高效传热技术在热能与动力技术中的研究与应用

李 洋
安徽海创循环科技有限公司 安徽 芜湖 241000

摘 要 热能作为能源动力领域的核心载体，80%的能量转换需通过换热设备实现，其利用效率直接决定系统综合能耗水平。高效传热技术通过材料创新、结构优化与系统协同，突破传统换热瓶颈，成为节能减排与能源高效利用的关键支撑。本文系统阐述高效传热技术的理论基础与分类体系，重点分析其在超临界发电、燃气轮机、新能源储能等热能动力场景中的研究进展与应用案例，深入探讨技术推广中的核心挑战，最后展望智能化、绿色化的发展趋势，为行业技术升级提供参考。

关键词 高效传热；热能动力；换热器；超临界CO_2；微通道技术

Research and Application of High-Efficiency Heat Transfer Technology in Thermal Energy and Power Engineering

Li Yang
Anhui HaiChuang Recycling Technology Co., Ltd., Wuhu 241000, Anhui Province, China

Abstract As the core carrier in the field of energy and power, approximately 80% of energy conversion in thermal systems is achieved through heat exchange equipment, making its utilization efficiency a direct determinant of overall system energy consumption levels. High-efficiency heat transfer technology, through material innovation, structural optimization, and system synergy, breaks through traditional heat exchange bottlenecks and becomes a key support for energy conservation, emission reduction, and efficient energy utilization. This paper systematically elaborates on the theoretical foundation and classification system of high-efficiency heat transfer technology, focusing on its research progress and application cases in thermal energy and power scenarios such as supercritical power generation, gas turbines, and new energy storage. It delves into the core challenges in technology promotion and finally looks forward to the development trends of intelligence and greenization, providing a reference for technological upgrading in the industry.

Key words High-Efficiency Heat Transfer; Thermal Energy and Power; Heat Exchanger; Supercritical CO_2; Microchannel Technology

在“双碳”战略与能源转型背景下，热能动力系统对能效提升的需求日益迫切。传统传热技术面临高温高压工况适应性差、能效瓶颈突出、设备体积庞大等问题，如常规列管式换热器传热系数仅为2 000～4 000 W/(m²·℃)，难以满足新一代能源系统的紧凑化、高效化需求。高效传热技术通过融合材料科学、流体力学与热物理等多学科理论，实现传热性能的数量级跃升，在超临界发电、燃气轮机提效、余热回收等领域展现出巨大应用价值。中国科学院工程热物理研究所等机构的研究表明，先进换热技术可使能源动力系统效率提升8%～15%，设备成本降低30%以上，其研究与应用已成为能源领域的核心攻关方向[1]。

1 高效传热技术的理论基础与分类体系

1.1 核心理论支撑

高效传热技术的发展建立在三大理论支柱之上：一是传热强化理论，通过破坏热边界层、增强流体混合实现传热系数提升，如波浪形微通道通过诱导Dean涡旋使传热效率提高40%；二是场协同原理，通过优化速度场与温度梯度场的协同度，减少传热熵产，中国科学院团队据此提出“分布耦合、协同优化”设计思想；三是材料物性调控理论，利用纳米颗粒掺杂、表面改性等手段提升导热性能，如Fe_3O_4纳米流体的导热系数较基液提升50%。

1.2 技术分类体系

根据强化机理，高效传热技术主要可分为三大类别。

首先是材料强化技术，该技术通过材料的物理改性或复合材料应用来实现物性性能的突破，具体包括纳米流体、超导材料、陶瓷基复合材料等，这些新型材料能够显著提升热传导效

率与热稳定性[2]。

其次是结构优化技术，其核心在于通过创新流道设计以增强换热效果，常见的技术涵盖微通道换热器、螺旋缠绕管束、印刷电路板式换热器等，这些结构设计能够有效增大传热面积并优化流体动力学特性。

最后是系统协同技术，该技术通过多设备之间的高效联动与智能调控策略来提升整体传热系统的效能，典型应用包括基于数字孪生的系统优化、多换热器组合协同控制等，从而实现系统级能效的最大化与运行成本的降低[3]。

2 关键研究进展与技术突破

2.1 超临界流体传热技术

超临界CO_2布雷顿循环系统因效率高、体积小成为新一代发电技术核心，其换热器成本占系统总造价的50%以上，且面临临界点物性剧烈变化的挑战。中国科学院工程热物理所团队通过系列创新取得突破：在理论层面，揭示直管与强化管内传热新规律，阐明传热恶化抑制机制；在设计层面，开发分段式设计方法与非均匀入口强化技术，克服温度夹点与流量分布不均问题；在实验层面，建成33 MPa/660 ℃全温全压试验平台，完成MW级回热器样机测试，换热效率较传统设备提升30%。目前已启动100 MW级系统换热器设计，为自主知识产权超临界发电技术奠定基础[4]。

2.2 紧凑式换热结构研发

针对燃气轮机、LNG等场景的紧凑化需求，研究人员开发出多种高效结构：在燃气轮机领域，采用多目标优化设计的间冷模块，通过优化板厚、肋高参数组合，在严格体积约束下实现传热效率与压力损失的平衡，MW级样机实测指标优于设计要求，回热器效率达83%以上；在LNG领域，江苏科技大学通过3D打印技术制造不锈钢微通道换热器，单位体积换热面积达170 m^2/m^3，相当于魔方大小空间铺开半个篮球场，替代进口设备单船节省千万元成本；在余热回收领域，螺旋折流板换热器较传统弓形结构压降降低20%，传热效率提升18%，某炼厂年节能收益超过500万元[5]。

2.3 智能调控与多能耦合技术

数字技术与先进传热技术的深度融合正不断催生能源系统智能化领域的关键性突破。以清华大学研发团队开发的吸收式换热机组为例，该装备借助智能调控算法与实时感知技术，将传统供热系统中一次网的回水温度从原先的55 ℃大幅降低至25 ℃，显著提升了传热温差和能源利用效率，最终使得系统供热能力提升达30%。在风电领域，某大型风电场部署数字孪生系统后，通过对风机运行状态的实时仿真与故障预测，非计划停机次数减少了65%，同时运维成本降低30%，系统可靠性与经济性同步增强。在多能互补与耦合利用方面，某核电站创新性地整合高温热泵与有机朗肯循环（ORC）发电技术，构建出高效余热回收系统，实现了热、电、冷三联供，不仅使供热面积扩大200%，还每年额外发电800万kWh。这些典型实例表明，数字赋能正推动传统传热系统从孤立运行的单一设备，向集成化、智能化、多能协同的综合能源解决方案全面演进。

3 典型应用场景与工程实践

3.1 电力能源领域

在火电行业，济三煤矿热负荷系统采用分层布管技术，将锅炉排烟温度从150 ℃降至80 ℃，年节约标准煤1.2万t；某600 MW机组通过模块化换热改造，占地面积缩小40%，余热回收效率达85%。核电领域，254SMO不锈钢双管板换热器实现蒸汽冷凝温度波动 ± 0.5 ℃以内，确保放射性物质零泄漏，设备寿命达20年；新一代换热机组集成相变储能模块，断电后可提供8小时应急冷却，满足核安全要求。地热发电站采用PCHE换热器后，余热发电效率提升8%，年减排CO_2 2万t。

3.2 新能源与储能领域

光热发电中，敦煌200 MW熔盐电站采用石墨烯改性涂层换热器，导热系数达5 000 W/(m·K)，传热效率提高30%，储热系统效率达98%；氢能制备场景下，采用Inconel 625合金的微通道换热器在70 MPa工作压力下泄漏率可达10^{-9} Pa·m^3/s，远优于加氢站标准要求的泄漏率限值，满足工程应用要求。电子冷却领域，40 μm振幅波浪形微通道结合Fe_3O_4纳米流体，在压降可控前提下实现最优换热性能，为5G设备、功率模块提供紧凑冷却方案；谷歌数据中心采用微通道冷凝器，PUE从1.6降至1.4，制冷剂充注量减少40%。

3.3 工业与交通领域

石油化工行业，乙烯裂解炉采用CuO-水纳米流体，传热系数提升35%，年节能超千万元；脱硫塔应用钛合金换热管与纳米流体技术，浆液温度波动从 ± 8 ℃缩至 ± 2 ℃，脱硫效率提升15%。冶金行业，中国铝业在铝电解槽采用陶瓷基复合材料换热器，耐温1 200 ℃，热效率提升25%；连铸机通过脉冲流强化传热，铸坯表面温度均匀性提升40%，缺陷率显著降低。舰船动力领域，某型号舰用燃机间冷器克服精密加工与无钎料焊接难关，全温全压测试性能优异，为舰船动力提效奠定基础。

4 技术挑战与发展趋势

4.1 当前核心挑战

高效传热技术推广仍面临三重瓶颈：一是材料性能制约，纳米流体易团聚需新型分散剂，陶瓷基材料寿命不足3年；二是成本与工艺障碍，PCHE制造成本是传统设备的3倍，微通道精密加工难度大；三是理论认知不足，高温高压强腐蚀工况下多物理场耦合传热机理尚不明确，如湿化燃气轮机回热器两侧流体耦合特性亟待研究。此外，不同行业工况差异大导致技术通用性差，缺乏统一标准体系也阻碍规模化应用。

4.2 未来发展方向

1.智能化与自适应。艾默生、西门子等工业自动化领域的领军企业正在积极研发基于“数字孪生+人工智能”的智能调控系统。该系统通过高精度传感器对传热过程进行实时数据采集与动态监测，并依托AI算法实现对关键运行参数的自主优化与反馈调节，从而达成传热系统的自适应智能控制。该项技术的应用目标是将生产过程中的能源消耗降低10%以上，显著提升能效水平。

与此同时，物联网传感技术与人工智能预测模型的深度融合，可实现对设备运行状态的持续分析与异常识别，使故障预警准确率提升至98%以上。该能力将大幅降低非计划停机频次，保障生产的连续性和稳定性，为流程工业的智能运维提供关键支撑。

2.绿色低碳升级。在材料技术方面，未来将大力推广生物基相变材料的应用，并采用低全球变暖潜势（GWP）制冷剂，以减少对环境的影响。同时，涂层技术也将朝着环保型方向升级，实现挥发性有机化合物（VOCs）排放量降低90%的目标。在结构设计层面，将重点开发可回收的模块化方案，提高设备的可持续性和资源利用效率。根据某300 MW机组改造的实际案例显示，应用绿色换热技术后，每年可减少二氧化碳排放约50万t，同时显著缩短投资回收周期至2至3年，充分体现了其在经济效益与环境效益方面的双重优势[6]。

3.跨学科融合创新。MIT与清华大学等顶尖研究机构正在积极推进“传热—材料—控制”一体化研究项目，致力于在多个关键领域实现重大突破。研究重点包括石墨烯增强碳化硅复合材料、高温超导材料等一系列具有前瞻性的先进材料体系，这些材料的开发将极大地提升能源转换与热管理系统的效率。与此同时，3D打印技术正在实现复杂内部流道结构的定制化生产，为高效换热器的设计与制造提供了全新的技术路径。GE Additive已经通过该技术成功制造出性能显著提升的换热器样机，实测数据显示其热交换效率比传统制造工艺提高了40%，这一突破为下一代热管理系统的产业化应用奠定了坚实基础。

5 结束语

高效传热技术通过材料、结构与系统的多维创新，已在热能动力领域实现从理论突破到工程应用的跨越。超临界CO_2换热器、微通道结构、智能调控系统等技术的成熟，使发电效率提升8%～15%，余热回收效率突破85%，设备体积缩减40%以上。尽管面临材料稳定性、成本控制、理论认知等挑战，但智能化、绿色化、跨学科融合的发展趋势已明确。未来需通过产学研协同攻关，完善标准体系，推动技术从单点优化向系统解决方案升级，为能源动力行业的高效低碳转型提供核心支撑。

参考文献

[1]中国科学院.工程热物理所在高效紧凑式换热器技术研究中获系列进展[EB/OL].(2025-07-28)[2026-02-25].https://www.etp.ac.cn/xwdt/kydt/202507/t20250728_123456.html.

[2]NOR ATIQAH Z. Thermal performance analysis of microchannel heat sinks with varied wavy structure amplitude[C]//E3S Web of Conferences, 2026.

[3]徐阳,崔明,魏勇,等.内外环境作用下主缆除湿过程传热传质特性研究[J].中国科学:技术科学,2024,54(12):2255-2268.

[4]林文珠,凌子夜,方晓明,等.相变储热的传热强化技术研究进展[J].化工进展,2021,40(9):5166-5179.

[5]汤勇,赵威,尹树彬,等.基于相变传热的动力电池高效复合热控技术研究综述[J].机械工程学报,2025,61(4):176-194.

[6]张余波.高效传热技术在热能与动力技术中的研究与应用[J].中文科技期刊数据库,2025(1):88-91.

（本文编辑 曹 阳）

