**煤粉工业锅炉余热利用技术规范**

**编制说明**

1. 工作简况，包括任务来源、协作单位、主要工作过程、中国煤炭学会标准主要起草人及其所做的工作等；
2. **任务来源**

实现双碳目标是党中央的重大战略决策，国家能源署的分析指出，相较于其他方式，节能和提高能效是二氧化碳减排的最主要途径，减排量占所有减排方式的37%。国家能源局印发的文件《2030年前碳达峰行动方案的通知》中指出，以工业锅炉等设备为重点，全面提升能效标准。建立以能效为导向的激励约束机制，积极推广使用余热利用、智能化用能控制等技术，提高设施能效水平。

对于煤粉工业锅炉，余热主要集中于烟气、废水、废汽和废渣中，对于不同的余热资源，回收利用的方式多样化，例如对于废汽，可采用换热器和热泵等进行利用。目前煤粉工业锅炉的余热利用技术已经成功应用并形成一定的市场规模，但是对于不同余热资源的利用形式、设计和节能评估等尚无可依循的标准规范，从而导致目前市场上相关产品的技术水平参差不齐，从而制约其发展。

本标准就是对不同煤粉工业锅炉的余热资源进行评价，对其利用的基本原则、规划方法进行规定，对适用的余热利用系统的边界、节能经济效益等进行确定，以形成指导煤粉工业锅炉余热利用系统建设的依据，进而推动该技术的发展进程，促进双碳目标的实现。

2021年12月16日，由北京天地融创科技股份有限公司申请团体标准的立项，根据中国煤炭学会下达的《关于中国煤炭学会2021年第二批团体标准立项的通知》年度团体标准制修订项目计划，批准《煤粉工业锅炉余热利用技术规范》标准的制定。

1. **协作单位**

起草单位：北京天地融创科技股份有限公司

参编单位：中国特种设备检测研究院

1. **主要工作过程**

中国煤炭学会煤粉锅炉专业委员会于2021年5月14日召开了煤粉工业锅炉准体系建设研讨会，对制定《煤粉工业锅炉余热利用技术规范》团体标准的工作进行初步摸底，中国煤炭学会介绍了《中国煤炭学会标准管理办法》，牵头单位北京天地融创科技股份有限公司对《煤粉工业锅炉余热利用技术规范》团体立项建议进行了介绍。中国煤炭学会于2021年12月15日召开团体标准立项评审会，7位行业内专家现场对团体标准《煤粉工业锅炉余热利用技术规范》进行了评审，提出意见和建议，并同意该标准立项。

标准立项后，根据任务要求，北京天地融创科技股份有限公司成立了标准编制起草小组，组织标准编制和协调工作。标准起草工作经过半年的广泛调研、收集、查阅和分析有关技术资料，结合北京天地融创科技股份有限公司在煤粉工业锅炉领域长期对余热回收利用工作的经验总结和技术条件，确定了本标准的总体框架和主要内容。

之后标准编制起草小组针对烟气余热回收技术、炉渣余热回收技术在多台煤粉工业锅炉上进行了长达两年的基础实验、工业试验和分析优化，编写完成了团体标准《煤粉工业锅炉余热利用技术规范》的草案。

2024年6月，起草工作组在公司内部进行了草案的意见征求和研讨，经过反复修改和完善，形成了团体标准的征求意见稿。

1. **中国煤炭学会标准主要起草人及其所做的工作**

本标准的主要起草人及其工作内容如下表所示：

表1 标准主要起草人及其工作内容

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 起草人 | 工作内容 |
| 1 | 李美军 | 负责标准工作的规划和起草工作 |
| 2 | 牛芳、王振川、梁兴、魏琰荣、胡亚文、陈嫄、段璐、龚艳艳 | 国内外技术资料的调研、收集和整理、基础实验和工业试验工作 |

1. 确定中国煤炭学会标准主要技术内容（如技术指标、参数、公式、性能要求、实验方法、检验规则等）的论据（包括试验、统计数据），修订中国煤炭学会标准时，应增加新、旧中国煤炭学会标准水平的对比；

本标准严格按照GB/T 1.1《标准化工作导则第1部分：标准的结构和编写规则》和GB/T 1.2《标准化工作导则第2部分：标准中规范性技术要素内容的确定方法》的要求进行，同时参考了以下标准：

DB46/T 180-2009 工业锅炉节能技术规范

GB/T 13234-2018 用能单位节能量计算方法

GB∕T 39091-2020 工业余热梯级综合利用导则

GB/T 151-2014热交换器

JB/T 13410-2018 低温省煤器技术条件

TSG 91锅炉节能环保技术规程

1. 主要试验（验证）的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效果；

在标准起草编制过程中，主要针对在煤粉工业锅炉中加入换热器和开式降膜吸收式热泵进行余热回收利用的技术，进行了基础实验和工业试验，同时针对煤粉工业锅炉加入闭式吸收式热泵后的节能效益和经济效益进行了论证，最后针对烟气余热回收利用完成了综述性报告。主要内容如下：

1、基础实验研究表明：

水平管降膜吸收是一个流体动力学与热力学相互耦合的过程，为应用于燃煤锅炉烟气余热和水资源回收利用，深入探究不同参数对水平管降膜吸收器性能的影响规律，分别设计并搭建了水平管降膜流动及吸收实验台，对降膜流动（管间流型、管外润湿性）与降膜吸收进行解耦研究。

（一）管间流型转变规律：设计并搭建了水平管降膜流动实验台，基于可视化研究不同参数对管间流型转变临界*Rel*的影响规律。采用四因素四水平实验方法，拟合得到了不同参数相互耦合影响下关于临界与*Ga*(物性)、*We* (气流) 、*s* (管间距) 、*d* (管径)的实验关联式，误差小于5%；根据公式反映影响管间流型转变临界的因素从强到弱依次为：溶液浓度＞管间距＞逆向气流流速＞管径，与实验结果一致；溶液浓度每提高10%，临界*Rel*降低约50%。

（二）管外润湿性规律：在水平管降膜流动实验台上，将实验与图像处理相结合，提出了润湿长度的概念，用于表征管外润湿性，采用数值拟合方法处理实验数据，拟合得到关于润湿比η与、管径s、管间距d的实验关联式，该式与文献实验数据对比误差小于15%；根据公式反映最佳管间距约为1-1.25d；管间流型达柱状流后，管外润湿面积基本趋于稳定。

（三）传热传质规律：设计并搭建了水平管降膜吸收实验台，基于多因素分析法和单因素敏感性分析，结合管间流型及管外润湿性的实验研究，在传热系数、传质系数、水回收率、余热回收率四个方面分别进行实验研究。

（1）传热传质系数：

气液比增大，溶液和冷却水的传热系数*h1*、溶液和湿烟气的传热系数*h2*均增大；溶液流量增大，传热系数*h1*增大并趋于稳定，*h2*则变化不大；溶液进口温度增加或浓度增大，*h1*减小而*h2*增大；管间距增大，*h1*先减小后增大趋势，*h2*则相反，小管径降膜管的*h1*小于大管径，*h2*则大于大管径。传质系数的变化与气液比、溶液流量、溶液进口温度呈正比，与溶液浓度、管间距、管径呈反比，随含湿量的增大先减小后增大。

（2）水回收率及余热回收率：

降低气液比、溶液进口温度，缩小管间距（＞12mm），提高溶液浓度，增大溶液流量，均有利于提高吸收器水回收率与余热回收率；相同管排数下，25mm降膜管吸收器性能高于16mm降膜管。

优化工况：烟气参数为70℃/30%RH时，选择50%溶液浓度，进口温度为40℃，气液比为1.6-1.8，溶液控制在55-70之间（柱状流），采用25mm降膜管，设置管间距为25mm，此时，水平管降膜吸收器具有较好的水回收及余热回收性能。

1. 工业试验表明：

为研究开式吸收式热泵的余热回收利用效果，在煤粉工业锅炉的烟囱前侧设计加入了开式降膜吸收式热泵余热回收工业试验系统，由CMA认证的第三方进行了锅炉能效测试，报告显示烟气进开式热泵前锅炉热效率为84.00%，经过开式热泵后锅炉热效率为90.46%，锅炉能效提升了6.46%，达到节能减排、提质增效的目的，报告如下图所示：

图2 余热回收前后锅炉能效测试报告

1. 节能和经济效益分析表明：

为实现烟气全热的深度利用和水资源回收，提出了70 MW煤粉热水锅炉耦合14 MW双效吸收式热泵的“嵌入式”增效型集成系统，建立了煤粉热水锅炉耦合双效吸收式热泵的集成系统热力学分析的基本方法，为煤粉热水锅炉烟气余热利用的研究和设计应用提供参考。具体结论如下：

对于利用NGD脱硫的70 MW煤粉热水锅炉系统，燃烧后烟气中水蒸气含量比无NGD的增加一倍，采用吸收式热泵系统深度回收烟气潜热，系统热效率可以提高7%以上。采用14 MW的吸收式热泵系统，以每年采暖季为120 d计算，年回收烟气余热量达51 088 GJ，年节省煤粉量2 102 t，年回收水量14 051 t。通过经济性计算，该系统年节省煤粉费用为210.15万元，年节省水费为11.24万元，静态投资回收期为1.72年。

1. 综述报告如下：

工业锅炉为工业生产和居民生活提供蒸汽，是重要的热能动力设备。我国工业锅炉约50多万台，其中煤炭消耗量约占我国煤炭消耗总量的20%，可知工业锅炉在我国的节能减排中具备巨大的潜力。锅炉运行中，运行热效率偏低、供热系统不合理造成的蒸汽的做功能力下降、输送管网网损较大、冷凝水未做回收、烟气余热直接排放等问题均是导致工业锅炉能耗增加的原因。其中，排烟热损失是锅炉热损失的重要组成部分，约占70%以上。锅炉排烟温度每增加10℃，意味着排烟热损失会增加0.6-1.0%，煤耗就会升高1.2%-2.4%。初步估算，全国燃煤工业锅炉排烟余热总量折标准煤约1亿吨，对锅炉进行烟气余热回收是提高锅炉热效率、降低锅炉能耗的重要途径，是工业锅炉节能减排的重要发展方向。

烟气温度是衡量余热品质的重要标尺，其高低将对余热回收方式产生重大的影响。余热可按照温度范围划分为三等：高温余热(大于500℃)、中温余热(200℃~500℃)、低温余热(低于200℃)。中、高温余热能的能量品级高，利用起来相对容易。而对于低温热源，由于其能量品质较低，致使回收过程中能源的利用效率也较低，回收技术的发展尚不成熟。我国现役工业锅炉的实际排烟温度在150~400℃之间，属于中低温余热的范畴。此外，锅炉烟气中的热量有两种存在形式：显热和潜热。不同类型的锅炉烟气中水蒸气含量不同，如天然气锅炉烟气中水蒸气为15%~19%，燃油锅炉为10%~12%，燃煤锅炉中一般小于6%，所以烟气中显热与潜热的比例也不同。对于燃气和燃油锅炉，既要回收烟气的显热量，还要对水蒸气冷凝回收潜热；而对于燃煤锅炉，主要是回收显热，并注意除尘和脱硫。本文主要针对烟气余热回收，总结当前工业锅炉余热回收利用的有效技术的原理、适用性、优势及劣势等，最后阐明了余热利用的原则及待突破的关键技术。

A. 温差发电器

这是利用热电材料的泽贝克效应（Seebeck effect）、汤姆逊效应（Thomson effect）、帕尔贴效应（Peltier effect）、焦耳效应（Joule effect）和傅里叶效应（Fourier effect）等将热能直接转化为电能的能量转化装置，其原理如图2。将许多不同类型半导体热电材料按照一定方式连接起来，比如采用串联、并联或者两者相结合的方式，形成半导体堆，再将半导体堆置于冷源和热源之间，热端从热源吸热，再将热量传递给冷源，在这个过程中将热能转换为电能，以电流或温差电动势的形式输出。因此可以根据锅炉不同的烟气的温度，将热电器件集成在水冷壁、省煤器或者空气预热器的换热面之上，通过燃料和水、烟气和水、烟气和空气之间的温差获得电能，可用于水泵、风机及控制器的供电。该技术在国外的开展较早，日本Komatsu公司于2009年开发的工厂废热利用发电系统可长期运行，冷、热端温度分别为30、250℃时，转换效率达7%。该技术适用于烟气大于250℃的场合，具有系统结构紧凑、无转动部件、无污染物排放、环保洁净等优势。但目前现有的热电材料的转换效率较低，工艺不成熟且成本昂贵，从而限制该技术广泛应用。目前，广大学者主要从改进热电材料转换性能、输出特性等方向进行研究。

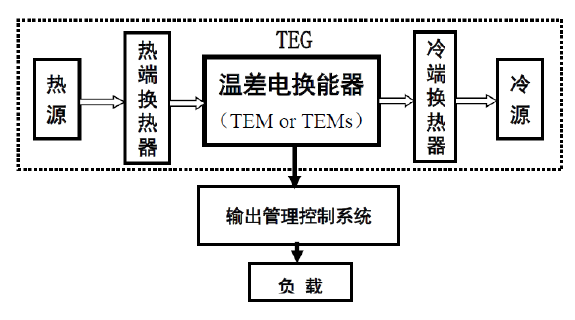


图2 半导体温差电转换系统

1. 有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle,ORC)

该循环采用低沸点的有机工质代替水蒸气作为循环工质，系统构成如图3所示，主要部件有蒸发器、冷凝器、工质泵及膨胀机。环保型低沸点有机工质在蒸发器内和低温余热源进行热量交换，有机工质吸热汽化，达到饱和或过热状态，高温高压蒸汽经膨胀机带动发电机发电，此过程将有机工质低品位的热能转化为高品位的电能，作功后的乏汽进入冷凝器放热，然后进入工质泵升压，完成整个工作过程。

该循环适用于中低温热源（100℃~300℃），系统结构相对简单、热力学性能好、运行稳定，且由于有机工质的凝固点较低，故系统在冬季不需要采取防冻措施，目前不同种类的有机朗肯循环已应用在工程实际之中。有学者对电站锅炉烟气回收系统、炉渣蒸发水余热回收系统、锅炉汽包连续排污系统进行深入分析和优化。但该技术循环性能仍有待改进，发电成本高，是制约其发展的瓶颈。目前，国内外学者对ORC系统的研究主要集中在有机工质的筛选、系统性能提升以及ORC新型系统的设计和实际应用的研究。

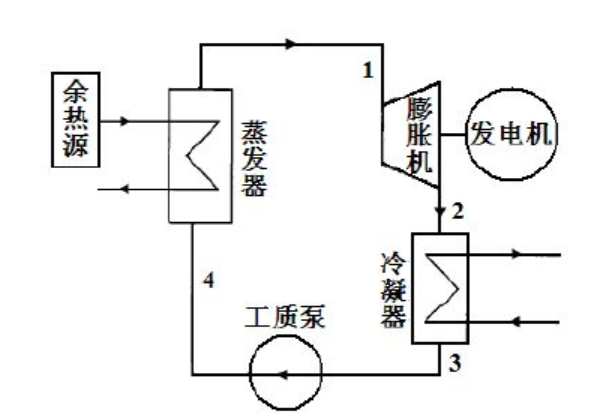


图3 有机朗肯循环系统构成图

C. 传统换热器

针对烟气余热利用时，传统做法是在烟道中加装空气预热器以预热空气，加装省煤器加热锅炉给水，以及加装换热器预热或干燥燃料、加热冷凝水或管网热水等。

燃煤锅炉一般均加装省煤器，但其热交换率往往比较低，余热回收效果不佳；烟气余热预热空气也很常见，但提前预热空气后会使原有受热面的传热分布发生变化，对锅炉效率的提高产生不利的影响；在省煤器后加装换热器，将品位较低的烟气余热加以利用，该方法技术成熟、投资小、简单易行，只存在一定的散热损失，能够有效提高燃煤锅炉的运行效率，但会受到季节的限制，适宜与其他利用方式联合利用。

烟气余热利用的核心问题，是烟气中硫酸蒸汽遇冷凝结为高浓度硫酸，对锅炉尾部烟道金属面和换热元件本身的腐蚀问题。由于硫酸的凝结温度远远高于水蒸气，因此只要烟气中含有少量的硫酸蒸汽，烟气露点就会大幅提高。常规换热器很常见，适用性广，但最大的弊端是受烟气露点的影响，尤其是烟气余热加热管网热水及烟气余热预热空气这两种余热利用方式的受热面壁温都可能低于酸露点，致使整个烟气余热回收系统都会受到低温腐蚀的威胁。一旦换热设备腐蚀严重，所有换热设备均需更换，成本高。因此传统换热器无法深度回收烟气余热，适合中小型燃煤锅炉的升级改造。

目前传统换热器的改进措施主要是通过采用板片式、肋管式或者翅片式结构以增加换热面积；改变高温烟气与低温介质的换热方向，如横向冲刷或纵向冲刷等；增设多级换热器，采用串联或并联方式布置等多种集成方式。其中，串联型余热利用系统主要是把空气预热器分多级串联布置，也就是在空气进入主空气预热器之前加装一个或两个前置式空气预热器，使得冷空气先经过前置式空气预热器升温后再进入主空气预热器，这样不仅利用了锅炉的排烟余热，还提高了原空气预热器的空气入口温度。并联型余热利用系统主要原理是在省煤器出口设置分隔烟道，主烟道设置空气预热器，旁路烟道设置高温烟水换热器和低温烟水换热器，分别加热回热系统给水和凝结水，并在之后的汇合烟道中设置前置式空气预热器，通过降低锅炉排烟温度来弥补空气在空气预热器中吸热量的不足，形成基于分隔烟道设计的并联型余热利用系统。

D. 冷凝换热器

传统的烟气回收只是针对显热，造成大量潜热损失，汽化潜热带走的热损失占整个排烟热损失的60%以上，影响锅炉热效率。冷凝换热器是利用烟气冷凝余热回收装置，将烟气的显热和水蒸气的潜热用于预热锅炉系统回水、加热生活热水或锅炉补水。采用冷凝换热器不但可以回收烟气中的显热，还可以回收烟气中的潜热部分，达到深度回收烟气余热，大大提高了热回收设备的热效率，与此同时，冷凝换热器产生的冷凝液对烟气中的氮氧化合物有一定的吸收作用，可以集中处理带有酸性物质的冷凝液，从而降低烟气中酸性气体的含量，减少了大气的污染。

冷凝换热器主要适用于燃气锅炉，是由于燃气锅炉的烟气中含有大量的水蒸气，携带着大量的潜热，自第一台冷凝锅炉1979年从荷兰诞生，世界上的许多国家争相研制，其使用每年为荷兰节约的天然气达到了20亿立方米。对烟气中水蒸气含量居中的燃油锅炉，该法应用潜力很大，需进一步加强研究。

一般的燃煤锅炉烟气中水蒸气的含量并不大，但是即使这部分气化潜热被全部回收，也能使热效率有很大的提升。但燃煤锅炉的烟气中二氧化硫含量很高，换热器容易发生低温腐蚀，低温腐蚀难以控制是制约国内外燃煤锅炉烟气深度冷却技术进步的主要瓶颈。为此学者在以下两方面进行了深入研究，一是确定烟气酸露点温度以指导锅炉排烟温度，二是开发新型耐腐蚀材料。

其中，西安交通大学的赵钦新提出了余热深度利用与污染物脱除一体化系统，揭示了烟气深度冷却过程中S03和H2O结合形成H2SO4(g)和灰颗粒发生的气液固三相吸附凝并机理，该机理直接引起烟气深度冷却过程中硫酸露点温度随着烟气深度冷却发生实时变化，提出了烟气深度冷却器置于静电除尘器之前的设计方案。并通过进一步研究，提出了控制碱硫比和流场均匀化的双判据设计方法，实现了烟气深度冷却过程中的低温腐蚀可控。同时发明了硫酸露点温度和低温腐蚀性能的检测方法及装置，确立了烟气深度冷却器材料选型和壁温安全设计准则，解决了低温腐蚀导致泄漏防控的技术瓶颈。该方法经独立设计、制造和装配后已在大唐国际、华能国际等多个发电有限公司进行了实验并得到验证。

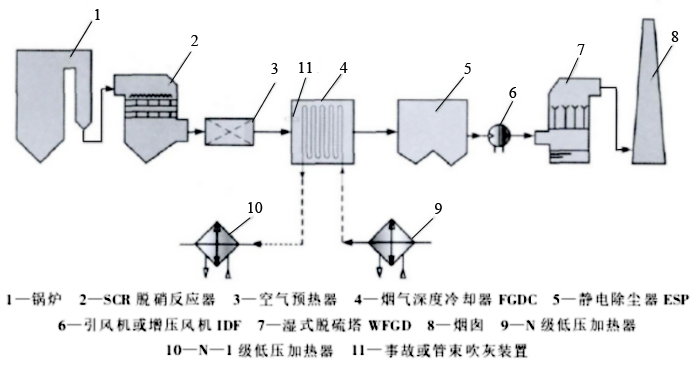


图4 布置于静电除尘器前的烟气深度冷却器系统图

（1-锅炉 2-SCR脱硝反应器 3-空气预热器 4-烟气深度冷却器 5-静电除尘器 6-引风机或增压风机 7-湿式脱硫塔 8-烟囱 9-N级低压加热器 10-N-1级低压加热器 11-事故或管束吹灰装置）

在开发新型耐腐蚀材料方面，当前电站锅炉尾部受热面常用材料为20G钢，ND钢和316不锈钢，在实际运行过程中，受热面表面都有一定程度的腐蚀和积灰。非晶合金具有优异的物理和化学性能，特别是耐腐蚀性能方面受到许多学者的关注。氟塑料材料由于其本身性质稳定，表面光滑等优势，利用氟塑料制作的换热器越来越受到关注，在海水淡化、电站锅炉水回收方面取得了较大的发展。但是氟塑料材料的耐高温性较差。

1. 热管技术

热管的应用是基于蒸发-冷凝的循环，热管中的工质在热输入端被工业废热加热，由液体变成气体，吸收了大量的热量，汽化潜热随着流动的蒸汽到达冷端，在重新冷凝成液体的同时放出大量的汽化潜热，冷凝的液体则又一次回到加热段被加热，重复上述的过程，如图5。热管通过汽化潜热来传递能量，即使传递的热量非常大的时候，热端和冷端的温差也不至于过大[33]，因此热管是一种导热能力很强的导热体。

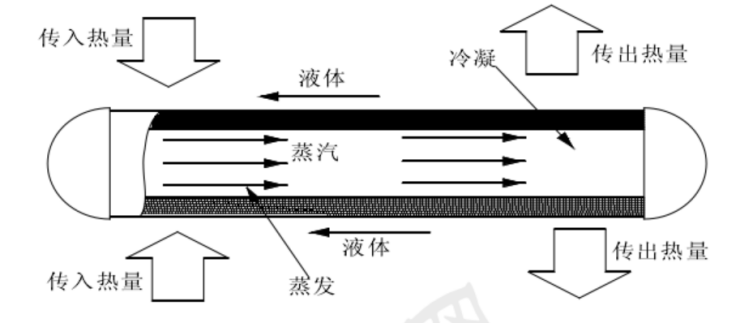


图5 热管的工作原理图

由热管换热元件制成的换热设备称为热管换热器，图6为热管锅炉的余热回收原理图。热管换热器一般有两种形式：烟气-空气热管换热器和烟气-水热管换热器两种，鉴于热管式换热器的特点，在换热器的冷、热段均可以加装翅片来扩展换热面积，增强换热，因此它比较适用于气-气之间的换热。

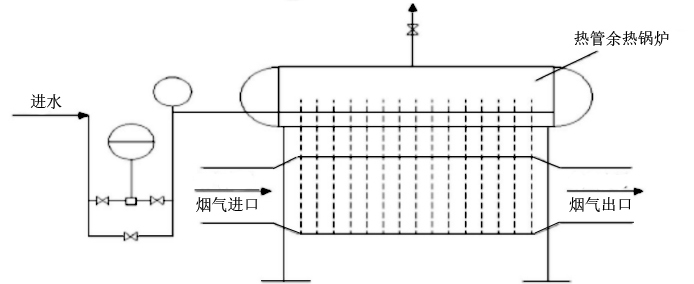


图6 热管锅炉的余热回收原理图

热管具有热回收效率高、结构紧凑、无运动部件、重量轻、无需外加动力、气密性好和介质之间无交叉污染等诸多特点，在实践中得到了广泛的应用。由于工质材料的局限性，目前热管价格偏高，且在工业领域应用时间不长，实践过程中出现的灰堵、露点腐蚀等问题还有待解决，技术还不够成熟，还需进一步加强应用研究。

1. 热泵技术

常见的热泵系统主要包括吸收器、再生器、冷凝器及泵等结构，如图7。热泵技术通过热力循环把热能从低温的物体转移到高温的物体，原理与制冷装置一样，需要消耗一定的外部高品位的能量。

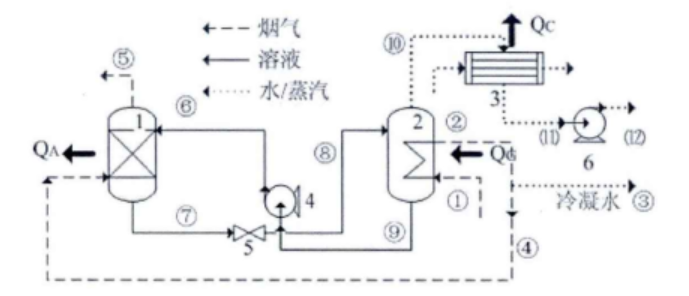


图7 开式循环吸收式热泵系统示意图

（1-吸收器 2-再生器 3-冷凝器 4-溶液泵 5-膨胀阀 6-加压泵）

热泵系统能够用来回收100-200℃的锅炉烟气热量。热泵有两种形式:压缩式和吸收式，压缩式体积较小、效率高，以消耗一部分高品位能为代价；而吸收式热泵则是消耗一部分温度较高的热能，吸收式热泵相对于传统的压缩式热泵体积和重量相对较大，但消耗的能量品位较低。在锅炉烟气余热回收上，热泵系统可以与冷凝换热器联合使用，如图8，适合热电站大型燃煤锅炉的余热回收，是未来的重要研究方向。同时可与除尘换热一体化技术结合，如日本将旋风除尘器和换热器结合在一起，回收热量和除尘起到相互促进的作用。在烟气热能的综合利用的实践中取得了良好的效果，引领了锅炉尾部烟气余热回收的新趋势。

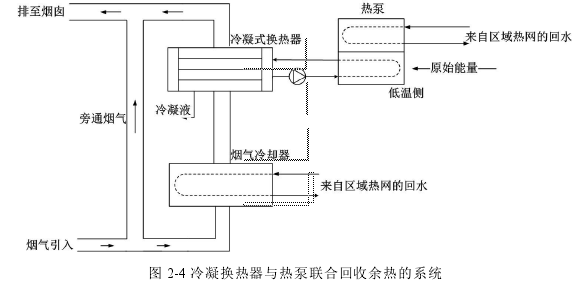


图8 冷凝换热器与热泵系统联合回收余热的系统

在余热获取方面，有诸多问题制约工业锅炉排烟温度的降低，如烟气传热过程中的硫酸腐蚀烟道及湿灰堵塞问题。同时在研究排烟温度时，多数研究未把受热面积、腐蚀、磨损等多种效应有机结合，而是分开研究。因此，下一步研究需将积灰、磨损及露点腐蚀的防治与强化传热及减少流动阻力进行整体集成优化。

在余热转化方面，需构建新型烟气余热特性热力循环，根据热源的品位及数量，寻找理想的热电材料、工质等，综合考虑材料和设备对系统热力性能、经济成本及生态环境的影响，通过多目标优化或多属性评价等方法，获得最佳的循环性能。

针对我国能源消耗不断增加、环境污染日益严峻的形势，对量大而广的燃煤工业锅炉进行余热利用迫在眉睫。本文总结了当前余热回收利用的有效技术（热能到电能、热能到热能）的原理、适用性、优势及劣势等，阐明了余热利用应遵循“温度对口，梯级利用”和“分配合理、各得所需”的原则，最后总结了在余热获取和余热转化方面亟待解决的问题，为燃煤工业锅炉的余热利用的技术创新提供理论依据。

1. 采用国际标准的程度及水平的简要说明；

本标准等同采用国际标准，在标准中参考引用的《GB/T 13234-2018 用能单位节能量计算方法》、《GB∕T 39091-2020 工业余热梯级综合利用导则》、《GB/T 151-2014热交换器》作为国标，也是国际认可的工业余热利用和换热器标准。

1. 重大分歧意见的处理经过和依据；

无。

1. 贯彻中国煤炭学会标准的要求和措施建议（包括组织措施、技术措施、过渡办法等内容）；

本标准的编制充分贯彻了中国煤炭学会《中国煤炭学会标准工作管理办法》，并按照学会团体标准制定工作程序，进行了标准的立项和起草，同时牵头单位北京天地融创科技股份有限公司成立了标准编制工作组，承担了标准的前期调研、试验、讨论、制定起草工作，同时充分研究和分析国内外与标准有关的生产、使用和科研发展情况相应的国际标准，并进行必要的试验验证工作。

七、其他应予说明的事项。

无。