中国颗粒学会成立40周年

纪念文集

1986-2026

薪传四秩·粒启新章



前　言

四秩微芒，聚粒成光。1986年11月，中国颗粒学会在北京正式成立，弹指之间，已走过四十载春秋。值此学会成立四十周年之际，我们编纂这部纪念文集，回望来路、铭记初心，致敬一代代颗粒学人的接续耕耘和守望，更激励来者，牢记使命，为中国颗粒学科的发展和繁荣不懈努力。

颗粒虽微，关乎万象。自郭慕孙院士等前辈擘画学科蓝图、筹建学会以来，我国颗粒学从萌芽起步，扎根流态化、粉体工程、气溶胶、超微颗粒、能源颗粒、药物制剂、微纳材料等方向，逐步成长为交叉融合、支撑国民经济主战场的重要学科。四十年来，学会恪守学术社团使命，在中国科学技术协会的领导下，在支撑单位中国科学院过程工程研究所的鼎力支持下，持续搭建国内外高水平学术交流平台，深耕品牌学术会议、主办学术期刊，积极推进产学研协同创新、青年人才培育与科学普及等工作，广泛团结广大会员与颗粒领域科技工作者，在基础研究、技术转化、行业服务、国际合作等方面稳步前行，见证了中国颗粒科技从跟跑、并跑走向部分领域领跑的非凡历程。

四十年风雨兼程，四十年薪火相传。这部文集，既是历史的回响，也是科学家精神的光芒。文集中收录了前辈追忆、学人感悟、学科综述、发展纪事与学会建设的片段，有拓荒者的远见坚守，有后继者的求索创新，记录着学科发展的关键节点、学术交流的温暖瞬间、服务国家需求的责任担当。它不只是过往成果的汇编，更是颗粒学人共同的精神家园，承载着“求真、笃实、协同、创新”的学术底色。

回望是为了更好地出发。当前，新一轮科技革命和产业变革加速演进，新质生产力蓬勃发展，颗粒科学在绿色能源、生物医药、先进制造、生态环境、新材料等领域的战略价值愈发凸显，也面临着新的机遇与挑战。站在四十周年新起点，中国颗粒学会将继续传承前辈治学精神，立足国家“十五五”发展大局，坚持学术为本、开放协同，持续打造高水平学术共同体，推动颗粒学科交叉创新，培育青年人才，深化国内外学术互鉴，面向国家重大需求攻坚克难。

微粒汇聚，可成山岳；星光相续，方致远途。谨以此文集，献给所有为中国颗粒科学事业耕耘奉献的前辈、同仁与青年人才。愿我们继往开来，以粒为基、聚力前行，共同书写中国颗粒科技事业更加璀璨的新篇章！

中国颗粒学会

2026年11月

目 录

“邂逅”流态化…… 祝京旭（ 1 -18 ）
流态化技术研发进展…… 流态化专业委员会（ 19-57 ）
砥砺前行四十载，逐梦星辰向未来…… 颗粒测试专业委员会（ 58-71 ）
有幸与中国颗粒学会颗粒制备与处理专业委员会结缘…… 颜富士（ 72-77 ）
气溶胶专业委员会发展历程…… 颜鹏、张仁健、武云飞（ 78-82 ）
超微颗粒专业委员会成立与发展：跨越海峡，凝聚微观世界的光
…… 林鸿明（ 83-90 ）
海峡两岸学术交流二十年回顾…… 邵刚勤、林鸿明（ 91-99 ）
三十载深耕纳米科技，四十载共筑颗粒未来：热烈庆祝中国颗粒学会成立四十周年
…… 成庆堂（100-102）
粒火相传四十载 微末深处见真情：纪念中国颗粒学会成立四十周年
…… 陈胜利（103-108）
药载匠心 粒筑华章：药物制剂与粒子设计专业委员会成立与发展纪念
…… 崔福德、唐星、石凯（109-119）
薪火传颗粒 能源启新程：能源颗粒材料专业委员会发展纪念
…… 魏飞、张强、黄佳琦、程新兵（120-122）
追光逐泡，砥砺前行：微纳气泡专业委员会成立与发展纪实…… 李攀（123-127）
从空气浮尘到吸入药物的星“尘”大海：吸入颗粒专业委员会发展纪略
…… 邵奇、王晓飞、栾瀚森、毛世瑞（128-133）
发光颗粒专业委员会发展历程…… 曾海波（134-136）
砥砺十三载，聚沙成平台：颗粒计算专业委员会成立回顾
…… 王利民、季顺迎（137-141）
化学链专业委员会的筹备成立历程…… 赵海波、郭庆杰、段伦博（142-144）
从 iPOPA 到专委会：晶态多孔颗粒学术共同体的形成…… 姚明水、孙麓（145-151）
含能聚力，颗粒赋能：中国颗粒学会含能颗粒专业委员会的筹建与发展
…… 谈玲华，魏贤凤，张家瑞（152-166）
从粗放监测到精准计量：从生态环境领域看颗粒计量及标准化发展历程
…… 张国城、张文阁、李力（167-199）

“邂逅”流态化

祝京旭
宁波东方理工大学、加拿大西安大略大学

进入流态化领域，说来是偶然中又有其必然。说到偶然，是因为我进入化学工程专业，本就是一场意外。1977 年我参加恢复高考后的首次考试，觉得自己对逻辑推理有兴趣、也更喜欢动手制作，就填报了清华大学“工程物理”专业。1978 年初顺利收到了录取通知书，欣喜之余也没去留意后边还标注了一个“250”编号，事后才知道那是指“核燃料后处理专业”。入校后我们 33 位同学，因这个“250”专业课程设置与化工系高度重合，被整体调入了化工系。近些年出去讲座，时常有主持老师让我介绍一下我的专业选择，期待着能给“后来者”以激励，我总会笑着打趣：并非我主动选择化工，倒是一个“二百五”（北京话形容头脑简单、做事莽撞），把我送进了化工领域。

清华大学那时的学制为五年，但因我们 1977 级是当年冬月考试、1978 年春季入学的，为保障 1982 级新生在秋季正常入学，我们的实际学制为四年半，于 1982 年夏天毕业。毕业前我参加了研究生招考，并以超出百余分的优势获全班第一名，拿到了本专业唯一的出国名额。临近毕业时系领导动员我放弃研究生资格留校任教，再协助安排以在职身份寻机出国学习，学成之后直接返校成为教学骨干。当时，核化工已不是国家急需专业，我便被跨专业分配到了化学工程教研室下属的反应工程与流态化课题组，就此开启了我长达四十余年的“流态化生涯”。

说到必然，应该与流态化这个专业本身有关。相比其他化工专业，含有多相流动的流态化，显示出其变化的多样性及其状态的不确定性。但恰恰就是这些与流态化中颗粒随机流动相类似的多样与多重特性，给我们这些从事流态化工程的研究者，留下了更多开发创造的空间。这也正好顺应了自己追求“不循常规”、喜欢“独辟蹊径”的性格。所以在进入流态化专业之后，就被其所吸引，一扎进去，就是四十多年。

固体流态化作为化学工程领域一门独具特色的分支学科，以颗粒与流体之间的高效接触、强烈传热传质与便捷物料输送，成为支撑化工、冶金、石油、煤炭、能源、医药等国民经济支柱产业的核心技术。自 20 世纪 40 年代海外华人学者率先开启流态化研究，到 1956 年郭慕孙先生回国建立国内首个流态化研究室，再到 1962 年召开首届全国流态

化会议，中国流态化事业走过了一条从无到有、从基础探索到工业应用、从国内协同到国际引领的波澜壮阔道路。而历届全国流态化会议，既推动了中国流态化的进步，也展示了中国流态化的历史发展轨迹。

全国流态化会议，从 1962—1993 年共办了 6 次，除了特殊历史时期之外，基本是三年一次。在“暂停”了 20 年之后，又于 2013 年重新恢复，开启了二年一届的新循环，至今又已经举办了七届。本人有幸参加了“前六”中的第三、六届，又赶上了“后七”中的第七、九、十一、十二届。前后合计参会次数近半，有可能是参与这一系列会议最多的人了。我也由此与流态化结下了“不解之缘“，这些会议不仅是我学术路上的重要节点，更让我结识了众多的良师益友，对我的学术道路与事业发展产生了深刻影响。因而在值此中国颗粒学会成立四十周年之际，特撰写此短文回顾中国流态化发展史，以致纪念。

回顾这一段历史，不禁让我想起当年的奋斗，也想起了许多老朋友，一起交流、一起讨论的美好时刻。也忘不了那些带领我们前进的前辈与师长。今特写下这段文字，既是记录自己作为一名流态化工作者的亲身经历，也借此向所有为中国流态化打下基础、开拓方向、一直坚守的前辈与朋友们，表示最诚挚的敬意。

1 学科溯源：华人学者的开创性奠基（1940s—1961）

中国的流态化研究，最早源于两位华人学者在 20 世纪 40 年代，参与世界流态化领域开创工作的经历，为国内学科发展埋下伏笔。1945 年，汪家鼎先生在美国麻省理工学院（MIT）完成硕士学位论文，聚焦褐煤的流态化低温干馏的应用研究。这是世界范围内华人学者发表的第一篇流态化专业研究论文，首次将流态化原理与能源转化相结合，开辟了华人参与国际流态化研究的先河。

紧随其后，郭慕孙先生在流态化基础理论领域实现了世界级突破。1946 年，郭慕孙先生在美国普林斯顿大学完成硕士论文，聚焦流态化核心机理；1948 年，他与导师合作发表流态化分类研究论文，系统提出散式与聚式两种不同的流态化类别及其区分判别准则。这篇论文历经近八十年检验，至今仍是国际流态化领域引用率最高、影响力最广的经典文献之一，成为世界流态化学科发展史上的里程碑之一。郭慕孙先生也因此成为国际流态化领域的早期开拓者之一，为中国流态化学者在国际学界赢得了先发地位。

郭先生 1946 年从普林斯顿硕士毕业后，曾经在可口可乐等公司工作，之后于 1956

年回国进入中国科学院化工冶金研究所（化冶所，后改名为过程工程研究所），创建了国内第一个流态化研究实验室。这标志着流态化研究正式从海外转回国内落地，学科发展进入本土化、体系化建设阶段。改革开放之后，郭先生担任中国科学院化工冶金研究所的所长，也是 1980 年当选的资深院士之一，他的学生中有李洪钟、李静海等后来的中国科学院院士，及一大批有造诣的学者，师生们对现在的过程工程研究所的创办与发展，做出了根本性质的贡献。

在这一阶段，国内流态化研究迅速起步。研究者聚焦气固两相流、流态化稳定性、分布板设计等共性基础问题，同时对接国家工业需求，探索流态化在石油催化裂化、矿物焙烧、煤炭转化等领域的应用。1963—1964 年，郭慕孙先生在科学院院刊上连续发表两篇英文论文，系统提出广义流态化理论，用统一理论框架描述不同颗粒、不同流体体系的流态化行为，突破了传统流态化研究的局限，形成了具有中国特色的流态化理论体系，为后续全国范围内的研究协作奠定了理论基础。

到 20 世纪 60 年代初，国内流态化研究已从零星探索走向规模化布局，中科院系统、高校、产业院所纷纷组建研究团队，科研力量初具规模。一场全国性的学术盛会呼之欲出，首届全国流态化会议应运而生。

2 启航之路：第一届全国流态化会议（1962 年，北京）

1962 年，第一届全国流态化会议在北京召开。这是中国流态化发展史上首次全国性学术会议，是学科从分散研究走向协同发展的重要标志，可以被誉为中国流态化事业的“启航大会”。

此次会议由中国化工学会主办，汇聚了中科院、高等院校、化工部、冶金部、石油部等全国 66 家单位的科研力量。会议规格之高、参与范围之广，在当时的化工领域前所未有。开幕仪式上，中国化学化工学会常务理事、北京石油学院（现更名中国石油大学）副院长曹本熹致开幕词；中国化工学会会长、化工部副部长侯德榜发表重要讲话；会议闭幕时，中国化学化工协会秘书长、石油化工科学研究院副院长侯祥麟致闭幕词。3 位泰斗级学者亲自坐镇，足见国家对流态化技术的高度重视。

曹本熹先生在开幕词中，精准阐释了流态化技术的核心价值：流态化作为一门新兴技术，在国外近二十年得到广泛应用，其核心优势在于颗粒表面积大、流体与固体流动剧烈，可大幅强化传热传质效率，同时简化颗粒输送流程。这一特性能够帮助工业部门

提升生产效率、减少设备投入、节省钢材、降低投资与生产成本，在化工、冶金、石油、煤炭等领域具备不可替代的战略意义。

侯德榜先生在讲话中，进一步明确了流态化技术的工业应用场景。他指出，流态化已在石油催化裂化、硫酸生产（黄铁矿焙烧）、合成氨原料气制备、苯酐生产（萘氧化）等关键工艺中实现应用，是支撑化工产业升级的核心技术。他同时强调，国内流态化研究虽然已取得初步成果，但仍存在诸多技术难题亟待突破，呼吁全国科研工作者协同攻关，推动技术落地。

侯祥麟先生在闭幕词中，全面总结了会议成果。此次会议历时 6 天，正式代表 72 人、列席 67 人、旁听 83 人，累计提交学术报告 80 篇，研究内容覆盖流体力学、散热、换热、发热、吸热、催化等流态化全领域。其中流体力学相关报告 17 篇、换热过程 16 篇、吸热过程 21 篇，形成了“基础理论与工业应用并重”的研究格局。

作为会议的实际组织者，郭慕孙先生担任秘书长兼学术组组长，全程统筹会议筹备、学术组织与成果梳理。在学术总结报告中，郭慕孙先生结合国内研究现状与国民经济发展需求，提出了两大核心研究方向：一是聚焦石油催化裂化、贫铁矿磁化焙烧、颗粒干燥、液体流态化等重要新过程与新技术，对接国家工业急需；二是攻克流态化不稳定性、流态化质量提升、多孔分布板设计等共性理论难题，夯实学科发展根基。

第一届全国流态化会议的召开，具有划时代的意义。它首次整合了全国流态化科研力量，明确了学科发展方向，搭建了学术交流平台，让流态化技术从小众研究上升为国家战略层面的重点方向。此后，国内流态化研究进入快速发展期，理论探索与工业应用齐头并进，为后续学科复苏与繁荣积蓄了力量。

3 复苏与重启：第二届全国流态化会议（1980 年，北京）

1962 年首届会议后，受特殊历史时期影响，全国性学术交流中断近 20 年，但国内流态化科研工作者从未停止探索的脚步，基础研究和工业应用在曲折中不断前行。在郭慕孙、杨贵林等前辈的带领下，中科院化工冶金研究所、山西煤炭化学研究所、清华大学、浙江大学、成都科技大学（后并入四川大学）、南京化工学院等单位坚守科研一线，在顺丁橡胶流化床、煤热解气化、硫铁矿焙烧等领域实现了关键突破，流态化技术逐步在工业现场落地应用。

1978 年改革开放后，全国科技事业迎来复苏后的新春，流态化学科也迎来了重启学

术交流的契机。1980 年，第二届全国流态化会议在北京召开，由中科院化工冶金研究所主办，郭慕孙先生担任大会主席。此次会议是文革之后国内流态化领域的首次全国性盛会，承担着“重启交流、凝聚力量、接续发展”的历史使命。会议全面梳理了近 20 年国内流态化研究成果，重新搭建了高校、科研院所、产业单位的协作桥梁，明确了改革开放背景下流态化技术“自主创新+国际接轨”的发展路径。

郭慕孙先生作为世界流态化领域的开拓者与中国流态化事业的奠基人，在会议中发挥了决定性作用。他不仅统筹会议组织工作，还分享了广义流态化、无气泡气固接触、快速流态化等多项研究成果，引领国内研究紧跟国际前沿。在他的推动下，国内流态化研究迅速摆脱停滞状态，重新掀起科研热潮。

更具深远意义的是，此次会议为后续全国流态化会议建立了稳定机制，确定了“定期召开、院所轮值、聚焦应用、开放交流”的办会原则，为 1984—1993 年连续四届会议的成功举办奠定了组织基础。同时，会议亦开启了中国流态化国际交流的大门，为后续中日流态化会议等国际合作铺平了道路。

第二届全国流态化会议，是中国流态化学科发展的“新生节点”。它让中断近二十年的全国学术交流得以重启，让分散在全国各地的流态化科研力量重新汇聚，标志着中国流态化事业进入改革开放后的黄金发展期。

4 1984 年的第三届全国流态化会议，本人第一次参会

1980 年第二届会议后，国内流态化研究进入全面繁荣阶段。1984—1993 年的九年间，第三届至第六届全国流态化会议连续召开，这四届会议汇集了全国流态化领域的顶尖学者与青年骨干，也收集了当时最优秀的论文与报告，成为学科发展的“黄金主线”。

1984 年 5 月，第三届全国流态化会议在太原晋祠召开，由中科院山西煤炭化学研究所主办，这也是我第一次参加全国流态化会议。这次会议不仅是 1980 年代国内流态化领域最重要的学术盛会，也是学科发展走向成熟的标志性会议，被众多参会者视为“科研生涯的里程碑”。此次会议延续了高规格学术传统，大会主席仍由郭慕孙先生担任，学术委员会副主席由山西煤化所流态化与煤化工奠基人杨贵林先生担任。杨贵林先生为留苏学者，长期深耕煤化工流态化领域，是山西煤化所流态化团队的学术掌舵人，培养了李洪钟、张碧江、汪洋、张济宇等一大批流态化领域骨干。

会议学术委员会汇聚了全国流态化领域的顶尖学者，成员包括：王尊孝（沈阳化工

研究院）、彭成中（北京化工研究院）、陈甘棠（浙江大学）、陈清如（中国矿业大学）、石炎福（成都科技大学-后并入四川大学）、秦霁光（甘肃化工研究院）、夏诚意（南京化工学院）、胡宗定（天津大学）、金涌（清华大学）、张蕴璧（西北大学）等。这份名单覆盖了从北到南、从东到西的全国流态化核心力量，勾勒出 1980 年代国内流态化研究的完整版图。

当时国内流态化研究已形成鲜明的地域特色与研究方向：沈阳化工研究院王尊孝、马万荣聚焦流化床工业应用；北京化工研究院彭成中、卢天雄深耕流态化基础理论；天津大学胡宗定主攻三相流化床；中国矿业大学陈清如专注煤炭流态化转化；中石化洛阳研究院陈俊武推动流化催化裂化技术国产化；南京化工学院夏成意深耕硫铁矿流化床焙烧；浙江大学陈甘棠、王樟茂研究鼓泡床机理；成都科大石炎福、余华瑞探索流态化放大技术；西北大学张蕴璧聚焦流化床反应器；中科院化冶所王永安、刘淑娟、郭铨、刘大陆、严子纲等坚守基础研究；清华大学金涌、俞芷青团队主攻流化床内构件及其在湍动流化床与催化反应过程中的应用。

山西煤化所作为东道主，派出了最强科研阵容：杨贵林、彭少逸、张碧江、胡惠民、宋同贵、张济宇、汪洋等多人参会。张济宇无疑是会上表现最突出的年轻学者之一。他与另外一个青年骨干，承担了会议文档整理、论文集出版等核心秘书工作，也由此有机会精读了每一篇论文。所以在会议的提问环节，不断提出很尖的问题，对此我至今仍然印象深刻，并由此对其由衷地敬佩。张济宇后来以 40 多岁的年龄去澳洲读了博士，回国后先在煤化所、后去福州大学，长期从事流态化工作，是两地的学术带头人。张碧江后来接任了煤化所所长，汪洋也成为煤化所流态化项目的主要骨干之一。

中科院化冶所则无疑有着全国流态化界最强大的科研阵容。印象最深的是一大批中年学者，如王永安、刘淑娟、郭铨、刘大陆、王中礼、李佑楚、李希光、严子纲、郑建生、姚建中、王凤鸣（此名单应该更长，有待扩充）、还有做光纤探头的秦绍宗。在会场上以及随后去化冶所“串门”的时候，我有幸向他们多次请教。按说他们算是我的老师辈了，我的清华同学也有几位在化冶所跟着他们做硕士（如多文礼），但可能因为我是清华老师身份，性格又有些“老气横秋“吧，他们都很客气。还记得李佑楚与王凤鸣花了半天的时间，给我仔细讲解了他们循环流化床的全套设备，让我在出国前，对这一当时的“流态化新事务”，有了全面的了解。化冶所之前还有一位教父级的归国学者庄一安（庄逸安），他年龄比王中礼这批人大一些，算是郭慕孙先生副手级别的，太原开会时，

他已经退休去了澳大利亚。后来 1992 年在澳大利亚开第七届国际流态化会时，我还在那里见到了当时已经 70 多岁的庄先生。也见到了在澳洲做访问学者的李希光，还见到了另外一位在化冶所拿到硕士后，去澳大利亚攻博的毛其明。他比我稍微大几岁的，当时是在跟随 Owen Potter 攻读博士。

第三届全国流态化会议的历史意义，不仅在于学术成果的交流，更在于人才的汇聚与传承。它让老一辈泰斗、中年骨干与青年学子同台交流，完成了学科代际接力；同时全面展示了国内流态化研究的成果，明确了流态化基础、煤化工、石油化工三大核心方向，为 1980 年代学科发展划定了明确的路线图。此次会议也成为我们这些青年学者的“启蒙会议”，为我们日后走向国际流态化前沿埋下了种子。需要说明一下，所谓的年轻学者，也是 30～40 这个年龄段的、文革之前大学毕业的这些人。这些人当中，有些在文革后又读了研究生，“变成”了我与李静海们的同辈，比如李洪钟、张济宇这两位，都比我大 20 岁，还有一批工农兵学员毕业之后又考上硕士的，比如浙大的孙光林。真正文革后大学毕业的，20 多岁的参会者，可能仅有我一个，许多后来鼎鼎大名的如李洪钟、李静海、董元吉、孙光林等人，以及清华与我同期的蔡平、白丁荣等都因为是在学研究生而没有参会。反倒是我，因为走了先工作后出国的路，有机会参加那次盛会。而比我稍小几岁的、后来成为流态化重要骨干的几位杰出学者们，还都在上大学。

当时还出了一件轶事：不知何故，开会竟漏通知兰州化工研究所的秦霁光，以致他们全员缺席。所以在讨论下次办会单位时，大家都暗感有愧，一致同意第四届会议去兰州，别人都不争了。清华也就自动变成了再下一次的主持单位。

5 黄金时代的继续：第四届至第六届全国流态化会议（1985—1993 年）

继 1984 年之第三届流态化会议之后，相隔 3 年，第四至第六届全国流态化会议连续召开，分别由兰州石油化工研究院与兰州化物所、清华大学、与华中理工大学相继主办。这四届会议覆盖华北、西北、华中、华东地区，汇聚了全国流态化领域的顶尖学者与青年骨干，成为学科发展的“黄金主线”。

5.1 第四届全国流态化会议（1987 年，兰州）

1987 年 4 月 13—17 日，第四届全国流态化会议在兰州召开，由兰州石油化工研究院与兰州化物所联合主办，秦霁光先生是实际的大会主席，虽然在会议集中，他是把所有的学术委员们，都列为主席（共 16 位）。相比于第三次会议，学术委员还增加了刘淑

娟、李佑楚、张碧江等稍微年轻一些的。

兰州作为西部化工重镇，汇聚了石油、化工、材料等领域的科研力量。此次会议聚焦石油化工、催化流化床等应用方向，重点交流流化催化裂化、流化床氧化、流化床聚合等关键技术，推动流态化技术在石油炼化等领域的深度应用。会议文集收录文章 62 篇，其中包括流动 20 篇、传热传质与模型计算 9 篇、液固与气液固 11 篇、测试 6 篇、应用 16 篇。

会议延续了全国协作的传统，中科院系统、高校、石化院所的学者齐聚兰州，西部流态化科研力量首次成为会议主办核心，填补了国内流态化区域布局的空白。会议不仅交流了基础理论成果，更侧重工业放大与现场应用，研讨多项石化流态化技术的“卡脖子”难题，推动流态化技术从实验室走向工业化大生产。

秦霁光先生作为西部流态化领域的带头人，统筹会议组织工作，搭建了西部与东部、国内与国际的交流桥梁。此次会议让流态化技术在西部工业基地落地生根，形成了“东部理论创新、西部工业应用”的协同格局，进一步完善了国内流态化产业布局。

5.2 第五届全国流态化会议（1990 年，北京）

1990 年 4 月 9—13 日，第五届全国流态化会议在北京召开，由清华大学主办，金涌与刘淑娟担任大会主席，学术组成员增加了哈工大的杨励丹、清华的俞芷青等人。清华大学流态化团队在金涌与俞芷青等学者的带领下，已成为国内流化床内构件、湍动流化床、快速流态化、流型转变机理等基础研究的核心力量。金涌先生深耕气固流态化机理研究，提出流型转变判据与内构件优化方案，解决了流化床放大的关键难题，并于 1997 年当选中国工程院院士，成为国内流态化工程应用领域的领军人物。会议亦开始汇聚陆慧林、李洪钟、李静海、蔡平、白丁荣、阳永荣等新一代青年学者，他们开始在国际流态化领域崭露头角，为学科国际化发展储备了人才。

此次会议以基础理论创新与工业放大技术等为核心，重点交流催化裂化、快速流化床、湍动流化床等前沿方向，推动国内流态化基础研究紧跟国际前沿。

由清华大学主办本次全国流态化会议，提升了高校在流态化研究中的关键地位，形成了“中科院+高校+产业院所”三位一体的科研体系，让流态化研究更贴近教学与人才培养，为学科持续发展输送了新鲜血液。

5.3 第六届全国流态化会议（1993 年，武汉）

1993 年 10 月，第六届全国流态化会议在武汉召开，由华中理工大学（现华中科技

大学）主办，刘德昌、林志杰先生担任大会主席。由于两位主席是做流态化燃烧出身的，从这次起，会议开始吸收更多的煤燃烧专家学者参会。

本次会议也有更多的年轻学者参会。此次会议是 1962 年以来六届全国流态化会议的收官之作，全面总结了三十余年国内流态化研究的成果，梳理了理论创新、技术突破、工业应用、人才培养等方面的成就。会议聚焦循环流化床燃烧、煤转化、流态化环保技术等方向，对接国家能源与环境战略需求。

随着时代发展，国内学术交流机制逐步调整，此次会议后，颗粒学会决定将流态化会议并入中国颗粒学会年会。全国流态化会议进入中断期，直至 2013 年才重新恢复。但 1962 至 1993 年六届会议奠定的学科基础、搭建的交流平台、培养的人才队伍，早已成为中国流态化事业的坚实根基。

1993 年初我也开始了在西安大略大学的正式教职，特地赶回来参会，重会阔别九年的老朋友们。这次是我第二次参会，并以唯一国外参会者的身份，做了 2 个报告。其中一个是与清华大学合作的关于流化床中 clusters 分型的综述，该文后来获得了不少的引用。我也趁短期回国之际，先后走访了北京及周边多所重点院校与科研机构，其中包括清华大学、北京化工学院、中科院化冶所。还陪同郭先生一起去天津大学参加了全国反应工程会议。此行得以与各校的学者深入交流，搭建起初步的学术沟通桥梁，开启了我回国合作的先河。

从初办首届流态化会议的 1962 年，至第六届流态化会的 1990 年代，是中国流态化学科发展的黄金三十年。以六届全国流态化会议为关键节点，一代又一代科研工作者薪火相传，在理论创新、技术突破、人才培养、国际交流等方面写下了浓墨重彩的篇章。

6 我与国内的“流态化朋友圈”

1982 年我毕业后留在清华大学化工系化学反应工程教研组当助教，如果不算进修英语和日语的一年，算是 1983 年夏天正式“进组”，至今整整 43 年。当初是一边自学流态化知识，读 Kunii（国井大藏）与 Levenspiel 的《Fluidization Engineering》及 Davidson 与 Harrison 的《Fluidization》两本书，一边具体指导两位大学生毕业论文。一位是后来去加拿大跟我读了博士的张俊平，另外一位是蒋新茹女士，她后来是分配去了北京的一个炼厂。我们一起研究颗粒在两个流化床之间的流动现象，研究成果发表于 1985 年的中日流态化论文集中，算是我的第 1 篇科研文章。

1984 年 5 月开第三次全国流态化会的时候，我应该是最年轻的参会者，当时 24 岁。那时我已经在清华大学反应工程组“实习”科研近一年，在金涌、俞芷青教授领导下逐渐进入“流态化研究状态”。因我已确认出国跟 John Grace 教授读博，就希望能去参会以便了解国内情况、并多多结识同领域前辈专家。当时清华只有 3 个参会名额，金俞两位教授“破格”决定带我这个全组“老末”去参会，使我有机会全面了解全国流态化的科研格局。当时还陪金涌教授去了与我们合作的太原油漆厂，了解他们萘氧化生成苯酐的过程，后来我们帮他们安装了金先生发明的塔型内构件，将流态化从鼓泡床带入湍动床，从而大大提高了转化率。

人生诸多际遇，常始于偶然。42 年前在太原的几天，却成了我终生珍贵学术缘分的重要开端。我有幸结识了众多流态化领域的学界前辈，在向各位前辈交流讨教的同时，也为我后续的学术交流之路埋下了伏笔。在我远赴海外求学工作后，未敢忘记这份难得的学界情谊，始终坚持每年圣诞节，给这些流态化前辈寄去祝福的明信片。暖心的是，国内的前辈们总会趁着紧接着的春节时节予以回复。一来一往间，跨越山海的学术情谊稳稳延续，使我得以与大多数前辈始终保持联络，让我即便身在异国，也能始终与国内流态化学术圈紧密相连。后来并由此逐渐建立起长期的联系，有些还成了忘年之交，建立了长期的合作关系，比如中科院的郭慕孙院士、浙江大学陈甘棠与岑可法、成都科技大学（后并入四川大学）石炎福与余华瑞、西北大学张蕴璧、天津胡宗定与赵学明、中国矿业大学陈清如与赵跃民等，都结下了很深的友谊。

当年的“无心插柳”， 成就了我与国内流态化界的 40 年因缘。1992 年底，在我确认了来春去加拿大西安大略大学任教后，当年的“跨洋明信片”便将此消息通报给了各位学界前辈与友人。不少前辈得知后，热忱嘱托我回国之际去访问，多看看国内的高校，拓宽学术交流。比如 1992 年底我在美国开会时巧遇四川大学的余华瑞教授（石炎福夫人），在得知我要加入西安大略大学后，她向我推荐了他们最得意的硕士毕业后留校的张辉教师，后者就成了我的第一位博士生，与我长期合作三十余年，共同开发了超细粉末喷涂等技术，前年还被评为加拿大工程院的院士。之后也是与石炎福教授合作，我于 1999 年成为化工界第一位“海外杰青”，在四川大学合作了十多年，带出了 20 几位学生，发表几十篇文章，至今还是川大的荣誉教授，也由此结识了朱家骅、黄卫星等众多川大同辈，后又与更年轻一点的梁斌、褚良银等化工名师，结下了浓厚的友谊。

1987—1988 年，在我博士在读阶段，我与俞芷青、张蕴璧老师一起促成了导师 Grace

教授访问西北大学。之后也在 1990 年代，接待了张蕴璧教授夫妇、俞芷青教授首次访问加拿大。西北大学也是我独立任教之后第一个正式访问的北京之外的大学（1994 年），也是在那里我做了回国后第一次正式的学术报告（之前在清华与化冶所应该算是非正式学术交流吧—不出海报的那种）。

1998 年起长期与浙江大学合作，在化工方面，长期与陈甘棠教授及其之后的阳永荣等保持密切合作，后还与任其龙、陈丰秋等做了长期的联合办学项目，促成数十位中加两方化工专业本科学生的交换学习，包括多位杭州过去的本科生，获得了双学士学位。在燃烧方向，也长期与岑可法院士的流态化燃烧团队保持合作关系，与他手下同龄人包括倪明江、骆仲泱、严建华、樊建人、方蒙祥，以及更年轻一些的王勤辉等，都成为非常的好朋友。1986 年曾在加拿大接待首次来访的岑可法及其首位博士倪明江，后者后来成为浙江大学的常务副校长。在我 2002 年成功主持第七届国际循环床大会之后，应岑可法院士之邀，协助他们组织了 2005 年在杭州举办的第八届大会。他们也给我推荐了几位优秀的学生与访问学者去加拿大西安大略大学。

2008 年起开始与天大合作，并共同成功申报了“协同创新中心”，之后顺理成章地在天大成立了一个科研组，至今还带着博士生，一起发表文章、开发专利。2009 年开始我多次访问南京工业大学，那时夏成意教授已经退休，但我也是通过他了解到南京化工学院的。后来与欧阳校长（清华学长）及之后的黄校长、乔校长等，都成为超出学术之外的好朋友，与他们一起，做了几个中加联合办学的项目。

2014 年，徐州矿大的赵跃民教授（2023 年院士）找到我，重新续上了西安大略大学 Beeckmans 老教授与陈清如院士早点建立起来的合作与友谊，邀请我参加他的流态化干粉选矿团队，为他们应用研究提供基础科研的保障。十多年来来往往的也共同指导了几十名学生，申请了几个专利，数不清的文章，在加拿大帮矿大代培的几位博士也都回矿大工作了，至今还在合作中。

还有与广州能源所陈勇所长（我们是通过下面提到的八达岭会认识的）的长期合作，我们是通过下边将提到的八达岭会认识的。并由此辐射到广州地区的华南理工大学、广东工业大学，之后还在广工大揭阳校区开辟了一个 400 ㎡的流态化实验室，建起了 20 余台流化床，应该是现在全世界最大最全的冷态流化床实验室了——欢迎朋友们去那里做实验，共同合作。

特意说这么多，是想“启示”年轻的朋友们，strategic planning or planting 是

多么重要。当年去太原时，一个模模糊糊的“念头”，却让我结缘了大半个中国的流态化界，也使我能够在国外大学刚刚独立任教的时候，就开始了与国内的合作。这也让我有更多更早的机会与国内学者合作，而同龄的华人教授们一般都等到“稳定”之后才开始回国，加之我独立比较早，一来一往就有十年之差，所以我在国内化工界的朋友，特别的多。与国内朋友们的长期合作，也给我提供了更多的搞科研的机会，通过互相帮助，达到了共赢的目的。

与国内合作，当然不会忘记清华大学。从太原会后不久去加拿大留学伊始，就一如既往地通过书信往来与金涌老师等保持联系并探讨学术问题。到 1990 年代初我再次回国的时候，与我同时进组的蔡平、白丁荣都已博士毕业（我们常被称为是 FLOTU 的前三驾马车），后边又成长起来一大批更年轻的学子们，包括所谓四大金刚的祁春鸣、张俊平、毕晓涛、杨勇林，以及宋续祺、曹春社、崔新力、吴群伟等。当时我给自己设置的主要任务就是帮助课题组从海量实验结果中，摘出质量最高的，组织大家深入讨论后写作成文。由此共同发表了十几篇高质量的英文文章，在 1990 年代初期那个发表英文文章还是稀缺货的时期，有力地帮助 FLOTU 奠定了其国际地位。（FLOTU 的名称是蔡平起的，是 Fluidization Laboratory of Tsinghua University 的缩写。）

1993 年我一开始独立任教，就赶去武汉参加第六届全国流态化会，除了与前辈们续上前缘之外，也开始结识国内流态化界的同辈们。我与张济宇结识于太原会上、与李洪钟结识于出国前去化冶所访问时、与李静海结识于 1989 年的第六届国际流态化会——当时他在瑞士理工做博后，我在荷兰壳牌做研究员，他从阿姆斯特丹转机，然后我们同机飞往加拿大 Banff 开会。下飞机后我租了一辆大车，休会时拉着“中国代表团”（包括郭先生、金涌、陈甘棠、李静海等人）去看加拿大的永久冰川。与岳光溪相会于 1994 年的 CFB4 会议上。在此之后几年的会议及访问中，又结识了一大批流态化的（当年的）年轻学子们，包括后来鼎鼎有名的广州能源所的陈勇与吴创之，石油大学的徐春明、卢春喜、高金森、李春义等等上边没有提及到的一些学校及科研院所的朋友们。1998 年夏我曾用了半个月时间，从上海-杭州-苏州-南京-武汉-成都-昆明，一路走到了云南。有意思的是，那一年接待我的基本上都是 60 岁左右的系主任们，再过两、三年后，各校的化工领导人，基本上都换成了我的同辈，有些人不到 35 岁，就挑起了中国化工的大梁！如四川大学的朱家骅、中国石油大学的徐春明、浙江大学的严建华与骆仲泱、清华大学的刘铮，都是在世界转换之际，开始担任主要化工院系的领导职位的。

在海外，特别是加拿大，多年来也结识了许多“流化友”。孙光林是浙大陈甘棠先生的硕士生，当年因为在读研究生而未去太原。他专注于流态化基础研究，1997 年去加拿大 UBC 做访问学者时表现突出，被邀请留下来读博，变成了我的“兄长师弟”，毕业后去了美国公司。因博士在读而未去太原参会的李洪钟，亦在 1986 年博士毕业后赴 UBC 跟着 Grace 教授做博士后，成为我的同窗挚友加师兄弟。他们初到温哥华时，都是我给他们安排住房，在 Grace 院士门下共同做研究数年，包括一起倒夜班在流态化燃烧炉上做实验，结下了深厚的学术与私人情谊。当时的同门还有来自清华热能系的赵建生、来自浙江大学岑可法门下的叶伯罡、来自太原理工的贺延龙，我们顶起了 Grace 教授组里的半边天。年龄最小的叶伯罡，坚持要以入门先后排序，让同是来自浙大的孙光林称他为三师兄。

1990 年，我在壳牌工作几年之后，Grace 教授升任研究生院的院长，叫我回去给他当科研“大总管”，帮他管理学生们及“主持日常工作”，并顶替其教授“流态化”课程。那几年我们招收了 5～6 位与我年龄相仿的博士生，其中有浙大岑可法手下的周家骅、有清华去的张俊平与毕晓涛、西北大学张蕴璧的学生栾文琦、山西大学的贺延龙（回来读博）、华中理工的陈建原（博后），加上当地的一位吴博士生与马来西亚去的郭博后，我带着这批华人青年为 Grace 老师撑起了“八方”。除了清华的两位，其他人都没有什么流态化经验，算是我帮着“启蒙”的，接受过“周末填鸭式流态化启蒙课程”。后来也接收了白丁荣去加拿大，他的实际流态化经验绝对不少于我，那时也已经在日本做助理教授了，过去后我们是互相扶持。老白后来去了公司，在美加的多家公司做 CTO，积累了非常多的工业经验，成就斐然。以至于我今年推荐他为加拿大工程院院士，首次即通过，顺利当选！

白院士是西北大学张蕴璧老师的学生，当年张老师推荐给俞芷青老师而来到清华来的。西北大学 78 级的化工人中，出了好几位杰出学者，除了白丁荣之外，还有去日本学习流态化后回母校任院长多年的马晓迅、留在日本工业研究所的张战国、后来去了英国当教授的肖建良、留在加拿大当教授的董明哲、以及上边提到的来 UBC 读博的栾文琦（毕业后去了芝加哥某跨国公司），张老师手下真是人才辈出！不幸的是，就在我写这个稿子的期间，传来张教授以 93 岁高龄仙逝的消息。而她的好校友加多年朋友，我称之为世界流态化界女姓第一人的俞芷青教授，则于 2024 年 8 月过世，终年 90 岁。也是在写作此文期间，我们 FLUTO 的学子们，在清华启动了俞芷青奖学金，每年鼓励两名优秀的清华

女博士生。

国际上，我与澳大利亚的余艾冰院士，应该是认识最久的。1994 年，我们一起参加刚刚发起的美国化工协会之下的颗粒学会年会（PTF），那时我是 Asst Professor，他是 Lecturer，大家年龄也相仿。后边通过他，也认识了众多的澳大利亚化工教授，其中许多都是我现在成立的“海外院士联合会”的重要成员。改开之后，澳大利亚选出了 30 多位华人院士，是我们“海外院士联合会”的重要据点之一。另外一个重要据点就是加拿大。两国的白人相对不像美国那样“卷“，所以咱们更勤劳的华人就有更平等的机会。如今加拿大各大学的工程院系中，华人面孔占据四分之一，所以加拿大一千位院士的工程院中有 100 多位华人院士，就不足以为奇了。加拿大的院士中，有我、白丁荣、毕晓涛，还有我自己曾经的博士生张辉、郑莹与徐春保，都是做流态化出身的。还有一位在加拿大林业研究所工作的多文礼研究员，早年也是在清华毕业后到化冶所读硕士的，两年前经我推荐当选加拿大工程院士。

当年的“八达岭会”上，我还认识了当时在 MIT 做 AsstProf 的陈清焰，后来我也做 modelling，应该也是多少受了他的影响。也是在同一次会议上我认识了准备从日本回国工作的陈勇，他当时也是日本的 AsstProf，后来回国去了广州能源所，两年后被突击提升为所长，开启了那里轰轰烈烈的改革，然后我也成了那里的长年“驻所首席”及“领军人才”，做了生物质气化、污水处理等多个项目。所谓八达岭会，是李静海回国后，向基金委申请，与我在 1994 年共同组织的一次“国际青年学者流态化前沿研讨会”，我们是共同主席，还在清华做博后的魏飞与梁五更两位作为会议秘书，因为当时是借用了清华在八达岭脚下的三堡疗养地，所以又称“八达岭会议“。会议仅 30 多人，但含金量超高，后边至少出了 4 位院士（静海与我，还有陈勇与陈清焰），另外还包括魏飞、段钰锋、金燕等多位学术带头人。这也与当时的气氛有关：那时还没有什么帽子（杰青是 1996 年才有的），大家也不需要攀比与“表现”，就是搞学术碰撞，所以也就激发出了更多的火花。我到现在还记得陈清焰的一句话：我现在在这里讲模型计算的结果，大家都不相信只有我自己相信；你们在这里讲实验结果，大家都相信只有你们自己不相信！我觉得这句话特别好，反映了现实之外，还非常具有哲理性，以至于我给我的博士们，讲了 32 年（现在借此分享给大家）。1994 年的八达岭流态化青年学者研讨会（“八达岭会”），汇聚了全球青年流态化科研精英，开启了中国主导国际流态化青年学术交流的新时代。

以上这些活动，更坚定了我深耕流态化领域的决心。回望过往，一次次相逢、一封

封书信、一场场交流，串联起我的学术成长之路，也让我始终坚守初心，并由此义无反顾地投入到科研创新、教书育人的事业历程中去，使我的“流态化路“，成为了我学术生涯的必然！

7 其他流态化会议

1997 年，首次颗粒学会年会在北京召开，由郭慕孙任大会主席，胡荣泽、卢寿慈、王明星任副主席。大会执行主席为金涌、俞芷青及李静海。会议文集有包含李洪钟与金涌的两位大会报告，14 篇有关流态化的文章及 7 篇流态化应用的文章。如果按 3 年算，则相当于 3 年有 69 篇文章，弱于之前每三年一次的全国流态化会。之后的颗粒学会会议也都类似，相对冲淡了化工行业内大家对流态化的关注度。有鉴于此，也考虑到流态化领域在颗粒学中的特殊性，郭慕孙先生在其过世前，提出重新启动全国流态化会议。由此，全国流态化会议在中断了 20 年后，在 2013 年获得重生。至今已经开了七届。而我也有幸参加了其中的 4 次。为不使此文过长，就仅在这里列出这些会议的概况：

第七届，卢春喜（北京，中国石油大学（北京）），2013.9.26—27（本人报告：固体流态化的操作区域与流型）；

第八届，周涛（长沙，中南大学），2015.11.19—21；

第九届，郭庆杰 （银川，宁夏大学） 2017.8.25—27（本人报告：流态化 100 年——回顾历史与展望未来）；

第十届，叶茂 （大连，化物所），2019.9.17—19；

第十一届，王勤辉、王靖岱 （杭州，浙江大学） ，2021.10.17—19（本人报告：记往昔、期未来 —— 流态化理论的发展史所带来的启迪）；

第十二届，卢春喜、刘梦溪、蓝兴英 （克拉玛依，中国石油大学（北京）克拉玛依校区） 2023.8.11—13（本人报告：流态化技术的拓展前景与未来应用展望）；

第十三届，许光文（沈阳，沈阳化工大学），2025.8.11—13。

这些会议的举办，让以颗粒学会流态化专委会卢春喜、王勤辉、葛蔚、程易等为代表的新一代流态化科研工作者，接续前辈使命，在介尺度科学、超细颗粒流态化、绿色流态化转化等领域实现新突破，让中国流态化事业薪火相传、生生不息。

除此之外，还曾经有过一个中日流态化系列会议。在国内前六届全国流态化会议蓬勃开展的同时，中国流态化也开启了国际化征程，而 1980 至 1990 年代所举办的中日流

态化会议，也成为国内流态化学者走向国际的转折平台，先后在杭州、昆明、东京、北京、名古屋、西安等地举办七届，成为亚洲流态化领域最具影响力的双边学术会议。郭慕孙先生作为国际流态化泰斗，长期担任中方主席，在推动中国流态化研究走向国际学界的过程中占据着重要地位。后亦应其历史作用的完成而终止，最后是于 2000 年在西安在大雁塔下画下了句号，后者我记得特别清楚，因为当时有位流态化界很出名的日本学者堀尾正幸（Horio，东京农工大学），紧盯着大雁塔对我说，1300 年前，我的先人们，就是经过千难万苦，漂洋过海，来这里学习的……

紧接着，中国流态化届，在郭慕孙先生的引领下，从起步阶段就努力与国际前沿接轨。郭先生利用自己在流态化历史上的特殊资历，带领国内学者频繁登上国际流态化会议学术指导委员会、顾问委员会，逐渐争取到国际流态化会议的主办权，让中国流态化在国际舞台上拥有了话语权。进入新世纪，我们这些早期出国的流态化学者也开始进入各种国际指导机构中，亦开始帮助新一代国内学者争取相应的国际地位。由此，中国先后主办了 CFB-5（1996 年）、Fluidization-10（2001 年）、CFB-8（2005 年）、FBC-20（2009 年）、CFB-11（2014 年）、Fluidization-16（2019 年）、CFB-14（2024 年）等国际顶级流态化会议，逐渐形成了国际流态化研究的核心阵地。与此同时，本人在加拿大主持了 CFB-7（2002 年）、毕晓涛主持了 Fluidization-15（2016 年）。

国际上有关流态化的系列，主要有 3 个:

1）最传统的是所谓国际流态化会（Fluidization or International Fluidization Conference），第一次于 1975 年在美国举办、第二次于 1978 年在英国剑桥举办、第三次又于 1980 年回到美国。此后就有规律地在亚太、欧洲、北美三大区每三年轮流举办一次，至今已经举办了 17 次，最后一次是 2023 年在英国，当时因新冠延后一年召开。但原本应该在 2026 年举办的第 18 届会议却因“无人问津”而被延迟到了 2028 年。因为此系列是由所谓的“剑桥派”发起的，所以比较偏重理论。另外，在此 Fluidization 会议之前，荷兰学者曾在 1967 年发起召开了一次流态化大会，那个其实才是真正的首届国际流态化会议。之后法国学者在 1973 年又续开了一次，都有许多好文章在册。但在英美学者于 1975 年在美国再次组织国际流态化会议时，却直接“忽略“了前者的存在，将自己的会议系列直接命名为第一届”国际流态化会议“了。

2）1985 年在加拿大发起的国际循环流化床会（CFB, Circulating Fluidized Bed Technology or International Conference of Circulating Fluidized Bed

Technology），在 1988 年（法国）、1990 年（日本），也以每三年在三大地区轮换的形式举办，至今已经举办了 14 届（2024 年，太原）。因为此会议的发起，是对应于 1980 年代循环流化床应用的快速崛起，所以从开始就形成了较多工业界参与的传统。

3）另外一个是起始于 1965 年的国际流化床燃烧会议系列（ICFBC 或 FBC, International Conference of Fluidized Bed Combustion），应该是从美国能源部的一个内部汇报会演变过来的，前边八次都是能源部主办的，并一直在美国（偶尔去加拿大）举办，直到进入新世纪。此时煤燃烧开始式微，这个会议的两年一轮又让其“结构性地“与另外两个流态化会议冲突，于是从 2022 年起自行改为每三年一次，并主动与上面两个会议系列错开。之后又将会议名称更改为 Fluidized Bed Conversion （保持 FBC），以表示对非燃烧流态化学者的欢迎。但最后这一招似乎也不太管用，在新冠疫情的“关照”之下，更难挽回颓势，已宣布在 2027 年与 CFB 并会。

这样看来，3 个国际流态化会议系列都在经历重组，这或许折射出当今世界的某种“风貌”，但并不代表流态化技术的发展已步入低谷。事实上，随着新能源与新材料时代的到来，流态化技术正面临更多的挑战与机遇。希望年轻一代不忘初心，牢牢抓住这一新的历史机遇，，让流态化更加发扬光大。

写到这里，汇报得也差不多了，但最后这个结尾有点沉重，本文所叙重点是上个世纪，那就讲个当年的笑话来轻松一下吧：在标志着一个历史时期结束的 2000 年西安那个终版的中日会期间，也出了一件秩事：某天组织参观西安雄伟的城墙，由西安建筑科技大学的一位李老师做讲解员，由祝老师（本人）翻译为英文，由白丁荣老师翻译为日文。但李老师很快发现祝老师翻译出来的英文内容，慢慢地超过了她的中文初稿，因为喜欢历史的祝老师，开始大量的夹杂私货——其实也是因为纯讲英文的老外没有几位，所以我就随意加了一些历史故事（号称是为了增加理解）。于是李老师说那不如我就不讲了，你随意就好了，反正大家也能懂。可是白老师不干了，说我的学术英文虽然还可以，但直接从英文翻日文还要讲历史那可就“できません“（日文：做不到），你不讲中文，我怎么办？后来李老师就通融了一下，让我先讲英文，然后她取用一部分掺在自己的原稿里讲中文，可怜的日本朋友们就这样吃了“剩饭”。没想到我们这么演“三簧”搞鬼，代表们居然都没有查觉。结束后把代表们送上车后，三人禁不住围在一起捧腹大笑。大笑之下，倒是免去了我怕引起美女李老师生气的担忧。其实那天也是难为她了，一位化工学者临时被抓了差来客串导游，自己临时抄写了个稿子，（而那时还只有红糖豆包，没

有现在的“万能豆包”）。当然，我对历史的偏爱，却是至今未改的。也是因为有这个怪癖，才能在几十年后，写出今天这么一篇回忆录不像回忆录、叙事不算叙事，但自信还有些实料、有所启迪的杂文吧。（特别声明：如果有任何记忆有误或评论不妥之处，请朋友们不吝指教，今后有机会“再版”时，一定虚心修改！）

流态化技术研发进展

流态化专业委员会

流态化是固体颗粒在流体的作用下呈现出与流体相似的流动性能的现象。利用流态化现象规模化处理固体物料加工和转化，在化学工程的发展中有着十分重要的地位。采用流态化技术处理固体颗粒，可以实现连续化、自动化和智能化生产。与其他固体加工和转化技术相比，流态化技术具有传热、传质效率高，温度均匀可控，适于各种吸热、放热过程。由于细颗粒与流体间接触面积大，反应速率快，生产能力大，因而在工业生产中应用范围很广。据统计，所有化学反应与分离操作中涉及以颗粒粉体为原料直接参与过程或作为催化剂存在的过程，占到总化工加工操作的 70%～80%。目前，流态化技术已被广泛应用于能源、炼油、化工、冶金、轻工、动力、环保、选矿、有色金属、建材、食品、制药等行业领域，包括固体物料的输送、混合、分级、干燥、吸附等物理过程以及燃烧、煅烧和许多催化反应过程，有些已成为该行业加工处理固体物料的首选技术[1-2]。其次，流态化技术的生产效率高，处理能力大，设备结构简单，可根据过程特点和要求组合成平推流、全混流、多级釜式串联及循环流和其间的各种组合模式，可以有效调控反应器内物料组成与温度时空分布，合理安排和实现热量和物料移入和移出，与欲达到类似效果的外取热式固定床反应器相比，优势尤为明显。从基础科学的角度，流态化是把连续介质和离散介质叠加在一起形成的一种新形态。在这种新形态下，离散介质的某些特性丧失，如堆积角、压力、传递特性等，但离散介质特性如密度、粒度、粒度分布、形状等对固体颗粒流动行为仍有重要影响。形成的新的两相连续介质的运动特性，如滞流、湍流、浓度分布等具有了与单一连续介质大部分运动相似或相同的特质，并可以出现一些单一连续介质没有的新的运动形态，如节涌、噎塞突变、多尺度结构等，但重力和温度、压力等参数的作用又会分别对两相施加影响，使两相流行为变得更加多态化。对这些新的行为的发生和演变机理的研究及其工业化应用应该是区别于连续介质力学（如水力学、空气动力学）和离散介质力学（土力学等）的一种复合介质力学体系，其魅力引发了基础研究和工程技术人员强烈的探索欲望，不断推动流态化理论的完善和技术的深入发展。

众所周知，任何一种自然现象若不能用数学定量描述，则将很难成为一门成熟的科学。在单相连续介质流体力学中，湍流的数学表达仍是物理学中古老且至今尚未成功的课题。所以在两相流态化领域，建立可预测两相流体力学行为、传热-传质交互作用和关联的多相化学反应过程及反应器的放大的数学模型，其难度可想而知。在未来的大数据时代，也许从统计力学角度出发可取得突破，本文不对这些方面深入描述。

总之，固体颗粒流态化是一个具有广泛应用和巨大商业经济价值的领域，而且机理深邃，充满科学探索魅力，可以容纳多学科、多行业交叉融合的专家介入，是研发价值诱人的科学和技术应用领域，也是复合介质力学的高端领域。所以当这一古老的物理现象，被赋予丰富的科学内涵并不断在实际过程中展现出无穷科学魅力和应用潜力后，过去的 70～80 年来吸引了世界各国学者，尤其是如美国、欧洲、日本等发达国家科技工作者争先恐后的投入。

关于流态化技术的发展，许多学者从不同角度已做了回顾和总结[3-7]。纵观过去 40～50 年来中国科技正处于复兴之际，在物质传递与反应、能量传递与转化、信息传递与优化为范式的化工研发过程中，中国学者和世界各地的华裔学者对流态化技术研发与应用贡献是巨大的，其作用是空前的和重要的。本文试图根据作者的亲历和了解，对中国学者多年来对世界流态化理论和技术研发的贡献，尤其是对中国流态化技术的发展所做贡献进行回顾，以供青年学者参考借鉴。值得指出的是，由于流态化技术涉及多学科、众行业交叉，参与者和相关过程甚多，受到作者学识和经验所限难免挂一漏万，存在的偏颇之处，期望读者批评指正，并在未来补充与勘正。

1　流态化技术在中国的发展历程

流态化技术在中国的发展，大致可以分为 3 个时期：酝酿、萌芽期，高潮期和平稳研发期。

1.1　酝酿、萌芽期

流态化作为一门具有科学内涵的学科，始于 20 世纪初期，至今已有近百年的发展历史。在我国，我们的祖先已注意到连续介质可以使离散介质悬浮的现象，而且有不少有趣轶事流传和记载。如 500 年前北京潭柘寺僧人曾在用化缘得来的含有沙粒的粮食煮粥时，采用直径 3.5 m 的大锅，铸有特殊造型，锅的底部铸有一凹槽（小锅），煮粥时锅里的水一开，米粒就往上浮，沙子就沉到小锅里了，处于悬浮状的米粥与沙粒分离，巧

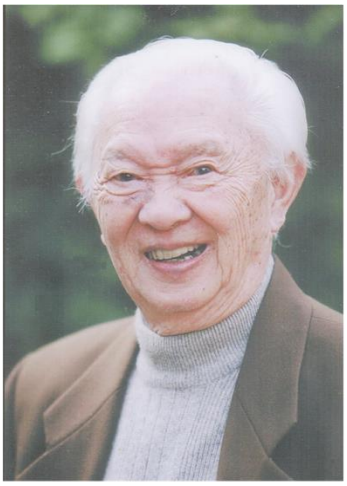
妙地实现了“漏沙不漏米”，至今僧人用锅尤存。16 世纪宋应星所著的我国古代百科全书《天工开物》中，就生动而形象地记载了扬簸、淘洗、冶金矿物、瓷土制备等过程[8]。

流态化技术工业化应用，一般认为是 1921 年前后德国巴斯夫公司的 Fritz Winkler 研发的煤燃烧反应器[9]。虽然这个技术在 1926 年得到成功工业运行，但后来由于各种原因并未实现大规模工业化应用。因此，流态化技术真正开始成为具有工业应用价值的技术应当始于上世纪 40 年代。当时大量石油被开采利用，采用常压精馏可直接获得 20%左右的轻质油，其余重油部分采用催化裂化反应得到更多轻质油。在这一反应过程中，催化剂表面会迅速积碳，在分钟之内就完全失去活性。所以，需要把失活催化剂转移到另一反应器（再生器）内，烧去积碳使催化剂再生。再生后的催化剂被迅速转移回反应器，从而使反应过程连续进行。如此频繁的反应-再生重复进行的化工操作是前所未有的。这时美国麻省理工学院（MIT）的 Lewis 等[10]利用已有知识和经验，在新泽西标准石油公司的资助下研发了用气流悬浮催化剂颗粒使其连续、迅速、并且大量在反应器和再生器之间转移的技术，使炼油技术获得巨大的发展。这是流态化技术首次成为具有巨大的工业和商业价值的技术，真正作为重要不可替代的工程技术登上了化工界的王座，流化催化裂化技术及其所应用范围和创造的价值至今无可匹敌。

流态化在 MIT 学者的推动下，在石油催化裂化方面取得巨大成功，但流态化技术尚处于萌芽时期。此时在麻省理工师从 Lewis 教授学习的汪家鼎院士就以褐煤的流态化低温干馏为研究课题开展研究，并以此获得硕士学位[11]，毕业后留校任研究助理，继续从事流态化技术研究。相关研究报道成为我国学术刊物上最早介绍流化床的研究论文继续从事流态化技术研究。有关研究报道成为我国学术刊物上最早介绍流化床的研究论文[12]。基于对流态化反应工程很深的了解，汪先生认为其必将成为世界化工发展的热点，因此在 1976 年决策，支持在清华大学化工系建立反应工程团队，主攻多相流态化反应工程，为我国流态化技术的发展做出了积极贡献。

与此同时（1945 年），郭慕孙院士获得了美国普林斯顿大学化工系的奖学金，获得了美国普林斯顿大学化工系的奖学金，师从 Willelm 教授开展流态化基础研究。他以液固体系为研究对象进行了系统且有成效的实验，发现用水和玻璃珠颗粒操作时可以得到近理想的均匀流化状态，同时发现当加大水与颗粒之间密度差时（如改用铅珠），液固体系也能出现类似气固流化床中的气泡的液体空穴，据此系统分析了液固和气固流态化的差异，首次提出了“散式”和“聚式”流态化的概念，并建立了颗粒与流体相互作用

的流动参数统一关联式，丰富了流态化的基础理论，是国际学术界公认的流态化经典之作，至今仍被广泛引用[13-14]。



汪家鼎院士（1919—2009）



郭慕孙院士（1920—2012）

图 1 中国流态化研究引领者汪家鼎院士和郭慕孙院士

汪家鼎先生 1946 年初回国后，在西南联大、重庆大学、南开大学任教，继续从事流态化和化学工程相关研究。后来在清华大学转入核化工专业领域，成为我国核化工和核燃料处理领域的带头人，为我国“两弹一星”做出了重要贡献。而郭先生归国后，在中国科学院化工冶金所成立了中国第 1 个流态化技术研究室，对液-固流化行为进行全面系统的研究，揭示了全操作域内液速对固相含率及其在床层轴向分布的影响规律，成功预测了八种流态化类型，计算了不同颗粒和流体系统的流态化行为，分析了许多工程技术问题，进而提出了广义流态化的概念。这是我国学者在流态化领域首次提出并构建了适用于整个颗粒-流体系统和流态化的理论框架，是流态化发展历史上独树一帜的理论突破。据此成功撰写的专著《流态化-垂直系统中均匀球体和流体的运动》[15]在 1963 年由科学出版社出版。可以说，中国对流态化技术的真正研发应从郭先生建立的第一个研究室算起。两位前辈的创新研发方向，分别激励着流态化技术的应用推进和基本流态化规律的深入探索。中国后续流态化研发基本上是沿着这两个方向发展的。

50～70 年代中国工业界采用的流态化技术主要是学习引进的。从苏联引进了萘氧化制苯酐大型反应器，从古巴复制了石油催化裂化装置，从德国引进了乙烯氧氯化制氯乙烯技术等。清华大学化工系师生用新的技术方案重新设计了苯酐流化床反应器[16-17]。此外我国学者还开展了流化床焙烧[18-19]，粉煤低温干馏[20-22]，醋酸乙烯合成[23]等技术研发，在流化床基础流动特性[24-28]、混合和传递[29-30]、分布器设计[31-32]等方面也开展了一些研究。

需要重点指出的是，中科院山西煤炭化学研究所所杨贵林团队采用国产催化剂研发出来丁烯氧化脱氢生产丁二烯的工程和工艺[33-34]，是中国第 1 套自己研发成功的装置，并受到国家级奖励。

50～70 年代是一个万马齐喑的年代，我国科学界没有一个稳定的科技开发环境，所以流态化技术虽然在基础理论和实际应用中取得了不少进步，但也只能在风浪中蹒跚前行。直到 70 年代末到 80 年代初，人们发现对气固流化床，从操作气速起始悬浮流化到全床颗粒被吹空之间有近几十倍的操作弹性空间。在这一宽广的气速操作区间内，都可以存在一个高颗粒密度的床层。究其原因是因为气体与颗粒间的曳力与颗粒群的聚集状态有关，是随着颗粒群聚集形态和密度不同而变化的[35]。这个认识揭示了气固流态化在多种化学和物理加工方面应用的可行性，因此我国学者在气固流态化利用方面，沿着改善和强化气泡-颗粒接触的密相流化床和无气泡散式流态化的路线，结合国家发展需求，加大研究和开发投入，迎来了流态化技术在中国的发展高潮期。

1.2 高潮期

对世界流态化技术具有里程碑式贡献的研究成果是剑桥大学的 Davison 和 Harrison 以及伦敦理工大学的 Rowe 等在 60 年代完成的[36-37]。他们认识到部分气体在通过悬浮颗粒群时以气泡形式通过（图 2（a））,流化床中的气泡与连续介质（如水）中的气泡行为不同（图 2（b））。在固体流化状态中处于上升时的气泡，其顶端高压区气体会溢出，进入颗粒浓相，该气体又会被快速上升气泡的尾部低压区重新吸入气泡（图 2（c））。这些气体与催化剂接触并发生化学反应，气体循环所经气泡周围的区域被称之为晕层，气泡愈小，相对晕层愈厚，气体参与反应的时间愈长，而且气泡尾部低压区会吸着一部分粒子一边上升一边脱落，粒子返回浓相区，促进了流化床内强烈的物料混合。所以虽然气泡的形成和快速通过颗粒床层，降低了气固间的接触效率，但如果气泡尺寸小，破碎更新快，不仅促进了床内物料的混合，使床层温度更加均匀，对提高化学反应转化率和产品选择性有利。因此，流态化条件下的气泡具有明显的正负两面性。

随后，国际上很多流态化研究围绕气泡模型进行，最具代表性的工作是 Kunii and Levenspiel 建立的鼓泡流态化两相模型[38]。对于 70 年代末处于改革开放初期的中国学者，在惊愕国外技术发展迅速的同时，也极大地激发了他们学习国外先进技术和自主研发的热情，纷纷加入流态化基础和应用开发。鼎盛时，中国不同行业参与流态化研究集体达到几十个，参加人员陆续近千人，在我国流态化的基础研究出现前所未有的兴盛局

面。一方面，中国科学院化工冶金所在郭慕孙先生带领下，并未跟随流态化气泡的研究热潮，而是针对气固流化床中气泡对相际接触和传递的不良影响，独辟蹊径开创了稀相流态化、快速流态化等无气泡气固接触新领域，并逐步成为流态化研究领域一个独立的、完整的理论与技术体系。

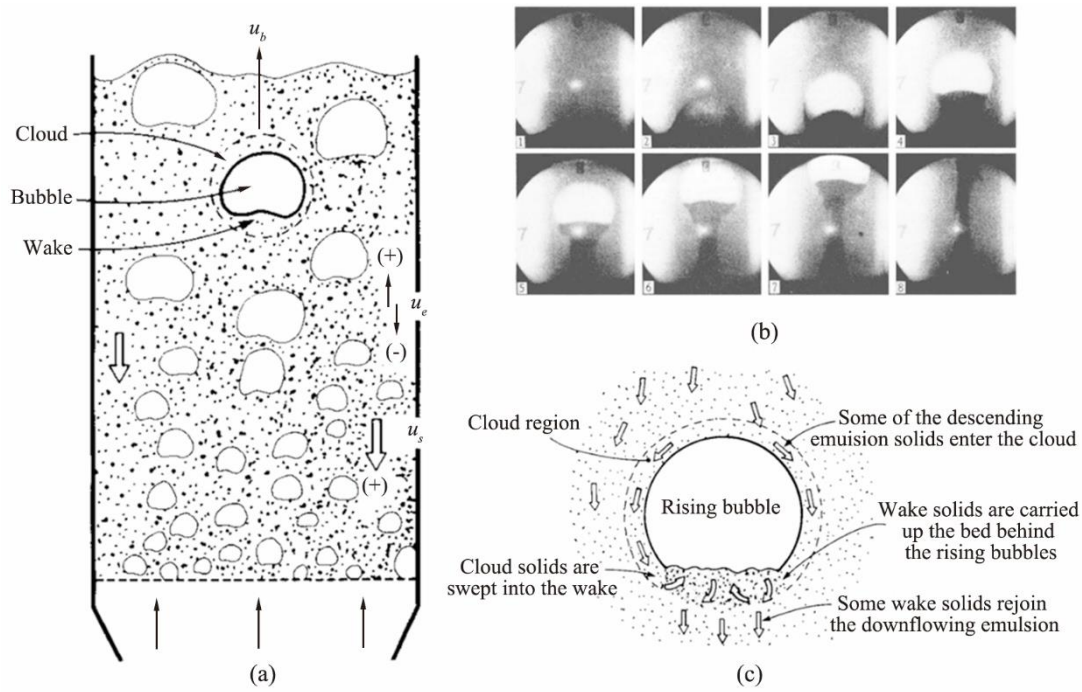


图 2 （a）气固流化床气泡流流动[38]，（b）X-射线获得的流化床中气泡运动图像[37]，（c）气泡与颗粒的交互作用示意图[38]

另一方面，许多中国学者针对流态化气泡两面性现象开展研究，发现在逐步提高流态化气速时，两相流也会发生流型转变，即从以气泡合并长大为指导的鼓泡流化转向以气泡破碎为主导的湍动流化（图 3（a））。在湍动流化床内，颗粒湍动剧烈，气泡不断聚并和破碎，气固接触迅速更新，十分有利于提高反应的转化率和选择性[39-40]。研究结果显示，以前国外推崇使用细颗粒催化剂，其原因是细颗粒（d_p≈60 μm）的流化床易于转入湍动流化操作域。清华大学化工系团队对湍流转变机制和发生判据进行了全方位的研究，包括颗粒粒径、粒径分布、密度、压力、温度、床径、内构件等（图 3（b））[39-47]。研究结果证明，不仅细颗粒流化可以进入湍动流化，对颗粒直径较大的体系（d_p=100～120 μm）通过床结构优化、添加内构件等措施，也可顺利进入湍动流化区，不仅可以提高反应转化率和产品选择性，而且也可大幅增加生产能力（生产强度）。为此该团队进一步研究了新型管式分布器（变质量模型）[48-50]，促进气泡更新的塔型（图 3（c））和脊型（图 3（d））等多种构件，内取热套管和 U 型管换热器，气固快速分离器等[43,51-54]。

将这些成果用于密相流化床，清华大学化工系团队设计了合成苯酐、丙烯晴、醋酸乙烯、顺丁烯二酸酐、三聚氰胺、二甲基二氯硅烷、三氯氢硅、聚甲氧基二甲醚、金红石型钛白粉及其包膜等反应器，并成功实现产业化，取得良好的经济效益，陆续获得了国家级发明奖二等奖一项、国家级科技进步奖二等奖三项、以及部委级科技进步的一、二、三等奖十多项。该项成果被美国化学工程师协会转载（Ind. Chem. Eng. 1982）[55]并被选为 10 年内最佳十篇论文再发表。在基础研究科技论文方面，一篇关于用激光荧光颗粒示踪方法研究气泡与颗粒运动影响的论文被选在第三届国际流态化会议上宣读[56]。该论文是中国改革开放后最早在国际会议上发表的两篇论文之一。以上成绩的取得，使 FLOTU（即清华大学流态化实验室）团队在国际上不断得到认可，团队带头人金涌院士因此获得美国化学工程师协会（AIChE）2006 年颁发的 PSRI 流态化讲座教授奖[57]。

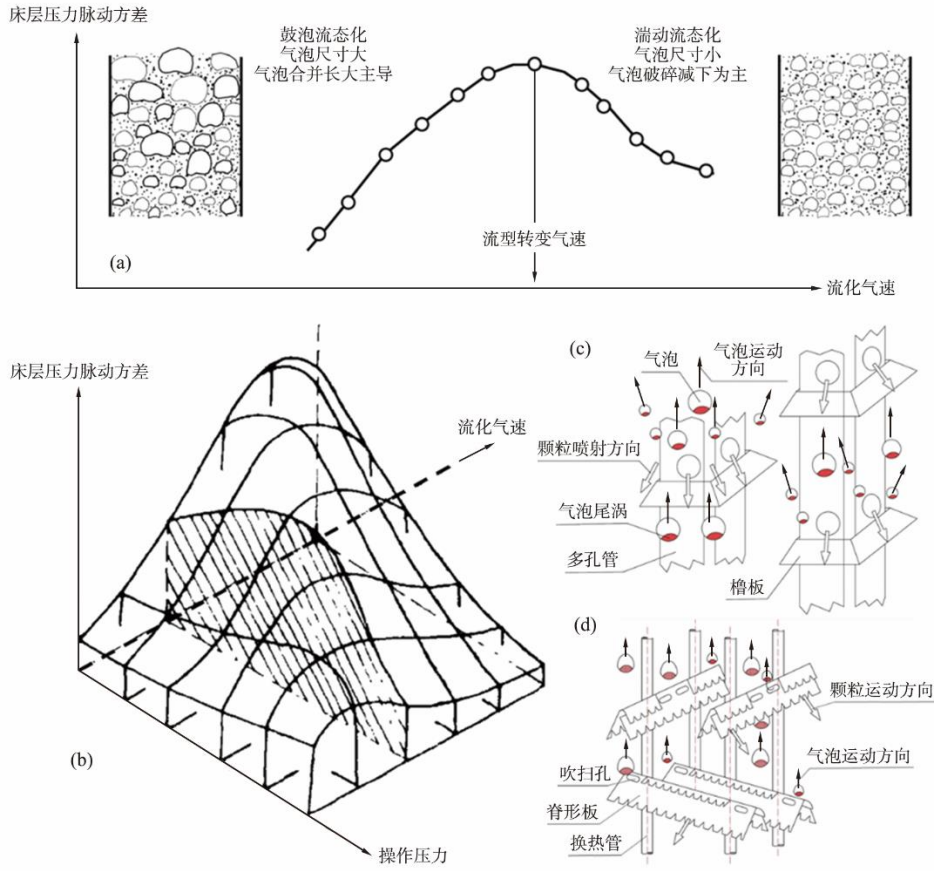


图 3 （a）鼓泡流态化向湍动流态化转变，（b）流化气速和操作压力对流型转变的影响，（c）促进流型转变的塔型构件，（d）促进流型转变的脊型构件

与此同时，中国学者在流化床用于化学合成研究中也取得了巨大进步。浙江大学化工系陈甘棠团队也开展了湍动流态化转变[58]、粒度与粒度分布对流化床质量传递特性影响[59]等基础研究，并开发出有特色的丙烯腈流化床反应器[60-62]，沈阳化工研究院王尊孝

团队[63]开发出苯酐流化床反应器，利用内构件促进流型转变，强化气固接触效率，取得了很大成果，因此获得国家科技进步一等奖。中科院化工冶金所研究开发了多层流化床吸附工业废气[64]，展现了多层流化床能够沿高度方向建立温度和浓度梯度，实现连续逆流操作的优势。在核化工领域，天津大学化工系开发了振动流化床还原 UO_3 以及三碳酸铀酰胺分解-还原反应新技术，在将流态化技术应用于核化工过程方面做出了贡献[65-67]。

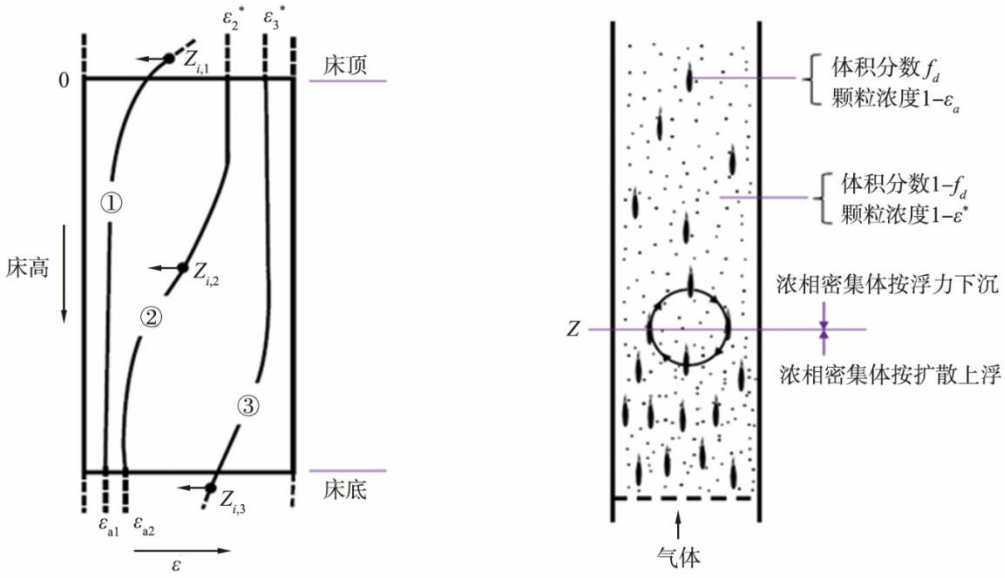
为了抑制气泡长大，气固流化床可以采用外加能量场强化流态化操作性能。在这方面，石油科学院团队采用磁控流化床，有效控制相间返混，促进颗粒均匀分布，改善气固流动性能，避免床层内部出现沟流和局部过热问题,开发出己内酰胺杂质脱除工艺，获得国家发明一等奖[68]。清华大学化工系团队采用搅拌流化床进行超细高性能 $CaCO_3$ 填料粉碎、表面涂膜[69-73]；采用氢热等离子体反应器将煤粉直接热解生产乙炔，也全面研究了甲烷、焦油、沥青质等热裂解制乙炔，并对下游的聚氯乙烯运用外场强化的气固相方法进一步氯化生产氯化聚氯乙烯，这些过程均获得研究成果，有些已实现工业示范或应用[74-79]。

中国流态化技术基础研究和应用的另一重大亮点，是低品位劣质煤流态化燃烧锅炉的成果开发和大规模应用。粒煤鼓泡流化床燃烧技术自发明以来，由于具有洁净高效且燃料适应性广等特点，得到世界各国的重视，得到迅速的推广和发展。中国有大量褐煤、煤矸石和煤泥资源，对中小型燃煤装置有很大需求。我国在燃煤流化床燃烧技术方面的研究与开发工作在国际上具有很大的影响，不仅在常规的流化床燃烧技术的研究和开发上取得很大成果，而且还先后研制出双床流化床燃烧技术、适用于煤泥等燃料的异重流化床燃烧技术等新型流化床燃烧技术。一度全国累计有近 3 000 台燃煤流化床锅炉或燃烧炉在运行，其数量在世界排第一位。我国的燃煤流化床燃烧炉大部分是燃煤流化床锅炉，也有相当一部分是用来产生高温烟气的燃煤流化床窑炉和烘干炉。我国的流化床燃烧炉主要应用于劣质燃料的燃烧利用，如劣质烟煤、煤矸石、石煤、造气炉渣、煤泥、油页岩等，锅炉的容量也主要集中在 35 t/h 以下。到目前为止，我国最大容量的燃煤鼓泡流化床锅炉是 130 t/h。

与此同时，关于密相流化床煤气化技术在中国开始研究。特别是在美国的 U-Gas 气化炉在中国（上海焦化厂引进）转让失败后，中国科学院山西煤炭化学研究所汪洋团队致力于此项技术研发，在常压操作条件下获得成功，但由于它的煤粉随排灰和夹带成分大，煤的利用率较低，比起移动床鲁奇炉并没有明显优势，所以最终未能大范围应用[80-

[81]。在流化床选矿方面，中国矿业大学陈清如团队从 1984 年开始进行空气重介质流化床干法分选技术研发，建立了“空气重介质稳态流化”的选矿理论，建成 50t/h 空气重介质流化床干法选煤系统[82]，为推动我国洁净煤技术做出了卓越贡献。总之，在这一波高潮中，中国学者在流化床的应用研发中呈现万马奔腾之势，取得了多方面的成绩，难以准确和全面统计。

中国第二波次的流态化研发高潮应是以美国纽约城市大学（City University of New York）的 Yerushalmi 教授关于高速和快速流化床报导为引子的[83-85]。Yerushalmi 教授提出，如从湍动流态化继续加大操作气速，流化床内的流态会发生第二次流型转变，使气相由分散的气泡相转变成为连续相，而颗粒相由均匀的乳化相变为以非均一尺度为主的分散相。这时床内没有气泡存在，但出现较高密度的颗粒聚集物，即絮状物。在我国引领这一领域的仍然是中科院化工冶金所团队。事实上，郭慕孙先生在 1973 年就率先提出了“快速流化床”的一维模型，预测并通过实验证明了快速流态化中颗粒聚团的存在[86]。经过系统深入研究，郭慕孙先生团队在第 3 届国际流态化会议上宣读了题为“The Dynamics of Fast Fluidization”的论文。该文提出了颗粒浓度在快速床中呈上稀下浓的 S 型分布（图 4（a）），并基于颗粒絮状物轴向分级与扩散的动力学平衡提出了著名的 Li-Kwauk 轴向固含率分布模型（图 4（b））以及气固流态化流型转变相图（图 4（c））。从此郭慕孙院士团队在多年坚持流化床散式化和无气泡化的学术理念的背景下，再次引领中国团队奔向第二波次的研发高潮期。



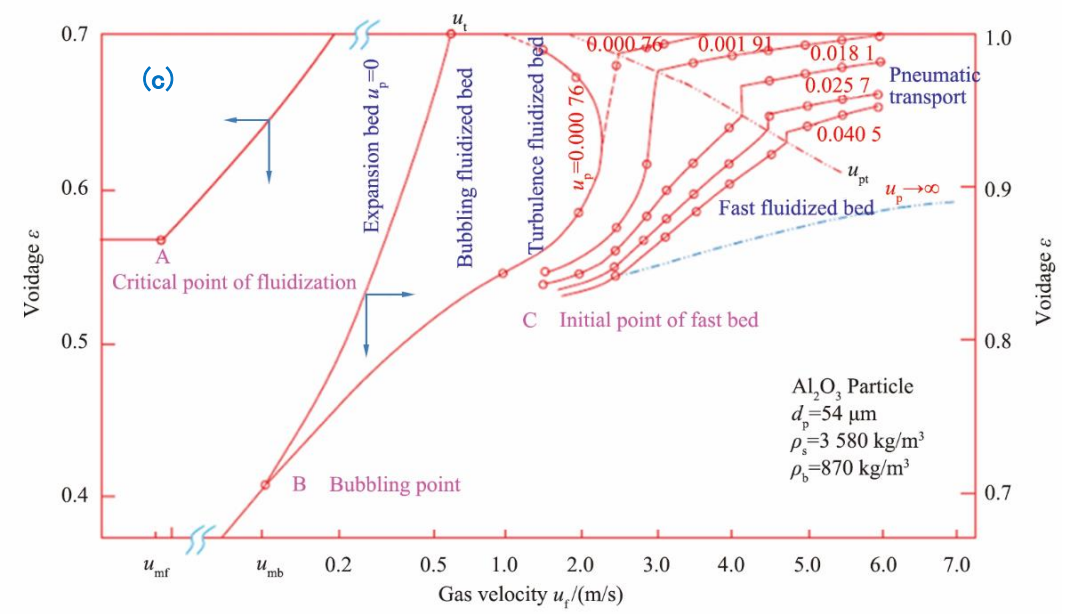


图 4 （a）快速流化床轴向空隙率典型分布，（b）颗粒絮状物力平衡，（c）气固流态化流型及其对应的空隙率和气速的变化关系

快速流化床颗粒密度小，气固两相停留时间短，催化剂颗粒循环量大，气固接触密切，特别适合于反应时间在十数秒的快速反应。恰巧这个时期，催化裂化催化剂正在从γ-氧化铝改变成高活性的分子筛催化剂，因此需要与适合快速反应的反应器匹配，其结果使炼油技术进入了新阶段。在此背景下，在中石化集团北京设计院杨启业院士和洛阳设计院陈俊武院士的带领下，中国催化裂化工业成功转型。中国炼油技术进步是依靠国内技术人员完成的，其贡献是十分巨大的。

快速流化床在重要工业过程中取得成功，再次激发了中国学者流态化研发热情。快速流化床应用与催化裂化的成功说明，反应效果取决于反应动力学的快慢和两相接触状况的合理匹配，床内颗粒密度的影响不大，只要两相流通量比保持足够大，催化剂的负荷适量，也能获得很好的反应效果。在此认识基础上，为了应对原油日趋重质化和劣质化对催化裂化带来的挑战，中石化石油科学院汪燮卿院士团队和中国石油大学（北京）徐春明院士团队将原油催化裂化反应化学特性与流态化特性综合优化，开发了多产轻质油的催化裂化馏分油加氢处理工艺与选择性催化裂化工艺集成技术[87]，按反应空间分区的催化裂化技术，包括焦化蜡油催化裂化分区技术（图 5（a））和重油分级分区催化裂化技术（图 5（b））及催化裂化汽油辅助反应器改质降烯烃技术（图 5（c））等[88]。由于在同一反应器中采用同样的反应条件难以与原料组成及其性质合理匹配，导致轻质油品收率损失，产品质量恶化，为此把催化裂化过程拆解成裂解和氢转移两个过程，其中

裂解反应速度快，反应温度高，而氢转移反应温度低 50℃左右，反应速度慢，所以采取分级分区催化裂化技术可以使转化率提高 7.25%，轻质油收率提高 6.39% ，干气和焦炭总选择性降低 1.18% [88]。

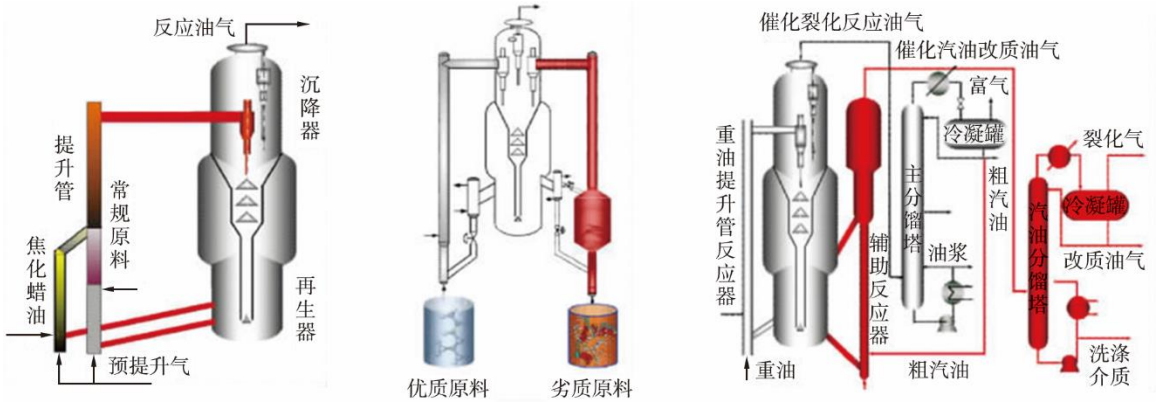


图 5 （a）焦化蜡油催化裂化分区技术，（b）重油分级分区催化裂化技术，（c）催化裂化汽油辅助反应器改质降烯烃技术

快速流化床在中国应用的第二个重大突破是先进燃煤循环流化床锅炉的成功研发和工业应用。粒煤鼓泡流化床技术虽然自发明以来得到广泛的推广与应用，但存在埋管受热面磨损、燃烧效率偏低、结构膨大等问题，而基于快速流化床过程的循环流化床燃烧则可以有效解决这些问题，国内的研发重点也转向燃煤循环流化床技术的研发。参与开发的有浙江大学热能工程研究所团队[89-90]，清华大学热能系团队[91-93]，中科院工程热物理所团队[94]及其他国内许多单位。其中，清华大学热能系岳光溪团队创建了定态设计方法，即依据流化图谱选择既能够满足燃烧又能最大程度降低锅炉磨损的操作状态（图 6（a）），然后通过提高参与颗粒循环的细颗粒含量（称为有效颗粒），减小不参与颗粒循环的粗颗粒（称为无效颗粒）含量，使得锅炉底部密相区浓度降低，由传统鼓泡流态化状态转为湍动流态化；同时，锅炉上部颗粒浓度增大，由传统的稀相输送转为快速流态化，实现锅炉内“流态重构”（图 6（b）—（c））。在 80 年代到 90 年代中期，我国各研究机构及锅炉制造厂合作开发了各种类型的中小容量燃煤循环流化床锅炉并得到应用，90 年代后期则通过引进国外技术和自主研发，我国在大容量燃煤循环流化床燃烧技术的发展则突飞猛进，建设了一批 100～300 Mwe 等级循环流化床锅炉。同时自主研发的 300 Mwe 等级以上大型循环流化床锅炉也先后实现工业应用，其中由清华大学、东方锅炉厂、神华集团以及浙江大学等单位联合研发的 600 MW 大容量超临界循环流化床锅炉（图 7）于 2013 年投入运行，被国际能源组织认为是国际循环流化床技术发展的里程碑事件。

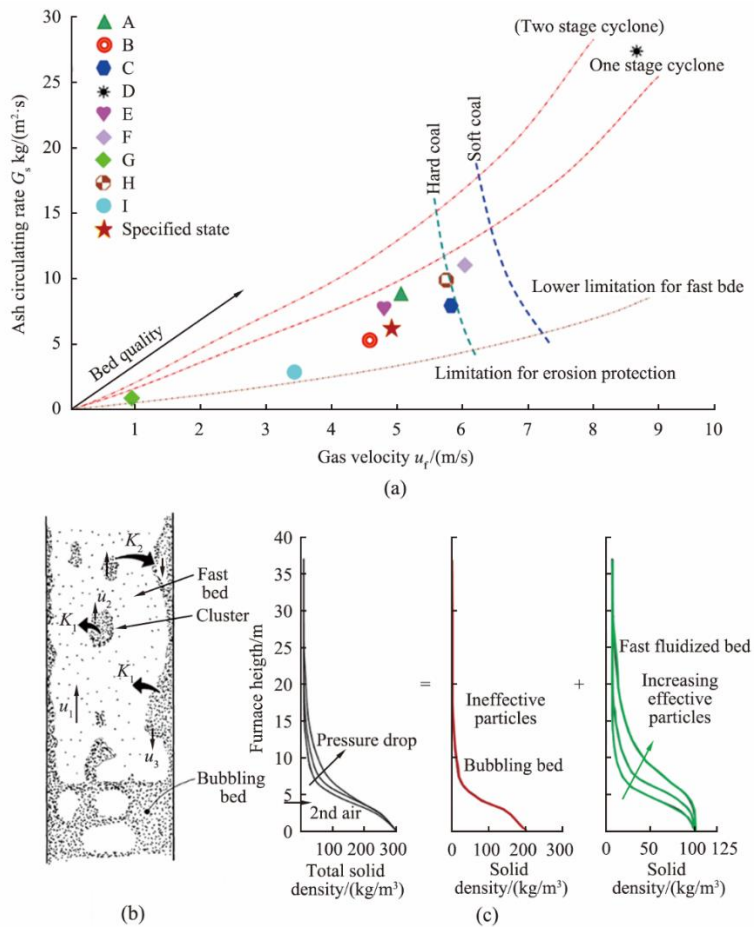


图 6 （a）循环流化床锅炉定态设计图谱，（b）流态重构示意图，（c）循环床锅炉中有效和无效颗粒轴向密度分布



图 7 国际首台 600 MWe 超临界循环流化床锅炉

快速流化床在中国应用的另一个重大突破是由西安建筑科技大学徐德龙院士团队完成的以悬浮预热预分解技术为核心的新型水泥干法生产工艺的系统研究和工业应用。该

团队开创性地提出了高固气比悬浮换热和反应理论，实现了高固气比预热预分解技术，建成和改造了 120 多条干法水泥生产线，创造了巨大的经济效益。

上世纪 90 年代以来，中国的流态化研发进入了第二波高潮的后期，在许多领域已处于世界前沿。其重要标志有以下几个方面。

1）气固并流的下行床研究。80 年代末，国际上对重质原油轻质化加工需求增加，清华大学化工系团队瞄准这一需求，提出开发新型超短接触反应器，有效控制催化裂化反应时间，提高轻质油品收率。为此，在国内外首先开展超短接触气固下行流化床反应器的基础研究[95-96] 。实验和研究结果表明[1,95]，气固两相在顺重力场向下流动时，由于重力和曳力平衡关系的变化，气固流动呈现 3 个特征阶段（图 8（a））：第一加速段，气体速度大于颗粒速度，重力和曳力同时向下；第二加速段，颗粒加速超过气体速度，曳力作用方向向上但依然小于重力；恒速运动段，气体和颗粒速度达到稳定，相上作用的曳力和向下作用的重力达到平衡。由于这种独特的气固流动方式，颗粒向下行运动时速度虽然超过局部气速，但同样在曳力作用下，处于悬浮状态，具有与普通流化床相同的诸如压力传递等特性，而且其径向气-固两相速度和浓度分布比气固向上流动的提升管均匀的多 （图 8（b）—（d））[96-97]。在壁面附近出现颗粒浓环，而颗粒滑落速度小[98-100]、气固返混少，径向扩散系数也不小于上行床（图 8（e）、（f））[101],因此在下行床中，气固两相流动更接近平推流，有利于反应的精准调控。

当应用下行床于石油催化裂化时，可能存在由于床内固相密度低，在喷油进料时可能会大部分会喷射到对面器壁上，加剧结焦。为此，清华大学团队将油喷嘴设置在上行输送颗粒在转向 U 型管前（图（a）），形成了提升管-下行管耦合反应器，有效地解决了这个问题。实验结果表明[102-103]，这里的颗粒密度高，混合激烈，油料与催化剂接触均匀，形成了一个化学反应器的最佳组合，即全混流串联一个平推流的化学反应器组合。在此条件下，只要保持足够颗粒循环量，气体与催化剂比适宜即催化剂负荷恰当，就能够实现优良的反应效果。在 15 万 t/a 处理能力的工业示范反应装置（图 9（b））的实验结果表明[104]，可使轻烃和芳烃收率达到 45%左右[95]。该技术成果开发后转让给了巴西石油公司。

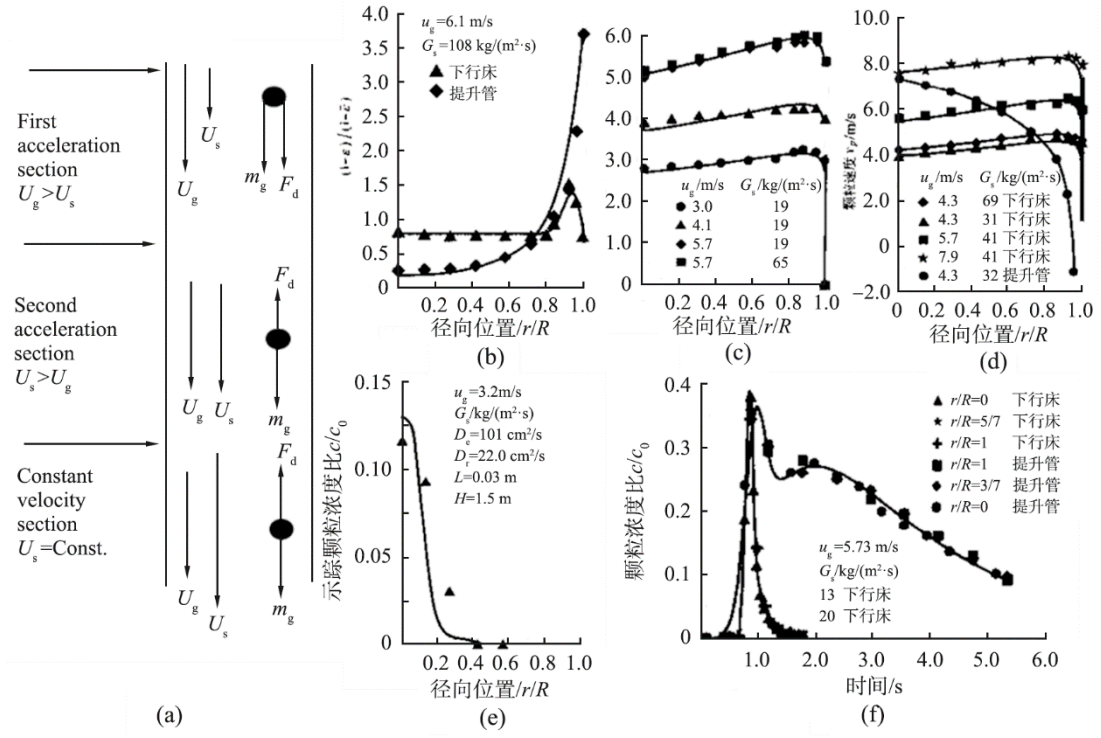


图 8（a）清华大学气固下行流化床装置示意图，（b）下行床中气固两相轴向流动特征，（c）下行床中颗粒浓度、气体速度和颗粒速度的径向分布及其与上行提升管的比较

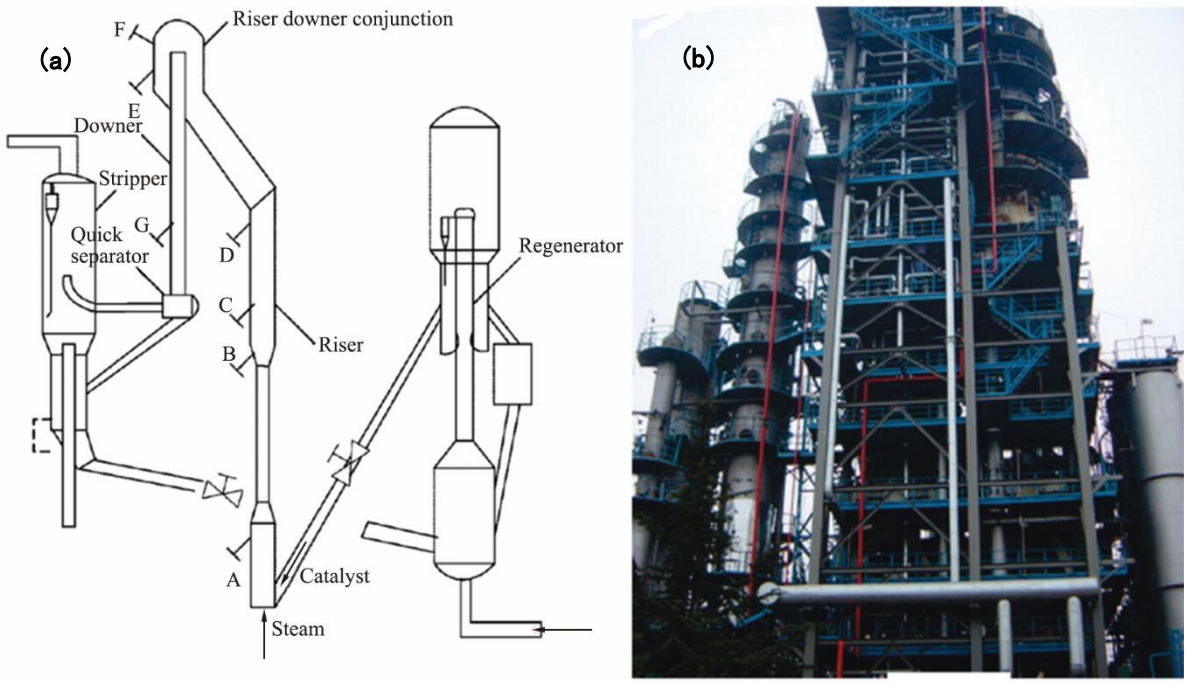


图 9 （a）提升管-下行管耦合反应器示意图，（b）山东济南炼油厂 15 万 t/a 重油催化裂化中试装置照片，提升管直径 380 mm，高 40 m，下行床内径 480 mm，高 15 m

近年来，随着“双碳”目标的推进，石油炼制工业进入巨大的变革时期。未来，石油炼制的目标将不再是生产汽油、柴油、煤油、润滑油，而是要以多产烯烃、芳烃等化

学品，为高分子材料提供单体。在这一趋势愈加明显时，世界最大石油炼制公司沙特阿美与清华大学签订合作协议，共同开展新一代下行床石油催化裂化高产化学品的实验研究。目前实验结果表明，轻烃与芳烃收率已可达到近 70%。然而，考虑到这一革命性技术如果产业化，将会牵动和影响国内外大石油公司利益，因此预计其产业化过程将会遇到各种困难，不会一帆风顺。

2）新一代煤化工技术研究。中国资源禀赋具有“富煤贫油少气”的显著特点，因此发展以煤为原料制备化工产品不仅具有重要的战略意义，也具有巨大经济潜力。中国流态化技术学者在此背景下，在能源产业大力研发了新一代煤化工技术。其中最成功的代表是由中科院大连物理化学研究所刘中民院士团队主导的流化床甲醇制乙烯技术（图 10（a））。该团队经过 30 多年的研发[108-109]，从实验室小型流化床反应器开始，经过中试、示范，最后放大到直径逾 10 m 的工业规模流化床反应器（图 10（b）、（c）），成功解决了反应动力学、催化剂失活和再生与流态化行为之间的合理匹配，取得了巨大成功。该技术的成果研发和应用，打通了由煤制烯烃的路线，弥补了石油路线原料的不足，产能已达到了 1 300 万 t/a，成为流态化技术应用于煤化工的世界级亮点。

此外，清华大学化工系团队利用流态化技术，在甲醇制芳烃、CO_2加氢制航空煤油的研发也在取得重要突破。该团队提出了“分区分功能转化的甲醇芳构化”理念，即将流化床分成三个区，分别进行反应活性适中的甲醇与烷烃（如丁烷、戊烷）中温芳构化；难转化的烷烃（如丙烷）的高温芳构化，以及易转化为烯烃的低温烷基化或中温芳构化[110]。为了减少柴油机产生的废气污染，清华大学化工系团队和山东玉皇化工（集团）有限公司合作开发了聚甲氧基二甲醚流态化合成技术，以“甲醇-甲醛-多聚甲醛”为原料路线，采用专用固体酸催化剂和气液固三相多级流化床反应器，在山东菏泽建成万吨级示范装置，目前已产业化应用[111]。

3）多级逆流流化床反应器研究。一般认为，流化床反应器有一个重要不足之处，即难于组织多级逆流操作。由于采用多级流化床串联操作理论上是可行的，但在实际操作时，层间颗粒溢流管常常由于气泡窜入而被吹空，使大量气体短路，导致操作难易稳定进行而失败。经清华大学化工系团队的研究发现，问题的解决可以通过让层间的分布板开孔率尽量大些（如 15%左右），使通过分布板压降ΔP_2尽量小，同时，保持底部溢流口较小；最关键的是溢流管的容积要远远大于溢流颗粒通量对应的体积，这时虽有气泡可

能会窜入溢流管内，但这些气泡可以从溢流管溢出，并且溢出后溢流管内还有大量颗粒存储而迅速封堵溢流管出口处，使反应器的操作迅速恢复正常。

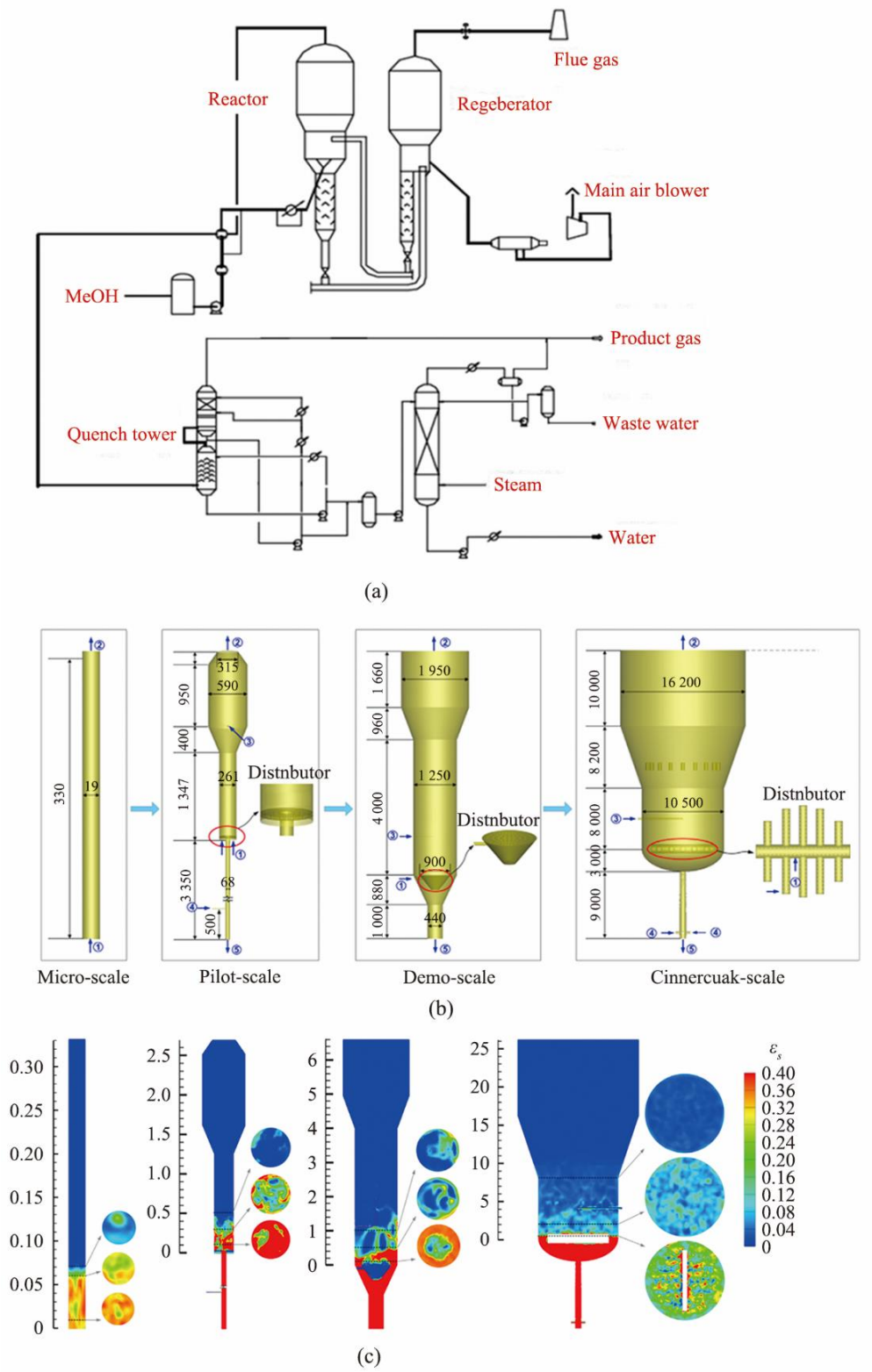


图 10 （a）流态化甲醇制制烯烃技术路线，（b）神华包头煤制烯烃工厂鸟瞰，（c）煤制烯烃流程；（d）流态化甲醇制制烯烃反应器装置照片，（e）流态化甲醇制制烯烃装置的三维模型图

基于这项研究建立的技术被成功应用于硝基苯加氢制苯胺多层流化床反应器（图 11）。使用新型两段流化床反应器，结合使用该团队开发的高压降变质量流管式气体分布器和脊型内构件，有效改善增强了气固接触，抑制了气体返混，促进了硝基苯的深度转化（转化率达到 99.99%）。这项技术的重要性是苯胺被用于生产人造革时，如硝基苯没有被除尽，使人造革在做为汽车等内装饰时带有异味，所以该技术研发的流化床反应器在全行业中普遍使用[112-113]。

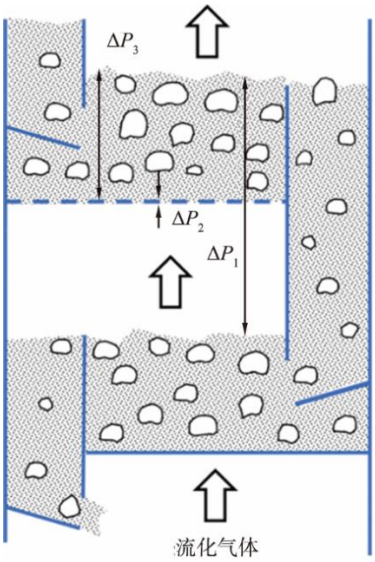


图 11 多层气固流化床示意图

4）高钾氯生物质循环流化床燃烧技术。碱金属含量高的生物质燃料如稻草、麦秆等农林业废弃物由于在燃烧过程容易发生聚团结焦、严重的高温腐蚀等问题，流化床燃烧技术一度被认为难以用于燃烧利用高碱金属含量的生物质。浙江大学根据我国生物质燃料资源特点，以农作物秸秆燃料为主要对象，对其高碱特性进行了针对性机理研究。在此基础上凭借浙江大学多年来在流态化燃烧领域积累的丰富经验，通过创新开发多温度窗口悬浮流化复合燃烧实现抑制床内物料聚团结渣的同时高效低污染燃烧、非规则生物质物料的高浓度窄筛分床料协同流化、生物质散料颗粒的高低位解耦给料以及主动调控钾氯等碱金属无机物的迁徙转化过程以抑制受热面灰沉积与腐蚀等关键技术，形成具有自主知识产权的高钾氯生物质循环流化床燃烧技术。采用该技术的国际上首台以稻麦秸秆为主要燃料的 75 t/h 循环流化床锅炉（图 12）于 2007 年在中国节能公司宿迁生物质电厂成功投运，运行情况表明在燃料适应性、燃烧效率、运行稳定性和污染物排放等方面具有明显优势。目前，该燃烧技术已得到广泛应用，引领了产业发展，目前循环流化床燃烧已成为国内生物质燃烧利用的主要方式。



图 12　国际上首台燃用秸秆类生物质的循环流化床发电机组

5）气固环流床技术。气固环流反应器将气液环流的理论合理地移植、耦合到气固体系，实现了可控的平推流与有限全混流的有机结合，具有高效的气固接触效率，有序的颗粒流动，可控的颗粒停留时间，优秀的传热、传质性能，结构简单等诸多优点。近年来，国内外学者通过大量的实验研究，使其在石油炼制领域实现了工业化应用。如中国石油大学（北京）开发的 FCC 带有密相环流预汽提器的粗旋快分 CSC（circulating stripping cyclon）系统、组合式环流汽提器、气固环流取热器等环流反应器已在 22 套ＦＣＣ装置中成功应用，轻质油收率提高 1.8 个百分点、焦炭产率降低 1.45 个百分点。

中国流态化技术研发在这一高潮时期处于较长的繁荣发展阶段，因此有众多具有极高科学价值和应用意义的科技论文在国内外发表。据不完全统计，自 2006 年以来，中国学者共发表（在 Web of Science 可查）论文近 8000 篇 （图 13（a）），其中以中科院、东南大学、清华大学、浙江大学等单位发表论文数量居前（图 13（b））。特别是，中国学者积极参加了多届国际流态化会议、国际循环流化床会议及其他相关会议。已有郭慕孙院士、金涌院士、李静海院士、岳光溪院士先后获得了国际循环流化床（CFB）界的终身成就奖，郭慕孙院士和金涌院士获得了美国化学工程师协会（AIChE）颁发的 PSRI 讲座奖。同时，中国也组织了包括国际流态化会议、国际循环流化床会议、中日流态化会议，中日颗粒学会议等，极大地推进了我国学者和国际同行的交流，每次会议都有数百位学者参加。

伴随着中国经济的快速发展和稳定，流态化技术也随之从高潮期进入稳定常态发展的时期。

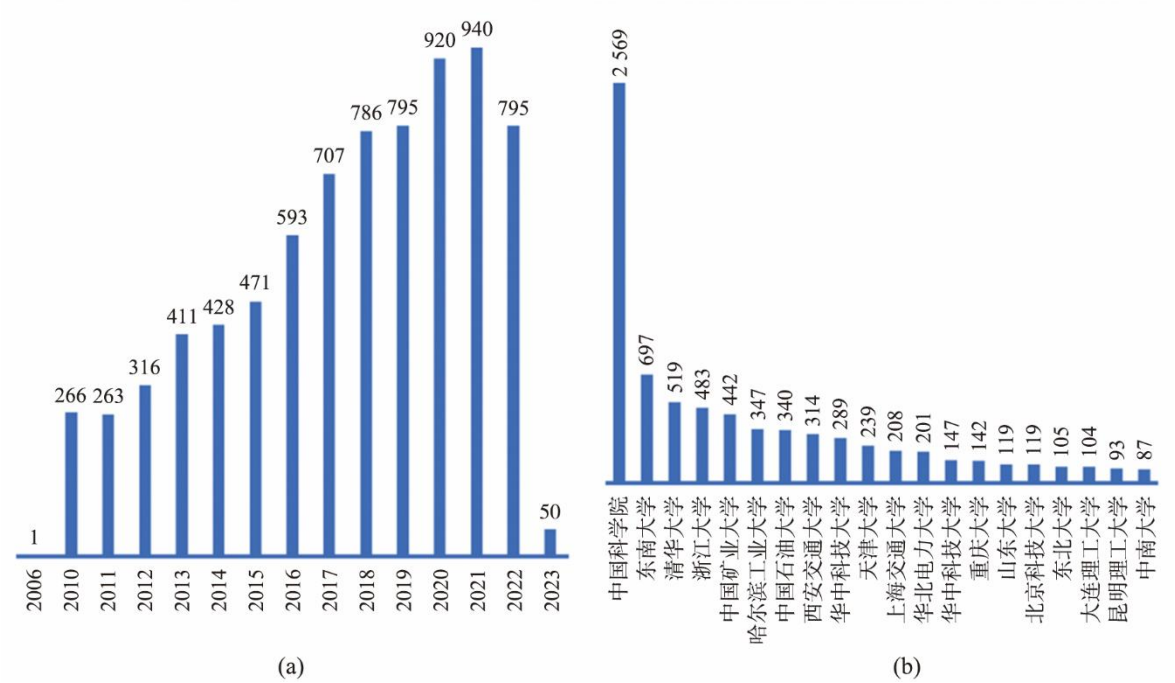


图 13 中国学者及前 20 名研发单位近年来发表的流态化相关论文统计
（基于 Web of Science，主题：Fluidiz*）

1.3 平稳常态研发期

进入 21 世纪以来，流态化技术在物理和化学加工操作应用中继续雄踞榜首，其应用范围继续扩展，原始创新不断出现。例如，清华大学化工系团队继续对流态化加深基础研究。在深入探索颗粒粒径对流化质量的影响时发现，FCC 催化剂粒径在 30 μm 左右时夹带量最高，这时颗粒间的范德华力超过颗粒重力的影响，是颗粒不发生显著团聚的最小粒径[114-115]。根据 Geldart 的流态化颗粒分类相图[116]，小于 30～40 μm 的 C 类细颗粒很难被平稳流化，会出现沟流等系列不正常行为。因此，小于 30 μm 的 C 类颗粒一度是流态化操作的禁区，那么如果粒径再减小 2～3 个数量级变成 30～40 nm，其流态化表现行为会如何？研究发现，纳米尺寸颗粒间范德华力为主导影响因素，在气流作用下会以稳定的团聚体形状（或称二次颗粒）被稳定悬浮流态化。聚团的尺寸为微米级，而且聚团的视比重很轻，可以形成很平稳的流态化密相层。纳米颗粒聚团流态化现象的发现，使流态化技术成功应用于纳米材料的宏量制备[117-118]。清华大学化工系团队依此技术成功宏量制备了世界上长度最长、强度最高的纳米碳管[119]，而且进一步合成出纳米碳管与石墨烯杂化的体型纳米材料，结合开发成功的片状泡沫铝，成为优质动力电池、动力电容的电极材料[120-123]。

在中国流态化研发平稳期，针对流态化复合介质力学特性的基础研究不断加深。中国科学院过程工程研究所李洪钟院士、朱庆山研究员团队针对矿物固相加工反应特点，深入系统地研究了宽筛分颗粒各粒级颗粒在流化床中的停留时间分布特征，据此开发了通过横向和纵向内构件、鼓泡-快速流化床耦合反应器等技术，对不同粒级颗粒停留时间分布进行调控，实现不同粒度颗粒反应时间和停留时间的合理匹配。基于研究结果在多矾酸铵还原制备三氧化二钒、难选铁矿磁化焙烧、低品位锰矿还原、氢氧化铝煅烧制 α－氧化铝等中试和产业化项目中取得了较好的效果，产生了显著的经济效益[124]。

中国石油大学卢春喜教授团队针对高效低毒农药制备过程，深入研究了气固流化床流动特性、气体分布器对流化床气固流场的影响，开发了先进的气固湍动-快速流态化耦合的流化床反应器，成功应用于吡啶碱和二硫化碳合成反应过程（图 14），单台装置可达到 500 台传统固定床反应器的产能，同时大幅降低了过程能耗和排放[125]。

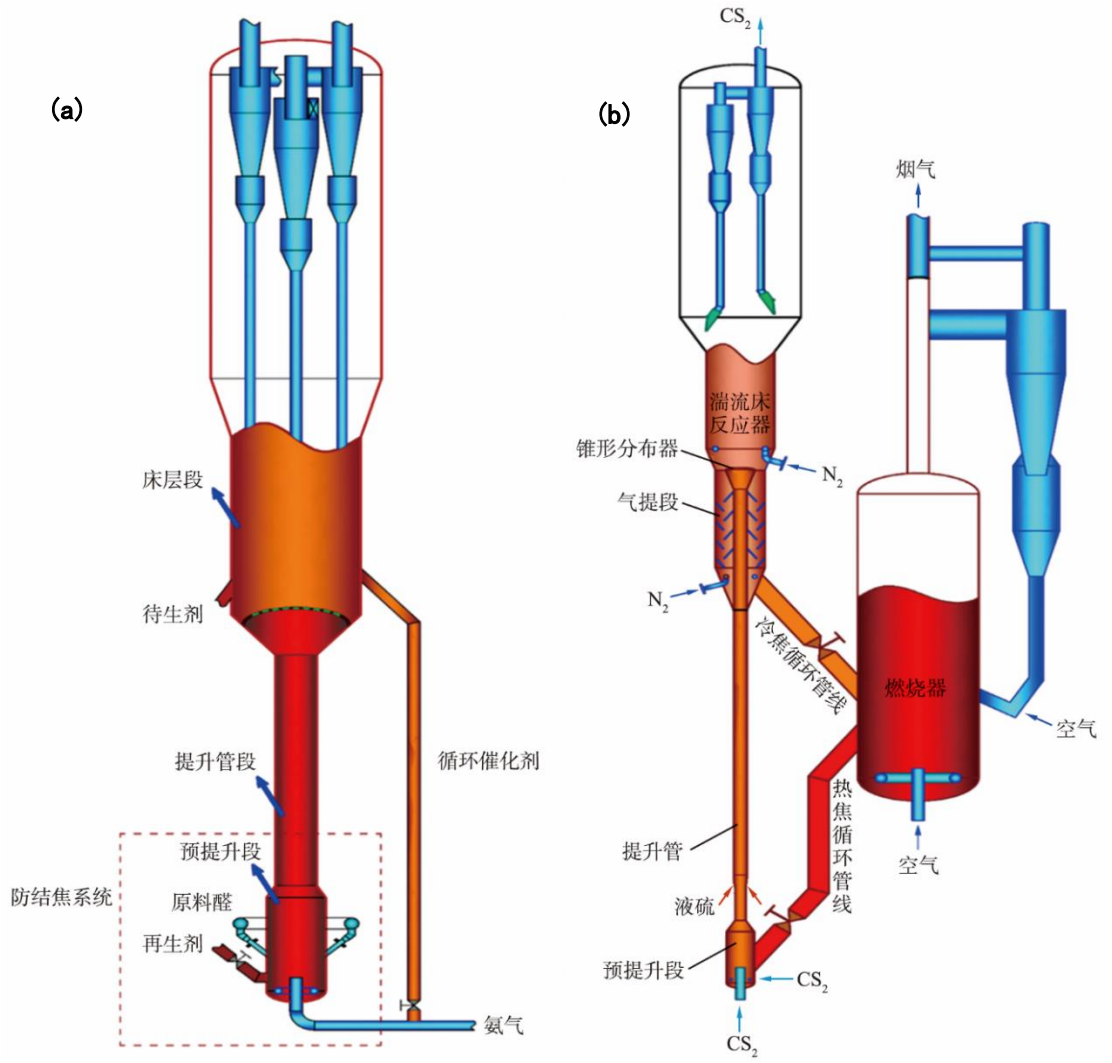


图 14 湍动-快速流态化耦合反应器应用于（a）吡啶碱合成，（b）二硫化碳合成反应过程

清华大学魏飞教授团队近年来研究了流化床内气泡破碎、成长规律，发现了对较深颗粒床层（床层高度/床径比值约 4.5），床层内以分布均匀的小尺寸气泡为主，反之则以非均匀分布的大尺寸气泡为主。据此，对工业规模氯甲苯氨氧化制备对氯苯甲腈的流化床反应器进行优化操作，取得了显著的改进效果[126]。此外，通过研究流态化复合介质力学特性，揭示了气固流化床中两相流动的稳定性，可压缩性，以及气泡-乳化相的共存特性[127-128]。研究发现，在气固流化床中（图 15（a））,随着操作压力增大，气泡相和乳化相颗粒浓度接近，到一定压力后，气泡和乳化相两相区别消失（图 15（b）），床层进入一种类似“超临界”颗粒流体状态（图 15（c））。

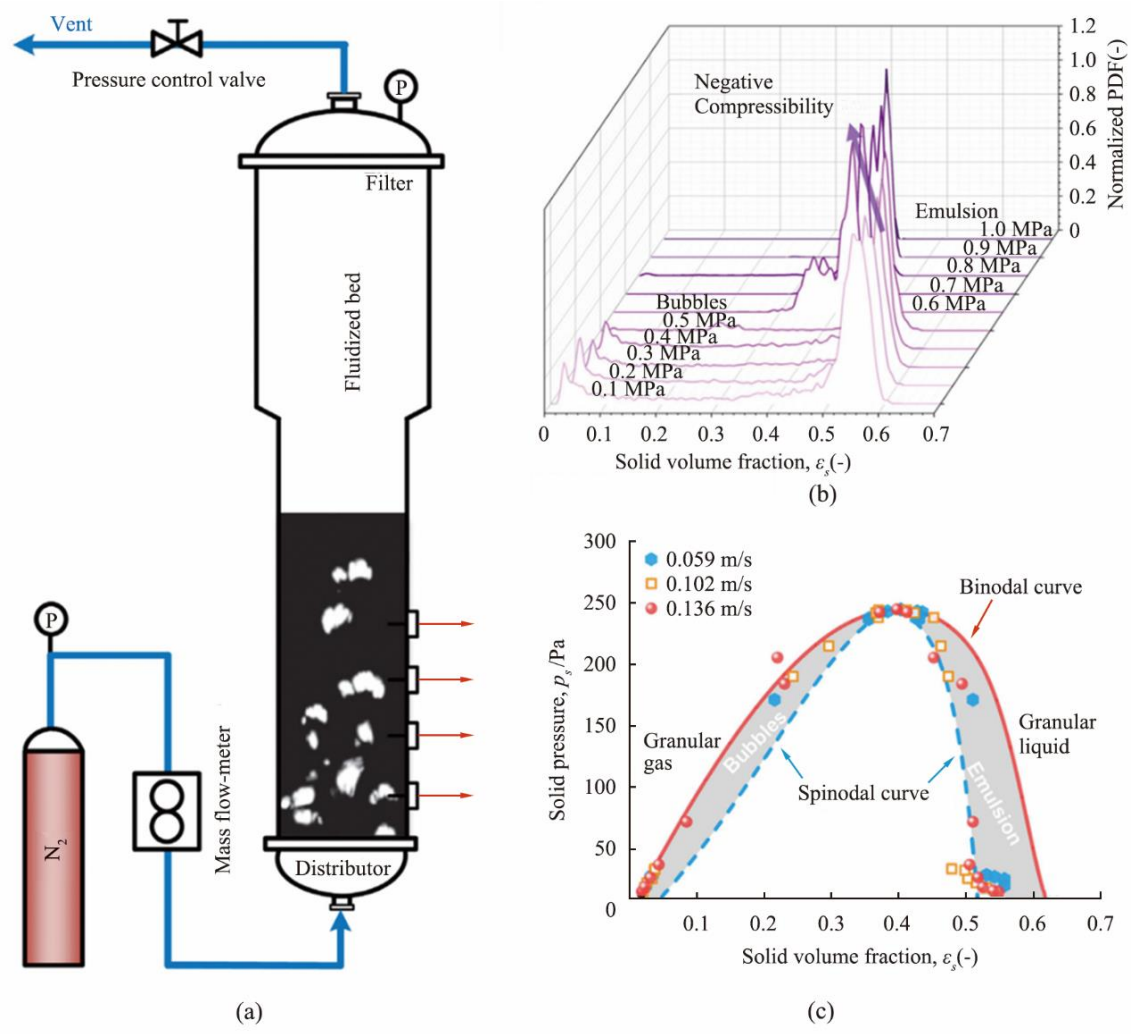


图 15 （a） 气固流化床，（b）气泡相和乳化相压力功率谱随操作压力的变化，（c）颗粒压力与颗粒浓度的变化关系

近年来，沈阳化工大学白丁荣、许光文团队，针对变革众多高温气固相和固相反应工程（如高密度优质镁砂烧结、橄榄石合成、莫来石合成等）的低温化目标，将流态化

基础研究扩展到温度高达 1 650 ℃的高温区域。发现在高温条件下，气体密度、粘度对流态化质量影响趋势不同。尤其是在高温下颗粒的形貌和结构特征（如尺寸、密度、形状）以及由于分子迁移和化学反应引起的颗粒间力作用明显增强，对流态化质量影响显著，其行为与常规低温流态化行为非常不同 （图 15）。实验同时发现，提高操作温度，有可能使在低温下难以流化的毫米级颗粒处于稳定的流化状态，这为进一步开发高温流态化的工业应用奠定了基础[129]。

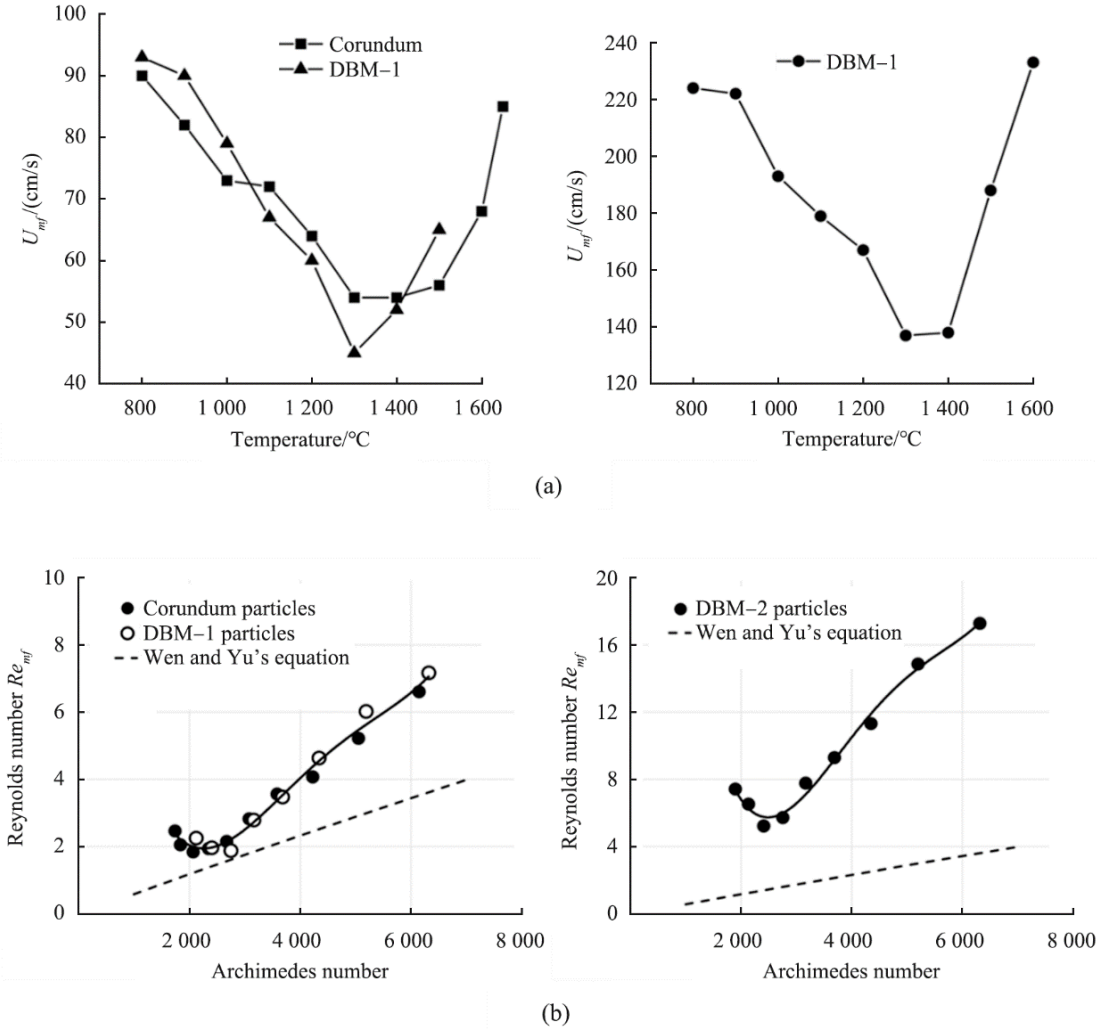


图 15（a） 温度对最小流化速度的影响，（b）高温流化床最小流化速度与低温条件下关联式的比较

燃煤循环流化床锅炉在大容量高参数方面得到了进一步发展，近年来先后投运了多台 600 Mwe 等级级以上的超临界循环流化床锅炉，其中东方锅炉厂研发的 700 Mwe 超超临界循环流化床锅炉于 2025 年 4 月在云南能投红河电厂投运，设计主蒸汽压力为 29.3 MPa，温度为 605 ℃，进一步提高了燃煤循环流化床发电机组的容量及发电效率。

煤炭流化床气化技术具有燃料适应性好、氧耗较低等优点，一直是煤炭气化技术的重要研发方向。中国科学院工程热物理研究所在煤炭循环流化床气化技术的研发及应用上取得较好的进展，先后研发了常压循环流化床气化制取工业燃气、常压富氧循环流化床气化以及加压富氧循环流化床气化制取合成气等装置，并实现了工业化应用，目前单炉煤处理量规模已达 1 000 t/d。

生物质气化是实现生物质高效能源化及资源化利用的关键技术，近年来生物质气化技术研发方兴未艾。由于流化床气化技术有望实现生物质高效利用得到较大关注。浙江大学研发团队在生物质循环流化燃烧技术研发工作基础上，在深入研究流化床气固两相流动特性以及秸秆燃烧气化特性基础上，创新开发了基于灰烧结温度控制的宽燃料适应性农林生物质循环流化床气化技术，并于 2018 年成功应用于湖北华电襄阳发电公司的 10.8 Mwe（生物质处理量 8 t/h）生物质气化耦合 600 MWe 燃煤超临界发电项目，该项目在国内外首次实现了纯烧秸秆条件下气化工业装置的长期稳定运行，并被国家能源局认定为 2021 年度能源领域首台（套）重大技术装备，所研发的生物质流化床气化技术已成功应用于 3～20 t/h 处理量的多个工业项目中。在生物质流化床气化制合成气合成甲醇等化学品方面，国内多家研究机构都在开展相关的研发工作及工业示范。其中中国科学院工程热物理所在燃煤循环流化床气化技术研发工作基础上研发了常压富氧循环流化床气化制合成气技术已应用于湛江 5 万 t 生物质制绿甲醇示范项目中，并于 2025 年投入运行；上海锅炉厂研发的生物质纯氧加压循环流化床气化技术于 2025 年 6 月在 5 t/d 生物质处理的中试装置上通过 72 h 连续运行考核；中石化和浙江大学合作开发的 120 t/d 生物质加压氧-水蒸气循环流化床气化工业试验装置也将开展试验运行。



图 16 8 t/h 秸秆类生物质循环流化床气化耦合燃煤发电示范装置

新世纪世界能源产业正发生革命性变化，化石能源时代正在转向以风能、光能、水能等可再生能源为主的时代，化石（煤、油，天然气等）能源将从主要加工成燃料转变成加工高分子等材料的原料。这个巨大变革为流态化技术创造出更多的发展机遇。多相流态化技术作为一个多学科交叉、非线性、多种物理、化学行为相互交联的体系，仍然是一个有着重大工业应用前景、有深邃理论内涵及广阔研究容量的领域，有强烈的吸引力让年轻学者发挥才干，其研发前景依然会无限辉煌。

2 结语

回顾流态化技术在中国近 80 年的发展，我国流态化学者在相当长的一段时期内，在极其艰苦的环境下，坚持不懈地努力，在汪家鼎和郭慕孙等老一辈先生的指导下，取得了许多成绩，创立了世界领先的广义流态化理论，开发出一些极具工业应用价值的流态化工艺过程。随着改革开放国策的实施和深入，我国流态化学者迎来了基础研究和工业应用过程开发的高潮，在基础研究领域和工业过程等方面形成了许多创新成果，为世界流态化技术发展进步做出了卓越贡献，同时也培养和成长了一大批学术造诣深厚、人品高尚的学术大师。

进入新世纪以来，随着全球地缘政治、社会经济、气候变化等发展变化，能源、化工等产业逐渐进入大变革的时代。在此背景下，固体颗粒的流态化技术也面临前所未有的变革需求和挑战。展望未来流态化技术发展方向，以下几点仅供参考。

1）能源和资源转化。随着非化石燃料交通技术以及可再生能源的发展，能源资源（石油、煤炭）将不断从传统的转化为燃料和动力的目的向转化为功能材料方向转变。尤其是石油资源将需要从传统的生产汽油、柴油、煤油、润滑油等产品变为生产石脑油、低碳烯烃和芳烃等原料。在这个领域，流态化技术无疑具有非常大的发展潜力。

2）煤炭分级分质利用。郭慕孙先生早期就提出“煤拔头”的技术思路，建议从较年轻的煤种采用快速热解和快速冷却并与循环流化床锅炉相结合的方法，从煤中获取较高的油品收率[130]。煤拔头思路促进了迄今为止的煤炭分质利用技术的发展。然而，现有技术包括由粉状褐煤生产兰炭的技术都遇到结焦堵塞、粉尘分离等工程问题难以解决，因而尚没有工业化应用。目前，应用浙江大学开发的煤炭双流化床热解燃烧分级转化热电煤气焦油联产技术的煤处理量 120 万 t/a 的工业示范装置已在山西省朔州市建成，并初步完成调试运行，有望实现该工艺技术路线的工业化应用。此外，现有技术生产焦油，

再通过焦油加氢制柴油的方向技术难度大，尤其是未来随着电动车的突起，柴油逐渐失去市场需求。为此，作者建议先在 400～500 ℃下低温热解，得到含有粗苯、轻焦油、沥青的热解气，再将热解气在高温流化床中直接二次裂解全部生成低碳烃类及氢气，就有望彻底解决焦油与粉尘所带来的问题，推动煤炭分级分质利用技术的产业化发展。

3）无机固废利用。流态化技术在无机固废资源利用方面有着极大的发展潜力。例如，我国现有大量磷石膏、脱硫石膏产生和堆积，对“青山绿水”环境保护造成很大的压力。同时，为保护环境，国家将不断加紧限制石灰石等矿山资源开采，而随着炼制含硫石油的减少，硫元素供应随之减少。预期未来 Ca 和 S 元素会面临资源供应紧张的局面。为此，通过流态化技术将磷石膏和脱硫石膏转化再生为可循环使用的含 S 和 Ca 的产品（如硫磺，硫酸，$CaCO_3$等），是有潜力的研究课题。对此，清华大学化工系团队已开展初步研究，目前正与初创公司合作完成 10 t/a 级示范，年产万吨装置正在建设中。

此外，我国还有大量的无机矿原生及洗选、加工后的固体废弃物，如菱镁矿尾矿、铁矿尾矿，铝灰、硼泥、油页岩残渣、赤泥等。未来，开发流态化技术、实现可规模化和高附加值利用这些废弃资源，促进循环经济发展，前景十分广阔。

4）矿物资源化。矿物资源热转化是生产许多金属氧化物和金属材料的重要初级加工过程。例如，铁矿石冶炼，原铝生产，工业级硅制备，菱镁矿煅烧制备氧化镁，水泥熟料生产，石灰制备，铜、锌、镍等金属制备，以及许多稀土元素的加工生产，都涉及原矿石的热加工（如煅烧、碳热还原、硅热还原等）。目前这些过程大多采用大尺寸的原料在高温电弧炉、竖窑或回转窑中进行反应，操作温度高到 2 000～3 000 ℃，处理时间数至十小时以上，一次能源利用效率不足 50%，能耗高，产能低，污染严重。

此外，目前还有一些矿物资源（例如磷矿）通过酸碱湿法加工转化，存在提纯难度大，处理能力低，二次污染严重等问题。以磷矿为例，磷是农作物生长不可缺少的元素之一，关系到国家粮食安全生产、社会稳定与发展、属于国家战略资源。我国磷矿资源储量少、品位低，目前加工转化工艺落后，资源浪费和环境污染严重。

研发先进的细颗粒高温流态化技术，革新这些传统过程，开发节能、环保、低品位资源高效利用先进技术和设备，具有非常巨大的科学价值和经济潜力。沈阳化工大学近期在这方面开始了有益探索，为填补流态化技术在超高温条件下的研究基础和应用空白，奠定了良好的开端[129-131]。

5）高端功能材料宏量制备。可再生能源替代化石能源无疑是实现“碳达峰、碳中和”目标的最终途径。然而，为了有效利用太阳能、风能等新能源，需要规模化、经济地生产储能器件，如锂离子电池和超级电容器所需的高端材料。正如使用流态化技术实现碳纳米材料宏量化制备一样，流态化技术在电极材料、储能材料、太阳能级/电子级硅、高纯金属/合金等宏量化制造方面具有非常广阔的开发需求和应用前景。流态化技术与高端材料制备的结合是未来流态化技术发展的重要方向。

6）基于碳捕集的化学链燃烧及气化技术。碳捕集技术是实现我国双碳战略目标的重要技术途径之一。基于流态化过程的含碳燃料化学链燃烧及气化技术打破了传统的火焰燃烧的燃料化学能释放方式，通过固体金属燃料的氧化还原过程，将燃料化学能释放过程与 CO_2 分离过程整合为一体，利用燃料化学能释放过程中的品位差作为 CO_2 分离的驱动力，在降低燃料化学能释放过程品位损失的同时实现 CO_2 的一体化分离，避免了 CO_2 分离带来的系统效率的降低。化学链燃烧因其更高的能量利用效率和环境友好性，成为未来提高系统效率、解决 CO_2 排放的重要突破口。近年来受到国内外广泛关注，我国在化学链燃烧及气化技术方向研发工作已取得较好的进展，其中东方锅炉厂及清华大学等单位合作建成了目前国际上最大规模的 5MW 燃煤化学链燃烧中试装置并实现自热连续运行，中国科学院青岛生物能源及过程研究所则实现了千吨级生物质化学链气化中的试验证运行。这些工作验证了化学链燃烧及气化技术的可行性，在未来可能实现工业化应用。

参考文献

[1]金涌，祝京旭，汪展文，等. 流态化工程原理 [M]. 清华大学出版社，2001.

JIN Yong, ZHU Jingxu, WANG Zhanwen, et al. Principles of Fluidization Engineering [M]. Tsinghua University Press, 2001.

[2]郭慕孙，李洪钟. 流态化手册 [M]. 北京：化学工业出版社，2007.

GUO Musun, LI Hongzhong. Fluidization Manual [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.

[3]李洪钟，郭慕孙. 回眸与展望流态化科学与技术 [J]. 化工学报，2013，64（1）：52-62.

Li Hongzhong, Guo Musun. Review and Prospect of fluidization Science and Technology [J]. CIESC Journal, 2013, 64（1）：52-62.

[4]王莊，吕潇，邵媛媛，祝京旭. 流态化的往昔寻觅及未来启示[J]. 化工学报，2021，72(12)：5904-5927.

WANG Zhuang, LYU Xiao, SHAO Yuanyuan, ZHU Jingxu. Fluidizing past search and future revelation[J]. CIESC Journal, 2021, 72 (12)：5904-5927.

[5]LECKNER B. Hundred years of fluidization for the conversion of solid fuels[J]. Powder Technology, 2022, 411: 117935.

[6]HORIO M, KAI T, TSUJI T, HATANO H. Fluidization centennial and the decades of research and development in Japan[J]. Powder Technology, 2023, 415: 118093.

[7]KNOWLTON T M, KEAIRNS D L, YANG W C. History of fluidization in North America[J]. Powder Technology, 2023, 426: 118609.

[8] 宋应星. 天工开物 [M]. 岳麓书社, 2002.

SONG Yingxing. Tiangong Kaiwu [M]. Yuelu Press, 2002

[9] WINKLER F. Verfahren zum Herstellen Wassergas: German Patent No. 437970. 1922.

[10] LEWIS W K, GILLILAND E R, BAUER W C. Characteristics of Fluidized Particles [J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1949, 41: 1104-17.

[11] WANG Jiading. Low Temperature Carbonization of Lignite in Fluidized Bed [D]; Massachusetts Institute of Technology, 1945.

[12] 汪家鼎. 流动化固体法应用于煤之干馏 [J]. 化学工程, 1948, XV (1/2) : 33-40

WANG Jiading. Application of fluidized solid method in coal distillation [J]. Chemical Engineering, 1948, XV (1/2) : 33-40

[13] WILHELM R H, KWAUK M. Fluidization of Solid Particles [J]. Chem Eng Prog, 1948, 44: 201-18.

[14] KWAUK M, LI J, LIU D. Particulate and aggregative fluidization — 50 years in retrospect [J]. Powder Technol, 2000, 111 (1) : 3-18.

[15] 郭慕孙, 庄一安. 流态化-垂直系统中均匀球体和流体的运动 [M]. 北京: 科学出版社, 1963.

GUO Musun, ZHUANG Yi 'an. Fluidization- Motion of Uniform Spheres and Fluids in Vertical Systems [M]. Beijing: Science Press, 1963.

[16] 清华大学化工系化（三）教改小分队. 流化床送气双锥下料装置的冷模实验及其在苯酐氧化炉中的应用 [J]. 化学工程, 1976 (3) : 33-6.

Department of Chemical Engineering, Tsinghua University (3) Teaching Reform Team. Cold model experiment of Fluidized Bed Feeding Device with Double Cone and its Application in anhydride oxidation furnace [J]. Chemical Engineering, 1976 (3) :33-6.

[17] 清华大学化工系反应工程组. 苯酐氧化炉（流化床）塔型立构件的研究 [J]. 石油化工, 1979 (2) : 98-102.

Reaction Engineering Group, Department of Chemical Engineering, Tsinghua University. Research on Tower vertical Components of Anhydride oxidation Furnace (Fluidized bed) [J]. Petrochemical Industry, 1979 (2) : 98-102.

[18] 朱寿康. 关于沸腾焙烧理论上的几个问题 [J]. 有色金属, 1957 (9) : 23-40.

ZHU Shoukang. Some Problems on Boiling Roasting Theory [J]. Nonferrous Metals, 1957 (9) : 23-40.

[19] 王启仁，黄贤震，毛培则. 高硫铜精矿全氧化沸腾焙烧 [J]. 有色金属（冶炼部分），1965（6）：34-8.

WANG Qiwu, Huang Xianzhen, MAO Peize. Total oxidation boiling roasting of high sulfur copper concentrate [J]. Nonferrous Metals （Smelting Part）, 1965,（6）: 34-8.

[20] 北京石油学院. 粉煤流化床低溫干餾 [J]. 石油炼制与化工，1958（14）:17-20.

Beijing Petroleum Institute. Fluidized bed low temperature distillation of pulverized coal [J]. Petroleum Refining and Chemical Industry, 1958（14）:17-20.

[21] 曹重远，王剑秋，朱亚杰. 粉煤流化床低温干馏的研究：第一报 实验室装置的研究 [J]. 华东石油学院学报，1959（00）:3-9.

CAO Chongyuan, WANG Jianqiu, ZHU Yajie. Study on Low temperature retorting of pulverized coal in fluidized Bed: The first report of laboratory equipment [J]. Journal of East China Petroleum Institute, 1959（00）: 3-9.

[22] 朱亚杰，曹重远，王劍秋，等. 粉煤流化床低温干餾的研究 [J]. 燃料学报，1959,（2）: 173-80.

ZHU Yajie, CAO Chongyuan, WANG Jianqiu, et al. Study on Low temperature dry distillation of Pulverized coal in fluidized bed [J]. Journal of Fuel Science, 1959 （2）: 173-80.

[23] 秦霁光. 醋酸乙烯流化床反应器 [J]. 化学世界，1966,（5）: 232-5.

QIN Jiguang. fluidized bed reactor of vinyl acetate [J]. Chemical World, 1966（5）: 232-5.

[24] 彭敏立，徐文汇. 流化流动床初步探讨 [J]. 贵州工学院学报，1960,（2）: 24-7.

PENG Minli, XU Wenhui. Preliminary study on fluidized bed [J]. Journal of Guizhou Institute of Technology, 1960,（2）: 24-7.

[25] 叶永华. 沸腾床中粒子带出量的计算 [J]. 化学世界，1963,（9）: 424-5.

YE Yonghua. Calculation of Particle Removal in Boiling Bed [J]. Chemistry World, 1963,（9）: 424-5.

[26] 江体乾，陈敏恒，戴干策. 流化床吸附中的物质传递 [J]. 化学世界，1963（12）: 567-71.

JIANG Tiqian, CHEN Minheng, DAI Gance. Material transfer in fluidized bed adsorption [J]. Chemical World, 1963,（12）: 567-71.

[27] 郑轩荣. 无溢流式多层流化床及其流体力学试验 [J]. 大连工学院学刊，1963（3）: 109-20.

ZHENG Xuanrong. Non-overflow multilayer fluidized bed and its hydrodynamics Experiment [J]. Journal of Dalian Institute of Technology, 1963（3）: 109-20.

[28] 秦霁光，邱信淼，陈洪生，et al. 聚式锥形流化床的流体力学特性研究 [J]. 化学世界，1964（8）: 380-1.

QIN Jiguang, QIU Xinmiao, CHEN Hongsheng, et al. Hydrodynamic Characteristics of conical fluidized bed [J]. Chemical World, 1964（8）: 380-1.

[29] 王紹亭，麥本熙，姚玉英. 固體流態化方法中的流體動力學傳熱与傳質問題 [J]. 天津大学学

报，1957（Z1）：239-58.

WANG Shaoting, MAI Benxi, YAO Yuying. Fluid dynamic Heat and mass Transfer in Fluidized Solids [J]. Journal of Tianjin University, 1957（Z1）：239-58.

[30] 郑炽. 流化床中的混和作用 [J]. 化学世界，1964（7）：315.

ZHENG Chi. Mixing in fluidized bed [J]. Chemical World, 1964 （7）：315.

[31] 秦霁光，丛启明，陈洪生，et al. 流化床气体分布板的研究 [J]. 化学世界，1964（10）：486-7.

QIN Jiguang, CONG Qiming, CHEN Hongsheng, et al. Study on Fluidized Bed Gas Distribution Plate [J]. Chemical World, 1964（10）：486-7.

[32] 叶永华. 流化床气体分布板的设计 [J]. 化学世界，1966,（3）：41-3.

YE Yonghua. Design of Gas Distribution plate in Fluidized bed [J]. Chemical World, 1966（3）：41-3.

[33] 陈大保，文立贤，杨贵林，et al. 湍流流化床丁烯氧化脱氢制丁二烯 [J]. 石油化工，1986,（11）：661-6.

CHEN Dabao, WEN Lixian, YANG Guilin, et al. Oxidative dehydrogenation of butadiene to butadiene in a turbulent Fluidized Bed [J]. Petrochemical Industry, 1986（11）：661-6.

[34] 杨贵林，黄哲，陈大保，et al. 快速流化床 H-198 催化剂丁烯氧化脱氢制丁二烯 [J]. 石油化工，1987,（10）：680-5.

YANG Guilin, HUANG Zhe, CHEN Dabao, et al. Oxidative dehydrogenation of butadiene to butadiene with Fast Fluidized Bed H-198 Catalyst [J]. Petrochemical Industry, 1987,（10）：680-5.

[35] 白丁荣，金涌，俞芷青. 循环流化床内颗粒的加速作用及气固两相间的动量交换 [J]. 化学反应工程与工艺，1991,（3）：260-70.

BAI Dingrong, JIN Yong, YU Zhiqing. Particle acceleration and Momentum Exchange between Gas-solid phase in a circulating fluidized bed [J]. Chemical Reaction Engineering & Technology, 1991,（3）：260-70.

[36] DAVIDSON J F, HARRISON D. Fluidized Particles [M]. 2006/03/28 ed.: Cambridge University Press, 1963.

[37] ROWE N, PARTRIDGE B A, LYALL E. Bubbles in Fluidized Beds [J]. Nature, 962, 195（4839）：278-9.

[38] KUNII D, LEVENSPIEL O. Fluidization Engineering [M]. 2nd ed. Boston: Butterworth—Heinemann, 1991.

[39] CAI Ping, CHEN Shapeng, JIN Yong, et al. Effect of operating temperature and pressure on the transition from bubbling to turbulent fluidization [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering （China）, 1990, 5（1）：122-32.

[40] CAI Ping, JIN Yong, YU Zhiqing, et al. Mechanism of flow regime transition from

bubbling to turbulent fluidization [J]. AIChE J, 1990,36: 955-956.

[41] CAI Ping, CHEN Shapeng, JIN Yong, et al. Effect of operating temperature and pressure on the transition from bubbling to turbulent fluidization [J]. AIChE Symp Ser, 1989, 85 (270): 37-43.

[42] 蔡平，金涌，俞芷青，等. 鼓泡流态化向湍动流态化过渡的判别 [J]. 化工学报，1986，(4)：391-401.

CAI Ping, JIN Yong, YU Zhiqing, et al. Identification of Transition from bubbling Fluidization to Turbulent fluidization [J]. CIESC Journal, 1986, (4): 391-401.

[43] 金涌，俞芷青，张礼，等. 流化床脊形内构件 [J]. 石油化工，1986，(5)：269-77.

JIN Yong, YU Zhiqing, ZHANG Li, et al. Ridged internal components of fluidized bed [J]. Petrochemical Industry, 1986, (5): 269-77.

[44] 蔡平，金涌，俞芷青，et al. 床径影响流化床中气-固流化行为的研究 [J]. 清华大学学报（自然科学版），1988，(3)：22-7.

CAI Ping, JIN Yong, YU Zhiqing, et al. Study on the influence of bed diameter on gas-solid fluidization behavior in fluidized bed [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 1988, (3): 22-7.

[45] 陈沙鹏，俞芷青，金涌，et al. 采用凝聚函数法进行气-固流化床轴向区域划分 [J]. 化学反应工程与工艺，1989，(2)：37-44.

CHEN Shapeng, YU Zhiqing, JIN Yong, et al. Application of condensation function method in axial region division of gas-solid fluidized bed [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 1989, (2): 37-44.

[46] 陈沙鹏，俞芷青，金涌，et al. 操作压力对鼓泡流态化向湍动流态化转变的影响 [J]. 石油化工，1990，19：696－700.

CHEN Shapeng, YU Zhiqing, JIN Yong, et al. Effect of Operating Pressure on the transition from bubbling fluidization to Turbulent fluidization [J]. Petrochemical Industry, 1990,19: 696-700.

[47]蔡平，金涌，俞芷青. 操作温度对鼓泡流化向湍动流化转变的影响 [J]. 化学工程，1991,(3)：62-6，1-6.

CAI Ping, JIN Yong, YU Zhiqing. Effect of operating temperature on the transition from bubbling fluidization to Turbulent fluidization [J]. Chemical Engineering, 1991, (3): 62-6, 1-6.

[48] 孙竹范，金涌，汪展文，et al. 流化床中多管式气体分布器的研究 [J]. 北京轻工业学院学报，1984，(1)：81-8.

SUN Zhufan, JIN Yong, WANG Zhan-wen, et al. Study on multi-tube gas distributor in fluidized bed [J]. Journal of Beijing Institute of Light Industry, 1984, (1): 81-8.

[49] 金涌，夏光. 流化床管式分布器的研究 [J]. 化工冶金，1982，(3)：61-6.

JIN Yong, XIA Guang. Research on fluidized bed tube distributor [J]. Chemical Metallurgy,

1982, (3) : 61-6.

[50]金涌, 俞芷青, 孙竹范,等. 流化床多管式气流分布器的研究（Ⅱ)分布器设计参数的确定 [J]. 化工学报, 1984, (3) : 203-13.

JIN Yong, YU Zhiqing, SUN Zhufan, et al. Study on multi-tube Flow distributor in fluidized bed （Ⅱ） Determination of the design parameters of the distributor [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 1984, (3) : 203-13.

[51] 清华大学化工系、天津油漆厂苯酐车间. 苯酐氧化炉（流化床）塔型立构件的研究 [J]. 石油化工, 1979, (2) : 98-102.

Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Tianjin Paint Factory, anhydride Workshop. Research on Tower vertical Components of Anhydride oxidation Furnace (Fluidized bed) [J]. Petrochemical Industry, 1979, (2) : 98-102.

[52] 金涌, 毕德明, 苏群, 等. 采用流化床换热的固定床反应器 [J]. 化学工程, 1979, (1) : 45-58.

JIN Yong, BI Deming, SU Qun, et al. A fixed-bed reactor with fluidized bed heat transfer [J]. Chemical Engineering, 1979, (1) : 45-58.

[53] 金涌, 俞芷青, 张礼, 等. 流化床反应器塔型内构件的研究 [J]. 化工学报, 1980,(2) : 117-28.

JIN Yong, YU Zhiqing, ZHANG Li, et al. Study on inner components of fluidized bed reactor tower [J]. Journal of Chemical Engineering, 1980, (2) : 117-28.

[54]金涌, 张礼, 俞芷青, 等. Φ1000 毫米萘氧化制苯酐流化床塔型立构件 [J]. 石油化工, 1984, (7) : 441-3.

JIN Yong, ZHANG Li, YU Zhiqing, et al. Fluidized bed tower component with Φ1000 mm naphthalene oxidation to anhydride [J]. Petrochemical Industry, 1984, (7) : 441-3.

[55] JIN Yong. Pagoda-type vertical internal baffles in gas-fluidized beds [J]. Int Chem Eng, 1980, 20: 191.

[56] JIN Yong, YU Zhiqing, Zhangli, et al. A Study of Particle Movement in a Gas-Fluidized Bed [M]//GRACE J R, MATSEN J M. Fluidization. Boston, MA; Springer US. 1980: 365-72.

[57] AICHE. Winners: PSRI Fluidization and Fluid Particle Systems.

[58]阳永荣, 戎顺熙, 陈甘棠, 等. 湍动流化床的流型与流型过渡 [J]. 化学反应工程与工艺, 1990 (2) : 9-16.

YANG Yongrong, RONG Shunxi, CHEN Gantang, et al. Flow pattern and transition of turbulent fluidized bed [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology,1990 (2) : 9-16.

[59]王樟茂, 张年英, 陈伯川, 等. 粒度与粒度分布对流化床质量传递特性的影响 [J]. 石油化工, 1986 (4) : 224-9.

WANG Zhangmao, ZHANG Nianying, Chen Bochuan, et al. Effect of particle size and particle size distribution on mass transfer characteristics of fluidized bed [J]. Petrochemical Industry, 1986 (4) : 224-9.

[60]侯昭胤，戴擎镰，张勤鑫，等. 丙烷氨氧化制丙烯腈的催化剂研究 [J]. 化学反应工程与工艺，1998，(3)：2-8.

HOU Zhangyi，DAI Qinglian，ZHANG Qinxin，et al. Preparation of acrylonitrile by ammonium oxidation of propane [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology，1998 (3)：2-8.

[61]戴擎镰，俞坚，张虹，等. 丙烯氨氧化制丙烯腈的反应网络与动力学模型 [J]. 化学反应工程与工艺，1993 (4)：345-52.

DAI Qingfu，YU Jian，ZHANG Hong，et al. Reaction network and kinetic model of propylene ammoxidation to acrylonitrile [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology，1993 (4)：345-52.

[62]俞坚，张虹，戴擎镰，等. 多组份 MoBi 催化剂上丙烯氨氧化反应 Ⅰ.反应气氛对氧化还原型催化剂性能的影响 [J]. 石油化工，1987 (7)：472-7.

Yu Jian，ZHANG Hong，DAI Qinglian，et al. Ammoxidation of propylene over multi-component MoBi catalyst Ⅰ. Effect of reaction Atmosphere on the performance of oxidation reduction Catalyst [J]. Petrochemical Industry，1987 (7)：472-7.

[63]王尊孝，张秀兰，秋绍南，等. 流态化床萘催化氧化制苯酐反应器的放大研究—通过 φ42，φ800 及 φ3600 毫米反应器试验 [J]. 化学反应工程与工艺，1988 (3)：109-13.

WANG Zunxiao，ZHANG Xiulan，QIU Shaonan，et al. Scale-up study on the catalytic oxidation of naphthalene to anhydride in fluidized bed reactor by φ42，φ800 and φ3600 mm [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology，1988 (3)：109-13.

[64]刘大陆，李希光，郭慕孙，等. 气控式多层流化床及其在净化排放气中的应用 [J]. 化工学报，1979 (1)：41-54.

LIU Dalu，Li Xiguang，GUO Musun，et al. Gas-controlled multilayer fluidized bed and its application in the purification of gas emission [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering，1979 (1)：41-54.

[65]陈松，康仕芳，赵珺. 在振动流化床反应器中还原三氧化铀 [J]. 核科学与工程，1999，(4)：361-6.

CHEN Song，KANG Shifang，ZHAO Jun. Reduction of uranium trioxide in a vibrating fluidized bed reactor [J]. Nuclear Science and Engineering，1999 (4)：361-6.

[66]赵珺，邱履福，钟兴，等. 三碳酸铀酰铵流化床分解-还原制备二氧化铀的研究 [J]. 中国核科技报告，1989 (00)：278-91.

ZHAO Jun，QIU Lyufu，ZHONG Xing，et al. Preparation of uranium dioxide by fluidized bed decomposition and reduction of uranyl ammonium tricarbonate [J]. China Nuclear Science and Technology Report，1989 (00)：278-91.

[67]赵珺，辛振林，张小岗，等. 多孔挡板流化床还原 UO_3 反应器模型的研究 [J]. 核科学与工程，1992，(01)：56-65，7.

ZHAO Jun，XIN Zhenlin，ZHANG Xiaogang，et al. Study on the model of porous baffle

fluidized bed reduction of UO3 reactor [J]. Nuclear Science and Engineering, 1992, (1): 56-65, 7.

[68]谷涛, 慕旭宏, 李军. 磁稳定流化床的床层特性分析及其应用研究 [J]. 石油与天然气化工, 2005 (3): 156-60+45.

GU Tao, MU Xuhong, LI Jun. Study on bed characteristics of magnetically stabilized fluidized bed and its application [J]. Chemical Industry of Oil & Gas, 2005 (3): 156-60, 45.

[69]文艳, 向兰, 金涌. 碳化法制备片状碳酸钙的研究 [J]. 无机材料学报, 2002 (6): 1315-20.

WEN Yan, XIANG Lan, JIN Yong. Preparation of flake calcium carbonate by carbonization [J]. Journal of Inorganic Materials, 2002 (6): 1315-20.

[70]崔爱莉, 王亭杰, 林玉兰, 等. 超细碳酸钙的合成与形状控制 [J]. 化工冶金, 1998, (4): 6-10.

CUI Aili, WANG Tingjie, LIN Yulan, et al. Synthesis and shape control of ultrafine calcium carbonate [J]. Chemical Metallurgy, 1998 (4): 6-10.

[71]向兰, 向英, 袁红霞, 等. 碳化法制备超细球形碳酸钙初探 [J]. 过程工程学报, 2002 (1): 50-4.

XIANG LAN, XIANG Ying, YUAN Hongxia, et al. Preliminary study on preparation of superfine spherical calcium carbonate by carbonization [J]. Process Engineering Journal, 2002 (1): 50-4.

[72]盖国胜, 杜林虎, 金涌. 高温流态化技术在精细陶瓷粉体制备中的应用 [J]. 现代技术陶瓷, 1995 (2): 26-9.

GAI Guosheng, DU Linhu, JIN Yong. Application of high temperature fluidization technology in the preparation of fine Ceramic powders [J]. Modern Technical Ceramics, 1995 (2): 26-9.

[73]胡平, 盖国胜, 金涌. New Process of Fine Grinding-activation of Heavy CaCO3 and Its Application to PVC Rigid Sheet [J]. 清华大学学报: 自然科学英文版, 1997 (4).

HU Ping, GAI Guosheng, JIN Yong. New Process of Fine Grinding-activation of Heavy CaCO3 and Its Application to PVC Rigid Sheet [J]. Journal of Tsinghua University: Natural Science, 1997 (4).

[74]吴昌宁, 颜彬航, 章莉, et al. 热等离子体裂解煤一步法制乙炔关键技术及过程经济性分析 [J]. 化工学报, 2010, 61 (7): 1636-44.

WU Changning, YAN Binhang, ZHANG Li, et al. Key technology and process economic analysis of acetylene by hot plasma cracking coal [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2010, 61 (7): 1636-44.

[75]程炎, 李天阳, 金涌, 等. 热等离子体超高温化学转化的过程研发和应用进展 [J]. 化工进展, 2016, 35 (6): 1676-86.

CHENG Yan, LI Tianyang, JIN Yong, et al. Development and application of chemical

transformation process of hot plasma at ultra-high temperature [J]. Chemical Industry Progress, 2016, 35 (6) : 1676-86.

[76]程炎，颜彬航，李天阳，等. 煤/煤焦油/沥青质的热等离子体裂解特性比较分析 [J]. 化工学报，2015，66 (8) : 3210-7.

Cheng Yan, Yan Binhang, LI Tianyang, et al. Comparative analysis of pyrolysis characteristics of coal/coal tar/asphaltene by thermal plasma [J]. Acta Chimica Sinica, 2015, 66 (8) : 3210-7.

[77] YAN Binhang, CHENG Yan, CHENG Yi. Particle-scale modeling of coal devolatilization behaviors for coal pyrolysis in thermal plasma reactors [J]. AIChE J, 2015, 61 (3) : 913-21.

[78] XU Pengcheng, JIN Yong, CHENG Yi. Thermodynamic Analysis of the Gasification of Municipal Solid Waste [J]. Engineering, 2017, 3 (3) : 416-22.

[79] LU Wei, CAO Tengfei, WANG Qi, et al. Plasma-Assisted Synthesis of Chlorinated Polyvinyl Chloride (CPVC) Using a Gas - Solid Contacting Process [J]. Plasma Processes and Polymers, 2011, 8 (2) : 94-9.

[80] 王洋. 加压灰熔聚流化床粉煤气化技术的研究与开发 [J]. 山西化工，2002，(3) : 4-7.

WANG Yang. Research and development of fluidized bed pulverized coal gasification technology for pressurized ash fusion [J]. Shanxi Chemical Industry, 2002, (3) : 4-7.

[81] 张海生，王洋. 煤灰熔聚气化过程的研究 [J]. 煤炭化工设计，1986 (4) : 17-23.

ZHANG Haisheng, WANG Yang. Study on gasification process of coal ash [J]. Coal Chemical Industry Design, 1986 (4) : 17-23.

[82] 陈清如，杨毅，钱积才，et al. 50t / h 空气重介流化床干法选煤工业性试验 [J]. 煤炭加工与综合利用，1994 (5) : 25-8.

CHEN Qingru, YANG Yi, QIAN Jicai, et al. Industrial test of coal preparation by air heavy medium fluidized bed [J]. Coal processing and comprehensive utilization, 1994 (5) : 25-8.

[83] YERUSHALMI J, TURNER D H, SQUIRES A M. The Fast Fluidized Bed [J]. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, 1976, 15 (1) : 47-53.

[84] YERUSHALMI J, CANKURT N T. Further studies of the regimes of fluidization [J]. Powder Technol, 1979, 24 (2) : 187-205.

[85] AVIDAN A, YERUSHALMI J. Bed expansion in high velocity fluidization [J]. Powder Technol, 1982, 32 (2) : 223 - 32.

[86] 柴玉田. 中国流态化学科研究的开拓者 - 记化学工程学家、工程院院士郭慕孙 [J]. 化工管理，2004，(7) : 66 - 71.

CHAI Yutian. Guo Musun, a chemical engineer and academician of Chinese Academy of Engineering, a pioneer in the study of fluidization in China [J]. Chemical Engineering Management, 2004, (7) : 66 -- 71.

[87] 许友好，汪燮卿. 石油重质烃高效利用的 IHCC 工艺理论基础与工业实践 [J]. 石油学报（石油加工），2017，33（3）：395-402.

XU Youyou, WANG Xieqing. Theoretical basis and industrial practice of IHCC technology for efficient utilization of petroleum heavy hydrocarbons [J]. Acta Petrolei Sinica （Petroleum Processing），2017，33（3）：395-402.

[88] 高金森，王刚，卢春喜，等. 重油催化裂化反应工艺技术创新 [J]. 中国石油大学学报（自然科学版），2013，37（05）：181-5.

GAO Jinsen, WANG Gang, LU Chunxi, et al. Technological innovation of heavy oil catalytic cracking reaction [J]. Journal of China University of Petroleum （Edition of Natural Science），2013，37（5）：181-5.

[89] 蒋旭光，池涌，严建华，等. 75t/h 洗煤泥循环流化床锅炉的设计与点火运行 [J]. 热力发电，1999，（5）：61.

JIANG Xuguang, CHI Yong, YAN Jianhua, et al. Design and ignition operation of 75t/h coal slime washing circulating fluidized bed Boiler [J]. Thermal Power Generation, 1999, （5）：61.

[90] 程乐鸣，许霖杰，夏云飞，等. 600MW 超临界循环流化床锅炉关键问题研究 [J]. 中国电机工程学报，2015，35（21）：5520-32.

CHENG Leming, XU Linjie, XIA Yunfei, et al. Research on Key Problems of 600MW supercritical Circulating fluidized Bed Boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35（21）：5520-32.

[91] YUE Guangxi, CAI Runxia, LYU Junfu, et al. From a CFB reactor to a CFB boiler – The review of R&D progress of CFB coal combustion technology in China [J]. Powder Technol, 2017, 316: 18-28.

[92] CAI Runxia, ZHANG Hai, ZHANG Man, et al. Development and application of the design principle of fluidization state specification in CFB coal combustion [J]. Fuel Process Technol, 2018, 174（2）：41-52.

[93] CAI Runxia, KE Xiwei, LYU Junfu, et al. Progress of circulating fluidized bed combustion technology in China: A review [J]. Clean Energy, 2017, 1（1）：36-49.

[94]王小芳，帅大平，吕清刚，等. 六回路环形炉膛循环流化床试验研究 [J]. 洁净煤技术，2015，21（2）：30-4.

WANG Xiaofang, SHUAI Daping, LYU Qinggang, et al. Experimental Study on Circulating Fluidized Bed in a Six-loop Furnace [J]. Clean coal Technology, 2015,21（2）:30-4.

[95] WU Changning, CHENG Yi. Downer Reactors [M]//GRACE J R, BI Xiaotao, ELLIS N. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstr. Weinheim, Germany. 2020: 499-530.

[96] WANG Zhanwen, BAI Dingrong, JIN Yong. Hydrodynamics of Cocurrent Downflow Circulating Fluidized-Bed （CDCFB） [J]. Powder Technol, 1992,70（3）：271-5.

[97] BAI Dingrong, JIN Yong, YU Zhiqing, et al. The Axial Distribution of the Cross-

Sectionally Averaged Voidage in Fast Fluidized-Beds [J]. Powder Technol, 1992,71（1）: 51-8.

[98] 杨勇林，金涌，俞芷青，等. 气固并流下行快速流化床反应器颗粒运动规律的研究 [J]. 石油化工，1991（11）: 765-70.

YANG Yonglin, JIN Yong, YU Zhiqing, et al. Study on particle movement in gas-solid fluidized bed reactor [J]. Petrochemical Industry, 1991（11）: 765-70.

[99] 杨勇林，金涌，俞芷青,等. 低密度循环流化床局部颗粒速度的轴径向分布的研究 [J]. 高校化学工程学报，1991（2）: 122-8.

YANG Yonglin, JIN Yong, YU Zhiqing, et al. Study on axial and radial distribution of local particle velocity in a low density circulating fluidized bed [J]. Chemical Engineering Journal of Universities, 1991（2）: 122-8.

[100] YANG Yonglin, JIN yong, YU zhiqing et al. The particle velocity distribution in a riser of dilute circulating fluidized bed [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 1991（2）: 182-91.

[101] 魏飞，金涌，俞芷青. 流动方向对循环流化床中颗粒混合行为的影响 [J]. 化工冶金，1997,（2）: 34-41.

WEI Fei, JIN Yong, YU Zhiqing. Effect of flow direction on particle mixing behavior in circulating fluidized bed [J]. Chemical Metallurgy, 1997（2）: 34-41.

[102] LIU Huie, DENG Rensheng, GAO Lei, et al. Study on the FCC Process in a Novel Riser-Downer-Coupling Reactor （I）; Hydrodynamics and Mixing Behaviors [J]. Ind Eng Chem Res, 2005, 44: 733－41.

[103] DENG Rensheng, LIU Hhuie, GAO Lei, et al. Study on the FCC Process in a Novel Riser-Downer-Coupling Reactor （II）: Simulation and Hot Experiments [J]. Ind Eng Chem Res, 2005, 44: 1446－53.

[104] LIU Fei, WEI Fei, LI Gguoliang, et al. Study on the FCC Process of a Novel Riser-Downer Coupling Reactor （III）: Industrial Trial and CFD Modeling [J]. Ind Eng Chem Res, 2008, 47: 8582－7.

[105] 吴韬，周炜星，周志杰，等. 水煤浆气化过程研究及新喷嘴技术开发（下） [J]. 上海化工，1999（11）: 25-7.

WU Tao, ZHOU Weixing, ZHOU Zhijie, et al. Research on coal water slurry gasification process and development of new nozzle technology （Part 2） [J]. Shanghai Chemical Industry, 1999（11）: 25-7.

[106] 吴韬，周炜星，周志杰，等. 水煤浆气化过程研究及新喷嘴技术开发（上） [J]. 上海化工，1999（10）: 15-6, 27.

WU Tao, ZHOU Weixing, ZHOU Zhijie, et al. Research on coal water slurry gasification process and development of new nozzle technology [J]. Shanghai Chemical Industry, 1999（10）: 15-6, 27.

[107] 于广锁，龚欣，刘海峰，等. 多喷嘴对置式水煤浆气化技术 [J]. 现代化工，2004（10）：46-9.

YU Guangsuo, Gong Xin, LIU Haifeng, et al. Multi-nozzle opposite coal water slurry gasification technology [J]. Modern Chemical Industry, 2004（10）: 46-9.

[108] TIAN Peng, WEI Yingxu, YE Mao, et al. Methanol to olefins （MTO）: From fundamentals to commercialization [J]. ACS Catalysis, 2015, 5（3）: 1922-38.

[109] LU Bona, ZHANG Jingyuan, LUO Hao, et al. Numerical simulation of scale-up effects of methanol-to-olefins fluidized bed reactors [J]. Chem Eng Sci, 2017, 171: 244-55.

[110] 王宏梅，王挥道，宋文龙，等. 多段流化床强化甲醇或烷烃芳构化研究进展 [J]. 化工学报，2021，72（12）:6002-15.

WANG Hongmei, WANG Huaqiu, SONG Wenlong, et al. Research progress in strengthening the aromatization of methanol and alkanes by multi-stage fluidized bed [J]. Chin J Chem Technol, 2021, 72（12）: 6002-15.

[111] 郑妍妍，唐强，王铁峰，等. 聚甲氧基二甲醚的研究进展及前景 [J]. 化工进展，2016，35（8）：2412-9.

ZHENG Yanyan, Tang Qiang, Wang Tiefeng, et al. Research progress and prospect of polymethoxy-dimethyl ether [J]. Chemical Industry Progress, 2016, 35（8）: 2412-9.

[112] 骞伟中，柯长颢，方晓明，等. 高纯度苯胺的大工业制备技术 [J]. 现代化工，2005,（10）：54-8.

QIAN Weizhong, KE Changhao, FANG Xiaoming, et al. Preparation of high purity aniline by chemical technology [J]. Modern Chemical Industry, 2005,（10）: 54-8.

[113] 汪智国，景山，魏飞. 硝基苯在湍动流化床加氢制取苯胺 [J]. 化学反应工程与工艺，2001，（3）：278-81.

WANG Zhiguo, JING Shan, WEI Fei. Preparation of aniline from nitrobenzene by turbulent fluidized bed hydrogenation [J]. Chemical Reaction Engineering & Technology, 2001, （3）: 278-81. （in Chinese）

[114] 王垚，金涌，魏飞，等. 纳米级 SiO_2 颗粒流化床的塌落行为 [J]. 化工学报，2001,（11）：957-62.

WANG Yao, JIN Yong, WEI Fei, et al. Collapse behavior of nano-sized SiO_2 particles in fluidized bed [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2001,（11）: 957-62.

[115] WANG Yao, Gu Guangsheng, WEI Fei, et al. Fluidization and agglomerate structure of SiO2 nanoparticles [J]. Powder Technol, 2002, 124（1/2）:152-9.

[116] GELDART D. Types of gas fluidization [J]. Powder Technol, 1973,7（5）: 285-92.

[117] 肖哲熙，鲁峰，林贤清，等. 气固流化床硅氧碳负极材料的宏量制备 [J]. 储能科学与技术，2022，11（6）:1739-48.

XIAO Zhexi, LU Feng, LIN Xianqing, et al. Macropreparation of silico-oxo-carbon anode materials in gas-solid fluidized bed [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022,

11（6）:1739-48.

[118] 张强，黄佳琦，赵梦强，等. 碳纳米管的宏量制备及产业化 [J]. 中国科学:化学，2013，43（6）：641-66.

ZHANG Qiang，HUANG Jiaqi，ZHAO Mengqiang，et al. Macropreparation and industrialization of carbon nanotubes [J]. Science in China: Chemistry，2013，43（06）：641-66.

[119] 李润，石晓飞，姜沁源，等. 超长碳纳米管的结构调控与制备：进展与挑战） [J]. 化学通报，2020，83（7）:588－99.

LI Run，SHI Xiaofei，JIANG Qinyuan，et al. Structural regulation and preparation of ultra-long carbon nanotubes: progress and challenges. Chinese Chemical Bulletin，2020，83（7）：588-99.

[120] 骞伟中，魏飞，王垚，等. 多段流化床技术用于多相催化与纳米材料合成过程 [J]. 化工学报，2010，61（9）：2186-91.

QIAN weizhong，WEI Fei ，WANGyao，et al. The multistage fluidized bed technology used in heterogeneous catalysis and nanomaterial synthesis process [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering，2010，61（9）：2186-91.

[121] 崔超婕，田佳瑞，杨周飞，等. 石墨烯在锂离子电池和超级电容器中的应用展望 [J]. 材料工程，2019，47（5）：1-9.

CUI Chaojie，TIAN Jiarui，YANG Zhou Fei，et al. Prospect of graphene application in lithium-ion batteries and supercapacitors [J]. Journal of Materials Engineering，2019，47（5）：1-9.

[122] 魏少鑫，金鹰，王瑾，等. 电池型电容器技术发展趋势展望 [J]. 发电技术，2022，43（5）：748-59.

WEI Shaoxin，JIN Ying，WANG Jin，et al. Development Trend of Battery Capacitor Technology [J]. Power Generation Technology，2022，43（5）：748-59.

[123] 谢青，田佳瑞，何宫樊，等. 石墨烯-碳纳米管杂化物在超级电容器中的应用 [J]. 储能科学与技术，2016，5（6）：861-8.

XIE Qing，TIAN Jiarui，HE Gongfan，et al. Application of graphene-carbon nanotube compounds in supercapacitors [J]. Energy Storage Science and Technology，2016，5（6）：861-8.

[124] 朱庆山，李洪钟，邹正. 气固流化床颗粒停留时间调控理论及应用 [M]. 北京：化学工业出版社，2020.

ZHU Qingshan，LI Hongzhong，ZOU Zheng. Theory and Application of particle residence time Control in Gas-solid Fluidized Bed [M]. Beijing: Chemical Industry Press，2020.

[125] 刘梦溪，卢春喜，王祝安. 流态化技术在化工过程中的应用 [M]. 北京：化学工业出版社，2022.

LIU Mengxi，LU Chunxi，WANG Zhuan. Application of fluidization Technology in Chemical process [M]. Beijing: Chemical Industry Press，2022.

[126] ZHANG Chenxi, LI Peilong, LEI Chao, et al. Experimental study of non-uniform bubble growth in deep fluidized beds [J]. Chem Eng Sci, 2018, 176: 515-23.

[127] LU Feng, ZHANG Chenxi, WEI Fei. Compressibility of granular fluids [J]. Phys Fluids, 2022, 34 (3).

[128]LU Feng, ZHANG Chenxi, WANG Yao, et al. Phase coexistence in fluidization [J]. AIChE J, 2021, 68 (2).

[129] FU Liangliang, BAI Haolong, BAI Dingrong, et al. Hydrodynamics of gas-solid fluidization at ultra-high temperatures [J]. Powder Technol, 2022, 406: 117552.

[130]姚建中，郭慕孙. 煤炭拔头提取液体燃料新工艺 [J]. 化学进展，1995 (3)：205-8.

YAO Jianzhong, GUO Musun. A new process for extracting liquid fuel from coal [J]. Chemical Progress, 1995 (3): 205-8.

[131] FU Liangliang, YUE Junrong, LIU Wenjin, et al. Analysis and experiment of sintering and densification of magnesia particles [J]. Chemical Engineering Science 2023, 268: 118396.

砥砺前行四十载 逐梦星辰向未来

颗粒测试专业委员会

四十年光阴荏苒，四十年春华秋实。今年，我们满怀喜悦与自豪，共同庆祝中国颗粒学会成立四十周年。作为中国颗粒学会最早成立的专委会之一，四十年来，中国颗粒学会颗粒测试专业委员会为促进颗粒测试技术和测试仪器行业的蓬勃发展做出了卓越贡献，也为我国经济社会的发展和科学技术的进步做出了巨大努力。

1 起步与攻关

1983 年 5 月在成都召开“全国粒度和孔径测试会议”，是首届全国性颗粒测试学术会议，会议由胡荣泽、李宣文、刘希尧、张瑞福、鲍宽卓等人发起，由成都冶金局、成都粉末冶金厂承办。在本次会议上，相关专家、学者认为作为一门交叉技术的科学，颗粒技术涉及到很多学科领域，但又无法完全被某个已有的学科领域所涵盖，所以有必要组织一个颗粒学方面的学术组织，开始探讨成立“中国颗粒学会”的可能性。会议决定成立全国颗粒测试常设机构，由胡荣泽负责，并确定中南工业大学李永胜为秘书。之后该常设机构联合流态化全国常设机构成立中国颗粒学会筹备组，郭慕孙担任组长，胡荣泽担任秘书长。

中国颗粒学会成立之前，由筹备组组织或参加，召开了多次学术会议。1984 年“第三届全国流态化会议”在太原召开。同年 7 月，在太原召开了微孔讨论学习班，由太原新华化工厂、山西煤化所承办。1985 年 9 月，在湖南汉寿举办“粒度分析提高班”，由中南工业大学承办。同时，全国颗粒测试常设机构参与了相关测量仪器的鉴定工作。1983 年 11 月参与丹东仪表研究所的沉降粒度仪鉴定；1984 年 4 月在湖南仪器仪表总厂（湖南洪江）组织了颗粒计数器等仪器鉴定。

1986 年 9 月 18 日中国颗粒学会经民政部及中国科学技术协会批准成立。1986 年 11 月 27 日，“中国颗粒学会成立大会及中国颗粒学会第一届全国会员代表大会”在北京召开，会上成立了首批 4 个专业委员会。分别是颗粒测试专业委员会、颗粒制备与处理专业委员会、流态化专业委员会、气溶胶专业委员会。

我国颗粒测试仪器的研究可追溯至 1965 年成立的第一机械工业部丹东仪表研究所。

但直到上世纪八十年代，国内才有少数几家公司生产销售沉降式粒度仪，技术水平与当时的国外产品比较差距很大。随着工业生产和科学研究的迅速发展，人们对颗粒特性中的粒度、粒形、表面积、孔径等级和性能提出了更高的测量要求。国外一些颗粒仪器公司较早注意到这个趋势，在二十世纪八十年代进入中国市场，如日本清新公司的离心沉降仪在国内许多企业得到应用，成为当时中国市场上最主要的颗粒粒度表征仪器。后来的英国马尔文公司等外国公司则在中国大力推广激光粒度仪，由于激光粒度仪具有动态范围宽、测试速度快、操作简便等特点逐步取代了沉降仪，并占据了国内绝大部分的粒度仪市场。

面对行业发展严峻形势，以胡荣泽教授为代表的老一辈科学家开始了颗粒测试技术的研究和搭建行业学术交流平台工作。从 1983 年第一次全国颗粒测试学术会议的召开，到 1986 年中国颗粒学会及颗粒测试专业委员会的组建，标志着中国颗粒测试技术研究及推动测试仪器行业发展工作正式拉开了序幕。

此后，天津大学、上海机械学院（现上海理工大学）、丹东仪表研究所、山东建材学院（现济南大学）、华南师范大学、重庆大学等一批大学和科研院所纷纷投入技术力量，开展了激光粒度仪的系统研究，从基础理论、测量技术、测量元器件研发等入手，先后突破了反演算法技术、半圆环多元光电探测器制作技术、大口径傅里叶透镜制作技术等关键技术，为基于衍射理论的激光粒度仪的研制成功与产业化打下了坚实的基础。自上世纪九十年代初开始，中国先后涌现出了多家专业的颗粒测试仪器公司，开始了中国颗粒仪器产业化的创业历程，取得了世界瞩目的成就。

2 引领与服务

自成立以来，颗粒测试专业委员会聚焦于颗粒测试理论、技术、方法研讨与实践应用。到 2025 年，颗粒测试专业委员会已组织召开了十五届全国颗粒测试会议，并开展颗粒测试仪器开发与应用培训、量值比对和相关标准制定工作，针对颗粒测试中的问题组织技术交流，努力培育国内颗粒测试品牌企业，开展技术创新工作，促进颗粒测试在交叉学科中的应用。

1）实现理论研究与学术突破

颗粒测试专业委员会组织高校、科研院所及仪器制造企业等开展了广泛的学术交流，在颗粒测量理论、测试方法、校准规范和技术研究取得突破。四十年来天津大学、上海理工大学、华南师范大学、国家纳米科学中心、上海计量测试研究院、北京市理化分析

测试中心、中国计量科学研究院等一批研究机构，先后在光散射理论、光散射颗粒测量方法、超声颗粒测量理论和方法、多波长消光法、光脉动测量方法、光阻法、动态光散射方法等的研究中取得许多成果，部分研究成果处于国际先进水平。在国际交流方面，国内研究院所与国外高校及仪器厂商积极开展合作交流，在深入开展理论研究、拓展测试应用领域方面取得了丰硕成果。

2）开展品牌特色学术交流，积极培养颗粒人才

四十年来，专委会将全国颗粒测试学术会议打造为品牌学术活动，到2025年，共召开了 15 届全国颗粒测试学术会议，会议紧密围绕当前经济发展情况下的科技进步开展研讨，会议主题包括工业过程颗粒测试、样品准备及分散技术研究、颗粒测试需求分析、微米、纳米颗粒测试理论及新进展、颗粒测试新技术、新方法及创新成果、颗粒关键参数的测试理论与验证、颗粒测试在交叉学科中的应用、颗粒标准化、颗粒特性与新材料、粒度比对及能力验证、颗粒比表面、孔径及Zeta电势的测试等关键科学与技术问题等展开。为鼓励和培养颗粒人才，尤其是青年科技人才和优秀学生，会议期间评选优秀报告和优秀学生报告、优秀墙报等活动，自第十一届全国颗粒测试学术会议以来，每届评选6～10个优秀报告，其中研究生报告占80%以上。设立颗粒测试奖，到2025年共评选4次颗粒测试奖，其中2019年评选一等奖2项、二等奖1项；2022年评选一等奖2项、二等奖1项；2023年评评选一等奖1项；2025年评选一等奖1项、二等奖3项。近5年来，向中国颗粒学会推荐申报中国颗粒学会自然科学奖、中国颗粒学会科技进步奖、中国颗粒学会青年颗粒学奖共12项，并获奖5项。同时，专委会还多次组织研讨会、交流会、培训班、讲习班等活动，这些活动为颗粒测试技术的推广应用、颗粒测试人才培养、颗粒测试仪器的市场推广搭建了公益平台，促进了行业技术交流活动，推动了颗粒测试技术的普及与发展。

3）促进技术与产业发展

在颗粒测试技术和应用方面，颗粒测试专业委员会主要成员单位珠海真理光学仪器有限公司、丹东百特仪器有限公司、济南微纳颗粒仪器股份有限公司、珠海欧美克仪器有限公司、成都精新粉体测试设备有限公司、澳谱特科技（上海）有限公司等国内著名仪器厂商以创新发展和服务社会为理念和宗旨，实现了规模化发展和技术创新，产品由单一到系列化、由自动化到智能化取得了质的飞跃，由国内发展到国际化，在国内诸多用户和国外得到了高度评价。经过近四十年的发展，国产颗粒测试仪器的研发和制造取得了可喜成果。国产颗粒测试仪器在国内市场占有率上已从八十年代基本为零逐渐发展

到目前的约占 80%以上的市场份额，结束了进口粒度仪在中国市场一统天下的局面，并拥有一大批自主知识产权的颗粒测试技术，培养了一批又一批高精尖专业技术人才。仪器种类也不断增加，目前已达近百种，应用范围也扩大到许多新兴行业和领域，更可喜的是中国激光颗粒测试仪器已批量出口到国际市场。

4）推动产学研合作，促进仪器市场有序发展

四十年来，颗粒测试专业委员会坚持推动中国颗粒测试技术发展，在开展学术交流活动的同时，鼓励、支持、协助从事颗粒测试仪器制造的企业以世界先进水平为目标，通过学术交流和技术交流，广泛协调仪器厂商产能和用户需求，推动中国颗粒测试仪器市场健康发展，促进中国颗粒测试仪器达到世界先进水平。在产业化的基础上，本专委会还鼓励、支持、协助企业与大学合作，促成了天津大学、上海理工大学、华南师范大学等高等院校与企业的合作，为中国颗粒测试技术与仪器达到世界先进水平奠定了更加坚实的基础。

5）开展行业比对工作

为进一步提高国内颗粒粒度测量仪器的性能，规范粒度测量方法，早在 1993 年中国颗粒学会颗粒测试专业委员会就开展了颗粒测量仪器比对工作，参加比对工作的国内外仪器公司和用户逐年增加。该工作对国内颗粒测量仪器质量、性能和技术水平的提高起了积极的促进作用。

6）制定相关标准

颗粒测试专业委员会及成员积极参与颗粒标准的制定工作，颗粒表征与分捡及筛分标准化技术委员会（SAC/TC168）以及颗粒分技术委员会（SAC/TC168/SC1）、全国纳米技术标准化技术委员会（SAC/TC229）等标准化组织，颗粒测试专业委员会成员有 10 人以上担任过标准化技术委员会的副主任及委员等职务。参与制定了多个涉及颗粒测试的国家标准和国际标准，并积极参与了 ISO 颗粒标准化委员会的工作。

7）研制标准物质

在标准物质研究取得新进展。颗粒测试仪器的优劣需要通过标准颗粒物检定。四十年来颗粒测试专业委员会积极组织和参与标准物质的研制工作，国内颗粒度标准物质的研究和生产从无到有、从单一品种到系列品种，开发出不同材质的标准颗粒物，现在已经能够根据各领域的不同需要。目前中国计量科学研究院、北京海岸鸿蒙标准物质技术有限公司、北京纳微标物科技有限公司等单位已经拥有从纳米到微米的、种类齐全、不同用途的国家一级和二级标准颗粒物质的标准颗粒物体系。

3 成果与贡献

通过组织学术和技术交流，促进了颗粒测试技术在不断进步，国产化颗粒测试仪器的性能在不断提高，应用领域不断扩展，颗粒测试行业在不断发展壮大。除了激光粒度仪、纳米粒度仪和颗粒计数器等常规的颗粒测试仪器外，许多其他测试技术如图像法、彩虹散射、干涉粒子成像、数字全息、超声散射等都得到了深入研究和快速发展。此外，随着测试技术的不断进步，测试标准物质和测试方法的标准化工作有序推进，并取得丰硕成果。

回首四十载征程，我们不仅见证了颗粒测试技术及产业的蓬勃发展，更亲历了颗粒测试技术在推动国家科技进步与经济社会发展的光辉历程。四十年间，颗粒测试技术经历了从宏观到微观、从实验室到现场在线、从单一参数到多维度融合、从人工操作到智能分析的革命性飞跃。中国颗粒仪器产业也经历了从无到有、由小到大，由弱变强的四十年。如今，国产激光粒度仪、纳米粒度仪等已占据国内市场主导地位，并成功进军国际市场，实现了从“跟跑”到“并跑”乃至在某些领域的“领跑”。颗粒测试技术与产品有力支撑了新能源、新材料、生物医药等战略性新兴产业，大力推动了建材与冶金、化工与颜料等传统产业的升级，更重要的是在环境监测、食品安全等方面守护了国家生态环境与公共安全。

感谢中国颗粒学会对颗粒测试专委会工作的指导和帮助！感谢为中国颗粒学会颗粒测试专委会做出贡献的专家学者、科研人员、企业家及生产、应用领域的广大一线工作者。四十年是一个里程碑，更是一个新起点。面向未来，颗粒测试专委会将聚焦数字化、智能化、精细化、标准化的发展方向，为国家经济社会的高质量发展再续辉煌！

历届专委会会议简介



1983 年 5 月在成都召开“全国粒度和孔径测试会议”。会议由胡荣泽、李宣文、刘希尧、张瑞福、鲍宽卓等人发起，由成都冶金局、成都粉末冶金厂承办。会议决定成立全国颗粒测试常设机构，由胡荣泽负责，并确定中南工业大学李永胜为秘书。之后该常设机构联合流态化全国常设机构成立中国颗粒学会筹备组，郭慕孙担任组长，胡荣泽担任秘书长。



1984 年 7 月，中国颗粒学会微孔讨论学习班在太原召开



1991 年 9 月中国颗粒学会测试专业委员会第三届年会在黄山召开



1992 年 4 月，颗粒测试专委会举办的青岛颗粒测试技术研讨会与会人员合影



1993 年山东建筑材料工业学院图书馆内举办中国首届颗粒仪器展览会，主办单位山东颗粒学会测试专业委员会、国家标准物质中心、上海测试所、天元颗粒公司，山东建材学院。主要参加人有胡荣泽、王庚辰、顾雪梅、薛祥立、任中京、张福根、董青云等。左图为山东建材学院任中京、曹杰，淄博分析仪器厂吴元海、王工程师合影。



1994 年全国颗粒测试技术研讨会开幕式。主席台上的是林迪生院长、万起鹏副院长、山东省科委领导、山东建材局局领导以及胡荣泽、王庚辰、金翠霞、黄金公司刘工。任中京主持开幕式。台下有罗玉长、张福根、潘孝良、陈绍龙、高名顺、丁建平、王乃宁等。



1995 年第四届全国颗粒测试学术会议暨第三届全国超微颗粒学术讨论会在珠海举办



1998 年由颗粒测试专业委员会主办、山东建材学院承办的颗粒测试学习班主讲教师与学员合影。主讲教师胡荣泽、王乃宁、王庚辰、陈诵英。



2000 年 6 月，在泰安举行的首届新世纪颗粒测试技术讲习班合影



2001 年 9 月 21 日，在丹东举行的第五届全国颗粒测试学术会议全体代表合影



2006 年 8 月，首届全国粒度仪量值比对会议



2008 年第七届全国颗粒测试学术会议暨 2008 年上海颗粒学会年会会场



2009 年 6 月，第二届全国粒度仪量值比对总结大会



2010 年 8 月，中国颗粒学会第七届学术年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会



2013 年颗粒测试与表征技术培训班（上海）



2015 年 9 月第十届全国颗粒测试学术会议在丹东召开



2017 年 11 月第十一届全国颗粒测试学术会议在广州召开



2018 年第十六届中国国际粉体展期间的颗粒测试与表征技术培训班



2019 年 11 月第十二届全国颗粒测试学术会议在杭州召开



2020 年第十七届参加中国国际粉体展及颗粒测试与表征技术培训班人员合影



2020 年中国颗粒学会第十一届学术年会在厦门举行



2021 年 9 月全国颗粒测试学术会议在滨海新区召开



2023 年 11 月第十四届全国颗粒测试学术会议在临沂召开



2025 年第十五届全国颗粒测试学术会议暨 2025 全国粉体测试技术应用研讨会、中国颗粒学会颗粒测试专业委员会成立四十周年学术研讨会在佛山召开，图为全体与会人员合影

有幸与中国颗粒学会颗粒制备与处理专业委员会结缘

颜富士
中国台湾成功大学

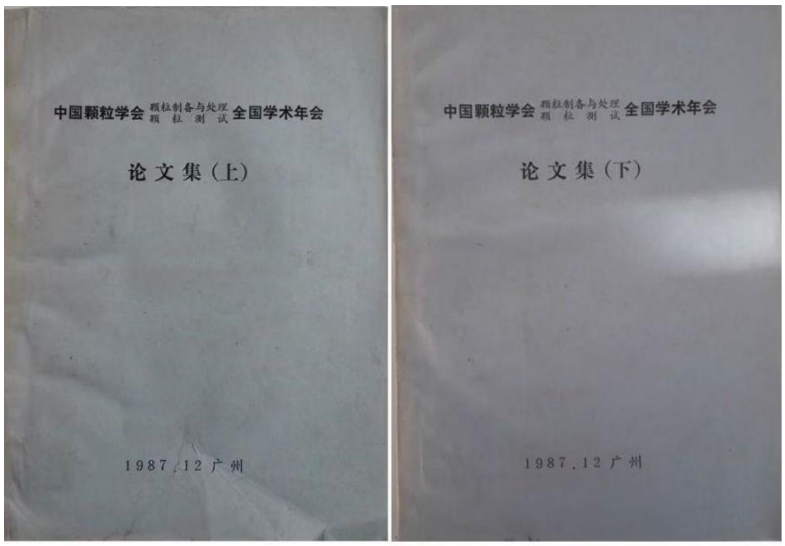
恭喜！中国颗粒学会建会四十周年。1986 年 11 月 27 日中国颗粒学会在北京成立大会时，同时成立了 4 个专业委员会。颗粒制备与处理专业委员会即是 4 个专业委员会中的 1 个。今年成立满四十周年了。恭喜！（其他 3 个专业委员会为：颗粒测试专业委员会、流态化专业委员会及气溶胶专业委员会。）

专业委员会的第一次学术研讨会或年会是 1987 年 12 月在广州召开。学术委员会主席卢寿慈教授。这一年 1987 年在中国近代史也是重要的一年。因为 11 月 2 日两岸开放探亲。当时我 45 岁。因有机会参加中国台湾地区进口矿业产品流向调查，必须往祖国大陆跑，也因此有机会参加当时祖国大陆每年举办的全国矿物科学与工程学术会议。而得知中国颗粒学会的成立。经好友蔡敏行教授介绍认识他的好友卢寿慈教授，得以与颗粒制备与处理专业委员会结缘。1999 年珠海第 1 次与新朋友相会。2000 年在北京见到郭慕孙院士。

2004 年是我参加专业委员会跑祖国大陆最勤快的一年。学会决定 6 月 8—11 日到中国台湾开年会。报名参加的有 30 多位朋友，变成到台湾旅行。后来因部分同行人员不符合当时赴中国台湾的通行管理要求，最终实际成行的仅 10 人。当然年会开会时间只好延后，9 月才在烟台举行。结束后接着是 11 月的颗粒学会年会。我记得最后 11 月的会我是在收件截止日期才收到通知。麻烦徐政教授帮忙请大会把我排进论文发表名单，且留了间客房。记得当年大会设在杭州玉泉饭店。我发表的论文是《由 Gibbsite 不易获得奈米级α氧化铝粉末的原因》。后来我把论文改写，2009 年发表在 *J. American Ceramic Society*（92 9 3089-3092 2009）。

从 2000 年开始每年研讨会，我的实验室都会有学生参加。学生参加研讨会的动机除发表论文、 旅游、认识新朋友外，尤其重要的是透过研讨会吸收上课无法吸收到的多元知识。对学校课堂强调的粉粒体的生（生成）、老（教育、改质）、病（功能衰退）、死（功能消失）概念，也因研讨会每每安排不同形式且较口语化的理论与技术说明演讲，由粉

末制备、分级、分散、与表面改性处理，而至用途应用及应用面的单元操作技术，与不同领域朋友接触学习而得融会贯通，受益良多。这些人现在都成为中国台湾工业界栋梁。而每次与会，当我听到学生说上午听到某老师作什么研究，下午想去听哪位同学报告什么等，欣慰内心也不由得感觉我讲课功力显然须作好好改进。感谢！这么多年来，我及年轻学生因参加研讨会受益良多。我是 2024 年 10 月参加在苏州举办的第 13 届中国颗粒大会才再与好朋友相聚。不过也发现有多位好朋友已因退休，没能见面，应是功成身退。回想 1999 年起与专业委员会结缘，受其恩惠，至今年（2026 年）能再参加中国颗粒学会举办的四十周年大会，欢欣之外。也祝下一个四十年学会在各方面更益壮大，培养更多社会英才。也祝诸好友退休后身体健康，幸福美满。



1987 年，全国颗粒制备与处理及测试学术年会会议论文集，广州



1999 年， 颗粒技术研讨会上卢寿慈老师与徐政老师，珠海



2000 年，第六届全国颗粒制备与处理学术会议，北京



2004 年，第一届海峡两岸粉体制备技术研讨会，台北



2007 年，第八届全国颗粒制备与处理学术和应用研讨会，银川



2009 年，第九届全国颗粒制备与处理学术研讨会，威海



2011 年，第十届全国颗粒制备与处理学术研讨会，昆明



2015 年，第十二届全国颗粒制备与处理学术研讨会，合肥



2017 年，第十三届全国颗粒制备与处理学术研讨会，武汉



2019 年，第十四届全国颗粒制备与处理学术研讨会，丹东



2026 年，第十六届全国颗粒制备与处理学术会议暨中国颗粒学会颗粒制备与处理专业委员会成立四十周年学术研讨会，宁波

气溶胶专业委员会发展历程

颜鹏[1]，张仁健[2]，武云飞[2]
1. 中国气象局气象探测中心；2. 中国科学院 大气物理研究所

1 组织起源与初创时期（1987—1999 年）：奠定基础，开启征程

经过长时间的筹备工作，1987 年 11 月，在北京中国建筑科学研究院空气调节研究所，中国颗粒学会气溶胶专业委员会正式成立，同期举办了第一届全国气溶胶会议。这是一个具有里程碑意义的时刻，标志着我国气溶胶科学研究结束了分散状态，进入了有组织、系统化发展的新阶段。

初创时期的专委会领导团队汇聚了我国气溶胶领域的先驱者：苏维瀚研究员担任主任委员。王明星研究员担任中国颗粒学会副理事长。这一时期的会议规模相对较小，参会人数约 60 余人，但与会者的热情高涨，大家都为终于有了专门的气溶胶学术交流平台而感到振奋。1999 年王明星研究员担任气溶胶专委会主任委员。

首届会议重点聚焦洁净技术、无尘厂房等工业应用领域，反映了当时国家经济建设对气溶胶技术的迫切需求。随着专委会的发展，研究范围逐步拓展至大气气溶胶、生物气溶胶、放射性气溶胶等多个方向。气溶胶专委会积极倡导学科交流的国际化，1990 年的第三届全国气溶胶会议上，10 多位外国专家和 90 多位国内专家参会，并出版中英文论文集各一本，开始了气溶胶专委会学术活动的国际化。1999 年 11 月专委会在云南昆明举办亚洲气溶胶实验研究国际研讨会（ACE-Asia），共有 50 多名来自美、日、韩等国家的科学家以及 30 名国内科学家参会。这次会议上，张仁健副研究员被选为 ACE-Asia 研究计划中方联系人，开启了专委会深度参与国际合作的序幕。

这一时期的专委会工作虽然条件有限，但为国内气溶胶科技工作者搭建了不可或缺的交流平台，通过定期举办学术会议、出版论文集等方式，促进了学科交流，为后续的快速发展奠定了坚实基础。

2 快速发展与国际合作阶段（2000—2010 年）：开拓创新，走向世界

进入新世纪，随着我国经济快速发展和环境问题日益突出，气溶胶专业委员会进入了蓬勃发展的新阶段。张仁健等一批青年科学家加入领导团队，为专委会注入了新的活

力。2001 年 7 月，专委会组团参加在韩国釜山举行的第二届亚洲气溶胶会议，张仁健理事作了题为“Focus on Dust aerosol Researches in China”的大会特邀报告，本次会议来自中国大陆的 4 名科学家均来自气溶胶专委会，充分体现了专委会在国内气溶胶领域的代表性地位。

这一阶段的重要突破是建立了海峡两岸学术交流机制，开创两岸交流新篇章。2002 年，专委会组织了由张仁健副研究员、林秉乐研究员、石志侠研究员和清华大学叶遂生教授等 8 人代表团赴台北参加首届海峡两岸气溶胶技术研讨会，开启了两岸气溶胶科技工作者的正式交流。这次历史性的会议由中国台湾气溶胶研究学会主办，会议主席巢志成博士在邀请函中深情写道:“由于海峡两岸经济急速发展，造成大气中气溶胶污染十分严重，且气溶胶科技在工业卫生、材料合成等十分重要，藉由这个会议，两岸气溶胶研究学会可以交换彼此在气溶胶科技及污染控制方面的经验及知识，有助于两岸的学术交流”。此后，两岸轮流举办研讨会成为惯例，不仅促进学术交流，也为增进两岸科技界的相互了解和友谊做出了贡献。

这个时期，经过新一代科学家的不断努力，气溶胶专委会的国际影响力不断提升。曹军骥研究员在泰国曼谷举办的第六届亚洲气溶胶会议上荣获亚洲气溶胶研究青年科学家奖。2010 年，专委会成功在西安举办了 A&WMA 国际特别会议，吸引了来自 35 个国家的 450 余名学者参会，其中国外学者 180 余人。

特别值得骄傲的是，在 2009 年的亚洲气溶胶会议上，专委会成功获得了 2011 年第七届亚洲气溶胶会议的主办权，这是对中国气溶胶研究实力的充分肯定。这一时期，专委会还积极组织各种学术交流活动，如粤港澳城市群气候与环境研讨会（2008 年）等，国际影响力不断提升。

3 学术繁荣与创新突破阶段（2011—2019 年）：深耕细作，成效显著

2014 年，张仁健研究员担任气溶胶专业专委会主任委员。这一时期，随着 $PM_{2.5}$ 污染问题成为社会关注的焦点，气溶胶研究迎来了前所未有的发展机遇。专委会紧抓时代机遇，实现了从规模扩张到质量提升的重要转变。

学术会议体系日趋完善，形成了三大品牌系列：全国气溶胶会议、海峡两岸气溶胶技术研讨会、大气细及超细粒子技术研讨会。这些会议各有侧重，相互补充，满足了不同层次、不同方向的学术交流需求。其中，2011 年在西安举办的第七届亚洲气溶胶会议

规模空前，吸引了 20 多个国家的 550 余名学者参会，创下历届之最。

专委会在国际舞台上的话语权显著提升。曹军骥研究员在 2011—2014 年担任亚洲气溶胶研究会主席。曹军骥、张仁健、李顺诚、胡敏 4 位专家先后获得亚洲气溶胶学会 Fellow 奖。这期间蒋靖坤、要茂盛、何建辉、黄汝锦、王戎 5 位教授先后获得亚洲气溶胶研究青年科学家奖。

4 高质量发展与新挑战应对阶段（2020—2026 年）：与时俱进，面向未来

随着国家“双碳”战略的实施和新冠疫情的影响，专委会积极适应新形势，推动学科创新发展。2023 年在合肥举办的第十四届全国气溶胶会议以“双碳新形势下气溶胶科学所面临的机遇与挑战”为主题，反映了专委会对国家重大战略的积极响应。会议吸引了 400 余名学者参会，收到论文 240 余篇，体现了专委会持续的学术影响力。



海峡两岸交流在疫情期间依然保持活跃，通过线上、线下相结合的方式持续开展。2022 年 8 月，海峡两岸在亚洲气溶胶会议期间线上举办的“海峡两岸气溶胶科技发展交流会”，在进行学术交流的同时，对未来海峡气溶胶科技交流进行了规划。

学科交叉融合趋势更加明显。会议议题涵盖了气溶胶非均相化学、碳气溶胶、生物气溶胶、健康效应等多个方向，促进了气溶胶科学与气候变化、公共健康等领域的深度交叉。专委会还注重产学研结合，邀请企业代表参会，推动科技成果转化应用。

面对新的挑战，专委会展现了强大的适应能力和创新精神，通过改进会议形式、拓展研究领域、深化国际合作，保持了学术活动的活影响力。

5 成就与贡献：硕果累累，影响深远

经过四十年的发展，气溶胶专业委员会取得了令人瞩目的成就，建立了完整的气溶胶学科体系。从最初的洁净技术研究，发展到涵盖气溶胶物理化学特性、源解析技术、气候环境健康效应、污染控制技术等多个方向，为我国气溶胶科学发展和环境保护事业

做出了重要贡献。

学术建设方面，专委会构建了完善的学术交流体系，通过定期举办各类学术会议，为气溶胶研究者提供了宝贵的交流平台。特别是全国气溶胶会议从最初的 60 余人发展到 400 余人的规模，反映了专委会强大的号召力和学术影响力。专委会还通过组织专业培训、出版专刊及学术著作、推动制定气溶胶有关标准等方式，促进了学科知识的传播和普及。

人才培养是专委会的重要使命。通过设立会议优秀论文奖、举办青年论坛、组织专业培训等，同时组织气溶胶专委会会员积极申报学会奖项，推动培养了大批优秀青年科技人才。许多曾经参与专委会活动的青年学者，如今已成为气溶胶领域的学术带头人和骨干力量。

在国际合作方面，专委会成功举办了多项重大国际会议，与国际气溶胶学界建立了广泛联系，展现了中国气溶胶学术界的实力，提升了国际影响力。专委会成员在国际组织中的任职，也为中国学者参与国际学术事务创造了条件。

在社会服务方面，专委会积极参与国家环境治理工作，为 $PM_{2.5}$ 污染防治提供了科学支持。《$PM_{2.5}$ 与环境》等专著的出版，为政策制定和公众教育提供了重要参考。专委会还通过科普活动、技术咨询、标准制定等方式，服务于社会和产业发展。

海峡两岸交流是专委会工作的亮点之一。通过持续举办了海峡两岸气溶胶技术研讨会，促进了两岸科技界的交流合作，为增进两岸关系做出了积极贡献。这种交流不仅限于学术层面，还延伸到人才培养、项目合作等多个方面。

6 展望未来：任重道远，砥砺前行

站在新的历史起点上，气溶胶专业委员会将继续传承老一辈科学家的奉献精神，面对新的机遇和挑战，继续秉持“求实、创新、协作”的精神，在服务国家重大战略需求、推动学科创新发展、培养高水平科技人才、深化国际合作交流等方面发挥更大作用。具体在以下几个方面持续发力：

首先，要紧跟国际科技前沿，推动原创性突破。随着观测技术的进步和研究方法的创新，气溶胶研究正在向更精细、更深入的方向发展。专委会将鼓励会员开展创新性研究，推动我国气溶胶科学实现从跟跑到并跑再到领跑的转变。

其次，要深化多学科交叉，拓展新的增长点。气溶胶科学与气候变化、云物理、健

康效应等领域的交叉融合正在创造新的研究机遇。专委会将积极促进不同学科领域的交流合作，推动气溶胶科学的创新发展。

第三，要完善青年科学家培养体系。青年是学科发展的未来，专委会将继续通过奖项评选、学术交流、国际合作等方式，为青年学者的成长创造良好环境，培养具有国际视野的创新型人才。

第四， 要提升在国际气溶胶学界的影响力。专委会将积极地组织和参与国际学术活动，推动中国学者在国际组织中发挥更大作用，提升我国气溶胶研究的国际话语权。

最后，要更好服务于国家重大战略需求。围绕“双碳”目标、美丽中国建设等国家战略，专委会将组织科技攻关，为环境污染防治和绿色发展提供科技支撑。

四十年的发展历程证明，中国颗粒学会气溶胶专业委员会已成为推动我国气溶胶科学发展的重要力量。展望未来，专委会将继续团结广大气溶胶科技工作者，勇于创新，追求卓越，为建设科技强国和实现可持续发展做出新的更大贡献。

附录 1

全国气溶胶会议——历届会议

届次	时间	地点	参会人数
第一届	1987 年 11 月	北京	60
第二届	1988 年 10 月	北京	60
第三届	1990 年 9 月	北京	90
第四届	1992 年 9 月	安徽	100
第五届	1994 年 8 月	太原	60
第六届	1997 年 9 月	烟台	50
第七届	1999 年 9 月	西安	70
第八届	2005 年 11 月	南京	100
第九届	2007 年 1 月	广州	150
第十届	2009 年 7 月	长春	200
第十一届	2013 年 5 月	武汉	300
第十二届	2015 年 10 月	重庆	400
第十三届	2017 年 11 月	石家庄	250
第十四届	2023 年 10 月	合肥	400
第十五届	2025 年 10 月	杭州	300

超微颗粒专业委员会成立与发展

——跨越海峡，凝聚微观世界的光

林鸿明
中国台湾大同大学

身为中国颗粒学会超微颗粒专业委员会副主任委员，我回首这段跨越近 30 年的学术历程，心中始终充满感念与敬意。超微专委会的诞生与发展，不仅见证了颗粒与纳米科技的蓬勃进步，更承载着两岸学术交流由萌芽至深化的珍贵轨迹。当我回望这段近 30 年的岁月，许多画面仍历历在目，那不只是学术的轨迹，更是一段人与人相遇、相知、相互成就的故事。

纳米粉体技术，作为跨世纪兴起的新兴学科，从一开始就承载着时代的期待。在中国颗粒学会的支持下，1998 年 10 月，超微颗粒专业委员会正式成立。那一年，我们像是在未知的微观世界里点亮了一盏灯，微弱却坚定，照见未来的方向。

我个人的记忆，则从更早的那个夏天开始。1998 年 6 月，在瑞典斯德哥尔摩的 NANO’98 会议上，我与张立德教授初次相识。那是一场纯粹而热烈的学术相遇，彼此谈论着颗粒、纳米与未来科技的无限可能。短短几天，却彷佛为往后数十年的交流埋下伏笔。

同年 7 月，我前往清华大学访问，与大陆学界戴遐明教授促膝长谈。我们共同构想一个跨越海峡的学术平台，那不只是会议，而是一种连结，一种让彼此不再遥远的可能。于是，1999 年珠海的首次两岸大型研讨会应运而生，也让理想开始落地。图一是戴遐明教授、胡荣泽教授与我的第一次合影，留下历史片段。

学会成立初期，两岸互访与学术交流即已展现蓬勃生机，每一步都带着探索的勇气。1999 年戴遐明教授来到中国台湾大同大学交流，记得我们在校园里长时间讨论学术与未来的情景。那是一种没有距离的对话，也是一种彼此信任的开始。

足履山河，我们逐步构筑起一个宽松、开放的学术交流平台。自 1998 年首届年会以来，专委会即确立两年一度的年会机制，并配合总会活动灵活调整。从杭州西湖畔，到山城重庆；从南宁绿城，到武汉江城；再到包头、丹东（2011 年，图 2）、吉首（2013 年，图 3）、宁波（2015 年，图 4）与玉溪，学术交流的足迹遍布大江南北。桂林（2002 年）、

烟台（2004 年）、北京（2006 年）、上海（2008 年）、西安（2010 年）、合肥（2010 年、2015 年）、沈阳（2018 年）、宜昌（2019 年）等地的重要会议，不仅是研究成果的集中展示，更是跨地域、跨学科深度对话的重要场域。



图 1 自左而右，戴遐明教授、本人与胡荣泽教授合照于 1999 珠海海峡两岸暨海外华人颗粒技术研讨会



图 2 2011 年第七届海峡两岸超微颗粒学术研讨会（辽宁省丹东市）



图 3 2013 年第八届海峡两岸超微颗粒学术研讨会（湖南省湘西自治州吉首市）



图 4 2015 年第九届海峡两岸超微颗粒学术研讨会暨中国颗粒学会超微颗粒专委会年会（浙江省宁波市）

这些年来，我们走过许多地方。桂林的山水、烟台的海风、北京的厚重、上海的繁华、西安的历史、合肥的沉稳……，还有武汉、包头、丹东、吉首、宁波、玉溪，每一座城市，都留下了我们讨论与辩论的声音，也收藏了无数深夜仍不愿散去的交流时光。

我们努力打造一个开放的学术环境，让不同观点能够碰撞，让年轻学者敢于发声。学术，不该只是论文与数据，它也应该有温度，有对未知的好奇，有彼此激荡时的光。而在这一切之中，最让我珍视的，始终是两岸之间那个逐渐清晰的连结。

2005 年南宁会议，是一个重要的转折点。海峡两岸超微颗粒学术研讨会自此成为常态化的交流平台。我们不再只是偶然相聚，而是有了承诺、有了期待每隔一段时间，就会再次相见。

这段历程中，我个人亦深感荣幸，先后于 2006、2010、2014 年在中国台湾台北组织三届海峡两岸纳米材料技术研讨会，促进两岸学者面对面深入交流。那些日子里，来自

大陆的学者与中国台湾的同仁，坐在同一个会场里，专注地聆听、热烈地讨论。语言或许略有差异，但对科学的热情却完全一致。同时大陆学者多次赴台湾地区开展学术交流，包括 2015 年张立德教授与费广涛教授，皆为学术互动增添厚度。



图 5 中国台湾大同大学举办的 2006、2010、2014 年海峡两岸奈米材料技术研讨会

2015 年，张立德教授与费广涛教授来访台北，我们再次长谈。那已不只是学术交流，更像是老友重逢，并留下合影（图 6）。这些年来，我深深感受到，真正珍贵的，不只是研究成果的累积，而是彼此之间建立起的理解与情谊。这些频繁往来，不仅体现在论文与技术成果上，更在人与人之间累积出深厚的信任与友谊，让科学交流蕴含温度。



图 6 2015 年，张立德、费广涛两位教授赴中国台湾地区参与两岸联合举办的纳米技术学术会议

随着时间推进，研讨会逐渐制度化——武汉、丹东、吉首、宁波、玉溪、宜昌、……，一届届延续下来，就像一条不曾中断的线，把不同世代的两岸学者串联在一起。

我们也开始思考，学术的意义是否能走得更远。于是，从设立产业交流专场，到走进企业，再到 2017 年玉溪年会中，学术与产业报告的融合，我们尝试让研究真正走向应用。当科学家的视野遇见产业的需求，那是一种新的火花，也是一种责任的延伸。

2019 年是我参与学会学术交流整 20 年的里程碑，当年宜昌会议前夕，我站在长江之滨，心中有一种难以言喻的感动。这条江水奔流不息，就像我们的交流，一路走来，从未停歇。这次会议，张立德教授因身体不适，无法出席会议（图 7）。象征学会也转至新旧世代交替的时期，期望超微颗粒专委会能在新一代年轻人手上，再创辉煌。



图 7 2019 年第十一届海峡两岸奈米颗粒学术研讨会暨中国颗粒学会超微颗粒专委会年会（湖北省宜昌市）

2021 年，在全球环境剧变之下，我们通过在线方式连结台北与济南。虽然少了面对面的温度，却多了一份跨越距离的坚持。那一刻，我更加确信，真正重要的，不是形式，而是彼此仍愿意相聚的心。中国颗粒学会、超微颗粒专业委员会及相关海峡两岸学术交流会议之学术交流历程，整理成表 1，以给大家在回顾曾经走过的岁月时，多一点念想。

回顾这一切，我常觉得，超微颗粒专委会早已不只是学术组织。它像一座桥，横跨海峡，也跨越时间；它让我们在微小的颗粒世界中，看见广阔的人文情怀。纳米科技仍将不断向前，而我们，也会继续走在这条路上。或许仍有挑战，或许仍有未知，但只要这份对科学的热爱，以及彼此之间的信任仍在，我相信，我们一定能走得更远。

展望未来，随着纳米科技与先进材料持续突破，超微颗粒科学的角色将愈发关键。期待两岸学界在既有基础上，深化合作、拓展国际视野、持续推动学术创新与产业应用并进。

这段共同走过的岁月，既是记忆，也是力量；既属于过去，更指引未来。在不断探索的微观世界中，我们将继续携手前行，让超微颗粒科学绽放更加璀璨的光芒。

表 1 中国颗粒学会、超微颗粒专业委员会及相关海峡两岸学术交流会议

主办单位	中国颗粒学会						超微颗粒专业委员会			大学			大陆/台湾学者人数*
会议类别	全国会员代表大会（简称“大会”）			学术年会（简称“年会”）暨海峡两岸学术交流会（简称“海峡会”）			全国超微颗粒学术研讨会（专委会成立前简称“超微研会”，成立之后简称“超微专会”，以区分届次）、海峡两岸学术交流会（简称“海峡会”）			海峡两岸纳米材料技术研讨会（简称“纳米会”）			
时间	届次	地点	备注	届次	地点	备注	届次	地点	备注	届次	地点	备注	
1986.11.27	1	北京	中国颗粒学会成立大会会员大会 1										
1988.							①	湖南长沙	超微研会①				
1991.							②	湖北武汉	超微研会②				
1995.							③	广东珠海	超微研会③				
1996.7.6	2	北京	会员大会 2										
1997.9				1	北京	年会 1							
1998.10							④	北京	超微颗粒专委会成立；超微研会④				
1998							1	北京	超微专会 1				
1999.10.13—16				2	广东珠海	年会 2 暨海峡会							11（台湾）
2000.							2	浙江杭州	超微专会 2				
2002.							3	重庆	超微专会 3				
2002.11.4—6	3	广西桂林	会员大会 3	3	广西桂林	年会 3 暨海峡会							21（台湾）
2004.8.24—28				4	山东烟台	年会 4 暨海峡会							27（台湾）
2005.11.21—23							4	广西南宁	超微专会 4 暨海峡会				11（台湾）
2006.4.16—23										1	台北	纳米会 1（台湾）	13（大陆）
2006.8.18—21	4	北京	会员大会 4	5	北京	年会 5 暨海峡会							54（台湾）
2007.6.18—23							5	湖北武汉	超微专会 5 暨海峡会				25（台湾）
2008.12.8—11				6	上海	年会 6 暨海峡会							18（台湾）
2009.8.15—18							6	内蒙包头	超微专会 6 暨海峡会				24（台湾）
2010.3.18—23										2a	台北	纳米会 2（台湾）	20（大陆）
2010.8.15—17	5	陕西西安	会员大会 5	7	陕西西安	年会 7 暨海峡会							25（台湾）
2010.11.30—12.4										2b	安徽合肥	纳米会 2（大陆）	11（台湾）
2011.8.8—10							7	辽宁丹东	超微专会 7 暨海峡会				21（台湾）
2012.9.5—8				8	浙江杭州	年会 8 暨海峡会							25（台湾）
2013.8.25—29							8	湖南吉首	超微专会 8 暨海峡会				28（台湾）
2014.5.18	6	北京	会员大会 6										
2014.10.25—11.1										3a	台北	纳米会 3（台湾）	11（大陆）
2015.8.3—5							9	浙江宁波	超微专会 9 暨海峡会				22（台湾）
2015.12.2—6										3b	安徽合肥	纳米会 3（大陆）	6（台湾）

主办单位	中国颗粒学会						超微颗粒专业委员会			大学			台湾/大陆学者人数*
会议类别	全国会员代表大会（简称“大会”）			学术年会暨海峡两岸学术交流会			全国超微颗粒学术研讨会、海峡两岸学术交流会			海峡两岸纳米材料技术研讨会			
时间	届次	地点	备注	届次	地点	备注	届次	地点	备注	届次	地点	备注	
2016.8.12—14				9	四川成都	年会9暨海峡会							20（台湾）
2017.8.12—14							10	云南玉溪	超微专会10暨海峡会				22（台湾）
2018.8.9—12	7	辽宁沈阳	会员大会7	10	辽宁沈阳	年会10暨海峡会							19（台湾）
2019.8.16—18							11	湖北宜昌	超微专会11暨海峡会				19（台湾）
2020.10.23—25				11	福建厦门	年会11（线下）暨海峡会（线上）							
2023.4.21——24	8	海南海口	会员大会8	12	海南海口	大会12							
2024.10.24—28				13	江苏苏州	大会13							
2026.3.20—22							12	山东济南	超微专会12暨海峡会				
2026.11.6—9	9	广东广州	会员大会9	14	广东广州	大会14							

***在大陆召开的会议只列出台湾学者的人数；在台湾召开的会议只列出大陆学者的人数。特感谢邵刚勤教授协助整理此表格。**

海峡两岸学术交流二十年回顾

邵刚勤[1]，林鸿明[2]

1. 材料复合新技术全国重点实验室（武汉理工大学）
2. 中国台湾大同大学

邵刚勤：本人从 1992—2025 年在材料复合新技术全国重点实验室（以下简称“全重”[1]（武汉理工大学）工作了 33 年，与中国台湾[2]的学者有着 20 多年的学术交流经验，现应邀写一些心得体会以供同行参考。特邀林鸿明教授（台湾大同大学）共同具名，实则考虑到原学术交流发起人张立德教授（中科院固体物理所）等老一辈已年事已高，不忍打扰，而我俩目前应是同行中联系最久之人了。

从 2003 年我们初次相识，到 2019 年参加最后一次线下的第十一届海峡两岸超微颗粒学术研讨会暨中国颗粒学会超微颗粒专委会 2019 年会（以下简称“超微海峡会”），然后两人相继退休。尽管此后国内外形势变化万端，我们仍然保持着较多的联系，几乎每年都能见面一两次，日常的电话和微信更是少不了。

2003 年 8—9 月，我到希腊克里特岛参加了“NN 2003”纳米材料与技术国际会议，在会场中偶遇一队行动齐整、言谈间带着别样汉语韵味的华人面孔，猜想他们应来自台湾。由此我上前与他们进行了简短的交谈，认识了那些人的领队林教授。后来想起来，那是我学术生涯中一次难得的异域邂逅！

林鸿明：邂逅即是缘分，那时我们都很年轻，意气风发！

邵刚勤：2004 年 8 月 24—28 日，我到山东省烟台市参加第 4 届“中国颗粒学会年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会”（以下简称“年会海峡会”），被分配到超微颗粒专业委员会（以下简称“专委会”）的分会，惊喜地再次见到了林教授和他带领的一队井然有序、彬彬有礼的台湾学者。

那一年，大陆学者承受着欧美伽利略、GPS 及其他科技项目等的限制，关注到美国

1 材料复合新技术全国重点实验室（简称“全重”），原名材料复合新技术国家重点实验室（简称“国重”），1987 年 3 月成立，2024 年 12 月重组更名。

2 中国台湾行政区包括 6 个“直辖市”：台北、新北、桃园、台中、台南、高雄；3 个市：基隆、新竹、嘉义；13 个县：新竹、苗栗、彰化、南投、云林、嘉义、屏东、台东、花莲、宜兰、澎湖、金门、连江（马祖）。

2001 年 9·11 事件之后的阿富汗和伊拉克战争的速胜。在此背景下，与中国台湾地区学者的学术交流显得格外特别。他们大多有欧美留学的背景，与日韩的先进产业也接触较多；而大陆学者正在为中国进入世贸组织（WTO，2001 年 12 月 11 日）后的首个五年规划而拼搏，其中以本土学者或公派回国的居多，留学归国潮尚未到来。至少在我单位，欧美或中国台湾学者的报告总是座无虚席，提问踊跃。这还是因为在“国重”，其他单位接触新面孔的机会更少。

这次会议中国台湾学者去了 27 人，涵盖台湾地区大部分高校和科研院所。此后历届的“年会海峡会”和“超微海峡会”台湾学者人数都基本保持在 20～30 人，最高峰时达到 54 人（2006 年第 5 届“年会海峡会”），且每次都以十来位“恒持者”为主体，林教授为领队。由此本人的学术生涯中增添了“海峡之声”！毕竟出国参会或赴中国台湾地区参会，以及中长期访问的次数有限，并且上班间隙听来访报告所作的交流很仓促，现在有如此众多、近距离交流机会当然值得珍惜。

奇文共欣赏，疑义相与析。对于这次及以后十几年的报告我感触颇深：

林鸿明教授（中国台湾大同大学材料工程所）专长于磁电功能性纳米材料、器件及其在半导体、医疗和能源等领域的应用，其前沿性和应用性令人敬佩！

林正雄教授（中国台湾清华大学材料系；中国台湾吴凤技术学院）专长于电子陶瓷和粉末冶金，他是中国台湾地区团队中最年长者，其学生遍布中国台湾，在欧美也不少。

叶君棣教授（中国台湾清华大学化学系；中国台湾元智大学）主要研究氢能技术、燃料电池和金属催化剂。

刘如熹教授（中国台湾大学化学系）专长于材料化学合成与应用，包括发光半导体、电池和（庞）磁阻材料等，他所作 PPT 的优美和展示度令人过目难忘！

韦文诚教授（中国台湾大学化学系）专长于固体氧化物燃料电池（SOFCs）的精密加工技术、陶瓷微结构分析等，对研究细节把控非常透彻。

邓茂华教授（中国台湾大学地质系），年轻英俊，主要研究方向为纳米材料合成与包覆、陶瓷烧结和数值模拟。

简淑华研究员（中国台湾“中央研究院”化学所）是台湾地区团队中女性最年长者，专长于功能性纳米材料如太阳能电池等，她表现出的科研追求、热爱与信念让我敬佩！

胡宇光研究员（中国台湾“中央研究院”物理所）专长于 X 射线同步辐射成像和分析技术，在材料、医学特别是脑神经图谱方面的工作受到世界瞩目，常年工作于为数不

多拥有该类设备的美、日、韩等国家，以及中国的大陆地区和中国的台湾地区。与林教授类似，我也与他一直保持着友好的联系。

胡淑芬教授（中国台湾师范大学物理学系）；专长于全固态 Li/CO_2 电池、锂氧电池及电极材料等，她对科研的认真和热爱使我极为感动！

苏程裕教授（中国台湾台北科技大学机械工程系）：专长于精密粘合、扩散软硬焊和纳米合成等，沉稳干练。

林中魁教授（中国台湾台北医学大学；中国台湾逢甲大学材料系）：专长于医疗和口腔相关材料研究，精力充沛。

邱郁菁教授（中国台湾大同大学化学工程与生物科技学系）：专长于能源科技和非均相催化剂研究，非常秀慧耐心，后来我随大陆学者两次访台她都协助林教授精心安排大家的会务、访问和交流！

傅彦培教授（中国台湾东华大学），主要研究燃料电池、太阳能电池和锂离子电池相关材料，是台湾团队中最年轻的教授，帅气阳光。

特别地，黄肇瑞教授（中国台湾成功大学）专长于结构功能材料如 Si_3N_4 和 Al_2O_3 等，他做过中国台湾成功大学工学院院长，后被聘为中国台湾高雄大学校长，两校均位于台南。请注意，“成功”是纪念明末清初民族英雄郑成功驱荷兰开台之功！海峡两岸均为其树碑立像。

因本文篇幅有限，其他报告我就不赘述了，我不止一次听过颜富士（中国台湾成功大学）、林永仁、吴溪煌、陈正翰、邱六合（中国台湾大同大学）、王锡福、王玉瑞、钟清枝、卓清松、张合（中国台湾台北科技大学）、戴明凤、刘忠文（中国台湾吴凤技术学院）、陈文章（中国台湾云林科技大学）、叶玉莉（中国台湾明新科技大学）、詹志洁（中国台湾逢甲大学）、任盛源（中国台湾“中央研究院”物理所）以及一些忘记留下姓名的中国台湾地区教授、学者的报告，在此我一并感谢！感谢你们的友好与善意！感谢你们为两岸学术交流所作的贡献！

综上，通过两岸学术交流，我们形成了开放与包容的良好氛围，共同探索，加深理解，增进了友谊与信任！

林鸿明：邵教授对中国台湾地区学者的工作点评很贴切！海峡两岸的学术交流将对现代科技和高新产业的发展起到推动作用。

邵刚勤：至于大陆学者的报告，客人优先，就不一一列举了，只谈一位，就是超微

颗粒专委会领头人张立德教授。他曾担任国家重点基础研究发展规划项目（973 计划）“纳米材料和纳米结构”的首席科学家，除了诸多论文、专利和奖项外，其主编的《纳米材料学》等教材是许多新进纳米材料领域的硕博学生必看读本。每次会议，他几乎一两天、两三天全程听会。别人是看和听，他是真听。特别是 2006 年前后，他老人家因用眼过度和年龄原因，视力急剧下降，但是每次会议闭幕前，他的总结报告定会引来一片惊呼！他可脱稿将几天的报告人及单位、报告精髓和值得商榷之处信手拈来，侃侃而谈！被评论者莫不感到受益匪浅和深深敬佩。

林鸿明：是的，1998 年 6 月我在瑞典斯德哥尔摩的 NANO’98 会议上与张教授初次相识，就被其魅力所吸引。那是一种没有距离感的对话，也是一份彼此信任的开始。此后就有了承诺、有了期待，不仅是学术交流，更像是老友重逢。

邵刚勤：2006 年 4 月 16—23 日，由林鸿明教授担任大会主席的首届“海峡两岸纳米材料技术研讨会”（以下简称“纳米会”）在中国台湾大同大学举行，我受邀首次赴中国台湾参加会议。我从香港转机，与其他城市飞来的大陆学者（总计 13 人）汇合后，一起办妥入台审核和转机手续（首次坐台湾航空公司的班机！），终于踏上了从小就心心念念的宝岛台湾。

在台一周，我们举行了“纳米会”（图 1），见到了岛内众多学者，足见林教授的号召力和魅力！此处郑重介绍一下林教授的夫人陈能静教授（中国台湾辅仁大学），她贤慧端庄，气质优雅，几乎伴随林教授走遍世界各地，俩人恩爱羡煞无数旁人！

我们参观了会议主办方中国台湾大同大学，得知其校名来自于创办者大同公司，而“大同”二字源于《礼记·礼运》大同篇，与山西大同和孙中山先生倡导的大同精神同出一源。我们进行的学术交流所追求的也正是科研创新与人心之大同！然后我们乘中巴沿途参访了中国台湾海洋大学（基隆）、中国台湾大学（台北）、中国台湾逢甲大学（台中）和中国台湾清华大学（新竹）等等。一路上，费教授对张教授的悉心照顾让我动容！戴教授与都院士幽默风趣的言谈减轻了我们年轻人不少的紧张。

林鸿明：这次首届“纳米会”，促进了两岸学者在中国大陆地区和中国台湾地区不同环境下面对面的深入交流，做了很好的示范，此后的历届会议日益成熟，气氛也愈发热烈。



图 1 首届“海峡两岸纳米材料技术研讨会”场外合影（2006 年 4 月，台北）；中间四位分别为戴遐明教授（清华大学）、林鸿明教授（中国台湾大同大学）、都有为院士（南京大学）和张立德教授（中科院固体物理所），左 4 为韦文诚教授（中国台湾大学）、右 6 为费广涛教授（中科院固体物理所），右 5 为董鹏教授（中国石油大学（北京）），右 3 为邵刚勤研究员（武汉理工大学）

邵刚勤：2007 年 6 月 18-23 日，由本人担任大会主席的第 5 届“全国超微颗粒学术研讨会暨海峡两岸学术交流会”在武汉理工大学举行（图 2—4），这次会议受到了学校的高度重视，教育部、学校和“国重”对本会进行了支持和资助，湖北省台办、武汉理工大学校领导和“国重”领导出席了会议并致辞。会议代表中中国台湾学者 25 人，来自于 11 个高校和研究机构；大陆学者 38 人，来自于 21 个高校、研究机构和企业，参会者近 200 人。无疑地，张教授的会议总结让参会者特别是在读的硕士和博士研究生惊叹与折服！而然志存高远慕先贤。会后部分论文经评审发表于《武汉理工大学学报》（EI 收录）。

会议期间会务组还组织大家参观了“国重”和国家级材料测试中心，以及武汉市龟蛇双山周边的景点，如武汉长江大桥（万里长江第一桥）、蛇山之巅的黄鹤楼及蛇山南麓的辛亥革命武昌首义旧址等，有点遗憾未能前往龟山西麓的古琴台，那里有春秋战国时期钟子期和俞伯牙高山流水觅知音的美丽传说！后来某年，我和下文要提到的田熙科教授曾陪同林教授夫妇访过此地，也算补上了这一缺憾。

林鸿明：这次会议在著名的东湖风景区内召开，给我们留下了深刻印象。作为内陆城市，武汉具备与沿海城市不同的特点，其对技术和产业的吸引力很大。



图 2 第 5 届“全国超微颗粒学术研讨会暨海峡两岸学术交流会”（2007 年 6 月，武汉）



图 3 第 5 届“全国超微颗粒学术研讨会暨海峡两岸学术交流会”主席台贵宾（2007 年 6 月）；从左至右，唐新峰教授（武汉理工大学·材料复合新技术国家重点实验室副主任）、郭健副主任（武汉理工大学港澳台办）、梁勇研究员（中科院沈阳金属所）、托德馨副校长（武汉理工大学）、张立德教授（中科院固体物理所）、祝新梅副处长（湖北省台办）、林鸿明教授（中国台湾大同大学）、戴遐明教授（清华大学）



图 4 第 5 届“全国超微颗粒学术研讨会暨海峡两岸学术交流会”期间林教授率团到本实验室参观；从左至右， 林鸿明教授（中国台湾大同大学）、 邵刚勤研究员（武汉理工大学）、 任盛源研究员（中国台湾“中央研究院”物理所）、吴溪煌副教授（中国台湾大同大学）、林永仁教授（中国台湾大同大学）、张合副教授（中国台湾台北科技大学）、任盛源夫人、林永仁夫人、简淑华研究员（中国台湾“中央研究院”化学所）

邵刚勤：2014 年 10 月 25 日至 11 月 1 日，我再次受邀赴中国台湾地区参加了第 3 届“海峡两岸纳米材料技术研讨会”。距上次赴台湾参会已过去 8 年多了，真可谓岁不我延。这一年，在大陆微信将长途电话送入了历史，连同支付宝使民众瞬间越过信用卡时代，私家车开始普及。

此时两岸空中客运直航已正式开通，但当时武汉仅开通直飞中国台湾桃园的客运航班，我遂经厦门中转后前往台北。这次大陆学者总计有 11 人，另有 8 人因手续延滞未能如期成行。再次见到了许多台湾同行，我们进行了紧张而愉快的学术交流（图 5）。除了台北周边外，此行特意参访了中国台湾东海岸花莲的中国台湾东华大学，并到台南瞻仰了民族英雄郑成功的雕像（图 6）。

2019 年 8 月 16—18 日，我到湖北宜昌参加了第 11 届“全国超微颗粒学术研讨会暨海峡两岸学术交流会”，中国台湾有 19 位学者出席，老朋友见面大家自然有说不完的话题。当时我内心藏着隐隐担忧，实际上这是我当年首次出远门。果然会议期间接到了家人的电话，告知母亲病危的消息，我匆忙与大家告别，赶回了家，……

当时真的没有想到，那是我学术生涯中与中国台湾地区学者的最后一次线下共聚一堂。现在我已退休，与大家更多的是在线见面，略得心安吧。



图 5 第 3 届“海峡两岸纳米材料技术研讨会”场外合影（2014 年 10 月，台北）；从左至右，邱郁菁教授（中国台湾大同大学）、苏程裕教授（中国台湾台北科技大学）、林鸿明教授（中国台湾大同大学）、邵刚勤研究员（武汉理工大学）、艾德生教授（清华大学）、林永仁教授（中国台湾大同大学）、陈胜利教授（中国石油大学（北京））、 田熙科教授（中国地质大学（武汉））、 徐锡金教授（济南大学）、吴进前总工（北京赛奇特种陶瓷研究中心）、彭威（清华大学）



图 6 台南市安平古堡内民族英雄郑成功雕像
（1624. 8. 27—1662. 6. 23，福建泉州南安人，祖籍河南固始）

期望专委会新一代的费广涛主任、艾德生副主任、刘潜峰和徐锡金任总干事继续发扬老一代领头人张立德教授、戴遐明教授和林鸿明教授等的优秀传统，珍惜这 20 多年来两岸学者持之以恒的坚守和传承。我们可以骄傲和自豪地说，在过去的 20 多年里，超微颗粒专委会、中国颗粒学会为海峡两岸的学术交流做出了很大贡献！身为其中一员，我们今后要精心维护好已有的成果，努力再创佳绩！

最后，本人还要感谢我的前辈，同时也是超微颗粒专委会创建者和先行者胡荣泽教授（北京钢铁研究总院）、袁润章教授（武汉理工大学）、欧阳世翕教授（中国建筑材料科学研究总院、武汉理工大学）、梁勇研究员（中科院沈阳金属所）、徐明霞教授（天津大学）、李懋强教授（中国建筑材料科学研究总院）、程虎民教授（北京大学）、都有为院士（南京大学）和董鹏教授（中国石油大学（北京））！

林鸿明：面临未来可能出现的种种挑战，我们要坚持对科学的热爱和彼此的信任。期待两岸学者深化合作、拓展国际视野，共同推进学术的创新与高新产业的应用。

三十载深耕纳米科技，四十载共筑颗粒未来

——热烈庆祝中国颗粒学会成立四十周年

成庆堂

江苏河海纳米科技股份有限公司

今年是中国颗粒学会成立四十周年，江苏河海纳米科技股份有限公司作为学会超微颗粒专委会创始成员之一，也迎来了加入学会的第三十个年头。回望本公司与中国颗粒学会三十载并肩奋斗的征程，万千感慨，满心感恩。

江苏河海纳米科技股份有限公司的前身，是中国科学院固体物理研究所泰兴纳米材料厂，由江苏河海科技集团有限公司与中科院固体物理研究所于 1996 年联合创办，其诞生离不开超微颗粒专委会主任张立德研究员的倾力倡导与推动。张立德先生是我国纳米材料产业化的拓路者，时任固体所所长的他于 1995 年在《参考消息》上发文呼吁国内有家国情怀的企业家关注纳米前沿科技，在国际同步研究纳米材料时绝不能输在起跑线上。这份振聋发聩的呼吁深深触动了河海集团党委，班子成员随即奔赴合肥固体所洽谈合作，首批无偿投入 41 万元科研经费，为我国纳米材料的产业化贡献绵薄之力。1996 年 4 月，河海集团的科研团队前往固体所，开展为期一年的学习，为产业化筑牢人才根基；同年，泰兴河海工业园内年产 5 t 纳米材料生产线顺利建成，次年又改建成了年产 50 t 生产线，正式迈出纳米材料产业化的坚实步伐。

基于以上在纳米材料产业化方面的基础，2001 年，河海纳米获国家发改委 1 000 万元财政拨款，建成国家重点项目——年产 500 t 的纳米材料工业性试验生产线，产能实现跨越式提升。在本公司成长、壮大的过程中，固体所的科研团队持续为河海纳米保驾护航，多次现场指导，牵头与国际头部企业开展应用对接，输出国际先进的产品指标与管理经验，推动 GMP 生产线改建，以全方位支持，为河海纳米锚定正确的发展航向，成为企业行稳致远的“定海神针”。

2007 年初，在成立十年、历经市场波折后，河海纳米大胆优化生产工艺，一次性批量出口 3 000 kg 纳米材料至韩国，实现了我国纳米材料出口“零的突破”。2008 年，张立德先生亲自带队赴河海纳米现场指导，并出席中石化协会组织的“纳米二氧化钛的规模化生产和表面处理工艺”科技成果专家鉴定会，最终产品获评“达到国际先进水

平”。鉴定会上，时任总经理成庆堂先生当场流下热泪——作为国内最早深耕纳米材料的专业企业，历经十年国内市场的深耕与坚守，终于成功打入国际市场，这份荣耀，是所有“纳米人”最滚烫的勋章。

作为超微颗粒专委会的成员，河海纳米几乎参加了每次超微颗粒专业委员会的年会，每次年会期间，本公司的参会人员都与参会高校、科研院所的人员深入交流、请教，提出问题，寻求解决方案；自 2006 年以来，超微颗粒专委会的相关人员多次走进河海纳米，现场“望闻问切”，为企业在激烈的国际竞争中保持奋进姿态、站稳行业潮头。如超微颗粒专委会副主任艾德生、于溯源教授等专家，始终不遗余力地为河海纳米免费答疑、出谋划策，助力企业拓展新产品、开辟新赛道，为企业发展提供了清晰的路径与方向。2018 年，“具有核心竞争力的纳米二氧化钛及工程应用研发和产业化”项目，还荣获中国颗粒学会科技进步二等奖。

三十载初心如磐，笃行不怠。如今，河海纳米已建成国家重点示范工程项目——年产 500 t 纳米氧化钛、年产 200 t 纳米氧化锌工业性示范生产线，配套年产 300 t 纳米浆料生产线，构建起“核心粉体研发—规模化生产—功能性浆料制备”全链条产业化体系，为涂料、塑料、防晒、陶瓷等多领域，提供稳定、高效、高品质的纳米材料整体解决方案。

三十载深耕不辍，我们全程参与并见证了中国纳米氧化物材料从实验室走向工业化、从单品应用迈向系统解决方案的完整历程，以技术创新筑牢核心竞争力，铸就四大核心技术壁垒：

1） 创新包裹技术：通过开放式包裹、界面结构精准包裹，实现了粉体性能定制化调控；

2） 精准表面处理技术：亲水/亲油/油水相亲改性、新型涂料适配工艺，满足多元化场景应用需求；

3） 高效粉体复合技术：无机+有机、有机+有机的复合改性，持续拓展了材料功能边界；

4） 成果转化应用技术：原料创新与配方优化深度融合、科研平台与产业应用高效衔接，加速技术成果规模化落地。

依托企业研究生工作站、企业技术中心等高端科研平台，公司累计获授权专利 38 项，主导制定《防晒用纳米二氧化钛》（ISO 18473-2：2015）国际标准，参与多项国家及行

业标准编制，荣获第七届中国国际专利与名牌博览会金奖、多项省部级科技进步奖，创造了多项国内第一，以硬核技术守护“河海纳米”的品质口碑。

三十载栉风沐雨，河海纳米的每一步成长，都离不开中国颗粒学会与超微颗粒专委会的引领与赋能。学会搭建的学术交流、技术协同、产业融合平台，为行业创新发展厚植沃土，也为公司技术升级、产业进阶注入了不竭动力。

站在新的历史起点，河海纳米将继续以学会为纽带，坚守纳米材料创新主航道，加速科技成果转化，携手全体同仁共筑颗粒科技新高地，为中国新材料产业高质量发展，贡献更大的河海力量！



中国颗粒学会科技进步奖

证 书

为表彰中国颗粒学会科技进步奖（团队奖）获得者，特颁发此证书。

项目名称：具有核心竞争力的纳米二氧化钛及工程应用研发和产业化

奖励等级：二等

获奖单位：江苏河海纳米科技股份有限公司

获 奖 者：成庆堂

2018 年 8 月 12 日

证书号：2018-KJ-2-01-R1

江苏河海纳米科技股份有限公司获得 2018 年度中国颗粒学会科技进步二等奖

粒火相传四十载，微末深处见真情

——纪念中国颗粒学会成立四十周年

陈胜利

中国石油大学化工学院；北京纳微标物科技有限公司

2026 年 4 月 1 号，一个寻常的日子，电话响了。

是费广涛教授。他的声音一如往常。他说，学会四十周年了，你写点什么吧。

我推辞。我说我对学会了解不深，又不擅笔墨，怕是写不好的。可费教授很执着，一遍，又一遍，像春雨润物，不急不躁，却终是一点一点渗进了心里。再加上，我今年因故缺席了在济南召开的超微颗粒专委会年会——那本是我心心念念要去的。想着见几位多年未见的老友，听听他们最新的研究成果，哪怕只是坐下来，什么也不说，也是好的。可临行前有事，终究未能成行。那几天心里空落落的，像是错过了什么再也等不回的约定。

于是，我硬着头皮应了下来。知其难为而勉力为之——这大概，就是我与颗粒学会之间一段说不清、道不明的缘分吧。

中国颗粒学会诞生于 1986 年 11 月，到今年，整整四十个春秋。而超微颗粒专业委员会，还要年轻十二岁——1998 年 10 月才呱呱坠地。20 世纪 90 年代，纳米科技如新潮拍岸，全球为之激荡。我国颗粒学界习惯把那些细到极处的纳米颗粒唤作“超微颗粒”。为回应科技界与产业界迫切的呼唤，一批有识之士聚拢而来，成立了这个专委会。如今回望，那真是一个风起云涌、群星初现的年代。

我第一次参加超微颗粒专业会议，是 2007 年 6 月，在武汉。

那年，我的一位挚友，武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室的邵刚勤教授，承办了第五届超微颗粒年会暨海峡两岸纳米颗粒学术研讨会。会上有两位长者，像两盏不灭的灯，至今仍在我记忆深处亮着。

一位是张立德教授。彼时他已年近古稀，视力不好，走路须年轻人搀扶。开会时看不清 PPT，便全靠一双耳朵去听。两天的会议，数十场报告，内容庞杂而密集。到了总结环节，张老不用一片纸稿，竟将每一个报告人的核心思想、创新之处一一点评，如数家珍。我坐在台下，惊讶得说不出话来。人常说上了年纪记性便不好了，可张老分明像一

台精密的录音机，更像一位洞若观火的解读者。那样的天才与奇才，我在此后的学术生涯中，再未遇见过。后来张老参会渐少，我已十多年不曾见到他了。算来他已是耄耋之年，不知身体可还硬朗？若您恰好遇见他，请代我问一声好——就说是当年武汉坐在他左边那个叫陈胜利的年轻人，还记着他。

另一位是戴遐明教授。如果说张老是奇才，戴老便是典型的儒者。他说话时永远面带微笑，和声细语，温文如玉。会议最后一天，有位理事姗姗来迟，戴老笑着迎上去，只说了一句："我们需要您的参与，理事需要理事啊。"一句轻轻的双关，把批评化在了笑声里。那样的风范，真叫人如沐春风。戴老已过世数年，每每想起，心中仍有不舍。

那次武汉会议，还有一个遗憾，至今想起仍觉后悔。

当年办会，东道主总会安排一次就近游览——如今这样的"好事"早已绝迹了。那次是坐游轮过三峡大坝，还能体验船舶升降机。我偏以"忙"为由，没有参加，匆匆回了家。后来听说，现在长江航运太繁忙，穿越大坝要等上十天半月，那种"坐船过大坝"的体验早已取消了。如今就算自己花钱，也买不回那一段三峡风光了。人生许多事就是这样，当时只道是寻常，错过了便是一辈子。江水依旧东流去，游轮再无穿坝时。我的那一次三峡游，便永远停在了遗憾里。有时候我会想，若那天我留下来了，站在甲板上，看船闸缓缓升降，看江水脚下退去又涌来，那该是怎样一番光景？可惜，人生没有如果，只有错过后的回望与轻叹。

超微颗粒专委会有一个独特之处：委员中有许多来自中国台湾地区学者。

我曾两度赴中国台湾地区参加海峡两岸纳米技术研讨会，一次是 2010 年 3 月，一次是 2014 年 10 月，都是由林鸿明等十余位教授组织的。说起林鸿明教授，我得好好写几笔。他身材魁梧，声音洪亮，活脱脱是影视作品里那种豪放不羁、侠肝义胆的形象。可相处久了你会发现，他心思极其细腻，像是粗犷的外壳下藏着一颗比绣花针还要细腻的心。

每次来大陆开会，他总会带上几盒中国台湾地区的特色小点心，送给年长的老先生们。诸老感悦不已，那点心甜在嘴里，更暖在心上。有一次他主持报告会，一位听众提了个与报告几乎无关、且极难回答的问题，台上的人一时语塞。林教授立刻接过话头，微笑着说："这个问题很有意思，但它是另一个 topic。其他代表还有问题吗？"既给了提问者体面，又替报告人解了围，全场气氛顿时松快下来。他还是个好丈夫。每次来

大陆，他都带着妻子，用餐时陪在身边，游览时为她照相、递水、讲解。在场的女同胞们看见林夫人脸上那幸福的笑容，眼神满是羡慕——那笑是真真切切的，装不出来的。

2010 年第一次到台北，刚下飞机，中国台湾地区的朋友们早早就在出口等候了。那份热情与周到，至今想起来仍暖在心头。台北的街道楼房密集，宾馆房间小巧整洁，和香港有几分相似。街头摩托车川流不息，绿灯一亮，像开了闸的水。走在街上，听到的口音、看到的招牌、闻到的小吃香气，恍惚间竟像置身于大陆南方某座城市，像一脚踏回了家乡。我在一个小摊上买了两个极小的礼物——刻着“下一站是幸福”字样的钥匙链。带回家送给夫人和女儿。没想到，她们喜欢得不行。那份小小的欢喜，至今想起仍让我心头一热。感谢中国台湾地区的学者们，给了我这样一次赴中国台湾交流学习、也带回一份小小幸福的机会。

除了超微颗粒专委会，颗粒测试专委会的会议，我也常去。特别是近些年，自己成立了公司，着手研制粒度标准物质之后，去的便更勤了。那里汇集了众多粒度测试领域的专家和企业家，有的企业家本身就是技术大家。与他们交流，总能收获许多在书斋里、在文献中，学不来的东西。

说起来，我第一次走进颗粒学会这个大家庭，便是参加颗粒测试专委会组织的会议。那是 2006 年 8 月，在北京房山——“各类粒度仪量值比对结果评比会议”。人并不多，主要是国内知名的颗粒测试专家和粒度仪企业代表。议题只有一桩，却扎实：分析比对测试结果，讨论国内粒度仪的技术水平与存在问题。来参会的，有胡荣泽教授、王乃宁教授、刘希尧教授、董鹏教授、周定益教授、任中京教授、蔡小舒教授、许人良教授、张福根教授、董青云董事长……，您听听这些名字，哪一个不是如雷贯耳！还有一些代表，名字我一时记不全了，但他们同样是国内颗粒测试领域响当当的专家。会议由老前辈、学会创始人之一胡荣泽教授主持，各项事务则由周素红教授悉心安排。

提起我的挚友周素红教授，我认识她，比参加颗粒学会的会议还要早些。周老师管理着各式各样的分析仪器，是仪器分析测试领域的行家里手。早年间，她曾无私地给过我许多帮助，点点滴滴，我都铭记在心里。她给我的印象是：为人随和，对人对事都满腔热忱，组织能力强，办事周全又认真，从不见她对琐碎有过一丝厌烦。几乎每一次学会会议，她都是组织者之一，总能看到她忙碌的身影。您今后若是有机会承办颗粒学会的学术会议，若能请得周老师帮忙张罗，那会议一准安排得妥妥帖帖，圆满顺当。

光阴似箭，日月如梭。一晃，离我第一次参加颗粒学会的会议，有二十年了。

当年的中青年，如今也到了耳顺之年。我对这个学会，有一种说不清的眷恋——是为了学术交流，更是为了相会故友。每一次见面，总有说不完的知心话，道不尽的故人情。今后，我还会尽力参加学会的会议，只是次数，大概会慢慢少了。长江后浪推前浪，世上新人赶旧人。岁月流逝，年龄增大，人早晚要退出舞台。

文章写到这里，我想特别谢谢费广涛教授。我和费教授同岁，相识多年，是生活中无话不谈的挚友。他知道我对学会的历史了解有限，却依然很执着地要我写一篇纪念文字。这份信任，我无以为报，只能把这篇短文，写得再用心一点，再真切一点。

值此中国颗粒学会成立四十周年之际，我写下这些零散却真切的记忆。

谨以此文，祝学会里上了年纪的师长们，寿考不忘，岁月静好。

祝正当盛年的同仁们，事业腾达，前途无量。

祝我们的颗粒学会，像那微末深处的火焰，粒火相传，越烧越旺——从四十年前的一点星火，燃成今日的一团烈焰，走向更红火的明天，走向更辉煌的未来！

附：专委会合影



2007 年 6 月在武汉第五届超微颗粒年会暨海峡两岸纳米颗粒学术研讨会代表合影，第 1 排左起第 1 位是戴遐明教授，第 5 位是张立德教师，第 6 位是林鸿明教授



2006 年 8 月在北京房山召开的各类粒度仪量值比对结果评比会议代表合影



2006 年 8 月在北京房山召开的各类粒度仪量值比对结果评比会议现场



张立德教授 2007 年 6 月在武汉超微颗粒年会暨海峡两岸纳米颗粒学术研讨会现场



2010 年 3 月在台北举办的海峡两岸纳米材料技术研讨会部分代表合影



2010 年 3 月台北举行的海峡两岸纳米材料技术研讨会期间，台湾大同大学材料工程学系的吴溪煌教授带领会议代表参观他的实验室；穿白色寸衫的是林鸿明教授，其左侧是张立德教授，张教授左侧是戴遐明教授，背向镜头在讲话的是吴溪煌教授



2014 年 10 月在台北举办的海峡两岸纳米材料技术研讨会代表合影



2025 年 11 月在佛山举办的颗粒测试会议代表合影，会场气氛就像初冬季节南国天气一样暖融融的

药载匠心 粒筑华章

——药物制剂与粒子设计专业委员会成立与发展纪念

崔福德[1]，唐星[1]，石凯[2]
1. 沈阳药科大学；2. 南开大学

1 时代之需：专委会的缘起与诞生

中国颗粒学会药物制剂与粒子设计专业委员会（以下简称“专委会”），是我国药物制剂科学与颗粒技术领域具有重要影响力的学术组织。随着药学、颗粒科学、粉体工程和制药装备技术的交叉融合不断深化，粉体与颗粒技术在药物制剂研发、工艺优化、质量控制和产业化生产中的作用日益凸显。学术界与产业界迫切需要一个联结颗粒学与药剂学、贯通基础研究与工程应用的专业平台。在这样的时代背景下，专委会应运而生，肩负起凝聚学术力量、促进学科交叉、服务行业发展的重要使命。

日期地点	会议名称	主办单位	承办单位	会议主席	参会人数
2006 5月15-16 沈阳	中日制剂和粒子设计研讨会	中国药学会-药剂专业委员会、 中国颗粒学会-颗粒制备与处理专委会 日本粉体工学会-制剂与粒子设计部会 日本粉体工业技术协会-粒子加工技术分会	沈阳药科大学	崔福德 川岛嘉明 郑良元	250人 (日本68人)
2007 7月28-30 沈阳	第一届亚洲药物制剂科学技术研讨会	中国颗粒学会 《亚洲药物制剂科学杂志》编委会 中国医药技术国际发展委员（香港） 永井記念薬学国際交流財団 沈阳药科大学	沈阳药科大学	崔福德 川岛嘉明 Paul W.S. Heng	国内290人 (国外120人)
2007 7月26-27 沈阳	药物制剂粉体技术研讨会	中国颗粒学会-药物粉体专委会筹备组 沈阳药科大学	沈阳药科大学	崔福德	150人 (台湾41人)
2010 9月27-28 上海	生物颗粒、粉体制备与应用技术研讨会:	中国颗粒学会-生物颗粒专委会筹备组	沈阳药科大学	崔福德	115人 (国外2人)
2011 9月19-20 西安	第二届亚洲药物制剂科学与技术研讨会	中国颗粒学会 亚洲药学联盟会 《亚洲药物制剂科学杂志》编委会	沈阳药科大学 西安交通大学 药学院	崔福德 川岛嘉明 Paul W.S. Heng	200人 (国外68人)

图 1 专委会成立前开展的相关学术活动



图 2 中日制剂与粒子设计研讨会（2006 年 5 月 15—16 日，沈阳）

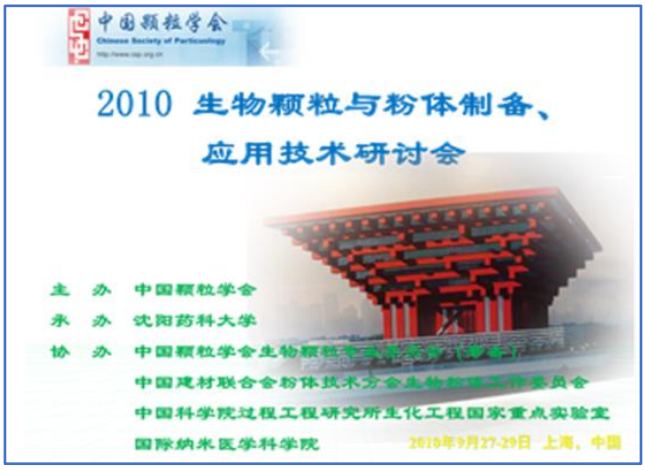


图 3 生物颗粒与粉体制备、应用技术研讨会暨筹备委员会会议（2010 年 9 月 27—29 日，上海）



图 4 第一届亚洲药物制剂科学与技术研讨会（2007 年 7 月 28—30 日，沈阳）

本委员会的前身为生物颗粒专业委员会。2012 年 6 月 26 日，专委会成立大会召开，挂靠单位设在沈阳药科大学；同年 6 月 28 日，经国家民政部正式批准成立。至此，一个聚焦粉体与颗粒技术在制药领域研究、生产和应用的专业化平台正式启航，也标志着我国药物制剂与粒子设计交叉学科建设迈出了坚实一步。



图 5 国家民政部批文和登记证书

早在 1996 年于清华大学召开的中日颗粒大会上，日本粉体工学会制剂与粒子设计专委会创始人川岛嘉明教授率领数十位日本药学领域代表参会。彼时，国内药学领域仅崔福德教授一人参加；此次参会源于崔教授在川岛教授研究室留学期间的报名与参与。可以说，当时我国药学领域的粉体研究尚处于萌芽阶段。川岛教授与中国颗粒学会创始人郭慕孙院士交谊深厚。经川岛教授引荐，崔福德教授得以与郭院士相识。郭院士殷切期望中国也能建立药物粉体相关专委会，并希望崔教授勇担重任，积极推动这一领域的

发展。2004 年，崔福德教授首次被聘为中国颗粒学会理事，并加入“颗粒制备与处理专委会”，由此开启了药学领域与中国颗粒学会的深度结缘。

“药物制剂与粒子设计专委会”的成立，离不开中国颗粒学会长期以来的大力支持与悉心帮助；专委会的发展壮大，也始终得益于中国颗粒学会的滋养、引领与领导。自成立以来，专委会坚持以服务国家医药事业的发展为己任，立足学科前沿，着眼产业需求，汇聚行业智慧，凝聚学术力量，在推动药物制剂与粒子设计领域学术进步、技术创新、成果转化和人才培养等方面作出了积极贡献，逐步发展成为国内具有重要影响力的学术交流与协同创新平台。

2 学术引擎：推动产学研融合的学术盛会

回顾发展历程，专委会始终与国家医药科技进步和产业升级同频共振。伴随着我国药学事业，特别是工业药剂学、创新制剂和高端制剂技术的不断发展，在崔福德教授等资深专家的倡导与引领下，专委会坚持产学研协同、理论联系实际的办会方向，积极搭建连接科研与产业、沟通理论与实践的高水平交流平台，不断拓展学术交流的广度与深度，持续提升服务行业发展的能力与水平。



图 6 第一届全国生物颗粒学术研讨会暨专委会工作会议（2013 年 9 月 21—22 日，乌鲁木齐）



图 7 第二届全国生物颗粒学术研讨会暨专委会工作会议（2015 年 12 月 5—7 日，广州）

多年来，专委会坚持以学术交流推动技术进步，以协同创新服务产业发展。自成立以来，专委会已先后举办七届全国性的药用颗粒制备与产业化应用技术学术研讨会。系列学术会议始终围绕工业药剂学、创新药物制剂研究等核心议题展开，紧扣领域发展趋势，聚焦行业共性问题，既展示基础研究的新进展，也回应工程实践中的关键需求，充分体现了专委会服务学术、服务产业、服务发展的责任担当。

会议	日期	地点	主办单位	承办单位	组织者	参会人数
第一届	2013年 9月21-22日	乌鲁木齐	生物颗粒专委会	沈阳药科大学 新疆医科大学	崔福德 高晓黎	98人
第二届	2015年 12月5-7日	广州	生物颗粒专委会	中山大学	吴传斌	105人
第三届	2017年 12月5-7日	苏州	生物颗粒专委会	苏州大学	陈晓东 崔京浩	296人
第四届	2019年 11月9-10日	深圳	生物颗粒专委会	沈阳药科大学 深圳新宜特 丹东百特	崔福德 刘海 董青云	431人
第五届	2022年 7月8-10日	长沙	药物制剂与粒子设计专委会	沈阳药科大学 CPEC PHEXCOM	崔福德	410人
第六届	2023年 10月27-29日	石家庄	药物制剂与粒子设计专委会	沈阳药科大学 深圳华溶	唐星 崔福德	430人
第七届	2025年 9月12-14日	沈阳	药物制剂与粒子设计专委会	沈阳药科大学 沈阳康百思	唐星 崔福德	400人

图 8 系列学术会议



图 9 历届学术会议

专委会的学术活动始终紧密围绕药物制剂与粒子设计领域的重要方向展开，交流内容涵盖药物制剂制备技术与工艺设计、药物及辅料粉体性质表征与评价、粉体技术在固体制剂中的应用、制剂实验设计与放大生产、现代制剂设备应用与开发、新型辅料开发与应用、制剂新剂型与新技术研究，及仿制药一致性评价中的粉体关键技术与共性问题等。上述内容贯通基础研究、工艺开发、装备应用和产业转化各环节，充分体现了专委会在推动学科交叉融合、促进技术集成创新方面的重要作用。



图 10 历届研讨会会场讨论、墙报及展台情况

3 协同共进：彰显服务行业发展的平台担当

专委会始终遵循“产、学、研合作，理论联系实际，研究为生产服务”的理念，不断加强国内外高校、研究机构与企业之间的学术和技术交流，为建设具有国内外影响力的学术平台作出了不懈努力。这一理念既是专委会发展的重要遵循，也是其不断成长壮大的内在动力。



图 11 专委会成员崔福德、胡富强、唐星、毛世瑞、王东凯等 10 位制剂专家赴日本参加 PLCM 研讨会，访问武田制药、岐阜药科大学和名城大学

围绕国家医药产业高质量发展的时代要求，专委会持续加强高校、科研院所与企业之间的学术与技术交流，积极搭建开放合作、优势互补、资源共享的高水平平台。在长期的发展过程中，专委会不仅成为广大专家学者开展学术对话、交流研究成果的重要平台，也成为推动成果转化、促进产业升级的重要纽带，充分彰显了我国药物制剂与粒子设计领域学术共同体的凝聚力、创新力和生命力。



图 12 专委会成员崔福德、吕万良、孙永达、唐星等 27 位制剂专家组成颗粒测试考察团，赴丹东百特仪器有限公司进行考察

多年来，在中国颗粒学会的领导下，在挂靠单位以及兄弟院校、科研院所和行业企业的大力支持下，专委会不断加强自身组织建设，凝聚了一批长期致力于药物制剂与颗粒技术研究的专家学者和行业骨干，逐步形成了优良的学术传统和鲜明的平台特色，为我国药物制剂与粒子设计事业持续发展奠定了坚实基础。



图 13 组织第十三届中国颗粒大会“医药粉体制备与物性表征培训”培训班（2024 年 10 月 25 日，苏州）

4 薪火相传：历届负责人与资深专家的引领和奉献

专委会的发展壮大和平台影响力的持续提升，凝结着一代又一代学科前辈、历届负责人和广大同仁的心血与智慧。正是在他们的共同推动下，专委会不断夯实组织基础，拓展学术领域，提升交流层次，逐步形成了特色鲜明、影响广泛的学术平台。

作为专委会首任创始主任委员，崔福德教授对专委会倾注了大量心血，以其深厚的学术造诣、严谨的治学精神和高尚的人格风范，为专委会的创建与发展奠定了坚实的基础，并通过持续推动高水平学术交流与合作，培养和带动了一批活跃在工业药剂学及制剂粒子领域的优秀科研工作者。其后，唐星教授接续使命，担任专委会主任委员。在其带领下，专委会以更加开阔的视野和更加务实的作风，进一步拓展学术交流的深度与广度，持续推动药物制剂与粒子设计领域的交叉融合与创新发展，进一步提升了专委会的学术凝聚力、组织影响力和行业号召力。



图 15 专委会首任创始主任委员崔福德教授和现任主任委员唐星教授

与此同时，专委会的发展也离不开一批一批资深专家的长期关心、积极参与和鼎力支持。吕万良、胡富强、吴传斌、常津、张振中、李范珠、何勤、吴伟等资深专家，长期深耕药物制剂、工业药剂学及相关交叉领域，在学科建设、学术交流、人才培养、技术推广和行业协同等方面做出了积极贡献。他们以深厚的学术积淀、宽广的专业视野和严谨务实的治学态度，为专委会学术方向的凝练、交流平台的建设和行业影响力的提升提供了重要支撑，也为专委会持续健康发展注入了深厚力量。



图 16 专委会资深专家：吕万良教授（北京大学），胡富强教授（浙江大学），吴传斌教授（暨南大学），常津教授（天津大学），崔福德教授（沈阳药科大学），张振中教授（郑州大学），李范珠教授（浙江中医药大学），何勤教授（四川大学），吴伟教授（复旦大学）



图 17 第五届全国药物制剂与粒子设计研讨会暨专委会工作会议（2022 年 7 月 8—10 日，长沙）

通过持续举办高质量学术会议、专题论坛和产学研对接活动，专委会不仅促进了新思想的碰撞、新成果的交流和新技术的推广，也为青年科技工作者成长成才创造了有利条件，为学科持续发展注入了源源不断的动力。薪火相传、接续奋斗，正是专委会不断前行、不断攀登的重要力量所在。



图 18 第十二届中国颗粒大会第十分会场（2022 年 4 月 22—23 日，海口）



图 19 第十三届中国颗粒大会药物制剂与粒子设计分会场（2024 年 10 月 26—28 日，苏州）

5 展望未来：奋楫笃行的崭新篇章

光阴荏苒，十余载奋楫笃行。抚今追昔，专委会的发展历程，是一部团结协作、开拓进取、砥砺前行的奋斗历程；也是一部顺应时代要求、服务行业发展、推动学科进步的奋进篇章。每一步成长、每一项成绩，都凝结着历届委员、广大专家学者以及业界同仁的智慧与汗水，凝聚着社会各界的关心与支持。

展望未来，站在新的历史起点上，药物制剂与粒子设计专业委员会肩负的使命更加光荣，责任更加重大。面对新药研发持续突破、制剂技术加速升级、医药制造向高端化、智能化、绿色化发展的新形势，专委会将继续秉承优良传统，坚守初心使命，进一步强化学术引领，深化协同创新，拓展国际交流，促进成果转化，服务产业升级，不断推动我国药物制剂与粒子设计领域迈向更高水平，为健康中国建设和医药强国发展作出新的更大贡献。

值此纪念之际，谨向所有关心、支持和参与中国颗粒学会药物制剂与粒子设计专业委员会建设与发展的各位领导、专家学者、委员同志及合作单位，致以崇高的敬意和诚挚的感谢！

大道同行，初心如磐；继往开来，未来可期。中国颗粒学会药物制剂与粒子设计专业委员会必将在新的征程上赓续荣光、再谱华章。

薪火传颗粒，能源启新程

——能源颗粒材料专业委员会发展纪念

魏飞[1]，张强[1]，黄佳琦[2]，程新兵[3]

1. 清华大学；2. 北京理工大学；3. 东南大学

时序轮转，薪火相传。在中华民族迈向能源转型与科技自立的壮阔征程中，中国颗粒学会已走过四十载峥嵘岁月，深耕颗粒科学领域，汇聚四方英才，推动我国颗粒技术从跟跑到并跑、领跑的跨越式发展。作为学会大家庭中专注于能源领域的重要力量，中国颗粒学会能源颗粒材料专业委员会（以下简称“专委会”）自 2012 年正式成立以来，承载着行业期盼，凝聚着科研智慧，在能源颗粒材料的科研探索、学术交流与产业转化之路中稳步前行，书写了一段扎根领域、赋能发展的奋斗篇章，为学会四十周年华诞献上了一份厚重的答卷。

能源是国之命脉，高效的能源储存与转化是当代社会面临的重大课题，而颗粒材料凭借其高比表面积、多级结构的独特优势，成为破解这一课题的关键抓手。在这一时代背景下，深耕能源颗粒材料领域的苏党生研究员与魏飞教授，以敏锐的行业洞察力和推动领域发展的责任担当，成为专委会发起筹备的核心引领者。在两位教授的倡议与引领下，首届能源颗粒材料技术研讨会暨《能源颗粒材料专业委员会》筹委会会议于 2011 年 10 月 12 日在乌鲁木齐隆重召开。来自全国各地的科研同仁齐聚一堂，共同探讨能源颗粒材料领域的发展前景，正式启动专委会的筹备工作。此后 8 个多月，苏党生、魏飞两位教授牵头统筹，多方协调，广泛吸纳行业优秀人才，细化筹备方案、明确发展定位，在各界同仁的共同助力下，专委会于 2012 年 6 月 26 日正式成立，从此开启了能源颗粒材料领域系统化、规范化发展的新征程。





成立之初，专委会便明确了自身使命——聚集全国从事能源颗粒材料研究开发与工业应用的优秀科技人员，搭建学术交流、产学研融合、人才培育的桥梁，推动我国能源颗粒材料技术的创新突破与产业升级。从诞生之日起，专委会就立足行业前沿，精准界定服务领域，涵盖了一切可进行能量储存、转化及释放的颗粒材料，形成了三大核心领域的全覆盖：含能固体材料、能源转化与储存颗粒材料、催化能源转化材料。这些领域的布局，既贴合国家能源战略需求，也精准把握了行业发展趋势，为专委会的长远发展奠定了坚实基础。专委会的稳步发展，离不开强大的支撑力量与高效的组织保障。成立以来，专委会始终得到清华大学、中科院过程所、中科院物理所、中科院金属所、广州大学、东南大学以及英国伯明翰大学等中外顶尖院校与科研机构的鼎力支持，这些支撑单位凭借深厚的科研积累、顶尖的人才团队与先进的实验平台，为专委会的学术活动、科研攻关、人才培育提供了有力保障，推动专委会在科研创新与产业转化中不断突破。

专委会精心打造了一系列品牌会议，构建起多层次、高水平的学术交流平台。全国碳催化学术会议汇聚碳催化领域顶尖专家学者，围绕石墨烯材料、碳基催化剂、二氧化碳转化等前沿方向深入研讨，推动碳催化技术的创新突破与成果分享；中国锂硫电池年会聚焦锂硫电池领域的技术难题与发展趋势，搭建产学研对接桥梁，助力锂硫电池技术从实验室走向产业化；由清华大学主办的国际期刊《Carbon Future》，自 2023 年创刊以来，聚焦碳材料、碳催化、低碳能源等领域，打造多学科融合的国际学术交流平台，助力我国在碳领域的学术影响力提升。这些品牌会议与学术期刊，共同构成专委会学术交流的核心载体，推动行业知识共享、技术互通，助力我国能源颗粒材料研究与国际接轨。



看今朝，硕果累累，砥砺前行向未来。历经十余载深耕细作，专委会已成为我国能源颗粒材料领域最具影响力的学术组织之一，聚集了一批行业内的优秀科技人员，推动我国能源颗粒材料的研究与应用跻身国际先进行列。在专委会的推动下，我国在能源颗粒材料领域取得了一系列开创性成果，不仅为国民经济发展作出了巨大贡献，获得了国家各类奖励，更在国际学术界占据了重要地位——从碳基催化剂的定向设计到锂硫电池的性能突破，从生物质颗粒的高效利用到新能源器件的迭代升级，每一项成果的取得，都凝聚着专委会同仁的心血与智慧，彰显着我国能源颗粒材料领域的创新实力。

值此中国颗粒学会成立四十周年之际，回望专委会十余载的发展历程，我们心潮澎湃、倍感自豪。从发起筹备到正式成立，从搭建平台到成果丰硕，专委会的每一步成长，都离不开中国颗粒学会的悉心指导，离不开各支撑单位的鼎力支持，离不开全体同仁的并肩奋斗。四十载风华正茂，新征程催人奋进。站在学会 40 周年的历史节点上，专委会将继续传承学会的优良传统，坚守赋能能源转型、推动科技自立的初心使命，进一步加强学术交流、深化产学研融合、培育专业人才、推动成果转化，聚焦能源颗粒材料领域的前沿课题，攻坚克难、锐意进取，努力推动我国能源颗粒材料技术实现更高水平的突破，为我国新能源产业发展、“双碳”目标实现以及科技强国建设贡献更大力量。

追光逐泡，砥砺前行

——微纳气泡专业委员会成立与发展纪实

李攀
同济大学

时光如梭。在中国颗粒学会成立四十周年之际，也是中国颗粒学会微纳气泡专业委员会（简称“专委会”）成立的第九个年头，回顾专委会留下的一个个脚印，心中满满的感慨。纳米气泡，这个在 20 多年前还处于学术争论中心的“神秘现象”，如今已在中国这片沃土上生根发芽，结合微米气泡已经形成了微纳米气泡技术领域，并逐渐成长为一个跨学科的底层技术、一个充满活力的产业高地。

1 缘起：一份执着与一次相聚

专委会的成立，并非一蹴而就，背后是多位学者对学科发展的深邃思考与不懈奔走。我至今清晰地记得 2017 年的冬天，李兆军老师专程来到同济大学找我。彼时，他满怀热忱地提出，微纳米气泡技术在国内被很多领域的学者和产业所关注，许多科研人员已有相当的积累，迫切需要成立一个专门的协会或学会，为科研人员与企业搭建交流平台。

在当时的背景下，单独成立一个全国性的学会面临着诸多程序上的困难。在深入探讨后，我们意识到气泡本质上也是颗粒的一种，这种跨学科的属性使其与中国颗粒学会的研究范畴高度契合。随后，我们去拜访了中国科学院应用物理研究所的胡钧老师，胡老师团队在国际上首篇发表了纳米气泡原子力显微镜（AFM）图像，作为学科带头人是最合适的。而且彼时胡老师团队已经和国际上的界面纳米气泡研究者组织了几次国际研讨会，也正有意在国内建立我们的组织。这样的不谋而合，立刻促成了 2018 年在中国颗粒学会旗下成立微纳气泡专业委员会的决定。这不仅为微纳气泡找到了“家”，更标志着该领域正式进入了国家级学术组织的视野。

2 破土：从苏州起航的学术梦想

2018 年是专委会的“元年”。

7 月 12 日，专委会筹备会在上海光源召开，确定了组织的骨干成员与发展宗旨。

10 月 16 日至 19 日，“2018 纳米气泡、纳米液滴及其应用国际会议（NANOBUBBLE 2018）”在苏州成功举办，多位国际标准化组织（ISO）专家见证了这一时刻。

10 月 18 日，中国颗粒学会微纳气泡专业委员会正式宣告成立。首届委员会推举胡钧研究员担任主任委员，李兆军研究员担任总干事，张立娟研究员等担任副总干事，并吸纳了首批 97 名委员。我印象最深刻的是，10 月 18 日恰好是我的生日，冥冥中我和微纳米气泡的缘分又加深了一层。那天我收到了参会同仁们热烈的生日祝福，此刻脑海中再次闪现吹蜡烛的那一刻，幸福感涌上心头。



图 1 2018 年 10 月 18 日中国颗粒学会微纳气泡专业委员会成立

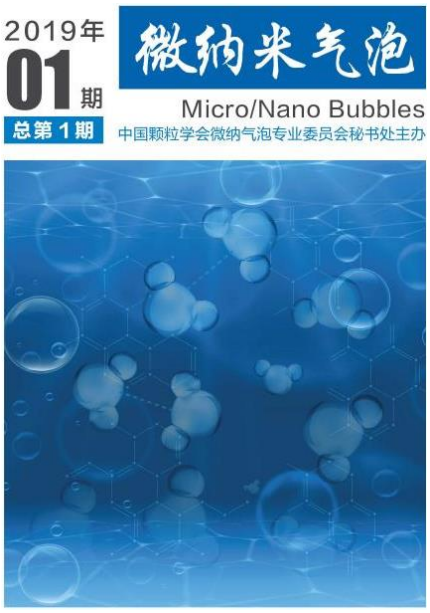
3 耕耘：大事记中的成长印记（2019—2025 年）

自 2019 年正式运作以来，专委会坚持每年举办年会，或是依托中国颗粒大会设立分会场，或是独立召开全国微纳气泡大会。参会人数从最初的百余人逐年攀升，学术质量与产业影响力日益增强。

3.1 初步探索与体制建立（2019—2020 年）

2019 年 9 月：在杭州举办了第一届专委会年会，规模达 136 人。此次会议的亮点在于不仅有深厚的学术报告，还特别设立了企业家论坛，初步彰显了产学研结合的底色。同年，专委会创办了内部刊物《微纳米气泡》，为行业内部交流提供了阵地。

2020 年 10 月：专委会依托在厦门举行的中国颗粒大会举办了第二届年会。尽管面临外部环境挑战，专委会仍然积极地组织了《净水技术》微纳气泡专刊，推动了技术的社会认知。



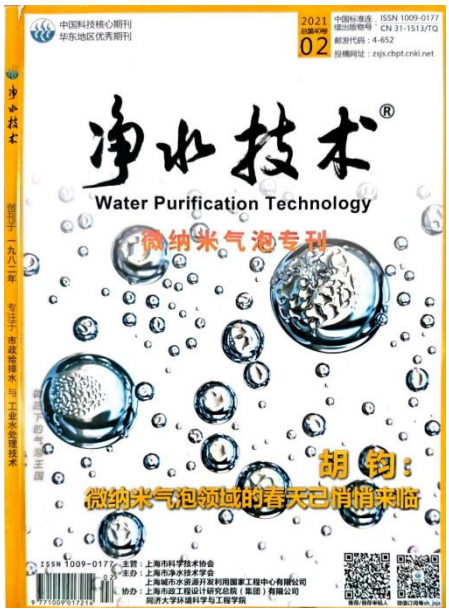


图 2 专委会内部刊物（左）和《净水技术》专刊（右）

3.2 规模突破与社会认可（2021—2022 年）

2021 年 10 月：在常州举办了第三届年会，参会规模跃升至 250 人。这一时期，会员人数快速增长，企业会员的积极性显著提高。

2022 年：这是专委会硕果累累的一年。

学术声誉：胡钧老师当选第八届中国颗粒学会副理事长。

荣誉加身：专委会组织的“微纳米气泡技术及其应用”项目荣获中国发明协会发明创业成果奖一等奖，并被鉴定为重要科学技术成果。

国际视野：成功举办“2022 微纳气泡-等离子体国际线上研讨会（ISPFB）”，吸引了中、泰、日、加、美、英等多国专家参与。

3.3 赋能产业与理论集成（2023—2025 年）

组织会议：2023 年 4 月在海口中国颗粒大会设立第七分会场；12 月在四川大邑召开第五届年会，主题为“上善若水、小气泡赋能乡村振兴”，深入探讨技术在农业种植、土壤改良和乡村振兴中的落地应用。

科普创新：自 2024 年起组织“微纳气泡读书会”，每月两期，通过线上平台加强了基础理论与应用案例的传播，浏览量达数万人次。

理论里程碑：2025 年 11 月，由专委会骨干成员张立娟、李攀、许萧、杨芳等专家主编的学术专著《微纳米气泡：科学、技术与应用》由化学工业出版社正式出版。 这是国内该领域第一本系统性的学术专著，全面总结了微纳米气泡在水环境、生物医学、绿色清洗等领域的最新研究成果，填补了国内空白。

领域拓展：2025 年 11 月在大连召开第二届全国微纳气泡大会，主题转向“赋能生物医学、大健康研究与产业发展”。参会代表中企业界人士占比显著，充分体现了产学研深度融合的特色。

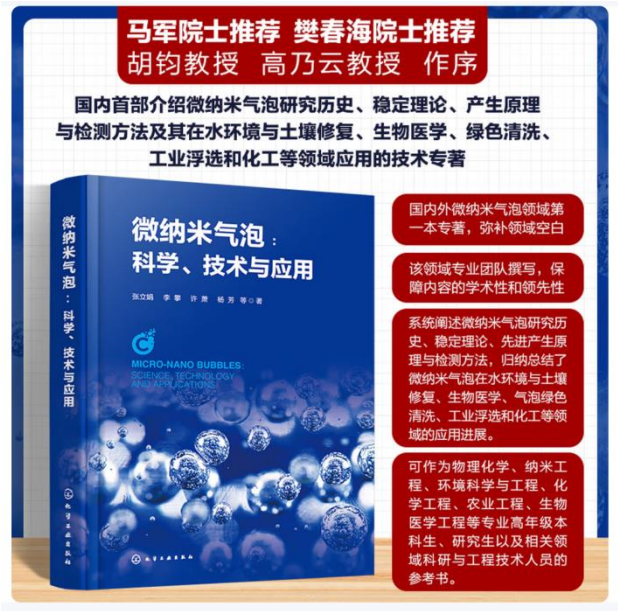


图 3 《微纳米气泡：科学、技术与应用》出版

4 核心特色：产学研的深度融合与企业热忱

在撰写这篇文章时，我一直在思考专委会最具生命力的地方在哪里。我想这个答案是不言而喻的：极高的企业参与积极性与明显的产学研特色。

专委会目前已发展会员近 800 名，其中企业会员约占 30%，涵盖了 180 余家单位，为了让科研成果真正落地，我们先后组织专委会成员到企业参观交流，并推荐了多个技术示范，涵盖了从设备生产到滇池治理、黑臭水体修复、工业废水高级氧化、氢健康、精密清洗及现代农业等多个维度。这种示范引领－企业主体－学术支撑的模式，引导微纳米气泡技术在农业增产、花卉保鲜乃至癌症辅助治疗等各个领域展现出巨大的应用潜力。

此外，专委会积极参与国家与国际标准制定，已发布多项关于术语，测量通则的国家标准。此外，在李兆军和周兰老老师的带领下，柳姝、杨芳、李攀等多位专家主导多项国际标准的研制。我们国家在 ISOTC281 标准体系中已经占据了重要的一席之地，显著提升了中国在该领域的国际话语权。

5 耕耘：张立娟总干事与专委会的跨越式发展

正如胡钧老师在《净水技术》微纳米气泡专刊的致刊词中所言：“微纳米气泡领域的春天已悄悄来临”。胡老师作为专委会主任这些年来为专委会领航，提出微纳米气泡技术是“次底层技术”，引领着我们在各个领域勇敢拓展技术交叉应用。

此外，对于专委会过去近十年的蓬勃发展，我们必须由衷地感谢一个人，她就是我们的张立娟研究员，她在担任总干事期间做了大量艰苦细致的工作。她亲力亲为地张罗每一年的年会，精心策划每一期学术专刊，并组织了每一期“微纳气泡读书会”。正是因为她的辛勤耕耘，专委会才建立起如此规范的运行机制和活跃的学术氛围。张老师最近身体不佳，我也在这里代表专委会全体委员预祝她早日康复，期待她能继续指导我们的工作。

未来，我们将继续深化组织建设，吸纳更多中青年骨干加入；我们将推动《微纳米气泡：小气泡大能量》系列科普丛书的出版，让更多人了解这一小气泡背后的大能量；我们将进一步加强国际合作，让中国方案在国际舞台上发出更响亮的声音。

专委会从苏州的一粒种子，成长为今天遍布全国的繁茂森林，离不开李兆军老师的播种，胡钧老师的引航，更离不开张立娟老师这位大管家的辛勤耕耘。让我们继续团结协作，共同开创微纳气泡事业下一个更加辉煌的十年！

从空气浮尘到吸入药物的星“尘”大海
——吸入颗粒专业委员会发展纪略

邵奇[1]，王晓飞[2]，栾瀚森[3]，毛世瑞[4]
1. 上海上药信谊药厂有限公司；2. 江苏德迈药业有限公司上海分公司；
3. 和妍（上海）医疗器械有限公司；4. 沈阳药科大学

2013 年 11 月 18 日，南京。金秋的古城迎来了一场特殊的聚会——一群怀揣共同理想的吸入药物研究者和企业家们相聚于此，共同见证了一个民间公益组织的诞生：“全国吸入给药联盟”（Inhalation Drug Delivery Association, IDDA）正式成立。联盟由五位吸入药学和医学相关的专家发起提议，成员涵盖吸入药品研发、质量监测、生产企业、高校院所以及临床呼吸科的专家、学者。

彼时，中国的吸入给药行业方兴未艾，国产吸入药占比仅有 13.8%。进口产品占据主导地位的市场格局，让每一位从业者都感受到了肩头的重任。联盟的成立，如同在茫茫大海上点亮了一盏航灯——它通过动员国内药物研究、药品生产、质量监控和临床应用等资源，积极推动吸入给药行业在中国的整体发展。





1 初生：联盟时代的探索与积淀（2013—2017 年）

联盟成立之初，便以学术为纽带，以产业为依托，迅速展开了富有成效的工作。从 2014 年 10 月 17—19 日，第二届“全国吸入给药联盟学术论坛”在南京中医药大学丰盛健康楼学术报告厅隆重举行。来自国内外相关行业的高等院校专家学者齐聚一堂，围绕着吸入制剂法规与技术展开深入研讨。中外专家深入探讨了该领域的工业技术与市场前景，与会专家指出：在我国吸入剂市场被进口产品占主导的当下，本土企业必须奋起直

追。此后数年，联盟持续汇聚来自药品研发与生产企业、高校院所的专业力量，每一次思想的碰撞，都在为中国吸入给药事业的土壤播下希望的种子。







2 蜕变：加入学会与身份升华（2018—2019 年）

2018 年，是值得铭记的转折之年。这一年，吸入给药联盟正式加入中国颗粒学会，中国颗粒学会吸入颗粒专业委员会应运而生。从民间公益组织到国家级学会下设的专业委员会，这不仅是身份的蜕变，更是使命的升华。

2019 年，专委会正式完成更名组建。专委会以国家政府机关制定的相关药品法律法规政策为导向，以推进中国吸入给药行业的发展，提高国内吸入药物的研发、产品技术标准和临床应用，加快与国际同行业接轨作为创建目标。

在组织架构上，专委会汇聚了领域内顶尖力量——名誉主任游一中、陈育智，主任毛世瑞，副主任沈丹蕾、王兆霖、侯曙光、李铁军、栾瀚森，委员阵容同样强大，涵盖陈永奇、寸冬梅、顾宇彤、郭立玮、贺晴、李劲松、李励、李旗、廖永红、钱卿、谭文、佟振博、王健、王震宇、吴传斌、徐坚、杨劲、叶晓芬、张海飞、张慧、张凯、郑恒、周薇等二十余位来自产学研各界的专家学者，秘书邵奇、王晓飞。专委会的研究领域涵盖吸入颗粒的理论研究及工程化技术、递送及流体力学、制剂研发与产业化、体内外评价以及临床研究与应用等五大方向。

自此，“吸入颗粒专业委员会”的名字开始出现在国内外的学术舞台上。



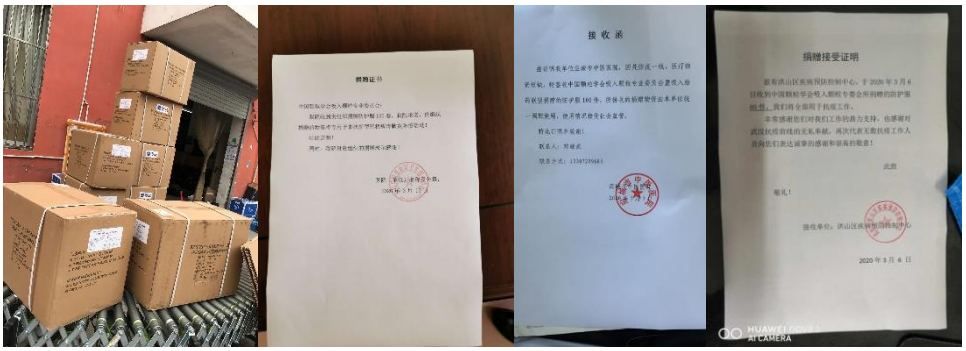




3 担当：疫情中的温暖力量（2020 年）

2020 年，新冠疫情突袭。在举国抗疫的关键时刻，专委会没有缺席。专委会多次通过网络会议商讨援助事宜。由副主任委员沈丹蕾牵头，筹集 48 000 元用于抗疫物资采购。这份来自吸入颗粒领域科技工作者的温暖，穿越了疫情的阴霾，送达湖北多家医院。学术之外，他们用行动诠释了“科技工作者之家”的担当。同年 10 月，中国颗粒学会第

十一届学术年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会在厦门盛大开幕，专委会成员积极参与其中。



4 奋进：学术繁荣的新篇章（2021—2023 年）

2021 年 6 月 25 日至 27 日，第六届学术研讨会在成都召开。开幕式上，中国工程院院士作主旨演讲。四川大学华西医院王刚教授、温州医科大学赵应征教授、中国科学院上海药物研究所张继稳研究员等顶尖学者云集。从支气管哮喘的异质性到鼻腔药物递送系统进展，从 FDA/EMA 吸入制剂体外分析方法的技术要求到经口鼻递送药物装置的研发现状，从肺部吸入疫苗的研究进展到 505（b）（2）吸入制剂的临床开发案例分析——每一个报告都是一次前沿的叩问，每一场讨论都是一次智慧的激荡。

2023 年 4 月 21 日至 24 日，第十二届中国颗粒大会在海南省海口市隆重举办。专委会组织了“吸入递送与疾病治疗”分会场，毛世瑞教授作了题为《疾病状态对肺部吸入粒子体内命运的影响》的主题报告。





5 国际化：迈向世界舞台（2024 年）

2024 年 7 月 4 日至 6 日，第三届吸入药物递送国际学术研讨会在沈阳盛大召开。这场由专委会与沈阳药科大学共同主办的盛会，吸引了来自中国、美国、日本、加拿大的 300 余名吸入药物领域产、学、研、医、管等前沿领域的专家学者、制药企业高管及科研

人员、高校研究生。

加拿大皇家科学院、加拿大国家工程院院士祝京旭以《颗粒学与创新吸入药物递送的思考与展望》为题作主题报告。中国颗粒学会秘书长王体壮在致辞中，对专委会在学术交流建设、吸入用包装材料、吸入制剂质量标准和指导原则的起草与修订、公共健康宣传等方面的突出贡献给予了充分肯定。沈阳药科大学校长程卯生表示，希望以此次论坛成功举办为契机，进一步加强与国内外同行的密切交流与合作。



6 回归：初心不忘再出发（2025 年）

专委会主任毛世瑞在开幕致辞中回顾了专委会成立的历史与意义，表示此次论坛具有“政、产、学、研、用”高度融合的特色。名誉主任游一中通过线上连线致辞，寄语同仁“专心搞创新、专心搞科普”，期望会议有力促进我国吸入制剂创新，推动产业高质量发展。

同年 10 月 24—28 日，第十三届中国颗粒大会在苏州召开，专委会组织了“吸入药物颗粒递送的前沿技术和进展”分会场。闭幕式上，副主任委员沈丹蕾代表吸入专委会承接了 2026 年第十四届中国颗粒大会的举办。

2025 年 10 月 30 日—11 月 2 日，第四届学术研讨会回到南京——这座孕育了吸入给药联盟的城市。会议由专委会与南京师范大学共同主办，南京师范大学能源与机械工程学院作为主要组织实施单位。开幕式由专委会主席毛世瑞教授主持。会议议题涵盖吸入与鼻腔制剂新装置与新技术、制剂工艺优化与质量评价、体内外相关性与评价方法、标准法规与临床转化等热点方向。南京师范大学两名研究生凭借在雾化吸入递送机制和吸入溶液关键参数测量方面的创新研究荣获“优秀墙报”——薪火相传，后继有人。



7 展望：星辰大海再启航（2026 年）

2026 年，第十四届中国颗粒大会将由吸入颗粒专业委员会承办，在广州白云国际会议中心举行。从南京到成都，从沈阳到广州，专委会的足迹正在绘制一幅愈发宏阔的学术版图。

结语

十余年风雨兼程，从一粒微尘到星辰大海，中国颗粒学会吸入颗粒专业委员会见证并推动了中国吸入给药行业从起步到蓬勃发展的历程。正如游一中教授所言，希望中国吸入药物蓬勃发展，惠及更多患者。这正是所有吸入颗粒人共同的初心与远方。

发光颗粒专业委员会发展历程

曾海波
南京理工大学

人类很早就注意到存在于自然界中的发光颗粒，从 17 世纪起人们就已经开始了有关发光现象的科学研究，并逐步了解发光的种类、发光的基本物理过程及应用。为了进一步团结全国从事该研究和技术领域的科学工作者，并搭建一个学术、高新技术、信息和人才交流的平台，以有效推动我国发光颗粒领域的科技创新与高新产业发展，助力中国制造业升级，由南京理工大学曾海波教授发起，在彭笑刚、陈学元、解荣军、金一政、宋宏伟、伍志鲲、杨柏、臧双全教授等的支持下，于 2019 年拟筹建发光颗粒专委会（以下简称“专委会”）。





随后，专委会主要成员于 2020 年中国颗粒大会上参与组织了“发光颗粒照亮未来”分会场，同时召开了专委会筹备会议。专委会拟聘主任、副主任及委员悉数到场，共商专委会建设方案、建设特色、建设重点等事宜。组织的分会场吸引了来自全国各地相关领域的专家学者及学生一百多人。随后在 2022 年 5 月 16 日学会的常务理事会上，由专委会发起人曾海波汇报，全体副主任委员和部分委员线上参与，进行成立答辩汇报。经全体投票后，同意发光颗粒专委会的成立。由于疫情的影响，原本计划在 2022 年召开的成立大会延期至 2023 年，可以说发光颗粒专委会是在疫情中成长起来的，但大家的热情并没有因为疫情而受到影响。在 2023 年初专委会还在南京参与了未来颗粒论坛的分会场组织工作，为青年颗粒人才的交流与培养提供了平台。




2023 年 4 月 22 日，随着第十二届中国颗粒大会在海口召开，发光颗粒专委会成立大会也如期举行。期间学会理事长朱庆山研究员，秘书长王体壮出席成立大会，朱庆山理事长致辞并为专委会授牌，同时为出席会议的专委会副主任委员和委员颁发聘书。随后，与会专家进一步讨论完善了发光颗粒专委会建设方案，总干事夏志国教授做了学会各类奖项的介绍和申报动员。大会期间，专委会同期组织了“发光颗粒照亮未来”分论坛，推开疫情的阴霾，发光颗粒同仁们踊跃参会、热情报告、激烈讨论，近一百人参加了此次会议。







随后，在王体壮秘书长、曾海波主任、彭笑刚教授的共同推动下，由学会牵头、发光颗粒专委会和浙江大学共同参与，开始承接“中国量子点大会”的组织工作，并于 2024 年第一次召开。量子点材料是主要发光颗粒之一，大会面向量子点领域前沿、热点发展方向，汇集学术界和工业界顶尖知名专家，分享最新科研成果，探讨技术前沿，以促进量子点领域的理论研究和工业应用。大会吸引了全国各地六百余位专家学者，包括

江雷、唐智勇、吴骊珠院士等。同时大会还设置了圆桌论坛，同期召开了量子点产业联盟筹备会议，就联盟工作办法草案和相关国家标准制定等事宜进行讨论，并举行了量子点产业联盟筹委会成立仪式。





发光颗粒专委会及相关专家学者的队伍在不断扩大，承办的活动也越来越丰富，影响力也在不断增强。相信在学会和各位专家学者的支持下，专委会能得到更快的成长，展现领域魅力，持续照亮未来！

砥砺十三载，聚沙成平台

——颗粒计算专业委员会成立回顾

王利民[1]，季顺迎[2]

1. 中国科学院 过程工程研究所；2. 大连理工大学

在波澜壮阔的科学与工程数字化浪潮中，颗粒计算作为连接微观机理与宏观现象的桥梁，正发挥着越来越不可替代的作用。2025 年 5 月，第一届全国颗粒计算学术会议暨中国颗粒学会颗粒计算专业委员会成立大会在兰州隆重召开。这标志着我国颗粒计算领域终于有了属于自己的“学术家园”。

任何一个学术共同体的破茧成蝶，都绝非朝夕之功。回望这条跨越十三年的筹建之路，是一部充满热忱、坚持与智慧的开拓历程。

1 溯源：张家界发轫，群星共启征程

一切的缘起，要追溯到 2012 年在湖南张家界举办的首届“颗粒材料计算力学会议”（李锡夔教授与冯云田教授担任会议主席，谭援强教授与季顺迎教授任执行主席）。这场由中国力学学会计算力学专委会主办，大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室与湘潭大学化工过程模拟与强化国家地方联合工程中心共同组织的会议，获得了国家 973 项目“重大工程地质灾害的预测理论及数字分析方法研究”的大力支持。在大连理工大学李锡夔教授、英国斯旺西大学冯云田教授、大连理工大学季顺迎教授以及清华大学孙其诚教授等老师们的推动下，首次将国内分散在力学、物理、岩土、化工、冶金、机械、农业、水利和环境等各领域，从事颗粒材料计算方向的科技工作者们凝聚在了一起，主要聚焦颗粒材料计算力学的基本理论、离散单元模型、高性能数值计算及多尺度方法等前沿领域展开交流。

自此，这颗植根于学术交流的种子开始发芽。会议确立了每两年举办一次的惯例：2014 年第二届在兰州大学举办（周又和院士与李锡夔教授担任会议主席，黄宁教授与季顺迎教授任执行主席）；2016 年第三届回到大连理工大学（王光谦院士担任会议主席，孙其诚教授与季顺迎教授任执行主席），并与第七届国际离散元会议成功联合举办；第四届在华侨大学举办（徐西鹏教授和李锡夔教授担任大会主席，谭援强教授与季顺迎教授任执行主席）。这一系列会议为日后的专委会成立储备了最坚实的人才基础与学术认同。

2 转折：珞珈山餐叙，跨界发展的星火

受疫情影响，原定于 2020 年举办的第五届颗粒材料计算力学会议延期至 2021 年 3 月底在武汉大学艰难却成功地举办（周伟教授和李锡夔教授担任会议主席，楚锡华教授与季顺迎教授任执行主席）。正是这次会议，成为了专委会成立的“关键转折点”。在珞珈山的大会餐叙上，与会专家们谈及未来发展：彼时，“颗粒材料计算力学专业组”仅仅是挂靠在中国力学学会计算力学专委会下的一个工作组。大家高瞻远瞩地提出一个设想：“既然我们都从事颗粒材料计算相关研究，能否在中国颗粒学会，申请成立一个颗粒计算专业委员会？”

这个极具前瞻性的提议，立刻得到了在场学者的共鸣。由于中国颗粒学会挂靠在中国科学院过程工程研究所，与会的中国科学院过程工程研究所葛蔚研究员和王利民研究员也在中国颗粒学会任职，与中国颗粒学会秘书处熟悉。回京后便向中国颗粒学会秘书处沟通了成立专业委员会的流程和相关材料。

3 筹备：一波三折，矢志不渝的推动

理想很丰满，现实却充满挑战。葛蔚和王利民研究员向刚刚接任中国颗粒学会秘书长的王体壮博士汇报了成立专委会的想法。王体壮秘书长认为这是一个极好的契机，但也坦陈了难度——相关专业议题应属于颗粒学相关的科学前沿、国家重大需求、国民经济主战场或人民生命健康领域，能团结一批国内外领军的专家和学者，能提供科技工作者服务的相关服务和产品，并能为颗粒学科发展贡献力量。因为流程和材料要求严格，事情一度搁置。直到 2023 年的一个清晨，葛蔚和王利民在过程工程所食堂吃早餐时，偶然遇到了王体壮秘书长。三人再次深谈，这次交流彻底点燃了筹备工作的引擎，王体壮秘书长的信心大增，表示全力支持专委会的筹备工作。

随后，葛蔚和王利民研究员立刻与大连理工大学季顺迎教授、中国科学院力学研究所的刘传奇研究员等核心骨干取得联系，开始撰写详实的申请报告与论证 PPT。为了凝聚共识、展示筹备决心和组织实力，2023 年 11 月，来自清华、北大、中科院、大连理工、香港科大及十沣科技、中望龙腾等 29 家顶尖科研院所与企业的专家相关专家在千岛湖召开了“高性能离散元计算分析软件研发研讨会”。这场由浙江大学赵永志教授组织的会议，王体壮秘书长受邀出席，真切感受到了颗粒计算群体对高规格学术平台的迫切渴求与强大活力。

经过紧锣密鼓地材料准备和反复修改，季顺迎教授亲自向中国颗粒学会常务理事会汇报。内容包括颗粒材料计算问题的广泛性、颗粒材料计算的多元性、颗粒计算问题的共性难题、颗粒计算学科的交叉性、颗粒计算软件的发展、自研软件的卡脖子问题、专委会的学术组织定位、学科发展方向、专委会成立后的业务范围和任务、已经组织的学术活动、撰写的学术专刊和图书以及专委会成立后的工作计划，与会常务理事经过咨询和讨论，一致投票同意成立筹备组。2024 年 1 月 31 日，中国颗粒学会正式下发《关于同意“中国颗粒学会颗粒计算专业委员会”进入筹建阶段的批复》。批复明确：专委会进入为期一年的筹建阶段，筹建期满后需提交详细工作报告，由常务理事会进行最终表决。

4 筹建：用实力说话，交出亮眼答卷

“进入筹建阶段”意味着拿到了入场券，但也面临着为期一年的严格考核。根据批复要求，筹建组必须定期向学会组织工作委员会汇报进展。

从 2020 年开始，王利民和季顺迎等老师们就一直积极参与第十一届和第十二届中国颗粒大会的组织工作，对于学术议题、学术号召力和凝聚力相当有信心。在 2024 年这一年的筹建期内，专委会筹建组没有丝毫懈怠。第十三届中国颗粒大会上组织了“颗粒计算”及“多相反应流理论及建模”2 个分会场。在这次大会上，颗粒计算分会场的参会人数最多、气氛最热烈，连续斩获“优秀分会场”荣誉。筹备组于 2024 年 5 月 31 日—6 月 3 日组织了第七届全国颗粒材料计算力学会议暨第四届计算颗粒技术国际研讨。大会以“颗粒材料计算力学与工程科技前沿”为主题，设置了 13 场大会主报告和 7 个分会场报告，吸引了来自国内外 600 余位的专家学者们汇聚一堂，共同探讨颗粒材料的力学理论、计算分析、软件开发及工程应用等领域的关键问题和技术难点。筹备组织核心专家们 2024 年 4 月 9 日、7 月 4 日及 8 月 8 日，“多相流技术在化工行业的创新应用”“国产多相流仿真前沿技术及应用”“多相流仿真技术研究及工程应用”网络会议在中国颗粒学会视频号线上直播。本系列直播全面展示了国产软件在多相流仿真领域的前沿发展，为工程师和研究人员提供了宝贵的交流平台，有助于他们更好地理解和应用这些先进工具。2024 年 8 月 16—18 日，2024 年 OpenFOAM 多相流基础培训在北京市中国科学院过程工程研究所成功举办。通过三天的紧张学习，学员们纷纷表示收获颇丰，不仅掌握了 OpenFOAM 的基本操作技能，还深入了解了多相流模拟的前沿知识和研究方法，推动了 CFD 技术在各个领域的应用与发展，也为培养更多高素质 的 CFD 人才贡献了

力量。这份从国际学术交流、全国学术交流、国产软件培训和软件实操培训等亮眼的 “筹建成绩单”，不仅严格执行了批复中的要求，更彻底打消了学会常务理事们的顾虑，为最终的“转正”铺平了道路。

5 破茧：兰州立帜，共赴广阔未来

筹建工作圆满完成后，学会常务理事会对报告进行了全面审查。2025 年初，经中国颗粒学会常务理事会最终表决，专委会正式获准成立。2025 年 5 月 23—25 日，第一届全国颗粒计算学术会议（PC-2025）暨中国颗粒学会颗粒计算专业委员会成立大会在兰州市顺利举办。本届会议由中国颗粒学会颗粒计算专业委员会主办，中国力学学会计算力学专业委员会颗粒材料计算力学专业组联合主办，兰州大学承办，并由中国科学院过程工程研究所介科学与工程全国重点实验室、真空技术与物理国家级重点实验室、大连理工大学工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室、中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室、大连理工大学-白俄罗斯国立大学科研创新中心、《力学学报》《计算力学学报》共同协办。本届会议以“智能时代与颗粒计算”为主题，聚焦颗粒计算的理论模型、计算方法与软件开发、工程应用和相关科学问题，开展广泛的学术交流和讨论。本届会议共邀请了 9 个大会报告，并围绕 5 个学术议题设置了 232 个分会报告及 4 场软件培训，同期中国颗粒学会颗粒计算专业委员会正式宣告成立，吸引了来自全国颗粒计算领域知名科研院所、高等院校和企事业单位的近 400 名相关专家学者和青年学生参会。本届会议聚焦颗粒计算的理论模型、计算方法与软件开发、工程应用和相关科学问题，为学术界和工业界提供了交流平台，促进基础理论与应用技术的突破，推动材料、能源、环境、制造等跨学科领域的创新发展，同时也为青年科技工作者提供了展示与学习的机会，有力地促进了颗粒计算领域青年人才的成长。

在此次大会上，中国颗粒学会颗粒计算专业委员会正式宣告成立。新生的专委会架构清晰、力量雄厚：秘书处设大连理工大学。第一届专委会汇聚了 114 名委员与 9 名学术顾问委员。其中，季顺迎担任主任委员，王利民、赵吉东、赵永志、谭援强、叶晓燕、周公旦担任副主任委员，刘传奇任总干事，薛琨、许文祥、马刚、张浩、熊清蓉、陈锡忠担任副总干事。专委会的服务领域横跨颗粒系统模拟仿真、多尺度颗粒力学行为计算、工业颗粒优化设计、环境颗粒物扩散沉降等前沿方向，全面赋能化工、能源、制药、冶金、环保等国家支柱产业。

6 启航：高频共振，赋能国产工业软件

成立只是序章，奋斗正当其时。在这个崭新的平台上，专委会迅速开启了高频次的国内外学术交流，将“计算未来”的蓝图化为扎实的行动：

深耕国际与双边交流：2024 年 8 月在大连理工举办第七届连续-非连续数值方法国际研讨会；2025 年 10 月在新疆喀什由新疆大学承办第八届连续-非连续数值方法国际研讨会，聚焦国产计算软件与先进算法；2025 年 11 月，在中科院力学所成功举办第四届中国-白俄罗斯颗粒材料计算力学国际学术研讨会，夯实了“一带一路”双边合作根基。

走向世界舞台发声：2025 年 7 月，专委会积极组织学者赴日本姬路参加第十届国际离散元方法大会（DEM10），成功申请并主办了“DEM 与 CFD 耦合”及“复杂颗粒流变学”两个分会场，提升了中国学者在该领域的国际话语权。

推动产学研用融合：2025 年 10 月底，在世界科技与发展论坛期间，专委会深度参与“东湖·介科学论坛——国产 CFD 与 DEM 软件发展分论坛”，开展国产离散元软件培训，直击“卡脖子”工业软件难题，打通从学术研究到工程应用的最后一公里。

从 2012 年张家界的初露锋芒，到 2025 年兰州的正式立帜，十三载春华秋实。中国颗粒学会颗粒计算专委会的成立，不仅是对老一辈科学家拓荒精神的致敬，更是新一代颗粒计算人面向国家重大需求的新起点。

聚沙成塔，计算未来。在这个数字与物理交织的新时代，颗粒计算专委会必将乘风破浪，书写更加辉煌的篇章！

化学链专业委员会的筹备成立历程

赵海波[1]、郭庆杰[2]、段伦博[3]
1. 华中科技大学；2. 青岛科技大学；3. 东南大学

在应对全球气候变化、推动能源体系清洁低碳转型的时代浪潮中，化学链技术作为一种革命性的能源转化与碳捕集利用途径，自概念诞生以来便承载着高效、清洁、低碳的科技理想。其核心在于通过固体氧载体颗粒在反应器间的循环，将传统燃烧（或转化）过程解耦，实现燃料化学能梯级利用、反应过程本质安全与 CO_2 源头内分离。这突破了传统碳捕集技术能耗高、成本高的瓶颈，为实现“双碳”战略目标提供了极具潜力的技术方案。化学链过程的实现，高度依赖于氧载体颗粒的性能及其在反应系统中的循环行为，本质上是一个深刻的颗粒科学与多相反应工程问题，与颗粒学的核心研究范式高度契合。

中国学者在该领域的研究起步早、贡献卓著，引领了多个方向的发展。早在 20 世纪末与 21 世纪初，以金红光院士为代表的中国科学家，便在理论上深刻揭示了化学链燃烧过程所具有的化学能梯级利用、低 NOx 排放以及 CO_2 源头低成本富集等独特优势，提出了创新的系统原型构想并测试了一批氧载体材料，为化学链研究的科学内涵与发展方向奠定了重要基础。2008 年以来，以沈来宏教授、赵海波教授、李振山教授、郭庆杰教授等为核心的科研团队，与国际研究同期甚至更早地系统开展了针对煤、生物质等固体燃料的化学链燃烧研究。他们设计、建造并成功运行了多套千瓦至百千瓦级实验室规模串行流化床装置，实现了固体燃料化学链燃烧的连续稳定运行，攻克了固体燃料转化、氧载体耐磨性与系统控制等一系列关键技术难题，使中国迅速成为国际化学链研究领域的主力军和重要引领者。历经二十余年的深耕，中国化学链研究完成了从原理验证、小试探索到工程示范的跨越。目前，已在国内建成和在建至少八套兆瓦（MW）级以上的化学链燃烧/气化工程示范装置，分布于宁夏、四川、广东、湖北等地，由高校（如华中科技大学、东南大学、清华大学、宁夏大学等）、科研院所（如中科院广州能源研究所、中科院青岛生物能源与过程研究所）与能源龙头企业（如广东能源集团、长江环保集团、大唐、东方电气、新奥集团、宁夏庆华煤化集团等）协同推进。这些示范工程的成功运行，标志着我国化学链技术成熟度已达到 7～8 级，为未来 10、100 MW 级乃至更大规模的工业应用积累了宝贵的工程经验与技术储备，走在了世界前列。与此同时，中国学者的研

究视野不断拓宽，在化学链高值化利用方向（如化学链气化-重整制合成气、化学链制氢/制氨/制氧、烷烃氧化脱氢制烯烃、污染物协同脱除等）以及钙循环捕集 CO_2 等领域开展了大量的前沿甚至开创性研究，形成了基础研究、技术开发与工程应用全链条创新体系，展现出蓬勃的活力。

随着研究队伍迅速壮大、学术交流日益频繁。中国在 2016 年主办了第四届国际化学链会议，并成功连续举办三届“中国化学链会议”（2019 年在广州，2023 年在昆明，2025 年在青岛），汇聚了全国本领域的核心力量，一个活跃、高水平的学术共同体已然形成，然而，面对从“工程示范”迈向“大规模产业化”的关键跃升期，也暴露出研究力量分散、评价标准不一、产学研协同有待加强等共性问题。在此背景下，凝聚共识、搭建一个稳定、权威、专业的协同创新平台变得尤为迫切。



2019 年，第一届中国化学链会议，广州



2023 年，第二届中国化学链会议，昆明



2025 年，第三届中国化学链会议，青岛

为此，2026 年 1 月我们申请并获准成立中国颗粒学会化学链专业委员会。专委会的成立，正是为了响应国家重大战略需求，顺应学科发展规律，将国内分散的创新力量有效组织起来。我们将以颗粒科学为共同语言，聚焦氧载体颗粒“材料-反应-输运”的全生命周期以及串行流化床反应器的“放大-运行-调控”核心工程问题，致力于构建跨学科、跨单位的深度合作平台。专委会的核心任务包括：组织高水平的全国性与国际化学术会议及专题研讨；推动氧载体颗粒评价方法、测试规范与数据标准的建立，提升研究结果的可靠性与可比性；搭建紧密的“产学研用”合作桥梁，加速科技成果向现实生产力转化；培养和举荐优秀青年科技人才，保持领域的创新活力；并积极面向社会开展科普，为化学链技术的健康发展营造良好氛围。

专委会拟挂靠于华中科技大学，依托其煤燃烧与低碳利用全国重点实验室的雄厚基础，并得到中国颗粒学会的全力指导与支持。我们将建立健全的组织机构和运行机制，通过会员会费、学术活动、社会赞助等多渠道保障专委会的可持续运行。

回首来时路，中国化学链研究从跟跑、并跑到在若干方向实现领跑，成就斐然，这是一代代科研工作者胸怀国之大者、砥砺创新的结果。展望新征程，中国颗粒学会化学链专业委员会的成立，标志着我国化学链事业进入了组织化、协同化发展的新阶段。我们将秉承初心，凝聚全体委员和广大会员的智慧与力量，聚焦关键核心技术攻关，推动标准体系构建，深化国际交流合作，为将化学链技术打造为我国绿色低碳能源体系的支柱性技术之一而不懈奋斗，为我国实现“双碳”目标、参与引领全球能源科技变革贡献坚实的专业力量。

从 iPOPA 到专委会：晶态多孔颗粒学术共同体的形成

姚明水，孙麓
中国科学院 过程工程研究所,介科学与过程工程全国重点实验室

在中国颗粒学会成立 40 周年之际，晶态多孔颗粒专业委员会（以下简称“专委会”）正式获批进入筹建阶段。这一进展并非单一时间节点推动的结果，而是在近年来持续开展学术交流的基础上逐步积累形成的。从早期的小范围专题研讨，到 iPOPA 系列论坛的连续举办，再到专委会的系统筹备，相关研究群体已逐步形成较为稳定的交流机制与协同合作基础。

1 研究方向的界定与发展共识

晶态多孔颗粒科学是一门融合多学科理论与技术的前沿交叉领域，涵盖金属有机框架（MOF）、共价有机框架（COF）、氢键有机框架（HOF）、超分子组装体系及相关晶态多孔体系等。该领域综合化学、材料、物理、化工及计算科学等多学科方法，围绕材料设计合成、结构表征、性能调控与功能修饰开展研究，并面向能源存储、碳捕集、环境治理、生物医药及工业分离等重要应用方向。总体来看，晶态多孔颗粒材料已成为基础研究与工程应用交叉发展的重要方向，在多组分分子分离、能源转化及高端功能材料等领域展现出持续发展潜力。

与传统活性炭、硅胶及高分子等“外表面敏感”材料不同，分子基晶态多孔材料属于“内表面敏感”体系，通过有序孔道与可调结构在限域空间内构建多维活性位点，从而实现更高的选择性和更丰富的分子相互作用，在分离效率与能耗控制方面具有显著优势。相关研究贯穿分子尺度结构设计、性能调控与工程应用全过程，呈现多尺度、多场耦合的典型特征。以 MOF 为代表的材料体系经过三十余年发展，已形成较为系统的研究基础。2025 年，专委会外方主任 Susumu Kitagawa 院士因开发 MOF 荣获诺贝尔化学奖，标志相关领域学术价值获得科学界最高级别的认可。

随着研究的持续推进，领域内逐步形成若干共性关注问题：多尺度结构调控缺乏通用方法，从分子设计到宏观成型的系统优化尚不完善；复杂工况下的稳定性与服役行为有待进一步明确；粉体材料向工程应用转化过程中存在适配与传质问题；原位与工况表

征手段仍有待发展。这些问题充分体现了晶态多孔颗粒研究在多尺度、多因素耦合方面的典型特征。

2 从系列会议起步的交流基础

围绕晶态多孔颗粒相关方向的学术交流，并非起始于统一规划的体系，而是在具体研究合作与学术需求推动下逐步展开，并在持续实践中形成相对稳定的交流基础。早期交流主要依托功能配位化学、晶体工程、材料化工等相关研究方向展开，以专题研讨和小规模学术讨论为主，参与人员相对固定，重点围绕具体科学问题开展深入交流。这一阶段虽未形成统一平台，但为后续跨单位合作与学术互动奠定了基础。近年来，相关学术活动逐步形成连续开展的态势，并在一定程度上具备了稳定的组织基础：

1）2023 年 8 月，北京举办软孔配位化学学术培训研讨会（SPCC2023），参会的人数约 120 人。



2）2024 年 10 月，苏州举办首届晶态多孔颗粒国际前沿交叉论坛（iPOPA1），参会约 130 人，并获评中国颗粒学会年会优秀分会场。



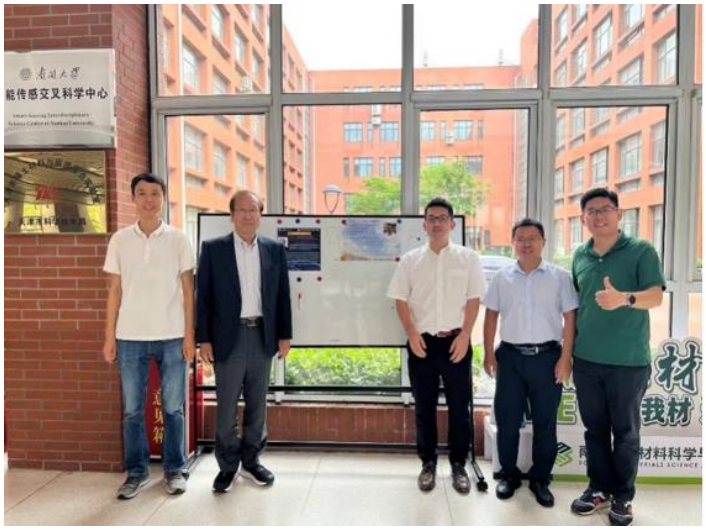
3）2025 年 11 月，日本京都举办第二届 iPOPA 论坛（iPOPA2），参会约 90 人。



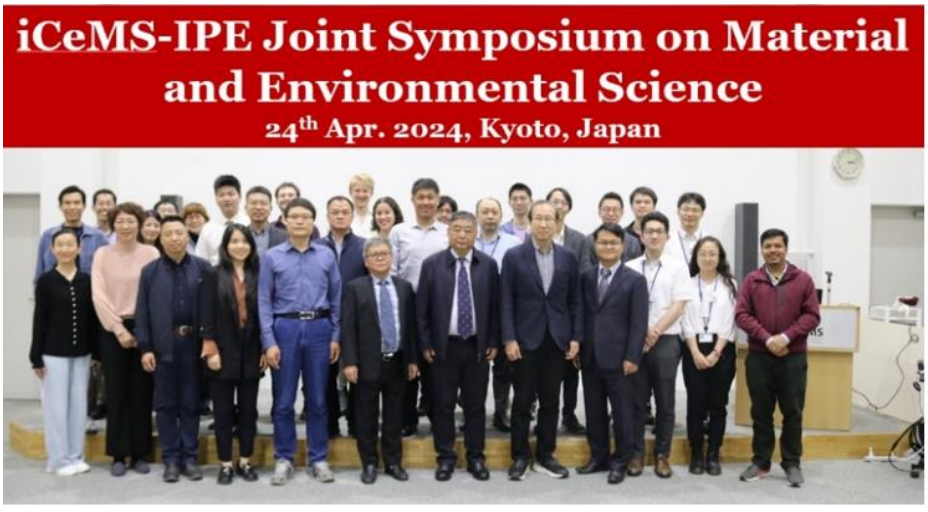
4）此外，还开展了多场双边论坛与专题研讨，如京都与大阪的材料与能源科学交流活动，围绕具体科学问题开展深入讨论。通过上述连续开展的学术活动，iPOPA 逐步成为该领域的重要交流载体。第三届 iPOPA 会议已确定于 2026 年在西安召开。在此过程中，参会人员结构逐渐稳定，部分研究团队持续参与会议组织与学术策划，相关合作关系也由单次交流逐步转向延续性互动，为进一步开展有组织的学术活动提供了现实基础。



2019 年 4 月，2019 功能配位化学研讨会 （中国广州，50 人）



2023 年 8 月，百年南开大讲堂（中国天津，40 人）



2024 年 4 月，iCeMS-IPE 材料与能源科学双边论坛（日本京都，35 人）



2024 年 4 月，OMU-CAS 材料与能源科学双边论坛（日本大阪，45 人）

3 以核心学者群为支撑的组织结构

在持续开展的学术交流过程中，围绕晶态多孔颗粒方向逐步形成了一个以核心学者为引领、多个研究团队共同参与的学术群体。该群体并非一次性组织形成，而是在多次专题研讨与 iPOPA 系列论坛的持续互动中逐渐稳定下来，为专委会的筹建提供了直接的人才与组织基础。

在学术带头人方面，已形成由国内外代表性学者共同参与的结构。中方由南开大学卜显和院士担任主任委员，其长期从事功能配位化学与配位聚合物研究，在结构调控与性能研究方面具有系统积累；外方由京都大学北川进（Susumu Kitagawa）院士担任，其作为金属有机框架（MOF）领域的重要开拓者之一，在多孔材料结构设计及原位表征研究方面具有重要国际影响力。中外学术带头人的共同参与，为该领域的持续发展与国际交流提供了稳定支撑。在核心组织力量方面，中国科学院过程工程研究所作为依托单位，在颗粒调控、成型与工程应用方面形成特色基础。以姚明水研究员和京都大学 Kenichi Otake 副教授为代表的中青年研究人员，围绕晶态多孔颗粒的动态调控与原位表征开展研究，并在组织 SPCC2023 及 iPOPA 系列论坛过程中发挥了重要作用，推动了相关学术交流的持续开展与平台化发展。在研究群体构成上，中方参与单位主要包括南开大学、中国科学院福建物质结构研究所、中山大学、浙江大学、上海交通大学、中国科学技术大学、苏州大学等高校与科研机构，并与日本、欧洲相关研究团队保持长期合作。不同团队分别在配位化学、晶体工程、材料化工、网状化学、高能物理、多相流动、物理化学、有机化学、材料化学、生物医药、能源化工、环境工程、化学工程、放射化学、分离工

程、工业催化、计算模拟等方向形成研究特色，并在具体问题上实现交叉衔接。从结构上看，该学术群体呈现出“基础研究—表征方法—工程应用”相互贯通的特点：中山大学、南开大学等团队在结构化学与晶体工程方面具有长期积累，京都大学等团队在原位表征与材料设计方面形成优势，过程工程研究所等单位则在颗粒调控与工程放大方面提供支撑。这种多方向协同的研究结构，使得围绕晶态多孔颗粒关键问题的系统研究成为可能。

4 从基础研究向工程应用的延伸

前期研究主要集中于材料设计、结构解析与性能评价等方面，相关成果多以学术论文、会议报告及学术专著等形式系统积累。围绕该方向，已组织期刊专题（如 2025 年《Particuology》专题）并出版多部学术著作，对领域发展起到了阶段性总结与系统梳理作用。

与此同时，晶态多孔颗粒研究在国际国内学术界获得了广泛关注与认可。以 MOF 开发为代表的相关研究取得重要突破，进一步彰显了该类材料在结构化学与功能材料领域的重要地位。国内多个研究团队在基础研究与应用探索中持续取得进展，获得中国化工学会基础研究成果奖、中国颗粒学会青年颗粒学奖等学术荣誉，部分学者入选中国科学院院士或获得重要国内外奖项。这些成果表明，本领域已形成较为活跃且具有国际影响力的研究基础。

在此基础上，晶态多孔颗粒研究正逐步由基础研究向工程应用拓展。然而，在从实验室走向实际应用的过程中，一系列共性问题逐渐显现，主要体现在以下几个方面：一是材料形态与工程应用之间的适配问题，现有材料多以粉体形式存在，在成型、结构稳定性及传质性能等方面仍需优化；二是实验室性能与实际工况之间的差距，材料在复杂环境中的稳定性与长期服役行为有待进行系统验证；三是规模化制备与成本控制之间的矛盾，制约了产业化进程；四是原位与工况表征技术仍有不足，难以全面揭示材料在动态过程中的结构演化与作用机制。

上述问题构成了晶态多孔颗粒从基础研究迈向工程应用的关键瓶颈，也是未来一段时期内亟需重点突破的方向。围绕这些共性挑战，亟需通过多学科交叉与协同攻关，推动材料设计、制备工艺、表征手段与工程应用的系统集成与协同发展。

5 专委会成立的意义与功能

晶态多孔颗粒研究正处于国际科学前沿持续深化与重大工业应用加速落地的关键阶段。在面向碳中和、能源转化及高端材料等领域展现出重要应用潜力的同时，该方向仍面临一系列共性科学问题与工程技术挑战，亟需跨学科协同攻关。

当前，国内外虽已开展大量前期研究，但我国相关研究力量分散于化学、化工、材料、物理、生物等多个学科与科研机构之间，尚缺乏统一、持续运行的组织平台以支撑系统性学术交流与协同创新。现有交流多以阶段性学术活动为主，尚未形成常态化、机制化的合作体系，制约了跨领域资源整合与关键问题的持续攻关。

在前期学术交流基础逐步成熟的背景下，推动晶态多孔颗粒专业委员会的筹建，旨在将已有合作关系制度化，构建稳定运行的学术组织平台。专委会成立后，将主要发挥以下功能：一是构建常态化学术交流机制，组织学术会议、专题研讨与国际合作，促进多学科深度融合；二是搭建协同创新平台，推动跨领域资源整合与联合攻关；三是围绕领域内共性科学问题与工程技术挑战，开展持续凝练与系统推进，强化基础研究、技术开发与工程应用之间的衔接；四是开展人才培养与学术规范建设，提升领域整体发展水平。

从早期学术研讨到 iPOPA 系列论坛的持续发展，晶态多孔颗粒领域已逐步形成具有一定凝聚力的学术共同体。专业委员会的设立，是这一发展进程的制度化延续，将为领域的长期发展提供重要组织保障，并有力支撑国家在碳中和、能源安全及高端材料自主可控等方面的重大战略需求。其后续成效，有赖于持续深入的学术交流以及关键共性问题的不断突破。

含能聚力，颗粒赋能

——中国颗粒学会含能颗粒专业委员会的筹建与发展

谈玲华[1]，魏贤凤[2]，张家瑞[3]

1. 南京理工大学；2. 西南科技大学；3. 国防科技大学

含能材料是我国“前沿新材料”重点支持方向，其高质量发展已步入国家顶层部署序列。为响应国家重大战略需求，推动含能材料领域基础理论与工程技术的深度融合与发展，西南科技大学联合中国人民解放军国防科技大学空天科学学院、南京理工大学、北京理工大学、西安近代化学研究所及兵器 575 厂等国内多家优势单位，于 2026 年，在中国颗粒学会下申请设立了“含能颗粒专业委员会”，其中，含能颗粒是含能材料的颗粒形态。该专业委员会汇聚了含能材料领域的多位业内资深专家和青年领军学者，以服务于一个具有鲜明独立性和高度交叉性的专门含能颗粒领域为核心使命，致力于构建一个跨学科、高水平的学术与工程共同体，为我国国防科技现代化和高端含能材料产业自主可控提供核心学术支撑。

1 专委会的筹建

含能材料（包括发射药、推进剂、炸药及火工烟火药剂等）作为国家安全的战略物资，其研发水平是衡量国家综合实力的核心指标。针对当前新含能分子开发难度大、成本高及工程化周期长的瓶颈，含能材料研发模式亟待发生根本性变革：即从以“分子设计与合成”为主导的传统模式，转向“粒子设计-颗粒工程-应用效能”一体化协同创新的新范式。

在这一新范式下，含能颗粒作为含能材料经特定物理化学加工形成的微纳米尺度固体单元，是连接化学能与武器效能的关键纽带，构成了“本体”与“形态”的辩证统一。通过精密调控颗粒的尺度、形貌、表面活性及组分（如包覆、掺杂与复合组装），并深入揭示其理化机制，能够有效平衡能量释放速率、方式与安全性，从而直接决定导弹战斗部、固体发动机等装备的最终应用效能。

目前，为推动我国含能材料领域的学术繁荣与技术进步，国内已经构建起由国家级与省级学会共同组成的多层次、专业化含能材料领域组织体系。在国家级层面，中国兵工学会作为该领域的核心学术组织，下设火炸药专业委员会与含能材料制造技术专业委

员会等，全面覆盖基础研究与应用工程。中国化学会设立了爆炸化学专业委员会，聚焦于含能材料的设计、合成、结构与性能等基础化学问题。中国宇航学会的固体火箭推进专业委员会，则专注于固体推进剂的配方优化、燃烧机理研究以及发动机工程应用等关键问题。在省级层面，陕西、北京、重庆、江苏、山西等国防科技重镇的兵工学会，亦纷纷组建了如火炸药、含能材料或弹药与火炸药等专业委员会，紧密结合区域内的产业特色开展活动。这些专业委员会纵横联动，形成了覆盖全国的专业化学术网络，为我国含能材料领域的科技创新、人才培养与产业升级提供了关键平台。

尽管国内已形成较为完善的含能材料学术组织体系，但在“含能颗粒”领域，专业组织仍显缺位。在近年来中国颗粒学会组织的学术活动中，“含能颗粒”方向的参与度与关注度持续走高，表明该领域已凝聚起一支活跃的科研力量，并产生了强烈的交流诉求。为精准引领该领域的创新发展、填补组织空白，“含能颗粒专业委员会”应需而生。专委会致力于突破武器装备性能瓶颈、解决“高能与钝感”矛盾、填补“通用粉体理论”在含能领域的适用性空白、推动科研成果向战斗力转化、构建安全标准体系与人才培养高地以及解决含能颗粒未来发展方向定位。专委会顺应武器装备发展规律、破解行业技术共性难题、保障国家战略物资安全，对于推动我国从“含能材料大国”向“含能颗粒强国”跨越具有不可替代的作用。攻克含能颗粒的关键科学与技术问题，对于提升我国战略科技力量具有重要而紧迫的意义。

2 专委会的专业性与学科独特性

含能颗粒的研究跨越微观、介观直至宏观全链条，具有鲜明的多学科交叉特征。在微观层面，依托分子设计与材料合成，追求更高的能量密度与稳定性；在介观层面，通过表面改性与结构组装，结合先进表征手段揭示能量释放机制；在宏观层面，其燃烧、爆轰及多相流动行为驱动着武器系统的总体设计。该领域突破了单一学科界限，构建了以化学与材料科学为基础的、以航空宇航与兵器科学为导向的、以工程学为支撑的交叉体系，涵盖材料科学与工程、化学工程与技术、仪器科学与技术、机械工程、力学及安全科学与工程等学科。

围绕含能颗粒的基本属性及易燃易爆性能，涉及的部分专业如下：

表 1 含能颗粒专委会涉及的部分专业

属　性	专　业	研　究　内　容
基本专业	材料化学	研究含能分子的设计与合成，为颗粒提供能量基体
	物理化学	涉及结晶动力学、表面与胶体化学，指导颗粒的生长、分散与界面改性
	燃烧学	研究含能颗粒的能量释放机理，以及其燃烧过程的先进诊断和仿真技术
	固体力学	分析颗粒在冲击、摩擦等外力作用下的力学响应及破坏机制
核心专业	特种能源技术与工程	直接面向火炸药与烟火技术的性能及应用研究
	粉体工程	粉碎、分级、混合等单元操作，制备合格颗粒的技术核心
	弹药工程与爆炸技术	关注颗粒在爆炸场中的能量释放规律及终端毁伤效应
	能源与动力工程	关注高性能燃料、推进剂制备及其在系统中的能量释放
	飞行器动力工程	关注含能颗粒在气固两相流中的流动燃烧特性及与发动机性能提升的关联
	微纳米技术	提供纳米级颗粒制备、表征及组装的关键手段
	机械工程	颗粒的制备设备
交叉支撑	流体力学	用于气溶胶输送、喷雾干燥及流化床造粒过程的模拟与控制，以及能源动力系统中的多相流动过程
	仪器分析与测试技术	涉及颗粒形貌表征（SEM/TEM 等）、粒度分析（激光衍射等）及晶体结构解析（XRD）等
	人工智能	机器学习方法预测含能颗粒的安全性能、表界面性能、力学性能等

鲜明的多学科交叉特征，使含能颗粒专委会与现有其他学术组织形成清晰区隔，主要有如下特点。

1）独特且聚焦的研究对象与科学问题

研究对象特殊：专注于具有快速释能特性的微纳尺度含能颗粒。其核心矛盾是“高能量密度”与“高感度（危险性）”的内在统一与可控调节、复杂理化机制与多尺度协同效应的深入认知与工程应用，这使得其理论基础、研究范式完全不同于水泥、矿物、药品等常规惰性粉体。

核心科学问题专有：致力于揭示“颗粒微观结构（尺寸、形貌、晶型、缺陷）→表界面性质与相互作用→宏观装药性能（感度、燃速、爆轰波传播）→武器系统终端效能（毁伤、推力、比冲）”之间的跨尺度、非线性、多学科构效关系。这构成了一个独立于分子化学和宏观力学的、以“介观颗粒”为核心的专门科学体系。

2）专门且复杂的技术方法体系

围绕上述科学问题，衍生出一套不可替代的专门技术链：

安全制备技术：面向高敏感材料的超细粉碎、分级、可控结晶与微胶囊化技术，其核心是“能量”与“安全”的平衡艺术。

精准表征技术：需在高安全防护条件下，对含能颗粒进行形貌、粒度、晶体结构（如使用防爆型 SEM、XRD）及原位、动态的过程观测（如燃烧、冲击过程），技术门槛极高。

专用评价方法：针对含能颗粒的机械感度、静电感度、冲击波感度等安全性评价，以及燃烧性能、爆轰性能等能量释放评价，已形成独立于通用材料的专用方法、国军标和行业规范。

3）活跃且成规模的科研社群基础

据初步统计，国内有超过 50 所重点高校（如北京理工大学、西南科技大学、南京理工大学、国防科技大学、西北工业大学等）、20 余家核心科研院所（如中国工程物理研究院、兵器工业集团、航天科工/科技集团的相关院所）以及众多军工企业的数百个研究团队，长期深耕于含能颗粒相关领域。研究方向横跨计算模拟与设计、实验室精准合成、工程放大生产、性能测试评价、应用系统验证全链条。该领域每年产出大量高水平学术论文、国家发明专利与国防科技成果，一个规模庞大、需求明确、交流活跃的专业学术共同体已然形成，亟须一个专属平台进行体系化整合与战略引领。

3 专委会的发展现状

“含能颗粒专业委员会”相关领域的学术组织工作已经非常活跃，并展现出强劲的发展势头。其现状可以概括为：以主会场为依托，分会场为起点，高规格、成体系地快速推进。

1）第十三届中国颗粒大会组织第 12 分会场:含能颗粒分会场

2024 年 10 月，由中国颗粒学会主办、由中国科学院过程工程研究所和中国颗粒学会微纳气泡专委会等承办的第十三届中国颗粒大会（CCPT13）在苏州国际会议中心酒店举办。大会首次设立含能颗粒分会场，分会场以“交叉融合、协同创新，共谋含能颗粒新发展”为主题，研讨颗粒的高能化创制、高效能质转换与精细表征技术等方面的前沿进展。分会场由国防科技大学、西北工业大学、北京理工大学和西安近代化学研究所共同组织，马立坤（国防科技大学教授）、敖文（西北工业大学教授）担任分会场主席。本

次会议共收到来自国内 17 家单位的稿件 63 篇，其中包括主题报告 13 篇、邀请报告 10 篇、口头报告 22 篇，墙报 18 篇，现场注册人数超 90 人。

会议议题主要涵盖了三个方面，南京理工大学白桥栋教授、国防科技大学黄利亚教授、西北工业大学胡春波教授和敖文教授介绍了粉末燃料爆轰发动机、金属基燃料跨介质冲压发动机、粉末燃料发动机和固体火箭发动机等固体燃料发动机最新研究进展，分析了目前固体动力技术发展的最新动态和瓶颈问题；上海交通大学蔡伟伟教授、北京理工大学石保禄教授、国防科技大学马立坤教授、浙江大学王海鸥研究员、山东大学褚开维教授分享了含能颗粒燃烧的高精度测量和高保真模拟方面的最新研究成果，介绍了含能颗粒高效能质转化机理研究的重大突破；常州大学孙运兰教授、西安近代化学研究所冯昊研究员、西北工业大学严启龙教授、北京大学王海洋研究员分别介绍了氟聚物包覆、原子层沉积、结晶/共晶和增材制造等技术在含能颗粒创制方面的最新研究成果。

含能颗粒分会场共评选出优秀墙报 4 篇、优秀青年报告 6 篇，并为获奖学者颁奖。优秀墙报、优秀青年报告被推荐至合作期刊《固体火箭技术》。最终，含能颗粒分会场获评大会颁发的“优秀分会场”。



图 1 第十三届中国颗粒大会“含能颗粒”分会场合影



图 2 第十三届中国颗粒大会“含能颗粒”分会场优秀青年报告证书颁发仪式





图 3 含能颗粒分会场荣获“优秀分会场”

“含能颗粒专委会”的核心组织架构在 CCPT13 会议上清晰亮相，为 2026 年的正式成立奠定了坚实基础。分会场主席由国防科技大学马立坤教授和西北工业大学敖文教授共同担任，他们是该领域的领军青年学者。设立了以侯晓院士为主任的高规格学术委员会，成员包括夏智勋、刘佩进等多位知名教授，确保了学术方向的权威性和前瞻性。成立了组织委员会，并任命了学术秘书，负责日常联络与协调工作，标志着组织运作已进入规范化轨道。

2）中国颗粒学会第二届未来颗粒前沿论坛组织第七分论坛：含能颗粒前沿论坛

2025 年 4 月，由中国颗粒学会主办的第二届未来颗粒前沿论坛在陕西省西安市举办。含能颗粒前沿分论坛以“先进含能颗粒，夯助强国基石”为主题，由中国颗粒学会、陕西省科学技术协会联合主办，南京理工大学、西北工业大学、中国工程物理研究院化工材料研究所、西安近代化学研究所、江苏省颗粒学会等多家顶尖科研机构联合承办。杨光成（中国工程物理研究院化工材料研究所，研究员）、汪营磊（西安近代化学研究所，研究员）、杨毅（江苏省颗粒学会，副理事长）担任分论坛主席，谈玲华（南京理工大学，教授）、庞维强（西安近代化学研究所，研究员）、谯志强（中国工程物理研究院化工材料研究所，研究员）、敖文（西北工业大学，副教授）担任分论坛召集人。

本次分论坛精心设计了四大核心板块，学术报告会及研究生交流专场、青年托举交流会、产学研结合交流会及青年创新创业人才交流会，涵盖了学术交流、人才培养、产学研对接及创新创业展示，形成了多层次、多维度的交流体系。

分论坛聚焦含能颗粒领域相关的科学前沿、技术突破、产业应用与人才培养，搭建了“基础研究-中试验证-产业落地”的全链条协同创新平台，吸引了来自全国高校、科研院所及产业界的百余名专家学者、青年科研人员和企业代表参与，最终荣获大会颁发的“优秀分论坛”证书。



图 4 学术报告会合影



图 5 优秀研究生口头报告



图 6 青年托举交流会



图 7 产学研会议 研讨、交流后达成合作意向



图 8 “青年创新创业交流”活动 专家经验分享、项目路演及指导



图 9 含能颗粒前沿论坛荣获“优秀分论坛”

“含能颗粒前沿论坛”作为第二届未来颗粒前沿论坛的重要组成部分，通过其精心设计的四大板块活动和高效的组织架构，成功举办并取得了丰硕成果。论坛通过构建理论探索与应用实践联动的交流平台，不仅为含能材料产业升级注入新动能，更形成了支撑颗粒技术在含能材料领域创新应用的系统性方法论框架。其兼具理论突破与工程价值的成果，将加速推进我国含能颗粒体系从跟踪仿制向自主创新的战略转型，为国防现代化建设与民用爆破产业升级注入强劲动能。未来，论坛将继续秉持“创新驱动，能聚未来”的内核，深化产、学、研合作，推动含能材料在民用爆破、航天推进等领域的广泛应用，持续为中国颗粒科技领域注入源源不断的创新动能，让含能颗粒的星火照亮国防强国和民用爆破的壮阔征程

3）“空天动力系统颗粒创制与能质转化过程”专题论坛

2025 年 7 月，第二十七届中国科协年会“空天动力系统中的颗粒创制与能质转化过程”专题论坛在北京中国科技会堂成功举办。论坛由中国科学技术协会主办，中国颗粒学会承办，国防科技大学空天科学学院协办，汇聚了来自全国 20 余家高校、科研院所和工程单位的 80 余位专家学者。论坛聚焦空天动力系统中的颗粒创制与能质转化过程，围绕“含能颗粒创制”“能质转化过程”“含能颗粒在空天动力系统中的应用”三大方向，邀请了 11 位行业专家作专题报告，论坛报告环节分别由湖北航天化学技术研究所陶博文研究员、北京理工大学赵马杰教授和北京航空航天大学韩旺教授主持，展开跨领域深度研讨。



图 10 第二十七届中国科协年会“空天动力系统中的颗粒创制与能质转化过程”专题论坛合影



图 11 第二十七届中国科协年会“空天动力系统中的颗粒创制与能质转化过程”专题论坛现场

现场针对关键科学问题展开精准研讨，点评专家以深厚学术积淀，与报告人就核心问题展开靶向性辨析，既点出了技术路径中的关键矛盾，又通过跨视角补充完善解决方案，从原理机制到工程实践构建多维度学术对话，推动讨论向纵深突破。专家们深入探讨了含能颗粒高能化创制、燃烧过程精细测量、高保真数值模拟、固体动力系统设计等交叉领域的重大难题与技术瓶颈，明晰了突破方向，在含能颗粒创制、能质转化机制研究及新型固体动力系统设计等关键方面厘清了创新思路，引发行业广泛共鸣。

本次论坛的学术产出呈现多维度、高质量特征：经同行评议收录的 23 篇学术论文，汇编成反映领域最新进展的专题论文集，其中 13 篇刊发于《固体火箭技术》“含能颗粒”专栏、2 篇刊发于《中国粉体技术》，10 篇高质量研究成果以墙报形式展示。为践行科学普及与科技创新同等重要的理念，让前沿科技走向大众，论坛特别策划制作

了 1 部科普视频《粉末爆轰发动机：科幻照进现实的动力革命？》，将深奥的空天动力技术转化为通俗易懂的科普内容，在各大平台获得超高人气播放，真正实现了高精尖技术的“接地气”传播。这些成果既彰显了基础研究的理论深度，也展现了应用研究的实践价值，为推动空天动力领域可持续发展奠定了基础。

本次专题论坛的成功举办，让正在筹备中的含能颗粒专委会行业影响力得到进一步扩大。依托本次科协年会的国家级学术平台，专委会核心筹备团队与空天动力领域 20 余家头部高校、科研院所及工程单位建立深度联动机制，吸纳了一批产业界核心骨干加入筹备阵营，将专委会的覆盖边界从原有基础研究领域，延伸至空天动力工程应用全链条。

4）第二届全国颗粒学与粉体技术青年科学家研讨会：含能颗粒材料分会场

2025 年 10 月，第二届全国颗粒学与粉体技术青年科学家研讨会在江苏盐城召开，研讨会设立第一分会场——含能颗粒材料分会场，由杨光成（中国工程物理研究院化工材料研究所，研究员）、谈玲华（南京理工大学，教授）担任召集人，邀请了来自哈尔滨工业大学、西北工业大学、东南大学、武汉大学、南京理工大学、西南科技大学、中北大学、南京工程学院、中国空空导弹研究院、中国工程物理研究院化工材料研究所、山西北化关铝化工有限公司等十余所单位的专家、青年学者参与。

分会场将大会主题“创新引领、产业赋能”作为内核，搭建了含能颗粒材料领域产-学-研高效合作平台，旨在促进理论创新、方法革新与工程实践的深度融合，共同推动含能颗粒材料技术的创新发展。



图 12 第二届全国颗粒学与粉体技术青年科学家研讨会——含能颗粒材料分会场



图 13 研究生专场报告

随着“含能颗粒专委会”相关会议活动的持续成功举办和行业影响力的扩大，2026 年正式成立了“中国颗粒学会含能颗粒专业委员会”，它将为我国含能颗粒领域的专家学者提供一个更加稳定、高效的交流与合作平台，有力地推动该领域的协同创新与跨越式发展。

4 专委会的未来展望

“含能颗粒专委会” 正从依托学术分会场的组织形态，向更具凝聚力与行业影响力的专业组织稳步迈进。未来，专委会将从以下几个方面进行努力。

1）学术深耕：从“前沿探索”走向“体系化研究”

未来，专委会将推动含能颗粒相关研究从分散的亮点突破，转向系统全面的学科构建。

基础理论的深化：不再止步于宏观现象描述，而是聚焦于超高温、超高压、超高速、多相耦合及多尺度等极端条件下的含能颗粒的燃烧、爆轰、能量释放机理及储存安全，建立更精准的本构模型和仿真体系。

跨学科融合的加速：含能颗粒具有处于材料科学、流体力学、化学动力学、增材制造等学科交叉点的天然优势。专委会将成为这些学科深度融合的催化剂，催生如“智能含能颗粒”“仿生结构含能材料”等新方向。

表征技术的飞跃：大力推动同步辐射、超快成像等高时间、空间分辨率的原位诊断技术在含能颗粒研究中的应用，使纳秒级时间分辨、微米级空间尺度的动态观测成为常规研究手段，为机理认知提供全新建构视角。

2）技术突破：从“实验室创制”走向“工程化应用”

专委会的使命之一，是打通从基础研究到装备应用的通道。

新一代动力系统：聚焦粉末燃料爆轰发动机、跨介质冲压发动机、固体火箭超燃冲压发动机等新概念动力，解决含能颗粒在其中的稳定供给、高效燃烧和推力调控等瓶颈问题。

先进制造工艺：将增材制造（3D 打印）、原子层沉积、微流控等先进技术，从制备样品推向批量化、低成本、高一致性的工程生产，实现含能颗粒的“按需定制”与“精准制造”。

安全与寿命评估：建立含能颗粒在全生命周期（储存、运输、使用）中的安全性与环境适应性评价体系，发展无损检测与寿命预测技术，这是其走向实战化的关键保障。

3）生态构建：从“小圈子”走向“大协同”

未来的专委会，将是一个连接产学研用、贯通创新链的枢纽。

产学研深度融合：搭建高校、科研院所与航空航天、兵器、船舶等领域工业部门之间的常态化对接平台，让科学问题从工程中来，让研究成果到工程中去。

标准体系构建：牵头或参与制定含能颗粒相关的测试方法、产品规范等团体或行业标准，掌握技术话语权。

公众科普与责任：在确保安全保密的前提下，向公众特别是青少年传播含能材料在国防安全、航天探索中的重要作用，激发科学兴趣，涵养爱国情怀。

结语

含能颗粒专业委员会成立时间虽然不长，却展现出蓬勃的发展活力。自筹建以来，专委会始终保持高频高效的运作节奏，平均每年举办 2～3 次学术交流活动，形式丰富多样、内容务实深入，涵盖产教融合专题研讨、特色议题交流及闭门会议等多种类型，在短时间内迅速凝聚行业共识、搭建协作平台，为含能颗粒领域的技术创新与人才培养注入了强劲动力。

“含能颗粒专委会”的未来，不止在于组织规模的拓展，更在于构建跨学科、跨行业的协同创新形态，汇聚顶尖科研力量与产业资源，直面国家在含能材料领域战略需求的关键瓶颈。专委会的成长，是技术突破的引擎，更是国家战略科技力量体系中不可或缺的一环。

从粗放监测到精准计量

——从生态环境领域看颗粒计量及标准化发展历程

张国城[1]，张文阁[2]，李力[3]

1.北京市产品质量监督检验研究院；2.中国计量科学研究院；

3.北京海岸鸿蒙标准物质技术有限责任公司

本报告系统回顾了 1995—2025 年间生态环境领域颗粒计量及标准化的发展历程。30 年间，该领域监测技术经历了从总悬浮颗粒物（TSP）宏观监测到细颗粒物（$PM_{2.5}$）精准计量、从手工采样实验室分析到在线自动监测、从质量浓度单一指标到“质量-数量-组分-粒径”多维表征的根本性转变，计量技术经历了从依赖进口到自主研制，从滤膜称重的间接比对、模拟仓内的系统比对、到盐雾化和振动孔技术的直接校准，标准化经历了从寥寥数项发展到涵盖国际标准、国家标准、行业标准、计量技术规范的完整体系。报告从环境政策驱动、监测仪器装备发展、计量技术突破、标准规范体系建设、标准物质研制五个维度展开论述，涵盖烟尘、粉尘、扬尘、生物气溶胶等不同颗粒类型，系统梳理了粒径分析与分离、数量浓度、质量浓度、颗粒组分等计量技术演进脉络，并对未来发展趋势作出展望，并介绍了颗粒计量及标准化组织的发展、取得的成果及专委会筹建情况。

1 绪论

1.1 颗粒检测、监测

宇宙是由物质构成的，物质是由颗粒构成的，颗粒无处不在。以颗粒气溶胶为例，它由固态或液态颗粒物悬浮在气体中、混合形成的多相分散系统，这些颗粒大小不一，从直径小于 0.1 μm 的病毒到直径为 100 μm 或更大的真菌孢子，它们可以以单一未附着的生物体或聚集体的形式出现。这种微小尺寸使其长期悬浮于环境空气中，易经呼吸进入人体。空气动力学直径≤10 μm（PM_{10}）的颗粒可进入呼吸道，≤2.5 μm（$PM_{2.5}$）的颗粒能深入肺泡，而≤1 μm（PM_1）的颗粒甚至可穿越气血屏障进入血液，引发从呼吸道炎症到心血管疾病、甚至致癌等一系列健康危害，因此，对颗粒气溶胶的全面评估并非只关注质量浓度，还关注数量浓度、粒径分布及化学/生物组分——多维度参数的精准测量，

是对其环境与健康风险进行科学评判的前提。

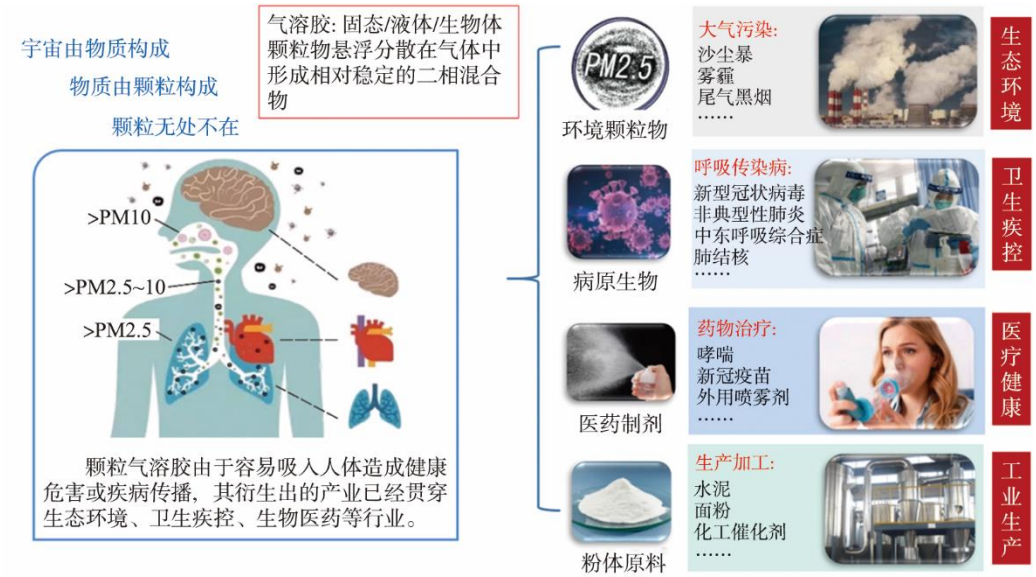


图 1 不同领域对颗粒气溶胶的关注

要实现多维参数的可靠获取，离不开各类颗粒采样、检测与监测仪器。然而，仪器本身只是“标尺”，其输出结果的准确性取决于自身量值的准确性与溯源性。一台未计量或校准不规范的仪器可能将 $PM_{2.5}$ 质量浓度测偏数倍，或将病毒尺寸误判为真菌孢子，导致误报、漏报，进而引发治理决策的严重偏差。“仪器量值决定结果可信度”的核心逻辑，凸显了颗粒计量的重要性。



图 2 不同领域的颗粒气溶胶采样器

1.2 颗粒计量及标准化

颗粒计量通过标准物质（如单分散/多分散聚苯乙烯微球、标准粉尘、生物气溶胶模拟物）、建立溯源链和校准方法，为各类仪器赋予准确、可比、可溯源的“刻度”。没有坚实的颗粒计量基础，再精密的仪器也只能输出“相对真假”的数据，而无法支撑起公共卫生、环境监测、职业暴露评估乃至国防防护等领域对颗粒物精准管控的刚性需求。

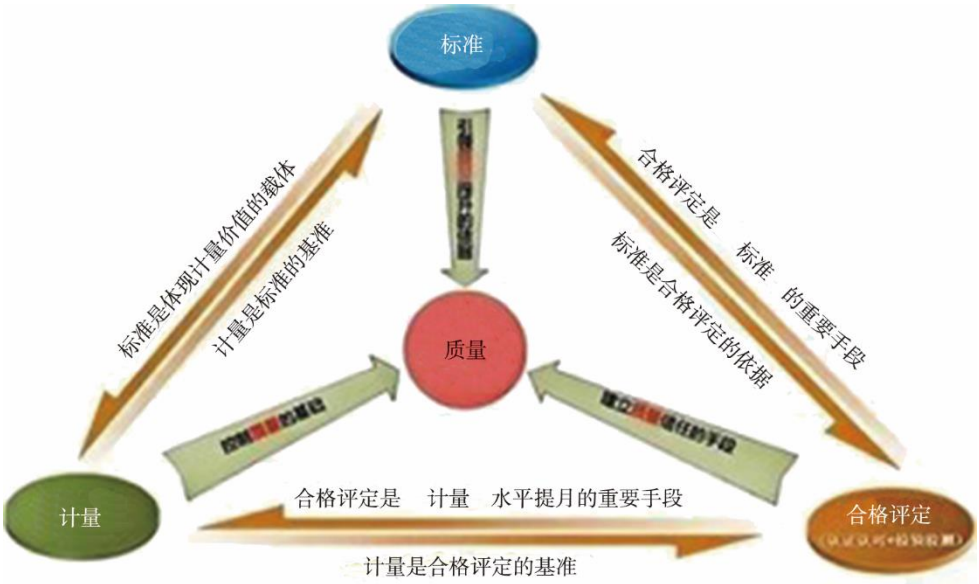


图 3 国家质量基础构成

国家质量基础（NQI）由计量、标准化、认证认可三大支柱构成，在颗粒检测与监测领域，这三者并非孤立运行，而是相互支撑、协同发力。颗粒计量及标准化的内涵远不止于颗粒仪器的计量校准，而是涵盖从“基准—标准—仪器—检测—认可”的全链条技术体系。

计量是核心基石。它确保颗粒粒径、数量浓度、质量浓度等参数量值的准确性与溯源性。具体包括：研制并保存颗粒粒径与浓度的一级或二级标准物质（如单分散聚苯乙烯微球、标准粉尘、生物气溶胶模拟物）；建立从国家基准到工作计量器具的量值传递链；制定颗粒仪器（如光学粒子计数器、凝结核计数器、气溶胶质谱仪等）校准规范与检定规程，保证不同时间、不同地点测量结果的可比性。

标准化是规范行为的准则。不仅涉及颗粒仪器本身的产品标准（如性能要求、安全性、环境适应性），更关键的是仪器计量方法标准的制修订。例如，规定如何用标准物质对粒子计数器进行线性校准、如何评估粒径分辨率和计数效率、如何验证生物气溶胶

采样器的物理收集效率与生物活性保持率等。这些标准为计量活动提供了统一的技术依据，也为后续认证认可提供了准绳。

认证认可是质量保障的机制。它以计量溯源和标准符合性为基础，对从事颗粒检验检测的实验室进行能力认可，确认其是否具备规范的检测能力和有效的数据质量控制体系。同时，对颗粒仪器开展型式评价、产品认证，确保出厂仪器满足相应标准要求。以认证认可为基础的颗粒检验检测，能够为环境监测、职业卫生、公共卫生等领域出具具有法律效力和国际互认性的检测报告，从而支撑政府监管和市场信任。

综上，颗粒计量及标准化是覆盖“计量溯源—标准制定—仪器校准—实验室认可—检测认证”的完整生态系统。只有将颗粒仪器的计量、仪器与方法的标准化、以及基于认证认可的检验检测能力建设三位一体协同推进，才能真正构筑起准确可靠、国际等效的颗粒物测量质量基础，为健康防护、环境治理和产业发展提供坚实保障。

颗粒计量及标准化是一门以颗粒特性参数精准测量、量值溯源体系构建及技术标准制定为核心的交叉学科，作为连接颗粒学基础研究、工业生产应用与公共安全保障的“技术基石”，其核心价值深度融合了计量精准性、标准统一性与应用广泛性，贯穿自然科学、工程技术及公共服务等多个关键领域。该学科的根基深植于计量学、物理学、材料科学、化学工程、计算机技术等多学科交叉的土壤：计量学提供的量值溯源理论与误差分析方法，为颗粒参数测量的准确性奠定核心理论支撑；物理学确立的颗粒粒径、浓度、形貌等参数测量原理，构成技术实现的底层逻辑框架；材料科学则保障了标准物质制备工艺的稳定性与长期可靠性；而计算机技术的迭代升级持续推动着在线监测、智能校准等应用场景的落地实现。

在应用拓展层面，颗粒计量及标准化的技术辐射边界持续向各行业深度渗透——环境领域中，它支撑着 $PM_{2.5}$、微塑料等新型污染物的精准监测与碳排放核算；生物医药领域，为纳米药物载体、生物气溶胶的质量控制提供关键技术依据；高端制造领域，助力半导体材料、锂电池粉体等核心物料的生产工艺优化；公共卫生领域，为疾控系统的粉尘危害防控、病毒颗粒检测提供规范指引；能源化工领域，则推动煤炭、催化剂等颗粒物料的高效利用与节能减排；空天动力领域，针对航空发动机涡轮叶片积尘、火箭推进剂颗粒粒径均匀性等关键问题，其计量数据直接决定动力系统的推力效率、运行可靠性与使用寿命，标准化体系是保障装备极端工况下稳定运行的核心支撑；防尘防爆领域，工业生产中粉尘浓度、粒径分布与爆炸风险直接相关，精准计量与统一标准为粉尘作业

场所的风险分级、防护措施制定及防爆设备选型提供科学依据，是落实国家安全生产战略的重要技术保障。

该学科具有跨学科、广覆盖的特性，已形成“基础理论—计量方法—标准制定—产业应用”的闭环研究范式。这一范式是破解多领域颗粒特性精准表征与数据互认难题的核心技术路径，在支撑国家战略需求与产业升级中发挥着不可替代的基础与先导作用。

本文中将以生态环境领域为例，介绍颗粒计量及标准化的发展历程。

1.3 颗粒计量：从被忽视到被重视

三十年前，颗粒计量还是一个相对小众的技术领域。彼时，人们对空气中悬浮颗粒的认识主要停留在“烟尘”“粉尘”的直观感受层面，计量手段以重量法为主，关注的指标是总悬浮颗粒物（TSP），即空气动力学当量直径小于 100 μm 的所有颗粒物的总和。这种粗放式的计量方式，难以区分自然扬尘与工业排放，更无法识别那些能够深入肺泡的细微颗粒。

三十年后的今天，颗粒计量已成为环境监测、职业卫生、气候变化、生物安全等多个领域的交叉热点。计量对象从 TSP 细化为 PM_{10}、$PM_{2.5}$ 乃至 $PM_{1.0}$ 和纳米颗粒；计量参数从单一的质量浓度扩展到数量浓度、粒径分布、化学组分、生物活性；计量场景从实验室手工分析延伸到现场实时在线监测。这一转变的背后，是环境科学、气溶胶力学、现代光学、微电子技术、数据科学等多学科的深度融合。

1.4 环境颗粒计量：政策驱动下的技术演进

环境颗粒计量技术的每一次重大进步，几乎都源于环境标准的收紧和监管需求的提升，或生物安全突发事件的发生。

1996 年：PM_{10} 首次进入国家标准。中国 GB 3095—1996《环境空气质量标准》首次增设 PM_{10}（可吸入颗粒物）标准限值，标志着颗粒计量从 TSP 向细颗粒的分水岭。这一转变迫使监测仪器必须具备粒径选择切割能力——能准确分离 10 μm 以下颗粒的采样入口成为技术攻关点。

2012 年：$PM_{2.5}$ 时代全面开启。2012 年 2 月，环境保护部发布新修订的 GB 3095—2012《环境空气质量标准》，首次增设 $PM_{2.5}$ 标准限值，规定二级标准年均浓度限值为 35 μg/m^3。这一决策将中国颗粒计量技术推向了快车道。2016 年 1 月 1 日起，该标准在全国范围全面实施，1 436 个国控监测点位的建设需求直接催生了数百亿规模的监测仪器市场。

2014 年：考核倒逼精准计量。国务院办公厅发布《大气污染防治行动计划实施情况考核办法》，将 $PM_{2.5}$ 或 PM_{10} 年均浓度下降比例作为地方政府考核硬指标。这意味着监测数据不仅关乎环境评价，更直接关联行政问责。数据准确性的重要性空前提升，计量溯源和量值统一成为刚需。

2020 年：生物气溶胶成为热点。新冠疫情暴发后，SARS-CoV-2 的空气传播途径得到证实，这彻底改变了以往对生物气溶胶（含细菌、真菌、病毒等）仅作为环境科研监测的定位。公共卫生与生态环境管理的双重需求，要求对空气中病原体实现“早发现、快预警”，直接推动了生物气溶胶采样与检测技术的革新。

2026 年：出台更严限值。生态环境部发布新修订的 GB 3095—2026《环境空气质量标准》，规定从 2026 年 3 月 1 日—2030 年 12 月 31 日，执行过渡阶段浓度限值，将 $PM_{2.5}$ 的年均浓度达标限值设为 30 μg/m³，PM_{10} 的年均浓度达标限值设为 60 μg/m³；第二阶段从 2031 年 1 月 1 日起，在全国范围内统一执行修订后的浓度限值，其中 $PM_{2.5}$ 为 25 μg/m³、PM_{10} 为 50 μg/m³。 同时，在颗粒物自动分析方法中增加了光散射法。新标准更低的浓度限值，要求监测设备具备更高精度、更低检出限和更强的数据稳定性，将为颗粒物测量仪，尤其是高精度低浓度测量仪带来新的发展机遇。

同时，随着大气污染防治向精细化、深层次推进，未来颗粒在线监测技术的重点方向包括：1）化学成分在线监测仪器的标准化与计量溯源体系的研究；2）超细颗粒物（PM_1）在线监测技术的研发与应用；3）光学测量方法在颗粒物环境空气质量浓度测量领域的应用及标准计量体系的研究；4）基于物联网的分布式监测系统校准方法的创新。这些方向的发展，将持续推动我国环境颗粒计量标准化体系向更高水平迈进。

2 颗粒监测计量的发展

2.1 二十世纪：手工滤膜称重法

2.1.1 技术奠基：滤膜称重法成为三大领域的统一基准

20 世纪 90 年代初期，颗粒物污染的监测技术尚处于“手工采样+实验室分析”阶段，滤膜称重法作为唯一被广泛认可的标准方法，在污染源、大气环境和工作场所三大领域确立了绝对主导地位。该方法的原理具有高度的统一性：通过采样器以恒定流速抽取定量体积的气体，使颗粒物被截留在已恒重的滤膜上，根据采样前后滤膜重量差及采样体积计算颗粒物浓度。

在环境空气监测领域，总悬浮颗粒物（TSP）被列为大气环境监测的必测项目，滤膜采样-重量法是测定 TSP 的基本方法。针对滤膜和颗粒物的吸湿性问题，研究者开发了恒湿处理技术，要求在恒温恒湿箱中对滤膜进行平衡处理，以消除湿度对称量结果的影响。

在固定污染源监测领域，烟尘测试经历了从粗放式手动调节向标准化采样的转变。1991 年发布的 GB 5468—1991《锅炉烟尘测试方法》规范了锅炉排放颗粒物的采样与称重流程。1996 年发布的 GB/T 16157—1996《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》提出了经典的“滤筒过滤称重法”，该方法因其原理直观、操作可行，成为烟尘测试沿用至今的经典方法。

在工作场所的粉尘监测领域，GB 5748—1985《作业场所中粉尘测定方法》明确规定“滤膜称重法”为粉尘质量浓度检测的基本方法。这一规定为劳动卫生领域的粉尘治理提供了统一的技术依据。

2.1.2 标准体系构建：从技术要求到计量规范的完整框架

滤膜称重法的广泛采用，催生了跨领域、多层级的标准体系，形成了从仪器性能、采样方法到分析天平的完整技术链条。

原国家环境保护局发布了 HYQ 1.1-1989《总悬浮颗粒物采样器技术要求（暂行）》，对采样器关键性能指标作出明确规定。1995 年发布的 GB/T 15432—1995《环境空气 总悬浮颗粒物的测定 重量法》，规定了从滤膜选择、采样操作到恒重称量的完整程序。该标准由归口单位国家环境保护总局管理，成为中国环境空气颗粒物监测的基石性文件。

标准对称量天平提出了分级要求：大流量采样滤膜使用总量范围≥10 g、感量 1 mg 的大盘天平；中流量采样滤膜使用感量 0.1 mg 的分析天平，并明确要求进行再现性（标准差）检验。这为后续计量检定规程的制定奠定了基础。

2.1.3 计量发展与局限

目前，仍然有不同领域还在使用手工滤膜采样技术，常见仪器包括环境空气颗粒物（PM_{10} 和 $PM_{2.5}$）采样器、总悬浮颗粒物（TSP）采样器、烟尘采样器和粉尘采样器等。

滤膜称重法虽然准确可靠，但其固有的局限性也推动了计量技术的进步。首先，该方法属于非实时监测，通常需要数小时甚至数天的采样和恒重周期，无法满足快速响应的管理需求。其次，称量过程对环境条件极为敏感，滤膜平衡的温湿度控制、静电消除、滤膜处理操作等环节均可能引入误差。国际上的系统审计发现，滤膜平衡不充分、记录

缺失、重复称量缺失是导致大量 PM_{10} 数据失效的主要原因。这些问题的暴露，促使计量部门加强了对恒温恒湿设备、分析天平的校准及其期间核查要求。

值得注意的是，GB/T 15432—1995 在发布时就为技术迭代预留了接口，明确规定了“允许采用其他仪器或方法测定粉尘质量浓度，但须以滤膜称重法为基准”。这一原则为光散射法、β 射线吸收法等现场快速监测技术的发展提供了法律依据，也奠定了滤膜称重法作为颗粒物质量浓度计量溯源链顶端的地位。

2.2 二十一世纪：自动监测技术起步与快速发展

2.2.1 监测技术：从采样称重向在线自动监测的跨越

进入 21 世纪，随着光电子技术、激光技术和计算机技术的快速发展，在线自动监测技术开始兴起，实现了从“点式采样”向“连续实时监测”的根本性转变。

这一时期，β 射线法和微量振荡天平法开始应用于自动监测。

1）β 射线吸收法：该技术利用恒流抽气泵采样，大气中的悬浮颗粒被吸附在 β 源和盖革计数器之间的滤纸表面，通过测量采样前后 β 射线计数值的变化计算颗粒物质量浓度。β 射线法因其无需频繁校准、长期稳定性好，成为我国环境空气质量监测站点的核心方法之一。

2）振荡天平法（TEOM）：基于锥形元件振荡频率与质量变化成正比的原理，该技术能够实时测量滤膜上积累颗粒物的质量增量，具有高灵敏度和时间分辨率的优势。

3）光散射法：利用颗粒物对激光的散射特性进行浓度测量，响应速度快、体积小、功耗低，适用于网格化布点和便携式监测场景。

4）先进光谱监测技术：大气探测激光雷达（LIDAR）等系列环境光学监测设备，初步建立了城市大气污染时空分布监测技术系统。这些技术实现了从点式监测向立体监测的跨越，能够获取颗粒物的垂直分布和区域输送特征。

2000 年以来，我国颗粒物在线监测技术经历了从引进消化到自主创新的跨越式发展，形成了 β 射线法、振荡天平法、光散射法等多种技术原理并存的格局。激光散射法因响应速度快、体积小、成本低而广泛应用于微型站和便携设备。但散射法易受颗粒粒径、颜色、形状影响，需要与重量法进行关联校准。2013 年发布的（HJ 653—2013）对各类自动监测系统的性能指标作出统一规定，为多原理仪器并存提供了技术依据。HJ 653—2021 把光散射原理也包括进来。

与之相适应的标准体系完成了从“方法原理导向”向“性能指标导向”的转型，HJ 653—2021 的修订实施标志着我国环境空气颗粒物自动监测仪器的技术指标已达到当前条件下的最严水平。“十四五”期间，HJ 653—2021 的实施进一步加严了在线监测仪器与手工监测方法的比对指标，颗粒物自动监测数据的准确性和可比性得到显著提升。

2.2.2 计量发展

随着在线监测技术的应用，以 JJG 846—2015《粉尘浓度测量仪检定规程》、JJF 1659—2017《$PM_{2.5}$质量浓度测量仪校准规范》为代表的国家计量技术规范相继发布实施，为相关仪器的准确性提供了法制保障，并对保障监测数据质量发挥了关键作用。

JJG 846—2015《粉尘浓度测量仪检定规程》：作为对 1993 年版的更新，它针对技术发展，将仪器原理从光散射扩展到 β 射线等多种原理，确保了粉尘仪测量结果在国家和区域间的量值统一与可比。

JJF 1659—2017《$PM_{2.5}$质量浓度测量仪校准规范》：它为当时快速普及的 β 射线法、振荡天平法等自动监测仪器提供了统一的校准依据，保障了 $PM_{2.5}$自动监测数据的准确与可溯源。

3 颗粒监测参数的计量发展

颗粒参数涵盖多个维度，共同决定其环境行为与健康效应。粒径分布（如 D_{50}、$PM_{10}/PM_{2.5}/PM_1$）影响颗粒在呼吸道内的沉积部位与清除机制。形貌与结构（球形度、长径比、表面粗糙度、团聚/包覆状态）关联颗粒的光学、流体及毒理学特性。化学组分包括无机元素、水溶性离子、碳质组分及有机/生物分子，决定其化学反应活性和毒性。生物活性特指生物气溶胶中微生物（细菌、真菌、病毒）的存活能力、致病性与免疫原性。质量或数量浓度（μg/m³ 或个/m³）是暴露评估与污染控制的核心指标。

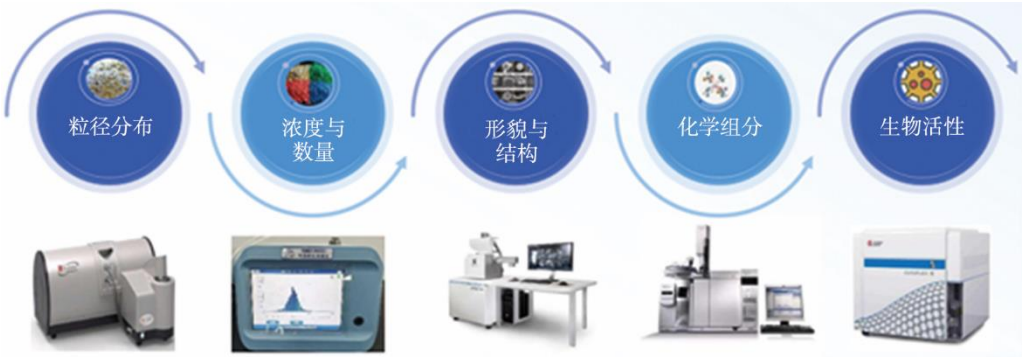


图 4 颗粒参数及检测设备

3.1 粒径分析与筛分

粒径是颗粒物的最基本参数，粒径分布的准确测量是质量浓度换算、来源解析、健康效应评估的基础。

3.1.1 粒径分析

1）粒径分析技术的发展

20 世纪 90 年代之前，颗粒粒径分析主要依赖筛分法、光学显微镜法和沉降法等传统手段。筛分法基于机械筛分，适用于较大颗粒（通常大于 38 μm）；沉降法依据 Stokes 定律测量颗粒在流体中的沉降速度，适用于微米级颗粒；光学显微镜法通过目视测量颗粒投影尺寸，虽直观但效率低且主观性强。

20 世纪 70 年代，光散射技术的引入成为关键转折点。动态光散射（DLS）通过分析悬浮液中颗粒布朗运动引起的散射光涨落来测定粒径，激光衍射法则基于颗粒对激光的夫琅禾费衍射和米氏散射理论反演粒径分布，两类技术显著提升了测量的精度与效率。90 年代起，激光粒度仪凭借测量速度快、重复性好、适用粒径范围宽（0.1～3 mm）等优势，开始逐步取代离心沉降法等传统手段。进入 21 世纪后，颗粒表征技术进一步向纳米尺度延伸，纳米颗粒追踪分析（NTA）、电泳光散射（ELS）以及超快速图像动态光散射等新技术相继问世，超快速图像动态光散射方法，可在微秒级时间内实时测量纳米颗粒平均粒径。同时，图像分析法借助 CCD/CMOS 探测器与计算机图像处理技术，实现了从静态图像到动态图像分析的跨越，可直接溯源至 SI 单位，成为粒度国家标准物质定值的基准手段。

2）计量及标准化的发展

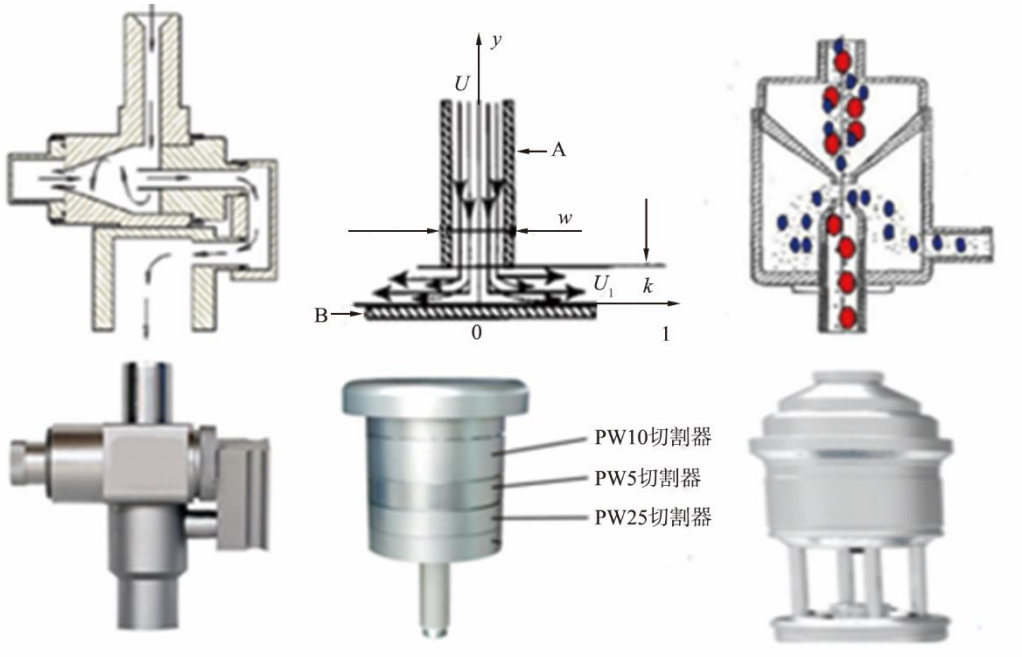
在计量技术规范方面，JJF 1211—2008《激光粒度分析仪校准规范》率先覆盖了静态光散射原理的激光粒度分析仪，随后 JJG 1104—2015《动态光散射粒度分析仪检定规程》的发布，进一步填补了纳米尺度颗粒测量仪器的计量检定空白。

3.1.2 粒径筛分的计量及标准化

1）粒径切割-分离技术的发展

近 30 年来，颗粒粒径切割与分离技术经历了从机械式惯性分离向精密化、多样化、标准化发展的深刻变革。惯性撞击原理自 19 世纪中叶被发现以来，一直是颗粒粒径分级最核心的技术基础。1945 年多级撞击器（级联撞击器）的问世，实现了空气动力学粒径的多级分离采集。20 世纪 70 年代，计算流体力学的引入使撞击器具备了尖锐的切割特

性曲线，随后惯性撞击器被确立为颗粒物分类的标准设备。1966 年虚拟撞击器技术被提出，以中间收集腔替代冲击板，从根本上避免了颗粒破碎和反弹问题，成为大气监测和固定污染源测评领域的重要工具。20 世纪 90 年代以来，虚拟冲击技术在全球范围内持续发展，中国的研究起步较晚但进展迅速。近年来，微流控芯片与鞘流技术被引入虚拟撞击器设计，切割粒径可下探至亚微米尺度。旋风分离器作为基于离心力的工业化分离设备，切割粒径（D_{50}）测定方法日趋成熟，高性能旋风分离器分割粒径可达 3～10 μm。



（a）旋风式 （b）撞击式 （c）虚拟撞击式

图 5 切割器原理

2）计量及标准化的发展

在切割器计量检测方面，国内先后建立了分流法和静态箱法 2 种技术。在技术规范制定方面，2021 年，JJF（京）78—2021《PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 切割器校准规范》正式发布，统一了地方切割器的评价方法与计量要求。中国环境监测总站发布了《$PM_{2.5}$ 切割器切割效率测试技术要求（试行）》，用于指导监测系统内部的质量控制。

在标准化建设方面，国际标准化组织颗粒表征技术委员会（ISO TC 24）发布了 ISO 9267-4：2001《粒度分析结果的表述 第 4 部分：分级过程的表征》。在国内，GB/T 45322.1—2025《颗粒 粒度切割器切割性能测试 第 1 部分：通则》、GB/T 45322.2—2025《颗粒 粒度切割器切割性能测试 第 2 部分：分流法》和 GB/T 45322.3—2026《颗粒 粒度切割器切割性能测试 第 3 部分：静态箱法》已正式批准发布，第 4 部分《洗脱法》正在制定中，形成了覆盖通则、分流法、静态箱法和洗脱法的完整测试标准体系。

3.2 数量浓度（计数）

气溶胶计数技术是指对气体介质中悬浮颗粒物的数量浓度与粒径分布进行测量的技术总称。近 30 年来，该技术经历了从传统光学方法向高精度、多原理融合的深刻变革，其计量标准化体系亦同步建立并日益完善。

3.2.1 气溶胶计数技术的发展

气溶胶计数技术的发展可追溯至 20 世纪中叶。1947 年，Gucker 及其合作者率先研制出光学粒子计数器（OPC），利用颗粒通过激光光敏区时产生的散射光脉冲实现单颗粒计数和粒径分析。同时期，过饱和蒸汽冷凝原理被用于将亚微米颗粒长大至可探测尺寸。这里 Aitken 在膨胀型凝结核计数器（CNC）的开发中发挥了决定性作用，此后 Bricard 及其合作者进一步推动了稳态流凝结核计数器的发展。

现代主流气溶胶计数技术包括：光散射式粒子计数器（基于单颗粒光散射原理，适用于 0.1～10 μm 颗粒）、凝结核粒子计数器（CPC，通过蒸汽冷凝使亚微米颗粒长大至可探测尺寸，检测下限可达数纳米）、气溶胶粒径谱仪（兼具计数与粒径谱测量功能）、空气动力学粒径谱仪（适用于 0.5 ～20 μm 颗粒），以及扩散荷电法和电迁移分级法等。近年来，超细颗粒物数量浓度（PN）测量技术在机动车排放法规中得到广泛应用，中国自国五阶段起在法规中明确提出柴油车 PN 控制要求，并在国六阶段进一步将 PN 限值监测范围扩展至轻型车。

3.2.3 计量与标准化发展

在计量方面，JJF 1190—2008《尘埃粒子计数器校准规范》通过比对法，建立了光散射式激光尘埃粒子计数器的校准方法；JJF 2295—2025 《在线尘埃粒子计数器校准规范》则通过溯源到颗粒静电计的技术，建立了在线尘埃粒子计数器的校准方法。

JJF 1864—2020《气溶胶粒径谱仪校准规范》适用于光散射法和空气动力学法原理、粒径测量范围为 0.1～100 μm、数量浓度测量范围为 50～7000 cm^{-3} 的气溶胶粒径谱仪的校准。

JJF 2215—2025 《移动源排放颗粒物数量检测仪校准规范》适用于采用凝结核粒子计数法或扩散荷电法原理，测量移动源排放气体中颗粒物浓度的台架式和便携式颗粒物数量检测仪的校准，并规定了各自的颗粒物浓度校准范围。

JJF 2366—2026《法拉第杯气溶胶静电计校准规范》则为颗粒数量浓度测量的另一技术路线提供了计量依据。

JJF 2066—2023《气溶胶稀释器校准规范》适用于流量范围为（1～30）L/min、稀释比为 1～300 的限流式与流量式气溶胶稀释器的校准，其他原理的稀释器可参照执行。

在国际层面，ISO 21501 系列标准构成了气溶胶单颗粒光学测量方法的核心规范。其中，ISO 21501-1:2025（最新第 2 版）规定了光散射气溶胶光谱仪的校准程序和验证方法，涵盖粒径、数量浓度和数量粒径分布的测量要求；ISO 21501-4:2018 描述了光散射空气悬浮粒子计数器的校准与验证方法，适用于粒径范围 0.1～10 μm，涵盖粒径设定误差、计数效率、粒度分辨率、虚假计数、最大颗粒数量浓度等关键参数，被广泛应用于洁净室空气洁净度分级。针对凝结核粒子计数器，ISO 27891:2015 规定了其检测效率的确定方法，适用范围为颗粒数量浓度 1～10^3 cm^{-3}、粒径约 5～1 000 nm，进样流量 0.1～5 L/min。

3.3 质量浓度

近 30 年来，烟尘、粉尘、扬尘等不同类型颗粒气溶胶的质量浓度检测技术及其计量标准化，因应用场景的差异而各有侧重，却又在技术原理和标准体系上相互交融，共同构成了我国环境监测与职业卫生防护的重要技术基础。

3.3.1 固定污染源颗粒物

烟尘检测针对的是固定污染源（锅炉、工业炉窑等）排气管道中有组织排放的颗粒物。上世纪七八十年代，国内主要采用手动调节静压平衡和动压平衡采样器作为监测手段。1988 年 GB 9079—1988《工业炉窑烟尘测试方法》和 1991 年 GB 5468—1991《锅炉烟尘测试方法》相继发布，奠定了早期烟尘测试的标准基础。1996 年，GB/T 16157—1996《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》正式实施，提出“滤筒过滤称重法”，该方法成为烟尘测试沿用至今的经典方法。2001 年 GB 13271—2001《锅炉大气污染物排放标准》对各类污染物排放限值要求更加严格，2011 年 GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》首次提出“超低排放”概念。2017 年，HJ 836—2017《固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 重量法》提出“滤膜过滤采样头整体称重重量法”，解决了低浓度排放场景的测定难题。HJ 1457—2026《固定污染源废气 低浓度颗粒物的测定 便携式 β 射线法》提出“β 射线吸收法”，开启了烟尘直读时代。在连续监测方面，HJ 76—2017《固定污染源烟气（SO_2、NOx、颗粒物）排放连续监测系统技术要求及检测方法》对烟气排放连续监测系统的设计、生产和检测作出规定。

计量检定方面，JJG 680《烟尘采样器检定规程》历经 2007 和 2021 版迭代。JJG 846—2015《粉尘浓度测量仪检定规程》等计量技术规范为光散射式烟尘测量仪器的量值溯源提供了依据。JJF 2290—2025《便携式烟尘浓度测试仪校准规范》适用于测量范围为 0～50 mg/m³、基于 β 射线测量原理的便携式烟尘浓度测试仪的校准。该规范为 HJ 1457—2026 的准确检测提供了统一、可溯源的计量依据，实现了烟尘检测“有标可依、有据可循”。

3.3.2 粉尘/职业卫生暴露

粉尘检测主要针对作业场所空气中颗粒物对劳动者健康的危害评价。1969 年世界卫生组织通过关于呼吸性粉尘的有关规定后，逐渐发展为测定呼吸性粉尘的质量浓度。中国测尘工作始于 1950 年初，以常规方法测定粉尘的质量浓度、分散度和游离二氧化硅含量。1979 年《工业企业设计卫生标准》（TJ36—1979）规定了车间粉尘最高容许浓度，后续标准如 GBZ/T 192.6—2018 进一步细化了超细颗粒检测方法。在检测方法方面，除重量法外，光散射法凭借实时监测优势得到了广泛应用，LD98—1996《空气中粉尘浓度的光散射式测定法》和 WS/T 206—2001《公共场所空气中可吸入颗粒物（PM_{10}）测定法-光散射法》等标准为光散射法粉尘测试仪的推广应用提供了技术规范。

在计量检定方面，JJG 520—2005《粉尘采样器检定规程》适用于粉尘采样器（含飘尘采样器）的首次检定、后续检定及使用中检验，规定了呼吸性粉尘采样器及采样流量可调粉尘采样器的准确度等级要求。JJG 520 与 JJG 680《烟尘采样器检定规程》、JJG 956《大气采样器检定规程》、JJG 943《总悬浮颗粒物采样器检定规程》等共同构成了环境监测采样设备的计量检定体系。JJG 846—2015《粉尘浓度测量仪检定规程》等计量技术规范为光散射式粉尘浓度测量仪器的量值溯源提供了依据。

3.3.3 扬尘及无组织排放

扬尘检测针对的是施工场地、道路、堆场等开放源无组织排放的颗粒物。2012 年，GB 3095-2012《环境空气质量标准》规定了 PM_{10} 日均浓度限值（≤150 μg/m³）。2019 年，河北省率先发布 DB13/2934—2019《施工场地扬尘排放标准》，确定监测点 PM_{10} 小时浓度限值为 80 μg/m³，并明确了达标判定依据。2021 年，T/CCES 26—2021《建筑施工扬尘防治与监测技术规程》发布，针对建筑施工过程中扬尘污染控制与监测作出规定。2025 年，生态环境部发布 HJ 1411—2025《环境空气 颗粒物来源解析 开放源扬尘采样技术

规范》，规定了土壤扬尘、道路扬尘、施工扬尘、堆场扬尘、混合扬尘等五类开放源扬尘的采样技术要求。

在监测仪器方面，光散射法和 β 射线法是扬尘在线监测的主流技术原理，目前《扬尘在线监测仪》国家校准规范正在制定中，北京、天津、河北、宁夏、山东等省市已经率先发布了适用于该地区的扬尘在线监测系统（或仪器）的校准规范。例如，JJF（京）131-2024 《扬尘在线监测系统校准规范》适用于测量范围 0～30 mg/m³ 的扬尘在线监测仪的校准。

3.3.4 油烟排放

餐饮油烟监测技术经历了从人工抽检向实时在线监测的根本性转变。光散射法已成为行业主流技术路径：通过发射激光或红外光照射油烟颗粒，测量散射光强度反演质量浓度，具有响应速度快（秒级）、适合现场连续监测的优势。

目前成熟的在线监测系统实时监控油烟浓度、颗粒物（$PM_{2.5}$/PM_{10}）及非甲烷总烃三项核心指标，同步采集风机/净化器的运行状态，实现污染从源头到排烟口“全链条”可追溯。技术发展方向已从单一参数的监控，演进至与大数据分析、AI 算法及物联网平台全方位融合的智能化阶段。

计量校准规范方面，《餐饮油烟浓度监测仪》国家校准规范正在制定；JJF（浙）1235—2026《光散射法油烟颗粒物在线监测仪校准规范》，适用于油烟浓度 0～10 mg/m³、颗粒物浓度 0～50 mg/m³ 的光散射法在线监测仪的校准。上述计量校准规范的推出，旨在将不同类型的油烟在线监测仪通过标准方法溯源至权威计量基准，确保监测数据准确性与统一性，为环境执法提供坚实技术支撑。

此外，行业标准《基于光散射法的油烟颗粒物在线监测仪》正在制定中。团体标准方面，T/ZAEIEP 001—2020《餐饮油烟在线监测仪及智慧监测平台技术规范》、T/ZS 0406—2022《餐饮油烟在线监测仪》等已发布实施，对设备功能、技术要求和试验方法作出规定，为餐饮油烟监测提供了补充性技术依据。

3.3.5 超细颗粒与可凝结颗粒。

近年来，我国大气颗粒物污染治理呈现出从“质量控制”向“健康风险精细评估”与“全组分管控”转型的显著特征，具体体现在对亚微米颗粒物（PM_1） 及可凝结颗粒物（CPM） 的关注与监测上。

学界与管理部门逐渐认识到 PM_1（空气动力学直径≤1 μm）因具有更高的肺沉积率和重金属富集能力，健康危害可能甚于 $PM_{2.5}$。在可凝结颗粒物（CPM）监测方面，政策与标准取得了突破性进展。传统监测主要关注过滤性颗粒物（FPM），忽略了在烟囱内以气态形式排放、排入大气后迅速冷凝形成的 CPM。为弥补这一缺失，2024 年以来，广东省及河南省等行业组织先后发布了基于“干式冲击冷凝法”的 CPM 监测技术规范。同时，电力行业也出台了针对燃煤电厂的稀释间接法标准。这些标准的密集出台，标志着我国对固定污染源的管控，已从“显性”的过滤性颗粒物延伸至“隐形”的可凝结颗粒物，旨在更加科学地评估污染源对大气 $PM_{2.5}$ 的实际贡献，实现颗粒物的全物种精细化管控。

3.3.6 净化评价

气溶胶光度计是专门用于快速测定空气中悬浮颗粒质量浓度的光散射类仪器，仪器能随采样实时高速指示颗粒浓度，被广泛应用于洁净室高效/超高效过滤器的现场检漏测试。

2020 年，国家市场监督管理总局发布了 JJF 1800—2020《气溶胶光度计校准规范》，适用于测量范围 0.01～100 μg/L 的光散射原理气溶胶光度计的校准，其他测量范围的气溶胶光度计可参照执行，并明确以手工称重法进行校准和量值溯源，形成以重量法为基准的完整量值溯源体系。标志着我国气溶胶光度计正式纳入国家量值溯源体系，为洁净室检漏、生物安全柜性能测试、口罩防护效果测试等关键环节提供了统一的计量法律依据，有力保障了半导体制造、生物医药及公共卫生等领域的环境安全与产品质量。

3.4 颗粒组分

3.4.1 分析技术

颗粒物的化学组成（碳组分、水溶性离子、无机元素）是来源解析和健康效应研究的关键信息。

碳组分分析。有机碳（OC）和元素碳（EC）是颗粒物中的重要组分，分别指示燃烧源和二次有机气溶胶。热光反射法（TOR）和热光透射法（TOT）是 OC/EC 分析的主流方法，通过程序升温，将碳组分氧化为 CO_2 并检测，同时用激光监测滤膜反光率和透光率变化校正裂解碳。2025 年，中国成功研制出有机碳/元素碳滤膜基底标准物质，攻克了均匀沉积与量值精准调控技术。

水溶性离子与无机元素。离子色谱法用于分析硫酸根、硝酸根、铵盐等水溶性离子；电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）或 X 射线荧光（XRF）用于分析无机元素。澳大利亚

ANSTO 的加速器离子束分析技术可在数分钟内同时测量氢到铅的 25～30 种元素，样品量仅需 300 μg（相当于普通人一天吸入的颗粒物量）。这种高灵敏度、非破坏性的分析技术为来源解析提供了有力工具。

单颗粒组分分析。近年来，气溶胶的飞行时间质谱（ATOFMS）、单颗粒气溶胶质谱（SPAMS）等单颗粒分析技术快速发展，可实时测量单个颗粒的粒径和化学组成，为认识颗粒混合状态、老化过程提供了前所未有的细节。

3.4.2 计量与标准化

2025 年，市场监管总局组织的科研攻关取得重大突破：研究团队攻克了滤膜基底颗粒物的均匀沉积技术、气溶胶稳定发生技术、多组分同步定值技术，成功研制出有机碳或元素碳、水溶离子、无机元素等三类滤膜基底标准物质，申报颗粒物化学成分标准物质 3 项。这些标准物质为我国大气颗粒物源解析和碳组分监测提供了关键技术支撑。

2023 年，生态环境部首次发布 3 项颗粒物组分连续自动监测技术规范，均为国家生态环境标准（HJ 标准）：

HJ 1328—2023《环境空气颗粒物（$PM_{2.5}$）中水溶性离子连续自动监测技术规范》，规定了 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子（Cl^-、NO_3^-、SO_4^{2-}、Na^+、K^+、NH_4^+、Ca^{2+}、Mg^{2+}等）连续自动监测系统的方法原理与系统组成、技术性能、安装调试、运行维护、质量保证与质量控制、数据有效性判断等技术要求。

HJ 1327—2023《环境空气颗粒物（$PM_{2.5}$）中有机碳和元素碳连续自动监测技术规范》，适用于采用热学-光学校正法或热学-光学衰减法的自动监测系统，是颗粒物碳组分监测的核心标准。

HJ 1329—2023《环境空气颗粒物（$PM_{2.5}$）中无机元素连续自动监测技术规范》，适用于采用能量色散 X 射线荧光光谱法的无机元素连续自动监测系统。

上述 3 项标准均由生态环境部发布，与采用实验室手工分析方法的现行标准相比，三项标准具有自动化程度高、干扰因素较少等优点，可用于指导我国颗粒物组分自动监测工作的开展。

此外，在手工监测领域，中国环境监测总站还发布了《国家大气颗粒物组分网手工监测作业指导书（第一版）》，规定了颗粒物组分的手工采样与实验室分析流程。同时，中国环境监测总站还制定了《环境空气颗粒物有机碳、元素碳连续自动监测技术规定》等 3 项技术规定，以及《大气颗粒物组分自动监测数据审核技术指南（试行）》，进一步

规范了组分自动监测的数据质量控制工作。

与常规颗粒物质量浓度监测相比，颗粒物化学组分检测仪器的计量技术规范起步较晚，目前尚处于地方先行探索阶段。浙江省已发布 JJF（浙）1211—2025《大气颗粒物水溶性离子成分在线分析仪校准规范》。在国家层面，环境空气颗粒物（$PM_{2.5}$）中水溶性离子连续自动监测系统校准规范、以及有机碳/元素碳监测系统校准规范等计量技术规范目前仍在制定中，尚未正式发布。

3.5 生物气溶胶

生物气溶胶（细菌、真菌、病毒、花粉等）因其健康风险和生物安全意义，成为近 20 年来颗粒物监测领域发展最快的分支之一。

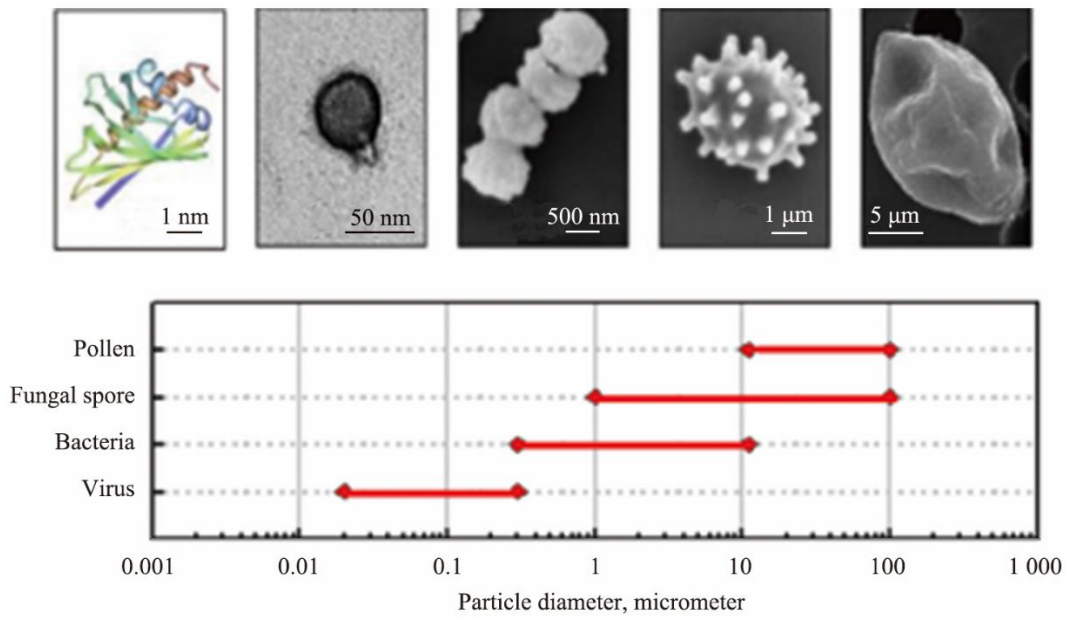


图 6 生物气溶胶种类与尺寸

3.5.1 采样技术

在采样技术方面，传统安德森采样器或滤膜法虽准但慢，难以满足应急需求。疫情催生了快速液体捕获技术与大流量富集技术的快速发展。例如，基于“逆雾流碰撞凝并”原理的快采系统（BIAFTS）可在 2～4 min 内将气溶胶捕获至液体基质，实现了对病毒颗粒的快速采样与富集。同时，针对病房等高风险环境，主动式生物气溶胶采样器结合 RT-PCR 检测，已被验证可有效捕获并定量空气中的病毒 RNA，为感染控制提供了直接工具。

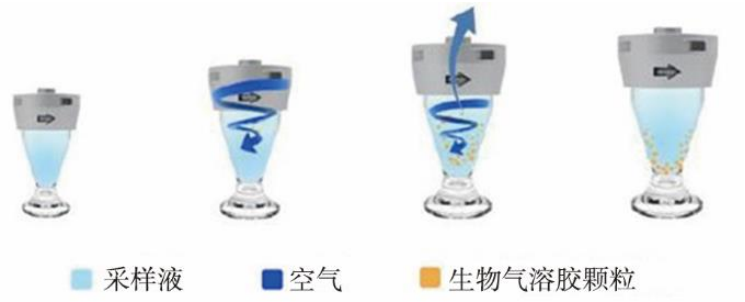


图 7 气旋式采样器原理

3.5.2 检测技术

传统方法：培养法的局限。传统的生物气溶胶监测依赖撞击式采样器将颗粒收集到培养基上，然后进行恒温培养、菌落计数（colony-forming unit ，CFU）。这一方法存在明显短板：低浓度环境下需要长时间采样才能获得可计数菌落；培养过程通常需要 24～48 h，无法满足实时预警需求；可培养微生物仅占空气中微生物总量的很小比例。

荧光法：实时监测的突破。基于紫外激光诱导荧光的在线监测技术，是近二十年来生物气溶胶监测的最重要突破。其原理是：微生物细胞内的色氨酸、NADH、核黄素等分子在紫外光激发下会产生特征荧光，通过检测单颗粒荧光信号即可判断其生物属性。国际上，基于激光诱导荧光的生物气溶胶监测设备在过去二十年取得显著进展：探测粒径范围不断扩展（从数微米到亚微米）、探测通道不断细分（多波段荧光识别）、激发光源成本持续优化。2020 年新冠病毒疫情后，这一技术受到空前关注，在公共场所生物安全监测中发挥了重要作用。

集成化系统：从采样到识别的全流程自动化。全集成现场生物气溶胶监测系统（IBEMA-sys），实现了从气载细菌富集、液体培养基捕获、显微培养到机器学习自动计数的全流程自动化。该系统利用惯性分离仅允许大于 1 μm 的颗粒进入，通过气液流量差实现约 10^7倍的浓度富集，对大肠杆菌生物气溶胶的收集效率达到 99.9%，检测限低至 30 CFU/m³，3 h 内即可完成计数，准确率 95%。这一进展标志着生物气溶胶监测正从实验室离线分析迈向现场实时智能监测。

3.5.3 计量与标准化发展

面对技术的快速迭代与应用需求的爆发，我国标准化工作迅速跟进，构建了层级分明的标准体系：

基础通用标准：2020 年，GB/T 38517—2020《颗粒 生物气溶胶采样和分析 通则》正式实施。该标准由全国颗粒表征与分检及筛网标准化技术委员会归口，首次系统规定了环境空气中细菌、病毒、真菌和毒素等不同特性生物气溶胶的采样与分析通用原则，解决了以往因缺乏统一操作程序导致的数据难以比对的问题。

计量校准规范：JJF 1826—2020《空气微生物采样器校准规范》规定采样流量及计时误差等关键计量特性，并特别引入采样物理效率作为核心指标，以菌落示踪法为技术路线，涵盖 0.7～15 μm 粒径范围，以评价采样器对不同粒径含微生物粒子的真实捕集性能。JJF 2304—2025《生物气溶胶采样器校准规范》明确了工作流量范围为 100～1 000 L/min 的生物气溶胶采样器的校准方法，以气溶胶粒径谱仪法为技术路线，明确了不同粒径采样物理效率的检测方法，并引入了采样生物效率。它的出台，确保了不同原理采样器（如撞击式、旋风式、液体冲击式）所获数据的可比性与准确性。

《荧光法生物气溶胶监测仪校准规范》正在制定中。目前，针对此类仪器的性能评价与校准技术研究可参照 T/CSP 7—2020《紫外荧光生物气溶胶监测仪 技术要求》、T/CAB 0391—2024《荧光法生物气溶胶监测装置技术条件》。

3.5.4 计量展望

在计量技术层面，生物气溶胶的溯源面临核心挑战——标准物质缺失。与常规颗粒物（如二氧化硅）不同，活性生物粒子的存活状态、聚集形态直接影响采样效率。目前，研究者正尝试使用噬菌体（如 ϕ29）或灭活的标准菌株作为替代物，用于评估采样器的物理采样效率与生物存活率。

展望未来，随着 JJF 2304—2025 的落地实施，我国生物气溶胶监测将实现“有规可依”。下一步的重点方向将集中在：一是开发荧光法在线监测仪器的现场校准装置；二是建立空气中病毒浓度的定量溯源链，将 PCR 测得的 Ct 值转化为可溯源至国际单位制的生物颗粒数量浓度，真正实现生态环境领域生物气溶胶的精准计量与智慧监管。

4 计量技术与溯源体系的发展

计量溯源体系的建设是颗粒粒径分析实现可比、可靠测量的基石。图像分析法由于可通过电子显微镜直接测量颗粒几何尺寸，成为可溯源至 SI 单位的基准方法。在此基础上，我国已成功研制数百种颗粒物粒度国家标准物质，覆盖大气颗粒物到生物荧光颗粒物等关键监测对象，有效解决了环境监测和生物气溶胶检测等领域对颗粒物监测仪器进

行量值溯源传递的迫切需求。此外，针对超细颗粒物数量浓度的计量溯源，基于带电颗粒感应微电流原理的校准系统实现了 PN 检测仪的直接溯源至国际单位“安培”。

4.1 颗粒计量学的特殊性

颗粒计量的难点在于：颗粒是一个“群体”而非单一实体，其测量结果依赖于测量原理和操作定义。例如，“粒径”可以是几何直径、空气动力学直径、散射等效直径、迁移率直径，不同方法测量的结果不可直接比较。因此，颗粒计量必须建立在一套公认的定义、参考方法和标准物质基础上。

4.2 标准物质的研制与突破

标准物质是量值传递的载体，也是不同仪器、不同实验室测量结果可比的基础。国际标准化组织颗粒表征技术委员会（ISO TC 24）推动了一系列粒径标准物质的应用，包括单分散标准（如聚苯乙烯微球）、多分散标准、计数标准、比表面积标准、Zeta 电位标准等。中国国家标准颗粒表征与分检及筛网标准化技术委员会（TC 168）已发布 60 项国家标准，涵盖各类颗粒标准物质的技术要求。近年来，我国在该领域的研制与体系建设取得显著进展。

4.2.1 标物发展概况

中国计量科学研究院官网显示，可提供有证标准物质 2 567 种，覆盖 11 个专业领域。在颗粒标准物质领域，目前国内微米、纳米系列粒度标准物质已达到世界前沿水平，其中 $PM_{2.5}$、可见异物等百余种标准物质的研制成功填补了国内空白。综合估算，目前国内颗粒类有证标准物质（含粒径、数量浓度、功能性等）总数约为 500～700 种，具体分布如下。

1）粒径标准物质（粒度标准物质）品种数：180～200

粒径标准物质是颗粒计量领域最基础、数量最多的类别，已形成从纳米到数百微米较完整的量值序列。根据文献记载，我国现有 18 种国家一级粒度标准物质，涵盖标称粒径从 60nm～8 μm 的聚苯乙烯微球，以及 150 nm～2 μm 的二氧化硅微球等。2020—2025 年，二级粒度标准物质（GBW（E）系列）加速扩充，每年新增数十种。

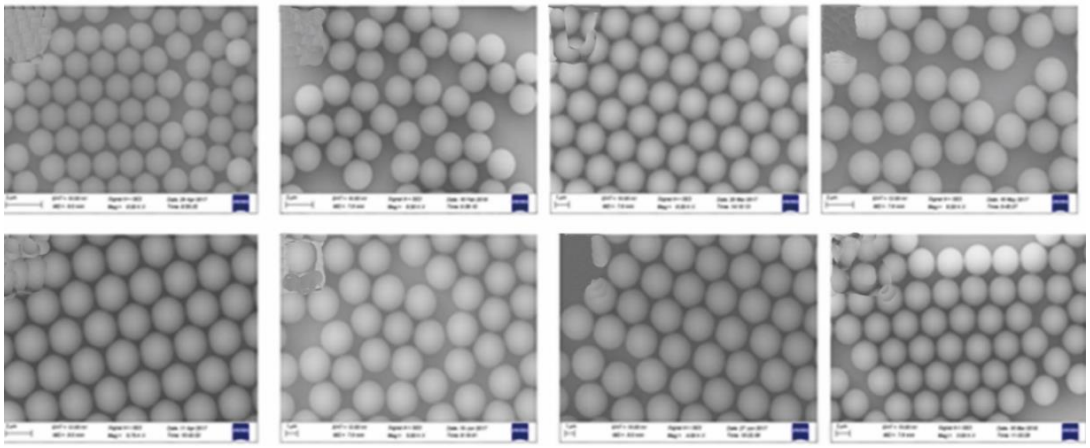


图 8 $PM_{2.5}$ 系列颗粒标准物质

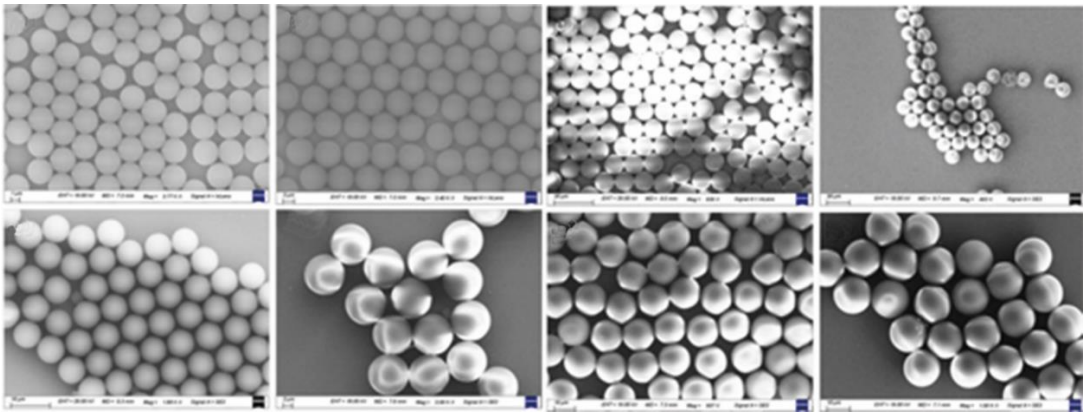


图 9 PM_{10} 系列颗粒标准物质

2）数量浓度标准物质品种数：40～60

颗粒数量浓度标准物质是近年发展的新兴方向。主要代表性品种包括 GBW(E)090306、GBW（E）090307 等颗粒数量浓度标准物质，以及分散于粒度标准物质中的“累计颗粒数量浓度”衍生规格（如 GBW（E）120149 油基多分散颗粒标准物质，同时给出 31 个粒级的颗粒数量浓度标准值）。

3）功能性颗粒标准物质品种数：30～50

功能性颗粒标准物质是指除粒径/数量浓度外还具备特定检测功能的颗粒类标准物质，如“液体颗粒计数器检定用标准物质”“油中颗粒标准物质”“血液细胞颗粒标准物质”“荧光标记颗粒”等。目前代表性品种包括 GBW（E）120027（液体颗粒计数器检定用标准物质）、GBW（E）120017/GBW（E）120149 等油基颗粒标准物质。GBW（E）120043 等可见异物检测用颗粒标准物质在注射剂、滴眼剂等药品质量控制中具有特定用途。

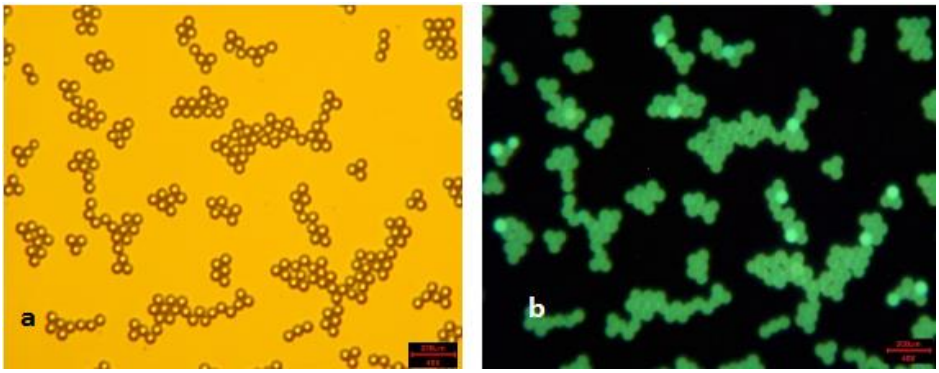


图 10 荧光颗粒标准物质

在国内颗粒标准物质的研制与生产中，民营企业是重要的市场力量。例如北京海岸鸿蒙拥有约 800 余种标准物质，其中有证颗粒标准物质 200 余种，颗粒标准物质及功能微粒产品种类超过 3 000 种，涵盖颗粒尺寸从 15 nm～1000 μm。

表 1 国内颗粒标准物质情况

颗粒标物种类	数量/种	代表性品种
颗粒有证标准物质（总量）	500～700	涵盖粒径、数量浓度、功能性三大类
粒径标准物质	180～200	GBW12031、GBW（E）120090、国家一级粒度标准物质（18 种）等
数量浓度标准物质	40～60	GBW（E）090306、GBW（E）090307 等
功能性颗粒标准物质	30～50	GBW（E）120027（检定用）、GBW（E）120043（可见异物检测）、油基颗粒标准物质等

4.2.2 关键作用与应用

1）支撑大气污染防治与环境精准治理。颗粒物标准物质为遍布全国的环境空气自动监测站、污染源在线监控设备及科研实验室提供统一的校准基准，使不同设备间的监测数据实现可比与可溯源，解决了传统监测中“量值迷雾”的技术瓶颈。研究表明，采用氯化钠标准溶液稳定生成的颗粒物标准物质，其对 $PM_{2.5}$ 质量浓度分析仪的校准不确定度可降至 4.6%（k=2），显著低于手工重量法。

2）保障职业健康与安全生产。粉尘标准物质是工作场所空气中粉尘测定方法标准的技术核心，支撑总粉尘浓度、呼吸性粉尘浓度及游离二氧化硅含量等关键指标的准确测量，为职业病危害作业分级管理提供计量依据。

3）赋能生物医药与纳米科技发展。纳米颗粒标准物质在纳米药物研发中用于校准动态光散射仪、激光粒度仪等设备，确保药物载体粒径分布的准确测量，直接影响药物的

溶解度、吸收率和生物利用度。在外泌体分析和癌症诊断中，通过与乳胶微粒标准物质比对，可有效区分外泌体与细胞碎片或其他纳米颗粒，显著提高诊断的特异性和灵敏度。

4）服务高端制造与工业质控。在半导体制造、精密机械加工等高端制造领域，颗粒标准物质在设备校准、产品质量控制等方面发挥关键作用，为“中国制造”高质量发展提供计量支撑。在制药行业，微粒检定参照物被广泛应用于注射类药物和眼药水的质量控制，满足 USP 等国际标准要求。

5）推动量值溯源与国际互认。我国标准物质的国际计量互认能力已稳居国际第一梯队，标准物质成功出口至 20 余国，极大提升了我国在全球计量领域的话语权与影响力。

4.3 计量技术的变迁：从滤膜称重到气溶胶直接校准

生态环境颗粒物监测的核心是浓度测量的准确性。三十年来，计量校准技术经历了从“间接比对”到“直接溯源”的三代跨越。

4.3.1 第 1 代：滤膜采样称重——基准的确立

早期颗粒物浓度监测以滤膜采样称重法为唯一基准。该方法看似简单，实则对两个环节要求极为苛刻：一是采样流量的准确性，必须恒定且可溯源（通常使用皂膜流量计校准，误差±2%）；二是称重的精密性，滤膜需在恒温恒湿（（20±1）℃，（50±5%） RH）条件下平衡 24 h 以上，使用感量 0.01～0.001 mg 的分析天平。这一方法虽然准确，但属于“事后”计量——只能评价采样和分析过程，无法对现场监测仪器进行直接校准。

4.3.2 第 2 代：气溶胶模拟仓比对——自动监测的校准桥梁

光散射法、β 射线法等在线监测技术兴起后，如何判定这些快速仪器的准确性？国际通行的解决方案是气溶胶模拟仓比对法，JJG 846—2015《粉尘浓度测量仪》、JJF 1659—2017《$PM_{2.5}$质量浓度测量仪》、JJF 1800—2020《气溶胶光度计校准规范》也都是这么做的。在一个密闭、可控的仓体内发生稳定浓度的颗粒物气溶胶（如 ISO 12103-1 标准试验尘），将待校准的自动监测仪与标准滤膜采样器并排放入仓中，在相同环境、相同时间内同步采样。

通过比对自动仪器的读数与滤膜称重结果，建立校准曲线。这种方法解决了“现场实时仪器如何溯源”的问题，但缺点在于：模拟仓内的颗粒物成分、粒径分布与实际大气仍有差异，且比对过程耗时较长，无法实现单台仪器的快速、独立校准。

对于高浓度或高流速的测试环境，需要采用水平风动来发生颗粒气溶胶，并与滤膜采样称重进行比较，例如 JJG 846—2015《粉尘浓度测量仪》、JJF 2290—2025《便携式

烟尘浓度测试仪校准规范》。对于长期在室外在线监控的仪器，还应考虑高温、高湿度等环境对仪器计量性能的影响，例如在修订中的《扬尘在线监测仪》国家校准规范、JJF（京）131—2024 《扬尘在线监测系统校准规范》等。

4.3.3 第 3 代：可控颗粒气溶胶直接校准——精准计量的飞跃

近年来，计量技术实现了根本性突破——直接发生质量浓度或数量浓度已知的标准颗粒气溶胶，对监测仪器进行“一步到位”的校准。

质量浓度可控气溶胶：采用喷雾法将已知浓度的盐溶液（如氯化钠或硫酸铵）雾化，经干燥、荷电中和、粒径筛选后，产生质量浓度可精确计算的标准颗粒气溶胶。由于溶质质量分数已知、雾化效率可控，输出的颗粒物质量浓度可直接溯源至质量与体积的 SI 单位，无需依赖滤膜称重作为中间环节。

数量浓度可控气溶胶：包括振动孔（vibrating orifice aerosol generator，VOAG）和喷墨（inkjet aerosol generator，IAG）等气溶胶发生方式。VOAG 将极稀的聚苯乙烯微球悬浊液通过高频振动的小孔喷射成均匀液滴，溶剂挥发后形成单分散固体颗粒。通过控制溶液浓度和振动频率，可精确计算每个颗粒的粒径和单位体积内的颗粒个数。这一技术为凝结核粒子计数器（CPC）、光学粒子计数器（OPC）等数量浓度测量仪器的直接校准提供了标准物质级的溯源路径。IAG 的喷墨头以恒定速率产生溶液液滴，经过静电中和的液滴流过蒸发管后产生干燥、浓度已知的单分散固体颗粒。IAG 发生的气溶胶可以作为数量浓度的参考标准，用于光学粒子计数器（OPC）、光散射气溶胶光谱仪（LSAS）以及生物荧光空气颗粒计数器（BFPC）计数效率的校准。ISO 21501-1、ISO 21501-4 以及制定中的 ISO 19676 都将该方法写进了计数效率的测试方法中。

总之，从滤膜称重的间接比对，到模拟仓内的系统比对，再到盐雾化和振动孔技术的直接校准，颗粒物浓度计量走过了一条从“劳动密集型”到“物理溯源型”的进阶之路。这一演进不仅提升了监测数据的可靠性，也为我国 PM2.5、超细颗粒乃至生物气溶胶的精准监管奠定了坚实的计量基石。

5 标准规范体系建设

5.1 国际标准体系

国际标准化组织颗粒表征技术委员会（ISO/TC 24）是颗粒表征领域国际标准的制定机构。截至 2021 年，该委员会已发布 61 项国际标准、1 项技术规范、3 项技术报告。这

些标准涵盖了颗粒术语、样品制备、粒径分析方法、颗粒表征技术、参考物质要求等方面，构成了全球颗粒计量标准化的基础框架。

5.2 中国标准体系：从跟踪到并跑

5.2.1 国家标准层面

中国国家标准化管理委员会下设的颗粒表征与分检及筛网标准化技术委员会（TC 168）已发布 60 项国家标准，与 ISO 标准体系基本对应。

表 2 与颗粒表征仪器相关的国家标准

标准号	标准名称
GB/T 41949—2022	颗粒 激光粒度分析仪 技术要求
GB/T 6167—2007	尘埃粒子计数器性能试验方法
GB/T 42660—2023	气溶胶颗粒数量浓度 凝结核颗粒计数器的校准
GB/T 39990—2021	颗粒 生物气溶胶采样器 技术条件
GB/T 11446.9—2013	电子级水中微粒的仪器测试方法
GB/T 44223—2024	纳米技术 动态光散射法粒度分析仪技术要求
GB/T 29024.2—2025	粒度分析 单颗粒的光学测量方法 第 2 部分:光散射法液体颗粒计数器
GB/T 29024.3—2025	粒度分析 单颗粒的光学测量方法 第 3 部分:光阻法液体颗粒计数器
GB/T 29024.4—2017	粒度分析 单颗粒的光学测量方法 第 4 部分:洁净间光散射尘埃粒子计数器

5.2.2 环境保护标准层面

2011 年以来，环境保护部（现生态环境部）密集发布了一系列颗粒物监测相关标准，以 $PM_{2.5}$ 监测为例：

监测方法标准：HJ 618—2011《环境空气 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的测定 重量法》

手工监测规范：HJ 656—2013《环境空气颗粒物（$PM_{2.5}$）手工监测方法（重量法）技术规范》

仪器技术要求：HJ 93—2013《环境空气颗粒物（PM_{10} 和 $PM_{2.5}$）采样器技术要求及检测方法》

自动监测系统：HJ 653—2013《环境空气颗粒物（PM_{10} 和 $PM_{2.5}$）连续自动监测系统技术要求及检测方法》

安装验收规范：HJ 655—2013《环境空气颗粒物（PM_{10}和$PM_{2.5}$）连续自动监测系统安装和验收技术规范》

点位布设规范：HJ 664—2013《环境空气质量监测点位布设技术规范（试行）》

表 3 与颗粒仪器相关的环保标准

标准号	标准名称
HJ 1327—2023	环境空气颗粒物（PM2.5）中有机碳和元素碳连续自动监测技术规范
HJ 1328—2023	环境空气颗粒物（PM2.5）中水溶性离子连续自动监测技术规范
HJ 1329—2023	环境空气颗粒物（PM2.5）中无机元素连续自动监测技术
HJ 93—2026	环境空气颗粒物 （PM10 和 PM2.5） 采样器技术要求及检测方法
HJ 1100—2020	环境空气中颗粒物（PM10 和 PM2.5） β 射线法自动监测技术指南
HJ 653—2021	环境空气颗粒物（PM10 和 PM2.5）连续自动监测系统技术要求及检测方法
HJ 75—2017	固定污染源烟气（SO2、NOx、颗粒物）排放连续监测技术规范

5.3 计量技术规范体系

国家市场监督管理总局（原质检总局）组织制定的颗粒计量技术规范（JJF 系列）不断完善。目前颗粒物相关规程规范总计约 20 余项，涵盖检定规程（JJG）和校准规范（JJF）两大系列，形成“采样→切割→浓度测量→组分分析→生物识别”全链条计量法规保障，为环境监测、职业卫生和公共卫生的数据准确性提供了法制基础。

5.4 团体标准

国内颗粒仪器与仪器计量相关的团体标准已有一定积累，主要发布机构包括中国颗粒学会、北京粉体技术协会、中国仪器仪表行业协会、中国计量测试学会、中国产学研合作促进会及地方智能制造协会等。相关标准大致可分为以下 2 类：

5.4.1 仪器技术规范类标准

这类标准主要规定特定颗粒仪器的技术要求、功能性能及试验方法，为仪器设计、生产和检测提供技术依据。代表性标准包括：T/SCIAC 001—2021《尘埃粒子计数器》、T/CSP 7—2020《紫外荧光生物气溶胶监测仪 技术要求》、T/CAB 0391—2024《荧光法生物气溶胶监测装置技术条件》、T/CSP 11—2024《生物气溶胶过滤效率测试方法》、T/CSP 10—2024《生物气溶胶试验舱》及 T/HZSM 0001—2022《餐饮油烟、颗粒物在线监测仪（光散射法）技术要求及测量方法》等。

5.4.2 仪器校准与性能评价类标准

这类标准聚焦于颗粒仪器的计量校准方法、实验室间比对及性能评价，为仪器量值准确统一提供技术规范。

表 4 颗粒仪器计量技术规范

仪器类型	计量技术规范
采样器	JJG 956—2013《大气采样器》
	JJG 943—2011《总悬浮颗粒物采样器》
	JJG 520—2005《粉尘采样器》
	JJG 680—2021《烟尘采样器》
	JJF 1826—2020《空气微生物采样器校准规范》
	JJF 2304—2025《生物气溶胶采样器校准规范》
质量浓度	JJG 846—2015《粉尘浓度测量仪》
	JJF 1659—2017《$PM_{2.5}$质量浓度测量仪》
	JJF 1800—2020《气溶胶光度计校准规范》
	JJF 2290—2025《便携式烟尘浓度测试仪校准规范》
数量浓度	JJF 1190—2008《尘埃粒子计数器》
	JJF 2295—2025《在线尘埃粒子计数器》
	JJF 1864—2020《气溶胶粒径谱仪》
	JJF 1562—2016《凝结核粒子计数器》
	JJF 2215—2025《移动源排放颗粒物数量检测仪》
粒径	JJF 1211—2008《激光粒度分析仪》
	JJF 2313—2025《多参数在线激光粒度仪校准规范》
气溶胶相关	JJF（京）78—2021《PM_{10}和$PM_{2.5}$切割器》
	JJF 2066—2023《气溶胶稀释器校准规范》
	JJF 2366—2026《法拉第杯气溶胶静电计》

代表性标准包括：T/WJZZ 009—2021《颗粒数浓度测量仪器整体计量校准规范》，适用于基于 CPC 法或 DC 法原理的颗粒数浓度测量仪器（PN 检测仪）的整体校准；T/CSP

14—2024/T/BSPT 7—2024《颗粒技术 实验室间比对指南 动态光散射仪粒度检测》、T/CSP 15—2024/T/BSPT 8—2024《颗粒技术 实验室间比对指南 激光粒度分析仪粒度检测》及 T/CSP 16—2024/T/BSPT 9—2024《颗粒技术 实验室间比对指南 气体物理吸附仪（BET）比表面积检测》，这 3 项标准分别针对动态光散射粒度仪、激光粒度分析仪和 BET 比表面积仪给出了实验室间比对的系统方法和评价准则。在标准方面，中国仪器仪表行业协会正在制定《生物气溶胶实验仪器设备 采样器 第 5 部分：气旋式采样器》和《生物气溶胶实验仪器设备 紫外荧光粒谱仪》，中国计量测试学会正在推进《机载被动腔气溶胶光谱仪校准规范》。

上述团体标准的制定与实施，有效填补了颗粒仪器领域国家标准和计量技术规范的空白，为颗粒仪器的技术研发、质量评价、校准溯源及实验室质量控制提供了重要技术支撑，对推动颗粒计量技术体系的完善和产业发展具有重要意义。

6 颗粒计量及标准化发展历程

6.1 学术会议

在颗粒计量及标准化专委会成立之前，相关领域的专家学者主要参与颗粒学会下属的其他专委会的活动，例如颗粒测试专委会、气溶胶专委会等。

2023 年 9 月 25 日，由中国计量科学研究院（以下简称“中国计量院”）主办，华东国家计量测试中心、华北国家计量测试中心协办的“首届颗粒计量现状及发展交流会”在北京中国计量院昌平院区隆重召开。来自全国各级计量技术机构、颗粒计量相关领域研究单位、仪器生产及使用单位的 70 余位代表齐聚一堂，首次将全国颗粒计量领域的同行、专家学者汇聚在一起，共商颗粒计量规划与发展。多位专家围绕生物气溶胶、环境空气中颗粒物质量浓度组分量计量、环境空气颗粒物质量浓度计量溯源体系建立、排放源颗粒物质控技术等主题作学术报告。相关领域代表，就扬尘在线校准、生物气溶胶监测仪校准方法研究、水中颗粒粒度、油中颗粒计数校准、颗粒物化学组分计量、颗粒物传感器测试及颗粒物监测仪器开发等方面进行了汇报和展望。会议搭建了我国颗粒计量领域首个全国性技术交流合作平台，为后续专委会的组织化发展奠定了重要基础。



图 11 首届颗粒计量现状及发展交流会

时隔一年，2024 年 10 月 25，第十三届中国颗粒大会（CCPT13）在苏州国际会议中心酒店盛大召开。其中，第 23 分会场 “颗粒计量及标准化” 由中国计量科学研究院、北京市计量检测科学研究院、合肥鸿蒙标准技术研究院、上海市计量测试技术研究院承办，这是颗粒计量与标准化议题首次被正式引入中国颗粒研究领域。来自颗粒研究领域相关科研机构、高等院校及企事业单位的 100 余位专家学者参加会议，聚焦颗粒物采样及粒径、数量浓度、质量浓度，以及检测仪器设备的量值溯源、标准物质、计量技术、检验检测能力、规程规范与标准研究等核心议题。分会场组织了 55 个学术报告，包括 16 个主题报告、16 个邀请报告和 21 个口头报告，内容涵盖污染源气溶胶、大气 $PM_{2.5}$、扬尘及生物气溶胶等颗粒物的计量技术现状、需求难点、前沿技术和创新成果，并就微细气泡技术及其计量标准化、生物气溶胶测量技术和相关测量仪器的计量标准化等亟待解决的技术挑战展开深入研讨。凭借承办单位的高效组织、与会人员的积极参与以及良好的会议效果，该分会场从 34 个分会中脱颖而出，荣获大会“优秀分会场”称号，标志着颗粒计量与标准化在颗粒学研究领域确立了独立的学术地位。



图 11 颗粒计量及标准化分会

从 2023 年的首届专题交流会，到 2024 年颗粒大会正式设立分会场，颗粒计量及标准化领域完成了从“计量界内部探讨”到“颗粒学主流学术平台”的跨越，为我国颗粒表征及相关特性量的溯源性、有效性和规范性提供了坚实的组织保障与学术支撑。展望未来，专委会将持续发挥学术交流与标准化制定的双重作用，推动我国颗粒计量事业向更高水平迈进。



图 12 优秀分会场

6.2 取得的成果

颗粒计量与标准化领域科研产出丰硕，自 2020 年以来，已有十多个颗粒计量相关项目获得国家和省部级科技奖励，充分体现了该领域在科技创新和服务国家战略方面的重要贡献。

表 5 颗粒计量及标准化取得的成果

年份	项目名称	获奖情况
2020	颗粒物（PM10 和 PM2.5）检测仪量值溯源装置研制与应用	山东省环保产业环境技术进步奖一等奖
2021	大气中颗粒污染物（PM2.5/PM10）浓度计量溯源体系研究及应用	中国计量测试学会科学技术进步二等奖
2021	PM2.5 与 O3 在线监测量值溯源传递关键技术研发与业务化应用	中国环境保护技术进步一等奖
2021	颗粒物测量与溯源关键技术及系列装备的开发	中国检验检测学会科学技术奖一等奖
2022	颗粒检测仪器量值溯源关键技术及应用	河南省科技进步三等奖
2022	微粒多参数测量体系与溯源关键技术研究及应用	中国分析测试协会科学技术奖（CAIA 奖）一等奖
2022	颗粒物测量与溯源关键技术及系列装备的开发	中国检验检测学会科学技术奖一等奖
2023	环境空气颗粒物质量浓度计量溯源体系的建立	中国颗粒学会科技进步奖一等奖
2023	大气颗粒物监测计量关键技术	浙江省科技进步三等奖
2024	智慧矿山安全多机理感知与瓦斯粉尘仪高精度量值溯源技术	中国仪器仪表学会科技进步二等奖
2025	生物气溶胶采样与监测仪器计量溯源体系的建立	中国颗粒学会颗粒测试奖二等奖

6.3 发展概览

回顾 1995—2025 年的这三十年，生态环境领域颗粒计量及标准化领域取得了令人瞩目的成就：

监测指标：从 TSP 单一指标拓展为 PM_{10}、$PM_{2.5}$、$PM_{1.0}$、数量浓度、粒径分布、化学组分、生物活性的多维指标体系。

监测手段：从手工采样-实验室分析发展为在线自动监测为主、手工比对为辅的监测网络。

仪器装备：从进口产品垄断到国产设备占据国控网 2/3 以上份额，激光粒度仪、$PM_{2.5}$ 监测仪等实现自主可控。

标准物质：从依赖进口到自主研制，粒径标物、数量浓度标物，有机碳/元素碳、水溶离子、无机元素等滤膜基底标准物质实现突破。

计量技术：从滤膜称重的间接比对，到模拟仓内的系统比对，再到盐雾化和振动孔、喷墨等气溶胶发生技术的直接校准，颗粒计量从“劳动密集型”到“物理溯源型”。

标准体系：从寥寥数项发展到涵盖国际标准、国家标准、行业标准、计量技术规范的完整体系。

6.4 未来展望

展望下一个十年，颗粒计量及标准化将在以下方向持续深化：

多参数协同监测：单一参数测量向多参数同时测量发展。同一仪器可同时输出质量浓度、数量浓度、粒径分布、化学组分甚至生物活性信息。数据融合和整体分析将成为常态。

单颗粒与在线分析：单颗粒质谱、单颗粒拉曼、单颗粒荧光等技术将更加成熟，提供颗粒混合状态、老化过程、来源特征的实时信息。

智能算法应用：机器学习将在颗粒识别、图像分析、数据反演中发挥更大作用。从复杂的散射数据中反演粒径分布、从显微图像中自动识别颗粒类型、从荧光光谱中判别微生物种类，都将受益于算法进步。

生物气溶胶计量突破：荧光法生物气溶胶监测设备的校准方法、性能评价准则有望在未来十年形成共识，推动生物气溶胶计量从定性走向定量。

标准物质体系完善：从总颗粒标准物质向组分标准物质、从滤膜基底向在线校准动态气溶胶标准物质拓展，构建更完整的量值溯源链条。

双碳背景下的协同计量：颗粒物与温室气体协同监测的计量需求将推动碳气溶胶、黑碳等组分的精准计量技术发展。

