

强化传热技术在工业换热中的应用研究

孟祥宇

上海电气电站设备有限公司上海电站辅机厂 上海 200090

摘要: 工业换热设备广泛应用于石油、化工、电力、冶金等高能耗行业,其传热效率直接影响系统能耗与生产成本。传统换热设备普遍存在传热系数低、结构尺寸大、易结垢等问题,制约了工业节能降耗目标的实现。强化传热技术通过改变流体流动状态、扩展传热面积、增加扰动等方式,可显著提升换热器综合性能。本文系统梳理主动式、被动式及复合强化传热技术的基本原理与典型结构,分析各类技术在工业换热中的适用场景,探讨技术选型的关键因素,并针对当前应用瓶颈提出优化建议。

关键词: 强化传热;工业换热器;节能降耗;传热系数;优化应用

引言: 工业换热器是能源转换与利用系统的核心装备,广泛用于余热回收、工艺介质加热冷却、冷凝蒸发等过程。传统管壳式换热器虽结构成熟、运行可靠,但存在传热效率偏低、占地面积大、易结垢等固有缺陷。强化传热技术通过优化换热表面结构或改变流体流动状态,可在不增加换热面积的前提下提升传热系数,实现设备小型化和节能降耗双重目标。本文立足工程应用视角,系统分析各类强化传热技术的作用机理与适用场景,为工业换热设备优化设计提供参考。

1 强化传热技术概述

1.1 强化传热的基本原理

强化传热是指提高换热设备单位时间、单位面积传递热量的能力。提高传热系数的核心途径包括增大换热面积、提高温差、降低热阻。工业应用中温差受工艺约束难以大幅调整,增大面积意味着设备体积增加,最有效的强化途径是降低总热阻。对流换热场合的热阻主要集中于流体边界层,强化传热的核心是破坏或减薄边界层,增加流体扰动,促进湍流发展。具体实现方式包括:在换热表面加工肋片、凹坑、波纹等扩展表面;在流道中插入扰流元件;采用螺旋流、射流冲击等特殊流动形式;利用超声波、电场等外加能量场。不同手段的强化机理各异,需根据流体性质、操作条件等因素综合选择。

1.2 强化传热技术的分类

强化传热技术按能量输入方式分为主动式、被动式和复合式三大类。被动式技术不依赖外部能量,通过改变换热表面几何形状或流道结构实现强化,主要包括扩展表面、粗糙表面、插入物、扰流元件等,结构简单、无附加能耗,是工业应用最广泛的方式。主动式技术需要外加能量驱动,包括机械搅拌、表面振动、电场作

用、超声波作用等,强化效果显著但设备复杂、投资较高,适用于特殊高附加值工艺。复合式技术是将两种或多种被动式技术组合,或与主动式联合使用,发挥协同效应,可获得更高强化效果,但设计难度和制造成本相应增加^[1]。

1.3 强化传热技术的评价指标

评价强化传热技术需建立科学的指标体系。传热强化因子反映技术对传热性能的提升程度;阻力系数比反映流阻损失增加程度;效率评价系数综合考量传热强化与流动阻力两方面因素,是常用的综合评价指标。此外,抗垢性能、制造工艺性、经济性是工程选型必须考虑的因素。抗垢性能好的技术能长期保持高效运行;制造工艺性好的技术易于批量生产、成本可控;经济性分析需权衡初始投资与运行费用。技术的可靠性同样至关重要,过于复杂的结构可能带来泄漏和维护困难,需在强化效果与工程可靠性之间寻找平衡。

2 典型强化传热技术及其工业应用

2.1 被动式强化传热技术

被动式强化传热技术以翅片管、螺旋槽管、波纹管、扭带插入物等为代表,广泛应用于工业换热场景。翅片管通过增加翅片扩展换热面积,适用于管内与管外传热系数差异较大的场合,如空气冷却器、余热锅炉。螺旋槽管在管壁加工螺旋凹槽,流体产生螺旋流动和边界层分离,传热系数可比光管提高1.5至2倍,常用于油冷却器、蒸发器、冷凝器等。波纹管通过周期性改变管径形成收缩与扩张,流体产生涡流和二次流,强化效果显著且具有一定抗垢能力,适用于易结垢介质。扭带插入物使流体产生旋转运动,强化管内侧传热,结构简单、易于装卸,常用于高粘度流体和需定期清洗的场合。管壳式换热器壳程可采用折流杆、螺旋折流板等替代传统

弓形折流板,消除流动死区,降低阻力,提高效率。上述技术已形成成熟的设计方法和制造工艺,在石化、电力、制冷等行业获得广泛应用。

2.2 主动式强化传热技术

主动式强化传热技术通过外加能量场干预传热过程,强化效果显著但设备复杂、成本较高,主要用于特殊工业场景。超声波强化传热利用空化效应和声流效应破坏边界层、抑制污垢沉积,适用于高粘度、易结垢介质,如聚合反应器冷却、原油加热器等,功耗约为换热功率的0.1%至0.5%。电场强化传热通过在换热表面施加高压静电场,利用电场力驱动流体运动,大幅提高单相和沸腾传热系数,尤其适用于微通道换热和电子器件冷却。磁场强化传热适用于磁性或导电流体,利用洛伦兹力产生对流扰动,在磁流体冷却、冶金冷却等领域有应用前景。机械搅拌强化通过搅拌装置增加流体扰动,适用于高粘度流体的搅拌釜式换热器。主动式技术强化倍数高,但投资和运维成本较高,限制了其在常规工业换热中的大规模应用,主要定位于高附加值或常规手段难以满足的工艺场合^[2]。

2.3 复合强化传热技术

复合强化传热技术将多种强化手段协同应用,能获得高于单一技术的综合效果,是当前研究热点。典型复合方式包括:螺旋槽管与扭带插入物复合,传热系数可比光管提高2至3倍;翅片管与涡流发生器复合,在翅片表面布置小型翼片破坏热边界层,适用于紧凑型换热器;超声波与波纹管复合,超声波抑制污垢生长,波纹管增强流体扰动,协同维持高效传热。复合强化并非简单叠加,不同手段之间存在复杂相互作用,设计时需综合考虑强化机理的匹配性和互补性。例如,螺旋槽管与扭带复合时,扭带螺距应与螺旋槽螺距协调,避免流动干涉降低效果。复合强化技术设计难度大、制造成本高,但能满足高温高压、高粘度、易结垢等苛刻工况需求,在核能换热、深海油气处理、化工反应器等高技术领域具有独特优势。

2.4 典型工业换热场景应用分析

不同工业领域对强化传热技术有差异化需求。石化行业介质多为高粘度、易结垢烃类,宜选用螺旋槽管、波纹管等具有自洁功能的被动式技术,配合在线清洗装置。电力行业处理大流量清洁流体,可选用翅片管、螺旋折流板等,重点降低壳程阻力和提高紧凑度。制冷空调行业相变传热占主导,宜选用微肋管、三维翅片管等强化沸腾和冷凝的专用管型,显著提高制冷系数。冶金行业高温烟气余热回收面临高温腐蚀和积灰问题,宜选

用钉头管、H型翅片管等耐腐蚀、易清灰结构,配合吹灰装置。化工反应器换热系统对温度控制精度要求高,可采用超声波强化技术,在强化传热的同时抑制聚合结垢。技术选型需综合考虑流体物性、操作参数、垢质特性、设备寿命、投资回收期等因素,避免盲目追求高强度倍数而忽视可靠性和经济性。

3 强化传热技术应用中存在的问题

3.1 强化结构与垢质沉积的矛盾

强化传热在提升传热系数的同时,流动阻力增大,垢质沉积风险随之上升。波纹管、螺旋槽管等表面的凸起凹陷区域易成为垢质附着热点,处理易结垢介质时抗垢性能可能劣于光管。垢层沉积后热阻显著增加,强化效果迅速衰减,甚至出现“强化反降”。部分换热器运行后性能明显下降,清洗困难、维护成本高,在石化油冷却器、化肥溶液换热器中尤为突出。内插扭带虽具自清洁功能,但长期运行会产生磨损。选型须将抗垢性能作为重要考量,优先选择具有自洁功能或易于清洗的强化结构。

3.2 技术选型与工况匹配不足

强化效果高度依赖工况条件,没有一种技术适用于所有场景。工程实践中存在选型不当、盲目追求新型结构的问题。低雷诺数层流工况下选用涡流发生器效果不佳,高粘度流体中选用密集翅片导致流动阻塞,相变换热中选用不匹配结构反而抑制成核沸腾。部分项目采用复杂复合结构但实际效果不及预期,造成投资浪费。选型不当的根源在于对机理理解不深,缺乏定量选型方法,设计单位与用户之间存在信息不对称^[3]。解决关键是建立科学选型决策流程,开展充分的工况分析与技术经济比选。

3.3 设计方法与制造工艺的滞后

强化传热技术发展与设计方法、制造工艺之间存在脱节。当前工程设计仍依靠光管换热器设计规范和修正系数,缺乏针对各类强化技术的专用设计方法和软件。经验关联式适用范围有限,外推可靠性差。CFD数值模拟对人员要求高、计算耗时长,难以普及。制造方面,高效换热管加工需要专用设备和模具,中小企业依赖外购导致成本上升。复合强化结构的焊接、胀接工艺要求更高,质量控制难度大。部分现场出现应力腐蚀开裂、振动疲劳失效,与制造工艺控制不当有关,设计方法与制造工艺滞后已成为重要瓶颈。

3.4 经济性与标准化障碍

强化换热器推广面临经济性和标准化双重障碍。经济方面,强化换热器初始投资高于光管产品,虽可通过

节能收益回收,但回收期受能源价格波动影响较大。部分用户只关注初始采购成本而忽视运行费用,倾向于选择低价传统产品。标准化方面,各类强化换热管尚无统一的产品标准和性能测试规范,不同厂家产品质量参差不齐,用户难以横向比较选型。设计、制造、验收标准的缺失增加了应用不确定性,行业缺乏权威的技术应用指南和经济性评价方法。推动规模化应用须从标准化建设和经济性评价两方面同时发力。

4 强化传热技术优化应用策略

4.1 基于工况特征的精细化选型

建立基于工况特征的精细化选型方法是破解选型难题的核心。首先,建立强化传热技术知识库,按适用流体类型、雷诺数范围、操作条件等维度对各类技术进行分类整理,明确每种技术的适用边界和限制条件。其次,开发选型辅助决策系统,用户输入流体物性、工艺参数、防垢需求等信息后,系统推荐候选技术方案并预估强化倍数和阻力增加。再次,强化技术经济比选,采用全生命周期成本方法,综合评估初始投资、节能收益、维护成本、设备寿命等因素,计算投资回收期和内部收益率。对于重要换热设备,建议开展中试验证或参考同类成功案例。通过科学选型,避免“为强化而强化”,确保技术在特定工况下发挥预期效果。

4.2 抗垢型强化结构与维护

应对结垢问题需从结构优化和运行维护两个维度协同,开发具有自洁功能的抗垢型强化结构,如螺旋槽管利用离心力甩离颗粒物;扭曲管通过连续改变截面破坏垢质附着条件;内插螺旋线产生微振动防止垢层沉积。对于易结垢介质,宜选用流道平滑、无流动死区的结构,避免深凹槽、锐角等易藏垢特征。运行维护方面,根据垢质类型和结垢速率制定清洗计划,化学清洗选用无腐蚀清洗剂,机械清洗选用不损伤结构的工具。条件允许时,可在线安装超声波防垢装置,利用空化效应抑制垢质生长,延长清洗周期。将抗垢性能作为技术评价的重要指标,推动抗垢型结构的研发和应用^[4]。

4.3 设计工具开发与制造工艺改进

开发强化换热器设计软件,内嵌各类技术的传热和阻力关联式,支持常见工业介质的相变和单相换热计算。推广CFD仿真技术在设计中的应用,建立参数化建模模板和仿真流程,降低使用门槛。建立性能测试平

台,对新型结构进行实验验证,积累可靠数据。制造工艺方面,推动高效换热管加工设备的国产化和低成本化,降低螺旋槽管、波纹管等产品成本。研发复合强化结构的焊接、胀接工艺,制定工艺规范和检验标准。鼓励制造企业与高校、科研院所开展产学研合作,加速实验室成果向工业产品转化。通过设计工具和制造工艺双轮驱动,降低技术应用门槛。

4.4 标准体系建设与经济性评价

制定强化换热管产品标准,明确几何尺寸、材料性能、加工精度、检验方法等技术要求。编制强化换热器设计规范,给出设计计算方法、安全系数取值、性能修正方法。制定性能测试标准,统一测试条件、方法和数据处理规则,确保产品性能可比。经济性评价方面,开发全生命周期成本分析模型,综合考虑初始投资、能耗费用、维护费用、停机损失、设备残值等因素。建立应用效果后评估机制,跟踪评价已投用项目的实际节能效果和经济收益。行业协会可定期发布技术应用指南和典型案例集,为用户选型提供参考。通过标准建设和经济性评价,降低应用不确定性,增强用户投资信心。

结束语

强化传热技术的工程应用需遵循“因质制宜、因工制宜”原则。本文研究发现,被动式技术在常规工业场景中经济性最优,主动式技术适用于高附加值工艺,复合式技术在苛刻工况下优势显著。当前应用瓶颈集中于抗垢设计与制造工艺的匹配不足。未来应推进增材制造与智能优化技术的融合,开发定制化、复合化、智能化的强化传热解决方案,在强化效果、流动阻力、抗垢性能与制造成本之间实现动态平衡,助力工业节能降耗目标的实现。

参考文献

- [1]董思彤.管壳式换热器强化传热技术研究[J].科技与创新,2026(2):126-128.
- [2]刘世杰,孙依地,叶周,等.安全抗振螺旋扁管换热器传热强化特性及工业应用进展[J].流体机械,2025,53(11):34-43.
- [3]孙睿,王军锋,许浩洁,等.喷雾冷却技术及其强化传热机制研究进展[J].化工学报,2025,76(4):1404-1421.
- [4]蒋静智,邵国伟,崔海亭,等.三套管式加肋相变蓄热单元的强化传热特性[J].化工进展,2024,43(8):4210-4221.