

换热器传热性能强化方法分析

郭秉法

中核第七研究设计院有限公司 山西 太原 030000

摘 要：本文围绕换热器传热强化技术展开系统研究。首先阐述了减薄边界层、增大换热面积、提升湍流程度三大强化机理。其次，分析了扩展表面、管内扰流元件、结构化表面改性三类被动强化技术，以及机械扰动、振动声波、射流冲击三类主动强化技术的原理与适用场景。最后，探讨了被动与主动复合、结构改性与射流复合、多被动结构复合三种复合强化方式的协同机理。研究表明，复合强化技术在换热效率与运行成本间具有较优平衡，是工业换热器性能提升的重点发展方向。

关键词：换热器；传热强化；强化技术；方法分析

引言：换热器是工业生产中实现热量传递与回收的核心设备，其传热性能直接决定能源利用效率与系统运行成本。换热器流体间热量传递的主要热阻集中在管壁层流边界层内，边界层厚度与湍流强度是制约换热效率的关键因素。当前，传热强化技术已形成被动式、主动式与复合式三大技术体系，但不同方法在作用机理、能耗成本及适配工况上差异显著，技术选型不当易造成强化效果不足或运行成本过高。本文围绕三类强化方法的技术原理与工程应用展开系统分析，为工业换热器性能

优化提供技术参考。

1 换热器传热强化基本原理

依据对流换热基础理论，工业换热器热量传递以对流换热为主、固体导热为辅，近壁层流边界层为换热量阻主要载体。边界层厚度越大、流体温度分层越显著，壁面换热热阻越高，换热系数越低。现有全部强化技术均以削减边界层热阻、提升对流换热速率为核心目标，底层调控机理分为三类，三类机理性能量化特征见表 1。

表 1 传热强化基础机理性能特征对比

强化机理	核心调控方式	换热系数提升区间	附加流动压降增幅	适用工况
减薄边界层	扰流撕裂附面层	20%~120%	10%~80%	中低流速单相流体
拓展换热面积	异型壁扩容接触区域	15%~70%	5%~40%	受限空间、气相换热
提升湍流强度	重构流场消除温度分层	30%~150%	20%~100%	高粘度、大温差介质

（1）减薄流体边界层：通过内置扰流构件、重构流道改变流体运动轨迹，周期性破坏管壁稳定层流附面层，缩短跨层导热路径，主流高温流体与近壁低温流体掺混速率提升 40%~90%，有效降低边界层导热热阻。（2）增大有效换热面积：采用翅片管、波纹管、微通道等异型换热结构，设备体积增幅低于 10%的前提下，换热面积可提升 30%~180%，单位容积换热负荷显著提高，适配场地受限工业装置。（3）提升流体湍流程度：扰动流体流动状态，破除截面温度分层，消除局部换热死区，流体截面温度均匀度提升 60% 以上，对流换

热强度同步增强。全部强化技术均依托上述单一或复合机理实现性能提升，各类方案的扰动形式、能耗水平、介质适配范围形成差异化应用边界，是工程选型的核心判定依据^[1]。

2 被动式传热强化方法分析

2.1 扩展表面强化技术

扩展表面强化依托管壁翅片、肋片、波纹延展结构同步扩容换热面积、被动扰动流场，广泛应用于管壳式、板式、翅片式换热器，适配气相、低雷诺数层流换热工况。三类主流翅片结构性能参数如表 2。

表 2 不同翅片结构换热与阻力性能（Re=1200）

翅片类型	换热面积提升率	换热系数增幅	流动压降增幅	缺陷
平直翅片	45%	28%	12%	流场扰动弱，换热增益有限
波纹翅片	52%	75%	48%	中高流速下压降激增
开孔翅片	49%	62%	35%	加工工序复杂，成本偏高

(1) 翅片强化为最典型扩展表面技术: 平直翅片仅依靠扩容面积提升换热量, 结构简易、流动阻力增量低, 但扰动能力薄弱; 波纹翅片依靠波浪壁面迫使流体周期性换向掺混, 持续撕裂边界层, 换热强化效果远优于平直翅片; 开孔翅片通过阵列开孔分割流体流股, 消除翅片尾部滞留涡区, 规避局部换热死角, 换热均匀性显著提升。(2) 技术综合特性: 扩展表面改造工程量大、设备运行稳定, 无运动部件失效风险; 短板适配雷诺数区间窄, 仅适用于低湍流工况, 当流体 $Re > 5000$ 时, 系统压降增幅超 60%, 介质输送泵耗大幅上涨。

2.2 管内扰流元件强化技术

管内扰流元件强化技术是在换热管内部放置固定扰流构件, 强制改变流体流动状态, 打破层流边界层, 提升流体湍流度, 是管式换热器常用的强化手段。常用的扰流元件包括螺旋扭带、弹簧绕丝、静态混合元件、凸凹扰流柱等。(1) 螺旋扭带应用最为普遍, 将金属带扭转呈螺旋状固定于换热管内, 流体流经时被迫产生螺旋旋流, 离心力使流体不断冲刷管壁, 持续破坏边界层, 大幅提升管内对流换热系数。该结构适配清水、油类等洁净流体, 强化效果稳定。弹簧绕丝结构简单, 通过管壁内侧缠绕弹簧, 对流体产生持续扰动, 适合细管径换热器, 但易造成流体杂质堆积, 仅适用于洁净介质。(2) 此类技术的核心优势是强化效果明显、适配管径范围广、改造成本低; 主要缺陷是扰流元件会增大管内流动阻力, 且元件与管壁间隙易沉积污垢, 长期运行会出现结垢堵塞问题, 反而降低换热效率, 不适用于含杂质、高粘度流体工况^[2]。

2.3 结构化表面改性强化技术

结构化表面改性是通过机械加工、冲压、蚀刻等方式, 在换热管壁表面构建微尺度、凹凸、螺纹、横纹等特殊微观结构, 改变壁面流体附着状态, 实现传热强化。区别于扩展表面技术, 该技术不额外增加构件, 仅对换热壁面本身进行改性, 设备体积无变化。(1) 螺旋管、横纹管、凹凸微孔管是典型改性结构。螺旋管管壁的螺旋螺纹可引导流体产生旋流, 破坏边界层, 同时螺纹结构增大了有效换热面积; 横纹管通过管壁环形横纹, 使流体在流动过程中反复收缩、扩张, 持续产生湍流扰动, 换热强化效果均匀; 微尺度凹凸结构可在壁面形成大量微型涡流, 打破层流附着状态, 尤其适用于低流速、薄层流体换热场景。(2) 该技术的优势是设备结构紧凑、无额外配件、不易结垢, 运行稳定性极强; 局限性在于加工工艺要求较高, 改性后的管壁会小幅提升流体阻力, 且微结构易被高粘度流体覆盖, 弱化强化效果, 更适用于洁净、低粘度流体换热。

3 主动式传热强化方法分析

3.1 流体机械扰动强化技术

流体机械扰动强化技术是主动式传热强化的典型方法, 通过外部动力驱动装置, 对换热器内部流体实施搅拌、旋流驱动与持续扰动, 破坏流体温度分层与管壁层流边界层, 显著提升换热效率。其主要实现形式包括: (1) 旋转扰流装置, 通过电机驱动扰流元件在管内高速旋转, 产生高强度湍流与螺旋旋流, 彻底打破层流边界层, 换热系数提升幅度远高于固定式扰流元件, 且可通过调节转速精确控制扰动强度, 适配不同负荷需求。(2) 搅拌式扰动装置, 主要应用于容积式换热器, 通过内部搅拌桨强制搅动流体, 消除局部换热死角, 有效解决高粘度流体换热不均问题。该技术核心优势在于强化效果可调可控、工况适配范围广, 尤其对高粘度及易温度分层流体效果显著。主要缺陷在于需配套动力设备持续输入能量, 增加系统运行能耗, 且运动部件存在机械磨损, 故障率与维护成本较高, 需在强化效果与运行经济性之间权衡^[3]。

3.2 流体振动与声波强化技术

流体振动与声波强化技术是主动式传热强化的重要分支, 通过外部振动装置或声波发生装置, 向换热器内部流体或换热管壁传递振动能量, 利用振动效应改变流体流动特性, 实现传热强化。该技术主要分为流体振动、管壁振动、声波扰动三种实施形式。(1) 在强化机理方面, 振动作用可使流体产生高频微扰动, 有效破坏管壁处边界层的稳定附着状态, 抑制流体内部温度分层现象, 同时振动效应可有效阻止污垢在管壁表面沉积, 兼具强化换热与在线防垢双重功能。声波扰动则通过高频声波激励流体产生共振效应, 放大流体内部湍流扰动强度, 对于低流速、层流状态下的流体换热提升效果尤为突出。(2) 该技术的核心优势在于不增加流体流动阻力、防垢性能优异、对换热器本体结构无需改造, 工程实施难度低。但其局限性同样明显, 高频振动易造成换热器管路、焊接连接件产生疲劳损伤, 长期运行会降低设备结构使用寿命。此外, 声波与振动能量的实际利用率偏低, 能耗投入与换热提升幅度之间的性价比有限, 在工程中多作为辅助强化手段与其他技术配合使用。

3.3 射流冲击强化技术

射流冲击强化技术是通过高压喷嘴将流体以高速射流形式直接冲击换热壁面, 利用高速射流的强冲击力冲刷管壁, 彻底破坏边界层, 实现局部高强度换热, 是针对性极强的主动强化技术。该技术多应用于板式换热器、高温换热设备及局部高热流密度换热场景。(1) 高速射流可使冲击区域的流体湍流强度大幅提升, 边界层

厚度降至极低水平，局部换热系数可提升数倍。同时，射流的冲刷作用可持续清除管壁浮垢，维持换热面的清洁度，保证设备长期稳定运行。通过调整喷嘴数量、射流速度、冲击角度，可精准控制换热强化范围与强度。（2）该技术的优势是局部换热强化效果极致、防垢性能优异、可控性强；缺点是高压射流需要增压设备，能耗较高，且射流仅能作用于局部区域，整体均匀性较差，易造成换热器局部温差过大，不适用于大面积均匀换热场景^[4]。

4 复合式传热强化方法分析

4.1 被动结构+主动扰动复合强化

被动结构与主动扰动复合强化方式，是在换热器被动改性结构基础上搭配主动扰动装置，属于当前应用最为成熟的复合传热强化技术。（1）以螺纹换热管内加装旋转扰流元件为典型，螺纹结构作为被动改性部件，可有效扩大管内换热面积，并对流体产生初步扰动；旋转扰流元件作为主动扰动部件，通过机械旋转产生高强度旋流，对管壁边界层形成强烈破坏，实现被动与主动强化效果的叠加。（2）相较于单一被动强化技术，该复合方式在低流速工况下优势显著，主动旋转构件弥补了固定扰流结构扰动强度不足的缺陷，大幅提升低雷诺数条件下的换热效率。（3）相较于单一主动强化技术，被动结构提供的基础强化作用有效降低了主动设备的运行负荷，可降低扰流装置的转速与驱动能耗，在保证换热效果的同时控制运行成本。该复合强化方式目前已广泛应用于化工管式换热器、工业热水换热设备及供暖换热系统中。

4.2 结构改性+射流冲击复合强化

结构改性与射流冲击复合强化技术，是将换热管壁结构化改性技术与射流冲击技术相结合的复合传热强化方式。在波纹板、翅片管等结构化换热器的基础上，增设高压射流冲击装置，形成结构改性与主动射流协同作用的复合强化体系。（1）在换热强化机理方面，波纹板、翅片等结构化表面可有效扩大整体换热面积，并在流体流经结构表面时形成基础扰流效果，提升换热器整体换热水平。射流冲击装置则可针对结构化表面的局部换热薄弱区域进行定向强化，弥补单纯结构改性技术在凹槽、死角等区域换热不足的缺陷，实现换热性能的全面提升。（2）在抗垢性能方面，射流的高速冲刷作用可有效清除结构化缝隙、波纹凹槽内沉积的污垢与杂质，解决了凹凸结构、波纹表面易积垢、难清洗的工程难题，显著提升设备长期运行的稳定性与换热持久性。该复合技术特别适用于含轻微杂质、高热流密度的工业换热场景，在兼顾高换热效率的同时，具备较强的设备

抗垢能力，适用于化工、石化等对换热稳定性要求较高的工业领域。

4.3 多被动结构复合强化

组合两种及以上无能耗被动构件，无需外源动力即可实现换热协同增效，运维成本极低，是存量换热器节能改造优选方案。（1）典型组合形式：波纹翅片+管内螺旋扭带复合翅片管束，管外波纹翅片扩容壳程换热面积并扰动壳程流体，管内螺旋扭带撕裂管程边界层、提升管内湍流度，管内外双侧同步强化，综合换热系数较单一结构提升 60%~110%。不同被动组合性能对比见表 3。

表 3 单 / 多被动结构换热性能对比（Re=1800）

强化方案	换热系数增幅	流动压降增幅	额外能耗
单一波纹翅片	58%	42%	0
单一螺旋扭带	72%	55%	0
波纹翅片+螺旋扭带复合	106%	68%	0

技术综合特性：无外源能耗、设备结构简单、机械故障率低，存量设备改造成本低，适配常规稳定工况节能升级；局限性为被动强化存在理论性能上限，综合换热增幅低于含主动扰动的复合体系，高负荷、大温差苛刻工况适用性有限^[5]。

结束语

换热器传热强化技术是提升工业换热效率、降低能源消耗的核心手段。本文系统阐述了传热强化的三大基本机理，系统分析了被动式、主动式及复合式三类强化方法的技术原理、适用场景与工程局限性。被动式技术以零能耗为优势，主动式技术以强化效果可控见长，复合式技术以多机理协同为突破方向。工业应用中需依据流体特性、工况条件与经济性要求，合理选择单一或复合强化方案。未来，随着微纳制造与智能控制技术的发展，传热强化将向精细化、低能耗、自适应方向持续演进。

参考文献

[1] 吴龙飞, 吴珍. 紧凑式换热器结构设计与传热性能优化分析[J]. 中国科技期刊数据库工业 A, 2026(1):105-108.
[2] 金树峰, 张宏, 丁佰岑, 李鹏飞, 齐世豪. 板式换热器结构对力学及传热性能的影响[J]. 轻工机械, 2026, 44(2):92-99.
[3] 王子星, 陶文铨. 数据中心空气冷却器的通道传热强化技术研究[J]. 制冷学报, 2026, 47(1):105-112.
[4] 王宇, 李启明, 陈玉爽, 邹杨. 螺旋管式换热器管侧熔盐传热与流动阻力特性模拟研究[J]. 核技术, 2026, 49(5):205-217.