

炼油化工装置换热器结垢机理与清洗工艺改进研究

赵振辉¹ 李 松² 毕向阳³

1.山东裕龙石化有限公司 山东 烟台 265715

2.陕西延长石油（集团）有限责任公司延安石油化工厂 陕西 延安 727406

3.陕西延长石油（集团）有限责任公司延安石油化工厂 陕西 延安 727406

【摘 要】：炼油化工装置中的换热器是实现能量回收与热量传递的重要设备，其运行效率直接影响整个装置的能耗与经济性。长期运行中，由于介质中存在悬浮颗粒、盐类沉积、化学反应产物等因素，换热器表面易形成结垢层，导致传热性能下降、能耗增加及设备腐蚀加剧。本研究通过分析不同工况下结垢的物理化学机理，探讨结垢形成的影响因素及其动力学特征。在此基础上，对比传统化学清洗与物理清洗方法的优缺点，提出一种基于工艺优化与环保理念的清洗工艺改进方案。研究结果显示，该改进工艺在提高清洗效率、降低腐蚀率及减少停机时间方面具有显著优势，为炼油化工装置的节能运行与维护提供了技术支持与理论依据。

【关键词】：换热器结垢；传热效率；机理分析；清洗工艺；炼油化工装置

DOI:10.12417/2811-0722.26.01.027

引言

炼油化工装置作为能源密集型系统，换热器在其中承担着关键的热能交换与能量回收功能。然而，在高温、高压及多杂质介质环境下，换热器极易产生结垢问题，造成传热效率下降、运行成本上升及设备寿命缩短。结垢现象不仅影响生产的稳定性，还可能引发安全隐患。为实现节能降耗与延长设备寿命，深入研究换热器结垢机理并优化清洗工艺显得尤为重要。本研究旨在揭示结垢形成规律，探索适用于炼油化工装置的高效清洗工艺，以期为换热系统的稳定运行提供科学依据与技术支持。

1 炼油化工装置中换热器运行的热能传递特征与应用背景

炼油化工装置中的换热器在生产流程中承担着关键的能量传递与回收任务，其运行特性直接决定了装置整体的热效率与经济性。换热器通过冷热流体之间的热能交换，实现反应过程所需的温度控制与能量再利用，是节能降耗体系中的核心设备。由于炼油化工过程多涉及高温、高压及多相流体，介质的物理化学性质复杂，如含有重油、沥青质、胶质、盐类及悬浮颗粒等，这些因素使得传热表面的传热与流动状态极为复杂。传热过程不仅受热导率与流体动力学条件影响，还受到边界层温度梯度与污垢热阻变化的制约。换热器的传热性能通常以传热系数、热负荷及压降等指标来表征，而结垢层的生成会显著增加热阻，降低换热效率，从而使系统能耗上升。

在炼油装置中，常见的换热器类型包括管壳式、板式及螺旋板式换热器，它们在不同工艺环节中承担预热、冷凝、蒸发及热回收等功能。以原油预热系统为例，原油在进入常减压蒸馏塔之前，需要依次经过多个换热单元与回流物料进行热量交换，从而减少加热炉燃料消耗。此类系统的传热过程极为复杂，

热流体的流动状态、湍流强度及流体黏度变化都会影响换热效率。而长期运行中，油品中的无机盐在高温下分解生成的沉积物、胶质氧化产物及颗粒悬浮物极易在管壁表面附着，形成初始污垢层，进而演变为稳定的结垢结构。结垢层的存在改变了流体的流动边界条件，使局部传热恶化，引发温差应力及金属腐蚀，加速设备老化。

热能传递特征的变化不仅影响单台换热器的性能，还会对整个热集成系统造成连锁效应。换热器网络的能量分配与换热负荷平衡受到结垢的扰动后，系统需通过提高操作温度或增加流体流量来维持生产稳定，导致能耗显著上升。过高的壁温会加剧焦化与盐垢生成，使传热恶化进一步恶性循环。因此，在炼油化工装置中，理解换热器的传热机理及其在复杂介质环境下的运行特征，对于科学评估能量利用效率、优化热系统设计以及制定合理的清洗与维护策略具有重要意义。这为后续结垢机理研究与清洗工艺改进奠定了坚实的理论基础。

2 结垢形成的机理分析及其对传热性能的影响规律

炼油化工装置中换热器结垢的形成是一个受多因素耦合影响的复杂过程，其机理涉及流体力学、热传导、化学反应及相变行为等多学科领域。结垢通常可分为晶体沉积、颗粒沉积、化学反应生成及生物附着等类型，其中以无机盐类结垢和有机沉积最为常见。在高温工况下，流体中溶解度较低的盐类（如碳酸盐、硫酸盐、氯化物）因局部过饱和而析出，在传热表面形成晶核并逐渐生长。当壁面温度高于流体平均温度时，近壁层的温度梯度加剧溶解度降低，加速了晶体沉积的速率。而对于含有重质烃类的介质，氧化聚合产物及胶质、沥青质在热应力作用下会发生粘附与固化，使结垢层结构更加致密，附着力增强，清除难度显著提高。

在流动层面，流体的雷诺数、剪切应力及湍流特性对结垢

行为具有显著影响。当流动状态处于层流或弱湍流区间时,边界层厚度增加,传质速率下降,导致盐类或固体颗粒更易沉积。而在高剪切区域,部分沉积物可被流体冲刷剥离,形成动态平衡状态。然而,工业换热器的流道结构复杂,流体流速分布不均,使局部沉积无法完全清除,长时间运行后逐渐演变为稳定的结垢层。结垢层的多孔性结构及成分差异使其导热性能较低,其导热系数通常只有金属壁面的百分之一至千分之一,造成显著的热阻效应。

结垢的存在对传热性能影响极大。一方面,结垢层增厚使总传热系数降低,导致换热效率下降;另一方面,由于热阻增大,壁面温度上升,易引发金属过热、应力集中及材料疲劳。实验与工程数据表明,换热器壁面存在1毫米厚的结垢层即可使传热效率下降超过10%,同时能耗增加约15%。此外,结垢还会引起流道截面减小,导致压降上升、流体分配不均,进一步恶化热交换效果。结垢层中的腐蚀性物质或微电池反应还可能促发局部腐蚀,使设备失效风险上升。因此,从机理层面揭示结垢形成与传热退化之间的耦合规律,对于优化运行参数、改进清洗策略及开发防垢技术具有重要的理论与工程意义。

3 结垢问题引发的运行风险与效率损失机理研究

换热器结垢问题在炼油化工装置的长期运行中会引发一系列复杂的风险与效率损失,其影响不仅局限于热能传递过程的退化,更会波及系统的安全性、经济性与设备完整性。结垢层形成后,传热表面的热阻显著增加,导致传热驱动力减弱,为了维持工艺所需的出口温度,操作人员往往不得不提高加热炉负荷或提升工艺介质的流量,这会直接引起能耗上升与燃料消耗增加。由于结垢层的导热性能较差,壁面温度升高,加剧金属材料的热应力作用,使设备更容易出现鼓包、裂纹或局部失效。高温区的局部过热还可能促使有机物焦化或盐类分解,从而形成更致密的二次结垢层,使热阻效应呈非线性增长,进一步恶化传热性能。

在运行层面,结垢造成的流道截面缩小会使流体流速分布不均,局部形成滞流区与高压区,导致压降上升和系统循环阻力增大。这种变化会破坏原有的流体动力平衡,进而影响整个换热网络的热量分配,降低系统的热集成效率。由于压降增大,泵的能耗显著提高,同时局部高流速区域可能引起流体冲刷与气蚀现象,加速设备磨损。对于需要严格控制温度梯度的反应系统而言,结垢导致的温度分布不均可能使反应条件偏离设计范围,影响产品质量与反应选择性。若结垢导致温度监测信号失真或控制系统响应滞后,还可能诱发过程波动与安全事故。

此外,结垢问题还显著增加了设备维护与检修的频率。频繁的停机清洗不仅影响生产周期,还增加了人工、药剂及废液处理成本,对经济运行造成隐性损失。长期结垢造成的局部腐蚀和材料疲劳甚至可能引发泄漏、穿孔等重大故障,带来环境

污染与安全风险。从系统角度看,结垢引起的能效损失与风险具有累积性和放大效应,尤其在换热网络高度耦合的现代炼化装置中,一处换热效率的下降可能导致全系统热平衡紊乱。因此,研究结垢引发的运行风险与效率损失机理,有助于建立预测模型和预警体系,为实现换热系统的安全、稳定与高效运行提供理论支撑。

4 基于工艺优化的换热器清洗与防垢改进技术实践

针对炼油化工装置中换热器结垢频发、清洗周期短及能耗高等问题,近年来的研究与实践逐渐转向基于工艺优化的防垢与清洗技术改进路径。传统清洗方式以化学清洗和机械清洗为主,虽然能够在短时间内去除污垢,但存在清洗不彻底、腐蚀风险高、环境负荷重等缺陷。工艺优化的核心在于通过热力学、流体力学与材料科学的综合分析,从源头上抑制结垢的形成并提升清洗效率。针对不同介质特性,可通过调控工艺参数、优化流体分配及引入在线监测技术,构建动态防垢与清洗策略,实现设备长周期、稳定运行。

在工艺改进方面,通过调整流体流速与温度梯度可有效减少沉积物在传热表面的黏附几率。适当提高流速或改变流向可增强湍流强度,减薄边界层厚度,促进固体颗粒再悬浮,防止晶核生长与沉积。同时,利用换热网络的热集成优化,可在系统层面合理分配热负荷,避免局部过热造成结垢速率增加。对于含盐或含有机杂质的介质,工艺上可通过预处理措施,如脱盐、过滤、除渣等环节,减少进入换热器的结垢前驱物质,达到源头控制的目的。

清洗技术的改进则注重实现高效、低腐蚀和可持续的运行维护。现代化的在线清洗技术,如水射流脉冲清洗、气液两相冲击清洗以及柔性机械刮洗系统,能够在装置不停机状态下实现污垢的实时剥离,显著降低停产损失。化学清洗方面,采用复合型缓蚀清洗剂及可降解有机酸体系,可以在保证去垢效果的同时减少金属腐蚀与环境排放。此外,表面改性防垢技术也逐渐应用于换热器制造与改造中,通过采用疏水或低能表面涂层、等离子体处理等方法,降低结垢物质与金属界面的结合能,从而延缓污垢层形成。结合工艺优化与智能监测手段,换热器清洗与防垢技术正朝着自动化与精细化方向发展。通过在线监测温差、压降与传热系数的动态变化,可实时判断结垢状态,并利用数据驱动模型实现清洗时机预测与方案优化。这种基于工艺协同与技术集成的清洗防垢体系,能够有效延长设备运行周期,降低维护成本,并为炼油化工装置的节能运行提供可持续的技术支持。

5 换热器高效运行的技术发展趋势与未来研究方向

换热器的高效运行已成为炼油化工行业提升能效与实现绿色制造的重要方向。随着能源结构转型与环保标准的不断提高,传统依赖经验维护与周期清洗的运行方式逐渐被智能化、

集成化与材料创新相结合的技术体系所取代。未来的发展趋势体现在三个核心层面：运行优化的智能化、结构设计的强化以及防垢与节能技术的协同创新。通过多维度技术融合，换热器不仅承担传热功能，更将成为能量管理与过程优化的重要节点。

在智能化方向上，数据驱动的换热系统优化逐渐成为主流。基于实时监测的热参数数据，结合机器学习与预测模型，可以实现结垢速率预测、传热性能退化诊断与最佳清洗时机判断。通过构建换热系统数字孪生模型，可在虚拟环境中模拟不同操作工况下的热交换行为，为实际运行提供动态决策支持。自适应控制系统能根据工艺负荷变化自动调节流量、温度与清洗频率，从而维持最佳换热效率并降低能耗。这种以数据智能为核心的管理模式，为实现换热器的全生命周期优化奠定了基础。

在结构设计方面，新型高效换热器的研究重点正向强化传热与抑制结垢并重的方向发展。通过优化流道结构、增设扰流元件以及采用多通道复合流动形式，可增强湍流程度，提高流体与壁面的换热系数。材料领域的创新也为高效运行提供了新支撑，耐高温、抗腐蚀及低黏附性能的合金与复合材料正被广泛应用于传热管与板片制造。纳米涂层与表面微结构调控技术

的应用，使换热表面具备自清洁特性，能够显著降低结垢速率并延长设备使用寿命。

防垢与节能技术的融合也是未来的重要方向。通过在系统中引入可再生能源辅助换热、低温余热回收以及强化传热剂应用，可提升整体热能利用率。研究多尺度耦合的结垢动力学模型与实时防垢调控技术，将为精准防控结垢提供理论基础。未来的换热系统将呈现智能、自净、高效和可持续的特征，其发展趋势不仅关乎设备性能的提升，更关系到整个炼化化工装置能效优化与清洁生产的实现，为行业向高效节能与绿色低碳方向转型提供强有力的技术支撑。

6 结语

换热器作为炼化化工装置中能量传递与回收的关键设备，其运行效率直接影响装置的经济性与安全性。结垢问题贯穿设备全生命周期，是导致传热性能退化、能耗上升及运行风险增加的重要因素。通过对结垢机理、影响规律及清洗防控技术的系统研究，可以从工艺优化、材料改进与智能监测等多角度实现综合治理。未来的发展方向应聚焦于强化传热与防垢技术的协同创新，构建基于数据驱动的智能管理体系，实现高效、清洁与可持续的运行目标。持续推进换热器技术的研究与应用，将为炼化化工行业的节能降耗和绿色转型提供重要支撑。

参考文献：

- [1] 周庆宇. 炼油装置换热系统节能优化与防垢研究[J]. 石油化工设备, 2021, 50(3): 45-52.
- [2] 刘晓蕾. 化工换热器结垢机理与传热性能退化分析[J]. 化工科技, 2020, 48(7): 112-118.
- [3] 陈志航. 基于流体特性的换热器清洗工艺改进研究[J]. 过程工程学报, 2022, 22(4): 76-83.
- [4] 孙哲远. 炼化企业设备结垢控制与维护技术探讨[J]. 现代化工, 2019, 39(10): 98-104.
- [5] 郑嘉宁. 高效节能导向下的换热器防垢与清洗技术发展趋势[J]. 石油炼制与化工, 2023, 54(2): 67-73.