

DOI:10.11918/202507003

# 低温空气源热泵室外换热器翅片优化研究进展

梁永辉<sup>1</sup>, 余思锐<sup>1</sup>, 宋孟杰<sup>1</sup>, 张 龙<sup>1</sup>, 张义奇<sup>1</sup>, 刘群波<sup>2</sup>, 旷文琦<sup>2</sup>, 张 旋<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 广东美的制冷设备有限公司, 广东 佛山 528311)

**摘要:** 在中国空调产业持续增长及气候变化的背景下, 热泵型空调以其高效节能的优势成为实现“双碳”目标的关键。然而, 翅片在湿工况下易结露、结霜, 导致翅片换热效率下降及系统能耗提升。为实现低温空气源热泵室外换热器翅片的多目标优化, 分别对换热器翅片的性能评估指标及在干工况和湿工况下优化设计方法进行了综述与分析。结果表明, 空气源热泵室外换热器翅片性能可从材料性能、换热流动性能和排水性能3方面进行综合评价。干工况下换热器翅片的优化主要聚焦于翅片结构的改进以强化传热。既有针对湿工况下单翅片的性能提升策略主要集中在微米级表面形貌设计与浸润性调控领域, 通过激光刻蚀或化学沉积构建微米级的沟槽网络, 在维持换热性能前提下降低压降。基于涡流诱导原理开发的翅片表面凸起和凹坑结构高度为0.6~1.61 mm, 使努塞尔数提升19.03%。在翅片表面设置结构以实现湿工况下的诱导成核并结合仿生学原理实现快速排水是未来的发展趋势。此外, 结合亲疏水表面特性的优势, 设计混合表面可延缓结霜并促进翅片排水。进一步指出该领域的重点研究方向, 以期提升换热器的换热效率、流动与排水性能, 满足现代工业与民用领域对高效、节能换热设备的需求。

**关键词:** 空气源热泵; 换热器翅片; 湿工况; 干工况; 冷凝结霜

**中图分类号:** TU832.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2026)02-0159-24

## Research progress in optimization of fins for outdoor heat exchangers of low-temperature air source heat pumps

LIANG Yonghui<sup>1</sup>, YU Sirui<sup>1</sup>, SONG Mengjie<sup>1</sup>, ZHANG Long<sup>1</sup>, ZHANG Yiqi<sup>1</sup>,  
LIU Qunbo<sup>2</sup>, KUANG Wenqi<sup>2</sup>, ZHANG Xuan<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;  
2. Guangdong Midea Refrigeration Equipment Co., Ltd., Foshan 528311, Guangdong, China)

**Abstract:** Against the backdrop of sustained growth in China's air conditioning industry and climate change, heat pump air conditioners have emerged as a key solution for achieving the "dual carbon" goals due to their high energy efficiency. However, fins are prone to condensation and frost formation under humid operating conditions, leading to reduced heat transfer efficiency and increased system energy consumption. To achieve multi-objective optimization of low-temperature air-source heat pump outdoor heat exchanger fins, this study reviews performance evaluation metrics and optimization methodologies for fins under both dry and wet conditions. Results indicate that air-source heat pump outdoor heat exchanger fin performance can be comprehensively assessed across three dimensions: material properties, heat transfer flow characteristics, and drainage performance. Optimization under dry conditions primarily focuses on enhancing heat transfer through structural improvements. Existing strategies for enhancing single-fin performance under wet conditions primarily concentrate on micrometer-scale surface topography design and wettability control. Techniques such as laser etching or chemical deposition create micrometer-scale groove networks to reduce pressure drop while maintaining heat transfer efficiency. Fin surface protrusions and pits developed based on vortex induction principles, with heights ranging from 0.6 to 1.61 mm, increase the Nusselt number by up to 19.03%. Future trends involve integrating surface structures for induced nucleation in wet conditions while leveraging biomimetic principles for rapid drainage. Additionally, designing hybrid surfaces combining hydrophilic and hydrophobic properties can delay frost formation and enhance fin drainage. This paper further identifies key research directions to improve heat exchanger efficiency, flow dynamics, and drainage performance, meeting modern industrial and civil demands for high-efficiency, energy-saving heat transfer equipment.

**Keywords:** air source heat pump; heat exchanger fins; wet conditions; dry conditions; condensation frosting

收稿日期: 2025-07-01; 录用日期: 2025-09-03; 网络首发日期: 2025-09-23

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250922.1952.006>

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52576006); 2024年度燕赵黄金台聚才计划骨干人才(科技平台)项目(244A7625D); 首都信息服务数据中心低碳运行技术研究及示范, 碳减排、碳中和科技支撑(Z231100006123010); 中央引导地方科技发展资金项目(科技成果转化项目)(254Z4504G)

作者简介: 梁永辉(1998—), 男, 博士研究生; 宋孟杰(1984—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 宋孟杰, mengjie.song@bit.edu.cn

在中国经济持续增长与消费升级的双重驱动下,热泵型空调作为现代生活刚需型家电的地位日益凸显<sup>[1-2]</sup>。2024年,中国家用空调产业呈现持续增长的态势,全年产量达19 508万台,同比增长19.5%;总销量突破18 977万台,同比增幅达20.9%。这种高速增长背后,全球气候变暖与极端天气频发的影响尤为关键<sup>[3]</sup>,夏季极端高温与冬季湿冷寒潮形成的双重气候压力,使得热泵型空调从改善型家电转变为应对气候挑战的刚需型家电<sup>[4]</sup>。中国幅员辽阔,南北方气候差异巨大,这种地理气候格局进一步强化了空调的市场价值。北方冬季严寒漫长,依赖集中供暖系统,而南方大部分地区冬季虽气温高于0℃,但湿度高、体感湿冷,且传统集中供暖设施覆盖范围十分有限<sup>[5]</sup>。以中国气象数据网2024年统计的数据为例,长沙、武汉等南方地区城市冬季平均室温低于10℃的时间达2~3个月,但集中供暖率不足5%。这种供需矛盾直接推动热泵型空调成为南方冬季采暖的绝对主力<sup>[6]</sup>,市场渗透率超过50%,在长三角城市群更是达到70%以上。

在此背景下热泵型空调的技术突破与规模化应用,正成为实现“双碳”目标的关键支点<sup>[7]</sup>。从热泵型空调器的运行原理看,当空调以热泵模式在冬季运行时,空调的室外机承担了蒸发器的角色,通过制冷剂的逆向循环从低温环境中吸收热量<sup>[8]</sup>。由于蒸发器空气侧存在强制对流过程,且空气中含有一定量的气态水,随着时间的推移,空气中的水蒸气会逐渐在蒸发器的翅片上凝结结霜<sup>[9]</sup>。结霜现象会导致蒸发器换热效果恶化,并最终堵塞翅片间的缝隙,翅片与空气换热失效<sup>[10]</sup>。在这种工况条件下,空调设备会停止制热循环的运行,调换四通换向阀方向,启动化霜程序,使热泵蒸发器转变为冷凝器,利用制冷剂冷凝放热融化换热器表面霜层。待化霜水排出后,再次调换四通换向阀方向,使空调器重新开始制热循环<sup>[11]</sup>。该经典控制逻辑为逆循环除霜,被热泵型空调广泛采用,但周期性的化霜循环及空调器频繁的启停机过程在很大程度上影响了热泵的效用,严重削弱了热泵用户的使用体验,并且增加了能耗<sup>[12]</sup>。此外,当热泵蒸发器经历过一次结化霜循环后,若化霜水不能彻底地排出换热器,残留水会在第二个结霜循环中迅速凝固成冰,导致热泵蒸发器结霜周期缩短,化霜程序提前启动,严重影响热泵的工作情况<sup>[13-14]</sup>。因此,化霜水不能顺畅地排出是热泵型空调面临的严峻问题,如何提升低温空气源热泵室外换热器的排水性能,是亟待研究解决的换热器优化问题<sup>[15-16]</sup>。

图1统计了2004—2024年Web of Science网站

上有关翅片换热器性能优化、湿工况、干工况、排水与结霜这4个研究方向的文献数量。以翅片换热器的性能优化为关键词的文献数量从2004年不足15篇跃升至2024年的约260篇,年均复合增长率达15%,相关研究愈发受到众多学者及企业的重视。对于干工况下的翅片换热器,整体文献数量较为稳定,常规干工况下的翅片换热器研究已较为成熟,研究资源更多地向排水、结霜等复杂情况倾斜。湿工况与排水结霜关键词的文献数量则呈明显的逐步上升趋势,一方面展现了市场对于此领域性能优化需求的增长,另一方面也体现了技术攻关点从基础理论研究向工程化应用创新的转变。因此,未来还需要重点突破湿工况下换热器翅片排水性能优化以及低能耗除霜技术两大方向,以支撑热泵在全球低碳供暖市场的规模化应用。

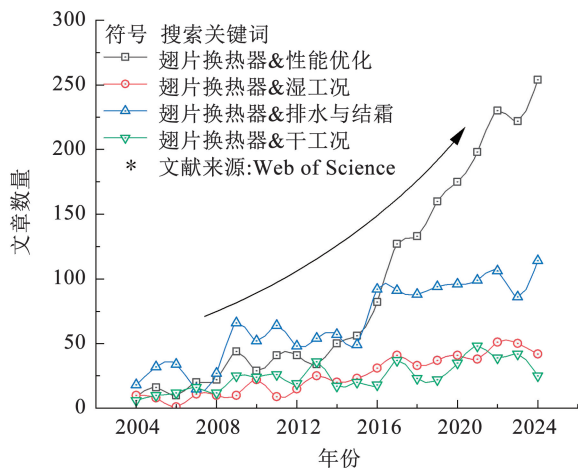


图1 国内外近20年关于翅片换热器性能优化文章数量  
Fig. 1 Number of articles on performance optimization of finned heat exchangers in the past 20 years

## 1 换热器翅片性能分析指标与评估方法

换热器作为空气源热泵能量传递的核心设备,其应用几乎包含所有涉及温度控制的工业与民用领域。从能源电力到航空航天,从家用空调到芯片散热,换热器在不同场景中扮演着关键角色。在石油化工领域,原油蒸馏塔的再沸器通过高效换热实现能源循环利用<sup>[17-18]</sup>;在汽车工业中,散热器确保发动机在高温环境下稳定运行<sup>[19-20]</sup>;而数据中心液冷系统的微通道翅片换热器通过精准控温保障服务器高效运转<sup>[21]</sup>。据统计,全球换热器市场规模在2023年已突破176亿美元,其中,化工和暖通空调领域合计占比超过60%,在工业与民生中具有重要地位。在换热器的广泛应用中,翅片作为强化换热的有效元件,其作用至关重要。通过扩展换热面积,翅片可显著增加流体与换热器之间的接触面积,从而提升

气-液或气-气之间的对流换热效率,加速热量的传递,尤其在气体这类低导热系数介质中表现突出。

统计了2015—2024年中国已授权的换热器相关专利数据,部分换热器授权专利内容如表1所示。近年来,中国换热器专利技术在换热器结构、翅片结构和翅片材料优化3个方向呈现系统性创新升级。在换热器结构领域,创新向着系统集成方向突破,此类专利近3年增长达40%。微通道技术、多介质换热和极端工况的适配成为关键突破口,并且更加关注整体的防霜能力及运行稳定性。翅片结构设计呈现多元化创新,相关技术研究从早期简单的翅片结构发展为融合流体力学原理的复杂翅片结构,如2021年一授权专利采用特殊的扭曲翅片结构,起到

类涡流发生器的作用。防堵塞设计成为近5年重点,2020—2022年密集出现的缺口优化、变间距翅片和错位排列等技术,有效解决了结霜导致的性能衰减问题。2023年一授权专利在翅片槽孔的周向设置孔缝,提高应用该翅片的换热组件的排水性能。翅片材料领域则更多围绕钎焊后强度提升、耐腐蚀性增强和制造工艺革新。2022年一授权专利通过铸轧工艺实现复合翅片宽度方向复合率均匀化,2024年一授权专利提出在翅片沿长度方向间隔设置有多个扁管槽口解决换热翅片之间的定位支撑问题。同时,绿色环保理念也推动废料循环利用和长效亲/疏水涂层的技术进步,使得材料创新与新兴应用场景共同发展。

表1 部分换热器授权专利内容总结(2015—2024年)

Tab.1 Summary of authorized patents for some heat exchangers (2015—2024)

序号	专利名称	授权年份	专利号	专利主要内容及创新点
1	一种层叠一体式内外翅片换热管及其制造方法 <sup>[22]</sup>	2015	CN201310573311.2	发明的换热管由多个外翅片单元和内翅片单元层叠黏结组成,同时具备外翅片管和内翅片管的优势,强化了蒸汽冷凝与对流换热性能
2	一种泡沫金属翅片的空调换热器 <sup>[23]</sup>	2016	CN201410026694.6	发明的泡沫金属翅片的空调换热器,在空气对流时可以有效利用气流的三维复杂流动,增加气流流动的扰动和紊流,提高传热系数
3	一种换热翅片、换热器及空调 <sup>[24]</sup>	2017	CN201410829511.4	在基片上设有多个通过过渡平面连接的阶梯平台,气流经过时,过渡平面不断破坏气流的边界层,降低气流热阻,提高了翅片的换热效率
4	一种翅片及含有其的换热器和空调 <sup>[25]</sup>	2018	CN201510427702.2	迎风侧设置为光滑翅片形状,且配合微通道扁管,可提高蒸发温度,降低结霜速度;背风侧设置增强换热的百叶窗,增强换热器换热效果
5	一种热泵用室外换热器及其控制方法 <sup>[26]</sup>	2019	CN201711018650.9	基于气液分离技术,利用电子膨胀阀进行气相制冷剂流量调节,提高换热器传热系数,降低制冷剂侧流动阻力损失,提升热泵系统的能效水平
6	一种换热器 <sup>[27]</sup>	2020	CN201510830642.9	发明的换热器在翅片中设置至少一个缺口,减小流动路径较长部分的翅片结构面积,从而改变流动路径的流动阻力
7	一种翅片端部扭曲的开槽翅片换热管 <sup>[28]</sup>	2021	CN201911203789.X	发明了一种翅片端部扭曲的开槽翅片换热管,采用特殊的扭曲翅片结构,起到类涡流发生器的作用,增强流体的扰动与近壁面流体混合
8	一种钎焊用复合翅片材料及其制造方法 <sup>[29]</sup>	2022	CN202010258198.9	发明了一种钎焊用复合翅片材料,采用铸轧工艺,宽度方向复合率均匀、成材率高、可以避免金属间脆性化合物的形成
9	翅片、换热组件、微通道换热器及暖通设备 <sup>[30]</sup>	2023	CN202310649947.4	在翅片槽孔的周向设置孔缝,冷凝水或化霜水可经由孔缝导出并通过槽孔一侧的排水结构及时排出,有利于提高应用该翅片的换热组件的排水性能
10	换热翅片、微通道换热器和热泵系统 <sup>[31]</sup>	2024	CN201811090818.1	翅片沿长度方向间隔设置有多个扁管槽口,扁管槽口两侧设有支撑结构,解决了换热翅片之间的定位支撑问题

翅片作为一种广泛应用于换热设备中的结构元件,其性能评估是一个多维度的过程,需要综合考虑材料性能、换热流动性能和排水性能等多个方面。翅片材料的选取直接影响热量从热源传递到流体介质的速度。翅片在工作过程中可能接触到各种腐蚀

性介质,具有良好耐腐蚀性能的翅片材料能够有效抵抗腐蚀,延长翅片管换热器的使用寿命。而合理的翅片布局和形状设计可以引导流体在管道内形成有序的流动状态,降低流体流动的阻力,减少能量损失。低温空气源热泵室外换热器翅片相较于常规换

热器翅片,其运行工况更为复杂,需同时应对干工况和湿工况的双重挑战。湿工况条件下,湿空气在换热器表面冷凝结霜,从而阻碍热量的传递,降低热交换效率,也会导致翅片材料的腐蚀和磨损。

### 1.1 翅片材料性能分析指标与评估方法

翅片材料对其换热性能的影响是一个多因素综合作用的过程,需结合热物理性质、环境适应性、加工工艺及经济性等多因素进行综合考量。翅片材料性能分析指标通常包括导热性、抗腐蚀性、机械强度等。热导率作为核心参数直接影响热量在翅片内部的传递速率,铝和铜等高热导率的材料能够快速将热量从基体传递至翅片表面,减少内部温度梯度,从而提升整体换热能力。而像不锈钢或钛合金这类热导率较低的材料,尽管在高温或腐蚀性环境中表现优异,却可能因内部热阻较大导致表面温度分布不均,换热效率大幅降低。翅片导热性的评估方法包括通过试验对换热性能进行测定和通过数值模拟进行分析。王清富等<sup>[32]</sup>通过试验研究的方法分析了相同热管与翅片类型的情况下,不同翅片材料对换热器换热性能的影响,结果表明,在雷诺数为 1 000 ~ 3 500 时,铜翅片空气侧的传热系数比铝翅片高 2%~6%,同时对翅片表面的压降无明显影响。王焯等<sup>[33]</sup>选取了镍钢、碳钢、8% Mg 铝合金、13% Si 铝合金、铝和铜 6 种材料的翅片,对不同翅片相应的换热器空气侧换热能力进行了数值模拟分析。结果显示,导热系数小的翅片表面温度不均匀性更加明显,空气通道内水平面上低温区长度更长,对换热板芯平均传热系数的影响更大。林创辉等<sup>[34]</sup>则对不锈

钢翅片与铝翅片进行了对比试验研究,不锈钢翅片的传热系数约为铝翅片的 25%,相同风速或水流速的情况下,不锈钢翅片的阻力均大于铝翅片。

在热泵型空调等换热设备低温高湿的应用环境中,翅片表面容易出现冷凝、结霜的现象,会对翅片的表面造成一定的腐蚀。因此,在湿工况条件下,翅片材料需具备一定的耐腐蚀性,以抵抗介质侵蚀,延长使用寿命。常见的防腐材料包括涂层铝、不锈钢等。盐雾试验则是评估翅片抗腐蚀性的常用方法,通过模拟高湿度、高盐分环境加速腐蚀过程,从而快速评估材料的耐腐蚀性能<sup>[35]</sup>。经阳极氧化处理的涂层铝翅片在盐雾环境中寿命可延长 30% 以上<sup>[36]</sup>。翅片的机械强度则决定了其在使用过程中的稳定性与耐久性。翅片在长期使用过程中会受到温度、压力、风速等因素的影响,需要具备足够的强度来承受机械应力。拉伸试验和显微硬度测试用于评估翅片的抗拉强度与表面硬度。研究表明,铝合金翅片的屈服强度需达到 120 MPa 以上以满足长期机械稳定性要求<sup>[37]</sup>。此外,翅片需具备一定的抗疲劳能力,以确保其在长期运行中的稳定性。干工况下,翅片主要承受流体的压力和机械应力,材料的抗疲劳性能主要体现在其能够承受反复的机械应力而不发生断裂或变形。湿工况下,翅片表面的凝结水膜会加剧翅片疲劳失效的风险。同时,翅片表面的凝结水会与空气中的灰尘结合形成积灰,从而增加空气侧的阻力。表 2 从导热系数、密度、耐腐蚀性、机械强度和成本 5 个方面对目前常见的翅片材料进行了总结与对比。

表 2 常见翅片材料性能参数对比

Tab. 2 Comparison of performance parameters of common fin materials

序号	材料	导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	耐腐蚀性	机械强度/MPa	成本
1	铝	160~237	2 700	中	70~400(合金类型差异大)	低
2	铜	380~401	8 960	中	200~350(退火态)	高
3	不锈钢	15~30	7 900~8 000	高	500~700(316L 冷轧态)	中
4	镍合金	15~22	4 500	极优	800~1 000(Ti-6Al-4V)	极高
5	钛合金	10~15	8 400~8 500	极优	800~1 200(固溶强化态)	极高
6	复合材料	50~400	1 800~3 000	高(取决基体)	500~800(碳纤维增强铝基)	中-高

### 1.2 翅片换热流动性能分析指标与评估方法

翅片的换热效率和压降是描述翅片性能的重要参数,但随着换热效率的增加往往伴随着压降的损失。因此,换热器的高效设计需要在换热效率和压降之间折衷选择。1972 年,Webb 和 Eckert<sup>[38]</sup>为了比较在相同管径条件下,换热器中使用粗糙圆管与使用光滑圆管的性能优势,提出了以换热量、功耗和体积 3 个变量来评价换热性能,对某一指标比较时,其他两个指标保持不变,通过方程推导可获得比较

指标的目标函数。1974 年,Bergles 等<sup>[39]</sup>提出了一种通过使用  $S_f$  数和阻力因子来评价强化管性能的方法。1981 年,Webb<sup>[40]</sup>在 Bergles 之前工作的基础上建立了针对管内单相流体对流换热的性能评价方法,分别对应减少换热器材料、增加换热量、减少对数温差和减小功耗 4 种不同目的的设计情况,并得到了广泛的应用<sup>[41]</sup>。在此之后,基于换热因子  $j$  和阻力因子  $f$  的性能指标得到了学者们的普遍认同。

翅片的主要作用是增加换热面积,其换热性能

直接影响换热器的效率。主要的换热性能分析指标包括换热效率和温度分布等。换热效率是指翅片对流体的热交换能力,其计算通常基于热流量与温差的比值。翅片的形状、材料、表面粗糙度等都会影响换热效率。换热效率的提高通常需要增加翅片的表面积或优化流体的流动路径。翅片的流动性能直接影响流体流动的稳定性、流动阻力及换热效果。流动性能分析指标主要包括压降、流速分布和湍流特性等。压降过大可能导致能量浪费,降低系统的整体效率。压降的大小通常通过阻力因子  $f$  和局部损失系数来计算。翅片的形状、间距、表面粗糙度等都对流动阻力有显著影响。层流和湍流等流动形态可通过雷诺数确定,湍流的产生有助于改善换热性能,可增强流体与翅片表面之间的混合,减少热边界层的形成,有助于提高热传递效率。换热因子  $j$  反映了翅片换热能力的大小,阻力因子  $f$  反映了翅片流动能力的大小,其表达式如下:

$$j = \frac{Nu}{RePr^{1/3}} \quad (1)$$

$$f = \frac{2\Delta PD_e}{\rho v^2 L} \quad (2)$$

式中:  $Nu$  为努塞尔准则数,  $Re$  为雷诺数,  $Pr$  为普朗特准则数,  $\Delta P$  为压降,  $D_e$  为当量直径,  $\rho$  为流体的密度,  $v$  为流体流速,  $L$  为特征长度。

利用换热因子  $j$  和阻力因子  $f$  来综合评价换热器的对流换热性能有 3 种常用表现形式,分别对应于等流量、等压降和等泵功条件下的对流换热评价指标。在换热强化技术评估体系的发展历程中,评价标准经历了多阶段演化。初期研究基于换热量与传热系数的正相关性,直接采用  $h/h_0$  作为核心指

标。在后续研究中发现,换热性能的提升往往伴随着流动阻力的显著增加,有学者提出综合考量换热与流动特性的新指标  $(j/j_0)/(f/f_0)$ 。基于工程应用需求,研究者结合压降与速度平方的关联特性,构建了等压降评价准则  $(j/j_0)/(f/f_0)^{1/2}$ ,该指标实现了在相同流动阻力条件下对比换热性能,当数值大于 1 时即表明具有更优的热传递效率。此外,针对部分强化技术通过引入速度 3 次方与泵功的对应关系,进一步建立了等泵功评价模型  $(j/j_0)/(f/f_0)^{1/3}$ 。该指标实现了在相同泵功条件下对比换热性能,当数值大于 1 时即表明强化表面具有更优的热传递效率。

对于一些常规结构换热器的对流传热系数可通过已有的准则关联式进行计算,如 Dittus-Boelter 公式、Colburn 修正公式等。只需测得流体的温度、流速及相关的热物性参数即可获得对流传热系数。但对于新型结构的换热器无已知的公式可用于计算,同时,对于某些特殊工质的热物性数据不易获取,部分换热器的壁温不易获得,从而导致对流传热系数无法进行计算。如图 2 所示,风洞试验可用来测量换热器的流动换热性能<sup>[42]</sup>,在试验中需要测量的外部参数主要包括散热器内外冷、热流体侧的温度、进出口压力和介质流量等。测试时首先要控制进入散热器管内流体的温度保持稳定,读取温度、压力传感器的数据。当散热器各进出口的介质流量、温度、压力全部达到稳定状态后通过计算机采集试验数据,计算得到散热器的换热总量、空气侧压降、流体侧压降<sup>[43]</sup>。此外,可通过布置热电偶阵列测量翅片表面温度分布,结合热流计计算局部传热系数。还有研究采用红外热成像技术实现非接触式全场温度监测<sup>[44]</sup>,误差可控制在  $\pm 5\%$  以内。

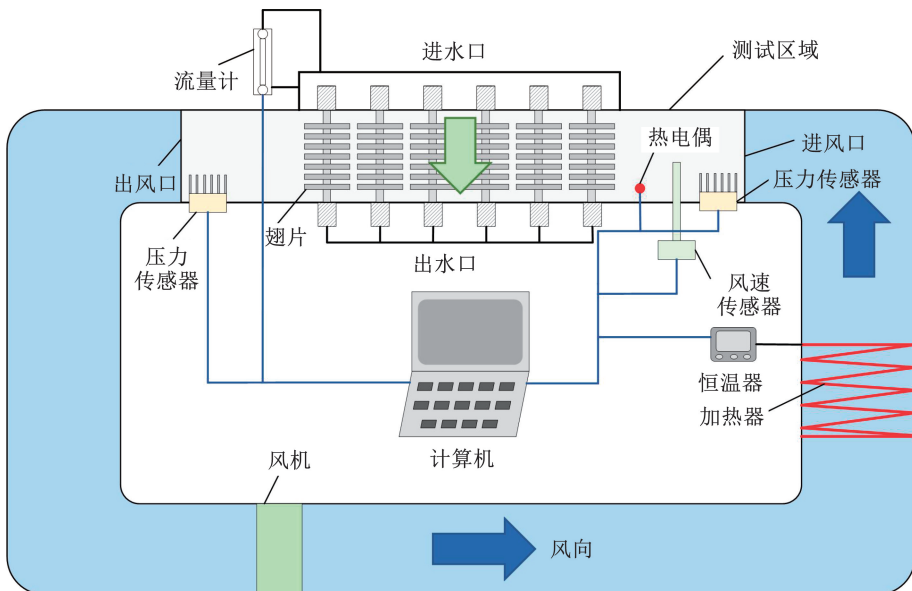


图 2 换热器换热流动性能风洞试验测试原理

Fig. 2 Schematic diagram of wind tunnel experimental testing of heat transfer flow performance of heat exchanger

翅片的设计应能最大化换热面积,提高换热效率,翅片与流体之间的热阻应尽可能小,以确保热量能够顺畅传递。翅片应能促进温度的均匀分布,避免局部过热或过冷现象。同时,应考虑流体通过时的阻力,减小流体压力损失,提高系统效率。合理的流道布局能优化流体流动路径,减少湍流和涡流,提高流动性能<sup>[45]</sup>。翅片表面应易于清洁,避免污垢积累影响流动性能和换热效率。流速分布描述了流体在翅片间隙中的速度变化情况。理想情况下,流速

应均匀分布,以提高换热效率。翅片间距过小或设计不当可能导致局部流速过高,形成热点区域,影响热交换效果<sup>[46]</sup>。流速分布的评估可以通过流体动力学模型或试验测试来实现。流动均匀性指的是流体在翅片表面流动的稳定性和均匀性。流体的不均匀流动可能导致部分区域的流速过低,从而降低热交换效率。换热器翅片换热流动综合性能评价指标如表 3 所示。

表 3 换热器翅片换热流动综合性能评价指标

Tab. 3 Comprehensive performance evaluation index for heat transfer flow of heat exchanger fins

序号	指标形式	指标内容	适用条件
1	换热量、功耗、体积	通过方程推导 3 个变量的关系式	两个指标不变,对单一指标比较
2	$St$ 与 $f$	减少换热器材料,增加换热量,减少对数温差和减少功耗	管内单相流体对流换热
3	$j/f$	换热/流动	等流体流量
4	$j/f^{1/2}$	换热/压降	等流体压降
5	$j/f^{1/3}$	换热/泵功	等泵功率

### 1.3 翅片排水性能分析指标与评估方法

湿工况下翅片的排水性能是另一个至关重要的评估指标。翅片排水性能分析指标主要包括冷凝水的排放效率、水滴滑落特性及翅片表面的水膜效应,其中,冷凝水的排放效率是衡量翅片在湿工况下排水能力的主要指标<sup>[47]</sup>。对于冷凝水排放性能的评估,目前现有的方法包括风洞试验、倾角测试法和动态浸渍法。风洞试验是在风洞中模拟换热器实际运行条件,测量其在湿工况下的冷凝水保留量、压降和换热性能<sup>[48]</sup>;倾角测试则通过改变换热翅片器的倾斜角度,研究冷凝水在不同倾角下的排水行为<sup>[49]</sup>。如图 3 所示,动态浸渍法则是通过将换热器浸入水中并实时测量其重量变化,来研究冷凝水的排水速率。相较而言,动态浸渍法能够快速评估不同几何结构和表面处理的排水性能,成本低、试验时间短,且可重复性高。Zhong 等<sup>[50]</sup>开发了两种经典的动态浸渍法,一种方法是基于移动水箱设计,水箱通过液压千斤顶进行升降,使换热器浸入水中并平稳降低水位;另一种装置则是基于水位置换设计,通过使用压缩空气控制水箱中的水位升降来实现翅片的浸渍。动态浸渍法虽然能够实现翅片排水性能的快速评估,但它也存在一定的局限性:一方面,动态浸渍法在静态气体条件下进行,无法完全模拟实际运行中的空气流动、温度变化等复杂工况;另一方面,对于具有特殊浸润性的翅片,动态浸渍法的结果可能与实际工况不一致。除此以外,试验结果对浸渍速度非常敏感,操作不当可能导致误差。

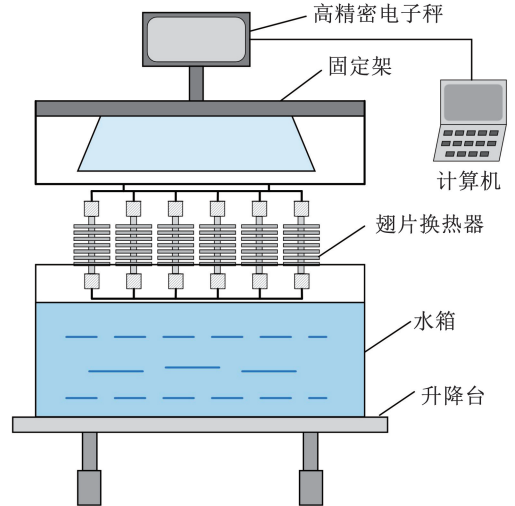


图 3 动态浸渍法测试翅片排水性能原理示意

Fig. 3 Schematic diagram of dynamic immersion method for testing drainage performance of fins

水滴滑落特性是指液滴在翅片表面因重力、表面张力及气流作用而发生的动态行为,其核心特征包括液滴的铺展、滑落速度、滞留时间及对传热效率的影响。翅片的表面结构与涂层对水滴的附着力和滑落速度具有重要影响,通过表面疏水处理或设计特定的表面微结构<sup>[51]</sup>,可以提高水滴的滑落效率,避免水滴积聚对翅片换热效果的负面影响<sup>[52]</sup>。水膜效应是指冷凝水在翅片表面形成的薄水膜,当水膜过厚时会显著增加热阻,降低换热效率<sup>[53]</sup>。评估水膜效应的关键在于判断水膜的厚度以及水膜是否容易脱落。翅片表面的疏水涂层或微结构设计可以减少水膜的形成<sup>[54]</sup>,从而降低热阻。采用 VOF 模

型可模拟冷凝水流动路径<sup>[55]</sup>, 研究两相流在各种质量通量换热器中的流动均匀性、压降和换热效率, 能够更好地帮助优化翅片表面的疏水性能和微结构设计。此外, 良好的排水系统设计可以有效地引导冷凝水行走, 避免水分积聚。通过设计合理的排水孔、导水槽等<sup>[56]</sup>, 可以大大提高冷凝水的排出效率, 避免水滴滞留或积水。

#### 1.4 翅片综合性能多目标优化方法研究

数值模拟和试验验证是评估翅片性能的重要方法<sup>[57]</sup>。数值模拟可在设计阶段提前预测翅片的传热、流体流动和排水性能等, 而试验验证则能够为数值模拟结果提供数据支持。计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 模拟是评估翅片热流和流动性能的常用工具<sup>[58-59]</sup>。在试验验证方面, 翅片的热性能可以通过测量热流量、温度差、热交换效率等参数进行评估; 流动性能则通过测量流体的压力损失、流速、雷诺数等进行分析<sup>[60-61]</sup>。为了确保翅片设计的可靠性和准确性, 数值模拟和试验验证往往结合使用。通过将试验数据与数值模拟结果对比, 可以对数值模型进行校正, 提高模拟结果的准确度, 从而为翅片优化提供更为精准的指导<sup>[62]</sup>。

多目标优化是针对翅片设计过程中涉及到的多个互相矛盾的目标进行权衡的过程, 如提高换热效率通常会增加流动阻力, 而降低流动阻力可能会降低换热效果。为了实现最佳的翅片设计, 如图 4 所

示, 常使用正交试验<sup>[63]</sup>、遗传算法<sup>[64]</sup>、非支配排序遗传算法<sup>[65]</sup>、粒子群优化算法<sup>[66]</sup>、生命周期评估<sup>[67]</sup>等多目标优化方法, 综合考虑热性能、流动性能、排水性能和材料成本等多重目标。正交试验法作为多变量研究的有效工具, 利用正交表规划试验流程, 最终通过数据分析获得翅片结构的最优参数配置。段少斌等<sup>[68]</sup>设计了正交试验方案并引入了综合评价因子, 翅片结构参数对换热器综合性能影响程度依次为翅片间距、翅片高度和翅片厚度。遗传算法通过模拟生物进化机制优化翅片结构参数, 该方法以换热因子  $j$ 、阻力因子  $f$  及综合性能指标为目标, 结合 CFD 仿真或代理模型评估适应度, 实现热力性能与经济性的多目标平衡。遗传算法亦可用于翅片几何参数全局优化<sup>[69]</sup>, 研究表明, 波纹加导流槽复合翅片的综合性能较传统设计提升 23%。杨辉等著<sup>[70]</sup>采用遗传算法的研究结果表明, 翅片高度和间距的增大会显著提升换热器的综合性能指标, 而翅片节距和厚度的增加则会导致该性能指标下降。非支配排序遗传算法是对遗传算法进行改进的一种多目标优化方法, 通过引入非支配排序机制和拥挤度距离计算, 能够有效筛选优质个体进行遗传迭代, 在提升收敛效率的同时, 维持种群多样性特征, 从而更可靠地逼近全局最优解。Sai 等<sup>[71]</sup>使用非支配排序遗传算法与粒子群优化算法相结合的方法对管壳式换热器进行优化设计, 结果表明, 该混合方法与自适应随机遗传算法相比总成本降低。

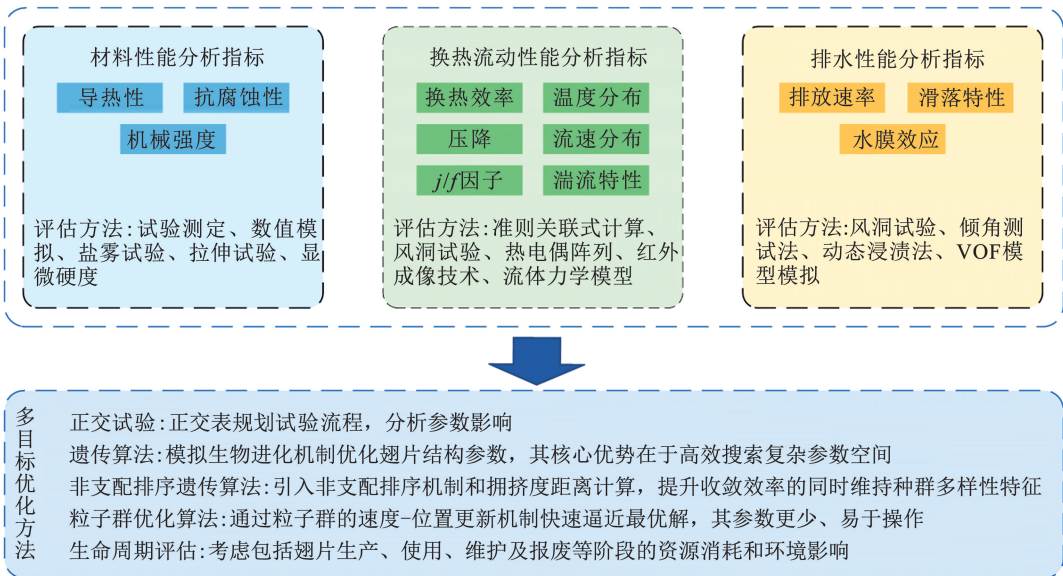


图 4 换热器翅片性能分析指标与评估方法汇总

Fig. 4 Summary of performance analysis indicators and evaluation methods for heat exchanger fins

与遗传算法相比, 粒子群优化算法参数更少、易于操作, 收敛速度也较快。Dastmalchi 等<sup>[72]</sup>使用粒

子群优化算法确定了双管换热器中微翅片管热效率最大化的最佳微翅片几何形状, 发现最佳微翅片管

的高度随着雷诺数的增加而增加。Patel 等<sup>[73]</sup>使用粒子群优化算法从经济角度对管壳式换热器进行优化设计,与采用遗传算法相比总成本降低了约 4.1%。生命周期评估是一种从全生命周期角度评估翅片环境影响的综合方法<sup>[74]</sup>。生命周期评估不仅考虑翅片在使用过程中的热性能、流动性能等,还包括翅片的生产、使用、维护及报废等阶段的资源消耗和环境影响<sup>[75]</sup>。翅片生产阶段的评估涉及材料的提取、制造过程中的能耗、废料排放等因素,通过优化翅片的制造工艺,减少材料的浪费和能量的消耗,可以降低生产过程中的环境影响。在翅片的使用阶段,评估翅片在不同工况下的能效表现,以及系统整体的能源消耗;在翅片的报废和回收阶段,需要考虑其材料的可回收性以及处理过程中的能源消耗和污染排放<sup>[76]</sup>。

## 2 干工况换热器翅片结构性能优化研究

对于空气源热泵系统而言,室外换热器的翅片在干工况下的换热特性对其能效与运行稳定性具有重要影响。干工况下,翅片表面无冷凝水生成,热量传递完全依赖显热交换,其换热过程涉及导热、对流与流动阻力的复杂耦合作用。干工况翅片的换热本质为强制对流换热,空气流经翅片表面,通过强制对流将热量传递给制冷剂,使其从低温低压的液态成分吸收热量成为低温低压的气态成分。在此过程中,翅片不仅通过扩展换热面积来增加热交换的接触面,还通过其特定的形状对空气流动产生扰动,有效破坏流动边界层和热边界层,从而显著增强换热效果。翅片的换热特性受到空气流速、翅片结构以及材料特性等因素的影响。空气流速的增加可以提高对流传热系数,但过高的流速也会带来额外的流动阻力。翅片的形状、尺寸和间距等结构参数对换热性能具有较大的影响,如高度较大的翅片虽能扩展换热面积,但若未同步调整空气通道宽度,反而可能因流速下降导致对流换热效率衰减。在翅片材料方面,材料的导热性能直接影响温度场均匀性。当翅片根部与端部的温差较大时,导热热阻会显著削弱整体换热效率,这一现象在低导热率材料或大尺寸翅片中尤为突出。

目前,对于干工况翅片优化研究依托于试验研究、数值模拟或两者相结合的方法开展,主要关注不同类型的翅片在干工况下的换热性能、流动特性和空气侧压降等性质。在干工况下,为强化室外换热器空气侧换热,研究人员对翅片的形状结构进行了大量研究与改进。在翅片换热器的强化换热设计

中,两种基础性物理机制被广泛用于各类翅片扩展表面的优化策略:一是利用特殊通道几何形态如波浪通道,重构流动路径以诱导湍流的形成及混合;二是通过周期性破坏边界层发展来重置热阻分布,如偏置条带翅片、百叶窗翅片的应用。对于空气源热泵室外换热器,工程中常用的翅片类型包括平直翅片、波纹翅片、百叶窗翅片与开孔翅片等。

### 2.1 平直型换热器翅片

平直翅片是最早发明出的翅片形式,因其结构简单、易于加工,至今仍是使用率最高的片型。平直翅片的形状为简单的矩形薄片,排列均匀,生产成本较低。尽管与特殊配置的翅片表面相比,平直翅片的换热性能较低,但其仍在需要低压降特性的场合广泛使用。在过去的几十年中,学者们致力于研究换热器的换热和流动阻力特性。但由于试验的不确定性和试件几何结构的差异等因素,部分研究人员<sup>[77-78]</sup>认为对于平直翅片,翅片间距和翅片厚度对换热和流动阻力的影响不显著,甚至可以忽略不计;而另外的研究人员<sup>[79-80]</sup>发现,翅片间距和翅片厚度会显著影响换热器的换热和流动阻力性能,翅片间距与对流传热系数、流动阻力呈负相关,翅片厚度与对流传热系数也呈负相关。基于对结论的差异性分析,主流观点则认为换热因子与翅片间距相互独立,阻力因子则与翅片间距呈负相关。

目前,有许多学者利用数值仿真模拟对平直翅片进行研究,得到了相关的理论模型。朱必佳等<sup>[81]</sup>采用计算流体力学的方法对平直型翅片换热器进行建模和模拟计算,通过对模拟的正交试验结果进行极差和方差分析,得出翅片厚度、翅片间距和管横向间距对换热器换热性能影响的最佳参数组合。在结构设计方面,Khudhur 等<sup>[82]</sup>对平直翅片的结构做了加减式的创新,如图 5 所示,其提出的新型平直翅片包括两类,一类是在平直翅片上外加几何阵列结构,另一类是在平直翅片减去几何阵列结构,采用的几何阵列结构包括半圆柱型、三棱柱型和长方体型。试验以及模拟结果得到有加减式结构的翅片相较于传统平直翅片,换热性能都有显著的提升,其中,外加半圆柱阵列结构的翅片换热性能表现最佳,传热系数和努塞尔数分别提升了 38% 和 21%。但由于翅片结构会引起流动混合与惯性阻力,加减式翅片均会引起压降的升高。如图 5(c) 所示,丛晓春等<sup>[83]</sup>基于模拟提出了由翅片间距与特征长度比值组成的无量纲参数对努塞尔数  $Nu$  与阻力因子的计算关联式。平直翅片制造工艺简单,成本低,但散热效果相对较差,适用于对换热效率要求不高的场合。

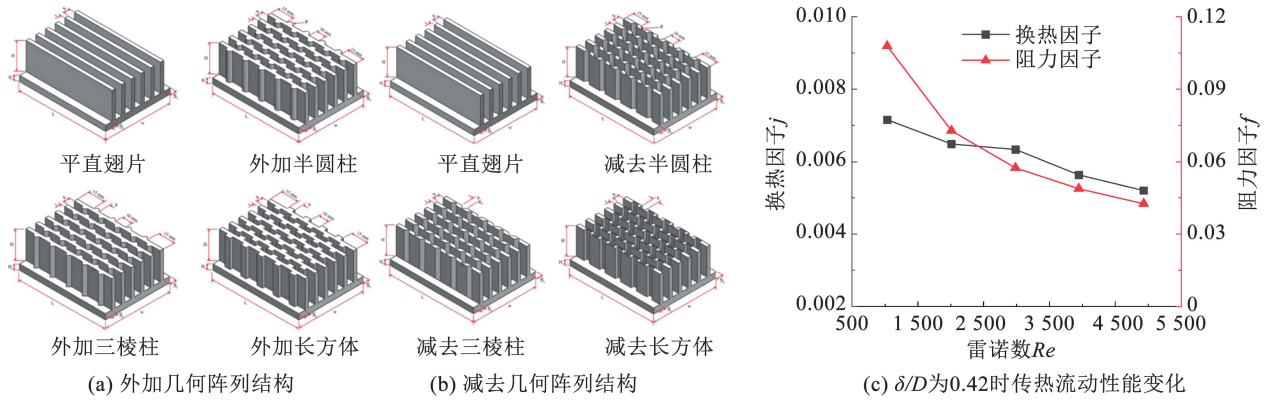


图5 平直型换热器翅片创新结构示意图<sup>[82]</sup>及性能效果

Fig. 5 Schematic diagram of innovative structure of flat heat exchanger fins<sup>[82]</sup> and performance effects

### 2.2 波纹型换热器翅片

波纹翅片是最常见的强化换热翅片形式之一,通过将平直翅片加工成特定波形结构,在相同的体积下有效增加换热器的紧凑性并延长气流路径,形成周期性弯曲流道并促进气流混合以增强换热效果<sup>[84]</sup>。其工作原理在于迫使流体产生方向变化,通过扰动流动实现湍流强化,同时削弱热边界层的稳定性。波纹参数对性能影响显著,当波形空间密度提高或波峰高度增大时,流体扰动程度加剧,由此产生的边界层分离效应可使换热效率得到阶梯式提升。尽管波纹翅片的对流换热系数较平直翅片有显著提升,但其波形通道与波峰几何特征会加剧流动阻力。Ali等<sup>[85]</sup>通过试验发现,在雷诺数大于1500的情况下,波纹翅片的换热性能在提高140%~240%的同时,阻力因子也会提高130%~280%。

学者们主要从试验和数值模拟两个方面对波纹翅片的翅片厚度、翅片间距、波纹倾角等几何结构的改变对换热性能产生的影响进行研究。戴艳俊等<sup>[86]</sup>利用数值模拟分析了波纹通道高度、波峰高度、通道宽度对波纹翅片流动与换热的影响,结果表明,通道高度越小、波纹波峰高度越大时,换热越强,压降越高;通道宽度增大换热几乎不变,但压降随之

降低。Tao等<sup>[87]</sup>通过三维数值模拟研究了波纹翅片管换热器的层流换热与流动特性,结合场协同原理分析了雷诺数、翅片间距、波状角度和管排数的影响。研究发现,雷诺数的增加会导致努塞尔数的增加和阻力系数的下降。波浪角的增加、翅片间距和管排数的减小,使得翅片的换热增强,但压降有所降低。同时,翅片间距会影响努塞尔系数,并且存在最优的翅片间距。Zhang等<sup>[88]</sup>提出一种如图6(b)所示的驼峰型波纹翅片,该新型翅片针对三角波纹翅片谷底和吸力侧局部传热系数低的问题,在相对应部位引入驼峰结构,从而消除回流、减小分离区、促进湍流过渡,提升整体换热性能。结果表明,驼峰型波纹翅片性能显著优于传统三角波纹翅片,并且在驼峰半径为0.5 mm时,波纹翅片的综合换热效果最佳,提升了11.7%。Gholami等<sup>[89]</sup>设计了一种波纹形状与流动方向垂直的波纹翅片,并且采用了单段波纹与三段波纹相组合的结构,如图6(c)和图6(d)所示。与平直翅片圆管换热器相比,该新型翅片的尾流区显著缩小,温度场均匀性明显提高,如图6(e)所示,压降减少19%,平均努塞尔数可以提高20%。波纹翅片增大了表面积和流体湍流,换热效率显著提升,但工艺复杂,成本较高。

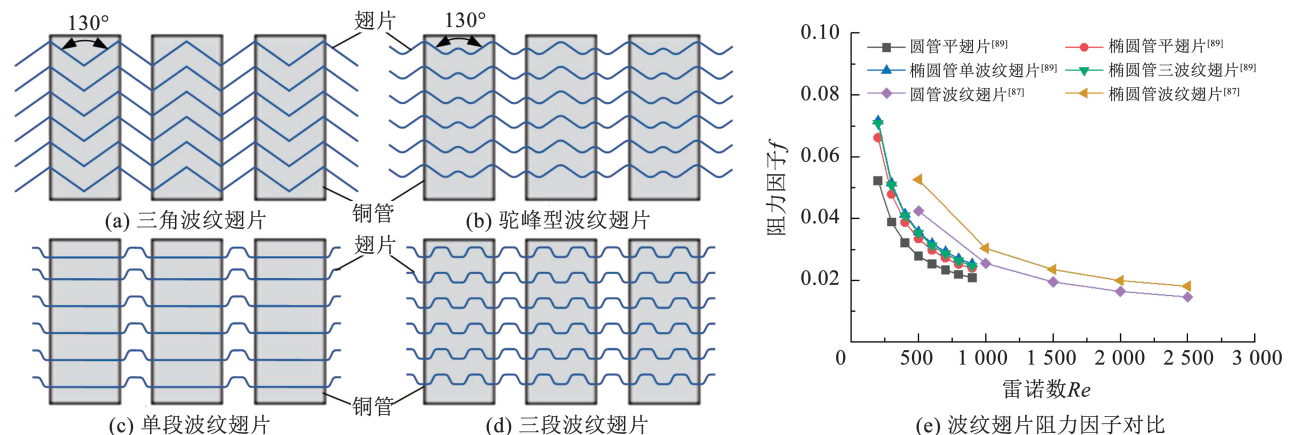


图6 波纹型换热器翅片创新结构示意图及性能效果

Fig. 6 Schematic diagram of innovative structure of wavy heat exchanger fins and performance effects

### 2.3 百叶窗型换热器翅片

百叶窗翅片属于间断式翅片,其原理是将翅片表面沿气流方向逐渐断开,以阻止翅片表面空气层流边界层的发展,使边界层在各表面不断被破坏,又在下一个冲条形成新的边界层,不断利用冲条的前缘效应,实现强化换热的目的。Carija 等<sup>[90]</sup>利用数值仿真方法分别研究了雷诺数为 70 ~ 350 时,平直翅片与百叶窗翅片性能随空气入口速度与翅片间距的变化,并充分证实了百叶窗翅片在换热性能中的优越性。Davenport<sup>[91]</sup>通过可视化试验研究了百叶窗翅片内空气的换热与流动,发现百叶窗式板翅阵列内存在两种类型的流动结构:在低雷诺数时,空气轴向流过阵列基本会绕过百叶窗,是一种管导向流的特殊流动结构;在高雷诺数时,气流几乎全部通过百叶窗,沿百叶窗倾斜方向流动。

对于百叶窗翅片的结构优化研究,主要集中在分析翅片间距、百叶窗开窗角度、百叶窗间距、翅片深度、翅片高度及翅片厚度等参数对空气侧流动换热与流阻性能的影响,并且通过换热因子和阻力因子等参数对翅片参数进行评价<sup>[92]</sup>。Aoki 等<sup>[93]</sup>对不同结构百叶窗翅片的换热性能进行了试验研究,结果表明,在低空气流速下,换热效率随着翅片间距的增加而降低,并且百叶窗角度为 28° ~ 30° 时,换热效率有最大值。Kim 等<sup>[94-95]</sup>通过试验分析了百叶

窗翅片主要结构参数对其换热与流动性能的影响规律,并通过整理 45 种不同结构参数百叶窗翅片的试验数据,获得了空气侧换热因子和阻力因子的计算关联式。王珂等<sup>[96]</sup>基于百叶窗翅片二维模型进行了不同雷诺数下翅片倾角对翅片性能的影响趋势分析,并在 18° ~ 30° 对比得出了实现翅片综合换热性能最优的翅片倾角值。王迎慧等<sup>[97]</sup>以百叶窗翅片的翅窗间距比为参数变量,在比较翅片间距对比翅片性能作用效果的同时,着重对比了同耗材热力性能评价因子与同体积热力性能评价因子对翅片综合性能的评价效果,并提出权衡二者关系的系数,以便根据实际性能需求选择合适的翅窗间距比。Park 等<sup>[98]</sup>提出了一种如图 7(a) 所示能在百叶窗中心产生涡流的翅片结构,通过试验与三维数值模拟分析了其作用机制,并与传统百叶窗翅片换热器进行了对比。结果表明,该结构能在百叶窗尾部产生大小涡旋,延长空气流动路径,增强湍流混合,在干工况下新型翅片的换热性能提升了 12%,且整体温度分布更均匀。朱茂桃等<sup>[99]</sup>基于百叶窗翅片的轻量化设计分析提出了一种具有变厚度尖锥形结构的翅片,如图 7(b) 所示,通过对中截面厚度和翅片间距的调整,优化后的百叶窗翅片质量减少了约 15.5%。百叶窗翅片增强了流体扰动和均匀分布,散热性能较好,但百叶窗结构可能积灰,需定期进行维护。

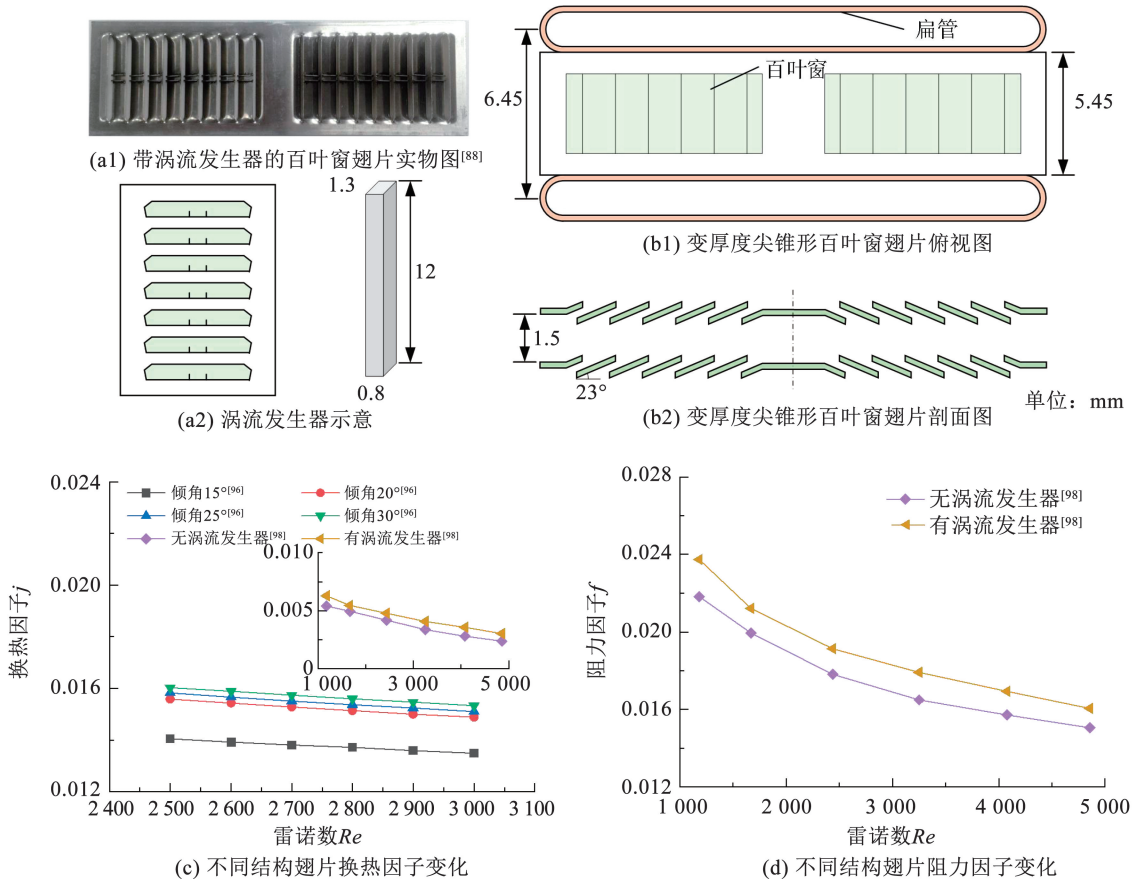


图 7 百叶窗型换热器翅片创新结构示意及性能效果

Fig. 7 Schematic diagram of innovative structure of louver heat exchanger fins and performance effects

### 2.4 开孔型换热器翅片

开孔翅片是在平直翅片上冲压出许多如圆形、椭圆形、三角形等孔洞, 这些孔洞能够不断流通空气, 引起二次流频繁破坏热边界层和流动边界层的发展, 以较小的阻力增加代价获得翅片管换热性能较大幅度的提高。但孔的存在同样也会减少翅片的换热面积并降低翅片强度, 在高流速状况下翅片会因为孔的存在产生噪声和振动。党艳辉等<sup>[100]</sup>通过数值模拟分析了开孔翅片表面的传热系数与分布规律, 研究了开孔数量、开孔尺寸、开孔位置对翅片空气侧换热和流动性能的影响。结果表明, 开孔数量的增加会导致翅片表面传热系数和流动阻力的增加, 在一定范围内也会引起换热量的增加; 开孔尺寸的增大会导致表面传热系数和流动阻力均增大, 但总换热量减少; 开孔位置对表面传热系数和流动阻力的影响不大。Shahdad 等<sup>[101]</sup>通过数值模拟研究

了雷诺数 20 000 ~ 50 000 开孔翅片周围的流场和湍流换热, 与平直翅片相比, 开孔翅片能够增加传热系数和努塞尔数, 如图 8(a) 所示, 具有两个方形孔的开孔翅片的传热系数和努塞尔数最高, 与平直翅片相比增加了 84%。同时发现, 开孔翅片能够降低翅片表面的压降和阻力。Li 等<sup>[102]</sup>则提出了一种基于周期性变截面结构的新型三角形开孔翅片, 如图 8(b) 所示, 该结构结合开孔的交错排列实现换热与压降的平衡。如图 8(d) 所示, 增加开孔率及孔的交错空间为单元尺寸的一半时有利于换热的改善。陈鹏飞等<sup>[103]</sup>在圆形翅片表面添加了不同尺寸和数量的扰流孔, 如图 8(c) 所示, 在一定范围内, 随着孔数的增加换热量不断增加, 扰流孔位置与换热量无关。开孔翅片提高了流体通过率, 减少了流动压降, 兼具导流和防积灰功能, 但开孔可能降低翅片结构强度。

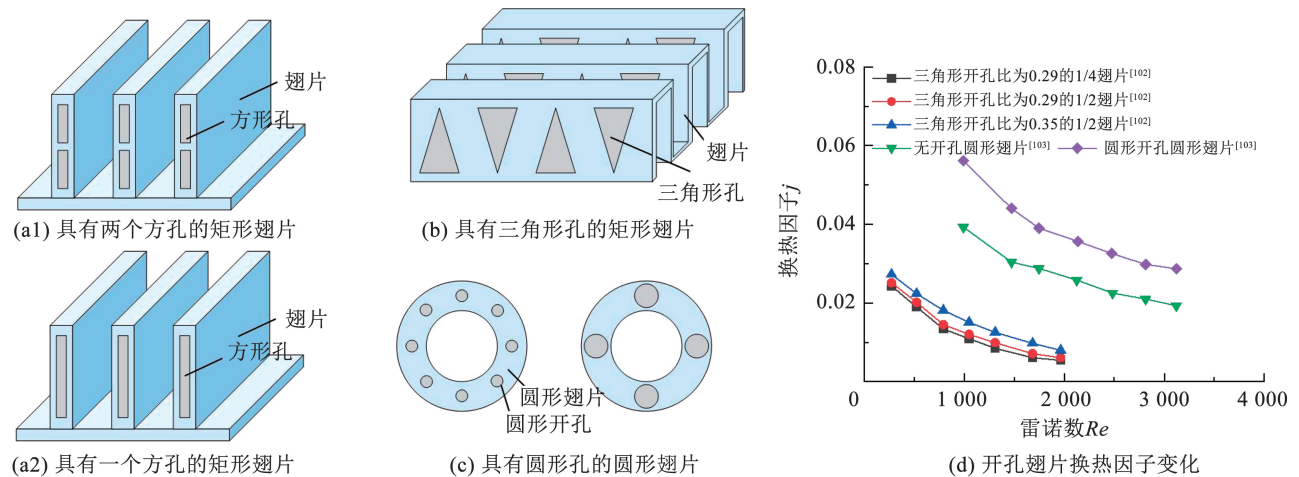


图 8 开孔型换热器翅片创新结构示意图及性能效果

Fig. 8 Schematic diagram of innovative structure of perforated heat exchanger fins and performance effects

基于干工况下换热器翅片结构的优化研究如图 9 所示, 系统梳理了平直型、波纹型、百叶窗型与开孔型换热器翅片的研究进展。研究发现, 传统平直翅片虽结构简单、成本较低, 但换热效率同样较低, 目前的新平直翅片传热系数能提高 30% 以上。波纹翅片通过弯曲流道诱导湍流, 换热性能较平直翅片提升 140% ~ 240%, 但同样也会带来 130% ~ 280% 的压降增长, 一些新型结构通过消除回流区使综合性能提升 10% 以上。百叶窗翅片凭借间断式边界层破坏策略实现强化换热的目的, 新型百叶窗翅片结构较传统结构综合性能可提高 10% 以上。开孔型翅片通过孔洞扰动强化混合, 但

需平衡开孔率与强度损失, 梯度孔径设计在特定工况下可将换热效率提升 19%。当前干工况下的翅片结构优化研究呈现两大方向: 一是换热与流动阻力的协同调控, 如通过波纹倾角调整、百叶窗间距比优化实现  $j/f$  综合指标提升; 二是多方法融合创新, 如试验与 CFD 模拟结合、遗传算法全局参数寻优、翅片复合结构设计等。然而, 高换热设计普遍伴随压降激增等技术瓶颈依然存在, 轻量化需求与机械强度矛盾突出。未来需强化翅片研究的多目标优化构建, 并探索高导热复合材料对当前翅片性能提升的突破。

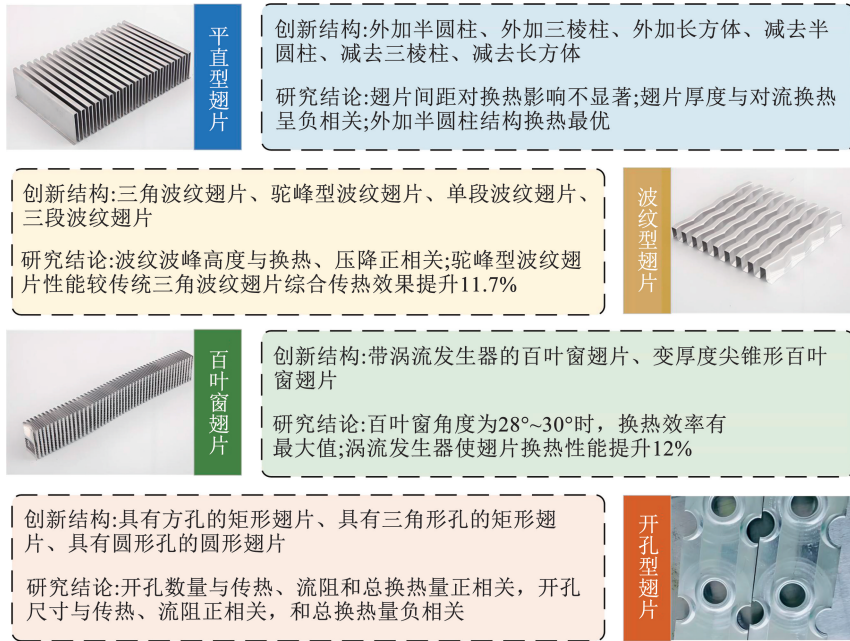


图 9 干工况下翅片结构优化研究进展汇总

Fig. 9 Summary of research progress on fin structure optimization under dry working conditions

### 3 湿工况换热器翅片优化研究

与常规换热器翅片相比,低温空气源热泵室外换热器翅片的运行工况更加复杂,不仅需要干工况下高效换热,还必须适应湿工况下的冷凝、结霜等特殊条件。湿空气被冷却至露点温度以下时水蒸气在翅片表面发生冷凝,液滴附着在翅片表面。管翅式换热器在湿工况下运行时如图 10 所示,持续凝结的湿空气使得液滴的体积和质量不断增大。当液滴长大到一定程度时,其所受的重力和气流曳力足以克服翅片表面的黏附力而促使液滴开始运动<sup>[104]</sup>。液滴所受重力和气流曳力的合力克服壁面黏附力从而驱使液滴运动,液滴所受气流曳力的大小与空气流速和液滴迎风面轮廓面积成正比。为了对抗重力和气流曳力,液滴在翅片表面的接触角会发生变化,从而产生一个与液滴运动方向相反的壁面黏附力,这个力的大小由接触角和液滴底面轮廓决定。当相邻液滴接触时会发生液滴合并现象,形成更大尺寸的液滴。最终达到临界尺寸的液滴会在重力或表面张力作用下发生液滴脱离。脱离后的表面区域将再次启动成核过程,从而形成持续循环的冷凝机制。翅片表面温度低于  $0^{\circ}\text{C}$  时,冷凝液滴会在翅片表面发生冻结,进而开始霜层的生长。

#### 3.1 换热器翅片结构参数优化

湿工况下,空气侧换热不仅包含显热交换,还涉及水蒸气凝结释放的潜热传递,导致换热过程需同时考虑质量与能量的耦合作用。此时,翅片表面可能形成水膜或水滴,使热量传递方式从纯导热转变

为导热、对流及辐射的复合形式。水膜覆盖翅片表面会减小空气与翅片的直接接触面积,并增加附加热阻,抑制显热传递效率。水膜还会改变流体边界层分布,增加空气流动阻力,进一步影响对流换热效果。湿空气中水蒸气的相变显著提升局部传热系数,但冷凝水的滞留可能阻碍后续换热。湿工况下需综合优化换热器翅片结构参数及表面特性,以平衡潜热增益与显热损失之间的矛盾。

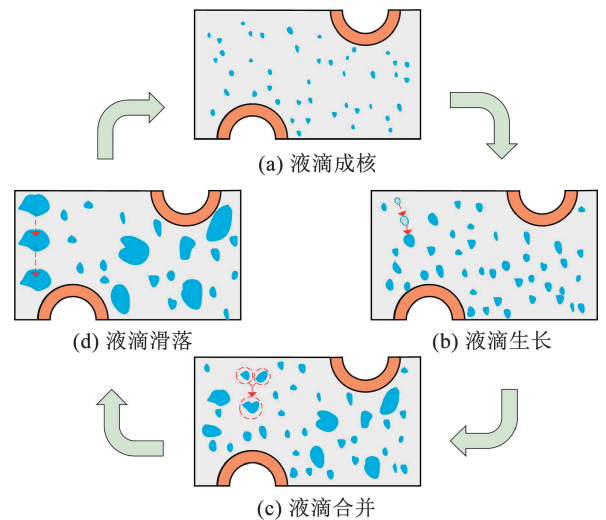


图 10 翅片表面液滴凝结生长过程示意

Fig. 10 Schematic diagram of droplet condensation and growth process on the surface of fins

##### 3.1.1 换热器翅片类型及安装方式优化

翅片高度增加可显著扩大散热面积,理论上提升热交换效率。但在湿工况下,翅片表面易形成水膜,导致实际有效接触面积减少,且热阻增加,削弱

了散热面积扩大带来的优势。过高翅片会加剧空气流动阻力,导致流速降低,进一步影响换热温差。湿工况下单纯增加翅片高度可能无法线性提升整体性能,需结合其他结构优化以改善水膜分布。翅片与潮湿空气的接触面积增加,会加速腐蚀进程,影响材料强度和耐久性。陈泽文等<sup>[105]</sup>采用热阻分离法获得管外冷凝传热系数,分析了翅片形式和高度对管外换热性能的影响。试验结果表明,随着翅片高度的增加,冷凝传热系数先上升后缓慢下降,翅片高度的增加导致液膜形成的附加压差减小,削弱了表面张力的增益效果。翅片高度的增加对提升冷凝换热能力有一个最佳值,在其研究中三维结构翅片管的最佳翅片高度为1.04 mm。翅片厚度减小可降低热阻,提升导热效率,但过薄的翅片会减少有效换热面积,尤其在湿工况下翅片表面形成的水膜会增加热阻,显著降低换热效率。薄翅片在湿工况下易受冷凝水冲击或腐蚀性介质侵蚀,可能导致翅片变形甚至断裂,影响长期稳定性。Sallar等<sup>[106]</sup>通过数值模拟探究了不同翅片厚度对翅片性能的影响,研究结果显示,除翅片厚度为0.75 mm和1 mm外,翅片的基底温度随着翅片的厚度增加而减小,所有翅片厚度下努塞尔数随着翅片厚度的增加而增加。

翅片类型是影响翅片排水性能的关键因素之一,在翅片换热性能升高的同时可能会带来排水性能的降低。Park等<sup>[107]</sup>通过试验研究了平直翅片和百叶窗式翅片换热器的结霜现象和换热性能。研究表明,平直翅片上的霜层形成是均匀的,而百叶窗翅片上的结霜是不均匀的。一旦百叶窗式翅片正面开窗结构被霜层完全堵塞,翅片背面就不再进行有效工作,导致换热效率急剧下降。石珂玮等<sup>[108]</sup>通过试验对比波纹片与百叶窗型竖插翅片微通道换热器发现,百叶窗型翅片由于开窗结构增强了空气扰动,其传热系数较波纹片高约20%,但空气侧压降也增加了50%以上。然而,在排水性能方面,百叶窗片因开窗区域易形成水桥,残留水量为142.7 g,显著高于波纹片的114.7 g,且排水时间延长了近一倍。这一差异主要源于波纹片的连续导流槽结构更利于液态水的快速排出。Xu等<sup>[109]</sup>研究了百叶窗翅片、波浪形翅片和具有排水设计的波浪形翅片3种类型的微通道换热器在结霜条件下的性能,研究表明,在5次结霜除霜循环中波浪形翅片性能随着时间的推移而恶化,波浪形翅片和具有排水设计的波浪形翅片分别比百叶窗形翅片性能提升25.8%和56.7%。张睿等<sup>[15]</sup>通过仿真模拟对比

7种翅片结构发现,平直翅片虽排水性能最佳,但其换热效率较低。而如椭圆大折角波纹与排水槽结合等复合翅片在保持较高换热效率的同时,排水性能较平直翅片提升5.23%,通过结构创新可实现排水与换热的协同优化。Wu等<sup>[110]</sup>通过试验研究发现与波纹翅片相比,平直翅片换热器可显著延迟结霜,并可有效减少除霜次数。在结霜条件下,相对湿度为60%时,平直翅片换热器的平均综合性能评价因子比波纹翅片高9.7%,平直翅片换热器在结霜下的流动阻力和换热性能方面具有更大的优势。

翅片的间距、宽度和安装方式等自身结构参数则是影响排水性能的另一关键因素。过小的翅片间距会阻碍冷凝水的自然流动,导致水膜覆盖面积增大,降低换热效率并加剧腐蚀风险。湿工况下,翅片间过窄的通道易形成连续水膜,阻碍空气流动并加剧冷凝水滞留,从而影响换热器整体排水性能<sup>[111]</sup>。同时,较小的间距会增加空气流动阻力,导致风速降低,削弱了气流对冷凝水的携带能力,间接恶化排水效果。间距过小也易积累灰尘或杂质,进一步缩小有效水流通道的,加剧冷凝水滞留并形成热阻,长期可能引发局部腐蚀或堵塞。Yang等<sup>[112]</sup>通过试验证明较大的翅片间距可以在较高湿度下延迟结霜,翅片间距过小时液滴与附近的翅片液滴聚集形成水桥,从而增加了热阻。刘晓蕾等<sup>[113]</sup>通过动态浸渍法测试翅片管式换热器时发现,翅片间距增大可以显著减少残留水量。当翅片间距从1.4 mm增至1.8 mm时,残留水量减少32%。此外,翅片宽度从13.6 mm增至19.8 mm时可扩大排水通道,残留水量降低至5.63%。然而,翅片间距过大会减少换热面积,需在换热与排水间权衡选择。刘璐等<sup>[114]</sup>通过CFD模拟百叶窗翅片时发现,开缝角度为28°~60°时对残留水量影响较小,波动范围<10%,而开缝数量从5增至14时,残留水量增加31.89%。这是因为开缝数量增加导致水桥形成概率上升,阻碍了水的自由流动,这一结论为百叶窗翅片的参数设计提供了量化依据。试验研究表明,换热器安装角度同样会显著影响排水效率。刘晓蕾等<sup>[113]</sup>发现,当换热器倾斜45°~60°时,残留水量最少。该角度范围下,重力分力与表面张力达到最佳平衡,既避免了垂直安装时的液滴滞留,又减少了水平安装时的水流阻力。Wu等<sup>[115]</sup>通过试验研究了6种不同摆放位置翅片上的结霜生长,斜翅片比对齐翅片更容易形成霜,单位翅片面积的霜重按单斜翅片、单对齐翅片、单排对齐翅片、五列斜翅片和单列斜翅片的顺序递减。

换热器翅片作为强化换热与排水性能的核心组件,其结构参数与安装方式的优化对系统能效和运行稳定性具有显著影响。近年来,针对不同应用场景下的结霜抑制、冷凝水导排及换热强化需求,学者们通过试验与数值模拟系统探究了翅片高度、厚度、

类型、间距、开缝参数及安装角度等多维因素的影响机制。研究结果如表 4 所示,揭示了翅片结构-换热特性-排水性能之间的非线性关联,为新一代抗结霜高效换热器的设计提供了理论支撑。

表 4 换热器翅片类型及安装方式优化研究汇总

Tab. 4 Summary of research on optimization of fin types and installation methods for heat exchangers

序号	参数分类	研究结论	换热影响	排水/结霜影响	作者
1	翅片高度	冷凝传热系数随翅片高度增加呈先升后降趋势,最佳高度为 1.04 mm,过高翅片导致液膜附加压差减小,表面张力作用削弱	有效接触面积先增后减,过高导致热阻增加	翅片高度增加加速水膜覆盖,影响排水效率	陈泽文等 <sup>[105]</sup>
2	翅片厚度	翅片基底温度随厚度增加而降低,努塞尔数随厚度增加而增加,翅片厚度小于 0.75 mm 易受水膜热阻影响	薄翅片降低热阻但减少有效换热面积	过薄翅片易受冷凝水冲击变形,长期稳定性差	Sallar 等 <sup>[106]</sup>
3	翅片类型	平翅片结霜均匀,排水性能最佳,但换热效率较低;百叶窗翅片的传热系数较波纹片高 20%,但压降增加 50%,开窗结构易形成水桥;波纹片的排水性能优于百叶窗,导流槽促进排水	百叶窗翅片扰动增强换热,但压降高;波纹片综合性能较优	平翅片结霜均匀但换热差;百叶窗易堵塞;波纹片排水高效	Park 等 <sup>[107]</sup> 石珂玮等 <sup>[108]</sup> 张睿等 <sup>[15]</sup>
4	翅片间距	翅片间距从 1.4 mm 增至 1.8 mm,残留水量减少 32%;间距过小导致水桥形成,热阻增加了 43%	间距过小降低空气流速,削弱换热温差	间距大于 1.8 mm 可延迟结霜,减少水膜	Yang 等 <sup>[112]</sup> 刘晓蕾等 <sup>[113]</sup>
5	开缝参数	开缝角度为 28° ~ 60° 时残留水量波动小于 10%,开缝数量从 5 增至 14,残留水量增加 31.89%,形成水桥概率上升	开缝数量增加扰动强化换热	开缝过多阻碍水流,恶化排水	刘璐等 <sup>[114]</sup>
6	安装角度	倾斜 45° ~ 60° 时残留水量最少,此时重力与表面张力达到平衡;垂直安装易液滴滞留,水平安装水流阻力大	倾斜角度影响气流分布,间接优化换热温差	最佳角度下排水效率提升显著	刘晓蕾等 <sup>[113]</sup> Wu 等 <sup>[115]</sup>

### 3.1.2 换热器翅片表面结构优化

通过光刻和化学蚀刻工艺在翅片表面形成微纳级沟槽或褶皱,可增加比表面积和液膜铺展能力,从而提升冷凝或蒸发效率。槽道也可通过毛细力与表面张力协同作用,引导冷凝液滴沿特定路径流动,减少液膜覆盖面积,降低液膜热阻并加速排水。Yu 等<sup>[116]</sup>使用光刻技术在铝翅片表面制作了如图 11(a)所示的两种分别为  $(14.9 \pm 0.4) \mu\text{m}$  宽、 $(9.6 \pm 1.4) \mu\text{m}$  深的微槽和  $(49.8 \pm 1.0) \mu\text{m}$  宽、 $(16.0 \pm 2.0) \mu\text{m}$  深的微槽。利用风洞测试了原型换热器在干湿条件下空气侧的换热性能,如图 11(c)所示,发现湿工况下空气侧换热性能几乎无影响,压降降低 9% ~ 53%。Song 等<sup>[117]</sup>提出了一种用于圆形管翅式换热器的新型翅片结构,其中,椭圆形凹陷凸起充当涡流发生器。如图 11(b)所示,凹陷凸起充当底部翅片的凸起,同时充当通道顶部翅片上的凹陷,凹陷的垂直高度为 1.61 mm。数值

模拟研究结果表明,椭圆形凹陷凸起热性能优于涡流发生器,努塞尔数增加了 19.03%。Zhang 等<sup>[118]</sup>设计了人字形波纹型翅片和凸起式人字形波纹型翅片,凸起的高度为 0.6 mm。凸起的人字形波纹型翅片由于条带在管壁附近形成许多感应涡流,加强了流体对管壁的碰撞作用,减小了边界层的厚度,从而增加了换热性能。研究结果表明,平均传热系数提高 7.38%,压降提高了 8.95%。Sen 等<sup>[119]</sup>利用数值模拟技术探讨了 18 种穿孔凹陷/凸起翅片,研究了包括截取穿孔的凹陷/凸起高度、孔径、孔结构偏移量以及多孔凹陷/凸起结构的布置对换热性能的影响。研究结果表明在相同的条件下,多孔凹陷/凸起翅片的整体换热性能随高度的增加而升高,随着孔径的增加先增大后下降,随着偏移量的增加先下降后增大。当孔径为 3.4 mm 时,穿孔凸起/凹陷翅片获得最佳增强因子,与多孔翅片相比,新翅片的综合评价因子提高了 23.7%。

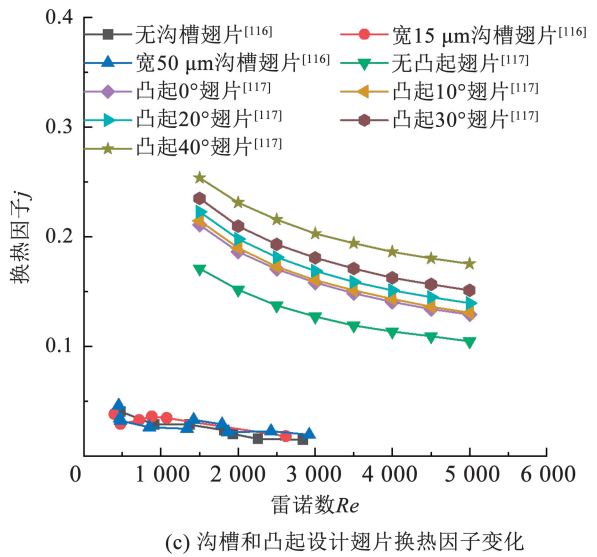
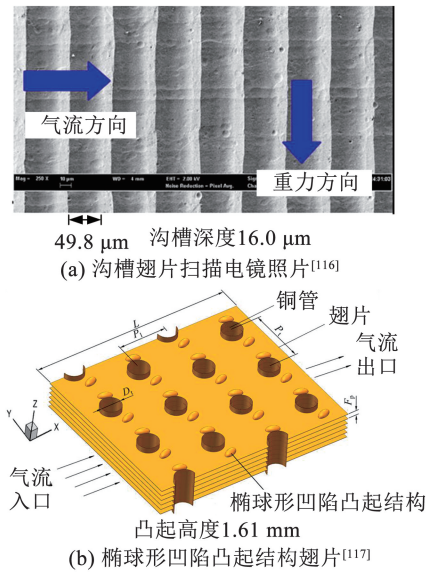


图 11 换热器翅片表面微纳沟槽和凸起结构设计及性能效果

Fig. 11 Design of micro-nano grooves and protrusions on the surface of heat exchanger fins and performance effects

在湿工况下翅片优化可借鉴仿生学原理,通过模仿自然界生物的结构与功能特性,提升排水效率、减少水膜滞留并强化换热性能。随着冷凝过程的进行,翅片表面上的液滴越来越大,相邻的液滴在接触时合并。随后当液滴生长超过阈值尺寸时在重力作用下脱落,离开的液滴在冷凝表面上留下了一个原始区域,冷凝液滴会在此重新成核生长。在以往的研究中,有学者模仿荷叶表面微纳米级乳突结构<sup>[120]</sup>,通过激光蚀刻或化学沉积技术构建疏水微槽道,此类结构可增大接触角,促使冷凝水快速聚并滚落,减少翅片表面水膜覆盖面积,降低热阻。借鉴鲨鱼皮肤表面的 V 形沟槽纹理<sup>[121]</sup>,设计非对称翅片表面沟槽,此类结构可引导流体定向流动,降低空

气流动阻力,同时增强湍流扰动以破坏热边界层。模仿蜂巢六边形多孔结构,设计高孔隙率翅片阵列<sup>[122]</sup>,多孔通道可增强冷凝水毛细吸附效应,加速排水,同时增加 3 次换热面积,提升显热与潜热交换效率。Ghosh 等<sup>[123]</sup>为了提高冷凝表面的性能,从香蕉叶叶脉排列的树液运输系统中汲取灵感,如图 12(a)所示,在铝板表面构造亲水通道。在较高湿度条件下,楔形超亲水轨道用于无泵带走冷凝水,采用仿生浸润性模式设计,铝板排水性能与裸铝相比提升了 19%。刘景成等<sup>[124]</sup>结合鲨鱼鳃型结构,提出一种鲨鱼鳃型强化换热翅片,如图 12(b)所示,该结构增加流体在流道内的扰动程度,促进不同流道内流体穿梭流动,强化换热器换热效果。

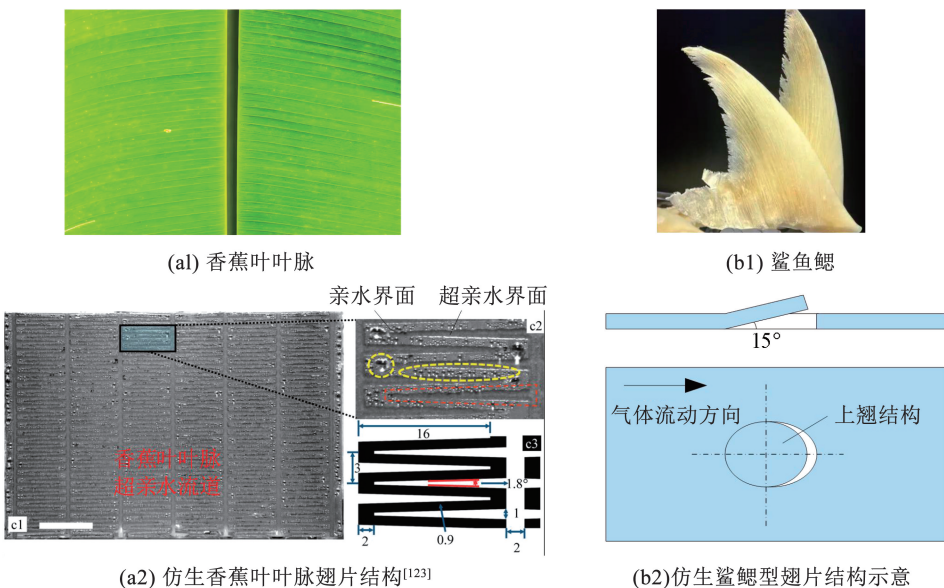


图 12 仿生换热器翅片结构设计

Fig. 12 Design of fin structure for biomimetic heat exchanger

换热器翅片表面微纳结构与仿生设计的创新优化是提升湿工况下换热与排水协同性能的关键路径。近年来,通过先进制造工艺如光刻、化学蚀刻、激光微加工等与仿生学原理的深度融合,学者们突破了传统翅片结构的性能瓶颈。一方面,微纳级沟

槽通过毛细效应定向调控液膜流动,实现压降降低达 53% 的同时维持换热效率稳定;另一方面,凹陷/凸起、人字形波纹等宏尺度结构创新,通过诱导涡流、减薄边界层使传热系数提升。表 5 系统归纳了表面结构参数优化与仿生启发的协同策略。

表 5 换热器翅片表面结构优化研究汇总

Tab. 5 Summary of research on surface structure optimization of heat exchanger fins

序号	优化类型	结构参数/方法	性能影响	作者
1	微纳级沟槽	使用光刻技术在铝翅片表面制作了分别为 $(14.9 \pm 0.4) \mu\text{m}$ 宽、 $(9.6 \pm 1.4) \mu\text{m}$ 深的微槽和 $(49.8 \pm 1.0) \mu\text{m}$ 宽、 $16.0 \pm 2.0 \mu\text{m}$ 深的微槽	湿工况下换热性能稳定,压降降低 9% ~ 53%; 毛细力引导定向排水,减少液膜热阻	Yu 等 <sup>[116]</sup>
2	椭球形凹陷凸起	凹陷垂直高度 1.61 mm,代替涡流发生器结构	努塞尔数增加 19.03%,热性能优于传统涡流发生器	Song 等 <sup>[117]</sup>
3	人字形凸起波纹	凸条高度 0.6 mm,诱导管壁附近涡流	平均传热系数提高 7.38%,压增 8.95%;边界层减薄强化换热	Zhang 等 <sup>[118]</sup>
4	穿孔凹陷/凸起翅片	利用数值模拟技术探讨了 18 种穿孔凹陷/凸起翅片,研究了包括截取穿孔的凹陷/凸起高度、孔径、孔结构偏移量以及多孔凹陷/凸起结构的布置对换热性能的影响	综合评价因子提升 23.7%;换热性能随高度增加而升高,孔径/偏移量存在最优区间	Sen 等 <sup>[119]</sup>
5	超亲水楔形轨道	仿照香蕉叶叶脉排列的树液运输系统脉排列,在翅片表面构造亲水通道	无泵排水效率提升 19%,高湿度下冷凝水自驱排水效率优化	Ghosh 等 <sup>[123]</sup>
6	鲨鳃型翅片	流道内扰动结构设计,促进穿梭流动	湍流强度提高 30%,局部传热系数峰值提升 18%	刘景成等 <sup>[124]</sup>

### 3.2 换热器翅片表面特性优化

表面处理与外部改进方法可以促进翅片滞留水的排出。液滴在固体表面的接触角是评价表面浸润性的依据。接触角  $\theta$  是液滴在固体表面达到热力学平衡状态时,气液界面与固液界面所夹的角度<sup>[125]</sup>。 $\theta < 90^\circ$  的固体表面称为亲水表面; $90^\circ < \theta < 150^\circ$  的固体表面称为疏水表面; $\theta > 150^\circ$  的固体表面称为超疏水表面。在冷凝阶段,随着翅片表面液滴接触角的增大,冷凝液滴粒径不断减小,液滴开始凝固的时间越晚;在霜层生长阶段,浸润性差的铝表面霜晶相对矮小且疏松,枝晶分布不均匀。随着接触角的增大,霜层高度减小,超疏水性表面霜高比亲水性表面减少了 45%<sup>[126]</sup>。徐象国等<sup>[127]</sup>指出亲水涂层可促进冷凝水形成连续水膜,减少液滴滞留,但长期使用后易因污染物附着失效;而疏水涂层虽能延缓结霜,但可能加剧液滴聚集成桥。苏伟等<sup>[128]</sup>进一步研究发现,单纯的疏水表面在霜层生长的第一个阶段生长速度明显低于亲水表面和超亲水表面。Jhee 等<sup>[129]</sup>通过试验研究发现表面处理加速了霜层积累而非延缓,对换热器的热性能影响有限。在亲水换热器上冷凝水在结霜初期以水膜形式分布在表面,导致霜层在较大面积上生长,霜密度较高促进了热量从电加热器传导到霜层,并在除霜过程中吸收了相对较少的融化水,从而提高排水率。而在疏水换

热器上,初期形成的水滴分布密度较小,霜密度较低,而由于疏水换热器的表面特性,即使霜层未完全饱和也能轻松排水。由于排水率的增加,亲水和疏水换热器的除霜效率分别比裸铝换热器提高了 3.5% 和 10.8%。

结合亲水表面和疏水表面的优点,许多学者也对亲水和疏水的混合表面进行了相关研究。有效的混合表面通常通过表面调整高浸润性和低浸润性特性,使液滴更容易移动,通过液滴运动、分布和控制液滴的最大半径来增强热传递。Hu 等<sup>[130]</sup>提出了一种新型亲疏水混合表面翅片管换热器,翅片表面亲水区和疏水区的宽度设置为 2 mm,亲水面积的凹槽深度为 0.04 mm,如图 13(a)所示,与亲水翅片换热器相比传热传质性能显著提高了 34.3%,阻力因子降低了 20.3%。Yang 等<sup>[131]</sup>提出了一种星形混合翅片,如图 13(b)所示,星形图案处为亲水处理的铜板,其余区域处理为疏水表面。通过试验研究发现,由于星形内部楔形设计的梯度变化,冷凝水在星形内部的流动性得到改善,液滴可以合并成更大的液滴,最终从表面脱落,换热性能比亲水换热性能高 3.7% ~ 11.4%。Chatterjee 等<sup>[132]</sup>设计的混合表面亲水区域为铜板上直径为 1.5 mm 的圆形,如图 13(c)所示,占总面积的 25%。亲水区域将冷凝液滴从疏水区域吸引,与完全疏水表面相比,冷凝水

的运动速度变慢。Yang 等<sup>[133]</sup>设计的一种具有对齐 V 形亲水通道的混合表面,如图 13(d)所示,可将冷凝水引导至一些垂直的亲水通道,以进行冷凝水排

放,其余区域为疏水表面。该混合表面有利于冷凝水排放,如图 13(e)所示,传热系数比疏水表面高 3% ~ 9%,比亲水表面高 6% ~ 16%。

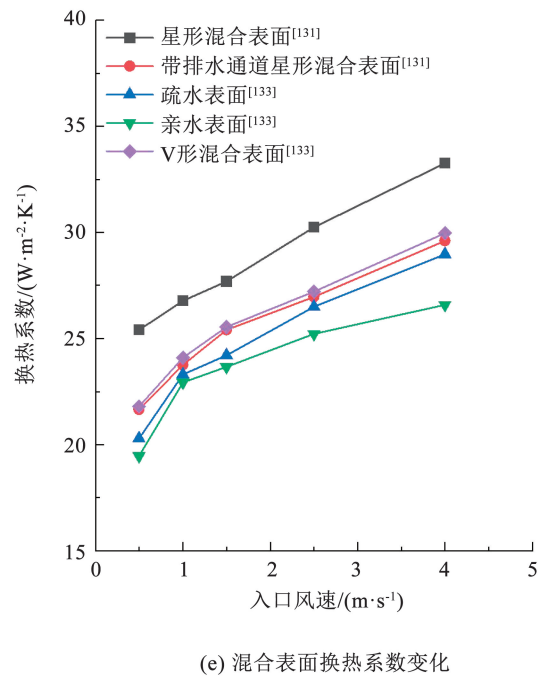
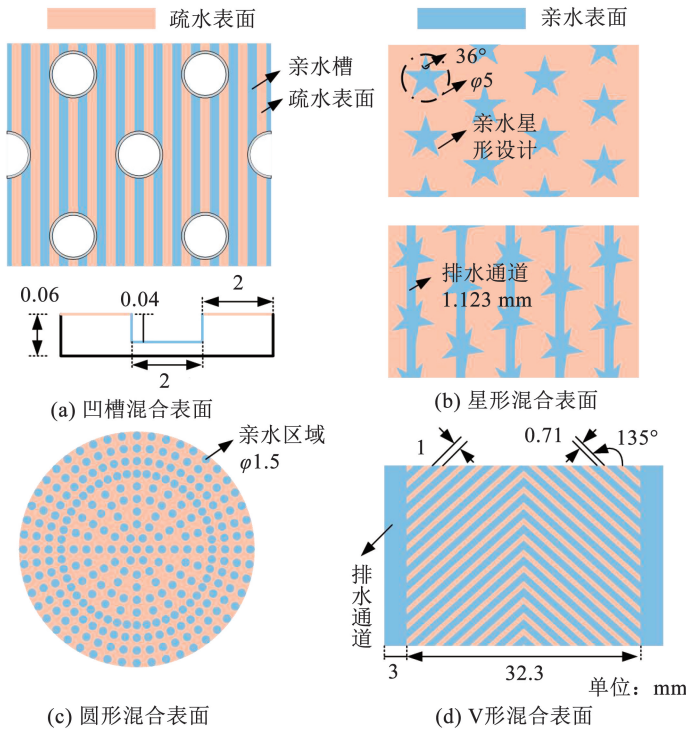


图 13 亲疏水混合翅片表面结构示意图及性能效果

Fig. 13 Schematic diagram of surface structure of hydrophilic hydrophobic mixed fins and performance effects

表面浸润性调控与分区设计是优化翅片排水性能、抑制结霜效应的核心策略。亲水与疏水表面处理通过改变液滴接触角动态影响冷凝液膜分布与霜层生长模式。亲水表面可形成连续水膜以提升初期换热效率,但易导致致密霜层堆积;疏水及超疏水表面虽能减少霜层高度达 45%,却面临液滴桥接与排水效率下降的风险。为此,近年来学者聚焦于亲疏水混合表面的协同设计,通过空间浸润性梯度分布

定向调控液滴迁移路径,结合毛细力与重力作用实现冷凝水高效自驱排放。研究表明,混合表面可突破单一-浸润性局限,使传热系数提升 3.7% ~ 34.3%,同时降低流动阻力与霜层密度。表 6 系统对比了不同表面处理技术的结构参数与性能表现,揭示了浸润性分区策略在平衡换热强化、压降控制及抗结霜能力中的关键作用,为复杂工况下换热器长效稳定运行提供理论依据。

表 6 换热器翅片表面特性优化研究汇总

Tab. 6 Summary of research on optimization of surface characteristics of heat exchanger fins

序号	优化类型	结构参数/方法	性能影响	作者
1	亲水表面	亲水涂层覆盖表面,接触角 $\theta < 90^\circ$	促进连续水膜形成,减少液滴滞留;长期使用后易因污染物附着失效,除霜效率提高了 3.5%	徐象国等 <sup>[127]</sup> Jhee 等 <sup>[129]</sup>
2	疏水表面	接触角 $90^\circ < \theta < 150^\circ$ ,超疏水表面 $\theta > 150^\circ$	延缓结霜,液滴聚集成桥风险增加;单纯疏水处理使排水性能恶化 14.9%	苏伟等 <sup>[128]</sup> Jhee 等 <sup>[129]</sup>
3	凹槽混合表面	翅片表面的亲水区和疏水区的宽度设置为 2 mm,亲水面积的凹槽高度为 0.04 mm	与亲水翅片换热器相比传热传质性能显著提高了 34.3%,阻力因子降低了 20.3%	Hu 等 <sup>[130]</sup>
4	星形混合表面	星形图案处为亲水处理的铜板,其余区域处理为疏水表面	冷凝水在星形内部的流动性得到改善,液滴可以合并成更大的液滴从表面脱落,换热性能比亲水换热性能高 3.7% ~ 11.4%	Yang 等 <sup>[131]</sup>
5	圆形混合表面	亲水区域为铜板上直径 1.5 mm 的圆形,占总面积的 25%	亲水区域将冷凝液滴从疏水区域吸引,与完全疏水表面相比,冷凝水的运动速度变慢	Chatterjee 等 <sup>[132]</sup>
6	V 形混合表面	具有对齐的 V 形亲水通道,其余区域为疏水表面	可将冷凝水引导至一些垂直的亲水通道,传热系数比疏水表面提高 3% ~ 9%,比亲水表面提高 6% ~ 16%	Yang 等 <sup>[133]</sup>

湿工况条件下,现有研究多通过试验和数值模拟的手段来研究换热器翅片的冷凝、结霜和排水性能。对于换热器翅片的优化研究,则主要集中在结构参数优化和表面特性优化方面。如图 14 所示,目前常用的结构参数优化包括换热器翅片类型及安装方式优化和换热器翅片表面结构优化。翅片高度增加可扩大散热面积,但湿工况下翅片表面形成的水膜会覆盖部分有效接触面积,降低空气与翅片的直接热交换效率。翅片类型中,百叶窗型翅片由于其

开窗结构增强了空气扰动,但开窗区域易形成水桥。平直翅片虽排水性能最佳,但其换热效率较低。湿工况下,翅片间过窄的通道易形成连续水膜,阻碍空气流动并加剧冷凝水滞留,从而影响整体排水性能。在翅片表面微纳级沟槽可通过毛细效应定向调控液膜流动,实现压降降低的同时维持换热效率稳定;凹陷/凸起、人字形波纹等宏尺度结构创新,通过诱导涡流、减薄边界层提升传热系数。

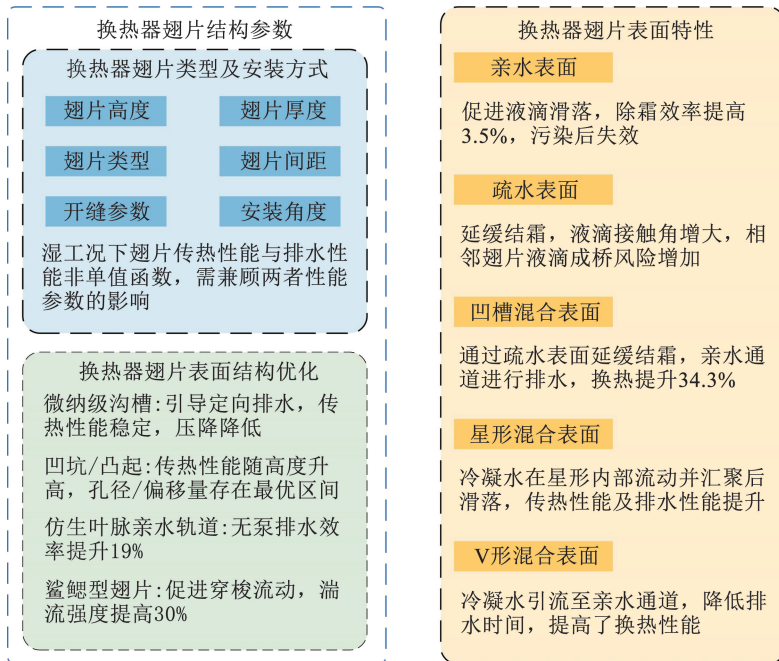


图 14 湿工况下翅片结构优化研究进展汇总

Fig. 14 Summary of research progress on fin structure optimization under wet working conditions

在翅片表面特性优化方面,亲水涂层可促进冷凝水形成连续水膜,减少液滴滞留。疏水涂层虽能延缓结霜,但可能加剧液滴聚集成桥,单纯的疏水处理会恶化换热器排水性能。同时,疏水表面在高湿度工况下仍面临液滴冻结引发的霜层快速生长问题。结合亲水表面和疏水表面的优点,许多学者根据翅片表面的冷凝结霜特性设计了许多亲疏水的混合表面,可有效提高翅片的换热效率及排水率。在对翅片表面结构设计时还可通过模仿自然界生物的结构与功能特性,提升排水效率、降低水膜滞留并强化换热性能。在现有研究中,换热器的表面结构优化的研究较少,对单翅片的优化设计主要为在表面设计微纳级沟槽进行引流、增加凸起结构增强换热流动性能以及改变局部浸润性。现有文献中设计的沟槽最小深度为 $(9.6 \pm 1.4) \mu\text{m}$ ,可在不降低换热性能的同时降低压降。学者们对翅片的凸起设计研究中采用的凸起高度为 $0.6 \sim 1.61 \text{ mm}$ ,翅片表面凸起可起到涡流发生器的作用,在局部产生涡流,增强

翅片的换热性能。

## 4 结 论

1) 空气源热泵室外换热器翅片性能可从材料性能、换热流动性能和排水性能三方面进行综合评价。在设计过程中常使用正交试验、遗传算法、非支配排序遗传算法、粒子群优化算法和生命周期评估等多目标优化方法对多个互相矛盾的目标进行权衡。在干工况领域,研究聚焦于翅片结构参数与流场扰动的协同优化,通过波纹、百叶窗等强化换热结构破坏边界层,提升换热效率。数值模拟与试验验证的结合推动了翅片间距、开窗角度等参数的优化设计,实现了散热面积与流动阻力的平衡。湿工况领域现有研究重点为结构与表面特性优化设计。通过翅片的结构设计降低水膜覆盖风险,采用亲疏水混合表面破解冷凝水滞留与霜层生长的矛盾。

2) 对于普通翅片诱导式成核的冷凝结霜研究发展潜力较大,既有研究尚未建立表面微结构参数

与成核点的定量关系。在翅片表面设置微纳沟槽进行排水引流,可在不降低换热性能的同时降低压降。翅片的凸起及凹槽设计可起到涡流发生器的作用增强翅片的换热性能,加强流体与管壁的碰撞过程,减小边界层厚度。为综合翅片亲疏水表面在湿工况条件下的优势,新型亲疏水混合表面翅片换热器表面通过疏水区域延缓结霜,在排水时引流至亲水通道,与传统亲水翅片换热器相比传热传质性能显著提高,阻力因子降低。既有研究多是在基于自然对流的稳态工况下进行试验,在强迫对流下的翅片表面优化特性仍需进一步探索。

3)当前空气源热泵室外换热器翅片优化研究仍面临多尺度耦合机制不明与动态调控技术缺失两大核心挑战。亲水涂层通过改变液滴形态提升排水能力,但凝结液动态行为与霜层生长的关联机制尚未明确;疏水表面虽能延缓结霜,但在高湿度工况下仍面临液滴冻结引发的霜层快速生长问题。该领域在未来的重点研究方向应关注开发融合微结构诱导冷凝结霜及排水、气流组织等优化调控的翅片,在机制层面深度融合微结构诱导排水、气液固三相相变换热与湍流扰动强化传质的关联规律,开发多尺度耦合模型。构建涵盖单翅片微观液滴冻结观测、平行翅片霜层生长观测与宏观换热器性能测试的多维度试验体系,推动仿生结构与机器学习算法的深度融合。

## 参考文献

- [1]任锦阳,韩舒伦,李欣田,等.面向光伏消纳的空气源热泵供暖水温需求响应方法研究[J].暖通空调,2025,55(7):113  
REN Jinyang, HAN Shulun, LI Xintian, et al. Research on demand response methods for heating water temperature of air-source heat pumps oriented towards PV utilization [J]. Journal of HV & AC, 2025, 55(7): 113. DOI: 10.19991/j. hvac1971. 2025. 07. 15
- [2]LI Shengyu, LU Jun, LI Wuyan, et al. Thermodynamic analyses of a novel ejector enhanced dual-temperature air source heat pump cycle with self-defrosting [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 215: 118944. DOI: 10.1016/j. apptthermaleng. 2022. 118944
- [3]邵奇奇,宋孟杰,张旋,等.冰中微尺度受陷气泡生长分布特性与宏观热力影响综述[J].哈尔滨工业大学学报,2024,56(6):152  
SHAO Keke, SONG Mengjie, ZHANG Xuan, et al. A review of micro-scale trapped air bubble growth distribution characteristics and thermal mechanical effects in ice [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(6): 152. DOI: 10.11918/202311080
- [4]郑帅,宁浩然,许国锋,等.严寒地区跨临界CO<sub>2</sub>空气源热泵系统性能研究[J].制冷,2025,44(3):29  
ZHENG Shuai, NING Haoran, XU Guofeng, et al. Study on performance of trans-critical CO<sub>2</sub> air source heat pump system in severe cold region [J]. Refrigeration, 2025, 44(3): 29. DOI: 10.19991/j. hvac1971. 2025. 07. 15
- [5]董安乐,唐亮亮,夏林锋,等.低环境温度空气源热泵(冷水)机组除霜方法综述[J].暖通空调,2025,55(增刊1):452  
DONG Anle, TANG Liangliang, XIA Linfeng, et al. Overview of
- defrosting methods for low ambient temperature air source heat pump (chiller) units [J]. Journal of HV & AC, 2025, 55(Sup. 1): 452
- [6]张川,陈金峰,王如竹.上海地区空气源热泵结合小温差换热风机盘管末端的供暖空调系统性能的实验研究[J].制冷技术,2014,34(1):1  
ZHANG Chuan, CHEN Jinfeng, WANG Ruzhu. Experimental investigation of the performance of heating and air-conditioning system with air source heat pump and low temperature difference fan coil indoor terminals in Shanghai [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2014, 34(1): 1. DOI: 10.3969/j. issn. 2095-4468. 2014. 01. 101
- [7]邵奇奇,宋孟杰,沈俊,等.极地低温环境结冰探测方法与防除破冰技术研究进展[J].哈尔滨工业大学学报,2025,57(2):1  
SHAO Keke, SONG Mengjie, SHEN Jun, et al. Research progress on icing prediction and detection methods, and anti/de-icing and ice-breaking technologies in polar low-temperature environments [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2025, 57(2): 1. DOI: 10.11918/202407059
- [8]ZHANG Long, JIANG Yiqiang, DONG Jiankai, et al. Advances in vapor compression air source heat pump system in cold regions: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81(1): 353. DOI: 10.1016/j. rser. 2017. 08. 009
- [9]牛建会,梁征,刘福生,等.空气源热泵多台室外机并联轮换除霜实验研究[J].制冷学报,2024,45(6):158  
NIU Jianhui, LIANG Zheng, LIU Fusheng, et al. Experimental study on air-source heat pump alternate defrosting with multiple outdoor units in parallel [J]. Journal of Refrigeration, 2024, 45(6): 158. DOI: 10.12465/j. issn. 0253-4339. 2024. 06. 158
- [10]CARROLL P, CHESSER M, LYONS P. Air source heat pumps field studies: a systematic literature review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 134: 110275. DOI: 10.1016/j. rser. 2020. 110275
- [11]KLINGEBIEL J, HASSAN M, VENZIK V, et al. Efficiency comparison between defrosting methods: a laboratory study on reverse-cycle defrosting, electric heating defrosting, and warm brine defrosting [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 233: 121072. DOI: 10.1016/j. apptthermaleng. 2023. 121072
- [12]雷尚文,宋孟杰,张龙,等.自然对流下重力对简单冷表面微观动态结霜特性影响的实验研究[J].家电科技,2022(5):71  
LEI Shangwen, SONG Mengjie, ZHANG Long, et al. An experimental study of gravity effect on the micro and dynamic frost characteristics on simple cold plate surfaces under natural convection [J]. Journal of Appliance Science & Technology, 2022(5): 71. DOI: 10.19784/j. cnki. issn1672-0172. 2022. 05. 011
- [13]余思锐,宋孟杰,沈俊,等.低温静止与运动表面结冰特性预测技术研究进展[J].哈尔滨工业大学学报,2024,56(10):150  
YU Sirui, SONG Mengjie, SHEN Jun, et al. Research progress on icing characteristic prediction technologies for low temperature stationary and moving surfaces [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(10): 150. DOI: 10.11918/202402006
- [14]YE Zuliang, WANG Yikai, YIN Xiang, et al. Comparison between reverse cycle and hot gas bypass defrosting methods in a transcritical CO<sub>2</sub> heat pump water heater [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 196: 117356. DOI: 10.1016/j. apptthermaleng. 2021. 117356
- [15]张睿,童珊,李日新,等.高效排水换热翅片设计与性能优化研究[J].低温与超导,2025,53(1):57  
ZHANG Rui, TONG Shan, LI Rixin, et al. Design and performance optimization of high-efficiency drainage heat exchanger fins [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2025, 53(1): 57.

- DOI: 10.16711/j.1001-7100.2025.01.009
- [16] QU Minglu, LU Mingqi, LI Zhao, et al. Thermal energy storage based (TES-based) reverse cycle defrosting control strategy optimization for a cascade air source heat pump [J]. *Energy and Buildings*, 2020, 219: 110014. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110014
- [17] 常伟先. 再沸器型式及其应用的技术分析[J]. *石油化工设计*, 2020, 37(1): 19  
CHANG Weixian. Types of reboiler and technical analysis of its application[J]. *Petrochemical Design*, 2020, 37(1): 19. DOI: 10.3969/j.issn.1005-8168.2020.01.005
- [18] LU Yan, JASCH K, SCHOLL S. Use of wire matrix inserts in thermosiphon reboilers in the lower operating range [J]. *Chemie Ingenieur Technik*, 2021, 93(7): 1142. DOI: 10.1002/cite.202000236
- [19] 李太科, 黄瑛. 散热器型对汽车散热器传热性能的影响研究[J]. *机械设计与制造*, 2024(1): 47  
LI Taikē, HUANG Ying. Study on the influence of heat transfer tube type on heat transfer performance of automobile radiator[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2024(1): 47. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.20230718.037
- [20] 朱茂桃, 姚鹏, 田春虎. 尖锥形汽车散热器翅片性能优化设计[J]. *机械设计与制造*, 2020(12): 184  
ZHU Maotao, YAO Peng, TIAN Chunhu. Optimization design of radiator louver fin performance [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2020(12): 184. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.2020.12.041
- [21] 谢文韬, 余承学, 谢昕言, 等. 数据中心冷却节能技术及余热回收技术研究进展[J]. *暖通空调*, 2025, 55(2): 1  
XIE Wentao, YU Chengxue, XIE Xinyan, et al. Research progress of cooling energy-saving technology and waste heat recovery technology of data centers [J]. *Journal of HV & AC*, 2025, 55(2): 1. DOI: 10.19991/j.hvac1971.2025.02.01
- [22] 华南理工大学. 一种层叠一体式内外翅片换热管及其制造方法: 201310573311.2[P]. 2015-09-16  
South China University of Technology. A stacked integrated inner and outer fin heat exchange tube and its manufacturing method: 201310573311.2[P]. 2015-09-16
- [23] 广东志高空调有限公司. 一种泡沫金属翅片的空调换热器: 201410026694.6[P]. 2016-04-20  
Guangdong Zhigao Air Conditioning Co., Ltd. Air conditioning heat exchanger with foam metal fins: 201410026694.6[P]. 2016-04-20
- [24] 海信(广东)空调有限公司. 一种换热翅片、换热器及空调: 201410829511.4[P]. 2017-05-03  
Hisense (Guangdong) Air Conditioning Co., Ltd. A type of heat exchange fin, heat exchanger, and air conditioner: 201410829511.4[P]. 2017-05-03
- [25] 广东美的制冷设备有限公司, 美的集团股份有限公司. 一种翅片及含有其的换热器和空调: 201510427702.2[P]. 2018-01-05  
Guangdong Midea Refrigeration Equipment Co., Ltd, Midea Group Co., Ltd. A type of fin and a heat exchanger and air conditioner containing it: 201510427702.2[P]. 2018-01-05
- [26] 西安交通大学. 一种热泵用室外换热器及其控制方法: 201711018650.9[P]. 2019-12-20  
Xi'an Jiaotong University. An outdoor heat exchanger for a heat pump and its control method: 201711018650.9[P]. 2019-12-20
- [27] 浙江三花汽车零部件有限公司. 一种换热器: 201510830642.9[P]. 2020-09-29  
Zhejiang Sanhua Automotive Parts Co., Ltd. A heat exchanger: 201510830642.9[P]. 2020-09-29
- [28] 西安交通大学. 一种翅片端部扭曲的开槽翅片换热管: 201911203789.X[P]. 2021-04-20  
Xi'an Jiaotong University. A slotted fin heat exchange tube with twisted fin ends: 201911203789.X[P]. 2021-04-20
- [29] 江苏鼎胜新能源材料股份有限公司. 一种钎焊用复合翅片材料及其制造方法: 202010258198.9[P]. 2022-05-03  
Jiangsu Dingsheng New Energy Materials Co., Ltd. A composite fin material for brazing and its manufacturing method: 202010258198.9[P]. 2022-05-03
- [30] 广东美的暖通设备有限公司, 美的集团股份有限公司. 翅片、换热组件、微通道换热器及暖通设备: 202310649947.4[P]. 2023-09-29  
Guangdong Midea HVAC Equipment Co., Ltd, Midea Group Co., Ltd. Fins, heat exchange components, microchannel heat exchangers, and HVAC equipment: 202310649947.4[P]. 2023-09-29
- [31] 珠海格力电器股份有限公司. 换热翅片、微通道换热器和热泵系统: 201811090818.1[P]. 2024-05-03  
Zhuhai Gree Electric Appliance Co., Ltd. Heat exchange fins, microchannel heat exchangers, and heat pump systems: 201811090818.1[P]. 2024-05-03
- [32] 王清富, 赵小明. 不同材料翅片管换热器传热及阻力特性试验研究[J]. *东方电气评论*, 2018, 32(4): 50  
WANG Qingfu, ZHAO Xiaoming. Experimental study on heat transfer and pressure performance of plane finned tube heat exchanger made of different materials [J]. *Dongfang Electric Review*, 2018, 32(4): 50. DOI: 10.13661/j.cnki.issn1001-9006.2018.04.012
- [33] 王焯, 王良璧. 翅片材料对扁管管翅式换热器耦合传热特性影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2017, 25(4): 824  
WANG Ye, WANG Liangbi. Influence of fin material on the conjugate heat transfer characteristics of flat tube bank fin heat exchanger [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2017, 25(4): 824. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2017.04.017
- [34] 林创辉, 崔梓华, 张学伟. 不锈钢翅片管式换热器性能试验研究[J]. *制冷与空调*, 2025, 25(1): 44  
LIN Chuanghui, CUI Zihua, ZHANG Xuwei. Experiment on performance of finned tube heat exchanger with stainless steel tube [J]. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2025, 25(1): 44. DOI: 10.20245/j.issn.1009-8402.2025.01.008
- [35] SEKHAR D C, KUMAR N S, NAIDU K C B, et al. Testing the types of corrosion [J]. *Corrosion Science: Modern Trends and Applications*, 2021, 28: 1. DOI: 10.2174/97898114818331210101
- [36] ACQUESTA A, SINAGRA C, MONETTA T. Electrochemical and economic analysis of no-rinse, "True-Cr-Free" surface conversion coatings for a green, cost-saving, corrosion protection of 8079 aluminium alloy [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(3): 1560. DOI: 10.3390/app13031560
- [37] WANG Jian, LING Xiang, ZHANG Wentong, et al. Microstructures and mechanical properties of friction stir welded butt joints of 3003-H112 aluminum alloy to 304 stainless steel used in plate-fin heat exchanger [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 21: 3086. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.10.161
- [38] WEBB R L, ECKERT E R. Application of rough surfaces to heat exchanger design [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1972, 15: 1647. DOI: 10.1016/0017-9310(72)90095-6
- [39] BERGLES A E, BLUMENKRANTZ A R, TABOREK J. Performance evaluation criteria for enhanced heattransfer surface [C]// *Proceedings of 5th International Heat Transfer Conference*. Tokyo: [s. n.], 1974: 239. DOI: 10.1615/ihtc5.2130

- [40] WEBB R L. Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1981, 24(4): 715. DOI: 10.1016/0017-9310(81)90015-6
- [41] 何雅玲, 陶文铨, 王煜, 等. 换热设备综合评价指标的研究进展 [C]//2011 年中国工程热物理学会传热传质学学术会议. 西安: 中国工程热物理学会, 2011
- HE Yaling, TAO Wenquan, WANG Yu, et al. Research progress on comprehensive evaluation indicators of heat exchange equipment [C]// 2011 Chinese Society of Engineering Thermophysics Conference on Heat and Mass Transfer. Xi'an: Chinese Society of Engineering Thermophysics, 2011
- [42] MANSUR M, OKAN K A, ISAK K, et al. Experimental and numerical investigation of flow and heat transfer in lancet-type-finned cross-flow heat exchangers [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 159: 108017. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108017
- [43] LI Yong, ZHANG Jin, ZHANG Yingchun, et al. Effect of shape and placement of twisted pin fins in a rectangular channel on thermo-hydraulic performance [J]. *Journal of Thermal Science*, 2024, 33(5): 1773. DOI: 10.1007/s11630-024-2030-0
- [44] HELMIG T, KNEER R. A novel transient infrared-thermography based experimental method for the inverse estimation of heat transfer coefficients in rotating bearings [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 167: 107000. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107000
- [45] GÓRCECKI G, ŁECKI M, GUTKOWSKI A N, et al. Experimental and numerical study of heat pipe heat exchanger with individually finned heat pipes [J]. *Energies*, 2021, 14(17): 5317. DOI: 10.3390/en14175317
- [46] KIATPACHAI P, KEAWKAMROP T, ASIRVATHAM L, et al. An experimental study of the air-side performance of a novel louver spiral fin-and-tube heat exchanger [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, 61(12): 9811. DOI: 10.1016/j.aej.2022.02.056
- [47] 魏文建, 王炎峰. 微通道蒸发器高风速湿工况性能试验研究 [J]. *流体机械*, 2023, 51(8): 13
- WEI Wenjian, WANG Yanfeng. Experimental study on performance of microchannel heat exchanger under high air velocity and dehumidifying conditions [J]. *Fluid Machinery*, 2023, 51(8): 13. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0329.2023.08.003
- [48] KORTE C M, JACOBI A M. Condensate retention and effects on the performance of plain fin-and-tube heat exchangers: retention data and modeling [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2001, 123: 926. DOI: 10.1115/1.1391276
- [49] HE Fan, HU Chenxi, GAO Weijun, et al. Effect of inclination angles on heat transfer characteristics of solid and perforated spiral finned heat exchangers [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2025, 16: 108920. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.108920
- [50] ZHONG Yongfang, JOARDAR A, GU Zhongping, et al. Dynamic dip testing as a method to assess the condensate drainage behavior from the air-side surface of compact heat exchangers [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2005, 29(8): 957. DOI: 10.1016/j.exptthermflusci.2005.01.006
- [51] 汪峰, 戴飞, 杨卫波. 翅片表面融霜滞留液滴的蒸发特性 [J]. *制冷学报*, 2024, 45(6): 152
- WANG Feng, DAI Fei, YANG Weibo. Evaporation characteristics of defrosting retention droplet on fin surface [J]. *Journal of Refrigeration*, 2024, 45(6): 152. DOI: 10.12465/j.issn.0253-4339.2024.06.152
- [52] XING Qingqing, GU Yaxiu, HAN Yi, et al. Experimental evaluation of the frost suppression performance of a superhydrophobic finned tube heat exchanger [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2024, 109: 109497. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2024.109497
- [53] 汪峰, 汤锐, 王志豪, 等. 冷表面温度对超疏水翅片结霜特性与抑霜性能的影响 [J]. *制冷学报*, 2022, 43(6): 107
- WANG Feng, TANG Rui, WANG Zhihao, et al. Effects of cold surface temperature on frosting characteristics and anti-frosting performance of superhydrophobic fins [J]. *Journal of Refrigeration*, 2022, 43(6): 107. DOI: 10.3969/j.issn.0253-4339.2022.06.107
- [54] WANG He, LU Hao, ZHAO Wenjun. A review of droplet bouncing behaviors on superhydrophobic surfaces: theory, methods, and applications [J]. *Physics of Fluids*, 2023, 35(2): 1450. DOI: 10.1063/5.0136692
- [55] LI Bingcheng, HOU Junming, XU Keke, et al. Optimal designs for flow uniformity at inlet of microchannel flat tube heat exchanger [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 226: 120300. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120300
- [56] LI Jie, ZHANG Dalin, ZHU Guangya, et al. Experimental investigation of flow condensation characteristics in a mini channel with micro pin fin [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2025, 160: 111304. DOI: 10.1016/j.exptthermflusci.2024.111304
- [57] 于改革, 陈永东, 韩冰川, 等. 扩散焊混合式换热器热工性能试验研究 [J]. *流体机械*, 2025, 53(3): 1
- YU Gaige, CHEN Yongdong, HAN Bingchuan, et al. Study on the thermal performance test of diffusion-bonded hybrid heat exchangers [J]. *Fluid Machinery*, 2025, 53(3): 1. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0329.2025.03.001
- [58] HARRIS M, WU H. Numerical simulation of heat transfer performance in novel biomorphic pin-fin heat sinks [J]. *World Congress on Momentum, Heat and Mass Transfer*, 2023, 23: 166. DOI: 10.11159/enft23.166
- [59] CÜLER N, BAYER Ö, SOLMAZ İ. Experimental and numerical investigation on fluid flow and heat transfer behaviour of foam clad pin fin heat sink [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 256: 124184. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124184
- [60] WANG Fei, ZHAO Rijng, MA Changming, et al. Reversely-variable circuitry for finned-tube heat exchanger in air source heat pump to enhance its overall energy performance [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2022, 142: 48. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2022.06.021
- [61] 时国华, 蒋可, 周文博, 等. 结霜下空温式深冷翅片管传热特性 [J]. *化学工程*, 2023, 51(2): 35
- SHI Guohua, JIANG Ke, ZHOU Wenbo, et al. Heat transfer characteristics of single cryogenic finned tube heated by air under frost [J]. *Chemical Engineering (China)*, 2023, 51(2): 35. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9954.2023.02.007
- [62] 朱荣鑫, 王清勤, 孟冲, 等. 空气源热泵用开圆孔翅片管式换热器结霜特性实验研究 [J]. *建筑科学*, 2021, 37(12): 50
- ZHU Rongxin, WANG Qingqin, MENG Chong, et al. Experimental study on frosting characteristics of perforated finned-tube heat exchangers of air source heat pump [J]. *Building Science*, 2021, 37(12): 50. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2021.12.08
- [63] 张雨顺, 牟纳斯, 韩勇, 等. 基于斜翅片型液冷板的流动和传热研究 [J]. *车用发动机*, 2025(2): 48
- ZHANG Yushun, MU Nasi, HAN Yong, et al. Flow and heat

- transfer based on oblique-fin-typed liquid-cooling plate[J]. *Vehicle Engine*, 2025(2): 48. DOI:10.3969/j.issn.1001-2222.2025.02.008
- [64] HUANG Jin, LUO Xiangyu, WANG Pengfei, et al. Multi-objective optimization of a double helical coil heat exchanger using response surface method and genetic algorithm[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2024, 199: 108927. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2024.108927
- [65] 吴俊鸿, 崔松林, 单联瑜, 等. 基于 NSGA-III 算法的小管径翅片管式蒸发器高维多目标优化[J]. *制冷与空调*, 2023, 23(4): 67  
WU Junhong, CUI Songlin, SHAN Lianyu, et al. High-dimensional multi-objective optimization of small-diameter finned-tube evaporators based on NSGA-III algorithm[J]. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2023, 23(4): 67. DOI: 10.3969/j.issn.1009-8402.2023.04.012
- [66] 韩武涛, 谢公南, 曾敏, 等. 基于粒子群算法的内外翅片管换热器优化[J]. *高校化学工程学报*, 2008(5): 744  
HAN Wutao, XIE Gongnan, ZENG Min, et al. PSO-based optimization of internally and externally finned tube heat exchanger[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2008(5): 744. DOI: 10.3321/j.issn:1003-9015.2008.05.004
- [67] SAID Z, RAHMAN S M A, ASSAD M E H. Heat transfer enhancement and life cycle analysis of a shell-and-tube heat exchanger using stable CuO/water nanofluid[J]. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2019, 31: 306. DOI: 10.1016/j.seta.2018.12.020
- [68] 段少斌, 谷雅秀, 任现超, 等. 面向数据中心冷却的蒸发式冷凝器翅片结构多目标优化[J]. *西安交通大学学报*, 2025, 59(12): 216  
DUAN Shaobin, GU Yaxiu, REN Xianchao, et al. Multi-objective optimization of evaporative condenser fin structure for data center cooling[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2025, 59(12): 216. DOI: 10.7652/xjtxb202512019
- [69] SUYATNA N R, JUANGSA F B, DARMANTO P S. Multi-objective finned-tube heat exchanger optimization using a genetic algorithm[J]. *Jurnal Teknik Mesin*, 2023, 29(2): 146. DOI: 10.5614/MESIN.2023.29.2.4
- [70] 杨辉著, 文键, 童欣, 等. 板翅式换热器锯齿型翅片参数的遗传算法优化研究[J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49(12): 90  
YANG Huizhu, WEN Jian, TONG Xin, et al. Optimization design for offset fin in plate heat exchanger with genetic algorithm[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(12): 90. DOI: 10.7652/xjtxb201512015
- [71] SAI J P, RAO B N. Non-dominated sorting genetic algorithm II and particle swarm optimization for design optimization of shell and tube heat exchanger[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2022, 132: 105896. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2022.105896
- [72] DASTMALCHI M, SHEIKHZADEH G A, AREFMANESH A. Optimization of micro-finned tubes in double pipe heat exchangers using particle swarm algorithm[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 119: 1. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.03.025
- [73] PATEL V K, RAO R V. Design optimization of shell-and-tube heat exchanger using particle swarm optimization technique[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(11): 1417. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2010.03.001
- [74] VALDIVIA S, BACKES J G, TRAVERSO M, et al. Principles for the application of life cycle sustainability assessment[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2021, 26(9): 1900. DOI: 10.1007/s11367-021-01958-2
- [75] SHARMA D K, AGARWAL P, PRABHAKAR A. Effect of fin design and continuous cycling on thermal performance of PCM-HP hybrid BTMS for high ambient temperature applications[J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 74: 109360. DOI: 10.1016/j.est.2023.109360
- [76] LOW Z H, QIN Z, DUAN F. A review of fin application for latent heat thermal energy storage enhancement[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 85: 111157. DOI: 10.1016/j.est.2024.111157
- [77] RICH D G. The effect of fin spacing on the heat transfer and friction performance of multi-row smooth plate fin and tube heat exchanger[J]. *ASHRAE Transactions*, 1973, 79(2): 137
- [78] WANG C C, CHANG Y J, HSIEH Y C, et al. Sensible heat and friction characteristics of plate fin-and-tube heat exchangers having plane fins[J]. *International Journal of Refrigeration*, 1996, 19(4): 223. DOI: 10.1016/0140-7007(96)00021-7
- [79] MADI M A, JOHNS R A, HEIKAL M R. Performance characteristics correlation for round tube and plate finned heat exchangers[J]. *International Journal of Refrigeration*, 1998, 21(7): 507. DOI: 10.1016/S0140-7007(98)00031-0
- [80] YAN W M, SHEEN P J. Heat transfer and friction characteristics of fin-and-tube heat exchangers[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2000, 43(9): 1651. DOI: 10.1016/S0017-9310(99)00229-X
- [81] 朱必佳, 孙宇. 平直翅片管式换热器的传热数值模拟研究[J]. *机械设计与制造*, 2018(增刊1): 99  
ZHU Bijia, SUN Yu. Numerical simulation of heat transfer on flat fin tube heat exchangers[J]. *Machinery Design and Manufacture*, 2018(Sup. 1): 99. DOI: 10.19356/j.cnki.1001-3997.20180627.017
- [82] KHUDHUR D S, AL-ZUHAIRY R C, KASSIM S M. Thermal analysis of heat transfer with different fin geometry through straight plate-fin heat sinks[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2022, 174: 107443. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107443
- [83] 丛晓春, 倪鹏飞, 王庆刚, 等. 平直翅片换热器空气侧换热与阻力特性研究[J]. *热能动力工程*, 2020, 35(5): 78  
CONG Xiaochun, NI Pengfei, WANG Qinggang, et al. Study on air side heat transfer and resistance characteristics of straight fin heat exchanger[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2020, 35(5): 78. DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2020.05.011
- [84] LEE Y T, CHIEN L H, HE J C, et al. Air side performance characterization of wavy fin-and-tube heat exchangers having elliptic tubes with large waffle heights[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 217: 119220. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.119220
- [85] ALI M M, RAMADHYANI S. Experiments on convective heat transfer in corrugated channels[J]. *Experimental Heat Transfer*, 1992, 5(3): 175. DOI: 10.1080/08916159208946440
- [86] 戴艳俊, 李欣, 陶文铨. 几何参数对低波纹通道流动与换热特性的影响[J]. *工程热物理学报*, 2011, 32(1): 126  
DAI Yanjun, LI Xin, TAO Wenquan. Effects of geometric parameters on flow and heat transfer characteristics in low-corrugated channels[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2011, 32(1): 126
- [87] TAO Y B, HE Y L, HUANG J, et al. Three-dimensional numerical study of wavy fin-and-tube heat exchangers and field synergy principle analysis[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(5/6): 1163. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.03.019

- [88] ZHANG Xilong, WANG Yichun, LI Min, et al. Improved flow and heat transfer characteristics for heat exchanger by using a new humped wavy fin[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 124: 510. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.06.068
- [89] GHOLAMI A, WAHID M A, MOHAMMED H A. Thermal-hydraulic performance of fin-and-oval tube compact heat exchangers with innovative design of corrugated fin patterns[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 106: 573. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.028
- [90] CARIJA Z, FRANKOVIC B. Heat transfer analysis of flat and louvered fin-and-tube heat exchangers using CFD [C]//6th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics. Pretoria, South Africa: HEFAT2008, 2008: 1249
- [91] DAVENPORT C J. Heat transfer and fluid flow in the louvered fin triangular ducts[D]. CNA: Lanchester Polytechnic, 1980
- [92] YUN L, CHOL M S, YL S T, et al. Experimental study on the convective heat transfer coefficient of early-age concrete [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2009, 31(1): 60. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2008.09.009
- [93] AOKI H, SHINAGAWA T, SUGA K. An experimental study of the local heat transfer characteristics in automotive louvered fins [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1989, 2(3): 293. DOI: 10.1016/0894-1777(89)90018-6
- [94] KIM M H, YOUN B, BULLARD C W. Effect of inclination on the air-side performance of a brazed aluminum heat exchanger under dry and wet conditions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44(24): 4613. DOI: 10.1016/S0017-9310(01)00104-1
- [95] KIM M H, BULLARD C W. Air-side thermal hydraulic performance of multi-louvered fin aluminum heat exchangers [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2002, 25(3): 390. DOI: 10.1016/S0140-7007(01)00025-1
- [96] 王珂, 刘遵超, 刘彤, 等. 较高雷诺数下百叶窗翅片倾斜角对传热的影响[J]. *工程热物理学报*, 2014, 35(2): 375  
WANG Ke, LIU Zunchao, LIU Tong, et al. Research on the influence of louver fin tilt angle on heat transfer at relatively high Reynolds number [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2014, 35(2): 375
- [97] 王迎慧, 赵凌骁, 邵楠. 翅窗间距比对管带式散热器综合性能的影响[J]. *内燃机工程*, 2016, 37(6): 229  
WANG Yinghui, ZHAO Lingxiao, SHAO Nan. Effects of fin-to-louver pitch ratio on comprehensive performance of louver finned-tube radiator [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2016, 37(6): 229. DOI: 10.13949/j.cnki.nrijge.2016.06.038
- [98] PARK J S, BYUN S, DONG R K, et al. Frost behavior of a louvered fin heat exchanger with vortex-generating fins [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2017, 114: 590. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.06.090
- [99] 朱茂桃, 田春虎, 徐晓明, 等. 基于RSM的汽车散热器翅片性能优化设计[J]. *现代制造工程*, 2019(3): 74  
ZHU Maotao, TIAN Chunhu, XU Xiaoming, et al. Optimization design of radiator fin performance based on RSM [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2019(3): 74. DOI: 10.16731/j.cnki.1671-3133.2019.03.013
- [100] 党艳辉, 明廷臻, 刘伟, 等. 开孔矩形翅片椭圆管流动及传热特性的数值模拟[J]. *化工学报*, 2009, 60(12): 2975  
DANG Yanhui, MING Tingzhen, LIU Wei, et al. Numerical simulation on flow and heat transfer characteristics of rectangular-wing elliptic tube with interrupted holes [J]. *CIESC Journal*, 2009, 60(12): 2975. DOI: 10.3795/KSME-B.2009.33.3.149
- [101] SHAHDAD I, FAZELPOUR F. Numerical analysis of the surface and geometry of plate fin heat exchangers for increasing heat transfer rate[J]. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2018, 9(2): 155. DOI: 10.1007/s40095-018-0270-z
- [102] LI Juan, LING Xiang, PENG Hao. Field synergy analysis on convective heat transfer and fluid flow of a novel triangular perforated fin [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2013, 64(5): 526. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.04.039
- [103] 陈鹏飞, 冯立斌, 程国鹏. 圆形开孔翅片管式换热器传热特性的数值模拟[J]. *工业炉*, 2014, 36(6): 1  
CHEN Pengfei, FENG Libin, CHENG Guopeng. Numerical simulation of heat transfer characteristics of circular openings finned tube heat exchanger [J]. *Industrial Furnace*, 2014, 36(6): 1. DOI: 10.3969/j.issn.1001-6988.2014.06.001
- [104] HE Hui, LYU Ning, LIANG Caihua, et al. Effect of micro-nano structure on anti-frost and defrost performance of the superhydrophobic fin surfaces [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2023, 144: 110878. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2023.110878
- [105] 陈泽文, 徐鹏, 许佳寅, 等. 翅片结构对管外冷凝换热强化效果影响研究[J]. *节能*, 2024, 43(12): 70  
CHEN Zewen, XU Peng, XU Jiayin, et al. Effect of fin geometry on outside condensation performance of the tubes for condensers [J]. *Energy Conservation*, 2024, 43(12): 70. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7948.2024.12.020
- [106] SALLAR H, IRFAN M, KHAN M M, et al. Hydro-thermal performance of an I-shaped pin fin microchannel heat sink with variable pin fin height, thickness and orientation [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2025, 160: 108256. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.108256
- [107] PARK J S, KIM D P, LEE K W. Local frost behaviors of a scaled-up louvered fin heat exchanger [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015(89): 1127. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.06.025
- [108] 石珂玮, 李丰, 郑晨, 等. 波纹和百叶窗竖插翅片微通道换热器在干/霜工况下的性能对比[J]. *制冷与空调*, 2025, 25(1): 82  
SHI Kewei, LI Feng, ZHENG Chen, et al. Performance comparison of wavy and louvered vertical-fin micro-channel heat exchanger under dry/frosting conditions [J]. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2025, 25(1): 82. DOI: 10.20245/j.issn.1009-8402.2025.01.014
- [109] XU Bo, ZHANG Chi, WANG Ying, et al. Experimental investigation of the performance of microchannel heat exchangers with a new type of fin under wet and frosting conditions [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 89: 444. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.06.037
- [110] WU Weilan, LUO Jiaen, LI Dawei, et al. Experimental investigation of heat transfer performance of a finned-tube heat exchanger under frosting conditions [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 80: 103752. DOI: 10.1016/j.scs.2022.103752
- [111] JI Jiadong, ZHAO Jinhui, NI Xuwang. Experimental study on the influence of base plate temperature and fin pitch on frosting characteristics of parallel cold plates [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2025, 71: 106209. DOI: 10.1016/j.csite.2025.106209
- [112] YANG Kaisheng, ZHENG Jiawei, WU Kailun, et al. Performance

- of the frosting characteristics of fin-and-tube heat exchanger subject to superhydrophobic coating [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 235: 121338. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121338
- [113] 刘晓蕾, 孟建军, 蔡良烽, 等. 空调器用翅片管式换热器排水性能试验研究[J]. *制冷与空调*, 2022, 22(12): 55  
LIU Xiaolei, MENG Jianjun, CAI Liangfeng, et al. Drainage performance test of finned-tube heat exchanger of air conditioner [J]. *Refrigeration and Air-Conditioning*, 2022, 22(12): 55. DOI:10.3969/j.issn.1009-8402.2022.12.012
- [114] 刘璐, 丁国良, 庄大伟, 等. 微通道换热器百叶窗翅片排水性能的 CFD 模拟[J]. *化工学报*, 2021, 72(增刊1): 91  
LIU Lu, DING Guoliang, ZHUANG Dawei, et al. CFD simulation of water drainage performance of louver-typed microchannel heat exchanger[J]. *CIESC Journal*, 2021, 72(Sup.1): 91. DOI: 10.11949/0438-1157.20201490
- [115] WU Xiaomin, HU Shan, CHU Fuqiang. Experimental study of frost formation on cold surfaces with various fin layouts [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 95: 95. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2015.11.045
- [116] YU R, SOMMERS A D, OKAMOTO N C. Effect of a micro-grooved fin surface design on the air-side thermal-hydraulic performance of a plain fin-and-tube heat exchanger [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2013, 36(3): 1078. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2012.11.027
- [117] SONG Kewei, YANG Qiuxia, SUN Kai, et al. Performance promotion by novel fin configurations with ellipsoidal dimple-protrusion for a circle tube-fin heat exchanger [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2024, 157: 107731. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107731
- [118] ZHANG Kai, LI Mingjia, LIU Hua, et al. Experimental and numerical study and comparison of performance for herringbone wavy fin and enhanced fin with convex-strips in fin-and-tube heat exchanger [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 175: 121390. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121390
- [119] SEN P, CHEN Mengjie, BAI Bofeng. Heat transfer enhancement of air flow through new types of perforated dimple/protrusion fins [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 256: 124030. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.124030
- [120] GUO Zhiguang, ZHOU Feng, HAO Jingcheng, et al. Effects of system parameters on making aluminum alloy lotus [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, 303(1): 298. DOI: 10.1016/j.jcis.2006.06.067
- [121] 李娟, 朱章钰, 翟昊, 等. 基于仿生学的强化传热与减阻技术研究进展[J]. *化工进展*, 2021, 40(5): 2375  
LI Juan, ZHU Zhangyu, ZHAI Hao, et al. Research progress on heat transfer enhancement and surface drag reduction techniques based on bionics [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(5): 2375. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2020-1140
- [122] 赵红柳, 孙明瑞, 姜楠, 等. S 型泡沫金属管翅式换热器的设计与实验研究[J]. *航空动力学报*, 2023, 38(4): 840  
ZHAO Hongliu, SUN Mingrui, JIANG Nan, et al. Design and experimental study of S-type foam metal tube-fin heat exchanger [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2023, 38(4): 840. DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.20210219
- [123] GHOSH A, BEAINI S, ZHANG B J, et al. Enhancing dropwise condensation through bioinspired wettability patterning [J]. *Langmuir*, 2014, 30(43): 13103. DOI: 10.1021/la5028866
- [124] 刘景成, 张树有, 周智勇. 一种新型仿生翅片及其对流体流动与传热影响[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(12): 161  
LIU Jingcheng, ZHANG Shuyou, ZHOU Zhiyong. Influence on fluid flow and heat transfer of a bionic fin in plate-fin heat exchanger [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(12): 161. DOI: 10.3901/JME.2015.12.161
- [125] KIM S, KIM K J. Dropwise condensation modeling suitable for superhydrophobic surfaces [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2011, 133(8): 1. DOI: 10.1115/1.4003742
- [126] 梁彩华, 汪峰, 吕艳, 等. 翅片表面特性对结霜过程影响的实验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(4): 745  
LIANG Caihua, WANG Feng, LV Yan, et al. Experimental study on effect of surface characteristic of fin on frost formation [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2014, 44(4): 745. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2014.04.012
- [127] 徐象国, 詹思成, 梁灏彬, 等. 空调换热器表面排水性能计算模型、整体影响及改进方法综述[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(4): 122  
XU Xiangguo, ZHAN Sicheng, LIANG Haobin, et al. Review of methods to simulate and improve the surface wettability of heat exchanger and corresponding influence on air conditioning systems [J]. *Journal of Heat Transfer*, 2017, 53(4): 122. DOI: 10.3901/JME.2017.04.122
- [128] 苏伟, 芦志飞, 张小松. 竖直超疏水翅片间霜层动态生长特性[J]. *化工学报*, 2021, 72(增刊1): 244  
SU Wei, LU Zhifei, ZHANG Xiaosong. Frost growth dynamics on vertical superhydrophobic fins [J]. *CIESC Journal*, 2021, 72(Sup.1): 244. DOI: 10.11949/0438-1157.20201491
- [129] JHEE S, LEE K S, KIM W S. Effect of surface treatments on the frosting/defrosting behavior of a fin-tube heat exchanger [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2002, 25: 1047. DOI: 10.1016/S0140-7007(02)00008-7
- [130] HU Wanling, MA Qiaoqiao, GUAN Yong, et al. Effect of hydrophilic-hydrophobic hybrid surfaces on the thermal hydraulic characteristics of finned tube heat exchangers under wet conditions in greenhouse environment [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 267: 125833. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.125833
- [131] YANG Kaisheng, HUANG Yuyang, LIU Yaohsien, et al. Enhanced dehumidification via hybrid hydrophilic/hydrophobic morphology having wedge gradient and drainage channels [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2019, 55: 3359. DOI: 10.1007/s00231-019-02643-9
- [132] CHATTERJEE A, DERBY M M, PELES Y, et al. Condensation heat transfer on patterned surfaces [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 66: 889. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.07.077
- [133] YANG Kaisheng, LIN Kaihsiang, TU Chengwei, et al. Experimental investigation of moist air condensation on hydrophilic, hydrophobic, superhydrophilic, and hybrid hydrophobic-hydrophilic surfaces [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 115: 1032. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.08.112