

列管式换热器传热效率优化设计

宫晓青

旭阳工程科技有限公司天津分公司 天津 300131

【摘要】列管式换热器因结构稳定、适应性强、维护便捷等优势，广泛应用于石油化工、能源动力、食品加工等工业领域，其传热效率直接影响生产系统的能耗水平与运行经济性。当前传统列管式换热器普遍存在传热系数偏低、能量浪费严重、抗垢能力不足等问题，难以满足现代工业对高效节能设备的需求。本文以列管式换热器传热效率优化为核目标，从传热机理出发，系统分析影响传热效率的关键因素，重点探讨换热管结构、壳程流场、传热表面改性及运行参数调控等方面的优化设计策略，结合强化传热技术的应用实践，提出一套全方位的优化设计方案，为提升列管式换热器传热性能、降低工业能耗提供理论依据与工程参考。

【关键词】列管式换热器；传热效率；优化设计；强化传热

DOI:10.12417/2705-0998.25.22.030

引言

在工业生产过程中，热量交换是不可或缺的核心环节，列管式换热器作为实现冷热流体热量传递的关键设备，其性能优劣直接关系到生产效率与能源利用率。随着“双碳”目标的推进，工业领域对节能设备的需求日益迫切，传统列管式换热器在长期运行中暴露的传热效率低、能耗高等问题愈发突出。尽管列管式换热器结构成熟，但换热管布置、壳程流动状态、传热表面污染等因素均会制约传热性能提升。因此，针对列管式换热器开展传热效率优化设计研究，通过结构改进与技术创新突破现有性能瓶颈，对推动工业节能降耗、提升生产经济性具有重要现实意义。

1 列管式换热器传热机理及效率影响因素

1.1 核心传热机理

列管式换热器的传热过程遵循傅里叶定律与牛顿冷却定律，通过管壁作为中间介质实现冷热流体间的热量传递，整个传热过程包含三个串联环节：热流体对换热管内壁的对流传热、管壁自身的导热以及换热管外壁对冷流体的对流传热。传热速率的大小取决于各环节的热阻叠加，其中对流传热热阻是影响整体传热效率的主导因素，尤其当流体流速较低或传热表面存在结垢时，对流传热热阻会显著增大，直接导致传热系数下降^[1]。

1.2 关键影响因素分析

结构参数是传热效率的基础影响因素。换热管的管径、长度、壁厚及布置方式直接决定传热面积与流场分布：管径过小易堵塞、过大则降低流速，管长过长增加流动阻力、过短浪费传热空间，正三角形或正方形等管间距布置，会显著影响壳程流体扰动程度。壳程折流板的形式、间距及缺口大小，直接控制流体流动路径与流速，设计不合理易产生流动死区，降低传热效率。

流体特性与运行参数对传热效率有直接调控作用。流体的

导热系数、比热容等物性参数决定自身传热能力，黏度大的流体易形成厚边界层，增大对流传热热阻。运行中，冷热流体流速影响边界层厚度，流速提升可减阻但过高会增加动力消耗；进出口温度差决定传热驱动力，合理调控可避免能量浪费。

传热表面状态也关键，列管式换热器长期运行易因杂质、盐分形成结垢层，其导热系数远低于金属管壁，会产生巨大附加热阻，显著降低传热系数。

2 列管式换热器结构优化设计策略

2.1 换热管结构改进与优化

换热管是热量传递核心载体，其结构优化是提升传热效率的关键。传统光管传热性能有限，通过改变外形构建强化传热结构，可增强流体扰动、减薄边界层。常用强化管型有螺旋槽管、横纹管等：螺旋槽管通过管壁螺旋沟槽使流体产生二次流，提升对流传热系数；横纹管借助环形沟槽扰动边界层，适用于高黏度流体换热。

换热管布置需兼顾传热效率与流动阻力：正三角形布置壳程流体扰动剧烈、传热效果优，但阻力大；正方形布置便于清洗，适用于易结垢工况，也可采用进出口区域混合布置优化效果。

管径与长度优化需结合换热需求与运行成本：满足传热面积前提下，小直径管可提升设备紧凑性与传热效率，但需配套防堵塞技术；管长应控制在合理范围，传热需求较大时优先增加管程数，以降低流动阻力与压力损失^[2]。

2.2 壳程结构优化设计

壳程流场分布对传热效率影响显著，通过优化折流板设计可有效改善壳程流动状态，减少流动死区，提升传热均匀性。传统弓形折流板虽能改变流体流动方向，但在折流板与壳体之间、折流板与换热管之间易形成流动死区，且易引发壳程流体的振动。将弓形折流板改为螺旋形折流板，可使壳程流体沿螺旋线流动，形成连续的湍流状态，消除局部死区，同时降低流

体振动与流动阻力，尤其在大流量工况下，传热效率提升效果更为明显。

折流板的间距与缺口大小需精准调控。折流板间距过小会增加流动阻力与设备成本，过大则无法有效扰动流体，导致传热系数下降，应根据壳程流体流速与黏度，确定最优间距，确保流体在壳程内始终处于湍流状态。折流板缺口大小直接影响流体的流通面积与扰动程度，缺口过大易导致流体短路，缺口过小则会增加阻力，通常缺口高度取壳体内径的20%~40%，具体数值需结合流体特性与传热需求通过数值模拟优化确定。

壳程内部构件的优化可进一步提升流场性能。在壳程进口处设置导流筒，可避免流体直接冲击换热管，减少流体磨损与振动，同时使流体均匀分布至整个壳程截面；在换热管束之间设置纵向隔板，可将壳程分为多个独立流道，提升流体流速与扰动程度，适用于壳程流量较小的工况。

2.3 管程结构与密封系统优化

管程结构优化需以提升管程流体流速与传热均匀性为目标。通过增加管程数可有效提升管程流体流速，增强对流传热效果，尤其当管程流量较小时，多管程设计可使流体在管内多次折返，提升流速与湍流程度。管程分程隔板的布置应确保各管程的流体流量均匀分配，避免因流量不均导致局部传热效率下降，隔板与管板的连接需保证密封严密，防止流体短路。

密封系统的可靠性直接影响传热效率与运行安全性。列管式换热器的密封点主要包括管板与壳体、管板与封头、换热管与管板的连接部位，密封失效会导致冷热流体混合，直接降低传热效率。采用新型密封材料，如柔性石墨、聚四氟乙烯复合材料等，可提升密封性能与使用寿命，适用于高温、高压及腐蚀性工况。对于换热管与管板的连接，采用胀焊结合的连接方式，可同时保证密封性能与结构强度，避免因振动导致的密封失效。

管板结构优化可减少传热热阻与流动阻力。传统管板厚度较大，会增加管壁与管板之间的接触热阻，采用薄管板设计并配合强化传热结构，可减少接触热阻，提升传热效率。

3 传热表面改性与强化传热技术应用

3.1 传热表面改性技术

通过表面涂层技术改变传热表面的物理化学性质，可同时实现强化传热与抗结垢双重目标。在换热管表面涂覆高导热涂层，如纳米铝基涂层、石墨烯复合涂层等，可提升表面导热系数，加速热量传递；涂覆低表面能涂层，如聚四氟乙烯涂层、陶瓷涂层等，可降低流体在表面的附着力，减少结垢形成，同时涂层表面的微纳结构可增强流体扰动，提升对流传热效率。涂层施工需保证厚度均匀、结合牢固，避免因涂层脱落影响传热效果与设备运行。

表面纹理加工是通过机械加工在传热表面形成特定微结构，增强流体扰动与传热效果。采用激光加工、电火花加工等技术，在换热管内壁加工微米级的凸凹纹理或螺旋微槽，可破坏边界层的稳定发展，使流体在表面形成强烈的湍流与二次流，显著提升对流传热系数。表面纹理的尺寸与密度需合理设计，过大或过密的纹理会增加流动阻力，需通过数值模拟与实验验证确定最优参数，实现传热效率与流动阻力的平衡。

表面合金化处理适用于高温、腐蚀性工况下的换热器优化。通过渗铝、渗铬等表面合金化工艺，在换热管表面形成一层耐高温、耐腐蚀的合金层，可延长设备使用寿命，同时合金层的高导热性能可提升传热效率。表面合金化处理后的换热管，其表面硬度与耐磨性也显著提升，可减少流体冲刷导致的表面磨损，确保强化传热效果长期稳定。

3.2 主动式强化传热技术

主动式强化传热技术通过外部能量输入改变流体流动状态或传热过程，适用于特定工况下的传热效率提升。机械振动强化技术是通过在换热器壳体或换热管上安装振动装置，使换热管产生高频微振动，破坏传热表面的边界层，增强流体与管壁的接触与混合，同时可有效抑制结垢形成，防止结垢层积累导致的传热效率下降。振动频率与振幅需精准控制，避免因振动过大导致换热管疲劳损坏。

超声波强化传热技术利用超声波在流体中传播产生的空化效应与湍流效应，增强传热效果。超声波作用于流体时，会产生大量微小气泡，气泡破裂时产生强烈的冲击波与微射流，破坏边界层，增强流体扰动；同时超声波可加速流体分子运动，提升对流传热系数。将超声波换能器安装在换热器的进出口或壳体上，可实现对传热过程的实时调控，尤其适用于高黏度流体或易结垢工况，强化效果显著且能耗较低。

电场与磁场强化传热技术通过外加电场或磁场改变流体的流动与传热特性。电场作用可使极性流体分子定向排列，增强分子间的热量传递；磁场作用则适用于含磁性颗粒的流体，通过磁场力驱动磁性颗粒运动，增强流体扰动与传热效果。这类技术适用于特定流体工况，具有调控灵活、无机械磨损等优势，是未来强化传热技术的重要发展方向之一。

3.3 被动式强化传热技术集成应用

被动式强化传热技术无需外部能量输入，通过结构改进或添加强化元件提升传热效率，是列管式换热器优化的主流方向。内插物强化技术在换热管内插入螺旋纽带、静态混合器等元件，促使流体旋转混合、破坏边界层，螺旋纽带还兼具自清洁功能，可减少结垢，适用于化工、食品加工等易结垢领域。

翅片强化技术通过在换热管表面增设矩形、三角形、螺旋翅片（其中螺旋翅片效果最优，可数倍扩大传热面积），适配气-液换热等对流传热系数差异较大的工况。翅片与换热管需通

过焊接、轧制或胀接紧密连接，降低接触热阻。

多种技术集成可实现协同强化，如螺旋槽管与管内螺旋纽带结合、翅片管与螺旋折流板配合，能同步优化管程与壳程传热性能。技术集成需经数值模拟与实验验证，确保各技术协同互补，避免相互干扰。

4 运行参数调控与防结垢优化设计

4.1 运行参数的优化调控策略

流体流速优化调控是提升传热效率的直接手段。设备设计阶段需结合流体物性与传热需求，确定管程 1~3m/s、壳程 0.5~2m/s 的最优湍流流速范围；运行中通过变频调节泵与风机转速，实时适配传热需求，避免过高流速增加能耗与设备磨损。

进出口温度参数合理匹配可提升能量利用率。在满足工艺要求的前提下，优化换热器进出口温度差以提高能量回收效率；采用多台换热器串并联的梯级换热模式，如高温流体依次与中温、低温流体换热，实现热量充分利用，最大化传热效率与能量利用率。

流体流量均匀分配是保证传热均匀性的关键。通过优化换热器进出口接管与内部流道结构，确保流体在各管程、壳程均匀分配，避免局部流量异常导致传热效率下降；多台并联运行时，借助流量分配阀调节各设备流量，使设备均处于最优运行状态，提升整体传热系统效率^[3]。

4.2 防结垢与在线清洗系统设计

防结垢设计需从源头抑制结垢，结合传热表面改性与流体预处理技术。流体进入换热器前，通过过滤、软化、除盐等预

处理去除杂质、盐分等结垢诱因，减少结垢物质含量；传热表面采用低表面能涂层或微纳纹理结构，降低结垢物质附着力，延缓结垢形成。

在线清洗系统可实现不停机清洗，保障换热器长期高效运行。根据结垢类型选适配方式：易溶解结垢采用化学在线清洗，自动投加清洗剂溶解结垢层；硬质难溶解结垢采用超声波、旋转刷等物理清洗方式，通过机械或物理作用除垢。清洗周期需依据运行监测数据自动调整，避免过度清洗损伤传热表面或浪费清洗剂。

结垢监测系统可实时掌握结垢状态、精准判断清洗时机。通过换热管表面的温度传感器、热电阻等监测传热系数变化，结合超声波检测结垢层厚度，为清洗决策提供依据。将监测系统与在线清洗系统联动，实现结垢自动监测与智能清洗，确保换热器始终高效传热。

5 结语

列管式换热器的传热效率优化设计是一项系统工程，需以传热机理为基础，综合考量结构参数、流体特性、运行工况等多方面因素，通过结构改进、表面改性、技术强化与运行调控的全方位策略，突破传统设计的性能瓶颈。换热管与壳程结构的优化是提升传热效率的核心，传热表面改性与强化传热技术的应用是重要支撑，运行参数调控与防结垢设计是保证高效运行的长效保障。未来，随着数值模拟技术、智能监测技术的不断发展，列管式换热器的优化设计将向精准化、智能化方向发展，为工业领域的节能降耗与高效生产提供更有力的设备支撑。

参考文献：

- [1] 贾凌峰,李涛.高效板式换热器在加热炉中的热效率分析[J].工业炉,2025(3):34-37.
- [2] 李泽方,闫红杰,黄正宗,等.锌精馏炉双级式列管换热器的设计与数值模拟优化[J].中南大学学报(自然科学版),2025,56(5).
- [3] 万霖,黄宇佳,车刚,等.气相旋转螺旋槽管式换热器结构优化与性能试验[J].农业机械学报,2024,55(10):422-432.