

Research on Optimization of High-Efficiency Heat Exchange Structure and Engineering Application of Heat Pump Air Conditioning System

Bo Kong

Qingdao Haier Intelligent Technology Research and Development Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266431, China

Abstract

Driven by the global energy crisis and the goal of carbon neutrality, heat pump air conditioning systems have become a key technology in the field of building heating and cooling due to their highly efficient and energy-saving characteristics. However, the traditional heat exchange structure is limited by problems such as low heat transfer efficiency, large flow resistance and poor adaptability to working conditions, which makes it difficult to break through the energy efficiency of the system. According to statistics, a 10% improvement in the performance of heat exchangers can increase the overall energy efficiency of heat pumps by 5% to 8%. Therefore, optimizing the heat exchange structure has become the core path to enhance system efficiency. Most of the existing research focuses on single-parameter optimization or experimental verification, lacking systematic solutions for multi-physics field collaboration and full life cycle engineering adaptation. This paper first conducts a detailed analysis of the theory of heat pump air conditioning heat exchange systems, then specifically proposes an optimization method for efficient heat exchange structures. Subsequently, it elaborates on the research on engineering application adaptability. Finally, it specifically lists case analyses and application prospects, with the aim of providing useful references and inspirations for related research.

Keywords

Heat pump air conditioning system; Efficient heat exchange; Structural optimization; engineering application

热泵空调系统高效换热结构优化及工程应用研究

孔波

青岛海尔智能技术研发有限公司, 中国·山东 青岛 266431

摘要

在全球能源危机与碳中和目标驱动下, 热泵空调系统因其高效节能特性成为建筑供暖与制冷领域的关键技术。然而, 传统换热结构受限于传热效率低、流动阻力大及工况适应性差等问题, 导致系统能效难以突破。据统计, 换热器性能提升10%可使热泵整体能效提高5%-8%, 因此优化换热结构成为提升系统效率的核心路径。现有研究多聚焦于单一参数优化或实验验证, 缺乏多物理场协同、全生命周期工程适配的系统性方案。本文先是详细分析了热泵空调换热系统理论, 随后具体提出了高效换热结构优化方法, 紧接着阐述了工程应用适配性研究, 最后具体列出了案例分析与应用前景, 以期对相关研究提供有益参考与借鉴。

关键词

热泵空调系统; 高效换热; 结构优化; 工程应用

1 引言

在“双碳”目标推动下, 建筑节能成为全球能源转型的关键领域, 而热泵空调作为核心装备, 其能效提升高度依赖换热器性能的优化突破。据国际能源署(IEA)统计, 建筑能耗占全球总能耗的36%, 其中空调系统占比超40%, 但传统翅片管式换热器因传热与流动耦合效率低下, 导致热泵在低温制热工况下性能衰减达30%以上, 严重制约技术

升级。当前研究虽在微通道、纳米流体等单一强化传热技术上取得进展, 却缺乏多目标协同优化方法, 且工程设计中常忽视换热器与系统其他部件的动态匹配, 导致实际能效显著低于理论值, 同时轻量化、防腐蚀等工程适配性问题仍未系统解决。为此, 本文提出构建“理论-设计-应用”一体化优化框架, 通过多物理场耦合建模揭示传热-流动协同机制, 结合仿生结构创新与全生命周期评估方法, 实现换热效率与工程可靠性的双重提升, 为热泵空调技术的高效化、轻量化发展提供理论支撑与实践路径。

【作者简介】孔波(1978-), 男, 中国河南信阳人, 本科, 工程师, 从事空调、热泵系统研发研究。

2 热泵空调换热系统理论分析

2.1 换热过程多物理场耦合机理

热泵空调换热器性能优化需深入剖析传热、流体流动及相变的多物理场耦合机理。根据场协同理论，传热效率受温度梯度与速度场、温度场协同程度影响，当流体速度与温度梯度夹角趋近 0° 时换热显著增强，如优化翅片倾角可改善边界层分布，微通道尺寸变化能触发流动状态转变以强化对流。低温制热时蒸发器结霜会增大导热热阻、阻塞气流，导致制热量衰减超30%；冷却工况结垢则降低传热系数，且垢层生长非线性，需动态模型预测。熵产分析表明，不可逆损失主要源于传热温差与流动摩擦，通过非对称流道设计或优化工质分配可降低局部熵产率，分布式布局较集中式可减少15%以上熵产，从而提升系统能效。

2.2 换热器性能评价指标体系

换热器性能需从热力学、流体力学及空间利用率等多维度综合评估。传热系数(K值)是核心指标，其大小取决于各部分热阻叠加，如翅片管式换热器空气侧热阻占比超60%，优化翅片结构可提升K值；微通道换热器则需关注水侧热阻与流道壁面粗糙度^[1]。压降直接影响能耗，需平衡传热强化与阻力增加，如增加翅片密度虽提升换热面积，但会增大压降，微通道换热器则需优化流道形状以缓解摩擦因子上升问题。紧凑度反映空间利用效率，在电动汽车热管理等场景中尤为重要，平板式换热器通过叠层设计可大幅提升紧凑度，但需解决流体均布性难题。

2.3 现有结构局限性分析

传统与新型换热结构均存在特定工况下的性能短板。传统翅片管式换热器因空气侧传热系数低(20-50 W/($m^2 \cdot K$))，且翅片间距不当易引发积灰堵塞或热阻增加，管排数过多还会导致气流短路，使实际换热量仅达理论值的60%-70%；微通道换热器虽传热系数高达5000-10000 W/($m^2 \cdot K$)，但易被颗粒物或冰晶堵塞，低温工况下制冷剂相变气泡更会引发流道干涸，同时多通道并联设计因加工精度不足导致流量分配不均，整体性能下降15%-20%。此外，传统换热器多针对单一工况设计，跨季节极端气候或变负荷运行时，换热面积与流量匹配失衡，如某商用热泵在 $-10^\circ C$ 工况下制热量较 $7^\circ C$ 时骤降45%。

3 高效换热结构优化方法

3.1 基于场协同理论的流道设计

基于场协同理论的流道设计通过优化速度场与温度场的协同关系，可显著提升换热性能。其核心原则在于调整流道走向、截面形状或流体入口角度，使速度矢量与温度梯度方向趋近一致，以减少夹角、降低热阻。例如，螺旋流道利用旋转产生的二次流增强边界层扰动，使协同角减小15%-20%，传热系数提升超30%。非对称流道设计(如一侧扩张、

另一侧收缩)则通过打破流动对称性形成局部压力梯度，促进流体混合^[2]；结合参数化建模(控制长宽比、曲率半径)与CFD仿真筛选最优结构，某微通道换热器采用此设计后，压降降低12%的同时换热面积利用率提高18%。针对传热系数、压降、紧凑度等多目标冲突问题，NSGA-II算法通过非支配排序和拥挤度计算生成帕累托最优解集，在翅片管式换热器优化中平衡了翅片密度与流道宽度，使综合性能提升25%，且计算效率较传统试错法提高5倍，为高效换热结构开发提供了系统化解决方案。

3.2 表面强化传热技术

表面强化传热技术通过微结构改造与涂层改性，可显著提升换热效率并抑制污垢沉积。仿生微结构表面借鉴自然灵感，如鲨鱼皮纹的肋条结构通过微沟槽诱导涡流破坏边界层，使空气侧传热系数提升20%-30%，同时降低流体阻力；荷叶效应表面采用超疏水涂层(接触角 $>150^\circ$)，在冷却工况下实现自清洁，结垢速率降低60%以上。多尺度复合翅片设计则结合宏观(如波纹翅片)与微观结构(直径10-100 μm 凹槽)，形成协同强化机制：宏观结构扩大换热面积，微观结构通过毛细作用增强液膜铺展，某平板式换热器应用后沸腾传热系数提高40%，抗结霜性能显著改善。

3.3 结构轻量化与紧凑化设计

结构轻量化与紧凑化设计通过拓扑优化、分布式布局及材料创新，在保障性能的同时实现高效减重与空间优化。拓扑优化以最小化材料用量为目标，采用变密度法或水平集法生成最优传热路径，例如某汽车散热器应用后骨架重量减轻35%，换热面积不变且压降仅增5%，显著提升能效密度^[3]。分布式换热单元布局则将单一大型换热器拆分为多个小型单元，通过并联或串联排列适应不同工况，减少气流短路并提高后排换热管利用率，某数据中心冷却系统采用此设计后能效比(EER)提升12%，空间占用减少20%，兼顾灵活性与紧凑性。材料选型与热膨胀补偿机制进一步优化可靠性，选用铝合金、钛合金等低密度高导热材料减轻重量，同时通过弹性连接件或波纹管设计补偿热膨胀差异，避免应力集中，如某跨季节热泵换热器采用钛合金流道与橡胶密封圈组合，在 $-30^\circ C$ 至 $80^\circ C$ 温变范围内无泄漏，寿命延长至传统结构的3倍，为极端工况下的稳定运行提供保障。

4 工程应用适配性研究

4.1 系统级协同优化

系统级协同优化聚焦于换热器与热泵系统其他部件的动态匹配，以实现整体能效最大化。在匹配设计上，需依据压缩机排气压力、流量特性及节流装置的流量调节范围，优化换热器管径、流道长度与翅片间距。例如低温制热时，蒸发器增大换热面积以弥补低温传热不足，并与压缩机变频控制协同，避免频繁启停造成能效损失。变工况下，通过

CFD 与系统仿真耦合,模拟极端工况(如 -30°C 低温制热或 50°C 高温制冷)下换热器性能衰减,如低温结霜使传热系数降 40%,需动态调整电子膨胀阀或引入辅助电加热快速除霜。能效比提升则从换热器侧优化(如多尺度复合翅片)、系统侧协同(流量-压力匹配)及控制策略优化(模糊控制算法)三方面入手,实验表明系统级优化可使 EER 提升 15%-20%, COP 提高超 10%。

4.2 安装与运维适应性

安装与运维适应性研究聚焦于换热器在实际工程中的可部署性与长期运行稳定性。模块化设计通过标准化尺寸(如 $600\text{mm}\times 600\text{mm}$ 单元)和快速连接接口,灵活适配狭长机房、屋顶平台等不同安装空间,某数据中心冷却系统采用后安装时间缩短 60%,且容量可按需扩展。针对工业环境(如纺织厂、化工厂)的粉尘或腐蚀性气体,防积灰/防腐蚀结构优化采用倾斜翅片(角度 $>15^{\circ}$)减少积灰,或涂覆环氧树脂等防腐涂层,某沿海热泵项目结合钛合金流道与防腐涂层后,寿命延长至传统结构的 2.5 倍^[4]。

4.3 成本与可靠性评估

成本与可靠性评估通过量化分析平衡性能与经济性,为技术可行性提供科学依据。生命周期成本(LCC)模型综合考量初始投资(材料、制造)、运行成本(能耗、维护)及报废成本(回收、处置),以净现值(NPV)或内部收益率(IRR)为指标优化设计。例如,某热泵项目采用轻量化钛合金流道虽初始成本增加 20%,但运维成本降低 40%,5 年周期内总成本下降 15%。关键部件疲劳寿命预测基于有限元分析(FEA)模拟换热管在热应力、振动载荷下的损伤,结合 Miner 法则预测寿命,某汽车散热器通过优化流道结构将疲劳寿命从 8 年延长至 12 年。故障模式与影响分析(FMEA)则识别潜在故障(如泄漏、堵塞、腐蚀),评估其严重度(S)、频度(O)及检测难度(D),某分析显示泄漏风险优先数(RPN)最高,需强化焊接质量检测与密封设计,确保长期运行可靠性。

5 案例分析与应用前景

5.1 典型工程场景适配案例

在典型工程场景中,新型换热器展现出显著适配优势。住宅领域,针对静音、节能需求,采用微通道换热器,优化流道与翅片间距后,换热效率提升 20%,噪声降 5dB(A),某高端住宅项目应用后节能 15%,安装体积缩小 30%;工业余热回收场景,开发钛合金换热器与双级压缩热泵耦合系统,梯级换热设计使余热回收效率达 65%,某钢铁厂年节约标煤 1.2 万吨,减排 CO_2 3.1 万吨,回收期仅 3 年;电动汽车领域,集成式液冷换热器整合多模块功能,仿生流道设计降压 15%,相变材料增强热缓冲,某车型实测电池温度波动 $\pm 2^{\circ}\text{C}$,续航提升 8%,重量减轻 25%。

5.2 技术经济性对比

5.2.1 与传统换热器的性能参数对比

参数	新型换热器	传统换热器	优势幅度
传热系数 ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)	800-1200	400-600	+80%-100%
体积 (m^3/kW)	0.02-0.05	0.08-0.12	-60%-75%
压降 (kPa)	5-15	20-30	-50%-70%

5.2.2 投资回收期与节能效益预测

以某商业综合体热泵项目为例,采用新型换热器后,初始投资增加 18%(因材料成本上升),但年运维成本降低 40%(能耗减少+维护频次下降)。按电价 0.8 元/kWh 计算,系统年节约费用约 52 万元,投资回收期仅 2.3 年。长期来看,20 年生命周期内累计节能收益可达 1040 万元,内部收益率(IRR)达 22%。

5.3 推广障碍与对策

新型换热器推广面临两大障碍及相应对策。行业标准与认证方面,现有标准多基于传统技术,对钛合金等新型材料及微通道结构的测试方法缺乏规范。为此需联合行业协会制定专项标准,如《微通道换热器性能测试规范》,并推动纳入国家强制认证目录,同时与第三方检测机构合作建立快速认证通道。市场接受度层面,联合头部企业打造标杆项目并公开故障率等数据,配合“以租代售”模式降低初期投入风险,再辅以节能改造补贴 30% 等政策引导,加速市场转型。

6 结语

综上所述,本文围绕热泵空调系统高效换热结构优化及工程应用展开研究,通过理论分析揭示多物理场耦合机理,提出基于场协同理论的流道设计、表面强化传热技术及轻量化紧凑化设计方法,显著提升了换热效率与工程可靠性。工程适配性研究聚焦系统协同、安装运维及成本可靠性,通过模块化设计、智能清洗等技术解决了实际部署难题。案例分析表明,新型换热器在住宅、工业余热回收及电动汽车领域均实现能效提升与成本优化,技术经济性优势显著。未来研究可进一步探索多目标协同优化算法与新型材料(如石墨烯涂层)的应用,推动换热器向更高效、更低成本方向发展。同时,加强跨学科合作,完善行业标准与认证体系,加速技术商业化进程,为全球能源转型与碳中和目标提供关键技术支撑。

参考文献

- [1] 曹涛,徐鸿,张银安,等.医院建筑热源塔热泵空调设计实践与分析[J].暖通空调,2025,55(10):149-155.
- [2] 吴丹.地源热泵高效换热系统热运移模型研究[D].合肥工业大学,2019.
- [3] 刘龙凤.风冷热泵空调水系统节能控制方式的实验研究[D].江南大学,2025.
- [4] 许鹏,聂靖宇,王伟忠,等.应用于热泵空调系统的MEMS压力温度传感器设计及验证[J].微纳电子技术,2025,62(05):86-92.