

微通道换热器在制冷空调系统中的应用分析

曹荣辉

浙江盾安热工科技有限公司 浙江 绍兴 311800

摘要: 为适配制冷空调行业高效化、小型化、环保化发展需求, 破解传统换热器节能与空间适配瓶颈, 本文围绕微通道换热器展开研究。阐述其通道当量直径10-1000 μm 的核心特征、传热与流动机理, 分析其在家用、商用、热泵空调系统中的具体应用及案例效果, 剖析制造、运行、适配等方面的现存问题, 提出结构、工艺、维护等优化策略, 为行业技术升级提供支撑, 助力“双碳”目标下制冷空调行业绿色可持续发展。

关键词: 微通道换热器; 制冷空调系统; 应用

引言: 随着制冷空调行业向高效化、小型化、环保化转型, 传统换热器已难以满足节能降耗与空间适配需求, 微通道换热器凭借独特结构与优异性能脱颖而出。其凭借单位体积传热面积大、制冷剂充注量少等优势, 广泛应用于各类制冷空调系统。本文结合行业发展需求, 系统分析微通道换热器的核心特性、应用场景及现存瓶颈, 探讨优化路径, 助力推动制冷空调行业技术升级, 契合“双碳”目标下的绿色发展理念。

1 微通道换热器的核心特性与工作机理

1.1 微通道换热器的基本概念与结构组成

(1) 微通道换热器的定义与分类: 指通道当量直径10-1000 μm 的高效换热器, 按材质可分为铜质、铝质、不锈钢质, 铝质因轻量化应用最广; 按结构形式可分为平行流、叉流、逆流式, 平行流多用于空调领域。(2) 核心结构组成及作用: 微通道管是核心, 负责承载流体并传递热量; 翅片用于增大传热面积、强化换热; 集流管用于分配和汇集流体, 保障流道均匀性, 三者协同构成紧凑换热单元。(3) 关键设计参数: 通道尺寸直接影响换热效率, 越小传热越强化; 翅片密度决定传热面积, 密度越高换热效果越好; 管排数影响流体停留时间, 需结合应用场景合理设计。

1.2 微通道换热器的工作机理

(1) 传热机理: 以对流换热为主, 相变传热为辅, 传热关联式为 $\text{Nu} = 0.023\text{Re}^{0.8}\text{Pr}^{0.4}$ (湍流工况), 层流工

况用 $\text{Nu} = 3.66 + \text{Nu}_s = 3.66 + \frac{0.0668\text{RePr} \frac{d}{L}}{1 + 0.04 \left(\text{RePr} \frac{d}{L} \right)^{2/3}}$, 通过减

小通道尺寸、增加翅片扰动强化传热, 提升热量传递速率。(2) 流体流动特性: 微尺度下流动状态以层流为

主, 压力损失计算式为 $\Delta P = f \frac{L\rho u^2}{2d}$, 随通道尺寸减小、流

速增大而上升, 需平衡流速与压力损失。(3) 制冷剂相变过程与热质传递规律: 制冷剂在通道内经历蒸发/冷凝相变, 相变过程中伴随大量热质交换, 通道结构影响相变均匀性, 进而影响换热效率^[1]。

2 微通道换热器在制冷空调系统中的具体应用

2.1 在家用制冷空调系统中的应用

(1) 家用分体式空调中的应用: 微通道换热器广泛应用于家用分体式空调的室内机蒸发器和室外机冷凝器。室内机蒸发器采用微通道结构, 可在有限空间内增大传热面积, 提升换热效率, 快速实现室内降温或升温; 室外机冷凝器通过优化微通道管排布和翅片设计, 有效散出压缩机排出的热量, 适配家用空调小型化需求, 同时减少室外机体积, 节省安装空间, 相较于传统换热器, 换热效率提升15%左右。(2) 家用中央空调中的应用: 适配多联机系统和风管机系统, 多联机系统中, 微通道换热器可实现多室内机与室外机的高效匹配, 通过精准分配制冷剂, 保障各房间温度稳定; 风管机系统中, 微通道换热器的紧凑结构可灵活嵌入吊顶, 不占用室内使用空间, 同时满足大空间的换热需求, 适配不同户型的安装场景, 提升家居美观度与使用舒适度^[2]。(3) 应用效果与优化方向: 应用后家用空调能效比可提升8%-12%, 能耗显著降低, 同时运行噪音控制在35dB以下, 体积较传统空调缩小20%-30%。优化方向主要集中在进一步提升能效、优化噪音控制技术, 以及缩小换热器体积, 适配小型化、智能化家用空调发展趋势。

2.2 在商用制冷空调系统中的应用

(1) 商用中央空调中的应用: 在冷水机组、螺杆式空调中, 微通道换热器替代传统壳管式换热器, 通过增大单位体积传热面积, 提升机组换热效率, 降低运行能耗, 适配大型商场、写字楼等商用场所的大负荷换热需求, 同时减少机组占地面积, 便于设备集成安装, 降低

商用场所的空间占用成本。(2)商用冷藏冷冻系统中的应用:适用于超市冷柜、冷库等场景,微通道换热器可精准控制冷藏冷冻温度,通过优化制冷剂流动路径,减少冷量损耗,保障食品新鲜度,同时降低系统能耗,相较于传统换热器,冷库能耗可降低10%-15%,超市冷柜的制冷效率提升明显,减少运行成本。(3)特种商用空调中的应用:在机房空调中,微通道换热器可适应机房高温、高负荷的运行环境,稳定传递热量,保障机房设备正常运行;在车载空调(如客车、冷链物流车)中,其轻量化、紧凑化特点适配车载空间有限的需求,同时耐振动、耐压性能优良,可适应车载复杂运行工况^[1]。

2.3 在热泵空调系统中的应用

(1)空气源热泵中的应用:除微通道换热器外,插片式换热器也广泛应用于热泵系统,其结构简单、换热高效,适配中低温热泵场景;微通道换热器作为蒸发器和冷凝器适配设计,蒸发器可高效吸收空气中的低位热能,冷凝器则将热量传递至室内,优化通道尺寸和翅片结构,提升热泵在常温环境下的换热效率,减少压缩机负荷,降低能耗,适配家用和小型商用空气源热泵系统。(2)水源/地源热泵中的应用:针对水源、地源的介质特性,微通道换热器采用抗腐蚀材质设计,表面喷涂TCP涂层或电泳涂层,避免被地下水、土壤介质腐蚀,TCP涂层耐蚀率提升80%,电泳涂层附着力达1级,同时优化传热结构,提升传热性能,充分利用水源、地源的稳定热能,实现高效供暖制冷,适配大型商用或别墅类水源/地源热泵项目^[4]。(3)低温环境下的应用难点与解决方案:难点主要是低温环境下空气源热泵蒸发器易结霜,导致换热效率下降、系统能耗增加。解决方案包括优化微通道翅片结构,减少结霜堆积;采用低温适配材质,提升换热器耐低温性能;搭配化霜系统,及时清除霜层,保障低温环境下热泵系统稳定运行。

2.4 应用案例分析

(1)典型家用空调微通道换热器应用案例及效果:某知名空调品牌家用分体式空调,采用微通道冷凝器替代传统换热器,经实际应用测试,空调能效比从3.8提升至4.3,能耗降低13%,室外机体积缩小25%,运行噪音降低5dB,用户使用体验显著提升,同时减少制冷剂充注量,更加环保。(2)商用中央空调微通道换热器工程应用案例:某大型商场商用中央空调项目,采用微通道换热器适配冷水机组,替换传统壳管式换热器,项目运行后,中央空调系统能耗降低12%,机组占地面积减少30%,每年节省电费约20万元,同时换热稳定性提升,有效保障商场内恒温环境。(3)案例总结与应用经验提

炼:微通道换热器在制冷空调系统中应用,核心优势在于高效换热、节能降耗、紧凑轻量化,适配不同场景的换热需求。应用中需结合场景特性,优化结构设计和材质选择,如低温环境重点考虑抗结霜、抗腐蚀设计,商用场景重点优化负荷适配性;同时需注重安装调试,保障换热器与系统的协同运行,充分发挥其性能优势。

3 微通道换热器应用中的问题与优化策略

3.1 微通道换热器应用中的主要问题

(1)制造工艺问题:微通道尺寸微小,制造过程中易因杂质残留、加工精度不足导致通道堵塞,影响流体流通与传热效率;钎焊工艺易出现虚焊、漏焊等质量缺陷,造成制冷剂泄漏,降低设备可靠性;核心材料多采用高导热铝合金,部分场景需用到耐腐蚀特种合金,材料成本相较于传统换热器偏高,增加了设备整体制造成本,制约其大规模普及应用。(2)运行性能问题:低温环境下,微通道表面易结霜,堵塞流道并降低传热效率;长期运行中,翅片与通道表面易积灰、积污,进一步弱化换热效果;集流管流道设计不合理易导致制冷剂分流不均,部分通道负荷过高、部分通道利用率不足;微通道尺寸偏小,若设计不当会出现压力损失过大问题,增加压缩机运行负荷,影响系统整体能效。(3)适配性问题:不同类型制冷剂的物理性质差异较大,部分微通道换热器设计针对性不足,与R32、R134a等新型环保制冷剂兼容性较差,无法充分发挥制冷剂的换热潜力;同时,其结构设计多适配特定空调制冷系统,与不同功率、不同类型的制冷空调系统协同性不足,适配范围有限,难以满足多样化应用需求。(4)维护保养问题:微通道内部结构精密、通道狭窄,积灰、结垢后清洗难度极大,常规清洗方式难以彻底清除堵塞物;部分应用场景中,换热器表面防腐涂层不足,未采用TCP或电泳涂层,长期接触潮湿、腐蚀性介质易发生腐蚀,缩短设备使用寿命,增加维护成本与更换频率。

3.2 结构设计优化策略

(1)微通道尺寸与排布优化:结合应用场景精准设计微通道当量直径,兼顾传热效率与压力损失,避免尺寸过小导致压力损失过大、尺寸过大降低换热效率;采用错排或叉排方式替代传统顺排,增大流体扰动,提升传热系数,同时优化通道间距,减少流体流动阻力,实现传热效率与压力损失的平衡。(2)翅片结构优化:根据换热需求适配不同类型翅片,家用、小型商用场景优先采用百叶窗翅片,增强流体扰动,提升传热效率;工业、高粉尘场景适配波纹翅片,其结构强度高、积灰难度低,同时优化翅片间距,兼顾换热效果与防积灰性

能,减少运行过程中的换热衰减。(3)集流管与流道分配优化:改进集流管内部结构,增设分流挡板或导流结构,引导制冷剂均匀分配至各微通道,解决分流不均问题;合理设计流道分支,根据通道负荷差异调整流道截面尺寸,确保各通道流体流量匹配,充分发挥每根微通道的换热潜力,提升整体换热效率^[5]。

3.3 制造工艺与材料优化策略

(1)钎焊工艺改进:采用真空钎焊替代传统钎焊工艺,减少氧化杂质产生,提升焊接接头强度与密封性,避免虚焊、漏焊等缺陷;优化钎焊温度与保温时间,降低能源消耗,同时简化工艺流程,减少人力成本,实现钎焊质量与制造成本的双重优化。(2)新型材料应用:选型耐腐蚀、高导热的新合金材料,如不锈钢、铜铝合金等,替代传统单一铝合金,提升换热器抗腐蚀性能与导热效率,适配潮湿、腐蚀性较强的应用场景;针对成本敏感场景,采用复合材质,在核心换热区域使用高导热材料,非核心区域使用低成本材料,平衡性能与成本。(3)表面处理优化:优先采用TCP涂层和电泳涂层,TCP涂层适配强腐蚀场景,电泳涂层适配潮湿场景,搭配亲/疏水性涂层,防霜场景采用疏水性涂层减少结霜附着,冷凝场景采用亲水性涂层加速冷凝水排出;对易腐蚀场景,喷涂防腐涂层,增强材料抗腐蚀能力,延长设备使用寿命。

3.4 运行与维护优化策略

(1)结霜与除霜控制优化:采用主动除霜技术,结合温度、湿度传感器实时监测结霜情况,精准启动除霜程序,避免盲目除霜造成的能耗浪费;优化防霜结构设计,搭配疏水性涂层,减少霜层附着,同时合理调整运行参数,延缓结霜速度,保障换热稳定性。(2)清洗维护方案优化:设计便捷化清洗结构,预留专用清洗接口,采用高压喷淋、化学清洗相结合的方式,降低清洗难度;制定标准化定期维护流程,明确清洗周期、维

护内容,及时清除积灰、结垢,避免堵塞通道,同时检查防腐涂层完整性,及时补涂,提升维护便利性与有效性。(3)系统匹配优化:可借助Coildesigner换热器设计软件,输入传热面积、流体参数等,精准计算传热系数、压力损失,优化微通道换热器与压缩机、节流装置的协同匹配;根据压缩机功率、节流装置的流量特性,调整换热器流道设计与换热面积,确保系统运行时压力、流量处于合理范围,降低压力损失,提升系统整体能效;针对不同制冷剂特性,优化换热器结构参数,提升与各类环保制冷剂的兼容性,扩大应用范围。

结束语

综上,微通道换热器凭借高效、节能、紧凑的核心优势,在制冷空调各场景中展现出广阔应用前景,有效推动了行业向绿色低碳、小型智能转型。本文通过分析其特性、应用及现存问题,提出的优化策略可有效解决实际应用瓶颈。未来,需持续深耕结构设计、制造工艺与材料创新,结合新型环保制冷剂应用需求,完善维护体系,推动微通道换热器技术迭代,助力制冷空调行业实现能效提升与可持续发展,为“双碳”目标落地提供支撑。

参考文献

- [1]吕玥莹,肖克华.增材制造高性能微通道换热器模块化单元传热与压损实验[J].工程热物理学报,2024,45(1):186-193.
- [2]陈华,段鼎立,张志强.微通道换热器换热性能的数值模拟及试验[J].煤气与热力,2022,38(10):22-29.
- [3]谈玉龙.微通道换热器在空调应用中的研究现状[J].机械工程师,2021,8(8):95-97.
- [4]葛俊玲,李伟伟.微通道换热器在制冷空调系统中的应用[J].建筑设计及理论,2022,34(11):157-160.
- [5]黄汝普.微通道换热器在热泵型空调中运用研究[J].建筑技术科学,2024,12(4):89-93.