

中国新材料技术应用报告（2021）

中国工程院化工、冶金与材料工程学部
中国材料研究学会

编写



化学工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

《中国新材料技术应用报告（2021）》结合当前我国各行业对新材料的应用与需求情况，重点关注当前我国重点领域新材料的先进生产技术与应用情况、存在问题与发展趋势。着重阐述了智能家电新材料、高速铁路装备新材料、汽车新材料、手机新材料、纺织新材料等基础工业领域相关新材料的战略需求、技术应用情况与存在问题；特别讲解了面向物联网的关键传感材料与器件、过滤分离关键膜材料、海洋新材料、核电机组关键部件及材料等工业关键核心领域新材料的需求、应用与发展状况，最后对材料大数据与基础设施建设、推动新材料产学研协同发展的战略研究进行了全面说明。

书中对各领域新材料详细的技术解读，将为新材料领域研发人员、技术人员、产业界人士提供全面的指导。

图书在版编目（CIP）数据

中国新材料技术应用报告. 2021 / 中国工程院化工、冶金与材料工程学部, 中国材料研究学会编写. —北京: 化学工业出版社, 2022.2

ISBN 978-7-122-40643-9

I. ①中… II. ①中… ②中… III. ①材料科学-研究报告-中国-2021 IV. ①TB3

中国版本图书馆CIP数据核字（2022）第021694号

责任编辑：刘丽宏
责任校对：田睿涵

文字编辑：林 丹
装帧设计：王晓宇

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011）
印 装：北京瑞禾彩色印刷有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张23¼ 字数520千字 2022年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询：010-64518888
网 址：<http://www.cip.com.cn>

售后服务：010-64518899

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：198.00 元

版权所有 违者必究

《中国新材料技术应用报告（2021）》

编 委 会

主 任 李元元 魏炳波 谢建新

委 员 （以姓氏笔画为序）

丁文江 王迎军 冯 强 朱美芳 李元元 李光宪

李树索 杨 锐 张平祥 张增志 武 英 欧阳世翕

周少雄 周科朝 姚 燕 聂祚仁 翁 端 唐 清

韩高荣 韩雅芳 谢建新 潘复生 魏炳波

主 编 谢建新 魏炳波 李元元

副 主 编 张增志 唐见茂

编 委 （以姓氏笔画为序）

万新明 马菱薇 王 菲 王其红 计艳丽 孙 琳

安全福 朱民儒 刘 超 宋志棠 陈小刚 李小娇

李晓刚 张 勇 张 雷 汪 晋 范润华 鄧 晓

孟祥军 周夕淋 周科朝 周益春 赵文丰 赵征志

姜 雪 徐 健 唐见茂 秦高梧 黄 伟 黄 庆

崔 宁 宿彦京 董玮利 曾 昆 曾小勤 熊柏青

总序

新材料产业是战略性、基础性产业，也是高科技竞争的关键领域，我们要奋起直追、迎头赶上。在世界新一轮科技革命和产业变革同我国转变发展方式的历史性交汇期，我国将在“十四五”时期强化国家战略科技力量，实现高水平科技自立自强，要求新材料作为技术先导，成为国家迈向科技强国的有力物质保障。

2021年正值“十四五”规划的开局之年，在中国共产党第二个一百年的重大历史开端之际，中国材料研究学会承担了工程院重大咨询项目《新材料发展战略研究》《新材料前沿技术及科普发展战略研究》《新材料研发与产业强国战略研究》《先进材料工程科技未来20年发展战略研究》等课题，站在国家发展的高度，研究我国新材料面临的问题与挑战，及时向政府和全社会推出最新的新材料发展战略研究成果，形成系列新材料品牌战略咨询报告与技术普及性图书。

在此背景下，《中国新材料研究前沿报告（2021）》《中国新材料产业发展报告（2021）》《中国新材料技术应用报告（2021）》《走近前沿新材料3》适时出版了。《中国新材料研究前沿报告（2021）》的主要任务是瞄准国家重大需求以及全球技术制高点，立足重大原创基础研究或行业颠覆性技术，梳理出关键战略材料发展过程中面临的问题并提出应对策略和指导性发展建议。《中国新材料产业发展报告（2021）》着重研究梳理制约行业发展的关键短板材料，关注高端关键材料发展面临的核心问题和实现重大产业突破的方向，对关键战略急需材料提出发展思路和解决方案。《中国新材料技术应用报告（2021）》针对我国新材料产用脱节以及有材“不能用”“不好用”“不敢用”等问题的实质，进行行业产业链条的深度分析，提出关键新材料走向国产化的解决方案和政策建议。《走近前沿新材料3》作为新材料科普系列报告之一，将不断涌现的新材料、新概念、新知识、新理论、新技术以科普的方式推介给青年学生、工程科技人员、政府



相关部门人员等，提升这些群体人员在新材料方面的科学素养，以更好地服务于我国工程科技的发展。

以上四部著作以新材料“基础研究—产业发展—技术应用—科学普及”为主链条，全方位深度研究中国新材料创新发展中各环节面临的问题与挑战。新材料重大基础研究要立足推动行业发展与变革，既要探索“短板补强”“行业空白”，又要紧密结合产业发展和技术应用。产业发展是解决当前“卡脖子问题”的重中之重，要立足自我创新，在生产制造过程中融入应用开发；技术应用既要与产业发展紧密对接，又要不断提出行业发展的重大科学问题；科学普及要推动和促进新材料的最新成果不断融入工程科技的发展。只有将新材料发展主链条上各环节的问题进行系统性战略研究，才能提出新发展思路，促使我国新材料有效支撑高新技术、高端制造、重大工程的快速发展。以上系列著作以行业为着眼点，深入新材料发展的各个环节，从宏观上提出各领域新材料发展的战略问题，这在国内尚属首次，对我国“十四五”规划目标的实现具有重要意义。

智库是国家软实力的重要载体，智库的高水平发展标志着国家经济实力的提高。中国材料研究学会作为我国新材料领域的代表性学会，拥有院士、专家、青年科技工作者等为代表的6万余名会员，涉及到新材料领域的各学科专业与发展方向。中国材料研究学会为了做好战略咨询工作，于2021年在武汉“第三届中国新材料产业发展大会”上正式成立了“CMRS中国新材料发展战略研究院”，并不定期召开系列化“材料强国”论坛。建设高水平新材料智库是中国材料研究学会重要工作之一，我们将进一步发挥自身的专家优势和社团优势，不断研究中国新材料发展中的新问题和新的挑战，践行新材料高端智库的责任担当，为我国的科技强国战略发挥重要支撑作用。

以上系列著作可以服务于我国广大材料科技工作者、工程技术人员、青年学生、政府相关部门人员，对于图书中存在的不足之处，望社会各界人士不吝批评指正，我们期望今后能够不断改进，为读者提供内容更加充实、新颖的图书。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '李元' (Li Yuan), written in a cursive style.

二〇二一年十二月



前言

《中国新材料技术应用报告（2021）》（以下简称《报告》）是中国材料研究学会承担完成中国工程院重大战略咨询项目《新材料研发与产业强国战略研究》所取得的研究成果的基础上而完成的专题研究报告之一，也是中国材料研究学会品牌系列出版物之一。

《报告》围绕我国建设材料科技强国的战略需求，重点选择了先进基础材料和关键战略材料两大领域的新材料技术进行研究和论述，其中先进基础材料包括先进金属材料、先进石化材料、先进建筑材料以及先进轻工和纺织材料等重点方向；关键战略材料包括高端装备用特种合金、高性能纤维及其复合材料、新能源材料、新型半导体材料、高性能分离膜材料、新一代生物医用材料及生物基材料等战略新兴材料，其应用涉及到海洋工程、新能源汽车、轨道交通、生物医用、节能环保及智能物联网等重大战略领域。

《报告》旨在助推我国高新技术和高端制造领域的关键战略材料基础保障能力全方位提升，着重论述了我国新材料技术应用发展的背景需求和战略意义、发展现状及未来趋势、主要任务及存在的主要问题，以及推动我国新材料技术应用高质量发展的对策和建议等。同时，报告还收入了新材料技术应用体系建设两份专题报告，即《推动新材料产学研用协同发展的战略研究》和《材料大数据与基础设施建设》。这是一部综合信息量大、时效性强、内容充实的战略咨询报告，可为有关政府职能部门和从事新材料技术应用和产业化的科技工作者以及产业界人士提供重要参考。

参加《报告》编写的人员都是来自材料技术应用和产业化第一线的专家、学者、教授和产业界人士，他们对各自领域内新材料的国内外现状、发展趋势、技术关键、市场需求有着全面的了解，他们的深入论述和分析使读者能够对我国当前新材料应用技术发展的现状和特点、主要问题以及对策和建议等得以较为全面的了解。

我国新材料目前正处在由大到强跨越发展的关键时期，希望《报告》的编写、出版、发行能对我国新材料技术高质量发展做出贡献。热切希望从事新材料技术研发、应用相

关工作的部门及人士提出宝贵意见，共同为我国新材料技术的发展贡献力量和智慧。

新材料量大面广、发展快速，再加上时间仓促、水平所限，本报告难免有不尽如人意之处，我谨代表编委会，诚挚欢迎广大读者提出宝贵意见。对本报告撰写专题报告的所有专家和作者及全体工作人员表示真诚的感谢！

谢建新

二〇二一年十二月



目
录

第一篇 总论 / 001

第 1 章 “双碳”目标下新材料技术应用的机遇和挑战 / 002

- 1.1 “双碳”目标下新材料技术的地位与作用 / 003
- 1.2 “双碳”目标下新材料技术的应用 / 008
- 1.3 新材料技术应用助推双碳目标的战略思考 / 015

第二篇 基础工业领域 / 017

第 2 章 智能家电新材料 / 018

- 2.1 智能家电材料领域的发展概述 / 018
- 2.2 智能家电典型新材料 / 019
- 2.3 发展趋势与建议 / 035

第 3 章 船舶及海洋工程新材料 / 039

- 3.1 船舶及海洋工程材料概述 / 039
- 3.2 船舶及海洋工程领域对新材料的战略需求 / 042
- 3.3 存在问题与挑战 / 043
- 3.4 未来发展建议 / 051

第 4 章 高速铁路装备新材料 / 056

- 4.1 高速铁路装备材料概述 / 056
- 4.2 新材料在高速铁路装备上的应用 / 058
- 4.3 存在问题与挑战 / 059
- 4.4 未来发展 / 061

- 第 5 章 汽车新材料 / 074
 - 5.1 汽车新材料概述 / 074
 - 5.2 新材料在汽车领域的应用 / 086
 - 5.3 存在问题与挑战 / 089
 - 5.4 未来发展 / 094
- 第 6 章 建筑新材料 / 101
 - 6.1 建筑新材料概述 / 101
 - 6.2 新材料在建筑领域的应用 / 105
 - 6.3 存在问题与挑战 / 107
 - 6.4 未来发展 / 109
- 第 7 章 手机新材料 / 115
 - 7.1 手机产业发展概述 / 115
 - 7.2 优势手机新材料技术状况 / 117
 - 7.3 我国手机新材料的应用 / 123
 - 7.4 5G 通信时代手机新材料发展 / 138
- 第 8 章 纺织新材料 / 143
 - 8.1 高性能纤维新材料 / 144
 - 8.2 生物基纤维新材料 / 153
 - 8.3 医用纺织品纤维新材料 / 164
 - 8.4 差别化功能性纤维新材料 / 166
 - 8.5 存在问题及发展建议 / 168

第三篇 工业关键核心领域新材料技术及应用 / 173

- 第 9 章 面向物联网的关键传感材料与器件 / 174
 - 9.1 物联网技术概述 / 174
 - 9.2 传感材料与器件技术 / 175
 - 9.3 物联网计算系统中的新材料与器件 / 189
 - 9.4 我国传感材料与器件技术的战略需求与未来发展 / 199
- 第 10 章 过滤分离关键膜材料 / 203
 - 10.1 过滤分离膜材料及其应用概述 / 203
 - 10.2 微滤膜材料的发展及其战略需求 / 204
 - 10.3 超滤膜材料的发展及其战略需求 / 215

- 10.4 纳滤膜材料的发展及其战略需求 / 225
- 10.5 当前存在的问题、面临的挑战及未来发展 / 241

第 11 章 海洋新材料 / 249

- 11.1 海洋工程用钢材料发展趋势 / 249
- 11.2 海洋工程用钢开发的关键技术——户外腐蚀评价技术 / 250
- 11.3 主要品种 / 254
- 11.4 海洋防腐涂料 / 262
- 11.5 海洋防污涂料 / 265

第 12 章 核电机组关键部件及材料 / 269

- 12.1 堆芯组件关键部件 / 270
- 12.2 一回路系统重要设备部件 / 281
- 12.3 燃料操作系统 / 292
- 12.4 蒸汽电力转换系统 / 296

第四篇 新材料技术应用体系建设 / 307

第 13 章 材料大数据与基础设施建设 / 308

- 13.1 概述 / 308
- 13.2 战略需求 / 309
- 13.3 历史沿革与发展现状 / 309
- 13.4 数据基础设施建设 / 311
- 13.5 材料数据的共享与应用 / 319
- 13.6 问题与挑战 / 323
- 13.7 急需解决的共性技术 / 324
- 13.8 未来发展 / 326

第 14 章 推动新材料产学研用协同发展的战略研究 / 332

- 14.1 我国新材料产业产学研用发展现状 / 332
- 14.2 制约我国新材料产学研用深度融合的原因 / 340
- 14.3 新材料产学研用协同发展模式构建 / 341
- 14.4 推动我国新材料产学研用协同发展的建议 / 357



2021



总 论

第一篇

第1章 “双碳”目标下新材料技术应用的机遇和挑战

- 1.1 “双碳”目标下新材料技术的地位与作用
- 1.2 “双碳”目标下新材料技术的应用
- 1.3 新材料技术应用助推双碳目标的战略思考

第 1 章

“双碳”目标下新材料技术应用的机遇和挑战

中国材料研究学会咨询部

出于可持续发展的内在要求和构建人类命运共同体的责任担当，2020年9月22日，在第75届联合国大会上，中国宣布了“碳达峰”和“碳中和”的目标愿景，即努力实现2030年前二氧化碳排放量达到峰值，2060年前实现碳中和。这就是目前我国提升到最重要的发展战略的“双碳”目标，也称“双碳”战略。

纵观200多年的工业化进程，科学技术的快速发展，人类利用自然改造自然能力的不断增强，人类社会的不断进步，生活质量的不断改善，而所有这一切，基本上都是通过愈演愈烈的、对自然资源的索取和消耗换取的，而这种试图以无限牺牲自然资源来满足人类需要的理念和价值观，使我们赖以生存的自然环境的退化和破坏也呈现全球蔓延和加剧趋势，其中一个明显的事实就是人类的社会活动所产生和排放的二氧化碳日益增多，导致气候环境恶劣变化，对人类的未来发展形成巨大威胁，如温室效应、冰雪融化、海面上升、特大干旱、热带风暴、沙尘暴等，这种由碳排放持续上升带来的危害，正在将人类推向未来生存的危险边缘，迫使人类不得不更加深刻地反思自己的行为活动以及伦理道德上的问题。

“双碳”目标正是在这种背景下提出来的、事关人类可持续发展的全球性重大议题，可以说，实现“双碳”目标是整个人类社会正在进行的一场全面深刻的系统性变革，涉及能源生产使用、产业结构、制造技术、交通运输、农业生产、城乡建设、社会形态以及人类社会活动等方方面面的问题。

对于我国这样一个发展中大国，双碳目标的重要战略意义还体现在改变经济发展方式，催生新的经济增长点和新兴产业，实现我国经济高质量发展，建设美丽平安中国，同时也体现我国对人类共同体的责任担当。但也应清楚地认识到，“双碳”目标尤其是碳中和目标意味着我国当下面临着空前的挑战和机遇，这就需要我们站在人类可持续发展的战略高度，认真研究策划制订全方位和系列化的变革，推进生产方式和生活方式的根本转型，加快推进双碳目标的进程。

1.1

“双碳”目标下新材料技术的地位与作用

材料是人类物质文明发展的基础，新材料更是现代高科技和新兴产业的基础和先导，200多年的工业化进程表明，任何一种高技术和新兴产业的突破都必须以该领域的新材料技术应用突破为前提。而新材料技术应用的突破往往会引发人类划时代的变革，例如20世纪60年代高纯硅半导体材料技术应用的突破，使得大规模或超大规模电子集成电路得以实现，使人类进入信息化时代。而信息化正向智能化迅猛发展，各种具有颠覆性功能的智能芯片技术，正与各种现代高技术深度融合，推动新能源、生物医用、信息、交通运输、航空航天和节能环保等新兴产业革命性的变革。

又如高性能碳纤维复合材料半个多世纪以来，对现代交通运输尤其是航空航天的技术进步发挥了重要作用，在提高飞行器的性能、节能减排、高端装备制造等方面展现出非常广阔的前景，特别在节能减排方面体现出巨大的经济效益和社会效益。在今后20~30年高性能复合材料将迎来新的发展时期，将引发一场航空航天和现代交通行业的革命性的变革（包括设计理念、制造技术、供给侧、人才培养和教育及维修服务产业）。

实现“双碳”目标，是一项高度复杂、全面深入的国家系统战略，它意味着颠覆性的能源革命、科技革命以及经济发展方式转型，新材料作为国民经济的基础和先导，对于践行“双碳”目标既是首当其冲，又是大有作为。因此新材料应该在产品设计、原材料提取和选用、制造加工、服役和使用、回收再生的整个生命周期实现绿色化和生态化，从全生命周期、全产业链供给侧以及全生态系统的高度和广度，与其他相关产业全方位协同努力、共同创新，大力助推我国早日实现低碳、零碳乃至脱碳的历史性变革。

下面从能源结构转型、节能减排、研发模式、循环绿色生态等方面着重阐述新材料技术应用的发展对实现双碳目标的重要意义。

1.1.1 能源结构转型——要求更多高性能高功能新材料支撑

实现“双碳”目标最主要的路径是实现能源结构的转型，即由不可再生和高碳排放的煤炭石化能源转变为可再生的清洁能源，如太阳能、风能、水电、可控核聚变等，增长潜力最大的还是太阳能和风能。同时还要大力发展先进高效的储能技术。所有这一切，离不开高性能和高功能新型材料的强力支撑。

(1) 太阳能

太阳能是当代最主要的一种可再生能源，是通过太阳能光伏电池的光电转换而得到的一种可再生新能源，因此决定太阳能生产效率的主要因素是光伏电池的光电转换率，实际上，光电转换率与电池材料的化学成分和结构、产品的性能和质量密切相关，这其实已归结到新材料技术的应用问题。例如，作为光伏电池的主流产品，硅太阳能电池在硅料、硅片、电池片、光伏组件、电站系统的几乎每一个制造环节，都关系到材料技术应用不断创新和发展。

如何提高太阳能电池的光电转换率，仍是当今及未来太阳能产业的重中之重。现行有两条主要途径。

一是提高电池的制造技术水平，例如单晶硅电池的最高转换率可达 25%，而多晶和非晶电池为 12%~15%，提高晶硅电池的转换率是追求的目标之一。当然晶硅光伏电池制作本身就是一个高能耗、高投入的过程，这对“双碳”目标无疑是一个挑战。这就要求硅太阳能电池的制备必须不断创新，不断降低能耗和成本，不断提升产品的性能和质量，实现制造技术跨越式突破。

二是研究用新型的半导体材料制作光伏电池，如利用元素周期表中 III-V 材料形成的化合物，如砷化镓（GaAs）、磷化铟（InP）和氮化镓（GaN）等广泛的光吸收特性，研制廉价的太阳能电池板，新型太阳能电池板可以达到理论极限的最高转换率的 50%。

新一代钙钛矿太阳能电池是目前太阳能开发和利用的新热点，相对于高温和高成本制造的晶硅太阳能电池，以其原材料储量丰富，制备工艺简单，可以采用低温、低成本的工艺实现高品质的薄膜，同时还可以实现柔性化和“卷对卷”式的规模化生产而具有极其广阔的发展前景。

（2）风能

•••

风能也是当今备受关注的一种可再生新能源，具有清洁、环保、储量大、分布广、成本低等优点；能充分利用地域资源，例如可在沙漠和海上建设大容量风电站。风能发电核心部件是发电站桨叶，同样是一个极具挑战性的材料技术应用问题。风电桨叶的总体要求是轻质高强、抗氧化、耐腐蚀、长服役寿命、可回收等，而高性能纤维复合材料在这些方面更具优势，据报道，容量 5M 以上的风电机组，桨叶长度要求 45m 以上，只有采用轻质高强碳纤维复合材料才是可行的方案。此外，大型复杂桨叶的整体成型制造也是一项重大挑战，可以说，风电的发展与材料技术应用的突破密切相关。

（3）储能技术

•••

实现能源转型的另一个重要方面是先进高效的储能技术，目前主流是以锂离子电池为代表的二次动力电池。

由于锂离子电池在电动汽车、计算机、手机等便携式和移动设备上的大量应用，所以它目前已成为世界上应用最为广泛的二次电池。锂离子电池的能量密度和功率密度都较高，这是它能得到广泛关注和应用的主要原因。尤其是在新能源汽车产业化发展中正发挥重要作用，成为实现双碳目标的一个重要方面。

锂离子电池技术发展取决于新材料技术应用的进步，如正负电极、隔膜和电解液等都属于新材料技术应用的范畴，尤其是正极材料，直接影响了锂离子电池的各项性能指标，是锂离子电池中最为关键的原材料，多元化正极材料是目前重点发展方向，如镍（Ni）钴锰和磷酸铁锂等三元材料，其中磷酸铁锂正极材料最具发展潜力，其优势在于具有较高电池能量密度、成本低、安全性高、电池寿命长，使其在新能源汽车领域占据一定优势。锂离子电池技术仍然在不断开发中，目前的研究集中在进一步提高它的能量密度、使用寿命、安全性，降低成本，重点是继续研究开发新型高效的正负极材料。

1.1.2 / 节能减排——新材料技术应用的贡献

实现“双碳”目标，另一个重要途径就是节能减排。当今世界的人类所有的社会活动，包括生产、科研、教学、交流、文体等，以及衣、食、住、行，都离不开能源的使用和消耗，而当前人类面临的能源危机却日益紧迫，要解决这一事关人类生存和发展的大问题，一方面要继续开发新型的可再生新能源，另一方面要全面持久地推行节能减排的理念和行动。

从新材料技术应用的视野审视，节能减排主要包括以下内涵。

研究开发新型高效节能新材料

在研究开发新型高效的节能新材料方面，已取得很多突破性的进展，如非晶体合金材料，在电力系统中，用非晶体合金材料代替传统的硅钢片制作变压器铁芯，能够大大提高变压器的运行效率，具有节能和环保的巨大优势。首先，在环保方面，当非晶体合金铁芯用于油浸变压器时可有效减排CO、SO、NO等有害气体，对大气污染程度降低。其次，非晶体合金变压器最显著的特点是空载损耗很低，节能效果明显。在电力系统中，非晶体合金发展势头强劲，特别是广泛地用于各种新能源变电站。

另外，高温超导材料作为一种新型节能材料，也能大幅度提高电力生产、传输、分配和利用的效率，目前，高温超导电缆已经开始进入商业运行的电力网络，高温超导变压器和高温超导电动机也已经进入样机的运行阶段，这种突破将对全球经济产生巨大影响。

照明是能源消耗的重要组成部分，统计表明，我国仅照明用电就占发电总量的12%左右，发展具有高效环保节能的照明技术对于节能减排意义重大。随着砷化镓（GaAs）、磷化铟（InP）等第二代半导体材料和碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）等第三代半导体材料的发展，半导体材料技术应用正孕育一场新的产业革命——照明革命。用半导体发光二极管（LED）作为新光源的固态照明灯，将逐渐取代传统的照明灯。LED作为照明光源具有节能（LED在同等亮度下能耗约为白炽灯的1/10）、长寿命（约10万小时）、小体积、低电压、易控制、环保等优点，带来巨大的节能环保效益。

1.1.3 / 轻量化——新材料技术应用的新潮流

轻量化是当今新材料技术应用的新潮流。所谓轻量化，就是在保证强度和安全性能的前提下，尽可能地减轻构件的质量，从而提高构件的动力性，减少燃料消耗，降低排气污染。轻量化可大幅提高材料使用效率，是当代新材料技术应用发展的重要趋势。

轻量化的应用主要在交通运输业，如汽车轻量化是当前世界汽车发展的新潮流，研究表明，汽车质量减轻一半，燃料消耗也会减少将近一半。在其他交通运输业也体现出节能减排的巨大效益，包括航空航天、轨道交通、船舰运输。

轻量化是一种新材料技术应用的集成，属于颠覆性的前沿新材料技术。实现轻量化主要有三种途径：一是设计轻量化；二是材料轻量化；三是制造轻量化。三者相辅相成最终实现产品轻量化。

(1) 设计轻量化

•••

根据构件的质量与功能的关系优化构件布局，进行轻量化的优化设计，充分发挥轻量化材料的优势，通过功能集成来削减制件的整体质量，如纤维增强复合材料，除本身的轻质高强、能大幅削减制件的重量之外，还可通过二次胶接或再固化实现大型复杂结构件的整体设计和整体成型制造，大幅减少机械连接数量及材料用量。

(2) 材料轻量化

•••

通过更轻质高强的新型材料的应用和替代，更突出减重的效果，最典型的案例就是碳纤维增强复合材料（CFRP），也简称为碳纤维或碳纤维复合材料，半个多世纪来，在航空航天领域取得长足发展。据报道，用 CFRP 代替轻金属铝合金，用作飞机结构材料，减重效果可达 20%~40%，美国波音 787“梦想”飞机和空客 A350-XWB 的 CFRP 用量占结构总质量超过 50%，可减少 20% 的燃料消耗。现在 CFRP 已由航空航天迅速扩大到各个工业领域。

随着新材料技术不断突破，一些颠覆性的前沿新材料陆续得到开发，为材料轻量化提供了非常广阔的前景。例如有世界上最轻材料之称的气凝胶，是采用溶胶-凝胶法制备湿凝胶（wet gel），然后在专门设计的工艺条件下进行干燥处理，将溶剂排出，得到相应的固态气凝胶，这是一种超低密度、高孔隙率的纳米多孔材料，具有轻质高强、隔热、降噪等特点，在航空航天、电力储能、石油化工、建筑、交通运输等领域具有广阔的应用前景，如用于太空服的绝缘材料和飞行器隔热等。

另一例前沿新材料就是泡沫金属，指含有泡沫气孔的特种金属材料，是用发泡剂与金属熔融体混合，然后采用一定工艺使发泡剂溢出，得到高气泡含量的泡沫状固体。目前已商业化的品种有铝、钛、镍、银和不锈钢等泡沫金属，泡沫金属具有轻质、超低密度、隔热、隔声，以及能够吸收电磁波等一系列优良特性，用泡沫金属设计制备夹芯结构，可大幅减轻构件重量，具有节能减排的巨大效益，在新能源、航空航天、交通运输、船舶工程、石油化工等领域应用前景广阔。

汽车轻量化发展迅猛，目前汽车轻量化最常见材料主要有以下几种。

① 长纤维增强热塑性复合材料（LFTP）。将碳纤维增强 PP、PA6、PA66、PBT 等热塑性树脂，用在汽车前段模板、护板、托盘、支架等位置，除轻量减重，其最大优点在于可回收再用。

② 工程塑料。具有质量轻、强度高、耐腐蚀、耐热、吸声、耐磨等优点。汽车用的五大工程塑料包括尼龙（PA）、聚酯（PBT）、聚甲醛（POM）、聚碳酸酯（PC）和聚苯醚（PPO），可用在保险杆、仪表板、门板等部件。

③ 高强度钢。韧性和强度比普通钢板要高出 10 倍以上。高强度钢可大幅提高车辆抗压能力，提高对车体内部的保护率，主要用于车身底盘和框架。

④ 铝合金。作为一种轻质高强结构材料，铝合金一直是汽车制造业的重要材料。目前也开发了一些新型铝合金材料，如泡沫铝合金、快速凝固铝合金、铝基复合材料等，主要用在车身和底盘。一台铝合金车身的皮卡车型，可以实现 40% 左右的减重。

(3) 制造轻量化

结合设计轻量化和材料轻量化,采用新概念、新技术、新方法,研究开发和应用先进制造装备、先进的成型和制造加工技术以及最优化的工艺流程,从而有效缩短生产周期,节约用材,降低能耗,减少污染,这一切对于高技术集成、高能耗、高投入的大型复杂的高端结构的制造尤其重要。显然,制造轻量化是实现产品和结构件轻量化的最终也是最重要的一环,是实现“双碳”目标最重要的一个方面。

3D打印又称增材制造,是材料先进制造技术的一种颠覆性创新,对实现制造轻量化有着开创性的作用。3D打印是一种以数字模型文件为基础,运用粉末状金属或塑料等可黏合材料,通过逐层打印叠合的方式来制造产品的技术。3D打印适合制造复杂形状的产品,如一体化结构、异形结构、轻量化点阵结构、薄壁结构、梯度合金、复合材料、超材料等。

相对于传统的切削加工或模具成型的减材制造,其最大优点是减少产生或不产生废弃物副产品,提高材料利用率,节能降耗,减少碳排放,降低成本,对实现“双碳”目标效益显著。

1.1.4 / “第四范式”——新材料研发模式的革命

随着大数据、云计算、机器学习等新兴技术的成熟及在各领域的推广应用,新材料研究范式迎来革命性的变革,如虚拟现实(Virtual Reality, VR)、增强现实(Augmented Reality, AR)、人工智能、机器学习等,在材料研发过程中,利用理论模拟、量子计算和材料基因组等方式进行数据的搜集、选择和分析,从海量数据中寻找“隐藏”的因果关系,用于解决基础研究中的种种问题。用数字化模拟对材料性能进行预测和判定,可为新材料的制备、合成及提取提供更准确更直接的方案,这不仅能开发高效新型材料品种,而且能大幅提升研发速度,缩短流程,降低能耗,节约成本,是实现双碳目标的强大推手。

这种新型的材料研究模式,就是现在风行的“第四范式”。其中,基于人工智能的机器学习技术在文献数据获取、性能预测、测试结果分析各环节发挥出重要作用。从发展趋势看,这种新兴的研发模式,不仅在新材料领域引发一场深刻的变革,同时在其他科学领域的应用前景也非常广阔。

1.1.5 / 绿色转型——新材料技术支撑可持续发展

“双碳”目标实际上可归结到人类社会可持续发展的根本问题,全球资源、能源和环境问题日益紧迫,可持续发展已成为人类共同理念和企求,而“双碳”目标正是基于可持续发展提出的战略举措。

新材料处于可持续发展前沿,作用非常重要,同时大有作为。例如:新能源材料是新能源、可再生能源开发利用的基础;环境友好材料对节约资源、保护环境、维持生态平衡将起到重要作用;轻质高强的新型结构材料将体现节能降耗的巨大效益;生物医用材料将提高人类生活质量和健康水平;仿生智能材料是人工智能、机器学习、机器人必不可少的基础和支撑。

出于可持续发展的要求,绿色材料和材料绿色化技术是新材料今后发展不可逆转的趋势,

对于材料科技和产业发展而言，就是要实现从产品设计、材料提取和选用、加工制造、服役和使用到回收再生的整个生命周期的绿色化和生态化，也就是要实现从“摇篮到坟墓”（from Cradle to Grave）到“从摇篮到再生”（from Cradle to Gate）的根本性转变。它不仅能促使材料科技和材料产业本身的绿色转型，同时也将对经济发展方式和人类未来社会形态产生不可估量的深远影响。

从新材料研发、制造、应用、产业发展的方面考虑，实现绿色转型主要是指建立节省资源的产业体系及实现绿色清洁生产，节能降耗；开发新能源与再生能源，提高能源利用效率；改善生态环境，减少环境污染，减少碳排放，降低温室效应。

1.2

“双碳”目标下新材料技术的应用

“双碳”目标是以降碳为中心的发展战略，推动节能减排、降碳去污的协同发展，实现生态环境质量改善由量变到质变的跨越，关键是通过创新，用绿色技术代替传统技术，不断催生新的经济增长点和新兴产业，推动经济发展方式的绿色转型。

对于我国这样一个发展中的大国，“双碳”目标无疑是一场硬仗，会面临巨大的挑战，但随着新理念、新产品、新技术、新应用不断催生，也会带来前所未有的机遇。

“双碳”目标下直接或间接地关系到新材料技术的应用，主要但不局限于以下四个方面。

- ① 更有效地利用自然资源，并重视废弃物的回收再利用，实现材料绿色化。
- ② 开拓创新，大力开发新材料洁净生产先进制造技术和新工艺流程，突破节能减排核心关键技术；提高生产效率，节能降耗，实现无污染或少污染，推动材料智能制造。
- ③ 优化产业布局，大力开发资源优势的新材料体系，以及可回收再利用的新材料体系，如生物基高分子材料以及在此基础上开发的绿色复合材料。
- ④ 加强理论基础研究及高技术的交叉融合，大力开发具有颠覆性的高性能和高功能的前沿新材料，实现材料从基础支撑到前沿颠覆的跨越。

具体而言，“双碳”目标将在以下几方面为新材料技术应用带来新的发展机遇：

- ① 支撑可再生能源（如光伏、风电、氢能）发展的上游材料与应用技术的需求将会大幅增长；
- ② 传统工业尤其是碳排放量较高的化工、建筑、交通行业，将更多地开发和应用新材料和新技术来助力“双碳”目标；
- ③ 原材料的制备和提取，将开发替代石化资源为原料的生物质原料，如生物质能源、生物基可降解高分子材料等；
- ④ 与碳捕集利用、封存、碳转化相关的新材料技术将会加速发展。

1.2.1

新能源材料在“双碳”目标下的机遇

“双碳”目标下实现能源转型，将主要涉及太阳能、风能、核能、氢能、生物质能等可再生能源。随着双碳目标的推进，预计2030年“碳达峰”后，新能源将得到大力发展，大部

分新建光伏发电、风电项目平均投资水平将低于新建煤发电厂，新能源成本将低于石化能源。到2050年，可再生新能源将占总能源的60%，煤炭占4%、石油占14%、天然气占22%，世界能源消费结构将发生根本性转变，新能源将超过煤炭、石油、天然气，成为主体能源。另外，随着能源结构转型，石化能源比重的降低，以动力电池为代表的储能技术也会迎来高速增长期。

新能源材料是实现能源结构转型的基础和支撑，“双碳”目标将为相关新材料的研究和应用带来大好的机遇。

(1) 光伏材料

技术升级加速，目前，晶硅光伏电池仍是主流，从硅料、硅片、电池组件到光伏电站，都有相当广阔的发展潜能。技术创新、降本增效将推动光伏产业快速发展。例如，电池结构从P型转N型是发展趋势，异质结最具量产可能性。大尺寸硅片210/182备受瞩目。

新型高效的光伏电池材料正加紧研究开发，如钙钛矿电池、量子点电池等。钙钛矿电池发展迅速，被认为是可能取代硅太阳能电池的新型太阳能电池，但钙钛矿材料对水分敏感，易在空气中水分作用下分解，这是目前研究的重点方向。

量子点电池制备工艺简便、成本低廉、光吸收材料性能稳定、光谱响应范围可调，具有良好的发展潜力。现在主要研究改进电池结构促进量子点电池效率的提升和发展。

(2) 风电机组材料

风电机组材料主要是制造风电桨叶的纤维复合材料，包括玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维以及高性能树脂基体，如环氧树脂、聚酯树脂等。目前研究的重点是在继续研究开发新一代轻质高性能材料基础上改进风电机组设计和成型制造技术，提高叶轮的捕风能力，增大叶轮直径，增大单位千瓦扫掠面积，提高抗各种恶劣环境的适应能力。

(3) 储能技术相关材料

储能技术相关材料主要是新能源汽车的动力电池材料，当前锂离子电池仍是发展主流，包括新一代正负极材料、隔膜材料、电解液和固态电解质材料等。氢燃料质子交换膜电池发展势头强健，而相关材料包括质子交换膜材料、催化剂、气体扩散层材料及石墨材料等将迎来发展机遇。

1.2.2 / 化工新材料在“双碳”目标下的机遇

化工新材料量大面广、品种繁多，为所有工业部门和制造业提供必需的原材料。而化工新材料从原料合成提取到基材加工制备直至产品的服役使用，可形成非常高的碳排放量，因此“双碳”目标下化工新材料将面临十分严峻的挑战；另外，也会迎来前所未有的机遇。

“双碳”目标对节能、减排、降耗、环保都有较严格的要求，对于快速增长的化工产品，化工行业向低碳化的转型和升级成为必然趋势。碳排放限制政策将重点淘汰环保不达标的落后产能，行业集中度将会提高，形成强者更强的产业格局。而部分传统产品会转型再发展或者新兴产品迎来发展机遇，如高性能纤维复合材料、生物基可降解塑料、聚氨酯应用于交通运输、建筑节能领域，生物燃料、塑料回收利用等。

化工新材料是指具备优异性能或某种特殊功能的新型化工材料。按产品系列主要有工程塑料、橡胶、合成纤维及复合材料，以及有机硅材料和有机氟材料等。

(1) 工程塑料

工程塑料具有重量轻、设计空间大、制造成本低、性能优异、功能广泛等优点，随着双碳目标的实施，将推动汽车轻量化、舒适化、节能化、安全化和制造低成本化等方面更快速发展，这一趋势加速了汽车塑料化的进程。

电子电气领域是工程塑料最大的市场。由于轻质高强和加工制造简便及优异的电性能，工程塑料大量地用于各种电子电气设备和器件，如计算机、通信装置、电绝缘器件、仪器仪表壳体、控制操作面板等，其消耗量占到总用量的 40% 以上。“双碳”目标为工程塑料的电子电气应用提供了更广阔的发展前景。

(2) 合成树脂

合成树脂包括环氧树脂、不饱和树脂、酚醛树脂等用于复合材料的基体材料、涂料和胶黏剂等，在电子、机械、航空航天、汽车、建筑等行业得到广泛应用。高性能纤维复合材料因轻质高强的优点将会得到越来越多的应用和发展，其中，高性能树脂基体的研究开发和应用将迎来新的机遇期。

(3) 合成纤维

以碳纤维、芳纶、超高分子量聚乙烯纤维（UHMWPE）等高性能纤维为发展主流。主要用作复合材料的增强材料，其中尤以碳纤维为当今高技术新材料发展的热点。高性能纤维复合材料最大优势在于轻质高强，在航空航天等领域用作结构材料，具有节能减排巨大经济效益和社会效益，对助力“双碳”目标将发挥重大作用。

(4) 可降解塑料

进入新世纪，可降解塑料发展热度迅速上升，目前发展较为成熟的材料主要为聚乳酸（PLA）。生物基可降解塑料 PLA 是以玉米为原料发酵生产乳酸，再以乳酸为原料生产丙交酯，进一步聚合而成。可降解塑料是一种生物质高分子材料，可完全自然降解，环保负荷极小。在“双碳”目标下，预计未来几年将进入可降解塑料的产能爆发期。

(5) 聚氨酯用二苯基甲烷二异氰酸酯（MDI）

建筑节能的新应用。可降解塑料是在“碳中和”背景下极具潜能的新兴产业，而 MDI 则是传统产业在“碳中和”下的再次发展。MDI 主要分为纯 MDI 和聚合 MDI，由于聚氨酯材料热导率只有 $0.024\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，在冰箱冷藏领域的应用极为广泛，目前我国占到了其下游应用的 44%。

基于聚氨酯材料优良的保温性能，在建筑业得到广泛应用。建筑业占全国碳排放量近 $\frac{1}{3}$ ，减少建筑能耗是实现“碳中和”的重要途径。MDI 在全球建筑业中广泛应用，占到了其下游应用的 52%。然而在我国，MDI 应用于建筑领域只占其下游总应用的 22%。MDI 在我国建筑领域的需求潜力很大，在“碳中和”的政策环境下，其发展前景会更加广阔。

(6) 塑料回收利用

上述的几个领域在“双碳”目标下都会迎来新的发展机遇，但从发展总体来看，塑料回收利用将对石化行业碳减排帮助最大的手段之一。回收利用可以使原本只有一次使用寿命的塑料制品多次循环使用，这将大大降低石化行业用于生产塑料制品的用量。

目前最通行的方法是通过热解等方式把塑料分解加工成单体，再做成塑料。如使用热解技术来处理废塑料和废轮胎，再加工成不同类型和用途的产品。

另一个极其重要的方面是高性能纤维复合材料的回收再利用，高性能纤维复合材料如碳纤维是一种高投入、高能耗、高成本的高技术产业，随着在各工业部门得到越来越多的迅速推广应用，未来将会有大量的退役产品，而目前处理的方法多为掩埋和焚烧，不仅浪费资源，而且环境影响严重。因此现在发展方向：一是研究开发先进的回收技术，如热固性树脂基体复合材料的回收，得到全球高度重视；二是研究开发易于回收的热塑性树脂基体的纤维复合材料，通过回收再利用，大幅提高资源利用率，获取节能减排的巨大效益。

1.2.3 / “双碳”目标下前沿新材料的机遇

前沿新材料是近年来处在新材料尖端发展前沿，人们研究发现或通过人工设计而得到的具有独特的化学成分及原子或分子微观聚集结构，能提供超常的优异性能或特殊功能的一类材料，前沿新材料是当代颠覆性的前沿技术的快速发展而催生的最新一代新材料。

新世纪前沿新材料成了全球集中关注的重点，当前，前沿新材料与信息、能源和生物等高新技术领域的深度融合不断推进，继续引领高新技术领域的颠覆性变革；同时更加重视发展方式转变，大力推进前沿新材料与资源、能源和环境更加协调的绿色化发展，因而在“双碳”目标下，前沿新材料将迎来空前大好的机遇。

从当今材料科技发展大势，“双碳”目标下最受益的前沿新材料包括如下。

(1) 石墨烯

石墨烯是由单层 sp^2 杂化碳原子组成的六方点阵蜂窝状二维结构的碳材料，单层厚度为原子级维度，这种独特的稳定结构使之具有许多优异的材料性能，是已知的世上最薄、超高强度、超高导电和导热、透明度最高，还具有生物互联性的前沿新材料。石墨烯在超级电容器、透明导电薄膜、导热材料、复合材料、超级催化剂、电线电缆、节能环保、新能源汽车等领域显示出极其广阔的发展前景。

石墨烯芯片将引发电子信息技术颠覆性突破，目前正在研究将石墨烯制备成新一代芯片，成为更薄、导电速度更快的新一代电子元件或晶体管，未来的超级计算机的运算速度将提高数千倍。

当前石墨烯的研究重点仍在大尺寸、超薄超均匀、低成本的石墨烯薄膜制备技术的突破。

(2) 金属材料

① 高温合金。是高性能飞机发动机、电力汽轮机、核电装备等不可或缺的关键材料，马赫数在 4 以上的高性能飞机，要求发动机推重比达到 20，油耗比降低 50%。其涡轮前进口温度最高达 2227~2470℃。因此高温合金是高性能航空发动机不可或缺的结构材料。

② 高熵合金。是一种多元素组成的合金材料，称之为多主元素高混乱度合金材料。一种高熵合金至少由 5 种（一般不会超过 13 种）主元素（金属或非金属）组成，每种主元素的原子分数要大于 5% 且不能超过 35%。高熵合金可看成是一种设计材料。主元素的选取和组合方式，对高熵合金的性能和功能影响很大。

通过合理的成分选择及制备加工工艺，高熵合金呈现优异的性能，如高硬度、高强度、高的抗高温软化性、良好的耐磨性、耐腐蚀性等，因而在高技术领域具有广阔的应用前景。

(3) 无机非金属材料

陶瓷基复合材料。用连续纤维如碳纤维补强的陶瓷基复合材料除保持陶瓷材料的耐高温、低密度、高比强度、高比模量、抗氧化和抗烧蚀等优异性能外，还具有类似金属的断裂行为、对裂纹不敏感、不会发生灾难性破坏的特征，可用作高推重比航空发动机和火箭发动机的高温材料，用于瞬时寿命的固体火箭发动机，其使用温度可达 2800~3000℃；用于长寿命航空发动机，使用温度为 1650℃。未来高性能飞行器发动机很大程度上取决于陶瓷基复合材料的突破。

(4) 有机高分子材料

高分子材料是指天然的或用石化资源合成制备的分子量大（大于 10000）的一类材料，具有轻质高强、绝缘、耐腐蚀、易加工、品种繁多、用途广泛、能回收等特点，一般分为塑料、橡胶、纤维和涂料几大类。高分子材料正向高性能化、高功能/多功能化、智能化、精细化方向发展，满足轻质高强的结构以及光、电、声、磁、生物医学、仿生、催化及能量转换等特殊功能应用的需求，在新能源、信息技术、生物医用、现代交通及节能环保等重点领域显示出非常广阔的发展前景。对未来具有颠覆性的高分子材料主要有：

① 高性能膜材料。从功能上来说，高分子分离膜具有分离物质、识别物质、转化能量和转化物质等功能。目前可分反渗透膜、超过滤膜、微孔过滤膜、气体分离膜、离子交换膜、有机液体透过蒸发膜、动力形成膜、镶嵌带电膜、液体膜、透析膜、生物医学用膜等多种类型。分离膜对保护环境、治理环境、安全生产以及改善生活都具有重要意义，主要用作核燃料及金属提炼、气体分离、海水淡化、超纯水制备、污废处理、人工脏器的制造等。

② 生物基高分子材料。指用天然资源通过化学合成制备的生物基高分子材料。相对于以石化材料为原料的高分子材料，其重要意义：一是控制或缓解越来越严重的“白色污染”。生物基高分子材料在水和营养成分存在的条件下，可以被微生物降解。最终还原成水和 CO₂，重新回到大自然中，对环境负荷降到最低。二是石化资源日益枯竭，资源短缺日趋紧迫，而生物基高分子材料原料取自可再生的天然资源，具有资源优势。生物基高分子材料可代替石化高分子材料，在包装、餐饮业、农业、医护、一次性日用品、渔网具、园艺建筑等多方面都有广泛的应用前景，特别是在医药领域独具优势，例如用作骨内固定装置（如骨夹板、骨螺钉等）以及手术缝合线，可自然降解。

③ 气凝胶。是密度最小质量最轻的固体材料，由于极低的密度、高比表面积和高孔隙率（>90%），而表现出独特的光学、热学、声学及电学性能，在众多领域中都具有广泛的应用

前景。在石油、化工和冶金行业中，用作管道、炉窑及其他热工设备的保温材料，可大幅提高保温效率，能耗降解可降低 10% 以上；还可以用作楼房建筑的保温、隔声材料以及冰箱的隔热材料；在航空航天领域，气凝胶作为超级隔热防护材料，对高性能飞行器，特别是航天飞机、飞船的隔热防护，具有很好的应用前景。气凝胶还可作为高效环境治理材料，因为其表面有成百上千万的小孔，对水中污染物、空气微尘污染物是非常理想的吸附材料。

(5) 其他前沿新材料

...

① 纳米材料。是指在三维空间中至少有一维处在纳米尺度范围（1~100nm）或由它们作为基本单元构成的材料，是前沿新材料在全球范围内首次取得标志性突破，从物质的原子、分子维度研究和探索物质的微观结构特征与宏观性能的关系，开发出具有超常优异性能或特殊功能的新型材料。

近半个世纪，纳米材料和技术已发展成为一门集前沿性、交叉性和多学科特征的前沿研究领域，其理论基础、研究对象涉及物理学、化学、材料学、机械学、微电子学、生物学和医学等多个不同的学科，并且在新能源、新一代信息技术、生物医药、人工智能、现代交通与航空航天、海洋工程、节能环保、化工等行业得到了广泛的应用。

② 新型传感器材料。新型传感技术是人工智能发展的核心技术，实际上是用一种或多种具有特殊功能的材料制备的检测元件或一种检测装置，其功能是感知被测量的信息，并能将感知到的信息转换为电信号或其他信息输出，通过专门芯片的数字化处理，最后形成指令性的执行或控制信号，用来控制各种机器的工作程序或状态检测，实现仿生的人工智能化。

新型传感技术融合了材料科学、微纳电子技术、生物技术等学科，是人工智能、精准医疗、新能源等战略前沿的先导和基础，也是智慧城市、智慧医疗等物联网应用的技术关键。智能化、微型化、多功能化、低功耗、低成本、高灵敏度、高可靠性是新型传感器件的发展趋势和主要研究方向。

③ 超材料。是新世纪开始研发的一种全新概念的颠覆性前沿新材料，是通过在原子或分子维度上进行微结构人工设计，得到独特的微尺度几何构型而形成的具有天然材料所不具备的超常物理性质的复合材料。

这种超材料在电磁隐身、光隐身和声隐身等方面的神奇功能将改变未来作战方式，具有巨大的应用潜力，在各类飞机、导弹、卫星、舰艇和地面车辆等方面将得到广泛应用，使军事隐身技术发生革命性变革。

超材料具有自然界的材料中所不具备的超常物理性质，其不是取决于构成材料的本征性质，而是取决于其中的人工设计结构，这就为今后开发无比神奇的新材料开启了一种新思路和新途径。

1.2.4 / “双碳”目标下新材料技术面临的挑战

我国新材料技术应用和产业发展取得了举世瞩目的成就，现已成为名副其实的材料大国。我国自主创新的新材料产业体系逐步形成，产业规模不断扩大，产业集聚效应明显，区域特

色产业集群初步形成。新材料原始创新和研发能力显著提升，新材料技术应用水平不断提高，为我国新能源、生物、信息、航空航天、现代交通等关键领域突破技术瓶颈、实现跨越发展提供了强有力的支撑。

总体看，我国还不是材料强国，新材料技术应用和产业发展与世界先进水平相比仍有较大差距，特别是“双碳”目标下，全球竞争格局发生深刻变革，为我国经济发展增大了外部风险，因而给我国新材料技术应用和产业发展带来更多挑战。从外部环境看：

① 我国新材料科技和产业发展竞争压力将增大。发达国家都将新材料作为未来的研发优先事项，不断加大对新材料的支持力度，积极布局前沿新材料研发，加大对企业科技创新的支持。在核心技术、产品研发、人员和资金投入等方面继续加强垄断。这种格局将使我国的创新压力和难度不断增大。

② 我国新材料供应链安全将受到冲击。一些关键战略材料和技术如碳纤维、高温合金等一直受西方的封锁。受贸易保护主义的影响，电子化学品、半导体材料等高端新材料和高端光刻机、单晶炉等专用装备的供应受到影响，我国保持先进制造业供应链安全和产业链稳定的难度将加大。

③ 我国新材料技术引进与国际合作将受到影响。新冠疫情导致国际交流交往活动减少，国际大循环动能减弱，全球供应链、产业链、创新链和价值链深度调整，特别是产业链将加速重构，欧美发达国家及地区将更加强调产业布局的安全性，加速中高端制造业回流，导致我国引进先进新材料技术和资本的难度加大。另外，我国新材料企业“走出去”参与国际竞争与合作将面临更多的审查和限制，优势新材料产能出口将面临较大压力。

从内部环境看，我国新材料技术应用和产业发展过程中还面临一些挑战，主要有：

① 产业结构调整面临的挑战。从能源结构转型来看，当前我国仍以煤炭和石油能源为主，从能源供应系统到能源消费行业、相应的重大基础设施，需在 2060 年前完全实现脱碳化改造升级，存在巨大挑战。“双碳”目标下，高能耗地区的产业结构调整将成为能源消费强度控制的重点之一，以煤炭为主的传统能源地区，将面临主体性产业替换的严重冲击；以钢铁、有色、化工、水泥等高耗能产业为主导的区域也将面临同样的挑战。

② 技术创新面临的挑战。中国还处在工业化、城镇化推进过程中，对低碳技术、零碳技术、负碳技术等技术创新的需求逐渐增大。如何在清洁能源运输优化、存储等技术上实现突破，碳捕集技术如何实现有效应用、升级并逐渐趋于成熟等，均是“双碳”目标下面临的巨大挑战。

③ 可持续发展面临的挑战。产品的全生命周期资源利用率不高，生产流程工艺水平不高，能耗大，环境负荷重，产品回收再利用率低，大多中小企业属于劳动力型和资源消耗型的粗放模式。

④ 产业发展环境的挑战。顶层设计和统筹协调不够，产业结构欠优化，低水平同质化现象较严重。新材料投资分散，成果转化率低，产业链不够健全，新材料企业大多集中在中下游环节，产业配套能力不强。创新产品进入市场困难，行政审批周期长（如医疗产品）阻碍了企业创新的积极性。开发风险较大的项目，缺少资金保障机制，市场的准入机制也存在一定的缺陷。

1.3

新材料技术应用助推双碳目标的战略思考

第一，加快全面推进绿色低碳转型发展，加快产业结构调整，推动传统产业低碳改造升级，坚决遏制高能耗、高排放项目建设，发展壮大绿色低碳产业。

第二，加快推进能源结构优化，严格控制石化能源消费，积极推进风电、光伏等清洁能源的发展，因地制宜开发水能，在确保安全的前提下积极有序发展核电，统筹推进氢能的制运和储用全链条发展，提高电网对可再生能源的消纳和调控能力，积极推进碳交易等市场建设。

第三，加快推进能源资源利用效率提升，持续强化能源“双控”，深化工业、建筑、交通运输等重要领域的节能建设，大力实施节能低碳技术改造，加强能效对标达标。

第四，加快推进绿色低碳技术攻关和应用，瞄准世界先进水平，加强低碳、零碳、负碳重大科技攻关。加强节能减排领域的国家实验室、重大科技创新平台建设，大力推进智能电网、储能、氢能、碳捕集等技术的研发应用。

第五，加强节能减排、高效低碳、循环再用的新型材料品种的研究开发和应用，加速推进新兴材料产业化建设，提高产业化技术水平和经济效益；加强研究开发低成本、低能耗、短周期、省原料的先进制造技术和先进工艺流程，大力推进数字化、智能化、机器学习的新材料研发模式，促进新材料技术颠覆性的跨越。



2021



基础工业领域

第二篇

- 第 2 章 智能家电新材料
- 第 3 章 船舶及海洋工程新材料
- 第 4 章 高速铁路装备新材料
- 第 5 章 汽车新材料
- 第 6 章 建筑新材料
- 第 7 章 手机新材料
- 第 8 章 纺织新材料

第 2 章

智能家电新材料

万新明 董玮利 李小娇

2.1

智能家电材料领域的发展概述

中国是家用电器生产、消费和出口大国。经过 30 多年的快速发展，家用电器行业由“大”到“强”，规模已居世界首位，与通信设备、轨道交通装备、输变电装备和纺织服装一起，成为中国在世界领先的五大产业。近年来，融合了新一代信息、新材料、新能源、智能制造等诸多先进前沿科技的新一代智能家电，极大地改变了传统家电产业形态，促进了家电到智慧家电的提升。智能家电已经成为全球家电、智能终端、互联网平台等高科技企业竞逐的产业制高点，相关产业规模也将从目前的万亿级增长至十万亿级。《“十四五”家电发展纲要》指出，“十四五”期间，以 5G、云计算、人工智能、大数据等为基础的“新基建”将成为推动全社会生产能力和生产要素转变的驱动力，家电行业也要围绕“新基建”构筑数字化和智能化协同发展的新生态。家电智能化已是大势所趋，智能家电市场迎来快速发展。中国家电协会秘书长王雷指出，“当前的消费升级对智能家电行业来讲既是机遇，也是挑战。必须用更好满足用户体验、更加有创新性，而且是消费者真正需要的能够解决用户痛点的创新产品和技术来提升自己的产品竞争力。”

材料的创新与应用，是家电发展的基础和重要保障。纵观家电行业的发展历程，每一次行业的巨大飞跃都与新材料和工艺技术的运用密不可分。从钢铁、合金、玻璃到天然木材，再到以 PE（聚乙烯）、PVC（聚氯乙烯）、ABS（丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物）为代表的高分子材料，家电的外观和造型有了许多变化。抗菌材料、保温隔热材料、超疏水超亲水涂层、新型制冷剂、催化剂等功能材料的大量使用，促进了家电产品的功能提升和快速迭代。因此，作为行业规模最大、规格最高的年度技术交流盛典，每年的中国家用电器技术大会，“材料”都会成为核心关键词被列入大会的主题。在 2021 年 10 月底举办的第十八届中国家用电器技术大会，主题为“智慧、健康、绿色、材料”，再一次体现了材料的重要地位。

新材料技术是按照智能家电的需求，通过材料设计、材料加工、材料服役评价等一系列研究，实现智能家电的新功能、长寿命。目前，新材料在智能家电上的应用主要体现在以下三个方面：节能低碳、健康除菌、核心功能提升。

2.2 智能家电典型新材料

2.2.1 节能低碳类材料

家电材料在生产使用过程中会带来众多的环境问题，为缓解日益恶化的环境问题，新型绿色材料的开发和应用是我们面临的重要任务。节能低碳类新材料既能满足家电在生产中的节能低碳要求，也需要具有令人满意的使用性能和优良的环境协调性，这类材料的具体特征为：节约能源，节约资源，可重复利用，可循环再生，结构可靠性、化学稳定性、生物安全性高，无毒无害，可清洁环境。此类新材料的应用将促使绿色家电的进一步发展，能够更有效地利用有限的资源和能源，尽可能地减少环境负荷，实现材料产业和家电行业的可持续发展。节能低碳类新材料的应用是未来绿色家电发展的重要方向之一。开发既有良好的使用性能，又具有较高的资源利用率，且对生态环境无副作用的新材料及绿色家电是社会发展的迫切需求。

产品在原材料获取、生产、加工、使用、再生和废弃等生命周期中都符合环境保护的要求，对生态环境无害或危害极少，具有保护、净化环境功能，并利于资源的再生和回收，因此在进行家电产品设计时应尽量选用无污染、无毒害的兼容材料或再生材料，以方便回收再利用，并减少原材料在采掘和加工过程中的能耗和对环境的污染，最大程度地减少资源和能源消耗^[1,2]。

家电主要由铜、铝、塑料等材料构成，如表 2-1 所示。随着欧盟的 RoHS 和 WEEE 的实施以及中国对家电新材料应用研究的关注，家电中金属部件的环境安全问题已得到广泛重视并得到有效解决。可以使用钢、铜、铝、热塑性塑料等，避免使用热固性塑料、热固性橡胶及有害物质。不得已使用有毒或不易回收的材料时，应使不同材料易分离拆卸，将它们对环境的影响降至最低^[3,4]。如冰箱门内胆、门胆、电器盒等不采用有害及难回收的 ABS 材料（1 种工程塑料，由丙烯腈 A、丁二烯 B 和苯乙烯 S 等 3 种单体的共聚物组成），而使用近年来研制的 HIPS（高抗冲聚苯乙烯）作为 ABS 的替代品，其无毒无味，耐腐蚀，绝热性能好，得到海信、科龙等制冷企业的推广使用。

表 2-1 典型家电产品的主要材料构成表

单位: kg

产品	平均重量	钢	铝	铜	塑料	玻璃	其他
150L 以下（含）冰箱	31.00	18.57	0.03	0.40	6.50	—	5.49
150L 以上冰箱	68.50	25.00	3.00	2.00	24.00	3.00	11.5
窗式空调	36.00	15.26	1.62	2.96	2.00	—	14.15
分体壁挂式空调	47.00	12.19	3.46	5.62	3.63	—	22.10

续表

产品	平均重量	钢	铝	铜	塑料	玻璃	其他
分体柜式空调	104.50	40.28	6.27	10.51	6.59	—	40.85
波轮双桶洗衣机	29.00	5.02	0.49	2.00	16.01		5.48
波轮全自动洗衣机	42.50	21.97	0.85	1.36	15.00		3.32
滚筒洗衣机	77.50	26.71	2.84	2.57	12.63	1.91	30.82

家电用节能低碳材料从环保性能上主要分为四大类：生物基材料、轻量化材料、免喷涂材料、隔热材料。目前这四大类材料已经逐渐应用于家电行业。

(1) 生物基材料

•••

生物基材料是指用可再生原料（如农作物、废弃物、树木、其他植物及其残体和内含物等）通过生物转化获得生物高分子材料或单体，然后进一步聚合形成的高分子材料。目前这类生物材料包括聚羟基脂肪酸酯（PHA）、聚乳酸（PLA）、聚丁二酸丁二酯（PBS）、生物乙醇、生物尼龙（PTT）、生物导电材料和聚氨基酸等。生物基材料是我国战略性新兴产业，被纳入《中国制造 2025》新材料领域，近些年，发展迅猛，关键技术不断突破，产品种类速增，产品经济性增强，正在成为产业投资的热点，显示出强劲的发展势头。标准的制定，将规范生物基材料的定义、术语和标识，是生物基材料标准体系的重要组成部分，将极大地推动生物基材料的发展。

生物基材料具有传统高分子材料不具备的绿色、环境友好、原料可再生以及可生物降解的特性。开发与应用这类材料是发展绿色、低碳、可持续发展的产业技术体系，破解资源、环境瓶颈问题的最重要方向之一。随着国家不断加大投入，中国在相关研究方面取得了长足的进步，同时形成了一批企业。2008 年的北京“绿色奥运”激发了国内外企业开发绿色材料产品的热情，以可持续发展、可生物合成、环境友好为特征的淀粉基塑料、PLA、PHA 和 PBS 产品被成功开发出来。

生物基材料是中国战略性新兴产业和生物质产业发展的重要领域，利用丰富的生物质资源开发环境友好和可循环利用的生物基材料，最大限度地替代塑料、钢材、水泥等材料，对于替代石化资源、发展循环经济、建设资源节约型和环境友好型社会具有重大意义。生物基材料产业是新兴产业，目前我国在生物基材料方面的研究和产业化虽然取得了长足进展，但同美国、欧洲、日本等相比还存在一定差距，主要表现在企业生产规模小，产能不大且价格昂贵，尚难与石油基产品竞争。另外，生物基材料技术不够成熟，制品性能无法完全满足各种消费需求，尽管目前市场上已有的生物降解塑料品种众多，但每种材料本身的力学性能和加工性能只是某一方面有突出特性，综合性能还存在各种不足^[5]。目前这类材料已在家电中得到初步应用。例如，DVD 前端面板使用了 PLA 制备，电视机和手机外壳使用了生物基尼龙作为塑料原料之一制备，计算机外壳采用了 PLA 与 PC50/50 塑料合金，鼠标外壳则采用了生物可降解材料和天然纤维增强材料，平板电脑的保护套也可采用生物基材料，吸尘器外壳可以采用 PLA 和 ABS 的混合原料制备而成，海尔集团也采用 PLA 原料完成了遥控器外壳的试制。

家电业是对新材料、新技术接受最快的产业，加上我国家电行业近些年来一直受到欧盟制定的“绿色贸易壁垒”的制约，各家电厂商已纷纷意识到开发绿色材料的紧迫性，加上国家政策的大力扶持，我国相关行业应深化产业化关键技术的研发，不断开发各种创新型产品，推动我国生物基材料产业整体水平向前发展。只有使材料性能不断改善，成本不断下降，其在家电产品中才有望实现大规模应用。目前生物基材料的产能不大且价格昂贵，因而家电企业尚未大规模采用。但是，随着石化资源的消耗，生物基材料产能的提升，其成本将逐年下降，有望早日实现在家电中的大规模应用。

(2) 轻量化材料

轻量化的概念起源于赛车运动，指在确保汽车安全性能、强度的基础上，使汽车的装备质量最大化减轻。随着“节能环保”理念的加深，轻量化进一步在常规乘用车行业普及，试验证明，车辆质量每减少 100kg，油耗可减少 0.7%，同时，二氧化碳排放量减少 5g/km，并在噪声、振动、稳定性方面得到相应的改善^[6]。基于此，在过去的十几年间，轻量化在乘用车领域得到了广泛的应用。随着技术的进一步成熟和低碳要求的全面提升，轻量化由汽车延伸至家电是必然的趋势。

在家电材料领域，轻量化的实现方案可以分为以塑代钢、以塑代玻和料-构优化三种。

以塑代钢作为相对成熟的技术，在家电领域已有多个应用案例。高刚性塑料是智能家电改性塑料发展的方向之一。高刚性塑料顺应了家电的轻量化、薄壁化、以塑代钢的趋势，而且它的性价比高，在保证性能的同时还可以大大降低生产成本。在关键零部件（如铰链、阀体、齿轮、滑动部件、线圈骨架等），高性能及其纤维增强材料，如 PA、POM、PBT、PPS（聚苯硫醚）等，展现出尺寸稳定性、耐磨性、耐热性及轻质的特点，进而在洗衣机、冰箱、热水器、小家电等实现批量应用。如图 2-1 所示，冰箱中铰链的以塑代钢方案是采用高性能 PA 材料，将固定板、铰链板、插销和套筒集为一体，通过注塑工艺一体成型，避免了零部件尺寸公差导致的难安装，以及组装和长期使用中出现移位的现象。



图 2-1 冰箱铰链（左：金属；右：塑料）

在受力结构件的应用中，减重以力学性能维持为前提，这也要求高性能材料的应用。海尔集团的卡萨帝天玺空调高端定制版，外壳采用了连续纤维增强热塑性复合材料（CFRTP）

制造，利用碳纤维复合材料轻质高强的特性，实现了薄壁结构，同时利用碳纤维特有的纹理形成高端的质感外观，使得天玺系列极具创新性，获得了家电业的至高荣誉（红顶奖）。与天玺空调的全面创新不同，美国开利（Carrier）的 Infinity 系列采用了全塑的外壳结构，一方面，实现了整体减重效果；另一方面，功能塑料的采用避免了金属易腐蚀情况的发生。功能塑料的减重应用案例如图 2-2 所示。



图 2-2 功能塑料的减重应用案例（左：海尔集团卡萨帝天玺空调；右：开利空调外机）

王胜杰等使用 30% 玻璃纤维增强的聚丙烯材料制备了冰箱压缩机安装板，与原有金属压缩机安装板相比，质量减轻了 2/3，在中性盐雾测试中显示出经久耐用的特性，且满足冰箱运输中抗震、不易发生永久变形的要求，同时具有成本优势^[7]。为解决热水器内胆在长期使用中所出现的涂层破裂、金属腐蚀问题，上海交大采用硅烷交联材料结合滚塑工艺的方式，生产了全塑热水器内胆，使用寿命长达 50 年^[8]。

家电以塑代玻的需求，在实现轻量化的同时，需兼顾外观与性能的双重考验。以洗衣机和干衣机为例，传统视窗部件采用玻璃材质，以满足耐苛刻洗涤剂、振动、冲击等工况的要求。通用塑料中具有良好透光度的 PC、PMMA、PS、AS（丙烯腈-苯乙烯共聚物）等，由于耐化学性较差，无法满足视窗的使用要求。美诺（Miele）品牌选用 Tritan 共聚聚酯作为原材料制造此视窗部件，不仅满足美观要求及电器组件耐洗涤功能需求，同时还满足欧盟家用电器和类似电器安全性的协调标准规定的安全性要求 [低压指令（2006/95/EC）欧盟协调标准，60335-2-7 对洗衣机的特殊要求，以及 60335-2-11 对滚筒式干燥机的特殊要求]。

搅拌机透明玻璃罐体质量过大的缺点一直饱受诟病，部件对耐冲击、气味、冷热冲击稳定性的需求与视窗类似。飞利浦在其搅拌机中选用 Tritan 共聚聚酯。实验证明其抗耐性是 AS 产品的 20 倍，无裂纹及破裂，透明度高，韧性和耐久性好，且材质气味小，可保留食材的风

味。除此之外，PETG/PES/PS 等材料所具有的高透明度和高综合性能，也显示出巨大的以塑代玻的潜力。

料-构优化，即通过材料及结构的优化设计，实现轻量化。三明治式的夹层结构设计以极高的减重潜力而胜出。这是因为承受弯曲变形的零部件的最外层材料承受的应力最大。越靠近中心层，对提高零件的抗弯性能的作用越小。因此三明治结构便是料-构优化实现轻量化的重要选择。可以想象，上下两个表面是最强最硬的“覆盖层”材料，中间芯部是轻质的泡沫材料。这样，三明治式的复合材料就增加了材料的厚度，而材料的质量却没有显著增加。理论上，在屈服强度相同的情况下，三明治式的复合材料可以将零件的质量减轻 90%。在实际应用中，能够做到的最高轻量化减重为 30%~60%^[9]。如 PP 材料通过微发泡注塑工艺，可形成“三明治”结构，其生产过程中可缩短注塑周期和降低 10%~30% 的能耗，并可应用于填充 PP 体系和玻璃纤维增强 PP 体系；且具有低翘曲、低气味特性及良好的隔热隔声性能，有望应用于家电产品。

以高性能塑料材料替代金属、玻璃，规避两种传统材料所固有的厚重特性，实现轻质高强；利用新材料和工艺的匹配，实现结构优化、性能提升。通过多技术的灵活应用，材料以轻量化技术助力家电产品实现低碳节能。

(3) 免喷涂材料

•••

随着消费者对生活品质要求的提升，家电对于家庭已不限于单一的使用性，而逐渐成为家庭美学的颜值担当。

喷漆作为传统的外观处理方式，可以实现丰富的感官效果，但难以克服气味重、掉漆、工艺复杂、难以回收的缺点，因此，免喷涂材料应运而生。广义上的免喷涂是指不需喷涂处理的技术，包括高光免喷涂、珠光免喷涂、金属珠光免喷涂、转印（IMR）、烫印、模内注塑（IMD）等。但在塑料制件领域，免喷涂材料更多的是指在树脂胶粒中添加特殊的颜料、珠光粉、金属粉等，经特定的相容技术改性而成，注塑成型后可以达到高光、炫彩、珠光闪烁、玉石通透、自然纹理等美学效果^[10]。

免喷涂材料主要由基材、金属颜料、助剂三部分组成。目前常见的免喷涂塑料基材有 PA、PP、PC、HIPS、PC/ABS、ASA、ABS、PMMA、ABS/PMMA、PBT、POM 等^[11]。添加的金属颜料主要包括铝粉、珠光粉、铜粉、玻片、金葱粉、荧光粉等，但目前应用较为普遍的是铝粉和珠光粉。这些原料的不同搭配可以形成效果各异的免喷涂材料：金属质感、陶瓷质感、水晶效果、流纹效果、大理石效果^[12]。图 2-3 中列出了免喷涂材料在家电中的一些典型应用。

由于免喷涂材料所具有的“低碳环保”价值，使得其在国外应用较早且普及率更高，如英国戴森（Dyson）吸尘器、韩国酷晨（CUCHEN）电饭煲等产品上，免喷涂材料已在此类产品中大量使用。近几年来，国内家电产品中免喷涂材料的普及率逐年上升。小家电如搅拌机、吸尘器、电饭煲等率先使用免喷涂材料创造多样化的外观产品。随后，电视机、空调、洗衣机等大家电也相继推出免喷涂材料新品。免喷涂材料在家电的主要应用部件以及所使用的主要免喷涂材料如表 2-2 所示。



图 2-3 免喷涂材料在家电中的典型应用

表 2-2 免喷涂材料在家电的主要应用

家电类型	应用部件	主要免喷涂材料
电视机	前框、底座	ABS/PMMA、PC/ABS、ABS
空调	面板、饰条	ABS、PC、HIPS、POM
冰箱	把手、端盖	ABS、ABS/PMMA
洗衣机	把手、端盖	ABS、ABS/PMMA
小家电	外观件	ABS、PP

免喷涂材料在生产效率、综合成本、环保方面具有明显优势，但仍存在一些瓶颈问题待解决，以下将对免喷涂及喷涂工艺进行具体对比。

表 2-3 免喷涂与喷涂工艺对比分析

项目	免喷涂	喷涂
优点	① 绿色环保（无气体及粉尘污染物、可 100% 回收） ② 综合成本低（无后处理、生产周期短）	① 漆膜的保护及遮盖作用（耐候、耐刮擦；熔接痕、气纹等） ② 外观效果丰富多样
瓶颈问题	① 材料单价高 ② 注塑难度大（易产生流纹、熔接痕等，速冷速热成型技术应用） ③ 耐候性	① VOC 排放及环境污染 ② 工艺烦琐（周转、喷漆、烘烤等） ③ 漆膜破坏及修复

正如表 2-3 中所列，免喷涂材料为高效的产品加工提供了新的思路及外观，但同时也存在一些制约因素限制其大规模的应用。以金属色免喷涂材料的熔接痕外观缺陷为例，其解决方案通常需要通过配方、结构和工艺三方面的配合，才能实现最佳的材料效果。

在配方方面，基材宜选用流动性好、透明性 / 光泽度高的材料；金属颜料则根据闪烁效果选用不同的形态和粒径（如不规则的片状、银元状铝粉可产生闪烁效果；规则的球形铝

粉产生点反射效果； $3\sim 14\mu\text{m}$ 具有好的遮盖力， $15\sim 30\mu\text{m}$ 实现亮度、闪光、遮盖力的平衡， $30\mu\text{m}$ 以上具有高亮度和闪光^[12]。作为基材和金属颜料两者的“纽带”，相容剂、耐候剂、耐老剂等的选择也很重要，有利于金属效果的稳定。

在结构方面，在产品设计及开模初期，应遵循以下原则。

① 浇口。少浇口（如果产品需要多浇口的，可以考虑使用顺序阀）、大浇口（直径尽量大）、合理浇口（使流纹和熔接痕的发生地方位于产品背面或者不易觉察的地方）。

② 少利角，厚度均匀。

③ 产品结构设计简单化，薄壁结构，少孔洞，少筋位。

④ 预设溢料井、排气位置^[13]。

在工艺方面：控制物料含水量，采用高光、急冷急热成型技术，注塑过程中利用高模温、低压、中速分段阶梯式控制注塑。

通过材料、结构、工艺的配合及 CAE 分析协助，免喷涂材料有了很大的发展，可以预见这方面将会取得更全面的技术和应用突破。

(4) 隔热材料

很多家用电器在本质上就是进行制冷或加热的工具，降低热量在产生、传输、利用过程中的损耗，提高能源利用效率，是家电行业广泛关注的热点，也是节能环保的要求。隔热材料能够有效阻断不同环境之间的热量传递，是提高热能利用效率的重要材料。

1937 年，德国 Otto Bayer 教授首先发现多异氰酸酯与多元醇化合物进行加聚反应可制得聚氨酯，并以此为基础进入工业化应用。20 世纪 50 年代前后，英国、美国、日本以及中国相继进行聚氨酯工业化生产。目前，聚氨酯保温材料仍然是综合性能最好、应用最为广泛的保温材料。中国是全球聚酯生产和消费中心，目前中国聚酯产量占全球比重在 65% 左右。2020 年，中国聚氨酯产量约为 1470 万吨，同比增长 7.6%；中国聚氨酯消费量约为 1240 万吨，同比增长 4.6%。预计到 2026 年，我国聚氨酯的需求规模将达到 1523 万吨。硬质聚氨酯具有质量轻、热导率低、耐热性好、耐老化、容易与其他基材粘接、燃烧不产生熔滴等优异性能。作为保温隔热材料，聚氨酯在欧美广泛用于建筑物的屋顶、墙体、天花板、地板、门窗等。欧美等发达国家及地区的建筑保温材料中约有 49% 为聚氨酯材料，而在我国这一比例尚不足 10%。在家电行业，聚氨酯保温材料在冰箱、冷柜、热水器、空调、消毒碗柜等产品中大量使用。冰箱在开始生产的初期采用过玻璃棉、聚苯等材料，但保温效果太差，质量很低，目前全世界的冰箱冷柜基本上采用聚氨酯保温材料，质量比以前大幅提升，耗能也大幅降低。

为了适应高效保温的需求，近年来保温隔热材料也有了较大的进展，主要研究方向和趋势有纳米孔保温隔热材料、憎水性保温隔热材料和复合保温隔热材料等。

纳米孔保温隔热材料作为一种超级绝热材料发展越来越快，已成为国际保温隔热行业关注的重点之一。其主要原理是将固体之间孔隙的大小，限定至纳米数量级，从而控制气体的对流传热，形成超低热导率的绝热材料。气凝胶就是一种典型的超级绝热材料，具有极其重要的地位，在航空航天、电力冶金、建筑节能等领域有广阔的应用前景，是传统隔热材料革

命性替代产品。气凝胶已入选国家统计局《战略性新兴产业分类》，并被发改委列入《当前优先发展的高新技术产业化重点领域指南》，很多省市也将其列入本省重点支持领域和发展重点。气凝胶是世界上密度最小的固体，仅为 3.55kg/m^3 ，仅为空气密度的2.75倍；干燥的松木密度（ 500kg/m^3 ）是它的140倍。这种物质看上去像凝固的烟，但它的成分与玻璃相似。在不同种类的气凝胶材料中，二氧化硅（ SiO_2 ）气凝胶是当今时代各个国家的科学家们研究较多的单组分气凝胶材料。二氧化硅气凝胶具有密度超低、孔隙率超高、结构超细的基本特征。目前二氧化硅气凝胶存在无法大规模制备问题，其生产工艺需要优化，尤其是干燥工艺必须进行合理改良。早期是通过对水玻璃进行水解而得到二氧化硅湿凝胶，并尝试将液体溶液与空气进行置换。但是由于该实验得到的湿凝胶中含有大量的氯化钠，必须对其进行反复冲洗，采用乙醇进行置换，最后进行干燥处理。整个过程需要花费较长的时间，步骤相对烦琐，因此科学家们并没有对其加以足够的关注。后来法国科学家 S.J. Teichner 对制备方法进行了简化，通过对正硅酸甲酯进行水解而得到湿凝胶，随后进行超临界干燥处理。这种制备方式能简化制备步骤，同时缩短干燥时间，最终得到的成品气凝胶孔洞更加均匀，材料密度也能降到更低。然而，正硅酸甲酯在水解过程中会产生有毒物质。在此基础上进一步优化，目前主要应用的是 TEOS（正硅酸乙酯）法^[14]。该方法可以制备高质量的湿凝胶，但干燥工艺仍然没有从根本上解决问题。超临界技术效果好，但器械设备负担较大，成本消耗较高，很容易出现安全问题，必须进行合理改良。冷冻技术能够制备出粉末状的气凝胶，但制备周期相对较长，成本较高，工业化水平很差，应用范围较小。常压干燥技术制备出的二氧化硅气凝胶多为粉末状或碎块状，质量较差。因此，制备工艺，尤其是干燥工艺，仍是目前研究和提升的重点方向。另外就是高端透明气凝胶产品。到目前为止，世界上也仅有少数国家拥有高端透明气凝胶核心技术，并在航空航天、核技术、军工等领域得到应用，而民用领域应用还在起步阶段。就产业化而言，国内外气凝胶制造商已大量生产出低端气凝胶产品，但高端气凝胶产品目前仅能够在美国、瑞典等少数国家生产，且尚未实现产业化。未来几年，气凝胶材料的发展趋势仍然是降低材料比重、提升材料隔热性能和高端透明气凝胶等方面。作为新兴材料，气凝胶产品短时间内难以出现替代生产技术，但国内气凝胶企业仍需要突破国外企业的技术封锁，将产品性能提升到更高的层次，才能进入国际市场，与国外竞争。

憎水性隔热材料的发展，主要受到湿度对隔热材料性能的影响。很多材料在实际使用过程中，会接触高湿度的环境。隔热材料中空隙约占到保温材料的80%~90%，甚至有的材料可以高达90%以上，孔隙率极高，这就决定了材质的本身吸水特性，再加上连通型孔隙的毛细管现象，使吸水率进一步增大。水的热导率远远大于空气，在常温下约为空气的23.1倍。因此，材料吸水会严重影响隔热效果。而目前，国内大部分隔热材料均不憎水，这就增加了外层防护的防水要求，从而导致产品成本的增加，降低材料的吸水率，提高其憎水性能，是隔热材料今后发展的一个重要方向。目前二氧化硅气凝胶疏水化改性主要方法有两种：共前驱体改性法和溶剂交换-表面疏水改性法^[15]，其主要工艺过程和优缺点如表2-4所示。

表 2-4 工艺对比分析

名称	工艺过程	优点	缺点
共先驱体改性法	将含有疏水基团的硅烷偶联剂与硅醇盐混合, 通过溶胶-凝胶、老化、干燥后制得 SiO ₂ 气凝胶	改性过程简单, 制备周期短	若疏水基团引入量过多, 则会阻碍 SiO ₂ 粒子间的连接, 降低气凝胶强度。因此共先驱体改性法对硅烷偶联剂的加入量有很高要求
溶剂交换-表面疏水改性法	选用甲基三甲基硅烷正己烷溶液对凝胶表面进行疏水化改性, 甲基三甲基硅烷正己烷水解产生的 Cl ⁻ 电负性高, 易与羟基的氢原子结合, 从而使甲基连接到 SiO ₂ 气凝胶表面上, 使气凝胶表面呈现出疏水性	在干燥过程可以降低溶剂蒸发时产生的毛细管作用力, 保持气凝胶孔隙结构的完整性	所需时间较长, 需要大量的硅烷偶联剂进行多次改性, 成本较高

复合保温隔热材料是在单一隔热层基础上发展起来的, 断裂韧性优良, 能有效削弱甚至是克服对裂纹和热震的敏感性, 兼具优异隔热性能和高温强度的复合功能。陶瓷基复合材料 (FRCMCS) 是在单相陶瓷材料的基础上通过多种材料的复合得到的新型材料, 已在热防护领域显示出巨大的优势。近 20 年, 许多研究人员致力于研究新型隔热保温节能材料, 与此同时, 出现了许多功能保温隔热材料。热喷涂技术的出现, 使得人们可以在一些机动车的发动机排气管上, 涂覆高熔点陶瓷涂层, 这种涂层绝热性很好, 形成的涂层即为热障涂层, 也有学者在发动机的排气管内部涂覆陶瓷薄层, 从而可以对排气管起到很好的隔热作用。将气凝胶与聚氨酯复合, 是目前家电领域隔热材料研究的最新热点之一。气凝胶材料绝热性能优异, 但在家电中应用存在强度不够的问题, 因此将高性能气凝胶材料与家电所用的传统绝热材料聚氨酯进行混合使用, 形成复合保温隔热材料, 使其兼具气凝胶材料的高隔热性能和聚氨酯的硬度, 从而满足很多家电应用场景中对强度的要求。

为了应对世界能源危机, 在“碳达峰”“碳中和”的背景下, 隔热材料将会迎来一个持续的发展热潮。积极开发科技含量高、性能优异且稳定、使用寿命长、制造成本低、对环境友好的隔热材料, 必然是未来研究和应用的重点及热点。



结论

低碳节能是家电未来发展的重要主题, 在环保低碳的经济趋势下, 绿色材料的应用是家电材料的发展主流, 绿色家电的发展将依赖于绿色技术和绿色材料的开发使用。可降解生物基材料的开发研制、轻量化材料的逐步替代使用、免喷涂材料及工艺的广泛应用, 以及隔热材料的推广都是当前家电用绿色材料的热点。当然, 如果单纯求高、求新, 则需要企业投入大量资金进行运作, 而在现时以价格为主导的市场大环境中, 这样的经济投入是国内家电企业所难以负担的。因此, 绿色低碳环保材料必须符合经济效益和生态效益的双重要求, 才能被家电企业大规模采用。在现有材料的基础上发掘绿色功能、绿色用途来满足不同的市场需求, 是比较现实的做法。这对投入资金的要求较低, 既有利于企业发展, 又有利于中国基础资源的开发利用以及环境的保护与治理。

(1) 抗菌材料

抗菌材料是指自身具有杀灭或抑制微生物功能的一类新型功能材料。抗菌材料的抗菌性可以通过在高分子材料中添加适量的抗菌剂，或以其他方式将抗菌基团引入到载体材料中^[16]。抗菌材料的使用领域很多，产品面很广，衣食住行无不涉及。这类产品自身具有抑制和杀死微生物的能力，从而减少自身受微生物的侵袭而损坏。这类制品还可有效减少病菌的传播。抗菌日用品和抗菌医用器械的使用降低了细菌交叉传播的风险，减少了人们对医药的支出，不仅使相关产业节能减排，而且提高了人民生活质量和健康水平。家电产品与抗菌材料的融合始于20世纪80年代，由日本的多家公司相继开发出抗菌冰箱为起点。在国内，抗菌材料产业化应用的序幕，以海尔集团和中科院理化所合作推出系列抗菌家电产品所拉开^[17]。海尔集团早在1997年就生产出国内第一台抗菌冰箱，随后又陆续推出了冷柜、洗衣机、空调、电视、热水器、微波炉、吸尘器等24大门类系列抗菌产品。2001年2月，海尔集团“抗菌系列家电及抗菌塑料研制应用项目”获得2000年度国家科技进步二等奖。

因抗菌材料种类的不同，抗菌材料大体可分为无机类抗菌材料、(合成)有机类抗菌材料、天然(有机)类抗菌材料以及复合类抗菌材料。各类抗菌材料的抗菌原理及优缺点如表2-5所示。

表2-5 常用抗菌材料种类及抗菌原理

种类	无机类	(合成)有机类	天然(有机)类	复合类
代表成分	银、铜、锌等金属及其氧化物	季铵盐、双胍类、酚醚类等合成的高分子有机抗菌材料，有机金属类抗菌材料	山梨酸、壳聚糖、儿茶素、芥子提取物等天然抗菌材料	有机/无机等多种抗菌剂合成的复合型抗菌材料
原理	通过金属离子与活性基团(如巯基)键合或置换金属离子辅基等方式使生命活性物质失活	通过作用于细胞壁和细胞膜系统、生化反应酶、遗传物质等实现抗菌抑菌及除菌作用	作用于细胞膜或酶等生物活性物质，影响微生物的运动、跨膜物质运输等	结合多种抗菌剂的抗菌原理及协同作用来优势互补，提高抗菌剂的综合性能
优点	长效 不产生耐药性 耐热性能优异	安全性高 即效性好 来源丰富	使用简便 安全无毒	综合抗菌性能优异
缺点	易变色 成本高	耐热性差 难加工 抗菌持久性差	抗菌效率低 耐热性差 使用寿命短	技术不成熟 待验证

在无机类抗菌材料中，金属和金属氧化物是应用最为广泛和成熟的材料。金、银和铜等材料主要通过破坏细菌的细胞膜从而起到抗菌的作用，并且其能够有效抑制代谢酶活性并干扰细菌遗传物质的表达^[18]。其中，银离子及其衍生出的光动银、纳米银等技术被松下、海尔集团等各大家电企业应用在洗衣机、冰箱、净水器及空气净化器等产品上。二氧化钛，尤其是锐钛矿型二氧化钛，作为最典型的金属氧化物抗菌剂，其半导体性质所实现的光触媒特性，利用光能产生电子-空穴对，并进一步与周围水分子和氧气分子发生作用，生成具有强氧化性的羟基自由基和超氧离子自由基，形成对细菌的灭杀效果^[19,20]。近几年，氧化

锌光触媒因具有生物相容性好、安全性高和可见光有效的优点，逐渐得到大量的使用。Tayel 等人研究得出纳米氧化锌对金黄色葡萄球菌的破坏作用是强烈的，所有处理过的细胞在暴露后仅 4h 就完全溶解^[21]。

(合成)有机类抗菌材料按分子量可分为以季铵盐类、季磷盐类、双胍类、醇类、酚类、有机金属等为代表的低分子有机抗菌材料和以聚季铵盐类、聚卤胺类、聚胍类、聚季磷盐类等为代表的高分子有机抗菌材料^[22]。低分子有机抗菌材料与细菌细胞膜表面的阴离子结合，或与巯基反应，使蛋白质变性，从而破坏细胞膜，造成细胞内的 DNA、RNA 等物质泄漏，使得细菌死亡^[23]。然而，因毒性较大且热稳定性差，低分子有机抗菌材料并不适用于家电产品中。高分子有机抗菌材料的抗菌官能团单体经聚合后，相对分子质量增大，其正电荷密度增大，有助于对微生物细胞起到更好的灭杀作用。曾伟振等合成了具有良好耐热性的含季磷盐结构的甲基丙烯酸酯聚合物抗菌剂，继而制备具有高效持久抗菌性能的抗菌 ABS 塑料^[24]。随着各类抗菌高分子材料的迅速发展，阳离子抗菌高分子材料、共轭高分子抗菌材料和抗菌肽材料等新型材料被设计开发而成，并展现出高的抗菌活性和生物相容性^[25]。

天然(有机)类抗菌材料是人类最早使用的抗菌剂，是一种来源于自然界生物体，通过提取、分离、纯化等手段获得的具有抑菌活性的生物活性物质。其按来源主要可分为植物天然抗菌剂、动物天然抗菌剂和微生物天然抗菌剂。天然抗菌剂具有安全性高、广谱、长效、应用广泛等优点^[26]。儿茶素、芥子提取物等已应用于空调和冰箱等产品，实现了较好的抗菌效果。为了解决某种单一抗菌剂的性能缺陷，将不同类型的抗菌剂进行化合、复配，通过它们的协同作用和优势互补，实现其抗菌性能的提高和适用范围的扩大，即为复合类抗菌材料。如于锐权等将聚乙二醇(PEG)接枝改性壳聚糖(PEG-g-CS)与纳米银复合物在皮革表面形成复合涂层，并检测其抗菌性能，研究得出 PEG 的阻抗细菌黏附、壳聚糖接触杀菌及纳米银释放银离子杀菌三者协同作用，对大肠杆菌及金黄色葡萄球菌有着长期抑制性^[27]。张子洋以载银蒙脱土和丙烯酰胺及丙烯酸(钠)为原料，通过水溶液插层聚合和反相悬浮聚合两种方法制备蒙脱土/有机高分子复合调湿抗菌材料，制备出的材料均具有较好的调湿能力和抗菌性能^[28]。

消费者健康意识的提升以及疫情的影响，为抗菌材料的发展提供了支点。伴随合成技术的进步，在单一抗菌材料提高自身抗菌活性的同时，复合协同抗菌材料将进入蓬勃的发展时期。

(2) 低挥发性材料

...

新买的家电产品往往会散发所谓的“新机味”，这是困扰生产企业和消费者的痛点之一。伴随大健康概念的深入，通过使用低挥发性材料，有望解决家电的异味问题。

以冰箱为例，在对其异味进行的分析中，王亚军发现其内胆(ABS 或 HIPS)、果蔬盒(GPPS)、密封条(PVC)、发泡层[PU(聚氨酯)]等均可产生异味；主要气味成分则包含芳烃、烷烃、烯烃、含氧化合物等^[29]。与之类似，在其他家电品类中，其生产所使用的塑件、辅助剂、黏结剂、涂料等，均会成为气味的来源。与家用电器相似，汽车行

业也有类似的问题。在生产中同样使用大量金属、塑件、发泡材料、黏结剂、涂料等材料的乘用车，在 2020 年 7 月 1 日正式执行国六标准（GB 18352.6—2016），其中对车内要求严格控制八大挥发性有机化合物（VOC）。以此为契机，具有低气味的材料也得到快速发展。

聚氨酯应用于家电的保温隔热层，其泡沫材料是由多异氰酸酯和多羟基化合物经聚合反应发泡而成。聚氨酯中气味主要来源于原料（异氰酸酯和聚醚多元醇）、助剂及老化。通过 MDI 替代传统 TDI（甲苯二异氰酸酯）、低挥发性和反应型胺类催化剂的使用，并结合预聚体合成过程中的加热、通氮气、抽真空处理工艺，可实现低气味发泡聚氨酯的合成。石滨等从聚醚生产工艺如原料环氧丙烷（PO）、温度、真空度、抗氧化剂等方面对影响聚醚多元醇气味因素进行分析，并提出改进方法，有效地降低了产品气味^[30]。郭勇生等采用 MDI 体系制备出气味低、VOC 含量低、力学性能优异的高性能全 MDI 聚氨酯材料^[31]。同时，针对聚氨酯易产生醛类物质的情况，除醛剂的使用可以有效降低聚氨酯中的气味。张丽娜的研究结果表明^[32]，加入除醛剂以后，能有效降低产品的甲醛含量，与不使用除醛剂相比，添加适量的除醛剂，可以有效降低聚氨酯泡沫中的 VOC 含量。

以 PP、ABS、PS、PC 等为基础的家电用塑件，其气味的来源主要包括合成过程中的催化剂、小分子分解、改性助剂、脱模剂等。为降低气味水平，主要的技术路线有萃取脱挥和吸附螯合两种。其中，萃取脱挥主要是采用低沸点的萃取剂制备成母粒，在双螺杆挤出的高温高压环境下释放，将相同环境下树脂、助剂释放出的 VOC 进行萃取包裹，在后期通过负压的作用进行抽离，达到除味效果。而吸附螯合主要是采用无机多孔粉体，对 VOC 进行吸附，在孔表面通过有机插层处理，避免气味的再次逸出。魏来等通过萃取脱挥技术，发现挤出工艺和后处理工艺对材料性能有明显影响，较低的挤出温度和螺杆转速，较高的真空度和后处理温度，较长的后处理时间有利于降低气味等级^[33]。范开鑫等通过不同气味吸附剂的使用及复配，加工了气味等级达到 8.8 级和 8.2 级的 PP 复合材料^[34]。张宗豪等通过对复配阻燃体系的选用，制备了阻燃等级可达到 UL 94 1.0mm V-0 等级，且气味等级不大于 3.0 的 PC 产品^[35]。陈晓东等在 PC/ABS 合金的低气味研究中发现^[36]，添加的吸附剂和萃取剂用量分别为 0.5%、1.5% 时，得到综合性能最优的产品，气味强度达到 3.0 级，舒适度改善到 0 级，TVOC 较挤出未添加吸附剂和萃取剂的纯 PC/ABS 合金降幅 57.9%；萃取剂对 PC/ABS 合金环保性能的改善作用优于吸附剂，而二者连用复合体系较各自单独使用更优。辅助剂、黏结剂、涂料中的气味来源主要为其可挥发性溶剂。研发水性溶剂产品，可大幅降低气味水平。经改性的水性聚氨酯产品，可用于涂料、涂层使用。王朝晖以制备的水性丙烯酸改性环氧醇酸树脂为成膜物质，设计并生产了水性防腐涂料，经测试结果证明水性丙烯酸改性环氧醇酸树脂可实现涂层的耐候性、耐水性和耐盐雾性^[37]。

通过使用纯净树脂原料和填料、选用稳定助剂、添加吸附剂等特殊助剂，以及匹配后处理等工艺环节，可实现家电材料的低气味处理；与此同时，配套相应的检测方法及标准更有利于推动家电大健康环境的搭建。



经过几十年的发展, 家电产品的迭代升级, 不再局限于功能的完善, 而是立足于整体居家环境的健康和谐。以低挥发性材料为代表的安全材料, 如低烟无卤阻燃材料、吸附功能材料、食品级材料等, 从材质自身提高用户体验; 而抗菌材料的主动出击能力, 则为家电形成多一层防护盾。这些健康安全类材料, 在家用电器中有些非常强烈的使用需求和应用前景, 必将随着我国家电业的发展而逐步壮大。

2.2.3 / 核心功能类材料

(1) 除湿材料

室内舒适度涵括了室内温度、室内湿度以及室内空气健康等多项指标。传统空调大多数以控制温度为主, 而随着生活品质的提升, 人们对室内空气舒适的要求也越来越高。除了温度外, 对湿度、VOC、氧气含量等参数的控制, 也逐步成为家电行业关注的方向。

和温度一样, 对室内环境湿度的控制非常重要。一般来说, 室内的小气候要能够保证居住者机体温热的大致平衡, 不能使体温调节机能长期处于紧张状态, 因此保证适宜的温度和湿度对人起着重要的作用, 直接影响到人体的健康状况。一般人体感觉舒适的温度是 $18\sim 25^{\circ}\text{C}$, 湿度为 $40\%\sim 60\%$ 。在这个湿度范围内空气中的细菌寿命最短, 人体皮肤会感到舒适, 呼吸均匀正常, 在此范围内感到舒适的人占 95% 以上。在装有空调的室内, 室温在 $19\sim 24^{\circ}\text{C}$, 湿度在 $40\%\sim 50\%$ 时, 人感到最舒适。

目前家电中的空调和除湿机均具备除湿功能, 但是空调除湿和除湿机除湿在除湿原理和除湿效果上有区别。空调除湿是把冷空气加热, 短时间内除湿效果不显著, 消耗的电能比较多。除湿机除湿是把潮湿的空气从进风口吸入, 将其变成干燥的空气并排出, 除湿效果较好, 但除湿速率略慢。以上两类产品目前采用的都是主动除湿技术, 即采用主动冷凝干燥器实现室内环境湿度控制。除了目前普遍采用的主动除湿技术之外, 被动湿度控制技术也越来越受到研究人员的青睐。被动湿度控制技术即在湿度控制过程中不存在对被控湿度的反馈作用, 是单向的, 为开环控制。被动湿度控制技术包括除湿材料、可再生除湿装置和调湿涂层, 其共同特点是湿度控制独立自主进行, 对密封舱内温度基本没有影响。

除湿材料主要是指比表面积比较大的多孔固体除湿材料。通过材料表面孔隙的吸附作用吸收空气中的水分, 其除湿效率相对较高, 系统占地面积小, 且可利用太阳能、工业余热等低品位热源进行再生, 节能环保, 具有广阔的应用前景^[38]。除湿材料的特性决定了除湿系统的除湿性能, 因此很多学者对固体除湿材料进行研究。采用多孔固体材料作为吸附剂, 利用多孔特性对空气中水分子进行吸附, 常用吸附床除湿和转轮除湿两种方法。常用的固体除湿材料(除湿剂)有沸石分子筛、硅胶、无水氯化钙、活性氧化铝、无水硫酸镁、氧化钙、活性炭等。硅胶($m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)别名硅酸凝胶, 是一种无毒、无臭、无腐蚀性的高活性吸附材料, 属非晶态物质, 具有再生温度低、吸附量大、性能稳定、孔隙结构丰富的优点, 其吸



附能力可以达到自身质量的 30%。硅胶的主要成分是二氧化硅，化学性质稳定，不燃烧，不溶于水，比表面积大，通常在 $100\sim 1000\text{m}^2/\text{g}$ ，孔隙率为 70% 左右。以硅胶作为吸附剂的系统，经再生后与原硅胶材料相比变化不明显，相比其他卤族除湿材料，硅胶具有自身吸附特性的同时，还有效地把无机盐的膨胀和结块问题以分散的方式解决。但硅胶的吸附性能受温度影响较大，再生过程如果温度范围为 $80\sim 150^\circ\text{C}$ ，会出现微孔熔融、阻塞毛孔、塌陷等现象，导致其原有的性能降低。同时，硅胶的再生能耗占据除湿系统运行的大部分成本。因此，许多学者对硅胶进行改性实验研究。研究发现，可以通过加强其机械强度或者使硅胶与其他纤维复合的方法改善其粉化、掉粉等缺点。另外，通过使用钴盐、铝盐或钛盐对硅胶进行改性之后，硅胶的比表面积、孔体积、孔径都有不同程度的增大。在分析金属离子对其作用时发现，金属离子会与硅原子进行交换进入原来的四面体骨架之中，利用不同金属离子进行改性，改性后其比表面积和热稳定性不同。对于改性过后硅胶的再生问题，很多学者都是围绕其再生时所需要的时间和改性之后所需要的再生温度来进行的。陈传涓等使用黏结剂或膨胀石与硅胶颗粒进行复合得到新的固体吸湿材料^[39]，利用黏结剂或膨胀石的优点使其传热性能提升。在实验中发现这种材料的再生性能在前 5min 时比原材料提高了 13.8%，表明了这种新型复合材料可以减少再生的循环周期。总体而言，硅胶本身具有吸湿性，并且具有再生温度低、吸附量大、易与其他化学试剂复合、孔结构丰富并且容易对孔结构进行改性、比表面积较大等特点。因此，硅胶是一种极其常用的吸湿材料。

沸石 (Zeolite) 是一种矿石，最早发现于 1756 年，其化学式一般为 $A_mB_pO_{2p} \cdot nH_2O$ 。现在使用的沸石主要分为两种：天然沸石和沸石分子筛，其中沸石分子筛则是人们利用化学手段进行合成的，其分子结构特殊，所以常常被用作吸附材料，这是因为其晶体由丰富的孔道相连，故此沸石的比表面积和孔径一般很大。在以往的研究中发现沸石对水的亲和性比较好，而且具有较强的选择性，在低温条件下吸湿性改变不大，所以在很多有限制条件的情况下，沸石往往可以满足条件，但是沸石分子筛再生温度较高。针对沸石分子筛的不足，人们做了很多改性工作。如降低沸石中的硅铝比，可以明显提高对水蒸气的吸附效果。孟晓伟等使用填充烧结微米金属 - 沸石混合吸附剂的吸附单元管为载体，改变填入的吸附剂^[40]，结果表明填充微米铝粉时，脱吸附水量比纯沸石分子筛大 31.8%。Niu 等使用碱熔融 - 水热法合成的以粉煤灰为原料的沸石分子筛^[41]，比表面积达到 $148\text{m}^2/\text{g}$ ，平均孔径为 3.8nm，其性能比常规沸石分子筛有所提高。沸石在除湿应用方面也存在一些问题，如沸石对水分子具有极强的亲和力，吸水后需在高达 200°C 的温度下进行活化再生，所以再生过程不仅能量消耗高，而且容易引发积炭堵孔。此外，沸石在吸水过程中，空气中的 CO_2 会与水分子发生竞争吸附，降低沸石的脱水效率。

金属 - 有机框架 (Metal Organic Framework, MOF) 材料是近 10 年来发展迅速的一种配位聚合物，具有三维的孔结构，一般以金属离子为连接点，有机配位体支撑构成空间 3D 延伸，是沸石和碳纳米管之外的又一类重要的晶态多孔材料，如图 2-4 所示^[42]。MOF 具有高孔隙率、低密度、大比表面积、孔道规则、孔径可调以及拓扑结构多样性和可裁剪等优点，在催化、储能和分离中都有广泛应用。目前，MOF 已成为无机化学、有机化学等多个化学分支的重要研究方向。

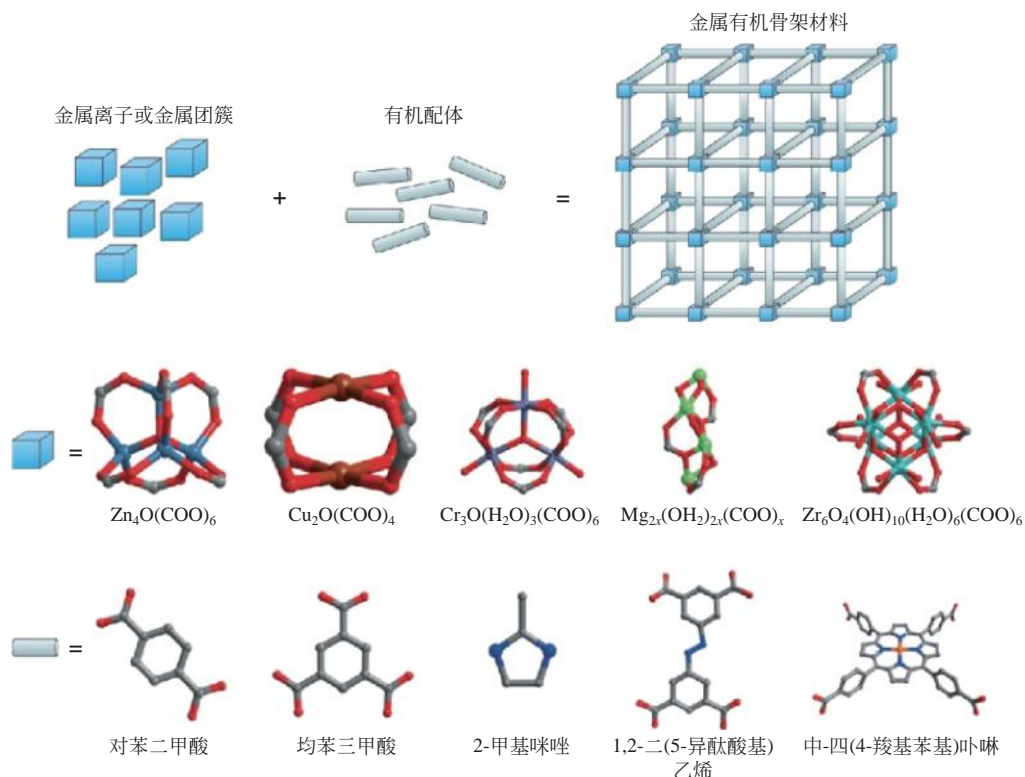


图 2-4 MOF 的基本构筑单元（正方体表示框架中的金属离子或金属团簇，柱子表示有机配体）^[42]

MOF 材料的水吸附性能主要受三方面因素的影响：未配位的开放金属位点对水分子的化学吸附；水分子在材料表面和孔道中的物理吸附；孔道中发生水蒸气的毛细凝聚。MOF 本身具有开放框架结构的特点，可通过合成后修饰以及官能团修饰等手段对其均匀分布的金属中心和有机配体进行调控，以达到调控稳定性的目的。优化后的 MOF 材料可实现微量水分的脱除，减少与其他气体的竞争吸附以提高脱水效率，可以做到低能耗、高效率地收集并液化空气中的淡水资源，甚至可以实现“沙漠取水”，其原理是采用 MOF 吸附夜间空气中的水蒸气，并在白天太阳能驱动作用下实现水蒸气脱附冷凝得到液态饮用水。美国麻省理工学院和加州大学伯克利分校合作率先报道了采用 MOF-801 实现干旱空气取水的方法，吸附量为 0.25kg 水每千克 MOF^[43]。已经有科学家研究将 MOF 材料用于空调系统的除湿^[44]，如图 2-5 所示。结果表明，与传统的空调器系统相比，使用 MOF 除湿的系统可节省 36.1% 的能量。该研究中使用的 MOF 具有较高的吸水率，由低成本的原材料制成，并且具有较高的水热稳定性。因此，它们具有在空调中大规模应用的潜力，已经成为家电行业研究的热点。

综上所述，对传统固体除湿材料进行改性和新型复合多孔除湿材料的研制，是提高除湿效率、改善再生性能、提高材料使用寿命的重要方向。MOF 也在除湿方面展示了极强的应用潜力。我国在 MOF 技术研究领域不断取得突破，但商业化应用实力依然较弱。在全球范围内，只有德国拜耳、德国巴斯夫、美国 Strem 试剂等少数企业实现了 MOF 大规模、低成本的产业化生产。我国在 MOF 研究成果工业化转化方面实力不足，现阶段行业规模与市场均较小。

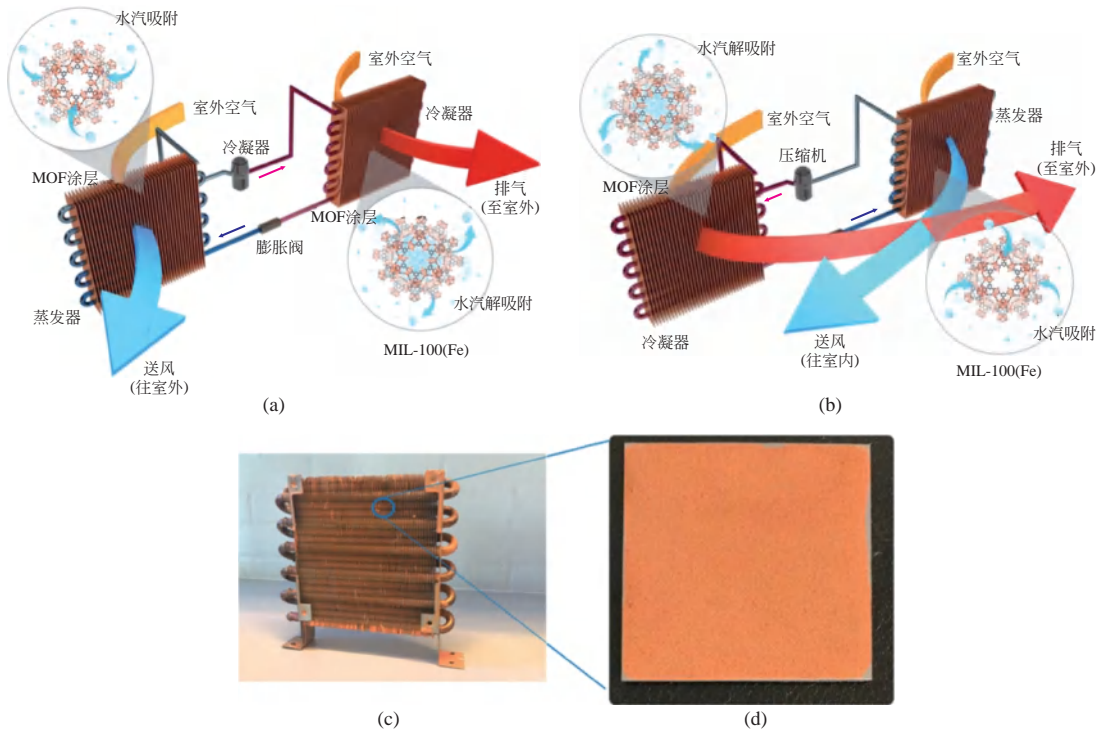


图 2-5 MOF 冷却系统工作机理示意图^[44]

- (a) MOF 吸收、储存和传递潜热负荷。左侧的 MOF 热交换器处于吸附模式，用作蒸发器。右侧的 MOF 热交换器处于解吸模式，用作冷凝器。(b) 当蒸发器上的 MOF 涂层饱和时，制冷剂循环的方向将反转，左侧的 MOF 热交换器成为冷凝器，右侧的 MOF 成为蒸发器。(c) 涂有 MOF 的热交换器图像。
(d) MOF 热交换器图像：单面涂有 MOF 涂层的单铝翅片

(2) 涂层材料

家用电器的清洁问题一直以来都是用户的主要关注点之一，冰箱作为用户储存食物的主要家用电器，在使用过程中会导致其内胆及内饰件表面黏附油垢或食物残渣，长期固化后难以清洗；同时长时间使用后容易滋生细菌、产生霉变及异味。厨房电器作为烹饪工具，长时间接触油烟和水渍，尤其是在中国重油烟的烹饪环境中，很难保证厨房电器干净美观。厨房电器长时间使用后往往会累积较多的油污且很难清洁，不仅影响外观，过多的油污累积也会降低产品的性能，甚至导致安全隐患的出现。随着时代的发展，用户对未来家电的要求不仅是功能性的完善，同时还要求外观美观易清洁。因此，易清洁的家电产品已成为家电企业开发的一大热点，这就促进了家电行业对易清洁技术的需求。

易清洁技术是指物体表面的污渍在外力因素（如雨水、重力或风力等）的作用下，能自行脱落或者可以被轻易擦除的一种技术。自清洁材料是指在自然条件下能保持自身清洁的材料，材料本身具有除臭、抗菌、防污等多重功能。自清洁材料能使污物不易附着在表面，即使附着也是和外层水膜结合，附着污物在外力、自重的作用下自动脱落，这种自清洁性能被人们称为“荷叶效应”。自清洁材料的性能主要来自材料的双疏性。自清洁材料表面对液体的接触角通常在 150° 以上，前进接触角和后退接触角的差小于 10° 。液体在这样的材料表面上

能够自动凝聚成水滴，并能够在表面滚动。这类材料在很多领域具有潜在的应用价值。如水滴在材料表面滚动能够带走附着在表面的灰尘等污染物，从而使表面具有自洁性；同时低的表面自由能能够减少污染物在表面的附着，减少清洗的次数，因此在建筑、汽车、航空和航天方面具有广阔的应用前景。

现如今，易清洁涂层在家电产业中引起越来越广泛的关注，通常，易清洁功能表面可以通过疏水表面与亲水表面来实现。疏水表面主要是通过引入烷基、氟化物等低表面能物质，降低灰尘、油污等污渍对固体表面的附着力，使污渍容易脱落，从而实现易清洁。如在冰箱翅片蒸发器采用疏水涂层材料可以确保在化霜过程中形成的水快速脱离翅片蒸发器的表面，缩短化霜时间，降低化霜能耗。空调也同样需要疏水涂层。空调夏天制冷时，换热器上会产生大量冷凝水，需要专门的排水管将其排到室外，这不仅降低了空调的能效比，而且容易出现漏水现象，更为严重的是冷凝水会带走大量能量，造成室内的空气湿度不断减小，导致人们生活、工作的环境恶化。同样，冬天制热时，室外机换热器会结霜，霜层的存在会增大换热热阻，降低传热系数，对换热系统造成一定的危害。为了除霜不得不经常停掉空调，这不仅浪费电能，还容易出现制热失效等各种故障。因此，防凝露和除霜控制是空调制冷行业方兴未艾的研究课题。很多学者开展了超疏水抑霜的研究和应用。与冰箱翅片蒸发器和空调换热器采用疏水涂层不同，吸油烟机需要采用疏油涂层。吸油烟机的使用环境及产品结构，决定了其内部部件必须具有不沾油的特质，否则非常难清理，并且油污长时间积累也很容易影响风机性能，造成吸烟效果减弱，吸烟效果不理想。因此，吸油烟机内部的蜗壳和叶轮表面的涂层处理就显得尤为重要。目前较为常用的是聚四氟乙烯，俗称“特氟龙”，但是特氟龙目前存在一些缺点，并没有达到最理想的疏油效果。

涂层材料，尤其是超疏水和超疏油涂层，在家用电器中有着广泛的用途和巨大的潜在应用价值。虽然目前还存在疏水或疏油性能不足，耐候性和耐刮擦性较差，涂层的涂覆工艺需要进一步提升等问题，但随着理论研究的不断深入，以及制备工艺的优化和制备方法的创新，其在家用电器及其他行业上的应用将会越来越广泛。

2.3

发展趋势与建议

未来家电的新产品将向“智能化、安全化、健康环保、定制化”四大方向转型，而家电材料围绕家电的发展趋势，向绚丽的外观、节能低碳、健康安全和特殊功能的方向发展。对于家电用材料来说，纳米级材料、高强度碳纤维等材料强调了智能化的特点；高阻燃、高耐热材料可提高制品安全性能，同时减小产品尺寸和降低成本，有助于安全化；低VOC材料、降声降噪材料和净化材料健康环保；高硬度、特殊外观、低成本的高端定制材料则为定制化服务。具体而言，智能家电材料行业未来的发展有如下趋势和特点。

① 节能低碳。生物基材料是明确的方向和趋势，但大规模的应用仍需要材料性能不断改善，成本不断降低。轻量化材料的应用已经由汽车延伸至家用电器产品，主要方向是以高性能塑料材料替代金属、玻璃，或者轻合金结合功能表面处理技术，利用新材料和工艺的匹配，实

现结构优化、性能提升。免喷涂材料为高效的产品加工提供了新的思路及外观，已经在家电产品中广泛使用，下一步可以通过配方、结构和工艺三方面的配合，进一步提升使用效果。隔热材料中，目前综合性能最好、应用最为广泛的仍然是传统的聚氨酯材料，气凝胶材料发展迅速，但国内无论是技术上，还是产业化程度方面，均与国外存在差距。国内气凝胶企业仍需要突破国外企业的技术封锁，将产品规模化制备技术和综合性能提升到更高的层次。

② 健康。抗菌防霉材料已经在家用电器产品上广泛使用，对材料抗菌性能和生物安全性的要求也在不断提高。抗菌材料将进入蓬勃的发展时期，急需研制抗菌新机理以及具有广谱抗菌性能的新材料。低挥发性材料，伴随大健康概念的深入，也逐步从汽车行业应用到了家电行业，通过使用纯净树脂原料和填料、选用稳定助剂、添加吸附剂等特殊助剂，以及匹配后处理等工艺环节，该领域的应用将步入快车道。

③ 安全。安全是家电发展的基本要素，安全模块指标提升是家电材料持续发展的方向。传统的高阻燃材料、无卤低烟材料在家电上仍占有重要的地位。

④ 美观。科技、时尚以及个性化的外观，已经成为目前发展的必然趋势。材料的发展，以及喷涂、模内转印等技术给家电带来了木纹、石材、雕刻等外观和质感。这也是家电行业对材料应用的永恒主题之一。

⑤ 特种功能。随着人们生活品质的提升，家电的功能也在不断增强。空调从单纯的制冷加热，到室内空气质量的控制，推动了吸附材料的发展和应用。除了沸石分子筛、硅胶、活性炭等传统材料外，家电行业对金属-有机框架材料等新型材料展现了浓厚的兴趣，但材料行业需要在工业化转化方面努力，以提升 MOF 材料的产业化程度，降低应用成本。涂层材料，尤其是超疏水和超疏油涂层，在家用电器中有着广泛的用途和巨大的潜在应用价值。但目前还存在性能不足、耐候性和耐刮擦性较差、涂层的涂覆工艺需要进一步提升等问题，需要理论研究的不断深入，以及制备工艺的优化和制备方法的创新。制冷加热作为家用电器的基本功能，也对材料科学提出了很多需求。热电制冷已经作为核心功能，取代了传统的压缩机，应用在酒柜等产品上。但热电转化效率低的缺点，限制了该材料的大规模应用。究其原因，还是在于热电材料本身的性能有待提高。随着研究的深入和性能的提升，热电材料不仅可以在冰箱、空调、厨电等家用电器上应用，在温差发电、作为传感器和温度控制器在微电子器件和 EMS 的应用领域，也具有极其广阔的前景。

智能家电的快速发展，对材料不断提出新的需求，也促进了材料行业的发展。材料行业在高端定制与高性能提升方面仍有较大空间。行业的发展不只是靠一家来支撑，需要行业内的企业联合起来，共同努力，开拓创新，更需要行业上下游的众多企业联动，共同努力，解决“卡脖子”问题，推动技术的发展和运用。只有这样，才能提升我国产业链供应链的安全性和竞争力，促进行业的健康发展。

参考文献

- [1] 邹茜茜. 面向绿色设计的家电产品材料选择和管理[J]. 轻工机械, 2007, 25(5): 106-108.
- [2] 任思聘, 解念锁. 绿色材料在现代设计及制造中的应用[J]. 科技创新导报, 2010(6): 142.
- [3] 赵先美, 赵士滨, 张进. 家用电器绿色设计技术的研究与探讨[J]. 轻工机械, 2006, 24(2): 159-162.

- [4] 尹凤福, 王宏伟, 王正太, 等. 家电中的六种有害成分及其替代[J]. 环境污染与防治, 2004(12): 3-6.
- [5] 谭天伟, 苏海佳, 杨晶. 生物基材料产业化进展[J]. 中国材料进展, 2012, 31(2): 1-6, 15.
- [6] 刘英莉, 张旭, 程斌. 汽车线束轻量化的发展趋势研究[J]. 汽车实用技术, 2016(01): 1-3.
- [7] 王胜杰, 沈剑, 李彬, 等. 冰箱压缩机安装板以塑代钢技术的应用[C] // 2017年中国家用电器技术大会论文集. 北京: 中国轻工业出版社, 2017: 38.
- [8] 史博臻, 任荃. 以塑代钢, 热水器换“胆”增“寿”[N]. 文汇报, 2010-11-26(003).
- [9] Angst P. 轻量化新途径: 三明治结构复合材料[J]. 汽车制造业, 2019, (08): 52, 54.
- [10] 梁耀文, 张军, 胡新国. 免喷涂材料浅析及在冰箱的应用研究[C] // 2017年中国家用电器技术大会论文集. 北京: 中国轻工业出版社, 2017:135-143.
- [11] 孟征, 孙兆懿, 贺芳, 等. 高光免喷涂 ABS/PMMA 合金研究进展[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(02): 134-139.
- [12] 周启花, 张扬, 雷明辉. 免喷涂材料及其应用概述[J]. 广东化工, 2019, 46(16): 94-96.
- [13] 莫荣强, 雷春堂. 家电壳体用高分子材料及其应用技术的发展趋势[J]. 塑料工业, 2019, 47(02): 6-10, 88.
- [14] 刘平, 郑亚莉. 二氧化硅气凝胶研究现状及应用探微[J]. 化工管理, 2016, 22: 95-96.
- [15] 陈宇卓, 欧忠文, 刘朝辉, 等. 隔热材料 SiO₂ 气凝胶改性研究进展[J]. 化工新型材料, 2017(08): 38-40.
- [16] 付建喜, 周延清, 王瑾晔. 抗菌生物材料的研究现状[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2008(32): 6327-6330.
- [17] 李小娇, 王秀萍, 董玮利, 等. 家电抗菌技术的研究现状与发展趋势分析[J]. 家电科技, 2020(02): 52-55, 61.
- [18] Chen Q, Xiao S, Shi S, et al. A One-Pot Synthesis and Characterization of Antibacterial Silver Nanoparticle-Cellulose Film[J]. Polymers, 2020, 12(02): 440.
- [19] Foster H A, Ditta I B, Varghese S, et al. Photocatalytic disinfection using titanium dioxide: spectrum and mechanism of antimicrobial activity[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, 90(6): 1847-1868.
- [20] Liou J, Chang H. Bactericidal Effects and Mechanisms of Visible Light-Responsive Titanium Dioxide Photocatalysts on Pathogenic Bacteria [J]. Archivum Immunologiae et Therapiae Experimentalis, 2012, 60(04): 267-275.
- [21] Ahmed A T, Wael F T, Shaaban M, et al. Antibacterial action of zinc oxide nanoparticles against foodborne pathogens[J]. Journal of Food Safety, 2011, 31(2), 211-218.
- [22] 汪子翔, 张坤, 卫金皓, 等. 抗菌材料及抗菌剂的研究现状及前景展望[J]. 橡塑技术与装备, 2021, 47(12): 22-29.
- [23] 张跃军, 赵晓蕾. 季铵盐杀菌剂杀生性能与机理研究进展[J]. 精细化工, 2010, 27(12): 1145-1151, 1227.
- [24] 曾伟振. 含季磷盐结构的甲基丙烯酸酯聚合物抗菌剂的合成及其在抗菌 ABS 塑料中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [25] 谢辉, 向书永, 朱才镇, 等. 抗菌高分子材料研究进展及应对策略[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(02): 149-156.
- [26] 罗坤明, 吴志林. 抗菌涂层和抗菌塑料在食品包装中的研究发展[J]. 包装工程, 2020, 41(03): 98-107.
- [27] 于锐权, 向俊, 李开军, 等. 改性壳聚糖 / 纳米银复合物对皮革抗菌能力的应用[J]. 皮革科学与工程, 2018, 28(02): 44-48.
- [28] 张子洋. 蒙脱土 / 有机高分子复合调湿抗菌材料的制备与性能[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [29] 王亚军. 食品储藏用冰箱异味成分分析及除味探索[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [30] 石滨, 肖春红, 王雷. 影响软泡聚醚多元醇气味的的原因分析[J]. 聚氨酯工业, 2006, 21(1): 36-38.
- [31] 郭勇生, 徐军, 殷玉鹏, 等. 汽车座椅用高性能全 MDI 聚氨酯组料及其制备方法: CN106589309A [P]. 2017-04-26.
- [32] 张丽娜. 发泡聚氨酯座椅 VOC 因素分析及快速改进[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2020, 105(03): 53-57.
- [33] 魏来, 兰修才, 曹艳肖, 等. 低气味玻璃纤维增强 PP 的制备及性能研究[J]. 塑料工业, 2020, 48(10): 150-154.
- [34] 范开鑫, 金江彬, 陈江明. 汽车用低气味、低 VOC 聚丙烯复合材料的制备及性能[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(08): 23-28.
- [35] 张宗豪, 杨海民, 李函坚, 等. 几种阻燃剂和增韧剂对低气味阻燃 PC 材料的气味等级和性能影响[J]. 广东化工, 2019, 46(02): 76-77.
- [36] 陈晓东, 刘小林. 低气味、低散发 PC/ABS 合金的研究[J]. 中国塑料, 2018, 32(08): 72-78.
- [37] 王朝晖, 雍涛, 杨敬霞, 等. 水性丙烯酸改性环氧醇酸树脂的制备及性能研究[J]. 涂料工业, 2021, 51(07): 36-41.
- [38] Subramanyam N, Maiya M P, Murthy S S. Application of desiccant wheel to control humidity

- in air-conditioning systems[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24(17-18): 2777-2788.
- [39] 陈传涓, 王如竹, 夏再忠, 等. 硅胶及其混合吸附剂——水吸附工质对性能测试[J]. *化工学报*, 2008, 59(S2): 43-48.
- [40] 孟晓伟, 武卫东, 朱成剑. 用于吸附单元管的烧结沸石吸附剂的性能强化实验[J]. *制冷技术*, 2014, 34(2): 20-25.
- [41] Niu Y, Li Y, Zhang X. Experimental Study on Synthesis of Adsorption Material of Porous Zeolite with Fly Ash[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 535-537: 2143-2147.
- [42] Howarth A J, Liu Y, Li P, et al. Chemical, thermal and mechanical stabilities of metal-organic frameworks [J]. *Nat. Rev. Mater.*, 2016, 1: 15018-15031.
- [43] Kim H, Yang S, et al. Water harvesting from air with metal-organic frameworks powered by natural sunlight [J]. *Science*, 2017, 356: 430-434.
- [44] Cui S, Qin M, Marandi A, et al. Metal-Organic Frameworks as advanced moisture sorbents for energy-efficient high temperature cooling[J]. *Scientific reports*, 2018(8): 15284.



作者简介

万新明, 工学博士, 现任海尔开放创新平台 (HOPE) 总工程师、数字化家电国家重点实验室材料专业技术委员会主任。毕业于中科院上海硅酸盐研究所, 加入法国罗地亚集团, 先后在上海研发中心和巴黎研发中心从事无机新材料研发, 2009年加入英国 KCMC (The Knowledge Centre for Materials Chemistry), 2012年回国加入海尔。

受邀担任世界知识产权组织 WIPO Green 项目咨询委员会专家组成员、中国技术经济学会技术孵化与创新生态分会常务理事、全国卫生产业企业管理协会抗菌产业分会副理事长、中国科学院大学 MBA 企业导师等。承担包括国家重点研发计划重点专项在内的多个项目; 参与编写英文学术专著 1 本, 在 *Angewandte Chemie*, *Advanced Materials*, *ACS Applied Nano Materials* 等杂志发表论文近 30 篇; 申请专利 21 项; 获得软件著作权 4 项; 参与编写标准 5 项。曾荣获上海市科学技术奖自然科学一等奖、全国百篇优秀博士学位论文奖、中国科学院院长奖等奖励。

董玮利, 博士, 高级工程师, 毕业于长春理工大学材料物理与化学专业, 任职于海尔超前创新中心, 担任数字化家电国家重点实验室材料专业技术委员会副主任。主要研究方向为新材料应用和空气净化杀菌技术。曾主持完成“家电抗菌 / 空气净化杀菌技术应用”“储能新材料在家电上应用”“热水器耐腐蚀寿命评测”等研发项目, 作为技术骨干参与完成国家重点研发计划“中低压直流配用电系统关键技术及应用”项目, 累计申请发明专利和实用新型专利 30 余项。

李小娇, 高级工程师。2011年毕业于青岛科技大学, 获得工学硕士学位。主要研究方向为高分子材料及其复合材料。致力于塑料改性以及连续纤维增强热塑性复合材料 (CFRT) 的研发, 先后开发了多比例玻璃纤维 / 碳纤维增强的 CFRT 产品, 并结合结构设计形成批量产品, 实现了 CFRT 在汽车行业以塑代钢的产业化应用。现研究方向为高分子材料在家电中的应用, 从轻量化、长效稳定性、绿色健康方向出发, 推进家电新材料的引入及材料性能提升。

第 3 章

船舶及海洋工程新材料

王其红 孟祥军

3.1

船舶及海洋工程材料概述

21 世纪被称为海洋的世纪，海洋储藏着大量的、远超陆地的、可供人类使用的石油、矿物和生物资源，海洋资源的开发利用在未来将占据重要的地位。随着科学技术的发展、资源的不断开发，陆地资源将逐渐枯竭，未来争夺的对象是海洋，谁拥有制海权，谁就掌握了主动权。

我国是海洋大国，海岸线长达 18000 多千米，海域面积达 300 万平方千米，海洋资源丰富。我国对海洋经济的发展也高度重视，“中国制造 2025”“一带一路”战略规划为我国建设海洋强国创造了条件和发展机遇。海洋资源的开发利用是我国海洋战略的重点，而先进海洋工程装备是海洋开发、利用以及海洋经济发展的前提和基础，处于海洋产业价值链的核心环节。先进海洋工程装备制造业是战略性新兴产业的重要组成部分，也是高端装备制造业的重要方向，具有知识技术密集、物资资源消耗少、成长潜力大、综合效益好等特点，是发展海洋经济的先导性产业。

先进海洋工程装备用核心关键材料的研发能力和技术水平，是海洋产业发展的技术基础。新中国成立以来，特别是改革开放以来，我国海洋工程材料在应用基础研究、技术研发以及工程应用等方面取得了长足进步，极大地促进了海洋产业的发展，满足了海洋工程建设的需求。为了满足我国造船工业快速发展的要求，近年来材料行业在海洋工程材料品种研究开发、生产应用以及产能建设等方面投入了大量的人力物力，海洋工程材料发展也取得了巨大进展。

先进海洋工程（简称海工）与高技术船舶材料主要分为结构材料和功能材料两大类。结构材料主要包括结构钢、钛合金、铜合金、铝合金，以及相应的配套焊接材料及复合材料、水泥混凝土等；功能材料主要包括防腐防污材料、隔热材料、防火材料以及结构功能一体化

材料等。

在先进海工用钢方面，我国的国产化率已达 90% 以上；在“海洋金属”钛合金方面，我国海绵钛、钛材的产量居世界首位，已成为世界钛工业大国；在树脂基碳纤维增强复合材料方面，我国已形成了 T300 碳纤维的量产能力，基本突破了国外的技术封锁；在海洋混凝土材料方面，近年来已在多座跨海大桥、海底隧道以及离岛建筑中广泛采用；在海洋腐蚀防护材料和防护技术方面，我国已初步建立了海洋环境监测及腐蚀防护材料与技术的研发体系。总体而言，我国目前已具备大部分先进海工用钢与高技术船舶材料的生产与应用能力，但主要集中在中低端，高性能材料多数仍需进口。

船舶及海洋工程材料几乎涵盖了所有重要的结构材料和功能材料，但按重要性和用量来归纳，主要有钢铁材料、钛合金、铜合金、铝合金、橡塑高分子材料、树脂基复合材料、水泥混凝土材料、防护涂层材料等。

军舰、民船和海洋平台等海工设施的复杂性、可靠性、大型化与海洋环境下高温、高湿、高盐雾、强辐照等严酷而多变的服役工况，决定了船舶及海洋工程材料具有种类多、用量大以及力学、防腐、加工等综合性能要求高的总体特点。

船用钢和海工钢是最主要的结构材料，一直呈现出高性能、大规格化的发展趋势，包括高强度、塑韧性、焊接性、耐低温、抗疲劳、耐腐蚀等综合性能，以满足各类船舶、海洋平台、海底管线等用途的需求。

我国船用钢历经引进—仿制—自行研制—创新研发的发展历程。从一般碳素钢到无镍铬和低镍铬高强度钢的开发研制；从电炉模铸钢的研制生产到转炉连铸钢的研发成功；从较高合金含量、较高资源成本钢的研发到低合金含量、低资源成本钢的研发的技术路线的转变，使之持续改进、提高、发展。我国主力船型使用的船体结构钢已经基本实现国产化，能够做到自给自足，并在一些高附加值特种钢铁材料（如大型集装箱船用高强度止裂钢、油船油舱用耐腐蚀钢、大线能量焊接用船板钢、LNG 船储罐用 9Ni 钢、高锰钢、殷瓦钢等）领域取得了突破。总体来看，95% 左右船体结构钢能够立足国内市场，但在一些关键材料，特别是一些批量小、难度大的特殊品种，较国外尚存在较大差距，目前主要依赖进口，受制于人。以极地破冰船用钢为例，由于对冰层接触线以下部位船体用钢要求最高，该部位船体必须承受冰层的反复撞击，必须具备足够的低温韧性、高强度、可焊接性、疲劳强度等综合性能。然而我国尚缺乏专门的极地船舶用低温钢及配套焊接材料，焊接工艺以及超低温断裂行为评价等研究更几乎是空白，与俄、韩、日等国家存在明显的差距。

海洋平台用钢也已经由吸收引进、批量低价的粗放型发展模式，向创新、引领、占领高端市场的方向转变，目前国产海洋平台钢板已经被广泛采用，EH36 以下平台用钢基本实现国产化，占平台用钢量的 90%。但随着海洋工程结构向大型化的方向发展，海工装备除了承受自身的质量之外，还要承受海浪和潮流的载荷，抵抗严寒、低温的侵袭。为了减轻海工装备的整体质量，提高其承载能力及低温下的断裂韧性，高强度、大厚度海工用钢需求越来越多，但该产品仍依赖进口。例如，武钢、宝钢、沙钢已具备生产屈服强度为 690MPa 海洋平台用钢的能力，但厚度在 100mm 以上时，产品质量尚不稳定，性能波动较大。另外，对于易焊接高强度海洋平台焊接用厚板，国际上已经可生产 F 级 690~720MPa 免预热焊接结构高强度

钢, 但是我国仍主要处于 E 级 460~550MPa 的强度水平, 且焊接过程中需要采用严格的焊前预热工艺。

焊接是船舶及海工平台建造的重要特点和重要工序, 焊接工时约占建造总工时的 40%, 焊接成本约占建造总成本的 17%, 并且焊接结合部位的性能对船舶安全性至关重要, 高质量的配套焊接材料才能满足海工装备焊接接头高强度、高韧性的需要。目前, 我国海洋工程装备普通结构的焊接已经实现国产化, 例如 EH36/DH36 等海工钢均使用国产焊接材料。而重要结构的焊接材料几乎都被国外品牌垄断, 如 390MPa 级以上船体结构钢、自升式平台齿条钢 Q690、海工半潜船的 E690 钢、LNG 船的双相不锈钢等配套焊接材料。

钛及钛合金作为“海洋金属”, 是船舶和海工重要的结构材料。钛合金在船舶的动力与推进系统如螺旋桨、喷水推进器、废气冷却器、舵等, 在消防系统如消防泵、冷却泵、阀门等, 以及在船舶的壳体、导流罩、换热器、冷凝器、管路系统和海上油气开采的隔水管、钻管、接头等部位具有突出的应用优势, 海水淡化装置用薄壁钛管目前也获得大量应用, 这些往往都成为最优的用材方案。随着成本控制和应用技术的不断突破, 钛及钛合金的用量也越来越大。

铜、铝有色金属发挥重要作用并得到大量应用。铜合金以其优良的力学性能、导热性能和耐海水腐蚀、抗海生物污损能力, 大量应用于船舶和海工海水管路、螺旋桨、冷凝器等。铝合金的质轻、耐腐蚀、导热、无磁、易加工等特点, 使其成为水中兵器、潜航器和特种船舶的重要壳体材料, 在油气开发、海水淡化等领域也得到较多应用。

纤维增强树脂基复合材料成为船舶及海工新材料主力军。质量轻、可设计性强、耐腐蚀、抗污的纤维增强树脂基复合材料用于制作船体结构和上层建筑、烟囱、桅杆、舱内舾装件等。质量轻, 能大大降低结构自重, 提高有效负载率, 使船舶有更多承载; 无磁、耐腐蚀性强, 可大幅提高船舶等装备在航率, 并降低维护成本乃至全寿命成本; 易于成型, 可实现钢结构难以达到的流线造型, 大大改善船舶部件的水动力性能, 降低水动力学噪声, 并提高航行效率。纤维增强树脂基复合材料的研发及应用成为本领域技术的重要方向之一。

防腐防污材料及技术依然是研究重点。腐蚀与海生物污损是海洋工程装备服役面临的共性问题, 也是海洋工程急需解决的关键技术难题之一。苛刻的海洋环境极大影响船舶及海工装备性能、寿命和安全可靠性, 随着船舶与海洋工程装备的不断发展, 服役环境复杂多变, 研制系列化防腐防污材料迫在眉睫。防腐防污材料主要包括阴极保护材料与技术、防腐防污涂层材料等。在阴极保护材料与技术方面, 我国已基本形成了系列化标准型号规格的常规阴极保护材料体系, 建立了阴极保护优化设计方法, 产品技术要求和标准检验方法较为完善, 并广泛应用于船舶与海洋工程装备领域, 取得了良好的应用效果。高活化铝合金牺牲阳极实际电容量 $\geq 2500\text{A}\cdot\text{h}/\text{kg}$, 外加电流阴极保护系统的使用寿命可达 20 年。船舶与海洋工程装备的常规阴极保护大多采用国产阳极, 几乎完全实现了国产化, 并且已大量出口, 在服役过程中应用效果良好。近年来, 我国也开发了深海牺牲阳极材料(深海环境)、低电位牺牲阳极材料(高强度钢等氢脆敏感材料)、高活化牺牲阳极材料(干湿交替环境)和极地低温牺牲阳极材料(极地低温环境), 以满足特殊工况环境海洋装备的防护需求。在防腐防污涂层材料方面, 我国已研制了不同防护期效的防锈漆、防污漆、船壳漆、甲板漆、压载舱涂层和

多种涂料用树脂等，基本建立了船舶与海洋装备所需的防腐涂料及配套体系，防污涂层经历了由非环境友好到环境友好的发展过程，形成了涂料研、产、用全谱体系。防腐涂层的使用寿命可达10年以上，防污涂层的防污期效可达3~5年。近几年，围绕智能自修复涂层、仿生减阻涂层、绿色长效涂层等新材料开展了应用基础研究，为不断完善防腐防污涂层材料体系奠定了基础。目前防腐防污材料及技术已在舰船、民用船舶、海洋平台等先进海洋工程装备中得到广泛应用，并取得良好的防护效果，为装备全寿期的安全可靠运行提供了重要保障。

防护涂层材料及技术依然是研究重点。苛刻的海洋环境极大影响船舶及海工装备性能、寿命和安全可靠性，因而电化学保护材料、防腐防污涂料已成为与结构材料同等重要的核心材料。目前，我国高技术船舶涂料年使用量基本保持在30万吨左右，市场份额大部分被国外跨国公司占据，前5大企业分别为Jotun、Hempel、CMP、PPG和IP，国内船舶涂料企业环境友好型产品配套体系不完善，售后服务环节较为薄弱，且以供应防腐涂料为主，高性能防腐涂料及高端防污涂料市场长期被跨国企业占据。海洋工程涂料的年销售额约20亿~30亿元，也被跨国企业占据大部分市场份额。海洋工程涂料不仅技术要求高，涂料的种类多，对配套性要求高，还要求企业的资质和认证齐全，很多细分市场还要求全球的售后服务网络，方便维护，我国一般企业很难满足这些要求，导致在竞争中处于劣势。为满足船舶海工产业要求和节能减排的需要，用新材料、新技术改进涂料的性能和开发新产品，是防腐防污涂料发展的方向。近年来，石墨烯改性技术、微胶囊技术、超支化技术、含氟和硅材料、仿生防护涂层材料、腐蚀监/检测及寿命预测技术、智能防护涂层材料技术、多功能一体化防护涂层材料技术等更成为前沿性研究热点，推动涂料技术的不断发展。

3.2

船舶及海洋工程领域对新材料的战略需求

美、俄、日、英、德、法等海洋强国历来重视船舶及海工材料的研究及应用。通过高投入，持续开展前沿技术的探索和基础材料、新兴材料的研发，并注重应用技术的研究和考核验证平台的建设，支撑了船舶及海洋工程装备的高水平发展。与此同时，材料技术人员具有扎实的理论基础、技术基础和良好的创新能力；建立起基本完善的舰船、民船和其他海洋工程材料体系。其中，结构钢强度等级高（达到1200MPa）、综合性能好，钛合金材料种类多、应用技术先进，树脂基复合材料技术水平高、工程应用领先，防腐防污涂料功能多、防护效果好、期效长。除此之外，已构建起配套齐全、结构合理、军民通用的科技体系和产业体系，为船舶及海工装备技术发展提供了有力的自主保障。

新中国成立以来，尤其是经过改革开放40多年的发展，我国船舶及海工材料的基础研究、材料研制和工程应用取得了显著进展，保障了海洋工程建设需求，也使中国逐步成为海洋大国，极大地促进了国民经济的发展。在船舶和海工用钢方面，建立了钢铁材料体系以及比较完备的科研和生产体系，海工钢的国产化率达到90%以上；在“海洋金属”——钛合金方面，形成了比较完整的研究、中试和规模化生产工业体系，海绵钛和钛材料产量位居世

界前列，特别是近 10 年来在船舶和海工领域的应用得到显著拓展；在铜合金、铝合金等有色金属方面，具备较为完善的研发、生产体系和相当规模的加工制造能力，其中铜合金已成为船舶及海工管路系统和相关部件的主要用材，铝合金在船舶舱室、上层建筑和壳体上的应用也越来越多，并成为水中兵器主要的壳体结构材料；在复合材料方面，碳纤维/玻璃纤维增强树脂基复合材料近年来爆发式增长，成为船舶和海工理想的轻质结构材料，其关键配套材料——高强度碳纤维的量产基本突破了国外技术封锁，轻质高强度高刚性金属基复合材料的研发及应用也取得重要突破，更好地满足了水中兵器向大深度、远航程、高航速方向发展的需求；海洋混凝土材料也取得突破性进展，多座跨海大桥、海底隧道和离岸建筑采用了国产混凝土；在海洋腐蚀与污损防护方面，建立了海洋环境检测以及防护涂层材料与技术研发体系，室内加速模拟试验及实海环境评价条件等，保障了新一代船舶和重要海洋工程用防护涂层材料迭代更新及防护需求。

尽管我国船舶及海工材料的发展取得了明显进展，但与世界海洋发达国家相比仍有很大差距和不足。为了弥补差距和不足，提出如下战略需求。

① 关键及核心高性能材料自主保障的需求：涉及舰船、海洋平台、油气管线、建筑设施等使用的高性能大规格结构钢以及高品质钛合金、复合材料、防护涂料等。

② 极端苛刻环境对新材料的需求：随着我国逐渐向海洋强国迈进，船舶与海洋工程装备针对深海、极地等苛刻环境的新材料应用技术仍较薄弱，有的相关技术领域甚至处于空白状态。从近海走向远洋，各海域腐蚀介质多样，恶劣的腐蚀环境对装备的可靠性、长寿命要求越来越高。

③ 强化基础研究的需求：新材料研发和技术创新长期以来的研仿模式以及对基础和前沿技术重视不够，导致总体上研发基础不扎实、创新能力不强。具体表现为：基础研究缺乏统一规划和布局；研发团队的理论水平参差不齐，对高通量计算与高通量实验、虚拟设计与虚拟制造、材料基因库建设等新技术新方法的掌握和应用相当有限。

④ 加强应用研究的需求：船舶及海工材料的工程推广在大规格异形件加工技术、高能束焊接和复合焊接先进连接技术、3D 打印快速增减材复合制造技术、新材料的全海域腐蚀规律与防护技术、新材料工程化研究与考核验证等方面的研究工作和数据积累仍很欠缺，给船舶及海工的设计和选材带来困难。

⑤ 建立完整的船舶及海工材料体系的需求：新材料新技术研究亟待加强。科技体系和产业体系的合理布局，对船舶及海工材料的行业发展至关重要。

3.3

存在问题与挑战

新中国成立以来，特别是改革开放以来，我国在船舶及海洋工程材料的应用基础研究、技术研发及应用等方面取得长足进步，但与国外海洋工程材料强国相比，我国在船舶海洋工程用材料的产业发展上还存在如下问题。

3.3.1 / 高性能材料自给能力不足，多需依赖进口

我国目前虽已具备大部分先进海工与高技术船舶材料的生产与应用能力，但主要集中在中低端，高性能材料多数仍需进口。高技术船用钢方面，国内在高强度止裂钢等高性能钢方面虽已取得较大进展，实现了在国产大型装备如超大型集装箱船上的应用，但其配套焊接材料存在稳定性差、性能水平不高等突出问题，不能满足应用需求，在装备建造中焊接材料仍需进口；此外，在舰船建造中一些高品质焊接材料如镍基焊丝及纯镍焊丝等长期以来一直依赖进口。海洋平台用钢方面，国内 90% 用量已实现国产化，但主要集中在强度为 355MPa 及以下的钢种，国内数家钢厂虽已开发出了关键部位所用超高强度（600MPa 以上）、大厚度（100mm 以上）、高韧性（-40℃ 以下）、适应 50kJ/cm 以上大焊接热量输入的钢材，但存在稳定性差、冶金洁净度低、化学成分控制精度不高、焊接切割适应性差等问题，至今尚未得到大范围应用，仍需进口。

我国船用钛合金已初步建立了 275~1150MPa 级的材料体系，具备了自主供应与保障能力，但与国外相比仍有较大差距，主要表现在：

- ① 材料体系不完善，有些强度等级缺少相应牌号产品；
- ② 规格不健全，我国船用钛合金一般主要针对某一构件专门研制，材料品种规格比较单一；
- ③ 大规格钛合金板材生产技术不成熟，大规格钛合金板材组织性能均匀性及工艺批次稳定性与国外相比存在一定差距，难以满足工程实际应用需求；
- ④ 大型船用钛合金铸锻件制造还缺少高端制造设备和相应的技术储备。

5083 铝合金是一种综合性能良好的 Al-Mg 系合金，具有中等强度（300MPa 等级）、优异的耐腐蚀性能、焊接性和成型性，是国内外交通、舰船广泛应用的铝合金材料。尤其是 H116 材料，兼有优异的耐腐蚀性能和力学性能，一直是舰船轻量化结构材料的代表，成为舰船领域使用量最大、应用最成熟的军、民通用铝合金材料，除用于舰用高速快艇外，还广泛用于水面舰船上层建筑、高速民用客船及其他海洋环境下使用的构件等。但相对于海洋环境的苛刻要求，还存在性能不稳定，配套焊接材料工艺性差，成型技术、焊接技术系统性研究缺位等一系列问题，限制着国产 5083 铝合金的上船应用。因此，多年以来我国舰船用某铝合金材料一直依赖进口。

高技术船用复合材料方面，国内在高性能耐海洋腐蚀的船用复合材料方面虽已取得较大进展，实现了在扫雷艇、巡逻艇等国产装备的应用，基本具备保障能力，但与国外相比还存在差距。

① 基础原材料自主化程度不足。高性能耐海洋腐蚀复合材料中的基体树脂（低黏度乙烯基树脂、阻燃型乙烯基树脂）、高性能增强纤维（碳纤维、芳纶纤维、超高分子量聚乙烯纤维、玄武岩纤维）、泡沫芯材 [PVC 泡沫、PMI（聚甲基丙烯酸酯亚胺）泡沫、浮力材料] 等基础原材料的自主化能力不够，严重依赖进口。例如适合船用的低成本大丝束碳纤维，国产化研究不足，存在与船用乙烯基树脂体系不匹配问题，使用寿命与长期耐久性难以保障，需要进口。

② 国产高性能复合材料应用考核评价不足。如兼具防火功能的舱内用复合材料方面，国产材料存在着复合工艺性能差、防火性能水平不高等突出问题，关键性能参数的考核验证方法也不全面，难以满足高技术大型船舶如豪华游轮等的应用需求；海洋平台用复合材料方面，以耐海洋腐蚀的环氧树脂基树脂为基体的长寿命（安全应用 50 年以上）复合材料体系存在可靠性评价不足等突出问题。

在船舶与海洋工程防腐防污材料方面，国内尚无适用于深海、极地船舶与海洋装备的阴极保护、防腐防污涂层等成熟产品，尚处于实验室和应用研究阶段，服役性能仍有待进一步提升，目前主要依赖国外进口，无法满足极端环境海洋工程装备腐蚀防护需求。如国内自主设计、建造的海洋石油 981 半潜式钻井平台，最大作业水深 3000m，采用意大利 ACG 公司生产的阴极保护装置；对于矿产开采装置，其磨蚀与腐蚀联合损伤防护为高新技术，国内研究开展起步晚，基础薄弱。另外，现有船舶与海洋装备防污涂层材料尚不具备减阻功能，防污剂释放后会形成粗糙的皂化层，增加航行阻力，难以满足船舶绿色环保、节能减排发展的需要，与国外同类技术存在一定差距。

防护涂层材料方面，先进海工与高技术船舶需要的核心原材料掌握在国外少数跨国公司手中，如基料树脂、各类助剂、高性能防污剂、高性能缓蚀剂等，一旦对国内限制出口，则会造成较严重的影响。

3.3.2 / 先进制造工艺推广应用程度低

在先进海工与高技术船舶建造方面，国外已实现了激光焊、大线能量焊接、环件轧制、增材制造等先进的制造工艺技术的成功应用，大幅度提高了建造效率和质量，但在国内这些先进制造工艺尚未得到大范围应用。

我国船舶焊接逐渐朝着机械化、自动化、高效化等方向发展，也研发了自动化、高效焊接技术，制造了焊接设备并建立了焊接生产线，同时从国外也引进了先进的设备。但我国船舶焊接技术与国外相比有较大差距。以激光焊为例，德国 Meyer 船厂广泛应用了 CO₂ 激光 - 电弧复合焊接技术，船厂平面分段全部实现激光 - 电弧复合焊接制造；日本三菱重工将激光 - 电弧复合焊接技术用于大型油轮、集装箱船、LNG 船等建造；美国已用于 CVN78 航母、DDG1000 驱逐舰、DDG51 等重点型号的模块化建造，实现高强度船体结构钢焊接变形控制和焊接自动化。但由于我国激光焊接技术起步较晚、焊接技术成熟度不高及配套焊接材料空白，致使该技术未能在我国实船建造中得到应用。

高效焊接技术在日本船舶领域实现广泛应用，焊接效率大幅提高，如 80mm 厚 EH40 钢可实现 680kJ/cm 大线能量焊接，65mm 厚 EH40 钢可实现 390kJ/cm 大线能量焊接。相对而言，我国开始研制大线能量焊接用钢的时间较晚，到目前为止，国内生产船板的诸多厂家都展开了一系列的研制工作，但达到多国船级社认证标准的船板钢所能承受的线能量都比较低；另外，国内目前虽已实现了 355MPa 级钢板的大线能量焊接，但在更高强度级别钢种的技术仍不成熟。

环件轧制技术在美、德、英、法、日等国的航空航天、石油化工、船舶及海工中也逐步得到了广泛应用，大幅度提高了壳圈直接成型后的圆度、厚度方向上的性能均匀性、建造效

率和质量。德国制造的 $\phi 3500\text{mm} \times 110\text{mm} \times 90\text{mm}$ 的碳钢环件，材料消耗降低40%~50%，生产成本降低75%。我国环件轧制技术始于20世纪50年代，但在船舶及海工领域推广较为缓慢。在船舶领域应用有望解决传统的“钢板分块冷成型、纵缝焊接及分段合拢”等模式存在的钢板成型后性能均匀性差，甚至强度不达标，高强度钢焊缝多、焊接效率低、残余应力大等问题。

金属构件增材制造技术可以有效解决备件“带的没用上，用的没带上”问题，实现多场景下损伤零件现场维修、复杂零件3D打印形性控制，以及零部件新型设计和制造水平的协同升级。目前，美国、欧盟等均有支持金属高性能激光增材制造在舰船领域应用的专项研发计划。美国海军水下作战中心开展激光同步送粉增材的修复技术研究，在主船体、动力装置、水中兵器等零部件实现应用。我国在金属增材制造技术的研究方面与欧美发达国家和地区同步，并已在先进战机、航空发动机、航天飞行器等重点型号研制与生产中得到工程应用，但在船舶及海工平台建造中却未能应用。

在钛合金先进连接技术方面，与国外比，我国先进、高效焊接技术较少，焊接自动化水平低，配套工艺技术落后。目前国内钛合金焊接主要采用TIG（非熔化极惰性气体钨极保护焊）、MIG、等离子和电子束等，焊接效率低，焊接质量难以控制；国内自动化焊机的数量少、自动化水平低，自动TIG和自动等离子焊接技术近年来才得到少量应用，机器人焊接系统还没有开展应用研究；与焊接工艺配套的工艺技术与国外相比也存在较大的差距，如智能柔性焊接系统还没开展研究，焊接过程监测与控制还处于较低的技术水平，焊接应力与变形控制技术不能满足先进海工与高技术船舶建造发展的需求。在钛合金精密高效成型技术方面，目前我国钛合金产品制备及建造多采用传统方法，如锻造加工成型、熔模精密铸造成型，很少采用近净成型工艺制备零部件，对异形钛合金构件主要依靠机加工成型或焊接技术，这不仅浪费了大量材料、生产成本高、制造周期长、构件整体性能下降，而且成为制约钛合金扩大应用的瓶颈，而国外等温锻造/超塑性成型技术、粉末冶金和快速成型等技术已有较好的应用。在钛合金工艺集成建造方面，当前国内以单独采用锻件、焊接件、钣金成型、铸造件提供产品为主，缺少相关工艺集成作为整体设备制造的综合能力。

钛及钛合金具有强度高、密度小、耐腐蚀、无磁、焊接性能好、透声、抗冲击性好等优点，在舰船通海管路等系统中获得了越来越广泛的应用，显著提高了舰船设备运行的可靠性和使用寿命。但钛合金由于具有良好的生物相容性导致海生物异常生长，具有较高的腐蚀电位导致其与异种金属连接时产生电偶腐蚀，以及钛合金自身耐磨性较差，限制了钛合金在航海领域的应用。因此，针对舰船用钛合金的不足之处，目前主要有绝缘、防污和耐磨减摩等表面处理技术。

绝缘处理主要解决钛合金与钢、铜等异种金属连接时产生的电偶腐蚀问题，通过在钛合金表面制备一层电绝缘涂层，实现连接接触面的电隔离效果。根据零部件的工况环境，电绝缘涂层主要分有机绝缘涂层和陶瓷绝缘涂层。有机绝缘涂层主要用于常温工况的非关键部位，如绝缘漆，常见的工艺有常规涂装和静电喷涂。陶瓷绝缘涂层主要用于常温和高温工况的关键部位，如氧化铝钛涂层，常见的工艺主要有等离子喷涂、火焰喷涂、微弧氧化、阳极氧化、热氧化等。如YET钛合金部件主要采用热氧化和微弧氧化进行表面强化处理，提高产品的绝

缘性和耐磨性。

防污处理主要解决钛合金管路等海生物附着污损的问题，通过钛合金表面的防污药剂缓释或超疏水涂层，实现海生物生长抑制。防污药剂缓释主要有电解防污和铜离子缓释，通过防污药剂的释放控制，实现毒杀海生物的目的。超疏水涂层主要通过仿生结构设计和降低表面能来抑制海生物附着生长。但目前船舶领域除电解防污和氧化亚铜防污漆有一定的应用，超疏水涂层尚在实验室阶段，新技术的防污效果和作用期效还有待进一步验证。

耐磨减摩处理主要解决钛合金自身耐磨性差的问题，通过对钛合金表面进行强化处理，提高表面的耐磨性或降低表面摩擦系数。根据钛合金表面承受的载荷情况，可以设计不同的表面耐磨减摩涂层体系，如氧化铝钛、氧化铬等陶瓷涂层体系，碳化铬、碳化钨等金属陶瓷涂层体系，氮化钛、氮化铬、类金刚石等硬质薄膜体系，二硫化钼、二硫化钨固体润滑薄膜体系等。常见的工艺主要有等离子喷涂、超声速火焰喷涂、激光熔覆、离子氮化、磁控溅射、电弧离子镀、离子注入、微弧氧化等。各种表面强化技术处理温度不同，获得的改性层或涂层厚度不同，对表面粗糙度的影响也不同，需要根据工况要求进行设计制备。

目前，用于钛及钛合金表面处理的技术比较多，应根据钛及钛合金表面的具体要求和使用寿命来选择适用的工艺，通常选择的原理是工艺可靠、耐久性好、绿色环保、性价比高。未来舰船用钛合金表面处理技术将继续向绝缘、防污、耐磨减摩三个方向发展，涂层产品将向高强韧、长寿命、高可靠性方向发展，进一步提高涂层体系设计能力，探究涂层工艺复合技术、涂层寿命预测方法。

对于船用钛合金无损检测技术，发展方向既要与船舶先进制造技术相契合，又要结合船舶行业的特点二次创新，在常见钛合金材料和构件的检测已较为成熟的基础上，满足新产品、新工艺的检测需求是当前的首要任务。例如，厚度几毫米到数百毫米的大范围规格产品检测、增材制造制件检测、在役装备检测与监测等带来了新的挑战。为适应船用钛合金的发展，满足其检测需求，无损检测新技术的应用比例不断提升，并呈现出多参数化、专业化和智能化的特征。以相控阵超声、数字射线和阵列涡流为代表的新技术将发挥出更大的技术优势。相比传统检测方法，新技术的检测能力大幅提升，能用于解决特殊构件的检测难题，且实现了数字化与可视化，有利于检测数据的记录和结果评定。

目前，新技术在船用钛合金中的应用比例不断提高，解决了部分检测难题，推动了无损检测技术的发展，但由于标准尚不完善，在一定程度上阻碍了其大范围的应用。

随着国家标准、行业标准的制定，新技术的应用将迎来快速发展阶段，检测工艺的制定和设备的应用将更加专业化。随着检测技术的升级，检测手段不断丰富，检测人员不仅要充分掌握常规检测方法，也要熟悉新技术的特点，以适应不同类型工件的检测需求。由于工件制造方法和结构形式的多样化，检测的难度不断提高，直接根据模拟试样制定检测工艺在可靠性和经济性上已很难跟上现代工业生产节奏。因此，需要借助计算机模拟技术，专用的模拟软件中内置有多种算法模型，能结合检测对象设置不同的检测条件，模拟检测效果。如针对特殊结构形式的焊接结构，结合焊接缺陷的分布特征，模拟不同超声探头参数、入射角度下的缺陷响应，从而实现检测工艺的最优化。计算机模拟技术的应用能高效地制定最优化检测工艺，降低大量试块的制造成本，目前已开始应用在超声、涡流和射线检测中。

检测结果的处理更加智能化，利用不同的算法实现检测结果的智能化识别一直是国内外研究的热门方向。目前已有相关的商用检测系统，如针对批量化工件，在数字射线检测的基础上，基于图像识别技术，能自动评判检测结果，并对工件分类，识别准确率达到90%以上。通过设计专家系统，将其应用于无损检测工艺制定和结果评判中，不仅能减轻检测人员的负担，也是企业推进智能制造升级的重要环节。

复合材料成型及加工技术方面，我国已具备建造大型复合材料船舶结构的能力，但是国内目前广泛采用手糊与劳动密集型真空辅助成型工艺制作复合材料船舶结构，导致性能离散度大，质量控制困难。与国外相比，存在VOC排放环境不友好、自动化程度低、质量监控手段缺乏等问题。在模块化设计与成型方面，国外已熟练掌握设计方法并应用于复合材料舰船建造。典型的有：DDG1000整体上层建筑在建造方面实现了模块连接以及计算机模拟联动的初步智能制造。在自动化成型及制造技术方面，国外在主船体等结构件中已经采用先进的自动化灌注系统，用液体成型流动前锋实时监控系统和监测产品质量，本项技术在国内还基本处于空白。在干纤维自动精确铺放工艺方面，国外已经在大型结构件上应用了干纤维-液体成型，而国内仅仅处于研究阶段，与国外相比存在较大差距。此外，先进的低成本OOA工艺在国外大型舰船构件上已经应用，国内对于大型船舶复合材料OOA工艺的研究仍在起步阶段。

在船舶与海洋工程防腐防污材料方面，国内已具备阴极保护材料、防腐防污涂层等常规材料的制造能力，尤其拥有先进的牺牲阳极研发、生产基地，常规牺牲阳极材料性能已达到国际先进水平。近几年，基于微结构制造技术实现防腐防污成为研究热点。国内围绕微结构设计、微结构加工技术等方面开展了基础探索研究，并通过构建超疏水或纳米结构解决腐蚀问题，但由于制造技术的不足导致微结构的可靠性降低和服役期效较短，技术仍不成熟。另外，随着我国船舶与海洋工程装备走向远海大洋，减少返港维护是未来发展的基本需求，急需发展适合现场维护和修复再制造技术，能快速对腐蚀损伤部件进行尺寸和功能恢复。目前我国缺乏适用于海上现场施工的便携式再制造装备，制造工艺的稳定性仍有待提升。

防护涂层材料方面，国外已应用较多的涂装机器人或特殊涂装设备对复杂结构表面、曲面和狭小空间部位等进行涂装，如智能曲面涂装机器人、水下涂装设备、管道内壁涂装设备等。目前，我国大部分采用人工涂装，涂装质量有差距，在危险部位涂装时还存在一定安全隐患。同时，在自动化生产方面，国内大部分还需要人工称重配料，自动化生产比例低，造成生产效率较低。

3.3.3 / 新材料应用进度滞后于国外

在先进海工与高技术船舶材料方面，国内长期缺乏能够统筹上下游环节的平台机制，各环节各自为战、无法形成全领域统筹规划的能力，导致在新材料应用方面长期处于“跟跑国外”的局面。以高强度止裂钢为例，日本在21世纪初即统筹钢厂、研究所、船级社、船厂等多家单位开展材料应用研究和规范制定工作，2009年，日本首先制定国内规范，随后将该规范推向国际船级社协会（IACS），意图凭借先发优势，形成对各国的技术壁垒和竞争优势，而我国直至数年后才开始启动应对工作，虽经后续大量工作实现与日本并跑并在局部领域反

超,但在初期仍避免不了被动应对的局面。再以高锰奥氏体低温钢为例,韩国经过近10年的投入和研究,已实现了在LNG储罐上的应用,该钢种的综合应用成本不到现有镍基合金钢的1/3,极具竞争优势,目前韩国正在将该钢种推向国际海事组织(IMO),并力图将其纳入LNG储罐用钢,形成垄断,我国也是在获悉韩国的工作后才开始这一方面的研究,目前虽已完成了实验室阶段的开发,但距应用还有相当的距离,落后于韩国。

在钛合金方面,俄罗斯和美国等国家开展了大量的应用研究,为新材料的推广应用奠定了基础,俄罗斯船用钛合金研制和考核评价的技术水平规模在国际上处于领先地位,为了验证钛合金建造艇体的可行性,俄罗斯首先建立了耐压壳体用钛合金评价体系。美国针对先进海工与高技术船舶用钛,开展了钛合金系统应用研究,确定了深海装备用钛合金的材料性能指标,具备了建造全钛水下装备的技术能力,为新材料应用奠定了基础。近年来,我国也加快了钛合金新材料的研制和应用研究进度,如耐高温长寿命船用钛合金、高强度高韧性钛合金以及通过表面改性的功能钛合金材料,但与俄罗斯、美国等钛合金优势国家相比,还存在一定的差距。

海洋开发离不开海上钻井平台、深海探测装备等重要作业装备,这些装备服役工况恶劣,长期承受海水腐蚀与海浪冲击。钛合金材料因其独特优势,有望广泛应用于上述装备制造领域,但成本问题一直阻碍应用范围的扩展。随着钛合金制备技术的成熟和提升,以及低成本钛合金的研究突破,关于成本因素的顾虑明显降低。美国已将钛合金大范围应用于近海石油平台支柱、板式换热器等;1991年应用到海洋平台提升装置,较好解决了海水条件下的结构腐蚀和疲劳问题;经过综合评估,使用钛合金件已经具有良好的成本经济性,保证耐腐蚀性的同时大幅减轻装备质量,取得很好的综合收益。

在复合材料方面,国外舰船已大量采用先进复合材料制造。美国“佩里”号护卫舰应用了凯芙拉装甲,效果良好。DDG1000驱逐舰均大量采用碳纤维增强复合材料,使得DDG1000航速达30kn,具有较强的稳定性。美海军舰船在主要和次要受荷载结构上已经使用复合材料,如船体、上层建筑、机座和机械部件,管道、阀门、泵和热交换系统,格栅、楼梯、立柱、通风管道和垃圾处理系统等附属部件。瑞典海军的“维斯比”级轻护舰更是全舰采用碳纤维复合材料,是最长也是最重的全复合材料船舶,长72m,排水量620t,最大速度可达35kn,整体质量减轻了30%,使得整个“维斯比”舰的磁场特征极低,达到了极好的隐身效果。俄罗斯海军22350级护卫舰首舰“戈尔什科夫上将”(Admiral Gorshkov)号上层建筑采用的复合材料为碳纤维/聚乙烯基树脂,能够有效地减少雷达波反射。俄罗斯圣彼得堡涅夫斯基造船厂首次浇铸了世界上最大的复合材料船舶,这艘船体完全采用碳塑材料制成的鱼雷舰,高度8m,排水量2000t,其制造完全采用新材料、新工艺和新技术。俄罗斯制造了当今最大的复合材料扫雷艇,该艇长50~52m,宽10~10.5m,排水量600~800t,航速15kn。我国船舶复合材料目前研究主要集中在材料配方体系、成型工艺等方面,应用上主要以玻璃纤维增强为主,以碳纤维增强乙烯基树脂为代表的高性能复合材料应用较少,与国外差距较大。

在船舶与海洋工程防腐防污材料方面,国外针对腐蚀防护材料应用技术开展了系统的研究工作,研发了一系列具有可减免维护、长效服役寿命、环境友好、高性价比等优良综合性能的

防腐防污材料，建立了完善的实海试验和实验室模拟评价方法，较好满足了船舶及海洋工程全寿命服役期内的安全可靠运行和降低维护成本需求。与国外相比，国内防腐防污新材料应用研究不足，致使推广应用进度滞后于国外，存在有材不好用、有材不敢用等问题。如国外已研制了防污减阻功能一体化材料，在防污期效7年的基础上可减少3%以上航行阻力，节约6%~9%的动力消耗，国内仍处于实验室研究阶段，尚不具备实船推广应用的技术条件。另外，海洋防腐蚀材料的研发、设计和应用是一个系统工程，涉及研究、设计和用户等单位，防腐防污新材料的产学研用需要联合攻关。目前国内涉及防腐防污材料应用研究的单位较多，但没有形成合力，且材料腐蚀数据和试验条件较为分散，一定程度上制约了防腐防污新材料的应用进度。

防护涂层材料方面，随着石墨烯、有机缓蚀剂、生物防污剂、微胶囊等新材料新技术的不断涌现，新一代防腐涂料、防污涂料及特种功能涂料得到发展。但是，新一代防护涂层材料仅能开展局部实船应用验证，还未开展整船或大规模应用评价，影响了新一代防护涂层的应用。同时，由于国内船舶涂料厂家在国外很少有售后服务点，导致相关新材料的实船应用仅限于国内航线，实船应用性能评价不全面，影响了防护涂层材料在先进海工与高技术船舶上的推广应用。

3.3.4 / 产品标准与设计规范制定缺乏自主性

我国在先进海工与高技术船舶材料方面工作的不足导致在产品标准和设计规范的制定上缺乏足够的国际话语权，无法有效主导国际规范的制定，在维护我国先进海工和高技术船舶领域利益方面多处于被动地位。如高强度止裂钢国际规范现主要由日本负责、高锰奥氏体低温钢国际规范主要由韩国主导等。海洋平台用钢方面，目前执行的标准主要包括BS/EN系列欧标、美标API、北海NOSOK及国际船级社规范等，国内缺乏具有自主性的标准。

在钛合金方面，目前钛合金在船上仅实现点式和局部应用，如比较成熟的变形Ti80合金和与之相配套的铸造Ti80钛合金主要应用在舰船装备的设备、通海管路和进排气系统，材料规格小、考核项目较少，大规格钛合金材料应用研究和大型钛合金铸锻件制造技术还不成熟，缺少相应的大规格板材、锻件、型材及相应焊接指标考核体系及设计规范。

复合材料方面，国外建立了船舶复合材料相应的测试考核标准，并对军民范围内的标准进行分析整合，用以指导船舶复合材料的设计应用。美国建立了复合材料寿命预测、舰船材料防火要求、舰船复合材料无损检测方法及能力范围，包括“结构损伤评估系统(SDAS)”、ASTM E632“建立人工加速测试方法预测建筑部件及材料的服役寿命”“海军装备复合材料设计指南”“高温防火材料及防火区隔热、隔音材料的性能规范”“海军舱内船体、机器和结构用复合材料系统的防火、毒性测试方法和认证程序”等。国内目前船体复合材料的标准及设计规范缺项多，大部分结构用复合材料标准及规范尚未制定，主要有已开展多年研究的高性能船舶(高速艇、公务艇、猎扫雷艇等)主船体用抗冲击复合材料、大中型水面船舶上层建筑用系列结构功能复合材料、船舶推进系统(包括中间轴、螺旋桨等)结构功能复合材料等，因此，需要针对这些部位用复合材料开展标准及规范的制定工作。再如豪华游轮用防火阻燃复合材料方面，目前的FTP规则不适用于复合材料，国外对此补充建立了针对复合材料的适用标准和原则，为复合材料的大型船舶应用制定了依据，国内则缺乏相关解读与标准补充。

在船舶与海洋工程防腐防污材料方面，为了有效控制船舶与海洋工程的腐蚀问题，美国、俄罗斯等国家在标准规范制定方面开展了系统的研究工作，已大量制定、修订与腐蚀控制产品相关的标准、规范和文件，逐渐形成了较为完整的腐蚀防护与控制标准系列，并将腐蚀控制工作纳入到船舶与海洋工程的论证、设计、建造、使用和修理全过程中。目前国内在阴极保护、涂料等领域主持编制了多项国际标准，不断扩大国际影响力，但总体上仍主要采用等同国外标准的方法，自主制定的标准规范体系尚不完善。

近年来，在防护涂层材料方面，一批新的标准和规范开始实施或正在制定中，如 IMO TBT-Free A/F（船舶无锡防污漆公约）、IMO PSPC（船舶保护涂层涂装标准）、VOC（挥发性有机化合物）规范、船舶压载水管理公约（Ballast Water Management）、拆船公约等，对船舶涂料与涂装具有重要影响，为了适应船舶国际法规及标准，我国近年来积极参与国际新标准、新法规的制定，并专门成立了船舶涂装工作组及中国 IMO 标准公约应对小组。当前，国内仅主导了少量涂层材料性能评价相关的 ISO 标准，在材料体系规范建设方面亟待加强。

3.4 / 未来发展建议

3.4.1 / 2035 年船舶及海工材料技术预判

船舶及海工高性能结构钢材料突破耐寒低温钢、高性能结构钢和大规格化成型技术等瓶颈，基本满足船舶及海工重要装备的研制需求。完善第三代舰船钢材料体系，实现高性能、大规格结构钢的自主研发和稳定生产，形成完备的船舶及海工钢铁材料产品体系，积极开发高强韧、超低氢船舶及海工装备用焊接材料。产品性能达到国际先进水平，满足船舶及海工装备的建造需求。

钛及钛合金解决高性能新材料、大规格制备、高效优质焊接、快速增材复合制造、应用评价、低成本制造等现有主要技术问题，完善船舶及海工钛合金材料体系，实现关键材料和技术保障的自主可控。同时，优化科技体系和产业体系布局，使钛产业链全流程研发创新能力以及产品性能和生产供货能力达到国际先进水平，满足船舶及海工装备的中长期发展需求，显著扩大钛合金材料的军民应用规模。树脂基碳纤维增强复合材料突破“海洋级”碳纤维材料制备关键技术、复合材料低成本、高精度成型技术和应用评价技术，满足重点装备研制对树脂基碳纤维增强复合材料的需求。“海洋级”碳纤维及其复合材料产品技术达到国际先进水平，基本实现自主生产和保障，为船舶及海工装备的持续发展夯实材料基础，同时实现民用领域的规模化应用。

新型高性能海洋防腐防污材料方面突破关键“卡脖子”防腐防污涂层材料的技术瓶颈，实现在装备上的广泛应用。持续提升船舶和海工防腐涂料的防护期效，防腐防污涂料产品达到国际先进水平，实现仿生减阻涂层材料等先进防护涂层材料的推广应用。重点开展极端环境海洋装备用阴极保护材料研发与应用技术，不断完善电化学保护材料体系，实现智能化、防腐与其他功能一体化、结构健康监测等电化学保护新技术的应用。实现防护涂料和电化学

保护关键材料和技术保障的自主可控，满足船舶和海工重点装备的中长期需求。形成防腐防污材料研发—生产—应用产业体系，显著提高我国在防腐防污产品标准和设计规范制定上的国际话语权。

新型高性能海洋防护涂层材料。针对目前防护涂层材料存在期效短、功能单一、保障能力不足等突出问题，重点突破涂料核心原材料技术瓶颈和新型特种涂料关键性能控制技术，研制系列新一代基料树脂、缓蚀剂、防污剂、特种功能填料等关键核心原材料，大幅提升涂层的防护性能和防护期效，将船舶防污漆期效由当前的3年左右提升至5年以上，船舶防腐漆期效由当前的10~15年提升至15年以上，海工防腐漆期效由当前的15~20年提升至20年以上。加强科研院所的科技成果转化应用，推动重点国企和民企的涂料产品技术发展，加快国外售后服务网点建设，力争国内涂料技术水平达到国际先进。

高性能、低能耗和低污染的新型涂料品种是海洋工程涂料的重要发展方向，其中高固体分涂料是目前发展最快、应用最广的海洋工程涂料品种之一。水性防腐涂料某些性能尚不能达到同类型溶剂型防腐涂料水平，尤其是C5以上腐蚀环境下的应用，尚有进一步提升的空间。同时，聚有机硅氧烷、聚天门冬氨酸酯以及无溶剂环氧涂料等高性能涂料也是未来重要的发展方向。

结合技术发展规律和船舶行业的特点，船舶及海工材料的发展总体上呈现“四超”趋势。

① 超高性能：具有更高的强度、模量、韧性和加工性能，以保障装备的结构强度、刚度和可靠性。

② 超轻质量：减轻结构质量，提高有效负载和稳定性能，并减小制造成本。

③ 超耐环境：更好的耐腐蚀、耐高温、耐持久能力，以提高装备对海洋、油气等恶劣环境的适应性。

④ 超前功能：前沿性和颠覆性仍是材料技术创新的主要方向，也是引领装备升级换代的重要支撑。

3.4.2 / 应用领域发展趋势

“十二五”以来，随着经济转型升级需求的日益迫切和“21世纪海上丝绸之路”的提出，加快海洋资源的开发和利用，已成为我国的重要战略发展方向。海洋产业和经济的高速发展、国家主权权益的维护，必须依靠先进的海洋装备才能实现。先进海工装备和高技术船舶处于海洋装备产业链的核心环节，推动先进海工装备和高技术船舶发展，是促进我国船舶工业结构调整转型升级、加快制造强国建设步伐的必然要求，为此我国已将先进海工装备与高技术船舶的发展列入了国家高端装备制造业发展规划。在2015年5月国务院发布的《中国制造2025》中，海洋工程装备及高技术船舶更是列为十大重点突破领域之一，内容包括大力发展深海探测、资源开发利用、海上作业保障装备及其关键系统和专用设备；推动深海空间站、大型浮式结构物的开发和工程化，形成海洋工程装备综合实验能力、检测与鉴定能力，提高海洋开发利用水平；突破豪华游轮设计建造技术，全面提升液化天然气船等高技术船舶国际竞争力，掌握重点配套设备集成化、智能化、模块化设计制造核心技术。

经过几十年的发展，我国已成为海工装备与船舶的制造大国，目前，我国已经是世界第

一造船大国，高技术高附加值船舶不断取得突破，海洋工程装备及高技术船舶发展明显提速，深海装备的设计建造不断取得进展。但就技术角度而言，我国目前在该领域仍处于以低技术水平产品为主的第三梯队，高端产品主要掌握在以欧美为主的第一梯队和以日韩为主的第二梯队手中。我国长期以来先进海工与高技术船舶材料研发、生产与应用领域的相互脱节以及关键环节自主保障能力不足是造成这一局面的重要原因。建立先进海工与高技术船舶领域新材料生产应用示范平台，可有效整合产业链各环节优势资源，加速生产应用技术迭代，实现上下游协同发展，进而有力推动我国先进海工与高技术船舶的发展，提升国际竞争力。

材料是装备发展的基础，高性能材料是先进海工与高技术船舶发展的基本保障，主要分为结构材料和功能材料，包括高性能钢、钛合金、复合材料、防腐防污材料及其他材料。为满足装备的发展需求，一方面需根据装备实际使用条件，对材料的各项性能进行系统而全面的评价，进一步给出材料的性能改进与生产优化的技术建议，使材料性能更好地满足使用条件的要求；另一方面需建立材料用于装备建造的各种工艺（焊接、冷热加工、成型等），形成相应的工艺文件和标准，提高装备的建造效率和质量并保证装备使用的安全可靠。

目前，为了满足我国造船工业乃至整个海工装备快速发展的要求，加快推动先进海工装备用核心关键材料国产化和升级换代已成当务之急。

3.4.3 应采取的相应对策

在国家政策引领和国家相关部门、部委指导下，依托国防系统专业从事船舶材料研制及应用研究的中国船舶集团有限公司第七二五研究所，联合国内在先进海工与高技术船舶材料研制、生产、应用领域相关优势企业、科研院所，建立先进海工与高技术船舶材料生产应用示范平台。

平台立足船舶和海洋工程领域，将在构建新材料上下游协同研发、创新机制，打破技术与行业壁垒，填补生产应用衔接空缺，推动船舶与海工新材料的研究开发以及推广应用方面发挥重要作用。

① 建立先进海工与高技术船舶材料生产应用示范平台，促进军民融合协调发展，推动先进海工装备用核心关键材料国产化和升级换代，推动国防建设与经济建设的良性互动。通过整合国内海工与高技术船舶行业具有优势的一批材料研发单位、生产单位、应用单位和规范制定单位，可实现军用舰船装备材料的生产应用研究成果在民用高技术船舶上的部分转化应用。同时，高技术船舶材料的研究工作成果也可对现有军用舰船材料研究体系作进一步完善和补充。因此，建立依托于军工研究单位的先进海工与高技术船舶新材料生产应用示范平台，促进军民融合协调发展，是推动先进海工装备用核心关键材料国产化和升级换代的有效途径。

② 建立先进海工与高技术船舶材料生产应用示范平台，解决先进海工与高技术船舶材料研制、生产和应用“被动跟跑”，提升国际话语权。我国在先进海工与高技术船舶材料领域虽已取得了长足进步，但与世界先进水平仍存在较大差距，主要表现在：产品研发思路主要沿袭国外，产品以仿制国外成熟低端产品为主，市场占有率低；关键的材料应用研究不足导致我国在绝大部分高技术船舶材料技术规范制定方面没有国际话语权，处于“被动跟跑”的局面。通过建立先进海工与高技术船舶新材料生产应用示范平台、构建上下游有效协同机制，

可实现材料工业化生产单位、应用评价单位与应用单位的沟通协调与资源共享，促进新材料与新装备的协同发展，建立具有自主知识产权的新材料生产应用体系，提升我国在先进海工与高技术船舶材料领域的国际话语权。

③ 建立先进海工与高技术船舶材料生产应用示范平台，有效推动相关领域行业的技术进步和产业升级。通过建立先进海工与高技术船舶新材料生产应用示范平台，一方面，针对材料的工业化生产技术的研究，可有效推动新材料的性能提升、应用规范的升级、新材料及相关配套产业的孵化；另一方面，针对材料的应用研究成果可为先进海工与高技术船舶的设计建造提供必需的技术依据，提升设计建造技术水平，促进以激光焊、增材制造等为代表的先进高效建造和成型工艺的应用，满足未来装备模块化、数字化、精准化建造需求，进而推动相关行业的技术进步和产业升级。

参考文献

- [1] 周廉. 中国海洋工程材料发展战略咨询报告[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [2] 杜敏, 孙明先, 杨朝晖, 等. 海洋构筑物阴极保护[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [3] 侯保荣, 等. 中国腐蚀成本[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [4] Thompson N G, Yunovich M, Dunmire D. Cost of corrosion and corrosion maintenance strategies[J]. Corrosion Reviews, 2011, 25(3-4): 247-262.
- [5] 金晓鸿. 防腐涂装工程手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [6] 王东. 水性船舶涂料的应用研究[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(8): 73-78.
- [7] 钱建华, 汪成宿. 模块化阴极保护远程监测系统设计与实现[J]. 全面腐蚀控制, 2020, 34(05): 48-53.
- [8] 肖千云, 吴晓光, 等. 舰船腐蚀与防护技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2011.
- [9] 黄雨舟, 董丽华, 刘伯洋. 铝合金深海腐蚀的研究现状及发展趋势[J]. 材料保护, 2014, 47(1): 44.
- [10] 詹晖. 海洋石油导管架平台外加电流阴极保护优化设计[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [11] 陈凯锋, 亓海霞, 张心悦, 等. 极地船舶用低温耐磨涂料的制备及性能研究[J]. 涂料工业, 2020, 50(10): 27-32.
- [12] 凌晨. 绿色化学与防腐蚀技术的发展方向探讨[J]. 中国高科技, 2018(01): 19-21.
- [13] 许立坤, 马力, 邢少华, 等. 海洋工程阴极保护技术发展评述[J]. 中国材料进展, 2014, 33(02): 106-113.
- [14] 刘登良. 中国船舶和重防腐涂料发展回顾和展望[J]. 中国涂料, 2007, (02): 7-9.
- [15] 张明慧, 郑艳娜. 海洋工程应用现状及其发展前景[J]. 山西建筑, 2016, 42(01): 253-255.
- [16] 中国机械工程学会无损检测分会. 无损检测发展路线图[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2020.
- [17] 耿荣生, 景鹏. 绿色无损检测—NDT技术的未来发展之路[J]. 无损检测, 2011, 33(9): 1-6.



作者简介

王其红，中国船舶集团有限公司第七二五研究所所长，研究员。兼任我国某海军重要装备型号总体系统副总设计师，是中央军委装备发展部先进材料专业组特聘专家；海军装备部海军舰船装备技术保障专家、国家国防奖主要评委。

先后主持舰船材料“九五”“十五”“十二五”材料发展规划，作为舰船材料体系的技术负责人之一，参与出版《舰船材料体系》等专著。享受国务院政府特殊津贴，获省部级科技进步奖6项，总装备部预先研究先进个人，河南省国防科技系统先进工作者，中船重工质量管理先进工作者，获河南省五一劳动奖章等荣誉。

孟祥军，中国船舶集团有限公司第七二五研究所科技委研究员，硕士生导师。多年从事船用钛合金的应用研究及钛合金制品的开发工作。主持完成多项国防重点预研项目；开发多项型号研究、研制项目。撰写并发表科技论文和报告 30 余篇，发明专利 3 项。

先后获国家国防科工委科技进步二等奖 1 项，国家国防科工委科技进步三等奖 1 项，国家工业和信息化部科技进步二等奖 1 项。

第 4 章

高速铁路装备新材料

孙琳 崔健 高宝杰 台永丰

4.1

高速铁路装备材料概述

近年来，我国高铁（高速铁路）已形成规模化、网络化运输体系，轮轨和磁浮技术体系协调发展，形成了丰富的产品谱系，涵盖速度 50~350km/h 等级、20 余种型号动车组产品。高速列车运营速度、综合舒适度、安全性、可靠性、节能环保等各项综合技术指标优良，部分指标国际领先。我国在创新研发高铁的历程中，坚持推进国产化和打破垄断工作，保证高速动车组自主、可持续健康发展，形成完整的产业链。另外，我国高铁装备制造业也面临着发达国家遏制、内力支撑不足、知识产权壁垒等挑战，中国高铁要保持领先地位和持续健康发展，需持续推动对外方来源依赖的部分材料和技术的自主化，打破技术与行业封锁。

高速铁路装备材料是我国高铁快速发展的基础，材料对整车安全、环保性、舒适性等性能具有重要影响。高速列车服役环境复杂多变、超大系统耦合作用关系复杂，随列车设计速度逐步提高，车-线-网-气流大系统耦合作用更加剧烈，对高铁装备材料的力学性能、减振降噪性能、轻量化等提出更高要求。铝合金、轮轴钢、碳纤维复合材料等结构材料、各种功能材料将在我国高速列车发展中起重要作用。图 4-1 所示为“复兴”号动车组装备材料应用现状。

铝合金型材和板材：目前国内 CRH2、CRH3、CRH5、CRH380、“复兴”号等高速动车组车体承载结构都批量化采用了铝合金（大截面）型材、板材焊接（MIG、TIG、搅拌摩擦焊等）结构，执行 TB/T 3260.1—2011 标准，型材主要采用 6A01-T5、6005A-T6 和 6082-T6 状态合金，板材主要选用 5083 和 6082 合金，均已实现国产化且批量装车。以“复兴”号标准动车组为例，CR400AF 型动车组车体主断面型材均采用 6A01-T5 状态合金，端部底架承载型材和板材采用 7B05-T5 状态合金，其余部位型材采用 6A01-T5 状态合金，板材采用 5083 合金。CR400BF 型动车组车体主断面型材均采用 6005A-T6 状态合金，底架前端承载型材采用 6082-

T6 状态合金，其余部位型材采用 6005A-T6 状态合金，板材采用 5083 合金。高速磁浮用铝合金型材、板材同样采用 6 系和 5 系铝合金。

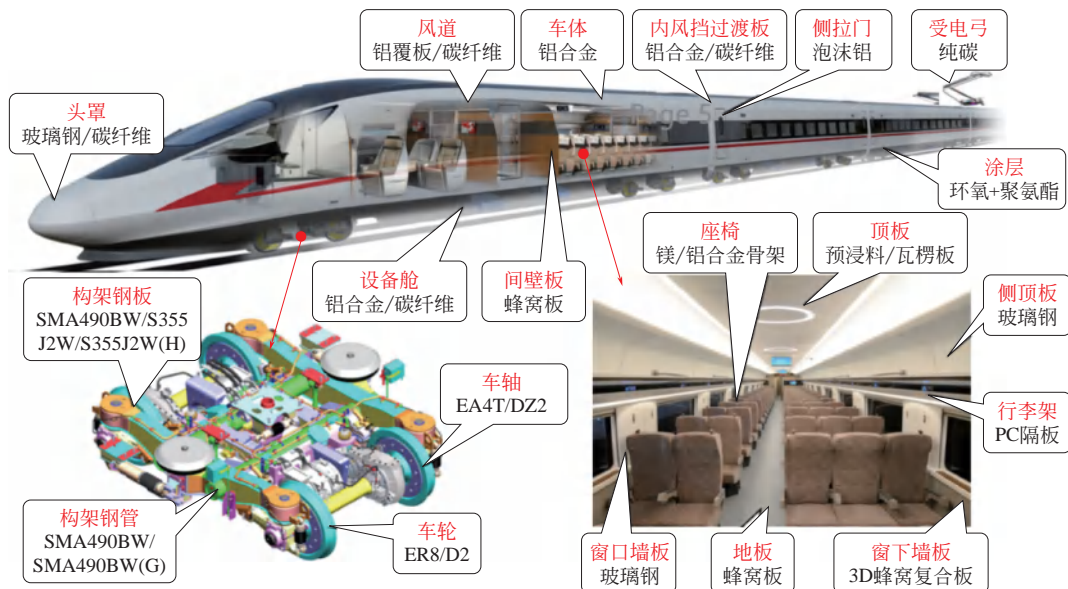


图 4-1 “复兴”号动车组装备材料应用现状

铝合金锻件：国内高速动车组轴箱体、磁浮列车牵引拉杆、制动拉杆、车钩使用了锻造 7050-T74 和 6082-T6 状态合金，其中高速动车组轴箱体每辆车用量达 256kg，磁浮列车用量达 84kg。国产锻铝轴箱体正在研制中，磁浮列车牵引拉杆等已验证成功，待批量应用考核，暂无在产批量车型。

铝合金铸件：目前部分车型动车组枕梁（CRH3 型车、CR400BF）以及齿轮箱已经陆续采用铝合金铸件；磁浮列车悬浮架用托臂、空气弹簧支架、滑橇壳、夹层 ASG 机箱、设备箱也采用铝合金铸件，高速动车组轴箱体每辆车用量达 1320kg，磁浮列车用量达 4426kg。国内多家企业已开展磁浮列车 ASG 熔模铸造研制，但目前尚未成功。磁浮列车用托臂、摇枕、滑橇壳、X 连接器座（ZL101A）等已研制成功，预计 3 年内通过装车运用考核。动车组的国产铸造枕梁和齿轮箱已批量应用，在产车型为 CR400BF。

轮轴钢：在高铁技术引进之前，我国车轮材料牌号为 CL60 钢，车轴材料牌号为 LZ50 钢，主要应用于货车车辆和速度小于 200km/h 等级的客车上，不适用于高铁产品。2007 年，全国铁路实施了第六次大提速，从这时期开始我国铁路陆续引入了速度为 200km/h 及以上的动车组列车，作为列车关键走行部件的轮轴也一起被同期引入，其中车轮普遍选用的材质有 ER8、ER9 和 ER8C，车轴材料有 EA4T、30NiCrMoV12、S38C。

碳陶摩擦材料：国内外制动盘的传统材料仍主要以铸钢、锻钢等为主。碳陶摩擦材料具有密度低（约 2.0g/cm³）、耐高温、能载水平高、寿命长和全环境适用等优点，被公认为极具竞争力的新一代磨耗材料。其目前在动车组受电弓碳滑板以及高速磁浮列车用滑橇摩擦块具有较强的应用前景。

电磁屏蔽涂料：现有电磁屏蔽涂料主要为导电涂料，所加导电性填料一般是金、银、铜、镍等金属粉末和炭黑、石墨等非金属粉末。金粉和银粉的导电性和化学稳定性好，但价格昂贵，使用受到限制。铜粉和镍粉的性能与银粉相近，但易氧化，导电性不稳定，所配置的电磁屏蔽涂料耐久性较差。炭黑、石墨粉末作为导电填料，分散性好，价格低廉，但导电性较差。我国对于电磁屏蔽涂料方面的研究主要集中于1GHz以上的微波隐身材料，对于10kHz~1GHz范围的电磁屏蔽涂料的研究较少，未形成产品的系列化和产业化。

减振降噪材料：车体的轻量化往往造成车体局部刚度不足、隔声性能变差，从而增加了车内低频噪声。如何在保证车体轻量化的同时，保证材料刚度，同时提高其隔声性能，是减振降噪新材料研发重点。现有高分子减振降噪材料品种较多，实际使用中往往不是某种高分子材料单独使用，经常需要结合使用。同时，还需兼顾车内和车外的减振降噪材料的工艺和环境适应性要求，形成一系列适用于高速列车不同部位的减振降噪材料体系。

4.2 新材料在高速铁路装备上的应用

轨道交通将在安全、高速、高效、绿色、智能等方面持续提升，产业规模将快速发展（计划至2020年，国内列车总量超过3800组，国外订单规模化增长），服役环境复杂多变，服务品质不断提升，这将对装备材料的应用提出新需求、新挑战。高铁需要综合性能优良的新型材料，提供高效可靠、节能环保的解决方案。我国高速铁路装备材料产业经过十几年发展取得了较大进步，但仍有许多新材料处于培育发展阶段，部分材料仍然依赖进口，部分关键基础性材料还制约着高铁装备技术水平的持续提升。高性能铝合金型材和板材、锻造铝合金、轮轴钢、碳纤维等材料和制造工艺与国外还有一定差距，导致成品率低、部分承载部件质量和可靠性与国外差距明显，轮轴和摩擦材料仍然依赖进口。高铁装备用的高性能铝合金、高强度钢等结构材料，以及高性能摩擦材料、特种涂料、减振降噪等功能材料，还存在批次稳定性差等问题。碳纤维复合材料是高速列车轻量化极佳的备选材料，对车辆减重、提速、降噪、降低能源消耗具有重要的现实意义，目前碳纤维复合材料在轨道交通领域还未大批量应用，存在缺乏行业测试评价标准及服役考核数据等方面的问题。因此，需要建立材料上下游产学研用联合体，多方共同投入，发展新材料技术和应用示范，推进我国高铁装备全产业链技术水平向更高层次迈进。

（1）新材料应用对高速列车的安全性和可靠性有重要意义

通过高性能铝合金、碳纤维复合材料、轮轴钢等自主化材料的应用，一方面，可以摆脱关键材料和部件对外方和单一来源的依赖，降低研发成本，健全材料应用标准体系，推动我国新材料产业化发展；另一方面，可以提高高速列车结构的安全性和可靠性，有助于解决高速列车随速度提升、振动加剧带来的结构安全性、振动模态匹配等问题。

（2）新材料应用有利于实现车体轻量化，提高舒适性和节能水平

高速列车在高速条件下的振动、冲击、阻力、噪声等技术挑战愈发凸显，并且在应对高原、沙漠、高温、高寒及高海拔等复杂多变的服役环境时，传统金属材料应用也迎来更多挑

战。高性能铝合金、碳纤维复合材料的应用可进一步实现列车轻量化，降低轴重，平抑速度等不利因素，解决轻量化与列车性能（强度、振动、噪声、隔热、辐射）的矛盾，探寻列车技术性能最佳平衡点。

车体轻量化可降低能耗和检修维护成本。例如，使用碳纤维复合材料，较传统铝合金结构可减重 30% 左右。据估算，CRH380A 动车组以 300km/h 在京沪线运行时，人均百公里能耗为 3.64 度电，此时的能耗风阻约占 80%，摩擦阻力约占 20%。若整车减重 30%，则可实现人均百公里能耗降至 3.05 度电，实现节能减排。同时碳纤维复合材料具有高强度（约为铝合金的 4 倍）、耐腐蚀（不涂装条件下仍可通过 500h 盐雾试验考核）、轻量化等性能，可以在列车全寿命周期检修维护管理过程中，有效降低维护频次、维护成本及检修难度，综合提高轨道交通装备性能。

（3）新材料应用对材料行业的产业升级带动作用明显

新材料应用将推动高速铁路装备基础材料和基础工艺技术的持续提升，包括高性能铝合金、碳纤维复合材料、高强度钢等结构材料以及高性能摩擦材料、特种涂料、减振降噪等功能材料在材料研发、设计仿真、制造工艺、检验检测和服役运维等方面全寿命周期的关键技术，提高材料批量稳定性、成品率、质量可靠性。同时，以材料在高速铁路装备的应用为牵引，促进我国材料生产企业的工艺优化，建立新材料生产、应用的平台体系，完善评价设施和评价技术指标体系，建立社会公共服务平台，面向国内相关行业单位提供检测评价、技术咨询、联合开发、数据共享等公共服务，推动行业的自主健康快速发展。

高铁装备制造业的快速发展有效推动我国铁路装备新材料规模化应用。以铝合金为例，目前 90% 的高铁动车组采用了铝合金焊接车体，每辆车体铝合金用量约为 9~13t，有效带动了铝锭、高性能铝合金型材、模具、加工等铝合金产业链的发展。

4.3 存在问题与挑战

我国高速铁路装备材料产业经过十几年发展取得了较大进步，但仍有许多材料问题亟待解决，部分材料仍然依赖进口，随着科技进步，新材料不断涌现，部分新材料应用验证尚不完善。

（1）高强度铝合金

车体结构的进一步轻量化，依赖于具有更高强度、更高综合性能铝合金材料的开发和应用，但前提是要解决当前存在的一系列问题。

① 高强度铝合金的应力腐蚀问题。高强度铝合金一般具有较强的应力腐蚀开裂倾向，严重降低结构件的可靠性，缩短寿命，因此，提高其抗应力腐蚀开裂能力是人们不断追逐的目标。解决方案为基于基础研究，结合工程实际，优化铝合金材料的成分设计、塑性加工和热处理工艺，精细调控铝合金材料的基体组织和第二相，保证铝合金强度提高的同时，获得良好的抗应力腐蚀开裂能力和其他综合性能。

② 高强度铝合金的焊接问题。列车车体制造通常需要采用焊接工艺实现铝合金材料的连接。高强度铝合金由于 Zn、Mg 等合金元素含量较高，在熔化焊接的过程中容易出现吸气、裂纹等问

题，焊接接头质量差，力学性能、疲劳性能、韧性、耐腐蚀性能大大降低，满足不了要求。解决方案为综合考虑铝合金材料本身，以及不同的焊接方法和工艺（如 MIG 焊接、搅拌摩擦焊接、激光焊接）对接头拉伸性能、耐腐蚀性等的影响，建立适用于高强度铝合金高质量连接的焊接技术。

③ 高强度铝合金的精密塑性成型问题。列车车体组装时，要求具有极高的装配精度，对铝合金结构件尺寸精度提出了高要求。采用高强度铝合金型材、板材、锻件成型加工各种结构件，受加工装备、工模具、材料回弹、残余应力等因素的影响，结构件加工成型的精度问题突出。解决方案为综合考虑材料塑性成型工艺与材料成型特征，研究不同工艺下的塑性流变特征、材料回弹及残余应力释放方式，建立适用于高强度铝合金制造的精密塑性成型技术。

④ 基于铝/其他材料混合车身的连接及防腐问题。在制造列车车体时，铝合金与其他材料的连接是不可避免的。因此，如何提高铝与其他材料连接处的强度及耐腐蚀性等也是一个突出的问题。针对铝与其他材料连接要求，通过拉伸、扭转、剪切、疲劳试验与连接防腐实验等多种测试和评价手段来评价连接接头性能、连接效果及其可靠性，建立适用于铝与其他材料连接的方法及工艺规范，积累并形成铝与其他材料连接工艺、力学性能和腐蚀性能等的数据库。

(2) 碳纤维复合材料

目前设计仍以材料的等刚度替换为主，尚未充分发挥碳纤维复合材料可设计性强的特点，还需深入挖掘碳纤维复合材料特性进行多样化设计。

工艺方案以碳纤维复合材料传统成型工艺（热压罐、模压）为主，正探索适合轨道车辆特点的低成本、高效率成型工艺。

仅通过全尺寸结构试验对碳纤维复合材料部件结构进行验证通常是不完整的，需要开展大量的试样、元件、组合件、部件等不同级别的试验来证实，即使用积木式试验方法进行结构强度完整性验证，目前尚未系统开展相关工作，缺少相关数据库。

(3) 轮轴钢

车轮、车轴既要承受车辆承受的载荷传递到钢轨，又要承受牵引制动载荷、冲击载荷等作用，工作服役环境十分复杂。因此车轮和车轴必须具有高强度、高韧性、抗高周疲劳性能和良好的耐磨性能，并且对车轮钢、车轴钢材料的洁净度、致密性、强韧性、生产工艺和检测条件要求也很高。

目前我国既有动车组所用的轮轴仍主要以进口为主，欧洲车轴采用低碳合金钢，制造技术路线为调质处理，制造工艺成熟稳定，和车轮一样，车轴制造标准对性能指标规定比较详细；而日本标准车轴采用碳素钢，热处理工艺采用表面高频淬火，且制造标准成分、性能规定项点非常少，制造技术完全隐藏在制造厂手中，不能实现技术推广。国产轮轴钢在批次稳定性方面与进口产品存在一定差距。高铁轮轴在关键共性技术的开发方面具备了一定的自主化水平，通过小批量试验运行数据的积累与国外的比方面，综合运行数据与国外水平相当，当前主要存在的问题是由于试验车辆数量较少，可靠性未得到进一步的验证。

(4) 碳陶摩擦材料

国内碳陶摩擦材料主要采用传统的 CVI（化学气相渗透）、PIP 和 MSI 技术，制备工艺过程复杂、周期长、加工难度大，应用领域十分有限，难以大规模工业化推广，尤其是在普通

民用制动领域。

成本方面，碳陶摩擦材料因生产中使用碳黏预制体及大型沉积设备，制备成本高；同时为实现材料致密化，制备过程需要进行多次浸渍沉积，极大地增加了工作周期，增加了生产成本。

技术成熟度方面，碳陶摩擦材料是继碳/碳复合材料发展起来的一种新型材料，在其制造、检验方面的标准目前在国内均为空白，缺乏结构性能试验方法和试验考核验证机制。高速列车碳陶制动盘应用上急需解决面临的制造成本高、结构可靠性低、紧固连接困难三大问题。

(5) 电磁屏蔽涂料

电磁屏蔽涂料技术水平的高低直接影响着最终防护效果，同时缝隙防护、可视屏蔽、线缆防护、结构屏蔽材料等成为电磁防护设计中的重点产品。欧、美、日等已经为高铁装备配套各种系列规格的电磁屏蔽涂料产品，在宽频段、高频效、抗毁伤、抗恶劣环境、轻质、高强度等方面也有了很好的解决方案。与国外知名企业相比，国内在系统化解解决车辆各个防护部位所需的电磁屏蔽涂料技术的水平方面有一定差距，尤其在轨道车辆较为关注的低频电磁波防护领域方面差距明显，国内电磁屏蔽涂料主要在 100kHz~18GHz 频率范围研究成熟，频效可达 35dB 以上，已形成产业化。但对于低频磁场 ($\leq 100\text{kHz}$) 电磁防护的研究起步较晚，最近几年各科研单位才开始进行大量的研究工作，并且在实验室阶段取得了一定的科研成果。高铁用电磁屏蔽涂料在应用中主要存在的问题是批量化应用的性能可靠性未得到验证。

(6) 减振降噪材料

高分子减振降噪材料品种较多，实际使用中往往不是某种高分子材料单独使用，经常需要结合使用。减振降噪材料应用过程中面临以下难题。

① 工况环境复杂。不同的高分子材料环境适应性不同，高速列车运行地域广，运行时间长，车内和车外的减振降噪材料的环境适应性要求也不同，需要生产适用于高速列车不同部位的减振降噪材料。

② 结构复杂，施工难度大。高速列车轻量化及强度要求都在不断提高，高速列车结构设计越来越复杂，零部件的布局设计要精细，空间利用要合理，减振降噪材料的施工部位与施工方式要有机结合，既要保证施工的效率，又要保证减振降噪效果。

③ 考核复杂。高速列车需要进行减振降噪处理的部位多，使用的减振降噪材料不同，施工工艺不同，减振降噪及其他综合性能的考核复杂。

4.4 / 未来发展

4.4.1 / 铝合金材料

(1) 2035 年技术预判

21 世纪以来，我国的铝加工产业快速发展，铝材的生产和消费总量已连续多年保持在全球的 50% 左右，新建工厂和新建生产线装备的后发优势明显，普遍居世界先进，甚至领先水平，

但仍存在产能结构性过剩、产品附加值普遍不高、原创产品和技术缺乏等问题，特别是在航空航天用铝合金材料、汽车覆盖件铝合金板、特殊用途铝箔等高端产品方面，国内虽已解决了有关问题，但产品的竞争力不足，制约了我国铝加工产业发展质量的进一步提升。未来，受国家产业升级转型的影响，铝合金材料及其加工技术将向高综合性能、高品质、工艺精细化、设备智能化方向发展，预计到2030年，国产各类铝合金材料将普遍达到国际先进水平，部分达到国际领先水平，产品附加值和市场竞争力大幅提升，基本满足我国先进制造业发展需要；其中，航空航天用高性能铝合金材料的产销量将突破 10^5 t/a，汽车、轨道交通列车和船舶制造用铝合金材料的产销量将突破 10^6 t/a。预计到2035年，我国有望成为全球最重要的铝加工生产基地、铝合金材料创新基地，引领全球铝加工产业的发展。

在高铁列车制造用铝合金材料方面，虽然面临碳纤维复合材料的挑战，但铝合金材料成本低、易加工等天然优势依然明显，伴随着铝合金材料综合性能的不不断提升，仍将在高铁列车制造用材方面保持较强的综合竞争力。预计到2030年，轨道交通用新一代铝合金材料（含型材、板材和锻件）的比强度将比现用铝合金材料提升25%以上，同时仍能够保持良好的耐腐蚀和焊接性能，且生产成本基本保持不变；预计到2035年，轨道交通用更新一代铝合金材料的比强度将比现用铝合金材料提升40%以上，比刚度提升10%以上，耐腐蚀性能和焊接性能优良，且生产成本不会大幅度上升。

(2) 应用场景

未来，铝合金材料（含型材、板材和锻件）仍将是新型高速列车制造最重要的候选材料，主要应用于高速列车车体结构件、底盘系统中的轻量化结构件、车体内部座椅和其他结构件等。

伴随着新型铝合金材料应用所带来的力学性能提升、耐腐蚀性能和焊接性能改善，将支撑新型高速列车中的各种结构件采用更加薄壁的轻量化减重设计，甚至可基于新型铝合金材料自身相对密度的降低和综合性能的提升，支撑采用结构件“等体积减重”设计，从而支撑新型高速列车车体的进一步轻量化、高可靠、长寿命设计制造。

(3) 思考与建议

截至目前，国产高铁列车制造所使用的铝合金材料，仍基本仿制国外20世纪60—80年代开发的产品。21世纪以来，伴随着我国铝加工产业的快速发展，中国铝加工企业已经拥有了国际一流的装备和规模体量，研究院所和高等院校的实验室硬件水平、科研团队能力水平也得到了大幅度提高，已开始与西方国家同场竞技，为我国铝加工产业从跟踪研仿逐步迈向自主创新奠定了基础。如果能够以新一代高铁列车的发展为牵引，全面带动轨道交通用新一代铝合金材料的研究开发、工业化生产和装车应用，不仅可以支撑新一代高铁列车的研制生产，而且可以带动我国的铝加工产业迈上一个新的台阶，率先抢占未来发展的制高点。

4.4.2 / 碳纤维复合材料

(1) 2035 技术预判

目前，我国的轨道交通建设正处于繁荣时期，给碳纤维复合材料在轨道交通的应用带来

很大的机遇及挑战。在 2035 年左右，碳纤维复合材料在轨道交通上的应用将取得一定阶段性的成果。首先是碳纤维复合材料成本的改善，在保证碳纤维复合材料性能的基础上，降低其制造成本，加大碳纤维复合材料在轨道交通车辆上应用，实现减重 30% 以上的轻量化目标，并且成本降低 15%；其次是碳纤维复合材料车体的制造工艺以及结构设计水平将有明显的提升，通过借鉴航空航天和军工领域的先进结构设计，来突破和完善轨道车辆研发技术，使得碳纤维复合材料车辆的制造成本降低；最后是碳纤维复合材料转向架将会转向应用研究阶段，通过碳纤维复合材料的制造工艺和结构设计水平提升，将碳纤维复合材料应用到转向架中，实现减重 30%~40% 的目标。

未来交通装备碳纤维复合材料除了实现轻量化之外，还将向着高性能化、多功能化、低成本化等方向深入发展。

① 高性能化。碳纤维复合材料需瞄准大型结构部件，这要求其不仅具备良好的强度刚度，还需要具备一定的塑性，以保持较高的综合性能。而随着节能、降耗的要求日益提高，轻量化是交通装备发展的重要方向，这为碳纤维复合材料的应用和提升提供了巨大的空间和迫切的要求。

② 多功能化。随着碳纤维复合材料技术的日益成熟及应用领域的不断扩大，在满足力学性能要求的基础上，实现多种功能的协同作用将是重点发展方向，如隔热、减振降噪等。

③ 低成本化。与金属材料相比，成本高仍然是制约碳纤维复合材料应用的重要因素。未来，低成本化将是碳纤维复合材料发展的大趋势和永恒主题。实现低成本化的途径包括：采用高生产效率、高成品率并能充分发挥材料性能的制造工艺，合理的材料设计和应用，针对产品的形状、尺寸、结构和使用要求采用合理的制造工艺等。

(2) 应用场景

随着碳纤维复合材料价格下跌，其优异性能将被广泛应用于民用各行各业。汽车行业中“轻量化”和风电行业中“大型化”将占据大量碳纤维复合材料份额，计划于 2020 年，全球碳纤维复合材料总量中，汽车行业达到占比 23%，风电行业占比 21%。

航空航天领域，碳纤维复合材料广泛应用于火箭、导弹和高速飞行器等的主机翼和机身。能源领域，随着风电叶片长度的增加，既要减轻叶片的质量，又要满足强度与刚度要求，有效的办法是采用碳纤维复合材料。国内已经完成真空灌注超过 70m 长的碳纤维风电叶片大梁。交通运输领域，碳纤维制品因具有卓越的力学性能成为汽车轻量化的首选材料。低成本、高性能的 CFRP 生产工艺和配套装备是推进碳纤维复合材料在汽车轻量化应用的根本动力。大丝束及其展纱技术可提供低成本生产原料，3D 预成型体织造技术可提高零部件性能，树脂固化时间大大缩短，提高了生产效率。其他领域，如混配模成型、页岩气及氢气存储和转运、加气站的耐高压容器、碳纤维增强水泥、碳纤维格栅增强混凝土、碳纤维格栅除冰公路及桥梁建筑维修、充电电池、燃料电池、电磁屏蔽塑料、通信和商用机器等领域。

国内碳纤维复合材料在轨道交通领域的应用研究起步较晚，但发展迅速，目前正在开展或已完成了承载件、次承载件、非承载件的典型部件的研制，减重效果明显，部分部件已完成试验验证及运营考核，充分证明碳纤维复合材料在轨道交通部件应用的可行性及发展前景。

① 大型承载部件应用。中车青岛四方机车车辆股份公司联合中德研发中心研制了下一代碳纤维复合材料地铁列车。新一代地铁车辆采用先进的碳纤维技术，车体、转向架构架、司机室、设备舱及设备机体等均使用碳纤维复合材料制造，是大规模应用碳纤维复合材料的地铁车辆。特别是成功突破碳纤维复合材料大型复杂件结构设计、制造成型等关键技术，实现了碳纤维复合材料在车体、转向架构架、司机室等车辆主承载结构上的全面应用。与采用钢、铝合金等传统金属材料相比，新一代碳纤维复合材料地铁车辆的车体、司机室、设备舱分别减重 30% 以上，转向架构架减重 40%，整车减重 13%。

长春轨道客车股份有限公司与 Fordyno 公司、中国航天研究院 703 所联合开发了无网超能有轨电车——武汉东湖“光谷量子号”，是一列由 5 辆碳纤维复合材料车体组成的列车，于 2018 年 9 月 7 日在长春轨道交通展上首次面向公众展出。本列车交付后成为中国首列用于运营的全碳纤维复合材料轨道列车。

悬浮架构架方面，中车株洲电力机车有限公司完成了中低速碳纤维复合材料悬浮架构架的研制，减重 30%，减少零件数量 200 多个。

② 次承载部件应用。

- 司机室头罩研究方面。中车青岛四方机车车辆股份公司制造的碳纤维复合材料司机室头罩应用于速度为 500km/h 高速试验车，该产品采用液体成型制造技术，满足阻燃要求，能抵抗 1kg 铝弹、660km/h 的高速撞击和 137kN 的静载荷，同时较玻璃钢头罩减重 25%，安全性和疲劳性能得到极大的提高。中车唐山机车车辆有限公司研制的中速磁浮碳纤维复合材料司机室外罩采用烘箱工艺，降低了制造生产成本，满足力学要求；中车株洲电力机车有限公司在地铁车辆上试用了碳纤维复合材料头罩和碳纤维复合材料导流罩，碳纤维复合材料头罩相比玻璃钢头罩减重 20%，2018 年在动车组、轻轨车辆上装车试用碳纤维复合材料司机室头罩。

- 设备舱方面。中车青岛四方机车车辆股份公司研制了中国标准动车组碳纤维复合材料设备舱，初步探索在高速列车大型结构件上的应用。采用模块化设计结构，可单件也可模块整体拆装。较铝合金结构减重 35%，可承受振动、地面效应及冲击和高温、高湿、风雪侵蚀，各项性能指标不低于铝合金设备舱性能。中车唐山机车车辆有限公司研制的碳纤维复合材料设备舱，根据不同部件的特点选用适合的复合材料成型工艺方法，减重达 36%，已应用于速度为 400km/h 的高速动车组。

③ 非承载部件应用。中车时代新材公司研制的碳纤维复合材料牵引逆变器柜体，采用整体成型及胶接工艺，大大减少零件数量，组装方便，产品尺寸精度高，密封效果好，采用碳纤维复合材料和预埋金属网结构满足电磁屏蔽的要求，较传统碳钢柜体减重 60% 以上，较铝合金柜体减重 15% 以上。

中车青岛四方车辆研究所有限公司研发生产了新一代碳纤维复合材料司机操纵台，主框架由原铝合金材质更换为碳纤维复合材料，在设计层面，充分利用碳纤维复合材料的可设计性优势，将多部件整合为单一部件，提高产品的尺寸精度，降低装配难度，并在一定程度上增强产品的强度、刚度。较以往同类型铝合金材质产品达到了减重 30% 的轻量化指标，现已进入批量供货阶段。

(3) 思考与建议

•••

目前国内基本型（T300 级）碳纤维复合材料的研制已取得突破，高性能碳纤维复合材料

应用技术也日趋成熟，应用部位也由次承载构件扩大到主承载构件，材料由单一功能向多功能、结构功能一体化转变。近几年，中车各子企业已组织完成了一些技术探索研究工作，如地铁车辆样机试制，司控台、空调导流罩等小批量部件的研制运用均获得成功，其功能特性及轻量化指标均满足了设计要求。但是，碳纤维复合材料在轨道车辆的推广应用过程中，也面临一些待解决问题，主要表现在：碳纤维复合材料成本较高，高性能环氧树脂性能稳定性较差，适合轨道车辆的低成本高效率成型技术有待深入研究，轨道车辆碳纤维复合材料标准基本空白，缺乏既懂车又懂碳纤维复合材料的专业人才，碳纤维复合材料的回收和有效再利用问题仍未得到有效解决。因此，为进一步推动轨道交通车辆领域碳纤维复合材料产业化，建议形成应用推进计划，完成碳纤维复合材料在磁浮列车、动车组、城际车、地铁、低地板公交车等轨道车辆的考核验证；推动轨道交通碳纤维复合材料行业级、国家级标准规范的建立。

4.4.3 / 高铁轮轴

(1) 2035 技术预判

车轮和车轴是高速动车组的关键部件，对于行车安全至关重要。未来车轮、车轴产品设计将进一步深化正向设计原理，结构设计许用应力和产品疲劳极限、材料疲劳极限、试验验证加载应力之间的关联理论；基于车轴弯扭载荷、车轮压剪复合应力下损伤容限及剩余寿命理论；材料性能指标同服役条件的关联关系及控制技术。

① 基于新材料、轻量化产品设计和应用。减轻车辆簧下质量一直是行业永恒的追求，轮对是转向架中最大的零部件，轻量化是必然选择之一，随着材料科学技术和新材料技术的持续发展，车轮、车轴轻量化设计产品必将成为重点研究方向之一，高强度大空心车轴、高强度树脂或碳纤维缠绕车轴、辐条结构车轮、带有主动导向功能的独立轮系统等技术将在未来进行研究或应用。

② 新型制造技术的研究和应用。随着新工艺、新技术的突破和发展，给车轮、车轴制造技术提供了更多的方法和选择，轮轴材料基因工程、车轴近净轧制成型、车轴新材料涂覆强化技术、轮轴小缺陷检测、轮轴多力学性能无损法综合检测、视觉识别表明缺陷检测等方面技术的研究和应用将日益成熟。

③ 智能检测技术开发。轮轴产品服役质量直接决定车辆稳定性和安全性，高铁轮对由于轮轨关系复杂，运转速度快，极小的损伤也会给车辆带来较大的振动、冲击等影响，随着网络技术、信息融合、人工智能等技术的发展，以及列车智能检测与维护要求不断提高，针对高铁轮轴的智能监测和决策的需求日益增强，高铁轮轴在途感知、服役状态在线检测、损伤情况智能预警等技术将成为重点研究方向。

(2) 应用场景

我国高铁自 2007 年引进以来，整车技术历经消化、吸收、再创新历程，经过多次迭代，已达到国际领先水平，但是车轮、车轴作为其中关键零部件之一，一直采用进口产品，除少量进口自日本以外，全部进口自欧洲，轮轴制造执行标准最初有日本 JIS 和欧洲 EN 标准，后来逐步统一为欧洲 EN 标准，车轴制造标准为 EN 13261，材质为 EA4T，车轮制造标准为 EN

13262, 材质为 ER8, 部分产品采用非标准牌号 ER8C。

2010 年开始, 我国逐渐开展了动车组轮轴自主产品研发和自主标准体系建设工作, 开发出了适用于速度为 250km/h 的动车组车轮、车轴材料体系、制造技术要求, 研制的产品搭载在 CJ-1 型城际动车组列车上完成了 60 万千米的运用考核, 考核结果良好, 产品服役表现同进口产品相当。2013 年, 我国开始研制“复兴”号中国标准动车组轮轴, 以速度为 350km/h 中国标准动车组车轮和车轴顶层设计要求为前提, 满足多地域环境、长距离、长时间、连续高速运行等需求。自主研发出的全新 DZ2 材质动车组车轮采用全新设计的成分体系, 增加残余有害元素的控制项点, 韧性要求相同条件下提高强、硬度水平, 增强高寒韧性, 提高纯净度控制要求等; DZ2 材质动车组车轴采用全新的设计材料成分体系, 全面提升车轴强韧性指标, 具有优异的低温韧性和疲劳性能。自主研发的轮轴产品在“复兴”号中国标准动车组上进行的运用考核结果表明, 车轮、车轴在运用考核期间表面质量、探伤检查均正常, 与进口产品性能相当。

(3) 思考与建议

① 推动自主化技术产业应用, 以应用需求推动技术迭代发展。当前, 我国已成为全世界最大的高铁应用市场, 高铁零部件市场需求非常巨大, 自主化高铁轮轴批量应用已迫在眉睫, 在未来 3~5 年预计将形成批量应用, 自主化产品可以根据产品服役表现针对性地进行优化, 形成研发—应用—优化的循环发展模式, 推动高铁轮轴技术持续发展。

② 强化基于材料和服役条件的基础研究。虽然我国高铁技术已从追赶国际先进技术发展到并跑或引领, 但对于车轮和车轴而言, 更多的是基于国外的技术路线深化研究, 同国外基础理论研究或支撑性数据还是存在较为明显的差距, 例如产品性能指标类比国外同类产品, 不能说明为什么采用这样的指标, 因此, 未来想要真正引领产业技术发展, 加强基础研究是必不可少的一步。

4.4.4 / 碳陶摩擦材料

(1) 2035 技术预判

碳陶摩擦材料是继碳/碳复合材料发展起来的一种新型制动摩擦材料, 具有密度低、耐高温、能载水平高、寿命长和全环境适用等优点, 克服了传统金属材料在严苛环境中的应用限制, 是解决交通运输装备在高速、高能载、严苛环境条件下制动的一种新型轻质高效的摩擦材料。目前, 以美国 NASA 和 GE 公司、德国 SGL、韩国 DACC 集团为代表的企业生产制造的碳陶制动盘、刹车片已批量应用于航空航天、高端汽车领域。在未来的 10~15 年, 碳陶摩擦材料将广泛应用于轨道交通领域、汽车领域以及海洋风力发电制动领域。

然而, 对于当前所应用的碳陶摩擦材料, 主要还是以 2.5D 碳纤维编织的整体毡为主, 通过后续的 CVI 沉积以及反应熔渗处理制备获得的碳陶摩擦材料, 表面某些区域容易表现出一定的不均匀性, 即碳陶摩擦材料表面某些区域的碳纤维无法被 SiC 陶瓷均匀包覆, 最终会导致碳陶摩擦材料在应用过程中, 特别是紧急制动过程中, 材料表面会表现出一定的凹凸不平的“蚀坑”。未来技术发展趋势之一是采用一种新型的“三明治”结构的碳陶摩擦材料, 即在进行碳纤维预制体原材料生产过程中, 在普通的碳纤维预制体基础上, 通过在上下两表面引

入一定厚度的全网胎层，以形成全网胎层 / 碳纤维预制体 / 全网胎层的“三明治”结构，最终可以保证在熔渗处理完成后，碳陶摩擦材料的摩擦面形成一层致密且结构均匀的复合陶瓷层，这可以很好地解决碳陶摩擦材料在高速制动过程中易出现凹凸不平的“蚀坑”问题。另外，“模压法”技术或“浆料法”技术也是重要的发展方向，该技术在碳陶摩擦材料表面形成一定厚度、致密的复合陶瓷层，可以避免碳陶摩擦材料中未被包覆的碳纤维在高温条件下被侵蚀，最终满足碳陶摩擦材料在轨道车辆应用的制动要求。

(2) 应用场景

首先，对于轨道交通领域，高速列车是我国优先发展的战略新兴产业，特别是近年来，我国高速列车的速度等级越来越高，诸如2020年6月中车青岛四方机车车辆股份有限公司试运行的磁浮高速列车速度等级600km/h。对于现有制动盘普遍采用钢制材料，在列车速度等级达到350km/h以上时，制动盘将承受交变温度场和交变应力场的同时作用，很容易导致钢制材料出现机械损伤、组织蜕变以及氧化腐蚀等，钢制制动盘出现热疲劳破坏会导致盘面产生裂纹，主要包括呈网状分布覆盖于盘面较浅处的“龟裂纹”以及处于盘体内部的“径向裂纹”；同时，我国当前对于节能的要求越来越高，即在材料本身能满足使用要求的前提下，材料的轻量化也是朝更节能、更环保方向发展。而此时碳陶摩擦材料刚好可体现技术优势，首先，其耐高温（ $\geq 1650^{\circ}\text{C}$ ），同时，具有优异的抗氧化性能（ 1200°C ），可以很好地克服类似钢制制动盘在高速制动过程中易出现的热疲劳破坏，且碳陶摩擦材料在高速制动过程中，其制动摩擦系数能够维持在相对舒适的范围内，另外，碳陶摩擦材料的密度是普通的钢制制动盘密度的1/3，可以较大程度地减轻车身本身的质量，符合当前轻量化的发展需求。

汽车作为我国当前第二大经济支柱产业，当前由于全球遭受能源危机，已逐步由燃油车过渡到新能源汽车，特别是以锂离子电池为首的新能源汽车配套产品的飞速发展。为了应对能源危机的影响，汽车也逐渐朝着轻量化的方向发展，包括车身钣金、车身附件等材料优化，在满足汽车本身使用的性能要求以及安全的前提下，汽车主机厂客户对于轻量化的材料越来越感兴趣。而碳陶摩擦材料，在相同的盘体体积下，其质量要相比当前在用的钢制制动盘轻2/3，因此，在一定程度上可以减轻整个车身的重量，对于降低汽车在使用过程中的能耗起到一定作用。但目前主要受限于碳陶摩擦材料的使用成本，由于主机厂客户对于成本的把控相当严格，当前碳陶制动盘的价格是普通的钢制制动盘价格的10倍以上，且普通汽车对于制动的要求不高，因此对于碳陶摩擦材料本身的性能优势无法体现出来，除非类似于F1赛车或重型卡车等对制动要求较高的汽车，此时碳陶制动盘可以体现出技术优势，对于碳陶摩擦材料目前还是主要集中应用于一些高端品牌的豪华车型。

另外，近年来，我国风力发电飞速发展。在2020年，我国风力发电量达到4665亿千瓦时，差不多是4个三峡电站2020年的发电量，截至2020年底，我国风电累计装机容量已达2.81亿千瓦，规模居世界首位。目前风力发电分为陆地和海上两种。对于海上风力发电，由于海上风速大且稳定，其具有高风速、低风切向、低湍流以及高产出等优点，但海上风电要承受更强的载荷和海浪的冲击，且能抵抗海洋环境的盐雾腐蚀。对于风力发电，风电机组的安全可靠性和稳定性一直是人们关注的重点，其中，作为保障风机制动和换向的制动系统

(刹车)是保障风机安全可靠性的关键部分。而应用于制动系统的摩擦材料的性能直接影响制动系统的工作质量。当前,风电机组的制动系统主要采用树脂基非金属摩擦材料和粉末冶金摩擦材料,但这两种材料在实际使用过程中存在一定应用不足,例如:树脂基非金属摩擦材料在潮湿的环境中,摩擦系数受影响较大,制动能力下降;对于粉末冶金摩擦材料,其在海水环境当中容易被腐蚀。而碳陶摩擦材料不含有金属组元,全环境使用,在满足使用性能的前提下,具有较强的防盐雾、防霉菌、防潮湿的能力,可以很好地满足海洋风力发电机组制动系统用摩擦材料的应用要求。

(3) 思考与建议

目前,由于碳陶摩擦材料价格成本较高,限制了其在市场大规模的推广。为了降低碳陶摩擦材料产品的生产成本,可以从以下几个角度考虑进行优化。

① 优化当前的制备工艺。当前碳陶摩擦材料在生产过程中,由于制备工艺流程过长,特别是 CVI 沉积工艺的时间占整个产品生产周期的 3/4,而当前 CVI 沉积的效率不高,因此,可以通过优化 CVI 沉积工艺,提高沉积效率,以达到降低产品的成本的目的;另外,对于反应熔渗工艺,目前主要采用单炉次进行产品生产,即在熔渗炉内每次装一定数量的产品进行升降温操作处理,熔渗炉每次进行升降温都需消耗大量的电能,后续可以通过采用连续熔渗的技术,减少熔渗炉重复的升温降温,这样既降低了产品生产的能耗,同时也提高了产品的生产效率,因此也可以在一定程度上降低产品的生产成本。

② 提高原材料的利用率。考虑到目前生产所用的碳纤维预制体都是先按照“方形”形状进行生产加工,而实际产品所需的形状为圆形,且中间为“掏空”状,因此,在产品实际生产过程中,需要将生产出的“方形”板料按照产品的最终成品形状进行预加工处理,这样会造成边角料以及中间“掏空”区域的材料浪费,后续可以通过优化碳纤维预制体的生产加工技术,例如使用“近尺寸”碳纤维预制体编织技术进行加工生产,可在很大程度上提高原材料的利用率,从而达到降低成本的目的。

③ 以国产碳纤维替代进口碳纤维。目前高端碳纤维还是以日本东丽生产的碳纤维为主,前期在进行产品开发的验证过程中,仍以日本东丽生产的碳纤维为主,后续可以采用国产碳纤维进行产品性能验证,对于使用性能要求不高的应用场景,可以选择以国产的碳纤维原材料进行替代,这样也可以在一定程度上降低产品的生产成本。

通过以上几个方面的优化,碳陶摩擦材料的生成成本在未来的几年将会很大程度地降低,这将有助于碳陶摩擦材料在市场上的推广应用,特别是汽车制动领域的推广,如后续能够尽可能地缩小碳陶制动盘与钢制制动盘的成本差距,这对于碳陶摩擦材料的大规模推广具有重要意义。

4.4.5 / 电磁屏蔽涂料

(1) 2035 技术预判

车辆电磁环境的安全性是保障高速列车正常运行的一个重要因素,国内外在高速列车研制过程中都将其作为一个重要内容来进行研究。目前欧洲(英、德、法)已针对高速列车制定了

较为完善的电磁安全、防护、兼容性设计的标准。电磁屏蔽涂料技术水平的高低直接影响着最终防护效果，同时缝隙防护、可视屏蔽、线缆防护、结构屏蔽材料等成为电磁防护设计中的重点产品，目前，欧、美、日等已经为高铁装备配套各种系列规格的电磁屏蔽涂料产品，在宽频段、高频效、抗毁伤、抗恶劣环境、轻质、高强度等方面也有了很好的解决方案。与国外知名企业相比，国内在车辆各个防护部位所需的电磁屏蔽涂料技术的水平方面有一定差距，尤其在轨道车辆较为关注的低频电磁波防护领域方面差距明显，这将是未来重要发展方向。另外，未来电磁屏蔽涂料应致力于提供耐高温、防火阻燃、环境友好、吸波导热的一体化解决方案。

(2) 应用场景

轨道交通高速度运行需要足够大的动力，因此对列车所用材料提出轻质化要求。为了满足车辆减重需求，在各类电磁防护产品中，电磁屏蔽涂料因质轻、成本低且适用性高，成为高铁动车中各种电子元器件、设备、部件、线缆等部位的理想材料。

高铁用电磁屏蔽涂料首先需具备优良的屏蔽效能，其频谱范围主要集中在 9kHz~1GHz 之间，偏重于低频电场、磁场防护，因此，高铁用电磁屏蔽涂料需兼具优良的导电和导磁性能；可靠性方面，针对高铁列车不同的防护部位（防护部位基材有各类塑料、复合材料等），开展对应的电磁屏蔽涂料设计，避免由于车辆高速运行产生较大振动导致电磁屏蔽涂料失效；环境适应性方面，高铁列车工作于大气环境中，受气候影响较大，工作环境十分复杂，由于部分防护部位位于车体外部（如线缆等），因此需要高铁用电磁屏蔽涂料具有良好的环境适应性能。

针对高铁列车电磁安全和电磁兼容需求，国内外各类电磁屏蔽涂料和技术应运而生。在国外，高速铁路电磁屏蔽涂料生产主要在美国、日本、德国等，其技术涵盖系统级电磁防护解决措施和全部位（孔、缝、连接、线缆、可视、屏蔽壳体等）的防护材料技术支撑。以 Parker（帕克）、Laird（莱尔德）为代表的世界著名 EMI（电磁干扰）材料的供应商，以 Agilent Technologies（安捷伦）、Rohde&Schwarz（罗德与施瓦茨）为代表的国际知名测试仪器公司占据了主要市场份额。

对于国内，基于高速铁路系统级装备的电磁屏蔽技术研究起步较晚，在该领域还相对滞后，主要表现在针对高铁动车系统装备开发应用的品种较少，大多数企业不具备系统防护设计、全系列防护部位的电磁屏蔽涂料配套能力。同时由于部分电磁屏蔽涂料的禁运因素，产品的性能指标与国外同类相比有一定的差距。电磁屏蔽涂料类产品在动车组上的应用如表 4-1 所示。

表 4-1 电磁屏蔽涂料类产品在动车组上的应用

产品名称	性能要求	应用部位
耐腐蚀性导电橡胶	可靠性高，耐高低温、耐湿、耐盐雾、耐化学试剂腐蚀	法兰面的导电连接和水汽密封
柔性屏蔽缠带	导电性好，任意弯折捆绑且不影响导电性能	线缆电磁防护
耐腐蚀性导电涂料	可靠性高，耐高低温、耐湿、耐盐雾、耐化学试剂腐蚀	与耐腐蚀性导电橡胶配合用于车体外部法兰面的保护与电磁防护
环保型防火导电涂料	导电，防护/阻燃，不含可挥发性有机物	车体内部
吸波导热材料	导热，吸波，耐高温，可靠性高	高功率设备/模块腔体内部
碳纤维布及碳纤维一体化复合材料	轻质化（对比铝制减重 30%），导电，屏蔽	高铁动车车体的称重部件及结构部件

(3) 思考与建议

近年来，在国家政策支持下，国内涌现一批具有较强技术研发实力的本土企业，深入研究了基于轨道车辆系统化的电磁环境和解决措施，在高铁用电磁屏蔽涂料技术方面自主保障能力明显增强，与国外差距逐步缩减，未来应进一步加强电磁屏蔽涂料的多功能化与智能化设计。

① 电磁屏蔽涂料结构功能一体化的多功能化设计。将轨道车辆所采用的轻量化复合材料进行功能化设计，增加其导热、电磁波吸收、电磁波屏蔽等功能。

② 电磁屏蔽涂料智能化设计。将车体材料表面的防护层进行基于超材料、自适应材料等的智能化复合，可以实现车体材料的电磁波传递、接收、防护等功能，实现车体与天线一体化设计；智能化方面，在雷电带来的间接雷击脉冲情况下实现自适应的强电磁脉冲防护功能。

4.4.6 / 减振降噪材料

(1) 2035 技术预判

高速列车减振降噪是一门综合的技术，影响噪声控制的主要因素有车体轻量化设计、减振结构及材料的选择、车体材料的强度、刚度等。减轻车体及零部件重量可以减少地基振动与构造物噪声；若减振降噪材料刚度不足，则固有频率降低，车辆在行驶中容易产生共振，从而引起噪声。因此选择减振降噪材料不仅要考虑材料本身的减振、隔声性能，同时还要考虑材料的轻量化以及刚度。通常来讲，车体的轻量化往往造成车体局部刚度不足、隔声性能变差，从而增加了车内低频噪声。如何在保证车体轻量化的同时，保证材料刚度，同时提高其隔声性能，是减振降噪新材料设计的重点。

传统材料普遍笨重，减振降噪效果差。而新型材料立足于传统材料，通过人为优化其结构和特性性能更佳。最先发展的非传统阻尼材料是高分子阻尼材料，高分子阻尼材料的分子链较长，结构复杂，耗能环节比较多，因此阻尼效果较好。然而高聚物的阻尼温度和频率范围小，损耗系数低，难以发挥最好的效果。

随着科技的发展和社会的进步，高分子阻尼材料呈现出以下发展趋势：

① 高性能、宽温域。高分子阻尼材料的要求主要为材料在宽温域内应具备高损耗因子。互穿聚合物网络由于网络间的相互贯穿、强迫互容、协同效应及特殊的细胞状结构、双相连续等形态特征，可有效拓宽高聚物的玻璃化转变温度，这已成为目前制备此类材料颇具前景的方法。

② 环境友好性。社会发展要求人类活动对环境的负面影响越小越好，因此水性、高固体系、无溶剂型材料成为高分子阻尼材料发展的趋势。

③ 智能化、精细化。智能阻尼材料已在阻尼材料领域表现出独特的优势和广阔的应用前景。随着科学技术的发展，在未来的研究工作中，对智能阻尼材料的研究将主要包括智能阻尼材料性能的增强、加工性能的改善、智能阻尼材料基体的改进以及材料使用温度范围的拓宽等。

(2) 应用场景

随着科学技术进步，涌现出了多种新型减振降噪材料，广泛应用于轨道车辆、汽车、工

业装备、建筑等领域。

① 新型复合阻尼材料。加入合适的填料可使高聚物硬度增加，也增大了填料和高分子间的摩擦，从而使能量耗散更多。因此国内外研究人员提出了许多种填充方案以形成新型复合阻尼材料。

- 压电阻尼材料。压电阻尼材料都含有压电陶瓷、高聚物和导电填料 3 种成分。压电粒子可将振动能转化为电能，电能通过导电网络以热能形式耗散。通过选择性能优良的基体材料，调节压电陶瓷的含量与颗粒度，改变导电相的种类与含量可以使压电阻尼材料的性能优化。压电阻尼材料能量转换率高，在低频范围有良好的吸声效果，阻尼效果好，可将其用于一些设备的底座，防止振动向外辐射，达到降噪效果。

- 碳纳米管增强型阻尼材料。碳纳米管于 1991 年被首次发现，它是一种一维纳米材料，微观结构由六边形的石墨片卷绕而成，具有优异的力学、电学、化学性能。碳纳米管的比表面积非常大，所以其与高聚物之间的界面摩擦很大，会吸收很多的能量，阻尼性能好。此外，碳纳米管的加入，会使材料在宽频率宽温域范围内具有较高的阻尼性能。当碳纳米管含量为 2% 时，材料结构阻尼提高了 200%，硬度提高了 30%。碳纳米管增强型阻尼材料阻尼大，比刚度高，密度低，温度和频率极限区间宽，更因为有了 C—C 键的加入，大大提高了原材料的刚度，力学性能出色。可考虑将碳纳米管增强型阻尼材料用于制作某些轴承部件，能起到高阻尼、低噪声的效果，同时也并不会影响轴承部件的刚度。

② 磁流变弹性体。磁流变弹性体是将磁性颗粒散布于固态状或者凝胶状的基体中，固化后制备出的一种新型磁流变材料。磁流变弹性体的磁流变效应可控且可逆，响应速度非常快（毫秒级）。在磁场作用下，磁流变弹性体的黏弹特性能够产生很大的变化，可用于各种可控刚度或阻尼器件的设计。目前磁流变弹性体已成功应用于减振降噪领域，如悬挂系统、轴衬、吸振器等，显示出广阔的应用前景。

目前，磁流变弹性体以广阔的应用前景越来越受到国内外的重视。同时我们也看出，磁流变弹性体的材料性能与实际应用还有一定的差距，而且许多应用研究仅仅还只是构想。因此，需要对磁流变弹性体进行深入的研究，具体包括以下几个方面。

高性能磁流变弹性体的研究。目前研制的磁流变弹性体都是在基体中添加颗粒，采用这种方法制备的磁流变弹性体的磁流变效应不是很大，材料的拉伸、压缩、撕裂等力学性能下降较大，而且为了提高磁流变效应，通常会选用较软的基体材料，这就造成制得的磁流变弹性体性能与实际工程应用还有一定的差距。因此，在设计磁流变弹性体时，不仅要采用新技术提高磁性颗粒的磁导率和饱和磁化强度，而且要研究新的制备工艺，提高基体与磁性颗粒之间的结合力，力求在提高磁流变效应的同时，不降低材料的力学性能。

磁流变弹性体的流变机理研究。磁流变弹性体在耦合场下的结构演化、磁能与材料应变能之间的转化等需要进一步研究。在进行力学模型分析时，需要考虑基体材料性能、颗粒非线性磁化等因素。

磁流变弹性体测试方法研究。目前磁流变弹性体的测试方法中，多数没有考虑测试装置之间的耦合作用，造成测试结果有所不同。因此，建立一套精确的测试方法至关重要。

磁流变弹性体的应用研究。利用磁流变弹性体的磁控力学性能可以开发出各种变刚度和

变阻尼器件。其磁致伸缩性能可用于主动控制，磁控电阻特性及应变特性可用于传感器元件等。

③ 声子晶体 / 声学超材料结构。近年来，“声子晶体”及“声学超材料”新概念的提出为实现“人为操控弹性波传播”提供了新思路。声子晶体是由两种或两种以上弹性介质周期排列构成的复合声学材料。声学超材料是在声子晶体研究基础上发展起来的新概念，通常指由特殊设计的声学微结构单元按阵列化排布构成的新型复合声学材料，通过对其亚波长尺度的微结构单元（如局域共振单元）进行人工设计，可以使其具有低频带隙、动态负质量密度等一系列与自然材料迥然不同的物理性质，这为弹性波超常调控及低频声振控制提供了全新途径。类比声学超材料，通过传统机械结构上引入人工微结构单元，可以构建出声学超材料结构，其具有类似声学超材料的超常物理特性，在低频声振控制领域应用前景广阔。可以考虑利用声子晶体制作结构中的板件或传动轴，目前已有不少学者研究了声子晶体制成的基本结构（杆、梁、板等）。

声子晶体作为一种新的减振降噪声学功能材料，具有频率可设计、针对性强、尺寸小、效果好等优点，而且减振功能会在减少各种探测和定位器件振动所带来的负面影响方面有重要意义，尤其是在常规阻尼材料所不能发挥效能的范围，具有潜在的可能应用。

(3) 思考与建议

•••

高速列车减振降噪的目的主要是提高乘车人员的舒适度，优化体验感。车厢外的噪声如风阻噪声、轨道噪声等是主要的噪声源。通过对车厢结构的设计以及轨道的减振降噪处理，一方面减小风阻和轨道噪声，另一方面隔绝车厢外的噪声和振动。车厢箱体无法隔绝的振动和噪声会进入车厢内部。车厢内部可以通过安装穿孔吸声板、吸声窗帘以及阻抗型声学材料降低噪声。通过对乘客座位进行减振处理和设计可以减弱传递到乘客上的车厢振动。不同的减振降噪材料在应用时，不仅要考虑其减振降噪效果，同时还需要考虑成本、是否存在空气污染以及美观性等因素。

压电材料利用力 - 电转换效应，作为填料添加在传统阻尼材料里，增强了其中高频的减振效果，同时在低频范围也有一定的减振效果。碳纳米管具有优异的力学、电学、化学性能，加入传统阻尼材料后，会使材料在宽频率宽温域范围内具有较高的阻尼性能。材料选型及配方设计是以上两种材料的主要技术难点。配方设计成功后，应用部位较为广泛，可在一定范围内替代原有的阻尼材料。

磁流变材料是一种智能型材料。利用材料本身的磁流变效应，通过调节其应用部位的磁场，从而改变阻尼特性。该材料比较适用于悬挂系统、活塞、阻尼减振器等。该项技术需要引入主动控制系统，通过系统拾取实现处理对象所需阻尼的特性，通过电磁信号转换，从而实现磁流变材料阻尼特性的控制。该项技术具有一定的技术难度，要实现批量化应用需解决控制系统集成化和小型化等问题，同时还得考虑应用成本。

声子晶体 / 声学超材料结构主要解决的问题就是低频减振和降噪。目前该技术在低频降噪已经有一些应用，但是在减振方面尚处于实验室阶段。该项技术是目前减振降噪领域的热点技术，已有大量的试验结果验证了该技术的可行性。该种材料应用难度较低、可量化和有一定规模应用。

随着集成控制电子元器件的更新换代,有源噪声控制技术实现应用已不再困难,该项技术比较适合舱室降噪,国外已有相关的产品。例如有源消声耳机、主动减振器。对于列车降噪,该技术比较适用于列车车厢内的噪声控制。该技术应用成本较高。

参考文献

- [1] 黄俊辉,肖翔,康洪军,等.中国高铁动车组创新发展的对策研究[J].城市公共交通,2018,(05):27-31.
- [2] 朱峰.高速动车组组成功能介绍及技术参数[J].工艺设计改造及检测检修,2018,(19):52-53.
- [3] 中国工程院.先进基础材料发展战略研究报告(有色金属类)[R].北京:中国工程院,2019.
- [4] 管仁国,娄花芬,黄晖,等.铝合金材料发展现状、趋势及展望[J].中国工程科学,2020,22(05):68-75.
- [5] 黄燕芳.N公司铝型材业务竞争战略研究[D].广州:华南理工大学,2020.
- [6] 丁叁叁,田爱琴,王建军,等.高速动车组碳纤维复合材料应用研究[J].电力机车与城轨车辆,2018,35:1-8.
- [7] 周平宇.高速动车组车轴材料及疲劳设计方法[J].铁道车辆,2009,47(2):29-31.
- [8] Fan S, Zhang L, Cheng L, et al. Microstructure and frictional properties of C/SiC brake materials with sandwich structure[J]. Ceramics International, 2011(37): 2829-2835.
- [9] Yang Z, Han J, Li W, et al. Analyzing the mechanisms of fatigue crack initiation and propagation in CRH EMU brake discs[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 34: 121-128.
- [10] 杨礼林,宣天鹏,杨广舟.电磁屏蔽涂镀层的研究现状及进展[J].稀有金属快报,2005,24(8):8-13.
- [11] 郭济伟,王黎明,程文露,等.动车组减振降噪新材料探讨[C]//“提高旅客舒适度”学术研讨会论文集.长春:中国铁道学会,2016:162-165.
- [12] 朱竑祯,王纬波,高存法,等.新型材料在船舶减振降噪方面的前景与应用[J].舰船科学技术,2016,38(12):1-8.
- [13] 黄微波,刘超,黄舰,等.高分子阻尼材料研究进展及发展趋势[J].材料导报,2012,26(21):89-91,100.



作者简介

孙琳,中车技术专家,中车青岛四方机车车辆股份有限公司高速动车组总成工程技术中心高级主任研发师,主要从事轨道车辆零部件国产化研制、材料腐蚀防护、材料服役性能评价等方面的基础性和前瞻性工程应用技术工作。2019—2021年,负责申报4项国家级和省部级技术创新项目,获政府经费支持1.3亿元;以第一作者发表SCI论文6篇,授权发明专利10余项。

崔健,中车青岛四方机车车辆股份有限公司高速动车组总成工程技术中心主任研发师,研究方向为轨道交通车辆复合材料工艺。

高宝杰,中车青岛四方机车车辆股份有限公司主任研发师,从事轨道交通车辆研发及管理工作。

台永丰,中车青岛四方机车车辆股份有限公司分管研发师,从事轨道交通车辆车体设计研发工作。

第 5 章

汽车新材料

赵征志

5.1 汽车新材料概述

近年来，我国汽车工业发展迅猛，汽车产销量已 12 年蝉联世界第一。汽车工业的飞速发展，在丰富人们物质文化生活的同时，也带来了能源的大量消耗以及环境的持续恶化，全社会对环境污染问题反应强烈。我国已成为世界第一大石油进口和消费国，受国际石油价格波动的影响较大，还会导致国家能源安全问题，进口石油成了中国必须考虑的战略问题。

2007 年中国二氧化碳排放量为 60 亿吨，占全球排放的 21%，超过美国成为世界上与能源相关的二氧化碳排放第一大国。汽车行业作为我国工业的支柱产业，同时又是生产大宗消费品的行业，既在生产制造、物流运输等环节产生碳排放，又在使用过程中消耗大量能源。据中汽政研中心研究数据，截至 2020 年，汽车行业的碳排放量约为 7.8 亿吨，占全社会碳排放总量的 7%~8%。2020 年，中国正式宣布力争 2030 年前实现碳达峰，2060 年前实现碳中和。针对碳达峰和碳中和目标，中国提出了在 10 个领域开展转型和创新，其中构建绿色低碳交通运输体系和推动绿色低碳技术创新涉及汽车节能技术，包括电动汽车、混合动力和氢燃料电池等汽车节能技术。同时，《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》^[1]指出，我国汽车行业的发展目标是：产业碳排放总量先于国家碳减排承诺于 2028 年左右提前达到峰值，到 2035 年碳排放总量较峰值下降 20% 以上。

当前，全球汽车产业已进入动能转换的关键期，德国、法国和英国等汽车强国陆续调整汽车战略，相继宣布禁售燃油车。全球范围内，汽车电动化及智能化的趋势已不可逆转，实施新能源汽车战略是促进汽车产业转型升级、抢占国际竞争制高点的紧迫任务。随着汽车产销量和保有量的不断增长，能源短缺及环境污染问题日益严峻，已经成为制约我国汽车产业可持续发展的突出问题，无论是从社会效益还是经济效益来考虑，低油耗、低排放的燃油汽车和新能源汽车都是节约型社会发展的需要。

对于乘用车来说,提高安全性、降低油耗是提高产品竞争力的必然要求。研究表明^[2],当整车质量减轻10%时,加速时间缩短8%,CO₂排放量减少4.5%,制动距离减少5%,轮胎寿命提高7%,转向力减少6%。中国石化集团经济技术研究院的统计数据表明,我国商用车油耗占汽车产品总油耗的60%。作为一种民用生产资料,商用车质量大、油耗大、行驶里程高,其节能问题更应受到全社会的关注。商用车的竞争力体现在省油、耐用、出勤率高等方面。根据世界铝业协会的研究结果,商用车平均减重10%,可以实现节油4.8%。目前,我国商用车整车质量平均比国外同类车型重10%以上,关键零部件如车架、悬架弹簧比国外重30%~40%。

汽车轻量化是汽车行业降低能耗和提升安全性的重要途径,是汽车技术革新矢志不渝的目标。汽车轻量化是指汽车在保持原有的行驶安全性、耐撞性、抗震性以及舒适性等性能不降低,且汽车本身造价不被提高的前提下,有目标地减轻汽车自身的质量。不管是传统的燃油车,还是新一代的混合动力,或者纯电动车,都需要尽可能减少整车对能源的消耗以延长行驶里程。汽车工业的快速发展及轻量化技术需求有力地推动了汽车新材料的研发与应用。

汽车材料是汽车品质的基础,对整车安全、节能环保性、车内空气质量具有重要影响。在汽车材料中,钢铁材料的比例仍旧占据主体地位。相比于其他材料,高强度钢可以在同密度、同弹性模量而且工艺性能良好的情况下,达到截面厚度减薄的效果,在现阶段汽车制造中钢的使用量仍然占主导地位。铝合金、镁合金等轻合金材料、塑料和复合材料等在汽车上的应用也越来越多。现阶段,汽车用铝合金主要为铸铝,铸铝占汽车用铝量的80%。变形铝合金的板材、型材已在前翼子板、发动机罩总成、行李箱盖板、车门、保险杠等部件进行应用。此外,泡沫铝是一种超轻多孔结构材料,是铝合金经发泡后得到的,具有很好的吸能、吸声、减振等特性,同样可以作为轻量化材料应用于汽车上。在汽车轻量化材料中,镁合金的发展和运用也备受关注。我国对镁合金进行重大专项攻关,在部分车型上已开始应用,如变速器、方向盘骨架等部件。另外,与钢、铝合金相比,碳纤维的密度更小,并具有耐腐蚀等特点,此外还有非常高的比强度和比刚度。国外已开发出全碳纤维增强复合材料(CFRP,也可简称为碳纤维或碳纤维复合材料)汽车,国内车企也已纷纷开展碳纤维复合材料的研发工作,尤其在车身外覆盖件上。塑料是汽车上应用最多的非金属材料。近年来,我国汽车塑料件占整车质量的比例达到12%~18%,塑料在发动机及车身板的零部件使用量持续增加。钛合金零部件目前主要应用于发动机连杆、气门弹簧座、气门、钛合金弹簧、排气系统及消声器、涡轮增压器、车体框架等。

先进高强度钢、铝合金、碳纤维复合材料等轻质材料的使用,在保证汽车刚度和安全性能的基础上大大降低了车身轻量化系数,多材料轻量化车身成为轻量化技术的主流趋势。但国内汽车新材料研发及应用与国外先进水平相比存在较大差距。汽车材料技术研究已经上升至国家战略层面,相关部委陆续推出了一系列政策文件,如《“十三五”“新能源汽车”试点专项》《“十三五”重点基础材料技术提升与产业化重点专项》《国家新材料生产应用示范平台建设方案》《国家新材料测试评价平台建设方案》等,这些政策的出台大大促进了汽车新材料产业的快速发展。我国汽车制造业在若干核心技术领域已经取得突破性进展,部分技术接近或达到了国际先进水平。但是仍在一些核心技术领域或单项关键技术上与国际先进水平存在一定差距,需要在相应的整车和零部件材料研发、结构设计、制造工艺等方面不断优化和创

新，实现汽车全生命周期的绿色制造，推动汽车新材料技术不断发展。

5.1.1 / 高强度钢

汽车用钢主要分为两类：一类是合金结构钢，包括非调质钢、弹簧钢、齿轮钢等，主要用于汽车发动机、传动系统和悬架系统的关键构件；另一类是高强度钢，主要用于汽车车身内外板及车身结构件。其中，高强度钢与汽车轻量化的关系最为密切，是汽车轻量化后保证碰撞安全性的最主要材料，得到了快速的发展^[3]。目前，国际主流车型的高强度钢占车身材料的比例已普遍达到60%以上，超高强度钢在车身结构件上的应用已相当普遍。

国内外开始不断研发先进高强度钢的种类和特性，并开展了相关的成型和应用技术研究。国际钢铁协会（IISI）先进高强度钢应用指南中将高强度钢分为传统高强度钢（Conventional HSS）和先进高强度钢（AHSS）。传统高强度钢主要包括碳锰（C-Mn）钢、烘烤硬化（BH）钢、高强度无间隙原子（HSS-IF）钢和高强度低合金（HSLA）钢；先进高强度钢主要包括双相（DP）钢、相变诱发塑性（TRIP）钢、马氏体级（M）钢、复相（CP）钢、热成型（HF）钢和孪晶诱发塑性（TWIP）钢等。根据AHSS研发历史及其特点，将AHSS分为三代：第一代AHSS微观组织结构基本上是以铁素体（软相）为主要组织，基体为BCC（面心立方）结构，另外含有少量贝氏体以及5%~15%的残余奥氏体甚至不含，其强塑积为15GPa·%以下，主要包括DP钢、TRIP钢、CP钢、马氏体钢和HF钢；第二代AHSS的微观组织结构主要是软相奥氏体，基本上是以FCC（体心立方）为组织结构，其强塑积可达50GPa·%以上，主要包括TWIP钢和奥氏体不锈钢；第三代AHSS是以马氏体、回火马氏体、亚微米晶/纳米晶为基体组织或沉淀强化的高强度BCC组织，强塑积20~40GPa·%，主要包括中锰（Medium Mn-TRIP）钢、QP钢（Quenching-Partitioning Steel）^[4]。

随着轿车等级不同，高强度钢的应用比例存在细微差别。如Fiat Punto A级车、B级车和C级车上高强度钢的应用比例分别为65%、67%和68%。总体来说，日本车企目前冷成型及热成型钢已经应用至1470MPa及1800MPa级别，以冷成型高强度钢为主；欧美车企冷成型钢及热成型钢已经应用至1200MPa及2000MPa级别，以热成型高强度钢为主。

我国在售车型，尤其是自主品牌汽车，受市场售价的制约，车身材料构成以钢为主，以工程塑料和轻质合金为辅。随着高强度钢在国内受到越来越多的重视，自主品牌车身的高强度钢板用量与强度级别也在明显提高，一些汽车公司新开发车型车身高强度钢板的应用比例已经达到50%左右。比亚迪“宋”笼式车身的高强度钢占30%，超高强度钢占40%，安全件如A、B柱，防撞梁等部件均采用热成型工艺，抗拉强度超过1200MPa，实现了零部件的大幅减重。长城汽车也大量使用了高强度钢板，单车用量最高达到63%。

我国宝钢、首钢和鞍钢等汽车钢生产企业开发了系列汽车钢产品，并实现了产业化应用，初步形成了340~440MPa级高强度IF（无间隙原子）钢、380~600MPa级HSLA钢、450~1180MPa级DP钢、780~980MPa级CP钢、1000~1700MPa级马氏体钢，以及1300~2000MPa级热成型钢，这些汽车钢在品种和强度级别等方面与国外发达国家相当，质量稳定性控制水平低于欧美和日本等发达国家和地区。

宝钢利用临界区退火配合两步法QP工艺，实现了QP钢在国内的首发，其组织特点为铁

素体+马氏体+残余奥氏体，微观组织如图5-1所示，其中残余奥氏体的含量在5%~10%之间。

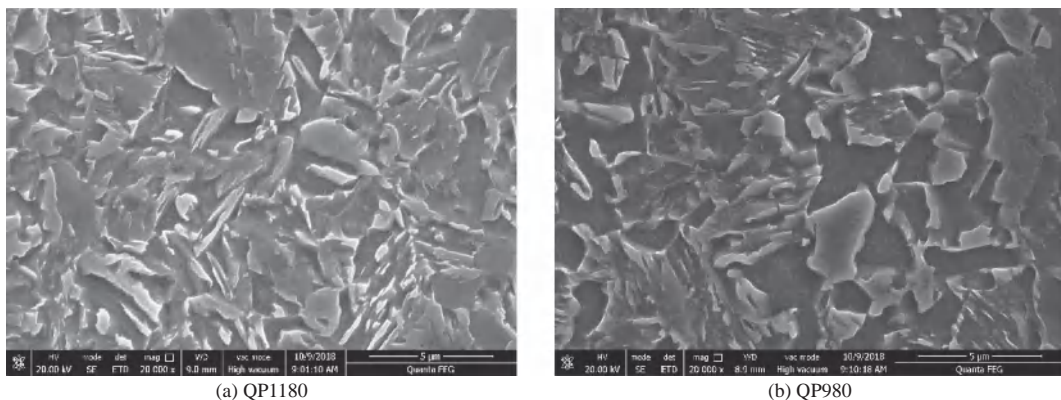


图 5-1 QP 钢的典型显微组织照片

5.1.2 / 碳纤维复合材料

汽车用非金属材料包括通用塑料、先进高性能工程塑料和树脂基复合材料。树脂基复合材料根据增强体和基体材料不同分为多种类型增强复合材料，如玻璃纤维增强复合材料、碳纤维增强复合材料、生物纤维增强复合材料等。

现阶段，玻璃纤维增强复合材料应用较为广泛，如应用于乘用车车身空气导流板、前翼子板和前挡泥板延伸部件、发动机罩、装饰条、尾板等，以及商用车保险杠、翼子板、脚踏板、面罩、导流板、驾驶室壳体等典型零部件。

碳纤维增强复合材料是一种含碳量 90% 以上的特种纤维，用腈纶和黏胶纤维做原料，经高温氧化碳化形成，具备耐高温、抗摩擦、高导电、高导热以及耐腐蚀等特点。外观表现为纤维状、柔软、可加工成各种织物。碳纤维的抗腐蚀性为普通钢材的 2~3 倍，抗拉强度高可达 3500MPa 以上，为钢材的 5 倍^[5]，并且表现出很低的质量。因此在减轻汽车质量、增强汽车强度以及减少汽车油耗等方面展现出极大的优势。据英国材料系统实验室的数据^[6]，碳纤维复合材料比低碳钢轻 50%，比铝合金轻 30%。碳纤维复合材料的抗拉强度为钢的 7~9 倍，且比模量、比强度、弹性模量等方面均具有无可比拟的优势，如表 5-1 所示为碳纤维复合材料与其他材质的性能对比分析。

表 5-1 碳纤维复合材料与其他材质的性能对比分析

材料类型	密度 / (g/cm ³)	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /MPa	比强度 /m	比模量 /km	
高强度钢	7.8	1000	214000	1.3	0.27	
铝合金	2.8	420	71000	1.5	0.25	
镁合金	1.79	280	45000	1.6	0.25	
钛合金	4.5	942	112000	2.1	0.25	
玻璃纤维增强复合材料	2.0	1100	40000	5.5	0.2	
碳纤维复合材料	高强度型	1.5	1400	130000	9.3	0.87
	高模量型	1.6	1100	190000	6.2	1.2

碳纤维复合材料最早是在 20 世纪 80 年代引入到以 F1 为代表的赛车领域，此后逐渐由赛车领域应用到高端跑车如兰博基尼、法拉利、布加迪、柯尼塞格等领域。采用碳纤维制作车身零部件在不降低结构强度的条件下显著减轻车身的重量，提升车辆自身的加速制动性能。随着碳纤维成本的逐渐降低，以及加工技术的提升，自 2000 年以来，碳纤维逐渐由高端跑车领域应用到了如保时捷 911、BMW（宝马）M 系列、玛莎拉蒂等豪华跑车领域。特别地，由于新能源汽车行业的逐渐兴起，碳纤维在新能源汽车的应用也越来越广泛。

采用碳纤维复合材料能大大提高车辆的性能，由于碳纤维复合材料强度很高，利用其制造的驾驶舱在碰撞中变形小，可有效保护驾乘者的生存空间；经特殊编织的碰撞吸能结构在高速碰撞中能够碎裂成较小的碎片，从而吸收大量撞击能量（能量吸收性为一般钢材的 3 倍以上），有效提高车辆被动安全性能。随着碳纤维生产水平的提高，近年来这种性能优良的材料在家用汽车中得到了广泛的使用，但受限于碳纤维复合材料的高成本，目前仅在高端汽车得到一定程度的应用，在中低端汽车市场应用较少。到目前为止，碳纤维复合材料主要应用在发动机系统中的推杆、连杆、摇杆、水泵叶轮，传动系统中的传动轴、离合器片、加速装置及其罩等，底盘系统中的悬置件、弹簧片、框架、散热器等，车体上的车顶内外衬、地板、侧门等。图 5-2 显示了 2020 年碳纤维材料各个领域的应用需求。

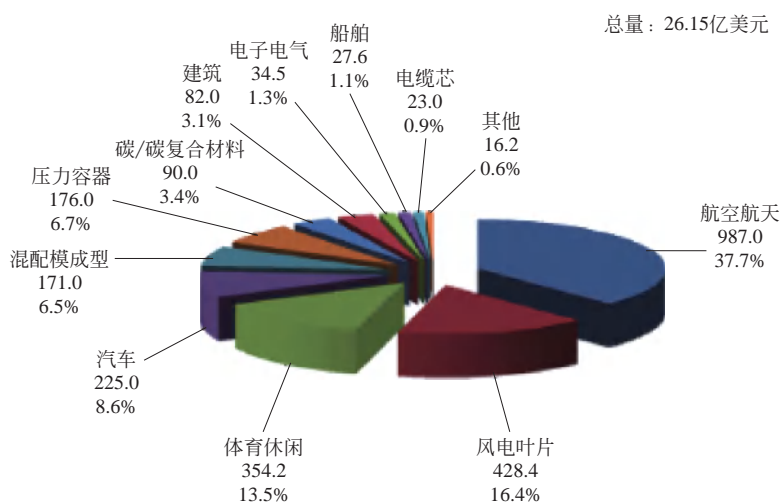


图 5-2 2020 年全球碳纤维应用需求（百万美元）^[7]

2013 年，德国 BMW 公司推出了第一款量产新能源电动汽车 i3（图 5-3），2014 年推出了 i8，在全世界范围内第一次在新能源量产车型上采用全碳纤维车身。其中 i3 共计用了 34 个碳纤维零部件，其中 13 个零部件（深红色部分）采用了 HP-RTM 工艺，2 个车身 A 柱加强管（灰色部分）采用了编织 HP-RTM（高压树脂传递模塑成型）工艺，其余 19 个零部件全部采用湿法模压工艺。这些零部件分别由 BMW 的 Leipzig 工厂和 Landshut 工厂生产，当自动化生产线将碳纤维预制件准确放入钢模并闭模后，HP-RTM 单元可以借助高压向模具中注入树脂，并在 5min 内完成环氧树脂的固化。HP-RTM 碳纤维成型技术的应用使宝马 i3 的零部件数量比传统的金属零部件数量减少了 2/3，仅约为 150 个。

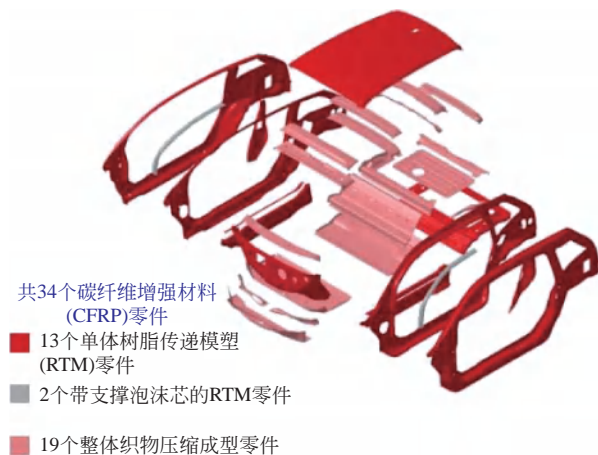


图 5-3 BMW i3 碳纤维车身零部件

利用碳纤维复合材料对汽车进行轻量化改进在国外已开始逐步推广应用。

① 在车身方面。英国材料系统实验室曾对碳纤维复合材料减重效果进行研究，结果表明，碳纤维复合材料车身重 172kg，而钢制车身重 368kg，减重约 50%^[8]。目前赛车和部分改装车大多选用碳纤维复合材料车身，在减重的同时，因复合材料碰撞时减少了碎片的产生，从而提高了安全性。宝马 i3 采用碳纤维，使得座舱减重 50%，通用超轻概念车采用碳纤维车身和底盘减重 68%。

② 在底盘传动方面。2003 年戴姆勒 - 克莱斯勒公司推出的 Dodge Viper 型跑车的挡板支架系统采用了碳纤维复合材料，这也是碳纤维在大型底盘和车身外部件上的首次应用。该复合材料中掺杂 55% 的碳纤维碎屑，使得这部分材料的密度仅为 $1.4\text{g}/\text{cm}^3$ ，零件减重 18kg，刚性提高 18%。

③ 在制动方面。汽车制动器衬片主要由石棉摩擦材料构成，这种材料在高温制动时易出现摩擦性能“热衰退”，产生的石棉粉尘对人体有致癌危害。碳纤维复合材料的比强度高、耐磨性好、耐热性好，应用在汽车刹车片上，可作为石棉的替代品。碳纤维制动盘可以在 50m 内将车速由 300km/h 降到 50km/h。碳纤维制动盘可承受 2500°C 的高温，且性能稳定。SGL Carbon AG 公司生产用于 Porsche AG 车的碳纤维 - 陶瓷制动盘装置，在 911 Turbo GT 和 GT II S 车型中已使用^[9]。

④ 在传动轴方面。汽车传动轴的受力比较复杂，而且进行往复运动，需要材料具有良好的抗疲劳性能。碳纤维复合材料具有比强度高、比模量高以及高抗疲劳性能等特点，可以替代传统的金属材料传动轴，不仅减轻了质量，而且因为其优良的力学性能，使用寿命得到提高。丰田 86 碳纤维传动轴仅 5.53kg，减重 50%，兰博基尼第六元素概念车使用碳纤维活塞连杆取代钢制连接件，质量减轻 40%~50%。

相较于国外而言，国内碳纤维复合材料的应用和发展尚处于起步阶段。以奇瑞、观致、北汽集团为代表的国内汽车企业在新能源电动汽车领域开始使用碳纤维复合材料。在 2017 年 6 月的第十九届中国科协年会上，宁波材料研究所与吉利集团共同研发的碳纤维复合材料电动汽车 G10-F 亮相，该车基于碳纤维复合材料的特性进行了整车设计，实现了从汽车

零件到整体应用研究的跨越，与传统汽车相比，车身减重 30% 以上，整车减重达到 20%，高质量地实现了汽车轻量化，大幅度增加续航里程并且减少加速时间。同年 7 月，康德集团、北汽集团以及常州市高新区管委会在北京签订协议，常州国家高新技术产业开发区建设“工业 4.0 智能化碳纤维车体及部件工厂”，从事碳纤维新能源汽车车身零部件研发、生产及销售，以满足中国车企在汽车轻量化方面对碳纤维零件的需求。2018 年 8 月，碳纤维新能源电动跑车前途 K50（图 5-4）于苏州正式上市，其碳纤维车身总计 31 个零部件，17 个总成件，其中 28 个部件由江苏亨睿碳纤维公司提供。奇瑞汽车生产的插电式混合动力“艾瑞泽 7”的车身采用碳纤维复合材料，外壳质量减轻 10%，油耗降低 7%，车身总体减重达 40%~60%。



图 5-4 前途汽车 K50 高端电动跑车

5.1.3 / 高性能铝合金

铝合金密度小（ $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ ），仅为钢的 1/3，具有良好的工艺性、耐腐蚀性、易回收等特性，是一种非常优良的轻量化材料。目前，铝合金在整车的应用包括车身和底盘、新能源车的电池系统等，主要有铝铸件、铝冲压件、铝型材和锻件等（图 5-5）。



类别	①ASF框架式车身	②冲压式车身
图示		
应用车型	奥迪 A8 特斯拉(TESLA)Model S 奔驰AMG GT 凯迪拉克CT6	捷豹路虎 福特(Ford)F150 蔚来汽车 TX5
技术特点	铝板+铸件+型材 以挤压型材和铸造连接件为主，形成框架式结构，覆盖件用冲压铝板	铝板+铸件 或铝板+型材 以铝合金板材冲压为主，冲压零件数占比较大，个别部位用铸件连接，或用型材
主要连接方式	结构胶+FDS+SPR+弧焊等多种工艺混合使用	结构胶+SPR，配合其他

图 5-5 铝合金在汽车车身上的应用

表 5-2 列出了汽车轻量化后对降低燃油及排放的作用^[10]，汽车质量每下降 10%，油耗下降 8%，排放降低 4%。铸铝占汽车用铝量的 80%，变形铝合金的板材、型材、锻件已在发罩总成、车门、行李箱盖板、前翼子板、保险杠、车内结构件和底盘结构件等部位应用。此外，泡沫铝是一种超轻多孔隙结构材料，是铝合金经发泡后得到，具有很好的吸能、吸声、减振等特性，同样可以作为轻量化材料应用于汽车上。

表 5-2 汽车轻量化对降低燃油及排放的作用

内容	轻量化带来的效果	备注
汽车轻量化	油耗降低 37%，悬挂装置负荷降低 18%，降低 1/2 能源消耗，提高发动机效率	理论计算
汽车减重 10%	燃油消耗降低 8%，排放降低 4%，油耗降低 10%~15%	世界铝业学会 (按 1300kg)
汽车使用 1kg 铝	可获得 2.2kg 减重效果，寿命周期中减少 20kg 尾气排放	美国铝学会
汽车减重 100kg	燃油效率可提升 6%~8%，1L 汽油汽车可多行驶 1.1km，碳排放减少 5g/km 每 100km 油耗降低 0.3~0.6L	欧洲铝协
货车减重 1t	生命周期节油 18000L，减少碳排放量 42t	
公交车减重 1.8t	一年行驶 12 万千米，减少 CO ₂ 排放量 27t	

续航里程是新能源汽车发展所关注的焦点问题之一，而车体的轻量化有利于在同等电量搭载条件下，有效延长新能源汽车的续航里程，因此，许多新能源汽车更愿意选用铝合金结构件进行减重^[11]。用于新能源汽车制造的各种铝合金中，6×××系铝合金（板材、型材、锻件）主要应用于车体外覆盖件和动力悬挂部件，5×××系铝合金（板材）主要用于车体内衬件、冲压和钣金结构件制定，3×××系铝合金（板材）主要用于散热器和动力电池组外壳制造，铝合金铸件主要用于车体和底盘结构件制造。图 5-6 为铝合金用于新能源汽车结构件示意图^[10]。

新能源汽车中使用的铝合金牌号及性能要求见表 5-3。减轻汽车车身对于汽车轻量化非常重要，因为汽车车身一般占总质量的 30% 左右，而铝质车身对比钢结构车身，其车身质量提高 23%，抗弯性提高 62%，扭曲刚性提高 74%^[12]。

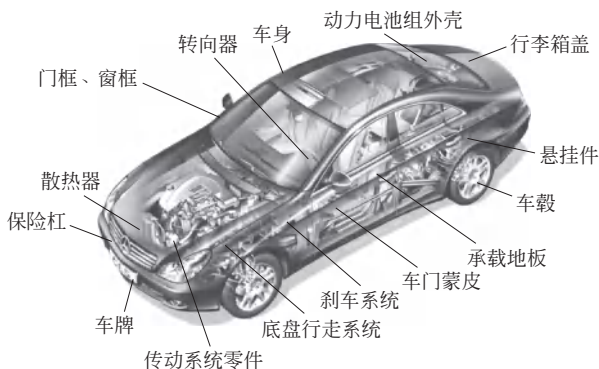


图 5-6 铝合金在新能源汽车结构件上应用的示意图

表 5-3 新能源汽车常用铝合金

材料	应用部件	合金牌号	特点及性能要求
轧制板材	翼子板、承载地板、发动机舱盖、车身顶盖板、车门蒙皮、行李箱盖	2008、2010、2036、5052、5083、5022、5023、5182、5754、6009、6016、6022、6111、6016、6181	良好烘烤硬化性能，高强度；良好冲压成型性；表面光滑平整，无表面缺陷；耐腐蚀
	散热器	皮材：4004、4045、4343、7072 芯材：3003、3003+1.5%Zn、3003+1%Zn、3004、6063	抗坍塌性能；耐腐蚀性；良好延展性
	车牌、装潢	1100、3002、5005、5252、5457、S501	表面光滑平整，无表面缺陷；耐腐蚀性
	电池壳	3003	防爆、耐高温、耐腐蚀；表面性能好，化学性能稳定；传热性、导电性、焊接性能好
	电池壳盖板	1050、1060	
挤压材	防撞梁、悬挂件、托架	5454、6005、6010、6061、6063、7021、709、7129	好的塑性和抗冲击性能；良好挤压成型性；可焊接性；耐腐蚀性；抗应力腐蚀开裂性；抗疲劳性
	车门	6005	
	散热器	翅片：1050 基板：6063	
	传动系统零件、连接件、门框、窗框	6063、6463、6151、6262	
	座位轨道、减振器棒材	6010、7003、7029、7129	
	刹车系统部件、紧固件、螺钉	2011、2017、2024、6053、6061	
铸造件	发动机盖、发动机缸体、进气管、发动机活塞	A319、A356、A360、A390、A339、ZL104、ZL106、ZL107	良好铸造性能；良好耐磨、耐腐蚀、耐热性；薄壁、轻量化
	托架罩、转向器	A380	
	车轮	5454、6010、A356、6061	
	传动系统、底盘行走系统	A356、A360、A383、A390、ZL104、ZL107、Z202	
锻压件	车轮、保险杠、底座大梁、前梁、曲轴	1100、5083、5056、6061、6082、60700	良好塑性、耐冲击性；疲劳寿命高；承载能力强；耐腐蚀性好

国外汽车的车身覆盖件已经开始大量采用铝合金板材，未来还将呈现大规模增长的趋势。例如，北美汽车企业制造引擎盖的铝合金使用率在 2012 年已达 30%，2020 年接近 75%，预计 2025 年将达 85%。以奥迪、捷豹、F-150 皮卡、TESLA（特斯拉）-S 新能源汽车为代表的车企正在推动铝合金板材在结构件上的应用。

在国际上，汽车覆盖件铝合金材料的开发起始于 20 世纪 40 年代。20 世纪 70 年代起，欧美、日本等汽车工业发达国家和地区在 6××× 系铝合金车身板研制方面投入大量人力物力。20 世纪 70 年代中期，美国率先研发了 6009 和 6010 铝合金，固溶处理后塑性好易成型，经喷漆烘烤可实现人工时效强化，但是包边性能较差。20 世纪 80 年代初期，美国和瑞士分别研发了高 Cu 的 6111 铝合金和低 Cu 的 6016 铝合金，6111 铝合金在 6010 铝合金的基础上烤漆硬化性和成型性得到显著提升。6016 铝合金则表现出更佳的成型性和耐腐蚀性，已被许多车型使用。20 世纪 90 年代中期，美国研发了 6022 合金，该合金的成型性、耐腐蚀性和烤

漆硬化性均优于 6111 铝合金，在 Ford（福特）Crow，Grand Marquis 等车型的外板和内板上获得了应用。

国内汽车覆盖件铝合金材料的研发与生产起步较晚，与国外先进水平相比有较大差距^[10]。“十三五”期间，经过科研单位、铝加工企业、汽车制造企业的共同努力，国内已初步形成生产能力，例如，南山铝业 5 系、6 系汽车板已实现了向世界知名新能源汽车制造商和一流汽车制造商的批量供货，成为国内首家乘用车四门两盖铝板生产商，但成熟产品所使用的合金牌号仅限 6016 与 5182 等。国内合资汽车企业，如上海通用的别克君威、君越、陆上公务舱 GL8 商务车引擎盖，一汽大众奥迪汽车引擎盖、车门、行李箱盖 2012 年开始已经使用铝合金板材。一汽、东风、上汽、广汽、江淮、长安等汽车公司也计划近年采用铝合金板材制造覆盖件。

对于发动机、底盘、悬挂件等，由于发动机重量一般约占整个车重的 18%，而发动机气缸又约占整个发动机重量的 25%，所以汽车减重可以从发动机气缸着手。美国通用汽车公司已采用全铝缸套，在悬挂系统中，部分构件使用铝合金，并且在逐步扩大铝合金代替铸铁的规模。发动机的活塞、油底壳、气缸盖、散热器、连杆、滤清器等部件都在逐步采用铝合金。5××× 系铝合金有着高强度、良好成型性、耐腐蚀性、高表面处理性、良好焊接性等优点，所以可被用于汽车油箱、结构件、发动机盖板等零部件。汽车悬架零部件所使用的合金以 6061-T6 为主。防撞梁使用 6A02-T6、6060-T4、6082-T6 铝合金较多，以实现轻量化的目标。

对于车轮来说，铝合金应用得更多，美铝公司曾对锻造铝合金做了大量研究，实验结果表明锻造铝合金车轮具有强度高、导热好、耐腐蚀性能强、冲击性能高、尺寸精度高、安全性高、各向振动减少、可回收、易维修等优异性能，对应用于新能源汽车有良好的发展前景^[10]。铝合金车轮温度平均比钢制车轮温度低 10~15℃，这可以降低轮胎偏差和温度，使轮胎寿命延长 10%~13%，增加行车安全性。轻型车使用铝合金车轮比传统钢制车轮轻 30%~40%，中型汽车可轻 30% 左右。汽车采用 ABS 的概率不断提高，为了减轻非悬挂件的重量和减少刹车系统的负荷，铝合金车轮将会更加广泛地应用于汽车市场中。在车轮制造业中，铝合金安装达到了 45% 左右，有的国家超过了 60%^[13]。我国在锻造铝合金车轮方面已有部分实验和成果，取得了一定程度上轻量化和节能减排的成果。

对于新能源汽车电池和电池壳来说，用铝及铝合金制造新能源汽车充电装备的电池壳、电子驱动装置、变速器、变流器、储氢装置、电池充电器、电容器壳等零部件。新能源汽车对于汽车的散热器能力要求更高，燃料电池系统中，大约有 50% 的能量转换成热量散失到大气中，这需要更高性能的散热器来辅助。散热器的性能对发动机的动力、成本、是否可靠都有着很大的影响。当汽车高速行驶时，热量自身散失不掉，需要借助其他散热方式，水冷、风冷散热是目前应用的方式。风冷散热器基板通常采用 6063 铝合金通过挤压成型来实现，随后将 1050 铝合金翅片嵌入，水冷散热器是由 4××× 系 / 3××× 系铝合金冷却管和翅片复合钎焊合成。散热器主要原材料一般是铝合金复合材料，即经过 2~3 种合金叠合轧制之后合成的多层复合材料，如 4004、4045、4047、4343、7072 铝合金等，芯材主要是 3003、3004 铝合金等。复合钎焊铝合金散热器质量比铜合金约轻 37%~45%。

5.1.4 / 高性能镁合金

首先，镁合金的密度约为 $1.3\sim 1.9\text{g/cm}^3$ ，比铝合金轻 $30\%\sim 50\%$ ，比钢铁轻 70% 以上^[14]。镁合金减振性能良好，具有较高的阻尼及吸收冲击能力，其吸收冲击的能力约为铝合金的 1.5 倍^[15]，是理想的减振、降噪及碰撞吸能材料。此外，镁合金具有较低的铸造温度及热容量（比铝熔化快 50% ^[14]），较高的充型速度、铸造精度及表面加工性能，适合压铸生产，从而针对某些附属结构较多的零部件实现集成化设计，达到减少零件数量和模具数量的目的。因此，镁合金是汽车轻量化发展进程中极其重要的材料，应用前景广阔，如图 5-7^[16] 所示，在汽车制造过程中将钢材和铝合金替换成镁合金后，可以使汽车零部件显著减重。同时，与其他材料相比，镁合金具有较高的比强度，且能实现降噪、吸振，并提高成型性、车身刚度及安全性。

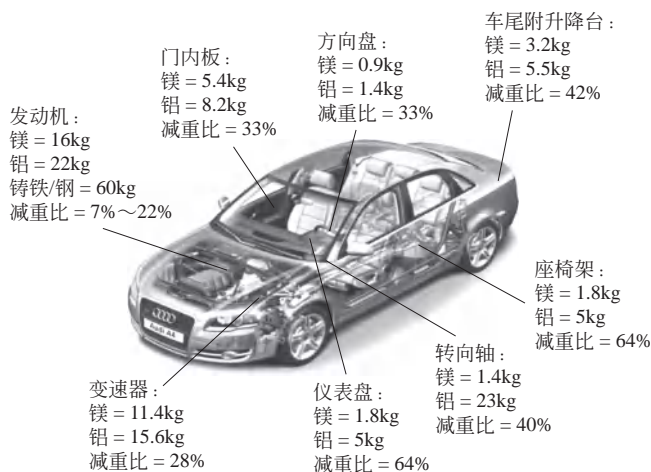


图 5-7 镁合金替换铝合金和钢材后汽车的减重情况

国内外政府及相关机构十分重视镁合金在汽车上的应用，2006 年 12 月，北美汽车研究理事会（USCAR）提出了汽车用镁合金研发计划，并联合美国能源部、加拿大资源部、北美材料和零部件供应商、大学及科研机构组成的 61 个成员单位共同参与。目前，欧洲正在使用和研制的镁合金汽车零部件已超过 60 种，单车镁合金用量为 $9.3\sim 20.3\text{kg}$ ；北美正在使用和研制的镁合金汽车零部件已超过 100 种，单车镁合金用量为 $5.8\sim 26.3\text{kg}$ ^[17]；我国平均单车用镁量约为 1.5kg ，与发达国家存在一定差距，但根据《节能与新能源汽车技术路线图》，到 2025 年我国每辆车使用镁合金将达到 25kg ，并逐步缩小与发达国家的差距^[18]。

鉴于典型镁合金较低的韧性，在碰撞载荷下容易断裂，目前镁合金主要应用于非主承力结构的零部件^[19]，例如方向盘支架、仪表板骨架、转向管柱支架、座椅骨架、气门室罩盖等。从合金成分体系上来看，目前汽车零部件常用镁合金主要有 AZ（Mg-Al-Zn）系、AM（Mg-Al-Mn）系、AS（Mg-Al-Si）系和 AE（Mg-Al-RE）系四大系列，不同成分体系在汽车零部件上的运用情况如表 5-4^[17] 所示。从成型方式上来看，镁合金零件主要可以分为铸造与

变形两种，前者通过铸造获得，而后者通过挤压、轧制、锻造等塑性成型工艺方式生产板、棒、管等形状的产品，但由于受到生产加工成本限制，相较于变形镁合金来说，铸造镁合金的应用范围更加广泛^[20]。镁合金汽车零部件的应用与发展趋势如图 5-8^[10] 所示。

表 5-4 典型牌号镁合金汽车零部件上的应用

镁合金牌号	汽车零部件
AZ91D	手动变速器、进气歧管、后窗框、门内框、辅助转动支架、离合器壳、反光镜支架、机油过滤器壳体、气门罩和凸轮罩、脚踏板、转向柱支架、变速箱上盖、操纵装置壳、气缸盖罩、前端齿轮室
AZ61	行李架骨架、立柱梁
AZ31	轮毂
AM50	座椅框架
AM60B	转向盘芯骨、电器支架、仪表梁骨架、转向盘、散热器支架、大灯托座、座椅框架、轮毂
AS41B	自动变速离合器活塞及定子、变速器壳体
AE44	变速器壳体、油底壳、发动机托架

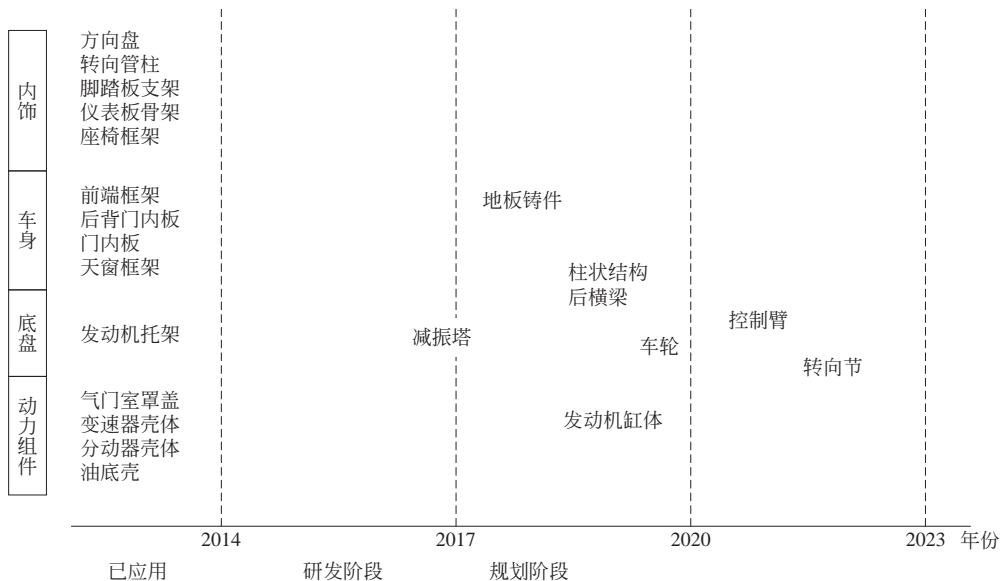


图 5-8 镁合金汽车零部件的应用与发展趋势

我国是镁资源储备及生产大国，从 2009 年起国际市场 80% 的镁由我国供应^[13]，同时，我国也具有最大吨位压铸装备的下游生产企业，在该领域我国已经形成了全球最为完整的产业链，能够实现从原镁到高端镁合金压铸件的全流程生产和制造^[21]，在汽车用镁合金轻量化应用方面，我国具有得天独厚的原材料优势与研发潜力，加速开发镁合金材料是实现可持续发展的重要措施之一。

与国外相比，目前我国镁合金压铸件的应用，基本停留在成型面积较小、形状相对简单、性能要求单一的产品开发层面，而镁合金用量大幅度提高，有赖于在一些大型、复杂薄壁结构件上的应用。由于面临的技术难题和风险，目前国内大型、复杂镁合金压铸件（如汽车变

速器壳、座椅等关键铸件)的开发与应用极少,急需的设计和制造工艺技术开发能力也有待建设,很多关键技术需要突破。

5.2 新材料在汽车领域的应用

随着汽车产业的不断发展以及人们对汽车环保性、节能性、安全性以及舒适性的要求越来越高,在不断严苛的排放法规和新能源汽车提高续航里程的迫切需求的影响下,对汽车新材料生产应用提出了更高的要求。

5.2.1 高强度钢

目前,国际主流乘用车的车身高强度钢比例已普遍达到近60%,欧系部分车型甚至超过70%,我国汽车用高强度钢的应用比例与之差距较大。美国政府宣布在2017年至2025年期间将汽车能效标准提高至54.5英里/加仑,为此美国能源部投资多个项目以加速下一代汽车用先进高强度钢和高强度合金等“更强、更轻”材料的开发,瑞典SSAB、日本新日铁以及韩国浦项等钢铁企业也加快了研发新一代先进高强度汽车用钢的进程。

① 提升高强度汽车钢应用比例和性能稳定性,降低生产成本。现阶段国内汽车企业新开发车型高强度钢应用比例在50%左右,部分车型高强度钢应用比例在60%以上。乘用车车身结构中,980MPa、1180MPa级别的冷轧汽车钢已经开始使用,但是,主要还是以590MPa、780MPa系列为主,进一步提高980MPa及以上(超)高强度钢应用比例,并提升性能稳定性,以满足汽车用户的使用要求。在以商用车和乘用车底盘为主的热轧板方面,高强韧性和高抗疲劳是其发展方向。国外的安米、JFE和浦项等均能稳定地生产780MPa高扩孔和抗疲劳钢板,980MPa已经进入认证阶段。

② 超高强度、高成型性汽车钢研发及应用。钢铁材料高强度和超高强度是汽车用钢发展的必然趋势。目前,我国已经形成了780MPa、980MPa、1180MPa冷成型汽车钢,1500MPa、1800MPa级热成型钢等(超)高强度汽车钢产品。高强度、高韧性与高成型性是汽车用钢的重要发展方向,也是实现汽车轻量化、改善材料成型质量的重要指标。进一步提高强度的同时确保理想的伸长率,是目前乃至今后的研发方向。另外,我国具备第三代汽车钢(包括QP钢和中锰钢)开发基础与优势,加大第三代汽车钢开发力度也是我国汽车用钢的重要发展方向之一^[22]。

③ 低密度高模量汽车钢研发及应用。通过向钢中加入Al、Si、Mn等轻量化合金元素使密度降低的低密度钢,以及向铁基合金中引入高模量粒子(如TiB₂)的高弹性模量钢都是汽车轻量化用钢的重要发展趋势。目前,低密度钢抗拉强度800MPa,伸长率约40%,强塑积达到32GPa·%,密度比传统钢铁材料减小10%;铁基合金中加入13%的TiB₂时,弹性模量可以达到250GPa,同时密度降低到7.39g/cm³。

④ 高强度镀层钢板开发及镀层技术研究。目前,国外新开发的汽车上采用镀层板比例已超过80%,而我国还不到50%。汽车上大量采用高强度钢“减薄减重”必然带来钢板抗腐

蚀性能的下降，需要开发高耐腐蚀的镀层超高强度钢来平衡“减薄-耐腐蚀”的矛盾。与国外相比，有差距的产品主要是 1000MPa 以上的热镀锌合金化、电镀锌和热冲压铝硅镀层方面。存在的主要技术难题为马氏体钢（包括热成型）的韧性提高、镀层钢板的氢控制、钢板表面内外氧化演变与可镀性、成型易回弹以及焊接困难等。近年来，一种新型的带钢镀层技术（真空镀）因在优化表面质量和抗氢脆方面潜力巨大正越来越受到重视，国外安米和浦项均已投入示范线。该技术涉及材料、真空、电磁、热力学、流体力学等多个专业及其耦合技术，难度高，需要“产学研”集成创新。

5.2.2 / 碳纤维复合材料

随着复合材料技术的发展，原材料价格降低，制造工艺优化，成型周期缩短，复合材料在汽车零部件上的应用越来越多。特别是对于碳纤维增强复合材料来说，随着碳纤维价格逐渐下降、复合材料制造工艺的成熟，各大主机厂纷纷进行碳纤维零部件的开发。碳纤维复合材料在汽车上可应用于发动机舱罩盖、翼子板、车顶、行李箱盖、门板、底盘等结构件和覆盖件。与高强度钢相比，碳纤维复合材料的强度也不容小觑，抗压能力亦高于钢，碳纤维结构车身不仅能让汽车结构更优，还能使抗冲击能力更强。碳纤维复合材料耐高温、耐腐蚀、抗老化性，都能够保证对车体的伤害降到最低。随着汽车领域对碳纤维复合材料的不断研究和应用，轻质高强的碳纤维复合材料应用成本下降，碳纤维复合材料零部件的应用会越来越广泛。预计到 2030 年，碳纤维复合材料将成为汽车零部件轻量化的主流材料。

碳纤维复合材料的发展主要分为两个方向，其一是纤维的应用种类，其二是树脂的应用种类。碳纤维复合材料中纤维应用主要为连续碳纤维、长碳纤维，以及短切纤维和回收后短切碳纤维、碳纤维毡，不同的纤维应用方式分别适用于小批量试制工艺、模压工艺、注塑工艺，丰富了零部件成型工艺与材料选择之间的匹配关系。而与碳纤维搭配使用的树脂，目前从航天、汽车等领域来看，热塑性碳纤维复合材料的占比在逐步扩大，主要因为热塑性碳纤维复合材料的韧性更佳，在高温高湿的环境下力学性能表现优异，材料成型工艺周期短，满足汽车行业大批量、高节拍的生产要求，材料可回收符合汽车全生命周期低碳排放的发展目标。但热固性碳纤维复合材料因常规条件下的优异力学性能，仍适用于结构件、半结构件、底盘件等部位。

5.2.3 / 高性能铝合金

铝合金由于具有密度小、易成型、易回收利用等特点，在汽车上用量会明显增加。国外发达国家铝合金在汽车上的应用已相当广泛。美国福特 F150 全铝车身较钢制车身减重约 300kg；通用汽车新一代全铝框架结构克尔维特刚度比钢制车架提升 57%，质量减轻 45kg；全新 CT6 车身框架大部分采用铝合金材料，实现减重 90kg；特斯拉车身更是大规模采用铝合金零部件，比例达到 97%。日产公司、本田公司都在车身大量采用铝合金，部分车型实现减重达 40%。

近年来，诺贝丽斯势头强劲，推出 Advanz™ 系列合金，包括高成型易回收的 5754R，以

帮助汽车制造商进一步减轻质量。外覆盖件用 Advanz e170，内覆盖件用 s118、具有良好强度与碰撞性能的 s615、高吸能性 c300 以及通用合金 e600。此外，诺贝丽斯积极研发新合金品种，最近推出了 Advanz™ 7000 铝合金，屈服强度可达 600MPa，主要用于制造保险杠系统、碰撞环和车门防撞梁等汽车组件。奥科宁克的 Micromill 技术则是短流程制备的代表。Micromill 技术制备的汽车板材已应用于 Ford150，在不增加成本的前提下，实现减重 30%。

随着一些工艺相对简单、生产成本低的铝合金零部件（发动机盖、保险杠和前后防撞梁挤压型材以及电池壳与电池托架等）的完善并投入使用，汽车用铝量将不断攀升，5×××系与6×××系高成型性板材、6×××系挤压型材、电池壳用可焊性板材等将得到开发和应用。以蔚来汽车为例，ES6 车型采用全铝车身架构，白车身铝合金应用率超过 90%，整体车身质量低于 350kg，而新车型 ES8 铝合金使用比例更是高达 96.4%。乘用车轮毂、发动机气缸体等零部件上均使用了大量铸造铝合金，例如 AC4C、101A、A356、ADC12、A360、A380 合金。车身骨架材料一般采用 6061-T6 铝合金型材，蒙皮采用 5052、5182 合金，也有少量采用 6×××系铝合金以便烘烤后得到更高的强度。专用车领域国内可以实现部分铝合金化或全铝化，欧美铝合金半挂车的普及率超过 70%，日本接近 90%，6×××系和 7×××系合金用于车身大梁、底板和悬挂等承载部件，5×××系合金用于车厢围栏和围板。

随着技术进步带来的成本下降，更多结构复杂、成本较高的铝合金零部件（如副车架、AB 柱、行李箱盖、车门等）将引入到汽车上。预测到 2025 年，汽车的用铝量可达到 250kg/车左右。6×××系与 7×××系高强度高成型性铝合金板材、电池壳用可焊高强度铝合金板材将得到应用。预计到 2030 年，将开发出性能更好的铝合金，研发铝合金变截面轧制技术、循环利用技术，以提高铝合金零部件的生产效率，降低生产成本。汽车用铝合金生产技术趋于成熟，各种结构复杂、性能符合要求的铸造件、挤压件将实现批量应用，全铝车身将占 30%，汽车的用铝量将超过 350kg/车。

5.2.4 / 高性能镁合金

随着对镁合金研究的不断深入，未来镁合金铸件在汽车中的应用仍会以较快的速度增长，变形镁合金在汽车零部件中的应用也将逐步增加。新型镁合金的开发、镁合金成型技术、镁合金耐腐蚀技术及镁合金在汽车零部件中应用的相关技术已成为当前国内外研究的热点。目前，镁合金正逐渐在原有合金系的基础上由二元、三元向多元化发展，这将是未来提高镁合金综合性能的主要趋势。

同国外相比，我国目前镁合金压铸件的应用，基本停留在成型面积较小、形状相对简单、性能要求单一的产品开发层面，而镁合金用量的大幅度提高，有赖于在一些大型复杂薄壁结构件上的应用。由于面临的技术难题和风险，目前国内大型、复杂镁合金压铸件（如汽车变速器壳、座椅等关键铸件等）的开发与应用极少，其急需的设计和制造工艺技术开发能力也有待建设。预计到 2030 年，使用镁合金的零部件将逐渐向结构件发展，乘用车用镁量将会达到 45kg/辆，为达到目标目前还有很多关键技术需要突破。

5.3 / 存在问题与挑战

5.3.1 / 高强度钢

探索新一代高强度钢的成分设计、组织调控原理及调控技术，实现高强度和超高强度汽车钢的应用，是推动汽车轻量化技术发展的重要途径之一。国内外学者在强韧化机理研究和生产工艺探索方面，开展了大量的探索研究，以期得到更高强度、高成型性、更高服役安全性能的超高强度钢，从而不断满足汽车工业发展的需要^[23]。

针对高强度汽车用钢的高成型性需求，以德国汽车工业协会（VDA）为代表又提出了增强成型性双相（DH）钢的概念。瑞典 SSAB 推出了 VDA 标准下第三代高强度钢 Docol DH 钢。DH 钢室温组织同样为铁素体、马氏体及奥氏体，但其设计原理是在原第一代双相钢组织基础上，通过成分、工艺优化获得适量的残余奥氏体，最终提高材料塑性。我国宝钢实现了高强塑积 QP 钢的全球首发。但高强塑积 QP 钢仍处于推广应用阶段，存在生产过程不稳定、材料性能波动较大、生产成本较高等问题。与 QP 钢相比，DH 钢工艺简单，对产线设备能力要求不高，性能稳定性更佳，成本更优。另外，随着汽车结构设计和高安全性的要求提高，目前宝马、奔驰等采用辊压成型方式生产的高强度钢零件逐步增加，对 CP 钢的需求逐步增加。CP 钢通过马氏体和贝氏体以及二相粒子析出强化的复合作用，强度可达 800~1200MPa，特别适合车门防撞杆、保险杠和 B 柱等安全零件。但随着汽车行业节能减排、轻量化发展的需求严苛，整车厂和零部件企业对 CP 钢提出了更高的冲压成型性能要求。迫切需要研发具有更好的伸长率及冲压成型性能的 CH 钢，来满足车企的成型性要求，同时这些零部件的特殊需求对钢企提出了更多的个性化需求和更高的竞争力要求。

热冲压零部件具有强度高、回弹小、成型难度小等技术优势，近几年呈快速增长的态势。日益严格的碰撞法规对热冲压零部件服役要求越来越高，但传统热成型钢及零部件塑性低，焊点周围存在热影响区容易发生碰撞断裂/撕裂现象，碰撞吸能效果差，以及延迟开裂风险高、模具制造成本高等问题^[24]。目前，Arcelor Mittal（阿赛洛米塔尔）热成型钢制造达到全球领先水平，其 Usibor 系列热成型钢在同等条件下可扩散氢浓度达到 0.65ppmw 水平。北美也已将高塑性热成型零部件列为重点项目推进。国内 1.8GPa 级热成型钢目前处在研发推广中，但抗氢致延迟断裂性能水平较低。目前使用的热成型钢主要为镀层板，Al-Si 涂层热成型钢和锌基镀层热成型产品的专有技术分别由阿赛洛米塔尔和奥钢联等掌控。国内钢厂也开发出了铝硅镀层板，但拼焊技术一直受制于国外专利，无法为车厂提供铝硅拼焊热冲压零件，Al-Si 镀层还存在弯曲断裂应变不足等问题。

5.3.2 / 碳纤维复合材料

尽管碳纤维复合材料在汽车轻量化和汽车安全性方面表现出无与伦比的优势，但是在现阶段并未取得大规模应用。在当前汽车市场上，绝大多数汽车仍然以传统钢材为主，即使使

用碳纤维复合材料，也只是在少量零部件应用，而在跑车、F1 赛车领域，碳纤维复合材料在车身、传动轴、刹车片等方面得到了全方位的应用。这是由于碳纤维复合材料生产成本过高，大规模地使用碳纤维复合材料会造成车辆价格的大幅增长，因此，制约了碳纤维复合材料的广泛应用。

首先，碳纤维复合材料在一定程度上表现为脆性材料，一旦发生碰撞或者其他事故，碳纤维的车身通过自身的破碎吸收碰撞产生的能量，因此极大概率地保护驾驶员的安全。但是，即使发生小规模碰撞，碳纤维复合材料也有概率破碎吸收能量，从而使得在车身的后续修理方面只能更换而无法进行维修，使得碳纤维复合材料难以在中低端汽车市场进行应用。

其次，碳纤维复合材料无法大规模应用的最主要原因在于其极高的生产成本，以聚丙烯腈（PAN）基碳纤维为例，其制作过程为：先经过丙烯腈聚合、纺丝等工序加工成为聚丙烯腈纤维或原丝，即“母体”，然后置于 200~300℃ 的预氧化炉中予以氧化，并在 1000~2000℃ 下进行碳化，最后完成碳纤维的制作。工序流程如图 5-9^[25] 所示。制作过程中，“母体”的价格过高，约占生产成本的 45%~60%；且“母体”加工工序烦琐、效率过低，设备投资大，占生产成本的 20%~35%；碳纤维原丝需与树脂结合，制作预浸料等半成品，再经过高温固化、真空导入、热压罐等工艺，才能完成碳纤维复合材料的制作，生产工艺复杂且精度要求高。在碳纤维复合材料产品研发设计中，碳纤维铺层、强度、耐久性等测试依赖于高精度模具，进一步增加了成本投入。

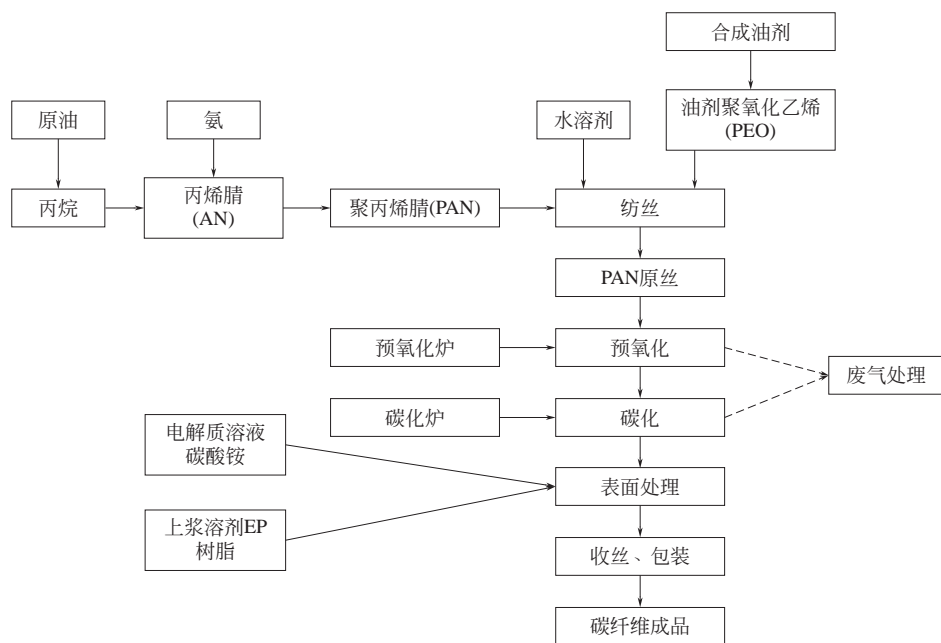


图 5-9 碳纤维复合材料生产工序流程

另外，由于国内对碳纤维复合材料的研发起步较晚，目前只有 T800 级碳纤维进入工程化应用验证阶段，更高性能的 T1100G 碳纤维等目前还处于跟踪研发阶段，高端产品缺乏，中低端产品成本居高不下。宇航级 T300、T700 国产碳纤维国外价格在 1000 元/kg 以内，国

内在 3000~4000 元/kg^[26]。不仅如此,国内对碳纤维复合材料高端产品应用不足,使得国内碳纤维复合材料难以形成规模化、集群化的研发,这也导致了国内碳纤维复合材料研发进展缓慢。

生产设备方面,国内当前也处于依赖进口的境地,国内碳纤维树脂基结构复合材料应用以跟踪替代为主,自主设计应用能力较弱,自动化成型工艺的应用比例不足 20%。复合材料设计和工艺技术落后使复合材料性能离散大、减重效果差和成品率低、成本高,已经成为制约复合材料应用的突出问题。

5.3.3 / 高性能铝合金

铝合金在汽车车身、动力部件、悬挂部件、散热器、动力电池外壳体、电池盖帽等方面的应用越来越广泛。虽然与汽车用钢相比还存在很大距离,但随着原料成本降低、加工过程简化、防腐技术提高,在未来铝合金将扮演越来越重要的角色,用量会迅速增大。国内高性能铝合金研发与应用研究起步较晚,整体上仍然处于跟跑状态,高端铝合金被国外企业,如诺贝丽斯、神户制钢、奥科宁克等企业,所垄断。与国外先进水平相比,具体差距体现在:

① 板材批次稳定性差,如屈服强度波动难以控制在 $\pm 5\text{MPa}$ 以内,冬季、夏季板材性能不一致,缺乏全流程工艺-组织-性能积累。

② 产品种类相对单一,6022、6111、5023、6056 等高强度、高成型合金尚未掌握精确的成分、工艺;易回收汽车用铝、内外板通用等新型铝合金及相关产业化技术研究尚未起步;适用于温冲压、热成型、易焊接的个性化材料缺乏研究。

③ 成本精细控制刚刚起步,尚未开展板材回收利用,液态金属直接铸造轧制、无中间退火等短流程工艺的开发刚刚起步。

目前铝合金的焊接和成型性要低于钢材,通常采用粘接、铆接等连接技术,伸长率也显著低于同强度级别的钢材,成型率低,限制了铝合金的应用^[27]。铝合金塑性低,成型难度大,尤其是大型复杂覆盖件冷冲压成型时,起皱、开裂和回弹是常见质量问题,国外已掌握成熟的铝板冲压成型技术,早在 20 世纪 80 年代奥迪 A8 就实现了铝合金侧围、车门内板、翼子板等覆盖件的开发和应用,国内缺乏铝合金产品开发经验和相应的成型工艺、模具设计和制造规范,即使个别模具厂通过为合资品牌汽车配套生产铝合金冲压件积累了一定的经验,由于在模具开发过程中主要采用传统试错法,耗费了大量的人力、物力,效率不高,难以获得推广。

铝合金具有较高的热导率、膨胀系数和低的电阻率、熔点等特点,同时铝合金易在表面生成一层氧化膜,一方面利于防腐蚀,另一方面在焊接过程中容易造成氧化物夹杂,有损焊接性能,并且铝合金对氢和水有很好的亲和性,在焊接过程中非常容易产生气孔和裂纹。这些特性导致铝合金在汽车零件的焊接质量较差,不易形成高质量接头。铝合金与热成型钢相比又有很大的性能差别,两者连接时会有很大的性能差异^[28]。另外,考虑到轻量化技术的多材料混合应用趋势,需要开展异种材料连接技术研究,如铝板与钢板、铝型材与钢板、铝板与碳纤维板等异种材料间的连接技术研究。

铝材平均价格大概是钢材的 3.5 倍,铝合金在新能源汽车的应用虽然提升了汽车的部分

综合性能，但是同时成本也相对提高。用铝合金代替钢板必须投入相当的研发费用，耗费大量的人力物力财力，并在实际中运用到新的生产工艺和流程，在新产品应用到市场之前，还需要进行大量实验保证安全、性能稳定等，这都会增加成本和风险。

在运输维修方面，由于铝合金相较于钢较软，局部拉延性较差，易出现裂纹，易产生刮伤、划伤、开裂等一系列表面缺陷，撞击变形后的铝材整形技术、表面处理喷漆技术难度都很大，而这些需要更专业、更复杂的技能和设备来维护，有时需要直接更换受损零件，对于这些铝合金的补焊、修复、替换和复原等后续维修服务都缺乏经验，还有待开发更经济更符合实际应用的方法。目前，石昊昱和叶升强^[29]针对 A365 铝合金进行了不同功率超声波的处理方案，结果经过处理改善了 A365 铝合金的力学性能和耐磨性。易杰等^[30]采用了不同焊接顺序针对使用 6061-T6 铝合金成功制作的保险杠进行实验，实践证明，优化后的焊接顺序能够在减小残余应力的同时更好地符合装配需求。张奥健等^[31]使用了 AnyCasting 软件模拟选定极佳的压力、浇铸温度等工艺参数，提高了铝合金铸件的耐磨性。

5.3.4 / 高性能镁合金

近年来，镁合金在汽车零部件上应用的相关技术已经成为国内外研究的热点，但镁合金仍存在一些问题与挑战，限制了其大规模的应用。

(1) 较低的力学性能

镁是一种典型的密排六方晶体材料，如图 5-10^[32]所示，相对于铁、铝、铜等体心或面心立方晶体材料，其位错滑移系及孪晶系较少。根据 Mises 准则^[33]，一个多晶体材料要具备好的韧性，每个晶粒需 5 个独立的滑移系（或孪晶系）。镁合金一般具有很强的织构，当材料沿 a 轴拉伸或 c 轴压缩时，压缩孪晶与锥面滑移均难以开动，此时无法满足 Mises 准则；当材料沿 c 轴拉伸或 a 轴压缩时，拉伸孪晶的开动应力极低（约 3.5MPa），且仅容纳 6.5% 的应变，表现出较低的韧性。而除此之外的载荷则会开动基面滑移（约 0.5MPa），导致强度降低。综上所述，区别于传统的金属材料铁（体心立方材料）和铝（面心立方材料），镁的力学性能呈现出强烈的各向异性与拉压不对称性，且强度较低，韧性较差。

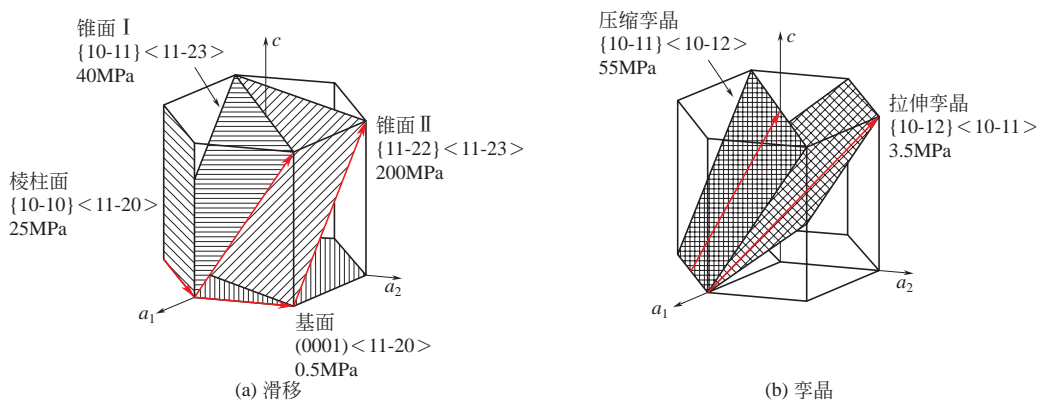


图 5-10 镁的塑性变形模式

相对于铸造镁合金, 变形镁合金具有更高的强度, 更好的延展性, 能满足更多结构件的需求, 然而, 现有商用的镁合金零部件中, 超 90% 是铸造镁合金^[34], 其中一个重要原因就是常规镁合金较低的塑性制约了其加工能力。

为了改善镁合金的力学性能, 学者从合金化的角度出发开展了大量研究。例如利用钕 (Nd) 实现析出强化、利用锌 (Zn) 提高合金晶界上化合物的数量、利用锆 (Zr) 细化晶粒, 构造出 Mg-Nd-Zn-Zr 合金, 其中 Mg-3Nd-0.2Zn-Zr (NZ30K) 的铸造性能与 AZ91 相当, 但力学性能显著提高, 在经过热挤压和时效处理后, 其综合力学性能达到 $R_m=352\text{MPa}$, $A=19.3\%$ ^[35]。另一种典型的高强度镁合金成分体系为 Mg-Gd-Y-Ag-Zr, 钆 (Gd) 与钇 (Y) 元素在 Mg 中的平衡固溶度较高, 可以实现固溶强化及时效强化, 而银 (Ag) 有利于提高合金的时效峰值硬度, 在提高强度的同时, 改善了合金的塑性^[36]。值得注意的是, 尽管一些镁合金具有较好的塑性, 但大多含有昂贵元素, 故而大大降低了其工程应用价值。对于低成本非稀土镁合金的开发已成为研究的重点, 其中 Mg-1.0Ca-1.0Al-0.3Zn-0.1Mn 挤压变形镁合金的屈服强度约为 425MPa, 抗拉强度约为 442MPa, 伸长率约为 11%, 表现出较好的应用前景^[37]。

(2) 较低的高温抗蠕变性

镁合金的蠕变行为与外界因素和内部因素密切相关, 蠕变方式主要是位错滑移和晶界滑移。以 AZ91 系镁合金为例, 晶界处的 β 相 ($\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$) 由于熔点很低极易发生高温变形, 从而导致晶界滑动引发蠕变。

利用稀土及其他元素实现合金化, 是改善镁合金高温抗蠕变性的的重要手段。例如向 Mg-Al 系镁合金中添加稀土元素, 形成的高温稳定相 Al_xRE_y , 一方面消耗了 Al 元素从而降低了 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 的产生, 另一方面能够有效地阻碍位错运动从而降低镁合金的蠕变速率^[38]。借助析出强化、固溶强化和弥散强化等基体强化手段, 可以提高镁合金的抗蠕变性。固溶强化是通过溶质元素注入形成固溶体, 当溶质原子浓度达到适当程度时, 位错运动阻力增加使滑移难度加大, 进而增强材料的抗蠕变性。析出强化是在时效过程中, 合金元素的固溶度随温度降低而形成的弥散分布的析出相与位错的作用增大了合金的屈服强度。用这种方法增强镁合金抗蠕变性的核心是采用合适的合金元素优化析出相的晶体结构和惯析面的改变来降低其与镁基体的点阵常数错配度, 并提高析出相的热稳定性以降低其扩散性, 使析出强化机制在服役条件下产生效果, 以提高镁合金的抗蠕变性。与析出强化相比, 弥散强化对温度的敏感性要小得多。弥散相具有较高的熔点和热稳定性, 溶解度低, 弥散分布在晶界、晶内, 限制了晶粒变形、晶界的滑动以及位错运动, 进而使合金的抗蠕变性适应温度环境的变化^[16]。

(3) 较弱的耐腐蚀性

镁的化学性质活泼, 在与其他金属接触时易形成原电池, 镁充当阳极发生电偶腐蚀^[16]。另外, 在制备高强度镁合金时通常采用剧烈塑性变形 (SPD), 传统 SPD 制备的超细晶所形成的非平衡晶界会显著降低镁合金的耐腐蚀性。

镁合金极易受到腐蚀破坏, 提高其耐腐蚀性关键在于两个方面: 一是对分散相颗粒的析出进行最优的合金化设计、塑性变形处理和热处理; 二是对镁合金零部件进行表面处理, 引

入物理保护层或自修复层，将镁合金与外界腐蚀环境隔离^[11]。

镁合金中的 Fe 和 Ni 等杂质成分影响了材料的耐腐蚀性，降低这些杂质成分的含量使其低于相应临界值，可以缓解腐蚀现象。在镁基材料中添加稀土元素能将晶粒细化，使晶界和相界扩散渗透性减小，限制 H⁺ 在阴极的析出，从而减慢腐蚀过程。在镁合金中添加其他金属如 Al、Mn 和 Zn 等元素在减慢腐蚀速率、提高耐腐蚀性方面也具有积极的作用。在材料加工工艺方面，速凝技术增大了固溶度，改善了镁合金内部组织结构，使材料更均匀，晶粒尺寸更小，缺陷更少，耐腐蚀性明显优于常规铸造镁合金。综合运用合金化和材料加工工艺可以使镁合金兼备较好的耐腐蚀性和机械特性。热处理工艺在一定程度上可以改变其成分分布和晶粒大小，尤其对变形镁合金耐腐蚀性的提高效果明显^[16]。

镁合金表面处理技术可以简单分为表面改性、表面涂覆层以及复合表面处理 3 类。表面改性是通过改变镁合金表面化学成分以改善表面结构和性能的一类表面处理技术，主要包括化学转化、阳极氧化、微弧氧化及离子注入等。镁合金表面涂覆处理是在镁合金表面形成一层结合强度高、化学成分和组织结构与镁合金基材不同的膜层，进而提升镁合金的表面性能，主要包括涂装、热喷涂、电镀、化学镀、物理和化学气相沉积等。镁合金的复合表面处理是将表面改性和表面涂覆技术相结合，即采用表面改性进行预处理进而保证后续涂覆层与基体有良好的结合^[39]。同时，铬酸盐转化膜、磷酸盐转化膜、微容器型自愈合涂层^[40]等自愈合或自修复涂层的研发，也是提高镁合金表面防护能力的研发方向之一。

5.4 / 未来发展

5.4.1 / 高强度钢

(1) 高性能超高强度钢的短流程高效制备关键技术

我国是拥有薄板坯连铸连轧（TSCR）产线最多、产量最大的国家。薄板坯连铸连轧产线经过多年技术改进，目前已经发展进入第三代的无头轧制阶段。无头轧制技术以优质、高强度、薄规格产品为主导方向，特别是表面质量、板形、性能均匀性要比其他 TSCR 产线有明显提升。汽车用钢迫切需要在提高产品质量的同时，降低高强度钢的生产成本和能耗。因此，研究高强度韧带钢的无头轧制技术，在可行性以及发挥国内的资源配比优势和提升产能升级方面，潜力巨大。结合我国薄板坯连铸连轧技术的飞速发展，通过高技术密集型新一代超高强度钢的研发，突破高性能超高强度钢的短流程高效制备关键技术。基于薄板坯连铸连轧流程的工艺与物理冶金特征，开展 600~780MPa 级 DP 钢、1500MPa 级热成型钢、780MPa 级 CP 钢等系列汽车用高强度钢的成分设计、组织调控研究，形成系列汽车用先进高强度钢成套制造技术。

(2) 高成型性汽车钢组织性能调控及镀层控制技术

研究高强塑积冷成型汽车钢合金设计准则和组织调控机理，开发抗拉强度 1200MPa 以

上、低合金成本、可制造性良好的冷成型先进高强度钢。基于相变诱导增塑效应，调控残余奥氏体的含量和稳定性，实现低合金体系、性能稳定可控的新一代冷轧超高强度复相钢的生产及应用。开发新一代高强度汽车用钢生产工艺与装备及制造关键技术、剪切边开裂控制和回弹预测等应用技术、轻量化评价技术。打通新一代超高强度汽车用钢的设计、研发、生产与应用产业链，实现抗拉强度 1200MPa 及 1500MPa 以上高成型性超高强度冷成型钢研发、生产及关键部件制造产业化示范，实现关键零部件减重 10% 以上，汽车轻量化钢铁材料研发与应用达到国际领先水平。

(3) 超高强度镀层汽车钢研发及镀层控制技术

从材料设计和镀层表面等基础研究入手，实现抗拉强度 1000~1700MPa 冷成型超高强度钢及热镀锌和热镀锌合金化产品研发与产业化应用。从材料设计和镀层表面等基础研究入手，突破关键工艺和装备的开发，实现抗拉强度 1000~1700MPa，镀层种类包括热镀纯锌（GI）、热镀锌合金化（GA）、电镀锌（EG）和热镀锌铝镁（ZM）。

(4) 抗氢致延迟断裂超高强度热成型钢研发及应用

研究超高强度热成型钢微合金化元素作用机制和组织调控原理，提高热成型钢的伸长率和弯曲角，通过化学成分和组织结构设计、工艺优化控制，研发高塑性超高强度热成型钢。通过氢陷阱理念设计、强韧化机理控制，提高 2GPa 热成型钢产品韧性和抗氢脆性能，研发绿色先进热成型成套技术。突破 Al-Si 镀层和锌基镀层热成型钢的韧性技术瓶颈，最终奠定新型抗延迟断裂超高强度热成型钢的研发、生产与应用技术基础，形成自主知识产权专有技术。探索基于超高强度汽车用钢技术适用性的组织调控及温热成型技术^[22,41]。

(5) 轻质超高强度钢的研发与应用

以新能源汽车为典型代表，通过轻质超高强度钢对关键零部件低强度钢的替换与革新，可大幅度提升汽车安全性，减轻汽车整备质量，显著提高新能源汽车的续航里程，降低能源消耗。新一代轻质超高强度钢的研发与应用，事关国计民生，有利于国家钢铁工业进程的高技术转型及可持续发展。在低密度轻质钢中以 κ 型碳化物来显著强化奥氏体基体是实现超高强度轻质钢的另一有效途径。其工艺过程往往需要在较低温度长时间时效处理，增加了工业化生产的复杂度。此外，目前对于 κ 型碳化物的析出机理以及对基体的强化机制等缺乏系统的研究。实现 B2 相及 κ 型碳化物的纳米级析出控制，并优化低密度超高强度钢的合金体系与工艺路线具有重要的科学研究价值。实现系列超高强度等级轻质超高强度钢的应用，尤其是关键零部件的原型钢成型技术具有无可比拟的工程价值。明确轻质高强度钢的合金化原理、强韧化机制、轻质化极限、延迟断裂机理及零部件成型技术，形成轻质超高强度钢原型钢技术。以典型汽车车身结构件为代表进行试制验证，突破传统高强度钢的轻量化极限。实现低密度超高强度钢的产业化生产，并提升产品合格率。

5.4.2 / 碳纤维复合材料

目前国内碳纤维复合材料面临着生产成本高、高端产品应用不足、生产自动化程度不足等问题，解决这些问题成为我国目前碳纤维发展的方向。随着制造工艺的突破、应用经验的

积累、规模化以及全生命周期成本优势不断凸显，碳纤维将从高端汽车向普及型汽车不断渗透，未来碳纤维复合材料将在汽车产业迎来飞速发展。

在传统工艺及设备方面如热压罐成型工艺、模压成型工艺、SMC等与国外差距不大，在新工艺方面国内应用较少。HP-RTM是近年来推出的一种应对大批量生产高性能热固性复合材料零件的新型RTM工艺技术。它是采用预成型件、钢模，真空辅助排气，高压混合注射和在高压下完成树脂对纤维的浸渍和固化的工艺，可实现低成本、短周期（大批量）、高质量生产。相比较传统RTM，HP-RTM工艺具有以下几个优点：第一，充模快、浸润效果好，显著减少了气泡，降低了孔隙率；第二，使用高活性树脂，缩短了生产周期，工艺稳定性和可重复性高；第三，使用内脱模剂和自清洁系统，制件表面质量优良，厚度和形状偏差小。产品的厚度和三维形状尺寸偏差低。HP-RTM用于制造大型复杂结构部件时优势更加明显，不仅可以在5min以内实现部件的一体化成型，而且能够大幅减少零部件和紧固件数量，简化连接和装配，极大减少了生产过程的能源消耗，降低了生产成本。

快速多孔注入压缩成型（Rapid Multi-injection Compression Process, RMCP）技术由西班牙卡普勒集团研发，中国恒瑞有限公司引进了该项碳纤维零部件快速生产国际专利技术。RMCP的特点和优势是全自动工业化生产线整合机器集成方案，根据树脂体系和产品形态，可以将生产周期缩短到3~6min甚至更短，每年单线产能达5万~10万件。多个注射头与HP-RTM和湿法模压灵活切换，比HP-RTM所需注射压力更低，注射树脂后预制体纤维与传统工艺相比变形小，单件工艺成本明显降低，主要应用于结构件、复杂形状零部件和三明治结构。

连续纤维增强CF-SMC技术，即连续纤维增强片状模塑料混杂工艺，是将连续碳纤维和短切纤维通过不同形式的混杂加工制备成形状较为复杂、有较高尺寸精度要求的复合材料零部件。在力学性能上远远优于传统的SMC制备技术，适用于大批量、重复性高、结构复杂的半结构汽车件生产。采用连续纤维增强体和SMC混杂这一成型工艺，生产制造轻量化汽车零部件，维持碳纤维复合材料高强度性能的同时兼顾了外观美观性以及工业化生产节拍。

从碳纤维复合材料中碳纤维本体出发，未来汽车用碳纤维发展趋势与关注点将主要集中于以下几个方面：高模量碳纤维的开发、低成本大丝束碳纤维的开发。从碳纤维复合材料中树脂角度出发，未来汽车用树脂侧重点将主要集中在快速固化与阻燃树脂的开发、热塑性树脂与碳纤维界面结合剂的开发等方面。

另外，当前国内碳纤维零部件正向开发过程中，缺少设计、分析和仿真所需的复合材料基础数据和工艺参数，且连续碳纤维零部件开发过程涉及材料铺层设计、仿真优化等环节，正向开发周期难以满足当前主机厂24个月的产品开发周期。碳纤维零部件于整车中的应用，需要连接工艺、无损检测、成型工艺评价、后期修复等众多专业技术的支撑，而传统汽车领域中掌握碳纤维复合材料设计能力及相关技术的人才相对稀缺。

5.4.3 / 高性能铝合金

轻量化技术逐步发展，对铝合金的性能需求也日益多样化，例如，高强度、高翻边、高成型、高吸能等。铝合金在汽车方面的应用主要集中在新工艺和新品种两方面。在新工艺方

面主要是改善加工、熔炼和热处理工艺,从而降低铝合金的加工难度,使铝合金能更好地实现加工、成型、焊接,提高铝合金的安全性、可靠性、稳定性、实用性,满足标准的力学性能,具有良好的成型性和烘烤硬化性,从而更为广泛地使用铝合金。在新品种方面,实现高强度铝合金、泡沫铝合金等新型铝合金材料的开发和应用;开发具有良好耐腐蚀性及高疲劳强度的新型铝合金挤压、压铸型材;开发屈服强度高、高耐腐蚀性的特殊铸造铝合金;对于制动器耐热性,需要开发耐热性高且其他综合性能良好的 Al-Cu 系铸造合金,进一步扩大铝合金的应用市场,取得巨大的经济效益。目前已开发出快速凝固铝合金、超塑性铝合金、粉末冶金铝合金等,还在继续研究开发新的铝合金复合材料等,改善铝合金的成分和工艺,如何提高铝合金产品的综合性能是今后需要解决的主要问题。

轻量化的测试表征以及轻量化材料的设计、加工工艺、性能之间的诸多联系还需要进一步深入研究,总结其中规律。铝合金的表面质量、喷漆前后处理及其效果、寿命等都是今后需要发展和重点解决的问题。为了促进铝合金在乘用车上的大力发展和应用,进一步改善开发新的回收再利用技术也是非常有必要的。

(1) 高性能铝合金研发及冷冲压成型技术研究

根据汽车公司对铝合金板材的多样化需求,汽车板必须持续不断推出新产品,主要包括高成型结构件 5××× 系合金、高强度高表面质量外覆盖件用 6××× 系铝合金、高成型性内覆盖件与结构件用 6××× 系合金。聚焦铝合金复杂覆盖件冲压成型技术,掌握关键成型工艺如拉延筋、工艺补充、产品形状特征、润滑处理和压边力、压边间隙等模具结构的优化设计技术,建立铝合金冲压成型工艺规范和模具设计规范,并进行批量推广应用。关注成型模拟仿真计算精度问题,掌握大变形条件下铝合金的硬化规律和屈服规律,形成铝合金覆盖件精确模拟仿真技术,实现成型缺陷的精准预判,掌握基于模拟仿真的回弹补偿和回弹控制技术,改善铝冲压回弹大的问题,实现零部件尺寸精确控制。

(2) 高强度铝合金热冲压成型技术

传统的铝合金成型技术主要适用于 5××× 系、6××× 系低强度板材,随着轻量化技术的发展,对铝合金零部件的强度提出了更高的要求,而 7××× 系高强度铝合金由于更低的塑性难以采用传统的冷冲压成型技术实现成型,需要开发铝合金热冲压成型一体化技术来有效地解决以上问题。目前,热冲压成型技术在高强度钢已经得到成熟应用,无论是国外还是国内,铝合金的热冲压成型技术都处于起步阶段,需要持续开展相关研究。针对铝合金的热冲压成型技术,加大技术开发力度,重点突破热冲压专用铝合金材料研发、高强度铝合金热冲压成型高精度数值模拟仿真技术、热冲压成型技术优化设计、模具设计、零件成型后热处理工艺及零部件性能评价等技术。

(3) 铝合金连接技术开发及应用

铝合金的连接工艺主要包括焊接、铆接、粘接和搅拌摩擦焊等,每种连接工艺具有各自的特点,无论是哪一种连接工艺,目前都还存在技术不成熟、工艺不规范等问题。铝合金相对于钢来说焊接难度更大,而汽车零件上需要焊接的部位很多,如何改善铝合金板材的焊接质量和焊接性能,提高铝合金部件的应用范围,将铝合金更广泛地应用到新能源汽车上是近

年来一直需要解决的问题。另外，考虑到轻量化技术的多材料混合应用趋势，需要开展异种材料连接技术研究，例如铝板与钢板、铝型材与钢板、铝板与碳纤维板等异种材料间的连接技术。

(4) 铝合金先进短流程制备技术

通过自主创新和关键技术突破，重点开展铝板带材短流程先进工艺与装备，实现速度大于 10m/min、厚度小于 10mm 的高合金化 5××× 系、6××× 系铝板带材产品的短流程低成本高效率制备。研究分析金属快速凝固原理，高速冷却工艺下元素的强制固溶、晶粒和结晶相细化，以及带材力学、延伸变化的组织、性能控制机理，探寻短流程工艺条件下高合金化板材性能提升和后续轧制变形力学性能控制机理，为短流程带坯制备找出凝固和工艺理论依据。设计开发出宽度为 300mm 的短流程带坯制备新装备，短流程工艺制备的带坯力学性能优于传统热轧开坯工艺。

5.4.4 / 高性能镁合金

(1) 多元化的合金设计

以现有镁合金为基础进行合金化，加入微量元素如 Ca、Sr、Ba、Sb、Sn、Pb、Bi 以及稀土元素等是研制新型镁合金的主要方向。为改善镁合金的韧性、耐高温性、耐腐蚀性，以 Mg-Al 系为基础发展形成了 AZ (Mg-Al-Zn)、AM (Mg-Al-Mn)、AS (Mg-Al-Si)、AE (Mg-Al-RE) 系列合金。围绕强度性能、延展性及抗蠕变性，镁合金正逐步在原有合金系的基础上由二元、三元向多元化发展，这将是未来提高镁合金综合性能的主要趋势 (图 5-11) [18]。

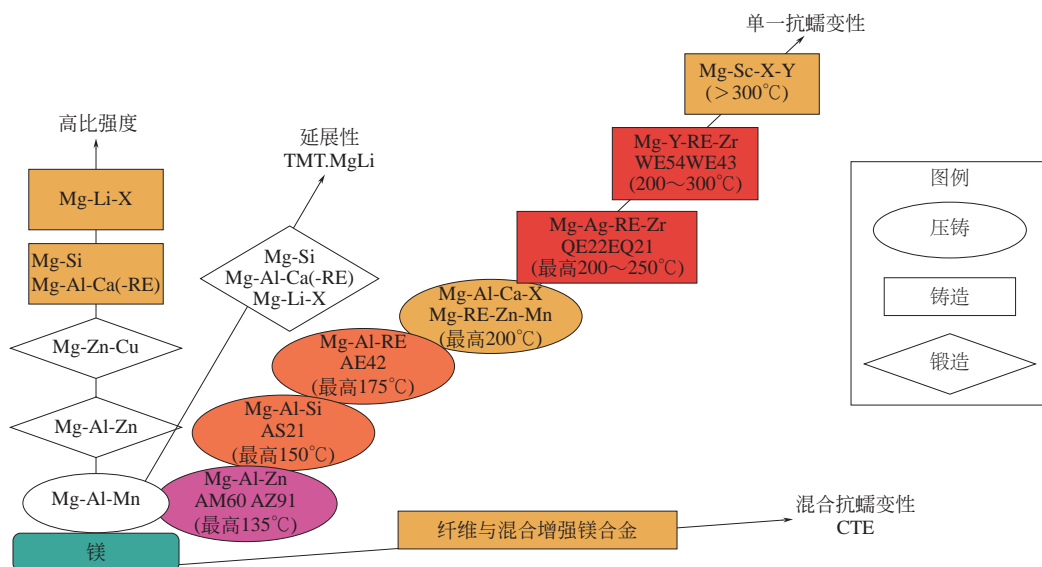


图 5-11 镁合金的多元化及其发展趋势

(2) 新型成型技术的应用

镁合金成型技术目前主要包括铸造成型、塑性成型和连接成型，其中铸造成型中的压铸

仍是最主要的成型工艺。近年来,开发了半固态压铸、低压铸造、调压铸造、挤压铸造、真空压铸、充氧压铸、涂层转移法精密铸造和触变注射成型等新技术。这些新技术在消除镁合金压铸件的铸造缺陷、提高其力学性能及内在和表面质量上均取得良好的效果。

镁合金的塑性加工方法一直以来都存在成型困难、成材率低和成本高的问题,目前主要有热挤压、等温锻造和等温轧制等加工方法。近年来,镁合金板材衬板控轧、非对称轧制、交叉轧制、累积叠轧、电脉冲辅助轧制及铸轧等技术的发展,尤其是低成本高性能镁合金板材短流程制备技术研发,极大地促进了镁合金制备工艺的发展^[42]。许道奎等^[43]通过对压缩路径及道次应变的独特设计,在AZ80镁合金中成功地制备出平均片层厚度约为200nm的高密度孪晶组织,抗拉强度高达469MPa,同时改变了 β -Mg₁₇Al₁₂相的形貌及分布,提高了镁合金的耐腐蚀性,这为高性能镁合金的制备提供了新的途径。

参考文献

- [1] 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图2.0 [M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [2] 中国汽车工程学会, 中国汽车轻量化技术创新战略联盟, 中国第一汽车股份有限公司技术中心. 中国汽车轻量化发展战略与路径[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015.
- [3] 李军, 刘鑫, 曹广祥, 等. 汽车车身高强度钢的应用发展及挑战[J]. 汽车工艺与材料, 2021(08): 1-6.
- [4] 赵征志, 陈伟健, 高鹏飞, 等. 先进高强度汽车用钢研究进展及展望[J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(12): 1059-1076.
- [5] 解江浩. 节能减排背景下汽车碳纤维复合材料应用的关键技术研究[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2018, 47(05): 87-91.
- [6] 竺铝涛. 汽车用碳纤维复合材料的发展历程及应用[J]. 上海汽车, 2013(11): 52-55.
- [7] 林刚. 碳纤维产业“聚”变发展——2020全球碳纤维复合材料市场报告[J]. 纺织科学研究, 2021(05): 27-49.
- [8] 王东川, 刘启志, 柯枫. 碳纤维增强复合材料在汽车上的应用[J]. 汽车工艺与材料, 2005(4): 33-36.
- [9] Friedrich H E. Challenges of Materials Technology for Low Consumption Vehicle Concepts[J]. Advanced Engineering Materials, 2003(5): 105-112.
- [10] 李龙, 夏承东, 宋友宝, 等. 铝合金在新能源汽车工业的应用现状及展望[J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(09): 18-25, 33.
- [11] 彭斐. “铝”掀起“新能源时代”下的汽车革命浪潮[J]. 汽车与配件, 2015(32): 31-33.
- [12] 张屹林, 王洪民, 王海涛, 等. 汽车轻量化与铝合金[J]. 内燃机配件, 2004(5): 37-40.
- [13] 廖君. 车用铝合金轻量化材料[J]. 汽车工艺与材料, 2008(2): 8-10.
- [14] 《世界汽车车身技术及轻量化技术发展研究》编委会. 世界汽车车身技术及轻量化技术发展研究[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2019.
- [15] 纪宏超, 李轶明, 龙海洋, 等. 镁合金在汽车零部件中的应用与发展[J]. 铸造技术, 2019, 40(1): 122-128.
- [16] 金霄, 汤梓铭. 车用镁合金性能对汽车轻量化发展的影响[J]. 新技术新工艺, 2015, 11: 100-103.
- [17] 王登峰. 中国汽车轻量化发展战略与路径[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015.
- [18] 李洛君, 王明明, 吕文静. 汽车轻量化材料的应用及现状[J]. 时代汽车, 2020, 8: 31-33.
- [19] 黄芳芳. 汽车轻量化难在哪儿?[J]. 经济, 2018, 21: 78-80.
- [20] 卢晓亮. 汽车轻量化材料及制造工艺研究现状[J]. 时代汽车, 2019, 13: 102-103.
- [21] 胡斌. 汽车行业发展对轻质结构部件的需求与展望[J]. 精密成形工程, 2020, 12(03): 120-124.
- [22] 梁静宇, 石增敏, 谢镐, 等. 汽车用超高强度钢的合金化方式及组织控制[J]. 金属热处理, 2021, 46(04): 20-25.
- [23] 陈亚军, 邝霜, 赵征志. 先进高强度汽车用钢氢致延迟断裂研究进展[J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(04): 265-272.
- [24] 刘清梅, 封娇洁. 汽车轻量化条件下先进高强钢的发展及现状[J]. 轧钢, 2020, 37(04): 65-70, 90.
- [25] 陈雪琴. 碳纤维及复合材料产业发展现状及对策[C] // 世界制造业发展报告. 北京: 社会科学文献出版社, 2015.
- [26] 邢丽英, 冯志海, 包建文, 等. 碳纤维树脂基复合材料产业发展面临的机遇与挑战[J]. 复合材料学报, 2020, 37(11): 2700-2706.
- [27] 熊自柳, 齐建军, 刘宏强, 等. 新能源汽车及其

- 轻量化技术发展现状与趋势[J]. 河北冶金, 2020(07): 1-9.
- [28] 韩立军, 郭院波. 汽车轻量化车身先进连接技术的应用与发展[J]. 金属加工(热加工), 2021(04): 1-6.
- [29] 石昊昱, 叶升强. 超声铸造对汽车 A356 铝合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(19): 106-108.
- [30] Jie Y, Zhang J, Cao S, et al. Effect of welding sequence on residual stress and deformation of 6061-T6 aluminium alloy automobile component[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(2): 287-295.
- [31] 张奥健, 徐春, 陈惠芬, 等. 压铸工艺参数和冷却速度对 B390 铝合金表面贫硅区的影响[J]. 上海金属, 2019, 41(1): 51-55.
- [32] 范海冬. 镁合金塑性机制研究综述[J]. 固体力学学报, 2019, 40(04): 287-325.
- [33] Mises R V. Mechanik der plastischen Formänderung von Kristallen[J]. ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 1928, 8(3): 161-185.
- [34] You S, Huang Y, Kainer K U, et al. Recent research and developments on wrought magnesium alloys[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2017, 5(3): 239-253.
- [35] 丁文江, 吴玉娟, 彭立明, 等. 高性能镁合金研究及应用的新进展[J]. 中国材料进展, 2010, 29(08): 37-45.
- [36] 赵政. 高强度铸造镁重稀土合金的开发与研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [37] Pan H, Kang R, Zeng Z, et al. Mechanistic investigation of a low-alloy Mg-Ca-based extrusion alloy with high strength-ductility synergy[J]. Acta Materialia, 2020, 186(21):278-290.
- [38] 黄伟, 张军. 汽车用耐热稀土镁合金的研究进展[J]. 铸造技术, 2014, 35(10): 2227-2230.
- [39] 王悦存, 周凡, 葛延峰, 等. 镁合金表面改性及防护研究进展[J]. 中国材料进展, 2020, 39(02): 100-112.
- [40] 丁自友, 崔蓝月, 曾荣昌. 镁合金表面自愈合涂层进展[J]. 表面技术, 2019, 48(03): 1-9.
- [41] 王存宇, 常颖, 周峰峦, 等. 高强度高塑性第三代汽车钢的 M^3 组织调控理论与技术[J]. 金属学报, 2020, 56(04): 400-410.
- [42] 查敏, 王思清, 方圆, 等. 高性能轧制镁合金研究进展[J]. 精密成形工程, 2020, 12(05): 20-27.
- [43] Yan C, Xin Y, Chen X, et al. Evading strength-corrosion tradeoff in Mg alloys via dense ultrafine twins[J]. Nature Communications, 2021, 12: 4616.



作者简介

赵征志, 研究员, 博士生导师, 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心现代交通用钢团队负责人, 北京市交通与能源用特殊钢工程技术研究中心主任, 中国汽车工程学会汽车材料分会委员。2015—2016年美国俄亥俄州立大学访问学者。主要从事高性能汽车用钢研发与应用、超高强度钢氢致延迟开裂行为研究等工作。承担国家科技重大专项和国家自然科学基金4项、工信部新能源汽车平台项目1项、北京市和广西壮族自治区重大科技专项等多项省部级项目。获北京市科学技术一等奖、广东省科技进步一等奖等科技奖励8项, 授权国家发明专利30余项, 参与制定国家标准1项, 在 *Science*、*Materials Science & Engineering A*、《金属学报》和《钢铁》等国内外期刊发表学术论文200余篇。

第 6 章

建筑新材料

鄧 晓 等

6.1 建筑新材料概述

建筑新材料是指传统的砖、瓦、灰、砂、石之外的，具有低碳、节能、环保、功能或智能等属性，在建筑工程实践中已有成功应用，并且代表建筑材料（简称建材）发展方向的建筑材料，既包括新出现的建材制品，也包括原有建材产品的性能或功能提升。

建筑新材料主要分类：

- ① 从功能上分，有保温材料、防水材料、粘接和密封材料，以及与其配套的各种五金件、塑料件及各种辅助材料等。
- ② 从材质上分，有金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料、复合材料等。
- ③ 从用途上分，有墙体材料、结构材料、外装饰材料、屋面材料、室内装饰材料、外围护结构材料、特殊和极端环境下的建筑材料等。

建筑新材料是保障建筑安全、提升建筑品质、践行建筑“双碳”战略的物质基础。因此，我国建筑新材料发展正面临着低碳绿色、高品质、可持续发展、城市基础设施数字化与智能化提升等迫切需求。

典型建筑新材料技术应用发展概况如下。

(1) 低碳水泥混凝土

水泥混凝土是我国用量最大的人造材料，也是我国基础设施升级、居住环境改善的物质基础，对节能、环保等影响巨大。目前我国水泥行业的技术、装备水平已经达到世界领先水平，形成了一批极具影响力和竞争力的设计、装备制造企业。

水泥生产主要的原材料有石灰石、黏土、含铁矿物和工业固体废弃物（简称固废）等，其中石灰石的用量最大，约占全部原材料的 80%，2021 年，全国水泥产量 23.63 亿吨，石灰石消耗约 30 亿吨。同时，水泥生产过程中的能源主要依赖煤炭燃烧，我国每吨熟料生产标准

煤耗约 100kg。

水泥生产中石灰石的分解和化石能源的燃烧是二氧化碳排放的主要来源，占总碳排放量的 90% 以上。对天然原材料和化石燃料依赖度高是水泥原材料方面的主要问题。大宗工业固废，如粉煤灰、矿粉和其他硅钙质固废等，已作为熟料生产原材料和水泥混合材被大量使用，水泥回转窑在协同处置工业和城市废弃物方面较其他工业窑炉有优势。但是，与欧洲主要国家及地区相比，我国水泥熟料生产燃料替代率仍处于较低的水平，如 2018 年欧洲燃料替代率已达到 46%，而我国目前燃料替代率低于 2%。预计到 2050 年，全球水泥产量仍将维持在 40 亿吨以上，我国水泥产量虽将逐步降低，但仍将维持在一个较高水平，预计我国水泥产量将在 2023 年提前达峰，届时水泥产量约为 24 亿吨，二氧化碳排放量约达 13.5 亿吨。降低单位水泥生产碳排放量是减少水泥生产碳排放总量的唯一途径，也是提升水泥绿色化程度的重要手段。近年来，研究者和工业界主要通过提高熟料生产热效率、使用替代燃料、提高水泥中混合材掺量、发展高贝利特特种水泥等措施降低水泥生产碳排放量，提升水泥绿色化水平。

降低混凝土生产及服役过程中碳排放量的方法主要有减少混凝土中水泥等胶凝材料使用量、利用固废等低环境负荷原材料、提升混凝土性能以延长其服役寿命及利用二氧化碳养护混凝土等。低碳混凝土包含高粉煤灰掺量混凝土（HVFAC）、超高性能混凝土（UHPC）、超高强度混凝土（UHSC）、高强度混凝土（HSC）、自密实混凝土（SCC）、轻质混凝土（LWC）和地聚物混凝土（GPC）。例如，高粉煤灰掺量混凝土中粉煤灰掺量为胶凝材料用量的 40%~50%，尽管目前早期强度较低，但新拌状态时工作性能、可泵性、抗开裂等方面均表现优异，具有很好的发展潜力。超高性能混凝土抗压强度通常为 120~200MPa，最高可达 800MPa，抗拉强度为 6~10MPa，弹性模量为 40~70GPa，国内桥梁工程中已有较多的应用；目前在 UHPC 制备方面，已提出了基于性能需求的 UHPC 纳观→微观→细观→宏观多尺度调控理论，构筑了强键合的流变调控聚合物外加剂、微纳米降黏功能材料、无机膨胀材料和有机减缩外加剂，形成了系列 UHPC 主动调控方法与功能化制备技术；而在 UHPC 结构性能和应用方面，建立了 UHPC 单/多轴本构模型，构建了 UHPC 构件的设计理论，研发了具有自重轻、装配率高、施工快捷、耐久性好、维护少、造价有竞争力等优点的 3 类 UHPC 装配式桥梁结构体系和可显著提升后浇节点区域施工效率和抗震性能的新型 UHPC 装配式建筑框架结构。

（2）外围护结构材料

•••

目前我国已经形成了完备的外围护结构材料体系，在关键技术、核心装备、标准体系等方面实现了全覆盖。部分技术已经达到国际领先水平，较好地支撑了国家建筑领域节能、环保等战略的实施。

墙体、门窗等围护结构的功能化是最经济、最节能的建筑功能化手段之一，目前发展的主要方向是太阳能建筑、生态建筑、智能建筑用围护结构材料体系。在集能型墙体系统方面，目前德国是太阳能建筑推广应用最好的国家之一，但多数使用的是太阳能屋面，墙体较少，国内外仍缺乏与太阳能板配套使用的保温结构。在智能围护结构方面，固态全无机电致

变色智能玻璃具有适合大面积制备、材料稳定性好、使用寿命长的特点，是目前最适用于建筑幕墙和外窗的主动式调控节能玻璃，国内还没有企业完全掌握大面积电致变色智能玻璃的产业化制备技术。防火玻璃方面，国际市场上圣戈班和皮尔金顿占主要份额，我国在知识产权、标准等方面与国外仍存在较大差距。欧美日等发达国家及地区在生态种植屋面、光伏发电智能屋面、特种功能屋面等方面取得了较大进展，而我国在关键材料、集成技术、标准体系等方面还存在明显不足，无法支撑屋面系统的绿色化、功能化、智能化发展。据统计，德国新建建筑屋顶绿化率已高达 80%（我国目前不足 10%）；日本光电转化屋面发电功率已达 $150\text{W}/\text{m}^2$ （我国目前基本为 $100\text{W}/\text{m}^2$ 左右）；以色列等国干旱地区集水蓄水屋面集流效率可达 90%（我国目前为 80% 左右）。因此，我国在屋面关键材料、结构与功能设计、施工与维护等方面的核心技术亟待突破，尚未形成生态屋面、发电智能屋面、特种功能屋面等系统集成技术。

国内围护材料与主体结构的安全服役和耐久性采用各自独立的设计方式，主体结构的设计服役寿命一般为 70 年，而围护结构保温隔热体系有效安全服役寿命为 25 年（部分建筑保温系统实际使用年限仅为十余年）。近年来，先后发生了若干外墙系统脱落、幕墙爆裂等事故，已经引起社会的广泛关注，通过技术升级、系统设计等思路进一步提高外围护结构的使用寿命需求迫切。

(3) 装饰装修材料

装饰装修材料门类众多，涉及的企业和科研单位分布广泛。近年来，随着我国建筑业的快速发展、人民对居住环境的进一步重视，以及全装修概念的推广应用，出现了一大批新的功能型装饰装修材料。

“十三五”期间，我国在装饰装修材料耐久性、功能复合性等方面取得了较大的进展，形成了相变材料及制品制备技术、净化功能材料及制品制备技术、装配式部件及一体化集成技术等，赋予了传统装饰装修材料空气净化、抗菌、调温保湿等功能，对行业发展起到了带动作用。如相变材料及制品研究方面，尽管从事该领域研究的机构（包括德国 RUBITHERM 公司、日本 JSR 株式会社等）在技术上起步较早，但我国相继对相变储能材料及储能建材进行了基础性探索研究，开发了相变储能混凝土、砂浆、相变石膏板等建筑材料，并在近零能耗建筑上进行了一定规模的应用。净化功能材料及制品方面，国内外从事该方面研究的机构，如日本东北大学、韩国 Korea Basic Science Institute、中国福州大学等，主要以实验室研究为主，能实现工业化生产并应用于室内空气净化的材料寥寥无几。“十三五”期间，中国建筑材料科学研究总院、北新集团建材股份有限公司等单位率先开展相变储能装饰性建材的系统性研究，在相变材料及其封装构件和建材制品研究方面取得重大进展，并实现规模化生产应用。装配式部件及一体化集成技术方面，我国已基本达到国际先进水平，美国、日本以及欧洲在一体化装饰装修材料的健康、安全、长寿命等方面已经有了一定的研究和应用。

(4) 固废资源化利用绿色建材

我国固废排放量巨大，资源化利用制备建材是固废大宗消纳的有效途径。随着新型城镇化建设和战略性新兴产业加速发展，新型固废不断产生，总量快速增加，组分日趋复杂，综

合利用难度加大。“十三五”期间，我国在固废建材化利用方面取得了一系列研究成果。针对城市污泥资源化制备建材过程中脱水困难、能耗高、难以大规模利用的问题，开发城市污泥（含水率达80%以上）多级深度脱水和除臭技术，研制污泥基造孔材料、复合矿化垃圾制备节能烧结墙体材料；开发快速无机胶凝技术，制备污泥基保温材料。针对我国生活垃圾焚烧灰渣和污染土壤重金属含量高、资源化利用率低的现状，开发垃圾焚烧灰渣和污染土壤制备轻集料关键技术；研究垃圾焚烧灰渣和污染土壤的基本特性，揭示重金属离子在轻集料制备和工程应用过程中的迁移、转化、固化机制，开发轻集料制备协同重金属离子固化技术；明确高掺量垃圾焚烧飞灰、污染土壤制备轻集料的组成设计方案，揭示烧结热动力学过程对产品性能、重金属离子固化和污染物排放的影响规律。针对低活性锂渣的基本特性，选择以锂渣为原料制备轻质高强保温材料；揭示锂渣粉的物理化学改性机制，建立锂渣基碱激发材料的聚合反应模型，研究碱激发锂渣粉制备高强碱激发材料的工艺技术；提出锂渣基轻质高强多孔材料制备中加压发泡与孔结构调控的关键技术；研发大掺量锂渣基轻质高强保温材料和轻量化装饰墙板的工艺技术。针对非活性尾矿难以资源化利用的问题，选取黄金尾矿、菱镁尾矿、粉煤灰硅钙渣等为研究对象，研究非活性高硅固废相特征对颗粒表面低温接枝活化与交联增韧调控；研究高硅固废非平衡态表面活化、增韧、发泡一体化演化机理；研究高硅尾渣基轻质材料有机接枝发泡对保温隔热性能的关系及作用机理；分析粉煤灰硅钙渣的矿相结构特点，重点突破高碱体系下杂质含量控制及晶型定向调控技术，开发粉煤灰高硅固废低温苛化、静态水热两步工艺制备高活性硅酸钙粉体填料技术。

这些研究成果较好地突破了固废建材化利用的关键技术瓶颈，依托这些成果所形成的商业模式为“十四五”期间固废的资源化利用提供了很好的条件。

（5）特殊和极端环境下的建筑材料

•••

深远海、深空、深地等特殊环境事关科技前沿，对绿色建材提出了许多新的技术要求。在特殊和极端环境下建筑材料方面，形成了矿物结构调控技术、高抗蚀硅酸盐体系熟料的烧成技术、高活性 C_4AF 矿物熟料的稳定生产技术，建立了抗侵蚀性能显著提升的高铁低钙复合硅酸盐熟料体系；开发了水化铝酸盐晶型转变的专用抑制剂，形成了高抗蚀铝酸盐水泥基材料的复合体系及其制备技术，以及高抗蚀铝酸盐水泥基材料水下工程应用中的抗离散性及施工技术。针对低温海洋环境工程的快速施工要求，开发了碱度高、后期强度稳定增长、高耐磨的快速施工用硫铝酸盐水泥基材料；开发了硫铝酸盐水泥基材料凝结硬化、流变性或粘接性较好的专用外加剂，完善了硫铝酸盐水泥基材料的性能调控技术，满足了不同温度环境、快速施工及修补防护工程应用中的功能需求。形成严寒环境高耐久混凝土制备、养护、施工与评价方法等成套技术，并在红沿河核电工程和京东“亚洲1号”长春长德物流园工程中示范应用。建立了我国海洋离岸地材资源分布调查和离岸地材相关理化性质数据库，研发了离岸地材混凝土专用功能化学外加剂和矿物掺合料，制备出海洋地材 C40 混凝土，形成相关标准；形成利用未净化海洋骨料制备绿色混凝土的关键技术，开发了抗钢筋锈蚀混凝土、超高性能海洋骨料混凝土、绿色珊瑚骨料混凝土及砌块、固盐剂等；开发了不锈钢-碳钢复合钢筋等新材料，形成了海洋环境混凝土制备与监测技术；制备了 FRP（纤维增强复合材料）筋-

海砂混凝土构件，解决了严酷环境下海砂混凝土结构的长期耐久性问题，满足与国防建设密切相关的岛礁建设的重大需求。采用硼工业渣、特种骨料制备出高耐辐照混凝土，300℃高温恒温 40h 后抗压强度提高 30%，氯离子扩散系数为 $1.47 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$ 。形成了高原复杂环境混凝土泵送关键技术、变形与裂缝控制技术、抗渗耐腐蚀技术，成果在西藏 S5 线快速路主嘎拉隧道工程中示范应用；研发了长寿命超轻质制备、施工与评价技术，完成了长寿命超轻质混凝土材料制备、验证与工业化生产，并成功示范于西藏林芝机场。针对重要构件难维护、减灾防灾与战备需求，形成了多元离子络合型和可控诱导释放型自修复混凝土制备与应用技术、严寒环境抢修抢建用磷酸盐水泥混凝土技术，成果已在巴基斯坦卡拉奇核电站取排水工程和中国新疆乌尉高速公路中示范应用。

6.2 新材料在建筑领域的应用

(1) 支撑国民经济高质量发展

当前我国建筑材料产业正处于中国制造和中国创造并举期，传统建材产业量增加到了顶峰期，结构调整补短板青黄不接攻坚期的三期叠加关键阶段，规模化、标准化、同质化的传统建筑材料市场需求已经基本饱和，高能耗高污染高排放等问题凸显。因此，无论是提升节能、环保、质量、安全标准，加快淘汰落后、去产能进程，还是大力发展新兴产业、建材服务业，推进供给侧结构性改革，补短板、调结构；无论是推进建材行业生态文明建设，实施大气污染防治攻坚战，还是推进智能制造、高端制造，建筑材料产业必须加快转型升级和关键技术领域自主创新，对支撑我国经济发展、保障我国基础设施高质量建设、抢占基础材料科技前沿制高点、为建材行业实现超越引领战略迈上一个新台阶、实现我国从材料大国向材料强国转变具有重大意义。

(2) 推动传统行业功能化和智能化转型

面对全球信息技术与新材料不断交融、人工智能不断发展的新形势，针对我国新型城镇化快速发展、环境保护日益严苛、居住功能不断提升的现实要求，以绿色化、功能化、智能化和国际化为基本目标，坚持创新驱动，面向新时期城镇化高质量发展需求，积极推动绿色建材领域与人工智能、新材料、新能源等领域的深度融合与科技创新，突破建材由单一功能向多功能复合关键技术、建材智能生产技术等系列关键技术转变，建成绿色建材生产、应用示范园区，提升绿色建材生产和制造过程的绿色度及产品的功能和智能水平，创建具有中国特色和世界影响力的绿色建材制备与应用技术标准体系，为城镇化的绿色发展提供有力支撑。开展建材行业的绿色化、功能化、智能化和国际化发展对提升行业品质、推动可持续发展具有非常重要的意义。

(3) 提升资源综合利用水平

随着我国城镇化和战略性新兴产业的快速发展，城市与工业新型固废不断产生、总量快速增加、组分日趋复杂、综合利用难度加大，成为威胁国民健康和环境安全的重大隐患。大规模高效、科学地利用地域性天然原料制备建筑材料，可解决资源短缺的问题，实现建材

工业的可持续发展。城市污泥、矿化垃圾、生活垃圾焚烧灰渣和污染土壤是我国城镇化过程中产生的几类典型城市大宗固废。在城市污泥制备建材方面，国外如日、英、德等率先开展了利用污泥制备水泥、砌块、轻集料等研究，国内在“十三五”期间已经取得一定进展，但仍存在掺量低、脱水能耗高等问题。在垃圾焚烧灰渣和污染土壤资源化利用方面，欧美等多将垃圾焚烧灰渣固化在水泥熟料中或替代混凝土骨料使用；国内进行了灰渣制备阿利特水泥、混合材等研究，但也存在烧结耗能较高、固化方式比较单一、重金属固化理论研究不足等问题。战略性新兴产业高速发展的同时也带来了固废快速增加、新废不断产生的问题，严重制约相关产业的可持续快速发展。和传统工业固废相比，战略性新兴产业排放的固废组分更加复杂、环境危害更严重、处理难度更大，导致已有技术存在对新废适应性不足、固废资源化率不高和产品附加值低等问题。因此，迫切需要开发高固废、高性能的环境友好型绿色建材规模化制备技术。建筑垃圾产量随着城镇化进程的高速发展显著增加，资源化成为解决建筑垃圾的主要途径。经过近 70 年的研究实践，欧盟、日本、美国等发达国家通过不断探索和实践，建筑垃圾资源化率已达 70%~98%，目前主要研究方向是建筑垃圾再生产品（骨料）应用的高性能化和可持续发展，其热点领域包括再生骨料的改性强化、再生混凝土的结构应用及再生处置的信息化、智能化等。在利用地域性天然原料制备建筑材料方面，只有少数天然原料（如煤矸石）资源化利用技术相对成熟，但总体处于分散、不系统或基础研究阶段，在成果产业化与应用、产品品质与一致性、评价技术与标准等方面存在诸多问题需要解决。“十三五”期间，地域性天然原料向大规模、高效、科学、环保利用方向发展，更加注重建筑材料及制品的生态和绿色效果，但总体仍处于分散、不系统研究阶段，在产业化关键技术、生态建材品质、产品附加值等方面存在问题。如地域原材料制备建筑材料生态化和功能化研究不足、地域原材料使用量偏低等。

（4）助力“碳达峰”“碳中和”攻坚工程

•••

我国以制造业为主的工业部门能源消费总量为 25.9 亿吨标煤，占全国能源消费总量的 54.9%，其中钢铁、建材、石化三个重点产业能源消费占制造业能源消费的 67.7%。2018 年，我国工业部门二氧化碳排放量为 51.2 亿吨，其中钢铁、建材、石化三个重点产业占工业部门碳排放总量的 69.6%。2020 年，水泥生产过程二氧化碳排放量为 13.2 亿吨，约占建材产业碳排放总量的 80%。降低生产过程中的碳排放对建材行业，特别是水泥工业至关重要。通过技术手段降低建材行业碳排放是实现“碳达峰”“碳中和”目标的必要方式。

（5）服务“一带一路”建设

•••

建材的国际化发展是提高我国建材核心竞争力、保障行业持续发展的重要支撑。“一带一路”建设是对全球国际合作以及全球治理新模式的全新探索，对于推进经济增长和供给侧结构性改革、开创地区新型合作关系具有划时代的重大意义。在参与“一带一路”建设过程中，要坚持突出中国品牌、中国技术，突出一流品质、一流信誉，坚持输出先进技术和优势产能。通过大型国企、研究院等在世界范围内布局，形成一批具有国际竞争力的绿色建材制备和应用体系；加快推动建材标准的国际化进程，特别是建材标准在“一带一路”的推广与应用。

以实施“一带一路”国家战略为契机，紧抓国际化发展业态，在功能化、智能化建材产品产业的装备品质、品种、品牌建设的同时，加快我国相关技术及产品的产能合作和“走出去”发展，提升国际影响力。由于不同国家和地区的资源和经济存在差异性，建筑新材料中特别是绿色建材的推广效果将会受到显著影响，如何结合区域有针对性地进行建筑材料绿色化生产是影响绿色建材应用的国际化关键问题。因此需要形成完善的调查评估机制，分析不同区域内的资源与经济现状下建筑材料绿色化技术优选的能力，从而形成强而有力的输出模式。

6.3 / 存在问题与挑战

目前，在新冠肺炎疫情持续蔓延的状态下，国际经济受到前所未有的冲击，国际贸易受到严重阻碍，中美两国经贸摩擦持续升级，经济压力进一步增大。我国经济进入新常态，先进建筑材料产业发展机遇和挑战并存，既有投资和消费结构变化带来的深刻影响，也有发展方式转变提出的紧迫要求。新型工业化、信息化、城镇化、农业现代化的同步推进，为建筑材料产业提供持续中高速增长空间；需求结构变化和有效供给不足，迫使建筑材料产业优化调整产业体系；生态文明建设不断推进，倒逼建筑材料产业转变发展方式、转换发展动能；推进国际产能合作，要求建筑材料产业加快培育竞争新优势。

6.3.1 / 建筑新材料面临的挑战

(1) 全球制造业竞争新格局面临的挑战

近年来，支撑全球经济平衡的价值链分工体系开始动摇，全球产业竞争格局呈现出制高点抢先、中高端对抗、中低端反转重塑等重要变化。新一代信息技术与制造业深度融合的新产业革命，引发国际产业竞争制高点重构。例如，美国的工业互联网平台（IIRA）与德国的工业4.0平台（RAMI 4.0），为各行业企业实现智能网络链接和智能生产提供统一兼容架构、标准、试验案例以及关键技术支撑，在参考架构和标准方面重构产业竞争制高点，依托跨行业的工业互联网平台和行业领先企业的工业互联网平台，构建以网络平台为制高点的国际产业竞争新格局。此外，中高端产业领域和环节的全球份额向新兴国家大规模转移，新兴发展中国家大力发展推进产业向中高端提升。

作为建材制造业大国，我国建筑材料产业面临发达国家高端制造业的压制和新兴经济体国家中低端制造业新发展的激烈竞争的两头压力，一方面要通过科技创新建优势、补短板，推动我国建材制造业向产业链高端提升发展，解决关键瓶颈问题，不被“卡脖子”；另一方面又要通过科技创新重塑建材产业价值链体系，实现融合发展、跨界发展，提升我国建材制造业的国际竞争力，实现我国建筑材料产业超越引领世界建筑材料产业。

(2) 制造业高质量发展面临的挑战

中国经济由高速增长阶段转向高质量发展阶段，要求我国建材行业必须向高质量发展转型，但我国建材行业智能化、标准创新提升、信息经济、数字经济等基础能力建设滞后，导

致建材产业中低端技术装备的同质化严重，创新驱动缺乏动力，更高附加值的建材新材料、新装备、新工艺研发落后，影响建材产业高质量发展。

(3) 建材行业绿色可持续发展面临的挑战

随着国家“碳达峰”和“碳中和”发展战略持续推进，大气污染防治攻坚战和绿色发展理念日渐深入人心，国家生态环境保护日益加强，建材行业面临能源、资源、环境的约束越来越大。作为能源和资源依赖型的建材制造业，粗放式发展模式必须得到扭转。建材行业要减少对自然资源、化石能源的依赖和消耗，降低行业烟气排放对大气的影响，必须要创新建材行业绿色发展路径，开发新技术，提高行业高效资源化，利用城市与工业固废、低品质矿产、再生能源，提升行业烟气治理技术水平的同时，保障产品质量，保持产业综合竞争力。

(4) 建材行业基础薄弱面临的挑战

我国建材行业正处于中国制造和中国创造并举期，科技创新模式正在发生深刻变化，原有的引进—消化—再创新模式已不能支撑我国建材行业超越引领世界建材的战略目标。无论是生产型企业，还是专职科研院所，对关系行业竞争力和长远利益的共性、关键性、高端的新领域和前瞻性技术研究都不够重视。同时，国际制造业竞争不断加剧，购买或技术转让等方式屡屡受限，企业的技术创新、资源配置与急需解决的重大关键共性技术问题未能紧密结合，行业结构调整和转型升级缺乏先进技术和高端产品支撑，这就要求我国建材行业必须从源头开始加强基础理论研究和颠覆性技术的探索，超前布局，注重应用基础研究，增强行业原始创新和自主创新能力，开发原创性和颠覆性技术，才能形成先发优势和领先地位。

6.3.2 / 建筑新材料技术应用存在的问题

(1) 功能性建材发展缓慢

功能性建材发展和推广用量少，市场仍主要受价格等因素制约，新兴产业和新的经济增长点发展相对缓慢，在短期内还没起到替代和促成行业总体结构发生显著变化的作用。我国在室内功能材料及制品性能提升和应用方面取得了一系列成果，但相关技术亟待提升。如相变建材方面，材料封装仍然存在易泄漏、易老化等问题，限制了制品的性能、质量及应用；基于成品建筑的全屋装配式内装技术在日本、德国等国家发展较快，而我国基本处于空白；长效抗菌、广谱净化、调温/调湿、电磁辐射防护等方面存在基础研究专利数量多而工程应用专利少等问题；相关标准多偏向于单一产品，在应用技术评价标准及验收规范等方面不够完善。

(2) 建材工业的智能化发展程度不高

智能建材是智慧城市的关键组成部分之一，也是建材发展的重要方向。智慧城市的发展轨迹 1.0 版指的是数字化，2.0 版指的是网络化，3.0 版指的是智能化，4.0 版指的是智慧化。截止到目前，全国 100% 的副省级以上城市，包括 76% 以上的地级城市和超过 32% 的县级市，总计大约 500 座城市已经明确提出或者正在建设新型智慧城市。但我国大部分的城市还停留在 1.0 版和 2.0 版，与之配套的智能建材的研发和应用也仍停留在智慧不足、少量应用的阶段。面对建筑新材料与信息、能源、生物等高新技术加速融合，大数据、AI、机器人及虚拟现实将

带来全新的居住体验等变革性需求，迫切需要大力提升建材工业的信息化和智能化水平。

(3) 建材绿色化程度偏低

建材的绿色化程度偏低，绿色生产、绿色加工等方面的基础理论和技术储备不足，在固废安全性、环保性、生态化应用等方面存在明显不足。《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》中明确指出，“十四五”期间将构建系统完备、高效实用、智能绿色、安全可靠的现代化基础设施体系；在推动绿色发展方面，将支持绿色技术创新，推进清洁生产，发展环保产业，推进重点行业和重要领域绿色化改造，推动能源清洁低碳安全高效利用。绿色建筑材料领域仍存在一些问题亟待解决：一是建材的绿色化研究不够，产品复合功能有待提高，产品长期使用性能研究缺失，产品生产和应用技术体系不完善；二是原创性不足，未能与现代信息技术、大数据等有效结合，不能满足智慧城市、智能交通、智能家居等需求；三是标准、专利等国际化程度不高，限制了相关技术的国际化推广和应用。

不断提高绿色化水平是建材发展的主要趋势。“十三五”期间，本领域针对绿色建筑材料与结构体系制备和应用过程中存在的寿命、环保、安全等重要科学问题，深入开展高性能结构材料、围护材料、装饰装修材料、地域性特殊原料和固废制备绿色建筑材料的应用基础和关键技术研究，在建筑节能、固废利用等领域取得重点突破，抢占了部分技术制高点。随着中国城镇化进入 2.0 时代，人们对建材的要求将由量的增长以满足需求转变为质的提高以满足美好生活。

6.4

未来发展

以提升建筑材料产业科技创新能力和整体竞争力为出发点，着力解决建筑材料产业面临的传统建材产能过剩、新兴建材与绿色建材发展缓慢、环境负荷重、能源效率低、资源瓶颈制约等重大共性问题。推进产业结构调整与产业升级，加强先进材料、关键战略材料及前沿新材料的基础理论研究，大力发展新兴产业，提升新材料产品附加值和产业竞争力，加快绿色建材的开发与推广。

到 2025 年，去产能将在所有建材传统产业推进与突破（在优化结构的同时产能利用率达到 80% 以上），补短板的发展速度必须超过总体增长的速度，全面推进产业结构和产品结构的调整，在主要产业企业数量减少四分之一的前提下，行业经济结构调整与优化成为转折标志。建材各主要产业基本实现中国制造和中国创造并举，主要产业的骨干企业的技术、装备、产品基本达到世界领先水平，半数产业、半数企业追赶世界领先与世界领先并跑，为中国建材行业总体实现“创新提升、超越引领”的发展战略及再登上新台阶奠定基础。

到 2035 年，建筑材料产业生态文明程度大幅提高，各主要产业建材企业实现全面绿色制造，能源利用效率和污染物排放达到国际领先水平，国际竞争力全面提升，具备全球配置资源的优势与能力，有国际、国内两个市场互动和互补的掌控能力，主要行业的关键技术、关

键装备、关键材料、高端产品在全球建材产业发展中起引领作用。

6.4.1 / 建筑新材料科技和产业发展保障

(1) 科技创新基础能力

加强先进建筑新材料领域基础研究，提升原始创新能力。针对先进建筑材料基础研究不足，原创技术不多，低端产品过剩、高端产品供给不足，难以支撑行业传统产业淘汰落后、化解过剩产能、高质量发展等问题，要深化先进建筑材料基础理论、应用基础研究；加强产业应用技术与基础理论结合，探索建筑材料制备新机制、新方法、新工艺，加快生物、纳米、仿生科技与建材产品相结合，延长服役寿命，实现建筑材料绿色化与功能化。针对绿色建筑、智慧城市、国防军工及极端环境重大工程建设的迫切需求，加强水泥、混凝土、陶瓷、高技术玻璃、特种无机纤维及其复合材料等建材主要产品性能和功能提升技术研究，进一步提升产品性能和质量，扩大产品功能，提高相关产品的固废资源化利用程度，推动国家重大工程高耐久、长寿命、绿色低碳可持续发展，实现先进建筑材料产业高质量发展。

(2) 支撑保障基础能力

开展矿产资源的开采与保护，保障我国原材料供应链安全。水泥、玻璃、陶瓷以及其他先进建筑材料产业是资源导向性产业，与矿产资源的分布与储量息息相关。此外，高质量矿石及矿石制品是保障先进建筑材料高端产品的核心原材料，加强矿产资源的勘探、开发及有效利用是我国原材料供应安全的核心保障。为此，需加大国内地质找矿力度，强化重要矿产后备资源保障；加快实施“走出去”战略，充分利用境外资源；合理保护开发矿产资源，促进资源高效利用，保障优势矿业企业发展对后备资源的基本需求等。

(3) 产业竞争基础能力方面

围绕国家战略性新兴产业发展，提升建材新兴产业的产业化规模。创新培育壮大新材料产业，发展新材料产业已经上升到国家战略，面对疫情和新业态，攻克产业链中的短板和“卡脖子”材料技术，持续研发创新，培育新的经济增长点，开拓更多的新材料产业。持续解决产业“卡脖子”难题，围绕国家重大需求，聚焦玻璃新材料，加速 11/10.5 代液晶玻璃基板、OLED（有机发光二极管）玻璃基板、0.1mm 柔性触控玻璃等“卡脖子”材料的研发与产业化攻关；围绕新基建，加速突破新基建相关前沿技术产品；围绕重点领域，加速推进 5G 基站复合材料、5G 终端显示材料、特高压绝缘材料、移动智慧能源光伏材料等前沿技术产品开发与产业化。

淘汰落后产能，提升智能化制造水平。围绕产业两化融合、智能制造和高端制造需求及行业淘汰落后、去产能和产业升级的总体要求，加强生产流程参数信息化、数字化研究，加大建筑材料产业基础软件的自主开发力度，加强两化融合、智能制造标准、规范体系研究及制定，以及行业关键智能制造专用技术、系统研发及推广，通过生产过程信息化、智能化，实现生产线智能化控制、远程控制，提高生产效率。重点加强水泥、玻璃、陶瓷、玻璃纤维等建筑材料各产业制造全流程技术、装备的智能化创新研究，开发智能化新一代产业技术和装备，研发水泥熟料煅烧新工艺，加快矿山开采的智能化、数字化、绿色化研究。

(4) 可持续发展基础能力

加快研发建材行业烟气治理新技术，开发绿色高效除尘、脱硫、脱硝的新材料与新方法。开发材料的循环利用与材料再制造技术，实现建筑材料产业可持续发展。

(5) 产业生态环境

以行业领军企业为主导，统筹规划，整合行业创新资源，建设综合创新中心，作为引领行业发展的方向。中心建立研发攻关、产业化及应用推广、检验检测及数据中心等多个平台，形成中心技术研发—产业转化—推广应用—检验检测—研发反馈的闭环运作方式，实现行业创新资源的有效协同。

建设先进建筑材料产业研发攻关平台。以市场化运作为核心思路，以网络化协作为纽带，在现有国家重点实验室、省市级研发中心等研发资源基础上，通过企业间、产业间纵向、横向联合，建设一批先进建筑材料产业研发攻关平台。重点加强国际前沿生产新技术、新方案研发，产业核心技术升级。平台研发应重视先进建筑材料产业外部性、支撑性强的特点，开展跨行业融合性技术协同开发，整合产业链内、链间研发资源，推广先进建筑材料产业链间协同的新型研发合作模式。

打造先进建筑产业成果转化和应用推广平台。以具有实力和影响力的生产企业为核心，与研发平台紧密结合，打造一批先进建筑材料产业成果转化和应用推广平台、研发技术转移扩散平台和商业化应用平台，充分发挥企业生产实践、投融资、项目工程管理等各方面优势，开展中试及工程化试验、工业化实施、先进建筑材料应用模拟及服役检测、专业人才培养等工作，加快先进建筑材料开发及产业化步伐。

组建材料性能测试评价中心。针对目前先进建筑材料测试体系的分散和专业性弱的问题，完善现有重点先进建筑材料研发机构、生产企业和计量测试技术机构现有测试评价体系，整合形成专业化、市场化、集中化的材料性能测试评价中心，打造设计应用资料库、产业大数据等平台，支撑建筑材料标准体系建设，建立完善的材料综合性能评价指标体系与评价准则，形成一批专家评价队伍，开展材料性能检测、质量评估、模拟验证、数据分析、表征评价和检测认证等公共服务。

6.4.2 / 建筑新材料发展展望

到 2025 年，我国先进建筑材料产业规模与技术水平能够满足我国国民经济、国家安全、社会可持续发展的需求，逐步形成以企业为主体、以高校和科研机构为支撑、以产学研用协同创新为基础的先进建筑材料产业体系，解决我国高技术产业发展“卡脖子”的关键问题，实现关键核心技术自主可控，有效支撑高端装备制造、信息技术等产业发展需求。从“需求牵引”发展模式转向“材料引领创新”模式，为我国战略性新兴产业发展、实现中国制造 2025 战略目标提供有力支撑。

到 2035 年，我国先进建筑材料产业全面满足我国经济和社会的需求，全面完成产业智能化、绿色化技术应用布局，掌握全球先进建筑材料产业技术和产品话语权，产业整体技术和规模水平全球领先。培育多家全球先进建筑材料龙头企业，完成由先进建筑材料大国向先进

建筑材料强国的转变，将先进建筑材料产业打造成为我国国民经济健康稳定运行的重要支撑产业。

6.4.3 / 建筑新材料未来发展建议

(1) 加大基础研究投入

围绕行业可能出现的颠覆性技术和前沿领域，以及我国特殊领域的多品种、小批量、高要求，关注交叉学科融合发展，研究基础材料改性优化的理化基础、制备过程中的组织结构控制机制、复合强韧化原理，新材料设计、制备新原理、新工艺以及结构、性能表征新原理，材料服役与环境的相互作用、性能演变、失效机制及寿命预测原理等。

加强高熵陶瓷、金属陶瓷复合材料、低维陶瓷 3D 打印技术等前沿技术和基础研究。

(2) 加快建材产业智能化升级

围绕产业两化融合、智能制造和高端制造需求，以及行业淘汰落后、去产能和产业技术升级的总体要求，着力加快推进各产业新一代技术装备的开发与推广应用，开发更高效节能新装备、新技术和新工艺，加强生产流程参数信息化、数字化研究，加大建材工业基础软件的自主开发力度，加强两化融合、智能制造标准、规范体系研究及制定，以及行业关键智能制造专用技术、系统研发及推广，通过生产过程信息化、智能化，实现生产线智能化控制，提高生产效率。重点加强水泥、玻璃、陶瓷等建材各产业制造全流程技术、装备的智能化创新研究，开发智能化新一代产业技术和装备，研发水泥熟料煅烧新工艺，加快矿山开采的智能化、数字化、绿色化研究。

(3) 提高基础建材绿色化、低碳化水平

以超越引领世界先进水平为目标，组织建材各产业制定新一代技术装备创新研发攻关行动升级版工作方案，组织行业力量开展产学研用联合攻关，突破产业共性关键技术，提升产业基础能力和产业链水平。围绕产业链供应链“卡脖子”环节，将先进建筑材料产业链供应链“卡脖子”材料列入国家重点研发计划和国家科技重大专项；加大支持关键产品在下游的认证和应用力度，对下游导入产业给予资金支持，鼓励引导下游企业推动产品的国产化替代；围绕“卡脖子”技术产品开通专利、发明、标准的绿色通道。

(4) 提高建材产业绿色制造发展水平

围绕国家生态文明建设总体部署和重大需求，针对建材行业大气污染防治特点，围绕行业超低排放趋势，加快建材行业烟气治理新技术、新工艺研发，坚持过程控制与末端治理相结合的综合防治原则，开发绿色高效的低成本脱硝技术和脱硝新材料，发展适用性强的低成本动态脱硝新工艺；研制开发集还原与催化于一体的低成本绿色高效无氨脱硝剂，实现 NO_x 排放量达到超低限排要求；开发陶瓷纤维管触媒脱硫除尘脱硝一体化技术，开展高性能陶瓷纤维制备关键技术研究，实现除尘、脱硫、脱硝一体化，替代进口，以满足建材行业深度减排的迫切需求。

围绕国家温室气体排放控制总体目标，针对建材行业窑炉特性，加快建材窑炉烟气二氧化碳捕集、封存、利用技术研发；开发新型高效二氧化碳吸收剂；开发成套工业化窑炉烟气

二氧化碳捕集纯化系统，探索二氧化碳封存、高价值转化与利用技术，加快更大规模化示范线建设，提升碳捕集、利用的技术水平和经济效益，降低行业碳排放量，支撑行业绿色发展。

面向生态文明建设与保障资源安全供给的国家重大战略需求，以及行业可持续发展要求，以固废“减量化、资源化、无害化”利用为核心原则，充分发挥建材窑炉、加工工艺的行业优势，研究适应建材行业特点的固废循环利用和污染协同控制理论体系，攻克整装成套的固废资源化利用技术，形成固废系统性综合解决方案与推广模式。开发各类尾矿、废渣制备高质量建材产品的工艺技术和相关装备，提高建材综合利用固废掺量，加快制定相关标准规范，完善绿色建材相关评价技术，减少建材产业对自然资源、能源的依赖程度，降低环境负荷，提高行业绿色发展、循环经济水平，支撑建材行业的可持续发展。

(5) 提升建材新兴产业竞争力

围绕国家战略性新兴产业发展，以新一代信息显示技术、人工智能、新一代半导体、国防等重点领域高端需求为驱动，重点开发建材新材料，提升性能，扩大功能，拓展建材新材料在新能源、新材料、信息显示等领域的跨界应用，扩大建材新兴产业的产业化规模。

针对我国玻璃产业普通建筑玻璃严重过剩、高端产品国产化供给不足、技术受国外垄断制约的问题，加强高技术玻璃创新研发，加快产品跨界推广应用。研制新式大容量、高安全、高耐久存储器用石英玻璃材料，研制大尺寸高均匀合成石英玻璃，开发高品质、大尺寸石英玻璃制品，研发超低损耗光纤用大掺量掺氟石英玻璃，满足我国半导体、信息显示、绿色能源领域的重大战略需求。

针对我国高端装备关键先进陶瓷材料受制于人，现有特种陶瓷、人工晶体的品质、尺寸、产业化水平与国际有较大差距的问题，突破高性能关键基础陶瓷粉体材料制备及分散技术，通过材料结构设计、自组装材料合成和复合、微米尺度上陶瓷结构与界面的自强韧化设计，实现陶瓷结构—功能一体化结构设计，开发凝胶注模产业化工艺。重点开展集成电路用氧化铝陶瓷基板与超精密碳化硅陶瓷零部件、陶瓷轴承球、超高速飞行器装备，以及高性能发动机高温部件用陶瓷基复合材料、5G时代微电子通信用关键微波介质陶瓷等关键技术攻关，强化精密小尺寸器件、大尺寸、复杂结构部件的成型、烧结技术及低成本规模化制备技术，实现典型部件在微电子装备精密设备等高端装备的应用。

(6) 创新提升统筹协调机制和组织体系

推动建立和完善协同工作机制，加强政府部门、企业、科研院所、高等院校等组织的协调配合，充分发挥企业创新主体的作用和政府主管部门、行业协会、科研院所和大专院校等在推动产业技术创新中的重要作用，建立建材行业科技创新组织体系，坚持需求导向、应用牵引下的产学研用合作模式，推动形成国家、行业、企业三位一体的研发维度，科学有效地推进建材行业技术创新工作。构建行业层面科技顶层设计、研发组织、科技管理、成果转化的综合性专业咨询机构，充分发挥行业协会的管理职能，建立健全产业统计监测体系，把握行业运行动态，及时发布相关信息，避免盲目发展与重复建设，引导和规范产业有序发展。

(7) 加快建材行业创新平台建设



科学统筹科技资源，加大对建材行业现有重点实验室、工程技术中心、技术中心的优化整合，加强引导公共技术平台的研究方向，协调行业各专业领域内、企业间的交流与合作，促进行业内各规模企业在公共技术平台的共建中发挥各自的作用，加大基础研究力度，保证公共技术平台服务于行业内广大企业，为建材行业中小企业提供公共技术服务及培训服务。充分发挥公共技术服务平台在建材行业各领域共性技术研究方面的纽带和桥梁作用，带动建材行业相关领域科技创新水平的提高。



作者简介

鄧晓，教授，博士生导师，研究方向：无机非金属新材料。国家新材料产业发展专家咨询委员会成员，国家智库专家，“十三五”和“十四五”国家重点研发计划专家组成员。参与制定了国家资源环境、新材料、智能制造“十三五”规划和国家“十二五”“十三五”“十四五”城镇化与城市发展领域规划和实施方案。出版《海洋工程材料》《中国新材料产业发展报告》等专著。

第 7 章

手机新材料

新材料在线

7.1 手机产业发展概述

中国手机产业经历 20 年的发展，产品从功能手机发展为智能手机，多个品牌不断做大做强，并逐步进入全球市场，且自主研发创新能力不断增强，带动国内手机行业从中国制造向中国品牌迈进。

(1) 中国智能手机出货量

2016 年至今，中国手机出货量逐年走低，2017 年 3 月—2018 年 4 月连续 14 个月出现负增长。2018 年 10 月市场有所回暖，出货量为 3853.3 万台，同比增长 0.9%，其中智能手机占比为 94.1%（图 7-1）。

近几年，国产手机异军突起，特别是中低端手机市场已经成为国内品牌的主要利润来源，而在高端旗舰机领域，随着华为 Mate 20、OPPO Find X、vivo NEX、小米 MIX3 等旗舰机型的推出，中国品牌在高端机型领域占比逐渐增加，高端机型的推出推动了中国手机品牌厂商在全球化推广。

(2) 品牌市占率

市占率方面，华为、OPPO、vivo、小米、Apple（苹果）占据着出货量的前 5 位，且行业集中度（CR_n）逐渐增高，CR5 从 2017 年的 74% 增加到 2018 年 Q2 的 87%，如图 7-2 所示。

国产品牌市占率的提高，一方面得益于国内品牌全面布局多元产品，在性价比方面有着较大优势；另一方面创新设计能力、高科技运用能力的提升逐渐得到消费者的认可。

(3) 最新技术及热点

整体来看，为争取更多的市场份额，当前国产品牌隐现机海战术的端倪，相继推出千元机。但在高端机领域，国产品牌亦不断推陈出新，不仅在设计上别具特色，对于最新技术的运用也让消费者耳目一新，主要如下：

- 旗舰机型大多采用 7nm 或 10nm 制程手机芯片；

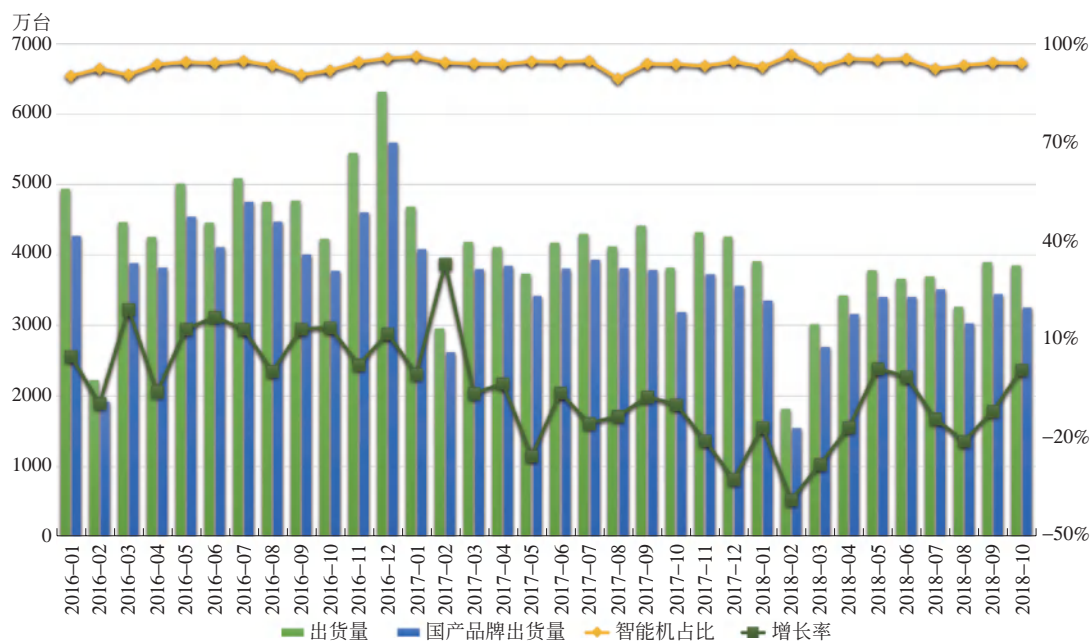


图 7-1 2016—2018 年 10 月中国手机出货量及增长率
(资料来源: Wind、赛瑞研究)

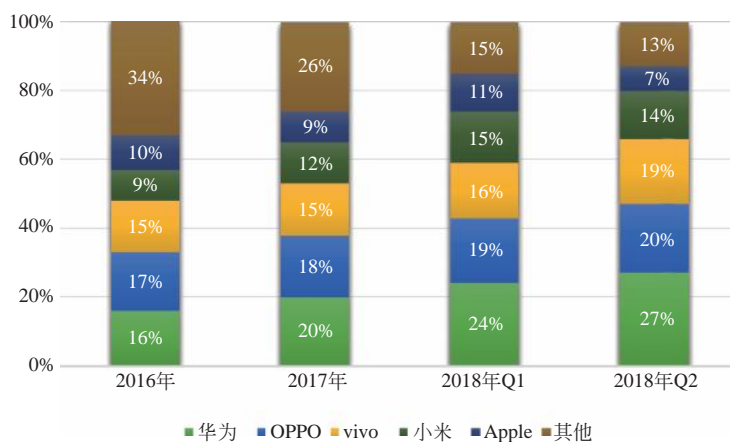


图 7-2 2016—2018 年 Q2 中国手机出货量品牌市占率
(资料来源: Wind、赛瑞研究)

- 屏下指纹及全面屏成为当前主流;
- 新型散热技术及新材料的运用逐渐增多;
- AMOLED (有源矩阵有机发光二极管) 屏幕已成为高端旗舰机型的标配;
- 金属中框 +3D 玻璃 / 陶瓷机身逐渐成为手机材料的主流。

2018 年主要品牌旗舰机技术亮点及其屏幕和机身材料见表 7-1 和表 7-2。

表 7-1 2018 年主要品牌旗舰机技术亮点

品牌	型号	相关技术亮点
华为	Mate 20 Pro	首个支持 Nano Memory Card 存储卡，比传统卡小 45% 全球首款 7nm 制程手机 SOC 芯片 全球首款 Cortex A76 架构 CPU，全球首款双核 NPU 全球首款 1.4Gbit/s 4.5G 基带 全新的 VC 液冷系统 + 石墨烯散热技术
小米	MIX3	磁动力滑盖全面屏 93.4% 超高屏占比 高效 10W 无线充电
vivo	NEX 旗舰版	全屏幕发声技术代替传统的听筒 屏下指纹技术，解锁速度提升 10%
OPPO	Find X	升降式前置摄像头 石墨散热贴及纳米碳铜材料的运用

(资料来源：赛瑞研究)

表 7-2 2018 年主要品牌旗舰机屏幕及机身材料

品牌	型号	屏幕	屏幕供应商	机身及机身材料	材料供应商
华为	Mate 20 Pro	AMOLED	京东方 / LG Display	金属中框 + 3D 玻璃	比亚迪 / 长盈精密
小米	MIX3	AMOLED	Samsung Display	7 系铝合金中框 + 陶瓷后盖	— / 潮州三环、比亚迪
vivo	NEX 旗舰版	AMOLED	Samsung Display	金属中框 + 3D 玻璃后盖	长盈精密 / 比亚迪
OPPO	Find X	AMOLED	Samsung Display	7 系铝合金边框 + 3D 玻璃	长盈精密 / —

(资料来源：赛瑞研究)

7.2 优势手机新材料技术状况

7.2.1 我国优势手机新材料产业概况

按照手机零部件的构成，手机产业链主要可以分为外壳结构件、显示器、摄像头、电池、芯片、功能件等几个细分产业。主要零部件的关键原材料的产业化实力较为薄弱，许多关键原材料主要依赖进口。优势产业主要集中在中游的外壳结构件、显示器制造及模组、摄像头模组及功能件等领域，如图 7-3 所示。

机身材料方面，通信技术的不断发展对手机的机身材料要求越来越高，为了避免信号屏蔽，以及目前全面屏设计方案对手机机身材料的特殊要求，玻璃及陶瓷机身材料逐渐取代了塑料和金属机身材料，2016 年以来，主流品牌的旗舰机逐渐放弃铝合金机身材料，转向玻璃及陶瓷机身。玻璃及陶瓷不仅能与屏幕达到更佳的贴合效果，而且能够很好地适应未来无线充电及 5G 网络对手机机身材料的性能要求。

中框材料方面，由于屏占比的扩大增加了屏幕玻璃受到外力撞击的风险，因此需要中框来增大机身结构强度和保护屏幕，这就需要金属中框材料具有良好的强度和延展性，起到保护和缓冲作用。目前金属中框已成为全面屏手机的标配，铝合金由于质量轻、强度高、易加工的特点逐渐成为消费电子的主要金属材料。而不锈钢相比铝合金具有更高的强度和硬度，能够更好地抵御物理形变，因此在高端机型中应用占比逐渐升高。

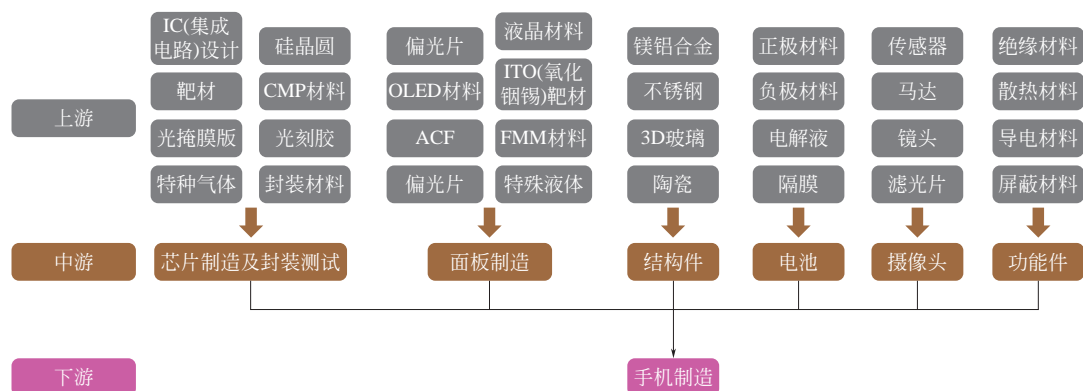


图 7-3 手机产业链结构示意图
(资料来源: 赛瑞研究)

手机机身及中框材料应用分布见图 7-4。

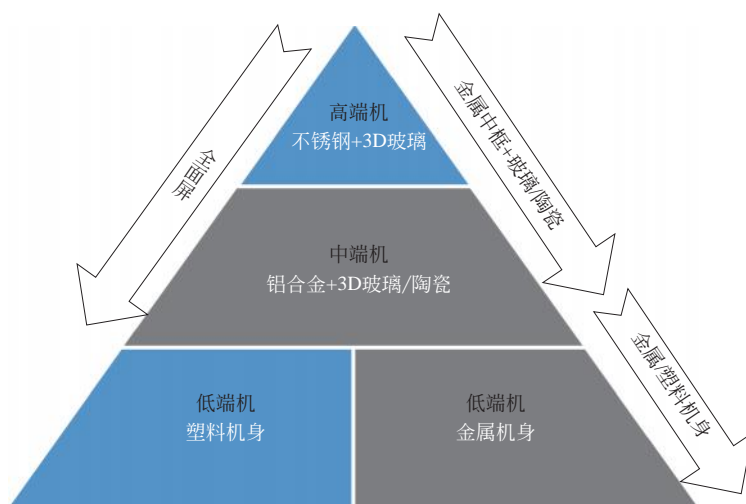


图 7-4 手机机身及中框材料应用分布
(资料来源: 赛瑞研究)

7.2.2 / 中国手机中框材料产业状况

金属中框用来固定正反两面玻璃盖板，对机身强度、内部空间利用率、散热效率等方面也有重要影响。长期以来，铝合金因具有质轻、价廉、易加工等优点，一直都担当着手机中框材料的主角。而随着手机朝着大屏化、轻薄化的方向发展，普通铝合金由于强度较低，无法达到性能要求，因此苹果公司在 iPhone 6 的机身“弯曲门”后，iPhone 7 采用了强度更高的 7 系铝合金。手机金属中框产业链结构示意图见图 7-5。

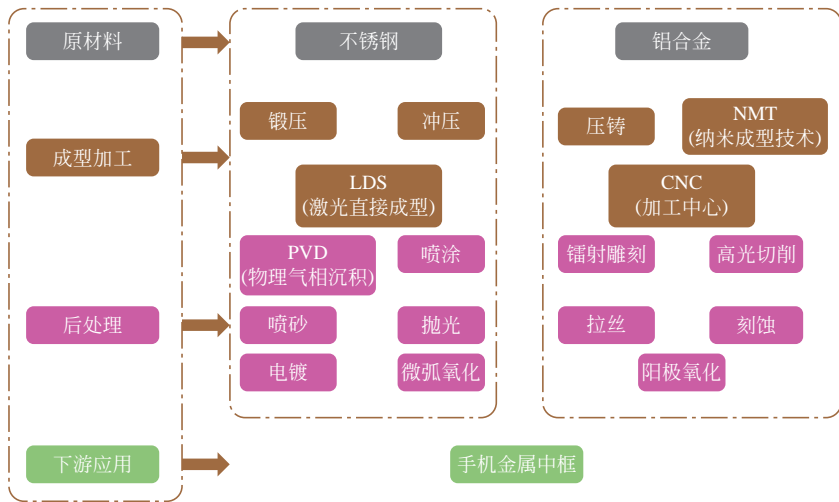


图 7-5 手机金属中框产业链结构示意图
(资料来源: 赛瑞研究)

2017年,“双面玻璃+金属中框”的应用渗透率为2%,主要集中在高端机型,2020年,“双面玻璃+金属中框”的应用渗透率达到50%,逐步从高端机型向普通机型渗透,成为未来3~5年的主流应用方案。

2017年,全球金属中框的市场规模约为734.5亿元,国内市场规模约为245亿元。2020年,全球及中国市场规模分别达到1334亿元和365亿元,2016—2020年CAGR(复合年增长率)分别为65.76%和52.71%,增长的主要驱动力为“双面玻璃+金属中框”应用渗透率的提升和金属中框加工技术成熟及价格的降低(图7-6)。



图 7-6 2016—2020年全球及中国金属中框市场规模及预测
(资料来源: 赛瑞研究)

目前我国金属中框产业较为成熟,且拥有如比亚迪、长盈精密、通达集团、领丰电子等一大批优质企业,见表7-3。

表 7-3 中国手机金属中框知名企业及客户情况

企业	产品	主要客户
比亚迪	7 系铝合金等	华为、Samsung、小米等
长盈精密	金属中框等	Samsung、Apple、华为、OPPO、vivo、小米等
富士康	不锈钢等	Apple、Samsung、华为
通达集团	金属中框等	华为、OPPO、小米、联想等
领丰电子	铝合金和不锈钢外壳	OPPO、vivo 等
劲胜智能	金属结构件	OPPO、小米、华为、Samsung 等
兴科电子	金属外观件	华为、小米、OPPO、vivo、TCL、美图、锤子等
东方亮彩	精密金属结构件	华为、OPPO、小米、中兴等
联振科技	不锈钢中框	Samsung、OPPO、vivo、小米等

(资料来源：赛瑞研究)

目前金属中框主要以铝合金为主，不锈钢的应用较少，但早在 2014 年 Apple 就在 iPhone 4 上采用了不锈钢中框，之后小米（小米 4、小米 6）、华为、魅族等相关产品均采用了不锈钢中框，但由于不锈钢存在长期散热不良导致电子元器件加快老化、加重整机质量、造价高等缺陷，应用范围较窄，各主流品牌逐渐放弃了不锈钢中框而选择了性价比更高、可加工能力更强的铝合金中框。

目前全面屏渗透率不断提升，中框变得更窄、更薄，不锈钢相对铝合金具有较高的强度和硬度，能够满足大屏双面玻璃的要求，iPhone X 和 iPhone XR 选择回归到不锈钢中框，小米、华为、诺基亚等也都在进行不锈钢中框的尝试，未来不锈钢中框的应用将逐渐得到扩展，有潜力取代目前的铝合金成为未来主流的中框材料。

7.2.3 / 中国手机机身材料产业状况

(1) 玻璃

玻璃作为手机外壳材料具有轻薄、透明洁净、抗指纹、防眩光、耐候性佳的优点。其产业链上游包括玻璃基板及相关原料的生产制备，中游成型加工处理，下游为成品应用（图 7-7）。

盖板玻璃作为外观件中重要的材料，经历了 2D、2.5D 和 3D 的升级，目前主流品牌的高端机型大多采用 3D 玻璃作为前后盖材料，主要是因为以下几点：

- 无线充电、5G 等新型传输方式使金属机壳屏蔽成为重大瓶颈，去金属化成为趋势；
- 金属背板增加了窄边框产品在天线净空区的设计难度；
- 相对其他非金属材料，玻璃在材料、手感和加工难度方面具有独特优势；
- 3D 玻璃与 AMOLED 柔性屏可达到更佳的贴合效果，实现曲面效果；
- 玻璃产业成熟度较高而成本相对较低。

目前 AMOLED 屏幕配合 3D 玻璃盖板的设计不仅可以获得更具吸引力的显示效果，而且可以得到市场认可，2017 年玻璃材料的渗透率仅为 13%，2018 年达到 26%，2020 年玻璃材料的渗透率达到 43%。未来 AMOLED 屏幕渗透率的提高必然会推动 3D 玻璃需求量的提升。

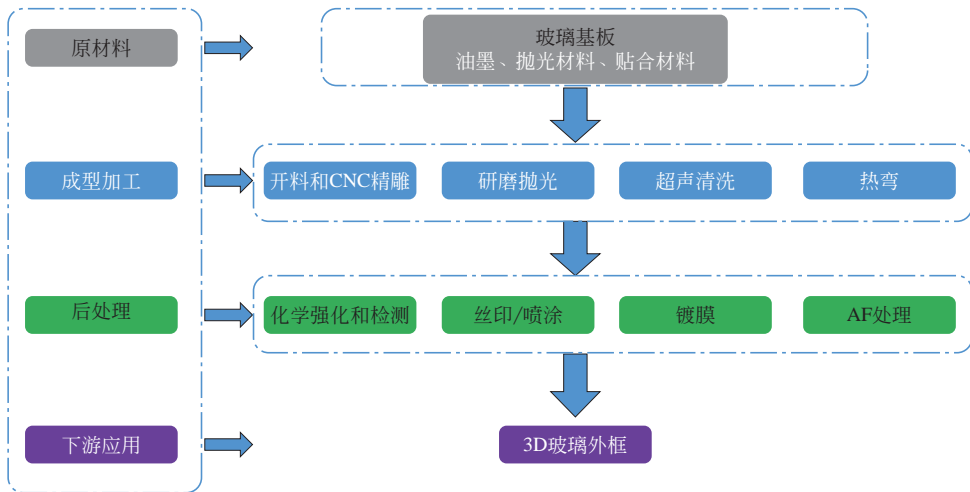


图 7-7 手机 3D 玻璃产业链结构示意图
(资料来源:赛瑞研究)

未来 3~5 年, 3D 玻璃产业将进入高速发展期, 考虑到 3D 玻璃未来庞大的市场需求, 国内的胜利精密、欧菲科技、比亚迪、星星科技、瑞声科技等上市公司纷纷扩充产能, 以期占据更多的市场份额 (表 7-4)。

表 7-4 中国 3D 玻璃知名企业及客户情况

企业	产能	规划产能	厂址	主要客户
伯恩光学	84kkpcs/年	—	深圳、惠州	Apple、Samsung、SONY、小米、华为等
蓝思科技	50kkpcs/年	70kkpcs/年	浏阳、东莞、越南	华为、Samsung、小米、vivo、OPPO、LG、联想等
星瑞安	12kkpcs/年	108kkpcs/年	贵阳	Apple、LG、华为、联想、中兴、OPPO、小米等
通达集团	7kkpcs/年	—	成都	华为、OPPO、小米、联想等
科立视	6kkpcs/年	5.5kkpcs/年	福州	—
东旭光电	5kkpcs/年	31kkpcs/年	绵阳	—
比亚迪	2.4kkpcs/年	90kkpcs/年	惠州、汕头	华为、Samsung、小米等
瑞声科技	—	100kkpcs/年	常州	Apple、Samsung、华为、中兴、小米等
星星科技	—	20kkpcs/年	莆田	华为、联想、小米、魅族等
胜利精密	—	75kkpcs/年	舒城	Motorola、OPPO、华为、小米
联创光电	—	50kkpcs/年	抚州	—

(资料来源:赛瑞研究)

目前产品价格过高、良率较低是限制 3D 玻璃渗透率快速提升的主要因素, 3D 玻璃的价格为普通玻璃的 3 倍左右, 因此应用主要集中在高端产品中。目前有限的产能及只有 50%~60% 的生产良率使得市场供应有限, 限制了 3D 玻璃的大范围应用。因此未来 3D 玻璃产业发展的主要任务是解决印刷、镀膜和抛光的工艺难题, 提高产品良率; 加快热弯机设备国产化替代, 降低 3D 玻璃整体成本, 加快向中低端机型的渗透。

(2) 陶瓷

...

陶瓷作为手机外壳材料具有质感良好、耐磨性好、散热性能好的优点。其产业链上游包括粉体和黏结剂的生产制备，中游成型加工处理，下游为成品应用（图 7-8）。

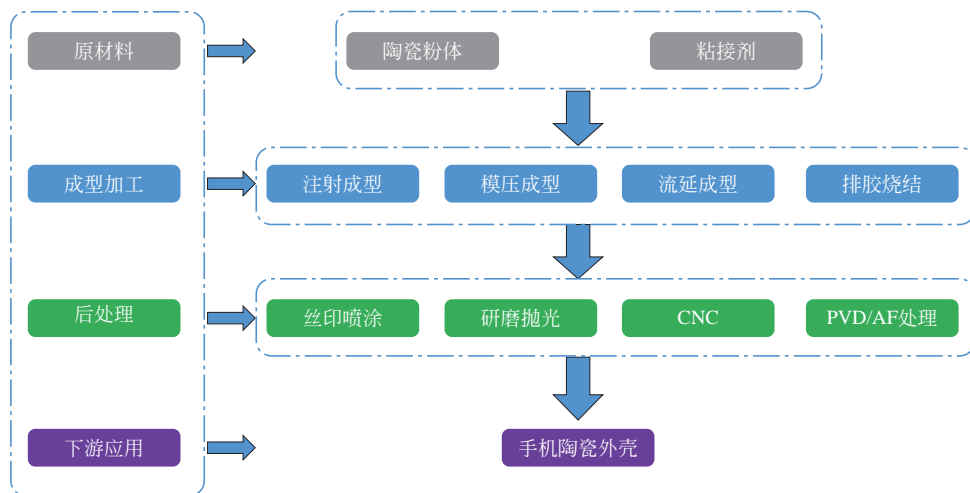


图 7-8 手机陶瓷产业链结构示意图
(资料来源：赛瑞研究)

相对于玻璃，陶瓷材料成本较高、良率较低、制作周期较长，因此很多厂商在权衡之后都会选择玻璃而不是陶瓷，其应用范围远小于玻璃。但是陶瓷在质感、耐磨、散热等方面的优势得到一些手机品牌的青睐，但配备的机型较少，主要应用于高端机型中，如小米 MIX3、金立天鉴 W808、初上科技 CHUS H1、华为 P7 蓝宝石典藏版、OPPO R15 等。

2017 年手机陶瓷材料的渗透率为 0.2%，2018 年为 1%，目前陶瓷材料的价格在 150~180 元之间，而随着未来手机陶瓷工艺的成熟及单价的降低，2020 年陶瓷机身渗透率达到 10%，全球市场规模超过 220 亿元，国内市场规模达到 60 亿元，2016—2020 年 CAGR 分别为 165.55% 和 144.66%。

手机外壳对于陶瓷粉体的高纯、分散性、粒度和分布有较高要求。目前高端纳米级复合粉体生产商主要集中在日本和欧美等国家及地区，目前国内主要依赖于进口。国内发展较为成熟的陶瓷加工企业主要有潮州三环、蓝思科技、顺络电子、长盈精密等（表 7-5）。

表 7-5 中国手机陶瓷背板知名企业及客户情况

企业	相关产品	主要客户	相关说明
潮州三环	陶瓷盖板及外观件等	小米、一加等	量产
蓝思科技	陶瓷中框、陶瓷后盖等	小米等	量产
顺络电子	手机陶瓷背板等	金立、华为	量产
富士康	陶瓷盖板	初上科技	量产
长盈精密	陶瓷机壳	小米等	量产
丁鼎陶瓷	手机陶瓷盖板等	—	量产
通州湾新材料	手机陶瓷背板	—	量产

续表

企业	相关产品	主要客户	相关说明
汇璟陶瓷	手机陶瓷背板等	—	量产
汇金股份	陶瓷背板等	—	布局规划
伯恩光学	陶瓷件加工	—	布局规划
比亚迪	手机陶瓷盖板	—	布局规划

(资料来源:赛瑞研究)

目前手机陶瓷产业链配套不是很齐全,产能规模有限,仅在个别品牌的高端机型中得到应用,还没有真正形成使用陶瓷的潮流和趋势。由于陶瓷材料能够很好地满足5G通信和无线充电技术对机身材料的要求,而且陶瓷在结构设计差异化、颜色个性化等方面的优势,将对陶瓷后盖的需求有较大的刺激作用,但是对陶瓷材料的机械可靠性、量产稳定性提出更高的要求。

7.3 我国手机新材料的应用

7.3.1 我国手机新材料发展概况

显示器、芯片是手机成本构成中的主要组成部分,iPhone X的成本中,面板和芯片的占比达到36.9%。而在面板及芯片领域,国内的优势主要在面板集成制造及芯片封装测试等领域,在上游关键原材料领域则处于劣势。国内芯片及显示材料发展状况见图7-9。



图7-9 国内芯片及显示材料发展状况
(资料来源:赛瑞研究)

面板行业，技术壁垒相对较低的背光源、PCB/FPC（印制电路板/柔性电路板）、玻璃基板、偏光片制造、彩色滤光片等材料，国内企业均能够实现稳定、大规模的供货，而具有较高技术壁垒的液晶材料、OLED（有机发光二极管）发光材料、高纯度靶材、精细金属掩模版（FMM）、柔性PI（聚酰亚胺）膜、各向异性导电膜（ACF）等均严重依赖进口，国内处于研发或小批量供货阶段。

芯片行业，目前产线国产材料的使用率不足20%，国产化替代主要集中在普通靶材、抛光材料、部分湿电子化学品以及部分封装材料，其中封装材料对国产化率的提升影响最大。在6in（1in=2.54cm）生产线上大部分材料均实现了国产化替代，但是在8in及以上生产线上，国产化率较低，大部分材料如大硅片、抛光垫、线性酚醛树脂、掩模版等均依赖进口。2018年国内半导体芯片材料逐步取得了一些突破，如抛光垫、高纯度金属靶材、大硅片、部分特种气体均实现了量产，部分产品实现了小批量的供货。

7.3.2 / 我国手机面板关键材料产业

全面屏时代，AMOLED屏幕具有厚度更薄、可实现柔性显示、广色域、高的对比度、极高反应速度、省电等优势，逐渐成为中高端智能手机的主流显示技术，而加快AMOLED屏幕关键原材料的产业发展，尽早实现国产化替代，是国内手机产业健康发展的重要保障。

(1) OLED材料

OLED材料以小分子有机材料为主，包括传输层材料[空穴传输层（HTL）、电子传输层（ETL）]、空穴注入层（HIL）材料以及有机发光层（OLL）材料，其中发光材料根据发光颜色不同可分为红、绿、蓝三基色发光材料，是OLED面板中最重要的材料。OLED材料最上游为基础的化工原料，经过一定的合成工艺制备得到OLED中间体和粗单体，粗单体经过升华技术得到单体，应用于OLED面板制造，如图7-10所示。

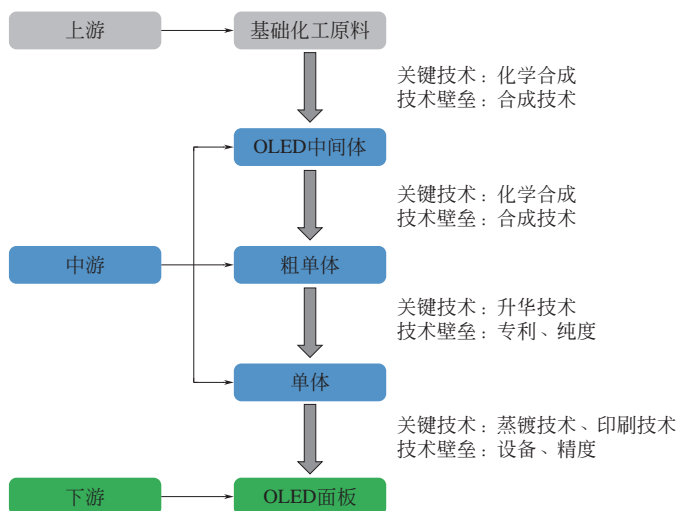


图7-10 OLED材料产业链结构示意图
(资料来源：赛瑞研究)

得益于近年来下游终端产品对 OLED 显示技术的青睐，OLED 面板出货面积得到大幅度的增长，推动了全球 OLED 材料市场规模的快速增长。

OLED 材料中，发光材料单体升华技术的技术壁垒最高，单体材料主要供应商有美国 UDC、Dow Dupont，德国 Merck，韩国 LG Chem、Samsung SDI、Duksan、Doosan，日本 Idemitsu Kosan、Toray、Sumitomo Chemical，国外企业基本垄断了 OLED 材料市场。其中美国 UDC 是全球最大的 OLED 磷光材料制造商，拥有 2000 多项技术专利。

总体来看，国内的 OLED 材料还处于起步阶段（表 7-6），主要集中于 OLED 材料中间体和粗单体材料的生产，供应给美、日、韩、德等国企业，而 OLED 单体材料则由于专利壁垒及较高的技术门槛的限制，并未实现大规模产业化和批量的供货。

表 7-6 中国 OLED 材料知名企业

企业	发光材料			空穴传输层	电子传输层	空穴注入层
	中间体	粗单体	升华材料			
奥莱德	●	●	●	●	●	●
强力新材	●	●	●	●	●	
诚志永华	●	●	●			
欣亦华	●	●		●	●	●
华显光电				●		●
莱特光电		●				
万润股份	●	●				
瑞联新材	●			●		
阿格蕾雅	●	●	●	●	●	
宇瑞化学	●					
宁波卢米蓝		●	●	●	●	
江西冠能	●	●	●			
北京鼎材	●					
濮阳惠成	●					

（资料来源：赛瑞研究）

2018 年，国内一些 OLED 材料企业陆续取得相关突破，如阿格蕾雅实现高纯 OLED 材料的量产，产能达 5t/年，相对进口材料可降低 50%~70% 的成本；强力新材与台湾昱镭光电合作成立强力昱镭，并已开始量产 OLED 升华材料，进入国内主要 OLED 面板厂的研发线及生产线。鉴于国内 OLED 升华材料处于量产初期，产量及良率均处于提升期，因此目前国内面板制造商更倾向于进口的 OLED 升华材料。

目前全球 OLED 面板产能扩张迅猛，未来将形成供过于求局面，且面板制造业逐渐向中国大陆转移，主流面板制造商迫于利润压力，致力于面板制造成本的降低，将更倾向于国内 OLED 材料，这将是国内 OLED 材料实现进口替代的黄金期。

(2) 薄膜封装材料

•••

OLED 发光层的多数有机材料对水、氧气及其他污染物极为敏感，遇水或氧气容易发生化学反应而影响发光效率、工作稳定性、材料寿命，因此 OLED 封装材料需具有良好的水汽阻隔性能和耐冲击性能。OLED 封装材料可以分为金属、低熔焊料玻璃粉、薄膜封装。

薄膜封装（Thin Film Encapsulation）一般是以塑料为基材，在其上通过磁控溅射法、电子束蒸镀法或等离子体增强化学气相沉积法将无机氧化物沉积在衬底上形成水汽阻隔膜。薄膜封装材料产业链结构示意图如图 7-11 所示。

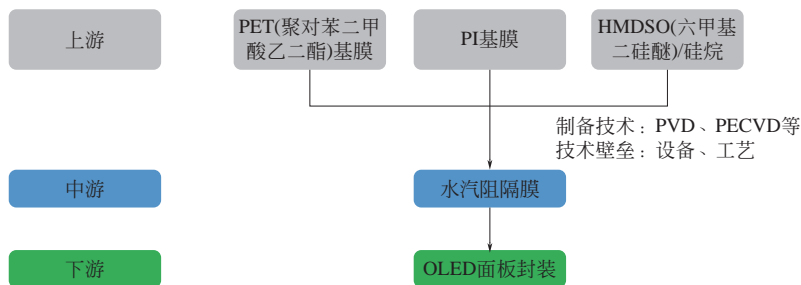


图 7-11 薄膜封装材料产业链结构示意图
(资料来源：赛瑞研究)

金属和玻璃封装材料无法满足 AMOLED 屏幕的性能要求，主要用于 PMOLED 产品中。薄膜封装不仅可以有效减小显示器的质量和厚度、提高面板柔性，而且透明度薄膜封装材料还允许 OLED 使用顶部发光模式，有利于面板的发光效率和屏幕分辨率的提高，逐渐得到市场的认可，未来将有 70% 的 OLED 面板采用薄膜封装技术。

2017 年，全球 OLED 面板出货面积为 4988km²，其中柔性 OLED 屏幕的渗透率在 30% 左右，薄膜封装材料的需求量为 2259km²，较 2016 年增长 180.2%，2018 年越来越多的智能手机采用 AMOLED 屏幕，极大地促进薄膜封装材料的需求，薄膜封装材料需求量达到 4414km²。随着柔性 OLED 屏幕渗透率的提高以及薄膜封装材料在 PMOLED 面板的应用普及，未来薄膜封装材料的需求将进一步扩大。

国外柔性密封材料发展较早，技术比较成熟，占据主要地位。目前全球主要的薄膜封装材料供应商为韩国的 Samsung SDI 和 LG Chem，其与美国 Kateeva 和 Applied Materials 等薄膜封装材料设备供应商合作，共同开发柔性薄膜封装材料。Samsung SDI 最先量产柔性屏幕用薄膜封装有机材料，在蒸镀及喷墨工艺流程的缜密性及面板产品的可靠性方面表现非常优秀。美国 3M、日本 Mitsui Chem 均能够稳定生产薄膜封装材料。国外主要柔性 OLED 薄膜封装材料企业如表 7-7 所示。

国内从事光学膜及显示膜业务的企业中，做封装阻隔膜的企业非常少，处于起步阶段，主要以康得新和万顺股份为主，其中万顺股份在高端 AMOLED 封装领域的高阻隔膜产品目前处于客户送样阶段。2017 年，康得新自主研发的全球首条卷绕式大宽幅高性能封装阻隔膜生产线成功投产，产能达到 1200 万平方米/年，拥有水汽阻隔膜专利，成功打破了国外企业的垄断，并且与京东方、华星光电、维信诺建立了合作。

表 7-7 国外主要柔性 OLED 薄膜封装材料企业

企业	相关产品	相关说明	备注
Samsung SDI	TFE	有蒸镀用产品、喷墨用产品	2010 年开始研发，2015 年开始量产
LG Chem	BFL、FSPM 封装剂	适用于手机、柔性可穿戴、电视等 OLED 面板封装	—
3M	水汽阻隔膜	高端显示用水汽阻隔膜	客户遍布主要面板制造商
Mitsui Chem	Structbon XMF-T 密封材料	高阻隔性、防潮性、透明性和工艺可管理性	2017 年扩大了封装材料的产能

(资料来源：赛瑞研究)

总体来看，国内柔性密封材料产能较少，处于供不应求的状态，但鉴于国外企业对生产技术的保密，以及相关关键设备技术人才的缺乏，高端封装阻隔材料依然严重依赖进口。目前包括华星光电、京东方、和辉光电、翌光科技、柔宇科技等面板制造商对柔性封装材料及结构进行了一系列的研究，并取得了相关专利，未来随着国内柔性面板制造技术的成熟和国内薄膜封装材料产量、性能的不不断提升，国内薄膜封装将大有可为。

(3) 各向异性导电膜 (ACF)

各向异性导电膜 (Anisotropic Conductive Film, ACF) 最先由 SONY 公司开发出来，是同时具有粘接、导电、绝缘三大特性的透明高分子连接材料，ACF 是微电路连接的必需材料，如芯片电路的连接、精密柔性电路的连接。ACF 能实现连接电极之间具有上下导通、左右绝缘的特性，且电极之间具有良好的粘接力、极好的耐高温湿性和耐腐蚀能力。ACF 材料性能的好坏直接影响信号的传输与画面显示的效果。

ACF 材料上游原材料为树脂 (基材、保护层及填充物)、导电金属颗粒 (Au/Ni)、聚乙烯烯 (保护层)、黏结剂和添加剂，经过搅拌、涂层、分割、卷带、封装等工艺加工 ACF 材料，如图 7-12 所示。

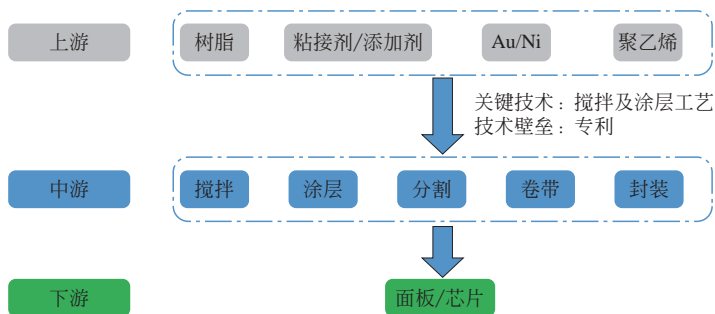


图 7-12 ACF 材料产业链结构示意图

(资料来源：赛瑞研究)

ACF 目前使用于 COG、TCP/COF、COB 及 FPC 中，主要用于驱动 IC 的 COF 基板与屏幕及 PCB 的封装接合。随着电子元器件朝着小型化、薄型化、柔性化的方向发展，AMOLED 面板亦逐渐采用 COF 封装方式，使 ACF 的需求及用量均迅速扩大。

ACF 目前市场规模超过 100 亿元/年，而随着未来 OLED 屏幕出货量的不断增长，ACF 材料的市场潜力巨大。ACF 属于高技术功能性材料，受国外产品的长期垄断，如日本 Dexerials、

Hitachi-Chem, 美国 3M, 韩国 H&S High Tech 等, 拥有不断创新的技术优势及市场基础, 牢牢掌控着全球 ACF 市场份额。中国台湾的 TeamChem、玮锋科技、长兴材料等公司的产品亦具有的竞争优势。全球知名 ACF 企业及产品指标见表 7-8。

表 7-8 全球知名 ACF 企业及产品指标

企业	相关产品	相关技术说明
3M	ACF6363、ACF7303、ACF7371	ACF6363 为例 粒径: 10 μm 黏结剂厚度: 40 μm 粒子类型: 镀金镍颗粒 剥离强度: >700gf/cm
Dexerials	各类型 ACF 材料	CP801AM-35AC 为例 粒径: 10 μm 粒子类型: 镀金 / 镍树脂粒子 可对应最小电极间距: 100 μm
Hitachi-Chem	COG/ATB 用 ACF	ANISOLM 为例 最小接触面积: 8000 μm^2 最小间距: 10 μm
H&S High Tech	各类型 ACF 材料	TSC5300 系列为例 粒径: 5 μm 粒子类型: 镀金 / 镍树脂粒子 颗粒密度: 5500pcs/mm 2
长兴材料	AF50935、AF70525、AF70625、 AF91218、EF90225	EF90225 为例 粒径: 10 μm 粒子类型: 镀金镍颗粒 颗粒密度: 500pcs/mm 2 剥离强度: >6N/cm
TeamChem	各类型 ACF 材料	—
玮锋科技	各类型 ACF 材料	—

(资料来源: 赛瑞研究)

ACF 产业化的技术难度高, 并且发达国家一直对相关的技术进行严密封锁, 所以至今我国大陆 ACF 材料严重依赖进口。近年来, 中国大陆已经陆续有一些企业取得了 ACF 材料的研究进展, 并有一定的生产能力, 如深圳飞世尔新材料股份有限公司 (简称深圳飞世尔) 已基本具备从导电微球到 ACF 制造全产业链研发和生产能力, 导电粒子粒径可达 5 μm , 在国内处于领先地位; 镇江爱邦电子科技有限公司具备导电金球和 ACF 的研发和生产能力。

ACF 属于高精尖的功能材料, 面板制造商在选取供应商时从测试到接受公司的产品需要较长的验证时间, 且面板制造商的验证成本提高 (验证成本超过 500 万元 / 次), 周期长, 对产品持谨慎态度, 更倾向于采用国外知名企业的产品, 导致国内产品验证机会有限, 推广周期较长, 销售量较少, 国产化进程十分缓慢。如深圳飞世尔 2017 年 ACF 材料销售额仅为 8.6 万元左右, 占总营收的比重仅为 0.22%, 还处于小范围供货状态, 如图 7-13 所示。

随着显示面板产业迅猛发展, ACF 已经成为一个技术含量高、经济效益好、具有广阔前景的产业。ACF 材料对外的高依赖性对我国显示面板的发展和竞争力造成严重威胁, 特别是在显示面板产业逐渐向中国大陆转移的背景下, 必然影响和制约我国面板产业自主创新的发展进程。因此国内企业加强相关技术的研发, 提高产品性能, 扩大产能, 加强与面板制造商的合作与验证, 共同推进 ACF 材料国产化进程。



图 7-13 深圳飞世尔 ACF 材料营收及占比
(资料来源: Wind、飞世尔年报、赛瑞研究)

(4) 精细金属掩膜版 (FMM)

精细金属掩膜版 (Fine Metal Mask, FMM) 是 OLED 蒸镀工艺中的消耗性核心零部件, 其主要作用是在 OLED 生产过程中沉积 RGB 有机物质并形成像素, 在需要的地方准确和精细地沉积有机物质, 提高分辨率和良率。分辨率越高, 像素数越多, 就需要更加微细和精巧的孔, 在一张精细金属掩膜版上约有 2000 万个孔。

由于在 OLED 有机材料的蒸镀过程中温度较高, FMM 材料由于金属热膨胀导致形变, 形变导致尺寸的变大, 进而导致蒸镀材料的错位, 最终产生发光层错位混色和金属过孔无法覆盖等现象, 因此精细金属掩膜版被视为 OLED 产业中具有高度技术难度的材料。由于在大尺寸 OLED 面板制造中, 现阶段 FMM 很难兼顾大面积、低质量、低热胀系数的要求, 而且制作 FMM 材料的相关设备研发和制造成本高昂, 投入过大, 发展严重滞后, 且采用光刻工艺制作掩膜版需要预先制作光罩, 一旦基板布局改变, 光罩也就随之废弃。因此, 采用光刻工艺制作 FMM 目前仅适用于小尺寸产线, 而且制作周期长, 生产成本低。

FMM 材料的最上游为 Invar 金属、刻蚀液及树脂等原料, 经过蚀刻、电铸和多重材料 (金属 + 树脂材料) 复合均可获得 FMM 材料, 其中蚀刻法为当前供应商主要采用的方法, 电铸 (Electroforming Metal) 制出的 FMM 厚度很薄, 多重材料复合法能够很好地解决 FMM 材料的热膨胀问题, 如图 7-14 所示。

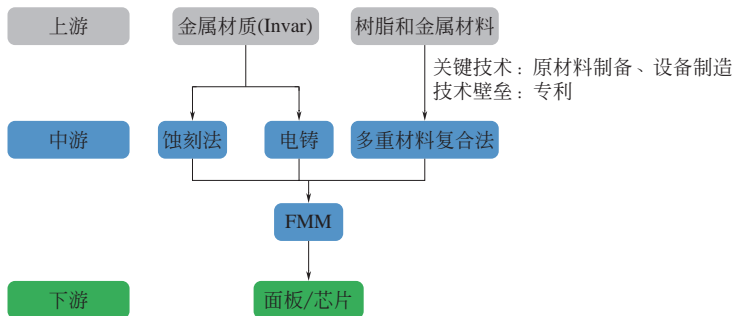


图 7-14 FMM 材料产业链结构示意图
(资料来源: 赛瑞研究)

近年来，OLED 显示技术渗透率逐渐提高，带动 FMM 材料市场规模快速增长。2017 年全球 FMM 市场的收入为 2.34 亿美元，2018 年中国大陆多条 OLED 线体量产，促使全球 FMM 材料市场规模增长至 4.21 亿美元，同比增长 79.9%。

FMM 材料的原材料 Invar（10~20 μm 厚）目前只有 Hitachi-Metals 可以生产，中游的材料制造则主要集中在日韩和中国台湾等少数企业，此前 Hitachi-Metals 跟日本 DNP 是捆绑合作，DNP 在超过 400PPI 的高 PPI FMM 的供货方面处于全球主导地位。此前 DNP 与 Samsung Display 签署垄断性合约（提供 10~20 μm 厚的 FMM），直至 2018 年 DNP 与 Samsung Display 垄断合约到期，国内面板制造商 BOE 才能够与 DNP 达成合作协议，为其提供 WQHD 级手机用的 FMM 材料（约 30 μm 厚）。其他企业如韩国 Wave Electronics、Poongwon、E-CONY、SEWOO、LG，日本 TOPPAN、Athene。

中国能够生产 FMM 材料的企业较少，而生产 CMM 材料的企业较多，但是中国作为全球 OLED 面板产业主要生产基地，将成为 FMM 材料需求最大的市场，且 DNP 与 TOPPAN 有限的产能无法满足众多面板制造商的需求，庞大的市场促使上游材料积极参与，中国台湾达运是全球少数具量产 FMM 能力的企业，月产能 3000 片。2018 年 8 月，联创光电 10 亿元的 FMM 生产项目落户南昌市赣江新区，建成投产后可实现年产值 7 亿元，有望实现精细金属掩模版的国产化，打破依赖进口的局面，推动国内 OLED 显示技术发展。

7.3.3 / 我国手机芯片关键材料产业

(1) 大尺寸硅片

硅片是价值含量占比最高、最核心的材料，其核心难点在于高纯度要求，通常需要 9N 以上；在 IC 制造中所使用的晶圆均为单晶硅片，具体的硅片规格又可分为抛光片 PW/AW、外延片 EW 和绝缘体上硅 SOI 三大类。

硅片的制造过程较为复杂，涉及诸多高精尖的制造设备。原始硅料经过单晶炉制备得到单晶硅体，后经过截断、滚磨、切片制得单晶硅片，硅片经过倒角、研磨、刻蚀、抛光、PCV（等离子体增强化学气相沉积）/CVD（化学气相沉积）后制得外延片，如图 7-15 所示。

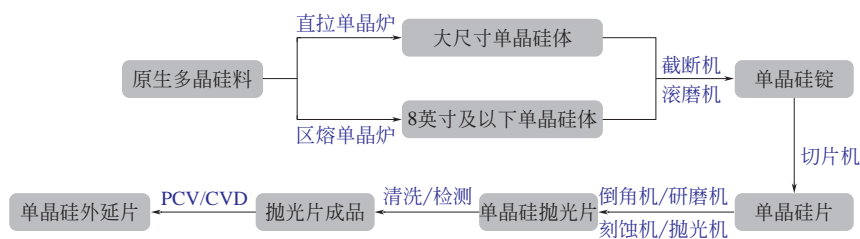


图 7-15 硅片制造流程及主要设备
(资料来源：赛瑞研究)

主流的硅片为 12 英寸、8 英寸和 6 英寸，大尺寸的（12 英寸的）渗透率在 2015 年已经达到 78%，将成为未来几年硅片市场的绝对主流。目前 90% 以上的芯片和传感器是基于半

导体单晶硅片制成，硅片的供应与价格的变动情况对 IC 芯片产业的影响极大，2016 年全球硅片市场开启了新一轮的景气周期，出货量逐步增长，2018 年 Q3 全球硅片出货量达到 3255 百万平方英寸（in²，1in²=6.4516×10⁻⁴m²），环比增长 3.01%，同比增长 8.61%，2018 年全球硅片市场规模达到 110 亿美元，如图 7-16 所示。

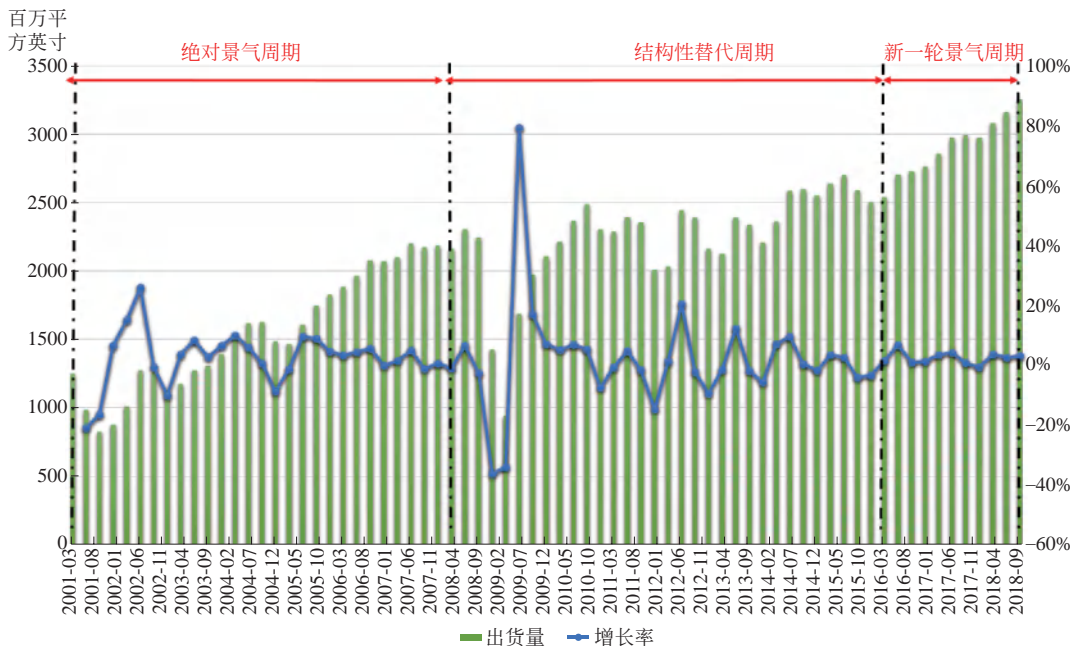


图 7-16 2001—2018 年 Q3 全球硅片出货量及环比增长率
(资料来源:赛瑞研究)

半导体硅片需求的增长主要是因为近年来高端制造工艺的发展对高质量大硅片的需求越来越大；下游需求（如高性能手机功能）的创新对大硅片需求的刺激；工业与汽车半导体、CIS、物联网等 IC 芯片市场的发展产生新的增量需求。

12 英寸硅片作为未来竞争的主要领域，目前处于供不应求的状态，2017 年需求量约 5400 千片/月，2018 年增长至 5700 千片/月，同比增长 5.2%，到 2020 年进一步增长至 6200 千片/月。

目前硅片市场呈现寡头垄断格局，2016 年全球第六大硅片供应商中国台湾的环球晶圆收购全球第四大硅片供应商美国 SunEdison，至此形成了日本信越半导体、胜高科技，中国台湾环球晶圆，德国 Siltronic，韩国 LG 五大供应商的垄断格局，五家公司占全球 90% 以上的市场份额。2017 年全球硅片市场格局如图 7-17 所示。

目前中国大陆自主生产的硅片以 6 英寸为主，产品主要的应用领域仍然是光伏和低端分立器件制造，而 8 英寸和 12 英寸的大尺寸集成电路级硅片依然严重依赖进口，上海新昇 12 英寸硅片目前已经向中芯国际提供样片认证。近年来，中国大陆迎来半导体晶圆扩产潮，不少本土企业、合资公司以及其他领域的巨头纷纷布局大尺寸硅片领域。国内部分大硅片企业项目进展如表 7-9 所示。

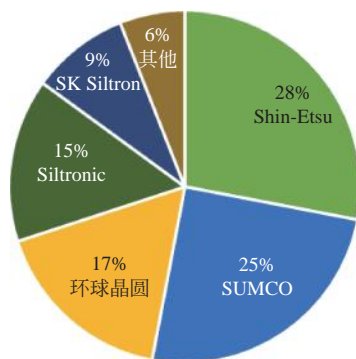


图 7-17 2017 年全球硅片市场格局
(资料来源: 赛瑞研究)

表 7-9 国内部分大硅片企业项目进展

类型	企业	地点	尺寸 / 英寸	金额 / 亿元	进度	产能 / (万片 / 月)
本土	北京有研	北京	8	—	在建	2
		北京	12	—	建成	1
	金瑞泓	衢州	12	30	在建	10
		衢州	8	2	建成	12
		衢州	8	20	在建	40
上海新昇	上海	12	15	在建	60	
合资	洛阳单晶硅	洛阳	8	—	建成	20
	环球晶圆	杭州	12	35	在建	24
		上海	8	12	在建	15
		杭州	8	30	在建	30
		昆山	8	—	—	—
	宁夏银和	银川	12	8	在建	20
		银川	8	15	在建	15
		银川	8	8	在建	35
	上海合晶	郑州	12	53	计划	20
		郑州	8	53	计划	20
跨界	中环股份	天津	12	—	—	2
		无锡	8	—	在建	75
		天津	8	—	在建	30
	重庆超硅	重庆	12	10	在建	5
		重庆	8	5	在建	50
	京东方	西安	—	100	计划	—

(资料来源: 赛瑞研究)

目前本土硅片供应严重不足, 8 英寸及 12 英寸硅片对外依存度高达 86% 和 100%, 导致大陆集成电路对外部原材料企业的议价能力较弱, 严重阻碍了我国集成电路产业的发展, 随着国内大尺寸硅片项目的推进, 有望改变 12 英寸硅片完全依赖进口的局面, 但总体上产能远远不能满足国内市场需求, 因此提升大硅片的供应能力是当务之急。

(2) 半导体光刻胶

光刻胶是利用光化学反应经曝光、显影、刻蚀等工艺将所需要的微细图形从掩模版转移到待加工基衬底上的有机化合物。受紫外光曝光后，光刻胶在显影液中溶解度会发生变化，从液态变为固态。G 线、I 线是市场上使用量最大的光刻胶。

光刻胶是经过严格设计的复杂、精密的配方产品，上游包括光刻胶树脂、光引发剂、添加剂等一系列化工材料，通过不同的配比，经过复杂而精密的加工工艺制得光刻胶，应用于 PCB、面板制造以及半导体领域中，如图 7-18 所示。

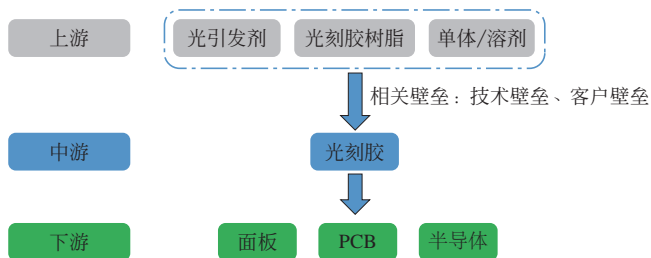


图 7-18 光刻胶产业链结构示意图
(资料来源：赛瑞研究)

光刻工艺的成本约为整个芯片制造工艺的 35%，并且耗费时间约占整个芯片工艺的 40%~60%，因此市场需求巨大。

光刻胶化学结构特殊、纯度要求比较高、生产工艺复杂、品质管理苛刻，属于资本密集型和技术密集型产业，因此中国光刻胶市场基本上由外资企业所占据，特别是高分辨率 KrF 和 ArF 光刻胶的核心技术基本上被日本 JSR、Shin-Etsu Chemical、Tokyo Chemical，美国 Dow DuPont 等企业所垄断，尤其是日本企业，全球专利分布前十公司中占 7 成。光刻胶单一产品市场规模与海外巨头公司营收规模相比较小，光刻胶仅为大型材料厂商的子业务。2017 年全球半导体光刻胶市场格局如图 7-19 所示。

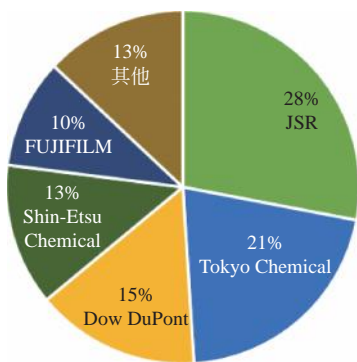


图 7-19 2017 年全球半导体光刻胶市场格局
(资料来源：赛瑞研究)

国外企业占据着全球超过 90% 的市场份额，对 KrF 线和 ArF 线光刻胶配方、生产工艺等核心技术进行技术封锁，不仅产品类型丰富，还积极进行 EUV 光刻胶的研发，其中代表性的

公司有日本 JSR、Tokyo Chemical、FUJIFILM，美国 Dow DuPont 等，如表 7-10 所示。

表 7-10 全球主要半导体光刻胶企业主要产品布局

公司	地区	KrF (248nm)	ArF (193nm)	EUV
JSR	日本	量产	量产	研发
Tokyo Chemical	日本	量产	量产	研发
FUJIFILM	日本	量产	量产	研发
Dow DuPont	美国	量产	量产	研发
Shin-Etsu Chemical	日本	量产	量产	—
Sumitomo-Chem	日本	量产	量产	—
DONGJIN	韩国	量产	研发	—
Everlight	中国台湾	量产	量产	—

(资料来源：赛瑞研究)

中国大陆企业半导体光刻胶技术和国外的先进技术相比差距较大，目前能生产半导体光刻胶的企业较少，仅在市场用量最大的 G 线和 I 线有产品进入下游供应链，如北京科华和苏州瑞红 G 线正胶、I 线正胶均取得量产，北京科华 KrF (248nm) 光刻胶已经通过中芯国际认证，ArF (193nm) 光刻胶均处于研发阶段。我国主要半导体光刻胶企业产品情况如表 7-11 所示。

表 7-11 我国主要半导体光刻胶企业产品情况

类别	市场规模	国产化情况	主要企业
分立器件光刻胶	0.5 亿元	10%	苏州瑞红、北京科华
G 线、I 线光刻胶	2 亿元	15%	苏州瑞红、北京科华、潍坊星泰克
KrF、ArF 光刻胶	5 亿元	几乎全进口	苏州瑞红、北京科华

(资料来源：赛瑞研究)

我国在半导体光刻胶方面国产化率较低，尤其是高端的 KrF、ArF 光刻胶基本依赖进口，虽然近几年有了快速的发展，但整体上还处于起步阶段，工艺技术水平特别是尖端原材料及设备仍依赖进口。加强引发剂、增感光刻胶树脂等关键原料的研发、生产，提高高端光刻胶自给能力为当前主要任务。

(3) 高纯金属靶材

•••

溅射属于物理气相沉积技术的一种，它利用离子源产生的离子，在高真空中经过加速聚集，而形成高速度能的离子束流，轰击固体表面离子和固体表面原子发生动能交换，使固体表面的原子离开固体并沉积在基底表面，被轰击的固体即为溅射靶材。

金属溅射靶材上游为金属提纯产业，下游为面板、半导体、太阳能等领域，如图 7-20 所示。高纯金属溅射靶材在半导体领域中主要应用在晶圆制造和先进封装过程，用来制备导电层、阻挡层等。

在众多应用领域中，半导体用金属溅射靶材要求最高、精度最大、集成度最高，因此价格也最为昂贵。

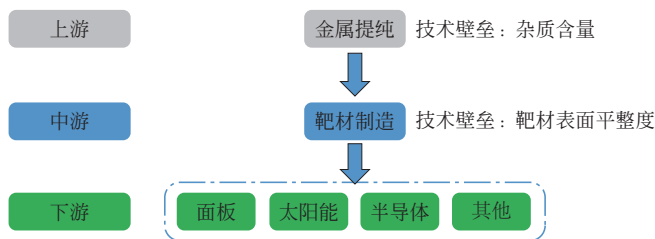


图 7-20 高纯金属靶材产业链结构示意图
(资料来源：赛瑞研究)

半导体芯片对溅射靶材的纯度、内部微观结构等都有着极其苛刻的标准，纯度通常要达到 99.9995% 以上，杂质含量过高不仅会影响沉积薄膜的电性能，而且易在晶圆上形成微粒，造成电路的损坏。因此需要掌握半导体溅射靶材生产过程中的关键技术，并经过长期实践才能制成符合工艺要求的产品。

目前溅射靶材产业链各环节参与企业数量基本呈金字塔形分布，高纯溅射靶材制造环节技术门槛高、设备投资大，具有规模化生产能力的企业数量相对较少，呈现寡头垄断格局，主要分布在美国、日本等国家，如日本 Nikko-Metal、TOSOH、Sumitomo-Chem、ULVAC，美国 Honeywell（霍尼韦尔）、Praxair 等，如图 7-21 所示。

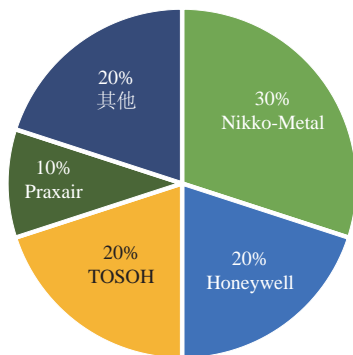


图 7-21 2017 年全球半导体溅射靶材市场格局
(资料来源：赛瑞研究)

美国、日本跨国集团产业链完整，囊括金属提纯、靶材制造、溅射镀膜和终端应用各个环节，具备规模化生产能力，在掌握先进技术以后实施垄断和封锁，主导着技术革新和产业发展。

我国溅射靶材行业起步较晚，总体来看国内高纯溅射靶材产业表现出数量偏少、企业规模偏小和技术水平偏低的特征。受到技术、资金和人才的限制，多数国内厂商还处于企业规模较小、技术水平偏低及产业布局分散的状态。近年来，受益于国家从战略高度持续地支持电子材料行业的发展，国内企业陆续开发出一批能应用于高端应用领域的溅射靶材，代表性企业有江丰电子、有研新材、阿石创等，如表 7-12 所示。

表 7-12 中国主要半导体高纯溅射靶材企业

公司	2018 年 H1 营收 / 亿元	2018 年 H1 净利润 / 亿元	相关产品	主要客户
江丰电子	2.96	0.24	各种高纯溅射靶材	台积电、格罗方德、中芯国际、联华电子、SONY、东芝、意法半导体、海力士等
有研新材	22.2	0.38	超高纯金属、铜靶材、钴靶材等	台积电、中芯国际等
阿石创	1.12	0.19	溅射靶材和蒸镀材料	—
隆华节能	7.2	0.66	氧化铟锡 (ITO) 靶材	—

(资料来源: 赛瑞研究)

经过数年的科技攻关和产业化应用, 目前, 国内打破了溅射靶材核心技术由国外垄断、产品供应完全需要进口的不利局面, 如江丰电子在 16nm 技术节点实现批量供货, 不断弥补国内同类产品的技术缺陷, 再加上国内溅射靶材市场的高增长和国内溅射靶材企业的本土优势, 国内溅射靶材企业的成长空间将被打开。

(4) CMP 材料

CMP (化学机械抛光) 是集成电路制造过程中实现晶圆全局均匀平坦化的关键工艺, 用较软的材料来进行抛光以实现高质量的表面抛光。抛光材料是 CMP 工艺过程中必不可少的耗材。根据功能的不同, 可划分为抛光垫、抛光液、调节剂及清洁剂等, 主要以抛光液和抛光垫为主。

抛光液是一种不含任何硫、磷、氯添加剂的水溶性抛光剂, 可分为酸性抛光液、碱性抛光液、硅溶胶抛光液等, 其上游主要原材料包括腐蚀介质、成膜剂、助剂、磨料等。抛光垫根据是否含有磨料分为磨料抛光垫、聚氨酯抛光垫、无磨料抛光垫等。CMP 材料产业链结构示意图如图 7-22 所示。

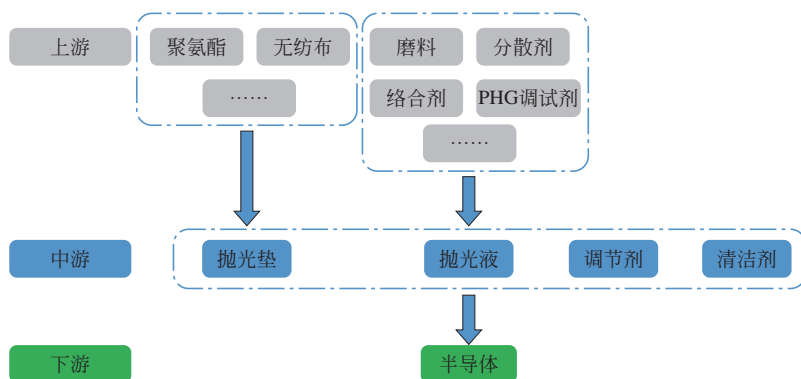


图 7-22 CMP 材料产业链结构示意图

(资料来源: 赛瑞研究)

CMP 材料的市场容量主要取决于下游晶圆产量, 近年来一直保持较为稳定增长。

CMP 材料制备技术门槛高, 美国和日本等凭借在研发和生产方面的技术优势, 并对相关专利及技术进行封锁, 构筑了极高的技术壁垒。

抛光垫的技术壁垒在于沟槽设计及寿命改良，全球抛光垫市场呈现 Dow DuPont 一家独大的局面，市场份额达到 79%，在细分集成电路芯片和蓝宝石两个高端领域更是占据 90% 的市场份额，牢牢掌控着全球市场，其他供应商还包括 Cabot、Thomas West、FOJIBO、JSR 以及中国台湾三方化学等。2017 年全球半导体抛光垫市场格局见图 7-23。

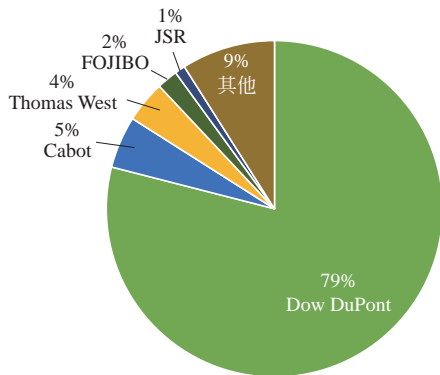


图 7-23 2017 年全球半导体抛光垫市场格局
(资料来源: 赛瑞研究)

抛光液的技术壁垒在于调整抛光液组成以改善抛光效果，目前主要的供应商包括日本 Fujimi、Hinomoto Kenmazai，美国 Cabot、Dow DuPont、Rodel、Eka，韩国 ACE 等公司，占据全球 90% 以上的市场份额。

中国抛光垫市场方面，此前大陆国产高端抛光垫市场率几乎为 0，本土企业仍处于尝试突破阶段，一直没有实现国产化替代，难点主要集中在国外技术封锁以及相关专利壁垒两方面。而近年来随着我国对电子信息材料的支持，大陆抛光垫企业鼎龙股份填补了国内空白，规划产能 50 万片/年，客户包括中芯国际、上海华力、中航微电子等主要半导体制造商，2018 年鼎龙股份收购时代立夫，进一步加快了抛光垫的国产化替代进程。

中国抛光液市场方面，2008 年之前我国抛光液对外依存度达到 90%，8 英寸、12 英寸芯片抛光液对外依存度更是达到 100%，虽然目前高端抛光液技术有所突破，但市场规模较小，占有率较低，代表性企业主要有安集微电子、力合科技、晶岭电子、北京国瑞升等，如表 7-13 所示。

表 7-13 中国主要抛光液市场企业

公司	性质	主要产品	说明
安集微电子	合资	抛光液、清洗液等	可生产 12 英寸、8 英寸芯片抛光液
力合科技	私营	蓝宝石抛光液、硅晶体抛光液、基片抛光液等	—
晶岭电子	合资	蓝宝石水晶玻璃抛光液等	主要生产 6 英寸芯片用抛光液
北京国瑞升	合资	研磨液（小部分用于 IC）、抛光膜等	相关产品已经实现国产化替代

(资料来源: 赛瑞研究)

CMP 材料具有技术壁垒高、客户认证时间长的特点，今后几年伴随着中国晶圆厂的不断投产，中国市场对于 CMP 材料的需求将会明显增长，中国企业应当加强对抛光液和抛光垫

等产品的技术研发，实现进口替代。

7.4 / 5G 通信时代手机新材料发展

随着通信技术的不断发展，未来 5G 毫米波通信、5G 天线设计、无线充电技术的发展对手机材料的要求也越发严苛，对各部件的材料都提出了更高的性能及功能要求，不仅要求材料对信号的干扰小、介电常数小，还需具有高的刚性，耐色污，且要在保证手机轻薄的前提下提高手机的耐冲击性。传统的材料已不能很好地满足未来性能及功能要求，因此寻找新材料替代传统材料成为当下产业发展的主要方向之一。

7.4.1 / 手机结构新材料

(1) 纳米氧化锆陶瓷

① 应用优势：纳米氧化锆陶瓷结合了玻璃的外形差异化、无信号屏蔽、硬度高等性能优势，同时拥有接近金属材料的优异散热性，纳米氧化锆陶瓷在手机中的应用主要是后盖（对塑料、玻璃、金属材料的升级和补充）、指纹识别的贴片或可穿戴设备的外壳（对蓝宝石的替代）、锁屏和音量键等小型结构件（传统应用）。

相比于传统金属材料，纳米氧化锆陶瓷具有无信号屏蔽、硬度高、观感强、散热性好等特点，与塑料相比具有更坚固、耐磨、易上色、不易褪色、强度高、整体轻盈等特点。纳米氧化锆陶瓷主要优点见表 7-14。

表 7-14 纳米氧化锆陶瓷主要优点

序号	特点	说明
1	高硬度	硬度接近天然钻石，不易磨损
2	介电常数高	对微波信号及微传感信号影响小
3	相容性好	不易产生细菌，对皮肤不过敏
4	综合力学性能优异	综合力学性能最优异，寿命周期长
5	外形美观	玉一般的质感，有视觉上的美感

（资料来源：赛瑞研究）

② 前景趋势：近年来，陶瓷背板市场认可度不断提升，但由于成本和产能的限制，纳米氧化锆陶瓷在手机背板材料中的渗透率较低，2018 年仅为 1%。未来随着生产工艺的完善、良品率的提升、成本的不断降低、易碎性的改善，纳米氧化锆陶瓷的渗透率将会不断提升。

(2) 工程塑料

① 应用优势：工程塑料因具备工艺成熟、可塑性强、稳定性高等优势，一直是制造手机的主流材料之一，主要应用于手机前框、中框和电池后盖。但 5G 时代对手机工程塑料提

出了更高的要求，如满足信号传输及外观的要求、足够的刚性与抗冲击性、耐刮等，而 PC/PMMA（聚甲基丙烯酸甲酯）等复合板材很好地满足其性能要求。

PC/PMMA 复合板通过共挤的方法制得，具有较好的硬度和耐磨性，相对玻璃具有高性价比、丰富灵活的定制化外观、工艺流程简单、爬坡上量快等优点，有望在 5G 时代迎来“重生”。

透明 PC 材料用作背盖，较复合板具有更低的成本、更高效的制品形态、更好的耐冲击和耐用性，且注塑压缩工艺成型的手机背盖在整机厚度和外观上足以与玻璃背盖相媲美，因此逐渐得到一些企业的青睐。

② 前景趋势：随着表面处理工艺的提升，PC/PMMA 复合板后盖的外观已经有较大的改善，2018 年 Covestro 推出的 Makrofol SR 253（PC+PMMA 的光学薄膜）为 5G 手机后盖新解决方案，在满足基本的刚性、抗冲击、耐刮等性能要求外，还具有出色的 3D 成型性以满足设计需求，优异的光学性能使手机具有出色的外观。目前 PC/PMMA 复合板已经逐渐被 OPPO、vivo、联想等手机品牌采用。

透明 PC 材料方面，比亚迪、东方亮彩、劲胜、三景、通达、硕贝德等企业正在加速布局注塑透明 PC 手机背盖，三菱化学、中塑新材料等相关企业亦纷纷研发满足高硬度、低应力、无彩虹纹等要求的原料，OPPO 已经有透明 PC 材料机型量产，计划于 2019 年成为手机背盖主流解决方案之一。

(3) 液态金属

① 应用优势：液态金属又称为非晶合金或金属玻璃，使用时呈固态金属，但其固态原子的排列方式类似于液体金属的原子无序排列，不存在周期性排列的晶体结构，因此具有独特的性能和成型工艺优势。

5G 时代，随着 3D 玻璃和陶瓷盖板的崛起，对中框强度等各方面的要求越来越高，液态金属强度为传统高强度钢的 2~3 倍，超过镁铝合金的 10 倍，此外还具有高硬度、高耐磨性、耐腐蚀性、良好的散热性，既轻又薄，作为手机中框，液态金属具有显著的优势。

② 前景趋势：虽然液态金属相比于其他金属中框材料性能优势突出，但是成品率较低，而且液态金属的本征脆性以及中框的成型性能差，直接限制其未来的快速发展。目前，除了图灵手机、Kreta 等少数产品机型，很少有品牌真正采用液态金属。除宜安科技、逸昊金属、Liquidmetal 外，具备大规模生产技术的企业比较少，产能太低，垄断性强，还未形成完整的产业链，所以，液态金属距离手机中框的大规模应用还有很长的路要走。

7.4.2 / 手机功能新材料

(1) 散热材料

5G 时代的临近，智能手机产品的不断更新升级，功能越来越复杂，芯片和模组的集成度和零部件密集程度急剧提升，导致设备功耗和发热密度不断提升，因此高效散热已经成为当前智能手机设计、研发的重要考虑因素之一，新型的散热材料不断被开发利用。5G 时代对智能手机散热新需求见表 7-15。

表 7-15 5G 时代对智能手机散热新需求

特性	发热增量说明
芯片处理效率升级	芯片发热量显著提升
玻璃、陶瓷散热性较差	玻璃、陶瓷散热性较金属差，需更多导热及散热器件
轻薄化	零部件更加集成化、模组化，内部更加紧凑，需进一步加强散热

(资料来源：赛瑞研究)

散热方法多种多样，各方法侧重不同，主要包括降低环境温度和降低热阻两种方法，目前主要以石墨散热和液冷热管散热技术为主。石墨散热片的片层状结构可很好地适应任何表面，屏蔽热源与组件的同时改进消费类电子产品的性能，因此被广泛应用。液冷热管散热技术并不是新技术，已经在 PC 端得到广泛的应用，在 2018 年荣耀 Note10、魅族 16th、Samsung Note9 等机型采用后，逐渐进入手机市场。荣耀 Note10 采用了 The Nine 热冷散热技术，在原来的八层散热基础上增加了液冷散热层，并且采用了石墨导热贴和热管。

石墨烯由一系列按蜂窝状晶格排列的碳原子组成，特殊的结构使得石墨烯具有优良的导热性，自身热导率达到 $5300\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，能快速扩散热量，是室温下导热最好的材料，甚至超过碳纳米管、石墨材料，并且石墨烯轻薄，更利于手机的轻薄化，有望成为划时代的散热材料。2018 年，华为 Mate 20 X 采用 VC 液冷 + 石墨烯膜散热系统，首次将石墨烯应用于手机散热。但石墨烯膜研发周期长、制备难度高、量率低、对设备要求高，目前应用较少。

未来 5G 时代，智能手机将朝着轻薄化、集成化方向发展，散热方案亦将朝着超薄、高效的方向发展，必将呈现多种散热技术并存、工艺技术不断升级的创新局面。

(2) 导热材料

导热材料用于发热源和散热器的接触界面之间，主要作用是提高热传导效率，从而有效地解决高功率电子设备的散热问题。导热材料分为导热脂、凝胶、相变材料、垫片、石墨膜。

导热凝胶具有较低的热阻和压缩变形能力，不需要混合、搅拌或任何固化过程，易于清理及修整，且自动化生产，主要用于解决手机芯片的散热问题，2018 年，Dow DuPont 推出了全新的用于智能手机部件热管理的 TC-3015 有机硅导热凝胶，不仅可实现芯片组的高效散热，还具有良好的润湿性，可确保低接触电阻实现热管理，即便在 IC 和 CPU 等发热最严重的部件也不会产生热点。

高导热石墨膜是近年利用石墨的优异导热性能开发的新型散热材料，高导热石墨膜是在特殊烧结条件下对基于碳材料的高分子薄膜反复进行热处理加工而制成的，具有厚度薄、散热效率高、质量轻等特点，针对局部过热、快速导热、空间限制等方面提供了很好的解决方案。

目前石墨膜已经成为手机散热的基础材料，且尚未发现导热性能优于石墨且其他特性又能满足手机商业化运用要求的导热材料，新型的手机散热解决方案，例如金属背板散热、导热凝胶散热，均系在石墨膜的基础上，通过与金属导热板或者导热凝胶的结合，进一步提升散热效果。

5G 时代高导热石墨膜及新型导热材料有望得到更广泛的应用，未来将呈现多种导热材料产品并存、材料工艺不断创新的局面。

(3) 电磁屏蔽材料

5G 时代，智能手机集成度不断提高、信号传输密度不断提升、内部芯片间距越来越小，导致手机内部的电磁干扰越来越严重，因此电磁屏蔽材料成为未来 5G 时代智能手机的刚需。

电磁屏蔽材料的主要作用：提供无线通信系统和高频电子设备的电磁兼容能力；降低电子设备的电磁辐射；保证电子产品工作的稳定性，提升电子设备的可靠性和安全性等。

目前主要的电磁屏蔽材料及器件有导电塑料器件、导电硅胶、金属屏蔽器件、导电布衬垫、吸波器件等，如表 7-16 所示。

表 7-16 目前主要电磁屏蔽材料及器件

材料	特性	应用
导电布	镍 / 铜 / 镍涂层的聚酯纤维布 最基层为高导电铜，结合镍的外层具有耐腐蚀性能、优异的导电性、屏蔽效能	PDA 掌上电脑、PDP 等离子显示屏、LCD 显示器、笔记本电脑、复印机等
导电布衬垫	导电屏蔽作用的衬垫材料 具有良好的电磁波屏蔽效果	电子机箱、机壳、室内机箱、工业设计、笔记本电脑、移动通信设备等
导电橡胶	金属填充物的橡胶材料 高导电性、电磁屏蔽效能、防潮密封	通信设备、信息技术设备、医疗器械、工业电子设备等
导电硅胶	主要有银 / 铜、银 / 镍、镍 / 碳等 出色的屏蔽效能及机械效能 在大多数金属表面都有很好的附着力的 工作的温度范围在 $-55\sim+125^{\circ}\text{C}$ 之间	无线基站、直放站、滤波器、手机、掌上电脑、笔记本电脑、汽车中控、摄像头、对讲机、安防器械等
电磁波吸收材料	可导磁的复合软磁性材料 高性能片状吸波材，适合狭窄空间的设计 非导电亚克力胶、高粘附强度 抑制电磁共振、电磁波抗干扰 抑制所有种类电子设备电磁噪声	电子数码产品、无线充电、RFID（无线射频识别）、数字交换机、柔性电路板、高速 CPU 芯片、图像处理、振荡芯片、储存芯片、高速信号限流、屏蔽罩内壳、高速微处理器等
金属屏蔽器件	良好的弹性，极好的重复使用性 良好的力学性能 能在多种环境下良好地工作	适用于广泛存在 EMI/RFI（电磁干扰 / 射频干扰）或者 ESD（静电放电）问题的电子设备

（资料来源：赛瑞研究）

5G 时代，电磁屏蔽材料将会朝着屏蔽效能更高、屏蔽频率更宽、综合性能更优的方向发展，电磁屏蔽材料将呈现材料多元化的发展趋势，产品种类不断丰富和创新，各种新材料在电磁屏蔽的创新应用中得到更多的发展，材料工艺不断升级，应用市场亦不断扩大。

7.4.3 手机天线新材料

5G 通信技术的通信频率和网络带宽越来越高，对天线材料提出了更高的要求，为了适应网络和终端的高频高速趋势，传统的 PI 软板作为智能手机的天线和传输线，已经遇到了性能瓶颈，其对射频信号产生的损耗较大，使得天线的全向通信性能变差，且吸湿性较大、可靠性较差，已经无法适应当前的高频高速趋势。因此选择损耗因子小的材料来制作天线以达到更好的信号传输效果，成为未来 5G 天线材料的主要方向，液晶聚合物 LCP 和 MPI（改性聚酰亚胺）材料脱颖而出。

LCP 是一种新型热塑性有机材料，基于 LCP 基材的 LCP 软板凭借在传输损耗、可弯折性、尺寸稳定性、吸湿性等方面的优势，可用于高频高速数据传输，LCP 基材的损耗值仅为

2%~4%，相比传统基材 2% 的电磁损耗降低 9/10，成为高频高速趋势下 PI 软板的绝佳替代材料。

改良传统 PI 软板而诞生的 MPI 材料，随着技术的成熟，在 15GHz 以下的频率范围内综合性能接近 LCP 材料，且在供货状态、产能、成品率和成本等方面有着较大的优势，未来将会占据一定的市场份额。

总体来看，5G 时代虽然 LCP 与 MPI 材料共存，但 LCP 材料将会成为主流并成为未来的发展趋势，特别是 15GHz 以上的应用或层以上的复杂软板的应用，2017 年 Apple 在 iPhone 8/8S 采用 LCP 天线传输线，而在 iPhone X 中规模化商用兼有天线传输功能的 LCP 天线，提前为 5G 布局与验证。



总结与展望

随着 5G 时代的来临以及人工智能的大面积普及，智能手机向着高集成度、轻薄化方向发展，对手机的设计、制造以及材料的性能提出了更高的要求，未来中国手机新材料的发展方向如下。

手机结构材料方面，优势产业需做大做强：凭借自身技术优势及产业化的优势，推动玻璃、陶瓷、金属中框等材料的技术及工艺的创新，做大做强优势产业。

面板及芯片关键材料方面，实现国产化替代是当务之急：抓住面板及芯片制造产业逐渐向中国大陆转移的契机，加快本土关键原材料的研发、生产技术的创新，突破国外技术封锁，实现进口替代。

5G 时代，把握市场机遇，不断的材料创新是关键：5G 时代是结构新材料、导热散热材料、天线材料等多种产品共存、不同工艺协同创新的时代，加强材料和工艺的创新是提升市场竞争力的关键所在。

第 8 章

纺织新材料

黄庆 崔宁 王菲 黄伟

纺织纤维新材料是支撑新兴产业发展的重要引擎，同时也是全球发展的战略重点。纤维新材料作为其重要组成部分，不仅是服装、家纺和产业用纺织品的原料，还是国民经济发展的重要基础材料和工程材料。纤维的创新不仅决定着纺织行业的应用领域与价值体现，更影响着我国经济社会的发展进程与质量。

2020年，我国纺织纤维加工总量达5800万吨，与世界纤维加工总量的比重保持在50%以上，化纤（化学纤维）产量与世界的比重达70%以上。纤维行业持续的结构调整和产业升级，尤其是纤维新材料技术的不断进步，培育并发挥着纤维材料高性能、多功能、轻量化、柔性化等优势，同时也为我国的工业、国防军工、航天航空、交通和纺织等领域实现产业升级及价值提升提供了重要路径。纤维材料等领域一批“卡脖子”技术难题得以突破。“十三五”期间，我国高性能纤维总产能在世界的比重超过1/3，产业用纺织品行业纤维加工量达1910万吨，较2015年增长40%以上，有效满足了我国工业多元化、多层次、多领域的市场需求。

在中国工程院对制造业开展的产业链安全性评估中，纺织工业是我国在全球居于领先地位的五大产业之一。我国纺织产业体系完备，拥有从纤维原料加工到日用消费品及产业用纺织品全产业链优质制造能力。在关系国计民生的产品领域，纺织产业链在技术和装备上均无明显空白。

目前，日本在服用和医卫用功能纤维的研究开发上居于世界领先地位，而欧美国家及地区在以产业用为代表的高技术领域功能纤维研究上首屈一指。功能性纺织品占全部纺织品的比重，日本为39%，欧洲为21%，美国为28%。面对新一轮的国际竞争，急需以高水平的科技供给支撑高质量发展、民生改善和国家安全。《纺织行业“十四五”发展纲要》提出，纤维新材料领域将以服务高质量发展和保障产业链安全为目标，加快突破和掌握一批关键核心技术，主导差别化、多功能纤维材料的研发创新，进入国际高性能纤维研发和生产的第一梯队，引领生物基化学纤维产业化进程。基因工程、高分子合成改性技术、纳米技术等诸多技术的综合应用，正在使材料来源和性能发生革命性的改变，技术的融合也使材料向着多结构、多

功能、超性能、智能化和绿色化的方向发展。材料技术改变着产品的成本结构和价值结构，突破材料技术成为行业实现价值提升的关键途径。

本章将针对极具代表性的高性能纤维新材料、生物基纤维新材料、医用纺织品纤维新材料以及差别化功能性纤维新材料进行重点分析，阐述该领域的趋势亮点与待解难题。

8.1 高性能纤维新材料

高性能纤维材料通常是指具有高强度、高模量、耐高温、耐腐蚀、阻燃等优良特性的纤维材料。在众多高性能纤维中，近年来发展最快的是以碳纤维、对位芳酰胺纤维和超高分子量聚乙烯纤维为代表的高强高模纤维；以聚酰亚胺纤维为代表的耐高温纤维；以间位芳酰胺纤维和密胺纤维为代表的新型阻燃纤维；以聚苯硫醚纤维和聚四氟乙烯（PTFE）纤维为代表的耐强腐蚀性纤维等品种。

高性能纤维被广泛应用于航空航天、能源、建筑、交通、安全防护、国防军工以及电子等领域。此类材料的开发投入大、研发周期长，从研究到成熟生产往往要经历十几年甚至更长的时间，其生产具有产业链长、涉及面宽、产业技术集中度高等特点。高性能纤维产业是诸多产业发展的先导，对国民经济发展、国防军工建设和节能低碳目标的实现起着关键支撑作用。为了使我国从经济大国走向经济强国，加快培育和发展包括高性能纤维材料在内的新材料产业具有重要的战略意义。

8.1.1 主要高性能纤维的性能及其应用

(1) 碳纤维

碳纤维根据前驱体原料的不同可分为黏胶基、聚丙烯腈（PAN）基和沥青基碳纤维。黏胶基碳纤维在 20 世纪 50 年代由美国联合碳化物公司实现工业化，PAN 基碳纤维 1959 年由日本大阪工业技术研究所开发，沥青基碳纤维在 1965 年由日本群馬大学开发，同年，美国联合碳化物公司实现了通用型沥青基碳纤维的工业化。前驱体有机纤维经预氧化、低温碳化、高温碳化、石墨化等一系列物理化学变化得到的含碳量大于 93% 的碳纤维，具有高比强度、高比模量（拉伸强度 $\geq 3500\text{MPa}$ ，拉伸模量 $\geq 220\text{GPa}$ ），优良的耐高温、抗蠕变、导热、导电、耐腐蚀等特性，密度仅为钢的 1/4，而比强度为钢的 10 倍。目前聚丙烯腈（PAN）基碳纤维占有 95% 以上的碳纤维市场份额，其中小丝束（1k~24k）品种占比约 62%，应用于航空航天、国防军工、石油天然气、运动型汽车等高端领域。24k 以上的大丝束品种占比约 38%，应用于风能、铁路、建筑等行业。黏胶基碳纤维具有优异的热稳定性和耐烧蚀性，主要应用于航天领域。高性能中间相沥青基碳纤维由于具有超高模量（ $\geq 900\text{GPa}$ ）和高传导性，在军工和航天等高端领域具有不可替代的地位。

碳纤维及其复合材料是高性能纤维及复合材料中发展最快、产量最大，也是实际应用最为成熟、范围最广的品种，在国民经济的各个领域得到广泛应用。2019 年，碳纤维 65%~70% 的全球市场由航空航天、汽车和风电所占据，见图 8-1。同时，由于复合材料制造

技术的进步，以及自动化制造技术日趋普遍，碳纤维及其复合材料在轨道交通和汽车产业中逐渐得以推广应用。

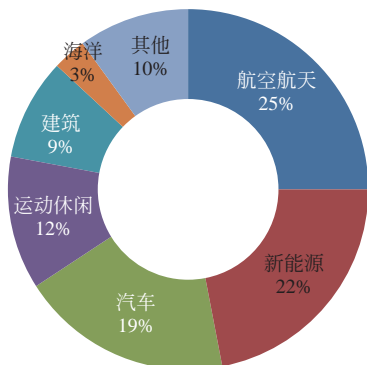


图 8-1 全球碳纤维市场需求^[1]

(2) 芳纶

芳纶全称为芳香族聚酰胺纤维，根据纤维原料分子中取代基位置的不同可分为对位芳纶（PPTA）和间位芳纶（PMIA）。

对位芳纶，即聚对苯二甲酰对苯二胺纤维（PPTA）。苯环与酰胺基团的共轭效应决定了对位芳纶高强度、高模量的优异性能（强度 $\geq 20\text{cN/dtex}$ ，模量 $\geq 700\text{cN/dtex}$ ），同时具有优异的耐切割性。各项优异性能使其主要应用于航空航天、运动器材、防弹、光缆、绳缆、汽车等领域，见图 8-2。

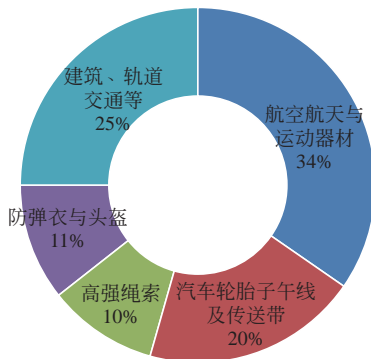


图 8-2 对位芳纶主要应用领域的市场分布^[2]

间位芳纶全称为聚间苯二甲酰间苯二胺纤维，与对位芳纶相比，间位芳纶模量较低、延伸率高、织物手感和舒适性更好。鉴于其优异的阻燃、耐高温、绝缘和化学稳定性等，间位芳纶更多地被应用于高温工业烟气过滤、耐热工装、消防服、工业耐温材料等领域。

(3) 超高分子量聚乙烯纤维

超高分子量聚乙烯（UHMWPE）纤维又称为高强高模聚乙烯纤维，目前市场上此类纤维产品主要由相对分子质量 100 万以上的超高分子量聚乙烯树脂通过凝胶纺丝—超拉伸技术制备而成。UHMWPE 纤维是目前密度最小的高性能纤维，也是比强度和比模量最高的纤维材

料，具有高分子材料中最高的耐冲击强度。另外，该纤维还有很强的抗酸、碱性能和一定的抗化学试剂腐蚀能力^[3]。

基于上述优异性能，目前国内外 UHMWPE 纤维主要应用在防护材料、绳缆及网类领域，其中防护材料（包括防弹衣、防弹装甲、防刺服、防切割服装、防切割手套、头盔、防护货箱等）约占 61% 的市场份额，绳缆约占 33%。近年来，UHMWPE 纤维在民用纺织服装、体育器械、雷达罩等领域的应用技术研究也很活跃。

(4) 聚苯硫醚纤维

聚苯硫醚（PPS）纤维是指分子主链结构为苯基与硫基交替连接的一类热塑性聚合物经熔融纺丝制得的高性能纤维材料。该纤维具有优异的耐酸碱腐蚀性能，也是天然的阻燃材料，极限氧指数 $\geq 34\%$ ，同时具有良好的耐高温性能，可以在 160℃ 下长期使用。聚苯硫醚纤维的介电常数及介电损耗角正切值均较小，可以作为良好的阻隔材料。

聚苯硫醚纤维主要以非织造材料形式用于工业高温烟气除尘或腐蚀性介质的过滤，其单丝或复丝织物还可用于除雾材料、造纸机干燥用布、缝纫线、电绝缘材料、增强材料、电池隔膜等。

(5) 聚酰亚胺纤维

聚酰亚胺（PI）纤维是指分子主链中含有酰亚胺环结构的一类聚合物经溶液纺丝而制得的纤维。该纤维分子链的芳杂环结构与碳氧双键产生共轭效应，使主链分子间键能增加，表现出一定的力学性能（强度 $\geq 5.0\text{cN/dtex}$ ）。聚酰亚胺纤维还具有低介电常数、耐高低温、耐辐射、阻燃和吸水率低等性能。聚酰亚胺纤维的化学稳定性强；在经一定强度电子照射后，其性能还能保持在 90% 左右；极限氧指数在 35%~75% 之间，其发烟率比较低，属于自熄性材料。

聚酰亚胺纤维作为高温除尘过滤材料是在环保领域的典型应用，聚酰亚胺纤维纸可作为基材复合制成蜂窝结构材料，用于飞机机翼和机舱门衬板、顶棚、隔墙等。聚酰亚胺纤维还可用于防高温、耐火等专业防护服领域。

(6) 聚四氟乙烯纤维

聚四氟乙烯纤维以聚四氟乙烯（PTFE）为原料，通过膜裂法、糊料挤出法等制备得到。PTFE 被称为“塑料王”，化学稳定性极好，除熔融的碱金属（包括强氧化剂在内的有机、无机试剂）之外，几乎都不发生反应。

PTFE 纤维具有优秀的热稳定性，对骤冷骤热的耐受性很强，耐老化和耐紫外线性能也十分突出，因此，作为宇航服的主要组成材料之一，发挥着至关重要的作用。此外，该纤维在现有合成纤维中表面张力最小、摩擦因数最低，且不黏附任何物质，在高温工业烟气过滤、海水淡化和医疗卫生等领域中也得到了广泛应用。

8.1.2 / 高性能纤维的发展现状及趋势

(1) 高性能纤维的国际现状

高性能纤维的开发与生产，是一个复杂的系统工程，是一个公司乃至一个国家综合实力的体现。前面所述几种主要高性能纤维基本上起源于美国和日本，而且目前高性能纤维产业

也基本掌握在这少数几家公司手中。同时，这些国家利用已有的在产业和市场上的优势地位，通过技术壁垒和专利围堵等手段，一方面维持自身的领先优势，另一方面抑制新兴国家和地区在此领域的发展。

以碳纤维为例，尽管中国、韩国等已经取得了令人瞩目的成绩，但全球碳纤维产业和市场大部分份额依然为日、美等国所占据。截至 2019 年底，全球碳纤维产能达到 16.1 万吨，日本占据 54%，达到 8.7 万吨；而在高端领域得到应用的小丝束碳纤维品种上，日本占到全球产能的 63%^[4]。

2019 年世界排名前 10 碳纤维生产商产能见图 8-3。

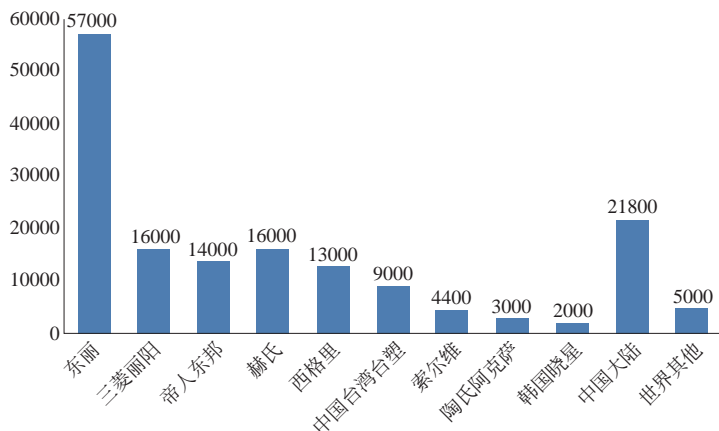


图 8-3 2019 年世界排名前 10 碳纤维生产商产能 (吨/年)

与碳纤维类似，对位芳纶在全球范围的生产与销售也是基本控制在日本和美国公司手中，而且市场占比高于碳纤维。美国杜邦 (DuPont) 公司占据全球市场份额的 51.6%，日本帝人公司占据 38.3%，而韩国、中国和其他国家的公司所占份额仅为 10% 左右，见图 8-4。

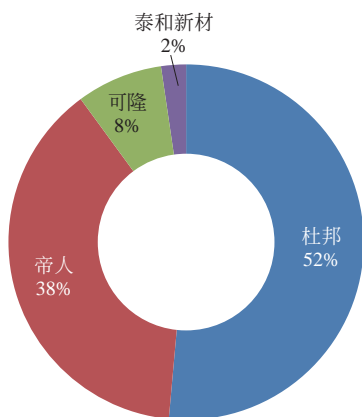


图 8-4 全球对位芳纶产能分布

建立专利围堵也是发达国家在高性能纤维及复合材料领域的发展趋势。以芳纶领域为例，美国杜邦公司一直在利用专利资源强化自身优势，不断扩展产业链，挤压新兴企业的生存空间。

20世纪80年代至20世纪末, 杜邦的主要专利布局着重于针对欧洲、日本等发达国家及地区。进入21世纪, 随着亚洲新兴市场的崛起, 杜邦在海外的专利布局开始从欧洲向亚洲转移, 重点在日本、中国、韩国进行大量专利布局。另外, 在市场发展的不同时期, 杜邦在芳纶产业的专利布局逐渐向产业链下游转移: 在间位芳纶产业化之前, 专利布局主要集中在聚合物的制备和生产工艺的研发, 之后的关注重点开始向生产工艺和应用领域倾斜; 在1980年之后, 生产工艺、产品及应用领域成为其专利布局的重点, 更偏向于生产工艺的研究; 而进入21世纪后, 对于芳纶产业的专利布局开始由对生产工艺的研究偏向于产品及应用领域, 见表8-1。

表8-1 杜邦在不同时期的专利技术分布^[5]

技术分类	专利量 / 项			
	1967年之前	1967—1980年	1981—2000年	2000年至今
化合物制备	38	31	60	48
复合材料	3	8	53	66
生产工艺	20	34	283	217
产品 / 应用	7	12	169	238

在超高分子量聚乙烯纤维领域, 虽然中国公司在近年来取得较大进步, 也有一定数量的产品实现出口, 但是核心技术以及医疗缝合线、个人安全防护等高端产品市场依然被荷兰、美国和日本公司所垄断。全球重点超高分子量聚乙烯纤维厂家如表8-2所示。

表8-2 全球重点超高分子量聚乙烯纤维厂家

序号	公司名称	国家	产品应用领域
1	帝斯曼 (DSM)	荷兰	超高分子量聚乙烯纤维工业化的创始公司, 产品名为 Dyneema 主要应用于医疗缝合、人员的防弹保护、高性能面料以及汽车等领域
2	霍尼韦尔	美国	产品名为 Spectra 主要应用于防弹衣、安全网、绳索、鱼线等
3	东洋纺	日本	产品名为 Izanas 主要应用于船舶系泊绳用纤维、钓鱼线、高尔夫球网、防护手套等
4	江苏九九久科技有限公司	中国	产品主要应用于功能性防护手套、家纺制品、军工缆绳、消防材料、鱼线等
5	仪征化纤	中国	主要应用于防护手套、绳索及软、硬防弹材料等

(2) 高性能纤维的国内现状

近年来, 随着我国航空、航天、风力发电、轨道交通、汽车、高压容器等产业的发展, 对高性能纤维的需求进一步增长。以碳纤维、对位芳纶、超高分子量聚乙烯纤维为代表的高性能纤维产业经过数10年的发展已初具规模, 一批具有一定技术实力和影响力的企业正在成长, 以产学研合作形式建立的各级别研发平台在技术创新和产品升级方面发挥着重要作用, 产品品种逐步丰富, 产品性能已经接近和部分超过国际领先水平, 高性能纤维材料已经成为国防与国民经济建设不可或缺的战略关键基础材料, 也是《中国制造2025》中诸多重点领域发展的材料基础。

① 碳纤维。我国国产碳纤维的产业格局基本形成，现有 20 多家碳纤维企业，主要分布在山东、江苏、河北和吉林。虽然我国的碳纤维研发可以追溯到 20 世纪 60 年代初，但是真正实现产业化的时间是最近 10 年。以中国石油吉林石化公司碳纤维厂、吉林化纤、中复神鹰碳纤维有限公司和威海拓展纤维有限公司为代表的企业，先后实现了千吨级碳纤维的产业化稳定生产和规模化应用。截至 2019 年底，国内碳纤维理论产能达到 2.6 万吨/年，有效产能约为 1.5 万吨/年，生产的 T300/T700 级碳纤维基本满足国防领域的应用需求。

从 2019 年开始，国内诸多碳纤维企业都不约而同地开始扩大产能。上海石化于 2019 年成立了碳纤维事业部，2021 年 1 月，2.4 万吨/年原丝、1.2 万吨/年 48k 大丝束碳纤维项目建设开工，随后于 2021 年 6 月成立上海金山石化碳纤维有限责任公司，负责完成项目建设和后续的纤维生产与应用推广；2021 年 4 月，吉林化纤启动了包括年产 15 万吨碳纤维原丝、年产 3.5 万吨大丝束碳纤维等内容的 20 万吨碳纤维全产业链项目；2019 年 5 月，中复神鹰碳纤维有限公司在西宁启动了年产 2 万吨高性能碳纤维及配套原丝项目。

另外，为整合国内的优势科研资源，一批碳纤维研发平台先后建立。这些研发平台分别专注于高品质碳纤维原丝技术、高强高模碳纤维技术、树脂基碳纤维耐热复合材料、碳/碳复合材料的开发，以及原料聚合反应器、高温碳化炉等关键设备的研制，如表 8-3 所示。

表 8-3 国家发改委和科技部建立的碳纤维及复合材料领域研发平台

序号	平台名称	依托单位
1	功能性碳纤维复合材料国家工程实验室	中国航天科技集团航天材料及工艺研究所
2	碳纤维制备及工程化国家工程实验室	威海拓展纤维有限公司
3	国家碳纤维工程技术研究中心	中国石油吉林石化公司和北京化工大学
4	碳纤维制备技术国家工程实验室	中国科学院山西煤炭化学研究所承担、中科院宁波材料所、化学研究所、上海有机化学研究所共同建设
5	结构性碳纤维复合材料国家工程实验室	中航工业北京航空材料研究院

在上述研发平台与规模化企业的共同努力下，我国已经初步建立起高性能碳纤维技术与产品体系。具体来看，T300 级碳纤维性能基本达到国际水平，在国防领域应用渐趋成熟，在民用领域的应用仍有待开拓；T700 级、T800 级高性能碳纤维突破了干喷湿纺工艺，实现了产业化生产；创新性开发了湿法纺丝 T700 级碳纤维制备工艺；在实验室条件下，T1100 级高性能碳纤维已经突破关键制备技术。在高模量及高强高模碳纤维领域，M40 级高模量碳纤维实现了小批量生产，并在多个卫星型号上应用；M40J 级高强高模碳纤维已完成工程化研制，正在进行应用考核；M55J 级高强高模碳纤维尚处于工程化研制阶段，更高性能的碳纤维品种仍处在关键技术研发阶段。

② 芳纶。截至 2020 年，国内具有对位芳纶产能和可稳定生产的厂家主要有烟台泰和新材料股份有限公司、中石化仪征化纤有限公司、蓝星（成都）新材料有限公司、苏州兆达特纤科技有限公司、中芳特纤股份有限公司等。其中，烟台泰和新材料股份有限公司是我国开展对位芳纶的研发和生产较早的企业之一，现有对位芳纶产能 1500t/a，居国内第一位、全球第四位，同时拥有间位芳纶产能 7000t/a，居国内第一位、全球第二位，如图 8-5 所示。

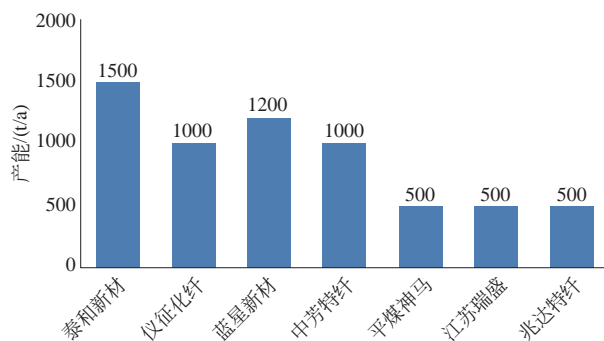


图 8-5 我国对位芳纶产能分布 (截至 2020 年)

在对位芳纶发展进程中, 依托科研院所与企业, 建设了多个开展芳纶技术与产品开发的国家及地方研发与技术平台, 如表 8-4 所示。

表 8-4 国内从事芳纶纤维技术开发的研发平台

研发平台名称	依托单位	主要工作
制浆造纸工程国家重点实验室	华南理工大学	实现芳纶纸技术的产业化
国家受力结构工程塑料工程技术中心	中蓝晨光化工研究院有限公司	对位芳纶的千吨级工程化技术, 芳纶 III 纤维及其复合材料稳定量产
国家芳纶工程中心	烟台泰和新材料股份有限公司	高品质芳纶原料制备、高性能对位芳纶工程化关键技术, 实现了芳纶在个体防护、橡胶复合材料、电气绝缘等领域的应用
纤维材料改性国家重点实验室	东华大学	芳纶纤维的技术开发、产业化和纤维改性

目前, 我国在对位芳纶的生产上取得成功的关键技术包括高分子量 PPTA 聚合体连续制备、浓硫酸发泡冷冻粉碎 - 聚合体固态预混 - 升温溶解、高黏度溶液快速脱泡、高剪切速率液晶纺丝及溶剂高效回收技术等。这些工艺技术生产安全性较高, 纤维强度 $\geq 21\text{cN/dtex}$, 模量 $\geq 700\text{cN/dtex}$, 使我国对位芳纶的生产技术整体达到国际先进水平。

芳纶的应用前景甚至比碳纤维更为广泛。因此随着芳纶生产技术的进步以及产品在国民经济中的应用推广, 我国对位芳纶纤维的生产规模正在加速扩展。2018 年, 由烟台泰和新材料股份有限公司与宁东开发投资公司等共同出资设立的宁夏泰和芳纶纤维有限责任公司注册成立, 3000t/a 高性能对位芳纶项目正式落户宁夏。该项目建成后, 烟台泰和新材料股份有限公司的对位芳纶产能将扩大至 4500t/a; 2019 年 4 月, 由中化集团投资的江苏瑞盛新材料科技有限公司 5000t/a 对位芳纶项目在扬州化工园区开工, 该项目建成后, 将有力推进我国对位芳纶产业的发展。

③ 超高分子量聚乙烯。国内超高分子量聚乙烯 (UHMWPE) 纤维产业化时间虽然较晚, 但在国家政策的支持下发展较快。纤维的断裂强度等关键指标不断提升, 产能规模也逐步扩大。2019 年, 我国超高分子量聚乙烯纤维行业总产能约达 4.25 万吨。产能排名前三的公司分别为江苏九九久科技有限公司, 产能为 10000t/a, 山东爱地高分子材料有限公司, 产能为 5000t/a 和浙江千禧龙纤特种纤维股份有限公司, 产能为 4000t/a, 如图 8-6 所示。

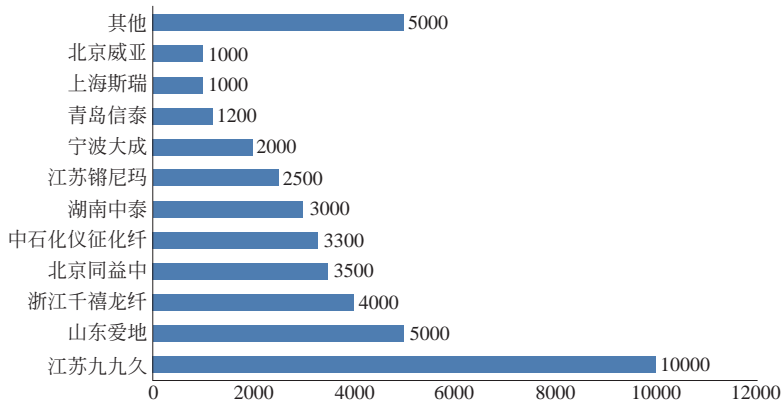


图 8-6 我国超高分子量聚乙烯纤维产能情况 (截至 2019 年)

从纤维生产技术的角度,目前真正实现 UHMWPE 纤维大规模工业化生产的方法仅有凝胶纺丝法。根据溶剂脱除方式不同,凝胶纺丝法又可分为湿法纺丝和干法纺丝。在世界范围内,霍尼韦尔公司采用湿法纺丝技术,DSM 公司采用干法纺丝技术。

目前国内绝大多数超高分子量聚乙烯纤维生产厂家采用湿法纺丝技术。中石化仪征化纤有限公司以中国纺织科学研究院有限公司和中国石化南化集团公司研究院合作开发的高性能聚乙烯纤维干法纺丝成套技术为依托,建设了国内唯一一条干法工艺技术生产线。

为解决国内纤维级 UHMWPE 树脂原料及其制备技术受制约的状况,2000 年以来,中国石化北京燕山石油化工有限公司、上海化工研究院等单位,根据高性能聚乙烯纤维对原料的要求,开展了纤维级 UHMWPE 专用树脂研究,掌握了聚合高效催化剂制备和分子量分布精准调控等技术,掌握了 UHMWPE 分子量 100~800 万、分子量分布可调控的规模化生产关键技术,形成了万吨级纤维专用树脂产业化生产能力。

与凝胶纺丝法相比,UHMWPE 熔融纺丝具有工艺简单、生产效率高、能耗小、环境污染小等明显优势,因此其技术开发受到学术和工业界长期关注。已经有中国科学院宁波材料技术与工程所、山东爱地高分子材料有限公司等单位开展超高分子量聚乙烯纤维的熔融纺丝技术研究并获得专利授权。熔融纺丝技术制备 UHMWPE 纤维力学性能可满足市场对中等强度纤维的要求,因此,该技术有望在市场中占有一席之地。

(3) 高性能纤维的发展趋势

高性能纤维在产业规模上日渐集中,技术仍然处于垄断状态。而从技术开发的角度看,高性能纤维的一个主要发展方向是超高性能产品,使材料可以在更为苛刻或高端的领域得到应用;另一个发展方向则是低成本产品的制造技术。此外,随着高性能纤维及其复合材料应用的不断增加,产业对于回收再利用技术的需求也将明显上升。

① 高性能化。以碳纤维为例,日本东丽公司于 2017 年成功实现了 T1100G 型碳纤维的商业化,该型纤维抗拉强度高达 7.0GPa,拉伸模量也达到 324GPa。随后于 2018 年底,东丽公司又宣布开发出具有更高抗拉强度和拉伸模量的 M40X 型产品。M40X 碳纤维抗拉强度为 5700MPa、拉伸模量达到 377GPa,此类型高强高模碳纤维的研发成功解决了长期以来

碳纤维高强度和高模量难以共存的难题，更大程度地满足了航空航天领域结构材料的特性要求。

美国高温材料开发商 Advanced Ceramic Fibers 与约翰霍普金斯大学应用物理研究所合作，通过纤维表面直接转化技术，将碳纤维外层转化为金属碳化物如碳化硅（SiC/C），利用此种纤维制备的 CMC（羧甲基纤维素）复合材料，可以耐受超过 1700℃ 的高温，将用于制造军用飞机结构的涡轮发动机部件^[6]。

② 更低成本、更高效。在追求更高性能的同时，以更低成本制造高性能纤维，最大限度地扩大高性能纤维及其复合材料的使用量和应用领域，也是高性能纤维产业所追求的发展目标之一。2013 年 9 月，世界碳纤维排名第三的美国 Zoltek 公司被日本东丽收购，Zoltek 公司的低成本商业化碳纤维品种 PANEX35 也被收于东丽麾下。PANEX35 碳纤维采用纺织品级聚丙烯腈纤维为前驱体，通过专有的高通量工艺制造，使其成为市场上成本最低的碳纤维，并且凭着其出色的力学性能（图 8-5），已成功应用于风电、汽车等工业行业。

表 8-5 低成本碳纤维 PANEX35 和 T300 性能对比

主要性能指标	PANEX35	T300
抗拉强度 /MPa	4137	3530
拉伸模量 /GPa	242	230
断裂延伸率 /%	1.5	1.5
体积密度	1.81	1.76
丝束规格	50k	1k、3k、6k

对于我国高性能纤维产业，低成本纤维制备技术不仅要降低生产要素成本，也要突破高性能纤维颠覆性制备技术，建立低成本化的生产工艺。

德国 Centrotherm 国际公司与德国纺织与纤维研究所（DITF）合作，开发出一种前驱体纤维热稳定化新技术^[7]，可以在纤维热稳定化过程中精确调控大气和氧气的质量分数。低压是控制氧气含量最有效和有利的方法。由于处理气体的用量减少，新技术可使处理时间减少 30%，能源成本降低 50%。低压和常压下热稳定化的 PAN 基碳纤维的抗拉强度与稳定时间的关系见图 8-7。

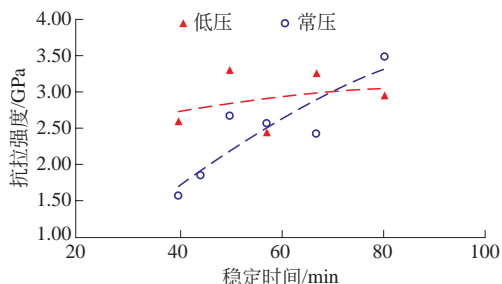


图 8-7 低压和常压下热稳定化的 PAN 基碳纤维的抗拉强度与稳定时间的关系

③ 回收再利用技术多元化。由于纤维技术的进步，我国高性能纤维及其复合材料在航空、新能源、交通等领域的应用日渐增加。以 C919 大飞机为例，其对高性能纤维复合材料的使用量已经达到机体结构质量的 11.5%，C929 预计将要达到 50%；同时，我国电力生产部门为达到“3060”“双碳”目标，将大力提高以风电为代表的新能源发电的比例，预计到 2060 年末，我国并网风电装机将达到全口径装机容量的 29.6%。风电的发展必然大幅提升高性能纤维的用量。当这些复合材料因性能衰减等原因退役后，将产生大量的废弃物而面临回收再利用的问题。

目前对于废弃复合材料的处理，已经不能再采用早期的焚烧/填埋方法。但是由于纤维增强复合材料大部分采用热固性树脂作为基体，热固性树脂在固化成型后具有不溶不熔的特性，而且大部分树脂和高性能纤维具有良好的耐腐蚀性，因此给回收再利用带来了巨大的挑战。

2014 年，日本碳纤维制造商协会（JCMA）联合东丽、帝人集团和三菱丽阳，开发出不需要预粉碎就可进行热解过程的回收碳纤维生产技术，所回收的碳纤维强度可达原生碳纤维的 80% 以上，该回收系统所回收的碳纤维已应用于汽车部件。

英国从事碳纤维回收再利用技术的 ELG 公司与波音公司合作，将波音工厂的固化与未固化碳纤维余料进行回收，制成研磨碳纤维零件与再生碳纤维的模压材料和预浸料，用于汽车底盘、车身轻质部件和火车转向架结构等。

另外，采用短切碳纤维增强的热塑性复合材料在 3D 打印行业得到了广泛的应用，与原生碳纤维相比，回收碳纤维用作 3D 打印复合材料，既避免了废弃复合材料对环境的污染，也有利于降低复合材料 3D 打印的成本。

8.2 生物基纤维新材料

我国作为世界第一的纤维材料生产和使用大国，90% 以上的化学纤维是石油基的合成纤维。由于石油是不可再生资源，为满足国民经济和社会发展需求，必须有相应的替代资源以满足消费需要。生物基化学纤维作为有望缓解资源危机和环境污染的新材料，原料来自植物和微生物代谢有机体，是我国新兴战略材料领域重要组成部分，也是建设化学纤维强国的重要支撑。

生物基化学纤维具有绿色、环境友好、原料可再生以及可生物降解等优良特性，有助于解决我国资源和能源短缺以及环境污染等问题，也将助力我国“双碳”目标的实现。“十三五”期间，我国生物基化学纤维取得了高速发展，关键技术不断取得突破，产业规模较快增长，一批具有产业实力和技术开发能力的企业进入了生物基化学纤维及原料领域，初步形成了生物基纤维素纤维、生物基合成纤维、海洋生物基纤维及生物蛋白复合纤维的产业体系。2020 年，生物基化学纤维总产能达到 66.78 万吨/年，较 2015 年增长了 241.6%，年均增长 48.32%。

以是否可降解为分类方式，生物基生物可降解材料主要包括：以 Lyocell 纤维

为代表的再生纤维素、聚乳酸（PLA）、聚对苯二甲酸丁二醇-共-丁二酸丁二醇酯（PBST）、聚丁二酸丁二醇酯（PBS）、聚己内酯（PCL）、聚羟基脂肪酸酯（PHA）[包括聚羟基丁酸酯（PHB）和聚羟基戊酸酯（PHV）以及这两者的共聚物（PHBV）]等；生物基非生物可降解的成纤聚合物包括聚对苯二甲酸丙二醇酯（PTT）、聚酰胺56（PA56）等。

目前，我国生物基化学纤维产业在整个化纤行业中仍占比不高，随着技术的突破，必将会迎来蓬勃发展的阶段。根据我国“十四五”生物基化学纤维及原料发展规划研究，到2025年生物基化学纤维总产能将达到300万吨。

8.2.1 / 生物基生物可降解纤维

(1) Lyocell 纤维

① Lyocell 纤维的生产。石油基高分子材料面临两个极为紧迫的挑战，一是石化资源日益消耗，使得以石油为原料的材料发展受到越来越多的制约；二是石油基高分子材料难以降解，在其生命周期的处置环节中产生的环境问题难以解决^[8]。基于可持续发展与环境保护两方面考虑，纤维素材料愈发重要。

在众多纤维素材料中，Lyocell 纤维是近年来最热门且已实现产业化的纤维素材料之一。Lyocell 纤维是将纤维素（浆粕）直接溶解于 NMMO/水体系中，形成纤维素溶液，经干喷湿法纺丝制得的再生纤维素纤维。以 NMMO 溶剂法生产 Lyocell 纤维是一种纤维素纤维的新工艺，生产过程完全是物理过程，所用 NMMO 溶剂几乎没有任何毒性、回收率已高达 99.8%，整个过程形成闭环回收再循环系统，没有废物排放，环境友好，是一种高效、绿色的先进生产工艺（图 8-8）^[9]。

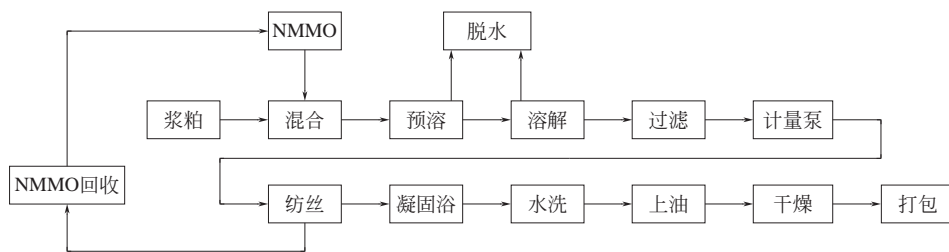


图 8-8 Lyocell 纤维纺丝过程简图

Lyocell 纤维的化学结构与黏胶纤维相同，除了具有天然纤维本身的特性，如吸湿性、透气性、舒适性、光泽性、可染色性外，还具有合成纤维的高强度，其强度与涤纶接近，远高于棉和普通的黏胶，有利于染整处理，适用于多种染料。Lyocell 纤维具有良好的强伸特性，适宜与其他天然纤维或合成纤维混纺，并且能够经受剧烈的机械和化学处理，使织物具有仿丝、棉、麻、毛等各种手感，其发展前景十分广阔。但客观讲，我国 Lyocell 纤维材料发展仍旧面临很多问题：一是政策或法规的引导和支撑作用有待进一步提高；二是生产制造成本高；三是生产技术自动化、智能化程度不高；四是纤维

应用推广能力与品牌意识较弱；五是纤维素纤维检测、评价体系尚不完善。只有这些存在的问题在行业发展过程中逐步完善并解决，才能使 Lyocell 纤维得到最大限度的开发与应用。

② Lyocell 纤维的主要类型。目前 Lyocell 纤维主要有短纤维、长丝、长丝成网非织造材料以及各种功能化 Lyocell 纤维。

a. Lyocell 短纤维：Lyocell 短纤维采用干喷湿纺工艺纺制而成，纤维结晶单元在气隙段高度取向排列，在纵向上具有很强的结合力，因此 Lyocell 纤维具有高取向、高结晶结构，但这也导致纤维结晶单元的横向作用力相对较弱，在湿态条件下，受到外力作用时，微原纤非常容易从纤维上剥离下来，引发纤维表面的原纤化现象。因此，使用常规 Lyocell 纤维生产的织物经过一段时间使用后会起球现象，这是由 Lyocell 纤维易于原纤化导致的。针对 Lyocell 纤维的原纤化现象，可以通过后处理交联的方式缓解 Lyocell 短纤维的原纤化现象，或者利用其原纤化来生产桃皮绒、天鹅绒外观的织物。目前，Lyocell 短纤维被广泛应用于服装、家纺、卫生材料、家装内饰等领域。

b. Lyocell 长丝：通过特定的纤维素浆粕制备高性能、高均匀性的纤维素溶液，利用专用纺丝组件进行纺丝，纺丝细流在纺丝漏斗内随着高速水流被拉伸，拉伸后的纤维再经水洗、上油、干燥等连续卷绕到丝筒上得到 Lyocell 长丝，目前 Lyocell 长丝的纺丝速度高于 200m/min。Lyocell 长丝具备生态友好、吸湿透气、顺滑柔软、高强耐用、垂感优良和染色性好的特点。

c. Lyocell 长丝成网非织造材料：特定的纺丝原液经由纺丝模头挤出，挤出的细流进入纺丝漏斗中，进行牵伸和凝固成型，成型纤维随着凝固浴一起落到铺网机上，形成纤网，最后经过水刺、水洗、烘干，制备成长丝无纺布。使用 Lyocell 纤维制备的非织造材料，具有高力学性能、吸收性、洁净度、柔软性、不掉屑等优点。

d. 功能化 Lyocell 纤维：功能化 Lyocell 纤维的制备主要通过物理共混法将功能粉体直接引入纺丝原液中，制备出功能化的高附加值纤维。例如将相变材料填入 Lyocell 纤维之中，纤维内部的相变材料会根据环境温度发生固液相转变，并进行吸放热，使纤维具备双向调温功能；利用医用级抗菌剂或氧化石墨烯对 Lyocell 纤维进行物理改性制备的功能 Lyocell 纤维，对金黄色葡萄球菌、白色念珠菌、大肠杆菌的抑菌率均可达 99% 以上，具有较好的抑菌性能；纺丝原液中加入含硫、磷等阻燃剂制备的阻燃 Lyocell 纤维^[10]染色性能优异，为阻燃迷彩面料的制作带来了便利，由于其燃烧时无熔滴、阻燃性能优异等特性，在军用纺织品领域及特种防护领域具有巨大的需求潜力。

③ Lyocell 纤维发展现状。

a. 国际 Lyocell 纤维发展现状：英国 Courtaulds 于 20 世纪 90 年代实现了 Lyocell 纤维生产工艺的产业化。1998 年，Courtaulds 公司与荷兰的 Akzo 公司合作成立了 Acordis 公司，生产经营 Lyocell 纤维产品（商标 Tencel[®]）；奥地利 Lenzing（兰精）公司也于 1998 年成功地开发了 Lyocell 纤维生产工艺，其在美国、英国、奥地利等国都有万吨级的 Lyocell 纤维工厂。2004 年 5 月，奥地利 Lenzing 公司收购了 Acordis 的 Tencel 工厂，成为全球垄断型的 Lyocell 纤维生产商。之后 Lenzing 生产的 Lyocell 纤维统一使用 Tencel[®] 商标，并逐步形成了 G100、

A100 和 LF 等系列产品。2021 年全球产能为 48.5 万吨，其中 Lenzing 公司是世界最大的 Lyocell 纤维生产商，占有 Lyocell 纤维总产能的 51%，全球建有四家工厂，合计产能 24.5 万吨/年^[11,12]。

b. 我国 Lyocell 纤维发展现状：我国从 20 世纪 90 年代初期开始对 Lyocell 纺丝工艺技术进行探索试验。中纺院自 1998 年开始启动 Lyocell 纤维国产化工程技术的研究开发工作。2006 年，上海里奥纤维企业发展有限公司“生物可降解材料 Lyocell 纤维开发”项目生产线全线贯通，2007 年通过项目验收。2013 年，保定天鹅新型纤维制造有限公司引进国外技术，完成了 1.5 万吨/年新溶剂法再生纤维素短纤维生产线的建设，2014 年投产成功，后扩产至 3 万吨/年；2015 年，山东英利实业公司 1.5 万吨/年 Lyocell 项目投产成功，后扩产至 3 万吨/年；2016 年，中纺院绿色纤维股份公司 3 万吨/年规模生产线 A 线试车成功，2020 年扩产至 9 万吨。之后越来越多的企业如唐山三友、湖北金环、沛县金荣泰、赛得利等纷纷加入 Lyocell 纤维生产大军之中。截至 2021 年底，国内产能已达到 22 万吨。

④ Lyocell 纤维的发展前景及发展趋势。

a. Lyocell 纤维的发展前景：随着 Lyocell 纤维生产技术的不断进步，产品应用推广逐步加强，国内绿色纺织原料升级换代，Lyocell 纤维将会有广阔的发展空间，原因主要包括以下四点：

一是中国拥有巨大的消费市场，2011—2018 年数据显示，Lyocell 纤维市场规模呈现持续增长态势，如图 8-9 所示。目前，兰精 Lyocell 纤维在亚洲地区的销售份额占比为 63%，其中在亚洲的销售份额中中国所占比例最大，这也表明国产 Lyocell 纤维蕴含了极为广阔的市场空间。

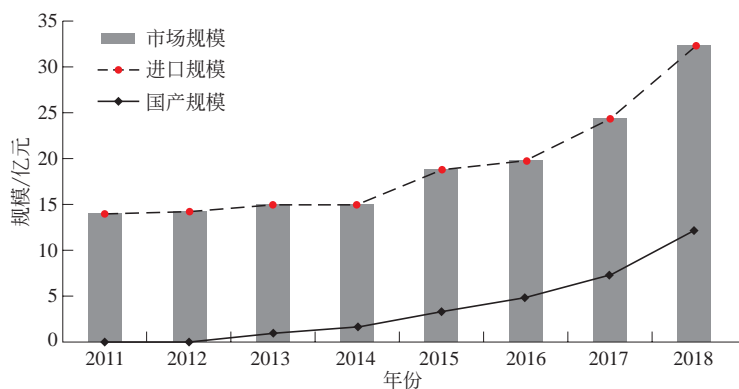


图 8-9 我国 2011—2018 年 Lyocell 纤维市场规模

二是符合国家环保发展政策，Lyocell 纤维的整个生产工艺是一种物理过程，纤维生产过程无毒、无污染，同时 Lyocell 纤维能生物降解或安全燃烧，不会对环境造成二次污染^[13]。

三是具有较好的穿着效果，Lyocell 纤维兼具天然、合成纤维两者优点，其物理、力学性能优良，尤其是湿强与湿模量接近合成纤维，同时具有棉纤维的舒适性、黏胶纤维的悬垂性

和色彩鲜艳性、真丝的柔软手感和优雅光泽。Lyocell 纤维还具有原纤化效应，可生产常规纤维不能得到的类似桃皮绒的表面效果。

四是原料来源广泛，Lyocell 纤维的原料——纤维素浆粕取自自然界，可再生，来源取之不尽。优质木材、棉短绒及阔叶林等作为 Lyocell 纤维工业化生产的原料得到成功应用，相关科研院所、高校和企业等也在逐步开发将速生材、竹材、甘蔗渣、秸秆类制成纤维素浆粕的技术。

Lyocell 纤维越来越为市场所接受。虽然由于目前产量有限，市场集中在中高端纺织品消费群体，但相信随着 Lyocell 技术的应用推广，国产化进程的推进，政府政策的大力支持，Lyocell 纤维将会逐步地替代部分传统工艺的黏胶纤维市场，推动国内绿色纺织原料升级换代，拥有广阔的发展空间。

b. 我国 Lyocell 纤维的发展趋势

- 产能向亚洲转移。目前 Lyocell 产能主要集中在欧美，但销售区域主要在亚洲，特别是中国。2003 年 Lenzing 在上海建立销售公司，表明其销售战略重心在向亚洲转移。面对越来越大的市场需求量，Lyocell 纤维的产能也有向亚洲转移的趋势，关键是 Lyocell 纤维的制造成本与销售价格。亚洲特别是中国的黏胶生产商一旦在制造技术上获得突破，生产成本降低，大量的产能扩张是必然的。

- 发展差别化及功能性 Lyocell 纤维。差别化也是 Lyocell 纤维的发展趋势，如同黏胶纤维的差别化，功能性纤维是差别化纤维的重要组成部分。开发差别化纤维的趋势就是要使其具有某种功能，如抗菌、抗静电、阻燃等，以迎合消费者对功能性纺织品的追求。而集多种功能于一身的差别化纤维更是一个新的发展方向，如阻燃纤维，除具有阻燃功能外，还兼有抗静电、抗起球、抗菌和防霉等功能。因此，功能性 Lyocell 会更受市场欢迎^[14]。

- Lyocell 纤维用浆粕及溶剂国产化的研发和生产。Lyocell 纤维生产的主要原料包括纤维用浆粕和 NMMO，近年来随着造纸工业的萎缩，虽然有大量纸浆厂转向生产纤维用浆粕，但在 Lyocell 纤维产能快速扩展的情况，仍存在浆粕供应不足的风险。Lyocell 纤维产能扩展也会使 NMMO 溶剂的使用量快速加大。目前国内还不能生产 Lyocell 纤维用浆粕和高品质 NMMO，在当前的国际贸易形势下，国产化 Lyocell 纤维用浆粕和 NMMO 也是重要的发展趋势。

- 拓展应用领域。以往 Lyocell 纤维的产品主要用于针织服装、内衣、休闲服等，产业用的比例很小。今后，Lyocell 纤维向装饰用与产业用纺织品领域发展也是一个趋势。

Lyocell 纤维作为我国重点支持的新兴产业，对我国黏胶纤维的转型升级、实现再生纤维素纤维与纺织产品的结构调整具有重大意义。为推进我国 Lyocell 纤维的国产化进程，需从国家层面上联合各大高校及企业的现有资源，加大研发投入，全面系统地规划部署，组织不同学科专家开展系统攻关，以早日实现 Lyocell 纤维的大规模国产化生产。

(2) 聚乳酸纤维

① 聚乳酸纤维的主要类型：聚乳酸（Polylactic Acid, PLA）又名聚丙交酯（Polylactide），是一种脂肪族聚酯，是目前研究开发得最早、技术最成熟、应用最多的一种全降解型生物高

分子材料。

PLA 主要以玉米、木薯等农作物为原料，经微生物发酵、提取制得乳酸，再经过精制、脱水低聚、高温裂解聚合而成。聚乳酸的合成分两步进行：第一步是提取玉米、木薯的淀粉、甘蔗和甜菜的糖及秸秆等的纤维素，经过发酵、脱水等处理获得乳酸单体；第二步是由乳酸制备成丙交酯，丙交酯提纯后再进一步开环聚合得到聚乳酸。乳酸是具有旋光性的分子，有 *D*-乳酸（右旋）和 *L*-乳酸（左旋）两种旋光异构体，由它们制成的聚乳酸有左旋聚乳酸（PLLA）、右旋聚乳酸（PDLA）、外旋聚乳酸（PDLLA）、非旋光性聚乳酸（meso-PLA）等几种不同的旋光异构体。由于发酵法制备的乳酸通常 99% 以上为 *L*-乳酸，因此市场上常见的 PLA 为 PLLA。*D*-乳酸往往需要特殊的发酵菌，市场上主要的菌株技术掌握在 Corbion-Purac 手中，只有 Corbion-Purac 能稳定提供 PDLA。

② 聚乳酸纤维的发展现状：目前，全球乳酸生产企业主要集中在美国、中国、泰国、西欧、中南美等国家和地区，近 70% 的厂商采用微生物发酵法进行生产，如美国 NatureWorks 公司开发了将玉米中的葡萄糖发酵制取聚乳酸的技术，产能已达 18 万吨/年，占据了全球 30% 以上的聚乳酸产能。Corbion-Purac 为全球最大的乳酸及其衍生物、丙交酯、聚乳酸供应商，在荷兰、西班牙、巴西、美国、泰国都有生产工厂，现具有年产 36 万吨乳酸及其衍生物、丙交酯的生产能力，约占全球总产能的 26%。

③ 聚乳酸纤维的发展前景及发展趋势。PLA 原料来源充分且可以再生，生产过程无污染，且废弃产品可以通过堆肥在温度高于 55℃ 或富氧的环境下，经过微生物作用下完全降解为 CO₂ 和 H₂O，返补自然。整个生命周期中大大减少了碳足迹（Carbon Footprint），不会对环境产生影响，是理想的绿色高分子材料。PLA 适用于挤出、注塑、拉膜、纺丝等各种加工方法，加工方便，因此可被应用于食品包装、快餐饭盒、无纺布、工业及民用布、农用织物、3D 打印等领域。

PLA 纤维具有高结晶度、高取向性和高强度等优良性能，同时具有较好的滑爽性、柔软舒适、干爽透气和抗紫外线功能，良好的光泽弹性和蓬松性，并具有良好的生物相容性，可完全生物降解，是一种可持续发展的生态纤维和极具发展前景的新型纺织材料，被认为是未来替代石油基化纤的主要材料。目前，国外熔融纺丝法制备聚乳酸纤维的工艺比较成熟，已有不少聚乳酸纤维类商品面世，如美国 NatureWorks 的 Ingeo 纤维、日本钟纺公司的 Lactron 纤维、尤尼吉卡公司的 Terramac 纤维等。2001 年，美国田纳西大学进行的熔喷实验证明了 PLA 在熔喷工艺上应用的可行性。2009 年，美国 NatureWorks 公司研究开发出了 6252D 和 6201D 两种熔喷级 PLA 切片原料生产工艺，并实现了熔喷 PLA 的工业化生产。此后，可用于熔喷生产的 PLA 切片原料一直被美国 NatureWorks 的 Ingeo™ 牌号 PLA 树脂所垄断。继 2005 年日本 KaneboGosen 公司与 Kureha 化学公司宣布已开发出可生物降解聚乳酸纺粘布之后，国内也开始了聚乳酸纺粘布的产业化推广工作。另外，我国也有多家单位开展了聚乳酸纤维的相关研发与产业化，例如马鞍山同杰良生物材料公司、恒天长江生物材料有限公司、安徽丰原集团、上海德福伦化纤有限公司等。

近年来，有了长足发展的静电纺丝技术成为制备 PLA 纤维的高效方法之一。通过静电

纺丝技术制备的 PLA 纳米纤维以及 PLA 复合纳米纤维在很多领域得到研究和利用，如多孔 PLA 纳米纤维可有效提高过滤材料的过滤性能；因其安全无毒、生物相容性好、具有合适的孔径和孔隙率等优点，广泛应用于生物医学领域，如组织工程支架或支架载体。

然而，PLA 脆性高、熔点较低、热变形温度低造成 PLA 纤维的耐温性和耐水热降解性差；化纤生产及纺织加工过程中的湿热场景比较多，如染色、熨烫等，很容易造成 PLA 纤维的湿热降解，极大地限制其在工业上的应用^[15]。

采用立构复合法^[16]制备具有较高耐热性且不影响可生物降解性能的 PLA 纤维应该是一种很有前景的方法^[17]，但是，由于纤维加工的特点，熔融纺丝法制备立构复合聚乳酸（Stereocomplex Polylactic Acid, ScPLA）纤维还具有一定的难度，至今市场上还未见成熟商品化的 ScPLA 纤维。全球聚乳酸生产企业实际及预增产能见表 8-6。

表 8-6 全球聚乳酸生产企业实际及预增产能

单位：万吨/年

区域	序号	企业	2020 年	2021 年	2022 年	其他新增产能
国内	1	浙江海正	4.5	1.5	6	
	2	安徽丰原	3	10	30	180
	3	金发科技	1	3		
	4	恒天长江	1			
	5	允友成	5			
	6	龙都天仁	5			
	7	同杰良	1.1			
	8	东部湾生物		2	2	4
	9	中粮生物			10	
	10	同邦新材料			10	10
	11	友诚控股				50
	12	泓达生物				16
	13	江苏九鼎	0.5			
	14	河北华丹	5			
	15	金丹科技			1	
	16	光华伟业	1			
		合计	27.1	16.5	59	260
国外	1	NatureWorks	15			7
	2	Total Corbion	7.5			10
	4	Hycail	0.5			
	5	Uhde Inventa-Fischer	0.05			
		合计	23.05			17

预计“十四五”期间中国企业 PLA 树脂规划产能将超 330 万吨，但用于纤维制备的 PLA 量相对较少，除恒天长江的产能基本是纤维级聚乳酸外，其余企业中纤维级聚乳酸产

能占比很低。目前 PLA 的工业化生产和应用仍面临成本较高、生产效率较低等问题，需要研究人员的不断探索，一旦有所突破，PLA 及其制品将会产生不可估量的经济价值和环保意义。

(3) PHBV 纤维

•••

① PHBV 纤维的主要类型：聚（3-羟基丁酸-co-3-羟基戊酸）PHBV 是聚羟基丁酸酯（PHB）和聚羟基戊酸酯（PHV）两者的共聚物，广泛地存在于微生物体内，是微生物的能源储备。由微生物合成的聚酯，包括均聚物和共聚物，总称为 PHA（Polyhydroxyalkanoate），PHA 最显著的特点是可完全生物降解，并且具有较好的物理、力学性能，以及较好的生物相容性。

PHA 是某些微生物处于非平衡生长状态时，细胞内合成的一种储藏性聚酯，在细菌体内的功能类似于植物中的淀粉和脂肪。目前应用较为广泛的 PHA 有两种：聚 3-羟基丁酸酯（P3HB）和聚（3-羟基丁酸-co-3-羟基戊酸）（PHBV）。英国的 Zeneca 公司采用两步发酵法在一个间歇釜中率先实现无规共聚 PHBV 的产业化，共聚物中 3HV 的组分含量可以在 0~47mol% 间变化^[18]。

② PHBV 纤维的发展现状及趋势：目前，PHBV 是主要以淀粉、葡萄糖为原料，运用发酵工程技术制备的生物可降解材料。此外，食品厂的工业废物、废弃水果、蔬菜等植物残骸也可作为原料，通过发酵和微生物合成制备 PHBV。

PHBV 是热塑性脂肪族聚酯，具有优异的生物可降解性和生物相容性、光学活性等特性，经改性后，具有良好的可纺性。PHBV 典型的纤维产品是禾素纤维，由 PHBV/PLA 两种材料按照一定的比例进行混合，然后熔融纺丝制得，其显著特点是具有天然抗菌性。禾素纤维在耐热度和柔软度方面都比纯 PLA 纤维更为优越，可利用该纤维制作健康环保的纺织品，已成功应用于纺织服装、家纺用品、母婴用品、化妆品、卫生用品等。

PHBV 作为高分子时不具备抗菌性，但它的低聚物却可以抗菌。低聚合度的 PHBV 能够破坏微生物的生物膜和细胞壁，使内容物外泄；进入细胞内会改变酸碱平衡，打乱代谢，从而使其死亡。通过工艺控制，使纤维表面具有一定浓度的低聚物，可以达到需要的抗菌效果。以其制作的面料具有柔软、顺滑、凉爽的特性以及良好的悬垂性，织物有良好的上染率和色牢度以及极高的抗菌性和驱螨虫性。宁波禾素纤维有限公司与中国科学院宁波材料技术与工程研究所、香港理工大学就 PHBV/PLA 复合纤维进行产业化技术及应用突破，纤维每年产能在 1500t。按照美国的 AATCC100—2012 标准（吸收法）测试禾素®纤维面料，洗涤 50 次后的抗菌检测结果：金黄色葡萄球菌 >99.99%；肺炎克雷伯氏菌 >99.99%；须毛癣菌 >99.99%；白色念珠菌 >92.86%。另外，PHBV 纤维还可以代替传统的医用外科手术线缝合伤口，可被身体逐渐吸收，免除拆线之苦恼。

PHBV 材料的推广和应用，必将为人类减轻对石油资源的依赖、遏制白色污染、控制温室效应以及社会经济的可持续发展作出重要贡献。

(4) PBS 纤维

•••

① PBS 纤维的主要类型：聚丁二酸丁二醇酯（PBS）一般是以 1, 4-丁二酸（SA）、1, 4-

丁二醇(BD)为主要原料, 钛酸四正丁酯(TBT)为催化剂, 磷酸三苯酯(TPP)为热稳定剂, 采用直接酯化-熔融缩聚法制得。PBS的熔点约 115°C , 属完全可生物降解热塑性聚酯, 降解产物主要为 H_2O 和 CO_2 。

② PBS纤维的发展现状及趋势: 在我国, PBS的研究和产业化已取得了很大的进步。2006年, 安徽安庆和兴化工公司依托清华大学, 建成年产3000t/年的生产线; 2009年, 10000t/年的PBS装置试产成功。但是, 与常规聚酯(如PET)相比, PBS的熔体强度低, 必须通过增大分子量以提高其物理性能, 但随着分子量的提高, 熔体的流动性迅速变差、黏弹性增加, 使得纺丝成型变得困难; 另外, PBS热稳定性较差, 合成的PBS分子量分布较宽, 加工过程分子量下降明显, 尤其对于熔体停留时间较长的纺丝, 分子量的下降更难以控制, 所以, 一直未见PBS化纤长丝产业化的报道。可见, 如何制得分子量大、分子量分布窄、热稳定性较好的纤维级PBS, 是实现PBS纤维产业化的关键。目前, PBS在喷熔、静电纺丝等领域已实现产业化。

(5) PBST纤维

PBST纤维的主要类型: 聚对苯二甲酸丁二醇-共-丁二酸丁二醇酯(PBST)纤维是近年来新开发的一种脂肪族-芳香族共聚酯纤维, 其制备单体丁二酸、1,4-丁二醇可通过生物发酵的方式获得^[19], 具有原料来源可再生性, 且由于其良好的物理、力学性能和生物降解性能, 逐渐引起业界的重视。

PBST大分子链中存在“软”BS链段和“硬”BT链段, 具有很强的伸展、回弹性能。这是因为PBST具有与PBT类似的大分子结构, 分子链表现为平面锯齿形构象, 在外力作用下会发生可逆的晶型转变, 即由“T-G-T”构象的 α 晶型向“T-T-T”构象的 β 晶型转变^[20], 这一转变赋予其良好的拉伸、回弹性能。

8.2.2 / 生物基非生物可降解纤维

(1) PTT纤维

① PTT纤维的主要工艺路线: 聚对苯二甲酸丙二醇酯(Polytrimethylene Terephthalate, PTT)由对苯二甲酸(DMT)和1,3-丙二醇(PDO)经缩聚反应制得。目前, PDO的生产成本及工艺是影响PTT纤维生产供应情况的主要因素。

PDO的生产方法有环氧乙烷法、丙醛法、生物发酵法等多种方法。因生物发酵法具有原料可再生、生产成本低、绿色环保等优点, 正逐步取代化学法成为PDO的主要生产方法。生物发酵法又分为甘油发酵法和葡萄糖转化法。美国杜邦公司采用廉价的葡萄糖为底物, 采用基因工程菌为发酵微生物制备PDO, 原料易得、价格便宜且反应条件温和, 相关技术已经形成了专利技术; 国内包括清华大学在内的多家研究机构都在开展PDO的甘油发酵法研究及PDO的生物炼制工作, 但大多还处于实验室阶段, 仅清华大学等个别机构的相关技术形成了工业化装置, 但所产的PDO质量与杜邦公司相比, 仍有差距。

国内PDO市场供应主要由珠海裕华聚酯有限公司进口美国杜邦PDO并代工聚合生产PTT, 但PTT最终由杜邦公司销售。国内自主PDO的产能主要来自盛虹集团及华美生物, 基

于清华 PDO 制备技术的广东清大智兴生物技术有限公司目前已有 2 万吨 / 年的 PDO 生产示范线。

② PTT 纤维的发展现状及趋势: PTT 纤维性能明显优于 PET 和 PBT。在物理性能方面, PTT 纤维兼具 PET 的稳定性、尼龙的柔软性、腈纶的蓬松性能以及接近氨纶的弹性恢复能力, 并具有良好的保型性, 被称为“记忆纤维”; 在化学性能方面, 具有良好的抗紫外性能, 可以低温染色。

目前, 全球 PTT 纤维生产技术主要掌握在两家美国公司——壳牌 (Shell Chemical) 和杜邦 (DuPont) 手中。1995 年, 美国 Shell Chemical 公司以对苯二甲酸和 1, 3- 丙二醇为原料, 利用化学合成方法生产出高品质 PTT 纤维, 其商品名为 Corterra[®]。而杜邦公司是以兼具环保性的生化合成技术制造, 以玉米为原料, 采用生物酶发酵法获取生物质转化的 PDO, 更具有环境友好性。杜邦公司以生物质转化的 PDO 制备的生物基 PTT 纤维商品名为 Sorona[®], 应用于服装、地毯等方面。在国内, 方圆化纤公司使用杜邦技术生产商品名为“Somalor[®]”的 PTT 纤维, 并将其应用于服装、汽车、室内装饰及家居织物等领域; 上海石化、上海华源等多家企业也进行了 PTT 纤维的开发与生产, 并做了大量的市场推广工作。

自 2014 年我国具备原料 PDO 的生产技术以来, 我国 PTT 纤维行业领先企业有苏州苏震生物工程有限公司、苏州龙杰特种纤维股份有限公司、吴江佳力高纤有限公司、江苏国望高科纤维有限公司、盛虹集团下属中鲈科技发展股份有限公司、张家港美景荣化学工业有限公司、晓星化纤 (嘉兴) 有限公司、英威达纤维 (佛山、上海) 有限公司与上海石油化工股份有限公司, 据不完全统计, 2019 年我国 PTT 纤维行业产能达到 30.5 万吨, 见图 8-10。

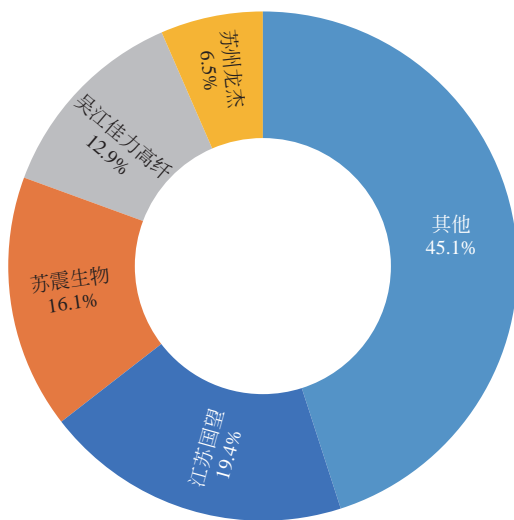


图 8-10 国内 PTT 纤维产能占比分布

2004 年, 南极人等品牌分别采用 PTT 纤维用于保暖内衣、普通内衣, 内衣的柔软、清爽、舒适和运动自如的效果得到极佳的体现。2019 年国内 PTT 纤维总产能达 12 万吨, 比 2015 年的 4.3 万吨增长 179.07%, 年均增长 29.25%。2019 年产量 5 万吨, 比 2015 年的 3t 增长 66.67%, 年均增长 13.62%。PTT 纤维国产化产品品质持续提升, 应用领域不断拓展, 已

形成品牌效应。

生物基 PTT 纤维是备受消费者青睐的高档服用纤维材料。同时，因原料中的 PDO 由废弃生物质微生物发酵制得，相比生产等质量的 PA6 纤维，生物基 PTT 纤维可减少 63% 碳排放，环保优势突出，是纺织化纤领域中低碳产品的代表，是我国纺织“十三五”推进产业绿色发展的重要组成部分。

(2) 聚酰胺 56

...

① 聚酰胺 56 的主要工艺路线：多年来，中国尼龙行业在国际竞争中一直处于劣势地位，尤其是生产聚酰胺 66 (PA66) 的关键原料己二胺（己二腈）技术由国外垄断，其中，英威达、巴斯夫等前五位的企业产能占全球的 80%，而我国没有生产己二腈的技术和能力。生物基聚酰胺 56 是由生物基 1, 5- 戊二胺和石油基 1, 6- 己二酸聚合制备而成的新型生物基聚酰胺，具有和 PA66 相当的热性能、力学性能及加工性能，有望在纺织行业替代传统的石油基 PA6 及 PA66。在国内生物基 1, 5- 戊二胺单体产业化技术已取得突破的基础上，利用我国石油基聚酰胺纤维大容量发展的工程技术优势，开发并建立生物基聚酰胺纤维高品质、连续化、规模化生产的工程技术体系和产品开发体系，对促进我国化纤行业的转型升级具有重要战略意义。

生物基 1, 5- 戊二胺可通过微生物发酵获得，也可通过全细胞法构建大肠杆菌系统直接将赖氨酸转换成戊二胺。*L*- 赖氨酸是戊二胺的直接前体，传统的赖氨酸生产菌种以谷氨酸棒状菌和大肠杆菌为出发菌，赖氨酸脱羧制备戊二胺，相比传统工艺，生物法制取二元胺的成本明显降低，生产效率大幅提高，生产生物基戊二胺过程所排放的温室气体大大减少，环境效益相当可观。我国秸秆拥有量居世界首位，每年产量约为 11.45 亿吨。发展和利用生物技术分解和转化天然纤维素原料，一方面可打破国外公司对尼龙用二元胺产品的市场垄断，另一方面可解决粮食库存过剩和纤维生产过度依赖化石资源的问题。国内生物基 1, 5- 戊二胺单体产业化技术已取得突破，并以此为基础，利用我国石油基聚酰胺纤维大容量发展的工程技术优势，开发并建立生物基聚酰胺纤维高品质、连续化、规模化生产的工程技术体系和产品开发体系，对促进我国化纤行业的转型升级具有重要战略意义。

② 聚酰胺 56 的发展现状及趋势：PA56 作为新一代尼龙产品，源于自然、回归自然，具有较高的生物基含量，性能优异，综合成本低。PA56 的玻璃化温度为 45~50℃，低于 PA66 (55~60℃) 与涤纶 (70~75℃)；柔软度接近羊绒，混纺产品手感更好、更柔软；熔点在 260℃ 左右，可以在 140℃ 以下长期使用。

此外，PA56 强度接近 PA66，高于涤纶，比棉花高 1~2 倍，比羊毛高 4~5 倍，是黏胶纤维的 3 倍；耐磨性比棉花、羊毛、黏胶纤维好；自身氧指数可达 29.9 以上，阻燃性能优异；当拉伸至 3%~6% 时，弹性恢复率可达 100%；标准回潮率大于 5%，优异的吸湿排汗率大大提升了穿着舒适度；分子链结构更疏松，染色温度比 PA66 低，得色更深，可用酸性、分散、活性及还原染料染色。

上海凯赛生物技术股份有限公司面向纺织领域推出了生物基聚酰胺材料品牌泰纶® (TERRYL®)，其原料部分来自可再生植物性原料。经 DIN 实验室等第三方权威机构检测，

其生物基含量高达 47%。基于生物基 PA56 的泰纶产品，其 CO₂ 排放量分别是聚酰胺 6、聚酰胺 66 的 44.2%、50.4%，有效降低碳排放，符合可持续发展的概念，并且泰纶® 的可追溯、可检测和完全可回收性，使其真正实现了闭环意义上的可持续发展。PA56 纤维具有高强耐磨、本体阻燃、吸湿快干、易染、高色牢度、轻量柔软等优点，能够满足不同类别服装的穿用需求。

生物基 PA56 纤维作为新型功能性纤维，是国内生物氨基酸产业与合成材料跨界创造的新材料，完成了从概念到产业化的技术挑战。目前，国内市场存在产品研发和产业化脱节的问题，上下游市场需求互动少，研发与产业化之间脱节，科研成果的产业化转化率较低。生物基聚酰胺的开发，瞄准终端消费，个性化定制开发，通过引导市场需求，消除过剩产能，同时，延伸产业链条，保持技术领先优势，开发高端产品。

8.3 医用纺织品纤维新材料

医用纺织品材料应用于从防护产品、伤口包扎敷料、绷带到一些高端医疗器械，如人工肾、组织工程支架和人工血管等。医用纺织品是医疗器械的重要组成部分，集结了材料、纤维、纺织、生物、医学及其他相关学科的多学科交叉，同时具有相对严苛的执行标准。随着现代医学进步，对医用纺织品的需求越来越多，世界各国都十分重视这一领域的技术发展。

医用纺织品采用的纤维包括棉花和纤维素及其衍生物纤维、胶原纤维、蚕丝、甲壳素及其衍生物纤维等，还有聚乙交酯（PGA）及其共聚物纤维、聚对二氧环己酮（PPDO）、聚己内酯（PCL）、聚酯（如 PET）、尼龙（PA）及其聚四氟乙烯（PTFE）和聚砜（PSU）等高分子材料，其应用见表 8-7。

表 8-7 医用纺织品的应用^[21]

应用	材料	纤维结构	形式
医疗护理用布等	棉 /PET	短纤维 / 长丝	机织布 / 针织布
隔离衣	PP/PET	短纤维 / 长丝	无纺布 / 机织布
压力织物 / 外科袜类	PA/PET/PU/ 棉	长丝 / 短纤维	针织物
口罩	PP	短纤维	熔喷无纺布
	PTFE	长丝	纳米膜
防护服	PP	短纤维	熔喷无纺布
	PTFE/PU	长丝	纳米膜
血管	Dacron T56（涤纶）/PU	复丝	纬 / 经编针织物
	PTFE		直 / 分叉机织 / 无纺布
腱 / 筋	Dacron T56/ Dacron T55	复丝	机织带
	Kevlar（纤维 B）		
疝修补片	PP	单丝	经编织物
食道	再生胶原	单丝	平纹针织物
补片	Dacron T56	单丝 / 复丝	机织 / 针织物
透析产品	聚砜 / 聚醚砜	中空纤维膜	中空纤维膜

续表

应用	材料	纤维结构	形式
缝合线	聚酯 / 金属 / PTFE/PGA/PGLA/PA/PPDO/ 再生胶原 / 蚕丝	单丝 / 复丝	编织物 / 机织带
韧带	聚酯 / PTFE/PE	单丝 / 复丝	编织带
骨骼和关节	含碳热固性或热塑性基质	单丝	机织带 / 针织 / 编织带
敷料	变性纤维素 / 海藻酸盐纤维 / 壳聚糖纤维 / 再生胶原纤维 / PU	长丝 / 短纤维	机织 / 针织 / 无纺布

由于医用纺织品存在标准与规定严苛、新产品开发周期很长的特殊性，“十三五”以来并没有新型医用纤维材料出现。主要还是在原有材料的基础上进行新工艺和新应用领域的开发和拓展，再就是新冠疫情促进了国内外口罩、防护服等防护产品的产能提升。

(1) 熔喷无纺布的现状与趋势

2020年因新冠肺炎疫情，我国熔喷无纺布市场井喷式增长，日加工量从200t提升到1000t以上，但并没有依托新技术的生产线建成。虽然拥有全球约80%的口罩产能，但在N95产品方面的技术并不成熟，高品质产品缺乏。随着疫情逐渐得以控制，市场开始重视聚丙烯原料的改性、高效过滤的驻极方式^[22]以及熔喷设备的改进。如燕山石化在成功生产降解法原料后，又应用氢调法技术生产出熔喷专用料；研究人员通过在等规聚丙烯粒料中添加有机物或无机物进行改性，以提高驻极电荷的稳定性以及熔喷布的过滤性；对低阻（81.6Pa）、高效（94.98%）且保持时间长的水驻极产业化展开探索；通过改良喷丝孔结构研制纳米熔喷纤维网^[23]，达到低阻高效的性能等。

(2) 过滤层的现状与趋势

各类微纳膜如PTFE膜、PU膜、PI膜开始替代熔喷布作为中间过滤层，应用于口罩、防护服。此类膜材满足低阻高效的过滤要求，并可进行有限次洗消，在疫情期间缓解了口罩、防护服短缺的局面。其中以中纺院和纳通医疗联合攻关、浙江格尔泰斯环保特材科技有限公司为代表生产的“PTFE膜微纳口罩”最具代表性。中纺院还联合北京邦维高科特种纺织品有限责任公司、中国人民解放军军事科学院防化研究院和中仪英斯泰克进出口有限公司研制了“三明治”结构的PTFE膜/PU膜复用防护服，并验证复用可行性以及配套洗消方案。

(3) 绷带及敷料类的现状与趋势

随着Lyocell纤维技术的逐渐成熟，开展了变性Lyocell纤维的研究，如英国Courtaulds公司开发了Hydrogel纤维，用于制作治疗慢性伤口的高端敷料，并且能更有效满足医用材料低金属和化学残留的要求。

(4) 可吸收纤维的现状与趋势

随着可降解涂层在人工血管上的成功使用，研究人员开始研究将可降解材料应用于人造血管的主要管壁结构；疝修补片引入PGA纤维研制半吸收补片，在未来将更能提高PGA/PP复合纤维补片的柔性及轻量化；“十三五”期间，中纺院联合浙江大学、振德医疗开发的真皮

替代物，引入可吸收纤维的经编支撑网，既提高了力学性能，又可以通过三维空间结构诱导组织生长。

(5) 骨修复的现状与趋势

人工韧带、缝合线等产品一直被国外企业如荷兰帝斯曼垄断，2021年锐健医疗通过多年攻关，突破了高强低蠕变线材技术。在高强聚乙烯纤维研究方面，干喷湿法纺丝技术相对于湿法纺丝技术更适合医用，中纺院联合相关医疗器械企业开展了高强聚乙烯纤维材料的应用探索。

8.4 差别化功能性纤维新材料

纺织材料在先进功能性纤维的支撑之下，正在改变着服装、家纺、产业用等产品的使用感受，也承担着人们对于纺织品能够同时拥有多种功能的现实需求。近年来，纺织材料在差别化、功能性方面获得了长足发展，建立起了产业链完整、品种齐全的功能性纤维产业体系，与国外发达国家和地区的差距明显缩小。行业在制备工艺优化、性能指标提升以及绿色环保生产等角度逐步加大研发力度，并不断拓宽其应用领域；同时，也在将功能性纺织品同智能穿戴相融合，不断推动行业革新和进步。

我国已转向高质量发展新阶段，人民群众对美好生活的需要持续释放，对纤维材料及纺织制品提出了更为丰富的应用需求。纤维与新型工艺的有效结合，可研发出多功能性产品。与此同时，发展功能性纤维产业也是解决我国化纤产品同质化、产能结构性过剩，实现行业高质量发展的重要发力点。

凭借小批量、多品种、快速响应市场等特点，差别化功能性纤维在鞋服面料、家居用品、医疗卫生、环境保护等重要领域均有应用。本节将重点介绍导电、抗菌、低熔点、阻燃、凉感、复合、光致变色等七类常见的功能性纤维。

(1) 导电纤维

导电纤维通常指在标准状况下（20℃，65%相对湿度）比电阻小于 $107\Omega\cdot\text{cm}$ 的纤维。目前，用于纺织品上的导电纤维主要包括金属导电纤维、碳系导电纤维和有机导电纤维三类。导电纤维广泛应用于西服、防静电工作服、职业工装及屏蔽材料（油田、石油加工、加油站、煤矿、电子工业、感光材料工业以及其他易燃易爆的场合）、无尘无菌服或特种过滤材料、可穿戴电子产品等。目前，如何使天然纤维也具有导电性、如何保持导电纤维的导电耐久性以及如何使得包覆或镀覆表层与基体的结合牢度提升等是未来的研究重点。

(2) 抗菌纤维

抗菌纤维分为天然抗菌纤维和人工抗菌纤维，天然抗菌纤维有汉麻、竹、壳聚糖等；人工抗菌纤维是将具有耐热性的无机抗菌剂混入纺丝过程而制成的纤维，具有抗菌、抑菌功能，可防感染和传染，且具有良好的耐洗性，常见的抗菌材料有抗生素、壳聚糖、二氧化钛、纳米氧化锌、银、铜等。2020年新冠肺炎疫情全球爆发，让人们对于健康生活、健康防护、疾

病预防等愈发关注。抗菌纤维可以广泛应用于家纺产品、内衣、运动服等，尤其是老年、孕产妇、婴幼儿服装以及医用纺织品等领域。目前对于科技感与时尚感并存的多功能绿色抗菌产品的需求加大，急需新产品开发以满足市场需求。

(3) 低熔点纤维

低熔点纤维是一种比常规纤维具有更低熔点的纤维，可在更低温度下熔融，无化学粘接剂且具有较强的粘接性能，并具备良好的尺寸稳定性和可加工性，使织物更加挺括丰满，保持优良的抗拉强度和抗撕裂性能，可替代传统纤维或产业用黏结剂、尿酸胶及聚氨酯发泡材料，从而减少污染。浙江恒澜科技有限公司提出一种共聚改性低熔点尼龙纤维的熔融直纺方法，通过加入共聚改性组分破坏尼龙分子链规整性，降低结晶度和氢键密度，以降低熔点。中国纺织科学研究院有限公司开发出一种连续聚合熔体直纺低熔点聚酯复合纤维制备方法，将聚酯低聚物与聚醚均匀后共聚制备，应用前景广阔，市场需求量与日俱增，可应用于服用、黏合衬、床上保暖用品、汽车内饰等。目前，低熔点纤维凭其优异的粘接性能和安全无毒无污染的优点应用前景广阔，但与国外同类型产品仍存在一定差距，高端低熔点纤维上存在较大缺口^[24]。

(4) 阻燃纤维

阻燃纤维主要由提高成纤高聚物的热稳定性和纤维改性两种方式制成。其与普通纤维相比具有阴燃、离火自熄、隔热、低烟、无毒等特性，应用性能、安全性能和附加值大大提高。不同纤维的阻燃添加剂种类及阻燃效果不同，近年来黏胶纤维、涤纶、锦纶、维纶、丙纶、腈纶等纤维的阻燃改性技术均取得一定的进展，阻燃效果逐步提升，并广泛应用于民用、工业以及军事等领域。目前，阻燃整理后织物的耐久性、染色效果、强度、手感等性能有不同程度降低，且阻燃单体合成费用较高，以及阻燃纤维复配技术等还有待进一步研究改善；此外，开发无卤、高效、低烟、低毒的新型阻燃体系，实现绿色阻燃和提高阻燃纺织品综合性能，是今后此类产品的主要发展方向。

(5) 凉感纤维

凉感纤维具有超高的热导率，能够快速将人体皮肤的热量扩散到环境中，从而带来冰凉舒适的触感。除聚乙烯纤维自具备凉感功能外，其他主要有凉感聚酯纤维和凉感锦纶纤维，一般是在纺丝过程中加入凉感矿物质因子如云母、贝壳粉等高热导率的矿物质颗粒以实现凉感功能^[25]，或者对面料组织结构进行设计、后整理加工等，使面料具有迅速散热、排汗和降温的作用，可应用于夏季纺织品、运动服装面料、居家用品等。目前，凉感颗粒的添加会对纤维的力学性能以及织造性能产生一定影响，且添加量有限，接触凉感效应也受到一定限制，需进一步进行研究。

(6) 复合纤维

复合纤维即在同一根纤维截面上存在两种或两种以上不相混合的聚合物，根据横截面和纵向排布情况，可分为皮芯型、并列型、海岛型和裂片型等。因复合纤维的研究开发始于20世纪60年代，制备技术较为成熟，开发品类众多，且不同类型特性不同，适合无纺、针织、机织纺织品，广泛应用于商标布、运动衣、运动袜、内衣等。复合纤维因种类繁多，随着市

场需求带来的技术革新仍在不断扩大其应用领域，并不断提升性能要求。

(7) 光致变色纤维

光致变色纤维是指在特定光照条件下，因纤维结构变化引起的纤维表面颜色改变，而当光照条件移除后可再次恢复。其制备工艺包括变色试剂与纤维材料无化学键连接的物理方法和化学键连接的化学方法，变色试剂主要有无机类过渡金属氧化物、金属卤化物和有机类的螺吡喃类、俘精酸酐类等。该纤维不仅可应用于部队伪装用纺织品、滑雪衣或测定空气中的湿度等，还可应用于民用变色织物面料。目前，光致变色纤维的重复使用率较低，需要加强绿色化学改性技术的研究开发。

(8) 其他功能性纤维

微孔纤维是中国纺织科学研究院有限公司研发成功的具有自主知识产权的改性聚酯纤维，独特的多微孔结构使其具有超越普通聚酯纤维和天然纤维的卓越性能，吸湿快干功能较好。触感柔软自然，光泽柔和，挺括性好且永久耐洗，应用于运动服装面料等。

通过独特的化学改性技术，开发成功了亲水性聚酯纤维（又称新型吸湿快干纤维）。该纤维具有“超仿棉”特性，综合性能优越。

8.5 / 存在问题及发展建议

“十四五”时期，随着新一轮科技革命的深入发展，材料科技占据前沿位置，以高性能、多功能、轻量化、柔性化为特征的纤维新材料成为世界纺织强国竞相争夺的产业战略制高点，同样也是我国纺织行业重点发展的关键材料，其发展水平关系到国民经济、社会发展甚至是国家安全。

我国在高性能纤维、功能纤维、生物基纤维等领域经过多年积累，已经形成了品种齐全的国产化布局，在低成本、规模化方面具有一定的竞争优势，但是在部分关键原材料、关键技术及装备等方面却仍存在差距。

8.5.1 / 我国纺织新材料发展面临的问题

第一，纺织新材料发展整体规划性不强。在国家高度关注以及高科技领域投资冲动等多重因素刺激下，目前仍存在新上的生产项目低水平重复、技术水平参差不齐等情况，不仅造成了大量国家和社会资源占用与浪费，也严重不利于行业竞争力和可持续产业生态的形成。

第二，健全的产业体系和健康的产业生态尚未建立。目前，我国纺织材料的产业体系有待完善，高端产品的部分重要原材料尚不能完全满足需求，导致生产成本居高不下，产品市场竞争力不足。此外，新型纺织和纤维材料生产所需的关键装置和配件的制备技术有待提高，生产装备的整体水平尚不能达到发达国家水平，对先进纺织材料行业的支撑保障作用有待进一步提升。

第三，行业标准评价体系尚不完整。纺织材料所涉及的纤维材料品种类型繁多，性能差异巨大，并且多数纤维材料对于化纤产业来说是新生事物，处于起步或发展阶段，自主的标

准化认证体系尚不完善，也尚未建立起完善的生产和产品标准。根据材料的服役环境和结构特点对纺织材料进行设计—评价—验证的工作流程与能力有待提高。

第四，基础研究投入不足，部分关键科学问题尚未探明。与世界纺织强国相比，我国纺织新材料在前沿产品创新开发上缺乏后劲。目前的纺织新材料研发，往往以市场导向或下游用户的需求为依托开展工作，这将导致相关材料学科的基础研究落后于材料的研制与应用。在面临新的材料品种需求和应用要求时不能得到有力的理论支撑，从而导致自主创新发展后劲不足，难以适应未来技术发展需求。

8.5.2 / 我国纺织新材料发展建议

在纺织行业“十四五”五大重点发展工程中，纤维新材料位列首位。要求纤维新材料领域以服务高质量发展和保障产业链安全为目标，依托优势企业，充分发挥专业院校和科研机构作用，加快突破和掌握一批关键核心技术，主导差别化、多功能纤维材料的研发创新，进入国际上高性能纤维研发和生产的第一梯队，引领生物基化学纤维产业化进程。

面向“十四五”，纤维新材料创新水平需要继续提升，高性能纤维自给率达到60%以上；生物可降解材料和绿色纤维产量年均增长10%以上，循环再利用纤维年加工量占纤维加工总量的比重达15%。针对目前纺织新材料领域面临的问题，为实现发展目标，应着力做到以下几个方面：

(1) 做好顶层设计，加强纺织新材料发展的总体规划

行业应建立起有效的协调工作机制，规划先行，做好顶层设计和统筹规划，加强对于纺织新材料产业发展的宏观指导与引导，为行业重点领域、重大工程提供产业政策、整体规划等咨询建议，集中优势资源推动技术创新及产业化应用。

(2) 形成合力，构建纺织新材料完整创新体系

应着力整合行业高端科技资源，强化国家纺织新材料创新运行机制。构建以企业为主体、市场为导向、产学研用深度融合的创新体系。发挥国家级科研院所、高校重点实验室、国家级企业技术中心、产业创新联盟等优质平台的作用，重点突破高性能纤维、生物基纤维、功能性纤维的基础理论和共性关键技术。加快科技成果转化应用水平，保障纺织新材料领域科技创新能力的整体提升。同时，加强行业上下游企业间的合作，建立产业链合作示范工程，完善从纤维到制品以及标准的完整创新体系。

(3) 完善纺织新材料标准及评价体系

尽快建立支撑新材料产业高质量发展的标准体系，加大先进基础材料、关键战略材料及前沿新材料标准的有效供给，充分发挥标准化对新材料产业发展和质量变革的引领作用。完善新材料测试、表征、评价体系，建立国家新材料测试评价平台，构建新材料测试评价体系，解决新材料测试评价的瓶颈和短板。大力培育发展自主认证、检测品牌，提升国际竞争力。

(4) 形成纺织新材料产业可持续的人才供给模式

加大纺织新材料人才的培养力度，形成可持续的人才供给模式。统筹和引导全国纺织服装等院校建设，优化课程设置及实操训练，强化复合型、创新型、实用型人才的培养与输出，

同时重视高等职业技术教育及中等职业技术教育,培养多层次纺织科技专业人才。积极吸引国外新材料创新人才。不断完善我国纺织新材料人才的评价机制,克服唯论文、唯职称、唯学历、唯奖项倾向,注重标志性成果的质量、贡献、影响。建议通过相关激励方式,让科技人员在成果转化中更好地体现自身价值。

参考文献

- [1] 罗益锋. 主要高性能纤维及其复合材料的创新发展与研发方向[J]. 高科技纤维与应用, 2020, 45(06): 1-16.
- [2] 万雷, 吴文静, 吕佳滨, 等. 我国对位芳纶产业链发展现状及展望[J]. 高科技纤维与应用, 2019, 44(03): 21-26.
- [3] 赵国樑. 超高分子量聚乙烯纤维制备与应用技术进展[J]. 北京服装学院学报(自然科学版), 2019, 39(02): 95-102.
- [4] QYResearch Group. Global Core Materials for Composites Market Research Report 2019[OL]. 2019.
- [5] 张寒. 全球及中国芳纶产业发展现状及前景分析.[OL]. 华经情报网, 2021-06-22.
- [6] 钱鑫. 美国研发出耐超高温度的碳纤维/SiC复合纤维[OL]. 碳纤维及其复合材料技术, 2021-07-26.
- [7] Clauss M M, Keller A, Fauth G, 等. 在减压和特定气氛中稳定碳纤维前驱体的新概念[J]. 国际纺织导报, 2020, 48(08): 22-23.
- [8] Bishop G, Styles D, Lens P. Environmental performance comparison of bioplastics and petrochemical plastics: A review of life cycle assessment(LCA) methodological decisions[J]. Resources Conservation and Recycling, 2021, 168(18): 105451
- [9] 赵庆章. Lyocell纤维生产工艺及原理[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2020.
- [10] Zhang Q, Liu X, Ren Y, et al. Fabrication of a high phosphorus-nitrogen content modifier with star structure for effectively enhancing flame retardancy of lyocell fibers[J]. Cellulose, 2020, 27(1999).
- [11] 王乐军, 刘怡宁, 房迪, 等. Lyocell纤维的国内外研发现状与发展方向[J]. 纺织学报, 2017, 38(4): 164-166.
- [12] 赵家森, 王渊龙, 程博闻. 绿色纤维素纤维——Lyocell纤维[J]. 纺织学报, 2005, 10(5): 124-125.
- [13] 靳高岭. 国内外新溶剂法再生纤维素纤维的发展现状与前景[J]. 纺织导报, 2016, 10(3): 96-98.
- [14] 董奎勇, 杨萍. Lyocell纤维发展概况及趋势[J]. 中国纤检, 2004, 11(3): 40-42.
- [15] Gupta B, Revagade N, Hilborn J. Poly(lactic acid) fiber: An overview [J]. Progress in Polymer Science, 2007, 32(4): 455-482.
- [16] Ikada Y, Jamshidi K, Tsuji H, et al. Stereocomplex formation between enantiomeric poly(lactides) [J]. Macromolecules, 1987, 20(4): 904-906.
- [17] Tarkhanov E, Lehmann A, Menrath A. Halfway to Technical Stereocomplex PLA Products—An Arduous Path to a Breakthrough [J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2020, 305(12): 2000417.
- [18] Byrom D. Polymer synthesis by microorganisms: technology and economics [J]. Trends in Biotechnology, 1987, 5(9): 246-250.
- [19] Stieglitz B, Weimer P J. Novel microbial screen for detection of 1, 4-butanediol, ethylene glycol, and adipic acid [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1985, 49(3): 593-598.
- [20] Yokouchi M, Sakakibara Y, Chatani Y, et al. Structures of Two Crystalline Forms of Poly(butylene terephthalate) and Reversible Transition between Them by Mechanical Deformation [J]. Macromolecules, 1976, 9(2): 266-273.
- [21] 巴迪. D. 拉特纳, 等. 生物材料科学: 医用材料导论[M]. 顾忠伟, 刘伟, 等译. 北京: 科学出版社, 2011.
- [22] Im K B, Hong Y. Development of a melt-blown nonwoven filter for medical mask by hydro charging[J]. Textile Science and Engineering, 2014, 51(4): 186-192.
- [23] Deng N, He H, Yan J, et al. One-step melt-blowing of multi-scale micro/nano fabric membrane for advanced air-filtration[J]. Polymer, 2019, 165: 174-179.
- [24] 徐朝晨, 吉鹏, 王朝生, 等. 国内外低熔点纤维的发展现状及趋势[J]. 合成纤维工业, 2020, 43(06): 54-58.
- [25] 谢婷, 钱娟, 张佩华. 凉感聚乙烯长丝的性能研究[J]. 国际纺织导报, 2021, 49(04): 1-4, 18.



黄庆，博士，研究员，长期从事合成纤维专业技术研究，在熔融纺丝技术，尤其是在产业、环保和医疗等领域应用的特种纤维制造技术开发等方面进行多年研究。先后主持和承担多项国家级、省部级及大型企业委托科研项目，以及多项纤维工程技术服务项目。近年来承担的科研项目中获国家科技进步二等奖 2 项，纺织工业协会一等奖 2 项，中国优秀专利奖 1 项，北京市科技进步二等奖 1 项，天津市科技进步三等奖 1 项，发表论文 8 篇，获得授权发明专利 13 项，2013 年获全国纺织科技创新领军人才、中国纺织学术带头人称号，2008 年入选国家人事部等 10 部委新世纪千百万人才，2000 年获国务院颁发的政府特殊津贴。

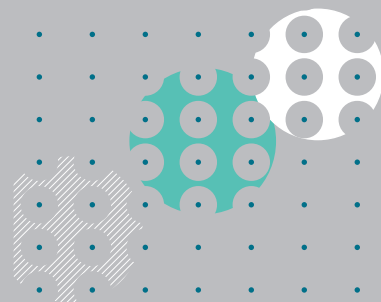
崔宁，正高级工程师，一直从事高技术纤维开发以及产业用纺织品研究。先后参与高模低缩 HMLS 涤纶工业丝技术开发、涤锦复合超细纤维长丝开发、复合型导电纤维技术开发，聚苯硫醚纤维的产品与技术开发，以及短纤维产品的国产化等技术工作。作为课题负责人，完成“十二五”科技支撑项目“细旦聚苯硫醚纤维耐高温过滤材料产业化技术开发”以及工信部“高温袋式除尘技术开发与应用公共服务平台”等课题任务；作为技术负责人，完成四川得阳科技股份有限公司 4000t/a PPS 短纤维+1000t/a PPS 长丝生产线的设计和建设项目。2008—2010 年获部级一等奖二项、国家科技进步二等奖两项。

王菲，《纺织科学研究》杂志总编辑。曾荣获 2018 “全国纺织行业新闻奖”十佳记者奖，《纺织科学研究》杂志及官方微信公众号作品多次荣获“全国纺织行业新闻奖”十佳作品奖、优秀作品奖、抗击疫情新闻作品特别奖等荣誉。参与《2019—2020 年度 Lyocell 纤维产业竞争分析报告》编制工作；组织策划并参与撰写《纺织科技飞跃的 70 个瞬间》，回顾纺织行业的重要科技历程，见证行业伴随新中国成长之路；2020 年策划并参与撰写“抗击新冠肺炎疫情”系列报道——《同心战疫》《迎战抗疫大考》《为全球抗疫贡献中国力量》等，获得了业内关注和好评。

黄伟，工程师。参与或完成了新溶剂法纤维素纤维相关的科技部“863”“973”计划项目、科技部“十二五”国家科技支撑计划项目、科技部科研院所专项资金项目、中国纺织工业联合会科技指导性项目、国家“十三五”重点研发计划项目等，已申请发明专利 2 项，发表国内外研究论文 7 篇，参编著作 1 部。主要研究成果包括参与国产 Lyocell 纤维的产业化及其应用开发工作，作为主要人员参与“Lyocell 纤维长丝制备及产业化技术开发”项目，作为项目负责人，承担高原纤化 Lyocell 纤维制备及产业化技术开发项目等。所在团队获得“纺织之光”2018 年度中国纺织工业联合会科学技术奖一等奖、第三届中央企业熠星创新创业大赛二等奖、第六届中国十大纺织科技奖、中央企业“青年文明号”。



2021



第三篇

工业关键核心领域 新材料技术及应用

第 9 章 面向物联网的关键传感材料与器件

第 10 章 过滤分离关键膜材料

第 11 章 海洋新材料

第 12 章 核电机组关键部件及材料

第 9 章

面向物联网的关键 传感材料与器件

宋志棠 周夕淋 陈小刚

9.1 物联网技术概述

物联网的概念始于 1999 年，在传统计算机互联网的基础上，利用信息传感设备按约定的协议，把物品与互联网连接起来，进行信息交换和通信，以实现智能化识别、定位、跟踪、监控和管理，构造一个覆盖世界上万事万物的互联网，进而在互联网的基础上专为供应链企业提供各种信息服务。物联网是具有全面感知、可靠传送、智能处理三大特征的连接物理世界的网络，是继计算机、互联网与移动通信网之后的又一次信息产业技术变革。

2005 年 11 月，国际电信联盟发布了《ITU 互联网报告 2005：物联网》报告，对物联网的概念进行了扩展，提出了任何时刻、任何地点、任意物体之间互联，无所不在的网络和无所不在的计算的发展远景^[1]。2009 年，IBM 提出“智慧地球”构想，通过利用新一代信息技术来改变政府、企业和民众相互交互的方式，以便提高交互的明确性、效率、灵活性和响应速度。“智慧地球”把新一代信息技术充分运用在生活的各种场景中，即把传感器嵌入和装备到世界各地的电网、路网、交通工具、建筑物、油气管道等各种物体中，并被普遍连接形成物联网，而后通过超级计算机和云计算将物联网整合起来，从而达到全球“智慧”状态。目前世界上主要经济体都把物联网产业列为经济振兴战略之一，并推出了相应的物联网产业发展规划和政策，如美国的“智慧地球”计划，欧盟的“物联网行动计划”，韩国的“Smart Korea”计划以及日本的“e-Japan”计划等。

传感器是物联网的“五官”，是感知层的关键技术单元，在发展 5G 通信、人工智能、大数据、云计算、物联网、先进机器人、无人驾驶、智能制造、智慧交通、智慧医疗以及促进经济高质量跃迁和建设未来智能社会中担当着重要角色。传感器技术和产品向感、知、联功

能一体化的智能系统方向发展，在未来几年将有更多的新材料、新技术、新器件工艺、新软件应用于激光雷达传感器、飞行时间传感器、组合惯性传感器、温湿度传感器、可穿戴传感器，以及用于航空航天、深空深海探测等领域的关键传感模块^[2]。

9.2 传感材料与器件技术

传感材料是指对声、光、电、磁、热等信号的微小变化反映出高灵敏应答的功能材料，以及制造传感器所需的结构材料，主要包括半导体、金属、复合材料等。传感器则是指具有信息采集功能的基础性功能器件，主要包括生物、化学、光电、红外、磁学、力学等传感器。本部分将基于近年来新型传感器方向的最新研究成果^[3-8]，介绍几种主要传感材料与器件的发展现状及其在物联网相关领域中的应用。

9.2.1 生物传感材料与器件

生物传感器是用生物活性材料（如酶、蛋白质、DNA、抗体、抗原、核酸、生物膜等）与物理化学换能器（如氧电极、光敏管、场效应管、压电晶体等）有机结合构成的系统，在临床诊断、化学分析、食品安全、环境保护传感网等领域中都具有广泛的应用前景。其构成主要包括两部分：生物敏感膜和换能器。生物敏感膜即分子识别元件，是生物传感器的关键元件，直接决定了生物传感器的功能与质量。生物敏感膜可以是酶、核酸、免疫物质、全细胞、组织、细胞器或它们的不同组合。而换能器的作用则是将各种生物的、化学的或物理的信息转变成电信号。为制备出性能优良的生物传感器，在器件的设计与制备中需要考虑多种影响因素，包括目标物的特异性、器件的稳定性、灵敏度和响应速度、信号检测的实时性以及器件的生物兼容性和可集成性等。

在生物传感材料方面，将纳米材料引入到器件结构中用于开发新型生物传感技术的方式备受青睐。纳米材料在尺寸上与大多数生物实体（如蛋白、核酸、细胞、病毒）相当，使其成为生物分子与测量平台之间理想的界面连接媒介；此外，纳米材料大多具有很高的表体比，这使得材料的理化和电学特性与表层原子所处环境密切相关，材料表面轻微的电荷扰动都会引起其内部载流子的耗尽或积累，进而引起材料电学性能的大幅度变化，从而成为高灵敏生物传感应用的理想材料。在纳米尺寸生物传感器的设计与制备中，需要考虑如超高灵敏度、特异性、高速样品输送以及价格成本等因素。在已有研究中，大量的场效应管型生物传感器被用于生物传感中。根据传感器采用的受体类型和信号产生的机理大致可以分为三类：酶修饰型场效应管、细胞型场效应管以及免疫或核酸修饰型场效应管。在过去的数10年中，各式各样的半导体材料，如硅纳米线（SiNW）、碳纳米管、石墨烯以及金属氧化物纳米线（如 $\text{In}_2\text{O}_3\text{-NW}$ 和 ZnO-NW ）等，都被用于开发新型场效应管结构的纳米生物传感器。由于成熟的硅加工工艺，硅纳米线已被用于包括离子、小分子、核酸、蛋白质、单细胞甚至细胞组织在内的各种各样的生物传感检测中。硅纳米线场效应管的器件结构大体可分为三大类：背栅结构（Back-gate）、正栅结构（Front-gate）以及双侧栅结构（Double-side-gate）。在硅纳米线场

效应管工作过程中，栅极用于调制沟道区域的载流子浓度，在背栅结构中，电压被加载在沟道区域的正下方；而在正栅结构中，则是在反应的电解质溶液中引入参考电极；在双侧栅结构中会引入分别起到主驱动和辅助驱动作用的栅极，两栅极分别位于硅纳米线的两侧。相比常见的背栅结构，双侧栅结构能够更加精准地控制沟道电势，使器件能有效工作在源、漏电流最灵敏的亚阈值区，提高器件的亚阈值摆幅，增强器件响应灵敏度。硅纳米线作为典型的用于生化检测的一维传感材料在环境离子、核酸杂交、蛋白免疫、病毒、生物电信号检测等方面已有了广泛的应用。

在离子选择性传感器中，硅纳米线表面有自然存在的硅羟基（Si—OH）基团，通过3-氨基丙基三乙氧基硅烷（3-Aminopropyltriethoxysilane, APTES）的硅烷化作用，在硅纳米线的表面产生氨基基团，使硅纳米线表面氨基化，氨基作为氢原子的受体，经过质子化/去质子化反应来改变硅纳米线表面的净电荷，调节硅纳米线的表面电势，改变其电导。

在生物电信号检测方面，通过结合纳米技术与生物界面电子学可以实现对胞内生化反应的探测与操纵。相比较而言，硅纳米线的直径远小于细胞尺寸，这使得硅纳米线在生物电信号探测上存在很大的时间与空间分辨率，能实现并行检测。

9.2.2 / 化学传感材料与器件

随着社会发展，人类对于化学工业和能源工业的安全生产需求越来越高，而由此引发的化学品安全问题和环境污染问题日益引起人们关注。无论是化工生产过程中的检测、存储运输中的监控、事故的预警和灾害程度评估，还是个人的安全防护，都对环境检测系统提出了更高的要求。从复杂环境中快速、可靠地获取关键信息的高性能化学气体传感器，无疑在科学研究和工业应用上具有广阔前景。化学传感器就是由化学敏感材料和物理转换器结合而成的探测器。化学敏感材料类似于化学分析中的指示剂，与目标分析物之间的化学作用导致敏感材料的性质变化，通过对应的可识别读取此变化的物理转换器转变为可测量的信号。敏感材料与分析物的作用类似对信号的调制与编译，依据其化学作用所对应的分析化学原理去解析获取的信息，从而识别出传感器探测的内容。

根据信号的转化方式，化学传感器主要分为电化学型传感器、质量传感器、光化学传感器、热化学传感器等。化学传感器的信号产生，更侧重于分子层面的特征识别功能，这对于生命科学、材料科学、化学科学具有很高的理论要求，同时对于环境科学、公共安全领域有着极高的实用价值。化学传感器的实用化：一是依赖于化学敏感材料的开发，能对特定的分析物具有专一的选择性和高灵敏度；二是需要更合适的信号生成与转换体系，可以实现高度集成化、小型化。其中荧光化学传感器以高效、灵敏、准确的特点，在公共安全、环境监测、生物医学研究等重要领域都有出色的表现且仍有巨大的发展前景。传感材料的研究对其发展起着决定性的作用，以目前的实际情况来看，新型荧光传感材料的研究和发展仍有广阔的探索空间，尤其是针对专一的气态被分析物的研究。

荧光化学传感器是基于荧光分析法的化学传感器。它采用高吸光能力和高量子效率的材料为荧光传感材料，其灵敏度甚至可以达到单个分子水平。荧光化学传感器最简化的部件包括激发光源、荧光传感材料以及荧光接收的光电转换器。荧光传感技术，就是利用目标检测

物与敏感材料之间的物理 / 化学作用改变敏感材料的能态从而改变其荧光发射特性。这种对应关系相当于分析物的特征性作用，是对“光信号”的编译，相应的信号识别则是通过对光谱信号的解析，达到定性或定量检测被分析物的目的。荧光分析法可检测的参数包括衰减时间、能量转移、偏振、光猝灭效率和光强等。荧光传感材料从分子器件的角度，可以同时具有被分析物识别功能和信号发生功能，即同时包含分子识别基团和荧光发射基团。对于传感器性能评价的重要指标灵敏度和选择性而言，荧光化学传感器的灵敏度取决于一定浓度的被分析物存在时敏感材料的荧光光谱的变化幅度，而选择性则源于目标分析物与敏感材料之间作用的特异性。

对于荧光传感机制的研究和敏感材料的开发，主要围绕荧光基团与分子识别单元的选择与优化展开。前者要求高的荧光量子效率、高的光稳定性、理想的激发 / 发射波长；后者要求准确的识别模式、理想的信号获取与放大模式。共轭芳基化合物通常具有高的量子效率，同时作为电子给体，有利于直接和被分析物发生电子转移，或者与识别官能团进行分子内电荷转移，因此芴类、茈类、茈类、葱、联萘等共轭芳烃，常用作传感材料的发光团。而与和分析物作用的基团多为杂环基团，如冠醚、卟啉、噻吩、苯并噻二唑、硼酸 / 氟硼酸等单元。通过与被分析物的给受电子作用、络合作用等产生分子能态变化从而改变荧光信号。

气相检测荧光传感材料由于检测目标是气体分子，因此基本是以薄膜态进行使用。固相荧光传感材料和气相被测物之间，在低浓度痕量检测时一般难以发生有效的化学反应，其传感主要依靠静电相互作用，如 π - π 堆叠、氢键、偶极 - 偶极作用等，以被测物和传感材料间的能级匹配的 PET 机理或是改变分子内电荷转移状态实现。这些对高效气相检测荧光传感材料的设计来说仍是巨大的挑战。

在针对爆炸物蒸气检测的荧光材料方面，对于爆炸物的检测尤其是硝基爆炸物的挥发物检测一直是荧光传感技术的热点。硝基爆炸物（如 TNT、DNT 和 PA）的缺电子特性使得它能和富电子的荧光生色团形成 π - π 作用发生 PET 诱导荧光猝灭，是一个典型的猝灭剂。荧光共轭聚合物传感材料（AFP）放大荧光聚合物对硝基爆炸物的检测实现了极高的灵敏度，已经在军事和安防领域获得规模化应用。气相检测为了降低传感材料的背景光干扰、增加传感材料与检测物的接触概率，通常将 AFP 制成敏感荧光薄膜使用，因此被分析物和敏感薄膜的结合强度以及挥发的目标分子在薄膜里的渗透能力等参数对传感性能的影响很大。

在针对其他气体的传感材料方面，挥发性有机物是室内环境污染的最主要部分，按其化学结构的不同，可以进一步分为八类：烷类、芳烃类、烯类、卤烃类、酯类、醛类、酮类和其他。针对挥发性有机物的荧光传感检测的研究，利用金属配合物等荧光材料的气致荧光变色现象是当前热点。当气体分子渗透插入金属有机物的晶格，通过改变分子堆叠形式，与配体发生 π - π 作用进而改变金属配体能量转移状态（MLCT/LMCT），切断金属 - 金属键，改变金属配位价态，甚至是发生化学反应等途径，影响金属有机物的能级，从而导致荧光光谱变化。

在气相传感的效率问题上，敏感薄膜的厚度、均匀性影响到气体通透性，即气相被检测物的接触效率。因此，在设计气相检测荧光传感材料的分子结构时，还要考虑其薄膜的形态问题。通过对材料的骨架或侧链进行修饰，实现对材料聚集态的调控（如自组装），这对于

薄膜器件性能来说非常关键。在能与胺类气体发生 PET 机理猝灭的茈二酰亚胺衍生物中, 通过茈二酰亚胺分子间的强 π - π 相互作用, 在不良溶剂中自组装形成直径约 350nm 的纤维薄膜, 由于纳米纤维薄膜良好的气体通透性, 对苯胺气体的荧光快速响应达毫秒级, 灵敏度在 200×10^{-12} 级别。若将类似的茈二酰亚胺桥连环糊精作为针对苯胺的捕获基团, 利用薄膜中茈 π - π 聚集自组装形成类似于共轭聚合物的二维激子扩散信号放大效应, 对苯胺的检测灵敏度则为 80×10^{-9} 。利用带氟硼 β 二酮的三苯胺衍生物做成有机荧光纳米纤维薄膜, 对胺类气体响应时间在 1s 左右, 检测限为 100×10^{-9} , 与非纳米薄膜相比, 响应时间更短、灵敏度更高, 这一传感增强效果归因于纳米纤维薄膜的通透性。

除了利用分子本身的自组装性质形成纳米结构外, 研究者更多地借助其他领域的纳米结构与荧光传感材料相结合, 获得具有纳米表面性质的传感器件。纳米材料通过增加传感器活性表面的表面积, 产生更多的接触位点, 提高传感器的灵敏度和响应速度。相应的纳米结构的制备方法很多, 如模板法和静电纺丝法等。模板法制备过程为: 利用径向有序的纳米多孔氧化铝模板, 模板孔中灌入有机材料溶液, 溶剂挥发固化后除去无机模板即可得到有机材料的纳米阵列。静电纺丝法制备的惰性纳米纤维作为传感材料的载体, 或是将惰性材料与传感材料以壳层结构获得复合纳米电纺丝。若以聚苯乙烯为惰性支撑材料, 卟啉衍生物作为包覆传感材料, 通过静电纺丝制得纳米复合纤维薄膜, 对硝基爆炸物的检测限达 10^{-12} 量级。

纳米材料 / 纳米复合结构, 如纳米线、多孔性纳米薄膜, 有着更大的接触面积和更优良的光物理特性, 由此带来了更高的灵敏度和更短的响应时间。随着纳米技术的不断发展, 新材料、新方法的研究, 纳米 / 复合荧光传感材料会有更好的发展前景。

9.2.3 / 声表面波传感材料与器件

目前的气体传感器主要有半导体传感器、接触燃烧式传感器、电化学传感器, 此外还有红外传感器、石英微天平传感器、热传导型传感器、声表面波传感器、光纤传感器、气相色谱法来检测气体传感器等。其中气相色谱仪根据不同组分有不同性能的色谱柱的原理, 将各组分分离, 导入检测器来获得各组分的检测信号, 根据峰的面积或高度来计算各组分含量。总体来说, 该方法检测性能强, 但是仪器昂贵复杂, 便携性差, 实时检测能力差, 成本高。电化学传感器是利用气体在电极上氧化还原时电流的不同来检测气体的, 通过测量电流的改变来确定气体的浓度。电化学传感器优点之一是线性输出, 且校正简单, 但是它工作时需要电解液, 因此寿命较短。半导体传感器是利用半导体敏感膜吸附气体后电学性质的改变检测气体的浓度的, 有电阻型的和非电阻型的。半导体传感器是目前最常用的气体传感器。非电阻型的半导体传感器利用与气体吸附反应所引起的功函数的变化来检测气体, 而电阻型的半导体传感器利用与气体吸附反应所引起的电阻 (电导) 变化来检测气体。电阻型半导体传感器又可以分为表面控制型与体控制型。其中表面控制型的电阻型半导体传感器包括常用的 SnO_2 、 ZnO 系列传感器以及其他金属氧化物 (TiO_2 、 WO_3 、 NiO 、 Cr_2O_3 等) 材料的传感器等; 体控制型的半导体传感器包括 Fe_2O_3 、 ABO_3 型传感器及燃烧控制型传感器。它们都是通过与气体吸附反应后载流子的数量发生变化来达到检测气体的目的。另外, 半导体传感器的缺点在于它们都需要工作在加热的状态下 ($>200^\circ\text{C}$)。这就会导致半导体敏感膜内部的晶粒不断

生长,使传感器的性能变坏,线性度下降,稳定性变差,还会使其寿命缩短。此外,由于需要加热,不但会增加制造工艺的复杂性,还会使整个传感器的功耗增加。

与其他传感器相比,声表面波气体传感器有着灵敏度高、抗干扰能力强、适合远距离传输、体积小、质量轻、工艺兼容性好、便于大量生产等优点,是一种应用前景广泛的气体传感器。目前声表面波气体传感器已经广泛应用在机场、码头、车站、海关等一些人员密集、流量大、随身物品多的地方,利用毛细管色谱柱与声表面波传感器探头取样,检测毒品、炸药等违禁物品。在工业上声表面波气体传感器被用来检测空气中的有毒气体,如 SO_2 、 NO_2 、 H_2S 等;此外在食品安全领域,声表面波气体传感器用于检测食品挥发出来的微量气体,可以用来鉴别食品质量状况。

过去十几年,世界各国都投入了大量的人力、物力和财力进行声表面波气体传感材料与器件的研究和开发,取得了重要进展。目前仅有美国的MSI公司和英国的BAE公司推出了商业化的声表面波传感器产品。而国内对声表面波传感器的研究始于20世纪70年代初,目前国内已有几十家科研、生产机构,如中国科学院声学所、上海交通大学、南京大学、浙江大学压电与声光研究所等,对声表面波传感器技术进行了积极的研究,对声表面波的理论计算、应用研究等方面都开展了大量的研究,并取得了一定的成果;国内的中电科技德清华莹电子、中电第五十五研究所等已经开始批量生产声表面波器件,但是器件性能与国外相比还存在一定的差距。国内对声表面波气体传感器的研究始于20世纪90年代,虽然已有报道能够检测如 SO_2 、 NH_3 、醋酸等气体的声表面波气体传感器,但是这些成果目前仅限于实验室的研究,还不能进行批量化生产,而用声表面波气体传感器来检测化学毒剂在国内更是刚刚起步,与国外先进水平差距很大。究其原因,一方面是国内的声表面波传感器技术的研究起步较晚,在理论上、研究上和国外有一定的差距;另一方面是国内的工艺水平和国外相差较大,这是限制国内声表面波传感器技术发展的主要原因之一。

9.2.4 / 磁学传感材料与器件

磁传感器是把磁场、电流、应力应变、温度、光等引起的敏感元件磁性能的变化转换成电信号来检测相应物理量的器件。20世纪以来,随着电工学的发展和物理学中一些物理现象的发现,磁场测量技术获得了迅速的发展,目前基于各种磁场测量方法形成了种类繁多的磁传感器。针对不同的应用有不同类型的磁传感器,包括霍尔磁传感器、各向异性磁电阻(AMR)传感器、巨磁电阻(GMR)传感器、测量线圈磁传感器、磁通门传感器、光纤传感器、超导量子干涉仪(SQUID)磁传感器、微电子机械系统(MEMS)磁传感器等。下面简要介绍几种发展成熟并已商业化应用的磁传感器。

测量线圈磁传感器的测磁原理是法拉第电磁感应定律。如果通过线圈的磁通量发生变化,则在线圈的两端会感应出电压,电压的大小与磁通的大小和变化频率成正比。交变的磁场通过固定的线圈或者线圈在一个非均匀磁场中运动都能使通过线圈的磁通量随时间变化。测量线圈磁传感器在使用时通常会在线圈内放置一个高磁导率的磁芯,磁芯可以“收集”周围的磁场,增大通过线圈的磁通密度。测量线圈磁传感器的灵敏度与磁芯的磁导率、线圈的面积、线圈的匝数和通过线圈的磁通量变化率有关。测量线圈磁传感器没有检测上限,灵敏度可以

通过改变铁磁芯加以改善，主要应用在较恶劣的环境中。

霍尔磁传感器是一种广泛使用的、价格低廉的磁传感器，其工作原理是霍尔效应。硅一般用于低价霍尔磁传感器的制作，高灵敏度的霍尔磁传感器一般用Ⅲ - V族半导体制作，因为Ⅲ - V族半导体的电子迁移率大于硅。硅霍尔磁传感器的磁场测量范围为 $10^6\sim 10^8\text{nT}$ ，使用铟化铜作为传感器材料后可使其磁场分辨率达到 100nT 。霍尔磁传感器不仅可以测试静态磁场，也能用于测量交变磁场，最高使用频率可达到 1MHz 。霍尔磁传感器的功耗为 $0.1\sim 0.2\text{W}$ ，并能在很宽的温度范围内工作。

磁通门传感器由铁芯外绕励磁线圈、感应线圈组成。铁芯的基本要求是磁导率高、矫顽力小，且励磁线圈上的励磁电源频率要尽可能高。为提高测量精度而需要差分信号输出，采用双铁芯传感器，现在一般采用跑道形结构。为了提高磁通门的灵敏度和降低其功耗，通常所使用的磁芯具有低矫顽力和高剩磁的特点。磁通门的磁场测量范围为 $10^{-2}\sim 10^7\text{nT}$ ，分辨率可达 100pT 。其频率响应受到激励磁场频率和磁芯的频率响应的限制，测量磁场的频率通常不高于 10kHz 。磁通门传感器具有复杂的磁芯结构，尺寸和质量通常较大，减小质量和功耗的同时将会降低其灵敏度和稳定性。

各向异性磁电阻传感器的原理是各向异性磁电阻（AMR）效应，在铁磁金属及其合金中，可以观察到明显的磁电阻效应，其是由铁磁性磁畴在外场的作用下各向异性运动造成的，由于磁电阻效应的大小与磁化强度的取向有关，所以称之为各向异性磁电阻效应。在开环检测方式下，AMR传感器的磁场测量范围为 $10^3\sim 5\times 10^6\text{nT}$ ，使用闭环反馈技术可使其最小分辨率达到 0.1nT 。在开环工作状态下，AMR传感器的动态范围能从稳态到近 1GHz 。AMR传感器的体积小，功耗仅为 $0.1\sim 0.5\text{mW}$ ，能在 $-55\sim 200^\circ\text{C}$ 范围内正常工作。

巨磁电阻（GMR）传感器是利用具有巨磁电阻效应的磁性纳米金属多层薄膜材料，通过半导体集成工艺制作而成。其具有体积小、灵敏度高、线性度好、线性范围宽、响应频率高、工作温度特性好、可靠性高、成本低等特点。现有的GMR传感器可测量的磁场范围为 $10\sim 10^8\text{nT}$ 。GMR传感器的薄层结构在磁场中会产生较大的温度漂移；制作工艺要求高；大于 1T 的外磁场会彻底破坏GMR传感器。

SQUID磁传感器是一种灵敏度极高的磁传感器，是以约瑟夫森效应为理论基础，在超导状态下检测外磁场变化的一种测磁装置。当材料处于超导温度时，材料变成超导体，即材料的电阻为零，如果外磁场的磁感线通过一个超导材料制成的线圈，会在线圈中感应出电流，在没有任何干扰的情况下，电流将在超导线圈中一直存在。产生的电流大小与磁通密度有关。SQUID的灵敏度非常高，适用于检测极微弱的磁场，如天文学、医学、地质学方面等。SQUID是目前测量低频磁场最灵敏的设备，其磁场分辨率可达到 fT （ 10^{-15} ）量级，同时工作功耗低。SQUID需要在低温条件下工作并且对电磁干扰非常敏感，使用时需要复杂的基础设备（液氦低温环境和磁屏蔽室等），所以SQUID装置在体积和质量方面存在一定局限性，从而限制了它的应用场景。

MEMS磁传感器从20世纪90年代开始快速发展。在各类MEMS磁传感器中，一类是通过外磁场与激励电流相互作用产生的洛伦兹力使微机械结构产生变形来检测。传感器工作时微机械结构被激励到谐振状态，高 Q 值可以大幅度提高磁传感器的灵敏度。为了得到尽量

高的 Q 值，必须进行传感器的真空封装，这大大增加了制作工艺的难度。该类磁传感器的优点是无须再加额外的电流激励和真空封装，从而大幅降低了磁传感器的制作成本和操作功耗。另外，这类 MEMS 磁传感器需要解决磁性材料的制作与传统 MEMS 工艺兼容性问题，同时需要高灵敏度的检测技术。

基于洛伦兹力的 MEMS 磁传感器是在谐振器两边的梁上制作一层金属作为传导电流的导线并通上电流，在外磁场作用下将产生洛伦兹力。梁的形变正比于洛伦兹力的大小，梁的形变由梳齿检测。电流的频率设置成器件结构的谐振频率，形变的大小是正弦变化的并且振幅是非谐振时的 Q 倍，这大大提高了传感器的灵敏度。该器件最小能检测到的外磁场大小为 $12.4\mu\text{T}/\text{Hz}^{1/2}$ 。在基于铁磁材料的隧道电流检测的磁传感器中，其利用在窄的真空势垒中的电子隧道效应，在距离接近的原子线度针尖与电极之间加一电压，电子就会穿过两个电极之间的势垒，流向另一电极，形成隧道电流。隧道电流对针尖与电极之间的距离变化非常敏感，距离每减小 0.1nm ，隧道电流就会增加一个数量级，由此可研制出灵敏度非常高的微电子机械系统磁传感器。在基于铁磁材料的光学检测 MEMS 磁传感器中，由 $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{38}\text{Mo}_4\text{Bo}_{18}$ 磁性材料构成两个尺寸相同的矩形梁，其中位于下端的矩形梁两端固定，上端的矩形梁一端固定，另一端可自由移动。两个梁在外磁场作用下发生磁化，相互之间产生排斥力或吸引力，从而使得上端的梁产生位移，通过测量其端部的位移可得到外磁场的大小。对上端梁的位移分别采用了电容检测和光学检测的方法进行测量。在电容检测方式下，其磁场分辨率为 $10\mu\text{T}$ 。在另一种基于顶角反射棱镜（CCR）检测和扭转结构的 MEMS 磁传感器中，采用 $\text{Co}_{40}\text{Ni}_{60}$ 作为磁性敏感薄膜。磁性敏感薄膜与外磁场作用导致扭转结构扭转从而带动 CCR 的可动板转动。输入光经可动板发生反射，反射角度与外磁场成正比。该 MEMS 磁传感器的分辨率为 200nT 。

磁传感器在汽车电子、导航、铁磁性物质检测、医疗等物联网相关领域发挥着重要作用，成为现代传感器技术的一个重要分支。在磁传感器的应用中，必须考虑地磁场的存在。地磁场是地球产生的比较稳定的磁场，大小约为 $50\mu\text{T}$ ，地磁场大小会随着地形、潮汐、季节等变化。磁传感器的应用可以分为四类，前三类是根据待测磁场与地磁场大小之间的关系来分类，第四类为应用于生物、医药领域。在第一类应用中，待测磁场大于地磁场，这时候虽然有地磁场作为噪声存在，但由于待测磁场较大，所以选用的磁传感器不需要太高的灵敏度和分辨率，此时应用的磁传感器一般价格便宜，如测量线圈磁传感器和霍尔磁传感器等；第二类应用中，磁传感器用于检测地磁场或铁磁性物质对地磁场的干扰，此时应用的磁传感器须有检测地磁场大小的能力，一般选用 AMR 传感器、磁通门传感器等灵敏度较高的磁传感器；第三类应用中，待测磁场远小于地磁场，此时地磁场作为噪声源，必须在应用时消除或降低它的影响，因此需要高灵敏度的磁传感器，一般选用光泵磁强计和 SQUID 磁传感器等。

① 磁传感器作为电流传感器。电流传感器一般是采用电磁感应原理或法拉第磁光效应（一束线偏振光穿过介质时，如果在光波传播的方向外加一磁场，那么线偏振光的偏振面会产生旋转角），将大电流信号转变成低电压信号或者光学信号进行测量。许多磁传感器都可用于电流测量，如磁通门传感器、各向异性磁电阻传感器、霍尔磁传感器等，但电流测量时不需要传感器有太高的灵敏度，所以目前大量使用的主要是价格便宜的霍尔磁传感器。

② 磁传感器用于安全防范检测。采用天然气为能源的汽车日益普及，天然气充装站也随

之增加。充装站一般采用地下储气井储存天然气，但是井壁由于长期处于高压状态，容易出现裂纹甚至破裂而造成天然气泄漏的安全事故。天然气储气井一般采用铁磁性材料制作，因此可以采用磁传感器检测漏磁来检测井壁的损伤。磁极产生磁场饱和磁化井壁，如果井壁表面均匀、无缺陷，则磁感线将被约束在井壁中，表面几乎无磁感线，被检测表面没有磁场。当井壁表面出现腐蚀坑、裂纹等缺陷时，将在缺陷处产生漏磁，可以通过磁传感器检测漏磁场的分布和大小，从而确定缺陷的大小和位置，达到无损检测的目的。由于漏磁场一般在 mT 量级，因此可以使用霍尔磁传感器作为检测磁传感器。此外，磁传感器还可以用于机场、车站、码头等安全检查，能够检测枪支、管制刀具等危险物品。

③ 磁传感器用作电子罗盘。地球本身是一个大磁铁，地球表面的磁场大约为 $50\mu\text{T}$ ，地磁场平行地球表面并始终指向北方。可用于探测地磁场的传感器作为电子罗盘应用在各种交通工具上作为导航装置。此外，磁传感器还广泛应用于手持电子罗盘、手机、手持 GPS 系统等定位导航设备，电子游戏机、无人机等需要方向和姿态显示的设备。

④ 磁传感器用于车辆检测。地磁场在很大的范围内可看作均匀和稳定的。大的铁磁物体的磁扰动，如一辆汽车，可看作多个双极性磁铁组成的模型。这些双极性磁铁具有北-南的极化方向，引起地磁场的扰动，产生的影响是地磁场磁感线扭曲和畸变。这种扭曲也被称作车辆的硬铁影响或干扰。利用磁干扰可以分辨不同类型的车辆，探测车辆的速度、运行方向和运动轨迹等。

⑤ 磁传感器用于生物医疗领域。在多组分生物传感器中，磁微球可作为标签在生物芯片上检测 DNA 的杂交，可通过芯片上的巨磁电阻（GMR）传感器检测身体各器官的运动，如眼睑的轻微抖动或说话时舌头引起的关节运动等可通过磁传感器进行检测，超导量子干涉仪（SQUID）可用于检测大脑产生的极其微弱的磁场并绘制脑磁图和各种医药测试。已有研究者应用高温 SQUID 开发出磁免疫分析系统原型机，该系统可在非屏蔽环境下分析液态样品。

9.2.5 / 加速度传感材料与器件

加速度传感器是一种能检测环境中加速度大小和方向的惯性器件。如人行走时，手腕、手臂做着周期性的变化，通过检测测试者的手臂或者其他身体部位的加速度，再利用监督学习手段对采集到的加速度数据进行分类，当加速度数据的波形、频率、周期和幅度等特征满足一定条件后，根据加速度的周期数目可以得到测试者行走步数。加速度传感器在整个过程中起到数据采集的作用。

加速度传感器的应用领域非常广泛，根据加速度传感器的性能要求不同，其应用领域包括以下几个方面：低成本的微电子机械系统加速度传感器用于汽车安全气囊、车辆控制、工业控制等，而高精度的加速度传感器用于倾斜测量、石油勘探、地震预报中的震动测试以及航空航天等领域。此外，对加速度传感器的输出信号进行积分处理，还可得到运动物体的速度和位移，结合陀螺仪制作的惯性测量单元，也能够应用于卫星信号极差的山区中，从而对 GPS 起到辅助作用，实现全方位的导航定位功能。

根据敏感检测原理的不同，MEMS 加速度传感器可以分为压阻式、电容式、隧道式、压电式、谐振式等；根据加工工艺的选择，可以分为体硅工艺加速度传感器和表面工艺加速度

传感器；按照工作方法，又可以分为开环加速度传感器和闭环静电力平衡式加速度传感器两种。本部分将重点介绍较为常见的压阻式、电容式和隧道式加速度传感器。

压阻式加速度传感器以硅材料的压阻效应为工作原理。传感器的结构单元由支撑梁、质量块以及通过离子注入工艺或扩散工艺制作在支撑梁表面的力敏电阻构成。当支撑梁在敏感方向上受到负载作用而发生形变时，支撑梁上将产生相应的应力分布，导致位于支撑梁表面上的力敏电阻的阻值改变，从而产生一个输出电压，通过检测此电压的变化就可以得知加速度信号的变化情况。压阻式加速度传感器具有结构简单、尺寸小、线性度好、抗电磁干扰能力强等优点。随着技术的深入发展，传感器的检测结构单元也呈现多元化，形成了单梁-质量块、双梁-质量块、复合梁-质量块及直拉微梁等多种结构体系。尽管已发展多年，但关于压阻式加速度传感器的研究近年来仍然层出不穷。

电容式加速度传感器具有两种工作方式：变间距式和变面积式。在变间距三明治式电容式加速度传感器中，活动电极位于两个固定电极正中间，质量块的上下表面均作为活动电极板。当加载加速度信号作用时，质量块发生摆动，一对电容极板间距减小，另一对电容极板间距增大，形成差分检测电容，通过信号处理电路进行 $C-V$ 转换，输出一个电压信号，便实现了加速度的检测。电容式加速度传感器具有灵敏度好、分辨率高和温漂小等优点，但也存在着一些缺点，如加工工艺困难，信号处理电路复杂等，此外由于非常高的输入阻抗特性，很容易受到环境中电磁作用的干扰。

隧道式加速度传感器的检测是利用微小间隙中的电子隧道效应产生的隧道导通电流来实现的。其结构由底部的导电指针电极和顶部的平面电极组成，两者之间的间隙非常小，当该间隙处于纳米量级时，电子隧道效应将在两电极之间产生隧道导通电流。由于隧道导通电流与电极间隙呈指数比例关系，因此在负载信号作用下，两电极间的距离即使只有非常微小的变化，也能引起很大的隧道导通电流的变化，因此具有非常高的灵敏度。但这种结构的传感器的加工工艺非常困难，成品率相对而言也较低，对于实现产业化产品还面临一定挑战。

近年来，物联网技术的兴起推动了 MEMS 传感器的高速发展。微电子机械系统加速度传感器作为一种惯性器件，除了应用于汽车安全气囊、消费类电子产品、航空航天、惯性导航等传统领域，在智能物流交通系统物联网中也能够用于车辆运动形态的检测和监控，具有广阔的应用前景。由于物联网的这种特殊应用场合，对加速度传感器提出了很高的技术要求，主要包括抗电磁干扰能力、单片三轴集成能力、抗过载能力三个方面。

在抗电磁干扰能力方面。由于物联网的远程监控特性，传感器的分布网点一般很广，且主要安置在环境恶劣的野外，面临着环境中的各种电磁干扰。压阻式加速度传感器因较低的输入阻抗特性，具有很强的抗干扰能力，很适合应用于环境恶劣的物流交通系统物联网中。此外压阻式加速度传感器还具有结构简单、尺寸小、制造成本低等优点，能够满足物联网对加速度传感器的大规模应用需求。

在单片三轴集成能力方面。在物联网系统中，车辆运动形态需要加速度传感器进行三轴检测来实现全方位的测量。这可以通过两种途径来实现：一是将三个独立的加速度传感器安装在互相垂直的三维方向上；二是采用单片集成的三轴加速度传感器。对于第一种方案来说，不容易保证三轴单元之间的安装精度，同时也存在着体积大、成本高等缺点。第二种方案是

在单个芯片实现三轴加速度传感器的集成，具有由光刻工艺所带来的很高的轴间位置精度，并具有成本低、体积小等优点。

在抗过载能力方面。物联网系统中各节点处进行加速度传感器安装时不可避免地会发生高强度的碰撞，这将在支撑梁的表面产生巨大应力造成梁的断裂，继而导致器件失效，因此从应用角度考虑，一种实用的加速度传感器应在各个方向上均具备非常好的抗过载能力。传统的横向过载保护是通过 DRIE 释放结构层所形成的间隙限位来实现的。纵向过载保护一般在上、下盖板上利用 KOH 湿法腐蚀形成的凸起间隙来实现。

9.2.6 / 柔性力学传感材料与器件

柔性电子技术是指利用新型的柔性材料制备电子器件或电路，能够满足在特定环境下，器件可形变且保持性能不变的需求，克服了传统硅基电子器件刚性易折断的缺点。进入 21 世纪以来，美国、日本以及部分欧洲国家和地区相继开展了针对柔性电子技术的研究计划，国内外多所著名大学也分别成立了有关柔性电子技术的科研机构，在能源、国防、医疗卫生等领域已经取得了不少优异的成果。其中柔性传感器作为可穿戴设备的关键部件，包括电学、力学、生化传感器以及多功能传感器，可直接贴附于皮肤上、嵌入到衣服上甚至植入到生物体中，实时监测温湿度、压力、触觉、化学信号以及生理信号等，具有广阔的应用前景。由于优异的力学性能和传感性能，柔性力学传感器已经在物联网电子产品获得实际应用。柔性力学传感器的研发不仅加速了可穿戴设备和医学术后监测技术的快速发展，在神经形态器件领域也表现出非常重要的作用，为个体化的智能健康医疗行业的发展提供了坚实的基础。

在可穿戴设备应用中，柔性力学传感器可以作为可穿戴设备，直接佩戴在皮肤上，用于日常监测生理信号以及运动状态。皮肤是人类最大的感知器官，具有复杂的表皮和真皮结构，柔性力学传感器的发展在很大程度上可以归功于对皮肤仿生学的探索。作为皮肤中最灵活的部位，手指的指纹和表皮与真皮之间的微结构，可以放大和传输触觉信号。除此之外，柔性力学传感器也可以佩戴在脖颈处，监测说话时的信号模式，进行语音识别，有望为人机交互提供远程控制以及在智能驾驶中实时监测司乘人员身体状况和精神状态。

在医学术后监测应用中，植入式传感器可以直接测量器官或组织的生理活动，为便携式的实时术后监测提供了新的契机。植入式柔性力学传感器要求器件具有良好的生物兼容性，以减少生物体的免疫反应。近年来生物兼容性优良的材料如聚乳酸、纤维素、壳聚糖、蚕丝蛋白等层出不穷，推动了植入式柔性力学传感器的快速发展。其中一些生物兼容的材料在生理条件下可保持长时间的稳定，由此制备的传感器可支持长期在体内工作；而另外一部分生物兼容的材料可在生理条件下逐渐被降解，随着这些生物降解材料的出现，生物兼容性好并且可降解的柔性力学传感器相继问世。具备生物降解性能的柔性力学传感器可在手术时植入到患者体内，连续不断地进行术后监测，并且在发挥作用后，器件可自行降解，无须二次手术取出，同时也减少了电子器件的环境污染。

柔性力学传感器能够将外界压力、弯曲、拉伸以及剪切等形变转换为电信号（电阻、电容、电流、电压等）输出，是一种关键的柔性传感器。柔性力学传感器的发展源自皮肤的启发，皮肤作为人类最大的器官，不仅是一层保护屏障，还是外界刺激的感受器。人类的皮肤

有四种机械感受器，其中两种是对静态外力有响应的慢适应感受器，另外两种是对动态外力有响应的快适应感受器。目前，柔性力学传感器在灵敏度、响应时间等方面取得了较大的进展，可与人体皮肤相媲美，但是其柔韧性、机械贴服性、生物兼容性等性能仍有待提高。得益于其良好的柔韧性、贴服性、易形变、小型轻便以及信号易读出等优点，柔性力学传感器在电子皮肤、健康医疗、人机交互界面、软体机器人和人工智能等领域表现出巨大的潜力。

根据传感原理的不同，柔性力学传感器可以分为压阻式传感器、电容式传感器、压电式传感器、摩擦生电式传感器等。

压阻式传感器可将外界形变转换为电阻信号输出，是最早被商业化的力学传感器。与传统的硅基传感器相比，压阻式的柔性力学传感器在外力刺激下往往能产生更大程度的形变，因此灵敏度也较高。压阻式柔性力学传感器的性能表现主要由材料组成成分以及器件结构决定。其材料组成成分较为简单，主要包括电阻敏感材料和柔性基体材料。常见的金属材料（金属纳米颗粒、金属纳米线、液态金属）、碳材料（碳纳米管、炭黑、石墨烯、生物质衍生碳材料）、导电聚合物（聚吡咯、导电离子水凝胶）以及金属有机框架材料（MOF）等新型材料均是典型的电阻敏感材料；而柔性基体材料的选择更为广泛，如柔性聚合物、硅胶、水凝胶、生物材料等。除了材料的选择外，压阻式传感器结构的设计对其性能也有较大的影响，如波浪结构、蛇形结构、网格结构、三维螺旋结构等可大范围地增强传感器的拉伸性能。多层级的纤维网状结构在压阻式柔性力学传感器中应用最为广泛，具有不同编织结构的纤维状力学传感器在机械响应性能上表现出较大的差异；而连锁结构的纤维网络结构有助于提高压阻式传感器的弹性、拉伸性能以及电学响应。人类的指尖皮肤有许多凸起的表皮结构，可以放大外界机械刺激，提高触觉灵敏度。受到指尖皮肤的启发，为了进一步提高灵敏度，表面粗糙或褶皱的压阻式柔性力学传感器相继被研发。与电容式和压电式传感器相比，压阻式传感器的能耗低，可检测的范围广，材料的选择性多，制备工艺相对更容易，且电阻信号的读出方式相对简单，因此受到了广泛的研发和推广。

电容式传感器是将外力转换为电容信号输出，其原理类似于平行板电容器。电容式传感器的灵敏度高，功耗低，且不受温度影响；但是电容信号的读取电路相对于其他类型的传感器较为复杂，在实际应用时多有不便；并且其灵敏度受到器件尺寸的限制，器件尺寸很小时，很难获得高灵敏度，因此，在当前可穿戴智能终端设备日益缩小的背景下，开发高灵敏度的电容式传感器仍是一个挑战。电容式传感器通常是由上、下两个柔性电极中夹杂一层介电层的三明治结构构成的，为了得到较高的灵敏度，一般选取低弹性模量的材料作为介电层，如聚二甲基硅氧烷（PDMS）、共聚酯（Ecoflex）、丙烯酸弹性体等。但是由于弹性介电材料的压缩局限性以及黏弹性，电容式传感器的灵敏度和响应时间仍然受到限制。为解决这一难题，科研人员为弹性介电层设计了多种微结构，如多孔状结构、金字塔结构、微柱形结构、微球体结构、串珠状结构、微针结构等。另外，天然材料如花瓣、树叶等因表面具有形式各异的微结构、含量丰富且环保，也被用作介电层开发“绿色”电容式传感器。

压电式传感器是利用具有压电效应的材料将动态的外力转换为电信号输出。压电式传感器灵敏度高，响应时间短，与压阻式和电容式传感器相比，还具备自供能的优点，电信号的获取方式简单，具有更广阔的应用前景；但是大多数的压电材料具有热电效应，因此压电式

传感器还需要考虑排除温度的干扰。另外，压电式传感器输出的是脉冲信号，因此适用于动态的力学传感应用，然而如何利用压电式传感器实现静态压力的传感仍然是一个难题。常见的压电材料主要有两类：无机材料（铅钛酸铅、氧化锌、钛酸钡）和有机材料（聚偏二氟乙烯、偏氟乙烯和三氟乙烯共聚物）。无机压电材料具有较高的灵敏度，但是柔性较差，大多是分散在柔性聚合物中使用。而有机压电材料则具有柔性、轻量、易加工的优点，然而有机压电材料的压电灵敏度较低，通常需要添加碳纳米管等碳纳米材料引入更多的电荷调节相对介电常数。

摩擦生电式传感器是利用摩擦生电效应将外力转换为电信号输出，是近年来新兴的一种柔性力学传感器。与压电式传感器类似，摩擦生电式传感器也具备自供能的优点，但是其电信号的产生只发生在两种材料接触和分离的瞬间，适用于动态的传感应用。摩擦生电式传感器可分为四种工作模式：垂直接触-分离模式、单向滑动模式、单电极模式和独立模式。其中垂直接触-分离模式和单向滑动模式在力学传感器的应用中最为常见。摩擦生电式传感器的电信号响应性能取决于动态外力的幅值和施加的频率，经理论计算和实际测试发现，其开路电压与施加的外力幅值呈线性关系，而短路电流与施加外力的频率呈线性关系，这一点为摩擦生电式传感器提供了理论基础。

为了适应当前科技发展的需求，柔性力学传感器应该具备以下几个特点：灵敏度高，响应时间短，韧性高不易损坏，柔性和贴服性与应用环境匹配等。而柔性力学传感器的性质很大程度上取决于其制备材料的特点。为了研发出高灵敏度和综合性能优异的柔性力学传感器，功能材料的电学性能和与外界机械刺激相互作用的性能是两个非常重要的衡量因素。大多数柔性力学传感器是在柔性基体表面通过旋涂、转移、打印、化学沉积等方式产生一层传感材料涂层，或在柔性基体内部填充传感材料制备而成。当前柔性力学传感器相关的柔性基体和传感材料简要介绍如下。

柔性力学传感器的传感材料对于器件的传感性能尤其重要，需兼备优异的力学性能和电学性能。柔性力学传感器的传感材料主要有金属类材料、碳纳米材料和导电聚合物等。金属纳米材料因为稳定的导电性和延展性而被广泛地用作柔性力学传感器的导电填充物或导电涂层。将银纳米线薄膜与PDMS薄膜制备成三明治结构的可拉伸的应变传感器，其最大拉伸长度可达70%，应变系数从2到14可调。虽然固态金属材料是众多工程、科学研究中完美的候选材料，但是它们的电学性质在较大的机械形变需求情况下表现出局限性，例如固态金属纳米线在释放大范围的形变后，其电导率不可恢复，且在重复循环测试中，表现出迟滞效应；部分由超薄金属导体制备的蛇形结构或者剪纸艺术结构，应变范围可提高至300%，然而工作范围仍然有限，无法承受极端形变。在此背景下，液态金属因为良好的导电性和可自由形变的属性成为研发柔性力学传感器尤其是可拉伸的应变传感器的候选材料。近年来毒性低、电导率高的镓基金属成为最适合制备可形变的力学传感器的材料。由于液态金属具有自由形变的属性，应变传感器的拉伸性能通常被弹性聚合物基底所限制。

虽然金属材料在柔性力学传感器领域占有很大的优势，但是金属材料的价格昂贵，不适用于大规模的集成和应用，科研人员逐渐将注意力转移到价格低廉且导电性同样优异的碳纳米材料上。炭黑材料是一种低成本的导电纳米颗粒，常用作弹性基体的导电填充物，可以提

高基体材料的机械强度、抗磨损性、抗紫外性能以及吸光性能。采用逐层铸膜的工艺将炭黑填充的弹性复合材料制备成多层结构的应变传感器，可拉伸至 500%，其电阻和电容均对应变有响应，并且所采用的逐层铸膜工艺可支持大规模印刷。

除了金属和碳纳米材料两种本征导体以外，导电聚合物因电导率范围广、易加工且力学性能好，在制备柔性力学传感器领域也吸引了越来越多的关注。聚吡咯（PPY）是一种典型的导电聚合物，然而致密的 PPY 由于刚性共轭环骨架而表现出刚性和脆性，研究人员设计了一种空心球体结构的 PPY，其弹性模量可调，可承受较大范围的形变和应力，并基于此开发了高灵敏度的压力传感器。

传统的刚性力学传感器的基底一般是硅、二氧化硅、玻璃等材料，通常对于传感器的性能不会产生关键的影响。与之不同的是，柔性力学传感器的柔性基体材料与传感材料各司其职，具有相同的重要性。上述传感材料主要保证柔性力学传感器的电学特性和力学敏感特性，而传感器的力学性能（如柔性、弹性、拉伸性能、抗疲劳特性等）则是由柔性基体材料负责。柔性基体材料主要有两类。

一类是柔性薄膜，多用作传感器的基底，如聚酰亚胺（PI）、聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）、聚萘二甲酸乙二醇酯（PEN）薄膜。

另一类柔性基体材料是弹性体，可在外力作用下产生肉眼可观的形变，大多作为载体在表面涂布或内部掺杂传感材料，如已被商业化的聚二甲基硅氧烷（PDMS）。共聚酯（Ecoflex）也是一种常用的硅胶材料，与 PDMS 相比，具有更大的拉伸率。将 Ecoflex 作为封装层，制备出一种拉伸率可达 480% 的电容型触觉传感器。除了硅胶类弹性体外，水凝胶也是一类黏弹性材料，其内部是亲水聚合物组成的三维网状结构，能够吸收保存大量的水分，其力学性能也可通过含水量调整。离子凝胶还可以作为绝缘介质层用于制备高灵敏度的电容式传感器，离子凝胶中被聚合物基质捕获的离子液体，在外界压力下由于电双层的形成会产生较大的电容变化。这类柔性力学传感器的工作原理是外力作用下电极和离子凝胶之间的接触区域改变从而改变电容大小，所以某些离子凝胶的微结构如锥形结构能够提高灵敏度。海绵以及海绵状弹性体内部为多孔结构，可承受较大范围的形变，回弹性好，并且容易加工为导电海绵，也是制备柔性力学传感器的好材料。

随着柔性力学传感器在可穿戴设备领域的广泛应用，人们越来越关注传感器对于皮肤的安全性，也有很多环保人士关心此类电子产品使用后的废弃问题。目前越来越多的科研人员将注意力转移到生活中常见的“绿色”材料上，探索更好的生物安全性、降解特性等。“绿色”材料通常来自自然界或者是受到自然界启发的材料，如纤维素主要从棉花、树木、竹子获得，是地球上最丰富的可再生生物高分子化合物。得益于纸的柔性和低成本，近年来科研人员把纤维纸投入到柔性器件的研发中。利用平坦的打印纸作为基底，在其上通过丝网印刷技术制备电极，并将多孔、褶皱的纸碳化后作为传感材料，二者集成为完整的压力传感器。植物的花瓣和叶子因表面具有复杂的微结构也可以用于制备柔性力学传感器。蚕丝蛋白是一种从蚕茧中提取的天然蛋白纤维，机械强度高，耐用性好，具有良好的生物兼容性，数千年以来在我国作为丝绸制品使用，是制备柔性可穿戴设备、电子皮肤的绝佳材料。除此之外，蚕丝蛋白纤维也可以直接碳化后作为传感材料用于柔性力学传感器中。在实际应用

中，即使传感器的材料具有生物兼容性，在长期使用的情况下，因器件需长期贴敷在皮肤表面而阻碍了皮肤的呼吸，也会引起皮肤的炎症反应。因此，也应保证贴敷于皮肤表面的柔性力学传感器在长期使用过程中的透气性。将包裹了金的聚乙烯醇（PVA）纤维制备成导电的纳米网格结构，然后用水溶解掉纤维内部的PVA，从而形成一种具有优异透气性的超薄、轻量、可拉伸的多功能传感器，可贴敷于皮肤表面探测触觉、压力等信号，并且由于高度的透气性，不会引起皮肤的炎症反应。在以上材料中，蚕丝蛋白因为丰富的含量、成熟低成本的提取方式、优异的力学性质以及易于功能化等优点，在柔性力学传感器领域具有广阔的应用前景。

由于优异的力学性能和传感性能，柔性力学传感器已经在物联网电子产品中获得实际应用。柔性力学传感器的研发不仅加速了可穿戴设备和医学术后监测技术的快速发展，在神经形态器件领域也表现出了非常重要的作用，为个体化的智能健康医疗行业的发展提供了坚实的基础。

在可穿戴设备应用中，柔性力学传感器可以作为可穿戴设备，直接佩戴在皮肤上，用于日常监测生理信号以及运动状态。皮肤是人类最大的感知器官，具有复杂的表皮和真皮结构，柔性力学传感器的发展在很大程度上可以归功于对皮肤仿生学的探索。作为皮肤中最灵活的部位，手指的指纹和表皮与真皮之间的微结构，可以放大和传输触觉信号。除此之外，柔性力学传感器也可以佩戴在脖颈处，监测说话时的信号模式，进行语音识别，有望为人机交互提供远程控制以及在智能驾驶中实时监测司乘人员身体状况和精神状态。

在医学术后监测应用中，植入式传感器可以直接测量器官或组织的生理活动，为便携式的实时术后监测提供了新的契机。植入式柔性力学传感器要求器件具有良好的生物兼容性，以减少生物体的免疫反应。近年来生物兼容性优良的材料如聚乳酸、纤维素、壳聚糖、蚕丝蛋白等层出不穷，推动了植入式柔性力学传感器的快速发展。其中一些生物兼容的材料在生理条件下可保持长时间的稳定，由此制备的传感器可支持长期在体内工作；而另一部分生物兼容的材料可在生理条件下逐渐被降解，随着这些生物降解材料的出现，生物兼容性好并且可降解的柔性力学传感器相继问世。具备生物降解性能的柔性力学传感器可在手术时植入到患者体内，连续不断地进行术后监测，并且在发挥作用后，器件可自行降解，无须二次手术取出，同时也减少了电子器件的环境污染。

目前柔性力学传感器在模拟皮肤的灵敏度和柔性方面已经取得了很大的进展，但是将其真正应用在健康医疗领域尚有不足，主要表现在：

① 测量模式较为单一，目前多数柔性力学传感器只能监测压力或者拉伸应变的其中一种，不能同时测量多种形变信号并且进行有效的区分，极大地限制了传感器的应用范围。

② 降解不可控，目前也有部分可生物降解的柔性力学传感器被报道，但是这类传感器的降解过程几乎是不可控的，只能随着材料被组织液等腐蚀而逐渐降解。在不可控的降解过程中，器件发挥作用的有效时间不能得到保证。

③ 不具备治疗功能，目前现有的柔性力学传感器只具备监测功能，然而在监测到生物体的异常信号时，却不能及时治疗或者缓解症状，极大地限制了柔性力学传感器在个体智能医疗领域的应用，尤其是对于慢性病患者或者病症发作急剧的人群。

在科技领域，人工智能、物联网和纳米科技被认为是即将到来的第四次科技革命的关键技术。随着 5G 技术的成熟，传感器的接入规模和数据的即时传输能力正在大幅增强，应用数据呈现爆炸式增长，大量数据处理需求使得计算系统面临巨大挑战。这种挑战主要体现在以下几方面。

① 处理器和主存之间的带宽限制成为数据密集型应用的瓶颈。大量数据从物联网前端采集传回云端，由云计算服务器进行处理。目前流行的一些数据密集型应用，如神经网络应用和图计算应用，数据的局部性差。这会导致处理器片上缓存命中率降低，进而导致处理器和主存之间频繁地传输数据。在传统的冯·诺依曼体系结构中，处理器和主存之间的总线数据传输成为瓶颈，而因为主存容量限制，数据不得不存储在访问延迟更高的非易失存储中，进一步延长了处理器访问数据的延迟时间。针对这一局限性，建立计算与存储融合的非冯·诺依曼新架构，多年来已成为学术界和产业界争相研发的技术目标。

② 数据传输的性能瓶颈。尽管 5G 技术在前端设备接入规模和响应延迟方面都有显著的突破，但前端产生的大量数据回传仍然需要大量的传输资源。在前端实时数据处理和任务响应的需求下，边缘计算、雾计算和智能传感器等新技术应运而生。这些新的技术在数据产生的源头和传输路径上增加计算处理能力，尽可能地传输处理后的信息，从而降低传输压力，在同一个设备中完成计算与存储，这也是在系统网络层面实现计算与存储的融合。

③ 前端数据处理的性能瓶颈。前端设备由于体积、成本、电源供给以及功能多样性等各种原因限制，难以配置大量算力。在面对实际应用场景时，新兴的神经网络算法常常因所需算力过大而无法部署到物联网前端，使得前端数据处理面临硬件算力的性能瓶颈。

随着微电子工艺进入纳米尺度，纳米功能材料第一次能够被精加工为纳米器件，进入集成电路，而以相变存储为代表的新兴存储技术成为两种技术首次结合的产物。在电脉冲的作用下，极具活性的纳米功能材料能够在纳秒量级的时间内发生状态变化，且其状态不需要能量来维持，可用来制备性能优良的存储器件和芯片。存储芯片所展示的高速随机访问和非易失特性正好契合了物联网系统计算与存储融合的关键需求，使得“建立新的非冯·诺依曼计算结构”这一目标变得前所未有的接近。

2015 年 Intel 发布了基于相变存储技术的 3D XPoint 非易失内存产品，允许系统将数据库建立在大容量非易失的内存中，处理器可以绕过 DRAM（动态随机存取存储器），直接访问数据，从而在系统层级上推动了计算与存储的融合，与此同时，嵌入式相变近核存储以及相变存算一体器件技术分别从芯片层级和器件层级实现计算与存储融合。

下面就不同类型的器件及其在物联网计算系统中的应用方式进行介绍。

9.3.2 / 新型存储器件与非易失内存

在物联网系统中，后端数据中心不仅要提供对源源不断涌入的海量数据的存储能力，同时还需要提供强大的算力，用于数据实时处理。早在 2008 年，IBM 就提出存储级内存（Storage Class Memory, SCM）概念，基于相变存储的高速随机访问和非易失特性，设计内存模块为服务器提供了大容量非易失内存，在 SCM 系统中，处理器可以直接通过高速内存总线访问数据完成计算，为物联网系统提高计算效率。

3D XPoint 是 Intel 公司与 Micron 合作开发的相变存储器技术。由于 3D XPoint 支持随机访问和原位更新这两个内存特征，从一开始研发，Intel 就参照 IBM 提出的存储级内存概念，将设计目标定位为内存的替代者。

2015 年，Intel 相继发布了代号为 Knights Landing 的至强处理器和代号为 Apache Pass 的第一代 3D XPoint 非易失存储器，该处理器将 DRAM 以堆叠的方式与处理器电路连接，实现最高 16GB 的第四级缓存。大容量的四级缓存承载了处理器最频繁的热数据访问请求，缓解了 DDR 内存总线的访问性能压力，为寿命和访问延迟与 DRAM 仍有一定差距的 3D XPoint 非易失内存进入实用化提供了有效的支撑。Intel 主导的非易失内存编程模型（NVM Programming Model）在同年由 SNIA 组织发布，针对非易失内存的软件系统优化，事实上已经将存储级内存概念完全实现。

由于非易失内存是计算架构的重大创新，而不是像往常的新技术那样只是提升性能，所以要充分发挥其巨大潜力，需要系统软硬件各个层面进行优化改造。从 Intel 的 3D XPoint 产品发布策略来看，非易失内存应用的市场导入是一个逐级推进的过程。

以美国 SAP 公司的 HANA 系列产品为代表的内存计算技术（Memory Computing）已经成为高性能数据中心的代表性技术，将数据库装入内存由处理器直接访问，是大数据应用中应对高并发访问的最优方案，我国铁路系统（12306 订票系统）正是基于这一技术才得以承受春运期间的巨大访问压力，但由于 DRAM 技术存储密度难以提高、成本过高，该技术难以大规模实施。3D XPoint 非易失内存能够大幅提升单台服务器的内存容量，同时非易失特性还能实现内存数据的可靠存储，很大程度上解除了内存计算的容量和可靠性限制，二者的融合将成为下一代数据中心的技术核心。

事实上，包括相变存储技术在内，多种新兴高性能存储技术正在逐渐涌现。

阻变存储器（Resistive Random Access Memory, RRAM）由两个金属电极中间夹着一层薄的介电层组成，通过电压来控制介质材料中导电细丝的形成与断裂，从而实现材料在高、低电阻态之间的转变^[9,10]。阻变存储器主要分为以下三类：电化学-金属化（Electro-chemical Metallization, ECM）、价变化机制（Valency Change Mechanism、VCM）、热化学机制（Thermochemical Mechanism, TCM）等。ECM 型的 RRAM 主要依赖于电极材料的作用，一般包括一个活性电极和一个惰性电极，活性电极材料可以选用 Cu 或 Ag，惰性电极可以选用活动性较差的金属，例如 Pt 或 TiN。而 VCM 型和 TCM 型的 RRAM 主要依赖于所选用的介质材料，可以选用 SrTiO₃、TaO₂ 等。ECM 和 VCM 是双极型 RRAM，正向开启，反向关闭；而 TCM 与之有很大的不同，TCM 是单极型的，正向开启，正向关闭。使用方式存在较大不同的原因是，TCM 依靠热效应将导电细丝熔断来关闭器件单元，而 ECM 和 VCM 是依靠电压的作用，使氧空位或者金属阳离子（如 Cu²⁺、Ag⁺ 或 Ni²⁺）的迁移来控制导电细丝的形成与断裂。

RRAM 器件有其优点,例如结构和材料组分比较简单,工艺简单,可以与当前的 COMS 工艺兼容,扩展性良好、速度快等^[11]。但是 RRAM 也有其缺点,例如基于 RRAM 器件的稳定性较差,因为导电细丝形成的过程中随机性较大,难以进行控制,在大规模应用中容易产生较大的操作电压浮动。如果用于小规模嵌入式应用,RRAM 已经具备足够的条件,因为它相较于 NAND Flash 而言,操作电压较低,速度又较快。另外,RRAM 的应用可扩展到神经网络计算或者新型逻辑器件^[12,13]。

自旋转移力矩磁存储器 (Spin-Transfer-Torque Magnetic Random Access Memory, STT-MRAM) 是利用铁磁层磁化方向的不同进行数据存储的^[14,15]。MRAM 器件单元从上到下依次为自由层、隧道层和固定层,固定层的磁场方向被磁极固定,而自由层的磁场方向可以通过施加电场来进行改变。MRAM 的电阻大小由自由层的磁场方向来决定,当自由层的磁场方向与固定层的磁场方向相同时,存储单元处于低阻态,用逻辑状态“0”表示;而当自由层的磁场方向与固定层的磁场方向相反时,存储单元处于高阻态,用逻辑状态“1”表示。MRAM 器件单元读写速度非常快,甚至能够与 DRAM 媲美,而且它还具有数据保持力强、循环寿命长等优点。但是 MRAM 最大的缺点是由于结构较为复杂,工艺实现难度高。总之,由于 MRAM 具有高速低功耗的优势,在商业应用上具有一定的价值。

相变存储器 (PCRAM) 是利用硫系化合物材料非晶态与晶态之间的转换来进行数据的存储,材料处于非晶态时为高阻,处于晶态时为低阻,常用的材料有 Ge₂Sb₂Te₅、Sb-Te 系材料、Ge-Te 系材料^[16,17]。相变材料在一个高电压、短脉宽的电脉冲作用下被 RESET 为非晶态,而在一个低电压、较长脉宽的电脉冲作用下被 SET 为晶态,以此来实现材料在非晶态与晶态之间的可逆转换。PCRAM 的优点是技术比较成熟,已处于规模量产的阶段,具有高速、低功耗、高数据保持力、寿命长、抗辐照等优点,性能与主流的 Flash 相比有多方面的优势。Intel 和 Micron 公司联合发布基于相变存储技术的 3D XPoint 技术,代表着相变存储技术已进入高密度三维集成的阶段^[18,19]。

铁电存储器 (FeRAM) 是利用铁电体的不同极化状态来存储信息,早在 1993 年, Ramtron 就率先推出了 4Kbit 容量的商用 FeRAM,该产品采用 1.5 μm 的 IC 加工工艺线,铁电薄膜为锆钛酸铅 (Pb (Zr, Ti) O₃, PZT) 材料,存储单元为 2T2C 结构。由于难以控制小尺寸的 3D 电容结构侧壁上的 PZT 膜的取向,因而无法以令人满意的方式解决该问题^[20]。在 2011 年, Böscke 在氧化铪 (HfO₂) 中发现铁电性^[21],提供了一种新的铁电存储解决方案。目前对基于 HfO₂ 的 FeRAM 更多聚焦于 Fe FET 方向,在该领域有一些最新的进展。Global Foundries、FMC、NaMLab 和 Fraunhofer 等通过在 22nm FD-SOI 工艺中展示了嵌入式非易失性 FeRAM 使研究达到了一个重要里程碑,该项技术在 2019 年获得认证。根据他们的论文,其 FeRAM 由 32Mbit 阵列组成,Fe FET 的单元小至 0.025 μm^2 ,写入/擦除时间在 10ns 范围,电源电压 4.2V,最高能在 300 $^{\circ}\text{C}$ 的高温下保持数据^[22,23]。欧洲微电子中心 (IMEC) 正在开发一个方案,用 HfO₂ 取代当前的 DRAM 材料,从而形成一类新型非挥发性 DRAM 存储器。此外,IMEC 还在开发类似于 3D NAND 的堆叠铁电器件^[24]。国内研究同样方兴未艾,许多高校与科研机构如中科院微电子所、清华大学、复旦大学、华中科技大学、电子科技大学、湘潭大学等都迅速组建团队投入科研,2020 年中科院微电子所刘明院士团队率先开发出基于 HZO 材料可三维集成的铁电二极管^[25]。

9.3.3 / 存算一体器件与存内计算

无论是物联网后端数据中心服务器还是前端或边缘计算设备，算力都是至关重要的资源。利用纳米功能器件的物理特性实现对特定计算的加速将是一种高效解决算力的手段。

存内计算为直接使用内存单元做计算，利用电阻和电流电压的物理关系表达运算过程。存内计算依赖于新型的非易失性存储器。如 ReRAM 和 PCM 等。在所有存内计算操作中，最普遍的是利用基尔霍夫定律（Kirchoff's Law）进行向量乘矩阵操作，原因在于：

- ① 它能够高效地将计算和存储紧密结合；
- ② 它的计算效率高（即在一个读操作延迟内能完成一次向量乘矩阵）；
- ③ 目前流行的数据密集型应用中，如机器学习应用和图计算应用，向量乘矩阵的计算占了总计算量的 90% 以上。

除了向量乘矩阵操作，存内计算还能利用电阻、电流及电压的物理关系实现查询，按比特与 / 或 / 非等操作。

存内计算使用基尔霍夫定律，在将近一个读操作延迟内完成一次向量乘矩阵操作。以计算一个 2×1 的向量 (V_1, V_2) 乘以一个 1×2 的向量 $(G_1, G_2)^T$ 为例，其中， $(G_1, G_2)^T$ 用 ReRAM 阻值表示，事先存在 ReRAM 中。 (V_1, V_2) 用电压表示，加到对应的字节线上。根据基尔霍夫定律，比特线上最后输出的电流值就代表了 $(V_1, V_2) \times (G_1, G_2)^T$ 的计算值。同理，实现向量乘矩阵操作时，ReRAM 阵列中存储着要做计算的矩阵，将向量转化成电压加在字节线上。通过比特线得到的输出就是相应的结果向量。由于向量乘矩阵操作是神经网络和图计算中的主要操作，这种内存计算结构得到了高效利用。

DPE 是一个专门针对向量乘矩阵操作设计的存内计算加速器。它提供了一个转化算法，可将实际的全精度矩阵存储到精度有限的 ReRAM 存内计算阵列中，减少器件问题以及外围电路问题对计算结果的影响。首先将矩阵映射到合适的 ReRAM 阵列中。这个过程利用对输入的预先了解以及对 ReRAM 阵列参数的共同优化来决定最后写入 ReRAM 阵列的数据。而后通过写入阶段，再进入计算阶段。计算阶段将预先准备好的输入数据转成信号，再传入 ReRAM 阵列中并读取输出数据。如果还有其他计算操作，则将临时输出传送到下一个 ReRAM 阵列中；如果没有，则结束计算。DPE 测试结果显示，只用 4bit 的 DAC/ADC（电信号转模拟信号单元 / 模拟信号转电信号单元）就能保证计算结果没有精度损失。相比于数字的 ASIC 向量乘矩阵加速器，DPE 能取得 1000 到 10000 倍的性能提升（图 9-1）。

ISAAC 是一个针对神经网络推理设计的存内计算架构。一个芯片上包含多个存内计算阵列（Tile），它们通过 C-mesh 的片上网络连接，可以互相通信。存内计算阵列中有用于池化层计算的最大池化单元（Max Pool，MP）、用于激活层计算的 Sigmoid 单元、用于数据缓存的 eDRAM Buffer、用于中间数据移位加操作的 S+A 单元、用于存放临时输出的输出数据寄存器，以及支持原地向量乘矩阵操作的基础单元（In-situ Multiply Accumulate，IMA）。每个 IMA 中包含 4 个基于 ReRAM 阵列的向量乘矩阵单元、电模互转单元（DAC/ADC）、输入寄存器、移位加操作单元以及输出寄存器。ReRAM 阵列的个数和其他电路单元的设计考虑了向量乘矩阵的计算延迟以及片上网络的带宽，充分利用了片上资源。该结构在做推理时，采用了 Pipeline

的方式将硬件时分复用，以加快整个推理的过程。然而，推理过程中会有很多由归一化操作产生的气泡。当推理任务松散时，ISAAC 的 Pipeline 效果并不理想。相比于针对神经网络的加速器 DaDianNao，ISAAC 有 14.8 倍的性能提升和 5.5 倍的能耗节约（图 9-2）。

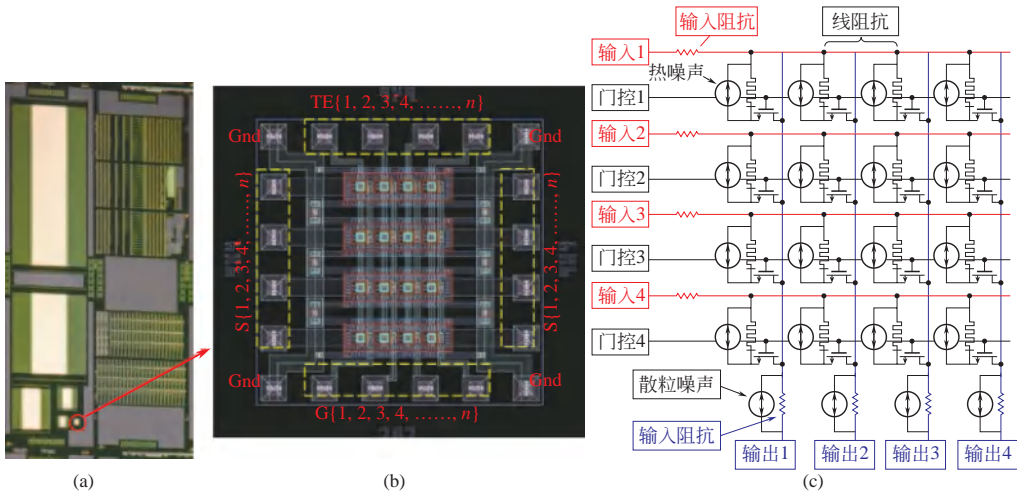


图 9-1 DPE 验证电路^[26]

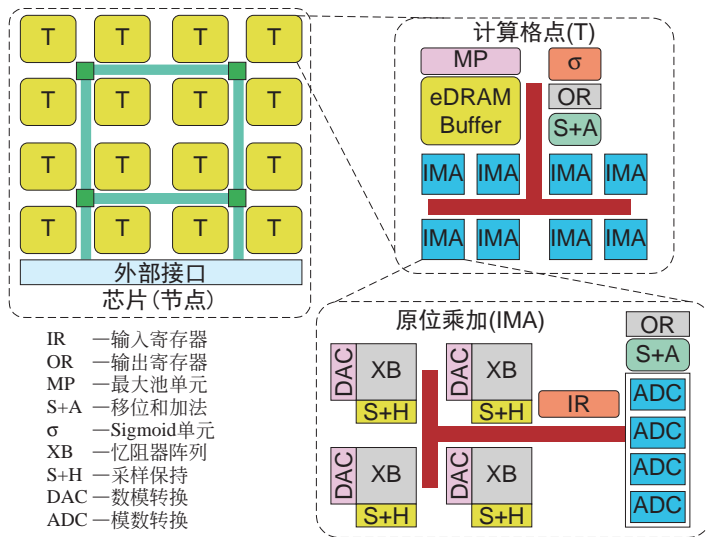


图 9-2 ISAAC 系统架构^[27]

PRIME 也是一个针对神经网络推理设计的存内计算架构。在一般的加速器结构中。计算加速单元作为 CPU 的协处理器放在 CPU 旁边，通过总线与主存相连。在基于 3D 堆叠的近数据计算架构中，加速单元靠近主存堆叠，并通过总线与 CPU 相连。在 PRIME 中，直接使用 ReRAM 单元做计算。其中，一个 ReRAM Bank 分为 3 部分：用作存储的 Mem Subarray、用作计算的 FF Subarray，以及用作缓存的 Buffer Subarray。计算阵列和缓存阵列进行数据交互，缓存阵列和存储阵列进行数据交互。与 ISAAC 不同的是，PRIME 不用片上 eDRAM 作为缓存，也不使用输入/输出寄存器，而是直接使用 ReRAM 阵列作为缓存和存储。与基于 CPU 的神经网络处理器相比，PRIME 能够取得 2360 倍的性能提升和 895 倍的能耗节约（图 9-3）。

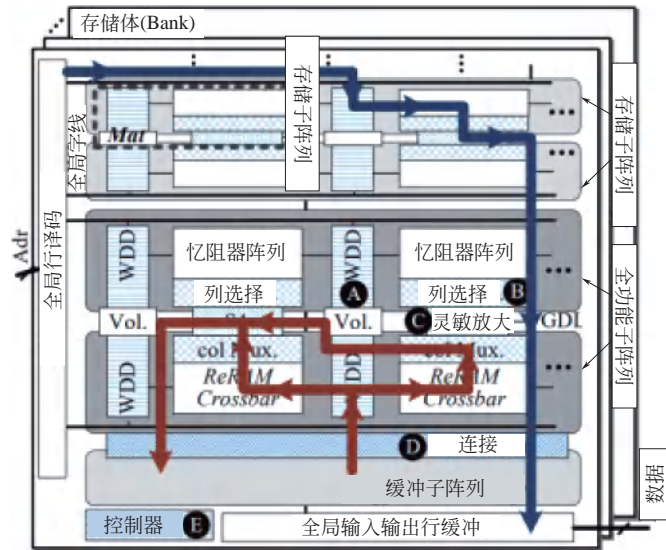


图 9-3 PRIME 系统架构图 [28]

除此之外，还有大量针对新存储器件应用的神经网络计算加速领域的新计算架构涌现。如 PipeLayer [29] 是一个针对神经网络训练设计的存内计算系统架构，可同时实现反向传播阶段的误差传递和权值计算并行；IBM 的研究人员提出了一种用 PCM+CMOS 的存储单元来做存内计算的方法 [30]。能在同一个阵列中实现全连接神经网络的前向传播、反向传播和权值计算；SC [31] 是一个针对科学计算提出的存内计算系统架构，用专门的硬件加速线性代数计算；GraphR [32] 是一个针对图计算提出的存内计算系统架构，把一个图分成多个子图，探索子图之间的并行性。

基于逻辑操作的存内计算代表工作有：University of California [33]，Santa Barbara 的 Pinatubo [34]，Delft University of Technology 的 Scouting Logic 和 XOR/XNOR 存内计算系统 [35]，以及 University of California，San Diego 的 MPIM [36] 和 MAPIM [37] 等。

9.3.4 / 存算一体器件与脉冲神经网络

人工智能 (AI) 正引领着一波前所未有的信息技术革命浪潮。利用神经启发计算的生物神经网络 (BioNN) 中自适应并行处理的硬件消除冯·诺依曼平台上的能量密集型和低效的传输 [38]，是一种很有前途的方案。

相比人工神经网络 (ANN) 算法，脉冲神经网络 (SNN) 更接近突触 - 神经元结构的工作机制，在自然语言处理等应用场景中具有优势，更重要的是，SNN 更容易实现在线学习，因而被越来越多的研究者认为是神经启发计算的一个更有前途的选择。在过去的 10 年中，人们提出了各种硬件 / 软件策略计算量：基于主流的互补金属 - 氧化物 - 半导体 (CMOS) 技术、基于晶体管的芯片，如 BrainScaleS [39]，TrueNorth [40] 和 Pohoiki Beach [41]，实现了具有合理分类精度和显著能效的 SNN 算法。然而，摩尔定律约束、复杂的外围电路和三维集成的困难阻碍了更先进的基于晶体管的神经启发系统的实现。

作为另一种候选方法，新兴的非易失性存储器 (NVM) 被发现在消除能量密集型和低效的传播方面具有优点。基于电诱导、电导可以模拟生物突触权重的原理，NVM 表现出良好的模拟

电导调节功能，即连续多层电导调谐，因此被广泛应用于神经网络和 SNN 神经激发系统中模拟突触行为。双端 NVM 器件可分为铁电随机存取存储器（FeRAM）、电阻 RAM（RRAM）、相变 RAM（PCRAM）和磁性 RAM（MRAM）。模拟电导调节、能耗、器件内可靠性和器件间均匀性是实现高性能神经激励系统的关键参数。具有可调谐和多层电导状态的 FeRAM 在血管内的可靠性和能量消耗方面存在挑战。MRAM 具有良好的均匀性和低能耗，但由于实现模拟电导的挑战，尚未在神经启发计算中广泛应用。RRAM 具有良好的模拟电导调节性能、低能耗、高可靠性和均匀性，是一种较强的候选材料。因此，基于 RRAM 的神经启发系统最近得到了深入的研究^[42]。PCRAM 作为另一个强大的候选方案，由于良好的电导可控性、器件内的可靠性和器件间的均匀性，以及与成熟的硅基大规模生产技术的良好兼容性，已经在各种具有 ANN 和 SNN 的神经激励系统中得到了广泛的证明。Intel 在 2018 年发布了商用傲腾持久性内存模块^[43]（图 9-4）。

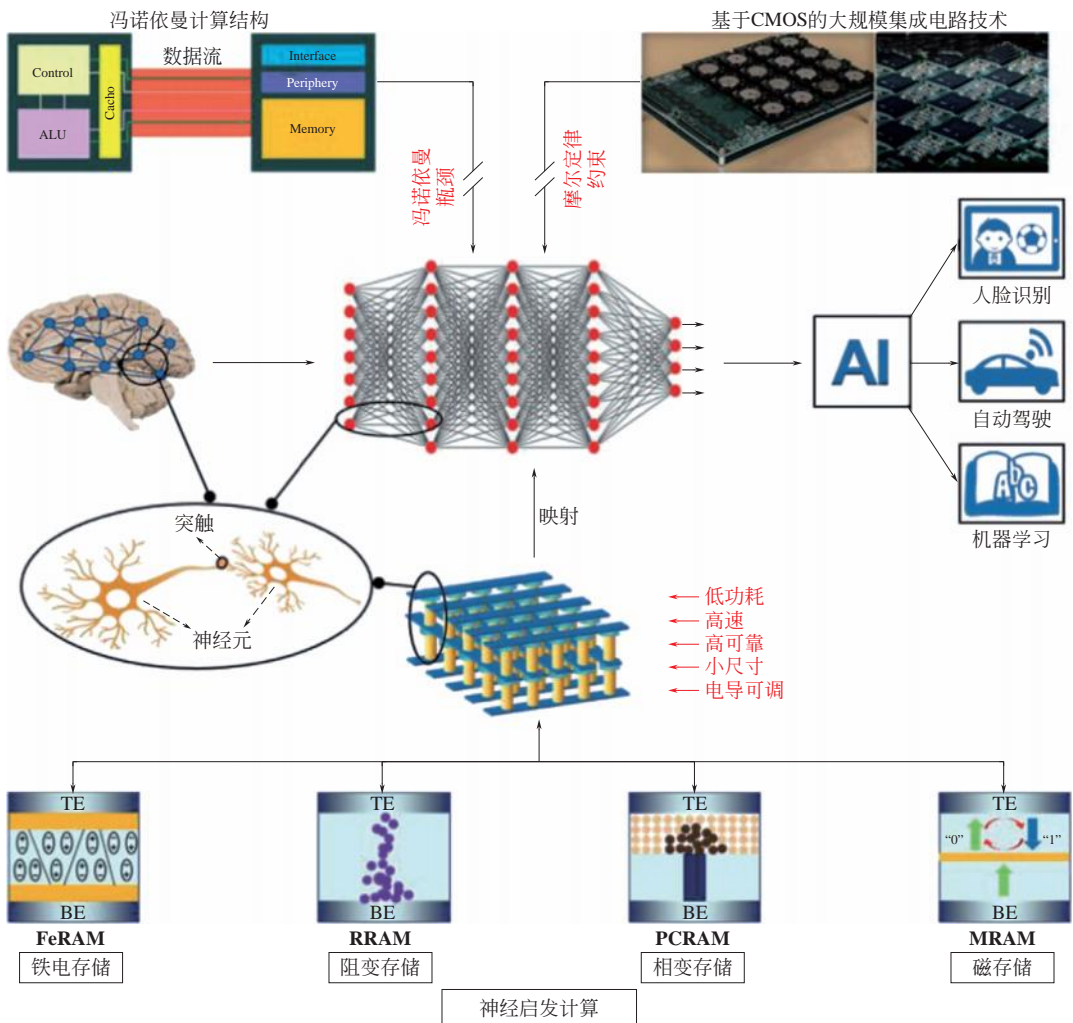


图 9-4 新兴的非易失性存储器（NVM）在类神经元行为模拟中的应用^[44]

典型的 PCRAM 具有金属 - 绝缘体 - 金属夹心结构，其电导可被认为与生物突触之间的连接强度相同。在 PCRAM 中，温度驱动的相变材料从晶态到非晶态的相变分别导致器件具有可区

分的高电导状态和低电导状态。类似地，可以通过施加一个写入的电脉冲来实现器件电导的变化，这取决于晶态/非晶态的体积比。这个过程用于模拟生物突触的权重更新。在外围电路和算法的帮助下，通过将 PCRAM 器件集成到 Cross-bar 结构中，可以直接映射由数十亿个相互连接的神经元组成的脑神经网络结构，从而实现 ANN 和 SNN 的功能。所采用的技术路线来自生物神经网络的解剖结果的启发。神经启发计算的基本任务是使用硬件技术模拟基本的突触、神经元及其突触行为。几十年来，利用 PCRAM 技术实现神经启发计算的许多工作成果得到报道。

在脑神经网络中，神经元通过 LIF 机制的重要功能来主导信息传递。根据霍奇金 - 赫胥黎模型和各种基于阈值的神经元模型^[45-47]，LIF 机制是由复杂的电化学机制结合脂质双层膜的特征驱动的。膜电位受到树突的兴奋和抑制性突触后电位的调节。一旦电位的和高到足以超过放电阈值，它就会导致触发神经元通过轴突输出新的电位^[48]。模拟人工神经元的思想是利用适当的硬件设计来实现膜电位的动态更新。具有电导阈值的 PCRAM 的电导转化直接表达了生物膜电位的演化。由于对随机性和非波动性的利用，该 PCRAM 神经元很好地满足了神经启发计算的两个要求，即鲁棒性和低能耗。然而，这是以牺牲对神经元动力学的有限控制和最小的电路要求为代价的，由于 PCRAM 的固有随机性来自物理结晶，使用更小的节点来更精确地调整结晶，以及更全面地设计附属器件、外围电路和算法等可进一步优化性能。IBM 提出了一种典型的随机相变神经元系统，利用 PCRAM 器件模拟了神经元的 LIF 机制^[48]。

电子突触是模拟生物行为的另一个关键成分。在实践中，单 PCRAM 和 2-PCRAM 方案通常用于神经启发的集成电路来模拟突触增强和抑制。单 PCRAM 方案对应于双向电诱导电导，缺点是随后的复位脉冲在非晶化过程中破坏了固有的状态。这意味着存储的信息会立即被忘记，并且必须被重新学习。对于后者，增强和抑制分别使用“正器件”和“负器件”来实现，这两者都利用了结晶过程中的累积性。最终的突触权值可以用 2-PCRAM 的不同电导来表示。这种方法避免了使用重置脉冲来提高连续的权值，但需要定期复位电导，以防止正电导和负电导的饱和。2-PCRAM 方案已被广泛应用于基于 PCRAM 的神经启发计算的构建，与单一的 PCRAM 方案相比，它增加了设计的复杂性^[49,50]。

模拟突触结构和突触可塑性是实现脑神经网络的必要任务。然而，复杂的突触可塑性的动态电化学模型使它们往往需要简化为仿真的计算模型。在已证实的突触可塑性中，突触增强和抑制以及 STDP 是神经启发计算中最理想和强调的。具有双端结构的 PCRAM 允许这些结构，并具有与生物突触结构相似和双向可控电导的优势，因此得到了广泛的研究。

突触电位由若干振幅低于设置电压的较宽脉冲组成的均匀脉冲序列或阶梯脉冲序列实现，而突触抑制由振幅略高于重置电压的较窄脉冲组成的阶梯脉冲序列实现。对于 STDP，可编程阶梯脉冲方案和方波脉冲方案最受欢迎。

在前一种方法中，突触前峰值由随振幅减少的增强脉冲和随振幅增加的抑制脉冲组成，而突触后脉冲仅由一个更宽的脉冲组成。值得注意的是，抑制脉冲和增强脉冲的振幅最初都低于相应的阈值，这意味着任何突触前脉冲都不能抑制或增强权重，除非它与突触后脉冲重叠。因此，突触后脉冲像一个门一样控制突触权重的增加或减少，分别导致 LTP 或 LTD。突触前和突触后脉冲的到达时间差定义为发放时间 (ΔT)，两个脉冲的强度变化由突触权重的变化 (ΔW) 表示。因此，时间和突触权值与 Bi 和 Poo 报道的生物 STDP 规则的结果非常相

似。此外，通过调节突触前尖峰的间隔和振幅，得到了四种流行（非对称 Hebbian、非对称反 Hebbian、对称 Hebbian 和对称反 Hebbian）的 STDP 学习规则。

在后一种方法中，即方波脉冲方案，利用相互增强脉冲和相互偏移脉冲对相变区域温度的完美控制来实现各种 STDP。它更简洁，具有更高的效率，原因是两个尖峰共同作用有助于调节突触权重，由于方波脉冲设计简单，在大规模集成电路中可能更容易实践。然而，通过方波脉冲方案实现的 STDP 的生物学相似性还需要进一步的改进和证明，因此它尚未在实践中得到广泛的应用。

累积和可控的结晶过程使 PCRAM 实现硬件神经元和突触可塑性成为可能。高能耗和突发非定构的缺点可以通过优化突触架构、电路和算法来克服，尽管它是以增加系统复杂性为代价的。此外，作为存储应用的一个关键优点，在过去的几十年里一直在追求高相变速度，这与神经启发计算中对连续多层电导响应的要求形成了对比。通过材料工程提高相变可控性可以考虑为简化电路和最小化系统需求的另一种方法。

高可靠性、低能耗和多级电导率是 PCRAM 对一个高效和高性能的神经启发计算硬件的基本设备要求。设备的可靠性主要涉及稳定的写 - 擦除操作、速度、保留性和耐久性。PCRAM 的可靠性差通常是由于结晶或非晶化后活性区热稳定性差，原子重排不稳定。能源消耗是神经启发计算硬件的一个关键问题，这主要与高功率重置操作、相变材料的熔点高，以及集成硬件中选择性器件的功耗有关。

多能级电导变化的能力与电导的连续可控性有关，以实现可靠的突触模拟。高结晶温度、晶粒细化和稳定的晶格常数在材料工程基本评价中发挥了至关重要的作用。据报道，基于 Ga-Sb-Ge 的 PCRAM 能够达到 10 年的高耐力周期和保留超过 10 年。此外，掺杂工程导致成核种子的抑制和缺陷的增加，进而导致结晶缓慢和可控。例如，C 掺杂的 GST，N 掺杂 GST，O 掺杂的 Ti-Sb-Te 等，具有可控的多层电导和良好的器件可靠性。还可以通过优化材料组成以降低熔点来降低能耗，嵌入二维材料作为隔热屏障，以及使用石墨烯和碳纳米管等新材料作为电极。

对于非易失性存储器实现 SNN 算法，突触权值是指器件的电导率。线性和对称电导响应（电导的增加和减少）有望实现与传统的计算机科学导向神经网络相当的高精度，后者包含由数学模型初始化的权重矩阵，关键要求是实现电导的微控制。然而，由于 PCRAM 的快速相变和独特的不对称切换机制，即集合的积累和复位的破坏，这一点很困难。对于 PCRAM 突触，目前只能实现具有相对线性和可控的电导响应的有限范围，导致精度严重下降。

材料工程在减缓结晶以提高 PCRAM 电特性的对称性方面起着至关重要的作用。例如 C 掺杂剂已被证明可以使 GST 中 Ge-Te 四面体无序，从而阻碍了晶粒的形成。

掺杂的 Ti-Sb-Te 在相同的脉冲下进行线性电阻调制。这些演示在突触模拟中具有良好的调节电导的潜力。可编程激励技术，如可编程脉冲方案以及方波脉冲方案，已被证明是提高电导响应线性和对称性的有效方法，即使材料工程有时不能达到预期一致性。然而，随着方案复杂度的提升，这一方案带来的提升正日益达到瓶颈。应进一步注重材料研究，提高相变的可控性，降低编程刺激工程的复杂性。

在模拟神经突触可塑性方面，阻变存储器件有着相似的阈值转变特性和高密度集成能力，同样可以实现脉冲神经网络阵列计算（图 9-5）。

神经网络另一个重要行为就是神经元的激活，同样可以由阻变存储器件实现。图 9-6 展示了

一种基于 Ag/SiO₂/Au 阈值开关忆阻器的集成和激发人工神经元，该神经元显示了基于动作电位计算的四个关键特征：动作电位的全有或全无尖峰、阈值驱动尖峰、不应期和强度调制频率响应。

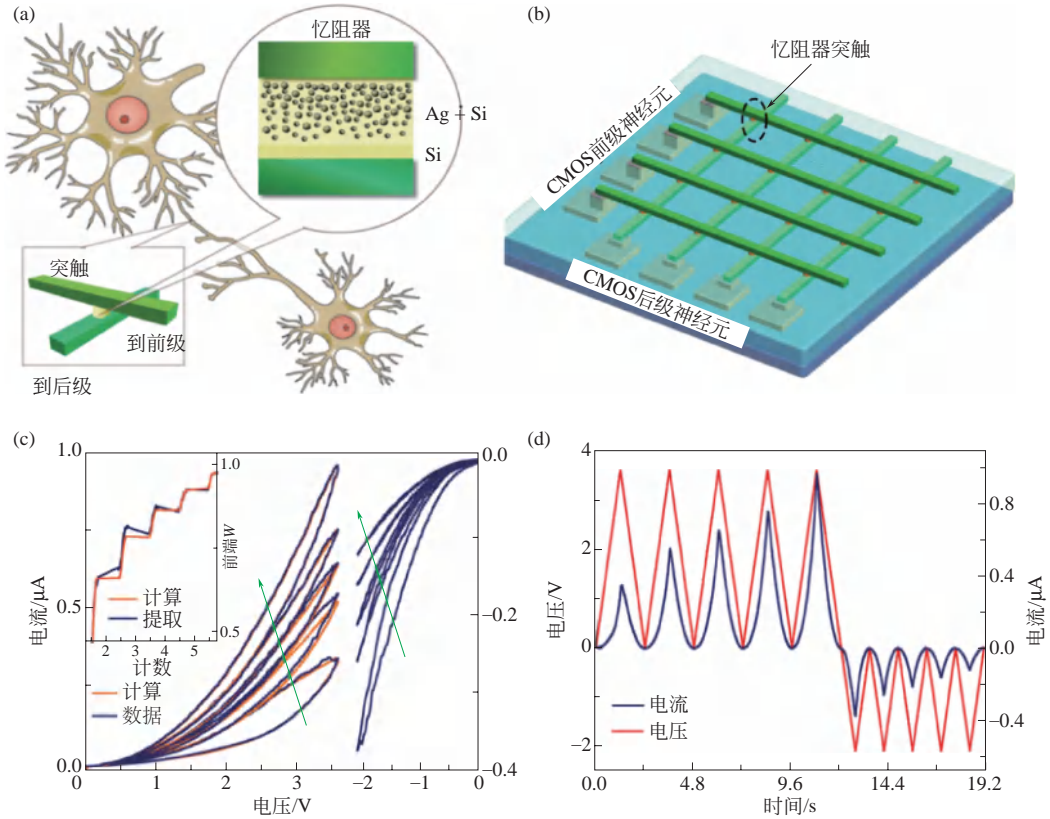


图 9-5 利用阻变存储器件模拟突触可塑性而实现的仿生突触^[51]

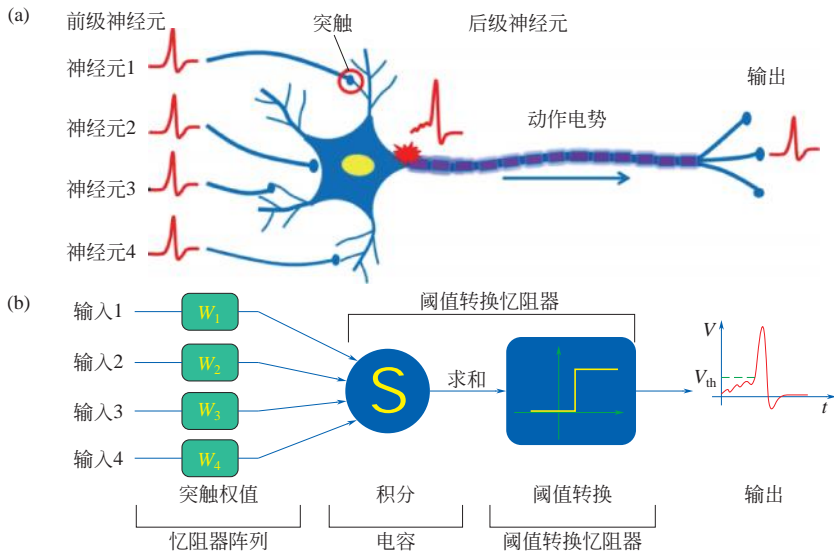


图 9-6 阻变存储器件实现神经元激活行为模拟^[52]

目前,传感器产业已被国内外公认为具有发展前景的高技术产业,它以技术含量高、经济效益好、渗透力强、市场前景广等特点为世人所瞩目。我国工业现代化进程和电子信息产业以 20% 以上速度高速增长,带动传感器市场快速上升。

随着新一代信息技术的发展,人工智能、物联网、无人平台等新技术的发展,对传感器材料与器件提出了新的要求和挑战。新一代传感材料与器件技术体现出零功耗、无线按需唤醒连接、多维信息集成、智能化组网等发展趋势。随着新一代信息技术与智能制造工程项目的不断落地,我国智能传感器市场将会迎来爆发式增长的快速发展期。

我国从 20 世纪 60 年代开始涉足传感器研发制造领域,“八五”期间,我国将传感器技术列为国家重点科技攻关项目,建成了“传感器技术国家重点实验室”“国家传感器工程中心”等研究机构,并将 MEMS 等研究项目列入了国家高新技术发展重点。与此同时,我国在传感器发展方面的问题也日益突出。我国虽然传感器企业众多,但大都面向中低端领域,技术基础薄弱,研究水平不高。许多企业都是引用国外的芯片加工,自主研发的产品较少,自主创新能力薄弱,在高端领域几乎没有市场份额。

总体来看,目前我国已有 1300 余家单位从事传感器材料与器件的研制、生产和应用,高等院校、科研机构都有不同程度涉及传感器材料与器件研发和小规模生产。国内传感器市场保持快速增长,年均增长速度超过 20%。在未来面向 2035 年的国家科技战略布局中,传感材料与器件领域应坚持科技自立自强,以战略性新兴产业、国家重大战略需求、生命健康保障等方向为牵引,系统布局和实施国家重点研发计划,抓住新的发展机遇,尽快掌握前沿核心技术,占领高端产品市场。

在先进智能传感材料制备、器件设计与研发进程中应进一步加强应用基础研究,建立学科交叉融合研发平台,加强传感材料与器件前沿交叉领域部署,重点关注新兴二维材料、超材料、有机框架材料、柔性材料以及拓扑量子材料的研发,鼓励开展前沿材料基础物理、化学性能的探索研究。

当前技术水平下的传感材料与器件系统正向着微型化、智能化、多功能化和网络化的方向发展。随着 CAD 技术、MEMS 技术、信息理论及数据分析算法的继续向前发展,未来的传感器系统必将变得更加微型化、综合化、多功能化、智能化和系统化。未来我国将进一步加强国家战略科技力量的统筹规划,集中优势力量攻关高端传感材料与器件技术的“卡脖子”难题。开展跨学科产学研用协同创新,开发新型传感材料,推进设计与制造工艺的深度结合,形成系统的具有自主知识产权的传感器制备、加工、设计、仿真、软件处理等技术。在此基础上开展以未来物联网需求为导向,以市场为目标的颠覆性技术研发,解决技术瓶颈背后的核心科学问题,实现物联网关键传感材料与器件科技自立自强。

参考文献

- [1] ITU Internet Reports 2005: The Internet of Things. <https://www.itu.int/pub/S-POL-IR.IT-2005>.
- [2] 中国电子报、电子信息产业网《大力发展智能传感材料与器件》. <http://m.cena.com.cn/industrynews/20210209/110604.html>.
- [3] 蔡奇. 新型锗纳米线生物传感器的研究与应用[D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [4] 施立琦. 环境污染物气相检测用荧光传感材料的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [5] 陈鑫. 室温有毒气体传感器的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [6] 龙亮. 基于磁膜扭转的 MEMS 磁传感器研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [7] 王军诚. 三轴集成加速度传感器及其 SIP 微模块集成的研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
- [8] 张珊. 基于蚕丝蛋白水凝胶的可控降解柔性力学传感器[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.
- [9] 左青云, 刘明, 龙世兵, 等. 阻变存储器及其集成技术研究进展[J]. 微电子学, 2009(04): 100-105.
- [10] 赵鸿滨, 屠海令, 杜军. 非易失性阻变存储器研究进展[J]. 稀有金属, 2012(03): 154-163.
- [11] 潘志勇. 基于 HfO₂ 的 RRAM 阻变特性研究[D]. 合肥: 安徽大学, 2017.
- [12] 刘记朋. 基于 RRAM 阵列的神经形态计算训练电路设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [13] 李志军, 曾以成, 李志斌. 改进型细胞神经网络实现的忆阻器混沌电路[J]. 物理学报, 2014, 63(1): 10502.
- [14] 张丽. 磁隧道结模型及自旋转移力矩磁随机存储器设计技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [15] Tang G, Yan J, Gu Y, et al. Construction of short tandem target mimic (STTM) to block the functions of plant and animal microRNAs[J]. *Methods*, 2012, 58(2): 118-125.
- [16] 汪昌州, 翟继卫, 姚熹. 基于相变存储器的相变存储材料的研究进展[J]. 材料导报, 2009, 23(8A): 96-102.
- [17] 邓志欣, 甘学温. 相变存储器简介与展望[J]. 中国集成电路, 2005, 71(4): 48-51.
- [18] Hady F T, Foong A, Veal B, et al. Platform Storage Performance With 3D XPoint Technology[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2017, PP(99): 1-12.
- [19] Newsroom I. Intel and Micron produce breakthrough memory technology[DP]. 2015.
- [20] Koo J M, Seo B S, Kim S, et al. Fabrication of 3D trench PZT capacitors for 256Mbit FRAM device application[C] // IEEE International Electron Devices Meeting, 2005. IEDM Technical Digest. Washington: DC, 2005, 4-343.
- [21] Böschke T S, Müller J, Bräuhäus D, et al. Ferroelectricity in hafnium oxide thin films[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(10): 102903.
- [22] Trentzsch M, Flachowsky S, Richter R, et al. A 28nm HKMG super low power embedded NVM technology based on ferroelectric FETs[C] // 2016 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco: 2016, 11.5.1-11.5.4.
- [23] Breyer E T, Mulaosmanovic H, Mikolajick T, et al. Reconfigurable NAND/NOR logic gates in 28 nm HKMG and 22 nm FD-SOI Fe FET technology[C] // 2017 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco: 2017, 28.5.1-28.5.4.
- [24] Lapedus M. A New Memory Contender?[EB/OL]. <https://semiengineering.com/a-new-memory-contender/>, January 2, 2018.
- [25] Luo Q, Cheng Y, Yang J, et al. A highly CMOS compatible hafnia-based ferroelectric diode[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1-8.
- [26] Miao H, Strachan J P, Li Z, et al. Dot-product engine for neuromorphic computing: programming 1T1M crossbar to accelerate matrix-vector multiplication.[C] // IEEE. IEEE, 2016.
- [27] Shafiee A, Nag A, Muralimanohar N, et al. ISAAC: A Convolutional Neural Network Accelerator with In-Situ Analog Arithmetic in Crossbars[C] // *Acm/IEEE International Symposium on Computer Architecture*. IEEE Computer Society, 2016.
- [28] Zhao J, Shuang C, et al. PRIME: A Novel Processing-in-memory Architecture for Neural Network Computation in ReRAM-based Main Memory[J]. *Computer architecture news*, 2016.
- [29] Song L, Qian X, Hai L, et al. PipeLayer: A Pipelined ReRAM-Based Accelerator for Deep Learning[C] // 2017 IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA). IEEE, 2017.
- [30] Ambrogio S, Narayanan P, Tsai H, et al. Equivalent-accuracy accelerated neural-network training using analogue memory[J]. *Nature*, 2018; 558(7708).
- [31] Feinberg B, Vengalam U, Whitehair N, et al. Enabling Scientific Computing on Memristive Accelerators[C] // *Acm/IEEE International Symposium on Computer Architecture*. IEEE Computer Society, 2018.
- [32] Song L, Zhuo Y, Qian X, et al. GraphR: Accelerating Graph Processing Using ReRAM[C] // IEEE

- International Symposium on High Performance Computer Architecture. IEEE Computer Society, 2018.
- [33] Li S, Cong X, Zou Q, et al. Pinatubo : a processing-in-memory architecture for bulk bitwise operations in emerging non-volatile memories[C] // the 53rd Annual Design Automation Conference. IEEE, 2016.
- [34] Xie L, Nguyen H, Yu J, et al. Scouting Logic : A Novel Memristor-Based Logic Design for Resistive Computing[C] // Vlsi. IEEE, 2017.
- [35] Lebdeh M A, Abunahla H, Mohammad B, et al. An Efficient Heterogeneous Memristive XNOR for In-Memory Computing[J]. Circuits and Systems I : Regular Papers, IEEE Transactions on, 2017: 1-11.
- [36] Imani M. MPIM: Multi-Purpose In-Memory Processing Using Configurable Resistive Memory[C] // IEEE Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC). IEEE, 2017.
- [37] Sim J, Kim M, Kim Y, et al. MAPIM : Mat Parallelism for High Performance Processing in Non-volatile Memory Architecture[C] // 2019 20th International Symposium on Quality Electronic Design (ISQED). 2019.
- [38] Wang Q, Niu G, Ren W, et al. Phase Change Random Access Memory for Neuro-Inspired Computing [J]. Advanced Electronic Materials, 2021: 2001241.
- [39] Schmitt S, Klaehn J, Bellec G, et al. in 2017 Int [C]// Joint Conf. on Neural Networks (IJCNN), IEEE, Piscataway, NJ 2017.
- [40] Merolla P A, Arthur J V, Alvarez-Icaza R, et al. Science, 2014: 345, 668.
- [41] Uhlig R. Intel's Pohoiki Beach[Z]. <https://newsroom.intel.com/news/intels-pohoiki-beach-64-chip-euromorphic-system-deliversbreakthrough-results-research-tests/#gs.7ck8tt>.
- [42] Zhang W, Gao B, Tang J, et al. Nat. Electron. 2020, 3, 371.
- [43] Wu Y, Park K, Sen R, et al. in DaMoN'20: Proc. of the 16th Int. Workshop on Data Management on New Hardware, ACM, New York: 2020.
- [44] Wang Q, Niu G, Ren W, et al. Phase Change Random Access Memory for Neuro-Inspired Computing [J]. Advanced Electronic Materials, 2021: 7(6).
- [45] Hodgkin A L, Huxley A F, Soc P R. London, Ser. B 1952, 140, 177.
- [46] Tuma T, Gallo M L, Sebastian A. IEEE Electron. Device Lett. 2016, 37, 1238.
- [47] Huang H M, Yang R, Tan Z H, et al. Adv. Mater. 2019, 31, 1803849.
- [48] Tuma T, Pantazi A, Gallo M L, et al. Nat. Nanotechnol, 2016, 11, 693.
- [49] Burr G W, Shelby R M, di Nolfo C, et al. in 2014 IEEE Int. Electron Devices Meeting, IEEE, Piscataway, NJ 2014.
- [50] Sidler S, Pantazi A, Woźniak S, et al. in Int. Conf. on Artificial Neural Networks, Springer, Cham 2017.
- [51] Jo S H, Chang T, Ebong I, et al. Nanoscale Memristor Device as Synapse in Neuromorphic Systems[J]. Nano Letters, 2010, 10(4): 1297-1301.
- [52] Zhang X, Wang W, Liu Q, et al. An Artificial Neuron Based on a Threshold Switching Memristor[J]. IEEE Electron Device Letters, 2017: 1-1.



作者简介

宋志棠，中科院特聘研究员，国家万人创新创业领军人才、国家重点实验室主任、上海市技术发明一等奖（排名第一）、上海市自然科学一等奖（排名第一）、上海市领军人才、上海市科技精英提名、新世纪百万人才工程国家级人选、国务院特殊津贴、中科院院长特别奖导师、中国材料研究学会科学技术一等奖、中国新材料产业发展大会获“新材料成果转化奖”、中国工博会创新银奖。相变存储器（PCM）首席科学家，承担国家4个973、3个02专项等重大项目，搭建12英寸PCM专用平台（1.6亿元），具备Gb级开发能力，研制出我国第一款PCM芯片（上海市技术发明二等奖），并实现量产，创立八面体基元与三维限定相变理论（上海市自然科学一等奖），组建新安纳电子科技有限公司、新储集成电路有限公司，实现PCM芯片、电子级SiO₂磨料与IC抛光液成果转化。在*SCIENCE*等期刊发表论文500余篇，PCRAM方面发表的论文数量国际排名第一，被引用5470余次，H因子为30；出版相变存储器专著两部；申请发明专利381项，数量国内第一。

周夕淋，中科院上海微系统与信息技术研究所副研究员，2014年于中国科学院大学获得工学博士

学位，2014 至 2020 年先后在新加坡科技设计大学和德国马普学会微结构物理研究所从事下一代非易失性信息存储技术的研究工作。在 *Advanced Materials*、*Nature Communications* 等期刊发表论文 60 余篇，总引用 1600 余次，已获授权中国专利 8 项，美国专利 2 项。主持国家自然科学基金面上项目，上海市“浦江人才”计划项目，参与国家集成电路重大专项、国家 863 计划、973 计划、国家重点研发计划等项目。

陈小刚，正高级工程师，2002 年获博士学位。从事新存储技术应用研究，主要包括新存储架构、内外存融合、存储内计算等方向。主要承担 973 项目子课题和中科院重点研发项目子课题。参与国家重大专项、国家 863 计划项目、973 计划项目、上海市纳米专项课题等。在国内外学术刊物上发表论文 30 余篇，申请发明专利 30 余项，已获得 20 余项授权。

第 10 章

过滤分离关键膜材料

安全福 计艳丽

膜材料是膜分离技术发展的核心，涉及高分子化学、无机化学、材料科学等，多学科交叉融合促进了其快速发展。21 世纪以来，中国膜材料的研发取得了长足的进步，特别是“十三五”以来，我国膜材料产业取得了跨越性的发展。通过解决高性能膜原材料制备、分离膜微结构控制及其产业化应用等关键技术问题，在水资源、能源、环境、传统产业升级改造等重大领域实现了工业化应用。目前，我国已进入从膜产业大国向膜产业强国发展的关键期，面临的任務十分艰巨，机遇与挑战并存。

10.1

过滤分离膜材料及其应用概述

膜分离现象广泛存在于大自然和生物体内，在 19 世纪中叶 Graham 发现了透析 (Dialysis) 现象，人们才开始重视对膜分离的研究。最初，许多生理学家使用的是动物膜，直到 1864 年 Traube 成功研制了第一张人造膜——亚铁氰化铜膜。1960 年，Leob 和 Sourirajan 共同制造出了一种具有高盐截留率和高水渗透通量的醋酸纤维素 (CA) 反渗透膜，这使膜分离技术迅速由实验室走向了工业应用，这在膜分离技术发展过程中具有里程碑式的意义。半个多世纪以来，膜分离技术得到了长足的发展，目前在许多发达国家，已将膜分离技术列为优先发展的高新技术之一，并迅速实现其产业化。

膜分离是以选择性透过膜为分离介质，当膜两侧存在某种推动力（如压力差、浓度差和电位差等）时，原料侧组分选择性地透过膜，达到分离、提纯和富集的目的。膜的分类方法有很多，如根据膜的孔径及分离特性，通常可将膜分离划分为微滤、超滤、纳滤、反渗透、渗透气化和气体分离等。其中，含有纳米及其以上孔径的纳滤、超滤和微滤膜分离技术主要是以压力作为驱动力，通过孔径筛分原理对物质进行选择性的过滤膜技术。根据膜材料种类对过滤分离膜进行划分，可分为有机膜、无机膜、复合膜及混合基质膜等。膜分离作为

一种新的分离技术，与传统的分离方法（如蒸发、萃取、沉淀、混凝和离子交换等）相比较，具有能耗低、分离效率高、操作简单、运行成本低等优点。美国曾发表官方文件表示“18世纪电器改变了整个工业的进程，而21世纪膜技术将改变整个工业面貌”，强调了膜分离技术在工业发展中的重要性。著名化学与膜专家黎念之院士也曾指出：“谁掌握了膜技术，谁就掌握了化学工业的未来”。

我国膜分离技术的发展是从1958年对离子交换膜和电渗析的研究开始的。1967年开始全国海水淡化的大会战，这为我国膜技术的发展奠定了坚实基础。到了20世纪70年代，我国膜分离技术的研究进入了一个全面发展的阶段，相继开发出了电渗析、反渗透、纳滤、超滤和微滤等各种膜和膜组件。随着全球水资源、能源、环境及传统产业改造等领域问题日益凸显，进入20世纪90年代以来，迎来了我国膜技术发展的全盛时代，膜工业发展已初具规模，其中，微滤、超滤和纳滤等过滤分离膜技术产品逐步形成了自己的特色。上述过滤分离膜技术已广泛应用于饮用水净化、工业水处理、化工、电子、冶金等各个领域。2017年，全球膜产业总产值达到820亿美元左右；我国分离膜市场总产值接近2000亿元人民币，占全球总产值的35%左右。2019年，我国膜市场总产值接近2800亿元人民币；预计2022年我国膜产业总产值将超过3600亿元。“十三五”以来，我国膜工业总产值的年均增长率保持在15%左右，我国膜工业产能规模和产品性能均取得了重大进展。我国的膜产业规模虽已进入全球膜产业大国之列，但在膜原料、膜改性材料和高端产品发展等方面与发达国家相比仍有差距。因此，加大高端产品开发力度，大力发展具有自主知识产权的高端膜产品，突破瓶颈，全面提高我国膜产业发展水平十分重要且迫切。

10.2 / 微滤膜材料的发展及其战略需求

10.2.1 / 微滤膜分离原理及特点

微滤膜是膜分离技术中应用最早和应用范围最广的过滤膜之一，早在19世纪中叶就已经开始制备天然高分子聚合物微滤膜，随后在20世纪初研究者们开始了对微滤膜的系统研究，1907年Bechhold最早发表了关于微孔滤膜性质的系统研究报告。第二次世界大战期间德国Gottingen成立了世界上第一家微滤膜公司，战后英国、美国等也开展了对滤膜技术的研究，相继成立了工业生产机构。随着膜过滤技术的应用范围越来越广，市场对于商品化微滤膜的需求日益增多，推动了膜分离技术的快速发展^[1]。我国微滤膜的研究始于20世纪70年代中前期，20世纪70年代末形成了单品种少量的微滤膜产品。20世纪80年代初，国家海洋局杭州水处理技术中心，研制开发了孔径均一的分析用微滤膜。近年来，随着聚合物材料的不断开发以及对于制膜工艺和成膜机理的深入探究，微滤膜技术迅速发展，膜材料从最初的醋酸纤维素、硝酸纤维素（CN）拓展到多种聚合物材料、无机材料以及有机-无机复合材料等，微滤膜也逐渐被用于水处理、空气净化、油水分离、食品、医药分离等领域。

微滤（Microfiltration, MF）是以多孔膜为过滤介质，以流体静压力差为传质推动力，通

过筛机理截留大于膜孔的颗粒或大分子，透过水或小分子，从而实现去除杂质、澄清溶液和组分分离的一种压力驱动膜分离过程。一般认为微滤膜的有效孔径范围为 $0.1\sim 10\mu\text{m}$ ，依据微孔形态的不同，微滤膜可分为弯曲孔膜和柱状孔膜两种。弯曲孔膜是最常见的一类膜，膜内结构呈网络状，微孔为交错连接的曲折孔道。柱状孔膜中，微孔为近似平行排列且贯穿膜壁的圆柱状毛细孔。根据原料液性质、颗粒尺寸、膜材料性质以及孔道结构等不同，微滤膜截留颗粒的作用主要有以下几种形式：筛分截留、架桥截留、吸附截留。筛分截留是指微滤膜拦截比膜孔径大或与膜孔径相当的微粒，又称机械截留；架桥截留是指微粒互相堆积推挤，导致微粒无法进入膜孔或卡在孔中，以实现截留；吸附截留是指微粒通过物理或化学吸附作用被微滤膜吸附，尺寸小于膜孔的微粒也可被截留。微滤膜具有分离效率高、过滤速度快、吸附容量少等特点。由于微滤膜的孔径通常较为均一，所以微滤膜的过滤精度较高，可靠性较高；微滤膜的表面孔隙率高，一般可以达到70%，因此其过滤速度比具有同等截留能力的滤纸快40多倍；而且微滤膜较薄，液体被过滤介质吸附造成的损失非常小。

10.2.2 / 微滤膜材料及其制备方法

(1) 常规聚合物微滤膜

纤维素酯类是用于制备微滤膜的典型材料，主要包括醋酸纤维素(CA)、三醋酸纤维素(CTA)、硝酸纤维素(CN)、混合纤维素(CN-CA)、乙基纤维素(EC)等，具有成孔性能良好、亲水性好、可耐稀酸、材料易得、成本较低的优点。该类型的膜可通过相转化的方法制备，相转化法是制备微滤膜最常用的方法之一，是使聚合物从液相转变为固相的过程，该过程可通过溶剂蒸发、控制蒸发沉淀、热沉淀、蒸气相沉淀及浸没沉淀等方式来实现。其中，浸没沉淀是应用最广泛的一种方法，其基本操作是将适量的聚合物固体溶解在特定的溶剂中形成铸膜液，之后通过加入非溶剂实现溶剂与非溶剂的交换，使溶解的聚合物由液相转变为固相从而制备微滤膜。聚砜类膜包括聚砜(PSU或PSF)和聚醚砜(PES)微滤膜，该类膜具有良好的化学稳定性和热稳定性，且具有耐辐射、机械强度高的特点，主要也是通过浸没沉淀相转化法制备^[1]。

聚酰胺类材料是指主链上含有酰胺基团的聚合物，具有强度高、熔点高、对化学试剂(除强酸外)稳定的优点，同时该类材料具有良好的亲水性，在酮、酚、醚及高分子量的醇中不易被侵蚀，因此该类材料可用于制备过滤酮、酚、醚及高分子量醇溶液的微滤膜。聚酰胺膜是首先通过缩聚反应制得高分子聚合物，再采用相转化法制得。例如聚酰胺66微滤膜的制备是首先通过己二酸和己二胺缩聚得到高分子聚合物，然后将该聚合物溶解于甲酸或甲酸和四氯化碳的混合溶剂中，以聚乙烯吡咯烷酮(PVP)、聚乙二醇(PEG)为制孔剂，最后再通过溶剂蒸发法制得聚酰胺微滤膜。最近，Yuan^[2]等利用选择性激光烧结的方法制备了聚酰胺-12微滤膜，该成膜方法是采用红外激光器作为能源，将聚合物粉末材料加热铺平，激光束在计算机控制下根据分层截面信息进行有选择的烧结，聚酰胺粉末的层状沉积和烧结可以制成具有分离性能的薄膜。上述过程不同于传统的溶剂铸造方法，该技术无须使用溶剂，在降低生产成本的同时，还降低了环境污染。

含氟材料主要包括聚四氟乙烯(PTFE)、聚偏氟乙烯(PVDF)、聚三氟氯乙烯(PCTFE)

F3) 和聚氟乙烯 (PVF), 较为常用的是 PTFE 和 PVDF 两种聚合物^[3]。此类型材料制备的微滤膜有极好的化学稳定性, 可耐强酸、强碱和各种有机溶剂, 且在高温下具有较好的稳定性, 适用面广, 可用于过滤蒸气及各种腐蚀性液体。该类含氟聚合物可以通过相转化法和熔融拉伸法制备微滤膜。例如韩家心^[4]等以 PVDF 为膜材料, 聚乙烯吡咯烷酮为添加剂, DMF (二甲基甲酰胺)、DMAC(二甲基乙酰胺)为溶剂制备铸膜液, 将铸膜液浸渍在基材上, 通过气-液传质和液-液传质完成铸膜液的相转化, 并在连续化制膜机上制得无缺陷的用于气体除菌的高通量氟聚合物微滤膜。

聚碳酸酯类化合物硬而脆, 具有良好的尺寸稳定性、耐蠕变性、耐热性和电绝缘性, 主要用于制备孔径较均匀的核孔微滤膜^[5](图 10-1)。聚碳酸酯膜耐臭氧, 不耐碱、胺、酯及芳烃等, 可溶于二氯甲烷、甲酚、二噁烷等溶剂中。其厚度一般为 5~15 μm , 孔隙率较低。聚碳酸酯膜的流体过滤速度与前述几种膜相当, 但因该膜的制作工艺较为复杂且价格昂贵, 应用受到极大限制。该类型均孔膜的制备方法是先将高能粒子垂直作用于膜表面, 使膜表面及内部生成潜径, 之后用化学试剂浸泡刻蚀掉浸迹处的膜材料, 最后将此径迹扩大成不同形状的直孔以制备微滤膜。孔道形状有圆柱形、雪茄型、锥形、菱形等, 孔道形状及孔径大小受潜径区溶解速率和本体材料溶解速率的比值影响, 具体由辐照粒子的强度、辐照时间、刻蚀时间等制膜条件决定, 孔径范围一般为 0.02~10 μm , 孔隙率大约为 10%^[6]。据报道, 聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)、聚碳酸酯、聚偏氟乙烯、聚丙烯 (PP)、聚酰亚胺等可采用上述方法制备均孔微滤膜。

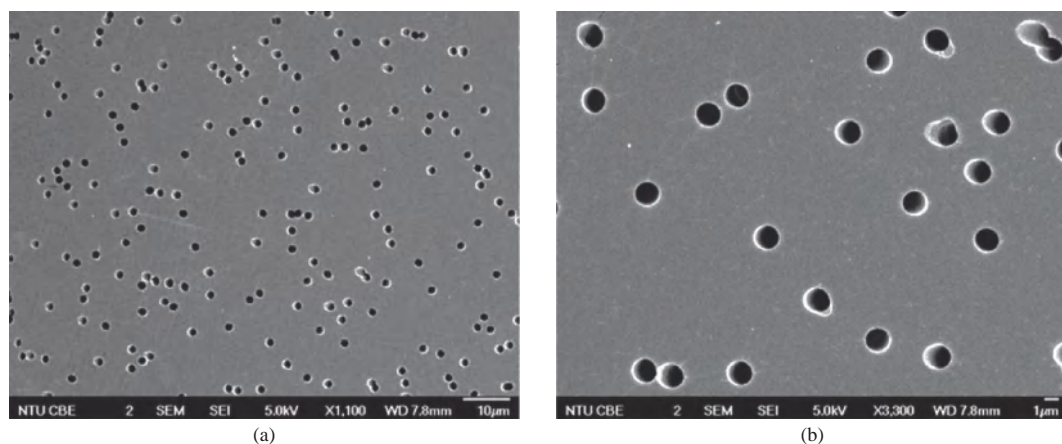


图 10-1 孔径尺寸不同的聚碳酸酯核孔微滤膜

聚烯烃类的微滤膜主要包括由聚丙烯、聚乙烯 (PE)、聚苯乙烯 (PS) 和聚丁烯 (PB) 等材料制备的微孔膜, 其中应用较多的是 PE 和 PP 微滤膜。该类膜具有良好的化学稳定性, 耐酸、碱和各种有机溶剂性, 且力学性能优良, 该类膜对气体有很高的渗透能力, 经溶胀后对液体也有很好的渗透性。该类膜可用熔融拉伸法制备, 成膜过程是将熔融的聚合物先在高应力下挤出原丝, 然后经过拉伸形成微孔。上述成膜过程不需要任何添加剂, 对环境无污染, 成本较低, 适合大规模的工业化生产 (图 10-2)。但是, 所得微滤膜孔径一般为 0.1~70 μm , 且孔径分布较宽, 截留效率较低, 膜分离精度有待进一步提升^[1]。另外, 针对部分烯烃类聚合物膜材料, 例

如含有丙烯酸反应活性单体的聚合物，可通过辐射固化的方法制备微滤膜^[7]，该方法是对丙烯酸类活性成膜组分的溶液进行涂层，在中压水银灯或电子束辐射下，丙烯酸树脂和活性单体在惰性非挥发性溶剂中进行聚合反应，同时相转化成为基于聚丙烯酸材料的微滤膜。

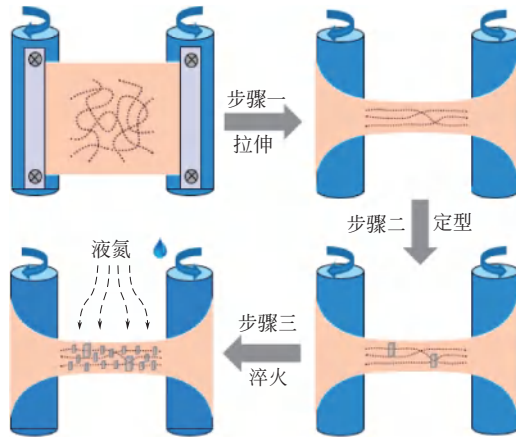


图 10-2 熔融拉伸法制备膜流程图^[8]

1994 年, Francois 等^[9]首次以聚苯乙烯苯撑嵌段聚合物为成膜材料, 利用呼吸图法成功制备了蜂窝状微孔膜。呼吸图法是将聚合物溶解于挥发性溶剂中, 在潮湿环境下滴涂于基底表面, 低沸点溶剂快速挥发制冷, 引起环境中的水滴冷凝至溶液表面, 溶液中的聚合物吸附或沉淀于水滴周围, 包裹水滴, 形成稳定的聚合物/水界面, 随后水滴继续生长排列形成二维或三维六边形阵列, 最终, 当溶剂与水滴完全挥发后, 得到了复刻水滴形状的聚合物有序多孔薄膜, 其制备示意图如图 10-3 所示。随着对呼吸图法成膜研究的不断深入, 逐渐将线形聚合物、星形聚合物、梳形共聚物、两亲性共聚物等一系列烯烃聚合物制备成有序微孔聚合物膜。

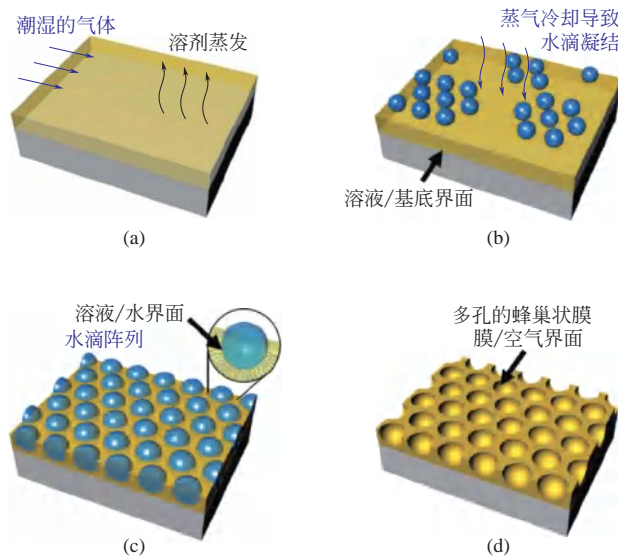


图 10-3 呼吸图法微滤膜制备示意图

(2) 新型聚合物微滤膜

•••

聚合物静电纺丝纳米纤维膜 (ENM) 作为一种新型的微过滤介质, 可高效和经济地去除水中 $0.2\mu\text{m}$ (甚至 $0.1\mu\text{m}$) 大小的污染物, 与传统的聚合物膜和陶瓷膜相比, 聚合物 ENM 通常具有高的孔隙率 (一般为 80% 左右)、大的有效比表面积和连续互通的孔隙, 这些特性使该类膜可在不牺牲溶质截留率的前提下有效提高溶剂渗透通量。Wang 等^[10] 以无纺布 @ 聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 为基底, 通过静电纺丝技术制备了高通量聚丙烯腈 (PAN) 微滤膜。除此之外也有研究者利用聚合物静电纺丝技术^[11,12], 制备了具有高效分离性能的 PVDF 微滤膜 (图 10-4)。Ma 等^[13] 采用自制的钢丝无针静电纺丝系统制备了聚氨酯 (PU) 纳米纤维微孔滤膜。

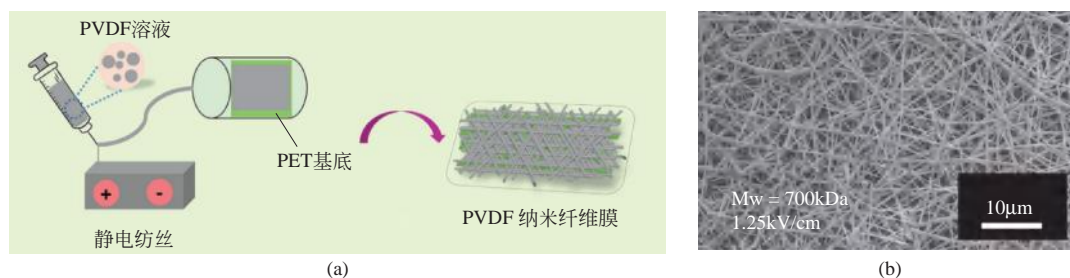


图 10-4 (a) 聚合物静电纺丝膜制备示意图^[13] (b) 静电纺丝 PVDF 膜 SEM 图

反相胶体晶体 (ICC) 微滤膜是近年来发展起来的, 其膜制备过程主要包括胶体晶体模板的制备、聚合物的填充和刻蚀胶体晶体模板三个基本步骤。具体制备步骤如下^[14,15]: 首先制备粒径大小均一、单分散性良好的胶体晶体微球, 如二氧化硅微球、聚苯乙烯微球等, 然后通过离心、重力沉积法对胶体晶体微球进行规整的垂直排列; 其次将聚合物注入到胶体晶体微球空隙中, 使胶体晶体微球被聚合物充分包覆; 最后通过化学反应、热处理和紫外照射等手段将胶体晶体微球刻蚀, 从而得到反相胶体晶体聚合物微孔膜。Wang 等^[16] 设计了一种由硅球自组装成胶体晶体模板的膜铸造槽, 所得到的紧密堆积的胶体晶体被反应性单体溶液浸渍, 聚合后, 硅球被刻蚀去除, 形成具有高孔隙率和均匀孔隙、高度互联的反相胶体晶体微滤膜 (图 10-5)。反相胶体晶体微滤膜具有孔径均一、孔隙率高、比表面积大等优点, 主要应用于生物制药工业中无菌过滤和病毒清除等分离纯化过程。

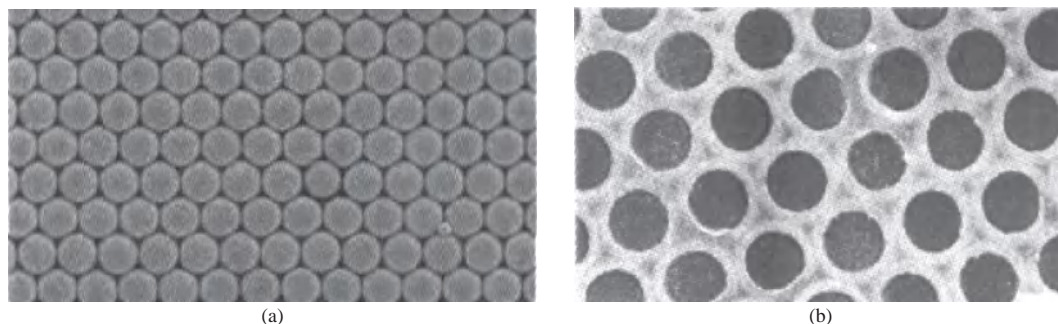


图 10-5 (a) 胶体晶体模板图 (b) 刻蚀后得到的微孔膜^[17]

通过向自然学习,模拟自然界中生物体的矿化过程对膜进行修饰,在膜表面或膜孔壁面构建功能性无机矿物层是目前在高性能分离膜制备领域的研究热点之一。Liao等^[18]通过紫外诱导接枝的方法在聚丙烯纤维微孔膜表面固定聚丙烯酸,丙烯酸功能基团可促进碳酸钙矿化过程的进行。由于碳酸钙矿化层具有结构粗糙、高表面能和强极性的特点,可在膜表面迅速形成水合层,大大提高改性膜的水浸润性。上述所得超亲水、水下超疏油的聚丙烯/碳酸钙复合纤维膜,在废水处理、油水分离等领域显示出良好的应用前景。Gao等^[19]以PAAS-g-PVDF为成膜材料,通过相分离法制备了抗污染性油水分离膜。该膜水下原油接触角为 172° ,处理原油/水混合液(体积比1:1)时通量高达 $50000\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$,透过液原油含量仅为 0.5ppm (1×10^{-6})。Hu等^[20]以光热响应超薄金纳米棒与聚(*N*-异丙基丙烯酰胺-丙烯酸酰胺)改性单壁碳纳米管制备了多孔膜,其制备过程如图10-6所示。该膜具有超亲水、水下疏油的特性,油接触角为 132° ,用于分离表面活性剂稳定的纳米乳液,具有较好的分离性能,最大通量可达 $35890\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ 。另外,由于热响应性共聚物和金纳米棒的引入,可以通过光照来简便地调节膜水通量,且其对油水混合物具有高达99.99%的分离效率。

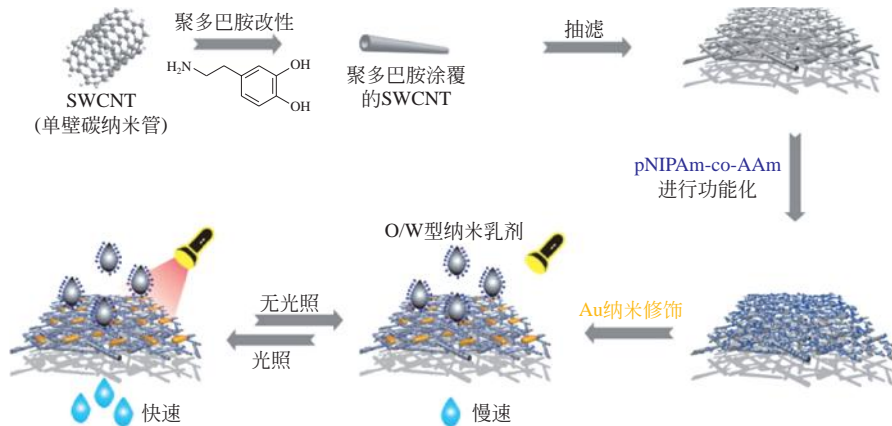


图 10-6 光热响应性纳米的制备以及用于油水分离的过程

(3) 无机微滤膜

除上述有机聚合物微滤膜外,氧化铝(Al_2O_3)、氧化锆(ZrO_2)、氧化钛(TiO_2)、玻璃纤维、各类金属(不锈钢、钨、钨、银等)等无机材料是近年来备受关注的新型微滤膜材料。

无机膜中氧化铝陶瓷膜、氧化锆陶瓷膜和玻璃膜的研究最多,且均已实现规模化制备,得到了工业化应用。陶瓷膜具有耐高温(可在 $1000\sim 1300^\circ\text{C}$ 下使用)、耐有机溶剂侵蚀、耐生物降解的优点,尤其对于高温环境的气体分离和膜催化反应器及食品加工等行业,具有良好的应用潜力。该类膜通常采用烧结法制备,首先将无机材料的粉末压制成型,然后在一定条件下烧结得到微孔滤膜。所得膜的孔径受原料粉体的粒度及烧结温度的影响,孔径一般为 $0.1\sim 10\mu\text{m}$,孔隙率为 $10\%\sim 20\%$ 。此外,还有研究者提出通过阳极氧化的方法在金属铝表面生成多孔氧化铝薄膜的研究思路。该方法是将高纯度的铝箔置于酸性电解液中进行电解阳极氧化,在氧化过程中金属箔的一侧形成多孔氧化层,另一侧金属被酸溶解,对多孔氧化层进

行热处理便得到多孔氧化铝膜。目前该方法仅限于实验室内进行研究, 还难以进行大规模制备^[21]。与有机高分子微滤膜相比, 无机微滤膜在耐高温及腐蚀性工业化分离过程中发挥着极其重要的作用。然而, 无机微滤膜仍存在不耐强碱、韧性差、弹性小、加工成型及组件安装难度较大等缺点, 需要进一步对其成膜材料及膜制备过程进行改进优化。 Al_2O_3 陶瓷膜 SEM 图见图 10-7。

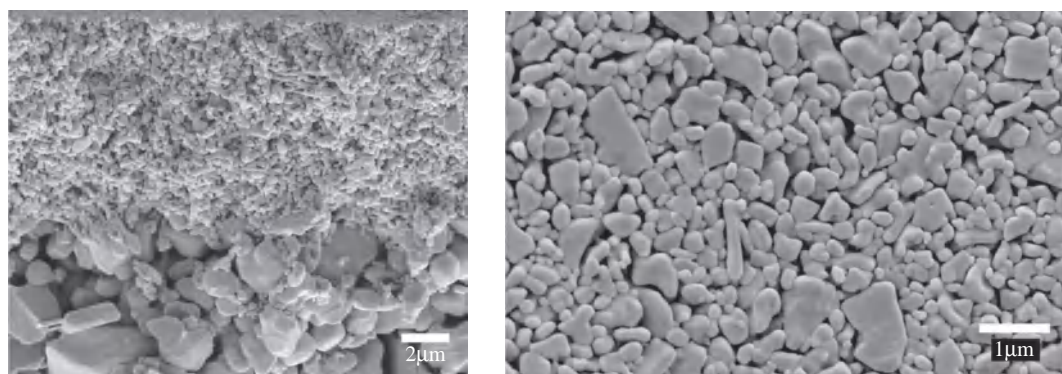
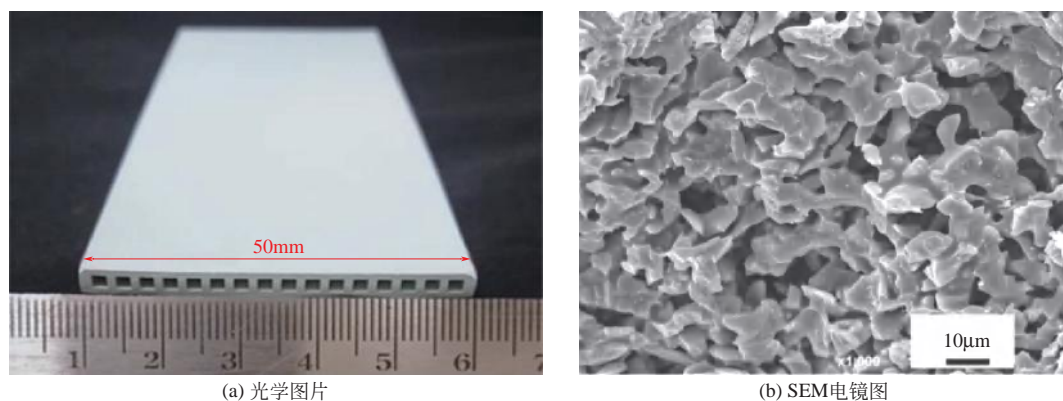


图 10-7 Al_2O_3 陶瓷膜 SEM 图^[22]

多孔碳化硅 (SiC) 材料由于机械强度高、耐化学性强、热导率高、热胀系数低、抗热震性强等特性而成为一种重要的无机膜材料。通常, 多孔碳化硅陶瓷膜是通过在惰性气氛中加热其粉末并压块制备所得。Bukhari 等^[22] 通过氧化结合技术制备了多孔 SiC 微滤膜, 其以薄涂层的形式覆盖在多孔支撑体上 (图 10-8)。所制备的 SiC 微滤膜具有良好的亲水性, 可用于水处理, 且表现出高的水渗透性。Chong 等^[23] 制备了一种新型的含 Ti-40Al-10Nb-10Cr 的多孔合金微滤膜, 该微滤膜通过烧结和化学气相沉积法所制备。



(a) 光学图片

(b) SEM 电镜图

图 10-8 平板多孔 SiC 微滤膜

Zhang 等^[24] 报道了一种特殊的无机网状膜, 是在无机纳米片中引入磷酸铜, 由于磷酸铜的层次化结构和强水化能力, 所得无机网状膜表现出优越的亲水性、水下抗油污和抗生物污染的性能。该无机膜的水下油接触角为 158° 以上, 水下油黏附力接近 0, 膜渗透通量始终稳

定在 $4000\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ ，滤液中的含油量低于 2ppm 。Gao 等^[25]通过溶胶-凝胶法将 TiO_2 包覆在 SWCNT 超薄膜上制备了具有超亲水和水下超疏油性能的 SWCNT/ TiO_2 超薄纳米复合膜，可以超快分离水包油乳液，其通量高达 $30000\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ ，比分离性能相近的商品化过滤膜高出两个数量级，并且在多次循环中表现出优异的抗污染和自清洁性能。Zhang 等^[26]采用碱性氧化法制备了一种由氢氧化铜纳米线和铜网组成的无机膜，其水接触角接近零，水下油接触角约为 155° ，仅靠重力驱动即可实现油水分离。最佳条件下制得的无机膜在处理正己烷/水和大豆油/水混合物时通量高达 $158000\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ 和 $127000\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ ，透过液的含油量均低于 30ppm ，表现出超高分离效率。

10.2.3 / 微滤膜过滤分离应用

(1) 微滤膜应用于空气净化

雾霾污染对人们的生活质量以及人体健康有着严重的影响， $\text{PM}_{2.5}$ 是指空气中空气动力学当量直径小于等于 $2.5\mu\text{m}$ 的颗粒污染物，会对人体造成不同程度的损伤。目前，通过静电纺丝技术制备的纳米纤维过滤膜可对直径在 $0.3\mu\text{m}$ 以下的颗粒进行有效去除，其过滤效率高达 99% 以上。用于空气过滤的纳米纤维膜材料有聚丙烯腈、聚酰胺、聚碳酸酯、聚醚砜等。纳米纤维微滤膜通过孔径筛分作用对颗粒进行去除，其过滤效率不会因为湿度变化而降低，因此可以满足特定工作环境的应用需求^[27]。纳米纤维的直径很小，有较高的表面能，增强了纤维的阻隔性和吸附能力，因此也可以用于生产多功能防护服。

花粉是一种常见的致敏原，会使过敏患者产生不适的症状，因此针对特殊过敏人群进行花粉防护具有重要意义。花粉过滤器是一种空气净化器，可有效过滤蒿草、葎草、豚草、圆柏等多种致敏花粉，聚乙烯亚胺和聚碳酸酯纤维等材料制备的微滤膜可以作为过滤器的滤芯实现对花粉颗粒的截留。另外，生物制药和医疗用无菌空气的制备需要经过多个过滤单元来完成，例如以除尘-除菌-除病毒的过滤系统为主要结构的空气除菌过滤工艺，其中除菌过滤是最为核心的步骤，常用的滤膜为疏水的聚四氟乙烯微滤膜。

化工企业的污染排放是造成大气污染的重要原因之一，在此过程中会产生大量的化学污染物，例如 VOC、粉尘等，因此工业烟气净化对于大气污染物的治理起着重要的作用。膜分离技术在燃煤锅炉尾气净化、生物质锅炉尾气净化、多晶硅烟气净化等工业烟气净化中均有重要的作用。例如在生物质锅炉尾气的净化中，由于生物质燃烧后烟气中粉尘具有密度小、浓度高的特点，传统除尘技术对其去除率较低，不能满足排放要求，而采用微滤膜技术净化后，气体中颗粒物浓度在 $5\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，去除效果十分显著^[28]。膜分离技术对化工生产过程中所产生的烟气净化效率高于 99.99%，除尘器出口细颗粒物排放浓度可低于 $5\text{mg}/\text{m}^3$ ，运行阻力比传统滤料低 $200\sim 300\text{Pa}$ ^[29-31]。传统除尘工艺和膜法除尘工艺示意图如图 10-9 所示。

(2) 微滤膜应用于水处理

电子工业中需要使用高纯水，纯水的质量对半导体器件、显像管及集成电路的成品率和产品质量有极大的影响，因此制备高质量的超纯水对于电子工业有重大的意义。微滤膜在纯

水制备中的应用首先是在反渗透和电渗析前用作保安过滤器以去除细小的悬浮物质(图 10-10),滤芯可用聚丙烯微滤膜,孔径为 $3\sim 5\mu\text{m}$,其次是在离子交换后用于去除离子交换树脂碎片,所用微滤膜孔径在 $0.2\sim 0.5\mu\text{m}$ 。另外,纯净水生产中最重要的是灭菌,纯净水中不能含有任何消毒剂、防腐剂,此时细菌在纯净水中易于大量繁殖,微滤膜可用于去除纯净水中的细菌。微滤膜也可应用于矿泉水的生产中,对于胶体、微粒含量较少、水质稳定的矿泉水水源,可利用微滤膜进行净化处理。

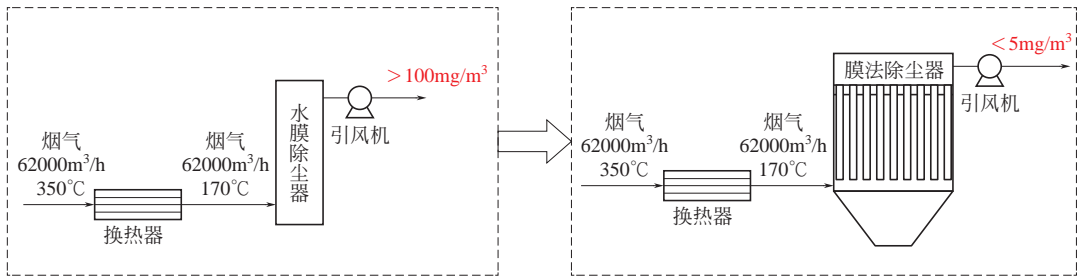


图 10-9 传统除尘工艺和膜法除尘工艺示意图^[28]

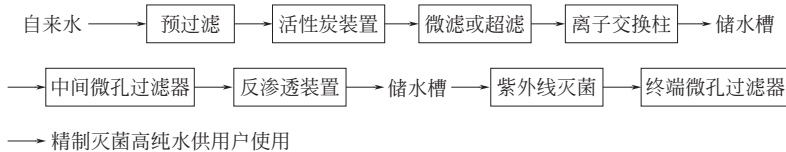


图 10-10 高纯水制造系统流程图^[32]

微滤膜技术在市政污水和工业废水处理中扮演着重要的角色,人们将微滤膜技术与生物技术耦合构成膜生物反应器(MBR),广泛应用于废水处理。在城市污水或废水处理中,传统的处理工艺(格栅+沉砂池+初沉池+曝气池+二沉池+消毒池)流程较长,占地面积大,出水水质得不到保证。而MBR工艺则因流程短、占地面积小、处理水量灵活等特点,呈现出明显优势(图 10-11)。目前常用的水处理微滤膜主要有PP、PVDF等制成的微滤膜。例如将PP微滤膜用于工业冷凝水深度处理的前置过滤,可以有效去除冷凝水中铁、铜氧化物等悬浮杂质,保证精密过滤树脂不被污染,延长水处理系统的运行周期。

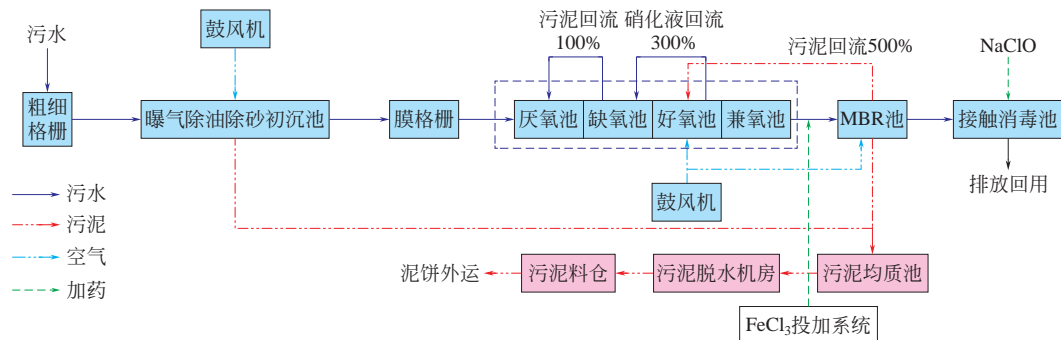


图 10-11 污水处理 MBR 工艺流程图^[33]

(3) 微滤膜应用于油水分离

来自石油、化工、食品加工等行业的含油废水严重危害着生态环境，含油废水中含有大量的难降解有机物，且成分复杂，较难治理，因此也引起了研究者的广泛关注。混合在水中的油具有不同的形式，如脂肪、碳氢化合物和石油产品，且根据油滴粒径可以将其分为浮油、分散油、乳化油和溶解油等^[33]，其中乳化油由于具有较高的稳定性和较小的粒径最难处理。微滤膜分离技术适用于含油废水处理，可以通过调节微滤膜材料的亲/疏水性质以及亲/疏油性质来实现油水分离（图 10-12）。微滤膜分离技术主要用于分离含油废水中粒径小于 100 μm 的分散油。含油废水极易引起聚合物微滤膜污染，采用化学改性、物理共混等方式可以改善膜的抗污染性质，增强膜的分离性能，从而实现高效的油水分离。在处理油漆厂废水中的分散油时，常采用 PVDF 微滤膜进行过滤，但 PVDF 膜疏水性很强，在油水分离过程中易造成严重的膜污染问题。因此，需要通过表面亲水改性的方法提升 PVDF 微滤膜的水通量和防油抗污性能，使油水分离过程更加高效。处理生活含油污水时常采用聚醚酰亚胺（PEI）、聚氯乙烯（PVC）或 PVDF 制备的微滤膜，但由于其极易发生膜阻塞及膜表面污染现象，可采用物理共混改性的方法增强膜的亲水性与孔隙率，从而提高膜的亲水疏油性能，进行高效油水分离。

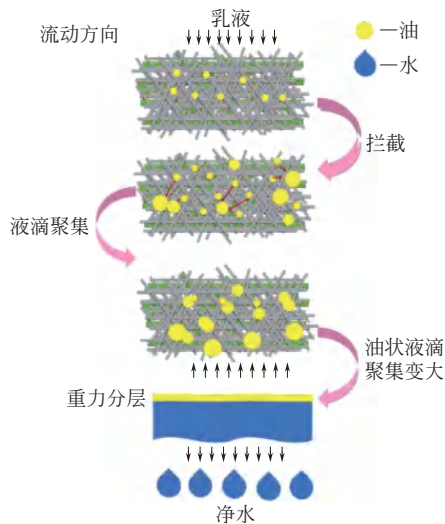


图 10-12 PVDF 膜对水包油乳液的分离过程^[34]

(4) 微滤膜应用于食品加工

相对于传统热蒸发分离操作，微滤膜分离技术具有高效节能、无相变、可常温下进行等优点，且不使用化学试剂就可实现微生物的去除，最大程度地保存食物原有的风味及营养成分，因此微滤膜分离技术在食品工业中备受青睐。例如将其用于啤酒生产的预处理，以除去颗粒和大分子胶体物质，最后以微滤膜除菌作为终端过滤，用以除去悬浮物、酵母和微生物等来保证啤酒独特的口感、风味和新鲜度^[1]。王守忠等^[35]利用聚碳酸酯微滤膜及聚酯微滤膜

对啤酒除菌效果进行了研究,结果表明,利用 $1.0\mu\text{m}$ 孔径的核孔微滤膜可绝对截留啤酒酵母;用 $0.4\mu\text{m}$ 孔径的核孔微滤膜可绝对截留大肠杆菌,使啤酒获得很好的生物稳定性,存放期可达 2 个月以上,具有较好的工业应用前景。

微滤膜也可应用于乳制品和果汁的生产中,陶瓷微滤膜被大量用于牛奶和乳清的生产过程中,以实现牛乳除菌、浓缩和乳清蛋白回收。在果汁澄清和浓缩的生产中,微滤膜可以有效地提高果汁的质量,降低处理成本。无机微滤膜在处理果汁的过程中,温度始终保持在 10°C 以内,此温度变化对澄清果汁的营养成分和口感风味不会产生影响。除了在上述提到的饮品中应用,微滤膜技术也可应用于各种各样的食品配料的制造过程中,例如在甜味剂、明胶、香精、酱油等发酵产品的制造过程中,微滤膜发挥了极为重要的作用。

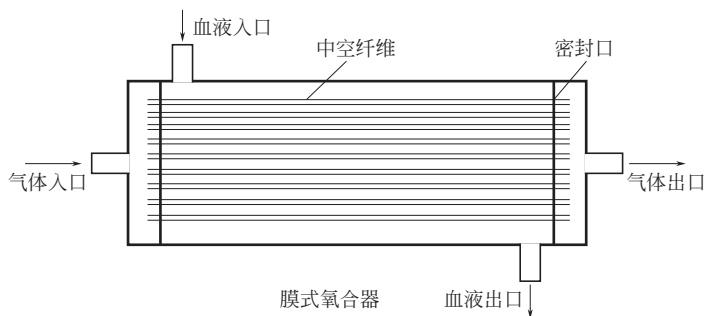
(5) 微滤膜应用于药物分离、医疗保健领域

•••

在制药工业中微滤膜主要用于注射用水制备、中药提取液的微细絮状物的澄清分离、药物原液及其制剂的除菌除杂、活性炭脱色液残留物的清除以及制药生产废水的综合治理等。药物原液及其制剂的除菌除杂主要分为三个步骤,即前处理—预处理—终端除菌过滤,其中微滤膜主要用于预处理阶段,在预处理过程中由于污染物量多且颗粒粒径较大,因此多采用强抗污性的过滤膜材料,例如聚丙烯微滤膜等。而对于中药注射剂而言,由于存在植物蛋白、多糖、胶体微粒等物质,预处理中常选用多层的聚丙烯微滤膜,而终端除菌时选用聚醚砜微滤膜。

在医药和医院中液体灭菌是最为重要的过程之一,传统的灭菌方法一般为热压灭菌,该方法对热敏性药物不适用,并且杀死的细菌尸体仍保留在药液中。而微滤膜技术可以除去大多数的细菌和微生物,且适合热敏性药物的除菌过滤^[36]。除对药液的灭菌外,医院的自来水也需要进行除菌操作,其主要采用双层 $0.2\mu\text{m}$ 除菌微滤膜,通过基于 ASTM F 838 的细菌挑战实验,可以方便快速地为广大患者、医护人员提供除菌级别用水,降低感染风险。微滤膜在医用输液过滤中也充当着重要的角色,国内目前采用终端过滤器的方式来截留输液器中的微粒,临床使用的微滤膜材料主要有聚丙烯无纺布膜、聚酯核孔膜、混合纤维素膜及尼龙膜^[37]。

微滤膜也被用作氧气呼吸系统过滤器,为重症监护室以及呼吸系统障碍的病人提供高质量的气体,除去空气中所携带的病毒、细菌、颗粒等物质。市面上常用的是深层过滤型滤材,如超细聚丙烯纤维熔喷滤材、陶瓷纤维滤材等,具有气阻低且纳污量大的特点,能较好地满足医用需求。人工肺(ECMO)是一种代替人体肺脏排出二氧化碳、摄取氧气的人工器官,具有人肺功能,是一种可在膜两侧进行气体和血液之间交换的分离装置^[38],其示意图如图 10-13 所示。人工肺的核心部件是放置在血流中的微孔纤维膜,用于该过程的理想膜材料需要有较好的气体通透性、较低的血液透过性及较好的血液相容性^[39]。常用的高分子膜材料有硅橡胶、聚乙烯、聚酯、聚丙烯等。除此之外关于新型人工肺膜材料的研究也在不断进行,例如 Kanamori 等^[40]应用一种新型的合成氟化苯聚酰亚胺中空纤维作为人工肺膜材料,具有较高的氧传输率。我国的人工肺膜材料相对于世界先进水平还有一定的差距,未来人工肺的膜材料还需要在稳定性和抗污染性方面进行深入研究。

图 10-13 中空纤维膜式人工肺示意图^[41]

10.3 超滤膜材料的发展及其战略需求

10.3.1 超滤膜分离原理及特点

超滤 (Ultrafiltration, UF) 是指对分离体系中大分子溶质具有分离选择性的压力驱动型膜分离技术, 超滤膜平均孔径范围为 2~100nm, 可截留相对分子量范围为 1000~500000Da ($1\text{Da}=1.66054\times 10^{-27}\text{kg}$) 的大分子有机物、胶体、悬浮固体等。1861 年, Schmidt 首次报道了用牛心胞膜截留可溶性阿拉伯胶的实验结果。1907 年, Bechhold 使用硝酸纤维素制备出了第一张超滤膜, 并首次使用了“超滤”这一术语。随后, Zsigmondy、Bachmann、Ferry 和 Elford 等进行了更深入的研究, 为早期超滤膜的发展做出了积极贡献。20 世纪 60 年代, 随着相转化成膜技术的出现, Michaels 等成功制备出多种聚合物超滤膜, 实现了超滤膜的商业化生产和工业应用^[1]。自从 20 世纪 70 年代起, 我国开始发展超滤膜技术, 先后成功研制了中空纤维、管式、卷式和板式超滤膜及其相应膜组件装置。进入 21 世纪以来, 我国超滤膜及装置研究取得了长足的进步, 已达到了世界先进水平, 具有各种聚合物膜品种, 形成了一系列截留分子量产品, 也发展出一批耐高温、耐腐蚀和抗污染的高性能超滤分离膜。今后, 继续研制兼具高渗透选择性、抗污染、耐热、耐化学腐蚀、高机械强度的高性能超滤膜仍是该领域的重点研究方向^[1]。

超滤膜具有典型的非对称结构, 由提供筛分作用的致密皮层和决定膜机械强度的多孔支撑层组成, 皮层厚度一般小于 $1\mu\text{m}$, 支撑层厚度在几十到几百微米之间。其分离能力主要由皮层孔径尺寸决定。超滤膜是以压力为推动力, 根据孔径筛分机理, 当料液流经膜表面时, 由于溶质或颗粒与膜孔径的差异, 尺寸小于膜孔径的物质在膜两侧压差的作用下透过膜层达到透过侧, 而尺寸大于膜孔径的物质被截留, 从而达到分离的目的。超滤膜分离技术具有分离过程无相变, 可在常温操作, 能耗低; 设备装置占地面积小, 投资费用低; 工艺流程简单, 易于管理, 兼容性强, 易与其他工艺耦合等特点。超滤已成为应用最为广泛的膜分离技术之一, 现主要应用于水处理、化工分离、食品加工、生物制药等领域^[1]。

10.3.2 / 超滤膜材料及其制备方法

在膜材料方面，由于材料本身特性的差异，所制备超滤膜的结构与性能也会有显著不同。目前超滤膜主要分为如下几类。

(1) 常规聚合物超滤膜

纤维素是世界上蕴藏量最多的天然高分子材料，生产原料来源于木材、棉花、棉短绒、麦草、稻草、芦苇、麻、桑皮、楮皮和甘蔗渣等。醋酸纤维素（CA）是目前应用最多的纤维素衍生物。该类材料制备的超滤膜亲水性好，但耐酸碱性较差（适用范围 pH=4~6），使用温度范围窄。醋酸纤维素可通过非溶剂引发相分离法（Non-solvent Induced Phase Inversion）制备成膜。将 CA 聚合物完全溶解在溶剂中，再刮涂于适当的支撑体上，最后浸入非溶剂的凝固浴中，由于非溶剂与溶剂之间的相互扩散导致聚合物沉淀，形成具有不同结构的超滤膜^[1]。为了提高所制备超滤膜的分离性能，CA 常与其他材料共混或改性成膜。Han 等^[42]将羧甲基醋酸纤维素与 CA 共混成膜，并加入 PEG 600 作为成孔剂，所制备的共混膜的分离性能和抗污染性能相比纯 CA 超滤膜均有所提升。Guo 等^[43]将多巴胺（DA）接枝到 CA 分子链上，所制备的超滤膜孔隙率、亲水性均有提升，水通量为 $181.2\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ ，对 BSA 截留率为 93.5%，水通量回复率可达 97.3%。此外，Kocaman 等^[44]在多孔基底沉积纤维素纳米晶体制备超滤膜，通过改变沉积成膜参数可调控所制备超滤膜截留性能，如图 10-14 所示，在优化条件下对 β -乳球蛋白截留率为 95%。

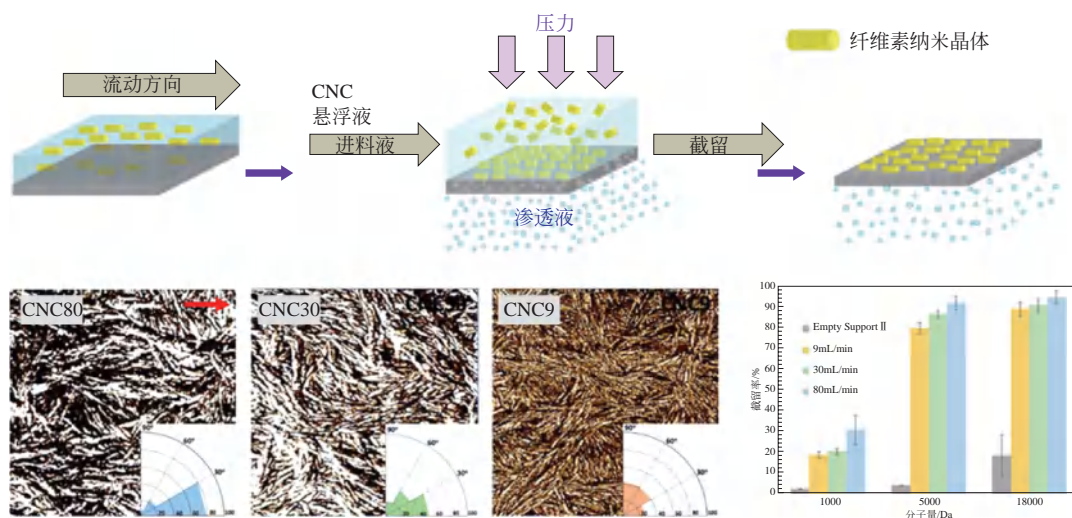


图 10-14 CA 纳米晶体制备超滤膜示意图、形貌以及截留性能^[44]

聚砜类材料是分子主链中含有砜基和亚芳基的高分子化合物，主要包括双酚 A 型聚砜（PSF）、聚醚砜（PES）等。其具有优异的力学性能与化学稳定性、玻璃化转变温度高（ $>190^\circ\text{C}$ ）、成膜性好等优点，被广泛用于超滤膜的制备。但材料本身的疏水性使其膜在使用过程中易被污染，故常需要进行亲水化改性来提高聚砜类超滤膜性能^[1]。Nayak 等^[45]通过化学接枝在 PSF 超滤膜表面构筑双亲性分子层，提高了膜抗污染性，实现了高效的油水分离

(图 10-15)。Kassa 等^[46]使用等离子体处理 PSF 超滤膜表面, 增强膜表面亲水性。Kasemset 等^[47]在 PSF 超滤膜表面涂敷聚多巴胺 (PDA) 用以改善膜亲水性, 并通过改变涂层厚度调控膜分离性能。Song 等^[48]通过磺化法制备了磺化聚砜 (SPSF), 再将其与 PSF 直接共混成膜, SPSF 的引入显著提升了共混膜的亲水性、孔隙率与荷电性, 进而提高了所得膜的超滤分离性能。

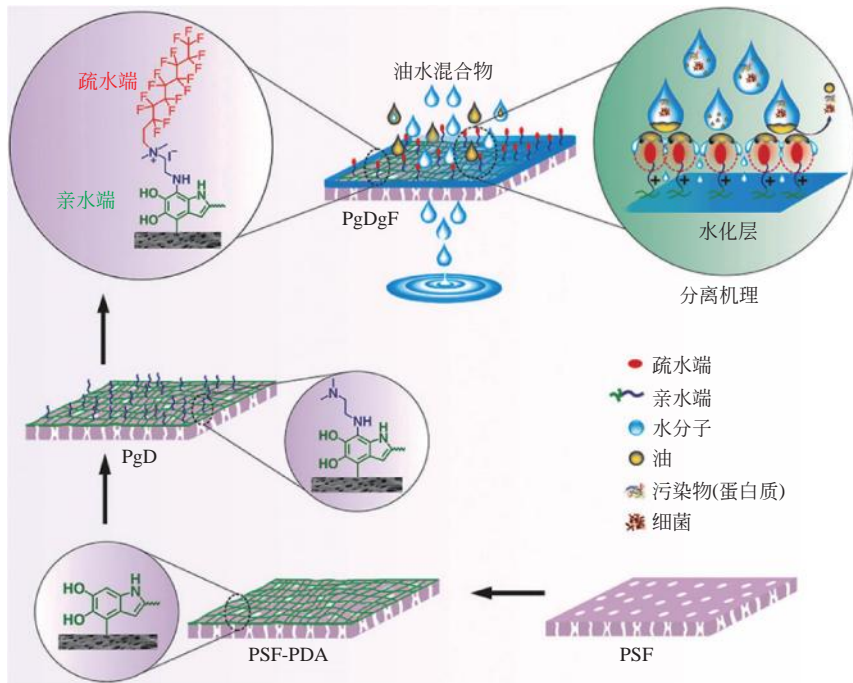


图 10-15 表面接枝构筑高性能 PSF 超滤膜^[45]

将小分子物质^[49,50]、亲水性聚合物^[51,52]等一种或多种填料加入聚合物铸膜液中, 将相转化膜引入超滤膜基体中对膜性能的提升主要体现在以下两方面^[53]: 一方面是亲水填料可以提高相转化分离过程中溶剂与非溶剂的交换速率, 且填料的加入降低了体系的热力学稳定性使其分相更容易, 因此形成更加疏松多孔的超滤膜, 进而可以提升膜的渗透选择性; 另一方面是亲水性填料在相分离过程中会自发向膜表面偏析, 并最终富集在膜表面区域, 提升膜表面亲水性, 进而可以改善膜抗污染性能。常用的共混小分子物质包括小分子醇、小分子酸、无机盐 (LiCl、ZnCl₂)、表面活性剂等。小分子物质会对聚合物相分离行为产生显著影响, 但小分子的添加对膜亲水性提升有限, 并不能显著改善膜抗污染性能。常用的亲水性聚合物主要包括聚乙二醇 (PEG)、聚乙烯吡咯烷酮 (PVP) 等水溶性聚合物^[54], 含有亲水基团的非水溶性聚合物^[55-57]以及两亲性共聚物^[58]。亲水聚合物的引入可以改善超滤膜亲水性, 并进一步提升膜抗污染性能。其中, 两亲性共聚物被认为是理想的超滤膜改性材料, 其亲水性部分可赋予共混膜良好的亲水性能, 疏水性部分则可以通过疏水-疏水相互作用锚定在超滤膜基体材料上, 使其具有稳定的亲水改性效果。

聚烯烃类材料主要包括聚丙烯腈 (PAN)、聚氯乙烯 (PVC) 等聚合物。PAN 具有良好的耐溶剂性、化学稳定性和热稳定性, 是一种常用的膜材料。虽然氰基是强极性基团, 但聚丙烯腈并不亲水, 一般需要对其进行亲水改性后使用。通常采用共混或表面接枝进行改性以提升超滤膜的亲水性。Asatekin 等^[59] 将含有亲水链段的 PAN-g-PEO (聚氧乙烯) 共聚物与 PAN 共混成膜, 使所得超滤膜的分离性能有所提升, 并表现出优异的抗污染性能。Ulbricht 等^[60] 在 PAN 膜表面接枝亲水性分子链 (甲基丙烯酸羟乙酯) 使膜表面水接触角由 48° 降低到 34° , 提升了 PAN 超滤膜的抗污染性能。Yang 等^[61] 以氢氧化钠水溶液为凝胶浴, 同时实现了 PAN 超滤膜的制备与水解, 使膜表面富含亲水性羧酸基团, 显著提升了膜抗污染性能。PVC 由乙炔法、乙烯氧氯化法或烯联合法制备而成, 其所制备的超滤膜具有耐酸碱、耐微生物侵蚀等优点, 但热稳定性较差。Xu 等^[62] 研究了 PVP 和 PEG 添加剂对 PVC 超滤膜性能的影响, 结果发现这两种添加剂的引入可以提高膜的孔隙率, 从而提升膜的水渗透性能。Liu 等^[63] 的研究结果表明, 引入适量的两亲性共聚物 F127 可提升 PVC 膜超滤性能, 然而, 过量地引入 F127 却会导致膜孔径减小和孔隙率降低 (图 10-16)。

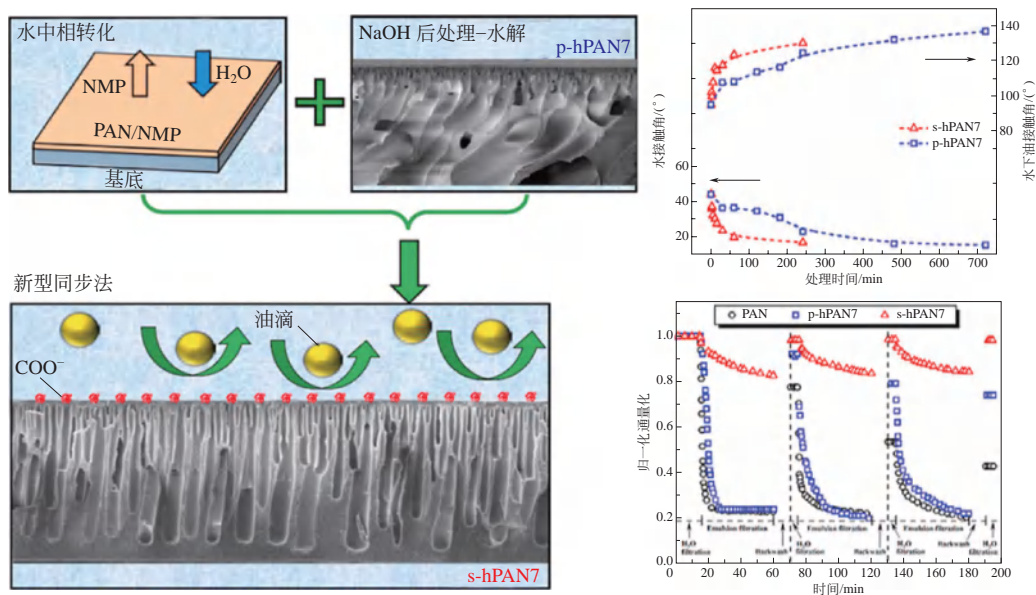


图 10-16 一步法实现 PAN 膜制备与亲水改性^[61]

用于制备超滤膜的含氟类材料主要为聚偏氟乙烯 (PVDF), 其具有较好的化学稳定性、耐高温性、耐氯性等优点, 但疏水性较强, 且耐碱性较差。可通过膜物理共混改性, 以及膜表面化学修饰、接枝、涂敷等方式构筑亲水层, 改善 PVDF 超滤膜亲水性, 提升膜性能。Ohno 等^[51] 将聚丙烯酸-2-甲氧基乙酯与 PVDF 共混成膜, 改性膜水通量较纯 PVDF 膜提升了 5~10 倍, 且抗污染性能也得到了显著改善。Kang 等^[64] 通过将两亲性的苯乙烯-马来酸酐共聚物与 PVDF 共混, 制备了改性 PVDF 超滤膜, 其水渗透通量可达 $1014\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$, BSA 截留率为 98.9%, 抗污染性能也有所提升。Lin 等^[65] 在 PVDF 膜表面接枝硫代甜菜碱 (图 10-17), 使水接触角由 130° 减小到 24.9° , 提升了 PVDF 膜的亲水性。

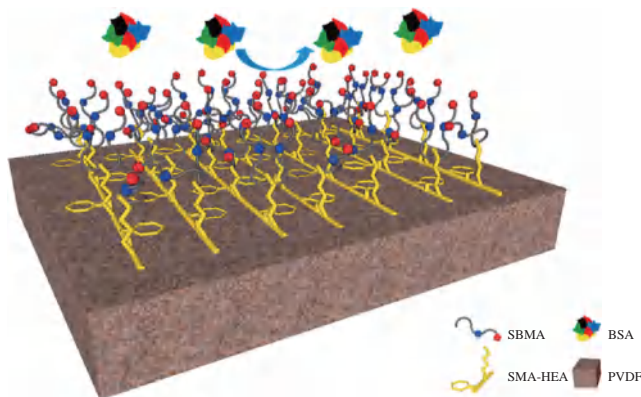


图 10-17 表面接枝硫代甜菜碱构筑高性能 PVDF 超滤膜^[65]

SBMA—甲基丙烯酸磺基甜菜碱；BSA—牛血清白蛋白；SMA-HEA—丙烯酸-2-羟乙基酯封端聚（苯乙烯-马来酸酐）；PVDF—聚偏氟乙烯

(2) 新型聚合物超滤膜

近年来，随着高分子科学和膜分离技术的不断发展，越来越多的新型聚合物材料被开发出来，用以制备高性能超滤分离膜。目前，新型聚合物超滤膜材料的研究仍围绕着如何降低制膜成本，减少膜污染，提升膜渗透选择性、耐化学性、耐热性，提高膜机械强度等方面开展。

壳聚糖（CS）是甲壳素脱乙酰化的产物，其分子结构中含有大量羟基和氨基等官能团，可溶于酸性水溶液。壳聚糖具有良好的亲水性、抗菌性、生物相容性，可用于新型抗污染、抗菌超滤膜的制备^[66]。杂萘联苯聚芳醚类新型高分子材料含有氮杂环及非共平面扭曲链结构，具有优良的耐化学稳定性和耐热性。同时，由于具有全芳香的非共平面扭曲分子链结构，杂萘联苯聚芳醚膜内分子链刚性较强，膜内分子链间不易紧密堆积，增加了膜内自由体积。该类超滤膜材料主要包括杂萘联苯聚醚砜酮（PPESK）、萘联苯聚芳醚腈酮（PPENK）、萘联苯共聚醚砜（PPBES）等。以 PPBES 制备的超滤膜，即使在 95℃ 下长期使用，截留率仍无明显下降，表现出非常好的耐热稳定性^[67]。

聚硫酸酯（PSE）是一类含有硫酸酯键（—SO₄—）的新型聚酯材料。2014 年，Sharpless 等^[68]首次提出六价硫氟交换反应并成功制备了一系列硫酸酯聚合物^[69]（图 10-18）。相较已被广泛应用的聚碳酸酯（PC）材料，聚硫酸酯具有更优异的热稳定性、耐老化性、耐酸碱性和耐溶剂性等优点。目前已报道的聚硫酸酯材料包括双酚 A 型聚硫酸酯、二苯醚型聚硫酸酯、双酚 S 型聚硫酸酯、联苯型聚硫酸酯、双酚 A 二苯醚共聚型聚硫酸酯等^[70,71]。由聚硫酸酯所制备的超滤膜在 pH=1 或 pH=13 的强酸、碱溶液连续浸泡 10 天后，仍能保持稳定的分离性能^[72]。

嵌段共聚物是一种具有特殊结构的高分子材料，其至少由两个不同化学性质的单体单元序列以共价键相连而形成，由于其不同链段物化性质的差异，在适宜条件下将发生相分离。嵌段共聚物具有自组装特点，通过微观相分离可以制备均孔超滤膜^[73]。均孔超滤膜具有孔形一致、孔径单分散等特点，在精密高效分离领域具有潜在应用。近年来，嵌段共聚物均孔超滤膜的制备引起了广大研究者的兴趣，发展了多种制备方法，包括非溶剂诱导相分离、选择性刻蚀、选择性去除和选择性溶胀等方法。Peinemann 等^[74]首次报道使用聚苯乙烯-b-聚（4-乙烯基吡啶）（PS-b-P4VP）通过相分离法制备了表层为均孔结构、下层为海绵状结构的非对

称多孔膜(图 10-19)。目前,已有越来越多的嵌段共聚物通过相分离法制备出了孔径较均一的超滤膜,包括聚苯乙烯-b-聚氧乙烯(PS-b-PEO)^[75]、聚苯乙烯-b-聚(甲基丙烯酸二甲氨基乙酯)(PS-b-PDMAEMA)^[76]、聚苯乙烯-b-聚(2-乙烯基吡啶)(PS-b-P2VP)^[77]、聚苯乙烯-b-聚(4-乙烯基吡啶)(PS-b-P4VP)^[78]等。相比传统聚合物,嵌段共聚物制备的分离膜经微相分离后极性嵌段(亲水端)会附着在膜孔壁,使膜亲水性更强,在提升渗透选择性的同时,抗污染性能也有显著提升。然而,嵌段共聚物的制备成本仍较高,目前还停留在实验室研究阶段,未来进一步优化膜制备方法、降低膜材料成本是实现嵌段共聚物均孔超滤膜工业化的关键^[79-81]。



图 10-18 六价硫氟交换反应制备的聚硫酸酯及其薄膜^[69]

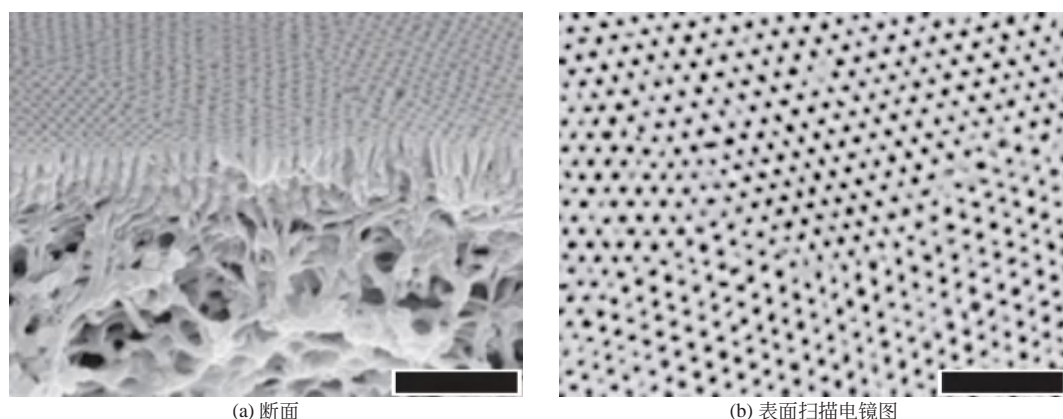


图 10-19 PS-b-P4VP 制备的超滤膜^[74]

(3) 聚合物纳米混合基质超滤膜

将功能性纳米材料与聚合物共混制备超滤膜,是制备高性能超滤膜的有效途径之一。通过简单的物理共混方法,将无机纳米材料引入聚合物膜中,使所制备的聚合物纳米混合基质超滤膜兼具有聚合物与无机纳米材料的优势与特性^[82-84]。对于非溶剂诱导相分离成膜而言,纳米材料的引入会改变聚合物铸膜液体系的热力学状态,使其更容易发生相分离,形成高孔

隙率的超滤膜^[53]。在动力学方面,亲水性纳米材料会加速非溶剂的扩散,使相分离速率更快,但过量添加纳米材料会导致铸膜液黏度增加反而会减慢相分离过程^[85]。另外,当无机纳米材料引入过多时,也容易产生纳米材料团聚的问题,进而影响聚合物纳米混合基质超滤膜的分离性能^[86]。目前,研究比较广泛的纳米材料包括纳米银(Ag)、二氧化钛(TiO₂)、二氧化硅(SiO₂)、氧化锆(ZrO₂)、三氧化二铝(Al₂O₃)、碳纳米管(CNT)、氧化石墨烯(GO)等^[86-92]。将上述无机纳米材料引入聚合物基膜中,可以显著提升超滤膜的机械强度;同时,将具有特殊功能的纳米材料引入,还会赋予超滤膜光催化、抗菌等独特的性能^[87,93]。聚合物纳米混合基质膜材料及其膜性能调控见图10-20。

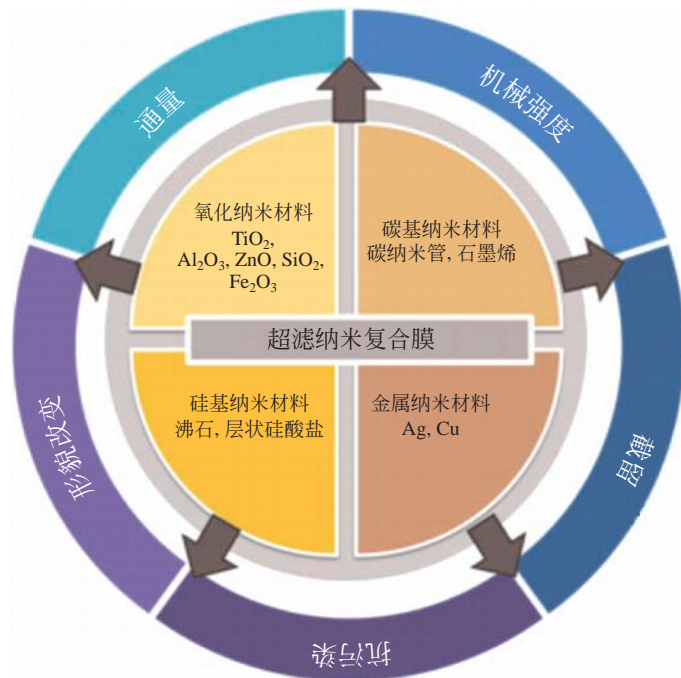


图 10-20 聚合物纳米混合基质膜材料及其膜性能调控^[53]

Mu 等^[94]将改性后的埃洛石纳米管(HNT)引入CA基膜中,当HNT负载量为3%(质量分数)时,所制备纳米混合基质超滤膜的水渗透通量由11.4L/(m²·h·bar)增大到92.9L/(m²·h·bar),对卵清蛋白的截留率为91.2%,且机械强度也有所提升。Yang 等^[95]将改性后的氧化石墨烯(GO)与CA共混成膜,所得混合基质超滤膜的水渗透性与抗污染性能均有所提升。Vatanpour 等^[96]将复合纳米材料ZnO@g-C₃N₄引入CA中,制备出了高性能的聚合物纳米混合基质超滤膜。Vetrivel 等^[97]研究发现CuO纳米材料的引入可提升CA超滤膜的孔隙率和亲水性,使膜的分离性能和抗污染性能同时得到改善。Melbiah 等^[98]将PAN与两亲性共聚物F127和CaCO₃纳米颗粒共混,所制备的纳米混合基质分离膜的水通量回复率由63%增加到90%,表现出良好的抗污染性。Fierro 等^[99]将PAN与多壁碳纳米管(MWCNT)共混成膜,所得混合基质膜的机械强度提升97%,且超滤性能也有显著提高。Yan 等^[100]和Yu 等^[101]均发现加入适量的纳米Al₂O₃或SiO₂颗粒可以提升PVDF超滤膜的热稳定性、机械强度、亲

水性和抗污染性。Wang 等^[102]将氧化石墨烯(GO)与PVDF共混成膜,当GO负载量为0.2% (质量分数)时,所得混合基质超滤膜的亲水性和抗污染性增强,水通量提升96.4%,抗拉强度增大123%。Zhang 等^[103]的研究也发现适量的低维碳纳米材料的引入,可显著提升PVDF超滤膜的亲水性、渗透性、抗污染能力和机械强度。

(4) 新型无机超滤膜

与聚合物超滤膜相比,无机超滤膜具有更强的耐热、耐化学性,且不易受微生物侵蚀,不溶胀,易清洗,可再生。目前,用于无机超滤膜制造的材料主要有 Al_2O_3 、 SiO_2 、 ZrO_2 、 SiC 、 TiO_2 等^[104]。无机超滤膜的结构常为三明治式,其中顶层为分离膜层,一般为 $10\sim 20\mu\text{m}$;载体层较厚,约几毫米,以提供必要的机械强度;中间层为过渡层,可以是一层也可以是多层,位于顶层和载体层之间,厚度为 $20\sim 50\mu\text{m}$ 。整个膜的孔径分布由载体层到顶层逐渐减小,形成不对称的结构。上述不对称结构的无机超滤膜的主要制备方法有固体粒子烧结法、溶胶-凝胶法;此外,还可以通过阳极氧化法、动态膜法、相分离-沥液法、薄膜沉积法、水热法等方法制备。相对于聚合物膜,无机膜的制备成本更高,限制了其广泛应用。而降低无机膜材料成本、优化烧结工艺、实现低成本制造已成为无机超滤膜的研究热点(图10-21)。

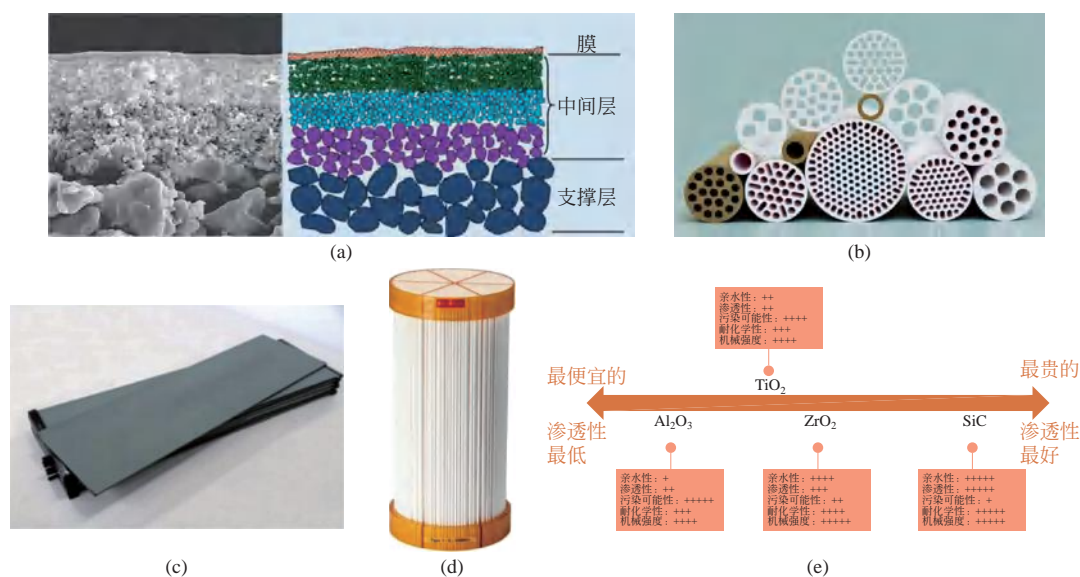


图 10-21 (a) 无机膜断面示意图; (b) 单/多通道管式无机商业膜; (c) 平板无机商业膜; (d) 中空纤维无机商业膜; (e) 使用不同材料制备的无机膜特性^[104]

10.3.3 / 超滤膜过滤分离应用

(1) 超滤应用于海水淡化、净化水预处理

在海水淡化和高纯水的制备过程中,超滤常作为反渗透装置的预处理步骤来去除水中的胶体、微粒、病毒、细菌等物质,以延长反渗透装置的使用寿命。相较于传统预处理工艺,超滤具有出水水质稳定、运行费用低、操作维修方便等优势。超滤也广泛应用于离子交换树

脂、电渗析等水处理系统的预处理步骤，不仅保证了这些装置系统的稳定运行，也有效提高了产水质量^[1]。中东除盐造水研究中心采用超滤-反渗透系统淡化红海和地中海海水，相比传统预处理方式，超滤预处理使水通量由 $13.6\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ 增加到 $19\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$ ，反渗透膜清洗频率也由每年 12 次减少为 2 次。

(2) 超滤应用于市政、工业废水处理

超滤膜分离技术在地表水、受污染地下水处理中，因设备占地面积小、成本低廉、运行维护方便、产水质量高等优势得到了广泛的应用。在北美现有超滤水厂 250 座以上，总处理水量在 $3 \times 10^6 \text{m}^3/\text{d}$ 以上，其中美国 Olivenhain 自来水厂利用 GE ZeeWeed[®] 浸没式超滤膜设计处理水量达到了 $1.29 \times 10^5 \text{m}^3/\text{d}$ ，且处理厂采用一套二级处理系统处理一级的排放浓水，最终使整个处理厂的回收率达到了 99% 以上。在国内也有大量超滤膜分离技术应用工程。北京市清河再生水回用工程采用中空纤维超滤膜分离技术，实现了城市污水的回收再利用。广州北部水厂（图 10-22）总设计规模为 $1.5 \times 10^6 \text{m}^3/\text{d}$ ，是目前国内采用超滤膜分离技术最大规模的水厂之一，解决了当地的供水问题，也全面提高了城区的供水保障能力。此外，东营南郊水厂、北京市第九水厂、无锡中桥水厂、绵阳新永供水厂、上东济阳自来水厂、天津南港水厂等也采用了超滤膜系统保障地区供水^[1]。



图 10-22 广州北部水厂全景

近年来工业废水处理过程中也常用到超滤膜分离技术。电泳涂装过程会产生大量的高浓度废水，直接排放会严重污染水体。超滤膜分离技术是处理电泳废水的理想方法之一。处理后浓缩液可返回涂料槽重复使用，透过液也可继续用来冲洗被涂件。造纸业中会产生大量组成十分复杂的废水，可生化性差，处理难度大。采用超滤膜分离技术处理造纸工业废水不仅可以提纯其中的木素、亚硫酸盐，也可去除漂白废水中的色度和有机氯，具有很大的经济效益。在钢铁、机械、石油精制、原油采集、运输及油品的使用过程中，会产生大量含油废水。通过超滤膜分离技术处理，可以使油分浓缩，水和低分子有机物透过膜，实现油水分离。此外，选矿、冶金废水中含有高分子量污染物，也常选用超滤或超滤与其他工艺耦合来进行处理，达到降低企业用水费用、减少环境污染的目的^[1]。

(3) 超滤应用于药物分离和医疗领域

•••

抗生素医药产品主要通过生物化学、生物发酵生产获得。发酵生产的抗生素原液含大量生物残渣，会影响产品的纯度，因此发酵液除杂是生产抗生素必不可少的步骤。相比传统除杂工艺，超滤膜分离技术不仅操作工艺简单，成本低，且具有较高的分离效率。超滤膜分离技术在中药有效成分的提取方面也具有广阔的应用空间。其可在常温常压下进行提取，且操作工序少，提取剂用量低，产品质量高，澄清度高，稳定性好，有效成分含量高，药液稳定性高。目前，超滤膜分离技术已经广泛应用于复方丹参注射液、清开灵注射液、五味消毒饮注射液、人参精口服液等注射液和口服液的制备^[1]。

当肾脏发生功能性衰竭时，人体内新陈代谢产物无法排除，从而引发尿毒症。血液透析技术以浓度差为推动力，借助溶质间扩散速度差，使不同溶质分离，实现代替肾脏净化血液的功能。超滤膜是血液透析技术的主要组成部分，其物理化学特性决定了透析结果。用于血液透析的理想超滤膜应具有较高的筛分选择性（不允许相对分子质量大于 35kDa 的物质通过，如红细胞、蛋白质等）、无特异性吸附、可耐高温蒸气或消毒药消毒等特性。使用血液透析技术不但可以有效地去除血液中的尿毒素、肝毒素等，而且可以补充相当于滤液体积的无菌水输回体内，具有使用方便、性能高效、价格便宜等优势^[1]。

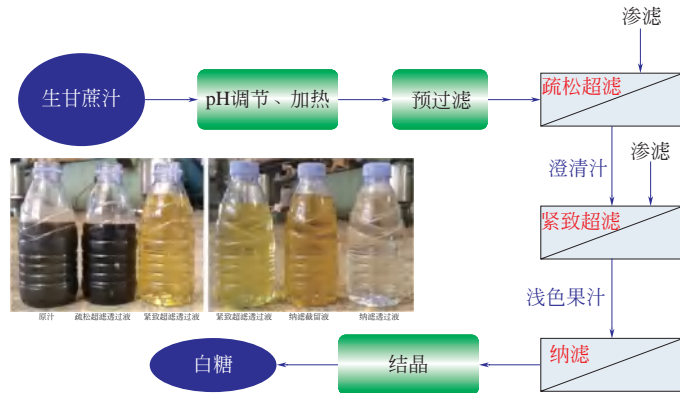
(4) 超滤应用于食品、生物制品纯化与精制

•••

超滤膜分离技术可用于脱脂奶浓缩、乳清预浓缩、原奶精制等奶制品处理加工工业。相比其他分离技术，超滤具有防止蛋白质变性、提高产品纯度、能耗低等优势。超滤膜分离技术将水、盐、乳糖等低分子物质从乳清中分离出来，从而调控浓缩物中蛋白质、乳糖和盐的比例。另外，大豆蛋白加工业中的乳清被大量排放，造成水体严重污染。采用超滤膜分离技术不仅可回收大豆乳清中的蛋白质，而且可有效避免环境污染。

超滤用于果汁澄清，无须添加助剂，在常温条件下即可进行，保留了果汁的原始风味且不损失营养成分。相较于传统处理技术，超滤膜分离技术处理后的果汁浊度更低。超滤膜分离技术也可用于酒类的精制过程。白酒降度时会产生絮状物沉淀，超滤去浊、除菌成本低，效果好；可使低度白酒中的辛辣、苦涩和邪杂味物质减少，而使产生香味的酯类物质增加，在短时间的处理过程中就可以达到自然窖藏长时间才能完成的化学和物理变化，提高了生产效率^[1]。

食醋是采用生物发酵法制备的酸性调味品，具有口味醇酸、营养丰富等特点。然而由于酿造工艺的原因，需要进一步澄清和灭菌处理。超滤膜分离技术用于食醋澄清，过程简单，可一步达到料液澄清及除菌的效果，澄清后醋液在感官与卫生指标上均符合国家标准，并且长时间放置也不会出现返浑现象。酱油是一种以大豆、小麦等为原料，经微生物发酵制成的具有特殊香味的调味品。利用超滤膜分离技术对酱油进行灭菌、澄清，可大大提高酱油的质量，获得高澄清度的优质产品。甘蔗制糖工艺中蔗汁清净是决定蔗糖品质和产糖率的关键（图 10-23）。超滤膜法蔗汁清净工艺较传统的化学清净工艺具有显著优势：产糖率提高、优品率提高、利于机械化收割、综合能耗大幅下降、产品不含外来化学物质及副产品、综合利用价值高等^[105]。

图 10-23 膜法制糖技术路线示意图^[105]

10.4 / 纳滤膜材料的发展及其战略需求

10.4.1 / 纳滤膜分离原理及特点

纳滤（Nanofiltration, NF）是介于反渗透（Reverse Osmosis）和超滤（Ultrafiltration）之间的一种压力驱动的膜分离过程，已经成为当今膜分离技术研发的热点之一^[106]。纳滤膜的研究始于 20 世纪 70 年代，源于 J. E. Cadotte 对 N 系列膜的开发。早期的纳滤膜被称为“疏松的反渗透膜”（Loose Reverse Osmosis Membrane），Israsel 公司曾用“杂化过滤”来表示这种介于反渗透和超滤之间的膜分离过程，直到 20 世纪 90 年代，美国 Film Tech 公司将其更名为纳滤，并一直沿用至今。纳滤膜作为一种新型的分离膜具有以下特点：

- ① 操作压力低。通常在 0.5~2.0MPa 之间，较反渗透膜的操作压力低很多，这大大降低了运行成本。
- ② 具有纳米级孔径。纳滤膜的相对切割分子量（Molecular Weight Cut-Off, MWCO）为 200~1000Da，可对不同尺寸的有机物分子进行分离。
- ③ 具有离子选择性。纳滤膜通常具有一定的荷电性，与高价态离子间的静电作用较强，可对不同价态的无机盐进行分离^[106,107]。

纳滤膜表面通常带有荷电基团，因此其对物质的分离是依靠空间位阻效应和静电排斥效应双重作用实现的。其传质机理依照分离对象的不同，主要有以下两种类型^[107,108]。一类是当分离非电解质溶液时，其传质模型主要有空间位阻 - 孔道模型、溶解 - 扩散模型等。空间位阻 - 孔道模型假设膜具有均一的细孔结构，并忽略孔壁效应；溶解 - 扩散模型假定溶质和溶剂溶解在无孔均质膜表面层内，然后各自在浓度或压力引起的化学位的作用下透过膜。另一类是当分离电解质溶液时，其传质受膜面与电解质电荷作用的影响很大，代表性的传质模型有空间电荷模型和固定电荷模型等。空间电荷模型是表征膜对电解质及离子的截留性能的理想模型，假设膜由孔径均一且壁面上电荷均匀分布的微孔组成。固定电荷模型由 Teorell

Meyer 和 Sievers 共同提出，模型假设膜是均质无孔的，膜中固定电荷分布均匀，不考虑孔径等结构参数，认为离子浓度和电势能在传质方向具有一定的梯度，该模型其实是空间电荷模型的简化形式。

10.4.2 / 纳滤膜材料及其制备方法

(1) 常规聚合物纳滤膜

自从 1960 年 Leob 和 Sourirajan 成功开发了第一张具有高盐截留率和高水渗透通量的醋酸纤维素 (CA) 膜以来，分离膜由实验室成功地走向了工业应用，这对膜分离技术的发展具有里程碑式的意义^[109]。与此同时，制造醋酸纤维素膜的方法——L-S 浸没相转化法也引起了学术界和工业界的广泛重视。L-S 浸没相转化法制备纳滤膜的过程一般为：首先，将聚合物铸膜液涂覆在支撑体上；其次，将其浸入到非溶剂的凝固浴中，通过溶剂与非溶剂之间的诱导相分离的过程交换成膜；最后，经洗涤、后处理，得到所需纳滤膜 (图 10-24)。常用的纤维素类膜材料主要有醋酸纤维素 (CA)、三醋酸纤维素 (CTA)、再生纤维素 (RCE)、硝酸纤维素 (CN) 及聚酯纤维素 (PR-C) 等，但醋酸纤维素的化学稳定性和抗生物腐蚀性较差。壳聚糖 (CS) 及其衍生物作为广泛存在于节肢动物甲壳中的天然高分子，凭借良好的亲水性、抗污染性及耐溶剂性，已成为一类十分具有发展潜力的膜材料。聚乙烯醇 (PVA) 具有高度亲水性、强耐污染性和良好的成膜性能，也已经成为一类用于制备纳滤膜的优良成膜材料。其他有机合成高分子材料，如磺化聚(醚)砜 (SPSF)、磺化聚醚酮 (SPEK)、聚酰亚胺和聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 等，也是纳滤膜的重要成膜材料^[110] (表 10-1)。上述高分子膜材料可以通过溶液涂覆法成膜。溶液涂覆法是将聚合物铸膜液直接涂覆在支撑膜表面，经过表面化学交联或热固化后，得到复合纳滤膜的方法。

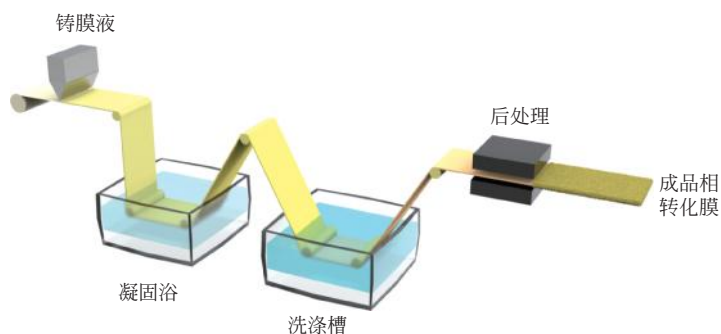
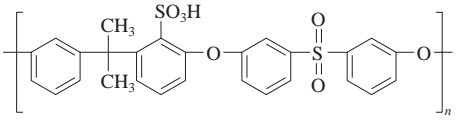
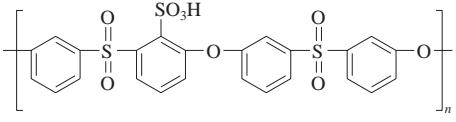
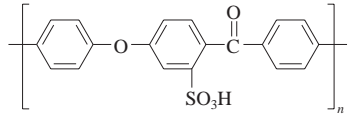
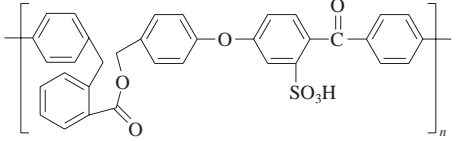
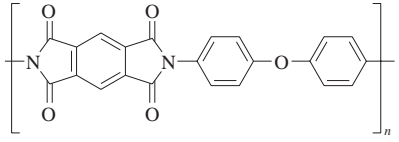
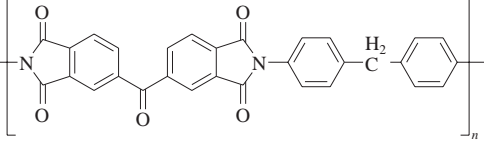
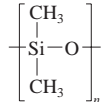


图 10-24 L-S 浸没相转化法制备纳滤膜的过程示意图

表 10-1 用于制备纳滤膜的典型合成高分子材料

聚合物名称	化学结构式
聚乙烯醇 (PVA)	$\left[\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H}_2 \\ \quad \\ \text{---C---C---} \\ \\ \text{OH} \end{array} \right]_n$

续表

聚合物名称	化学结构式
磺化聚砜 (SPSF)	
磺化聚醚砜 (SPES)	
磺化聚醚酮 (SPEK)	
磺化酚酞型聚醚酮 (SPEK-C)	
芳香聚酰亚胺 (PI)	
聚酰亚胺 (P84)	
聚二甲基硅氧烷 (PDMS)	

1972年, Cadotte等首次采用界面聚合法制备了聚酰胺复合膜, 其中最具代表性的商品化聚酰胺纳滤膜是由哌嗪(PIP)和均苯三甲酰氯(TMC)为功能单体制备的聚酰胺纳滤膜NS-300(图10-25)。这种聚酰胺复合膜与此前的L-S浸没相转化法制备的不对称纳滤膜相比, 操作压力大幅度降低, 水通量和盐截留率都有较大程度的提高。这一全新的制膜技术现已成为纳滤膜/反渗透膜生产的主要方法^[108]。聚酰胺复合膜的性能主要取决于聚酰胺活性层的交联致密度、皮层厚度、粗糙度、亲水性以及化学官能团活性等, 其中所用界面聚合单体的种类和性质对上述综合性能起到了决定性作用。因此, 为了制备具有理想膜结构与优异膜性能的聚酰胺纳滤膜, 研究者们设计、合成了不同的界面聚合单体(表10-2)。其中, 哌嗪、间苯二胺(MPD)与对苯二胺(PPD)等二胺单体和均苯三甲酰氯、间苯二甲酰氯(IPC)等多元酰氯单体是最常见以及研究最为成熟的用于制备聚酰胺纳滤膜的单体。采用界面聚合法制备的聚酰胺纳滤膜通量高、分离性能好, 但受成膜材料所限, 其耐污染性和耐氯性有待进一

步提高。因此，开发新型聚酰胺纳滤膜的成膜单体材料是聚酰胺纳滤膜研究的重点。

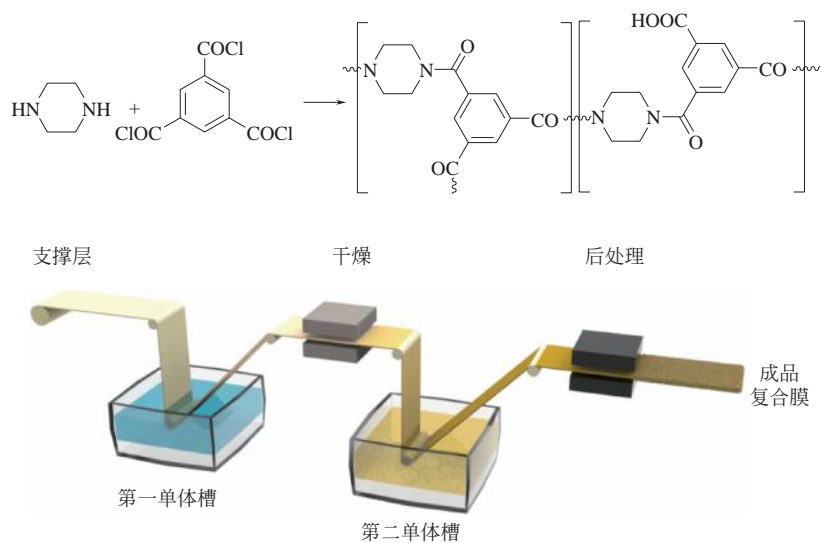


图 10-25 界面聚合法制备聚酰胺纳滤膜 NS-300 的示意图

表 10-2 界面聚合单体的化学结构^[108,111,112]

水相单体名称	化学结构	有机相单体名称	化学结构
哌嗪 (PIP)		均苯三甲酰氯 (TMC)	
间苯二胺 (MPD)		间苯二甲酰氯 (IPC)	
对苯二胺 (PPD)		5-异氰酸间苯二甲酰氯 (ICIC)	
4-甲基间苯二胺 (MMPD)		5-氯甲酰氧基间苯二甲酰氯 (CFIC)	
1, 3-环己二甲胺 (CHMA)		1, 3, 5-三甲酰氯环己烷 (HTC)	
N, N'-二氨基哌嗪 (DAP)		mm-联苯四甲酰氯 (mm-BTEC)	

续表

水相单体名称	化学结构	有机相单体名称	化学结构
<i>N,N</i> -氨基磺化丙基哌嗪 (AEPPS)		mm-联苯四甲酰氯 (mm-BTEC)	
三乙醇氨 (TEOA)		op-联苯四甲酰氯 (op-BTEC)	
3, 5-二氨基-4'-氨基苯酰替苯胺 (DABA)		联苯四甲酰氯 (BTEC)	
二氨基 (2, 6- <i>N,N</i> -二羟乙基) 甲苯 (BHDT)		联苯五甲酰氯 (BPAC)	
六氟代醇修饰亚二甲苯胺 (HFA-MPD)		联苯六甲酰氯 (BHAC)	

(2) 新型聚合物纳滤膜

材料合成技术的迅速发展和对纳滤膜传质机理的深入研究,为新型纳滤膜的研制提供了坚实的基础。Noble 等^[113]则利用液晶高分子材料 Q₁ 制备了一种新型的具有规整纳米孔洞结构的薄膜,其孔洞尺寸约为 0.75nm,对糖类有机物分子及无机盐的截留率大于 95%,水渗透通量为 0.089L/(m²·h·bar)。与商品化纳滤膜 NF-270 相比,其盐截留率较高,水渗透通量较低。但液晶材料的合成较为复杂,且选择合适的液晶类型制备出孔径小于 1nm 的薄膜也较为困难,因此,液晶薄膜的研制还有待于从液晶材料的制备及其成膜机理上做深入探讨。树状聚合物/超支化聚合物凭借独特的支化分子结构、溶液特性以及化学反应活性等,引起了国内外学者的广泛研究兴趣,现已将其用于纳滤膜的制备^[114]。随着仿生科学的不断发展,在分子水平上对生物膜的结构与功能进行模拟,制成高分子仿生纳滤膜成为新的研究热点。已有大量研究报道,将单宁酸、儿茶酚及其衍生物聚合物通过表面沉积,在聚合物膜表面直接形成改性层、共沉积/引发接枝聚合物功能层,或作为中间过渡层制备复合纳滤膜^[115]。Zhao 等^[116]采用相转化和原位氧化聚合相结合的方法制备了聚苯并咪唑 (PBI) 和聚多巴胺互穿网络结构的耐溶剂纳滤膜(图 10-26),通过改变多巴胺原位氧化聚合时间可以调控膜孔尺寸,膜切割分子量为 190~850g/mol。所得膜具有良好的耐温性和耐溶剂稳定性,在 -10~100℃ 极性有机溶剂中保持膜结构稳定,该膜对 DMF 有机溶剂的渗透通量高达 12L/(m²·h·bar)。

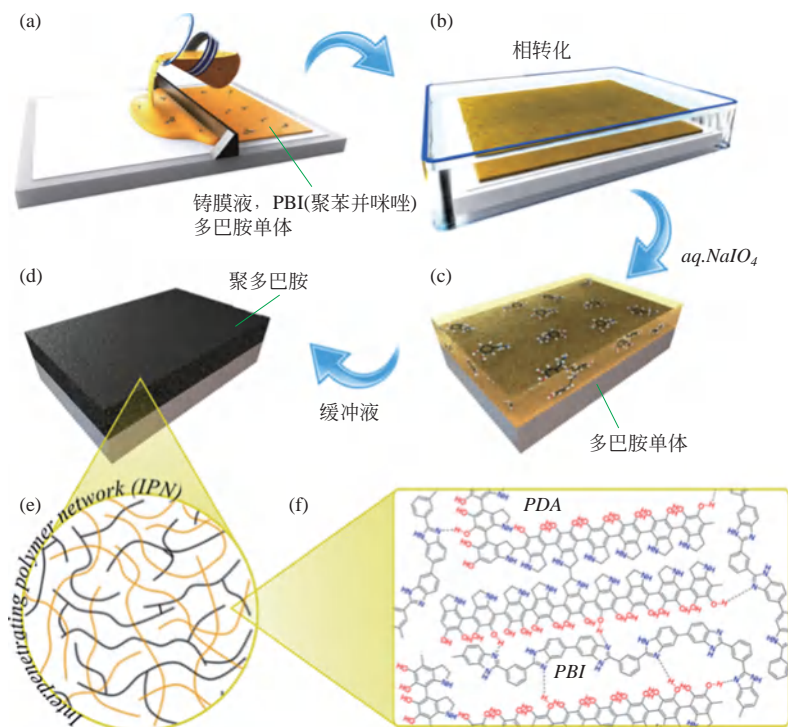


图 10-26 聚苯并咪唑和聚多巴胺互穿网络结构 (IPN) 的耐溶剂纳滤膜制备示意图^[116]

有机多孔聚合物材料按不同类型, 可以分为超交联聚合物、共轭微孔聚合物、自具微孔聚合物、多孔芳香骨架和共价有机骨架材料等, 由于其结构可控性强、稳定性好、具有多孔性和高比表面积等特点, 在吸附、分离、催化、传感等领域具有广阔的应用前景。Tang 等^[117]报道了一种基于噻吩的共轭微孔聚合物膜, 该膜内噻吩单元可以通过氧化法实现孔径调节, 其膜孔径可从 1.73nm 缩小至 1.48nm, 膜截留分子量从 800g/mol 降低至 500g/mol, 而甲醇渗透通量仍高达 2179.8L/(m²·h·bar)。此外, 他们还采用表面引发聚合的方法制备了新型微孔聚合物 (CMP) 膜 (图 10-27), 共轭微孔聚合物刚性主链结构可有效地防止膜在各种有机溶剂中发生结构弛豫现象。所得膜能够截留分子量大于 560g/mol 的溶质分子, 在各种有机溶剂中均表现出较高的溶剂渗透性和耐溶剂稳定性^[118]。

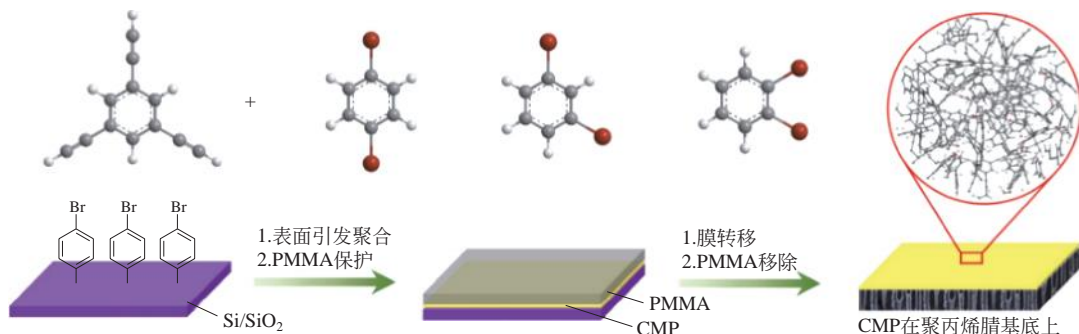


图 10-27 表面引发聚合法制备新型微孔聚合物膜示意图^[118]

共价有机骨架材料 (COF) 是在热力学作用下通过可逆反应 (成键 - 断键) 而排列形成有序的网络结构的材料。自从 2005 年 Yaghi 等^[119] 首次报道了 COF 材料, 该类聚合物多孔材料便得到了迅速发展, 目前已被逐渐用于纳滤膜的制备。Fan 等^[120] 采用原位生长法在氧化铝管式膜上制备 COF-LZU1 膜, 其对尺寸超过 1.2nm 的染料分子具有较高截留率 (>90%) 和高的水渗透通量 [约 760L/(m²·h·bar)]。Zhang 等^[121] 通过自下而上界面结晶的策略制备阳离子 EB-COF: Br 纳米片, 然后采用层层自组装方法制备荷正电 2D-COF 膜, 表现出对不同染料分子 / 无机盐离子优异的分选选择性。Wang 等^[122] 以 1, 3, 5- 三甲酰间苯三酚 (Tp) 为有机相单体, 以苯二胺 (Pa-1) 为水相单体, 直接在聚砜超滤膜表面快速制备了亚胺型 COF 分离层, 制备过程如图 10-28 所示。该复合膜渗透通量可达 50L/(m²·h·bar), 对不同染料分子截留率大于 95%, 与其他文献报道的纳滤膜相比, 水通量提高了 2~10 倍。

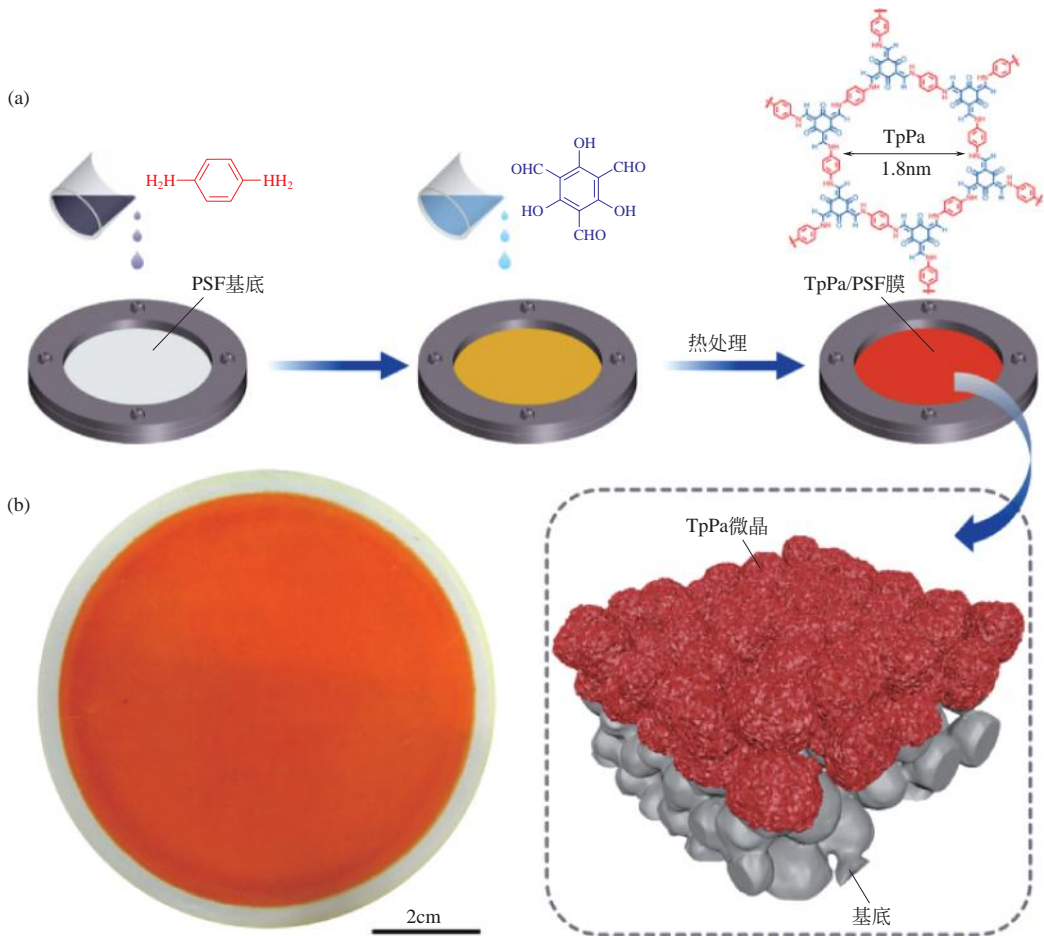


图 10-28 界面聚合法制备 TpPaCOF 膜示意图^[122]

TpPa—1, 3, 5- 苯三甲醛, 2, 4, 6- 三羟基与 1, 4- 苯二胺的聚合物; PSF—聚砜

近年来, 聚电解质类材料由于可调的荷电性、良好的亲水性和丰富的化学结构, 逐渐发展成为一类重要的纳滤膜材料, 吸引了广泛学者的研究兴趣。根据荷电性不同, 可将聚电解

质分为阴离子聚电解质、阳离子聚电解质和两性离子聚电解质。自 Decher 等^[123,124] 于 1991 年运用阴、阳离子聚电解质静电层层自组装 (Electrostatic Layer-by-Layer, ELbL) 方法成功制备了多层的超薄膜以来, 层层自组装方法被越来越多地用于纳滤膜的制备 (图 10-29)。ELbL 复合物膜具有可控的荷电性、厚度、膜微观结构以及耐溶剂性, 是一种理想的纳滤膜材料。

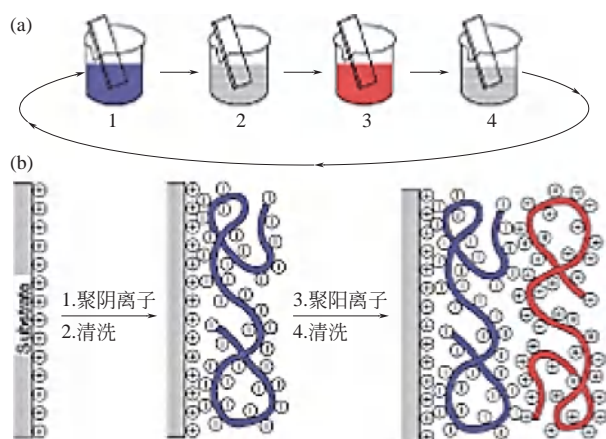


图 10-29 静电层层自组装方法制备纳滤膜示意图^[124]

目前报道的以 ELbL 方法制备的纳滤膜, 所用聚电解质材料如图 10-30 所示。Bruening 等^[125] 在多孔氧化铝基膜上组装了 5 个双层的聚苯乙烯磺酸钠 / 聚丙烯胺 (PSS/PAH), 所得自组装纳滤膜对 $MgCl_2$ 的截留率为 95%, Na^+/Mg^{2+} 的分离因子为 22, 通量为 $35.4L/(m^2 \cdot h \cdot bar)$, 对一价和二价阳离子有很好的分离性能。Jin 等^[126] 则以聚乙烯醇 (PVA) 和聚乙烯基磺酸 (PVS) 为原料在 PAN/PET 多孔支撑膜上自组装制备了纳滤膜, 该膜对 $MgCl_2$ 和 $MgSO_4$ 两种盐截留率高达 100%, 对 $NaCl$ 和 Na_2SO_4 的截留率分别为 93.5% 和 98.5%。已有研究发现, 通过改变阴、阳离子聚电解质类型、组装液的盐离子强度和 pH 值等制膜条件, 可调控 ELbL 复合物膜的荷电强度和微观致密度, 改变膜的纳滤分离性能。然而, ELbL 膜也有不足之处, 如组装层数较多, 制备过程较烦琐等问题。由此可见, 倘若可以制备出与 ELbL 膜具有类似结构的聚电解质材料, 并通过简便的方法成膜, 则既可保持 ELbL 纳滤膜的优点, 又可提高制膜效率, 这将为纳滤膜分离技术开拓出更广阔的发展空间。

聚电解质络合物 (Polyelectrolyte Complex, PEC) 是指聚电解质与带相反电荷物质, 如聚电解质、表面活性剂、纳米粒子、多价金属离子和蛋白质分子等, 通过静电作用力形成的复合材料。近年来, An 等^[127,128] 采用酸保护 - 去保护法制备了可加工的 PEC 本体材料, 其在水中具有良好的分散性。该类 PEC 材料用于制备渗透气化和纳滤膜时, 表现出十分优异的渗透性和选择性, 打破了传统膜分离过程中存在的 “Trade-off” 现象。最近, An 等将二氧化硅、碳纳米管、石墨烯等纳米材料以及磺酸根强电离基团引入到 PEC 材料中, 进一步提高了 PEC 膜的机械强度、渗透选择性和稳定性。Ji 等^[129,130] 采用酸保护 - 去保护法制备了阳离子纤维素 (QCMC)、聚二烯丙基二甲基氯化铵 (PDPA) 与聚甲基丙烯酰氧基三甲基

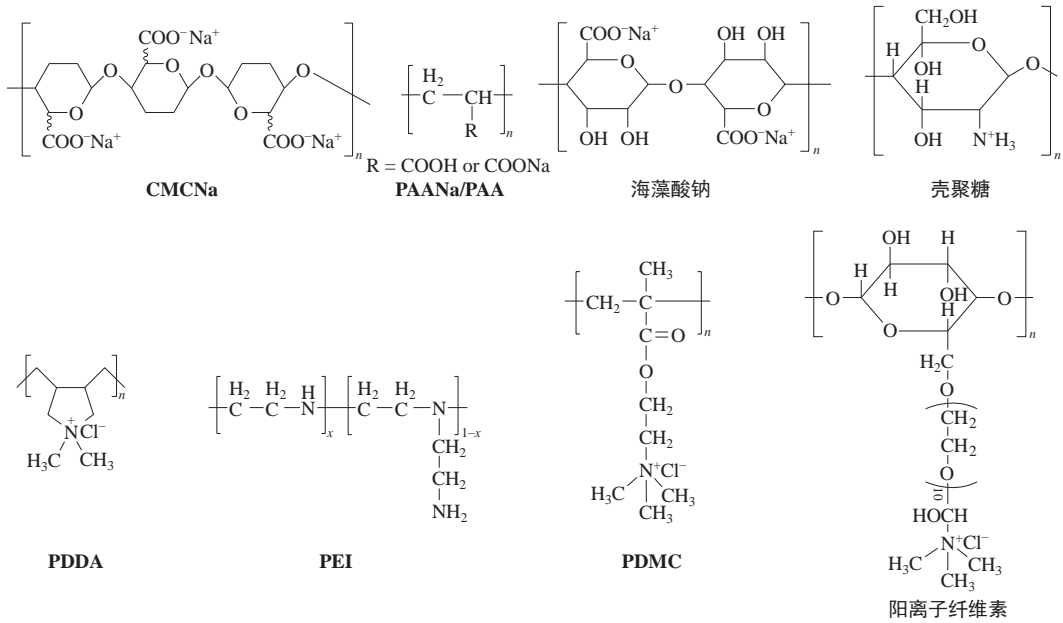


图 10-30 常见聚电解质材料化学结构

氯化铵 (PDMC) 等阳离子聚电解质和羧甲基纤维素钠 (CMCNa) 阴离子聚电解质的 PEC, 通过溶液涂覆 - 化学交联的简单工艺, 制备了系列与 ELbL 膜具有类似结构的 PEC 纳滤膜 (图 10-31)。结果表明, 通过调节 PEC 的化学组成和离子交联结构, 可调控 PEC 膜的亲水性、荷电性和致密性, 该膜不仅对不同价态无机盐及有机物具有良好的分离性能, 同时还表现出优异的耐污染性能。

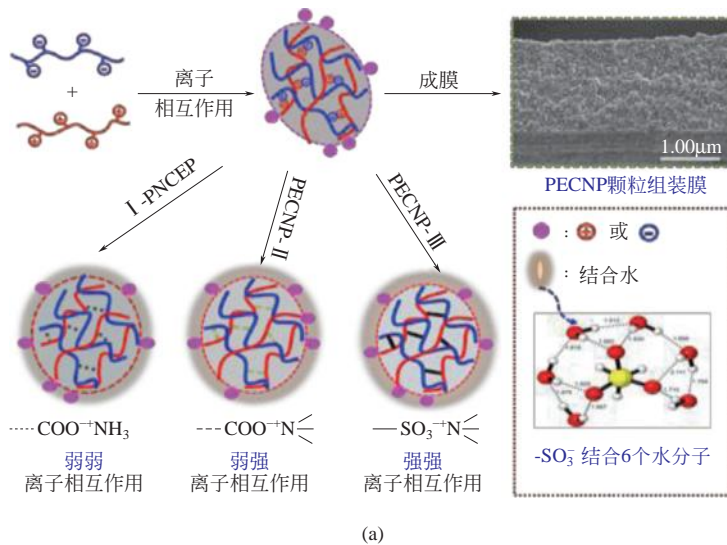


图 10-31

(3) 聚合物纳米混合基质纳滤膜

近年来,随着纳米技术的迅速发展,将一些功能性无机纳米材料引入聚合物膜内以提高膜的水渗透性和耐污染性等已发展成为一个重要的研究方向。2007年,美国加州大学 Jeong 等^[135]首次将自制的 50~150nm 的 NaA 型沸石添加到 TMC 有机相中,通过界面聚合将其原位引入到聚酰胺膜内,制备了薄层纳米复合聚酰胺膜 (Thin film Nanocomposite Membranes, TFNM)。随后,国内外学者针对聚酰胺混合基质膜的构建开展了系列创新性研究工作,将无机纳米材料如 SiO₂、TiO₂、CNT 和 GO 等引入聚酰胺膜中,提高了膜的水渗透通量和耐污染性能。然而,无机纳米粒子通常具有高的表面能,在界面聚合成膜过程中易发生团聚,使混合基质膜产生缺陷,从而导致膜的分离性能下降。将聚合物纳米基元材料如超支化/树状聚合物、生物蛋白纳米颗粒、聚电解质纳米粒子等引入膜中,可以解决纳米材料与聚合物基膜间相容性问题,提高所得纳滤膜分离性能。Ji 和 An 等^[136,137]采用离子交联和化学交联法制备了不同类型两性聚合物纳米粒子,通过调控单体分子扩散速率及其界面聚合反应过程,构筑了聚酰胺纳米混合基质膜 (图 10-33)。通过调节两性聚合物纳米基元的化学结构和亲疏水特性,调控聚酰胺纳米混合基质膜内部微观结构及其表面性质,获得适用于水溶液和有机溶剂体系分离的高性能纳滤分离膜。

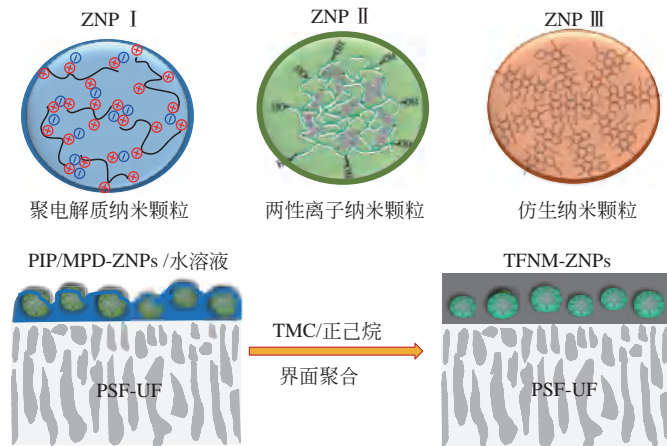


图 10-33 基于两性聚合物纳米粒子聚酰胺混合基质纳滤膜示意图
ZNP—两性聚合物纳米粒子

随着纳米材料科学的迅速发展,一些新型多孔纳米材料被证明具有极高的水/溶剂传输性能,如仿生水通道蛋白、金属有机骨架材料 (MOF)、共价有机骨架材料 (COF) 等,这些新型纳米材料有望用于制备新一代水处理膜。Agre 等^[138]发现水通道蛋白中存在特殊的受限通道,一个 AQP1 水通道蛋白每秒可以传输 3 亿个水分子。在聚合物膜中引入水通道蛋白 Aquaporin-Z (AQPZ) 可将水传递速率提高约 800 倍,是现有报道的聚酰胺膜水通量的 10 倍多 (图 10-34)。Zhao 等^[139]首次将含有水通道蛋白的脂质蛋白 AQPZ 添加到间苯二胺 (MPD) 的水相溶液中,与均苯三甲酰氯 (TMC) 界面聚合制得聚酰胺复合膜。该膜的水通量比商品化聚酰胺膜 BW30 提高了近 40%,对 NaCl 的截留率可高达 97%。水通道蛋白 AQP 可以有效地提高膜通量,但其生物提取合成、膜制备过程复杂,难以规模化生产,距其真正地应用于水处理膜还有很大的距离。

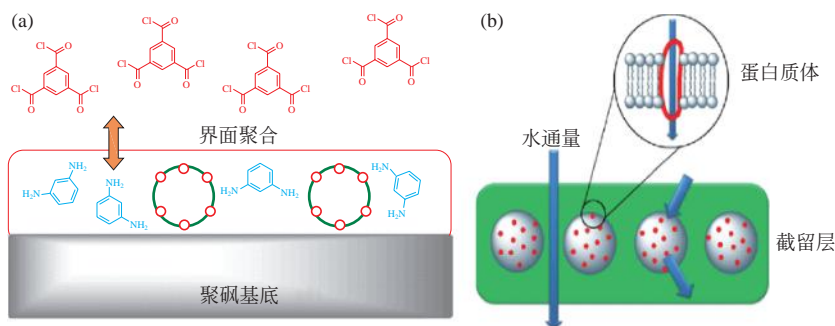


图 10-34 基于水通道蛋白聚酰胺混合基质纳滤膜示意图^[139]

金属有机骨架材料 (MOF) 内部的孔道或空腔的尺寸、形状、分布以及亲疏水性和化学活性等, 均能够通过选择不同的金属离子和配体在分子层次上进行精确的调控, 同时, MOF 内部含有无机金属和有机高分子两种组分, 将其作为混合基质膜的填充组分, 可具有更好的界面相互作用, 避免非选择性缺陷孔的产生。Sorribas 等^[140] 制备了 TFN-MOF 杂化聚酰胺膜, 该杂化膜对有机溶剂的渗透性显著提高, 且由于 MOF 与聚酰胺基膜间存在良好的相容性, 减少了非选择性缺陷孔的产生, 保持了高的分子截留率。Ji 等^[141] 以两性芳香胺纳米粒子 (ZNP) 为模板诱导 MOF 界面晶化构筑多级孔纳米基元纳滤膜 (图 10-35)。纳米晶体 MOF 具有高孔隙率、大比表面积, 将其引入可以调控 ZNP 纳米基元界面孔尺寸, 同时进一步提升了膜孔壁面刚性以及孔有效连通性。所得复合纳米基元膜对刚果红 / 硫酸钠分离选择性为 9.2, 水渗透性约达到 $200\text{L}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{bar})$, 水通量相较于目前报道的聚合物纳滤膜性能提升 1~2 个数量级, 且在长期服役过程中保持稳定的膜结构和分离性能。

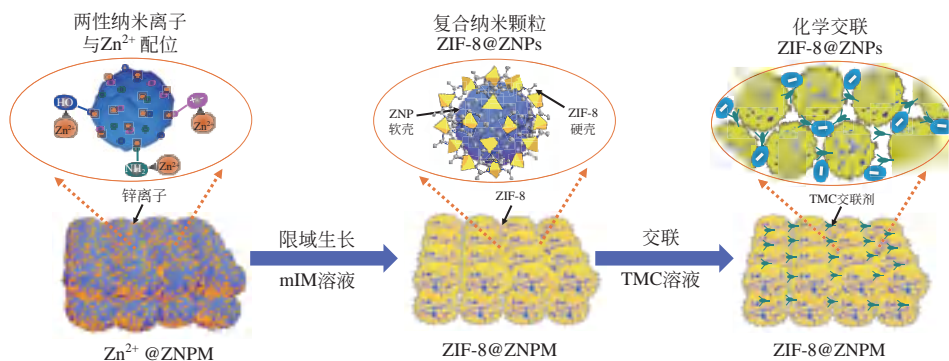


图 10-35 两性纳米粒子诱导 MOF 界面晶化构筑多级孔纳滤膜示意图^[141]

mIM—甲基咪唑; TMC—均苯三甲酰氯

上述研究表明, 混合基质膜已经成为纳滤膜高性能化的重要发展趋势。但是, 纳米功能组分与膜材料的相互作用关系, 功能粒子对成膜过程的影响、对纳滤膜性能的促进机制尚不明确, 而且价廉易得、分散性好和稳定性高的功能纳米粒子的设计与合成仍然面临巨大挑战, 需要从材料设计、成膜动力学和传质过程等方面开展系统、深入的研究。

(4) 新型无机纳滤膜

自 20 世纪 90 年代科学家发现无机材料可用于分离膜的制备以来, 无机纳滤膜的研制

成为纳滤膜发展的一个新的方向^[142]。目前可用于纳滤膜制备的无机金属材料有 γ - Al_2O_3 、 ZrO_2 、 SiO_2 - ZrO_2 和 Al_2O_3 - TiO_2 等，其成膜方法主要有溶胶-凝胶法、化学气相沉积法和水热法^[143,144]。Skruzacek等^[145]采用溶胶-凝胶法，制备了铁离子改性的二氧化硅纳滤膜，膜的孔径约为1.5nm。当操作压力为1.72MPa、进料液pH值为 8.5 ± 0.5 时，膜的水通量约为 $250\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar})$ ，其对NaCl和 Na_2SO_4 的截留率为60%~80%，对 MgCl_2 和 MgSO_4 的截留率小于10%。美国US Filter（国际上最大的陶瓷膜公司）对氧化铝载体改性，得到的陶瓷膜能耐一定程度的强碱，但仍不能在热的强碱液中长时间使用。南京工业大学自主研发设计的无机陶瓷膜具有国际领先水平，目前我国陶瓷膜行业的企业产值从起初的百万元已发展到数亿元的规模。陶瓷类无机纳滤膜虽具有良好的热稳定性、化学稳定性、耐污染和易清洗等优点；但由于其膜制备条件较为苛刻，较难得到大面积无缺陷的纳滤膜及制膜成本高，限制了此类膜的大规模工业化推广。碳材料的化学稳定性好、机械强度高、选择性好，被认为是十分具有应用潜力的膜材料。

碳材料分离膜[如类金刚石碳(DLC)、碳纳米管(CNT)、石墨烯及其衍生物等]具有耐高温性优异、机械与化学稳定性突出和分离性能好等众多优点^[146]。目前主要是使用氧化石墨烯(GO)、还原氧化石墨烯(rGO)的水分散液，通过喷涂、旋涂、真空抽滤或加压过滤等方法，制备基于石墨烯片层堆积的石墨烯基纳滤膜^[147]。Gao等^[148]采用真空抽滤GO水分散液制备超薄石墨烯纳滤膜，当膜厚度为22nm时，由于膜内存在水传输通道，其纯水的渗透通量高达 $21.8\text{L}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot\text{bar})$ ，对染料MB与直接红81的截留率 $>99.0\%$ 。然而，在长期压力运行下，GO纳米基元膜会发生层间孔塌陷现象，导致通量快速衰减。An等^[149]提出采用冷冻干燥-原位晶化新方法调控GO纳米基元成膜。控制GO层间水含量，利用水分子晶化体积增大，扩增GO层间距，构建了层间亚纳米孔传输通道。进一步在纳米孔处原位生长ZIF-8，利用GO上羧基与ZIF-8中的二价锌离子配位作用，实现刚性ZIF-8在GO纳米片柔性边缘的定点填充和交联，消除缺陷孔，保持GO层间距和膜稳定性(图10-36)。

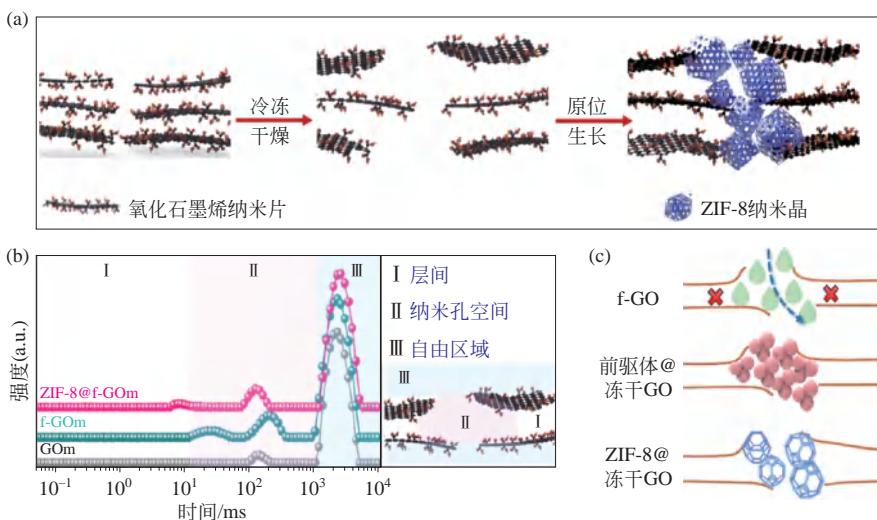


图 10-36 ZIF-8@f-GOm 膜制备示意图及其微观结构表征^[149]

(1) 纳滤应用于水质软化、饮用水净化

目前，纳滤膜最大的应用领域是工业及生活用水的软化，由于纳滤膜对高价态离子具有较强的静电排斥作用力，可以将水中 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 等离子去除，达到水软化和净化的目的。1992—1996年，美国的纳滤装置以 500% 的速度增长，在美国已有超过 100 万吨/天的纳滤软化水装置在运转；纳滤/反渗透（NF+SWRO）集成工艺也已得到成功应用，纳滤对海水 TDS（溶解性总固体）的脱除率一般在 10%~50% 之间，目前最大的规模已达到 360t/h。随着膜分离技术的发展，国内也开始利用膜分离技术对工业和市政用水进行处理。如 1997 年 10 月在长岛南焯城建成投产的国内首套工业化膜软化系统，实际运行的产水量可达 144t/d，具有水质软化效果好、自动化程度高的特点^[150]。

膜法水处理技术是提高饮水安全保障能力的重要技术。据统计，我国 90% 的地表水和地下水受到不同程度的污染，饮水安全形势仍然十分严峻，提高饮用水的安全性十分紧迫与必要。采用以反渗透和纳滤为核心的液体分离膜技术，可有效实现对受污染饮用水的净化，是目前解决饮用水污染最有效、经济的方法。法国巴黎 Mery-sur-Oise 水厂在 1999 年建成的 14 万吨/天的 NF 膜系统，是世界上第一个大型 NF 系统，为 80 万居民提供高品质饮用水（图 10-37）。我国位于长沙市的湘江风光带直饮水工程，采用纳滤膜为核心处理工艺，由湖南沁森环保公司生产的 NF1-4040 纳滤膜组件滤除水中有害病菌、重金属离子、有机毒害物质，为市民提供安全洁净的饮用水。



图 10-37 法国巴黎 Mery-sur-Oise 水厂纳滤膜系统

(2) 纳滤应用于市政污水、工业废水处理

纳滤膜分离技术在水资源供应和废水深度处理与资源回收等方面将发挥重要作用，成

为解决我国水资源危机、减轻和治理环境污染的一种不可或缺的重要手段^[151]。将纳滤膜系统用于处理生活污水或垃圾渗滤液,使不能被生物降解的大分子有机物被截留并浓缩,大分子有机物经过化学氧化后再进行生物降解,能提高化生物氧化池效率,减少氧化剂用量,降低残留物含量,且透过水可以回用,缓解城市水资源短缺的矛盾。长沙市黑麋峰垃圾渗滤液处理工程于2009年进行了提标改造,采用“外置MBR+RO/NF膜工艺”,处理量为1800t/d,处理后排放液COD(化学需氧量)脱除率高达90%。在染整、造纸、纺织等行业中,由于生产技术所限,通常会产生大量的高盐浓度、高色度和高COD的有毒废水。为了将有机物浓缩回收、水循环再利用,可以利用纳滤膜分离技术对含有机物废水进行浓缩、脱盐处理,使浓缩液和处理后的水达到生产回用的标准。矿山废水中含有大量的铅、铁、铜、钴、镍等重金属离子,直接排放到自然水体中,会严重破坏自然环境和人体的健康。采用纳滤膜分离技术处理电镀废水,可以截留大部分有害离子,回收重金属,回用废水,实现零排放。德国Salzgitter Flachstahl钢铁厂曾利用UF-NF/RO两步膜处理工艺对电镀锌生产线废水进行处理,膜对锌和铁的截留率分别高达99.2%和99.8%,由于纳滤膜的选择性,对硫酸截留率低于30%,可回收70%的硫酸,使产水和浓水满足生产需求。河钢矿业中关铁矿水处理项目是目前国内首个在冶金矿山矿井回灌水净化系统应用纳滤膜分离技术的示范化工程项目,能够回收80%清洁水,其余20%的浓盐水全部用于选矿生产,实现生产废水零排放。

(3) 纳滤应用于石油化工产品生产

将纳滤膜分离技术及其集成创新工艺应用于石化行业中废水资源化及其产品纯化分离过程,可大幅提高资源利用率,有效解决石化行业中的高能耗、高污染等问题,对于推进我国石化行业绿色发展和传统产业转型升级将发挥重要作用。2004年,中石油新疆克拉玛依炼油厂将纳滤技术应用于炼油厂综合废水的处理。经过长期运行,纳滤膜元件的性能相当稳定,在0.55MPa的运行压力下,压力损失为0.40MPa,产水量高于60m³/h,运行压力低、产水水质好的纳滤回收率大于75%,废水中COD的脱除率可达70%,且脱盐率稳定高于90%,运行稳定性高,产水可直接回用。包头市山晟新能源有限责任公司与杭州水处理中心合作,将纳滤和多种膜分离技术耦合用于生产过程中形成的高盐废水处理。废水经过超滤系统的预处理后利用纳滤膜进行分盐,再用反渗透膜装置对纳滤浓水进行再浓缩,使最终的蒸发浓水减少至5m³/h。最终结合机械式蒸气再压缩(MVR)技术,大大降低了结晶能耗(图10-38)。通过对多种膜过程的有机组合,达到了对废水预处理、分盐和浓缩的目的,项目投产后实现节省水费投资472万元/年,每年减少排污费达350万元。

在精细化工和石油化工等领域产品的分离、纯化、有机合成、催化等过程均需用到大量的有机溶剂,有机溶剂的直接排放不仅会造成能源浪费,也会对环境 and 人体带来极大危害。纳滤作为一种新型膜分离技术,具有操作压力低、无化学反应、无相变、分离高效等优点,如能将纳滤膜分离技术应用到上述行业领域中则会产生重要的经济效益。Ohya等^[152]报道了用聚酰亚胺(PI)制备的不对称纳滤膜具有耐高温、高压及有机溶剂的特点,该膜可截留170~400Da的有机物分子,可有效地分离汽油和煤油,截留率达到90%。White等^[153]将

PI 纳滤膜用于回收润滑油滤液中的有机溶剂，对润滑油的截留率为 95%，有机溶剂回收纯度高达 99% 以上，且表现出良好的耐溶剂稳定性。目前，纳滤膜的渗透选择性、耐溶剂稳定性与实际应用的要求还有一定的差距，实用性的膜品种单一，多数仍处于实验室阶段。因此，研制新型、高效的耐溶剂纳滤膜，实现其有效的工业化转化以及拓宽该分离膜的应用领域均需要进一步开展工作。



图 10-38 纳滤和多种膜技术耦合用于石化生产中高盐废水处理

(4) 纳滤应用于食品、生物医药等分离纯化

食品、生物和医药等领域涉及的健康产业被认为是 21 世纪引领全球经济发展和社会进步的重要产业。根据《国务院关于促进健康服务业发展的若干意见》中提出的明确目标，到 2020 年，我国健康产业总规模达到 8 万亿元以上。纳滤膜可以应用于乳清脱盐，乳清中含有大量的乳糖、维生素、乳清蛋白和矿物盐，而其中的 NaCl 在很大程度上会破坏乳清的品质，需要将其去除。据报道，国内凯能公司开发的管式纳滤膜可以有效地去除乳清中的无机矿物成分^[154]，对乳糖的截留率达到 99.8%，能将其从 4.2% 浓缩到 29.5%，而对无机矿物的去除率可以达到 90%。氨基酸是构成动物营养所需蛋白质的基本物质，含有碱性氨基和酸性羧基，该类化合物具有等电点，利用纳滤膜的静电排斥效应，可实现对分子量相似氨基酸的分离。

纳滤技术在医药、医疗和保健行业中主要用于药液（水体系或有机溶剂体系，抗生素、氨基酸、维生素、中药组分等）纯化与浓缩、脱盐等，饮用水深度处理、制药用水前处理等^[155]。据 Markets and Markets 数据显示，2021 年全球制药过滤用膜市场达到 620 万美元，纳滤膜分离技术在生物制药行业中的应用将具有广泛前景。目前，国产纳滤膜材料已在涉医领域得到应用，例如三达公司采用纳滤、超滤、连续离子交换技术等耦合工艺，实现了其在维生素（如维生素 C）、凉茶饮料等保健品，青霉素、头孢菌素 C、红霉素等抗生素，葡萄糖、多糖等生物制品，制药行业洗脱柱酸碱回收等中的成功应用，在国内市场占有较高份额。华

北制药厂将纳滤膜分离技术用于青霉素 6-APA 浓缩，浓缩液含固量高到 24% 以上，解决了青霉素 6-APA 低浓度裂解和高浓度结晶的关键问题，较传统方法提高收率 5% 以上，产品质量达到国际标准。此外，纳滤可用于中药注射液、口服液、浸膏等生产中药液提取和浓缩，能够去除药物中非药用成分或药用性较差的成分，克服药剂量大、制药粗糙、质量不稳定的缺点，解决传统浓缩工艺中能耗高、效率低的问题。

10.5

当前存在的问题、面临的挑战及未来发展

国家战略性新兴产业发展给膜产业发展带来新的增长点，国家将节能环保、信息、生物、高端装备制造、新能源、新材料等作为当前阶段重点发展的战略性新兴产业。其中，高性能膜材料是支撑水资源、能源、传统工业升级改造、环境污染治理等领域发展的战略性新兴产业。随着我国战略性新兴产业的快速发展，将给膜产业发展创造出更多的经济增长点，带来巨大的市场空间。我国过滤膜材料及其分离技术的应用已取得诸多进展，但高性能特种分离膜产品种类偏少，面对水资源紧缺、环境保护、新能源开发、传统工艺技术改造、医疗健康保障等市场兴起，我国膜工艺技术与实际分离应用体系结合开发力度不够，总体工程应用规模偏小发展较慢，其主要问题及应用需求包括以下方面。

目前在石化行业、生物医药分离领域中普遍存在物质分离、纯化、浓缩难度大，精度不够高；工业废水处理及资源化利用涉及的各类高含盐、高浓度有机物的分离和脱除十分困难，处理过程复杂，成本高，回收效果不佳等问题。因此，急需针对实际应用需求的膜材料、膜组件、膜应用过程、膜集成技术等方面进行技术攻关，将基础性研究成果从实验室向工业化应用放大进行转化，并最终实现膜技术在面向工业生产和民生健康等实际应用领域中推广。为加快推进我国膜产业技术的发展，促进膜分离技术在关键领域的广泛应用，提出以下发展建议。

在膜材料开发方面，我国的膜产业规模虽已进入全球膜产业大国之列，但总体上我国的膜产业水平与国外发达国家相比仍有差距，特别在膜原料、膜改性材料和高端膜产品发展方面差距较大。高分子微滤膜、超滤膜和纳滤膜材料已得到广泛的研究和应用，但耐高温、耐强酸碱、耐溶剂、耐氧化和抗污染等特种高性能高分子膜的开发仍是今后膜材料研发的主要方向；随着纳米技术的发展，混合基质分离膜的制备已取得较大进步，但在设计、合成具有快速传输选择性“通道”结构的纳米材料及其混合基质分离膜的制备方法和过程仍需进一步简化、可控；无机膜克服了有机膜的不足，具有耐高温、生物和化学稳定性好的优势，目前，其发展的一个重要方向是如何大规模、低成本、高效率地制备孔径小、孔隙率高、膜层薄和完整性好的无机分离膜。因此，加大高端过滤分离膜材料开发力度，突破瓶颈，获得具有自主知识产权的高端分离膜产品，全面提高我国膜产业发展水平十分重要且迫切。

在应用拓展方面，“十四五”期间环保仍是工作重点，在工业废水减排、环境污染治理的同时，大幅降低工业用水量，过滤膜分离技术将在工业废水零排放中发挥着重要的作用。我

国过滤膜分离技术目前主要偏重水处理领域，占膜市场的85%左右，面向医药、能源和化工生产等领域应用的特种功能膜的产品种类较少，这不仅影响了膜产业的全面发展，而且严重制约了膜应用领域的拓展。今后需进一步加强过滤膜分离技术在食品、医药、化工和能源等领域的应用，这将有利于获得更好的经济和社会效益。在面对日益复杂的实际分离体系时，需要进一步开发集成膜分离工艺和优化该过程，开发能够充分发挥各种膜性能的膜组件和完善的操作系统，探索不同应用领域的膜运行和维护技巧，提高膜在实际应用过程中的稳定性和耐污染性能。可以预见，随着人们对膜材料及膜分离过程研究的不断深入和发展，膜分离技术必将在高难度工业废水处理、石油化工、生物医药以及生命健康等领域发挥愈来愈大的作用。

在政策制度方面，建立膜技术在水资源综合利用、石化行业绿色发展，以及食品、生物、医药、生命健康等国家重大领域的中长期战略发展规划，充分发挥政策引导作用，凝聚国内膜领域科研院所和相关行业优势力量，有效整合政产学研资源，建立膜技术研发单位和企业的高效合作平台，强化产业集群效应。同时，交叉融合材料行业，突破膜产业发展所需密封材料和原始材料的限制。在吸引国外膜技术创新人才的同时，也要加大国内人才的培养力度，形成可持续的人才供给模式。搭建世界级新型膜材料科研平台/项目，吸引国内外顶尖科学家和团队参与，攻克膜分离技术领域的瓶颈问题。鼓励相关监管部门出台有力措施，打破膜技术在石化行业、食品加工、制药医疗等领域应用的政策壁垒，推动高新型膜技术产业的持续良性发展。

参考文献

- [1] 邓麦村, 金万勤. 膜技术手册[M]. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2020.
- [2] Yuan S, Strobbe D, Kruth J P, et al. Production of polyamide-12 membranes for microfiltration through selective laser sintering[J]. *J. Membr. Sci.*, 2017, 525: 157-162.
- [3] 黄丽, 陈晓红, 宋怀河. 聚合物复合材料[M]. 第2版. 北京: 中国轻工业出版社, 2012.
- [4] 龚志宏, 韩家心, 何秋良, 等. 气体绝对除菌用高通量氟聚合物微滤膜的制备[J]. *膜科学与技术*, 2009, 29(1): 47-51.
- [5] 李克友, 张菊华, 向福如. 高分子合成原理及工艺学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [6] 黄伯云, 徐志康, 万灵书. 高性能分离膜材料[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2017.
- [7] 张志诚, 黄夫照, 朱柏华. 超滤技术研究与应用[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [8] Chen X, Zhang Z, Chen B, et al. Crystalline grain refinement toughened isotactic polypropylene through rapid quenching of stretched melt[J]. *Polymer*, 2021, 216(19): 123435.
- [9] Widawski G, Rawiso M, Francois B. Self-organized honeycomb morphology of star-polymer polystyrene films[J]. *Nat.*, 1994, 369(02): 387-389.
- [10] Wang R, Liu Y, Li B, et al. Electrospun nanofibrous membranes for high flux microfiltration[J]. *J. Membr. Sci.*, 2012, 392-393: 167-174.
- [11] Dong Z, Ma X, Xu Z, et al. Superhydrophobic PVDF-PTFE electrospun nanofibrous membranes for desalination by vacuum membrane distillation[J]. *Desalination*, 2014, 347: 175-183.
- [12] Yang Y, Li L, Zhang Q, et al. Enhanced coalescence separation of oil-in-water emulsions using electrospun PVDF nanofibers[J]. *Chin. J. Chem. Eng.*, 2021, 38: 76-83.
- [13] Gopal R, Kaur S, Ma Z, et al. Electrospun nanofibrous filtration membrane[J]. *J. Membr. Sci.*, 2006, 281, 581-586.
- [14] Yu B, Song Q, Cong H, et al. A smart thermo- and pH-responsive microfiltration membrane based on three-dimensional inverse colloidal crystals[J]. *Sci. Rep.*, 2017, 7: 12112.
- [15] Ni H, Wang M, Chen W. Sol-gel co-assembly of hollow cylindrical inverse opals and inverse opal

- columns[J]. *Opt. Express*. 2011, 19: 25900-25910.
- [16] Wang X, Husson S, Qian X, et al. Inverse colloidal crystal microfiltration membranes[J]. *J. Membr. Sci.*, 2021, 365: 302-310.
- [17] 曹丙强, 蔡伟平, 李越, 等. 胶体晶体和基于胶体晶体的纳米结构[J]. *物理*, 2004, 33(2): 127-132.
- [18] Liao K, Ye X, Chen P, et al. Biom mineralized polypropylene/CaCO₃ composite nonwoven meshes for oil/water separation[J]. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2013, 131, 39897.
- [19] Gao S, Sun J, Liu P, et al. A Robust Polyionized Hydrogel with an Unprecedented Underwater Anti-Crude-Oil-Adhesion Property[J]. *Adv. Mater.* 2013, 28: 5307-5314.
- [20] Hu L, Gao S, Ding X, et al. Photothermal-Responsive Single-Walled Carbon Nanotube-Based Ultrathin Membranes for On/Off Switchable Separation of Oil-in-Water Nanoemulsions[J]. *ACS Nano*, 2015, 9: 4835-4842.
- [21] 汪锰, 王湛, 李政雄. 膜材料及其制备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [22] Bukhari S Z A, Ha J H, Lee J, et al. Oxidation-bonded SiC membrane for microfiltration[J]. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2018, 38: 1711-1719.
- [23] Chong J, Wang R. From micro to nano: Polyamide thin film on microfiltration ceramic tubular membranes for nanofiltration[J]. *J. Membr. Sci.*, 2019, 587: 117161.
- [24] Zhang S, Jiang G, Gao S, et al. Cupric Phosphate Nanosheets-Wrapped Inorganic Membranes with Superhydrophilic and Outstanding Anticrude Oil-Fouling Property for Oil/Water Separation[J]. *ACS Nano.*, 2018, 12: 795-803.
- [25] Gao S, Shi Z, Zhang W, et al. Photoinduced Superwetting Single-Walled Carbon Nanotube/TiO₂ Ultrathin Network Films for Ultrafast Separation of Oil-in-Water Emulsions[J]. *ACS Nano*, 2014, 8, 6344-6352.
- [26] Zhang F, Zhang W, Shi Z, et al. Nanowire-Haired Inorganic Membranes with Superhydrophilicity and Underwater Ultralow Adhesive Superoleophobicity for High-Efficiency Oil/Water Separation[J]. *Adv. Mater.*, 2013, 25: 4192-4198.
- [27] Gui W, Liu J, Song X, et al. A new microfiltration membrane with three-dimensional reticular architecture for Nano-pollutants removal from wastewater[J]. *Prog. Nat. Sci.*, 2021, 31: 414-419.
- [28] 仲兆祥, 张峰, 邢卫红. 膜分离技术在化工过程烟气高效净化中的应用[C] // 中国环境科学学会. 第二十二届大气污染防治技术研讨会. 2018: 380-385.
- [29] Yang Y, Xu W. Preparation of highly stable porous SiC membrane supports with enhanced air purification performance by recycling NaA zeolite residue[J]. *J. Membr. Sci.*, 2017, 541: 500-509.
- [30] Wei W, Zhang W. Preparation of non-oxide SiC membrane for gas purification by spray coating[J]. *J. Membr. Sci.*, 2017, 540: 381-390.
- [31] Feng S, Zhong Z. Progress and perspectives in PTFE membrane: Preparation modification and applications [J]. *J. Membr. Sci.*, 2018, 549: 332-349.
- [32] 施云海, 许振良. 微滤膜在超净高纯电子化学试剂生产中的应用进展[J]. *化学世界*, 2002: 187-191.
- [33] Ge J, Zong D, Jin Q, et al. Biomimetic and Superwetable Nanofibrous Skins for Highly Efficient Separation of Oil-in-Water Emulsions [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2018, 28: 1705051.
- [34] Yang Y, Li L, Zhang Q, et al. Enhanced coalescence separation of oil-in-water emulsions using electrospun PVDF nanofibers[J]. *Chin. J. Chem. Eng.*, 2020: 1004-9541.
- [35] 王守忠, 张泉荣, 严玉顺. 新型的啤酒除菌方法——核孔膜过滤[J]. *酿酒*, 1988: 27-33.
- [36] 张玲玲, 贺高红, 李祥村. 膜分离技术及其在生物医药领域中的应用[D] // 大连理工大学生物医学工程学术论文集. 大连: 大连理工大学出版社, 2005.
- [37] 张峻梓, 王海涛, 田庆丰. 一次性使用输液器用液过滤器滤膜滤除率研究[J]. *中国医疗器械信息*, 2009, 15: 34-35.
- [38] Lautier A, Gille J P, Juvin A M, et al. Sargentini Extracorporeal circulation in European Economic Community[J]. *Int J Artif Organs*, 1993, 16: 670-676.
- [39] Naito N, Cook K, Toyoda Y, et al. Artificial Lungs for Lung Failure [J]. *J Am Coll Cardiol*, 2018, 72: 1640-1652.
- [40] Kanamori T, Niwa M, Kawakami H, et al. Estimate of gas transfer rates of an intravascular membrane oxygenator[J]. *ASAIO J*, 2000, 46: 612-619.
- [41] 饶华新. 新型中空纤维膜式人工肺的设计与研究[D]. 广州: 暨南大学, 2008.
- [42] Han B, Zhang D, Shao Z, et al. Preparation and characterization of cellulose acetate/carboxymethyl cellulose acetate blend ultrafiltration membranes[J]. *Desalination*, 2013, 311: 80-89.
- [43] Guo H, Peng Y, Liu Y, et al. Development and investigation of novel antifouling cellulose acetate ultrafiltration membrane based on dopamine modification[J]. *J. Biol. Macromol.*, 2020, 160: 652-659.
- [44] Kocaman C, Bukusoglu E, Culfaz-Emecen P Z. Controlling ultrafiltration membrane rejection via

- shear-aligned deposition of cellulose nanocrystals from aqueous suspensions[J]. ACS Appl. Mater. Interfaces, 2021, 13(30): 36548-36557.
- [45] Nayak K, Kumar A, Das P, et al. Amphiphilic antifouling membranes by polydopamine mediated molecular grafting for water purification and oil/water separation[J]. J. Membr. Sci., 2021, 630: 119306.
- [46] Kassa T S, Hu C C, Keshebo D L, et al. Surface modification of high-rejection ultrafiltration membrane with antifouling capability using activated oxygen treatment and metallic glass deposition [J]. Appl. Surf. Sci., 2020, 529: 147131.
- [47] Kasemset S, Wang L, He Z, et al. Influence of polydopamine deposition conditions on hydraulic permeability sieving coefficients pore size and pore size distribution for a polysulfone ultrafiltration membrane [J]. J. Membr. Sci., 2017, 522: 100-115.
- [48] Song D, Xu J, Fu Y, et al. Polysulfone/sulfonated polysulfone alloy membranes with an improved performance in processing mariculture wastewater [J]. Chem. Eng. J., 2016, 304: 882-889.
- [49] Tan X, Rodrigue D. A review on porous polymeric membrane preparation. Part I : production techniques with polysulfone and poly(Vinylidene Fluoride) [J]. Polymers, 2019, 11: 1160.
- [50] Wang D, Li K, Teo W K. Porous PVDF asymmetric hollow fiber membranes prepared with the use of small molecular additives[J]. J. Membr. Sci., 2000, 178: 13-23.
- [51] Ohno S, Nakata I, Nagumo R, et al. Development of low-fouling PVDF membranes blended with poly(2-methoxyethyl acrylate) via NIPS process[J]. Sep. Purif. Technol., 2021, 276: 119331.
- [52] Chen G, Yang Y, Kang D, et al. Enhanced performances of chlorinated polyvinyl chloride(CPVC) ultrafiltration membranes by styrene-maleic anhydride copolymer[J]. Sep. Purif. Technol., 2021, 258: 118043.
- [53] Goh P S, Ng B C, Lau W J, et al. Inorganic nanomaterials in polymeric ultrafiltration membranes for water treatment[J]. Sep. Purif. Rev., 2015, 44: 216-249.
- [54] Chakrabarty B, Ghoshal A K, Purkait M K. Ultrafiltration of stable oil-in-water emulsion by polysulfone membrane[J]. J. Membr. Sci., 2008, 325: 427-437.
- [55] Ochoa N A, Masuelli M, Marchese J. Effect of hydrophilicity on fouling of an emulsified oil wastewater with PVDF/PMMA membranes[J]. J. Membr. Sci., 2003, 226: 203-211.
- [56] Heidari A, Abdollahi E, Mohammadi T, et al. Improving permeability hydrophilicity and antifouling characteristic of PES hollow fiber UF membrane using carboxylic PES : A promising substrate to fabricate NF layer[J]. Sep. Purif. Technol., 2021, 270: 118811.
- [57] Cihanoğlu A, Altinkaya S A. A facile route to the preparation of antibacterial polysulfone-sulfonated polyethersulfone ultrafiltration membranes using a cationic surfactant cetyltrimethylammonium bromide [J]. J. Membr. Sci., 2020, 594: 117438.
- [58] Zhao J, Chong J, Shi L, et al. PTFE-assisted immobilization of Pluronic F127 in PVDF hollow fiber membranes with enhanced hydrophilicity through nonsolvent-thermally induced phase separation method [J]. J. Membr. Sci., 2021, 620: 118914.
- [59] Asatekin A, Kang S, Elimelech M, et al. Anti-fouling ultrafiltration membranes containing polyacrylonitrile-graft-poly(ethylene oxide) comb copolymer additives [J]. J. Membr. Sci., 2007, 298: 136-146.
- [60] Ulbricht M, Belfort G. Surface modification of ultrafiltration membranes by low temperature plasma II. Graft polymerization onto polyacrylonitrile and polysulfone[J]. J. Membr. Sci., 1996, 111: 193-215.
- [61] Yang X, Liew S R, Bai R. Simultaneous alkaline hydrolysis and non-solvent induced phase separation method for polyacrylonitrile(PAN) membrane with highly hydrophilic and enhanced anti-fouling performance[J]. J. Membr. Sci., 2021, 635: 119499.
- [62] Xu Z L, Xu J. Poly(vinyl chloride) (PVC) hollow fiber ultrafiltration membranes prepared from PVC/additives/solvent[J]. J. Membr. Sci., 2002, 208: 203-212.
- [63] Liu B, Chen C, Zhang W, et al. Low-cost antifouling PVC ultrafiltration membrane fabrication with Pluronic F 127: Effect of additives on properties and performance [J]. Desalination, 2012, 307: 26-33.
- [64] Kang D, Shao H, Chen G, et al. Microstructure manipulation in PVDF/styrene-maleic anhydride copolymer composite membranes : Effects of miscibility on the phase separation[J]. Sep. Purif. Technol., 2021, 263: 118371.
- [65] Lin Y, Chao C, Wang D, et al. Enhancing the antifouling properties of a PVDF membrane for protein separation by grafting branch-like zwitterions via a novel amphiphilic SMA-HEA linker[J]. J. Membr. Sci., 2021, 624: 119126.
- [66] 黄征青, 杨丽. 壳聚糖超滤膜的研究进展[J]. 膜科学与技术, 2015, 3(5): 121-125.
- [67] 张守海, 蹇锡高. 杂萘联苯聚芳醚分离膜材料研究及应用进展[C] // 中国-欧盟膜技术研究与应用研讨会文集. 2015: 165-169.
- [68] Dong J, Sharpless B K, Kwisnek L, et al. SuFEx-

- based synthesis of polysulfates [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2014, 53: 9466-9470.
- [69] Dong J, Krasnova L, Finn M G, et al. Sulfur(VI) fluoride exchange(SuFEx): Another good reaction for click chemistry[J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2014, 53: 9430-9448.
- [70] Gao B, Zhang L, Zheng Q, et al. Bifluoride-catalysed sulfur(VI) fluoride exchange reaction for the synthesis of polysulfates and polysulfonates[J]. *Nat. Chem.*, 2017, 9, 1083-1088.
- [71] Zhu W, Li F, Liu J, et al. Nucleophilic construction of sulfate bonds : simplified access to polysulfates and polysulfonates [J]. *React. Chem. Eng.*, 2019, 4: 2074-2080.
- [72] Zhou J, Luo Z, Yin M, et al. A comprehensive study on phase inversion behavior of a novel polysulfate membrane for high-performance ultrafiltration applications [J]. *J. Membr. Sci.*, 2020, 610: 118404.
- [73] 汪勇, 邢卫红, 徐南平. 均孔膜[J]. *化工学报*, 2016, 67(1): 27-40.
- [74] Peinemann K V, Abetz V, Simon P F W. Asymmetric superstructure formed in a block copolymer via phase separation[J]. *Nat. Mater.*, 2007, 6: 992-996.
- [75] Karunakaran M, Nunes P S, Qiu X, et al. Isoporous PS-b-PEO ultrafiltration membranes via self-assembly and water-induced phase separation[J]. *J. Membr. Sci.*, 2014, 453: 471-477.
- [76] Schacher F, Rudolph T, Wieberger F, et al. Double stimuli-responsive ultrafiltration membranes from polystyrene-block-poly(NN-dimethylaminoethyl methacrylate) diblock copolymers[J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2009, 1: 7, 1492-1503.
- [77] Zhou M, Wu Y, Luo P, et al. Fabrication of free-standing membranes with tunable pore structures based on the combination of electrospinning and self-assembly of block copolymers[J]. *RSC Adv.*, 2017, 7: 49568-49575.
- [78] Clodt I J, Bajer B, Buhr K, et al. Performance study of isoporous membranes with tailored pore sizes[J]. *J. Membr. Sci.*, 2015, 495: 334-340.
- [79] Radjabian M, Abetz V. Advanced porous polymer membranes from self-assembling block copolymers[J]. *Prog. Polym. Sci.*, 2020, 102: 101219.
- [80] Volker A. Isoporous block copolymer membranes [J]. *Macromol. Rapid. Commun.*, 2015, 36: 10-22.
- [81] Warkiani M E, Bhagat A A S, Khoo B L, et al. Isoporous micro/nanoengineered membranes [J]. *ACS Nano*, 2013, 7: 1882-1904.
- [82] Ang W L, Mohammad A W, Hilal N, et al. A review on the applicability of integrated/hybrid membrane processes in water treatment and desalination plants [J]. *Desalination*, 2015, 363: 2-18.
- [83] Guillen R G, Pan Y, Li M, et al. Preparation and characterization of membranes formed by nonsolvent induced phase separation : A review[J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2011, 50: 3798-3817.
- [84] Li X, Sotto A, Li J, et al. Progress and perspectives for synthesis of sustainable antifouling composite membranes containing in situ generated nanoparticles [J]. *J. Membr. Sci.*, 2017, 524: 502-528.
- [85] Zhou J, Yin M, Wang Z, et al. Ultralow Ti₃C₂T_x doping polysulfate membrane for high ultrafiltration performance[J]. *J. Membr. Sci.*, 2021, 637: 119603.
- [86] Zinadini S, Zinatizadeh A A, Rahimi M, et al. Preparation of a novel antifouling mixed matrix PES membrane by embedding graphene oxide nanoplates[J]. *J. Membr. Sci.*, 2014, 453: 292-301.
- [87] Wu H, Liu Y, Huang J, et al. Preparation and characterization of antifouling and antibacterial polysulfone ultrafiltration membranes incorporated with a silver-polydopamine nanohybrid[J]. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2018, 135: 46430.
- [88] Zhang F, Zhang W, Yu Y, et al. Sol-gel preparation of PAA-g-PVDF/TiO₂ nanocomposite hollow fiber membranes with extremely high water flux and improved antifouling property[J]. *J. Membr. Sci.*, 2013, 432: 25-32.
- [89] Zhang Z, An Q, Liu T, et al. Fabrication and characterization of novel SiO₂-PAMPS/PSF hybrid ultrafiltration membrane with high water flux[J]. *Desalination*, 2012, 297: 59-71.
- [90] Pang R, Li X, Li J, et al. Preparation and characterization of ZrO₂/PES hybrid ultrafiltration membrane with uniform ZrO₂ nanoparticles[J]. *Desalination*, 2014, 332: 60-66.
- [91] Maximous N, Nakhla G, Wong K, et al. Optimization of Al₂O₃/PES membranes for wastewater filtration[J]. *Sep. Purif. Technol.*, 2010, 73: 294-301.
- [92] Lannoy C F, Soyer E, Wiesner M R. Optimizing carbon nanotube-reinforced polysulfone ultrafiltration membranes through carboxylic acid functionalization[J]. *J. Membr. Sci.*, 2013, 447 (15): 395-402.
- [93] Wu H, Liu Y, Mao L, et al. Doping polysulfone ultrafiltration membrane with TiO₂-PDA nanohybrid for simultaneous self-cleaning and self-protection [J]. *J. Membr. Sci.*, 2017, 532: 20-29.
- [94] Mu K, Zhang D, Shao Z, et al. Enhanced permeability and antifouling performance of cellulose acetate ultrafiltration membrane assisted by L-DOPA

- functionalized halloysite nanotubes[J]. Carbohydr. Polym., 2017, 174: 688-696.
- [95] Yang S, Zou Q, Wang T, et al. Effects of GO and MOF@GO on the permeation and antifouling properties of cellulose acetate ultrafiltration membrane[J]. J. Membr. Sci., 2019, 569: 48-59.
- [96] Vatanpour V, Faghani S, Keyikoglu R, et al. Enhancing the permeability and antifouling properties of cellulose acetate ultrafiltration membrane by incorporation of ZnO@graphitic carbon nitride nanocomposite [J]. Carbohydr. Polym., 2021, 256: 117413.
- [97] Vetrivel S, Saraswathi M S S A, Rana D, et al. Cellulose acetate ultrafiltration membranes customized with copper oxide nanoparticles for efficient separation with antifouling behavior[J]. J. Appl. Polym. Sci., 2020, e49867.
- [98] Melbiah B J S, Nithya D, Mohan D. Surface modification of polyacrylonitrile ultrafiltration membranes using amphiphilic Pluronic F127/CaCO₃ nanoparticles for oil/water emulsion separation[J]. Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp., 2017, 516: 147-160.
- [99] Majeed S, Fierro D, Buhr K, et al. Multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) mixed polyacrylonitrile (PAN) ultrafiltration membranes[J]. J. Membr. Sci., 2012, 403-404: 101-109.
- [100] Yan L, Li Y, Xiang C, et al. Effect of nano-sized Al₂O₃-particle addition on PVDF ultrafiltration membrane performance[J]. J. Membr. Sci., 2006, 276: 162-167.
- [101] Yu L, Xu Z, Shen H, et al. Preparation and characterization of PVDF-SiO₂ composite hollow fiber UF membrane by sol-gel method[J]. J. Membr. Sci., 2009, 337: 257-265.
- [102] Wang Z, Yu H, Xia J, et al. Novel GO-blended PVDF ultrafiltration membranes[J]. Desalination, 2012, 299: 50-54.
- [103] Zhang J, Xu Z, Mai W, et al. Improved hydrophilicity, permeability, antifouling and mechanical performance of PVDF composite ultrafiltration membranes tailored by oxidized low dimensional carbon nanomaterials[J]. J. Mater. Chem. A, 2013, 1: 3101-3111.
- [104] Asif M B, Zhang Z. Ceramic membrane technology for water and wastewater treatment: A critical review of performance, full-scale applications, membrane fouling and prospects[J]. Chem. Eng. J., 2021, 418: 129481.
- [105] Luo J, Hang X, Zhai W, et al. Refining sugarcane juice by an integrated membrane process: Filtration behavior of polymeric membrane at high temperature [J]. J. Membr. Sci., 2016, 509: 105-115.
- [106] 时钧, 袁权, 高从堦. 膜技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001.
- [107] 徐又一, 徐志康. 高分子膜材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [108] Petersen R J. Composite reverse-osmosis and nanofiltration membranes[J]. J. Membr. Sci., 1993, 83: 81-150.
- [109] 高从, 俞三传, 张建飞, 等. 纳滤[J]. 膜科学与技术, 1999, 02: 1-5.
- [110] 王薇, 杜启云. 纳滤膜分离技术及其进展[J]. 工业水处理, 2004, 03: 5-8.
- [111] 邓慧宇, 朱宝库, 魏秀珍, 等. 单体结构对聚酰胺复合纳滤膜表面形貌与性能的影响[C] // 第六届中国功能材料及其应用学术会议. 2007.
- [112] 李祥, 张忠国, 任晓晶, 等. 纳滤膜材料研究进展[J]. 化工进展, 2014, 33: 1210-1212.
- [113] Zhou M, Nemade P R, Noble R D, et al. New type of membrane material for water desalination based on a cross-linked bicontinuous cubic lyotropic liquid crystal assembly[J]. J. Am. Chem. Soc., 2007, 129 (31): 9574-9575.
- [114] Gao C, Yan D. Hyperbranched polymers: from synthesis to applications[J]. Prog. Polym. Sci., 2004, 29: 183-275.
- [115] Yang H, Luo J, Lv Y, et al. Surface engineering of polymer membranes via mussel-inspired chemistry [J]. J. Membr. Sci., 2015, 483: 42-59.
- [116] Zhao D, Kim J F, Ignacz G, et al. Bio-Inspired Robust Membranes Nanoengineered from Interpenetrating Polymer Networks of Polybenzimidazole/Polydopamine[J]. ACS Nano., 2019, 13: 125-133.
- [117] He X, Sin H, Tang Z Y, et al. Controlling the selectivity of conjugated microporous polymer membrane for efficient organic solvent nanofiltration [J]. Adv. Funct. Mater., 2019, 29: 1900134.
- [118] Liang B, Wang H, Shi X, et al. Microporous membranes comprising conjugated polymers with rigid backbones enable ultrafast organic-solvent nanofiltration[J]. Nat. Chem., 2018, 10: 961-967.
- [119] Cote A P, Benin A I, Yaghi O M, et al. Porous, crystalline, covalent organic frameworks [J]. Science, 2005, 310: 1166-1170.
- [120] Fan H, Gu J, Meng H, et al. High-flux membranes based on the covalent organic framework COF-LZU1 for selective dye separation by nanofiltration [J]. Angew. Chem. Int. Ed., 2018, 57: 4083-4087.
- [121] Zhang W, Zhang L, Zhao H, et al. A two-dimensional cationic covalent organic framework

- membrane for selective molecular sieving[J]. *J. Mater. Chem. A.*, 2018, 6: 13331-13339.
- [122] Wang R, Shi X, Xiao A, et al. Interfacial polymerization of covalent organic frameworks (COFs) on polymeric substrates for molecular separations[J]. *J. Membr. Sci.*, 2018, 566: 197-204.
- [123] Decher G, Hong J, Schmitt J. Buildup of ultrathin multilayer films by a self-assembly process: III. Consecutively alternating adsorption of anionic and cationic polyelectrolytes on charged surfaces[J]. *Thin Solid Films*, 1992, 210-211: 831-835.
- [124] Decher G. Fuzzy nanoassemblies: Toward layered polymeric multicomposites[J]. *Science*, 1997, 277: 1232-1237.
- [125] Lu O Y, Malaisamy R, Bruening M L. Multilayer polyelectrolyte films as nanofiltration membranes for separating monovalent and divalent cations[J]. *J. Membr. Sci.*, 2008, 310: 76-84.
- [126] Jin W, Toutianoush A, Tieké B. Use of polyelectrolyte layer-by-layer assemblies as nanofiltration and reverse osmosis membranes[J]. *Langmuir*, 2003, 19: 2550-2553.
- [127] Zhao Q, Qian W, An Q, et al. A facile route for fabricating novel polyelectrolyte complex membrane with high pervaporation performance in isopropanol dehydration[J]. *J. Membr. Sci.*, 2008, 320: 8-12.
- [128] Zhao Q, Qian W, An Q, et al. Synthesis and characterization of solution-processable polyelectrolyte complexes and their homogeneous membranes[J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2009, 1: 90-96.
- [129] Ji Y, An Q, Zhao Q, et al. Fabrication and performance of a new type of charged nanofiltration membrane based on polyelectrolyte complex [J]. *J. Membr. Sci.*, 2010, 357: 80-89.
- [130] Zhao Q, Ji Y, Wu J, et al. Polyelectrolyte complex nanofiltration membranes: Performance modulation via casting solution pH[J]. *RSC Advances*, 2014, 4: 52808-52814.
- [131] Kudaibergenov S, Jaeger W, Laschewsky A. Polymeric betaines: synthesis, characterization and application[J]. *Adv. Polym. Sci.*, 2006, 201: 157-224.
- [132] Ji Y, An Q, Zhao Q, et al. Novel composite nanofiltration membranes containing zwitterions with high permeate flux and improved anti-fouling performance[J]. *J. Membr. Sci.*, 2012, 390-391: 243-253.
- [133] An Q, Ji Y, Hung W, et al. AMOC Positron annihilation study of zwitterionic nanofiltration membranes: correlation between fine structure and ultrahigh permeability[J]. *Macromolecules*, 2013, 46: 2228-2234.
- [134] Ji Y, Zhao Q, An Q, et al. Novel separation membranes based on zwitterionic colloid particles: tunable selectivity and enhanced antifouling property [J]. *J. Mater. Chem. A.*, 2013, 1: 12213-12220.
- [135] Jeong B H, Hoek E M V, Yan Y S, et al. Interfacial polymerization of thin film nanocomposites: A new concept for reverse osmosis membranes[J]. *J. Membr. Sci.*, 2007, 294: 1-7.
- [136] Ji Y, An Q, Weng X, et al. Microstructure and performance of zwitterionic polymeric nanoparticle/polyamide thin-film nanocomposite membranes for salts/organics separation[J]. *J. Membr. Sci.*, 2018, 548: 559-571.
- [137] Ji Y, Qian W, An Q, et al. Mussel-inspired zwitterionic dopamine nanoparticles as building blocks for constructing salt selective nanocomposite membranes[J]. *J. Membr. Sci.*, 2019, 572: 140-151.
- [138] Agre P, Preston G M, Smith B L, et al. Aquaporin CHIP: the archetypal molecular water channel [J]. *Am. J. Physiol.*, 1993, 265: F463-476.
- [139] Zhao Y, Qiu C, Li X, et al. Synthesis of robust and high-performance aquaporin-based biomimetic membranes by interfacial polymerization-membrane preparation and RO performance characterization[J]. *J. Membr. Sci.*, 2012, 423-424: 422-428.
- [140] Sorribas S, Gorgojo P, Téllez C, et al. High flux thin film nanocomposite membranes based on metal-organic frameworks for organic solvent nanofiltration [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2013, 135: 15201-15208.
- [141] Ji Y, Gu B, Xie S, et al. Superfast water transport zwitterionic polymeric nanofluidic membrane reinforced by metal-organic frameworks[J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33: 2102292.
- [142] 梁希, 李建明, 陈志, 等. 新型纳滤膜材料研究进展[J]. *过滤与分离*, 2006, 16 (3): 18-21.
- [143] 李亚军, 隋贤栋, 黄肖容. 无机纳滤膜的研究进展[J]. *材料导报*, 2003, 17: 30-32.
- [144] Tsuru T. Inorganic porous membranes for liquid phase separation [J]. *Sep. Purif. Rev.*, 2001, 30: 191-220.
- [145] Skluzacek J M, Isabel T M, Anderson M A. An iron-modified silica nanofiltration membrane: Effect of solution composition on salt rejection[J]. *Microporous Mesoporous Mater.*, 2006, 94: 288-294.
- [146] Liu G, Jin W, Xu N. Graphene-based membranes [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2015, 44: 5016-5030.
- [147] Ma J, Ping D, Dong X. Recent developments of graphene oxide-based membranes: a review[J]. *Membranes*, 2017, 7: 52.

- [148] Han Y, Xu Z, Gao C. Ultrathin Graphene Nanofiltration Membrane for Water Purification[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2013.
- [149] Zhang W, Yin M, An Q, et al. Graphene oxide membranes with stable porous structure for ultrafast water transport[J]. *Nat. Nanotech.*, 2021, 16: 337-343.
- [150] 张国亮, 陈益棠. 纳滤膜软化技术在海岛饮用水制备中的应用[J]. *水处理技术*, 2000, 26(2): 67-70.
- [151] Mulder M. *Basic Principles of Membrane Technology* [J]. Dordrecht, 1991: 267-272.
- [152] Ohya H, Okazaki I, Aihara M, et al. Study on molecular weight cut-off performance of asymmetric aromatic polyimide membrane[J]. *J. Membr. Sci.*, 1997, 123: 143-147.
- [153] White L S, Nitsch A R. Solvent recovery from lube oil filtrates with a polyimide membrane[J]. *J. Membr. Sci.*, 2000, 179: 267-274.
- [154] 宋玉军, 钟天媛. 纳滤膜的制备及应用技术研究进展[J]. *化工科技*, 1999, 3: 1-7.
- [155] 蔡媛媛, 郭百涛, 邢卫红, 等. 面向健康产业应用需求的膜技术与膜材料[J]. *化工学报*, 2020, 71: 2921-2932.



作者简介

安全福, 北京工业大学教授、博导, 学校科技发展院副院长、北京膜学会副理事长。2005年在浙江大学高分子系获得博士学位, 博士后出站后留校任教。2011—2012年在台湾中原大学薄膜研究发展中心作访问学者, 2014年晋升教授, 2016年12月调入北京工业大学任教。主要从事面向能源环保的新型膜材料的设计与制备, 膜组件及其应用。获国家自然科学基金杰出青年基金、北京市长城学者计划和浙江省杰出青年基金支持。在 *Nat. Nanotech.*, *Adv. Mater.*, *J. Membr. Sci.*, *J. Mater. Chem. A*, *Chem. Eng. J.* 等期刊发表论文 190 余篇, 获授权国家发明专利 58 项, 参与编写膜相关著作 3 部; 获得浙江省自然科学一等奖 (2/5)、中国膜科技中青年突出贡献专家和中国膜行业教育名师奖。

计艳丽, 浙江工业大学膜分离与水科学技术研究院副研究员。近年来主要从事功能性聚合物膜材料合成、分离膜制备及其应用方面的研究工作。作为项目负责人承担国家自然科学基金面上项目 2 项, 青年项目、中国博士后特别资助项目、中国博士后科学基金面上项目和浙江省博士后科研项目各 1 项; 参与国家重点研发计划 2 项和科技部 863/973 子课题 2 项。现已在 *Adv. Mater.*, *J. Mater. Chem. A*, *Macromolecules*, *Chem. Eng. J.*, *J. Membr. Sci.* 等材料、化工以及膜分离权威期刊上发表论文 50 篇, 申请国家发明专利 20 项 (已授权 16 项), 参与编写《中国战略性新兴产业—新材料 (高性能分离膜材料)》著作 1 部。

第 11 章

海洋新材料

李晓刚 刘 超 马菱薇

11.1

海洋工程用钢材料发展趋势

随着我国海洋强国和“一带一路”战略的实施，我国的海洋工程建设项目达到了一个新的高度，对海洋工程用钢的需求提出了更高的要求，如高强度、高韧性、抗疲劳、高耐腐蚀、良好的低温韧性和良好的焊接性能等。2013年，负责“新一代超级钢”研发的973首席科学家翁宇庆院士指出：“面对海洋开发，我国尚无相关的可用钢种，甚至没有海洋用钢的钢号标准”。

海洋用钢的关键问题是耐腐蚀性和焊接性。近10年来，随着我国冶炼-轧制装备和工艺的发展，我国钢铁材料的纯净度大幅提高，材料的强韧性也得到了显著的提升，海洋用结构钢，特别是中厚板，基本完全实现了国产化。但是，海工钢的焊接性和耐腐蚀性仍然是制约高品质海工钢的瓶颈，这需要我国科研工作人员加强海洋环境对海工钢耐腐蚀性机理的研究、建立耐腐蚀钢调控理论、优化生产工艺，最终实现在保证海工钢强韧性的基础上，正向提升材料的焊接性与耐腐蚀性。

面对海洋环境的挑战，世界各国制订了符合本国国情的材料发展计划。美国历来高度重视新材料的研发工作，于2011年制订了旨在缩短新材料研发周期和降低研发成本的“材料基因组计划”，通过分析结构材料的“基因组”，改变原有的试错研发方法，加速材料的研发进度。英国通过实施海洋产业增长战略和海事2050年战略，加快本国海洋材料的研发。德国、日本、韩国和俄罗斯等国家也分别通过能源战略2050、海洋基本计划、国家融合技术发展基本计划和国家能源发展规划等计划加快海洋新材料的研发。

此外，在我国绿色高质量经济发展和碳减排、碳达峰政策的要求下，发展高品质耐腐蚀海工钢成为发展趋势。面对海洋耐腐蚀新材料的发展，我国钢铁企业的机遇与挑战共存。面对海洋耐腐蚀新材料的巨大需求，可以有效调动钢铁企业研发新材料的积极性，推动我国钢

铁材料的升级换代，增加企业材料的品种数量、占领新的市场，提高企业的经济效益和市场竞争能力，还可促进我国钢铁企业形成高效、高质、绿色、低碳的新材料产业体系。但同时要意识到海洋耐腐蚀材料发展的紧迫性和挑战性，面对全球海洋开发的竞争，各国都在加快相关耐腐蚀材料的研发，西方发达国家已经具备了雄厚的研发基础和生产经验，且已经形成了较为完备的耐腐蚀钢材料体系。我国钢铁企业近年来高速发展，在材料的洁净度和强韧性上取得了长足的进步，而材料的耐腐蚀性能还存在明显的不足，导致我国众多高品质海工钢钢种仍需依靠进口。究其根源，耐腐蚀性调控微观理论的不足和高性能耐腐蚀钢制备与应用关键技术的缺乏，成为了制约高品质自主品牌海工钢研发应用和“走出去”战略的“卡脖子”难题。

面对多变国内外发展格局，国内的主导部门领导、国内大型钢铁企业，抓住历史机遇，不断推动产业结构合理性布局的改革，完善高品质钢铁材料发展的顶层设计，加大高品质钢铁材料研发的扶持力度，促进新材料的发展。以鞍钢、南钢、宝钢和首钢为代表的国内钢铁企业通过和各大高校、科研院所合作，研究不同海洋环境下各类材料的腐蚀规律与机理，开发了系列化耐腐蚀海工钢。

11.2

海洋工程用钢开发的关键技术——户外腐蚀评价技术

海洋工程用钢的腐蚀不仅和材料自身的化学成分及组织结构相关，还和服役环境密切相关，海洋环境的腐蚀因素主要包括溶解气体、盐含量、pH、温度、浪花飞溅、光照、辐射和微生物等。材料环境腐蚀数据具有不可引证性，系统研究材料海洋腐蚀的机理与规律，并发展海洋腐蚀评价与防护技术是研发海洋新材料的基础。目前海洋工程材料的户外腐蚀评价技术主要以户外暴晒的形式实现。在国家材料环境腐蚀平台领导的领导下，先后在青岛、舟山、厦门和三亚等地区成立了8所国家级海洋环境试验站，国家材料腐蚀与防护科学数据中心先后在这些海洋环境试验站开展了长期海洋腐蚀环境检测，详细分析了各类影响因素对材料耐腐蚀性的影响规律与机制，并先后开展了上千种材料的海洋环境腐蚀数据收集及评价。

海洋环境是腐蚀性最为严酷的自然环境。海水作为一种腐蚀性较强的电介质溶液，含有大量的盐类和氧气，这两者是引发金属材料腐蚀的重要因素。海水环境温度的周期性变化也会影响材料的腐蚀速率。此外，海水中丰富的微生物的生长代谢过程也会对金属材料的腐蚀产生显著影响。

海工钢在同一海域的海洋服役环境由上至下可分为海洋大气环境（大气区）、海水环境（浪花飞溅区、潮差区和全浸区）和海底环境（海泥区），如图11-1所示。在不同的服役海域，海洋环境可分为包含“高温、高湿、高盐雾、高辐射”（简称“四高”）的严酷海洋环境、深海环境和极地海洋环境等典型环境。在不同的服役环境下，对海工钢的性能要求存在显著的差异。

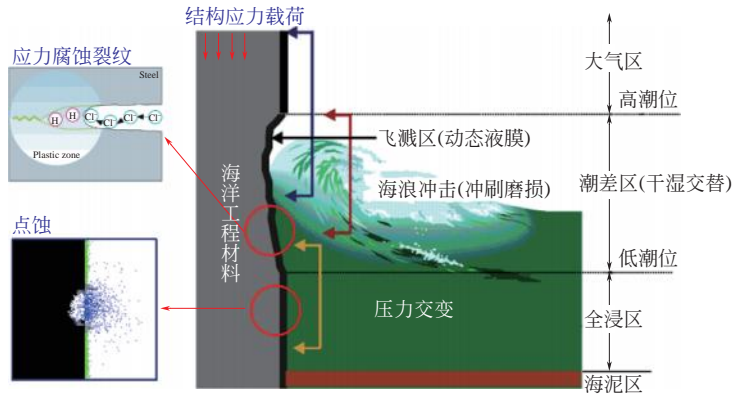


图 11-1 由上至下的海洋环境种类划分

11.2.1 / 海洋腐蚀环境的分类

(1) 海洋大气腐蚀环境

海洋大气环境主要包括海面以上及沿海地区的空气及气候状况。一般认为，距离海岸线 200m 以内的区域可称为海洋大气腐蚀环境。与内陆大气环境相比，海洋大气环境中富含多种盐粒，对金属具有较强的腐蚀性。另外，氯化钙和氯化镁等海盐离子具有极强的吸湿性，容易在金属表面形成薄液膜。薄液膜的存在使金属表面发生电化学反应成为可能，同时由于薄液膜内的供氧较为充足，进一步促进了腐蚀反应的发生。

以钢铁材料为例，在海洋大气环境下，材料表面覆盖溶解有盐粒的薄液膜，铁原子不断失去电子形成 Fe^{2+} ，基体发生溶解，发生阳极反应；在阴极区发生氧的溶解反应，形成 OH^- 。随着腐蚀的进行， Fe^{2+} 和 Na^+ 等离子向阴极区移动， OH^- 和 Cl^- 向阳极溶解区移动。形成的 FeCl_n 可导致局部弱酸性微区环境形成，并在表面形成 Fe/FeCl_n 溶解 $/\text{O}_2$ 这样的腐蚀微电池，密布在材料表面，促进腐蚀的进行。

(2) 浪花飞溅区腐蚀环境

浪花飞溅区是指海水的飞沫能够喷洒到其表面，但在海水涨潮时又不能海水所浸没的部位。浪花飞溅区的部位随潮差区的变化而变化。在浪花飞溅区，材料表面处于干湿交替状态，供氧充足，在阳光和海风的作用下，该区域材料表面的盐分显著浓缩，导致材料的腐蚀加快。研究表明浪花飞溅区是材料腐蚀最为严重的区域。

(3) 海洋潮差区腐蚀环境

海洋潮差区是指在海洋潮汐周期内，随着海水的涨潮和落潮而周期性淹没、暴露的区域。海水潮差区，材料表面始终处于浸没—润湿—干燥交替的状态，此区域供氧充分、温度差异大，同时还存在波浪冲击以及海水退去后残留在试样表面盐分不断浓缩的作用，造成了材料在该区域的高腐蚀速率。在浸没状态时，材料表面溶解氧浓度的差异引起试样表面的宏电池作用，产生电偶电流，加速材料的腐蚀。润湿状态下，薄液膜成为影响腐蚀的主要因素，而电偶电流可以忽略不计，影响腐蚀速率的主要因素为润湿时间。干燥状态下，试样表面的腐

蚀过程较为缓慢。

(4) 全浸区腐蚀环境

海水全浸区对材料耐腐蚀性能的影响显现出显著的差异。总的规律显示出腐蚀速率随海水深度的增加而有所减轻。由于钢材腐蚀过程和海水温度、溶氧量、pH、盐度、海水压力、微生物等因素密切相关，在多因素耦合作用下，材料的均匀腐蚀速率可能会降低，但电偶腐蚀、缝隙腐蚀和点蚀等局部腐蚀可能会加剧。同时海水压力和洋流冲刷的作用下，材料发生应力腐蚀或氢脆的可能性加大。在全浸区中，表层海水具有饱和或接近饱和的溶解氧，海洋生物活性较强，水温适宜，是海水全浸区腐蚀最为严重的区域。

(5) 海底环境

海底环境主要是指海泥区，通常海泥区的氧含量和温度较低，材料的腐蚀速率较低。但在细菌等微生物存在的区域，由微生物代谢生成的腐蚀性 NH_3 和 H_2S 等产物会加速材料腐蚀的产生和发展。海洋中的硫酸盐还原菌、硫氧化菌、铁氧化菌和铁还原菌等细菌可以加速金属材料的腐蚀。

11.2.2 / 高温高湿高盐高辐照严酷海洋环境

以我国南海为代表的热带海洋大气环境中，年平均气温在 20°C 以上，常年处于高温状态。温度对金属大气腐蚀的影响分为两方面：一方面，温度升高有利于提高电化学反应速率和物质扩散速率，加快腐蚀速率；另一方面，在热带海洋大气环境下，较高的温度会促进薄液膜的蒸发，缩短表面润湿时间，从而降低腐蚀速率。因此，在侵蚀性离子浓度较高的大气环境下，温度对金属材料的大气腐蚀有着两方面的影响。在高温高湿高盐严酷海洋环境下，海洋大气环境具有较高的湿度，在金属表面形成薄液膜环境，促进金属表面腐蚀原电池的形成，加速材料的腐蚀，随着温度和湿度的周期性变化，薄液膜中各类盐的浓度不断提升，加速了材料的腐蚀速率。ISO 9223 将材料的表面润湿时间定义为温度在 0°C 以上且湿度超过 $75\%\sim 80\%$ 的时间。我国以南海为代表的高温高湿高盐高辐照严酷海洋环境下，年表面润湿时间在 5000h 以上，高湿环境对材料表面的腐蚀过程起到了促进作用。热带海洋环境属于强日照环境，如我国西沙大气站的年太阳辐射量达 $1600\text{MJ}/\text{m}^2$ ，辐照会加速材料表面液膜的蒸发，降低腐蚀速率。但液膜的挥发也导致了材料表面盐的浓缩，在后续形成的薄液膜环境下加速材料的腐蚀速率。此外，辐照还会加速高分子材料的老化。海洋环境下， Cl^- 的沉积速率是影响材料腐蚀速率的最重要因素。小离子半径的 Cl^- 在材料表面氧化膜的缺陷处极易扩散，到达金属基体表面，引发腐蚀。 Cl^- 在金属表面的沉积，还会降低材料发生腐蚀的临界相对湿度，减小材料发生腐蚀的阻力。

总体来说，在高温高湿高盐高辐照的严酷海洋大气环境下，材料表面富含 Cl^- 的薄液膜环境，会加速材料腐蚀的产生和发展。

11.2.3 / 深海海洋环境特征

随着深海资源的开发，“蛟龙”号深海潜水器、深海采油设备、海底管线和深海航行器

等装备在深海环境下的腐蚀越来越多地得到关注。深海腐蚀的主要因素有静水压力、氧含量、盐分浓度、温度、海水流速、微生物等。20世纪60年代以来,以美国和日本为代表的发达国家,对数百种金属材料进行了深海腐蚀试验,系统总结了各类影响因素对不同金属材料耐腐蚀性的影响规律。在进入21世纪以来,国家材料腐蚀与防护科学数据中心和中船重工七二五研究所海洋腐蚀与防护国防科技重点实验室等科研单位在南海进行了大批量的深海腐蚀试验,并对材料的腐蚀形貌及腐蚀机理进行了详细分析。结果表明,深海中的溶氧量对金属的腐蚀特征有着显著影响,随着溶氧量的降低,金属材料的腐蚀速率逐渐降低。此外随着静水压力的升高,材料的点蚀、应力腐蚀等局部腐蚀发生的风险增大。

11.2.4 / 极地海洋环境特征

目前,极地材料腐蚀研究主要集中在北极圈和南极圈附近的国家,如俄罗斯、挪威、澳大利亚和美国等。目前他们已经在南极和北极等极地环境率先展开极地海洋环境腐蚀特征调研和材料的腐蚀研究,旨在评估材料在这种苛刻环境下的服役安全性。我国自2017年以来陆续在北极海域、南极海域及南极大陆开展了材料腐蚀初步调查工作,并在南极伊丽莎白公主地区(中山站所在地)和维多利亚地区(恩克斯堡岛站所在地)成功开辟了大气腐蚀试验站点(图11-2)。2019年,随着我国第一艘由中国自主建造的极地科学考察破冰船“雪龙2”号正式交付使用,中国海洋大学和北京科技大学联合在极地站点开展多种材料的户外挂片试验。



图 11-2 我国南极中山站及恩克斯堡岛站腐蚀暴晒场图片

极地海洋环境的典型特征是低温高辐照,年平均湿度为51%,且常年伴随强风天气。极地影响材料腐蚀的主要因素有高风速、高辐照、冰雪及冰中可溶性盐、夏季温度升高后材料表面形成的可溶性盐膜。在极地海洋低温和高风速条件下,平台材料表面易形成着冰现象,阻碍金属表面的氧气及水分的传递,降低材料的腐蚀速度。随着材料表面盐分的吸附,会降低结冰温度。而且,冰层内依然存在电化学腐蚀现象。极地地区的平均降水量较低,不能实现盐分的自然洗涤,易形成具有持续性的腐蚀环境。在浪花飞溅区,由于波浪和冬夏之间冰和海冰的反复循环,易形成干湿交替环境,加重材料的腐蚀过程。此外,局部存在火山地区,随着火山爆发,会导致 SO_2 等腐蚀性气体浓度的升高,加速材料的腐蚀。

采用户外暴晒技术,可以得到相关海洋工程材料在真实服役环境下的腐蚀速率。但此方法具有试验周期长、获得数据量少和腐蚀过程无法追踪的缺点。针对以上问题,北京科技大

学承担的国家材料腐蚀与防护科学数据中心先后建立了海洋腐蚀实验室环境载荷谱、海洋腐蚀试验与评价标准规范新体系和腐蚀大数据在线监测技术。大数据在线监测可以实施采集典型环境参数的变化过程和材料的腐蚀速率，并可以通过对其腐蚀过程中电荷转移累积量的分析，精准区分环境参数、合金成分或组织结构改变对材料腐蚀速率的影响规律，实现材料耐腐蚀性的评价。并在此基础上发明了基于腐蚀大数据的短期暴晒试验和环境谱试验相结合的腐蚀寿命预测技术，结合理论建模，实现了耐腐蚀钢研发模式由“经验指导实验”向“理论预测+实验验证”的转变，与常规的长周期暴晒方法相比，研发周期显著缩短。

11.3 / 主要品种

11.3.1 / 海洋工程用中厚钢板

中厚钢板是指厚度大于 4.5mm 的工程钢板。我国的 GB 712—2011《船舶及海洋工程用结构钢》标准对屈服强度为 235~690MPa 的钢材进行了详细的性能划分。根据强度海洋工程用钢分为一般强度、高强度和超高强度海洋工程用钢三类。其中一般强度船舶及海洋工程钢的牌号主要有 A、B、D、E 等；高强度海洋工程钢的牌号主要有 AH32、DH32、EH32、FH32、AH36、DH36、EH36、FH36、AH340、DH40、EH40、FH40 等；超高强度海洋工程钢的牌号主要有 AH420、DH420、EH420、FH420、AH460、DH460、EH460、FH460、AH500、DH500、EH500、FH500、AH550、DH550、EH550、FH550、AH620、DH620、EH620、FH620、AH690、DH690、EH690、FH690 等。海洋工程用中厚钢板是海洋重大装备的最关键用材，其品质的好坏直接决定了海洋装备的安全服役和使用寿命，也代表了一个国家海洋装备的制造水平。我国的海洋中厚钢板目前正在突破 690MPa 级别的各种关键制备技术，而国外已经完整掌握了 780MPa 级别的各种关键制备技术。

随着海洋强国战略的实施，我国对海洋资源的开发达到了新的高度。然而，海洋环境极其复杂，在海浪、海潮、风暴、潮流和微生物的作用下，常受到高载荷和腐蚀的交互影响作用。这就要求海洋工程用钢（海工钢）具有高强度、高韧性、抗疲劳性、高耐腐蚀性、抗氢脆、良好的低温韧性和良好的焊接性能，以保证海洋平台、跨海大桥、特种船舶等海洋装备在复杂服役环境下的安全性和可靠性。海洋平台用钢在海洋环境下的腐蚀形式较为复杂，不仅和服役的环境相关，还和其在海洋的深度相关，如图 11-3 所示。

海工钢需要具有高强度、大规格、易焊接和高耐腐蚀的特点。目前海洋平台用钢一般遵循 EN 10225（英国标准）、BS 7191（欧洲标准）、API（美国标准）和 NORSOK（北海标准）四大国际标准，对材料力学性能、焊接性能、低温韧性和强度的均匀性都有明确的要求，然而对材料的耐腐蚀性能的规范相对欠缺。世界海洋平台用钢主要由德国的迪林根，日本的新日铁、JFE 和住友金属生产，强度一般大于 350MPa，目前常用的有 420MPa、460MPa、500MPa、550MPa、620MPa 和 690MPa 等几个级别，并要求低温性能至少满足 -40°C ，甚至 -60°C ，其主要以调制、控轧控冷和正火状态交货，以保证材料的力学和焊接性能。目前

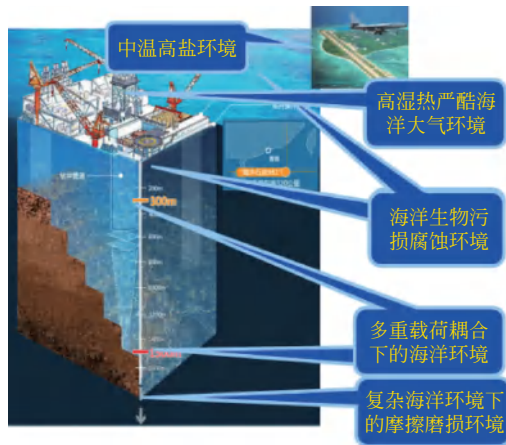


图 11-3 海工钢服役环境的分类

以日本为代表的国家，已经成功研发了强韧性、耐低温、耐腐蚀性良好、可大线能量焊接的 980MPa 级海工钢。日本的 JFE 公司开发了厚度为 140mm、屈服强度为 700MPa、抗拉强度为 800MPa 的含镍 (Ni) 平台用钢和 JFE-HITEN 系列改样工程用钢，强度覆盖 360~980MPa，具有高耐海水腐蚀性、可大线能量焊接和优良的低温韧性等特点；日本新日铁也通过氧化物冶金技术开发出了系列化耐候钢板，如强度覆盖 315~950MPa 的 WEL-TEN 系列高强度钢板、MARILOY 系列焊接结构用耐海水腐蚀钢板及 NAW-TEN 系列含 Ni 耐候钢板等品种。欧洲相关海洋资源开发较早的国家，也开发出了系列化高强度海洋平台用钢，强度覆盖 355~690MPa。挪威的“埃科菲斯克 II 号”海洋钻井平台采用了改进韧性 S420M 和 S690Q 钢板建造，在欧洲第一次将 690MPa 钢板应用于海洋平台。俄罗斯的在北极的 Arkticheskaya 自升式钻井平台采用了 S690 高强度海工钢建造。在海洋平台建设中，部分通过调质工艺生产的高强度级别钢板（屈服强度可达到 1100MPa）得到了部分应用。然而，随着钢板强度的提升，材料自身存在严重的均匀性、焊接性和耐应力腐蚀开裂的问题，这也限制了高强度海工钢在海洋平台中的大面积推广。日本的低温强韧化和焊接热影响区强韧化海洋平台用钢研发水平一直处于世界领先水平。日本的钢铁公司采用在线快速冷却、在线热处理、连续在线控制工艺、热影响区细晶高韧化技术和氧化物冶金技术等先进生产工艺，以保证海洋平台用中厚钢板的高强度、高韧性、优异的焊接性能及良好的耐腐蚀性能。

近年来，随着我国冶炼装备和纯净化、细晶化理论的发展，我国钢铁企业在海工钢领域取得了较大的进展。我国海洋工程用钢已能满足国内市场的大部分需求，海洋平台主要使用的屈服强度为 355~460MPa 的 D、E 及 F 级钢板，基本实现国产化。近些年，以宝钢、沙钢、鞍钢、舞钢、南钢和首钢为代表的国内钢铁企业成功研发了 690MPa 级海工钢，并得到了船级社的认证，标志我国海工钢实现了 690MPa 强度以下钢板的全覆盖。对于高强度的海工钢，当其厚度超过 120mm 时，产品质量及性能的稳定性、满足更大规格产品的技术需求、耐腐蚀开裂、配套焊接等方面都存在问题。虽然在力学性能上的差距正在逐渐缩小，但在耐腐蚀性上，还依然存在较大的进步空间。海洋工程的关键部位使用的部分高级别的特种钢材仍依赖进口，特别是屈服强度大于 690MPa 的高强韧、高耐腐蚀和易焊接的海工钢。油舱甲板钢是

海洋工程用钢中较为特殊的一种，其在服役过程中受到 H_2S 、 O_2 、 CO_2 和干湿交替的协同影响，会产生严重的腐蚀。2010年，国际海事组织（IMO）通过了《油船货油舱腐蚀防护替代方法性能标准》，要求油舱甲板钢必须采用耐腐蚀材料，且对其耐腐蚀性进行了规定：目标寿命25年，钢板服役25年后的腐蚀损耗值不超过2mm。我国南钢、宝钢和鞍钢等钢铁企业自2008年以来先后采用Cu、Cr、Sb、Sn和Mo等微合金元素对钢板的耐腐蚀性进行调控，研发了系列化的耐腐蚀油舱甲板钢，其强度均在360MPa以上。

由于材料耐应力腐蚀及焊接性问题的存在，目前我国海洋平台采用的钢中多以355~460MPa级海工钢为主，在齿条板、弦板和支撑管等部分区域采用690MPa海工钢。如我国2019年建造的“雪龙2”号破冰船主要采用了360MPa钢板；南海荔湾平台主要以360MPa的海工钢为主；我国第一艘自主设计并建造球罐的双燃料LNG船“新乐30”号主要采用了560MPa的9Ni钢；“蓝鲸”号钻井平台系列，采用了百余吨690MPa海工钢，其主体依然以360MPa海工钢为主；我国半潜式钻井平台“海洋石油981”所用钢的强度也达到了690MPa；北海油区的自升式平台采用了500MPa以上，甚至750MPa的高强度海工钢；武汉江汉七桥和澳门四桥均采用了690MPa的高强度海工钢；2020年，我国援建马尔代夫的中马友谊大桥采用的是420级的3Ni钢；“大庆435”号油船采用了鞍钢研发的油舱甲板钢对油舱内底板和上甲板进行改装，显著提升了油船的耐腐蚀性能。围绕海洋大型油轮船的专用耐腐蚀钢板进行研究与生产，推动了我国耐腐蚀海洋中厚钢板的发展。经过我国科研工作者和钢铁生产企业的多年研发，已经形成了系列化的耐海洋腐蚀钢种，在严酷海洋大气环境下形成了钢与涂料合作的研发模式，并在实际工程中得到了应用，如港珠澳大桥和中马友谊大桥等。目前我国大型钢企正在大力开发深海和极地海洋耐腐蚀新钢种，特别是在深海下和阴极保护技术相匹配的钢种，以及适应极地超低温的耐腐蚀钢种。

11.3.2 / 海洋工程用管线钢

海底管线钢是海洋石油资源开发的重要装备。海洋油气资源开发是我国海洋强国战略的重要组成部分。海洋工程用管线钢是深海油气资源输送的重要材料，其服役环境异常苛刻，常受到管外高压低温海水、海浪冲刷、微生物腐蚀、管内高 H_2S 和应力/载荷的耦合作用，增加了海洋工程用管线钢氢致损伤（氢致开裂和硫化氢应力腐蚀开裂）和低温脆性断裂的风险。这也对海底管线钢提出更高的性能要求，如高钢级、大厚度、各向同性、低屈强比、低温下的高韧性、高止裂性、良好焊接性、抗大应变性能及抗酸性介质腐蚀等性能等。

日本、美国、欧洲等国家和地区关于海底用管线钢的研发起步较早，形成了先进的产品体系，并在海底油气输送工程中展开了相关的应用。20世纪70年代初期X65管线钢开始投入使用，20世纪80年代开始在油气输送工程中引入X70管线钢，在1985年以后，X80钢逐渐在部分管线工程中开始得到使用。如墨西哥湾海底（深度2400余米）的输油管道，采用了管径610mm、壁厚24~34mm的X65管线钢；挪威到英国的Langeled海底管线建设采用了管径1016mm、最大壁厚34mm的X70管线钢；俄罗斯穿越波罗的海的海底石油管线采用了管径1219mm、最大壁厚41mm的X70管线钢；于2021年竣工的连接俄罗斯至德国的本溪管线工程同样采用了X70级管线钢。随着管线钢服役深度的不断增加，非酸性石油管线多采

用 X70 级管线钢，抗酸性石油管线多采用 X65 级管线钢。

我国海底石油管线建设起步较晚，但近年来随着对海洋资源开发力度的加大，我国海底管线建设得到了迅猛的发展。于 1985 年在渤海埕北油田铺设第一条海底管线以来，我国已经建设了数万公里的海底管线。随着我国高钢级石油管线钢的发展成熟，海底管线钢的强度也提高到了 X70 级。例如，我国胜利油田海底管线采用的是管径 560mm、最大壁厚 12.7mm 的 X52 钢；乐东气田海底管线采用的是管径 610mm、最大壁厚 18.7mm 的 X65 管线钢；南海荔湾 3-1 油气田海底管线采用了管径 765mm、最大壁厚 32mm 的 X65 钢和管径 765mm、最大壁厚 32mm 的 X70 钢；2018 年我国深海起重铺管船“海洋石油 201”在南海北部湾海区完成了 195km 的海底管线铺设，铺设管线主要采用了管径 800mm 的 X70 钢；2021 年建设的“深海一号”油气田采用的是 X65 级钢。

目前我国海底管线钢的生产及应用技术已经达到国际先进水平，随着国内钢铁工业技术的进步，国内钢铁企业具有了一流的海底管线钢生产水平。在相关部门的领导下，国内钢铁企业研发出了各种类型的海底管线用钢，实现了大口径、大壁厚、高强度（X65/X70）、高耐腐蚀海底管线钢的研发，为我国深海开发项目提供了有力的支撑。

随着深海资源的进一步开发，对高钢级海底管线钢的需求逐渐增大。我国已经成功开发出了 X80、X90、X100 等高强度管线钢，并在陆地油气输送管线中得到应用。但在复杂的海底环境下，高钢级海底管线钢存在焊接性差、耐 H_2S 腐蚀能力不足和低温断裂敏感性高的缺点。日韩针对高钢级海底抗酸管线钢采用了氧化物冶金技术，通过微合金元素调控，在钢中形成微纳米夹杂，对焊接热影响区的奥氏体晶界起到钉扎作用，促进晶内针状铁素体的形核和长大，细化组织。同时选择合理的脱氧剂如 Mg 脱氧等，在钢中形成微纳米的复合夹杂，成为钢中的氢陷阱，降低钢中可扩散氢的浓度，进而提升钢材的焊接性、抗氢性能和低温韧性。目前我国科研人员也在积极探索高钢级管线钢在海底的腐蚀机理，并联合国内相关钢铁企业开展相关海底管线钢的研发。

11.3.3 海洋工程用耐腐蚀钢筋

海洋环境中存在大量的 Cl^- ，加速了钢筋混凝土中钢筋的腐蚀失效，降低了钢筋混凝土的耐久性而导致过早损坏。混凝土孔隙液的主要成分为 $Ca(OH)_2$ ，其 pH 一般在 12.6 以上，钢筋在此高碱性环境下，表面存在一层致密的钝化膜，抑制钢筋的腐蚀。然而，在海洋环境下， Cl^- 侵蚀和混凝土碳化加速了钢筋的锈蚀。普通钢筋在南海存放数月，材料既会发生严重腐蚀又会发生层状剥落。

CO_2 和 SO_2 等气体进入混凝土内部时，会降低混凝土孔隙液的 pH，导致混凝土酸化，当混凝土孔隙液的 pH 低于 9.6 时，混凝土会解体，导致结构彻底失效。此外，环境中的 Cl^- 渗透到钢筋基体后，会破坏钢筋表面的钝化膜，诱发局部腐蚀，形成腐蚀电池，并在随后形成的局部酸化自催化效应下，加速钢筋的阳极溶解，导致局部环境不断酸化。随着钢筋的不断溶解，腐蚀产物的形成易导致混凝土内应力的增加，进而导致混凝土的开裂，加速钢筋的腐蚀。

为提高钢筋在海洋环境下的耐腐蚀性能，世界各国开始通过合金化调控研发耐腐蚀钢

筋。低合金耐腐蚀钢筋适合当今环保节能大趋势的发展方向，其研究还正在进行中。自 20 世纪 60 年代以来，各种低合金高性能的耐腐蚀钢筋先后被开发出来。美国 1933 年研究成功了耐候钢“Corten”钢，并投入了市场进行销售；自 1936 年开始研制耐海水腐蚀钢，到 1951 年研制成功了“Mariner”钢，并于 1964 年投入了市场进行销售。这两个钢号分别是世界上第一个低合金耐大气腐蚀钢和第一个低合金耐海水腐蚀钢的名牌钢号。随后世界各国才根据自己国情需要，相继开发了各种系列、各种使用范围和用途的耐大气和海水腐蚀钢号，并投入了市场销售和推广使用。20 世纪 90 年代末期，美国加利福尼亚大学伯克利分校的 Gareth Thomas 博士联合 MMFX 钢铁公司开发了一种含有 9%（质量分数）Cr 的低碳 MMFX 钢筋，其具有较高的耐腐蚀性能，力学性能也有所改善，如强度、延展性、焊接性能和可成型性，经实验室加速试验预测，使用 MMFX 钢筋的钢筋混凝土使用寿命为 55~100 年。2005 年，David 等开发的低合金钢 ASTM A706 钢筋，有较低的 C（0.23%）、Mn（0.93%）、P、Ni（0.18%）、Cr（0.18%）和较高的 Cu（0.41%）。也有少数研究者采用 Cu、Cr、Mo、Ni 等耐腐蚀元素对钢筋进行微合金化，获得了良好的耐腐蚀性能。沙特的科研人员通过调控钢筋的热轧钢筋冷却工艺，在钢筋外层形成马氏体组织，从而提高其耐腐蚀性能。

我国从 1965 年开始研制耐海水腐蚀钢，我国的科研工作者详细研究了 Cu、P、Cr、Ni、Mo 和稀土等元素对钢筋耐腐蚀性能的影响规律，并开发了系列化的耐腐蚀钢种。如北京科技大学承担的国家材料腐蚀与防护科学数据中心分别通过 Cr、Ni、Cu、P、Mo 和稀土等元素的有机组合调控，研发了系列化的低碳耐腐蚀钢筋，成功提升了海洋环境下或盐碱地环境下钢筋的耐腐蚀性能。程学群等通过调控 Cr（1.5%~5%）含量，详细研究了在碱性环境下 Cr 元素对钢筋表面钝化膜的影响机制，分析了钝化膜缺陷的变化规律。高含量的 Cr 元素可以在钢筋表面形成厚度为 5~6nm 的富 CrO_3 和 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 钝化膜，还可以提升钢筋的开路电位、极化电阻和临界 Cl^- 浓度，降低钢筋的附属速率，并建立了钢筋的寿命预测模型，结果显示随着 Cr 含量的提升，钢筋的服役寿命显著增长。截至目前，我国已有部分钢铁企业通过与高校合作，研发了系列化的耐腐蚀钢筋，如沙钢、南钢、新兴铸管、三宝、马钢和包钢等企业，以适应市场的需求。目前国家已经存在 GB/T 33953—2017《钢筋混凝土用耐蚀钢筋》和 GB/T 34206—2017《海洋工程混凝土用高耐蚀性合金带肋钢筋》两项耐腐蚀钢筋相关的国标，GB/T 33953 当中分别针对工业大气环境和耐 Cl^- 环境进行了元素成分的调整规定，其中有关海洋耐腐蚀钢筋主要通过调控钢中的 Cr（0.25%~7%）和 Ni（ $\leq 0.65\%$ ）含量来实现。而 GB/T 34206 可看作是 GB/T 33953 的一个补充标准，其主要是通过超高 Cr 含量调控（7.5%~10%）来提升钢筋在海洋环境下的耐腐蚀性能。然而，需要指出的是，目前国内的很多设计和建设单位对冰盐、海盐、盐碱地等的“盐害”重视不够、认识不深、措施不力，导致耐腐蚀钢筋的市场并未被充分挖掘。此外，还需要认识到混凝土中的钢筋是在碱性混凝土孔隙液中服役，在接近真实服役环境中建立合理、准确和便捷的钢筋耐腐蚀性监测方法是高品质耐海洋腐蚀钢筋研发的保证，不合理的钢筋耐腐蚀性评价方法，可能会阻碍耐腐蚀钢筋的研发与推广应用。

钢筋混凝土结构是海洋工程建设中使用最为广泛的结构形式，如何在较低的成本范围内，稳定提升钢筋的耐腐蚀性能，保证工程结构的服役寿命，是一个需要综合考虑的问题，开发

新型耐海洋腐蚀钢筋材料，通过材料改性提升基体材料的耐腐蚀性能，获得持久的耐腐蚀性提升，并合理控制其生产及使用成本，将会是一个重要的研究方向。

11.3.4 / 海洋工程用不锈钢

(1) 超级不锈钢

与常规的微合金或低合金结构钢不同，海洋用的超级材料主要指高 Ni/Cr/Mo 的高性能不锈钢材料，具有较高的强度和耐腐蚀性能，如超级奥氏体不锈钢、超级铁素体不锈钢和超级双相不锈钢等。此类材料具有较高的点蚀当量、高纯净度和 N 合金化的特点，主要用于海洋平台的储运、工艺管道、脱盐、换热器、油井管、钻探和桩腿等部位。在海洋环境下，Cl⁻ 极易破坏不锈钢表面的钝化膜，诱发材料表面点蚀的发生。随着空气中海盐不断在材料表面沉积、浓缩，在温度和湿度的作用下，材料的点蚀过程会被加剧。在钢中添加 Cr 和 Mo 并进行 N 合金化，可以有效提高材料的点蚀当量 [PREN= wt% (Cr) + 3.3wt% (Mo) + 16wt% (N)]。

根据海洋平台部位的不同，其使用的不锈钢种类也存在差异，如平台上方的关键部件主要采用超级奥氏体不锈钢、超级双相不锈钢和高强度不锈钢等；平台下方管道、泵阀多采用双相不锈钢；平台井下钻采部件多采用超级奥氏体不锈钢和沉淀硬化不锈钢等材料。2205 不锈钢是典型的双相不锈钢，其具有超低碳、高铬、氮合金化的特点，具有较高的点蚀当量指数 (32~39)。在 2205 双相不锈钢的基础上，通过调控 Cr、N、Ni、Mo 和 W 等合金元素的种类及成分，得到了不同系列的双相不锈钢。双相不锈钢在海洋建筑、桥梁和海洋平台上得到了广泛的应用，如卡塔尔新建的新多哈国际机场采用了 1500t ATI2003 双相不锈钢；中国香港的昂船洲大桥采用了 2000t 2205 双相不锈钢制作桥塔的表面结构，以满足其 120 年免维修的设计寿命要求；挪威 Statoll 工程采用了 2500t UR45N 双相不锈钢；英国北海油田工程中的油气集管和输送管线采用了 UR52N 超级双相不锈钢制造；马来西亚 Kikeh 油田的高压管道系统采用了 AL 2003 经济型双相不锈钢。典型的含 N、Mo 超级奥氏体不锈钢的商业牌号有 254、654、AL6XN、NAS254 和 NAS354 等。典型双相不锈钢的商业型号有 SAF2507 和 AL2003 等。此类产品易在北海油田、波斯湾油田和墨西哥湾油田等海上油田平台中得到广泛使用。654 超级奥氏体不锈钢具有优异的耐缝隙腐蚀性能，在我国北海石油平台上的应用，成功解决了原油冷却系统缝隙腐蚀问题。波斯湾卡塔尔马士基石油公司和卡塔尔石油公司的部分海底管线设备采用了超级奥氏体不锈钢，以保证石油管线的使用安全。

高性能的海洋平台使用的超级不锈钢是保证海洋工程的重要材料，目前日本冶金 (YAKIN)、美国阿里根尼 (ATI)、美国特种金属 (SMC)、美国卡朋特 (CARPENTER)、瑞典三特维克 (SANDVIK)、德国蒂森克虏伯 (THYSSENKRUPP)、芬兰奥拓谱尼 (OUTOKUMPU)、奥地利伯乐 (BOHLER) 等企业是高性能超级不锈钢的主要生产企业。我国以太钢、宝钢和永兴特钢为代表的钢铁企业，持续开展了超级奥氏体 / 双相不锈钢、高强度不锈钢和超级马氏体不锈钢等材料的基础应用和制备技术研究，促进了我国高品质超级不锈钢的升级换代。

(2) 不锈钢钢筋

•••

目前，在几种类型的不锈钢中，马氏体不锈钢和沉淀硬化型不锈钢没有被用于耐腐蚀钢筋，铁素体不锈钢用于耐腐蚀钢筋较少，奥氏体不锈钢用于耐腐蚀钢筋较多，双相钢也逐渐被用于耐腐蚀钢筋，特别是在高氯化物和高湿度环境下。不锈钢钢筋具有优异的耐腐蚀性能、高强度和良好的塑性，可以有效提升海洋环境下钢筋混凝土的服役寿命，在国内外的海洋建筑中得到了广泛的应用。日本等国家先后建立了不锈钢钢筋标准，我国也紧随其后，建立了《钢筋混凝土用不锈钢钢筋》国标（GB/T 33959—2017），开发了奥氏体、奥氏体-铁素体和铁素体 400~500MPa 级的不锈钢钢筋。国内不锈钢钢筋广泛应用于核电行业、桥梁行业、斜坡和填海工程等。例如，太钢生产的双相不锈钢钢筋等材料在中国港珠澳大桥、文莱淡布隆跨海大桥、马尔代夫中马友谊大桥等海洋工程中得到了应用。

不锈钢钢筋具有优异的耐腐蚀性能，但是其造价昂贵，应用成本较高，根据不锈钢种类不同，其成本大约是普通碳钢的 6~10 倍。为了使钢筋同时具有不锈钢的高耐腐蚀性能和相对低的成本，国内外的学者及企业研制开发了不锈钢包覆钢筋，即在碳钢钢芯外包裹一层不锈钢。

目前，不锈钢包覆钢筋有两种加工工艺。一种是将不锈钢条焊接成管状，然后在压力作用下将碳钢颗粒填充在不锈钢管子中形成碳钢芯，形成两端有褶皱的人造棒材，然后将其加工轧制成钢筋。另一种是在碳钢铸件上喷涂一层不锈钢合金包覆层，然后将其加热轧制成钢筋。

不锈钢包覆钢筋的优点主要有：

- ① 钢筋表面具有一层耐腐蚀层；
- ② 比不锈钢钢筋便宜；
- ③ 材料性能良好时寿命预期值高。

不锈钢包覆钢筋的缺点以及可能出现的问题主要有：

- ① 与碳钢相比，造价相对较高；
- ② 包覆层厚度不均匀；
- ③ 包覆层与碳钢芯之间脱开；
- ④ 包覆层缺陷会造成应力集中；
- ⑤ 端头处理不好，将会使碳钢钢芯发生腐蚀；
- ⑥ 钢筋的屈服强度小于需要的屈服强度值；
- ⑦ 目前还不能生产小直径的钢筋；
- ⑧ 生产厂家较少。

11.3.5 / 海洋用钢的防护技术

(1) 阴极保护技术

•••

阴极保护技术是减缓海洋工程材料在海洋中腐蚀的有效方法。阴极保护技术主要是通过促进阴极极化，降低金属氧化反应的过电位，降低腐蚀速率，进而达到延缓钢筋腐蚀的效果。目前的阴极保护技术主要有牺牲阳极阴极保护和外加电流阴极保护两种方法。牺牲阳极阴极保护方法主要通过将钢材和具有更负电位的金属连接，由电位较负的金属向被保护金属提供

阴极电流,使得电位较正的金属得到保护。用于海洋工程阴极保护的牺牲阳极主要有锌阳极、镁阳极和铝阳极。要达到稳定的阴极保护作用,需要牺牲阳极系统具有电位足够负且稳定、牺牲阳极溶解均匀且产物易脱落、电容量较高、活性强和环境友好等特征。由于浅海、深海及海底的环境差异较大,同类牺牲阳极在不同的服役环境下可能会产生较大的电化性能差异。例如,常规牺牲阳极在潮汐带具有电化性能良好、工作电位负且稳定、腐蚀均匀且产物易脱落的特点,可为海洋工程构建提供良好的保护。但在低温、低氧和高压深海环境下,可能会产生局部腐蚀严重、电流效率低且腐蚀产物不易脱落等问题,导致其保护作用大幅降低。近年来中船重工七二五所等单位针对深海环境开发了系列化的高性能牺牲阳极品种,有效提升了深海环境下工程装置的安全性。然而,随着我国耐腐蚀海洋工程用钢品种的不断完善,耐腐蚀性能的提升,与之相匹配的高性能牺牲阳极材料研发进展缓慢,还有待进一步加强。此外,针对海底复杂的腐蚀环境,目前我国还没有形成系统的高性能牺牲阳极材料体系。

阴极保护的第二种方法是外加电流阴极保护。该方法是通过外加直流电源及辅助阳极,给材料施加电流,使其处于保护状态。该系统需要有稳定的电源,且必须具备长期可靠性和稳定性、可输出足够大的电流、有足够的输出电压等特点。然而针对海洋工程而言,外加电流阴极保护方法存在电源易腐蚀、过压、过流等风险,这些问题不仅降低了外加电流阴极保护系统的可靠性,也增加了该系统的日常维护成本,且复杂的线路也增大了该方法的使用难度。钢铁研究总院青岛海洋腐蚀所将很好的研究工作和技术积累经验,用于大型海洋平台等海洋重大装备中。

(2) 缓蚀剂

在海洋钢筋混凝土工程中,适当添加缓蚀剂,可以有效提升钢筋的耐腐蚀性能。在混凝土中常用的缓蚀剂有硼酸盐、钼酸盐、硅酸盐和磷酸盐等无机缓蚀剂和含有P、N、S、O等原子的有机缓蚀剂。无机缓蚀剂对钢材具有较好的缓蚀效果,可以促进钢筋表面形成稳定且致密的钝化膜,促进基体表面形成 $\alpha\text{-FeOOH}$ 和 Fe_2O_3 等物质,有效阻止 Cl^- 等侵蚀性离子的侵蚀,提高钢筋的耐腐蚀性能。而有机缓蚀剂,主要通过和钢筋表面的Fe发生络合反应,生成络合物吸附膜,阻挡 Cl^- 等侵蚀性离子和钢基体的接触,从而达到缓释的目的。在部分含 H_2S 的油田管线系统中,添加适当的缓蚀剂,可以有效降低管道的腐蚀速率。但缓蚀剂并不具备普适性,特别是在油田系统中,油气中腐蚀介质浓度的差异,可能会使缓蚀剂的效果产生较大的差异,如 CO_2 和 H_2S 浓度的不同,会对缓蚀剂的作用产生显著的差异。缓蚀剂的非普适性,增加了缓蚀剂的使用难度。我国海洋平台用缓蚀剂基本实现了国产化。

(3) 涂镀层

涂镀层技术是指在金属表面施加有机涂层或金属涂层,阻挡 Cl^- 等侵蚀性离子和钢基体的接触,而实现材料耐腐蚀性的提升。常见的技术有化学热处理(热浸镀、渗锌、渗铬等)和有机涂层。

通过热浸镀或渗锌技术,在金属表面形成一层富锌的金属镀层,可以起到有效的物理隔绝作用,降低 Cl^- 诱发钢筋腐蚀的风险。热浸镀或渗锌技术在高铁等设施中已经被广泛应用于紧固件等金属制品的腐蚀与防护。

环氧涂层是有机涂层中的一种,常用于钢筋的包覆。通过在钢筋表面涂覆一层环氧涂层,

形成一层具有一定机械强度的固态薄膜，提高构件的耐磨和耐腐蚀性能。环氧涂层钢筋是在 20 世纪 70 年代美国联邦公路管理局和美国国家标准局为了防止除冰盐对钢筋的腐蚀，开发研制出的一种钢筋防腐蚀涂层，即静电喷涂环氧粉末涂层。这种钢筋称为熔粘黏环氧钢筋，通常称为环氧涂层钢筋。环氧涂层钢筋在我国的使用自 20 世纪 90 年代才开始，但是发展较快，目前制定的标准有中华人民共和国建筑工业行业标准《环氧树脂涂层钢筋》（JGT 502—2016），该标准是在美国 ASTM A775M—95、ASTM A934M—95，英国 BS7295: 1992 及国际标准化组织 ISO-14654 等标准有关内容的基础上，结合我国国情编制的。另外，中科院金属所自行研制了比普通环氧涂层具有更好附着力的高性能的环氧涂层钢筋，混凝土的耐久性可以提升至 100 年以上，并制定了《混凝土用高性能环氧涂层钢筋技术规范》的相关标准。该涂层可以有效阻止 Cl^- 等侵蚀性离子的危害。环氧涂层包覆的钢筋可以用于海洋重防腐工程，如在马尔代夫中马友谊大桥中的建设中就采用了环氧涂层包覆钢筋。

有机涂层的另一种技术是海洋防腐涂料，其具体介绍如下。

11.4 / 海洋防腐涂料

目前，海洋装备和设施仍然以钢铁材料为主，例如，世界贸易中 90% 以上的货运依靠海洋运输，海洋资源与航海船舶业已经成为世界经济发展中不可或缺的重要支柱，其中最重要的材料是金属材料，金属材料中最重要的是结构钢。然而，海面风浪的冲击、高盐度高含氧量海水的浸泡、海面空气湿度的剧烈变化、海洋生物及其代谢产物的黏附等多种因素均会加速金属材料的腐蚀。海水和海洋大气双重侵蚀导致材料在海洋环境中的腐蚀速率通常要比内陆环境高几十倍，使船舶及海洋工程设施极易受到破坏。腐蚀已然成为影响船舶、近海工程、深远海设施等服役安全和可靠性的“头号杀手”。然而海洋材料，尤其是钢铁设施和装备不可能裸用，必须使用涂料进行表面保护。随着我国“海洋战略强国”规划的逐步开展，海工装备的涂料防护问题成为不可忽视的关键问题。对船舶及海洋工程材料使用表面涂装防护，对于延长船舶和海工设施的服役寿命具有重要意义。

11.4.1 / 船舶防腐涂料

船舶结构材料所处的腐蚀区域包括：水线以上结构部位、水线潮差部位、水线以下结构部位、船舱和管道等内部结构件以及船舶搭载的各种设备等。由于船舶的水上结构部位暴露在海洋大气环境中，会同时经受紫外线照射、海水中无机盐沉积、海风侵蚀以及雨水侵蚀等影响，通常采用有机重防腐底漆对船舶的水上结构进行防护，并涂刷耐候性良好的氟碳或氟硅共聚类面漆。在极地环境服役的船舶上，船体外壳涂层还要求具备较好的耐磨、耐低温和防覆冰性能。对于军用船舶使用的涂料，船舶的水上部位需要涂覆一种或几种功能复合的隐身涂料，最后再涂装具有耐候性的面漆。对于水线潮差部位，涂层若发生破损，会在破损处形成原电池，阴极电流会在涂层的局部缺陷处发展，发生阴极剥离，因此对该部位底层防腐涂料的耐阴极剥离特性具有较高要求。水线以下船底区域重点关注防污问题，需要着重涂覆

防污涂料对船体进行保护。船舱内部的涂料需要具有良好的附着性、优异的耐磨性能、维修方便等特点,根据舱室功能的不同还应满足隔声降噪、防火阻燃等需求。潜艇所使用的涂层除了要受到海洋环境中的水分子、氧及 Cl^- 等因素影响外,还受到压力变化、温度变化、氧浓度变化以及海水盐度变化等多种因素的交变耦合作用,所选用涂层需要同时满足耐交变压力、耐高低温交变以及耐干湿交替作用等多重标准。

船体防腐涂料通常使用环氧树脂体系。在涂料中添加缓蚀剂是一种常见的防腐措施,缓蚀剂随着腐蚀介质到达金属基体,在金属表面形成吸附膜或使金属钝化,从而抑制腐蚀电化学反应,降低金属的腐蚀速率;根据金属基体的不同,添加的缓蚀剂种类也可以不同。涂层中还可以加入金属粉作为牺牲阳极相以实现阴极保护,常用的金属粉包括铝、锌等活泼元素,在发生原电池腐蚀时,电位更负的铝、锌等元素会优先于基体金属发生腐蚀,从而达到牺牲阳极(锌粉、铝粉)、保护阴极(钢铁基体)的效果。此外,为了实现更加优异的阻隔保护作用,涂层中可以加入片层状填料,包括蒙脱土、玻璃鳞片、云母氧化铁、滑石粉、云母粉及石墨烯等,通过充分利用迷宫效应可以大幅延长腐蚀介质的渗透路径,从而提升防腐性能。比利时开发了一类有机高富锌涂料,干膜涂层中的金属锌含量达96%,在挪威奥斯陆的沿海区域,涂覆在钢桥上 $120\mu\text{m}$ 膜厚的涂层15年后实测每年的平均损耗仅为 $1\mu\text{m}$;无机富锌涂料应用最为典型的成功案例是澳大利亚Morgan-Wyalla长达250km的油管工程,表面的单层水性无机富锌涂层在50年后仍能发挥良好的防护性能,未发生腐蚀现象。美国埃克森(EXXON)公司在琉球岛建的炼油厂采用单层硅酸锌防腐涂层,历经15年后仅需小部分涂层修补,修补后又经4年完好无锈。在我国,中船重工七二五所开发了一种超耐候高致密氟碳面漆,可应用于南海盐雾、高温、高湿、高阳光辐射的强腐蚀环境下。该面漆采用“有机弹性体+纳米粒子+有机紫外线吸收剂+紫外光稳定剂”的多种抗老化改性技术提高涂层在高湿热环境下的耐候性,同时通过对刚性纳米粒子的有机无机杂化改性,提高其在涂层中的相容性、涂层致密性和力学性能,延长防护涂层在南海腐蚀环境下的服役时长。中化集团青岛海洋化工研究院经过长期积累和研发,生产了系列化的船用涂料,基本实现了船用涂料的体系化和专业化,例如,他们生产的甲板防滑防磨损专用涂料,以及建筑用防护和防火涂料,具有优异的综合性能,完全可以取代进口产品。集美大学的有关团队也有很出色的研发经验。

船用防腐涂料还包括在船舶外壳使用的船壳漆,主要作用是保护水线以上船体、结构部件等免受腐蚀,在军用船舶中还要具有一定的隐身功能。船壳漆通常选用有机硅树脂、有机氟树脂、醇酸树脂、聚氨酯树脂、丙烯酸树脂等耐候性树脂作为涂层基材,还会添加具有较高遮盖率和着色度且具有良好耐黄变性能的物质作为填料来提高涂层的耐候性,同时也需要考虑涂层的高热反射率、发射率、隔热性等功能。船舱是船舶最核心的部位,需要采用重防腐涂料涂装防护,通常采用醇酸防锈漆、氯化橡胶防锈漆、环氧煤沥青防锈漆作为防锈材料,目前船舱部位在分段涂装时使用高固体分通用环氧防锈漆和水性防锈涂料以提高环保性能。我国针对船舱部位制定了相关国家标准GB/T 14616—2008《机舱舱底涂料通用技术条件》,标准中规定了涂料的细度、固体含量、干燥时间、附着力、耐盐雾性、耐热盐水性和耐柴油性等检测技术指标,并规定了各项指标的合格范围。

11.4.2 / 海洋工程设施防腐涂料

海洋工程设施包括海上钻井/采油平台、海上风力发电、浮式结构物、深远海养殖平台等类别。海洋工程设施长期处于高盐雾、高潮气、高腐蚀率的海洋环境中，无论是大气区、浪花飞溅区、潮差区、全浸区还是海泥区，均对其结构造成显著的腐蚀影响。海洋大气区的材料结构部件受到日光、风、雨、盐雾的多重作用，所以对该区域防腐涂层的耐候性具有较高要求，同时也对涂层体系的配套性提出要求。在配套体系中，底漆常使用富锌底漆（有机：环氧富锌；无机：硅酸乙酯）、热喷涂铝锌；中间漆不仅需要防止腐蚀介质进入涂层底部，还应起到增强面漆附着力、延缓电化学腐蚀发生过程的作用，一般使用抗渗透性、抗冲击性、耐磨性和耐腐蚀性较好的环氧云铁、环氧玻璃鳞片涂料；面漆一般采用氟碳树脂、丙烯酸树脂或聚氨酯涂料，能够有效降低和控制水汽、氧及活性离子的渗入，同时应满足一定的抗溶性、抗老化性和抗冲击性。目前，海工重防腐领域最常用的涂层配套系统是富锌（有机/无机）底漆+环氧云铁中间漆+聚氨酯面漆，总干膜厚度约200~350 μm ，该配套体系已在海上平台、跨海大桥等处于严重腐蚀环境下的设施得到广泛应用，极大地降低了该环境下钢结构的腐蚀。此外，环氧底漆+环氧云铁中间漆+氟碳面漆配套涂层的防腐期限可达25年以上，目前我国已建成通车的港珠澳大桥即采用此配套防腐涂层，预计寿命达到120年。在海洋环境中腐蚀最严重的区段是浪花飞溅区，其腐蚀速率是其他部位的3~10倍，其防腐防护主要采用600 μm 以上环氧漆或环氧玻璃鳞片漆。为解决浪花飞溅区腐蚀速率过快的问题，海洋化工研究院研制出海洋浪花飞溅区钢结构超厚膜环氧涂料，一道涂料施工后干膜涂层厚度可达1000 μm ，缩短了工程时间，降低了施工成本，也解决了多次喷涂的层间附着力不佳的问题，并且通过合成EPU改性环氧树脂有效地提高了涂层的抗冲击性能和耐磨损性。中国科学院海洋研究所侯保荣院士在中国青岛区域的海洋大桥、近海平台及海上风电基础部位浪花飞溅区的示范工程中创新性地应用了浪花飞溅区包覆技术，也将氧化聚合物型包覆防腐技术用于螺栓与法兰等异形结构、桥梁的拉索与防水套、风电大气区的焊接部位等示范工程中，起到了极好的防腐效果。潮差区可采用环氧底漆，面漆采用聚氨酯、氟碳等，为了达到更好的防腐效果，一般需要厚涂涂料并且在中间层加玻璃布。全浸区不仅经受海水的侵蚀，还会遭受海生物的污损。全浸区通常使用高强度环氧涂料及环氧玻璃鳞片涂料作为环氧重防腐底漆，各大涂料公司都开发相应涂料配套产品，并且通过了相关产品认证。海泥区主要由海底沉积物构成，位于全浸区以下。海泥区一般采用与全浸区相同的环氧重防腐底漆，主要包括通用重防腐底漆和环氧玻璃鳞片防腐涂料。中海油常州涂料化工研究院、武汉材料保护研究所、集美大学、中国矿业大学、北京科技大学、哈尔滨工程大学和中科院宁波材料所等团队，已经具有了很好的研究积累，开发了适用于我国大型海洋多功能平台工程化应用的涂料体系，将保障我国新一代海洋装备和设施的长期安全服役。

11.4.3 / 海洋防腐涂料发展趋势

近年来，我国海洋涂料行业发展迅速，企业数量迅速增多，市场规模日益壮大，前景持续向好。但同时，市场集中度低、竞争力薄弱等问题突出，制约着行业进一步发展。从生产

企业的数量来看，涂料生产企业的数量目前已达到上万家，但却存在着多而不强的特点，产量能够达到 5000t 以上的涂料企业不足 10%。从市场占有率来看，挪威佐敦、丹麦赫普、荷兰阿克苏诺贝尔和日本关西等公司垄断了海上石油钻井平台和海上设施所用的重防腐涂料。从销售额来看，我国最大涂料公司的年销售额不及荷兰阿克苏诺贝尔公司的 1/50，由此看来，我国涂料公司的产品质量和销量急需进一步提高。我国一般的涂料企业都难以符合国际海事组织标准，难以获得船级社证书，导致我国涂料企业在船舶涂料的市场竞争中不以立足，这是我国海洋涂料几乎全面被国外占领的主要原因。单纯从技术水平来说，国内的部分涂料技术已达到可应用的水平，却缺少工程应用机会，这不仅影响国内相关关键技术的发展，同时也影响我国建造的海洋平台在国外的应用。

随着近年来国家对环保问题重视程度的提升，以及涂料新技术、新工艺的快速升级迭代，海洋防腐涂料更加强调通用性、低成本、无涂装间隔限制和低 VOC、无重金属化、水性化、低表面处理化、多功能化等新发展方向。具有自修复、自预警等功能的智能防腐涂料也是重要的发展方向。我国随着极地科考任务的增加以及北极航道的进一步开拓，对破冰船专用的耐低温涂料和抗冰涂料也将重点关注；同时，南海严酷复杂海洋环境对我国长期在该区域服役的船舶腐蚀防护问题提出了更加严峻的挑战，优异的长效性能是研究重点之一。此外，为确保深海装备的良好运行，应进一步研究应用于深海环境下的新型防腐涂层材料技术和满足深海压力交变及高强度连接技术需求的长效防腐涂料。

11.5 海洋防污涂料

海洋生物通过在船底黏附生长和繁殖使船底发生污损和腐蚀的同时，造成船底粗糙，摩擦力增大，从而降低船舶航行速度，增加能耗。远洋船只更是带来外来海洋物种入侵等生态问题。据不完全统计，全球每年由生物污损造成的船舶燃料增耗超过 40%，造成经济损失高达 75 亿美元；给海洋畜牧业和沿海电厂等造成的经济损失总和高达 170 亿美元。不仅如此，由生物污损造成的燃料额外增耗约 706 万吨，产生二氧化碳气体 21000 万吨、二氧化硫气体 560 万吨，对海洋生物的影响十分巨大。通过船舶运输，海洋物种也可能被引入到非本地环境，从而破坏海洋生态物种的平衡，造成生态损失和经济损失。

海洋防污涂层技术最初是利用沥青、焦油、石蜡、重金属（铅）或有毒的（砷基）涂料。至 20 世纪 60 年代开发出传统的三丁基锡（TBT）涂料，该涂料在使用过程中由于对海洋生态环境造成危害，已于 2008 年起被国际海事组织全面禁用。近年来，以铜基、锌基为主的防污涂料是当前民用船舶使用的主要防污涂料，其中防污剂主要包括氧化亚铜、硫氰酸亚铜、氧化锌、硫酸铜、铜粉等。目前，防污涂料的类型多种多样，其有效期根据防污涂料类型差异一般为 1~5 年。

近年来，商业化的防污涂料主要可以分为两类：

①化学活性物质释放涂料（简称化学活性防污涂料），即通过化学活性化合物抑制或是限制海洋生物的附着，该方法主要通过添加防污剂达到防污目的；

② 非化学释放防污涂料，该涂料不是通过化学反应或是增加抑制生物吸附剂来抑制生物吸附，其中具有代表性的为污损释放型防污涂料和低表面能防污涂料。中船重工七二五所、中国海洋大学、华南理工大学、中化集团青岛海洋化工研究院和集美大学等研究团队有很好的研究积累。

11.5.1 / 化学活性防污涂料

化学活性防污涂料是基于释放无锡的活性化合物，这种物质又被称为杀生物剂。目前，这类防污涂料约占据市场 90%~95%。根据基体类型不同，又可以分为接触型涂料、可溶性/可控损耗聚合物涂料和自抛光共聚物涂料。这 3 种涂料的共同目标是将这些防污剂嵌入到有机物涂层基体中，从而达到控制生物活性分子释放的目的。

接触型涂料主要运用高分子之间的粘接作用使基体部分在海水中不溶解，例如以水不溶性的乙烯基、丙烯酸树脂、环氧树脂、氯化橡胶聚合物作为基料，添加高浓度氧化亚铜作为防污剂和可溶性的渗出助剂。该类涂料基体不会溶解，因此也被称为硬防污涂料。由于基料不溶于海水，因此涂料中的防污剂与海水接触互相溶解后，使表面形成蜂窝结构，导致更深处的毒性粒子暴露，释放速率逐渐降低，防护效率大幅下降。不仅如此，随着涂层内部防污剂不断渗出，涂层粗糙度变大，航行摩擦阻力变大，油耗增加。通常来讲，根据暴露程度条件的不同，这类防污涂料的服役时间一般为 12~24 个月，这也在一定程度上限制了军用和商用。

可溶性/可控损耗聚合物涂料主要通过将防污剂与大量基体混合的方法制备而成。可溶性聚合物基体材料一般是无毒、海水可溶，通过物理干燥而成的材料，通常以松香及其衍生物作为基料，氧化亚铜作为防污剂。这类基料微溶于海水，且能够不断露出新鲜的涂膜表面，使防污剂不断与海水接触溶解，形成毒液膜。这类涂层在早期释放速率非常高，随后迅速降低，通过添加沥青和填料的方法可以调节树脂溶解速率。传统的可溶性聚合物涂层防污寿命通常不超过 12~15 个月，属于最为传统的一类防污涂料。

可控损耗聚合物涂料的基体材料主要是有机物合成树脂，该类树脂的水合作用和溶解抗溶解作用都要比天然树脂及其派生物有明显提高。可控损耗聚合物涂料的防污机制与传统的树脂基可溶性聚合物涂料基本类似，即与海水接触后，防污剂和可溶性基体一起溶解，并一同从表面洗掉。通常可溶性/可控损耗聚合物涂层技术可以使涂料的有效期达到 36 个月。

无锡自抛光共聚物涂料是以丙烯酸或甲基丙烯酸共聚物作为基体材料，将共聚物与防污剂混合后，可以形成平滑的涂层表面，这类聚合物在海水中容易水解。自抛光共聚物涂层通过控制基材的侵蚀速率可以达到控制和调节防污剂释放速率的目的。目前市场上自抛光防污涂料主要包括丙烯酸锌树脂、丙烯酸铜树脂、硅烷化丙烯酸树脂和羧酸锌树脂，这些基体主要依靠逆酯化的疏解或离子交换进行化学分解。黏附在涂料表面的污损生物，由于基体或是交联剂高分子链的水解作用，可以随着基体与交联剂的脱离而一起脱离。Bressy 等对商业自抛光共聚物涂料进行研究发现淋溶层溶解和离子扩散速率与抛光速率相等时，涂层表现出优异的稳定性，并且厚度为 10~20 μm 就可以达到使用年限的要求。防污剂在自抛光共聚物涂料中的释放速率是通过聚合物的程度（分子量）和共聚物交联剂的水解性质决定的，水解性

质又取决于共聚物链中的水解基团。通常自抛光涂层的抛光速率是 $5\sim 20\mu\text{m}/\text{年}$ ，在干燥环境中，寿命可以延长到 5 年。

混合损耗自抛光涂料是通过将可水解的自抛光共聚物涂料技术和树脂基可溶性 / 可控损耗聚合物涂料技术结合制备而成。防污剂的释放速率取决于水解作用和水合作用共同机制。这些混合防污涂料显示出可溶性 / 可控损耗聚合物涂料表面耐受性的特点和硬质基体的特点，以及自抛光共聚物涂料抛光速率、防污剂释放速率控制和减少淋溶层厚度的优点。这类防污涂料的有效期通常持续 3~5 年。

11.5.2 / 非化学释放防污涂料

非化学释放防污涂料主要为污损释放型防污涂料，也是目前发展最迅速的一类防污涂料。这类污损涂料是不含生物防污剂的，其防污性能主要依赖于双重模式作用机制，例如抗黏附特性和污损释放行为。常用策略是减少污损生物在基体表面的黏附行为，以便依靠航行或是简单的机械冲刷过程将污损生物移除。目前，市面上主要以有机硅、有机氟和硅-氟树脂为主。这类涂层具有表面光滑的特点，可以减小船只在进行中的阻力，进而减少燃料费用和排放的温室气体量。但是，由于防污机制特点，这类防污涂层主要供应于高速航行的船只，如渡船、集装箱船、游艇航班、滚装船等，并且通常供应商会规定该类防污涂料不得用于船速低于 $19\sim 20\text{kn}$ ($1\text{kn}=1.852\text{km}/\text{h}$) 的船只。目前，市场上可用的污损释放型防污涂料通常被开发成一种双工系统，由表层涂层、应用于防腐的环氧底漆及中间的粘接层三层共同构成。污损释放性能与表面疏水性和低表面能有关，但也受到其他参数包括表面粗糙度、弹性模量和涂层膜厚度的影响。报道指出的污损释放型防污涂料使用寿命一般为 5~10 年。

中涂化工（上海）有限公司总结的有机硅树脂有优异的化学稳定性、柔韧性和斥水性，只需涂装 $200\mu\text{m}$ 厚度有机硅涂层，即可表现出优异稳定的防污效果。但由于有机硅树脂较软，因此容易造成机械损坏，使涂层粗糙度增加，进而影响涂层防污性能。而氟代聚硅氧烷作为基料时，不仅保留了聚硅氧烷的高弹性和高流动性，又吸收了 CF_3 基团的超低表面能特性，使涂层在机械强度上有明显提高，并减少细菌和藻类海生物黏附情况。

11.5.3 / 海洋防污涂料发展趋势

由于我国海洋涂料发展起步较晚，因此较国外大涂料公司 HEMPEL、JOTUN、IP、SIGMA、NIPPON，我国自主品牌的防污涂层仍存在一定差距。针对目前防污涂层存在问题，将纳米材料与低表面能结合，借助仿生技术和天然防污剂已成为 21 世纪防污涂料发展的主要方向。



作者简介

李晓刚，长期从事材料腐蚀防护与耐腐蚀材料研究工作，是 973 首席科学家，该领域的学科带头人之一。主要研究方向为：材料环境微纳米尺度腐蚀电化学理论研究；高品质钢耐腐蚀性能微纳米尺度

调控关键技术研究、质量控制和服役条件标准体系建设；金属材料及有机高分子材料在海洋环境下的劣化机理研究；新一代材料腐蚀信息监测和评价技术的研发。

发表 SCI 论文 490 篇；专著 18 部；获发明专利 100 件，获国家科技进步二等奖 2 项、省部级一等奖 5 项、行业一等奖 7 项；获国际腐蚀工程师协会杰出研究奖和会士奖；担任国际腐蚀理事会理事和冶金专业类国际顶级期刊 *Corrosion Science* 的顾问编委；获全国优秀科技工作者、北京市师德模范、先进工作者称号。

刘超，博士，北京科技大学助理研究员。主要致力于材料局部腐蚀微区电化学技术前沿的理论与应用研究和耐腐蚀材料的研发，先后承担国家自然科学基金、中国博士后基金、重点研发和校企合作项目十余项，并参与了国家 973 项目、国家自然科学基金项目、“国家科技条件平台”、教育部自主科研计划等项目的研究。先后在高水平期刊发表 SCI 论文 20 余篇，获发明专利 1 项，实用新型专利 3 项，参编团体标准 47 项，2020 年获得北京市科学技术发明一等奖，2017 年获得第十五届全国青年腐蚀与防护科技论文讲评会二等奖。主要科研方向为：局部腐蚀微区电化学检测理论及技术研究；微观组织结构诱发局部腐蚀机理研究；新型耐腐蚀钢研发。

马菱薇，副研究员，主要从事防腐涂层与表面技术应用研究，获 2020 年中国科协“青年托举人才”称号。主要科研方向为：智能防腐涂层及表面技术应用；纳米复合材料的制备与性能调控；缓蚀剂新型检测技术。主持国家自然科学基金青年基金项目、博士后面上基金项目、装备预研重点实验室基金项目等，参与国家 973 项目、教育部自主科研计划等项目，担任“一带一路”东南亚环境材料腐蚀与防护教育部野外科学观测研究站副主任；发表第一/通讯作者 SCI 论文 23 篇，合作 SCI 论文 70 余篇；授权国家发明专利 10 项。曾获“博士生国家奖学金”“北京市优秀博士毕业生”“北京科技大学优秀博士后”等荣誉称号。

第 12 章

核电机组关键部件及材料

清华大学

我国是世界上为数不多的能够独立完成核电站设计、建造和运营的国家之一，据《国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要（草案）》所述，在“十四五”期间将“推进…核电机组关键部件…等研发应用，安全稳妥推动沿海核电建设”“核电运行装机容量达到 7000 万千瓦”“重点项目包括建成‘华龙一号’‘国和一号’、高温气冷堆示范工程，积极有序推进沿海三代核电建设”“推动模块式小型堆、60 万千瓦级商用高温气冷堆、海上浮动式核动力平台等先进堆型示范”“建设核电站中低放废物处置场，建设乏燃料后处理厂”及“开展山东海阳等核能综合利用示范”等。

虽然我国在核电行业的一些关键技术领域已从跟跑、并跑发展至领跑地位，但是核电机组中某些关键装备和材料依然被国外垄断，严重制约了我国核电行业的发展^[1]。所谓核电机组，是指由反应堆及其配套的汽轮发电机组以及为维持它们正常运行和保证安全所需的系统和设施组成的基本发电单元。核电机组关键部件主要指的是核电站核岛部分核心设备或系统及其关键部件。1994 年，我国从法国成套引进了大亚湾核电站 1 号、2 号机组和秦山一期核电站，现阶段国内已经建立起了较为完整的核能科研体系，培养了一支高水平核科学技术研究设计队伍，拥有较完整的反应堆研究设施，具有独立自主进行 300MW、600MW、1000MW 级压水堆核电站研究设计的能力，虽然核反应堆中反应堆压力容器、蒸汽发生器、堆内构件等核心装备都已实现国产化。尽管如此，我国的相关技术水平与国际上还存在一定差距，虽然，核反应堆相关材料基本实现了国产化，但还没有完全实现品牌自主化。在国家发展和改革委员会、国家能源局联合发布的《能源技术革命创新行动计划（2016—2030 年）》中，先进核能技术被放在了显著位置，开发先进的核能领域相关材料对于促进核能领域的发展具有重要意义。

目前，国内的核电站如秦山、大亚湾等均为压水堆核电站，且压水堆核电站将是我国 21 世纪相当长时间内核能发电及能源结构转型的主力堆型^[2]，因此书中内容所涉及的材料主要与压水堆有关，其他堆型（如重水堆、快中子堆及在 2021 年 9 月 12 日首次实现临界的石岛湾高温气冷堆等）则作简要阐述，如未作特殊说明，则所述均与压水堆相关。

12.1 / 堆芯组件关键部件

12.1.1 / 核燃料组件

(1) 概述

核燃料系统作为核反应堆的核心系统，对核电站安全稳定运行极为重要。在燃料系统中，核燃料组件则起着至关重要的作用。核燃料组件是指组装在一起的整组燃料元件。其主要由若干燃料元件、上管座、下管座、控制棒导向管和定位格架等部件组成。核燃料元件则是指反应堆内以核燃料作为主要成分的结构上独立的最小构件，泛指核反应堆内具有独立结构的燃料使用单元，包括从单一的圆柱状短棒到结构复杂的大组件，通常指由燃料芯体和包壳组成的燃料单元。核燃料元件是核燃料产业的最终产品，是核电站的能量源泉^[3]。

不同的反应堆使用的燃料元件也不同，按其形状来区分，有棒状、管状、板状和球状等。按其核燃料状态来区分，有金属型、陶瓷型、弥散型等。燃料组件则是组装在一起并在堆芯装卸料过程中不需拆开的一组燃料元件。燃料元件在堆内受到强中子辐照、高温和高流速冷却剂的冲刷和腐蚀以及由于温度、压力变化而引起的应力应变的机械负荷等因素的作用，因此燃料元件必须具有物理、力学、化学等方面的稳定性。

沸水堆组件是由装在 Zr-4 合金元件盒内 7×7 或 8×8 根正方排列的燃料棒或隔板支撑棒组成。

压水堆燃料组件的结构曾经历过多次改进：由有盒组件改为无盒组件；棒状燃料元件由 6×6 排列改进为 15×15 排列，最新的结构则为 17×17 排列。按 17×17 排列的燃料组件具有棒径细、根数多、长度长等特点，故每根棒状燃料元件的线性比功率较低，有利于改善和提高堆芯的热工与安全性能^[4]。

在世界核电先进国家，如美国、法国、俄罗斯等，针对大型压水堆核电站有诸多商用燃料组件品牌，如 ROBOT、AFA3G、TVS-2M 等。相应的目标燃耗已普遍提升到约 60GWD/tU ，换料周期约为 18 个月。2011 年福岛核事故发生后，具备抵抗严重事故能力的核燃料 ATF (Accident-tolerant Fuel) 已经成为了新的发展方向。

现阶段，我国的压水堆核电先进燃料主要是从法国引进的 AFA (Advanced Fuel Assembly) 系列燃料和 AP1000 燃料。总体来看，在核燃料组件部分已基本实现了国产化。福岛核事故之后，各国对于 ATF 燃料的研究明显加快，不过现有的以 $\text{UO}_2\text{-Zr}$ 燃料系统为基础的燃料系统依然很有发展潜力。

国际上已经使用的快堆燃料形式有陶瓷燃料和金属燃料两大类。氧化物陶瓷燃料技术最为成熟，是目前快堆的主流燃料，特别是混合氧化物燃料 (MOX)。国际上正在研发快堆金属燃料、氮化物和碳化物燃料。这类燃料比氧化物燃料有更高的增殖比^[5]。金属材料的研发主要集中在 U-Zr 合金和 U-Pu-Zr 合金两类，通常的组成为 U-10Zr 或者 U-Pu-10Zr，在氧化物

燃料及金属燃料中加入 Mas（钨系元素）成为嬗变燃料。当前，快堆燃料包壳材料普遍采用的是改进型的奥氏体不锈钢、铁素体 - 马氏体不锈钢、镍基合金和钒基合金，此外还有新型难熔金属包壳材料，如利用难熔金属 Nb 和 V 代替不锈钢作包壳材料。

2021 年 9 月 12 日，山东石岛湾高温气冷堆（HTGR）示范工程首次实现临界，标志着我国在世界先进核能技术领域迈出了跨越式的一步。高温气冷堆和超高温气冷堆（VHTGR）属于国际核能界认可的第四代核能系统重点研发的 6 种堆型中最具发展潜力的先进堆型之一。高温气冷堆的突出特点是采用耐高温的陶瓷型包覆颗粒燃料元件。包覆颗粒燃料的核芯是 UO_2 燃料颗粒，核芯外围是多层包覆层，包覆颗粒均匀弥散在石墨基体中构成燃料元件。我国自主研发的高温气冷堆属于球床模块式高温气冷堆，采用的是球形燃料元件技术。球形燃料元件在反应堆堆芯内随机堆积，形成可流动的球床堆芯。球床堆芯被底部、侧面和顶部反射层形成的堆芯腔所包容，反射层结构材料采用石墨^[6]。

（2）本领域对新材料的战略需求

核燃料组件设计的目标是要确保在堆芯安全运行及燃料和燃料组件零部件的性质之间取得一个合适的平衡。燃料组件的发展需求大致为：稳定可靠、高燃耗、换料周期长和安全裕度高。核燃料组件应具有较高的输出功率，装、卸应尽可能方便。核能技术的发展对燃料组件相关材料的性能提出了更高的要求，如包壳材料需要具有更优异的性能，包括优异的耐腐蚀性、抗吸氢性、抗辐照生长性和抗高温蠕变性。还需要关注燃料元件与其他材料相结合时出现的问题，例如所用结构材料要与堆内介质有很好的相容性。

对于快堆而言，燃料包壳的各项性能制约着快堆中最高燃料温度的设计。因此，为提高快堆燃料温度，获得更高的燃耗，须设法提高包壳材料在高温下的蠕变强度、抗辐照肿胀性能、抗氧化性能等，从而使得包壳材料能够满足在高温条件下长期服役的需求。针对超高温气冷堆的发展需求，必须寻找具有更加优异性能的可以作为包覆燃料颗粒阻挡层的材料^[6]。未来超高温气冷堆氦气出口的温度有望提高到 1050°C ，在正常运行和事故工况下燃料元件的最高温度将达到 1300°C ，甚至 1800°C 。更优异的包覆层材料必须满足 3 个基本要求：高温下更高的强度和硬度，热中子吸收截面小，更好的耐辐照性能。

（3）当前存在的问题、面临的挑战

国内对于核燃料组件的设计研究起步较晚，相较于美国、法国、俄罗斯等核电大国还有一定差距，不过近几年我国在先进核电燃料领域发展较快，目前国内正在研发的燃料组件型号有^[7,8] CF 系列燃料组件、STEP 系列燃料组件、CAP1400 燃料组件。其中，CF 燃料组件的发展较快， CF_2 燃料组件用于 K2/K3 首炉， CF_3 燃料组件则采用了自主研发设计的 N36 钼合金包壳材料，最大燃耗 52GWd/tU ， CF_3 研制完成之后将用于 K2/K3 的换料。中国核工业集团有限公司在 2016 年启动了 CF_4 燃料组件的设计研究，其目标燃耗为 60GWd/tU ，燃料包壳为 N45 合金^[2]。

在制造技术方面，多元少量合金化和大铸锭会带来钼合金的成分均匀性问题，大变形和低温加工工艺技术亟待突破。

目前有关 UO_2 燃料的改进性研究和新型锆合金包壳的研究尚不足以支撑更为先进的自主品牌燃料组件及包壳材料的国产化和商业化应用。ATF 材料的大批量入堆条件目前尚不具备，需进一步研究。快堆及乏燃料后处理技术难度大且投资巨大，MOX 燃料组件的最高燃耗仍待进一步提升，有关金属燃料 U-Zr 合金的制造技术和工艺仍待进一步优化。

在高温气冷堆中，包覆层材料的性能还需进一步优化，并且燃料元件的制造成本过高也是一个显著问题。

对快堆而言，目前应用的快堆燃料包壳材料主要存在以下问题：虽然奥氏体不锈钢（如 AISI347, 304L, 316SA, D9）具有良好的抗腐蚀性能、抗热蠕变性能、高温力学性能、完善的制备工艺以及丰富的经验数据，并因此在最初的金属燃料快堆（EBR-I）中被选作包壳材料^[9]，但其抗辐照肿胀性能较差，容易产生较大的尺寸变化，这极大地限制其在高燃耗方面的应用，因此，急需开发具有优异抗辐照肿胀性能的新材料。而对于体心立方结构的铁素体-马氏体钢（如 HT-9 钢），其抗辐照肿胀性能相比于奥氏体不锈钢更加优良，在 EBR-II 中，在燃耗达到 20.0%（原子分数）时未发现明显的辐照肿胀现象，包壳应变很小，也没有发生包壳的破损，但当温度升高至 600℃ 以上时，HT-9 包壳的强度损失较奥氏体不锈钢要高很多，蠕变强度较低，从而使反应堆使用期限显著缩短，同时 HT-9 钢与 U-Zr-X 燃料之间易发生共晶反应，很难胜任第四代钠冷快堆系统中 650℃ 预期温度的要求。此外，尽管难熔金属可以在高燃耗下具有良好的抗蠕变和抗辐照肿胀性能，但是较差的抗氧化性能、低温脆性以及制备加工难度大使得它们亦难以完全满足包壳材料的使用要求。因此，金属燃料快堆包壳需要具备耐高温、高燃耗、抗辐照肿胀和高蠕变强度等特性。

（4）未来发展

《美国用户要求文件（URD）》和《欧洲用户要求文件（EUR）》对第二代改进型和第三代核电厂的经济性、可靠性及安全性均提出了要求。基于此，燃料组件的发展也朝着高燃耗、长换料周期、高安全性等方向发展。燃料组件的发展很大程度上取决于与之相关的材料性能是否满足要求，因而研究开发先进的核燃料组件及相关材料是保证核电安全的关键问题。

对于燃料组件中用到的锆合金材料，现阶段所做工作仍然是调整现有合金的成分，改进加工工艺，开发新合金。在合金成分方面，Zr-Sn-Nb 系合金是发展的主流，低含量 Sn 及适中的 Nb、Fe 是主要的合金元素。此外，以 Zr-1Nb 为基础并适当增加合金的组元也是一个发展方向。

对压水堆而言，持续开展 UO_2 燃料的改进研究和新型锆合金包壳研究，实现更先进的自主品牌燃料组件及包壳的国产化和商业应用。积极开展 ATF 燃料研究，逐步明确 ATF 燃料的技术路线，并具备工程应用能力。除了 ATF 燃料和金属燃料以外，高熵合金、材料基因工程、核燃料的多尺度分析和试验技术也是国际核燃料及材料前沿领域和发展趋势。

对快堆而言，混合的 Pu-U 氮化物燃料和碳化物燃料是正在开发的新型燃料形式。UPuN 和 UPuC 的 Pu-U 密度比氧化物燃料高，能够获得较高的增殖比、较短的增殖时间、较好的热导性能，并且与钠冷却剂和不锈钢包壳均有良好的相容性^[10]。快堆燃料包壳性能的改进，可通过优化铁素体-马氏体钢的热处理制度、调整合金元素含量、在燃料与包壳之间引入中间

过渡箔片以抑制共晶反应^[11]等形式,设法提高包壳材料的综合性能,使其兼具优异的抗氧化性能、抗腐蚀性能、抗辐照肿胀性能、抗蠕变性能、高温强度和良好的燃料-包壳相容性。此外,新型耐高温/抗熔盐腐蚀合金、双金属复合材料、C/C复合材料和SiC/SiC复合材料等陶瓷基复合材料、高致密超细颗粒核级石墨等是未来的发展方向。

对高温气冷堆而言,优化燃料组件生产工艺,实现生产设备的连续化、自动化和规模化是需要解决的问题。关于其包覆燃料颗粒阻挡层材料,ZrC是一个可能的方向。此外,高温气冷堆中所用的SiC颗粒燃料技术在其他堆型中的应用也可以作为未来发展方向进行考虑。

12.1.2 / 控制棒组件

(1) 概述

控制棒主要用于在热中子和中能中子反应堆内控制反应性。随着控制棒在堆内的移动,吸收的中子数有所变化从而改变堆内反应性。根据需要,控制棒主要做成棒状、管状或板状。控制棒按作用分为补偿棒、调节棒和安全棒^[12]。

安全棒是一种用于快速落棒安全停闭反应堆的装置。安全棒驱动机构是反应堆可靠运行和安全停堆的关键设备。中国先进研究堆(CARR)共设置了2根采用动水压式的安全棒驱动机构。

调节棒则是在整个运行周期中始终插在堆芯内,根据反应堆控制系统的指令自动调节插入堆芯深度,以快速补偿运行时各种因素引起的反应性波动的控制棒组。

补偿棒是在反应堆每一个运行周期之初插在堆芯内,以补偿后备反应性的控制棒组。随着燃料的燃耗和裂变产物的积累,后备反应性逐渐减少,补偿棒逐渐抽到堆外,直到完全抽出。

核反应堆的稳定有序运行是将堆内链式反应维持在可控制的范围内实现的,在核电站的运行中,常用的核反应堆功率控制手段主要有化学补偿和机械补偿两种方式^[13]。化学补偿主要是通过调节堆芯中的硼酸浓度,使反应堆功率处于可控的调节带内,以改变反应堆的温度和功率,来实现核反应堆的长周期控制^[14-16];机械补偿则是通过控制棒中含有的中子吸收材料芯块来吸收链式反应产生的中子,调节堆内控制棒的插入深度来跟踪反应堆的瞬时反应性变化,进行反应堆负荷的调控^[1,17]。

如前所述,控制棒是用于控制反应堆反应性的可动部件,即反应堆内链式反应的强弱,可用控制棒予以控制。控制棒组件由吸收中子能力很强的材料制成,可以控制核裂变的速率。在正常工况下它们用于启动反应堆、调节堆功率和停堆。在事故工况下,控制棒依靠自身重力快速下插,使反应堆在极短时间内紧急停堆,以保证安全。

控制棒组件材料主要是指用于中子吸收的控制棒的芯体材料,主要用于核反应堆中,通过其含有的较高中子吸收截面的物质吸收热中子,控制裂变链式反应。控制棒用中子吸收材料必须具有大的中子吸收截面,重要的中子吸收体有硼-10、镉、钆、铪和钷等;它们多以合金或陶瓷形态制成圆柱棒(或芯块)状的控制棒芯体。已经被商用的中子吸收材料包括钆合金、银-铟-镉(Ag-In-Cd)合金、B₄C和Dy₂TiO₅等。近年来,美国的S.M.斯托勒公司、

西屋公司等开发出 $\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$ 、钨合金等新型中子吸收材料^[18]。

常用的中子吸收材料如表 12-1 所示。

表 12-1 常用的中子吸收材料及其优缺点比较^[1]

材料	使用堆型	类型	优点	缺点
银 - 铟 - 镉合金	大多数堆型	强中子吸收材料	辐照性能稳定, 在压水堆中具有广泛的运行经验	长时间使用, 其核反应性价值有较大降低, 成本高
碳化硼 / 硼钢	VVER 反应堆、RBMK 反应堆等	强中子吸收材料	反应性价值最大, 成本低, 广泛的工业规模辐照经验	位移损伤、(n, α) 反应氦气泡等辐照问题, 容易肿胀和开裂
铪	军用小型堆	强中子吸收材料	调控速率快, 辐照稳定性好, 有广泛的运行经验	成本高, 加工生产困难
钛酸锆	VVER 反应堆、RBMK 反应堆等	强中子吸收材料	辐照肿胀率低, 熔点高, 辐照性能稳定	随燃料增加反应性价值降低较快, 与碳化硼配合使用
$\text{UO}_2\text{-Gd}_2\text{O}_3$	—	强中子吸收材料	成本低, 降低燃料循环费用, 燃料管理灵活性增加	还未有使用经验
钨	AP1000	弱中子吸收材料	成本低	弱中子吸收体, 核反应性价值有较大降低

其中, 铪是最早被使用的材料。1957 年, 美军所产的第一艘核动力潜艇 SSN-571 中首次将铪作为控制棒用中子吸收材料。20 世纪 50~60 年代, 铪被广泛应用于美军军用核反应堆和核电站中^[19]。由于铪元素的生产成本很高, 并且可用性相对较低, 因此其在商用反应堆中暂未大规模使用。

目前使用最广泛的中子吸收材料是银 - 铟 - 镉合金^[20], 其具有良好的力学性能、耐辐照性能和热稳定性能, 且原料容易获得, 易于制造。银 - 铟 - 镉合金具有较大的中子吸收截面, 吸收中子后的产物还能有效地再吸收中子。但是, 有学者研究发现, 银 - 铟 - 镉合金的反应性价值随着其燃料深度的增加而减少, 极大地影响其使用寿命^[21,22]。此外, 银 - 铟 - 镉合金属于强中子吸收材料, 常用于安全棒中^[1,23]。

含硼材料, 例如含硼聚乙烯、含硼不锈钢、 $\text{Al/B}_4\text{C}$ 复合材料等, 由于其优异的中子吸收能力被广泛用于中子屏蔽材料和控制棒材料中^[24-26]。大部分情况下, 含硼材料用于中子屏蔽, 作为控制棒用于中子吸收的仅有碳化硼和硼钢, 其在俄制的 VVER 和 RBMK 反应堆中有应用。但是相关学者研究发现, 由于硼与热中子会产生 (n, α) 反应从而产生氦, 这容易造成含硼材料发生辐照肿胀, 导致结构破坏^[27-29]。天然硼含 ^{11}B 和 ^{10}B 两种核素, 其中 ^{10}B 的丰度为 18.8% (质量分数), 其热中子吸收截面为 3837b ($1\text{b}=10^{-28}\text{m}^2$); ^{11}B 几乎不吸收中子。硼化物陶瓷具有很强的中子吸收能力, 常用的有碳化硼、六方氮化硼等。

Dy_2TiO_2 材料由俄罗斯研制, 其熔点高、辐照肿胀率低、辐照性能稳定、易于生产, 在俄制的 VVER 和 RBMK 反应堆中与 B_4C 配合使用^[30]。

我国在相关领域的研究起步较晚, 近年来, 随着我国核电自主化发展的进程加快, 上述中子吸收材料都有研究涉及, 并且部分材料已实现批量生产。另外相关学者提出了一系列新型的复合材料作为中子吸收材料, 如 Tm_2TiO_5 陶瓷、 $\text{TbTiO}_5\text{-DyTiO}_5$ 陶瓷、镧系稀土元素复

合材料、 Gd_2O_3 陶瓷材料等^[22,31-33]。

(2) 本领域对新材料的战略需求

前已述及，控制棒主要分为安全棒、补偿棒和调节棒，安全棒具有较高的反应性价值，而补偿棒和调节棒的反应性价值则较低。补偿棒和调节棒主要是提供机械补偿以配合安全棒的运动实现反应性控制，其内部的中子吸收材料需具有熔点高、导热性能好、热胀系数低、抗压性能好、抗辐照性能强及抗腐蚀性性能好等特点。

在反应堆运行过程中，一旦监测发现功率上升过快，控制系统就会将控制棒弹射入堆芯，停止核反应堆的运行。因此，控制棒不仅需要材料有高中子吸收截面，同时也需要有优良的热物理性能以及良好的化学相容性^[34]。

为了使核反应堆能够在机械补偿机制的操作模式下安全稳定运行，要求控制棒中的中子吸收材料在不同燃耗阶段具有较低的核反应价值，同时在整个服役期间内中子吸收能力随燃耗的进行不发生显著变化^[35]。在核反应堆中服役的控制棒用中子吸收材料经高剂量的中子辐照后将产生辐照生长、辐照肿胀、辐照蠕变和辐照硬化等现象，导致材料性能降低。所以控制棒用中子吸收材料的抗辐照性能也是一个需要特别考虑和关注的因素^[36]。综合考虑现有材料的优势与不足，不断探索并开发出具有优异力学性能和抗辐照性能的中子吸收材料，对于我国的核电事业发展具有重要意义。

(3) 当前存在的问题、面临的挑战

当前，中国在运和在建的百万千瓦级压水堆核电机组，其堆芯控制棒用中子吸收材料均是从国外进口。国内对于堆芯控制棒用中子吸收材料的研究起步较晚，目前尚未形成具有自主知识产权的材料体系，这严重制约了我国的核电自主化进程。控制棒驱动系统承担着反应堆启动、功率调节等控制和保护职责，是反应堆安全运行的“心脏”，但是目前使用的材料均存在一定的弊端，需要攻关解决。

如以 Ag 为基体的银 - 铟 - 镉系列合金，其本身主要作为安全棒的中子吸收材料，正常情况下，其内部的中子吸收材料遭受的中子剂量少，因此可以在堆芯中服役较长时间。但是如果将其作为补偿棒和调节棒的中子吸收材料，由于补偿棒和调节棒长期插入到核反应堆中，遭受的中子剂量高，故其服役寿命下降较快。当其服役五到十年后，反应性价值下降为初始值的 80%，不再满足补偿棒和调节棒对核反应性控制的要求^[37]。并且银和铟与中子反应后将发生转变，成为镉和锡，这就导致材料的密度发生变化，影响使用效能。此外，在服役过程中，由于辐照引起的空位、位错、嬗变产物等，将使得中子吸收材料出现严重的膨胀和开裂。

再如碳化硼和硼钢作为控制棒中的芯体材料已经应用于 BBER-500 反应堆中^[38]，但是其在运行过程中积累了大量的辐照缺陷，如形成氦泡、肿胀和开裂等，同时燃耗只能做到 45%~50%^{10B}^[39]，故其作为补偿棒和调节棒用中子吸收材料也并不是最佳。

根据已有的资料显示，硼、镉、铯和铪等元素是作为中子吸收材料的优异候选者，为了寻找性能优异的中子吸收材料，主要集中在 $A_2O_3-BO_2$ 二元体系化合物（其中，A = 镧系元素、Y 和 Sc；B = Ti、Zr、Sn 和 Hf）的探索中。目前关于控制棒用中子吸收材料尚未有完美的解决方案，一方面，需要在现有材料的基础上不断提升其中子吸收能力和适用于补偿棒与调节

棒的服役年限，以期实现良好的机械补偿效果；另一方面，仍需不断开发新的可替代材料，实现真正的国产自主化。

(4) 未来发展

近年来，稀土元素开始在中子吸收材料上使用，我国稀土资源丰富，可优先发展其应用。在众多的复合材料中，基于镧系稀土元素的铁基复合材料是一种具有广阔应用前景的中子吸收材料。镧系稀土元素（Tm、Tb、Dy 元素）作为中子吸收元素，中子吸收能力适中，当含量达到一定的比例时，随着燃耗的变化，其中子吸收能力仍然能够保持长期稳定。镧系氧化物具有较好的抗辐照损伤能力^[40]，且具有合适的中子吸收截面，在粒子辐照下表现出较低的体积膨胀率，同时具有优良的热物理性能与抗腐蚀性能等，是核反应堆控制棒用中子吸收材料的良好候选者。

俄罗斯原子能国家研究中心在 WWER-SM 反应堆中利用 $3.4 \times 10^{22} \text{cm}^{-2}$ ($E > 0.1 \text{MeV}$) 的中子流研究了 $\text{Ln}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ 的辐照性能，结果证明其具有较好的抗辐照性能。此外，在俄罗斯的反应堆中， Dy_2TiO_5 材料作为控制棒用中子吸收材料已经被用于 VVER-1000RACCs 和 RBMK 核反应堆较长时间^[41,42]，其在结构稳定性方面具有较大的优势，且中子吸收率随时间变化比较平稳。在多年的核电应用中，尚未出现因为 Dy_2TiO_5 中子吸收材料失效而引起的操作问题和安全事故，这为镧系稀土元素作为中子吸收材料的应用提供了良好的依据。因此，可以考虑发展镧系稀土元素。

随着核反应堆用中子吸收材料的发展，提高中子吸收材料在高温环境下的服役性能，研究设计集结构 / 功能一体化的中子吸收材料是未来发展的趋势，如屏蔽中子 / γ 射线双重功能的防护材料的研发、稀土合金以及稀土掺入的中子吸收材料。在产业化应用中核防护用异形构件，采用激光 3D 打印颗粒增强金属基复合材料具有潜在的应用前景，例如超声波辅助激光打印颗粒增强金属基复合材料构件，大尺寸板材制备采用粉末冶金方法是一种较为合适的方法^[43]。

随着国防事业、核工业以及放射医学的发展，对控制棒用中子吸收材料的要求将会越来越苛刻。研制出热导率高、高温相稳定性好、质量轻及耐腐性好的材料，已成为核能领域发展的重要课题。因此，为了提高我国的科技创新能力，打破国外的技术封锁，建立一种新型的中子吸收性能良好、理化性能优良的稀土元素中子吸收材料制备工艺具有重大的战略意义。

12.1.3 / 屏蔽组件及反应堆屏蔽材料

(1) 概述

核反应堆运行时，堆芯将产生 α 、 β 、 γ 、X 射线及中子 (n)、质子 (p)、重氢核 (d)、裂变产物 (FP) 辐射^[44]；停止运行时，裂变产物也向周围放出 γ 射线。其中尤以中子和 γ 射线的穿透力较强，可对周边物及人员造成辐照损伤^[45]。为了防止周围的工作人员和公众受到这些放射性辐射的危害，并防止邻近的结构材料受到放射性辐射损伤，在堆外结构设计中，必须在反应堆的四周设置屏蔽层。屏蔽层是核反应堆的基本结构组成部分。

γ 射线是原子核能级跃迁蜕变时释放出的射线，是波长短于 0.01\AA 的电磁波，具有很强

的穿透力。工业上常用其来进行探伤和流水线的自动控制^[46]。 γ 射线的屏蔽材料有很多,如铁、钨、铅、混凝土、铅硼聚乙烯等^[47-49],但这些材料对 γ 射线的屏蔽效果各不相同。铅及含铅的复合材料常被用作 γ 射线屏蔽材料,但是因为其本身质地软、熔点低且容易被碱腐蚀,所以不能用作结构体。以W为基体,并添加Ni、Fe、Cu等强化元素组成的高密度合金,具有密度大、强度高、塑性好等优点,近年来在屏蔽材料领域得到了广泛应用。南华大学颜亮等^[50]采用液相烧结的方法制备了90W-7Ni-3Fe合金和90W-7Ni-3Fe-Hf合金,研究表明W-Ni-Fe合金对 γ 射线的吸收效果远高于传统的屏蔽材料铅。成细洋等^[51]采用激光成型的方法制备了W94Ni6钨镍合金,结果显示,材料的屏蔽效果远高于铅,同时合金的硬度比纯钨高出64%。

中子是组成原子核的核子之一,其本身不带电,具有很强的穿透力。中子可根据其速度分为慢中子、中能中子和快中子。对中子的屏蔽作用实质是对快中子的减速和慢中子的吸收。早期,中子屏蔽材料以一些合金或原子序数小的元素所组成的简单化合物为主,如不锈钢、钨、铜等金属和水、石蜡、聚乙烯等含氢量较高的简单非金属材料,这些都是良好的中子慢化材料^[52]。硼是一种常见的中子吸收体,其中 B_4C 具有很强的中子吸收能力,主要是因为硼-10的热中子吸收截面很大。袁楠等^[53]采用粉末冶金的方法制成了Al- B_4C 复合材料,对热中子具有良好的吸收性能。

硼-10对热中子的吸收截面较大,且对应的 γ 辐射释放的能量较小,因此常用于屏蔽层^[54]。硼屏蔽组件材料主要可分为以下几类:硼钢、硼铝合金、含硼水泥、含硼有机聚合物和铝基碳化硼复合材料等^[55-58]。

近年来含硼不锈钢被广泛用于原子能工业领域,把含硼质量分数大于0.1%的不锈钢称为高硼钢,高硼钢具有较高的耐腐蚀性、较好的中子吸收能力和高强度。硼含量为1%的硼钢可作为原子反应堆保护外壳,硼含量为2%的硼钢作为反应堆调整杆,硼含量为3%的硼钢作为核反应气冷堆的安全棒、展平量用的吸收棒和粗调棒^[59,60]。

美国Carpent公司把0.20%~2.25%硼含量的硼钢划分成A、B两个等级,两者的区别主要在于制造方式和颗粒粒径。A级硼钢的颗粒细小,材料组织均匀,力学性能优异。A级硼钢既可作为结构材料,也可用作屏蔽材料,B级硼钢则只能作为屏蔽材料^[61]。

20世纪日本的神户钢厂、住友金属工业公司和日立金属公司等企业研发了大量的硼钢并尝试作为中子屏蔽材料使用,其中硼的含量为0.6%~1.0%。神户钢厂研发出的力学性能较好且中子吸收能力强的硼钢已经在核电站中广泛应用^[62,63]。

美国Eagle Picher公司将硼加入到1100Al和6351Al基体中,得到了两种不同的硼铝合金,该材料的机械加工性能较好,硼和铝的合金化反应较小,已经广泛应用为核电站乏燃料的中子吸收材料。这两种硼铝合金由于铝含量不同,材料的力学性能也不相同,1100Al基的硼铝合金所含铝的成分较低,其力学性能较差,只能作为中子的吸收材料,而6351Al基的硼铝合金所含铝的成分较高,其力学性能较好,既能作为中子的吸收材料,又可以作为结构材料^[25,64]。

防辐射纤维也是一种常见的防中子辐射屏蔽材料。研究人员制成的离子交换型纤维是将硼、锂等元素吸附到纤维上,从而使材料具有中子辐射屏蔽功能。美国一些核电厂研究出一

种含硼的有机聚合物 Boraflex，其成分主要是聚四氟乙烯和聚乙烯为基体， B_4C 为增强物，二氧化硅为强化剂。核反应堆中屏蔽组件材料也有大量的有机聚合物，例如聚苯硫醚、环氧树脂、酚醛树脂等。

国内的张鹏等^[65]制备了高碳化硼含量的铝基碳化硼复合材料，并利用计算程序对中子的屏蔽性能进行模拟，不同的入射中子能量，中子透射率的变化各异，在低能量区间，中子透射率的变化相较于高能量区间要高，铝基碳化硼复合材料的中子透射率与材料厚度呈指数衰减趋势；除此之外，还对材料的显微组织和力学性能进行了研究，通过对材料的微观组织观察，发现碳化硼颗粒在铝基体分布均匀，没有出现团聚现象，材料的组织致密，气孔和裂纹缺陷较少，碳化硼颗粒的加入提高了材料的抗拉强度，对碳化硼含量为 50% 的铝基碳化硼材料进行抗拉强度测试，其值可以达到 254MPa^[66]。

对于传统的中子屏蔽材料，在合金材料中，SS-316 对于能量为 2~12MeV 的中子拥有最好的屏蔽效果；在混凝土中加入适量的硼和聚乙烯可以有效地增强热中子吸收性能，并减少经中子照射后水泥中产生的长寿命放射性核素的密度，同时也有效降低了经中子辐照后混凝土的总放射性^[67]。

(2) 本领域对新材料的战略需求

随着核能技术的进步，对屏蔽材料的性能提出了更多的要求，总体来说，屏蔽材料开发时有以下几个需求：首先，屏蔽材料必须满足基本辐射屏蔽要求，即对中子和 γ 射线具有良好的慢化吸收或屏蔽效果；其次，屏蔽材料要有较好的物理机械性能以满足使用；再次，材料在使用过程中要保持良好的结构完整性，尤其对于不可更换的一次性安装的结构材料；最后，还必须考虑材料的活化及热积累和二次 γ 射线的产生。当然，屏蔽吸收复合材料的造价、制备工艺的难易以及制备所需原材料的可获得性也是必须要考虑的。

针对硼及化合物屏蔽中子出现的问题，采用热中子吸收截面较大的稀土元素替代硼，是目前研究的热点。根据现有研究结果^[48]，采用钐、镝、钆等稀土元素制备的稀土有机复合材料，能有效改善成分偏析问题，同时提高材料力学性能，而且热中子屏蔽效果至少提高了 5 倍。但是，稀土吸收热中子时次生 γ 辐射较大，必须配合 γ 射线屏蔽材料使用。国内稀土资源丰富，稀土元素热中子吸收截面较大，应受到重视。

(3) 当前存在的问题、面临的挑战

随着国防工业、核科学技术和放射医学等领域的不断发展，各种放射性射线在国防、医学、工业等领域得到了广泛的应用。同时射线对环境和人体的危害也渐渐显现出来，传统屏蔽材料很难兼顾结构和功能一体化的要求。

在各类硼屏蔽组件中，对于简单含硼化合物，如碳化硼和碳化硼-碳化硅化合物，其中子宏观吸收截面较小，中子吸收性能还有待提高。高硼钢兼具快中子慢化性能、热中子吸收性能、 γ 射线屏蔽性能等，是辐射防护中用量最大的材料之一。含硼 1%~2% 的高硼钢已经作为堆芯组件开始应用，但是钢中的硼-10 会形成脆性连续的网状硼化物，这会显著降低高硼耐磨铸钢的韧性，因此，需要研究如何改善或消除硼化物的网状结构，获得均匀细小弥散分布的硼化物^[67,68]。

(4) 未来发展

在新型中子屏蔽材料开发中,含碳化硼、氮化硼、硼及碳纤维等的复合型辐射屏蔽材料是新型辐射屏蔽材料开发的主要方向之一。其主要中子吸收性能由屏蔽材料中B元素的含量决定,而中子的慢化效果和材料的物理性能则取决于基体的选择。高分子基体因含有大量的H元素而具有较好的中子慢化性能,金属基体则具有较好的力学性能和热塑性,另外,金属基体的含B材料对 γ 射线也具有一定的屏蔽效果,是对复合辐射场进行辐射防护的理想材料。

在高分子化合物的开发上,碳化硼和硼等因具有较大的中子吸收截面而被广泛地用于中子屏蔽材料的合成制备中,其中以纤维增强环氧树脂基复合材料和含碳化硼高密度聚乙烯具有最好的中能中子屏蔽效果,这与硼较大的热中子吸收截面及纤维增强环氧树脂和密度聚乙烯含有大量的H等低原子序数的元素有关,但硼的添加会降低材料的抗压强度等机械性质,在进行材料研制的时候需要综合加以考虑;碳化硅虽然中子吸收截面相比硼、碳化硼较差,但其有一定的 γ 射线屏蔽作用,可以考虑作为混合辐射场的屏蔽材料。当然,在选用辐射屏蔽材料时,除了要考虑射线的屏蔽性能,材料的热力学性能和一些特殊的物理性能也是需要考量的因素,如透明屏蔽材料硼硅酸铍玻璃等。

纤维织物虽然存在制作设备复杂、投资大、拉伸强度低、断裂伸长率大等缺点,但纤维织物的柔韧性和易于加工的性质使其成为制备人体防护装备不可或缺的材料,如制备全身式、马甲式或围裙式辐射防护服或特殊部位辐射防护服等。

另外,随着工艺的不断发展,结合表面处理技术、纳米技术以及与新型高分子化合物相结合的纤维织物将成为材料发展的一个重要方向。在中子辐射防护材料中,硼-10具有较大的中子吸收截面且二次发射的 γ 射线能量较低,硼元素在其中一直占有非常重要的地位。随着核工业对屏蔽材料性能要求的复杂化和多样化,科研人员对含硼化合物的基体做了许多研究与尝试,包括高分子基体含硼化合物、金属基体含硼化合物等;另外,纳米材料因有着特殊的小尺寸效应、表面与界面效应和量子尺寸效应等而被人们关注。

随着核工业和射线装置的进一步发展,以及核能应用领域的日趋扩大,单一类型的屏蔽材料已经不能满足辐射防护的要求,新型复合屏蔽材料的研究成为目前急需解决的问题。因此,开发质量轻、强度高和体积小的新型屏蔽材料成为未来发展的重点方向。

12.1.4 / 中子源组件

(1) 概述

压水堆中子源组件包括初级中子源组件(Primary Neutron Source Assembly)和次级中子源组件(Secondary Neutron Source Assembly),用于提高反应堆启动时的中子注量率水平,以使源量程核测仪器能可靠地测出中子注量率水平,从而保证反应堆安全启动。

初级中子源组件结构与可燃毒物组件基本相同,由连接板和初级中子源棒组成。初级中子源组件共两组,每组含有一根初级中子源棒,初级中子源材料为镅(Cf)源或钋-铍(Po-Be)源,它会自发地发射出中子,每根初级中子源棒强度不小于 $3.6 \times 10^8 \text{ n/s}$ 。初级中子源采用双层不锈钢包覆,用于反应堆首次启动。

次级中子源组件结构与控制棒组件基本相同，共两组，由连接柄和次级中子源棒组成。次级中子源棒由不锈钢包壳、铈-铍（Sb-Be）源芯块和上下端塞组成。Sb-Be源是一种稳定源材料，铈在反应堆运行期间吸收中子活化，铈的 γ 射线轰击铍而释放出中子。次级中子源组件用于反应堆换料后启动，其最低中子强度要求停堆换料3~4个月后仍不小于 $3.6 \times 10^8 \text{n/s}$ 。

（2）本领域对新材料的战略需求

目前中国正在运行的反应堆核电机组总数已有将近50台，位居世界第二位。中子源组件是目前每个反应堆核电机组必备的组件，在反应堆的每次停起过程中都发挥了重要作用。由于中子源组件的特殊性，目前的中子源组件，尤其是次级中子源组件，其设计寿命一般都比较长，像秦山二期核电厂的次级中子源设计寿命为15年。在此期间，中子源组件将在堆内经受长时间的高辐照强度、高温、高压环境的考验。而中子源组件的包壳在运行过程中承担了包容中子源等放射性材料、维持中子源组件的结构完整性等重要作用，需要在使用寿期内避免破损。因此在这种严酷辐照条件下保持材料结构的完整性具有很大的挑战。目前中子源组件所使用的包壳材料大部分是不锈钢，根据目前不锈钢在堆内的使用情况来看，并不能完全满足放射性物质包容的要求。因此目前有必要研发新的结构材料，作为新的中子源组件材料。

（3）当前存在的问题、面临的挑战

一般的反应堆机组所采用的次级中子源都是铈-铍（ $^{124}\text{Sb-Be}$ ）源。次级中子源相关组件设计使用寿命一般为15年，但是长期的堆内辐照以及装、卸料期间的插拔操作，使得次级中子源组件在设计寿命的末期存在破损和失效的风险，破损案例在国内外多个机组都曾出现。

堆内的中子源组件的破损将会导致两个方面的问题^[18]。一是原有的次级中子源无法正常使用。这是因为铈-铍（ $^{124}\text{Sb-Be}$ ）源中的 ^{124}Sb 是由天然铈（57.2% ^{121}Sb ，42.8% ^{123}Sb ）经中子辐照后产生的，半衰期为60.2d。因此次级中子源必须经过堆内辐照才能正常使用，如发生破损而更换新的次级中子源，机组下一循环将无次级中子源可用，影响装料操作的正常进行。二是中子源组件包壳的破损将导致放射性物质包容能力的降低，造成放射性物质的泄漏，这将造成一回路放射性水平的显著提升，从而给反应堆的正常运行带来很大的影响。尤其是次级中子源一般会产生比较多的氙，中子源包壳的破损会导致氙的泄漏，从而增加核电基地周围的环境排放压力。氙排放量是目前国内核电基地普遍关注的环境限值，其排放量在一定程度上决定了核电基地的装机容量和规模，而次级中子源中的氙泄漏目前已经成为了核电厂运行过程中关注的一个重点问题。因此，为了解决中子源组件目前存在的问题，需要研发新的结构材料，改善中子源组件的辐照性能，提高氙等放射性物质的包容能力，用于后续的中子源组件。

（4）未来发展

目前来看，中子源组件的包壳和端塞等结构所使用不锈钢材料并不能满足中子源组件的实际需求。由于反应堆内的特殊环境，未来满足中子源需求的新材料应该是能够耐受更高强度的中子和光子辐照考验，耐受更高温度和压力，使用寿命更长，结构强度更好，方便加工

的新型材料。类似的材料除了满足反应堆中子源组件的应用需求，还将可能用于替换反应堆内的多种结构材料，考虑到国内反应堆装机数在未来一段时间内还将会有比较大的增加，因此这种新型的材料必将获得很大的市场空间。

12.2 / 一回路系统重要设备部件

12.2.1 / 反应堆压力容器

(1) 概述

反应堆压力容器（Reactor Pressure Vessel, RPV）是指安置核反应堆并承受其巨大运行压力的密闭容器，也称反应堆压力壳。核电站所用的反应堆主要有轻水堆（压水堆及沸水堆）、重水堆，未来还将包括气冷堆及快堆等。反应堆压力容器包容了反应堆的活性区和其他必要设备，其结构形式随不同堆型而异^[69]。结构材料包括在反应堆压力容器或压力容器内除燃料组件及其相关组件以外的全部结构件所用的材料；这类材料需承受高中子注量的辐照和冷却剂的腐蚀，且在高温、负载工况下可保持足够强度。

反应堆压力容器通常由压力容器筒体组件和顶盖组成，前者由下法兰（含接管段）、筒体和半球形下封头组焊而成，顶盖由半球形上封头和上法兰焊接组成（或者为一体化顶盖）。目前核电站反应堆压力容器筒体、法兰、底封头、顶盖等主体结构使用最广泛的结构材料为 A508-Ⅲ 锻件和 A533B 板材。上下法兰面之间用两道自紧式空心金属（高镍耐腐蚀合金 Inconel718 或 1828 钢）“O”形环密封。为了避免容器内表面和密封面腐蚀，在压力容器内壁堆焊有大于 5mm 厚的不锈钢衬里，过渡层 309L（00Cr23Ni11）+308L（00Cr20Ni10）。为防止外表面腐蚀，压力容器外表面通常涂漆保护^[70-72]。

国际上反应堆压力容器材料大型锻件制造商主要有日本制钢所（JSW）、法国克鲁索、韩国斗山重工等。其中 JSW 整体技术水平世界领先。法国克鲁索公司拥有空心钢锭制造技术，在筒形锻件制造上独占鳌头。

我国部分重型机械厂拥有 12000t 自由锻造水压机，可供生产核电压力容器大锻件用。一重有生产船用小型反应堆设备的经验并具备国内大部分核电反应堆压力容器的批量供货能力，二重有 AP1000 反应堆压力容器锻件生产经验，上海电气核电设备有限公司也具备反应堆压力容器供货经验，他们在劳动生产率和技术水平上与国外先进水平之间差距正在缩小。

不锈钢是一类常见的压力容器材料，目前，在众多不锈钢类型中，仅有奥氏体不锈钢被广泛用作核反应堆的结构材料；而铁素体和马氏体不锈钢在堆芯应用方面受到限制，但是因其优越的导热性、抗氧化和抗应力腐蚀开裂性能以及对高温气体耐腐蚀性而被用于制造热交换器内部部件和加热炉零件。

镍基合金大多是耐腐蚀且耐热的合金，所含的 Ni、Cr、Mo 等合金元素都比奥氏体不锈钢多，其组织为稳定的奥氏体，在 600~1000℃ 的高温下可承受一定的应力，并具有耐腐蚀、

抗氧化等特性；主要用于堆外作为蒸汽发生器、过热器的传热管和其他耐热、耐腐蚀部件。

(2) 本领域对新材料的战略需求

反应堆压力容器是压水堆核电站的大型关键部件，装载着核燃料组件、堆内构件和一回路高温高压的冷却水，并担负着屏蔽辐射和防止燃料元件破损后裂变产物外泄等功能。压力容器还是反应堆中最大的和不可拆换的部件，是反应堆延寿的主要限制因素。反应堆压力容器材料需要满足极高的运行参数和严苛的环境条件。

反应堆压力容器的长期使用特性使得研发人员必须关注其承受冷却剂温度和压力的能力，以及在使用寿期内积累的中子注量对其力学性能的影响。它不仅十分庞大，而且长期在高温、高压（14~16MPa）和中子场下运行。其中 RPV 钢的辐照脆化对安全威胁最大。压水堆核电站的压力容器一般采用 Mn-Ni-Mo 低合金铁素体钢（A508-III）制造。A508-III 钢中 Mn 是强化基体和提高淬透性的元素，Ni 可以增强钢的淬透性，提高韧性，降低韧脆转变温度，Mo 能提高钢的高温性能并降低回火脆性。另外，钢中还残存微量的 Cu、Si 等杂质元素。但此材料经受中子长期辐照后韧脆转变温度会升高至室温以上，严重影响核电站的安全运行。

提高冷却剂循环温度能够提高反应堆发电效率，因此高温是先进反应堆的发展方向之一。随着一些新型先进反应堆压力容器设计温度提高至 600℃ 甚至更高，A508-III 类低合金钢已无法胜任反应堆压力容器材料，镍基合金和铁-马钢因优异的高温性能而成为新的反应堆压力容器候选材料。

(3) 当前存在的问题、面临的挑战

随着 20 世纪六七十年代国外大规模建造的核电站运行时间接近设计寿命，急需反应堆压力容器寿期评估与延寿分析论证，国外有美国核管会、美国西屋公司等，国内主要有国家电投上海核工程研究设计院、核动力设计院等机构开展了这方面的工作，并已取得阶段性的研究成果。

国内反应堆压力容器材料存在的主要问题是材料的制造国产化，特别是大型铸锻件的冶炼、机械加工方面的国产化。其中，一重近年来在国家的大力支持下，实施铸锻钢基地及大型铸锻件自主化改造项目，在能力水平上瞄准世界一流。

虽然国内已完全掌握了反应堆压力容器材料，包括大型锻件的生产制造技术，在部分技术领域达到了国际先进水平，但大型锻件的组织及其均匀性控制尚有提升空间，表现为材料的高温力学性能与美、日、法国的产品尚存一定差距。国产反应堆压力容器用焊材的性能及质量稳定性也有所欠缺，焊材发展水平明显滞后于锻件、钢板等型材，目前还没有在核电反应堆压力容器制造中完全取代进口焊材。

(4) 未来发展

未来反应堆压力容器的发展主要有以下趋势^[73]：大型化、整体化和长寿化。因此，在材料的选择、冶炼、铸造、无损检测、在役辐照监督等方面需加强研究攻关。

对于压水堆核电站及压力容器设计温度在 350℃ 以下的高温气冷堆反应堆压力容器而言，未来将在成熟的 A508-III 钢制造技术基础上，优化锻件成型技术，提高高温力学性能，实现

批量化制造，有效控制制造成本。

对于一些设计温度提高至 600℃ 甚至更高的新型先进反应堆压力容器而言，学者们正研究镍基合金和铁 - 马钢作为新的反应堆压力容器材料的可行性，开展这类材料高温性能、辐照性能等相关研究。

经过多年的发展，国内已经具备制造现代核电厂用大型 RPV 的能力，对特大型和整体化的 RPV 锻件研发也已经着手开展，结合相关学者的研究^[74]，未来 RPV 材料的发展主要有以下几个方向：

- ① 尽可能减少 RPV 材料中有害杂质元素的含量，如 S、P、H、O、N、As、Sn、Sb 等；
- ② 对炼钢原材料进行挑选，可采用钢包精炼、真空脱气和铸锭等工艺，降低材料中 H、O、N 等元素的含量，加大锻件的锻造比以保证各部位金属均能得到充分的锻造；
- ③ 优化成分配制，降碳增锰以改善材料性能。

12.2.2 / 堆芯捕集器

(1) 概述

...

堆芯捕集器是通过耐热部件接住保持落下的堆芯熔融物，并且与注水机构组合来将堆芯熔融物冷却，从而确保核反应堆外壳的健全性，抑制放射性物质向外部释放的安全设备。

堆芯捕集器将耐热性的部件配设在核反应堆外壳下部干井的地面部分，以使熔融堆芯不会将核反应堆外壳的下部熔融贯通或者使放射性物质泄漏。但是，仅通过铺满单纯的耐热性的部件，有可能不能充分地堆芯碎片冷却^[75]。此外，如果为了将堆芯碎片冷却而配设多个用来通过冷却水的配管，则有在其配设中增加成本的问题。仅通过从碎屑的上方进行注水，只有碎片上面水的沸腾带来的冷却，如果碎屑堆积厚度较厚则有可能不能充分冷却到碎屑底部。因而，需要将地面面积取得较大，使碎屑的堆积厚度在能够冷却的厚度以下。但是，确保足够大的地面面积在容纳容器构造设计上是困难的^[76]。

堆芯捕集器概念从提出至今，已产生诸多技术方案，按其是否布置于压力容器内，可分为堆内型和堆外型；按熔融物滞留容器的形式可分为坍塌式与铺展式；按熔融物迁移至容器初期是否直接与冷却水接触，可分为干式和湿式。目前实际应用堆芯捕集器的核电厂包括欧洲先进压水堆（EPR）和俄罗斯水 - 水高能反应堆（WWER）。

在此详述以下三种^[77-79]：

一种是在压力容器的外侧设置扩展室，扩展室的下方设有冷却水道，当堆芯熔融物熔穿下封头后，熔融物流入扩展室，利用扩展室的大面积平面对熔融物进行冷却，冷却水道内的冷却水可对熔融物进行冷却以防止扩展室被熔穿。但这种结构需要采用一个面积很大的平面来进行熔融物摊平，以增大熔融物的冷却面积，加快熔融物的冷却速度，这样的设计意味着要占据安全壳下部很大的面积和空间，进而造价较高，也增加了设计难度。

另一种方式是在压力容器的下方设置桶状的捕集器，在捕集器内设置可熔化的牺牲材料，捕集器外设有冷却水道，熔融物流入捕集器后与其内设置的牺牲材料相互作用，熔融物在熔化牺牲材料的过程中被逐渐降温。由于捕集器的形状限制，导致仅依靠捕集器的壁面带走熔融物的衰变热，传热面积小，导致传热量小，特别是中部熔融物汇集后冷却明显不足。

再一种方式是在压力容器的下方设置捕集器，捕集器的外部设有冷却水道，捕集器的内部设有混凝土底板，并在捕集器的底部设置喷嘴，且喷嘴的上端伸入堆腔混凝土底板，喷嘴的下端伸入冷却水道。熔融物流入捕集器后，先与混凝土底板发生相互作用导致混凝土不断熔化，混凝土底板起到了牺牲材料的作用，在一定程度上降低堆芯熔融物的温度；当熔融物将喷嘴的上端熔化后，冷却水道内的冷却水通过喷嘴注入，实现了熔融物的底部注水，能够对熔融物实施快速冷却。但熔融物与冷却水直接接触时，瞬间产生大量蒸汽会造成安全壳压力瞬间升高以致损坏，甚至会产生蒸汽爆炸，从而造成严重后果。

从1993年开始，欧洲先进压水堆（EPR）的设计者提出采用压力容器外设置堆芯捕集器，以包容和冷却堆芯熔融物。堆芯捕集器的设计基本分为两种类型^[80]：

① 基于熔融物硬壳的外部冷却设计，堆芯捕集器采用硬壳设计，例如EPR和VVER-1000。

② 基于产生颗粒或者多孔碎片，由于表面增加，堆芯捕集器采用快速淬火和冷却的设计，通过向堆芯捕集器底部注水的COMET设计概念和韩国的新一代ALWR（先进轻水反应堆）均采用该种设计。

EPR的设计思路为：反应堆压力容器下封头失效后，高温熔融物掉入堆坑。在熔融物释放到扩展区前，堆坑区可暂时积累逐步释放的熔融物，并通过牺牲混凝土调整熔融物性能。熔融物与堆坑区内层混凝土接触后，混凝土熔蚀与高温熔融物混合。堆坑内层牺牲混凝土和堆坑底部熔化塞被熔穿后，熔融物经过倾斜的扩展通道进入面积为170m²的扩展区。由于堆坑区和扩展区功能不同，因而两个区域采用了不同的牺牲混凝土。EPR堆坑区为含有铁矿石和硅石的硅铁混凝土，而扩展区采用硅石混凝土^[81]。

田湾核电站则根据俄罗斯VVER-1000堆型反应堆设计，结合堆内熔融物稳定和堆外熔融物稳定两种方案的优点，在反应堆压力容器的正下方设置了堆芯捕集器^[82]。堆芯捕集器牺牲材料主要组分为约70%的Fe₂O₃、约30%的Al₂O₃、0.1%~0.2%的Gd₂O₃和相当于5%的SiO₂基结合剂^[83]。

COMET由Alsmeyer等^[84]提出，通过堆芯捕集器底部注水实现堆外收集和冷却熔融物。压力容器下封头失效后，熔融物进入扩展区，熔蚀底层15cm厚的硼硅酸盐玻璃牺牲混凝土层。混凝土与熔融物的混合降低了熔融物的温度和黏度，使得熔融物更易扩展；混凝土分解产物可氧化熔融物中可能存在的金属锆，避免注水阶段锆与冷却水反应产生大量氢气^[85]。

韩国的新一代先进轻水反应堆的堆芯捕集器设计与COMET相似，其面积较大，熔融物可在其中充分铺展。堆芯捕集器由牺牲混凝土、冷却注射喷嘴和基底构成。牺牲混凝土为硅质混凝土，对于降低熔融物温度、氢气产生速率和裂变产物释放速率等有着重要作用^[86]。ALWR与COMET的不同之处在于冷却注入系统，ALWR的冷却物质是水和气体的混合物，气体的加入可以降低蒸汽产生的速率，使得蒸汽释放速度变慢，蒸汽爆炸的可能性降低。

（2）本领域对新材料的战略需求

•••

当反应堆发生堆芯熔化严重事故后，熔融物可能熔穿反应堆压力容器，从而可能造成大量放射性射线释放的后果。三代核电站对严重事故缓解能力提出了更高的要求，致力于解决

严重事故环节中的熔融物长期冷却问题，以实现堆芯完全熔化后将熔融物稳定限制在一定空间范围内，最终终止事故发展。

要解决堆芯熔融物的冷却问题，提高核电站安全性，就需要加快对核电混凝土材料的研制和应用。鉴于目前欧洲 EPR 第三代核电站技术，它要求安全壳衬底应有牺牲混凝土保护，熔融物落入反应堆腔后先与设置在堆腔面层的牺牲混凝土反应，可以降低熔融物的温度和辐射性。熔融物在反应堆腔内停留的时间由牺牲混凝土熔融时间和熔融金属塞所需时间决定，在这一段时间中，压力容器失效后滞留在容器内的堆芯熔融物可以得到有效收集^[87]。因此，在改变堆芯熔融物的成分和调整熔融物的整体扩散性能以及冷却捕集过程中，牺牲混凝土起到了至关重要的作用，它不仅可以防止在扩散过程中熔融物对堆芯捕集器结构造成瞬时的热载荷，而且可以降低熔融物的温度、减小氧化物的密度和核燃料的辐射值。可见，牺牲混凝土作为第三代核电站反应堆腔和堆芯捕集器的重要组成材料，与核电站的安全运营密切相关^[88]。

与其他牺牲材料相比，牺牲混凝土具有施工方便和经济适用等优点^[89]，将在新型核电站建设中占据重要的一席之地。随着核电事业的发展，第三代核电站已在我国开始兴建，为实现第三代核电建设国产化和提高核电的安全性，形成具有自主知识产权的牺牲混凝土制备技术及施工应用技术，具有十分重要的意义。

(3) 当前存在的问题、面临的挑战

•••

随着国际社会对核电安全要求的不断提高，堆芯熔融物冷却和包容策略对严重事故缓解起着越来越重要的作用。三代核电站对熔融物处理方式较以前有明显改进，而深入研究各种堆型熔融物的处理措施对保障核电站安全具有重要的价值。

受 1979 年和 1986 年分别发生在三里岛和切尔诺贝利核电站的严重事故的负面影响，核电工程建设曾停滞近 20 年，期间核电界集中力量对严重事故的预防和后果缓解进行了研究和攻关，进一步明确了防范与缓解严重事故、提高安全可靠性和改善人因工程等方面的要求。在水冷型核反应堆中，有可能因向核反应堆压力容器内供水的停止、连接核反应堆压力容器的配管的断裂而引起冷却水的丧失、核反应堆水位降低而堆芯露出，使冷却变得不充分。

设想这样的情况，通过水位下降的信号自动地将核反应堆紧急停止，或通过紧急用堆芯冷却装置（ECCS）的冷却材料的注入而使堆芯浸水并冷却，将堆芯熔融事故防患于未然。

虽然概率很低，但也可以想象出上述紧急用堆芯冷却装置不运行，且其他向堆芯注水的装置也不能使用的状况。在这样的情况下，有可能因核反应堆水位的下降而使堆芯露出，从而不能进行充分的冷却。核反应堆停止后还持续发生的衰变热使燃料棒温度上升，最终造成堆芯熔融。

如果在核发电厂发生这种严重的事故，熔融堆芯则有可能贯通核反应堆压力容器底部的封头而下落到核反应堆壳外的收纳容器上。作为熔融堆芯的残骸（即堆芯碎片），在存在于其内部的放射线物质衰变热的作用下，继续向核反应堆输出的 1% 左右的发热。因此，在没

有冷却机构的情况下，堆芯碎片将铺设在收纳容器的混凝土之上，如果接触面呈高温状态，则与混凝土反应，有可能产生大量二氧化碳、氢等非凝缩性气体，并且将混凝土熔融浸蚀，将大量的放射性物质释放到环境中。

产生的非凝缩性气体提高收纳容器内的压力，有可能使核反应堆外壳损坏。此外，还有可能通过混凝土的熔融浸蚀使收纳容器边界损坏或使收纳容器构造强度降低。最后，如果堆芯碎片与混凝土的反应继续，则会造成收纳容器损坏，有可能向外部环境释放收纳容器内的放射性物质。

为了抑制堆芯碎片与混凝土反应，需要将堆芯碎片冷却，将堆芯碎片底部与混凝土的接触面的温度冷却到浸蚀温度以下（一般的混凝土是 1500K 以下）或者使堆芯碎片与混凝土不直接接触。以往，通过从落下的堆芯碎片的上方注水冷却，降低堆芯碎片温度，实现了对混凝土浸蚀反应的抑制。

由于核电站的特殊性和复杂性，无法对其进行原型实验，目前均是通过模拟试验和建模为基础来研究熔融物与混凝土的相互作用，以获得相互作用过程中的热量传递、混合物温度变化、混凝土的熔蚀速率和熔蚀深度等信息。国内外目前对于堆芯捕集器中牺牲混凝土的研究正处于起步阶段，仍需进一步的探索和研究，许多的理论研究和试验论证工作还有待开展。

（4）未来发展

随着第三代核电对安全性要求的进一步提高，各国核电机型设计已将相关安全要求重新定位，其中两点如下：堆芯熔化事故概率小于或等于 1.0×10^{-5} 堆/年；大量放射性释放到环境的事故概率小于或等于 1.0×10^{-6} 堆/年。所以，怎样冷却并收集堆芯熔融物成为缓解严重事故关键课题之一，由此开启了堆芯捕集器的研究与发展新征程。

目前，提出了完善安全系统而由静态设备构成的自然循环冷却式被动安全沸腾水型核反应堆（ESBWR）。在 ESBWR 中，核反应堆外壳的下部设置有堆芯捕集器。这是用来进一步提高有关下一代 BWR 安全性的完备措施。

堆芯捕集器的未来设计应具有以下特征^[90]：

- ① 转移性：满足堆芯熔融物最终转移要求；
- ② 冗余性：滞留及冷却功能具有冗余设计；
- ③ 隔离性：间接冷却方式，避免蒸汽爆炸风险；
- ④ 紧凑性：最小化牺牲材料用量，减少最终滞留物总量；
- ⑤ 非能动性：具有充分的非能动特性。

12.2.3 / 蒸汽发生器

（1）概述

核电蒸汽发生器（简称蒸发器）是核岛内的三大设备之一，是压水堆核电厂一回路、二回路的边界，它将反应堆产生的热量传递给蒸汽发生器二次侧，产生的蒸汽经一、二级汽水分离器干燥后推动汽轮发电机发电。

蒸汽发生器材料主要包括蒸汽发生器壳体材料和传热管材料。

蒸汽发生器壳体材料除要求在室温和使用温度下具有足够的强度外，还要具有高的韧性，以防止脆性断裂，使之运行高度安全；在厚的断面上有良好的全厚度性能；在对接焊接和堆焊衬里时有良好的可焊性；在容器活性区部位具有抗中子辐照脆化的能力。在所用材料方面，除了早期使用过碳素钢和不锈钢外，大多数都采用 MnMo 钢、MnMoNi 钢或 CrNiMoV 钢。自轻水堆技术开始应用以来，西方国家和日本主要采用两种钢号，即 A508-II 和 A508-III（ASME 体系中采用）或 18MND5（RCC-M 体系中采用），并在调质状态使用，由于后者在焊接后消除应力的过程中表现出更好的防止裂纹产生的抗力，所以后来几乎全部采用了 A508-III 钢或 18MND5^[91,92]。

随着核电工业技术的不断发展，蒸汽发生器设计制造不断采用新材料和新工艺，使传热管材的综合性能不断提高，蒸发器传热管的材料基本上经历了以下三个阶段^[93-95]。Inconel 600、Inconel 690 和 Inconel 800 合金是目前反应堆蒸汽发生器已经使用的定型材料。

第一阶段是在 20 世纪 50、60 年代，核电发展的初期，主要是选用 18-8 不锈钢管。早期的压水堆核电站所用的管均采用 18-8 型铬镍不锈钢，如 304、316 不锈钢。但这种钢的耐氯离子腐蚀性能较差，出现了大量钢管破裂事故。不锈钢材料在多种环境中，尤其是在有氯化物和氧存在时极易产生应力腐蚀破裂。

第二阶段是在 20 世纪 70 年代，由于不锈钢管氯离子应力腐蚀问题的大量出现，材料工程师根据石化工程方面的经验，选用耐应力腐蚀的 Inconel600 镍基合金管。Inconel600 镍基合金管在 1970—1972 年间又发生了苛性碱应力腐蚀破损事故。西欧一些国家及地区从 1972 年开始采用第三代耐应力腐蚀合金（Incoloy800 合金）代替 Inconel600。Incoloy800 合金的 Ni 含量大大低于 Inconel600 镍基合金，节约了大量的镍。在高温高压水中，由于这种合金的镍含量处于一个既不产生穿晶又不产生沿晶应力腐蚀破裂的范围，而且 Incoloy800 合金的价格大大低于 Inconel600 镍基合金，所以 Incoloy800 合金成为继 18-8 型不锈钢和 Inconel600 镍基合金后，可用于压水堆蒸汽发生器的第三代合金。

第三阶段是 20 世纪 80 年代以后，为了解决 Inconel600 合金管在蒸汽发生器介质中的应力腐蚀问题，法、美、日等国联合开发了耐应力腐蚀性能优良的第四代 Inconel690 镍基合金。Inconel690 是一种具有优异的抗多种水性介质和高温气氛侵蚀能力的镍基合金。该合金在纯水和低浓度苛性碱溶液中具有较好的抗应力腐蚀开裂性能，且还具有高的强度，良好的冶金稳定性和优良的加工特性。由于在抗氧化和抗应力腐蚀性能方面的优异表现，从 20 世纪 90 年代初开始，Inconel690 逐渐成为各国核电压水堆传热管的主要选材。同时，Inconel 800 合金在成分和热处理制度上对 Inconel 600 合金进行了改进，即提高了 Cr 含量，降低了 Ni 含量，使材料表面形成稳定的 Cr₂O₃ 氧化膜；又降低 C 含量到 0.03%，添加 Ti，规定 Ti/C ≥ 12，以形成稳定的 TiC，增强敏化抗力，从而提高了抗应力腐蚀开裂的性能。Inconel 800 合金已成为高温气冷堆蒸汽发生器传热管的选材之一。

国内发展而言，2018 年 4 月 23 日，由中国一重首次承制的红沿河 5 号机组百万千瓦级核电蒸汽发生器，在一重下辖的核电石化公司制造完成并列装发运。这不仅开创了中国一

重自主研发核电蒸汽发生器的先河，也对中国实现核电重大技术装备国产化具有重要意义。2010年8月28日，由中国自主设计制造的二代加核电百万千瓦级蒸汽发生器在上海临港核电基地竣工。这是上海电气为辽宁红沿河核电一期工程承制的核电站顶级核岛设备，也是上海电气在临港核电产业基地完整制造的第一台百万千瓦级蒸汽发生器。

(2) 本领域对新材料的战略需求

蒸汽发生器与反应堆压力容器相连，不仅直接影响电站的功率与效率，而且在进行热量交换时，还起着阻隔放射性载热剂的作用，对核电站安全至关重要。因此，蒸汽发生器的一级安全等级、I类抗震类别、一级规范级别和Q1级的质量要求，以及材料和制造的高技术含量均位于当代制造业前列。蒸汽发生器传热管要求新材料具备越来越高服役温度，越来越强的耐腐蚀性能、抗应力腐蚀开裂性能。我国在蒸汽发生器相关材料领域还有待开展深入的基础研究工作，特别是在合金元素作用机理、元素含量精确控制、冶炼工艺和材料制造工艺的稳定性等方面有待提高^[96]。近年来，蒸汽发生器传热管多采用抗晶间腐蚀和应力腐蚀性能更好的Inconel690(0Cr30Ni60Fe)镍基合金替代Inconel600(0Cr15Ni75Fe)镍基合金或Inconel800(00Cr22Ni33Fe)铁镍基耐腐蚀合金。蒸汽发生器的筒体管板一般采用与反应堆压力容器相同或相近的材料，如A508-III(Gr.3C1.1)、18MND5，其他一些部件如分离器则采用碳(锰)钢或低合金钢等。此外，在堆内构件、驱动机构等重要部件上，广泛采用304L、316L型奥氏体不锈钢等作为结构材料^[96]。

钠冷快堆蒸汽发生器是Na水热交换器，其传热管材料多为铬钼铁素体钢2.25Cr-1Mo或高温强度和抗高温氧化性能更突出的9Cr-1Mo钢，或在2.25Cr-1Mo中加Nb形成稳定2.25Cr-1Mo-Nb低合金钢，形成NbC抑制C的扩散迁移，使钢材具有较好的抗高温氧化和耐高温腐蚀性能。

高温气冷堆为了更高的发电效率，以及实现高效制氢，未来会将一回路氦冷却剂出口温度从750℃提高至900℃以上，从而对蒸汽发生器壳体及传热管材料的高温性能都提出了更高的要求。

(3) 当前存在的问题、面临的挑战

核电厂反应堆蒸汽发生器材料面临最显著的问题是传热管的应力腐蚀开裂等腐蚀问题。其中Inconel 600合金应力腐蚀开裂现象较为严重，采用热处理、改善传热管应力状态、提高合金的Cr含量等措施仍无法避免Inconel 600合金的应力腐蚀开裂问题，现已多用Inconel 800合金或Inconel 690合金替代。Inconel 800合金通过增Cr、降C、添Ti等措施提高了抗应力腐蚀开裂的能力，但对氯化物诱发应力腐蚀开裂不能完全克服。Inconel 690合金进一步提高了耐腐蚀性能，在纯水中没有应力腐蚀开裂倾向，但在蒸汽发生器异常情况下，如浓碱溶液中对应力腐蚀开裂的敏感性仍无法克服。

高温气冷堆等先进反应堆蒸汽发生器材料则还面临高温性能的问题。尤其当达到900℃以上的服役温度，蒸汽发生器结构材料的性能数据较为欠缺，蠕变和疲劳性能尚待提升。

(4) 未来发展

对于核电厂反应堆蒸汽发生器材料，未来将进一步改善其抗应力腐蚀开裂等耐腐蚀性能。

对于一些一回路冷却剂出口温度更高的先进反应堆，未来需验证和完善适用于高温环境，具备优良高温强度和蠕变性能的传热管材料。

对于钠冷、铅冷快堆， CO_2 冷却反应堆，未来需验证和确定一次侧与钠、铅、 CO_2 等冷却剂兼容，二次侧在水中具备优良抗应力腐蚀开裂等耐腐蚀性能的蒸汽发生器材料。

12.2.4 / 安全壳

(1) 概述

安全壳是继核燃料包壳、一回路压力边界之后防止放射性物质外泄的第三道屏障，也是最后一道屏障，有着十分重要的作用。安全壳用来控制和限制放射性物质从反应堆扩散出去，以保护公众免遭放射性物质的伤害。万一发生罕见的反应堆一回路水外泄的失水事故时，安全壳是防止裂变产物释放到周围的最后一道屏障。安全壳一般是内衬钢板的预应力混凝土厚壁容器，顶部呈半球形，内径约 40m，壁厚约 1m，高约 60~70m。安全壳强度按照抗震 I 类设计^[97]。

世界上第一个安全壳是 1953 年在美国西米尔顿的诺尔斯核动力试验室建成的。供工程使用的安全壳则是在 20 世纪 50 年代后期，世界上第一批核电站投入商业运行而出现的球形及圆筒形钢安全壳，尺寸较小。从 20 世纪 60 年代开始，随着反应堆功率的提高，出现了内径超过 30m 的圆筒形安全壳。20 世纪 70 年代，为了适应大功率核电站的工艺布置，出现了球径达 60m 左右的钢球壳。为了尽量避免焊后热处理，壁厚通常控制在 38mm 以内。钢安全壳一般用作主安全壳，建造在与其相脱离的混凝土次级安全壳里面。沸水堆的钢安全壳尺寸比压水堆的稍小，多为球壳加上一小段筒壳，呈“烧瓶”形。由于工艺比较成熟，目前钢安全壳仍被大量采用^[98]。

为了降低钢安全壳的造价，20 世纪 60 年代初美国首先采用了带有薄的碳钢衬里的钢筋混凝土单层安全壳，它由内径超过 30m 的圆筒壳和半球顶组成。沸水堆核电站的安全壳尺寸较小，形状较为复杂，筒壁多为锥壳与圆筒壳的组合结构。为了能承受事故压力和温度作用，钢筋混凝土安全壳必须采用排列很密的粗钢筋。这种壳的表面虽易开裂，但由于它比较经济，目前仍被采用。

20 世纪 60 年代中期预应力混凝土安全壳首先应用于法国的 EL4 核电站，其后在美国、加拿大等国迅速推广并有所发展，大致经历了三个阶段。第一代预应力混凝土安全壳的特点是采用扁穹顶，筒壁环向预应力钢束由六个扶壁锚固，所用钢束的极限承载力较低，筒壁施加的预压应力较高。第二代也采用扁穹顶，但筒壁扶壁减少到三个，单根钢束的承载力增大一倍，由于充分发挥普通钢筋的作用，筒壁的预压应力有所降低。第三代则把扁穹顶改为半球顶，省去了传统的环梁，改善了安全壳结构的受力性能，穹顶的预应力钢束也与筒壁的竖向钢束合二为一，因而比第二代更经济合理。目前有的国家还在探索比第三代预应力安全壳更为先进的结构形式，把环向锚固扶壁减少到两个，以改善受力性能和减少总钢束数。有的国家在加紧研究无衬里的预应力双层安全壳等新形式，以求得更加经济合理的效果。

二代和二代改进型核电技术采用单层安全壳设计，为内侧覆有钢板的预应力混凝土结构，如法国的 M310 和中国的 CPR1000。20 世纪 80 年代末，为了满足《美国用户要求文件（URD）》和《欧洲用户要求文件（EUR）》而开发的三代核电技术均采用双层安全壳设计：一种是双层安全壳设计为内层的覆有钢板的预应力混凝土结构 + 外层的钢筋混凝土结构，如法国的 EPR、俄罗斯的 VVER 和中国的“华龙 1 号”；另一种是双层安全壳设计为内层的钢制安全壳 + 外层的钢筋混凝土结构，如美国的 AP1000。在这两种不同的双层安全壳设计中，外层的钢筋混凝土结构作用基本相同，主要用来防止外来飞射物等对内部物项的损害；在内层安全壳设计中，AP1000 之所以与其他三代核电技术不同，采用钢制安全壳，主要是为了实现其特有的非能动冷却功能，将钢制安全壳作为最终热阱的换热面^[99,100]。

如前所述，20 世纪 50 年代初期的安全壳为球形钢结构，将厚度达 50mm 的钢板压成弧形，分块拼装和焊接，这种钢制安全壳自成一体，既能承担结构强度要求又能承担密封性能要求，缺陷是受焊接工艺影响，很难实现所有焊缝均能达到良好的焊接质量，同时也很难解决焊接过程中的钢板变形问题。

针对钢安全壳的不利施工影响因素，20 世纪 60 年代核电站安全壳开始发展带钢衬里的钢筋混凝土结构，结构形式从球形演变为筒身为圆柱体、穹顶为半球形结构。这种结构便于浇筑并且实现了强度和密封性功能相分离，即钢筋混凝土结构承担强度作用，内部钢衬里承担密封性要求。这样承受压力的钢筋混凝土壳可以根据要求设计成不同厚度，而提供密封功能的钢内衬就可以用很薄的钢板，焊接时就比较容易达到气密性要求。

随着气密性成为可靠性要求，现在大部分新建的核电站如 CPR1000 等，在 20 世纪 60 年代壳体结构设计的基础上将原有钢筋混凝土结构变革为预应力钢筋混凝土结构，内部钢衬里密封性结构则保持不变；另外随着最新核电技术的应用，有些堆型如 EPR 采用双层安全壳结构，内层安全壳墙体是预应力钢筋混凝土结构，钢衬里厚度为 6mm，从上到下覆盖整个内层，为安全壳提供了密封边界；外层安全壳是钢筋混凝土结构，它能防止飞机撞击、爆炸等外部事件造成的破坏，内、外壳之间是宽度为 1.8m 的环形空间，环形空间维持负压以收集内壳的泄漏，并将其过滤后排放至大气中^[101]。

（2）本领域对新材料的战略需求

•••

安全壳是为防止在核反应堆失水事故和严重事故下放射性物质向环境释放，保护冷却剂压力边界和安全系统抗御外部事件而设置的构筑物；其是包容反应堆及其一回路系统的最后屏障。安全壳材料现多采用带密封钢衬里的预应力混凝土，衬里可采用 A516-60 或 A516-70 钢；当厚度超过 38mm 时，需改用低温韧性和焊接性能更好的改进型碳锰钢 A537 型。

根据设计要求，安全壳钢衬里需在事故工况下保持密封性、完整性，从而保证放射性物质在事故工况下不释放至大气中。钢衬里由底板、截锥体、圆柱形筒壁和穹顶组成，工程建设期间钢衬里必须经过目视、渗透、射线、超声检测等多道严格的检验，以保证安全壳钢衬里的密封性。密封性作为核电站安全壳结构钢衬里的首要职能，其退出结构强度的角色为核

电站建造带来了便利，提升了施工工艺的可靠性，同时也保障了钢衬里维护结构的气密性能。钢衬里的敷设也是基于结构性功能需求，对于混凝土的时效变形影响较大，降低了混凝土开裂的风险，为核电站安全壳的密封性能增强了保障。因此，在设计建造过程中不仅要考虑钢内衬的密封性能，还要考虑其结构性能。

除了钢内衬之外，安全壳的混凝土也是不可忽视的一部分。核电站建筑物一般需要承受海风的侵蚀，海风中存在的大量氯离子在混凝土中的渗透，会加速混凝土结构中钢筋的锈蚀，对建筑物的应力系统产生影响。除了外部海洋环境外，环境温度的变化对混凝土结构表面造成的冻融剥蚀现象，更是导致了氯离子渗透深度的进一步提高。在以上诸多因素的影响下，安全壳钢筋混凝土结构将会逐渐被腐蚀，致使其预应力系统衰退，结构承载力下降，使用寿命缩短^[102]。因此，保障核电安全壳的耐久性关系到国民经济、社会安定的重大研究课题，也是工程界关注的重大技术问题之一。

(3) 当前存在的问题、面临的挑战

国内外经验反馈表明，腐蚀是钢衬里老化的主要形式，随着服役时间增加，安全壳钢衬里因腐蚀导致老化降质的趋势逐渐增加，影响了安全壳结构的整体密封性，一旦腐蚀穿孔，不仅维修难度和风险较大，还需要进行整体或局部密封性试验以验证维修效果，影响大修工期，造成较大经济损失^[103]。因此，安全壳钢衬里的抗腐蚀性能尤为重要。此外，在核电厂苛刻复杂的服役环境下，安全壳钢衬里用钢板对钢质纯净度、内部质量、低温和高温下的强韧性、抗变形能力等指标具有严格的要求^[104]。

法国的 M310 机组根据《法国压水堆核岛土建设计和建造规范》(RCG-G) 中规定选用的是法国标准 NFA36-250 中 A42AP 以及 A42AP-Z35 钢板^[105]。目前国内尚未找到完全合适的钢衬里替代品，急需攻关解决。

钢衬里除密封性能作用之外，还影响着壳体混凝土结构的变形，这对于壳体结构的选型和优化设计关系重大。混凝土结构的变形有瞬时变形和时效变形，当前安全壳的设计是基于弹性设计，即不考虑混凝土的塑性变形，作为安全壳组成部分的钢衬里尽管存在一定的刚度，但相对混凝土的刚度微不足道。因此，从设计本身没有涉及钢衬里对强度的贡献作用，即不考虑钢衬里对弹性变形的影响。但是，钢衬里对混凝土的时效变形有不同程度的影响，这需要引起设计者的注意^[106]。

(4) 未来发展

现代安全壳钢衬里设计主要针对密封性要求，除了密封性能之外，还需要考虑混凝土与钢内衬的结构性能。钢衬里是安全壳的重要组成部分，对安全壳实现防泄漏功能起着至关重要的作用，针对钢内衬的老化管理的目的是，在整个运行周期内，通过科学的老化管理，确保钢内衬的功能不退化，从而保障安全壳的完整性^[101]，还需要对混凝土进行调控以保障核电安全壳的耐久性。

有资料显示^[99]，SA-738Gr.B 材料是强度高、韧性及焊接性好的结构钢材料，适用于各种工况下承受多种载荷组合以及制造要求高的条件。我国目前正处在核电大发展的时期，开发大型先进核电厂和提高设备国产化程度已成为发展的趋势，SA-738Gr.B 安全壳容器钢板材料

的采用对我国大型核电厂钢安全壳设计具有良好的借鉴作用。

12.3 燃料操作系统

(1) 概述

核电站燃料操作系统包含新燃料组件进入反应堆厂房至乏燃料组件运出反应堆厂房的过程中，所进行的燃料组件（元件）的输运、储存、倒换、检验、修理等一系列操作所需要的装备的组合，主要设备有装卸料机、运输通道和管道、储存容器、储存格架、抓取工具等。对于不同的反应堆堆型，有不同的燃料操作系统。例如压水堆采用定期停堆装换燃料方式，乏燃料组件的放射性很强，其操作、运输、储存和检验等过程需在水下进行；球床式高温气冷堆则是采用不停堆换料方式，燃料形式为球形燃料元件，燃料的装卸系统与反应堆一回路压力边界相连，乏燃料元件的储存方式为干式储存，因此燃料操作系统需要考虑高温、高压和高放射性的影响。

虽然不同核电站的燃料操作系统有所不同，但燃料操作系统涉及的材料一般包含以下几类：结构材料，用于装卸料机、燃料储存容器、燃料运输管道、燃料储存格架等设备和容器的结构材料等； γ 射线屏蔽材料，对已辐照燃料进行装卸、输运、修理和储存等操作时，为了操作的可接近性对 γ 射线进行屏蔽；中子吸收和中子屏蔽材料，一方面满足新燃料和已辐照燃料的临界安全，另一方面满足燃料操作过程中的中子屏蔽；减震材料，为了保持新燃料和已辐照燃料运输过程中的完整性，需要对储存容器进行减震缓冲。

不锈钢、铁素体钢、特种钢、球墨铸铁等材料多被用作装卸料设备、乏燃料后处理设备、燃料运输管道和燃料储存容器壳体的结构材料。由于结构材料必须具有合适的强度、延展性和韧性，另考虑制造的难易、抗腐蚀能力以及去污能力，不锈钢是目前应用最为广泛的结构材料。中美两国都选用不锈钢进行容器内外壳的设计，日本和法国在 20 世纪 70 年代就选择采用耐硝酸 NAG 不锈钢作为核电站乏燃料后处理设备的材料^[107]。德国则选用球墨铸铁作为乏燃料储存容器的材料^[108]。锆是目前乏燃料后处理设备中常用的耐腐蚀合金。法国在乏燃料后处理领域应用纯锆及其合金方面处于世界领先地位，如 1971 年第一次制作的热对流型蒸发器，直至 1983 年也没有发生失效。在 UP2 和 UP3 工厂中已经使用了超过 100t 的锆和 5000m 的锆管^[109]。

混凝土、钢和铅等传统材料被用作燃料操作系统的 γ 射线屏蔽材料。其中，铅的储量丰富，价格低廉，而且对 γ 射线质量减弱系数高，是目前核电站应用最广泛的 γ 射线屏蔽材料^[110]。

水泥基中子屏蔽材料、 B_4C/Al 和硼钢材料多被用作中子屏蔽材料。水泥基的中子屏蔽材料主要是在水泥混凝土中掺入中子慢化和吸收的功能型材料。 B_4C/Al 主要是用作核电站乏燃料水池和运输容器的材料，以吸收乏燃料中子^[111]。硼钢则具有较好的吸收热中子性能、屏蔽 γ 射线性能以及优良的力学性能，符合功能 / 结构一体化中子吸收材料的性能要求，已经成为乏燃料储存常用的中子吸收材料。含硼不锈钢具有良好的耐辐照性能、环境和结构稳定性，是较早应用于乏燃料储存格架的材料之一^[112]。

随着燃料的加深、干式容器的推广，现多采用硼化树脂、硼化聚乙烯等固体材料作为中子屏蔽材料。例如钨/环氧树脂复合材料，既能起到中子屏蔽的作用，同时由于密度高，也可以进行 γ 射线的屏蔽，而且钨粉达到一定比例时，还具有较高的强度^[113]；四官能度环氧树脂 AG-80 为基体，二氨基二环己基甲烷为固化剂，玻璃纤维为纤维增强材料，是一种耐温型屏蔽复合材料^[114]；碳化硼复合材料是一种体系黏度低、氢元素含量高的中子屏蔽材料^[62]。同样地，铅硼聚乙烯对中子和 γ 射线均具有较好的屏蔽效果，因此在核反应堆辐射防护中使用广泛^[115]。

减震器作为核乏燃料运输容器的关键部件，起着吸收能量、控制过载和保证结构完整性的重要作用，主要由内部的填充材料与外部的钢板组成，内部填充材料是其关键，主要功能为缓冲吸能，原理是在受到外部载荷冲击作用时，填充材料发生变形吸收能量。木材、聚氨酯泡沫、蜂窝铝材是乏燃料运输容器减震器的填充材料^[116]。

(2) 本领域对新材料的战略需求

•••

随着核燃料燃料的不断加深，核燃料的成分越发复杂，使得对核燃料装卸料设备和运输容器设备材料综合性能的要求更为苛刻。因此我们需要研发新材料以满足燃料操作系统的使用需求。

根据核燃料的特性以及核安全的要求，核燃料操作设备和运输容器必须具备特定的性能要求，以乏燃料储存为例，需具备以下技术特性^[117]。

① 密封包容性能。不管在运输还是存储的条件下，都必须保证乏燃料运输容器的结构具有密封性，不能使其内部的放射性物质外泄，而且还要保证在长期使用条件以及受热或腐蚀条件下的密封性。

② 屏蔽性能。必须具有 γ 射线屏蔽材料和中子吸收材料，保证容器在满载乏燃料的情况下，表面剂量率不超过 2mSv/h，距表面 2m 处的剂量率不超过 0.1mSv/h。

③ 临界安全。临界安全通常由吊篮栅孔的几何排列和使用可以吸收中子的吊篮材料来保证，由此吊篮的设计必须具有相应的强度，能够支撑乏燃料组件的质量，同时还要求吊篮必须使用含硼的金属材料。要求保证其增值系数 k_{eff} 不大于 0.95。

④ 余热导出。通常设置散热片像鳍一样布满容器外表面或设置在内外壁之间，国际上曾使用过的散热片材料有铜、含硼铝合金等。要求保证在正常运输情况下，容器的外表面温度不高于 85℃，铅层温度不高于 200℃，在事故条件下，铅层的温度也不高于 200℃。

⑤ 结构具有足够的强度。要求容器能够经受 9m 的跌落试验，而不破坏容器、吊篮、密封包容系统的完整性。

基于以上要求，燃料操作系统的新材料要具有更强的 γ 射线屏蔽能力；具有更高的热中子吸收能力；具备更高的强度和良好的塑韧性等力学性能，符合功能/结果一体化设计要求；在工业生产中，原料易于获得，制造工艺简单。运输管道减震器的填充材料应该向着力学性能更优、受环境影响更小的方向发展。

总结燃料操作系统对新材料的需求如下：

① 需要既有不锈钢耐腐蚀的优点，又解决传统不锈钢材料存在的晶间腐蚀开裂、腐蚀速率相对较快缺陷的新材料作为乏燃料后处理系统的结构材料。

② 需要耐空气氧化性能好、耐高温、耐腐蚀、熔点低、高硬度、易加工、在生产和使用过程中无毒的新材料作为 γ 射线屏蔽材料^[118]。

③ 需要抗压强度高、柔韧性好、耐腐蚀、抗辐照能力好、使用成本低、施工性能好、加工简单、使用年限到期后不会形成具有高度放射性的核废料、不污染环境的新材料作为中子屏蔽材料。

④ 需要能够克服传统材料——木材的纹理性与易腐性，材料性能受环境影响小，有更好阻燃性，在多个方向有相同的力学性能，可以满足多个方向的吸能要求的新材料作为乏燃料运输容器减震器的材料^[116]。

(3) 当前存在的问题、面临的挑战

•••

基于燃料操作系统材料在结构材料、 γ 射线屏蔽材料、中子屏蔽和中子吸收材料以及减震材料等方面的需求，国际学术界开展了非常多的、有针对性的研究，也不断开发出具有特殊性能要求的材料。

在结构材料方面，日本乏燃料后处理设备用材料开始使用 Ti-Ta 系的 Ti-5Ta 合金^[119]；印度则在日本 Ti-Ta 系合金的基础上研发了 Ti-5Ta-1.8Nb 合金^[120]；国内后处理设备用材料也由不锈钢转向了目前研发的 Ti-Ta 系合金 Ti35 钛合金。比较 304 不锈钢、纯钛两种传统材料和 Ti-5Ta、Ti-5Ta-1.8Nb、Ti35 合金这三种新材料，三种新材料及它们的焊接试样相比 304 不锈钢和纯钛均表现出了优异的耐腐蚀性能^[107]。

铅有机复合材料和美国研制的 DUCORETE 混凝土相比传统材料铅板和普通混凝土是更好的 γ 射线屏蔽材料。铅硼聚乙烯是铅有机复合材料的代表材料，它是铅粉、 B_4C 和聚乙烯混合而成的，其最大优点是含氢量高，能较好地使快中子慢化成更容易被硼吸收的热中子，提高了屏蔽材料对中子的吸收率^[43]；DUCORETE 混凝土与普通混凝土相比具有更大的密度和更好的屏蔽效果，使用在同型号的混凝土容器上，具有增加容积、减轻质量、提高屏蔽性能的作用^[117]。

中子屏蔽材料发展至今，主要是以硼基或铅基聚乙烯屏蔽材料为主体。这类材料对快中子的减速和慢中子的捕获具有良好的效果。许多国家和机构也在研究开发新型的柔性中子屏蔽材料。新型的柔性中子屏蔽材料主要是用新型高性能的有机聚合物取代传统的有机聚合物作为基体。

印度 Carborundum 公司^[121] 研制了一种中子吸收材料，它是由 B_4C 弥散在酚醛树脂中构成的聚合物材料。国内研究人员^[122] 研制了一种新型玻璃纤维/ B_4C /环氧树脂复合材料， B_4C 质量分数为 10% 的玻璃纤维/ B_4C /环氧树脂复合材料，相对于含硼聚乙烯有更好的屏蔽效果。国内研究者^[123] 用物理交联法制备了含有金属离子的 PVA/PEO 水凝胶新型中子屏蔽材料，这种材料屏蔽效果比较理想，耗费材料少。国外研究人员^[124] 以不同含量的 B_4C 为填料与热塑性的天然橡胶 (TPNR) 共混制备了中子屏蔽材料，并对复合材料的衰减性能进行了研究。针对硼基或 Pb 基聚乙烯屏蔽材料的缺点，国外研究者^[125] 将硼硅酸铋玻璃化制备了中子屏蔽材料，进一步对该材料分析发现其有很高的透明度并且具有良好的中子屏蔽性能。美国、英国于 21 世纪开发出了硼基硅胶板屏蔽材料。这类材料由于硅氧键的存在，可有效地

吸收二次 γ 射线,大大提高材料使用寿命,同时由于硅氧键键角大,进一步提高了材料的柔性^[111]。

在运输管道减震器材料方面:美国 Holtec 公司已经在研发双向瓦楞蜂窝铝材料,山东科技大学也对该材料展开了研究^[126]。这是一种双向吸能材料,其可承受双向冲击载荷;泡沫铝也是近几年研究热门,因其具有比强度高、吸能效率好等优点,其应用范围也在逐步扩大。这两种材料均有较好的吸能特性。

尽管各类材料的研究取得了很大进展,但是目前在燃料操作系统新材料的领域仍然面临很大的挑战。

首先是燃料操作系统用结构材料数据库方面,与核反应堆一回路的材料类似,燃料操作系统的结构材料常处于高温、腐蚀介质和辐照等工况下,其性能数据获取十分不易。建立专业的核材料数据库对性能数据进行搜集整理,对于有效利用有限的数据库具有非常重要的意义^[127]。但目前国内后处理设备用材料腐蚀研究数据较少,对于在辐照条件下材料腐蚀行为研究尚属空白,材料耐腐蚀性机理分析不够完善。

其次是在辐射屏蔽新材料方面,目前的中子屏蔽材料主要是以硼基为主体,硼铝合金是一个很大的研究方向。但 B_4C 的加入易于在铝基复合材料的内部生成 Al_3BC 、 AlB_2 、 AlB_2C_2 、 Al_4C_3 等化合物,使得材料的脆性增加。此外,由于 B_4C 颗粒与铝基体两相之间的表面张力较大,使得两相容易在浇铸过程中分离,导致颗粒团聚发生。而且 B_4C 颗粒与铝基体两相界面的反应机理目前还没有研究清楚,需要继续探索^[112]。目前研制出的硼有机复合材料也存在聚合物固有的易老化特性。在高温酸性介质和辐照环境下,材料极易发生老化,尺寸稳定性和力学性能较差,容易产生辐照损伤,服役寿命较短^[128]。

针对上述硼及化合物屏蔽中子出现的问题,采用热中子吸收截面较大的稀土元素替代硼,是目前研究的热点^[118]。但是,稀土吸收热中子时次生 γ 辐射较大,必须配合 γ 射线屏蔽材料使用。目前研究比较热门的中子屏蔽稀土元素例如钐、镝、钆都有严重的缺陷:钐中子具有极高的中子吸收能力,然而,其燃烧快且本身具有放射性;镝有剧毒;钆的成本较高,且在吸收中子后会放出高能 γ 射线。

此外,虽然对 γ 射线和中子都有特别高效的屏蔽材料,但还没有材料能够同时实现对这两种辐射高效屏蔽。屏蔽性能与结构力学性能、耐热性能以及环保性能始终难以同时兼顾。

最后,目前研制的乏燃料运输管道减震器的成本太高,导致国内外使用的核乏燃料运输容器减震器填充材料仍然为木材,其他材料涉及很少。

(4) 未来发展

随着中国核电事业的发展以及军事、航空的需要,未来核反应堆燃料操作系统所使用的材料不仅应该有良好的综合屏蔽功能,还应有兼作结构材料的潜能。燃料操作系统所需的新材料将进一步向综合屏蔽性能和结构力学性能一体化发展。因此,新材料未来发展应该具有以下趋势:

- ① 密度尽可能大,总质量和体积尽量小;
- ② 满足 γ 射线、中子屏蔽功能要求;

- ③ 满足一定的结构性能以及热稳定性能、耐辐照性能和耐腐蚀性能要求；
- ④ 在 γ 射线、中子屏蔽时产生的次生辐射可以忽略不计；
- ⑤ 价格和生产成本尽可能低；
- ⑥ 既具有中子屏蔽性能，又具有随意裁剪、任意粘贴与包装性能。

要满足以上发展需要，可以从材料成分调控和材料制备技术两个方面进行。材料成分方面，目前对添加稀土改善硼化物分布和固溶度方面的研究是热点，另外通过研究添加 Ti、W、Mg、Al、Cr、Zr、Mo 等合金元素改变结晶过程，细化硼化物品粒、润湿基体也取得很大成功。在材料制备技术方面，中外开展的屏蔽材料淬回火、固溶、扩散退火等热处理过程研究很多，另外通过粉末冶金（烧结）提高材料致密性，3D 打印避免焊接影响，包覆浇铸和复合热轧工艺制备高硼不锈钢有效减少边裂纹、提升伸长率等都具研究前景。而屏蔽材料成分 / 制备优化设计、功能 / 结构一体化分别从理论设计和制备角度有望满足上述发展趋势。

此外，未来我国乏燃料运输容器在设计及运输安全研究中，必须重视高燃料组件的包壳脆转变特性可能造成的不利影响。建议推动乏燃料运输安全的分析基准点前移至乏燃料结构完整性分析，以确保对基准事故下基于组件结构保持得出的屏蔽、临界和热工分析结论是保守的^[129]。

12.4 / 蒸汽电力转换系统

12.4.1 / 主蒸汽系统

(1) 概述

在核电厂中，二回路系统是其极为重要的组成部分，该回路系统主要通过热力循环将一回路系统的热能转换为电能和机械能，并且也为核动力装置的正常运行提供电能、热能和淡水^[130,131]。其中，主蒸汽系统主要由管道、阀门和相关仪表组成，采用母管制形式，管路系统中主要包括主蒸汽母管、给水母管、凝水母管和乏汽母管。主蒸汽系统管道和部件主要布置于汽机房内，包括从蒸汽发生器出口到主汽阀之间的主蒸汽管道，以及与汽轮机上的主蒸汽管道相连的设备和管道。主蒸汽系统的主要功能是将蒸汽发生器产生的蒸汽汇集于主蒸汽母管并经管路分流输送给主汽轮机组、汽轮发电机组、汽轮给水泵组、汽轮凝水泵组、汽轮循环水泵组、汽轮滑油泵组和低压蒸汽发生装置等主要耗汽设备，还有一部分用于乏汽母管补汽^[132,133]。

核电厂中，主蒸汽系统用管道在厂房布置时，需要利用弯头连接。弯头在服役过程中不仅承受高温高压，而且还遭受一定程度的流质腐蚀，因此在主蒸汽系统中起关键的连接作用，具有较高的质量要求，弯头连接的效果对于主蒸汽系统运转性能的好坏起着至关重要的作用^[134-136]。

压水堆核电站主蒸汽系统弯头主要起管道连接的作用，属于主蒸汽管道系统的核心重要部件。目前常用材料为碳钢或低合金钢，其服役温度约为 300℃，中间流体介质为饱和蒸汽。主蒸汽弯头可采用锻制（锻件加工）、压制（钢管在外模具内挤压变形）和推制（钢管在内

芯棒中推制变形)三种方法进行制造。

在我国自主设计的“华龙一号”堆型核电站中,主蒸汽系统弯头使用等效于 P280GH 碳钢材料,使用制造方法是推制。在其他堆型核电站中, M310 堆型采用的是 M1125 中的 P280GH 材料,制造为锻制或推制; AP1000 堆型采用 SA-234 Gr.WP11 制造,制造方法为推制^[137]。

主蒸汽系统是二回路最基本的系统,应考虑生命力、可靠性等指标。由于蒸汽母管尺寸较大,为了减少管路损失,提高主蒸汽系统的安全性,管路上设置有支持管路并防止变形、摇摆、振动的支架,并考虑必要的热膨胀补偿设计。蒸汽管道需要包覆足够厚度的隔热层,选用坚固而热导率低、容重小的隔热材料,隔热层表面温度不超过 60℃^[138],因此对于适用于核电厂的隔热材料也有特殊需求。目前主蒸汽系统中选用的材料还有 SA-335 P11 低合金钢、SA-335 P22 低合金钢(抽汽管道在止回阀出口采用)等。

(2) 本领域对新材料的战略需求

蒸汽系统的材料设计需要考虑侵蚀、腐蚀损坏等因素,管道材料需选用抗侵蚀、耐腐蚀的材料。为保证介质铜离子含量符合蒸汽发生器内部件的要求,主蒸汽系统部件中应尽量避免采用铜合金。虽然奥氏体不锈钢具有较高的热强性、良好的抗氧化、抗腐蚀能力,而且也具有较好的焊接性能和冷、热加工性能,但因其对应力腐蚀比较敏感,所以堆内承受载荷的构件和主蒸汽系统现在一般避免采用 18-8 不锈钢,而选用各种性能均优于不锈钢、且对应力腐蚀不敏感的镍基合金或铁镍基高温合金,如 Inconel 600 (NC15Fe)、Inconel 690 (NC30Fe) 和改良 Incoloy 800。

Inconel 690 (NC30Fe/OCr30Ni60Fe10) 是在 Inconel 600 合金基础上改良而成的。主要针对 Inconel 600 合金中的镍含量太高(达 75%)导致的碳在固溶体的溶解度减小,从而对晶间应力腐蚀比较敏感的不足,而将其镍和碳含量分别降低到 60% 和 0.04%,并将铬升高到 30%,以达到改正上述缺点的目的。这种成分配比,大大提高了其耐晶间腐蚀、氯化物应力腐蚀和苛性碱应力腐蚀的能力。改良的 Incoloy 800 (OCr20Ni32FeAlTi) 是作为高温应用的耐腐蚀合金发展而成的,但与前两种镍基合金有所不同,其含 Cr 量为 23%,高于 Inconel 600 合金的 14%~17%,抗氧化能力更强, Ni 为 30% 左右,正好处于对晶间和穿晶应力腐蚀并不敏感的区域,成分配比较为理想。由于 Incoloy 800 中镍、碳分别为 30% 和 0.05%,低于 Inconel 600 合金的 75% 和 0.08%。因此,前者的抗晶间腐蚀和抗晶间应力腐蚀能力优于后者,但镍含量降低会导致抗苛性钠应力腐蚀的能力下降,因而 Incoloy 800 合金抗苛性钠应力腐蚀的能力弱于 Inconel 600 和 Inconel 690 合金。

因此,目前蒸汽系统对于具有更加稳定和更加优异耐腐蚀性能的镍基合金或铁镍基高温合金有较大需求。

(3) 当前存在的问题、面临的挑战

母管制二回路主辅蒸汽系统分支多、流量大,在该系统设计和运行过程可能会存在以下问题^[139]: 当二回路主辅蒸汽系统运行过程中,不同用电与用水需求条件下会出现主、辅机负荷变化的情况,如何保证主蒸汽母管压力稳定,以及不同负荷下各用汽管路流量分配合理,进而保证各用汽设备的稳定工作,是必须解决的关键问题。同时,蒸汽汇集至母管的方式

(支路的位置)、蒸汽从母管分配至各支路的方式(支路的位置和间距)都会造成主辅蒸汽系统的流量分配特性的改变,那么就有可能出现流量分配不均匀、某些用汽设备流量不足、母管压力不稳等情况,将直接影响设备的正常工作。

对于主蒸汽用弯头, RCC-M M1125 标准中规定^[140]主蒸汽系统用 P280GH 弯头通常应该采用锻造成形,但是该种工艺存在材料的严重浪费并导致价格高且制造周期长。

(4) 未来发展

自 20 世纪 90 年代以来,由于 Inconel 690 合金是继 Inconel 600 和 Inconel 800 合金之后发展起来的合金,成分配比更为合理,因此美国、法国已将其作为新建设的现代压水堆核电站蒸汽发生器 U 形管束材料的优先选择,并且在其他部件中也有使用。

采用热推制成形工艺制造弯头,由于可通过轧制或锻造钢管进行直接热推成形,因此几乎不存在材料的浪费且制造周期较短。根据目前国内核电厂中其他系统(如主给水系统)弯头的制造及应用经验,结合国产化进程,研究论证后认为主蒸汽系统用 P280GH 弯头也可以用热推制来成形。

12.4.2 / 蒸汽管道

(1) 概述

核电厂中的管道一般称为回路管道,是指压水堆核电厂内连接反应堆容器、蒸汽发生器、冷却泵和稳压器的一回路冷却水管道;或沸水塔核电厂中连接反应堆容器、汽轮发电机的再循环系统管道。回路管道材料包括主回路管道材料和二回路管道材料;多数主回路管道由 304 或 316 不锈钢制成,少数采用锰-钼-镍低合金钢管;气冷堆采用 9Cr-1Mo 耐热钢管;高温气冷堆则采用镍基耐热钢管。在核电厂的蒸汽-水系统内,蒸汽发生器传热管及其管束具有极其沉重的载荷和恶劣的工作环境。

蒸汽管道主要是在核电厂二回路系统中,前已述及,核电厂二回路系统水处理的任务是保证水质,防止和减少蒸汽发生器传热管、汽轮机设备、管道等设备的腐蚀。蒸汽发生器作为二回路中最重要的核一级主设备,保护蒸汽发生器传热管不受腐蚀更是水化学控制的重中之重。蒸汽发生器传热管主要由镍基合金或不锈钢制造而成,为尽可能避免它的腐蚀,就要保证水中的溶解氧含量控制在较低水平。碳钢是压水堆核电站蒸汽管道的主要材料^[141,142]。

目前第二代核电技术的压水堆(如 CPR1000)设计的主蒸汽温度为 316℃,压力为 8.6MPa,新开发的第三代核电技术的反应堆(EPR 或 AP1000)的蒸汽温度和压力参数也无大的变化,因此,常规岛二回路系统的主蒸汽管道和给水管道材料主要采用碳素钢/碳锰钢,也有一部分采用的是 ASTM 标准的碳素钢,第三代核电站二回路用管道材料采用的是碳素钢/碳锰钢 TU42C、P355NH^[143]。

核电站主蒸汽管道在运行期间主要受到自重、内压力、支吊架载荷、温度载荷、固定点位移载荷及风载荷的作用。国内的田湾核电站 5、6 号机组常规岛内部的主蒸汽、主给水管道材料均为按照法国标准设计制造的 P280GH 钢材。主蒸汽管网由 1067×65(外径×壁厚,mm)、813×36.53、813×32 及 813×46 四种管道组成^[144]。

P280GH 是 RCC-M 规范中规定了高温特性的碳素钢无缝钢管品种,具有良好的冲击韧性和焊接性能。在加入特定范围的 Cr 含量后, P280GH 具有较好的抗流动加速腐蚀(Flow Accelerated Corrosion, FAC)性能,被广泛用于压水堆核电站主蒸汽系统、蒸汽发生器给水控流、辅助给水系统和汽轮机旁路系统等^[145]。

(2) 本领域对新材料的战略需求

蒸汽管道材料在溶氧量低的高温水中容易发生流动加速腐蚀^[146]问题,因此,蒸汽管道材料需要尽可能减缓 FAC 的影响。有研究显示,选用含 Cr 的碳钢材料和低合金钢材料管道,有利于减缓 FAC 的影响。国内学者的研究表明,当管道材料中的 Cr 含量大于 0.1% 时,管道壁厚的相对减薄速率大大降低^[147]。蒸汽管道的设计中,需要重点考虑含 Cr 的管道材料,这对于减缓 FAC 的影响是正确和有效的措施^[148]。

(3) 当前存在的问题、面临的挑战

如前所述,对于 FAC 问题,在溶解氧含量较低的情况下,金属表面生成的氧化膜以磁铁矿(Fe_3O_4)为主,它的结构比较疏松,不稳定,会溶解于单相液体或气液两相流的液相介质中,并被流动的工质带走,从而造成持续的壁厚减薄。FAC 的发生会导致核电站管路系统和其他过流部件的壁面减薄,如果这种减薄现象没有被及时检测到并采取相应的措施,减薄到一定程度后就会突然破裂而使设备失效,同时高温高压的液体或蒸汽向外喷射,会损坏旁边的设备,甚至造成人员伤亡。这将给核电站带来巨大的损失,严重威胁核电机组的安全可靠运行。因此, FAC 在各种核电设备失效方式中排在第二位,仅次于应力腐蚀开裂^[149]。国内在 2000 年发生过类似的管道破裂事件^[150]。

目前,国内核电厂主蒸汽管道在运行过程中,经常碰到以下问题:阀门密封性不好造成蒸汽泄漏;阀门启闭过快造成水锤冲击或振动;管内蒸汽介质流速过高或管道布置不合理造成管系振动或摆动;疏放水等小管径管道应力集中或疲劳断裂等^[151]。

此外,核电站常规岛内的主蒸汽、主给水管道的安全方面,虽然其在生产、检查验收以及安装焊接时会采取严格的控制,但是仍然避免不了在材料内部以及焊接连接部位存在原生微裂纹缺陷,这些原生微裂纹在高温高压条件下受到压力管道常规运行工况以及偶然地震工况载荷的作用,会缓慢地萌生、扩展并长大,沿着压力管道的横向或纵向发展,逐步形成表面裂纹、贯穿裂纹,并最终发生破裂。一旦核电站主蒸汽、主给水管道发生破裂,其内部的液体、气体将从破口处喷射出来,并产生巨大的喷射反作用力。主蒸汽、主给水管道在喷射反力的作用下会发生甩击现象并严重威胁到周围管道、建筑结构、核电安全设备和工作人员的安全,甚至会带来核泄漏等严重的次生灾害^[144]。

目前核电用管的部分品种规格可以在国内生产,但是规格不配套、品种不齐全,不能完全满足核电站的建设要求,产品质量还有待进一步提高。

我国的核电建设起步较晚,核电站设计及设备制造在早期主要依赖国外技术,尽管最近几年发展较快,逐步形成了具有自主知识产权的技术,但核电用管材料采用国外标准和国外牌号钢种,给国内采购和生产带来一些问题。国内具备核级钢管生产资质的几家企业,所生产的核岛使用的奥氏体不锈钢管及少量的主冷却管道和蒸发器传热管,长期以来也只好

为进口产品的补缺产品，尚不具备成套供应的能力；核二、三级碳锰钢管因品种规格多，难以形成批量生产且利润远低于不锈钢管。核级钢管虽然国内有部分企业可以生产，但尚不具备大规模成套供货的能力。

常规岛二回路用非核级无缝钢管大多是碳素钢 / 碳锰钢。目前尽管国内部分钢管生产企业现有的装备技术已完全具备生产高质量非核级钢管的条件，但是国内核电建设工程仍大多采用国外规范、国外标准和国外牌号。另外，因这类钢管涉及的规格多、数量少、牌号特殊，难以形成规模生产，故钢管企业对这类钢管的生产渴求不高。因此制定相应的国家核电用管标准，以弥补我国在核电用管道材料标准方面的缺失，是核电用管国产化急需开展的工作^[143]。

(4) 未来发展

在蒸汽管道的应用方面，由于我国的核电工业起步比较晚，对流动加速腐蚀问题的重视程度不够，相关的系统性研究工作开展得比较少。然而，根据韩国和中国台湾的经验，在核电站运行 15 年左右时，FAC 问题将会在碳钢管道和部件上大面积发生。以此时间估计，FAC 很快就会威胁到我国核电站的安全运行，因此相关研究工作的开展刻不容缓。应尽快开展与我国核电站实际运行工况相适应的 FAC 实验研究、数值模拟和监测技术研究，建立更加完善的 FAC 机理模型，为管道的超声测厚提供较精确的定位指导，防止事故的发生，确保核电站的安全运行^[149]。未来可以在现有研究基础上对 P280GH 的成分进行优化，需要充分保证产品性能和碳当量控制要求，同时控制有害元素的质量分数。



结语

本章主要对核电机组关键部件及材料进行了概述。我国的核电发展水平接近世界领先地位，但在核电领域中的一些材料还未完全实现品牌自主化，部分关键材料的研发与生产仍急需攻关解决。随着我国“碳达峰、碳中和”战略的提出，国家发展对能源多样性的需求逐年增加。对国内核能技术的发展而言，第四代核反应堆是下一代反应堆技术，燃料利用率高、安全性好是其突出特点。目前，我国正在规划建设的多座核电站也拟采用第四代核电技术。此外，小型化也是中国核电的一个发展趋势，小型核反应堆具有更强的适应性，应用范围更加广阔，适合我国地域差异大的基本国情。以上问题都对核电机组相关材料性能提出了更高的要求。相信在不久的将来，书中所提及的关键材料问题都有望得到解决和突破，中国的核电事业也将以更快、更稳的步伐迈向未来。

参考文献

- [1] 穆勇帅. 基于稀土元素(Tm、Tb 和 Dy)的 Fe 基中子吸收复合材料的研制[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
- [2] 李冠兴, 周邦新, 肖岷, 等. 中国新一代核能核燃料总体发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(1): 6-11.
- [3] 叶奇蓁, 李晓明. 中国电气工程大典 第 6 卷 核能发电工程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [4] 李锐, 周洲, 张国梁, 等. 核燃料组件: CN202512906U[P]. 2012-10-31.
- [5] Vatulina A V, Suprun V B, Kulakov G V Development of Fuel for Research Reactors[J]. Atomic Energy, 2016, 119(5): 304-312.
- [6] 史力, 赵加清, 刘兵, 等. 高温气冷堆关键材料

- 技术发展策略[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(04): 270-278.
- [7] Zheng M, Yan J, Shentu J, et al. The General Design and Technology Innovations of CAP1400[J]. 工程(英文), 2016, 2(1): 6.
- [8] Suo X, Liu J, Dong L, et al. A machine vision-based defect detection system for nuclear-fuel rod groove[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2021(1).
- [9] Walters L C, Seidel B R, Kittel J H. Performance of Metallic Fuels and Blankets in Liquid-Metal Fast Breeder Reactors[J]. Nuclear Technology, 2017, 65(2): 179-231.
- [10] Golovchenko Y M. Oxide-Metal Core Is Possible Transition to the Metal Fuel Core for Fast Reactors of the BN-Type[J]. International Journal of Energy and Power Engineering, 2014, 2(3): 113-120.
- [11] Ryu H J, Lee B O, Oh S J, et al. Performance of FCCI barrier foils for U-Zr-X metallic fuel[J]. Journal of Nuclear Materials, 2009, 392(2): 206-212.
- [12] 任思琪. 新型中子吸收材料 $\text{Eu}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2\text{/HfO}_2$ 的制备及性能研究[D]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2021.
- [13] 林诚格, 郁祖盛, 欧阳予. 非能动安全先进核电厂 AP1000[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2008.
- [14] 张腾. 核电站反应堆硼和水补给系统的建模与仿真[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [15] 谢佳志, 刘超. 田湾核电站控制棒原理及运行经验[J]. 硅谷, 2014, 7(13): 188-189.
- [16] 方祥洪, 杨彬, 马若霞. 核电站含硼废液处理方法研究[J]. 山东化工, 2016, 45(21): 179-180.
- [17] 刘同先, 吴磊, 陈长, 等. CNP650 压水堆不调硼负荷跟踪可行性研究[J]. 核科学与工程, 2016, 36(05): 595-600.
- [18] 元亮. 压水堆的控制棒材料[J]. 国外核新闻, 1982(09): 31-33.
- [19] Cheng B, Rosa L Y. Hafnium alloys as neutron absorbers: US5330589[P]. 1994-7-19.
- [20] 西部金属材料股份有限公司. 核级银-铟-镉合金棒: GB/T 25942—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [21] 李攀, 于雷, 陈玉清. 压水堆控制棒价值的亏损速率研究[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(S1): 382-385.
- [22] 卢俊强, 李继威, 黄金华, 等. Tm_2TiO_5 中子吸收材料的制备及性能研究[J]. 稀有金属, 2018, 42(02): 191-198.
- [23] 李继威, 薛晶晶, 刘家正, 等. 银铟镉吸收体棒性能研究[J]. 动力工程学报, 2016, 36(05): 416-420.
- [24] Radford K C, Argall B M, Keller H W, et al. Fabrication Development and Application of an Annular $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-B}_4\text{C}$ Burnable Absorber[J]. Nuclear Technology, 2017, 60(3): 344-351.
- [25] 王傲松, 刘翠波, 孟氢钷. 核电乏燃料贮存用中子吸收材料的发展及趋势[J]. 材料导报, 2016, 30(S2): 233-236, 243.
- [26] 张国峰, 晏朝晖, 庞晓轩, 等. $\text{B}_4\text{C}/\text{Al}$ 复合材料研究进展[J]. 科技与创新, 2018(21): 30-33.
- [27] Hollenberg G W, Basmajian J A. Crack Propagation in Irradiated B_4C Induced by Swelling and Thermal Gradients[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1982, 65(4): 179-181.
- [28] Suzuki H, Maruyama T, Wakasa T. Postirradiation Annealing of Boron Carbide Pellet Irradiated in Fast Breeder Reactor[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1979, 16(8): 588-595.
- [29] 唐凤平. 300# 研究堆碳化硼辐照肿胀研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2015.
- [30] Eremeeva Z V, Panov V S, Myakisheva L V, et al. Structure and properties of mechanochemically synthesized dysprosium titanate Dy_2TiO_5 [J]. Journal of Nuclear Materials, 2017, 495: 38-48.
- [31] Luo Y, Ran G, Chen N, et al. Microstructural Evolution, Thermodynamics, and Kinetics of Mo-Tm(2)O(3) Powder Mixtures during Ball Milling[J]. Materials(Basel), 2016, 9(10).
- [32] Lv D, Lu J, Ran G, et al. Ball milling and sintering of neutron absorber Mo-based $\text{Tb}_2\text{O}_3\text{-Dy}_2\text{O}_3$ composite and its characterization[J]. Powder Technology, 2018, 331: 226-235.
- [33] 张羽白. 氧化钷中子吸收材料制备及性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [34] 周洁. 核反应堆控制棒驱动机构的结构及制造[J]. 装备制造, 2010(4): 4.
- [35] K·J·德鲁迪, W·R·卡尔森, M·E·康纳, 等. 先进灰棒控制组件: CN101504872[P]. 2008-11-19.
- [36] 吴怡祯. 镧系钛酸盐中子吸收材料研制及其辐照性能研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.
- [37] Dubourg R, Austregesilo H, Bals C, et al. Understanding the behaviour of absorber elements in silver-indium-cadmium control rods during PWR severe accident sequences[J]. Progress in Nuclear Energy, 2010, 52(1): 97-108.
- [38] Kim H S, Joung C Y, Lee B H, et al. Characteristics of $\text{Gd}_x\text{M}_y\text{O}_2$ (M=Ti, Zr or Al) as a burnable absorber [J]. Journal of Nuclear Materials, 2008, 372(2-3): 340-349.
- [39] Tracy C L, Lang M, Zhang J, et al. Structural response of A_2TiO_5 (A=La, Nd, Sm, Gd) to swift heavy ion irradiation[J]. Acta Materialia, 2012, 60

- (11): 4477-4486.
- [40] Zhang J, Zhang F, Lang M, et al. Ion-irradiation-induced structural transitions in orthorhombic Ln_2TiO_5 [J]. *Acta Materialia*, 2013, 61(11): 4191-4199.
- [41] Risovany V, Varlashova E, Suslov D. Dysprosium titanate as an absorber material for control rods[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2000, 281(1): 84-89.
- [42] Risovaniy V, Zaharov A, Klochkov E, et al. Dysprosium and hafnium base absorbers for advanced WWER control rods[R]. 2000.
- [43] 陈洪胜, 王文先, 聂慧慧, 等. 核屏蔽用中子吸收材料研究现状与展望[J]. *稀有金属材料与工程*, 2020, 49(12): 4358-4364.
- [44] 段永华, 竺培显, 孙勇. 屏蔽/结构一体化 B/Pb 复合材料组织与力学性能的研究[J]. *中国科技论文在线*, 2007(05): 359-362.
- [45] 罗征, 周新贵, 于海蛟, 等. 核屏蔽材料研究与进展[C] // 第十二届反应堆数值计算与粒子输运学术会议. 中国安徽合肥, 2008; 308-314.
- [46] 李奎江, 邹树梁, 唐德文. 核辐射屏蔽材料的研究进展及发展趋势[J]. *现代制造技术与装备*, 2017(8): 2.
- [47] 王建, 邹树梁. 钨和铅作为 γ 射线屏蔽材料的性能对比研究[J]. *南华大学学报: 自然科学版*, 2011, 25(4): 4.
- [48] 曾小义, 黎泽伟. 核辐射综合屏蔽材料的研究进展及发展趋势[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(35): 7.
- [49] Shoudong C, Jingchao C. Study Reality and Development Prospect of Lead-based Nuclear Shielding Material[J]. *Materials Review*, 2011, 25(7A): 58.
- [50] 颜亮. 基于液相烧结的 W-Ni-Fe 合金防辐射屏蔽材料的制备研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2015.
- [51] 成细洋. 液相烧结制备钨基合金屏蔽材料的实验研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2012.
- [52] 张鹏. 高含量铝基碳化硼中子吸收材料的制备及性能研究[D]. 太原: 太原理工大学.
- [53] 袁楠. 碳化硼铝基复合材料的制备及其力学性能的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
- [54] 柴浩, 汤晓斌, 陈飞达, 等. 新型柔性中子屏蔽复合材料研制及性能研究[J]. *原子能科学技术*, 2014, 48(S1): 839-844.
- [55] Adeli R, Shirmardi S P, Mazinani S, et al. Nuclear characteristics of epoxy resin as a space environment neutron shielding[J]. *Kerntechnik*, 2017, 82(1): 125-131.
- [56] Sarkawi M S, Zain M R M, Rabir M H, et al. Radiation shielding properties of ferro-boron concrete [C] // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2018; 012037.
- [57] 王利伟. 抗中子 γ 射线吸收屏蔽材料 W-Al-B₃C 制备及其性能研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2020.
- [58] Yang J, Chen Z F, Gan Y C, et al. Research Progress on Radiation Shielding Concrete[C] // 2nd International Conference on Civil Engineering and Transportation (ICET 2012). Guilin, PEOPLES R CHINA, 2012: 303-307.
- [59] 元琳琳, 韩静涛, 刘靖, 等. 热中子屏蔽用高硼不锈钢复合板的组织与性能[J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(08): 104-110.
- [60] 郑学家. 金属硼化物与含硼合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [61] 张哲维. 基于 MC 法的乏燃料贮存用铝基复合材料屏蔽性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [62] 刘志远, 朱亚君, 谭伟民, 等. 中子屏蔽材料的制备与性能研究[J]. *涂料工业*, 2016, 46(02): 18-21.
- [63] Kalaiselvan K, Murugan N, Parameswaran S. Production and characterization of AA6061-B₄C stir cast composite[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(7): 4004-4009.
- [64] 刘明朗, 韩增尧, 郎静, 等. 碳化硼-铝复合材料的性能研究[J]. *材料导报*, 2011, 25(23): 31-34.
- [65] 张鹏. 高含量铝基碳化硼中子吸收材料的制备及性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- [66] 张鹏, 张哲维, 李宇力, 等. 热压法制备高含量 B₄C/铝基复合材料的显微结构与力学性能[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2014, 19(01): 95-100.
- [67] 韩毅, 陈法国, 于伟跃, 等. 中子屏蔽材料研究现状[J]. *材料导报*, 2015, 29(S2): 483-488.
- [68] 董占武, 魏世忠, 张国赏, 等. 高碳硼钢的组织与性能研究[J]. *铸造技术*, 2008(11): 1481-1484.
- [69] 王伟. 反应堆压力容器模拟钢中富 Cu 相的析出及晶体结构演化研究[D]. 上海: 上海大学, 2011.
- [70] Lu Z, Faulkner R G, Flewitt P E J The role of irradiation-induced phosphorus segregation in the ductile-to-brittle transition temperature in ferritic steels [J]. *Materials Science and Engineering : A*, 2006, 437(2): 306-312.
- [71] Debarberis L, Sevini F, Acosta B, et al. Irradiation embrittlement of model alloys and commercial steels : analysis of similitude behaviors[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2002, 79(8-10): 637-642.
- [72] 肖茜. 反应堆压力容器用低合金钢及不锈钢堆焊层在模拟压水堆一回路水中的腐蚀行为[D]. 上海: 上海大学, 2018.
- [73] 李承亮, 张明乾. 压水堆核电站反应堆压力容器材料概述[J]. *材料导报*, 2008(09): 65-68.
- [74] 朱正清. 现代大型反应堆压力容器材料的研制与发展[J]. *核动力工程*, 2011, 32(S2): 1-4+8.
- [75] 王小吉. 坍塌式堆芯捕集器的发展及设计需求研究

- [J]. 科技视界, 2021(10): 107-110.
- [76] 李琳, 臧希年. 压水堆核电厂严重事故下堆芯熔融物的冷却研究[J]. 核安全, 2007(04): 39-44.
- [77] 崔方水. 田湾核电站堆芯捕集器的设计简介[J]. 核动力工程, 2008(03): 52-55.
- [78] 冉刻, 周涛, 李精精. 核电站堆芯熔融物的处理措施[J]. 华电技术, 2011, 33(10): 77-81, 85.
- [79] 于英俊. 核电牺牲混凝土与堆芯熔融物相互作用研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [80] Allelein H. J., Bürger M. Considerations on ex-vessel corium behavior: Scenarios, MCCI and coolability[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236(19-21): 2220-2236.
- [81] Bittermann D, Fischer M, Nie M. Main features of the core melt stabilization system of the European pressurized water reactor (EPR) [J], 2005.
- [82] Dombrovskii L A, Mineev V N, Vlasov A S, et al. In-vessel corium catcher of a nuclear reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2007, 237(15-17): 1745-1751.
- [83] Seiler J M, Latrobe A, Sehgal B, et al. Analysis of corium recovery concepts by the EUROCORE group [J]. Nuclear Engineering and Design, 2003, 221(1-3): 119-136.
- [84] Alsmeyer H, Tromm W. The COMET concept for cooling core melts: Evaluation of the experimental studies and use in the EPR[M]. Forschungszentrum Karlsruhe, 1999.
- [85] Ha K S, Kim H Y, Kim J, et al. An evaluation of a direct cooling method for the ex-vessel corium stabilization[J]. Nuclear Engineering and Design, 2011, 241(12): 4737-4744.
- [86] Magallon D, Bang K, Basu S, et al. Insight into the results of international programme SERENA on fuel-coolant interaction[C] // The 11 th International International Topcal Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-11), Popes 'Palace Conference Center, Avignon, France. 2005.
- [87] 郑华. EPR 缓解 SGTR 事故的设计特点[J]. 核科学与工程, 2010, 30(01): 15-18.
- [88] 曹元超. 核电牺牲混凝土的制备与性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2012.
- [89] 陈泓. 世界先进反应堆型——欧洲压水堆 EPR 介绍[J]. 中国电力, 2000(02): 65-69.
- [90] 韩旭, 荆春宁, 朱晨, 等. 压水堆核电厂新概念堆芯捕集器设计研究[J]. 核动力工程, 2018, 39(01): 102-105.
- [91] 沈贤莉. 大型核电蒸发器管板锻件研究与制造[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [92] 刘辉. 核电蒸汽发生器管板材料的深孔加工表面完整性
- 整性和钻头磨损研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [93] 王新宇. 核电 690TT 合金划伤表面的腐蚀和应力腐蚀研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- [94] Couvant K T. Evaluation of the susceptibility to SCC initiation of Alloy 690 in simulated PWR primary water [C] // International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors. 2011; 41-53.
- [95] 李子阳. 核电蒸汽发生器 690 合金管激光表面改性研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2015.
- [96] 赵卓. 压水反应堆蒸汽发生器传热管材料进展[J]. 科教文汇, 2017(8): 5.
- [97] 王彪, 张纯禹, 马显锋, 等. 压水堆材料与结构中的关键力学问题[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2019, 49(11): 6-23.
- [98] 张庆涛. 核级安全壳隔离阀抗震设计与研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2020.
- [99] 朱瑞峰, 吴崇志, 苏靖杰, 等. AP1000 钢制安全壳选材及应用[J]. 压力容器, 2016, 33(03): 56-60+80.
- [100] 胡广泽, 王刚, 于杰, 等. 核电站用钢制安全壳纵焊缝的焊后热处理畸变[J]. 金属热处理, 2021, 46(01): 220-224.
- [101] 彭斗光. 压水堆核电厂安全壳钢内衬老化管理[C] // 绿色建筑与钢结构技术论坛暨中国钢结构协会钢结构质量安全检测鉴定专业委员会第五届全国学术研讨会. 中国甘肃兰州, 2017; 4.
- [102] Naus D, Oland C, Ellingwood B, et al. Management of aging of nuclear power plant containment structures[R]. Oak Ridge National Lab., 1998.
- [103] 廖开星, 吴剑剑, 李毅, 等. 核电厂安全壳钢衬里的腐蚀防护与控制初探[J]. 腐蚀与防护, 2019, 40(01): 61-65.
- [104] 胡海洋, 王永才, 孙殿东, 等. 核电站安全壳钢衬里用 20HR-B 钢的试制[J]. 轧钢, 2017, 34(02): 67-70.
- [105] 郭瑞亮, 成同松. 核电厂安全壳防泄钢衬里钢板替代问题的探析[J]. 产业与科技论坛, 2011, 10(03): 113-114.
- [106] 李小将, 梁招瑞, 张心斌, 等. 核电站安全壳钢衬里作用探讨[J]. 工业建筑, 2012, 42(S1): 179-182.
- [107] 徐建平, 苏航标, 郭获子, 等. 核乏燃料后处理设备用钛合金腐蚀性能研究进展[J]. 稀有金属与硬质合金, 2019, 47(03): 36-41+46.
- [108] McKinnon M A, DeLoach V A. Spent nuclear fuel storage -- Performance tests and demonstrations[R]. 1993.
- [109] 孙涛涛, 马天洋, 田航, 等. 乏燃料后处理溶解

- 器用耐蚀钼合金研究进展[J]. 中小企业管理与科技(下旬刊), 2020(08): 176-177.
- [110] 徐超. 基于安全分析的乏燃料运输容器关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [111] 吴鹏, 刘森, 邓建国, 等. 中子屏蔽材料的研究进展[J]. 化工新型材料, 2017, 45(09): 4-5+8.
- [112] 石向东, 董广成, 张旭明, 等. 利用中子吸收材料进行乏燃料贮存的研究进展[J]. 辽宁工业大学学报(自然科学版), 2020, 40(06): 376-380.
- [113] 刁飞宇, 张衍, 刘育建, 等. 钨/环氧树脂 γ 射线屏蔽复合材料的制备及性能[J]. 热固性树脂, 2016, 31(06): 8-12.
- [114] 孙超, 孟宪芳, 秦培中, 等. 耐温屏蔽复合材料的研制及性能研究[J]. 辐射防护, 2020, 40(04): 301-307.
- [115] 李坤锋, 王子凡, 刘春雨, 等. 核屏蔽材料铅硼聚乙烯高温熔融处理研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(02): 552-555.
- [116] 邢攸冬, 杨思一, 安钰坤, 等. 核乏燃料运输容器减震器填充材料研究进展[J]. 包装工程, 2019, 40(21): 111-117.
- [117] 汪海, 董明炎, 孙胜, 等. 乏燃料运输容器研究进展[J]. 机械工程师, 2015(12): 65-69.
- [118] 曾小义, 黎泽伟. 核辐射综合屏蔽材料的研究进展及发展趋势[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(35): 14352-14358.
- [119] Maki A. Corrosion circumstance in the Tokai Reprocessing Plant and evaluation of the corrosion rate[J]. Saikuru Kiko Giho, 2002: 39-63.
- [120] Kapoor K, Kain V, Gopalkrishna T, et al. High corrosion resistant Ti-5%Ta-1.8%Nb alloy for fuel reprocessing application[J]. Journal of Nuclear Materials, 2003, 322(1): 36-44.
- [121] Mudali U K, Dayal R K, Gnanamoorthy J B Corrosion Behavior of Weldments of Ti and Ti-5Ta for Nuclear Fuel Reprocessing Plants[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1995, 4(6): 756-760.
- [122] 陈飞达, 汤晓斌, 王鹏, 等. 新型纤维增强环氧树脂基复合材料研制及其中子屏蔽性能研究[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(S1): 703-707.
- [123] 李清华, 岳凌, 杨淑琴, 等. 中子辐射屏蔽材料PVA/PEO水凝胶的制备及其作用研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2010, 28(02): 98-102.
- [124] Zali N M, Yazid H, Ahmad M H A R M. Neutron shielding behavior of thermoplastic natural rubber/boron carbide composites[C] // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. 2018; 012018.
- [125] Singh V P, Badiger N, Chanthima N, et al. Evaluation of gamma-ray exposure buildup factors and neutron shielding for bismuth borosilicate glasses[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2014, 98: 14-21.
- [126] Li Z, Yang S, Xu H, et al. Study on the two-way corrugated aluminum honeycomb as a filler material in impact limiters for spent fuel transport casks[J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 2019, 56(5): 425-431.
- [127] 翟向伟, 沈龙凤, 李春京, 等. 核反应堆材料数据库系统及其应用[J]. 核科学与工程, 2016, 36(03): 360-365.
- [128] 李刚, 简敏, 王美玲, 等. 反应堆乏燃料贮运用中子吸收材料的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(13): 110-113, 129.
- [129] 王学新, 潘玉婷, 庄大杰, 等. 乏燃料容器设计中组件外壳的氢脆特性影响分析[J]. 包装工程, 2021, 42(03): 93-99.
- [130] 彭敏俊, 田兆斐. 核动力装置热力分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2012.
- [131] 孙凤. 基于遗传算法船用核动力装置凝给水系统故障诊断研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
- [132] 纪西胜, 吴强, 牛敬娟. 中国实验快堆主蒸汽系统优化设计及分析研究[J]. 核科学与工程, 2012, 32(02): 133-137.
- [133] 衣立波. 蒸汽管网现状分析及发展前景[J]. 价值工程, 2010, 29(09): 254.
- [134] 李永新, 惠小健, 吴桂敏, 等. AZ31合金的挤压工艺数值模拟及参数优化[J]. 铸造技术, 2017, 38(03): 705-707+710.
- [135] 王丽萍. 轧制工艺对AZ31镁合金冲压性能的影响[J]. 铸造技术, 2016, 37(02): 343-345.
- [136] 吕文泉, 王锦程, 杨跃双, 等. 高强镁合金的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2012, 26(05): 105-108+112.
- [137] 张华锋, 张宏伟, 梁雪元. 压水堆核电站主蒸汽系统用推制弯头材料标准对比转化研究[J]. 核标准计量与质量, 2019(02): 21-27.
- [138] 贺军. 核动力装置二回路系统方案设计研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [139] 回方娇. 二回路主辅蒸汽系统管网特性仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- [140] 焦少阳, 李茂林, 郑越, 等. 核电站主蒸汽系统用P280GH弯头热推制成形工艺评定[J]. 热加工工艺, 2018, 47(21): 160-164+168.
- [141] Dooley R B, Tilley R. Guidelines for controlling flow-accelerated corrosion in fossil and combined cycle plants[J]. EPRI CA, 2005, 1008082.
- [142] Lister D H, Liu L, Feicht A D. A fundamental study of flow-accelerated corrosion in feedwater systems[J]. Power Plant Chemistry, 2008, 10(11): 659-

- 667.
- [143] 成海涛, 郭元蓉. 核电用管现状及国产化进展[J]. 钢管, 2008(04): 1-5.
- [144] 张梦灿. 田湾核电站主蒸汽、主给水管道最易破裂位置研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [145] 郭元蓉, 刘昊, 胡铂, 等. 压水堆核电站用无缝钢管 P280GH 的研制[J]. 钢管, 2011, 40(01): 24-28.
- [146] Lister D, Feicht A, Cook W, et al. Effects of dissolved oxygen on flow-accelerated corrosion in feedwater systems[J], 2007.
- [147] 王君, 严志勇. 某热电公司 2×330MW 机组工程设计优化[J]. 中国勘察设计, 2011(01): 118-120.
- [148] 邓宏伟. 核电厂二回路管道应对流动加速腐蚀机理研究[J]. 南方能源建设, 2015, 2(01): 51-54+61.
- [149] 潘向烽. 碱化剂对核电厂二回路管道材料流动加速腐蚀的影响研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
- [150] 严卓奇. 流量加速腐蚀对核电站二回路材料影响及对策的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [151] 牛冠军, 孙希文. 热电厂主蒸汽系统配管优化[J]. 中外企业家, 2014(12): 119.



2021



第四篇

新材料技术应用 体系建设

第 13 章 材料大数据与基础设施建设

第 14 章 推动新材料产学研用协同发展的战略研究

第 13 章

材料大数据与基础设施建设

姜 雪 张 雷 宿彦京

13.1 概述

德国制造 4.0 和美国制造业振兴计划的实施，推动了全球制造业的数字化转型和智能化变革，大数据成为制造业智能化发展的战略资源，抢占第四次工业革命先机的重要基础支撑。近年来，各国政府加快战略布局大数据技术的研发和数据基础设施建设，以应对工业革命的挑战和机遇。

材料是制造业创新发展的物质基础，是催生高新技术的先导。传统的“试错法”研发模式导致材料研发周期长、成本高，成为制约制造业和高新技术发展的瓶颈。大数据和人工智能技术被国际公认为突破这一瓶颈的有效途径，数据驱动的新材料发现已在全球范围内形成继实验（经验）、理论分析、模拟计算之后的新型材料研究范式，即第四范式，推动材料研发模式的智能化转变，促进材料产业的高质量发展。

数据资源是构建大数据和人工智能驱动材料新型研发范式的重要基础，是信息化和智能化时代新的生产要素，是国际竞争的关键战略资源和优先发展领域。构建材料数据资源体系，建设材料数据基础设施是应对当前材料数据资源分散、碎片化严重、支撑材料创新能力不足等问题，实现材料数据有序积累和规模化应用的重要途径；研发材料数据库技术和软件，建立和完善材料数据开放共享机制和市场化发展机制，已成为材料数据资源体系建设和材料大数据健康发展的基础；研发材料人工智能技术和核心软件，建立数据驱动材料研发的新型技术体系和发展模式，是提升新材料国际竞争力、布局未来战略优势、抢占材料技术和产业制高点的重要手段。

本章从材料创新发展对大数据的战略需求、材料数据发展的历史沿革、数据共享与应用、材料大数据和基础设施关键技术、急需解决的问题和未来发展展望等方面，介绍材料大数据的发展与材料数据基础设施建设的现状和进展。

13.2 / 战略需求

材料科技的发展和新材料的工程应用，对材料数据资源和基础设施的需求日益增强。

① 数据资源是材料创新发展的重要基础。数据和人工智能驱动的材料研发从根本上改变了新材料的研发模式，推动材料科技创新的颠覆性发展，对材料数据积累、资源整合、高效应用提出了前所未有的迫切需求。国内新材料创新与应用发展迅猛，但支撑高效研发的材料数据独立、分散，数据资源已成为新材料发展的关键瓶颈。

② 材料数据是制造业智能化的重要生产要素。数据是数字孪生、智能制造、先进制造快速发展的前提，在国际科技和产业竞争中的重要性日益凸显。材料数据的共享服务和大数据应用，已成为提升材料产品研发设计—生产制造—端链协作—系统集成—测试评价—健康服役全流程数字化和智能化的重要保障，具有自主知识产权的材料数据资源已成为制造业智能化发展的重要生产要素。

③ 数据是材料科技和产业高质量发展的重要保障。材料发展的第四范式正在国际范围内迅速形成，材料数据基础设施建设与数据资源正加速整合，各类综合性或专业性材料数据库快速涌现；人工智能技术与材料高效计算设计和实验技术的融合，推动了材料自主计算设计和实验的发展；互联网和云技术实现了材料计算、实验数据的快速积累与共享，在科研机构和企业之间搭建了信息交流和数据共享的产学研用合作平台；数据资源已成为赋能材料科技和产业高质量发展的重要保障。

13.3 / 历史沿革与发展现状

13.3.1 / 历史沿革

数据库随着计算机的发展应运而生，伴随着计算机、云技术、人工智能技术的发展，材料数据基础设施由独立数据库发展成为整合计算与分析的材料数据中心和智能化平台，并逐步演化为分散建设与维护、集中访问与共享的新数据治理模式^[1]，如图 13-1 所示。2010 年以前的第一阶段，材料数据库主要提供数据托管和数据搜索服务，方便科学家查询和应用数据，同时，鼓励材料科学家在更大的社区中共享数据^[1,2]，例如 Pauling File^[3,4]、Granta Design^[5]、MatNavi^[6]、SpringerMaterials^[7] 等。2011 年以后，美国材料基因组计划推动形成了数据驱动的材料创新发展模式，材料数据库发展进入第二阶段，成为提供原始数据、计算模拟和数据分析服务的数据中心，并很快在数据挖掘和人工智能技术的推动下转变成成为促进新型材料研发的材料发现平台^[1,2,8]，例如 AFLOW^[9,10]、Citrine Informatics^[11,12]、Materials Project^[13,14]、NOMAD^[15-17] 等。互联网、人工智能和云技术的迅速发展，继续推动数据库发展进入多数据资源与应用开放互联和无缝共享的第三阶段^[1]，以 workflow 牵引数据流，在科研机构、企业、用户之间逐步形成了数据与知识连通的产学研用合作平台。例如，美国政府充分发挥国家标

准技术研究院（NIST）在数据集成和管理等方面的专业优势，以 NIST 为核心，辐射西北大学等近百家科研机构和企业，通过集成各类机构的材料数据、代码、计算工具等软硬件资源与服务，建成了以 Materials Data Curation System(MDCS)^[18]、Materials Data Facility(MDF)^[19, 20]、Open Quantum Materials Database (OQMD)^[17, 21] 为代表的一系列数据库系统、数据库服务平台、数据资源库，集成了材料高通量实验数据采集、计算建模软件与工具，引领了美国和国际材料数据集成和应用的发展。通过材料资源注册平台进行多源异构数据注册登记，建立数据交换协议和机制，实现数据资源、数据库、软件和终端用户的桥接，实现更广泛范围内材料数据的共享和再利用^[22]。瑞士的新型材料计算、设计与发现国家中心（MARVEL）建设了 Materials Cloud 平台，提供基于开源工作流和开放数据集的整体解决方案，以材料建模的工作流驱动计算科学资源的共享^[23, 24]。MARVEL 联合 AFLOW、Materials Project、NOMAD 等 31 个国际主流材料数据平台机构，创建了 Open Databases Integration for Materials Design (OPTIMADE) 国际联盟，提出了材料数据库访问与交换的通用应用程序接口（Application Programming Interface, API）OPTIMADE，推动全球材料数据的 FAIR 准则，即可发现、可交换和可共享^[25]。

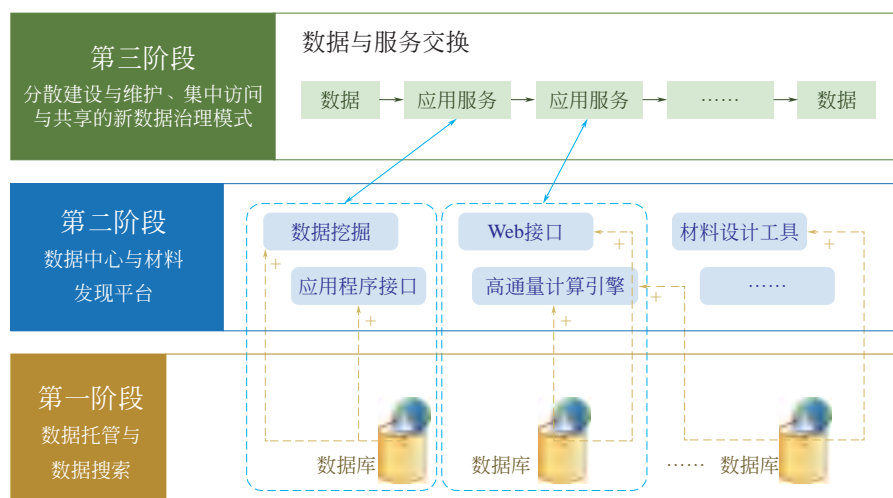


图 13-1 材料数据基础设施发展的阶段与特点

13.3.2 / 知名数据库

根据数据是否免费开放共享，目前国际材料数据基础设施可以分为开放数据库和商业数据库两类^[1]。图 13-2 总结了国内外知名材料数据库的功能和特色。

(1) 开放数据库

AFLOW 集成了多个高通量第一性原理计算模块，积累了 3556705 种化合物的 704227590 条计算性质数据^[9, 10]，并持续增加。HTEM 积累了利用材料组合芯片技术获取的 57597 种薄膜样品的性能数据^[26, 27]。MDF 是支持通过 Forge python 包进行数据检索的材料计算和实验数据发布网络^[20]。Materials Project 材料在线开发平台包含了 144595 种无机化合物、63876 条分子和 530243 条纳米多孔材料数据，开发并集成了包括 pymatgen、custodian、FireWorks 和 atomate 的

开源软件库与设计工具^[14]。MatNavi/NIMS 是包含 10 个数据库、4 个应用系统和 NIMS 在线结构数据集的集成材料数据库系统^[28]。NOMAD CoE 支持主流计算材料学软件输入和输出格式的数据存储，提供了超过 50236539 条的能量计算数据，以及大数据应用服务^[16]。OQMD 包含 815654 条无机晶体结构的密度泛函理论计算热力学和结构性质数据，支持通过 qmpy python 软件包进行数据下载与应用^[29]。MGEDATA 材料基因工程数据平台包含了高温合金、能源材料、复合材料、稀土材料、催化材料、轻质高强度合金和生物医用材料实验与计算数据 706083 条，提供了高通量第一原理计算引擎、数据挖掘系统、材料设计工具、高通量实验数据处理和材料科技文献文本挖掘系统等数据应用与服务，支持通过应用程序接口进行数据上传与访问^[30]。

(2) 商业数据库

Granta Design 是为材料设计提供数据、工具和专业知识的研发平台^[5]。Materials Design 提供化学、冶金、电子、聚合物数据，以及材料科学研究应用的软件产品和服务^[31]。MaterialsZone 提供可在线开发与调试的材料信息学环境与实验数据^[32]。Citrine Informatics 是结合数据库与人工智能的材料信息学平台^[11,12]，属于商业数据库，其中一部分数据集可免费开放访问（图 13-2）。

	计算数据	实验数据	数据上传	工作流管理工具	数据分析工具
开放数据库	AFLOW	☑		☑	☑
	HTEM		☑	☑	☑
	Materials Data Facility	☑	☑	☑	
	Materials Project	☑			☑
	MatNavi/NIMS	☑	☑		☑
	NOMAD CoE	☑		☑	☑
	Open Quantum Materials Database	☑			☑
	MGEDATA	☑	☑	☑	☑
商业数据库	Citrine Informatics	☑	☑	☑	☑
	Granta Design	☑	☑		☑
	Materials Design	☑	☑		☑
MaterialsZone	☑	☑			☑

图 13-2 典型材料数据基础设施的功能和特色

13.4

数据基础设施建设

13.4.1

材料数据的获取

材料数据基础设施中的数据一般有三大大主要来源，即材料计算数据、实验测量数据和科

技文献数据。

(1) 材料计算数据的获取

新材料、新物质的计算机辅助设计可分为三个阶段^[33]：第一阶段是探索材料的微观结构和性能的关系，从量子化学、固体物理等角度探索研制新材料的新思想、新概念；第二阶段是从相图、热力学和动力学性质出发，探索新型合金、陶瓷等材料及其制备方法的革新；第三阶段是运用“数据挖掘”(Data Mining)技术(如模式识别、人工神经网络、支持向量机、进化计算等)和数据库、知识库相结合，存储、加工材料的结构与性质关系、成分及制备工艺条件和材料性能与生产技术指标的关系等方面的资料和信息，实现材料制备、加工和性能的优化。依靠典型模拟方法对微结构演变与宏观性能进行研究仍是现代材料学的主要研究方法，所涉及的空间尺寸从微观的亚纳米到宏观米的量级，时间尺度从皮秒到年，涉及的物理模型、模拟方法和仿真软件工具各异。不同计算模型和软件的计算结果数据结构不同，通过定制不同计算模型和软件的数据解析程序，形成面向不同计算方法的数据自动转换，实现不同计算任务的数据自动解析与存储。例如，NOMAD 数据库支持计算材料的 24 种第一原理计算软件的输出文件解析与存储，如 VASP、ABINIT、BigDFT、CASTEP、DMol、CP2K、CRYSTAL 等，实现第一原理计算数据的自动获取。

(2) 材料实验及测量数据的获取

材料科学的特点决定了其实验数据种类繁多、特征各异。从材料类别的角度，金属材料、无机非金属材料、有机材料、复合材料等具有各自的科学体系和实验方式，纳米和低维材料的兴起，进一步丰富了材料实验的类型。从结构和性能表征角度，可通过各类表征测试手段获取材料成分、晶体结构、微观组织、物理和化学性质等，形成了材料实验和测量数据的多样性。从材料制备加工流程角度，如制备合成、加工处理等，各阶段实验数据特点与形式不同。从数据表现形式或载体角度，实验数据既有各类传感元件获取的数值型数据，如材料拉伸实验数据(包括实验参数)，以及由实验机构控制的拉伸速率、力传感器获得的载荷数、引伸计获得的应变量等；也可以以数组的形式描述，并可视化“应力应变曲线”等；或者形成二维或三维的图像信息，如 SEM、TEM 照片；亦或在时间序列上形成动态的演化信息，或者某一样品经过多次不同实验历程形成的材料加工链条等。因此，实验数据的产生和获取方式不同，决定了实验数据记录与描述方法的个性化差异，对实验数据的记录、采集与管理是对实验设计思路的复现和存档，与材料科学问题和实验设计过程密切相关。在实验室级别，实验数据的采集主要由人工进行记录，可借助 LIMS 系统等各类实验室管理软件、E-Notebook 电子实验记录本等电子化和信息化手段，将零散的实验数据按照实验设计进行管理和转换，通过数据库接口进行归档入库，完成实验数据的获取；广义上讲，材料在制造、加工、组装、测试、使用等工业生产应用过程中，同样会产生与实验过程类似的材料数据，各类生产线的信息化、工业传感器和控制系统的广泛应用，以及物联网和工业互联网的日益发展，使得生产过程数据自动采集获取成为可能，并已成为材料生产应用单位重要的信息资源和生产要素。

(3) 科技文献数据的获取

长期以来，材料科学家通过人工阅读文献进行数据记录、整理、校对和录入，形成规模化、成体系的材料专业数据库，例如 MatNavi/NIMS 和 Pauling File。这需要维护稳定的、高

水平文献阅读团队，保证数据整理原则相同，降低数据提取的质量差异。近年来，随着自然语言处理和文本挖掘技术的发展，材料科学家们尝试自动从文献中提取化学物质、工艺路线及性能信息，很大程度上减少了数据积累过程的人为参与，加速了数据从文本描述变成知识的进程，使大规模数据的融合、共享和进一步利用成为可能。

从广义的角度上看，自然语言处理的发展可以大致分为三个阶段：从基于字典的方法发展到基于启发式规则的方法，再发展到基于机器学习的方法。图 13-3 是材料科技文献自然语言处理流程^[34]，第一步是文本语料库的获取；第二步是文本预处理与分词；第三步是主题归纳与分类，筛选出文档中包含目标信息的有效段落（句子）；第四步是命名实体识别，将分词得到的词语识别为特定的信息类别；第五步是对上一步得到的实体进行关系抽取与实体链接。

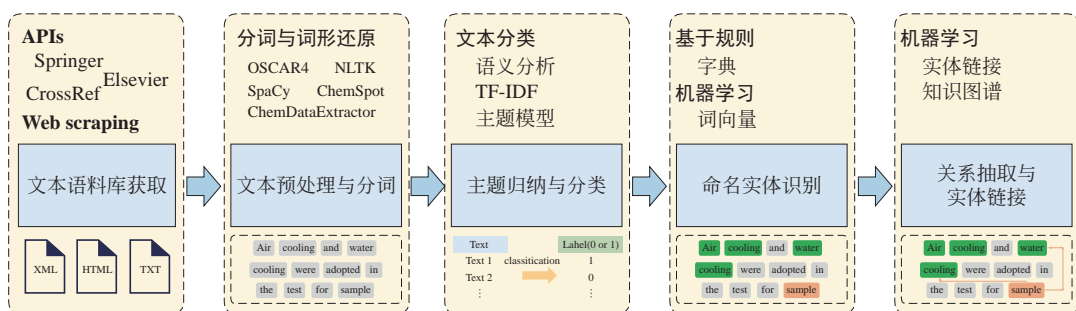


图 13-3 材料科技文献自然语言处理流程

获取文本语料库是指根据感兴趣的文章主题获取相关的语料，用于后续信息的检索和抽取。早期的数字化内容主要储存在便携式文档格式（Portable Document Format, PDF）中，这些内容可能被保存为图像，给大规模的信息抽取带来了难以克服的困难。将 PDF 转化为纯文本仍然是一块具有挑战性的研究领域^[35]，其中主要的困难是文本块的排序和字符转化。20 世纪 90 年代中期以后，大多数期刊和出版商以超文本标记语言（HTML）或可扩展标记语言（XML）的形式提供文章内容，包括文章的全文内容和元数据（期刊名称、标题、摘要和作者姓名）。HTML 和 XML 更易于准确转换为纯文本格式，所以绝大多数材料数据的自动抽取均基于标记语言格式的论文开展^[36,37]。

获取文本语料后，需要对文本进行一系列预处理操作，进而可通过命名实体识别、关系抽取与实体链接等步骤处理文本信息。文本切分是预处理的一种形式，它将文本分割成句子、短语、单词或词块的集合，之后进行单体或序列化处理。材料科学领域术语复杂且形式多样，通常由多个单词、符号和其他类型的结构实体组合而成。例如，使用了逗号的化学和材料名称 $(Y, In) BaCo_3ZnO_7$ 、 $(La_{0.8}Sr_{0.2})_{0.97}MnO_3$ 和 $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 等，使用了冒号的名称 $LiSr_{1-x}PO_4: Eu$ ，或使用了运算符或连字符的名称 $(1-x)Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_{3-x}BaTiO_3$ 和 Ti-64 等，这些情况给自然语言通用分词方法的适用性带来很大挑战，因此研发适用于材料科学领域的分词方法与工具，会对下游实体识别与关系抽取任务产生重要的影响^[36-38]。科学领域文献中常用的分词工具有 OSCAR4^[39]、ChemDataExtractor^[40]、ChemSpot^[41] 和 BANNER 等分词器^[42]。

文档分割和段落分类方法可精确实现文章某一个部分信息的获取，例如摘要、全文、表

格或者图表。可通过有监督的方法，例如神经网络，基于标记语料训练文本分类器实现目标段落、表格或图表的分类。Huo 等^[43]利用基于概率的方法，例如潜在狄利克雷分配（Latent Dirichlet Allocation, LDA）算法，从数百万篇文章中无监督地抽取出句子中描述实验步骤的关键词。LDA 算法为每个句子提供一个主题概率分布，Huo 等进一步将各个句子的主题按顺序连接形成主题序列作为特征，人工标记合成步骤类型并训练随机森林模型，成功对不同类型的合成步骤进行了分类。

命名实体识别的一般方法包括字典查找、基于规则的方法和机器学习方法。材料科学领域中的命名实体识别需要将这三种方法有效结合，才能实现准确率和召回率之间的平衡。基于字典和规则的方法开发起来烦琐，而且不容易泛化；利用有监督的机器学习模型进行命名实体识别通常依赖于标记语料，需要详细的标记指南以及大量人工标记的数据进行训练。并且通常要选择能够处理上下文信息的、时序的（通常是双向的）机器学习模型来综合考虑前序和后续单词所提供的信息。材料科学领域中基于机器学习的命名实体识别工作最初由 Kim 等完成^[37]，Kononova 等在此基础上使用双向长短期记忆神经网络和条件随机场模型（BiLSTM-CRF）通过两步法成功实现了材料命名实体识别^[36]。

实体关系抽取是在命名实体识别之后获取目标实体之间的关系。在材料科学领域，实体关系通常通过依存解析的方法进行抽取。基于机器学习的有监督方法需要对实体之间的关系进行大量语料标记，通过计算实体向量相似度来衡量实体间的相似性。“雪球”（Snowball）算法是一种半监督的实体关系抽取方法，人工提供种子实体对，利用聚类算法对包含种子的句子关系模式进行学习^[44]，将新句子与已学到的关系模式比较，从而从新句子中获取新的实体关系。命名实体链接将从文本中提取的实体关系与存储在已有数据库中的数据信息联系起来。自然语言处理领域已有一些成熟通用的工具包，如 NLTK^[45]、SpaCy^[46]、Stanford CoreNLP^[47]、AllenNLP^[48] 和 OpenNLP^[49]。此外，单词的向量表示技术也发展迅速，例如 BERT 模型^[50]。利用材料科技文献对 BERT 模型进行增量训练，有望提高化学和材料实体识别的准确性^[51]。

自然语言处理技术在材料科学领域中尚处于起步阶段，近年来，在聚合物^[52-54]、居里和奈耳磁性相转变温度^[38]、复杂氧化物的脉冲激光沉积工艺条件等信息的自动抽取中进行了探索性尝试^[55]。材料、工艺路线及材料性能是目前主要的抽取内容。基于 ChemDataExtractor 工具，Court 等^[38]从大约 7 万篇化学和物理领域的文献中抽取了近 40000 种化合物及其居里和奈耳磁性相转变温度数据。这些数据描述了铁磁相变和反铁磁相变的温度。Greene L 等^[56]通过自然语言处理方法自动抽取复杂氧化物的脉冲激光沉积工艺条件（衬底、厚度、生长温度、重复速率和氧气分压）、物理特性 [临界温度 (T_c)] 和功能特性（通量和残余极化）的数据，并利用了众包法来进行错误检测。Kononova 等^[36]自动从 50000 多个段落中提取约 20000 条合成信息，包括目标产物、反应前驱物、合成操作和条件等信息。Kim 等^[37]从包含 30 种不同氧化物体系的 64 万篇期刊文章的正文部分成功提取化学合成参数。Jensen 等^[57]将 70000 篇相关文章输入到自动化的数据抽取流程中，获取了凝胶合成的条件信息以及针对锆基沸石的 1200 种合成路线。Wang 等^[58]提出了一种自然语言处理自动化流水线，从近 14000 篇文章的文本与表格中自动抽取高温合金的化学成分及 γ' 溶解温度、密度、固相线温度和液相线温度数据 2000 余条，开发出基于规则的命名实体识别方法、基于启发式的多关系抽取算法以及通用的

表格抽取工具，实现在小语料量条件下的高温合金信息抽取仍具有较高的准确率和召回率。

自动化、高精度地抽取材料数据并形成数据库后，可利用机器学习从中发现材料未知现象与规律，从而指导材料设计。首先，对抽取得到的数据集进行可视化分析来探索其中数据的变化趋势。例如，Hiszpanski 等^[59]利用从 35000 篇金属纳米材料合成文章中提取的数据开发出一个可视化工具，辅助探索某一化学物质如何根据指定纳米材料的形态和组成变化而变化。Kononova 等^[36]通过对抽取的反应数据集进行可视化来洞察固态合成反应的本质，发现碱离子和过渡金属阳离子通常用于二元氧化物、氮化物、硫化物、碳酸盐等特定前驱物的反应中，同时固态合成中的反离子控制了前驱体熔化或分解的温度，可对合成过程进行指导。其次，利用机器学习对获得的数据进行深层次分析与应用。Court 和 Cole 等利用自动获取的铁磁相变和反铁磁相变的温度，对钙钛矿型氧化物和磷族化合物超导体进行了研究，精准地重构磁性和超导相图，并对相变温度进行预测，最终发现具有优异性能的未知化合物^[38]。

除了数据抽取以外，科学家们还利用自然语言处理技术基于已报道的研究文献进行知识萃取，直接学习材料科学领域中隐含着的新理念和新材料。Tshitoyan 等^[60]采用了一种无监督的方法将已发表文献中的材料科学知识有效地编码为信息密集的单词嵌入，成功提取了元素周期表内隐含的知识以及材料结构和性质之间的关系，成功发现了新的热电材料，证明未来发现的知识大概率嵌入在过去的出版物之中，此方法能在材料被报道出来之前为某些功能或者应用推荐材料。

如今，自然语言处理技术和信息抽取在材料科学领域还处于早期发展阶段，还需要科学家不断努力去标记大量语料、建立领域相关的抽取算法和针对科学语料构建依存解析器。随着自然语言处理技术在材料科技领域的不断完善和强化，已发表的非结构化文献中隐含的信息宝藏终将被成功抽取出来，为材料数据资源积累不断“造血”。

13.4.2 / 材料数据库技术

材料数据库建设的过程是对材料科学问题的抽象过程，这一抽象过程通常要经历两个步骤：①从现实世界到信息世界的抽象过程，②从信息世界到机器世界的抽象过程^[61]。第一步抽象由材料科学家和数据库工程师协作完成，材料科学家通过认知抽象构建能够描述材料实体、属性和联系的概念模型，数据库工程师通过对概念模型进行范式化和约束处理，最终形成信息世界的逻辑模型。第二步抽象过程由数据库工程师借助数据库管理系统（Database Management System, DBMS）将逻辑模型转化为软件支持的物理模型，如 MySQL^[62]、Oracle^[63]、PostgreSQL^[64] 和 MongoDB^[65] 等。材料数据的存储方式由数据库管理系统决定。

DBMS 分为关系数据库管理系统（RDBMS）和 NoSQL 系统两类^[66]。RDBMS 使用表来表达数据以及这些数据之间的联系，每个表有多个列，每个列有唯一的名字，表中的一行代表的是这些列之间的联系，表是行的集合。由于二维表具有逻辑表达能力和数学运算能力，RDBMS 在多字段组合查询和数据一致性上表现良好，但因需要严格遵循数据格式与长度规范，RDBMS 关系模式的可扩展性很低。此外，关系型数据库数据读写必须经过结构化查询语言解析，对数据做读写或修改数据结构时需要加锁，影响并发操作效率，所以 RDBMS 在写入和更新频繁的高并发下的能力存在瓶颈^[67]。

NoSQL 系统无须预定义关系模式，易于扩展、可伸缩性强，在高并发、大数据下读写优

势显著^[68]。典型的 NoSQL 系统包括键值存储系统、列存储系统、文档存储系统和图存储系统。对于不支持开放数据上传的数据库，材料数据以专业机构进行收集、录入和管理为主，数据录入并发性和数据库关系模式更新频率低，所以数据存储以 RDBMS 为主。在人工智能与机器学习技术的推动下，材料数据融合需求加剧，在社区内进行数据上传、高并发数据写入、数据关系模式异构的功能要求不断涌现，RDBMS 系统开始“力不从心”：

- ① 材料科学家与数据库工程师频繁密切沟通，致使材料数据库的设计与构建门槛高；
- ② 数据存储逻辑模型和物理模型更改需要数据库工程师完成，数据库可扩展性低；
- ③ 通过应用程序访问数据库需要预先掌握数据库的设计模式，致使数据交换与集成难度大。

因此，许多材料数据库开始采用 NoSQL 系统进行数据归档与存储，例如 Materials Project 利用 MongoDB 数据库系统进行数据存储^[14]。

随着用户自定义数据描述方式的需求的不断增加，基于 NoSQL 系统的模板化数据存储系统逐渐成为多数据资源与应用开放互联和无缝共享的基础，通过提供可重用的数据类型进行数据模板的自定义，满足不同工程应用、团体、机构和个人的个性化数据表达需求，实现材料数据模式的事后定义和标准化存储，例如 Materials Data Curation System^[18] 和 MGEDATA^[30]。Materials Data Curation System 由美国 NIST 开发，提供了包含双精度浮点数值型、单位型、不确定性型等可重用的通用基础类型，支持利用基础类型组合出新的复杂数据类型，进而形成用户定制的材料数据模板进行数据上传，数据以可扩展标记语言（Extensible Markup Language, XML）的格式存储于文档数据库中^[18]。MGEDATA^[69] 是我国“十三五”期间重点研发计划“材料基因工程”重点专项建设形成的材料数据库系统，自主研发了支持用户自定义数据存储结构的动态容器技术，提供了包含字符串型、数组型、表格型、容器型和生成器型等 10 种高级通用数据类型，通过组合 10 种类型自定义数据模板，数据以 BSON 形式（Binary JSON, BSON）存储于 MongoDB 文档数据库中，满足多源异构材料数据描述和存储需要^[30]。图 13-4 展示了 RDBMS 与基于 NoSQL 的模板化数据系统在材料科学场景下的应用对比。

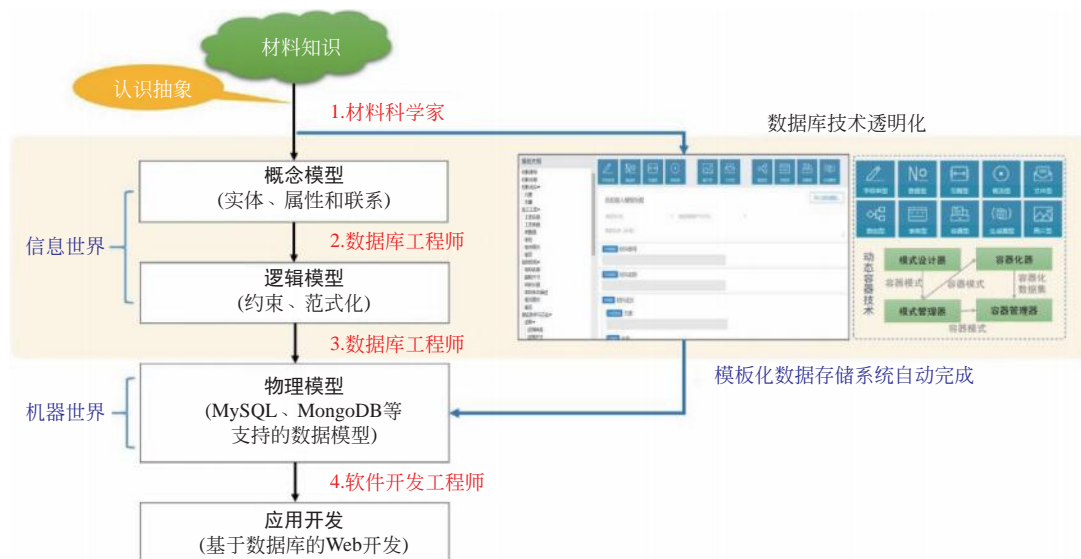


图 13-4 RDBMS 与基于 NoSQL 的模板化数据系统在材料科学场景下的应用对比

13.4.3 / 数据交换

随着材料数据种类和基础设施服务功能的不断细化,从多个数据库中获取信息变得十分必要,但是不同的材料数据库涵盖的材料类别和性能等模式各不相同,具有自定义的数据访问接口,使得跨数据库进行材料数据交换难度很大^[1]。因此,在复杂 workflow 场景下的数据调度过程中,统一的应用程序接口(Application Programming Interface, API)决定了材料数据可访问和可互操作。OPTIMADE 国际联盟提出了材料数据库访问与交换的通用规范 OPTIMADE v1.0 版本,OPTIMADE 定义了使用 URL 查询的 RESTful API,查询响应遵循 JSON: API 规范^[25]。被查询的材料数据库需要使用通过 Web 服务的代表性状态传输来支持请求,并发布服务于 OPTIMADE API 的基本 URL (Base URL),例如 <https://example.com/optimade/>,实现了 OPTIMADE API 的所有材料数据库都可被查询请求访问到。例如,从遵从 OPTIMADE 协议的 Theoretical Crystallography Open Database (TCOD) 数据库中检索包含 C、Si、Ge、Sn 和 Pb 中任意元素的数据,可在 TCOD 的 Base URL “<https://www.crystallography.net/tcod/optimade>”基础上衔接 “/v1/structures?filter=elements HAS ANY "C", "Si", "Ge", "Sn", "Pb"”进行请求,请求 URL 为:

```
https://www.crystallography.net/tcod/optimade/v1/structures? filter=elements HAS ANY "C", "Si", "Ge", "Sn", "Pb"
```

检索请求结果以 JSON 格式进行返回。目前实现 OPTIMADE 协议的国际主流材料数据基础设施有 AFLOW^[10]、Materials Cloud^[24]、Materials Project^[14]、NOMAD^[16]、Open Materials Database 和 OQMD^[29]等。

同时,区块链系统具有不可伪造、全程留痕、可以追溯、公开透明、集体维护等特征^[70],在材料数据共享和交换过程中利用区块链技术进行数据活动的监听,结合共识机制算法和智能合约技术,形成数据生命周期全记录,实现数据接入、数据检索、数据应用的可溯源和可信交换,也成为重要的数据交换模式。基于数据交换记录对数据资源质量与可靠性实施动态评价,可促进形成良性的数据生态循环。

13.4.4 / 材料数据云

云计算是利用互联网实现随时随地、按需、便捷访问共享资源池(如计算设施、存储设备、应用程序等)的计算模式,具有按需自助服务、广泛的网络访问、共享的资源池、快速弹性能力和可度量的服务特点^[71,72]。云计算根据服务模式可分为基础结构即服务(IaaS)、平台即服务(PaaS)和软件即服务(SaaS),按照部署方式可分为私有云、社区云、公有云和混合云^[73]。云计算技术可解决材料数据基础设施未来可能面对的高流量和多并发问题,实现数据服务能力的可弹性扩展。图 13-5 为材料数据库的云基础设施解决方案示意图。

材料多数据资源与应用的开放互联和无缝共享的应用场景下,云数据库可快速创建、应用可便捷部署、可数据隔离、资源可动态扩容、可容灾容错、物理分散、逻辑统一等需求对数据基础设施的技术选型提出了更高要求。在虚拟化技术的支持下,IaaS 可以为材料数据基础设施提供硬件资源的按需配置,将计算单元、存储器、I/O 设备和带宽等计算机基础设施集中起来成为一个虚拟的资源池对外提供服务,保障材料数据基础设施的容灾容错和动态可扩展。例如,Materials

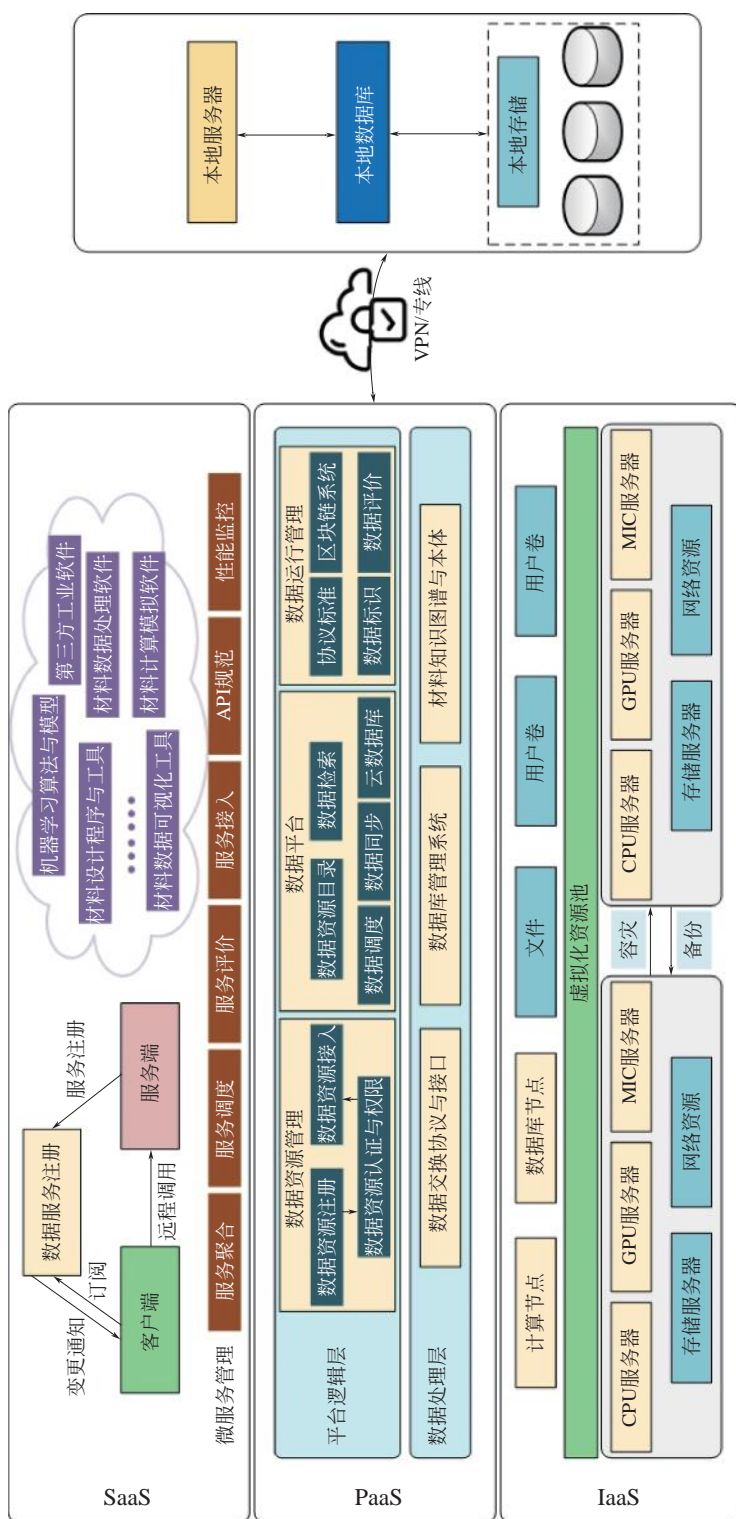


图 13-5 材料数据库的云基础设施解决方案示意

Cloud 和 MGEDATA 利用 IaaS 实现了虚拟机、容器与块存储等资源的分配与配置^[24,30]。为方便不同应用程序进行集成与共享,材料数据基础设施可利用 PaaS 提供应用程序部署与管理服务,如容器云平台,保证材料应用程序的标准化交付、应用微服务化、弹性扩缩和跨平台。SaaS 部署在 PaaS 和 IaaS 平台之上,用户可以在 PaaS 平台上开发并部署 SaaS。Materials Cloud 利用 PaaS 实现了基于 Jupyter notebooks 的在线集成开发环境,并支撑材料计算科学工具的部署与应用^[24]。

13.4.5 / 材料本体与知识图谱

材料数据的托管、检索与应用需要对材料数据进行定义,例如对于合成得到的实验样品,需要记录原材料信息、合成步骤与条件、形貌特征与性质等信息;对于计算得到的虚拟样品,需要记录计算机代码与参数设置等信息,保证实验与计算过程的可重复性和质量的可检验性。按照材料类别(金属、陶瓷、复合、有机等)、功能特性(电子、光学、力学等)、拓扑特征(表面、界面等)、工艺路线(合成、变形、热处理等)等维度,材料科学数据存在众多属性。由于材料数据的应用方式不同,对材料数据的维度与属性进行组织与管理,对于材料数据存储、表示,构建材料数据库、数据平台和基础设施尤为重要。

本体论来源于哲学领域,本体用于表示属性、事件、过程及其之间的关系。在计算机科学中,术语“本体”已被更具体地表示实体的集合、实体之间的关系以及可在社区内进行共享的推理规则^[74,75]。知识图谱是一种用图模型来描述知识和建模关系的技术,是本体的一种实现手段^[76]。在材料科学中,材料本体是对材料、性质、单位和限制及其相互关系等的表示,构建材料本体有利于数据共享过程中的标准化和可理解。同时,基于材料本体的数据检索可实现对数据的语义级搜索。此外,结合物联网技术对实验设备数据进行自动采集的过程中,实验设备产生的原始数据在封装了语义描述之后,可以更加容易地与其他设备的数据进行融合、交换和互操作,为设备之间的互联提供标准化黏结剂。

在材料科学领域,构建一个完备的材料本体是一项巨大的工程,在一些细分材料领域,材料科学家们已开展了初步尝试。目前,材料科学家们构建了原子级材料科学领域的 NOMAD Meta-info^[8,77]、ESCDF^[8] 和 OpenKIM^[78] 本体,陶瓷领域的 PLINIUS 本体,钢铁行业的 ONTORULE 本体^[79],层状复合材料领域的 SLACKS 本体,以及通用材料科学数据表示的 PIF^[80]、Ashino^[81]、EMMO^[82]、MatOnto^[83]、Premap^[84] 和 MatOWL^[85] 本体。OPTIMADE 联盟正在构建一个用于从多个材料平台访问数据的通用接口规范。或许因为材料科学子领域的多样性,定义一种通用的材料本体不太现实,但是尽可能地统一材料本体的构建标准,是材料数据基础设施走向分散建设、集中共享的关键步骤。

13.5 / 材料数据的共享与应用

13.5.1 / 材料数据准则与标准

自 2000 年以来,国际上开始尝试发起并推进材料数据的标准化协议。MatML^[86] 是由

NIST 于 2000 年发起的专为材料信息存储和交换而开发的一种可扩展的标记语言 (XML)。MatML 为其标签定义了连贯、一致的文档结构, 确保任何编程语言都可以以任何需要的方式解析和处理数据, 增强了应用程序对数据的理解和可操作性。最初, NIST 成立了工作组来描述和开发 MatML 新语言的范围和规范, 并发布 Annotated MatML DTD(MatML 1.0、2.0 和 3.0 版本) 工作草案进行意见征求。2003 年, MatML 协调委员会成立, 由 ASM International、材料信息协会牵头, 由来自学术界和工业界的专家组成。MatML 的标准化目前由结构化信息标准促进组织 OASIS 管理, 由模式开发工作组负责 MatML 标记语言的开发和维护。MatML 的架构图如图 13-6 所示。

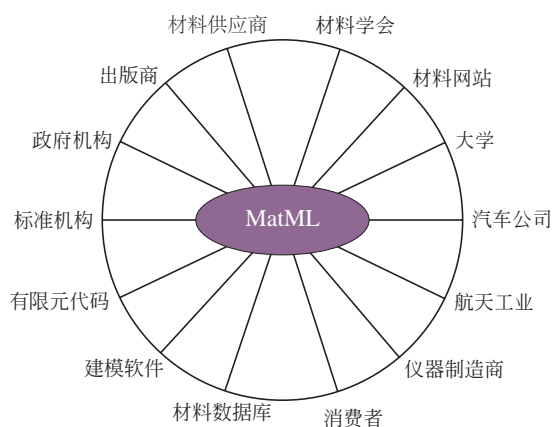


图 13-6 MatML 的架构图

2019 年, 我国中关村材料试验技术联盟发布了《材料基因工程数据通则》团体标准, 对数据产生过程中必须收集的信息与遵循的格式进行了规范, 将数据分为样品信息、源数据 (未经处理的数据) 与衍生数据 (经分析处理得到的数据) 三类, 以操作 (样品制备 / 表征 / 计算 / 数据处理) 为条目单位, 对每次操作分别赋予独立资源标识 (根据国标 GB/T 32843 或 DOI), 以确保数据满足 FAIR 原则和可再利用的要求。

2021 年, OPTIMADE 国际联盟提出了材料数据库访问与交换的通用规范 OPTIMADE v1.0 版本, OPTIMADE 定义了使用 URL 查询的 RESTful API, 查询响应遵循 JSON : API 规范^[25]。被查询的材料数据库需要使用通过 Web 服务的代表性状态传输来支持请求, 并发布服务于 OPTIMADE API 的基本 URL (Base URL), 例如 <https://example.com/optimade/>, 实现了 OPTIMADE API 的所有材料数据库都可被查询请求访问到。

13.5.2 / 材料数据流通与共享

材料关系到国家国防建设、工业生产等许多重要方面, 材料数据具有与生俱来的敏感性, 同时由于数据生产者的自我保护意识, 材料数据的开放和共享面临诸多挑战, 形成了以个人或机构为界限的“数据孤岛”, 难以快速实现规模化的集成与融合。

在数据开放共享过程中, 为永久标识数据的知识产权, 保证数据流通过程的引用和溯源,

可利用数字对象唯一标识符 (Digital Object Identifier, DOI) 系统^[87] 对材料数据资源进行知识产权标记和保护, 通过数据 DOI 注册、解析与引用, 可保护材料数据资源在开放、交换与共享中的安全性与知识产权, 目前 HTEM^[26]、MDF^[20]、NOMAD CoE^[16]、Citrine Informatics^[12] 和 MGEDATA^[30] 等已经应用 DOI 系统对上传的数据进行了标识。

在应用数据阶段, 对所用材料数据资源进行规范引用, 维护数据知识产权, 可进一步鼓励和促进材料数据的开放和共享。国际上, 全球 4 大研究机构 APA、Chicago、MLA 及 Oxford 制定了通用数据引用格式, 致力于提高数据的可识别度, 使之成为合法的、可引用的学术记录资源^[88], 如表 13-1 所示。

表 13-1 全球几大研究机构的通用数据引用格式

机构名称	数据引用格式
APA	Cool, H. E. M., and Bell, M.(2011). <i>Excavations at St Peter's Church, Barton-upon-Humber</i> [Data set]. doi: 10.5284/1000389
Chicago(notes)	Cool, H. E. M., and Bell, M. <i>Excavations at St Peter's Church, Barton-upon-Humber</i> (accessed May 1, 2011), doi: 10.5284/1000389.
MLA	Cool, H. E. M., and Bell M. "Excavations at St Peter's Church, Barton-upon-Humber." <i>Archaeology Data Service</i> , 2001. Web. 1 May 2011. < http://dx.doi.org/10.5284/1000389 >.
Oxford	Cool, H. E. M. and Bell M. (2011) <i>Excavations at St Peter's Church, Barton-upon-Humber</i> [data-set]. York: <i>Archaeology Data Service</i> [distributor] <DOI10.5284/1000389>.

13.5.3 / 材料数据的应用

(1) 材料科技创新中的应用

数据驱动的新材料研发和性能提升已在能源材料、催化材料、电子材料、金属合金等领域得到突破进展。随着信息化发展, 材料领域沉淀和积累了大量的数据信息, 包括材料基本物理化学性质和服役行为数据, 晶体结构和相结构等属性数据, 各类衍射谱图和显微组织等图像数据, 动态过程演变等的时序数据, 以及以科技文献形式呈现的文本数据。综合利用各类材料数据, 机器学习可以建立材料影响因素 (如成分和工艺等) 与目标量 (如性能、显微组织、相组成等) 间的映射机制, 捕捉影响因素之间的内在关联, 实现材料成分、结构、组织、工艺、性能的预测与新材料发现。机器学习还可以辅助材料科学家从不同尺度、不同维度认识材料的机理特征, 更深入地理解材料科学问题的本质。例如, 利用机器学习, 材料科学家们用“失败”的实验数据成功地预测了亚硒酸钒合成工艺的最优条件^[89], 捕捉到影响钙钛矿催化材料析氧反应活性的关键描述符^[90], 加速了具有更低热滞温度的铁镍基形状记忆合金的研发^[91]等, 显著降低了实验成本, 缩短了研发周期。

(2) 材料产业大数据的应用

通过材料数据库、人工智能技术、数字孪生技术的融合, 大幅度降低材料研发的成本, 显著加快了材料产业更新升级的步伐。通过材料数据应用和材料基因工程技术的发展, 新型飞机起落架材料以及新一代航空发动机用高温合金等关键材料领域均获得了重大突破和应用。

英国劳斯莱斯公司，利用数据驱动方法开发新型的商用镍基超合金，设计材料成分和热处理工艺以实现材料 11 项综合性能最优化并形成专利^[92]。日本丰田公司利用材料数据和机器学习等方法，开发了新型的锂电池系统^[93]。

各国专业的材料数据库通过材料数据的应用服务，推动了企业的创新发展。美国 Citrine Informatics 公司的材料数据平台拥有超过 17000000 材料性能 - 结构 - 工艺关系数据，支持多尺度材料计算数据，并通过人工智能引擎进行材料推荐，在功能材料、金属、玻璃、塑料、合成领域支撑产业应用。其材料数据库支撑日本松下公司快速开发了新型的有机半导体材料，帮助美国 HRL 公司在千万种粉末与纳米颗粒组合中快速筛选最佳组合并实现了航天级 3D 打印铝合金的商业化。材料数据资源的发展推动了企业自身和整个行业向数字化和智能化转型升级。瑞士的 Total Materia 号称全球最全面的材料性能数据库，覆盖 45 万种金属和非金属材料 2000 万条性能数据，面向各类企业提供材料数据商业服务，其材料数据可以直接支撑制造企业的工业仿真与生产研发。

材料数据科学的快速发展让材料科技和企业的竞争进入新的阶段和呈现新的模式。例如，美国联合储能研究中心（JCESR），利用材料大数据技术和多模式实验等，在 2012—2018 年期间开发了系列新型电池材料，成立了三家初创公司实现成果转化，期望在下一代电池材料市场竞争中占据主动位置^[94]。国际汽车行业建立了全球汽车行业材料数据系统 IMDS，从整个汽车供应链收集数据并面向企业会员服务^[95]。

（3）关键装备与重大工程健康安全管理的应用

•••

随着材料基因工程和数字孪生等技术的发展，材料数据的重要性已经贯穿于材料和产品的设计、制造、应用全生命周期管理。材料数据在关键装备或重大工程结构安全保障和运维管理中的应用也已成为国际趋势。美国通用电气公司利用材料数据进行重大工程结构或关键设备装置的健康维护，实现了远程故障诊断、寿命预测及可靠性分析；德国西门子公司将产品、工厂、系统和机器设备连接在一起，促成多源异构数据集成，在全局范围内实现信息的全面感知与分析。

当前图像识别技术和传感技术的发展进一步加强了材料在工业场景中长期服役过程的数据采集与应用，基于特定工业应用场景和材料失效模式的材料数据库推广应用等。例如，在基础设施领域，图像数据库与深度机器学习用于腐蚀形貌识别、腐蚀检测与设施完整性评估。在石油天然气、采矿、化工等设施生产安全要求高的产业，无损检测和失效案例数据库的建立，用于风险评估和失效早期控制。国际标准化组织金属与合金的腐蚀分委会 ISO/TC156、国际材料与保护协会（AMPP）均成立了专门工作组推动材料服役数据的电子化采集与材料服役数据库建设。跨国公司和研究机构也日益加强材料服役性能和设施结构完整性方面的数据库建设，并支持机器学习、数据挖掘和材料及设施装备的寿命评估。例如，挪威船级社（DNV）通过不同工业 JIP 项目分别在加拿大电厂管线上布置大量无线传感器监控材料缺陷并建立数据库用于蠕变寿命评估^[96]。美国霍尼韦尔等公司则开发了炼化装置材料数据库和寿命预测软件^[97]。英国 Rosen 公司利用大量管道智能检测数据，构建全球管道缺陷数据库，用于机器学习和风险预测^[98]。

13.6 / 问题与挑战

13.6.1 / 存在的问题

(1) 材料数据资源整合和数据体系建设尚待发展

经过多年发展，我国材料科技和产业领域已积累沉淀了大量数据，但数据生产、管理和赋值机制不健全，采集积累不完整、流通共享不畅通，分散重复、碎片化严重。由于材料数据库建设主体各异，数据库基础软件和数据关系模式选择不同，同时缺乏统一的材料数据体系架构和材料数据接口协议，使得异构数据资源整合需要针对每一个材料数据库进行访问接口的定制化开发，且难以适应数据库结构的变化更新，严重阻碍了数据资源的聚集与交换。同时，材料数据库之间缺乏可信和持续的开放与共享网络，使得材料数据无法安全流通汇聚形成规模。

(2) 材料人工智能技术和应用软件发展相对滞后

材料数据的生产周期长、成本高、敏感性强，难以形成大量的公共数据集在社区内共同维护，加之材料种类庞杂，数据异构性强，分析利用存在技术门槛。支撑数据驱动材料研发的人工智能技术和数据挖掘技术起步较晚，应用软件发展相对滞后，材料科学与数学、计算机、人工智能技术等学科仍需不断交叉融合。

(3) 材料数据标准规范、权益保障与激励机制尚显不足

材料数据库建设往往先于数据标准规范的建立，大多数材料数据库都需要自行建立规范，进行特定的数据结构和完整性约束。目前，材料数据标准规范的建设仍远落后于材料数据库的发展和数据资源的积累速率，尚缺乏材料与计算机领域的多层级数据标准，难以兼顾数据库差异性和数据交换灵活性。同时，数据发布、引用和评价机制尚未健全，缺少材料数据全生命周期的溯源与管理体系，极大地阻碍了材料数据的规范化发布和规模化聚集。

13.6.2 / 面临的挑战

(1) 如何通过顶层设计建立统一的数据资源体系

急需建立统一规划设计的材料数据资源体系，以及具有权威性、可靠性、公益性和可持续发展的国家级材料数据基础设施体系，通过建设逻辑统一和物理分散的分布式材料数据资源节点，整合碎片化材料数据资源、破除专业或地域壁垒，形成规模化的材料数据资源优势。

(2) 如何通过机制建设增强数据共享意识和生态

急需加强材料数据积累意识、数据共享文化和政策引导，建立统一的数据标准规范、数据质量与安全保障机制、数据共享激励与权益保障机制、数据贡献的信用评级机制、数据知识产权保护机制、数据价值评估与交易机制，实现“产权不变动、数据不搬家”，形成材料数据体系发展的良好政策、文化和商业生态。

(3) 如何通过技术发展支撑数据价值挖掘

急需形成对材料数据基础设施和数据管理、共享、应用、服务平台起到支撑作用的计算机与材料学科的交叉技术与工具，加强跨学科交叉、跨材料类别协作、跨地域合作，利用云技术、区块链等先进的计算机与信息技术，发展材料人工智能技术和应用软件，支持多源异构数据存储与交换、可定义数据处理与分析流程、高维数据可视分析、材料大数据应用等软件的服务化，提升材料数据利用效率和应用水平，挖掘材料数据的重要价值。

(4) 如何通过产业融合推动数据应用的可持续发展

急需加强材料数据与工业互联网的深度融合，支撑基于材料数据的数字孪生技术，建立与第三方科学计算软件和工业应用软件的无缝衔接，形成对全产业链条数字化研发与智能制造的技术支持，构建可持续发展的商业模式与生态。

13.7 急需解决的共性技术

13.7.1 材料数据基础设施关键支撑技术

当前，材料数据基础设施急需发展满足复杂多源异构材料数据分布式存储、集中共享与智能服务需求的相关技术，实现对数据集成、互联互通、开放共享、智能检索与大数据应用服务的技术支撑，具体包括以下技术。

(1) 云基础设施

利用云计算技术、虚拟化技术、容器化技术、分布式并行存储技术、自动运维技术等，结合微服务体系结构的设计与开发，形成支撑材料多源异构数据存储、管理、共享及材料大数据应用，保障材料数据基础设施可动态扩容、可数据隔离、可容灾容错、可均衡负载的通用材料数据云基础设施解决方案。设计支撑材料机器学习算法与模型、材料设计工具与软件等第三方应用的独立封装、便捷部署、灵活访问和高效调度的微服务体系结构。建立材料大数据应用程序开发和发布环境，支撑材料数据与工业软件和工业互联网的衔接，实现材料数据应用服务化。

(2) 数据资源建设、整合、接入与数据交换

通过现有材料数据库资源整合、开源材料数据收集清洗、材料文献数据信息采集挖掘、材料计算平台与测试平台数据采集接入、工业联合项目或工业企业联合共建、专题材料数据库建设等，实现多渠道材料数据资源建设。在材料数据社区内制定异构数据统一交换的应用程序接口，实现数据资源注册、接入、访问和下载，形成标准化协议。同时，通过信息安全技术对数据资源进行签名与认证，并利用数据分级和权限管理实现数据资源等级标记，从源头保证数据资源的访问界限，确保材料数据安全交换。在材料数据共享和交换过程中，利用区块链的技术优势，探索材料数据交换机制，形成材料数据生命周期全记录，实现数据接入、数据检索、数据应用的可溯源和可信交换。

(3) 材料数据库技术和软件

充分利用国家科技计划在“材料基因工程”重点专项中形成的动态容器材料数据库技术成果，持续发展支持用户自定义数据结构的材料基因工程通用数据库系统与软件，优化数据结构可嵌套、可复用的材料数据定义模型，实现用户为中心的多源异构材料数据灵活描述和存储。形成全面系统的用户级别数据库 API，利用全局逻辑视图、知识图谱、自然语义解析技术，发展物理分散的材料数据资源的统一检索与智能分析技术，为数据资源共享服务提供通用数据库系统软件，形成材料数据库软件生态。

13.7.2 / 材料数据应用关键技术

材料数据高效融合、智能挖掘、深度学习、集成建模等应用技术发展，将突破材料数据高维、分散、多模态、高噪声等特征带来的技术瓶颈，构筑材料全生命周期的大数据应用技术体系，实现材料研发-生产-应用全链条的数据驱动创新发展。

研发材料数据的文本信息自动挖掘、图像信息自动识别、材料数据清洗等技术与软件工具，建立服务于研发机构碎片化数据整合和制造业工业企业数据采集的智能化技术，提升材料数据汇聚整合能力。建立材料实验检测数据的自动采集解决方案和软件开发，支撑大量分散数据源的高效整合与集成。研发建立针对材料高效计算、集成计算、模拟仿真的数据采集自动流程算法与应用程序，支撑计算数据高效存储，减少计算数据存储冗余和资源耗费。

面向产业智能化升级需求，开展针对产品特点和产业特征的材料大数据分析和人工智能应用技术研发与定制化服务，针对新材料研发、材料理性设计、综合性能匹配、生产工艺优化、制造流程数字化和智能化、性能损伤与寿命预测、材料服役安全保障等方面，开展材料数据挖掘、机器学习、深度学习等人工智能模型、算法和软件的定制研究、开发与服务，研发材料数据机器学习自动流程算法和应用程序，研发支撑材料集成计算工程、跨尺度关联与制造流程仿真模拟等工业应用的材料数据服务技术与工具，形成材料大数据资源对新材料研发、材料设计、生产工艺优化、制造流程数字化和智能化、材料损伤与寿命预测等方面的定制化服务与技术应用。

13.7.3 / 材料数据标准规范和管理体制机制建设

针对产业特点与材料类型差异，建立材料数据标准规范体系。针对产业应用中材料属性多维度和数据关联复杂性等特征，建立分层级和衔接材料与计算机专业的材料数据标准规范、协议、模板，发布材料数据标准规范，保障数据质量和完整性。

在材料数据知识产权保护方面，建立材料数据标识体系和规范，利用数字对象唯一标识符 (DOI) 系统对材料数据资源进行知识产权永久标记和保护，通过数据 DOI 注册、解析与引用，激励材料数据资源开发、交换与共享。

在材料数据溯源方面，形成数据生命周期全记录，实现数据接入、数据检索、数据应用的可溯源和可信交换。基于数据交换记录对数据资源质量与可靠性实施动态评价，形成良性

的数据生态循环。

针对材料数据库可持续发展的运行生态和服务定位，建立长效和可持续的数据共享、数据管理、数据服务、数据安全、知识产权保护和数据评价等机制和措施，形成面向产业应用市场化服务的材料数据价值赋值和商业化模式，构建材料大数据资源整合与服务的良性自主发展生态，营造积极良好的数据共享环境和对产业发展的支撑。

13.8 / 未来发展

(1) 2035 年技术预判

到 2035 年，我国将建成国家级的材料数据资源体系，建成统一开放共享、集中管理服务的国家材料数据中心与规模化材料专题数据资源节点的架构，建立材料数据标准规范体系，实现开放共享服务，推动材料数据在材料科技创新和企业新产品研发中的应用。

材料数据库满足复杂多源异构材料数据分布式存储、集中共享与智能服务需求，形成物理分散、逻辑统一、多节点融合的材料数据的云-端-地一体化数据安全、调度优化、开放共享，支持分布式数据库节点的数据集成、互联互通、统一智能检索与应用服务。

在材料数据衍生获取方面，形成先进、成熟的材料文本和图像数据挖掘技术、数据增强技术、数据清洗技术、各类数据自动采集技术等，并在增强材料数据衍生渠道、提高材料数据质量、高效获取数据等方面实现应用。

在材料数据资源整合方面，实现材料研发-生产-服役全寿命周期数据产生、存储、融合与全流程应用，形成材料数据的智能管理及与工业互联网的技术衔接，服务制造流程数字化。

在材料数据分析挖掘方面，支撑材料高效计算与集成计算、材料高效和智能实验技术的迭代发展，实现生产制造流程的状态监控、在线诊断、智能寻优等技术集成，服务制造业智能化。

在材料数据的应用方面，实现材料数据产品的广泛开发，形成材料大数据资源对材料研发—生产—制造—应用全链条的高效支撑，显著提升材料数据的工程应用水平。

(2) 应用场景

通过国家级材料数据资源体系的系统建设与共享服务，数据在材料科技创新和产业发展中的驱动作用将迅速显现。随着材料数据资源体系的建设，利用互联网、区块链和云技术实现信息和数据的互联互通，材料数据能够逐渐满足新材料产品研发、智能制造、产业升级、重大工程安全管理的发展需求。面向新能源、集成电路和信息通信等新兴产业，支撑数据驱动的新材料研发与应用；面向钢铁、有色、建材、化工、轻工、纺织等基础材料行业，突破材料数据短板，保障材料基础数据信息可靠性和可持续积累；面向航天工程、海洋工程、能源输送、交通建设等，支撑基于材料数据的重大工程和设施安全保障。

面向金属、无机非金属、有机高分子等材料体系，围绕前沿材料和高端关键材料、基础材料和新兴战略材料产品，形成数 10 个专题材料数据资源节点，涵盖材料设计研发—生产制造—应用服役的全链条的计算数据、实验数据、工程应用数据和服役评价数据，通过互联互通，实现开放共享服务。建成集数据采集、共享、应用、服务为一体，具有国际领先水平的国家级材料数据中心，面向科技创新和企业发展需求，支撑材料数据的规模化应用，在高端关键材料和材料产品研发中获得突破，形成数据驱动材料创新发展的范式，推动新材料研发模式的数字化和智能化变革，为我国新材料的原始创新能力和水平达到国际先进水平提供基础性技术保障。

根据我国产业数字化升级和制造业智能化发展的实际需求，通过材料数据资源和大数据技术的工程应用与科技服务，发挥数据规模化优势，实现材料数据资源基础对工业互联网、制造业数字化转型和智能化升级的有效支撑。

(3) 战略思考

围绕材料创新发展和产业智能化变革的需求，材料数据资源驱动研发的新材料、新配方、新工艺，材料大数据技术，材料数据衍生软件、自动流程数据平台、智能化监控诊断系统等技术创新成果将不断涌现。通过技术成果转化和创新激励，培育和孵化材料数据资源服务、新材料研发、材料大数据技术等科研创新企业，构建材料大数据应用的研发服务体系与可持续发展生态，将激发材料大数据资源与技术的无限潜能。

参考文献

- [1] Himanen L, Geurts A, Foster A S, et al. Data-Driven Materials Science: Status, Challenges, and Perspectives[J]. *Adv Sci (Weinh)*, 2019, 6(21): 1900808.
- [2] Kalidindi S R, Brough D B, Li S, et al. Role of materials data science and informatics in accelerated materials innovation[J]. *MRS Bulletin*, 2016, 41(08): 596-602.
- [3] Villars P, Berndt M, Brandenburg K, et al. The pauling file[J]. *Materials Science Forum*, 2004, 443-444: 357-360.
- [4] Materials Platform for Data Science [Internet]. Available from: <https://mpds.io>.
- [5] Granta Design [Internet]. Available from: <https://www.grantadesign.com/>.
- [6] NIMS Materials Database (MatNavi) [Internet]. Available from: https://mits.nims.go.jp/index_en.html.
- [7] SpringerMaterials [Internet]. Available from: <https://materials.springer.com>.
- [8] Ghiringhelli L M, Carbogno C, Levchenko S, et al. Towards efficient data exchange and sharing for big-data driven materials science: metadata and data formats[J]. *npj Computational Materials*, 2017, 3(1): 1-9.
- [9] Curtarolo S, Setyawan W, Wang S, et al. AFLOWLIB.ORG: A distributed materials properties repository from high-throughput ab initio calculations[J]. *Computational Materials Science*, 2012, 58: 227-235.
- [10] A Flow—Automatic FLOW for Materials Discovery [Internet]. Available from: <https://afowlib.org>.
- [11] O'Mara J, Meredig B, Michel K. Materials Data Infrastructure: A Case Study of the Citrination Platform to Examine Data Import, Storage, and Access[J]. *Jom.*, 2016, 68(8): 2031-2034.
- [12] Citrine Informatics [Internet]. Available from: <https://citrine.io/>.
- [13] Jain A, Ong S P, Hautier G, et al. Commentary: The Materials Project: A materials genome approach to accelerating materials innovation[J]. *APL Materials*, 2013, 1(1): 011002.
- [14] Materials Project [Internet]. Available from: <https://materialsproject.org>.
- [15] Draxl C, Scheffler M. NOMAD: The FAIR concept for big data-driven materials science[J]. *MRS Bulletin*, 2018; 43(9): 676-682.
- [16] The Novel Materials Discovery (NOMAD) Laboratory [Internet]. Available from: <https://nomad-coe.eu/>.

- [17] NOMAD Repository [Internet]. Available from : <https://repository.nomad-coe.eu>.
- [18] MDCS [Internet]. Available from : <https://github.com/usnistgov/MDCS>.
- [19] Blaiszik B, Chard K, Pruyne J, et al. The Materials Data Facility: Data services to advance materials science research[J]. JOM., 2016, 68(8): 2045-2052.
- [20] The Materials Data Facility (MDF) [Internet]. Available from: <https://materialsdatafacility.org>.
- [21] Saal J E, Kirklin S, Aykol M, et al. Materials design and discovery with high-throughput density functional theory: the open quantum materials database (OQMD) [J]. JOM., 2013, 65(11): 1501-1509.
- [22] Materials Data Resources [Internet]. Available from : <https://www.nist.gov/mgi/materials-data-resources>.
- [23] Talirz L, Kumbhar S, Passaro E, et al. Materials Cloud, a platform for open computational science[J]. Scientific Data., 2020, 7(1): 299.
- [24] Materials Cloud [Internet]. Available from : <https://www.materialscloud.org/>.
- [25] Andersen C W, Armiento R, Blokhin E, et al. OPTIMADE: an API for exchanging materials data[J]. Scientific Data, 2021. arXiv: 2103.02068.
- [26] HTEM [Internet]. Available from : <https://htem.nrel.gov>.
- [27] De Jager PL, Ma Y, McCabe C, et al. A multi-omic atlas of the human frontal cortex for aging and Alzheimer's disease research[J]. Scientific data. 2018, 5(1): 1-13.
- [28] NIMS Materials Database (MatNavi) [Internet]. Available from: https://mits.nims.go.jp/index_en.html.
- [29] OQMD [Internet]. Available from: <https://oqmd.org>.
- [30] MGEDATA [Internet]. Available from : www.mgedata.cn.
- [31] Materials Design Inc [Internet]. Available from : <https://www.materialsdesign.com/>.
- [32] MaterialsZone [Internet]. Available from : <https://www.materials.zone>.
- [33] Butler K T D D, Cartwright H, Isayev O, et al. Machine learning for molecular and materials science [J]. Nature, 2018, 7715(559): 547-555.
- [34] Olivetti E A, Cole J M, Kim E, et al. Data-driven materials research enabled by natural language processing and information extraction[J]. 2020, 7(4): 041317.
- [35] Ramakrishnan C, Patnia A, Hovy E, et al. Layout-aware text extraction from full-text PDF of scientific articles[J]. Source code for biology and medicine. 2012, 7(1): 1-10.
- [36] Kononova O, Huo H, He T, et al. Text-mined dataset of inorganic materials synthesis recipes[J]. 2019, 6(1): 1-11.
- [37] Kim E, Huang K, Saunders A, et al. Materials synthesis insights from scientific literature via text extraction and machine learning[J]. 2017, 29(21): 9436-9444.
- [38] Court C J, Cole J M. Auto-generated materials database of Curie and Néel temperatures via semi-supervised relationship extraction[J]. Scientific Data, 2018, 5(1): 1-12.
- [39] Jessop D M, Adams S E, Willighagen E L, et al. OSCAR4: a flexible architecture for chemical text-mining[J]. 2011, 3(1): 1-12.
- [40] Swain M C, Cole J M J. ChemDataExtractor: a toolkit for automated extraction of chemical information from the scientific literature[J]. Journal of chemical information and modeling, 2016, 56(10): 1894-1904.
- [41] Rocktäschel T, Weidlich M, Leser U J B. ChemSpot: a hybrid system for chemical named entity recognition [J]. Bioinformatics, 2012, 28(12): 1633-1640.
- [42] Leaman R, Gonzalez G. BANNER: an executable survey of advances in biomedical named entity recognition [J]. Biocomputing 2008: World Scientific, 2008: 652-663.
- [43] Huo H, Rong Z, Kononova O, et al. Semi-supervised machine-learning classification of materials synthesis procedures[J]. npj Computational Materials. 2019, 5(1): 1-7.
- [44] Hawizy L, Jessop D M, Adams N, et al. ChemicalTagger: A tool for semantic text-mining in chemistry[J]. Journal of Cheminformatics 2011, 3(1): 1-13.
- [45] NLTK [Internet]. Available from: <http://www.nltk.org>.
- [46] Spacy [Internet]. Available from: <https://spacy.io>.
- [47] CoreNLP [Internet]. Available from : <https://stanfordnlp.github.io/CoreNLP>.
- [48] AllenNLP [Internet]. Available from : <https://allennlp.org>.
- [49] OpenNLP [Internet]. Available from : <https://opennlp.apache.org>.
- [50] Devlin J, Chang M-W, Lee K, et al. Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding[OL]. 2018.arXiv: 1810. 04805.
- [51] Beltagy I, Cohan A, Lo K. Scibert: Pretrained contextualized embeddings for scientific text[J]. 2019, 1(1.3): 8.arXiv: 1903. 10676v2.
- [52] Kim C, Chandrasekaran A, Huan T D, et al. Polymer genome: a data-powered polymer informatics platform for property predictions[J]. 2018, 122(31): 17575-85.

- [53] Tchoua R B, Ajith A, Hong Z, et al. Creating training data for scientific named entity recognition with minimal human effort. *International Conference on Computational Science*[J]. Springer, 2019: 398-411.
- [54] Audus D J, de Pablo J J. Polymer informatics : Opportunities and challenges[J]. *ACS Macro Lett*, 2017, 6(10): 1078-1082.
- [55] Young S R, Maksov A, Ziatdinov M, et al. Data mining for better material synthesis: The case of pulsed laser deposition of complex oxides[J]. *Journal of Applied physics* 2018, 123(11): 115303.
- [56] Greene L, Lubensky T, TIRRELL M, et al. *Frontiers of Materials Research : A Decadal Survey*[J]. No. DOE-NASEM-16257. The National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, 2019.
- [57] Jensen Z, Kim E, Kwon S, et al. A machine learning approach to zeolite synthesis enabled by automatic literature data extraction[J]. *ACS Cent. Sci.*, 2019, 5(5): 892-899.
- [58] SuperalloyDigger [Internet]. Available from: <http://superalloydigger.mgedata.cn/#/home>.
- [59] Hiszpanski A M, Gallagher B, Chellappan K, et al. Nanomaterial synthesis insights from machine learning of scientific articles by extracting, structuring, and visualizing knowledge[J]. *J. Chem. Inf. Model*, 2020, 60(6): 2876-2887.
- [60] Tshitoyan V, Dagdelen J, Weston L, et al. Unsupervised word embeddings capture latent knowledge from materials science literature[J]. *Nature*, 2019, 571(7763): 95-98.
- [61] Silberschatz A, Korth H F, Sudarshan S. *Database system concepts*[M]. New York: McGraw-hill, 1997.
- [62] DuBois P. *MySQL*[M]. UK: Pearson Education, 2008.
- [63] Greenwald R, Stackowiak R, Stern J. *Oracle essentials : Oracle database 12c*[J]. O'Reilly Media, Inc., 2013.
- [64] Momjian B. *PostgreSQL : introduction and concepts* [M]. New York: Addison-Wesley, 2001.
- [65] Chodorow K. *MongoDB-the definitive guide : powerful and scalable data storage*[J]. O'Reilly Media, Inc., 2013.
- [66] Andlinger P. RDBMS dominate the database market, but NoSQL systems are catching up[J]. *DB-Engines.com*, 2013.
- [67] Phaneendra S V, Reddy E M. Big Data-solutions for RDBMS problems-A survey[J]. 12th IEEE/IFIP Network Operations & Management Symposium (NOMS 2010) Osaka Japan, 2013, Apr 19-23.
- [68] Strauch C J S H d M, Tech. Rep. Nosql whitepaper. Stuttgart: Hochschule der Medien, Tech. Rep. 2014.
- [69] Liu S, Su Y, Yin H, et al. An infrastructure with user-centered presentation data model for integrated management of materials data and services[J]. *npj Computational Materials*, 2021, 7(1): 1-8.
- [70] Nofer M, Gomber P, Hinz O, et al. *Engineering IS* [J]. *Blockchain*, 2017, 59(3): 183-7.
- [71] Marston S, Li Z, Bandyopadhyay S, et al. *Cloud computing—The business perspective*[J]. *Social Science Economy*, 2011, 51(1): 176-189.
- [72] Wang L, Von Laszewski G, Younge A, et al. *Cloud computing : a perspective study*[J]. *New Generation Computing*, 2010, 28(2): 137-146.
- [73] Jadeja Y, Modi K. *Cloud computing-concepts, architecture and challenges*[J]. 2012 *International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET)*, 2012: 877-880.
- [74] Allemang D, Hendler J. *Semantic web for the working ontologist : effective modeling in RDFS and OWL*[J]. Elsevier, 2011: 13-25.
- [75] Feigenbaum L, Herman I, Hongsermeier T, et al. *The semantic web in action*[J]. *Scientific American*. 2007, 297(6): 90-97.
- [76] Ehrlinger L, Wöß W J S. *Towards a Definition of Knowledge Graphs*[J]. *SEMANTiCS (Posters, Demos, SuCESS)*. 2016, 48(1-4): 2.
- [77] *NOMAD Meta Info* [Internet]. Available from : https://metainfo.nomad-coe.eu/nomadmetainfo_public/archive.html.
- [78] Tadmor E B, Elliott R S, Sethna J P, et al. The potential of atomistic simulations and the knowledgebase of interatomic models[J]. *Jom.*, 2011, 63(7): 17.
- [79] de Sainte Marie C, Escudero M I, Rosina P. The ONTORULE project : where ontology meets business rules[J]. *International Conference on Web Reasoning and Rule Systems*, 2011: 24-29.
- [80] Premkumar V, Krishnamurty S, Wileden J C, et al. A semantic knowledge management system for laminated composites[J]. *Computing Reviews*, 2014, 28(1): 91-101.
- [81] Ashino T. *Materials ontology : An infrastructure for exchanging materials information and knowledge*[J]. *Data Science Journal* 2010, 9: 54-61.
- [82] Council EMM. *Report on Workshop on Interoperability in Materials Modelling*[R]. 2017.
- [83] Cheung K, Drennan J, Hunter J. *Towards an Ontology for Data-driven Discovery of New Materials*[M]. *AAAI Spring Symposium : Semantic Scientific Knowledge Integration*, 2008.
- [84] Das P, Yeddula R R, Reddy S. A knowledge Model Driven Framework for Integrated Computational Materials Engineering[J]. *ICME*, 2016, 2016: 27-32.

- [85] Zhang X, Hu C, Li H. Semantic query on materials data based on mapping MATML to an OWL ontology [J]. *Data Science Journal*, 2009, 8: 1-17.
- [86] Kaufman J G, Begley E F. MatML: A Data Interchange Markup Language[J]. *Advanced Materials And Processes*, 2003.
- [87] Paskin N. Digital object identifier(DOI®) system[J]. *Encyclopedia of library and information sciences*. 2010, 3: 1586-1592.
- [88] Ball A, Duke M. Data citation and linking[J]. *Digital Curation Centre*, 2011.
- [89] Raccuglia P, Elbert K C, Adler P, et al. Machine-learning-assisted materials discovery using failed experiments[J]. *Nature*, 2016, 533(7601): 73-76.
- [90] Weng B, Song Z, Zhu R, et al. Simple descriptor derived from symbolic regression accelerating the discovery of new perovskite catalysts[J]. *Nature Communication*, 2020, 11(1): 3513.
- [91] Xue D, Balachandran P V, Hogden J, et al. Accelerated search for materials with targeted properties by adaptive design[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11241.
- [92] Conduit B D, Jones N G, Stone H J, et al. Design of a nickel-base superalloy using a neural network[J]. *Materials & Design*, 2017, 131: 358-365.
- [93] Dave A, Mitchell J, Kandasamy K, et al. Autonomous Discovery of Battery Electrolytes with Robotic Experimentation and Machine Learning[J]. *Cell Reports Physical Science*, 2020, 1(12): 100264.
- [94] Green M L, Choi C L, Hatrick-Simpers J R, et al. Fulfilling the promise of the materials genome initiative with high-throughput experimental methodologies[J]. *Applied Physics Reviews*, 2017, 4(1): 011105.
- [95] Pollok I, Temple B, Edgar D, et al. The International Material Data System: Global Data Collection for the End-of-life Vehicle Management[J]. *Proceedings of the 34th International MATADOR Conference*, 2004: 385-392.
- [96] Keserovic A, Fosselie T, Lilleengen J I, et al. From Joint Industry Project to Digital Business - The CUI Risk Manager[J]. *Houston: NACE International*, 2019: 1-10.
- [97] Srinivasan S, Constantineau P, Yap K M. Improved Mechanical Integrity Through Real-Time Process Monitoring and Predictive Analytics[R]. 2019.
- [98] Smith M, Barton L, Pesinis K, et al. Intelligent Corrosion Prediction Using Bayesian Networks[R]. 2019.



作者简介

姜雪，工学博士，现任职于北京科技大学。长期从事材料数据库与大数据技术交叉学科研究工作，具体包括材料数据库技术，机器学习辅助材料设计，以及材料文本挖掘等材料科学前沿共性技术研究。参与国家重点研发计划课题、国家 863 计划课题、北京市科技支撑计划课题、广东省重点研发计划课题，以及多项企业合作课题。在 *Scripta Mater.*、*Calphad*、*Comp. Mater. Sci.* 等期刊发表文章 10 余篇。

张雷，工学博士，研究员，博士生导师，国家重点研发计划项目首席科学家。2005 年博士毕业于浙江大学材料系，2013 年入选北京市青年英才计划，2015 年英国利兹大学访问学者。现任职于北京科技大学。担任中国腐蚀与防护学会环境敏感断裂专业委员会秘书长、全国钢标委腐蚀分委会委员、国家认可委 CNAS 技术专家、ISO/TC156WG2 技术专家。长期从事深海、深地、油气、燃气、氢能、电力、管网等工业材料服役安全保障、材料数据基础设施建设关键技术、材料工业大数据应用等研究，主持国家重点研发计划项目、国家自然科学基金、内蒙古自治区重大专项、国际合作项目及数 10 项企业合作项目等。发表 *SCI/IEI* 论文 70 余篇，参编论著 4 部，获专利 20 项、参编国标 3 部、获省部级及行业科技奖励 3 项。

宿彦京，工学博士，教授，博士生导师，国家重点研发计划项目首席科学家。2000 年获得北京科技大学材料物理博士学位，同年入选北京市科技新星计划，2005 年入选教育部新世纪人才计划。现任职于北京科技大学。担任“十三五”国家工业与信息化部产业发展促进中心“材料基因工程关键技术与支撑平台”和“制造基础技术与关键部件”重点专项专家委员会委员。“十四五”科技部“稀土新材料”

重点研发计划实施方案专家组成员。主要从事工程结构安全性和寿命预测，以及材料数据库和大数据技术研究，在 *Acta Mater. Corr. Sci.* 和 *Nano. Lett.* 等刊物共发表论文 240 余篇，合作出版专著 4 部，获省部级科技进步一、二等奖 4 项。主持完成国家重点研发计划“材料基因工程专用数据库和大数据”项目，研发出材料复杂异构数据存储技术，形成集数据库、数据采集和机器学习软件一体化的材料智能数据库系统，建成了材料基因工程数据库和数据服务平台（www.MGEdata.cn）。

第 14 章

推动新材料产学研用协同发展 发展的战略研究

曾 昆

14.1

我国新材料产业产学研用发展现状

(1) 我国新材料产学研用合作现状

产学研用合作是企业、高校、科研机构以技术创新和应用为目标，以资源共享、优势互补为基础，以合作研发、利益共享、风险共担为原则，投入各自优势资源和能力，在政府、科技服务中介机构、金融机构等相关主体的协同支持下，在一定时期内组合形成利益共同体，共同开展科技创新，推进成果转化。通常地，企业是技术创新和应用的需求方，高校、科研机构是技术供给方，产学研用合作实现了技术创新所需各种要素的有效配置。产学研用合作有时也被称为产学研合作、产学研结合、产学研用结合等，这些概念之间密切关联，产学研用合作更强调用户企业的参与，此章节我们从产学研用角度进行分析。

产学研合作最早产生于 20 世纪 50 年代的美国硅谷，形成了“硅谷模式”，后来被美国、日本、韩国、中国台湾等多个国家和地区学习借鉴。我国产学研合作的探索开始于 20 世纪 80 年代的科技攻关，随着我国科技和经济发展需要，我国产业界和高校、科研机构、政府之间的产学研合作不断形成和发展，历经了产学研联合、产学研结合、产学研用结合、产学研协同创新四个阶段，产学研合作向深度融合、多元融合、一体化发展方向演进。

新材料产业是典型的知识密集型产业，研发投入高、研发周期长、产业风险高，新材料或新产品的研发创新离不开企业、高校、科研机构、下游用户等多方主体的协同参与和支持。我国一直高度重视新材料产业产学研用合作，在政府的积极引导下，我国新材料企业、高校、

科研院所等不断加强产学研用合作，集聚创新资源，推动新材料技术创新与应用，取得了明显的成效。

① 产学研用合作政策体系趋于完善。我国出台了一系列政策支持产学研用合作。从国家层面来看，中共中央、国务院、全国人大、国务院所属部委等都出台了支持产学研合作政策，其中科技部出台的政策最多，占比为 17.29%；其次是教育部，占比为 15.06%；再次是国家发展改革委，占比为 12.12%^[1]。从政策形式来看，有 25 种形式，包括法律、法规、意见、规划、通知、方案、纲要等^[2]。其中国务院印发的《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》明确提出，“建设以企业为主体、产学研结合的技术创新体系”，从加强基础设施建设、提升公共服务能力、加大金融支持、加大税收优惠、加强政府采购等多维度给予支持。与此同时，各地也制定了推动产学研用合作的政策，例如北京在 2007 年发布的《北京市鼓励企业与高校、科研院所进行产学研合作的若干意见》、陕西在 2015 年出台的《陕西省科技厅关于促进产学研合作工作的指导意见》、江苏 2008 年出台的《江苏省产学研联合创新资金管理办法（试行）》等。这些综合性政策都有助于推动新材料领域产学研合作的深入，除此之外，我国还出台了专门推动新材料产业产学研用合作的政策。例如，2016 年工业和信息化部、国家发展改革委、科技部、财政部联合发布的《新材料产业发展指南》提出，“强化新材料产业协同创新体系建设”；2017 年工业和信息化部、财政部、保监会联合发布的《关于开展重点新材料首批次应用保险补偿机制试点工作的通知》，旨在解决生产与应用脱节、创新产品推广应用困难等问题；2017 年工业和信息化部、财政部联合出台的《国家新材料生产应用示范平台建设方案》，目的就是促进新材料供需对接，提高新材料产业生产应用推广水平。各地也出台了支持新材料产业产学研用合作的政策，新材料产业产学研用合作政策体系逐步健全。

② 产学研用合作财政支持力度不断加大。随着我国经济的快速发展，我国对产学研合作的支持力度不断加大，体现在政府对科学技术的财政投入持续增加。《2019 年全国科技经费投入统计公报》（以下简称《公报》）显示，2019 年国家财政科学技术支出为 10717.4 亿元，比上年增长 12.6%。其中，中央财政科学技术支出 4173.2 亿元，增长 11.6%，增速比上年加快 2.3 个百分点，占财政科学技术支出的比重为 38.9%；地方财政科学技术支出 6544.2 亿元，增长 13.2%，占比为 61.1%，比上年提高 0.4 个百分点。中央和地方财政科技支出双双保持较快增长，为科技创新实力提升和产学研用合作提供了有力保障。此外，鼓励和支持科技协同创新的税收减免政策进一步落地落实。《公报》显示，2019 年，在规模以上工业企业中，研发费用加计扣除减免税政策和高新技术企业减免税政策的惠及面分别达到 66% 和 56.2%，分别比上年提高 2.2 个和 0.1 个百分点；企业对这两项政策的认可度分别达到 87.1% 和 88.9%，分别比上年提高 2.8 个和 2.2 个百分点。具体到新材料产业，以重点新材料首批次应用保险补偿机制试点工作为例，2017—2019 年，首批次保险的范围逐步扩大，涵盖材料品种不断增加，2017 版目录合计 129 项，2018 版目录合计 166 项，2019 版目录合计 331 项，申请的企业数量也相对增加。

③ 企业的主体地位显著提升。企业研发投入逐年快速增长，已成为研发投入的主体。《公报》显示，2019 年，各类企业研究与试验发展（R&D）经费支出 16921.8 亿元，比上年增长

长 11.1%；政府属研究机构经费支出 3080.8 亿元，增长 14.5%；高等学校经费支出 1796.6 亿元，增长 23.2%。企业、政府属研究机构、高等学校经费支出所占比重分别为 76.4%、13.9% 和 8.1%，企业投入主体地位稳固。规模以上工业企业 R&D 经费为 13971.1 亿元，比上年增长 7.8%；投入强度（与营业收入之比）为 1.32%，比上年提高 0.09 个百分点。具体到材料行业，大部分材料行业的规模以上企业研发投入强度低于规模以上工业企业平均水平，但总体来看，材料企业研发投入呈增长态势，如黑色金属冶炼和压延加工业规模以上企业 2019 年研究与试验发展经费为 886.3 亿元，研究与试验发展经费投入强度为 1.25，高于 2017 年 0.26 个百分点。2019 年行业规模以上工业企业研究与试验发展（R&D）经费情况如表 14-1 所示。

表 14-1 2019 年行业规模以上工业企业研究与试验发展（R&D）经费情况

行业	研究与试验发展经费 / 亿元	研究与试验发展经费投入强度 /%	2017 年投入强度 /%
黑色金属矿采选业	13.4	0.39	0.18
有色金属矿采选业	21.8	0.65	0.61
非金属矿采选业	18.6	0.54	0.28
化学原料和化学制品制造业	923.4	1.4	1.11
化学纤维制造业	123.7	1.44	1.34
橡胶和塑料制品业	357.6	1.41	1.01
非金属矿物制品业	520.1	0.97	0.61
黑色金属冶炼和压延加工业	886.3	1.25	0.99
有色金属冶炼和压延加工业	479.8	0.85	0.85
金属制品业	466.4	1.36	0.95

（数据来源：2019 年全国科技经费投入统计公报、2017 年全国科技经费投入统计公报）

④ 产学研用合作创新成果大量涌现。近年来，企业、高校、科研机构等越来越注重产学研用合作，各参与方发挥资源互补优势，形成了以企业为主体，以市场为导向，以项目为载体，协同开展科学研究和技术攻关，推动新技术、新产品、新工艺研发推广应用的合作机制，加速了科技创新和科技成果的转化，涌现出了一批产学研用合作创新成果。以中国产学研合作促进会于 2009 年开始评选的中国产学研合作创新与促进奖为例，其中的产学研合作创新成果奖主要面向通过产学研合作孵化出的突出创新成果。2011—2020 年，企业、高校、科研机构等产学研合作向纵深推进，产学研合作创新成果奖数量逐年增多，从 2011 年的 77 个增加到 2020 年的 345 个，总体呈上升趋势，表明我国产学研合作创新成效显著。具体到新材料领域，2020 年有高品质钢洁净化、均质化、细晶化、精准化制备共性关键技术与应用，高性能高稳定性石墨烯及聚合物衍生碳基能源材料关键技术研究及应用，轻稀土基烟气脱硝催化材料技术及产业化应用等 46 个项目通过产学研合作取得技术突破，解决了制约我国新材料产业发展的部分短板问题，推动我国新材料产业高质量发展。2011—2020 年我国产学研合作创新成果奖数目如图 14-1 所示。

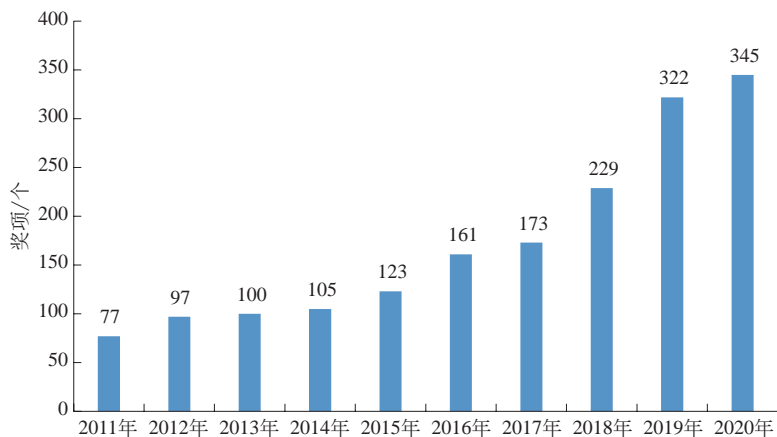


图 14-1 2011—2020 年我国产学研合作创新成果奖 (单位: 个)

(数据来源: 中国产学研合作促进会, 赛迪智库材料工业研究所整理)

⑤ 产学研用合作模式不断创新。传统的产学研用合作模式主要是校企合作、院企对接、院校合作等, 校企合作、院企对接主要是由企业牵头, 通过合作、委托开发等方式委托高校、科研院所协助解决企业技术难题; 院校合作主要是高校、科研院所根据各自优势, 分工协作, 联合进行研究和创新活动。随着产学研用合作在创新发展中的作用日益重要, 各级政府部门、各地区、相关行业组织加大对产学研合作的支持, 出现了多元化、多样性、各具特色的产学研合作模式, 如创建产学研技术创新联盟、产学研示范基地、制造业创新中心、生产应用示范平台等协同创新载体和平台等。这些模式更加注重发挥市场作用, 最大限度调动各方主体产学研用合作积极性。新材料领域的技术创新联盟数量众多, 综合性的有中国新材料产业技术创新战略联盟, 细分领域的有石墨烯产业技术创新战略联盟、碳纤维及其复合材料产业技术创新战略联盟、中国碳纤维复合材料应用技术创新联盟、硅基新材料产业技术创新战略联盟、生物医用材料产业技术创新战略联盟等, 这些联盟集聚了新材料产业链的上下游企业, 促进了产业链信息与技术交流共享。新材料领域的产学研示范基地也有很多, 有的依托产业园区建设, 如宁波新材料联合研究院 (宁波国家高新区内)、江苏省功能新材料产业产学研协同创新基地 (海安高新区内), 有的依托企业而建, 如氟化工产学研合作创新示范基地 (依托多氟多化工股份有限公司)、磷化工产学研合作创新示范基地 [依托瓮福 (集团) 有限责任公司] 等。制造业创新中心是以企业为主体, 科研院所、高校等自愿组合建立的新型创新载体, 目前已经建设 17 家国家级制造业创新中心, 其中和新材料相关的有国家轻量化材料成型技术及装备创新中心、国家先进功能纤维创新中心、国家稀土功能材料创新中心 3 家创新中心。国家新材料生产应用示范平台是以新材料生产企业和应用企业为主联合组建, 吸收产业链相关单位, 实现新材料与终端产品协同联动的平台, 截至 2020 年底, 已经建设核能材料、航空材料等 14 个生产应用示范平台。

(2) 推进新材料产学研合作的典型案例

① 长三角地区新材料产学研用合作。长三角地区经济发达, 先进制造业基础雄厚, 从新材料研发设计、生产制造到下游应用都具有较好的基础, 新材料产业产值占全国总量的三分

之一以上^[3]，是我国三大综合性新材料产业基地之一，新材料产业发展水平位居我国第一梯队。2019年12月，为充分发挥长三角地区技术和产业优势，集聚国内外创新资源，增强创新源头供给能力，构筑材料科学领域领先优势，服务国家重大工程和国防建设需求，江苏省政府、中国科学院、中国宝武钢铁集团和中国钢研科技集团共同发起成立长三角先进材料研究院（以下简称研究院），具体由江苏省产业技术研究院与相城区政府合作共建。

研究院立足长三角、面向全球，采用市场化的管理运行机制，主要目标是协调全国材料领域的龙头企业、高校、科研院所，集聚全球顶尖人才和科研团队，形成2000人以上的研发队伍和产业人才，参与一批材料研发主导型企业的技术创新活动，攻克一批材料产业前沿和关键共性技术，加大关键技术源头创新与供给，成为材料领域国际一流的新型研发机构和国家级材料创新基地。

成立至今，研究院承担了大量国家级和省部级科研项目，产出了一批产业化前景好、技术含量高的技术成果，加快了长三角地区新材料产学研用合作步伐，为长三角地区新材料产业创新发展乃至区域经济高质量发展提供了支撑。

一是加强高端材料技术攻关。研究院重点聚焦国家重大战略和产业发展需求领域，在金属材料、碳纤维及其复合材料、先进高分子材料、先进能源材料等方向建设了细分领域专业研究所，引进了一批高层次人才，如干勇院士领衔的“长三角先进材料研究院关键金属结构材料团队”于2020年7月获评苏州市顶尖创新人才团队。这些研究所致力于开展高端材料技术攻关，例如先进金属材料及应用技术研究所围绕航空发动机关键零部件、轻合金材料及加工技术、高温合金材料与关键工艺、功能型金属粉体材料、等离子粉体5个主要研发方向，储备了一批具有上市潜力的重点项目，累计引进、孵化企业超过50家^[4]。

二是开展全产业链协同创新。研究院构建了“1+N+X”的总体架构，其中“1”是指研究院本部，是重大技术集成创新的组织主体，重点打造包括共性技术与平台支撑、资源集聚与融合创新、战略策划与集成攻关在内的三大功能；“N”指若干专业研究所，共同构成研究院的整体研发体系和能力，是各领域资源集聚、技术研发和项目投资孵化的主体；“X”是创新需求提出、研发资金投入和技术成果实施的主体，主要依托X个细分领域龙头企业共建联合创新中心。截至目前，研究院在材料领域已经建设了近40家企业联合创新中心，各共建企业累计提出技术需求250余项，成功对接需求60余项，已签约合同金额超过1.2亿元^[5]。

三是加强创新资源集聚。研究院不断加强与国内高校重点材料学科、国家重点实验室、中科院材料类研究所等交流对接，已与超过40家国内重点高校材料学院建立战略合作伙伴关系，开展了一批联合研发项目和人才培养。2020年8月，研究院联合浙江大学、上海交通大学、南京大学、中国科学技术大学等26家高校共同组建了长三角高校先进材料创新联盟，设立首期联盟创新基金5000万元，进一步统筹协调长三角地区材料领域创新力量，推动长三角地区新材料快速发展。

四是加强与下游企业对接。为满足长三角地区航空航天领域需求，研究院集聚相关资源，与上海商飞合作，共同开展航空发动机材料技术攻关，既满足了长三角地区新材料技术创新的需求，也满足了长三角地区新材料制造和应用产业发展提升的需求。

② 宁波新材料产学研用合作。宁波是长三角代表性城市之一，在新材料研发和制造方面

具有较强优势，是我国首批七个新材料产业国家高技术产业基地之一。2020年，宁波新材料产业完成工业总产值2174.6亿元，占全省新材料产业产值的30.3%，产业总体规模全国领先。宁波重点发展化工新材料、金属新材料、稀土永磁材料、电子信息材料、功能膜材料五大领域，形成了一批全国知名新材料企业和独创性新材料产品，初步形成了相应的产业集群。

宁波高度重视新材料产学研用合作，通过整合高端科技和人才资源，引进培育若干应用研究机构，加强新材料全产业链合作等，推动科研院所、高校、企业的产学研协同创新，取得了显著的成效。

一是积极引入高端创新资源。宁波高新区（新材料科技城）先后引进共建了中科院宁波材料所、北方材料科学与工程研究院、诺丁汉大学宁波新材料研究院等研发机构，培育市级及以上企业工程（技术）中心64家、省级企业研究院10家、院士工作站8家、市级以上技术转移示范机构12家^[6]。

二是搭建产学研协同创新平台。为助力宁波新材料产业发展，加强宁波新材料产业链各环节的协同合作，宁波政府在宁波高新区（新材料科技城）整合中科院宁波材料所、兵科院等研发机构资源，以新材料应用研究和成果转化为目标，成立了宁波首个新材料产学研协同创新平台——宁波新材料联合研究院。研究院具有公共检测、应用研究、成果转化、创业孵化、产业加速、科技金融六大功能，建有材料公共实验检测平台和有机功能材料、等材和增材制造、轻量化材料三个工程技术中心，以及一个新材料众创空间和一个新材料加速器。面向发达的下游应用市场，宁波新材料联合研究院与下游企业不断加强合作，已经与超过300家企业达成合作，例如与中策橡胶集团合作共建“橡胶与新型绿色材料工程技术中心”，推动高分子发泡技术在实心轮胎上的应用。2017年，宁波新材料联合研究院凭借在科技成果转移转化方面的突出贡献，被评为全国唯一的“中国新材料产学研合作创新示范基地”。此外，中科院宁波材料所依托其在高端科技人才和科研平台的优势，成立了新材料初创产业园，面向全球开展创新资源引进和培养，在高新技术企业、省市级科技型中小企业培育方面取得积极进展，纳米晶软磁带材、固态锂电、石墨烯薄膜、特种高温辐射装置等获得高端客户认可，2019年，新材料初创产业园运营机构——宁波高晟新材料初创产业园发展有限公司荣获第12届中国产学研合作促进奖。

三是政府大力支持产学研合作。宁波高度重视产学研协同创新，体现在其一系列政策文件中。2017年出台的《中共宁波市委 宁波市人民政府关于进一步强化科技创新推进国家创新型城市建设的意见》提出，扶持创新型初创企业，发展高新技术企业，培育创新型领军企业，建设高水平产业技术研究院，打造新型孵化载体等，并给出了相应的支持政策。2020年，宁波国家高新区出台《科技创新引领国家自创区高质量发展的若干政策及实施细则》，实施一套全面加快产学研协同创新的政策组合拳，例如对新落户的高端研发机构，5年内给予最高5000万元运营资金资助、最高5000万元购房资助、最高5000万元设备资助；对新落户的产业技术研究院，5年内给予最高2500万元建设运营资金资助；设立科技成果转化引导基金和科技信贷风险池基金等，同时批复了宁波高新区敏智科技有限公司等18个企业申报的产学研项目为高新区2020年产学研合作项目，开展高新区2020年公共技术服务平台认定及考核工作。在这些政策的引导下，宁波新材料科技成果转移转化效率不断提高，新材料企业“研发—

孵化 - 加速 - 产业化”体系逐渐完善，宁波逐渐向全国领先的新材料协同创新中心目标迈进。

③ 广东新材料产学研合作。广东是我国第一制造业大省，体系完备，实力雄厚，新一代电子信息、绿色石化、智能家电等产业发展较快，形成了超万亿元的产业集群，汽车、智能手机、4K 家电、水泥、塑料制品等产品居全国首位，新材料应用前景广阔。新材料产业是广东省重点培育的 10 大战略性新兴产业之一，产业基础良好，产业技术水平和综合实力位居全国前列，终端应用市场广阔，需求旺盛。地处粤港澳大湾区，广东省前沿新材料优势明显，科研和转化能力突出，知名科研机构和人才团队集聚，2019 年广东省前沿新材料产业营业收入接近 500 亿元。

广东省充分利用产业基础扎实、市场成熟、需求旺盛、企业创新意愿强等有利条件，弥补创新资源缺乏的不利条件，积极开展产学研用合作，大幅提升了广东省新材料产业的创新能力和综合竞争力。

一是开展省部院产学研合作。早在 2005 年广东省就与教育部、科技部联合开展“省部产学研结合模式”试点，出台了省部产学研结合扶持政策，如 2006 年出台的《广东省人民政府 教育部关于加强产学研合作提高广东自主创新能力的意见》；成立了省部产学研结合专门机构，建立了组织协调体系；设立了产学研结合省部专项资金，如 2008 年出台的《广东省产学研省部合作专项资金管理暂行办法》提出，省财政每年投入不少于 1 亿元，并根据省部合作的需要逐年增加，支持省部产学研合作成果的转化、重大项目推进、人才引进与交流等。省部产学研合作协调机制建立后，广东地市、企业与部属高校迅速建立起高层次对接协商机制，增强了广东新材料自主创新能力，例如广钢集团与北京科技大学建立的“广钢集团 - 北京科技大学联合研发中心”成功开发了珠钢 CSP 工艺生产集装箱板成套技术，形成了一系列具有自主知识产权的技术发明专利，不仅帮助我国成功摆脱集装箱板生产长期依赖国外进口的窘境，还推动广东成为全球最大的集装箱生产基地，促进了广东对外贸易的快速发展。此外，广东省与中科院自 2009 年起开展省院战略合作，截止到 2015 年底，超百家中科院所属单位为 2000 多家广东企业提供服务，与广东各级政府和企业合作共建 360 多个研发平台，培育成高技术企业超过 350 家，有力推动了广东新兴产业的发展^[7]。2010 年，广东省与工程院签署《广东省人民政府中国工程院全面推进产学研合作协议》，截止到 2016 年，广东共建 83 家工程院院士工作站，遍布广东省各地市，围绕当地传统支柱产业领域及电子信息、新能源汽车、新材料、LED、高端装备制造等战略性新兴产业领域，制定技术及产业规划 200 多项，突破核心技术 1100 多项，为企业培养各类科技人才 4800 多人，转化各项成果 1500 多项，实现经济效益 300 多亿元，对广东产业转型升级和加快新兴产业发展发挥了重要作用^[8]。

二是建设合作创新平台。在省部院产学研用合作的带动下，广东加快合作创新平台建设，打造了一批具有较强研发实力、良好创新效益、较强示范作用的产学研合作创新平台。例如，为深化省部产学研合作，广东省探索产学研结合新模式，构建省部产学研战略联盟，推动产学研合作由短期、松散、单向合作向长期、紧密、系统合作转变，实现强强联合和多方共赢。同时，为推动高校科技成果向下游拓展，加速高校科技成果转化，促进高校科技成果和创新要素向社会辐射，广东开展高校产学研结合示范基地建设，推动有科技成果转化需求的高校与有实力的企业、县区镇合作。截止到 2016 年底，广东省共建立 204 家产学研创新联盟，

2651 家省级工程中心，121 家院士工作站，其中产学研创新联盟涉及 127 所高校、92 所科研机构 and 2000 多家企业^[9]。

三是推动科技成果与产业精准对接。为加快科技成果转化，广东省定期举办科技成果与产业对接会，建立科技成果与产业对接的长效机制，2016 年广东省科技成果与产业对接会发布科技成果 800 多项，签约对接项目 19 项，重大科技成果转化数据库收录科技成果 6000 多项，有力推动了科技成果的产业化^[10]。同年，广东省与教育部共同举办中国高校科技成果交易会，海内外知名高校和各地企业积极参与，重点展示项目 1500 项，重点发布应用技术成果 500 项，重点交易项目 100 项，推动了高校重大科技成果的落地转化^[11]。

(3) 存在问题

尽管新材料产学研用合作取得了较突出的成绩，但与发达国家相对成熟的产学研用合作机制相比，我国新材料产学研用合作还存在诸多不足与短板，高校、科研院所、企业尚未形成有效互补的协同创新关系，导致新技术成果转化率和产业化率不高，新材料产业创新能力不强。

① 产学研用合作创新链条不顺畅。一方面，受政策、体制、机制、管理等诸多因素的制约，我国新材料科技成果转化率和产业化率较低。据统计，目前我国每年取得 3 万多项省部级以上科技成果及 7 万多项专利技术，加上历年积累的科技成果则会更多，但科技成果转化率仅有 25% 左右，真正实现产业化的成果不足 5%，专利实施率仅为 10% 左右，与美国、日本等发达国家 80% 的科技成果转化率差距甚远^[12]。在新材料领域，也存在科技成果转化率低的问题。我国在部分基础研究方面已经达到了世界领先水平，但从应用看，我国与世界发达国家还存在较大差距。另一方面，我国新材料生产与应用结合不紧密问题也比较突出。产学研用合作重点在“用”上，尤其是新材料必须被下游用户和市场接受认可，否则新材料的创新就失去意义。受各种因素影响，在部分高端应用领域，我国新研发的材料很难大规模推广应用，其主要原因是材料生产企业很难获得与下游用户协同攻关、不断迭代的机会，导致材料企业对下游应用的需求了解不充分，处于自我摸索和研制阶段，一定程度上脱离了市场需求，不利于新材料的推广应用。而美国、日本等发达国家则更加注重上下游的融合发展，如日本碳纤维的广泛应用就得益于东丽和波音公司的联合开发及应用。

② 中小企业参与产学研用合作的难度较大。产学研合作需要企业、高校、科研院所等共同参与，其中企业是技术需求方，也是产学研合作的主体。大企业一般资金实力雄厚，引进高端人才能力强，具备较强的内部研发实力，为了节约成本和固化收益，通常倾向于在企业内部组建研发团队进行技术创新。中小企业资金、人才、科研配套设施有限，难以承受内部研发的高昂成本，需要借助与高校、科研院所等开展产学研合作的机会提升企业创新能力，例如企业与高校、科研机构开展技术转让、合作开发和委托开发等合作。但由于各主体对技术成果价值看法不同和缺乏有效激励机制等，导致中小企业很难与高校、科研机构开展产学研合作创新。此外，中小企业往往侧重于通过产学研合作解决企业的具体技术难题，合作层次偏低，难以实现真正持续的产学研合作。

③ 产学研用合作体系不健全。管理体系不健全，企业、高校、科研机构等都有各自管理部门，部门之间在推进产学研合作过程中的信息获取、政策目标、选择合作伙伴、技术成果应用等方面缺乏有效沟通和统筹安排，难以形成部门合力，导致产学研合作创新资源分散、重复，影响了产学研用合作效果。同时，在科研成果孵化过程的中试、推广应用等交叉与临界环节，目前尚没有完善的制度和政策，也没有统一的管理机构，导致产学研用合作链条缺乏有效衔接，影响了技术成果的转化效果。合作交流体系不健全，尽管已经建设了很多产学研用合作平台，但在信息交流共享、仪器设施共享、促进成果孵化转化方面，大多数平台的功能还未充分发挥，未能有效满足企业、高校、科研机构需求。产学研用合作的服务中介组织体系不健全，现有的科技服务中介组织比较分散，缺乏可以提供设计、检测、测试等专业技术服务的中介组织，产学研用合作的融资渠道不畅、资金缺乏，特别是金融对产学研用合作及其技术成果转化的支持不够，市场急需的风险投资偏少。

新材料产学研用合作不紧密造成新材料研发成果与用户、市场脱节：企业有技术需求却找不到相应的解决方案；高校、科研机构有科技成果却对市场缺乏了解，创新成果无人问津；中介机构不发达，没有充分发挥连接企业、高校、科研机构的纽带作用，致使我国大量新材料科技成果“卡”在实验室中，科技对产业发展的引领支撑作用得不到有效释放，既造成科研创新资源和成果的浪费，也使得我国新材料产业创新发展后劲不足。

14.2 制约我国新材料产学研用深度融合的原因

① 动力机制不健全。产学研用合作的动力机制分为内部动力和外部动力。内部动力指产学研用合作系统各主体从内部产生的合作创新动力，包括资源互补、利益驱使、内部激励、自我改进和发展需求等。外部动力是来自产学研合作系统外部的动力，如政府支持、市场需求、技术推动等。产学研用合作中各个主体的观念、任务、目的不同，激励机制不相容，导致各参与主体合作动力不强。例如，企业目的是通过产学研用合作获取更先进的技术或技术支持，提高新材料市场竞争力，获得更多的经济效益，因此，在产学研用合作过程中，企业要求新材料成果可以规模化商业应用，且成本要低廉，规模化生产制备过程中保证绿色安全。高校、科研院所目的是通过产学研合作获得更多的研究经费支持，提升软硬件能力，培养更多科研人才，获得更多科研成果，因此，在产学研用合作过程中，高校、科研机构强调的是研发成果的创新性和颠覆性，对研发工艺和成本考虑不足。为了保证产学研用合作各主体都能从中受益，急需建立统一的激励相容的动力机制激发产学研用合作各主体积极性。

② 知识转移机制不健全。产学研用合作是知识在各类主体间扩散、传递、集成以及新知识产生并最终在市场形成新产品的过程。知识在不同主体之间转移是知识生产和应用的桥梁，也是产学研用合作的核心环节。完善的知识产权保护制度是促进知识转移的主要途径。目前，产学研用合作创造的知识成果的归属问题还难以妥善解决。企业、高校、科研机构都投入人力、物力、财力到产学研用合作中，投资比例难以精确量化，合作研发产生的知识成果产权

归属不明晰,例如产学研用合作中,企业人员与高校、科研机构人员联合进行技术开发,技术成果是否属于职务发明难以界定;又如产学研用合作中技术成果的发明人或设计人等署名权容易产生纠纷,以及未公开专有技术的所有权也容易产生权属纠纷。此外,知识转移过程中防止泄密机制还不健全,产学研用合作中还存在透露项目研发方向、透露项目关键研发资料和技术、技术人才流失等带来的泄密现象,严重影响了产学研用合作的积极性。

③ 风险控制机制不健全。产学研用合作结果具有较强的不确定性,面临着较大的内外部风险。外部风险包括政策风险、市场风险,内部风险包括人才风险、资金风险等。以市场风险为例,在产学研用合作的不同阶段,面临的来自需求、竞争、价格、环境等方面的市场风险也不同。产学研合作初期,投入的技术、设备、资金、人才还处于磨合阶段,研发条件还不稳定,市场前景还不明确,市场风险主要来自预期收益的不确定,预期收益取决于市场环境、国家政策、市场需求等一系列因素。随着产学研用合作程度的进一步加深,企业、高校、科研机构之间的分工趋于专业化,新材料不断被研发出来,这一阶段的市场风险主要来自新材料生产和推广应用过程中能否被下游用户接受和认可。当产学研用合作进入比较成熟的阶段时,随着技术的不断成熟,会面临越来越多的竞争者,需要不断优化新材料性能,加快新材料迭代更新,这一阶段的市场风险来自模仿和跟进,大量的竞争和替代品出现。目前,在我国新材料产学研用合作的各个阶段还缺乏有效的风险控制措施,导致产学研用合作效果受到影响。

④ 利益分配机制不健全。产学研用合作是企业、高校、科研院所基于各自资源优势实现各自利益最大化的市场化行为。产学研用各参与主体利益分配是否合理,即理论创新、中间成果、最终成果如何在各参与主体之间分配及分配是否合理,直接影响产学研用合作的持续性和稳定性。对于产学研用合作成果,企业、高校、科研机构对技术价值的评价标准不同,导致技术成果定价不同,利益分配容易产生分歧。例如企业认为高校、科研机构的技术成果定价过高,高校、科研机构认为企业过于节约成本,研发投入偏低,对于技术成果价值的分歧导致各主体在利益分配问题上很难达成一致,影响了产学研用合作创新进程。这种利益分配上的分歧,在产学研用合作创新初期,由于各主体投入不大,所以相对容易协调解决,但随着产学研用合作进程加深,创新利益越来越大,利益分配问题逐渐成为制约产学研用合作的重要因素,决定着产学研用合作关系是否可以继续维系。同时,产学研用合作各主体内部也存在利益分配问题,对人才队伍稳定、技术研发人员的积极性等都有较大影响。目前产学研用合作常用的利益分配方式有固定支付方式、产出分享方式和混合方式等,都不能精准反映企业、高校、科研院所产学研用合作中的贡献,因此,急需建立合理的利益分配机制。

14.3

新材料产学研用协同发展模式构建

14.3.1

国外模式借鉴

(1) 美国的制造业创新网络

为跨越基础研究和产品开发之间的“死亡之谷”,打通“基础研究—应用研究—商

业化”环节之间的障碍，重振美国制造业，美国政府于2012年决定在重点领域建立15家制造业创新研究所，形成国家制造业创新网络（NNMI，2016年9月更名为“美国制造”，Manufacturing USA）。建设制造业创新网络旨在集聚产业界、学术界、国家实验室、联邦政府、地方政府等资源，建立和完善美国的创新生态系统，提升美国制造业全球竞争力。

① 制造业创新研究所的运行模式。制造业创新研究所（IMI，以下简称研究所）是制造业创新网络的节点，主要工作包括：一是聚焦应用研究、开发和示范项目，降低新技术应用的成本和风险；二是开展各级教育和培训，提高劳动者素质；三是鼓励吸纳中小企业参与共建创新研究所，进行应用技术创新；四是做到基础设施共享，加速技术的产业化。

每个研究所都拥有较大的自主权，成立一个由成员单位代表组成的独立的信托董事会，同时选出执行董事负责研究所的日常运作。以增材制造业创新研究所（NAMII）的管理结构为例，董事会同时选出四名副理事，分别主管技术发展、技术转移、先进制造企业和人力资源/教育推广。董事会成员共同商议决定提案，内容涉及主要业务领域、会员资格、知识产权分配、投资金额、项目类型、资金分配等。此外，由12位分别来自不同联邦部门的官员联合组成技术咨询委员会，在国防部的牵头领导下就战略规划、技术方向、项目选择和审查等方面提出意见和建议。NAMII还设有治理委员会和执行委员会。治理委员会由NAMII的重要会员、普通会员、小企业会员和制造扩展合作伙伴代表组成。执行委员会负责挑选合适的产业界和学术界代表，结合技术咨询委员会提名的政府部门代表，联合组建NAMII执行委员会，配合董事会开展具体工作（图14-2）。

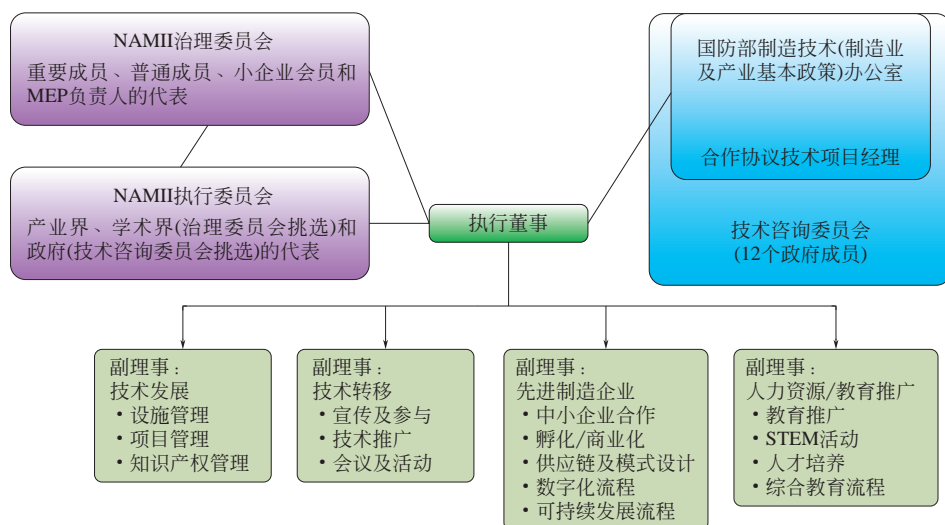


图 14-2 美国增材制造业创新研究所（NAMII）的管理结构^[13]

② 制造业创新研究所的运营机制。美国联邦政府对研究所的资金支持取决于每个研究所的研究领域和拟建项目，支持时间大约为7年，随着创新研究所资金来源渠道的拓展，联邦

政府的资金支持规模会逐年减少。

第1年：研究所政府投入占7年内政府总投入的15%。其中，设备投入约占10%，基础项目资助约占3.6%，启动资金约占1.4%。

第2年：研究所的政府投入占7年内政府总投入的20%。其中，设备投入约占12.5%，基础项目资助约占6%，启动资金约占1.5%。

第3年：研究所的政府投入占7年内政府总投入的20%。其中，设备投入约占10%，基础项目资助约占9%，启动资金约占1%。

第4年：研究所的政府投入占7年内政府总投入的15%。其中，竞争项目资助约占5%，设备投入约占4%，基础项目资助约占6%。美国国家制造业创新网络的竞争项目资助从第4年开始，每年选择2~3家创新研究所，给予200万~300万美元的奖励。

第5年：研究所的政府投入占7年内政府总投入的11%。其中，竞争项目资助约占7%，基础项目资助约占4%。

第6年：研究所的政府投入占7年内政府总投入的11%。其中，竞争项目资助约占7%，基础项目资助约占4%。

第7年：研究所的政府投入占7年内政府总投入的8%。其中，竞争项目资助约占7%，基础项目资助约占1%。

美国联邦政府对研究所的资助应满足每个研究所的发展需求。通常在5~7年内，创建一个研究所需要7000万~1.2亿美元的资金支持。研究所成立后，美国联邦政府将根据研究所的年度报告以及各种指标的完成情况决定是否对其延续资助。这些指标主要包括开展合作投资的情况、成员数量及质量、设施利用率、创新成功案例、技术转化率等。

除此之外，研究所也会得到非联邦政府的资助，主要是设备和建筑物等实物资助。随着研究所的正常运行，这些资助将逐渐转移到项目、会员费、使用费中。为保证研究所发展目标的实现，非联邦政府与联邦政府投资的比重通常远大于1:1。

研究所建立之初，最大的资金资助来自美国联邦政府。研究所建立2~3年后，美国联邦政府的投入资金不断减少，研究所的大部分运行资金将由私人和其他机构提供。同时，研究所会不断拓宽融资渠道，在5~7年后，研究所将不再依赖国家制造业创新网络联邦基金的支持，其会通过收取会员费和服务费、举办活动、开展合作研究、获取知识产权使用费和捐款等方式保证自身发展需求。

此外，为鼓励研究所竞争发展，美国国家制造业创新网络会根据每个研究所的技术质量、研究实力等设立“竞争项目奖”，激励研究所创新发展。

③ 建设进展。2016年，国家制造业创新网络更名为“美国制造”，与国家制造业创新网络强调增强制造业创新能力有所不同，“美国制造”侧重于技术成果的商业化应用。截止到2017年，美国共建立了14家研究所（表14-2），拥有1291个会员单位，包括844家制造厂、297家教育机构（大学、社区学院、其他学术机构）和150个其他机构（联邦政府、州政府、地方政府、联邦实验室、非防卫组织），其中中小企业占比达到65%。

④ 经验借鉴。“美国制造”建设至今，在专业人才培养、创新生态构建、制造业竞争力

提升方面起到了积极的作用，值得我国借鉴学习。

表 14-2 美国 14 家制造业创新研究所情况

领域	机构名称	主要出资机构	成立时间
增材制造	美国制造创新研究所	美国国防部	2012 年 8 月
数字制造与设计	数字制造与设计技术创新研究所	美国国防部	2014 年 2 月
轻量化金属制造	轻质材料制造创新研究所	美国国防部	2014 年 2 月
宽禁带半导体制造	电力美国创新研究所	美国能源部	2015 年 1 月
纤维增强聚合物复合材料	先进复合材料制造创新研究所	美国能源部	2015 年 6 月
集成光子学制造	集成光子制造创新研究所	美国国防部	2015 年 7 月
柔性电子器件和传感器制造	柔性混合型电子制造创新研究所	美国国防部	2015 年 8 月
纤维材料与制造工艺	美国先进功能织物研究所	美国国防部	2016 年 4 月
智能制造	智能制造的清洁能源制造创新研究所	美国能源部	2016 年 12 月
生物加工与制造	先进组织生物制造创新中心	美国国防部	2016 年 12 月
机器人制造	先进机器人制造中心	美国国防部	2017 年 1 月
生物医药制造	国家生物制造创新中心	美国商务部	2017 年 3 月
化工过程强化	过程强化部署快速推进中心	美国能源部	2017 年 3 月
可持续减排碳排放与清洁能源制造	节能减排创新中心	美国能源部	2017 年 5 月

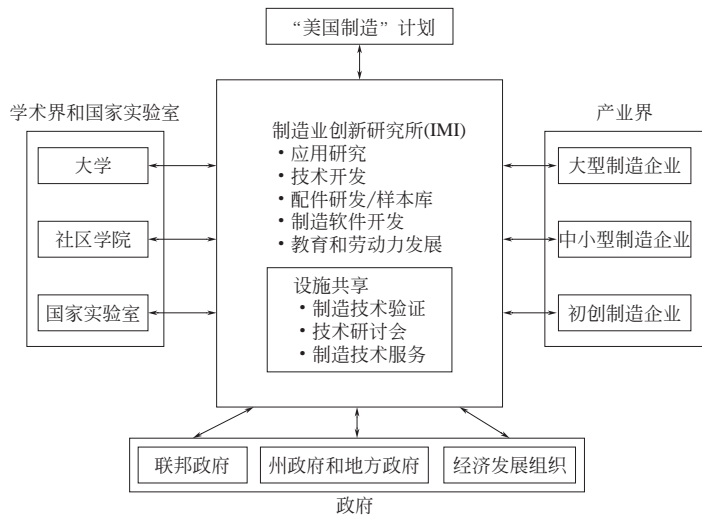
（数据来源：根据《美国制造 2017 年度报告》整理）

一是强调技术成果的本土化转化。前期的国家制造业创新网络建设强调吸引高端制造业回流进而巩固提升美国高端制造业竞争力，后期的“美国制造”更强调技术创新成果的本土化转化，即创新成果可以进行规模化、市场化应用，以此带动制造业发展和扩大国内就业。

二是研究所的布局领域更加强调满足军民融合等战略需求。例如美国先进再生制造创新研究所开展下一代组织构建及相关制造技术研究，旨在帮助负伤士兵的皮肤、血液、器官再生的同时，也为改善普通民众健康提供了方法。美国先进功能织物研究所开展基于光的新一代通信系统研究，不仅可以提高美军秘密行动的安全性和有效性，还可以在 GPS（全球定位系统）无法定位的建筑中进行民用救援^[4]。

三是紧贴市场需求开展“自下而上”的技术创新。国家制造业创新网络的技术路线和项目都是“自上而下”确立的，“美国制造”则是充分发挥研究所作用，由研究所集聚每一个重点领域的产业界、学术界、政府等机构，挖掘企业和市场需求，“自下而上”确定技术路线图，开展产学研用合作和投资。

四是发挥科研机构的平台枢纽作用来打造产业创新生态。制造业创新研究所采用多层次的会员制度，企业、行业组织、高校、政府、国家重点实验室、非营利组织等都是研究所的会员，共同组成以特定研究方向为基础、“政产学研用”相结合的创新生态系统。为推动创新成果落地，“美国制造”强调研究所要与现有区域产业集群及集群内企业加强联系，同时发挥研究所在加强标准制定和工厂建设方面的积极作用。“美国制造”创新生态系统如图 14-3 所示。

图 14-3 “美国制造”创新生态系统^[15]

(2) 德国产学研用协同发展体系

•••

创新是德国制造业得以在全球保持强大竞争优势的主要驱动力，德国汽车、机械制造、化工、电气技术等方面的世界领先地位离不开创新的支撑。德国高度重视产学研用创新体系的构建，已经形成了由联邦政府、州政府、大学、科研机构、中介机构、企业共同构成的国家科技创新体系。

① 基本情况。德国国家科技创新体系是全社会参与的协同创新体系，强调实现四个功能：一是平衡各参与主体之间关系；二是加强知识交流；三是注重创新实效，推动创新成果转化；四是建立多层次创新网络（包括国家网络、欧盟网络、地区网络、跨地区网络）^[16]。德国创新体系中比较有代表性的组成部分有工业研究联盟联合会（AiF）、工业研究联盟（IGF）、德国弗劳恩霍夫应用研究促进协会（FhG）等。

AiF 成立于 1954 年，是服务中小企业、促进共性技术研发、推动中小企业创新的官产学研用平台，是典型的伞状组织，旗下有 100 家统称为“工业研究联盟”的会员。这些会员由公益性的研究联盟、研究会或者研究所组成，属于细分领域的科技社团。近三分之一的“工业研究联盟”拥有实体研究所或者研究团队，吸纳了 5 万多家科技型中小企业为会员，组成了立体的产业创新网络。AiF 的正式会员必须是在某个技术领域推动和实施跨地域合作的法人科技社团，以中小企业或者为中小企业服务的机构或经济组织为会员，从事研发、科技成果评估、科技成果转化与应用的活动。AiF 吸纳了德国联邦工业协会（VDI）、德国工商大会（DIHK）、德国弗劳恩霍夫应用研究促进协会（FhG）、德国科技社团协会（DVT）等为编外会员。AiF 的运营经费全部来自会员会费，规定其会员单位和科研部门不能动用财政经费缴纳会费。AiF 及其旗下两个全资子公司是政府授权的管理中小企业科研项目的第三方机构，负责面向中小企业产学研合作的“工业研究联盟”（IGF）项目和促进中小企业开发创新型产品、工艺流程的“中小企业核心创新计划”（ZIM）项目。成立至今，AiF 组织管理了超过 23 万个研发项目，涉及公共财政经费达 115 亿欧元。2014—2019 年期间，IGF 项目吸引了 1200 多家科研院所参与，1200 多位专家参与了项目评审与管理^[17]。

“工业研究联盟”(IGF)主要资助规模不超过250人、营业额不超过5000万欧元的中小企业,为中小企业提供设备和创新费用资助,也可以支持研究机构。

德国弗劳恩霍夫应用研究促进协会是德国也是欧洲最大的应用科学研究机构,属于非营利的科研机构,研究领域涉及健康、安全、通信、能源和环境等,致力于为企业特别是中小企业服务,开发新技术、新工艺和新产品,推动研究成果转化为现实生产力,下设72个研究所及其他研究机构,拥有超过2.5万多名科研人员(包含合作院校的教授、实习生等)。

② 德国弗劳恩霍夫应用研究促进协会。德国弗劳恩霍夫应用研究促进协会(以下简称协会)成立于1949年,是德国国家创新体系的重要组成部分,在应用开发研究领域处于世界领先地位,主要从事两大类应用研究:一类是面向产业界需求,围绕企业急需解决的技术难题,提供技术和产品研发服务;另一类是依托协会自身研发实力,面向未来产业开展前瞻性研究。协会每年服务超过3000家企业客户,完成近万项研发项目,年度研究经费23亿欧元,其中20亿欧元来自科研合同,超过70%的研究经费来自企业委托项目和由政府资助的研究项目,近30%的研究经费由联邦和各州政府以机构资金的形式赞助^[18]。

协会的研究经费通过一定机制分配给各个研究所,这些经费由四部分组成:第一部分是政府每年拨付的经费,每个研究所得到的相同数额的经费;第二部分与各个研究所上一年度的营收挂钩,营收越高的研究所得到的经费越多;第三部分与研究所上一年企业委托项目的收入挂钩,鼓励各个研究所将企业委托项目保持在相对合理的比例,低于或高于这个比例,得到的经费会相应减少;第四部分与上一年承担的欧盟项目收入挂钩^[19]。这种经费分配比例既保证各个研究所可以为企业提供服务,带动制造业创新,又可以保证各个研究所的科研独立性,有能力从事风险高、研发周期长的前瞻性技术研究。

协会要求研究所必须以企业需求为导向,为企业的系统性解决方案,增强企业的核心竞争力。为了解企业需求,研究所定期邀请企业代表召开战略会议,讨论未来市场需求和技术趋势,明确未来研发方向。各个研究所以科研委托项目的方式给企业客户提供从产品研发到系统设计、原型开发的服务。协会每年会对各个研究所进行绩效测评,评估研究所获得企业委托项目的的能力。协会下属各个研究所具有较强的独立性,有自己的财务预算和决策中心,有较强的研究自主性,研究所之间是一种竞合关系:一方面,为获得更多的企业委托项目,各个研究所相互竞争;另一方面,为更好服务企业,不同领域的研究所之间也加强合作,协同提供完整的技术解决方案。这种竞合关系使得协会可以整合某一领域、某一区域的企业、高校、科研机构等资源,集中解决制造业面临的关键核心技术难题,系统推进协同创新。

协会注重创新人才培养和转移。研究所的团队中,既有固定的科研人员,也有流动性较大的合同制研发人员,其中合同制研发人员比例占到60%,他们通常签订3~5年固定期限合同,合同到期后大部分研发人员选择去企业求职。统计显示,协会每年人员流动率在20%左右。由于研究所经常驻企业开展研发项目,所以灵活的合同制聘用形式既方便研究所根据企业需求招募相应科研人才,也方便科研人员向企业流动,留在企业任职的科研人员还会给研究所介绍企业研发项目。同时,大部分研究所设立在大学中或与大学合作,可以从大学获得大量科研人才,同时大学可以获得与企业交流合作的机会,催生更多研发成果,参与企业合作项目的高校学生提高了实践能力。这种基于协同创新的人才流动和共享机制,为创新人才的培养和转

移提供了保障。此外，各个研究所所长及主要负责人通常是高校教授，这既保证了研究所的专业性，也为从事基础研究的科研人员提供实践机会，推动了研究所与高校之间的交流合作。

③ 经验借鉴。

a. 良好的平台及其运行机制塑造了网络协同创新模式。协会的运行机制是制度安排下协同创新的典范，形成了以大学、企业、研究机构为核心要素，以政府、金融机构、中介组织、创新平台、非营利性组织等为辅助要素的多元主体协同互动的网络创新模式，呈现出非线性、多角色、开放性的创新特征^[20]。协会在协同创新网络中担任平台角色，是连接大学与企业之间的纽带，研究所与企业开展研发合作，技术创新各主体发挥各自优势，实现了创新资源有效配置。研究所与企业创新方面的差异性决定了它们通过合作可以实现利益互补，这有利于合作创新的稳定性。

b. 健全的组织管理体系保障协同创新有序开展。除在协会主席选举方面，政府有一定权限之外，协会享有高度的自主管理权，可以自由选择研究项目而不受政府干涉。协会的董事会、管理委员会、研究所的顾问委员会等都有产业界、学术界的成员。协会与各个研究所之间的管理机制对协会创新体系的运作有着重要影响。协会的主要职能是支持和促进研究所发展，在组织管理方面对研究所有一定的监督权，在规章制度和决议方面对研究所有一定影响，在服务方面为研究所提供专利和合同审核等服务，在经费方面对研究所进行分配比例调控。除此之外，研究所有较大的自主权。这种由协会与研究所组成的管理体系，使得各个研究所可以充分利用协会的品牌价值和影响力，获得更多企业业务机会，协会作为整体也可以协调组织各个研究所共同承担企业业务。

c. 有效的专利保护体系是协同创新开展的前提。为支撑创新活动的持续开展，协会不断加强专利保护。凭借雄厚的技术储备、与企业开展的密切的技术合作、强大的科研团队，协会每年都会产生大量具有应用前景的专利。研究所与企业采取“合同科研”的合作方式，接受企业的委托项目，有利于清晰界定研究所与企业之间的权利义务。协会通常采取合同制研究、对外发放许可证、利用 IP 获得新项目、衍生公司等方式进行知识产权的商业化操作。研究所与企业项目合作期间产生的科研成果，各个研究所会申请专利，同时授予企业客户独家或排他性许可权，或者规定具体应用范围的使用期限许可，保障了科研成果的顺利高效转移^[21]。由于采取了有效的专利保护策略，协会成为知识产权保护最大的受益者。研究所与企业的研发合作增加了协会的无形资产，这些无形资产又成为协会吸引企业合作的有力支撑^[20]。

d. 全方位创新政策支持是研发成果实现商业化应用的关键。协会与产业界的研发合作旨在推动新技术、新工艺、新产品实现商业化应用，这离不开政策的支持。协会的管理委员会和研究所的顾问委员会都有来自产业界的代表，协会、研究所与产业界有天然的密切联系，且协会有一系列鼓励创新的政策。为推动科研成果商业化应用，协会会在与企业顺利完成产品开发后选择合适的商业模式。商业模式的选择和建立与企业、市场需求相关，也是影响应用研究创新成功的关键因素。研究所与企业根据市场需求不断调整商业模式，在与市场博弈、利益权衡中形成合理的技术产品的商业模式。

e. 广泛的国际合作加速技术转移和创新。协会非常注重国际合作与交流，在欧洲、美国、亚洲和中东设有研究中心和代表处。协会与中国建立了广泛的交流合作关系，如 2017 年协会在中国与上海交通大学、上海市临港地区开发建设管理委员会成立上海交通大学弗劳恩

霍夫协会智能制造项目中心，是协会在中国成立的第一个科研机构，旨在研发工业 4.0 涉及的前沿核心技术，为汽车、航空航天、造船等行业的骨干企业提供共性技术服务。2018 年协会与广东佛山机器人学院开展战略合作，推动德国科研资源、先进技术、管理理念、培训体系在佛山的转移落地，同时吸收引进中国先进技术来进一步提高德国制造水平。

(3) 日本产学研用协同发展体系

① 基本情况。日本产学研用合作的特点是政府发挥主导作用，通过出台政策、资金支持等方式促进产学研用结合，因此，日本的产学研用合作通常也称为官产学研合作。

20 世纪 60 年代开始，日本大力推行产学研用合作，实现了产业转型和经济腾飞。日本政府逐渐介入到官产学研用中，引导大学、科研机构、企业加强合作。

20 世纪 90 年代，为进一步促进产学研用深度合作，日本政府集中出台了《科学技术基本法》《知识产权基本法》等一系列政策法规，其中 1995 年出台的《科学技术基本法》是日本第一部有关科学技术的根本大法，将产学研合作确立为基本国策。日本政府积极介入，并逐渐发挥主导作用，产学研用合作得到了更多的政策、资金、服务、权利保障。大量促进产学研用合作的中介机构涌现，产学研用合作更加规范高效稳定。1996 年，日本政府开始制订为期 5 年的第 1 期国家科学技术基本计划，之后的各期计划都出台相应的政策支持产学研用合作。

进入 21 世纪，日本产学研用合作的参与度和深度不断拓展，发展成为各参与主体紧密联系、互通有无、互利互惠的完整体系。2001 年，日本政府设立综合科学技术会议（CSTP），2014 年 5 月起更名为综合科学技术创新会议（CSTI），后来合并日本科技厅与文部科学省，通过一系列行政体制改革，形成了政府主导型的产学研合作模式和体系。在这种体系中，CSTI 负责组织召开产学官合作会议，协调各省厅根据科学技术基本计划的要求推进产学官合作，推进过程中的问题和评价结果通过产学官会议和专业调查会反馈给 CSTI，CSTI 及时对产学官合作机制、政策等进行调整，为下一期计划的制订提供依据^[22]。日本产学研用合作的管理架构如图 14-4 所示。

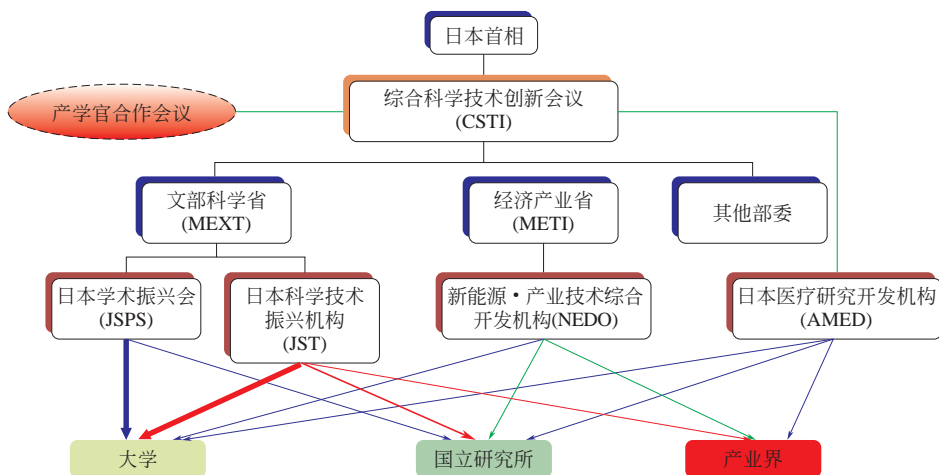


图 14-4 日本产学研用合作的管理架构^[22]

② 日本科学技术振兴机构。产学研用合作推进过程中，离不开专业机构和中介机构的参与。日本有很多产学研用推进机构，如负责加速日本大学科研成果商业化输出的技术转让机构（TLO）等，其中日本科学技术振兴机构（JST）最为出名。

JST 是日本国家科学技术基本计划的主要实施机构，隶属于日本文部科学省。JST 以技术创新为目标，打通基础研究到产业化应用的链条，建立了从基础研究、应用研究到技术开发和产业化应用、规模化发展的完整的科技成果转化体系，同时开展科普、科技信息交流等活动。JST 有四大主要职能：集中官产学研用各方力量，推动基础研究、高技术研究和应用开发研究；建立完善的科研基础设施和信息网；吸引国内外高水平学者到国立研究机构工作；推动技术转移，开展研究援助等。

推进产学研用合作是 JST 的一项重要业务。JST 的主要经费来自日本政府拨款，用于执行政府的科技政策和服务国家战略决策的相关活动，用于推进产学研用合作的预算占 JST 业务预算的 23%，具体用于知识产权支持、匹配支持和研发支持。知识产权支持包括提供专利获取服务，为高校提供知识产权咨询服务，帮助高校取得国外专利；专利价值提升服务，从高校获取专利建立专利组合，为相关的研发活动提供资金支持，提高专利价值；专利许可服务，转让高校的专利许可，帮助企业获得授权专利等；其他诸如知识产权战略管理、建立知识产权数据库等。匹配支持指 JST 为高校、科研机构和企业搭建沟通合作的平台，例如举办创新日本大会、新技术推介会等，向企业介绍推广最新学术研究成果；举办需求研讨会，方便企业发布技术需求，便于高校帮助企业解决技术难题。研发支持指 JST 根据研究项目的类型、进展情况设计相应的支持计划，满足从技术筛选、研发、商业化应用到孵化全流程需求，加速新技术的商业化应用^[22]。

JST 通过“委托开发”和“开发斡旋”两种形式，推动技术研发，推动技术从拥有者到使用者之间的转移。委托开发是由 JST 广泛搜集科研成果，从中挑选出对国民经济发展具有重要意义但企业难以独自研发完成的科研成果，经新技术审议委员会专家集体审议确定后，委托企业进行应用开发，给予相应的研发经费支持。开发斡旋是 JST 收集具有市场前景的科研成果，由专家、技术人员和学者组成的新技术斡旋委员会为科研成果所有者选择有意合作开发的企业，协助签订开发合同，监督执行情况。

JST 构建了产学研合作知识数据库，包括科技成果转化过程中的成功经验数据库，也包括失败案例数据库，帮助后来的研究人员汲取经验教训，提高科技成果转化成功率。此外，JST 还开展科技创新人力资源发展项目，提供人力资源免费培训课程，提升产学研合作相关人员的能力。

JST 实行独立行政法人制度，经营模式采取行政首长负责制，行政首长可由主管部门任命或公开招聘。行政首长是法人代表，全面负责 JST 的经营管理，可直接决定日常事务，重大事项集体讨论后由行政首长裁决。JST 采取中期目标管理制，政府主管部门提出一个 3~5 年内需要完成的目标，如业务发展目标、财务状况目标、服务能力目标、管理机制改革目标等，JST 根据目标制订具体执行计划，并接受政府主管部门的评估^[23]。

③ 经验借鉴。

一是健全动态的政策法规体系为产学研用合作提供了保障。日本有一套相对完善的促进

产学研用合作的法律体系，20世纪90年代之后相继出台《科学技术基本法》《大学技术转移促进法》《知识产权基本法》《国立大学法人法》《产业活力再生特别措施法》等法律法规。这些法律相互补充配套，可操作性强，凸显了产学研用在科技创新中的地位，也推动了日本产学研用合作纵深发展。同时，日本政府制定了一系列促进产学研用合作的政策。这些政策强调对产学研用合作的正向激励，并适时根据外部环境变化对产学研用合作政策进行调整，且这些政策具有较强的延续性。例如，日本政府每年对产学研用合作情况进行调查，分析其发展模式、路径、策略等是否与最初设定目标相符合，并对未来发展趋势进行科学预测，进而确定是否调整产学研用合作政策^[24]。

二是完善的中介体系和平台加速产学研用协同发展。日本政府高度重视产学研用合作专业机构建设。这些专业机构大都由行业协会、企业、高校、科研机构牵头组建，运行机制较为灵活，在促进产学研用合作方面起到了联络和协调的作用，是产学研用合作协同发展体系中的重要组成部分。例如技术转移组织（TLO）作为联系高校和企业之间的中介，提供成果发掘、评价和选择以及专利申请、保护等服务，可以大大降低高校和企业产学研用合作搜寻和交易成本，加速高校科研成果商业化应用。产学研用合作专业机构分布于多个层级，涉及多个行业，例如日本学术振兴会、半导体研究振兴会、新技术事业团、理化研究所、电子工程共同研究机构、筑波研究联合体等，有效推动了各行各业的产学研用合作。

三是科学的产学研用合作评估体系保证产学研用合作持续开展。日本文部科学省为考察产学研用合作水平，特别是高校产学研用合作的绩效水平，构建了一套完整的绩效评估体系，主要指标包括参与产学研用合作的高校数量、高校与企业合作研发项目数、高校与企业合作研发投入、专家派遣人数、高校专利申请数、高校拥有专利的数量、高校初创企业的数量、专利使用许可的数量及收入、其他知识产权收入等^[22]。通过开展纵向和横向比较，发现各地区产学研用合作特征、优势及不足，增强政策制定的精准性，提高科研成果转化率，提升科技创新对经济社会发展的支撑力。产学研用合作绩效评估体系兼具稳定性和动态性特征，在一定时期内保持稳定，以保证产学研用合作的稳定，从长期来看，绩效评估体系会随着经济社会等外部环境变化不断优化调整。

14.3.2 / 国内模式探索完善

为推动新材料产学研用深度合作，推进新材料上下游企业、高校、科研院所等协同创新，自“十三五”开始，我国在新材料重点领域开展了公共服务平台建设、上下游合作机制构建等一系列产学研用协同发展探索，在关键核心技术突破、科技成果商业化应用、上下游供需衔接方面取得了积极进展。“十四五”期间，我国将在前期工作基础上继续完善新材料产学研用协同发展机制，同时探索一些新型产学研用协同发展模式。

(1) 国家级创新中心

为解决我国关键核心技术受制于人、产业共性技术供给不足、创新成果产业化不畅等问题，增强我国自主创新能力，“十三五”以来，我国密集部署了一批国家级创新中心，包括国家制造业创新中心、国家产业创新中心、国家技术创新中心。

这三大中心有区别也有联系，制造业创新中心以制造业重大创新需求为导向，由工业和信息化部批复建设；产业创新中心面向战略性领域，定位于获取未来产业竞争新优势的某一特定产业技术领域，由国家发展改革委批复建设；技术创新中心以关键技术研发为核心使命，产学研协同推动科技成果转移转化与产业化，由科技部批复建设。制造业创新中心和产业创新中心更强调企业主导，技术创新中心更强调高校和科研机构作用。三大中心都是国家级创新平台，都是整合行业内创新资源、开展前沿技术和共性关键技术/先进适用产业技术、开发与推广/开展关键技术攻关、为企业提供投资孵化服务的载体。

制造业创新中心从2016年开始启动建设，截止到2020年底，已有17家国家制造业创新中心批准建设。产业创新中心从2018年开始启动建设，至今有国家生物育种产业创新中心和国家先进计算产业创新中心两个中心获批建设。技术创新中心从2017年开始筹建，至今有国家高速列车技术创新中心和国家新能源汽车技术创新中心两个中心批复建设。由于制造业创新中心数量多，建设时间稍长，所以本节着重介绍制造业创新中心。

① 定位与功能。国家制造业创新中心是国家级创新平台的一种形式，是由企业、科研院所、高校等各类创新主体自愿组合、自主结合，以企业为主体，以独立法人形式建立的新型创新载体。制造业创新中心以制造业创新发展的重大需求为导向，利用整合重组现有创新资源和载体，开展技术开发到转移扩散到首次商业化应用的创新链条各环节的活动，打通技术、组织、商业、资本之间的分割与壁垒，打造跨界协同的创新生态系统，形成以国家制造业创新中心和省级制造业创新中心为核心节点的多层次、网络化制造业创新体系。

制造业创新中心主要任务有开展产业前沿及共性关键技术研发、建立产学研协同创新机制、加强知识产权保护运用、促进科技成果商业化应用、强化标准引领和保障作用、服务大众创业、万众创新、打造多层次人才队伍、鼓励开展国际合作。

② 总体布局。制造业创新中心包括国家制造业创新中心和省级制造业创新中心。根据制造强国战略，围绕新一代信息技术、高端装备、新材料、生物医药等领域创新发展的重大需求，建设一批制造业创新中心。到2020年，形成15家左右国家制造业创新中心；到2025年，将形成40家左右国家制造业创新中心。在有条件、综合实力较强的地方，建成一批省级/区域制造业创新中心，作为国家制造业创新中心的支撑和补充。

③ 运营管理模式。以企业为主体，依托已有产业技术联盟，或引导鼓励企业、科研院所、高校，尤其是转制院所，自愿选择自主结合，构建各类产业技术联盟，发挥各自优势，整合相关资源，探索机制和模式创新，创建制造业创新中心。同时，发挥地方政府积极性，在有条件、地方综合实力较强的省市，鼓励开展制造业创新中心建设。

组织结构上看，根据参与成员和所在行业特征，制造业创新中心的组织结构由参与创建的各成员单位协商决定，采取企业法人等形式。制造业创新中心经营活动自主决策，实现自负盈亏、自我发展。运行机制上，制造业创新中心按照责权明确、科学管理的模式运行，自主决策、自我管理。经营机制上，制造业创新中心根据市场需求，自主开展各类经营活动，主要的形式有吸收集聚成员单位等各方面的创新资源和科研成果，自主开展技术研发或接受企业委托开展技术研发，将成果及时辐射给行业，向企业尤其是中小企业源源不断提供前沿技术、共性技术和新工艺、新设备、新知识。制造业创新中心建立利益共享、风险共担的有效机制^[25]。

(2) 国家新材料生产应用示范平台

•••

为解决生产与应用相互脱节、关键领域保障不足的问题，全面提升新材料产业生产应用推广水平，2018年，我国开展国家新材料生产应用示范平台建设。截止到2020年底，已有核能材料、航空材料、航空发动机材料等14家国家新材料生产应用示范平台批复建设。

① 定位与功能。国家新材料生产应用示范平台（以下简称示范平台）属于国家级创新公共服务平台，是以企业为主体、产学研用紧密结合的新型创新载体。示范平台围绕制造强国战略需求，在关键领域由新材料生产和应用企业牵头，联合高校、科研院所、设计单位等吸收产业链相关单位，构建上下游有效协同的新机制、新体制、新体系，实现新材料与终端产品同步设计、系统验证，推动企业完成从研究开发到实现应用，缩短新材料开发应用周期。

示范平台主要建设任务有建设新材料应用评价设施、新材料应用示范线、新材料生产应用信息数据库、新材料生产应用公共服务体系、新材料生产应用人才服务体系。

② 总体布局。示范平台衔接已有国家科技创新基地，打破技术与行业壁垒，实现新材料与终端产品协同联动。围绕《新材料产业发展指南》明确的十大重点，力争到2020年在关键领域建立20家左右。鉴于“十三五”示范平台建设情况，预计“十四五”期间，根据新材料产业发展需要和目标，将会继续开展示范平台建设，完成现有示范平台的验收总结，推动新建一批示范平台。

③ 运营管理模式。示范平台组建方式原则上由参与创建的各成员单位协商决定，可采取企业法人、联合体等形式。可建立成员单位分平台，吸收各单位新技术、新模式、新应用，建立紧密的上下游合作机制。对于采取联合体形式组建的示范平台，成员单位需要签订合同并约定上述相关事项。组织架构上，示范平台建立科学的决策机制，设立专家委员会、监督委员会等，实现责权明确、科学管理。运营管理上，平台组建后按照市场化运行，自主决策、自负盈亏。建设和运行经费主要通过成员单位自筹、技术转让、对外服务、产业化运营收益等渠道解决^[26]。

(3) 上下游合作机制

•••

为强化新材料产业链协同，推动上下游企业联合攻关，自2015年起，围绕制造强国建设需求，在民机材料、新能源汽车驱动电机用稀土永磁材料等领域形成了上下游合作机制。

① 民机材料上下游合作机制。2015年，为推动民机铝材跨行业协同创新，工业和信息化部牵头成立了民机铝材上下游合作机制，该机制的主要任务是围绕航空铝材研发、生产、应用关键环节，通过加强上下游单位协同创新、加大对重点牌号研制和平台建设支持、完善民机铝材应用引导政策和标准体系等，鼓励国企民企加强合作，攻克民机铝材关键核心技术、专用装备、考核认证等难题，建立自主创新的新材料体系和装备技术体系，支撑我国航空航天事业发展。

民机铝材上下游合作机制的主要机制是由市场推动形成的，各成员单位有明确的职责和

分工，成员单位利用合作机制平台，定期会商沟通，开展深度合作。相关政府部门给予政策支持，对合作机制运行情况进行监督检查，积极协调解决合作机制中出现的难点问题。

2019年，为进一步推动上下游紧密协作，以民机铝材合作机制为基础，进一步将铝材扩大至钛材、非金属材料、复合材料等民机材料品种，形成民机材料上下游合作机制，成员单位进一步扩大，包括中国商飞、北京航材院等30多家单位成为民机材料上下游合作机制的成员单位。

② 新能源汽车驱动电机用稀土永磁材料上下游合作机制。2018年，为推动新能源汽车、驱动电机、稀土永磁材料产业链协同，实现全产业链协同发展，中国汽车工业协会、中国稀土行业协会牵头成立新能源汽车驱动电机用稀土永磁材料上下游合作机制（以下简称新能源汽车合作机制）。

新能源汽车合作机制的主要任务是建立新能源汽车整车、电机协同发展带动电机关键部件和磁体材料发展的协同创新组织，解决稀土永磁材料在新能源汽车上利用率低和相关标准体系不完善问题，提升驱动电机性能，降低成本，助力新能源汽车发展。

新能源汽车合作机制充分调动整车企业、电机企业和磁材企业的积极性，利用市场机制建立合作框架，明确重点任务和时间节点，推动成员单位在合作框架内开展关键核心技术协同攻关，开展标准建设和完善工作，提升新能源汽车产业链竞争力。

新能源汽车合作机制的组长单位为中国汽车工业协会和中国稀土行业协会，成员单位有北汽新能源、宇通客车、吉利汽车、比亚迪汽车、精进电动、上海电驱动、中国汽研、中科三环、宁波韵升、钢研总院、有研总院、宁波材料所、北方稀土、厦门钨业、苏州绿控、哈工大等20多家单位。

（4）其他探索

① 新型研发机构。新型研发机构是新一轮科技革命和产业变革的产物，是我国深入实施创新驱动发展战略、提升国家创新体系整体效能的重要载体，在推动科学研究向技术研发、成果转化、市场应用转变方面发挥越来越重要的作用。近年来，我国从中央到地方都高度重视新型研发机构建设，涌现了一批新型研发机构。根据《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》，“十四五”期间，“支持发展新型研究型大学、新型研发机构等新型创新主体，推动投入主体多元化、管理制度现代化、运行机制市场化、用人机制灵活化”，新型研发机构将会加速发展，成为推动政产学研用协同发展的重要平台。

根据2019年9月科技部出台的《关于促进新型研发机构发展的指导意见》，新型研发机构有别于传统研发机构，其投资主体更加多元化、运行机制更加市场化、组织方式更加灵活化，通过科技、资本、产业、教育四位一体的发展模式，建立了有利于产业技术研发、科技成果转移转化、政产学研用协同创新的新机制，成为区域创新能力提升的支撑和推动经济发展的引擎。在中央高度重视下，各地出台了相应政策细化对新型研发机构的支持，形成一批不同主体、不同模式、不同领域、不同路径的新型研发机构群体。

新型研发机构参与主体多元化，由高校、科研机构、企业、地方政府、服务机构等构成，各主体相互合作和协调，形成政产学研用协同发展的组织。根据建设主体的不同，新型研发

机构的模式：

一是政府主导型，地方政府根据区域优势、主导、特色产业发展需求，集聚高校、科研机构等创新资源与相关企业等产业资源，搭建产业技术协同创新的平台；

二是企业主导型，由行业内龙头企业牵头，联合高校、科研机构、服务机构、地方政府等，以产业链产品创新为导向，围绕产业链打造创新链，重点解决产业发展的技术瓶颈；

三是高校或科研机构主导型，由优秀科研团队或科研骨干牵头，与地方政府、企业等合作，吸引政府资金、投资基金、社会资本等参股组建独立法人企业，推动科技成果转化和先进成果产业化应用。

从当前新型研发机构建设情况来看，大部分新型研发机构的建立与运行主要依赖于政府的财政投入，尚未形成自我造血、自负盈亏的持续运行机制，组织结构、收益分配、资本运作等方面还未建立有效的制度保障，导致部分新型研发机构定位不清、运营效率不高，新型研发机构“新”的特色和作用还未得到充分释放。为充分发挥新型研发机构在政产学研用协同发展中的作用，需要加强统筹协调，完善新型研发机构的体制机制，创新组建、投入、运行管理等模式。新型研发机构的建设必须坚持以下原则。

一是坚持市场主导、政府引导原则。以市场需求为导向，坚持企业在创新中的主体地位，特别是在政府投入为主导的建设初期，政府部门要避免对新型研发机构进行过多行政干预，加强对新型研发机构发展方向、战略等方面的指导，提升公共服务能力，促进企业与高校、科研机构的深度合作，降低企业、高校、科研机构合作的交易成本。

二是建立多元化的投入保障机制。新型研发机构早期建设阶段，以财政投入为主，侧重于对研发机构建设、产业技术研发、人才培养等方面的支持；发展阶段，直接的财政支持逐步减少，探索依靠承接政府项目、开展有偿服务、引入社会资本等方式支持科技成果孵化、技术服务、专利运营等；成熟阶段，财政资金逐步退出，引导社会资本进入，推动企业、高校、科研机构等建立以股权为纽带、市场化运作的模式。

三是坚持企业化的运营管理模式。新型研发机构实行理事会领导下的院长负责制，采取相对扁平的组织机构，坚持引入市场化竞争机制，实行有效的绩效考评机制，激发创新人才和团队的积极性。除政府、企业、高校、科研机构主导型新型研发机构外，可以采取政府市场结合型、多主体联合组建的综合性新型研发机构，推动新型研发机构多样化发展。

四是建立动态的考评机制。建立新型研发机构绩效评价指标体系，建立定期动态考评与激励机制。依托第三方机构，对新型研发机构的成果转化、企业孵化、产业辐射、人才培养、运营管理等方面进行考评。对新型研发机构开展监测监管，实行优胜劣汰、动态调整机制，并将考评结果作为政府扶持的依据，确保新型研发机构科学规范运营。

② 中试平台。中试是产品正式投产前的试验，即中间阶段的试验，是产品在大规模量产前的较小规模试验。中试平台是为科技成果转化提供开发环境、试生产环境、测试环境的平台或载体，在推动研发成果从实验室进入到规模化生产、加速科技成果转化、完善自主创新体系方面起到至关重要的作用。中试平台主要职能是技术产品化试制、试制产品测试、工艺设计、原料品质认证、产品标准的数据管理等^[27]。

长期以来，我国一直加大在中试环节的投入，政府、企业等都开展科技成果中试熟化能

力建设，取得了积极的成效。目前来看，中试平台主要有三种模式。第一种是政府支持建立的公共服务平台，例如国家工程技术中心。截止到2019年，建设了360个国家工程技术研究中心，其中依托企业建设的有189个，占比达到52.5%；建成1650个中试基地和1646条中试生产线，每年产生近7000项科技成果，自主创新成果占85%以上，主要分布在新材料、先进制造、信息通信与空间遥感、交通、能源、生物技术与人口健康等15个领域^[28]。第二种是行业内龙头企业建设的服务于企业创新发展需求的中试车间或中试生产线。第三种是中介服务机构建设的中试基地或平台，通常为区域内同类型企业提供中试设备、场地、人才等和专业化的服务。

尽管企业、高校、科研机构都意识到中试环节的重要性，但由于投资较高、投资风险大、利益分摊不合理等原因，我国中试熟化还存在动力不足、资源分散、运行机制不健全等诸多问题，制约了我国科技成果转化效率。“十四五”期间，我国应进一步促进新材料产业链与创新链的深度融合，建设一批新材料产业中试平台。新材料产业中试平台建设应注意以下几点：

一是充分整合利用现有中试平台资源。继续加大对中试平台建设的支持力度，优化国家工程技术中心布局，支持国家硅基LED工程中心、国家碳纤维工程中心、国家特种矿物材料工程中心、国家镍钴新材料工程中心等新材料领域国家工程技术中心在关键核心技术自主创新方面取得突破。发挥国家高新区、大学科技园、科技企业孵化器、专业化众创空间、成果转化加速器等科技成果中试熟化平台的重要作用，加速区域新材料科技成果转化。

二是放大现有技术平台的中试功能与作用。推动新材料领域国家制造业创新中心、国家技术创新中心和新材料生产应用示范平台等建设，集聚创新资源，推动企业、高校、科研机构等在关键核心技术的协同创新、技术转移扩散和首次商业化应用，开展跨区域、跨领域广泛合作，跨越从实验室到工程化、产业化之间的“死亡之谷”。

三是鼓励行业龙头企业建立服务行业的中试平台。鼓励有条件的龙头企业利用自身的人才、技术及资源优势，建立开放式中试放大平台，畅通创新成果转化渠道，实现大中小企业之间多维度、多触点的创新能力共享、创新成果转化，以平台赋能产业创新发展。

四是推动技术转移机构和技术经理人队伍建设。加快技术转移机构建设，完善技术转移体系，创新成果转化模式，提升科技服务能力。探索金融支持科技成果转化的新途径，推动金融与科技深度融合，从技术、人才、资金等方面推动产学研用协同发展，加快推动科技成果转化成为现实生产力。

③ 共性技术平台。共性技术是能够在多个领域广泛应用，对整个产业或多个产业产生影响和瓶颈制约的技术，是支撑创新链和产业链发展的基础性技术，具有通用性、关联性、系统性、开放性的特点。共性技术平台是从事共性技术研发、转化与应用的平台，是组织产业共性基础研究和应用研究、推动产业可持续发展、集聚和培养人才的重要平台。共性技术平台的主要职能包括开展共性技术研发，提供产品研发设计、检验测试、标准制定等专业化服务，引进培育创新创业人才，推动科研成果转化和新技术应用等。

共性技术平台是推进产学研用深度融合的重要桥梁。建设共性技术平台，集聚各方资源协同突破产业共性技术瓶颈，可以降低后续应用技术研发风险，是促进产业技术革新的重要途径之一。世界主要发达国家和地区都重视共性技术研发，美国、欧盟、日本等通过政府研

究机构、政府社会资本合作研究与开发计划、技术联盟等形式建设共性技术平台，满足产业发展的共性技术需求，推动后续技术创新，构建稳固持续的产业基础能力。其中政府研究机构形式指在政府内部设立有体系内研究部门从事专业性研究的实验室平台；政府社会资本合作研究与开发计划形式指政府有关部门发布研究计划，社会资本（或联合体）进行后续研发；技术联盟形式指企业牵头，联合高校、科研机构共同成立的研究平台^[29]。不管是哪种形式，总体上，共性技术平台中政府参与度较高，不同形式下政府参与模式不同，其中政府研究机构形式是政府参与度最高的形式，政府提供研发资金，组织研发力量，管理具体项目。

我国在共性技术领域不断探索，早期的共性技术研发大都由部委下属的专业化科研院所完成。20世纪90年代末，我国开始推进科研院所企业化改制，改制后的科研院所运营效率有所提高，但由于市场化考核导向和指标发生变化，过于追求短期经济效益，甚至部分科研院所投身于生产制造领域，导致对共性技术的研发投入减少，共性技术供给能力下降，科研院所提供的共性技术研发和下一代技术开发储备的功能逐渐弱化。随着我国经济进入高质量发展阶段，产业共性技术越来越受重视，从国家到地方不断加大引导支持力度，建设了一批多种形式的共性技术平台，例如产业技术创新战略联盟、产业技术研究院、产业公共技术服务平台等，也有企业或企业联合体、科研院所、科研基地（包括重点实验室、工程中心、技术研究中心）等通过技术合同、项目合作、共建实体等方式从事共性技术研发。

尽管国家和地方建立了大量共性技术平台，但由于缺乏顶层设计，平台性质多样，发展模式单一，尚未形成发展合力，导致我国共性技术研发能力不强，影响了产业基础能力和产业链现代化水平的提升。根据“十四五”规划纲要，“十四五”时期必须“集中力量整合提升一批关键共性技术平台，打造新型共性技术平台”^[30]。建设新材料共性技术平台必须坚持如下原则。

一是加强共性技术平台的顶层设计与政策引导。从国家层面加强共性技术平台的统筹协调和前瞻谋划，制定新材料领域急需突破的共性技术清单，统筹优化新材料共性技术平台布局，完善共性技术支撑体系。梳理评估科技部、国家发展改革委、工业和信息化部等相关部委主导批准设立的新材料领域国家共性技术平台，明确各平台的定位和功能，推进跨部门共性技术平台的整合优化，形成协同创新新格局，解决跨行业、跨领域的关键共性技术问题。

二是创新共性技术平台的建设模式。集中资源整合提升一批新材料领域共性技术平台，加快建设完善新材料领域国家制造业创新中心、技术创新中心、产业创新中心，继续发挥已有国家重点实验室、工程研究中心等在共性技术研发方面的主导作用；依托改制科研院所，强化共性技术供给主体功能，建设一批共性技术研发平台；整合国家和地方资源，根据地方产业特点探索建立国家级共性技术平台分平台、分基地或分中心。

三是推动共性技术平台建设主体多元化。对改制的科研院所实行分类化精细改革，愿意且能够持续供给共性技术的科研院所，探索回归公益属性，加大财政支持力度；鼓励新材料领域领军企业联合上下游企业、高校、科研机构等，通过兼并重组、合作、共享等方式组建共性技术平台，实现共性技术创新资源开放共享；发挥新材料领域协会、学会、联盟等行业组织作用，吸引企业和社会资本，开展共性技术攻关；鼓励政府、企业、高校、科研机构等

联合建设共性技术平台，形成政产学研用深度融合的创新体系。

四是构建稳定弹性的财政支持机制。健全财税和金融支持方式，引导社会资本加大对共性技术平台的支持。明确共性技术平台非营利性研发主体地位，构建稳定持续的经费支持机制，完善激励机制，从微观层面增强其自主投入共性技术研发的积极性。根据共性技术平台的特点和发展情况，建立科学的考评机制，实行差异化、竞争性的经费支持模式，对于资源配置效率高、共性技术研发成果多的平台，优先给予财政支持；对于从事技术应用面广、严重受制于人的共性技术平台，给予持续、高强度的财政支持；对于从事单一领域、市场化程度高的共性技术平台，鼓励市场化运作，给予竞争性支持。

14.4

推动我国新材料产学研用协同发展的建议

“十四五”是我国新材料产业高质量发展的关键时期。我国新材料产业面临的国际竞争压力日益增大。全球新材料产业主体仍是美国、欧盟、日本等发达国家及地区，凭借大型跨国企业在核心技术、研发能力、资金实力等方面的绝对优势，继续保持全球市场的垄断地位；韩国、俄罗斯等紧随其后，巴西、印度等发展中国家不甘落后，在新能源材料、生物材料领域快速发展。国际贸易保护主义愈演愈烈，我国先进基础材料出口难度将会加大，高端材料进口将严重受阻。面对新发展形势和新发展阶段，我国新材料产业必须坚持创新驱动发展，强化企业创新主体地位，促进各类创新要素向企业集聚，形成以企业为主体、市场为导向、产学研用深度融合的协同发展体系。

(1) 加强政策与市场协同，构建产学研用协同发展的生态体系

① 完善产学研用协同发展政策环境，建立完善的支持产学研用协同发展的法律法规和政策措施，加强对新材料产学研用协同发展的指导协调，规范和约束各主体行为，维护各主体合法权益，为新材料产学研用协同发展创造良好政策环境。

② 完善市场导向机制，利用市场化运作方式，引导创新资源集聚，引入金融资本等，激发创新要素活力，推动新材料企业、高校、科研机构等形成紧密合作的产学研用利益共同体。发挥龙头企业在产学研用协同发展中的主导作用，推动龙头企业成为新材料产学研用协同发展生态系统的主要构建者和科技成果转化的孵化器，构建龙头企业牵头、高校和科研院所支撑、各创新主体相互协同的创新联合体，提高协同创新效率。

③ 完善知识产权保障机制。加快新材料领域知识产权保护制度建设，细化产学研用合作中知识产权的归属及处置规定，规范科研成果定价方法，完善知识产权评估办法、程序和标准，提高评估机构资信水平。建立高效的知识产权综合管理体制，打通知识产权创造、运用、保护、管理、服务全链条，形成权界清晰、分工合理、责权一致、运转高效的体制机制。坚决惩处产学研用合作中知识产权侵权行为或违反约定的主体，建立知识产权信誉管理体系和信誉档案，依据信誉记录对各利益主体实行分类管理。

④ 完善利益分配机制。充分考虑新材料产学研用合作主体的人才、资金、设备、资源等创新要素投入，制定合理的利益分配方案，调动新材料产学研用合作主体的积极性。实行以

增加知识价值为导向的分配政策，提高新材料科研成果转化收益分享比例，加大创新人才的激励，保障科研人员各得其所。

（2）发挥新型举国体制优势，推动以下游需求为导向的产学研用协同发展

•••

① 充分发挥市场在新材料技术研发方向、路线选择、创新要素配置的导向作用。建立以“用”为导向的新材料创新要素融合新机制，明确新材料产学研用合作的工作重点和着力方向，拓展新技术、新工艺、新产品市场应用空间，充分发挥市场在配置新材料产学研用协同创新资源中的决定性作用。

② 充分发挥政府引导作用，以重大项目推动新材料产学研用合作。以重大装备需求和重大工程建设为指引，鼓励新材料企业提前介入重大装备研制和重大工程建设中，与下游用户企业、科研院所等围绕重大项目提出的要求，建立面向重大需求的新材料产学研用协同开发模式，形成上下游协作配套、联合攻关、共同实施重大项目的合作模式，加速新材料关键共性技术研发，推动技术成果的产业化应用，提高我国新材料的保障能力。

③ 充分利用政府政策，推动新材料产学研用深度合作。利用重点研发计划、科技重大专项等科技政策支持从事新材料基础研究、应用研究等前端研究的产学研用合作共同体；通过制造业高质量发展专项、国家制造业转型升级基金、制造业创新中心、产业创新中心、技术创新中心等支持从事新材料共性技术研发、成果转化与应用的产学研用合作共同体；通过新材料首批次应用保险补偿机制、新材料生产应用示范平台、资源共享平台等支持从事新材料首次商业化应用的产学研用合作共同体。

④ 发挥政府纽带作用，打通产学研用合作的“堵点”。发挥政府的引导调控作用，完善推动产学研用合作的财税和金融政策，引导新材料产学研用合作向高层次、产业链合作方向转变。加强科技部、国家发展改革委、工业和信息化部等新材料产学研用合作相关部门的统筹协调，加强中央与地方各相关部门的沟通合作，形成跨部门、跨区域的新材料产学研用合作推进机制，落实好促进新材料产学研用结合的政策措施。

（3）加大多元化资金投入，完善产学研用协同发展投融资机制

•••

① 建立多元化的投资主体，形成融合政府、企业、高校、科研机构、金融机构的多元化投融资机制。加大政府的引导投入，充分利用现有财政支持资金，支持新材料产学研用协同发展，同时引导银行、保险、风投等金融资本支持新材料产学研用合作，逐步形成以政府投入为引导、企业投入为主体、银行贷款为支撑、社会集资和引进外资为补充的多元参与的投资体系。

② 整合现有各类资金，加大对新材料产学研用合作的支持力度。支持新材料企业加大研发投入，提高研究开发费用占销售收入的比例，鼓励新材料企业与高校、科研机构等建立长期产学研用合作专项经费，推动企业成为新材料产学研用协同发展的投入主体。充分利用项目基金、匹配基金、种子基金、风险基金、青年基金等不同类型的基金推进新材料产学研用一体化。适度放宽风险投资进入新材料等高科技产业的限制，保障和拓宽风险投资的退出渠道。支持新材料企业上市，探索建立新材料企业上市绿色通道。

③ 推动产融结合，加速新材料产学研用协同创新。推动新材料企业与金融机构深度合

作，形成实体企业与金融机构的利益共同体，鼓励金融机构通过企业贴息、入股或控股等方式参与新材料产学研用协同发展。探索建立新材料产学研用协同创新风险补偿机制，对技术研发、中试、成果转化及市场推广应用等环节进行风险补偿，带动金融担保机构支持新材料协同创新项目，满足新材料产学研用协同创新各环节的资金需求。

④ 创新金融支持方式，设计符合新材料产学研用协同发展特点的金融服务方案。加速科技与金融资源的深度融合，推进知识产权质押贷款，引导商业银行资金满足新材料产学研用协同创新融资需求。建立“科技支行”“科技贷款公司”等，为新材料产学研用协同创新提供专业、高效、便捷的金融服务。推进科技保险发展，为新材料产学研用协同创新成果转化与市场化应用提供风险保障^[31]。

(4) 搭建产学研用协同发展平台，健全中介服务组织

① 加强新材料产学研用信息平台建设，完善产学研用对接机制。充分发挥国家新材料产业资源共享平台等公共服务平台优势，定期发布高校和科研机构的研究成果，征集企业技术需求，发布人才供需信息，向社会提供大型科研仪器、设备和公共实验室等创新资源，公布可以提供设计、检测、测试等专业技术服务的专家和机构名单，搭建新材料企业、下游用户、高校、科研机构等沟通交流的平台，降低新材料产学研用合作各主体的交易成本。

② 促进产学研用中介服务市场的资源整合，健全产学研用一体化的各类中介机构。优化整合科技企业孵化器、众创空间、大学科技园等各类新材料领域平台载体，打造新材料协同创新共同体，加速新材料创新要素聚集。推动创新创业中心、信息服务中心、专利事务所、资产评估事务所等资源整合，形成新材料产学研用各环节紧密结合的中介服务体系。

③ 加强各类科技中介服务机构建设，提升专业化服务能力。建立一批科技成果评估机构，重点发展新材料科技成果评估咨询机构、科技信息中心，以及有关技术、经济、法律等方面的咨询服务机构等。建立科技金融服务平台，提供风险投资、融资担保、上市辅导、金融理财、行业资讯和人才实训等多种服务，加速金融与科技、产业的深度融合。

④ 加强市场化的新材料产学研用协同发展社会组织建设，搭建开放共享的新材料产学研用协同发展网络。完善新材料产业链条，引导生产企业与科研院所、下游用户紧密合作，建立一批以新材料重点企业为主体，上下游紧密合作，分工明确，利益共享，成员优势得到充分发挥的新材料产学研用一体化发展联盟，形成从上游原料生产到新材料加工，再到下游示范应用的完整产业链，形成常态化、长效化的新材料产学研用协同发展合作机制。

参考文献

- | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [1] https://www.sohu.com/a/353499573_473133 . | [6] https://zjnews.zjol.com.cn/zjnews/nbnews/201712/t20171213_6035493.shtml . |
| [2] https://www.sohu.com/a/353499573_473133 . | [7] http://www.gd.gov.cn/gdywdt/bmdt/content/post_73035.html . |
| [3] https://baijiahao.baidu.com/s?id=1687273033932871679&wfr=spider&for=pc . | [8] http://finance.china.com.cn/roll/20160816/3859989.shtml . |
| [4] https://baijiahao.baidu.com/s?id=1687422878068564200&wfr=spider&for=pc . | [9] http://m.haiwainet.cn/middle/348215/2017/0411/content_30852183_1.html . |
| [5] https://baijiahao.baidu.com/s?id=1687422878068564200&wfr=spider&for=pc . | |

- [10] http://m.haiwainet.cn/middle/348215/2017/0411/content_30852183_1.html.
- [11] http://m.haiwainet.cn/middle/348215/2017/0411/content_30852183_1.html.
- [12] <http://news.hexun.com/2018-01-02/192140182.html>.
- [13] 黄健. 美国制造业创新研究所启示 [J]. 高科技与产业化, 2015: 56-59.
- [14] https://www.sohu.com/a/319563628_100003860.
- [15] https://www.sohu.com/a/319563628_100003860.
- [16] 薛万新. 德国产学研协同创新驱动机制及其对我国的启示 [J]. 创新科技, 2017, 203 (1): 4-8.
- [17] <http://wap.sciencenet.cn/blog-320892-1155183.html>.
- [18] 刘敬仪, 廖宇. 德国弗劳恩霍夫系统与创新研究所运作机制及思考 [J]. 智库理论与实践, 2020 (6): 88-94.
- [19] https://www.sohu.com/a/300381598_728387.
- [20] 黄宁燕, 孙玉明. 从 MP3 案例看德国弗劳恩霍夫协会技术创新机制 [J]. 中国科技论坛, 2018 (9): 181-188.
- [21] https://www.sohu.com/a/300381598_728387.
- [22] 邓元慧. 日本产学研的合作推进与评估 [J]. 科技导报, 2016, 34(4): 81-84.
- [23] 李力. 关于日本科学技术振兴机构的研究 [J]. 江苏广播电视大学学报, 2005 (6): 90-91.
- [24] 张同建, 王敏, 常光辉. 日本产学研发展路径及对我国的启示 [J]. 科学管理研究, 2020 (4): 157-163.
- [25] 工业和信息化部制造业创新中心建设工程实施指南 (2016—2020 年). 2016.
- [26] 工业和信息化部, 财政部. 国家新材料生产应用示范平台建设方案. 2018.
- [27] 郑琦. 基于资源整合的中试公共平台战略 [J]. 科技进步与对策, 2008 (8): 1-6.
- [28] 卢庆国. 关于支持企业建立高水平中试平台更好实现产学研结合的建议 [J]. 中国科技产业, 2020 (5): 15-16.
- [29] 唐海燕, 霍燃. 共性技术平台, 科创中心的催化剂 [J]. 科技中国, 2018 (8): 27-30.
- [30] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要. 2021.
- [31] 余华, 唐斌. 我国产学研协同创新机制优化路径研究 [J]. 湖南工业大学学报: 社会科学版, 2015 (4): 22-25.



作者简介

曾昆, 中国人民大学经济学博士, 副研究员, 赛迪智库材料工业研究所副所长, 主要从事新材料产业战略与政策、区域经济、产业经济等研究, 参与了《新材料产业发展指南》《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》《“十四五”国家战略性新兴产业发展规划》等多个国家政策的制定工作, 主持过工业和信息化部、国家发展和改革委员会以及北京市、黑龙江省、江西省等新材料及其相关课题 20 多个, 参与国家新材料产业资源共享平台等建设, 发表新材料领域论文 20 多篇。