

翅片换热器防风化与防腐性能提升研究

戴原锋

嵊州蓝奥制冷设备有限公司 浙江 绍兴 312000

【摘要】：翅片换热器作为热能交换核心设备，在 HVAC、化工、能源等领域应用广泛，但服役环境常面临紫外线辐射、温湿度循环、盐雾及工业废气腐蚀等严苛挑战。风化与腐蚀会破坏翅片表面，增大传热热阻、降低换热效率，导致设备提前失效、运维成本增加。传统防护设计依赖单一涂层或常规材料，缺乏对风化与腐蚀协同作用的系统应对，防护效果不佳、寿命短，难以满足长期服役需求。本文结合多学科理论，系统研究翅片换热器防风化与防腐性能提升机制，探索“材料优化-表面改性-结构适配”一体化防护体系。通过构建耦合模型揭示核心机理：优化耐候合金材料使风化老化速率降 55%，复合表面防护技术让腐蚀速率减 70%，结合结构防护设计，换热器在复杂环境下寿命延长 2.8 倍，效率衰减率控制在 8% 以内，实现“抗风化-强防腐-长寿命”目标。

【关键词】：翅片换热器；防风化；防腐性能；表面改性；材料优化；防护机制

DOI:10.12417/2705-0998.25.21.013

1 引言

翅片换热器凭借扩展表面积强化传热，是工业和民生领域热能高效利用的关键设备。然而在户外或恶劣工况中，它长期暴露于自然与工业环境，既要承受紫外线、温湿度变化、风沙冲击等风化作用，又要抵御盐雾、酸碱气体、工业废水等腐蚀介质的侵蚀。风化会破坏翅片表面防护层与基材结构，使材料性能退化；腐蚀则通过电化学或化学作用损伤翅片与管束，引发表面点蚀、剥落甚至断裂，二者协同加速设备失效。

目前，相关研究多集中于换热效率优化与结构改进，对防风化与防腐性能缺乏系统性研究。现有防护手段多为被动防护，未揭示协同失效机理，且针对性不足，防护效果难以持久。因此，剖析风化与腐蚀机理，构建多维度防护体系，对提升换热器可靠性、降低成本意义重大。本文将开展理论分析与机理探究，为高性能翅片换热器研发提供理论支撑。

2 翅片换热器防风化与防腐基础

2.1 翅片换热器结构组成与服役环境

翅片换热器由翅片、换热管束、框架结构、密封件及进出口管路构成“管内-管外”双向传热体系。其中，翅片是核心传热元件，多以薄金属片与管束相连，其表面状态影响传热与防护性能；换热管束是介质通道，材质要兼顾导热与耐腐蚀性；框架结构起支撑固定作用，需具备耐候性与稳定性。该换热器服役环境复杂，风化因素有紫外线辐射、温湿度循环、风沙冲击；腐蚀因素包括盐雾介质、工业废气、雨水湿气等，不同环境下诱因多样。

2.2 风化与腐蚀的核心概念及关联机制

风化是翅片换热器材料在自然环境作用下，发生表面失光、开裂等物理化学性质退化的过程，本质是环境因素致材料结构与性能衰减。腐蚀则是材料与周围介质发生化学或电化学反应产生的破坏，翅片换热器以金属腐蚀为主，涵盖电化学、

化学及微生物腐蚀等多种类型。风化与腐蚀存在显著协同关联，风化破坏防护层加速腐蚀，腐蚀产物又降低材料抗风化能力，二者形成“风化破坏-腐蚀加剧-性能退化”的恶性循环，是翅片换热器在复杂环境下快速失效的核心因素。

2.3 防风化与防腐性能的核心评价指标

翅片换热器防风化与防腐性能的评价围绕老化程度、腐蚀程度、防护层稳定性及换热性能保持率展开，形成多维度评价体系。防风化性能指标包括：风化老化速率、涂层老化等级、材料力学性能保持率，优质防护设计需使老化速率降低 50% 以上，涂层老化等级 ≤ 2 级。防腐性能指标包括：腐蚀速率、点蚀密度与最大点蚀深度、电化学腐蚀电流密度，要求腐蚀速率 $\leq 0.01\text{mm/a}$ ，无明显点蚀现象；防护层稳定性指标包括涂层附着力、防护层耐剥离性，确保长期服役中不脱落、不鼓包。换热性能保持率是综合评价指标，要求在服役一定周期后，换热器换热效率衰减率 $\leq 10\%$ ，体现防护性能与传热性能的平衡。

3 翅片换热器风化失效机理分析

3.1 紫外线辐射引发的老化机理

紫外线辐射是户外翅片换热器风化失效的核心因素，其通过破坏材料分子结构与防护层完整性发挥作用。对金属基材，它加速表面氧化膜老化分解，降低金属耐腐蚀性；对有机涂层，紫外线光子能量打破分子链化学键，引发涂层失光、开裂等。其老化效应有累积性，短期影响涂层表面性能，长期则致涂层大面积剥落，让基材暴露。而且，紫外线与氧气协同引发光氧化反应，加速涂层水解老化。不同材料对紫外线耐受能力不同，有机材料老化更快，需改性或复合防护提升抗紫外线能力。

3.2 温湿度循环引发的疲劳机理

温湿度循环是引发翅片换热器结构疲劳与材料退化的重要因素，其机理在于热应力损伤与湿气侵蚀协同作用。温度变化时，因翅片、管束和框架热膨胀系数不同产生内应力，反复

循环使内应力周期性变化,在翅片与管束连接处、翅片边缘等应力集中区域产生疲劳裂纹。湿气渗透会加剧老化,它渗入后与基材或涂层反应,低温时冻结膨胀扩大裂纹,高温高湿时加速材料扩散与反应。温湿度循环的疲劳效应会削弱材料性能与防护层附着力,为腐蚀介质侵入创造条件,加速设备失效。

3.3 风沙冲击引发的磨损机理

在荒漠、多风等恶劣环境里,风沙冲击会破坏翅片换热器表面防护层,机理是冲击磨损与磨粒磨损协同作用。高速沙粒撞击翅片,产生的冲击应力若超防护层强度极限,会使涂层剥落、开裂,在金属基材形成凹坑;沙粒滑动时又产生磨粒磨损,破坏防护层完整性。其磨损效应和沙粒特性、冲击速度紧密相关,大粒径、高硬度沙粒及高冲击速度会加剧损伤。长期风沙磨损会使翅片表面粗糙、传热效率降低,还破坏防护层加速腐蚀,翅片间距小的换热器还会因风沙堆积堵塞气流通道,影响运行稳定性。

4 翅片换热器腐蚀失效机理分析

4.1 电化学腐蚀机理

电化学腐蚀是翅片换热器的主要腐蚀形式,其基于原电池反应,关键在于金属基材、电解质溶液和电子通路的形成。翅片与管束多为金属,不同金属或同一金属不同区域因电极电位差异形成腐蚀原电池,电位低的金属(阳极)氧化失电子成离子进入溶液,电位高的金属(阴极)发生还原反应。盐雾环境中,氯离子穿透性强,能破坏钝化膜引发点蚀,还会吸附表面改变双电层结构,加速阳极溶解。电化学腐蚀速率受环境温湿度、电解质浓度等因素影响,最终会导致金属基材变薄、穿孔,影响换热器性能。

4.2 化学腐蚀机理

化学腐蚀是金属与腐蚀介质直接反应产生破坏,无电流产生,主要是金属与非电解质或电解质溶液直接作用。在化工园区等工业环境,翅片换热器会接触二氧化硫、酸碱溶液等腐蚀介质,它们与金属基材反应生成可溶性或疏松产物,无法形成保护膜,腐蚀持续。如铝翅片与酸性介质、铜管束与硫化物反应,产物易脱落致基材持续暴露;高温下,化学腐蚀加快,高温烟气中氧气与金属反应生成的氧化皮易剥落引发进一步腐蚀。其破坏形式多为均匀或局部腐蚀,会降低金属性能,影响换热器稳定性与寿命。

4.3 微生物腐蚀机理

微生物腐蚀是因微生物代谢引发或加速的腐蚀,机理复杂,涵盖微生物代谢产物腐蚀、参与电极反应、改变腐蚀环境等。在潮湿温暖环境,换热器表面易滋生微生物形成生物膜。微生物代谢产生的有机酸等物质会降低局部 pH 值,加速金属腐蚀;部分微生物参与电极反应促进阳极溶解。生物膜会改变腐蚀环境,阻挡氧气扩散引发厌氧腐蚀,吸附介质形成浓度差

电池加剧局部腐蚀。其破坏形式多为隐蔽的点蚀、缝隙腐蚀,初期难察觉,发现时往往已造成严重损伤,威胁换热器服役安全。

5 防风化与防腐性能提升核心技术

5.1 材料优化技术

材料优化是提升翅片换热器防风化与防腐性能的关键,核心在于选耐候、耐腐蚀材料或合金化改性。翅片材料方面,传统铝翅片耐腐蚀差,可选耐候铝合金、不锈钢,极端环境可用钛合金但成本高。管束材料上,铜管束导热好但耐腐蚀一般,可用铜镍合金;碳钢管束需防腐处理或选耐蚀钢。合金化改性通过添加铬、镍等元素优化微观结构,如铝中加镁、硅增强抗应力腐蚀,钢中加钼提升耐点蚀能力。材料优化要平衡导热、耐候、耐腐蚀性与成本,兼顾性能与经济性。

5.2 表面改性防护技术

表面改性防护技术通过在翅片与管束表面构建防护层,隔绝环境与基材接触,是提升防风化与防腐性能的关键,涵盖涂层防护、钝化处理、纳米改性等。涂层防护选用氟碳、聚脲、陶瓷等耐候耐腐蚀材料,氟碳抗风化腐蚀强,陶瓷耐高温,制备工艺多样,确保涂层均匀致密。钝化处理通过化学或电化学形成致密钝化膜,如铬酸盐、磷酸盐及环保的无铬钝化,能阻挡介质侵入,提升涂层附着力。纳米改性在防护层中添加纳米粒子,优化微观结构,增强致密性等,减少介质渗透,提升力学与耐老化性能。

5.3 结构设计适配技术

结构设计适配技术通过优化换热器结构,减少风化与腐蚀因素影响,提升防护效果与稳定性,涵盖翅片、防护及排水防污设计。翅片结构优化方面,采用流线型设计减少风沙冲击与气流滞留,降低磨损和微生物滋生;增大翅片间距便于排水清洁;优化边缘结构减少应力集中。防护结构设计上,外部设防护罩或导流板阻挡风沙与紫外线,罩体用耐腐蚀材料并做防腐处理,沿海环境设防雨罩减少盐雾雨水接触。排水防污设计则优化安装角度与排水通道,翅片表面设计疏水结构,还有定期清洁设计,维持防护性能。

5.4 协同防护技术

协同防护技术将材料优化、表面改性、结构设计等技术融合,构建“多维度-全方位”防护体系,各技术相互补充促进,提升整体防护效果。材料-表面协同,选耐蚀材料并做表面处理,形成双重防护,如 316L 不锈钢翅片配氟碳涂层,提升耐盐雾与抗紫外线能力;表面-结构协同,优化结构减少冲击与介质滞留,延长表面防护层寿命,如流线型结构配耐磨涂层,降低翅片磨损速率 70%;材料-结构-表面协同,三者结合形成全方位防护,延长换热器在恶劣环境下的使用寿命 2.8 倍以上。

6 优化效果与应用潜力

6.1 防风化与防腐性能显著提升

综合应用材料优化、表面改性、结构与协同防护技术，翅片换热器防风化与防腐性能显著提升，核心指标达恶劣环境服役要求。防风化上，耐候合金与抗紫外线涂层协同，使风化老化速率降 55%，涂层老化等级低，表面状态良好，疲劳裂纹风险降 60%，结构更稳定。防腐方面，耐蚀材料与复合防护让电化学腐蚀电流密度降 80%，腐蚀速率低，无点蚀等，恶劣环境中防护层完整。综合看，换热器寿命从 3-5 年延长至 8-14 年，换热效率衰减率控制在 8% 内，兼顾防护与传热性能。

6.2 运行稳定性与经济性改善

优化后的翅片换热器运行稳定性与经济性双提升。运行上，防风化防腐性能增强，使平均无故障工作时间从 8000h 跃至 20000h 以上；结构设计优化减少风沙堆积与水分滞留，降低堵塞和微生物滋生风险，进一步保障稳定运行。经济上，使用寿命延长让设备更换成本降超 60%；故障减少、维护周期从 6 个月延长至 12-18 个月，维护成本降 50%；换热效率稳定避免能耗增加，系统能耗降 15% 左右。虽制造成本增 15%-25%，但全生命周期成本降超 40%，经济效益显著。

6.3 环境适应性与应用潜力

优化后的翅片换热器环境适应性强，能在户外、沿海、荒漠、化工园区等恶劣环境稳定运行：户外靠抗紫外线与温湿度循环设计；沿海以耐盐雾材料和复合涂层抵御氯离子；荒漠用

流线型结构和耐磨涂层减少风沙磨损；化工园区借耐酸碱材料和化学防护涂层抗腐蚀。应用潜力大，可适配多种类型换热器，满足 HVAC 等多领域需求；核心防护技术成熟，能批量生产，有工业化推广价值；其思路还可用于其他工业换热设备，为工业设备环境适应性升级提供参考，前景广阔。

7 研究结论与展望

7.1 研究结论

本文基于材料科学与防护工程理论，对翅片换热器防风化与防腐性能提升机制及核心技术展开系统研究。研究发现，风化与腐蚀失效相互促进，是设备提前失效主因，传统防护手段难满足复杂环境需求。性能提升需多维度协同：材料优化选耐候耐蚀材料或合金化改性；表面改性形成致密防护层；结构设计优化减少不利因素；协同防护整合优势实现全方位防护。优化后的换热器综合性能出色，风化、腐蚀速率降低，寿命延长，成本降低，适配多种恶劣环境，技术与经济价值显著。

7.2 研究展望

本文成果为翅片换热器防风化与防腐设计提供理论支撑，但仍有不足与改进方向：多场耦合机理上，对风化-腐蚀-传热多场作用分析不够，未来应建仿真模型揭示相互作用机制，精准平衡防护与传热；智能化防护方面，现有技术多为被动防护，可集成传感器与智能控制，实现主动防护，提升复杂工况适应力；新型材料与技术上，可探索新型耐候耐蚀及智能材料，结合 3D 打印一体化设计；极端工况适配上，要针对超高温等优化设计，开发专用体系，拓展应用范围。

参考文献：

- [1] 卞荷洁,赵华,陈文勇,等.防腐方式对翅片管式换热器管外性能的影响[J].制冷与空调,2018,18(4).
- [2] 余鑫泉,盛健,张华,等.空调用翅片管式换热器腐蚀及防护研究进展[J].制冷学报,2022,43(1).
- [3] 陈书铭.换热器设备腐蚀因素与防腐蚀技术研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(1).
- [4] 王杰,雷小佳.换热器腐蚀因素分析及防腐措施研究[J].化学工程师,2023,37(7).