

换热器结垢问题分析及清洗技术优化

万其鹏

盛虹炼化(连云港)有限公司 江苏 连云港 222000

摘要: 换热器是工业热能交换体系的核心设备, 长期运行过程中受水质工况、流体流动、设备结构及运维方式影响, 内壁极易形成各类附着污垢, 干扰介质流通与热量传递过程。不同类型污垢的成型规律与附着特性存在差异, 对设备运行产生的负面影响各不相同。本文结合换热器结构特点与结垢形成机制, 区分各类污垢的形态特征与生成诱因, 系统梳理传统物理、化学清洗技术的固有局限与工艺短板, 从清洗方式适配、参数细化、工艺融合、常态化防控多个维度优化清洗方案, 进一步提升换热器污垢清理的精细化与规范化水平。

关键词: 换热器; 结垢机理; 污垢类型; 清洗技术; 工艺优化

引言: 工业生产体系持续运转过程中, 换热器始终保持高频连续运行状态, 内部介质所含杂质会在温度变化与流体运动作用下不断聚集附着, 逐步形成稳定垢层。结垢问题属于设备运行中的常见通病, 会持续改变换热通道结构与壁面导热性能, 影响设备运行稳定性。传统清洗方式多依托经验开展作业, 工艺适配性不足、清洗盲区较多, 难以彻底解决复杂结垢问题。深入梳理结垢成型机理, 优化现有清洗工艺体系, 能够有效改善设备结垢堆积状况, 保障工业换热设备长期稳定运行。

1 换热器结构特性与结垢基础机理

1.1 换热器基本结构与换热工作原理

换热器是工业换热系统中的核心换热设备, 整体结构由换热腔体、换热壁面、介质流通通道、进出口管路等基础构件组成。不同功能类型的换热器在结构布局上存在差异, 换热壁面多采用薄壁金属材质, 具备良好的导热性能, 可满足热量传递的基本需求。设备内部划分独立介质流通空间, 冷热两种流体可以在互不掺混的前提下完成热量交换^[1]。设备运行过程中, 高温流体携带的热量会通过金属壁面传导至低温流体, 依靠温差作用实现热能的定向传递。结构布局直接决定流体流动状态与热量传递效率, 紧凑的通道结构可以提升换热效率, 也会对介质流通造成一定约束, 为污垢堆积创造基础条件。稳定的结构运行状态, 是设备持续完成换热作业的前提。

1.2 换热器介质运行与壁面接触特征

换热器内部介质多为工业循环水、工艺流体等介质, 流体内部普遍含有微量悬浮物、矿物质微粒与胶体杂质。介质在通道内部持续流动, 会与换热壁面保持长期、高频的接触状态。流体流速在通道内部并非均匀分布, 边角区域、弯道区域以及流速滞缓区域的流体活跃

度更低。流动缓慢的介质会让内部杂质脱离流体悬浮状态, 逐步贴近金属壁面。换热作业持续进行时, 壁面长期处于温差交变状态, 温度变化会改变介质内部杂质的物理稳定性, 促使微粒逐步聚集、附着。壁面金属材质的表面粗糙度, 也会降低杂质附着难度, 让微小颗粒更容易停留、堆积在壁面表层。

1.3 换热器结垢形成的基础机制

换热器结垢属于循序渐进的物质堆积过程, 依托介质流动、温度传导、壁面附着多重条件。介质流经换热通道时, 温度升高会降低水中矿物质的溶解能力, 溶解态物质逐步转化为固态微小晶粒。晶粒随流体持续运动, 在流速较低的区域发生聚集, 依附在换热壁面表层完成初始附着。初始附着的微小颗粒会改变壁面表面状态, 增大壁面粗糙程度, 后续流动的杂质颗粒会更容易完成叠加堆积。随着设备长时间连续运行, 薄层堆积物不断增厚、压实, 逐步形成质地坚硬、结构稳定的垢层。垢层持续覆盖换热壁面, 改变设备原有换热结构与流通条件, 对设备后续运行状态产生持续影响。

2 换热器结垢主要类型与生成诱因

2.1 换热器常见结垢种类与形态特征

换热器长期运行过程中会产生多种类型的污垢, 不同污垢的物质成分、物理形态和附着特性存在明显区别。结晶污垢多源于流体中矿物质析出, 整体质地坚硬、结构致密, 紧密附着在换热壁面, 不易发生脱落。沉积污垢由流体内部悬浮杂质、泥沙颗粒堆积形成, 结构相对松散, 多分布于流体流速偏低的通道区域。腐蚀污垢产生于设备金属壁面与介质的化学反应, 伴随设备腐蚀产物堆积生成, 附着位置多集中在壁面破损区域。生物污垢由微生物代谢物质、菌群群落积聚形成, 质地偏黏, 容易裹挟各类杂质共同附着壁面^[2]。各类污垢的物

理特性差异,会对换热器流通状态和换热效果造成不同程度的干扰。

2.2 水质环境引发的结垢生成因素

流体水质条件是推动结垢生成的关键外在条件,水体内部所含矿物质、胶体颗粒与悬浮杂质,为污垢堆积提供物质来源。水体硬度偏高时,钙镁盐类物质会在换热升温过程中逐步析出,不断在壁面聚集生长。水体浑浊度偏高,会提升固体颗粒含量,增加杂质沉降堆积的概率。水体酸碱数值出现波动,会改变杂质物质的稳定状态,加速微粒凝聚成团。水体中微生物含量超标,会在适宜温度环境下持续繁殖,逐步形成生物附着层。水质状态出现异常波动,会持续改变结垢生成速度,加快换热通道内部污垢的积累进程。

2.3 设备运行工况诱发的结垢问题

设备运行工况的动态变化,会持续改变结垢的生成速度与堆积规模。换热过程中的温度提升,会打破水体矿物质的溶解平衡,促使可溶性物质转化为固态沉积物。流体流速处于偏低区间时,杂质受到的水流冲击作用减弱,沉降与附着概率大幅提升。设备持续高负荷运行,会让换热壁面长期处于高温状态,进一步强化物质析出与堆积现象。运行负荷频繁波动,会造成壁面温度反复变化,让污垢结构不断压实增厚,提升附着稳定性。工况参数的不合理变动,会持续加剧结垢现象,加重设备内部污垢堆积程度。

2.4 设备结构与运维方式带来的结垢隐患

换热器自身结构设计特点,会形成多处易结垢区域。通道结构狭窄、管路弯折过多的部位,流体流通阻力更大,流速衰减明显,杂质更易滞留堆积。壁面粗糙程度较高的结构表面,可为微粒附着提供附着支点,降低污垢初始成型难度。日常运维工作的疏漏会持续放大结垢问题,常规清理工作落实不到位,会让初期薄层污垢持续累积增厚。运维巡检频次不足,难以及时发现轻微结垢迹象,任由污垢不断发育成型。运维流程的粗放管理,会让各类结垢隐患不断积累,逐步发展为影响设备运行的厚重垢层。

3 换热器常规清洗技术及现存短板

3.1 物理清洗技术应用方式与技术特点

物理清洗是换热器除垢的常用技术手段,依靠机械作用力剥离设备内壁附着污垢的结构,作业过程不掺入化学药剂。常见技术形式涵盖高压水射流清洗、机械刷洗、超声波清洗。高压水射流通过高速水流冲击,冲刷去除换热壁面松散垢层,适用于大面积通道污垢清理。机械刷洗利用专用清洁工具伸入管路内部,借助物理摩

擦去除固化沉积物,处理局部堆积的厚重垢体。超声波清洗依托声波振动产生的微观剥离效果,去除细微杂质与薄层污垢,适配结构精密、管路狭窄的换热设备^[3]。技术作用形式纯粹依靠物理外力,不会改变设备材质性质,作业过程不会对金属壁面造成化学损伤。

3.2 化学清洗技术应用方式与技术特点

化学清洗通过专用化学药剂与污垢成分发生化学反应,分解溶解固化垢体,实现除垢效果。作业过程可根据垢质成分选用酸洗、碱洗、中和漂洗等方式,针对性分解钙镁结晶沉积物与腐蚀污垢。药剂在管路内部循环浸润,渗透垢层内部结构,瓦解致密硬化的垢体,促使污垢逐层溶解脱落。这类清洗方式能够深入设备缝隙与狭小死角,处理物理清洗无法触及的隐蔽污垢,对长期堆积的硬质厚垢作用明显。作业无需布设大型机械结构,操作步骤简洁,可适配多种复杂换热器结构形式。

3.3 常规清洗技术适用场景与固有限制

物理清洗更适配质地松散的沉积污垢,面对附着紧密、硬度较高的结晶垢与腐蚀垢,剥离能力存在明显不足。弯折管路 with 狭窄通道会限制器械作业范围,设备内部易形成清洗盲区。化学清洗对硬质顽固垢层清理效果突出,药剂接触金属壁面会产生轻微腐蚀作用,多次重复作业会逐步损耗设备结构。化学作业产生的废液需要专项处理,处置流程工序繁杂。两类常规清洗方式仅能对已有垢层做清除处理,无法干预污垢沉积过程,设备运行后污垢会再次逐步堆积。

3.4 清洗作业流程与工艺匹配存在的问题

换热器清洗作业选型多依赖现场人员经验,未结合设备结构、垢质类别、垢层厚度制定对应清洗方案。固定单一的清洗工艺反复套用,忽视设备不同区域结垢程度的差异性,出现局部清洗不彻底、局部清洗过度的情况。清洗工序排布缺乏科学规划,预处理、清洗作业、后期核查等工序落实不到位。水流压力、药剂浓度、作业时长等关键参数设置随意,参数标准与现场实际工况脱节。清洗作业缺少统一的细化执行标准,作业管控力度不足,设备内部污垢残留问题频繁出现。

4 换热器清洗技术优化与工艺改进路径

4.1 清洗方式的适配性优化调整

换热器清洗作业需要摆脱固定化的作业思维,根据设备结构、通道形式、污垢成分与堆积状态选择对应的清洗手段。水体悬浮物沉积形成的疏松污垢,可以采用高压水射流方式处理。水流冲击作用能够剥离表层堆积杂质,减少硬性机械摩擦对管壁造成的结构损伤。精密管路与细小通道内壁附着的薄垢,适合采用超声波清

洗工艺。声波振动作用可以剥离细微颗粒杂质,清理常规手段难以触及的缝隙污垢。管壁附着紧密、质地坚硬的结晶垢与腐蚀垢,可采用化学清洗手段处理。药剂反应能够逐层瓦解致密垢体,去除长期堆积形成的顽固沉积。不同设备的管路弯折程度、流通孔径、材质属性存在差异,作业前需要区分大面积主体区域和结构复杂的死角区域^[4]。依据实际结垢情况灵活选用单一工艺或组合工艺,提升清洗作业与设备工况的匹配程度,解决污垢残留、清理不彻底的问题。

4.2 精细化清洗工艺参数优化思路

清洗工艺参数的合理设定能够提升作业精细程度,减少清洗过程对换热器的负面作用。物理清洗作业阶段,结合管壁厚度与垢体密实状态调整水流压力大小。压力数值控制在合理区间,保证垢层顺利剥离的前提下,避免高压冲击磨损金属内壁。根据管路通径调整水流喷射角度和喷射距离,让水流覆盖完整流通截面,减少局部漏洗区域。机械清洗作业控制刷头转速与推进速度,按照垢层厚度循序渐进完成清理,避免粗暴作业刮伤壁面结构。化学清洗作业阶段,参照垢质组分调配药剂浓度,合理控制药剂循环浸润时长。保证药剂与污垢充分反应,适当缩减药剂在设备内部的停留时间,降低化学腐蚀带来的结构损耗。摒弃完全依靠经验的参数设定方式,结合设备运行状态建立标准化参数区间,让每一次清洗作业都具备稳定的执行依据。

4.3 复合式清洗技术融合应用方案

单一清洗技术存在明显短板,单一工艺很难兼顾复杂工况下的除垢质量与设备保护需求。多重工艺组合的复合清洗模式可以弥补各类技术的应用缺陷。作业流程可以设置分层处理步骤,先以高压水射流完成表层松散污垢清理,暴露底层固化垢体与局部沉积区域。再利用适配药剂开展化学清洗,溶解硬质垢层,瓦解垢体堆积结构,处理管路死角与细微缝隙中的隐蔽污垢。化学工序结束后,再次引入清水冲洗流程,带走残留药剂与脱落垢渣,避免药剂滞留引发二次腐蚀问题。结构精密的板式换热器,可以采用超声波预处理搭配循环漂洗的作业模式,提升细小通道的清洁效果。不同技术依次分

工配合,逐层完成表层清理、深层除垢、残渣冲洗等工序,适配复杂结垢工况的实际清洗需求。

4.4 建立结垢前置防控与常态化清洗体系

结垢治理工作需要兼顾过程防控与定期清理,改变重清洗、轻预防的运维习惯。日常运行阶段加强循环水质管控,稳定水体硬度与悬浮杂质含量,减少矿物质析出和微粒沉降的物质来源,从源头缓解污垢堆积速度。结合设备运行负荷变化,掌握污垢积累节奏,制定贴合设备运行规律的清洗周期。在薄层污垢初步形成阶段开展清理工作,避免垢层持续压实硬化,降低后续深度清洗的作业难度。设备高负荷运行阶段缩短清洗间隔,常规运行阶段保持稳定的清洗频次^[5]。规范清洗作业的完整流程,统一预处理、清洗操作、残渣清理、设备核查的执行标准。完善运维记录台账,留存清洗工艺、作业参数、垢质情况等信息,积累适配设备自身特点的运维经验,持续优化现场清洗作业质量。

结束语

换热器结垢是水质环境、运行工况、设备结构与运维模式共同作用形成的综合性问题,各类传统清洗工艺存在适配性差、清理不彻底、易损伤设备的各类缺陷。通过匹配结垢类型灵活调整清洗方式、细化优化作业工艺参数、融合多类清洗技术形成复合工艺,可有效弥补单一清洗手段的应用短板。搭配前置防控与常态化运维清洗体系,能够从源头缓解污垢堆积问题,持续优化换热器运行工况,稳固工业换热系统的运行质量。

参考文献

- [1]高磊,王云,牛鸿权,等.列管式换热器结垢特性及在线清洗技术优化研究[J].山东化工,2026,55(1):172-175,180.
- [2]张仁华,王成.乳制品加工设备结垢与清洗综述[J].中国乳业,2023(8):110-118.
- [3]赵晓刚.换热器结垢和清洗方法研究[J].石油石化物资采购,2024(4):26-28.
- [4]时盼盼,曹琦,任永辉.换热站板式换热器在线清洗法应用及案例分析[J].科技与创新,2025(8):94-96,101.
- [5]李响,刘峰,刘张.板式换热器在供热系统中结垢处理及效果分析[J].电力与能源进展,2022,10(2):11-18.