

锅炉系统中高效热交换技术的应用

王鑫，张义，张霞龙

国家电投集团内蒙古能源有限公司，内蒙古 通辽 028000

DOI:10.61369/ME.2025120020

摘要：高效热交换技术通过三类关键路径实现突破，强化传热技术依托增大换热面积、优化流体流动等手段使锅炉热效率提升；新型换热材料将热效率提升且设备寿命延长；先进换热结构使热效率提高，且板式换热器占地面积仅为传统设备的1/3。然而，该技术应用面临技术实施复杂、成本投入增加及操作人员技能要求提升等挑战。对应提出技术研发优化、成本全生命周期管理、人员系统化培训等应对策略。研究表明，高效热交换技术对锅炉系统节能降耗意义重大，通过多维度突破挑战可推动其广泛工业应用。

关键词：锅炉系统；高效热交换技术；热效率；节能；应用挑战

Application of High-Efficiency Heat Exchange Technology in Boiler Systems

Wang Xin, Zhang Yi, Zhang Xialong

State Power Investment Corporation Inner Mongolia Energy Co., Ltd., Tongliao, Inner Mongolia 028000

Abstract : High-efficiency heat exchange technology achieves breakthroughs through three key pathways: enhanced heat transfer technology improves boiler thermal efficiency by increasing heat exchange area and optimizing fluid flow; novel heat exchange materials enhance thermal efficiency and extend equipment lifespan; advanced heat exchange structures elevate thermal efficiency, with plate heat exchangers occupying only one-third of the space of traditional equipment. However, the application of this technology faces challenges such as complex technical implementation, increased cost investment, and heightened skill requirements for operators. Corresponding strategies are proposed, including technological research and development optimization, full lifecycle cost management, and systematic personnel training. Research indicates that high-efficiency heat exchange technology holds significant importance for energy conservation and consumption reduction in boiler systems, and overcoming multidimensional challenges can facilitate its widespread industrial application.

Keywords : boiler system; high-efficiency heat exchange technology; thermal efficiency; energy conservation; application challenges

引言

锅炉系统作为工业生产与能源供给的核心设备，其热效率直接关系到能源利用率与环境效益，而热交换技术是决定锅炉热效率的关键核心环节。热交换技术通过冷媒与烟气的热质交换实现显热、潜热及水分的回收，主要分为间接换热与直接接触换热两类，历经数十年发展已从基础换热形式向高效化、复杂化、智能化演进。然而，传统热交换技术在锅炉系统应用中逐渐暴露换热效率低、耐极端工况能力不足、低品位余热回收有限等瓶颈，导致能源浪费与运行成本攀升。在此背景下，强化传热技术、新型换热材料应用及先进换热结构设计等高效技术路径应运而生，成为提升锅炉性能的关键。

一、相关概述

(一) 热交换技术发展历程

热交换技术的原理是通过冷媒与烟气换热使冷媒温度升高，烟气温度降低，烟气中的水蒸气过饱和凝结，从而回收烟气中的显热、潜热和水分。根据换热方式的不同，热交换技术可分为间接换热法和直接接触换热法。间接换热法是一种在烟道内增加耐腐蚀的间接冷凝换热器的方法。冷却水在换热管束内流动，烟气

在管外与冷却水逆向流动，两者不发生直接接触，烟气中的冷凝水流至换热器底部被储水池收集，烟气余热被管外冷却水吸收。直接接触换热法也称为喷淋冷凝法，通过在烟道增加喷淋换热器及相关水处理设备实现换热，冷媒水在喷淋塔内通过喷嘴以逆流方式喷入热烟气气流，两者接触换热后，烟气以低温饱和状态离开系统，冷媒水以被加热的状态离开系统^[1]。随着工业需求的增加以及科学技术的进步，热交换技术逐渐向高效化和复杂化方向发展。20世纪中期，管式换热器和板式换热器的出现标志着热交

换技术进入了一个新的阶段，这些设备通过优化流体流动路径和增加换热面积显著提升了传热效率。近年来，随着材料科学和控制技术的突破，热交换技术进一步融合了智能化控制和新型材料的应用，例如高性能金属合金和陶瓷复合材料的使用，为热交换技术的发展注入了新的活力。

(二) 传统热交换技术在锅炉系统的应用及不足

传统热交换技术在锅炉系统中主要体现为管式换热器、热管换热器和板式换热器等设备的应用，这些技术虽然在早期工业生产中发挥了重要作用，但其固有的局限性也逐渐显现出来。传统热交换技术的换热效率较低，主要原因在于其设计未能充分优化流体流动方式，导致热量传递过程中的能量损耗较大。传统换热器在面对高温、高压工况时，容易发生设备腐蚀和材料老化等问题，这不仅缩短了设备的使用寿命，还增加了维护成本^[2]。此外，传统热交换技术对低品位余热的回收能力有限，尤其是在烟气温度较低的情况下，难以实现显热和潜热的有效回收。这些不足直接影响了锅炉系统的整体性能，导致能源利用率低下和运行成本增加。因此，如何克服传统热交换技术的局限性，成为提升锅炉系统热效率的关键问题。

二、高效热交换技术在锅炉系统的应用

(一) 强化传热技术应用

强化传热技术通过优化热交换过程中的关键参数来显著提升热交换效率，其核心原理涵盖增加换热面积、优化流体流动方式以及改进管束结构。增加换热面积能有效扩大热量传递的接触界面，进而提高单位时间内传递的热量；优化流体流动方式则可通过调整流体的速度分布与流动路径，减少边界层厚度，从而提升传热系数；改进管束结构能借助改变管道的几何形状或排列方式，促进流体的湍流效应，进一步强化传热效果。这些措施共同作用，可显著降低能量损失并提高整体热效率，例如在热能动力系统中，采用高效换热技术能减少烟气排放温度，同时提升锅炉受热面的热吸收能力，实现更高效的能源利用^[3]。

在锅炉系统中，强化传热技术被广泛应用于换热器等关键部件的设计与优化，以达成热效率提升和能耗降低的目标。具体来看，通过增加换热面积和优化流体流动方式，能够有效提高换热器的传热性能，比如在煤气锅炉中，使用高效的烟气换热器可显著提升热交换效率，同时减少燃料浪费和热损失；此外，在烟道内安装冷凝换热器，不仅能回收烟气中的显热，还能利用水蒸气凝结释放的潜热，进一步提高锅炉的热效率。

(二) 新型换热材料应用

新型换热材料凭借优异的导热性能与耐腐蚀性，在锅炉系统中的应用愈发广泛，高性能金属合金和陶瓷复合材料是其中的典型代表，它们不仅具备高热导率、高强度，还拥有良好的抗高温氧化性能。像部分镍基合金在高温环境下能展现出卓越的机械强度与耐腐蚀性，很适合长期运行于高温高压条件的锅炉设备；陶瓷复合材料则因低膨胀系数和高耐磨性，特别适合处理腐蚀性介质的环境^[4]。除此之外，新型换热材料还具备出色的热稳定性，即便在极端工况下也能保持性能稳定，为锅炉系统的安全运行提供了可靠保障。

新型换热材料的应用对锅炉系统性能提升主要体现在换热效

率提高与设备使用寿命延长两方面。一方面，由于新型材料热导率较高，能快速将热量从热源传递到冷源，大幅提升换热效率，例如在燃气锅炉中采用不锈钢板式换热器，可有效降低排烟温度，同时吸收烟气中的显热和潜热，让锅炉热效率提升至90%以上；另一方面，新型材料的耐腐蚀性能有效减缓设备老化速度，减少因腐蚀引发的维修与更换频率，进而延长设备使用寿命^[5]。

(三) 进先换热结构设计应用

先进换热结构设计以高效、紧凑和可维护性为核心目标，通过创新设计理念优化热交换过程，板式换热器和热管换热器是其中两种典型的先进换热结构，且设计理念各有侧重。板式换热器借助多层薄板叠加形成高效换热通道，流体在板间流动时会形成强烈的湍流效应，这一设计能大幅提升传热系数，不仅具备高热效率，还因占地面积小的特点，适合应用于空间受限的工业场景；热管换热器则利用工质的相变特性实现高效传热，其内部的真空环境让热量可以极高速率传递，同时还拥有良好的等温性与灵活性。这些先进设计理念的融合，为锅炉系统提供了更高效、更可靠的热交换解决方案。

在锅炉系统中应用先进换热结构设计后，其在提升热效率和优化空间占用方面的效果十分显著。例如，引入板式换热器后，燃气锅炉的排烟温度可降低至100°C以下，同时还能吸收烟气中的显热与潜热，使锅炉热效率提高15% ~ 20%；此外，板式换热器的紧凑设计使其占地面积仅为传统管式换热器的1/3，极大节省了安装空间，尤其适配现代化工厂的布局需求^[6]。而热管换热器在处理低品位热源方面表现突出，能够高效回收锅炉尾部烟气中的余热，并将其转化为可利用的热能，进一步提升系统整体能效。

三、高效热交换技术应用面临的挑战

(一) 技术实施复杂性

高效热交换技术在锅炉系统中的应用涉及多个复杂的技术环节，其中新型材料加工和先进结构设计安装尤为关键。例如，新型换热材料如高性能金属合金和陶瓷复合材料的加工过程需要高精度的制造工艺，以确保其导热性能和耐腐蚀性达到设计要求。然而，这些材料的加工难度较大，尤其是在大规模生产中，如何保证材料的一致性和稳定性成为一大技术难题。此外，先进换热结构设计如板式换热器和热管换热器的安装也需要高度专业化的技术支持。这些设备的安装不仅要求精确的尺寸配合，还需要对流体流动路径进行优化设计，以避免热量传递过程中的能量损失。

(二) 成本投入增加

高效热交换技术的应用通常伴随着显著的成本增加，主要体现在新型材料的采购、设备的购置以及安装调试等方面。新型换热材料如高性能金属合金和陶瓷复合材料的价格远高于传统材料，这使得其在锅炉系统中的大规模应用面临经济压力。先进换热设备的购置成本也较高，例如板式换热器和热管换热器的制造工艺复杂，设备本身的价格昂贵，这直接增加了项目的初期投资成本^[8]。高效热交换技术的安装调试过程需要专业技术人员的参与，这不仅延长了施工周期，也进一步增加了人力成本。从长期运营的角度来看，高效热交换技术的维护成本也不容忽视。由于这些设备通常工作在高温、高压等恶劣环境中，其部件的磨损和老化速度较快，需要定期进行检修和更换。同时，新型设备的技

术复杂性也要求操作人员具备较高的技能水平，这可能导致培训成本的上升。高效热交换技术应用所带来的成本增加对其在工业领域的普及构成了重要阻碍，如何在保证技术性能的同时降低其经济成本，是亟待解决的问题^[9]。

（三）操作人员技能要求提高

高效热交换技术的应用对操作人员的技能水平提出了更高的要求，尤其是在设备维护和故障诊断方面。传统锅炉系统的操作相对简单，主要依赖于基础的热力学知识和常规机械操作技能。然而，高效热交换技术的引入使得系统变得更加复杂，操作人员需要掌握更多的专业知识，例如新型材料的特性、先进换热设备的工作原理以及智能控制系统的操作方法。这些新要求对现有操作人员的技能储备构成了挑战，尤其是在技术更新换代较快的背景下，如何快速适应新技术成为关键问题。此外，高效热交换设备的维护工作也需要更高的技术含量。热管换热器和板式换热器在运行过程中可能出现流体泄漏、换热效率下降等问题，这些问题需要操作人员具备精准的故障诊断能力和快速响应能力。如果操作人员技能不足，可能导致设备故障未能及时发现和处理，进而影响整个锅炉系统的运行稳定性和安全性。

四、应对高效热交换技术应用挑战的策略

（一）技术研发与优化

为应对高效热交换技术在锅炉系统应用中实施复杂的挑战，必须加大对相关技术研发的投入，并优化技术实施方案。针对新型材料加工和先进结构设计安装等技术难题，应通过多学科交叉研究，开发更为高效、经济的制造工艺。例如，采用增材制造技术可以显著减少复杂换热结构的加工难度与成本，同时提高材料利用率。在燃烧控制系统和烟气回收领域，引入智能控制算法以实现实时监测与动态调整，有助于进一步提升热交换效率并降低运行风险。此外，结合模型预测控制技术，可对锅炉系统的运行参数进行精确优化，从而在提升热效率的同时降低技术实施的复杂性。应建立标准化的技术实施流程，通过模块化设计和预制化安装减少现场施工的难度，为高效热交换技术的广泛应用提供技术支持。

（二）成本控制与管理

高效热交换技术的应用往往伴随着较高的初始投资成本，这

对其在工业领域的推广形成了显著阻碍。因此，通过合理选型、优化采购及运营管理等手段控制成本显得尤为重要。在设备选型阶段，应根据具体应用场景选择性价比最高的技术方案^[10]。在蒸汽利用系统中，科学选定蒸汽压力温度参数，避免过度设计导致的成本浪费。在采购环节，可通过集中采购和长期合作协议降低新型材料和设备的购置成本。此外，在运营管理方面，采用全生命周期成本分析方法，综合考虑设备维护、能源消耗及使用寿命等因素，制定经济高效的运行策略。例如，通过对管道保温材料的优化选择，不仅可以减少热量损失，还能延长设备使用寿命，从而降低长期运营成本。

（三）人员培训与技能提升

高效热交换技术的广泛应用对操作人员的技能水平提出了更高要求，尤其是在设备维护、故障诊断及运行优化等方面。因此，开展针对性的人员培训活动是应对这一挑战的关键措施。应制定系统化的培训方案，涵盖从基础理论到实际操作的全流程内容。通过模拟实训平台，操作人员可以在虚拟环境中熟悉新型换热设备的运行特性及维护要点，从而提升实际操作能力。应定期组织技术交流与经验分享活动，邀请行业专家和技术骨干传授最新的技术知识和实践经验。此外，结合智能控制技术的发展趋势，培训内容还应包括数据分析、模型预测等前沿技能，以帮助操作人员更好地适应智能化锅炉系统的运行需求。通过建立完善的考核与激励机制，确保培训效果的可持续性，从而为高效热交换技术的顺利实施提供坚实的人才保障。

五、结语

未来，需持续深化技术研发，推动增材制造、智能控制等技术与换热技术的深度融合；构建全生命周期成本管控体系，平衡技术性能与经济投入；完善人员培训与激励机制，筑牢人才保障基础。通过技术、经济、人才的协同推进，高效热交换技术必将在锅炉系统中实现更广泛的应用，为工业绿色低碳转型与能源可持续发展注入更强动力。

参考文献

- [1]蒋胜蓝,武巧,顾炜莉,等.锅炉烟气低品位余热回收技术综述[J].能源与节能,2023,(01):74-78.
- [2]梁峻铭.热能工程技术在供热领域中的运用研究[J].工程与建设,2023,37(4):1306-1308.
- [3]张庆;徐逞祥;胡方;王利杰.锅炉烟气余热回收系统主要技术分析[J].能源与环境,2023,(2):71-73.
- [4]黄敏.提高煤气锅炉热效率的技术与措施[J].爱人,2023,(3):180-182.
- [5]冯琳峰;秦成;符瑞斌.燃气锅炉烟气余热回收与低氮排放协同处理技术研究[J].中国设备工程,2023,(22):223-226.
- [6]金永健.节能降耗技术在电厂锅炉运行中的应用[J].电力系统装备,2023,(10):89-91.
- [7]赵麟.分析火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术[J].中国设备工程,2023,(5):108-110.
- [8]文重立.热能动力系统优化节能改造[J].节能与环保,2023,(8):53-55.
- [9]李晓艳.浅析燃煤锅炉的节能环保改造技术[J].能源与节能,2024,(4):79-82.
- [10]袁新立;靳志鹏.火力发电厂锅炉尾部烟气余热利用技术探析[J].电力设备管理,2024,(10):255-257.