

化工产品回收厂荒煤气冷凝系统腐蚀机理、防护措施及经济性分析

刘华贇 (山西焦化, 山西 临汾 041606)

摘要: 本文针对 20-80℃、0.1-0.3MPa 运行的化工产品回收装置荒煤气冷凝系统, 开展腐蚀现状与机理、材料药剂组合优化及寿命周期成本评估。以山西临汾焦化厂为案例, 识别出冷凝塔与循环水管系在弱酸含硫环境中以均匀腐蚀、点蚀为主导, 建立腐蚀速率与 H₂S 浓度、pH、流速的联动关系。研究表明该组合平衡投资与运维, 具备同类条件推广可行性。

关键词: 荒煤气冷凝系统; 腐蚀机理; 缓蚀剂; 玻璃钢衬里; 寿命周期成本

中图分类号: TQ055.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 010-0088-03

Corrosion Mechanism, Protection Measures and Economic Analysis of Condensing System of Waste Gas in Chemical Product Recovery Plant

Liu Huayun (Shanxi Coking, Linfen Shanxi 041606, China)

Abstract: This study investigates the corrosion status and mechanisms, material-reagent combination optimization, and lifecycle cost assessment of the raw gas condensation system in chemical product recovery units operating at 20-80 °C and 0.1-0.3 MPa. Using Linfen Coking Plant in Shanxi Province as a case study, the research identifies uniform corrosion and pitting corrosion as the predominant mechanisms in the weakly acidic sulfur-containing environment of the condensation tower and circulating water piping system. A correlation between corrosion rate and H₂S concentration, pH, and flow velocity was established. The findings demonstrate that this combined approach balances investment and operational maintenance, showing feasibility for widespread application under similar conditions.

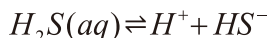
Keywords: waste gas condensation system; corrosion mechanism; corrosion inhibitor; FRP lining; life cycle cost

荒煤气冷凝系统因 H₂S 等组分形成低 pH 高剪切腐蚀环境, 碳钢易腐蚀停机。既有研究难耦合介质-材料-参数及经济性。本文以临汾焦化厂为例, 构建腐蚀机理, 提出材料升级、缓蚀剂选型与工艺协同方案, 构建寿命周期成本模型比较, 提供可落地治理路线。

1 化工产品回收厂荒煤气冷凝系统腐蚀现状与机理分析

选取某焦化厂化工产品回收装置的荒煤气冷凝系统作为研究对象, 系统由冷凝塔、碳钢管道以及列管换热器构成, 在 20-80℃ 与 0.1-0.3MPa 下运行。进一步观察发现, 腐蚀集中于冷凝塔内壁与循环水管道法兰接口, 形态表现为均匀腐蚀、局部点蚀以及受残余应力叠加的应力腐蚀开裂, 现场统计年腐蚀速率约 0.5 mm/a。需重点关注的是, 荒煤气中的 H₂S、NH₃ 与 HCN 溶于冷凝液后生成酸性或弱酸性物种, 叠加 20-40℃ 的析酸敏感区与 pH4-6 的环境, 把碳钢的阳极溶解与膜破坏过程持续驱动, 同时高速流经弯头的剪切应力把初生膜反复剥离, 形成流动加速腐蚀。由此推导, 在 100-500 mg/m³ 的入口 H₂S 浓度区间内, 腐蚀速率与 H₂S 浓度呈单调正相关特征, 温度与 pH 的联

合作用会把该相关性进一步放大, 见图 1。



其中, H₂S(aq) 表示溶解态硫化氢, H⁺ 为氢离子, HS⁻ 为氢硫根离子。

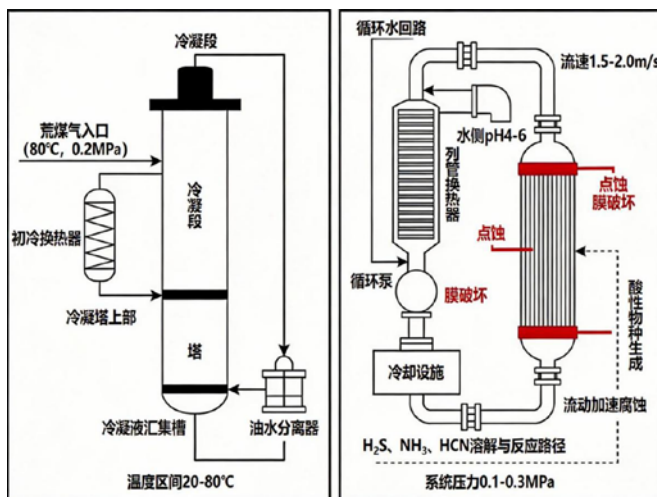


图 1 荒煤气冷凝系统工艺流程示意图

2 荒煤气冷凝系统腐蚀防护措施优化

2.1 材料升级方案设计

鉴于案例厂荒煤气冷凝系统存在 H₂S 浓度 100-500 mg/m³ 与 pH4-6 的酸性液相环境, 本研究把材料

表 1 不同材料在荒煤气冷凝系统中的耐蚀性能对比表

| 材料名称 | 适用部位 | 介质适配范围 | 预测腐蚀速率 mm/a | 预计使用寿命年 | 关键性能说明 |
|----------|------------|---|----------------|---------|--------------------------|
| 碳钢 | 冷凝塔塔体与普通管段 | H ₂ S 100 - 200 mg/m ³ , pH 5 - 6, 温度 ≤ 60 °C | 0.40 - 0.60 | 2 | 阳极溶解显著, 易发生点蚀, 维护频繁 |
| 316L 不锈钢 | 支路管线与连接件 | H ₂ S 100 - 300 mg/m ³ , pH 5 - 6, 温度 ≤ 80 °C | 0.10 - 0.20 | 6 | 均匀腐蚀受控, 点蚀抗力中等, 施工便利 |
| 双相不锈钢 | 主干管与换热器壳侧 | H ₂ S 100 - 500 mg/m ³ , pH 4 - 6, 温度 ≤ 80 °C | 0.05 - 0.10 | 10 | 点蚀抗力高, 抗应力腐蚀能力强, 强度与刚性优良 |
| 玻璃钢衬里 | 冷凝塔内壁与液相区 | H ₂ S 100 - 500 mg/m ³ , pH 4 - 6, 温度 ≤ 90 °C | 金属基体流失 ≈ 0 | 8 - 10 | 屏障隔绝介质, 渗透率低, 检修便捷与周期长 |

升级作为抑制均匀腐蚀与点蚀的核心路径, 并且兼顾应力腐蚀风险与施工可实施性。对比现役碳钢与候选材料, 碳钢在该介质下的阳极溶解速率较高且保护膜易被流动剪切破坏, 难以维持稳定服役周期。双相不锈钢是一类铁素体与奥氏体双相组织的合金, 因具有较高的点蚀抗力等指标, 能在含硫环境中把局部腐蚀显著降低。316L 不锈钢在低氯含量条件下耐蚀性可接受, 但在低 pH 与硫化物存在时对点蚀的抑制能力弱于双相钢。玻璃钢衬里以乙烯基酯体系为主, 依靠致密屏障层来隔绝介质, 对冷凝塔液相区的溶蚀与渗透有明显抑制作用。

从工艺适配角度来看, 塔体内壁宜选用玻璃钢衬里以获得低渗透与易维护的综合效益, 循环管道与换热器壳侧宜选用双相不锈钢来承受流速与温度的联合作用, 低负荷支路与非关键连接部位可把 316L 当作经济替代材料来使用。为经济性分析提供定量支撑, 结合现场腐蚀特征与候选材料的介质适配范围, 给出在相同工况下的预测腐蚀速率与使用寿命区间, 其中碳钢服役约 2 年, 双相不锈钢可达 10 年, 316L 与玻璃钢衬里处于 6-10 年的区间, 并且在塔体液相区玻璃钢衬里更契合长期运行的维护策略。

2.2 缓蚀剂选型与投加工艺优化

鉴于案例厂荒煤气冷凝系统液相呈弱酸性且含硫显著, 本研究把有机膜成型缓蚀剂作为主选路径, 聚焦咪唑啉类与有机胺类的协同机理。咪唑啉类依靠极性头基在金属表面进行定向吸附并构建疏水致密膜, 用来抑制阳极溶解与阴极去极化过程; 有机胺类通过中和酸度并提供界面活性支撑, 把局部点蚀敏感区的反应速率降低。结合 H₂S 浓度在 100-500 mg/m³ 与 pH 为 4 至 6 的介质特性, 确定以静态挂片试验为选型依据, 将咪唑啉类在 200 ppm 条件下的目标缓蚀效率设定为 90%, 并把胺类剂作为辅助调理剂以稳定膜层与黏附性。考虑冷凝段温度在 20 °C -80 °C 波动, 为减少膜层剥离风险, 还对黏度与浊点进行约束, 使其在低温侧不发生析出, 同时限定氯离子质量浓度低于 50 mg/L 以降低膜层穿孔概率^[1]。

面向投加工工艺优化, 体系需要在汽液两相交汇且剪切充分的位置建立主投加点, 优先布置在冷凝前气相主管与塔顶回流支路, 并在循环水回水总管设置补充投加点, 用来提高整体分布均匀性。计量方式选用按流量比例的连续投加, 常态剂量控制在 80-200 ppm, 启停与负荷波动期采用时长不超过 2h 的脉冲投加, 剂量上限 300ppm。为保障混合效果, 把静态混合器或再循环旁路引入关键节点, 使接触停留时间不低于 3min, 同时监测水侧有效胺残留在 5-10 mg/L 的区间, 用作投加调节的反馈信号。需重点关注与消泡剂以及破乳剂的相容性, 避免相界面被稳定或被破坏而引起含油冷凝液分离效率下降; 在不锈钢与玻璃钢衬里共存的设备内, 优选低溶剂型配方, 溶剂体积分数不高于 10%, 以降低衬里溶胀风险。

2.3 工艺参数调整与系统结构改进

鉴于案例厂荒煤气冷凝系统在 20 °C -80 °C 范围内运行且液相呈弱酸性, 本研究把工艺参数与结构要素联动优化作为切断流动加速腐蚀与点蚀扩展的路径。现状显示, 低 pH 会把金属阳极溶解速率提升并促使保护膜持续破坏, 过高流速会把剪切应力与传质系数同步抬升, 而冷凝水温度波动会放大相界面扰动与膜层剥离。由此提出把循环水 pH 提高至 7-8, 通过碱度调节与在线控制实现稳定缓冲, 同时把关键支路与弯头的流速降至 1.5 m/s 以下, 并把塔内液相停留时间维持在合理区间以减弱冲刷。结构改进方面, 管道选用长半径弯头与等径扩散段来平滑流场, 把无缝焊接与全焊透工艺用于高剪切节点以降低缝隙滞留与缝隙腐蚀, 把换热器壳侧增设导流板与整流格栅以均匀入口分配并削减管束前端的冲击区。针对塔体与回流支路, 把喷淋分配器进行重新布置并采用多孔分配盘来实现均匀液膜, 把低速区的死角通过导流舌与泄液槽进行消除, 从而减少微滞留与酸性富集。运行层面, 建立按负荷联动的阀门节流与泵速调度, 把在线 pH 与流速信号作为投加与调度的主反馈, 设定腐蚀速率控制目标为 0.1 mm/a, 并且以稳定的参数窗口支撑材料与缓蚀剂方案的长期适配^[2]。

3 防腐措施的经济性分析与效果评估

3.1 防腐措施的成本构成分析

鉴于案例厂荒煤气冷凝系统拟实施材料升级与投加工工艺完善,本部分把成本构成按一次性投资与年度运维两类来开展分解,以便为寿命周期成本计算提供可信输入^[3]。一次性投资方面,材料升级采购与安装合计50万元,覆盖主干管选用双相不锈钢与冷凝塔内壁玻璃钢衬里;为匹配新材的施工与设备接口,还包含焊接工艺优化与法兰改造,按12万元计入安装性改造费用。缓蚀剂计量与混合系统改造需要新增计量泵、静态混合器与旁路管线,按10万元计入投加设施投资;在线pH与流速监测的仪表与信号采集模块按6万元计入自动化与监测投资。

年度运维方面,把缓蚀剂采购费用按8万元计入,并把维持pH 7至8所需碱度补充折算为3万元的化学品消耗;流速下调与泵速联动带来电力成本下降,按每年节约2万元计入能耗变动;静态混合器与计量泵维护及备件消耗按0.5万元计入设备维护;在线监测系统标定与数据服务按1.5万元计入监测维护;对玻璃钢衬里进行周期性面层修补与检视按1万元计入材料维护。为建立对比基线,还把未升级碳钢系统的常规检修与漏点处理费用按每年20万元记录,用作后续方案对比的参考。上述数据将被用于10年期寿命周期成本的参数化计算,并与前述材料适配与工艺优化方案在同一工况下形成一致性评估框架。

3.2 寿命周期成本(LCC)计算与对比

基于寿命周期成本法来开展经济性评估,本节把成本现金流划分为初始投资、年度运维支出与停机维修损失,并在统一折现率与评估年限下进行现值换算,以获得可比较的总成本。为保证三种方案在同一边界条件下可比,评估年限取10年,折现率按资金加权成本选取,同时把末期残值作为负向成本在第10年进行计入,从而反映材料寿命与可再利用价值对总成本的影响。

$$LCC=C_0+\sum_{t=1}^n \frac{C_t+D_t-S_t}{(1+r)^t}$$

其中,LCC表示寿命周期成本总额, C_0 为初始投资现值, C_t 为第t年运维支出, D_t 为第t年停机与维修损失, S_t 为第t年残值抵扣,r为折现率,n为评估年限。所有金额以万元计,并按同一价格基期进行折现处理,保证横向可比性与口径一致性^[4]。

从案例厂介质与工况约束出发,对碳钢加缓蚀剂、双相不锈钢、玻璃钢衬里加缓蚀剂三类方案建立年度现金流序列并完成折现,10年期结果显示三者的寿命周期成本分别为120万元、150万元与110万元。

3.3 防腐效果的现场验证与效益评估

围绕最优方案玻璃钢衬里加缓蚀剂的组合,本研究在装置达产后设定12个月观察窗口,采用在线腐蚀探针与定期挂片的双通道监测,并把pH与流速的过程信号同步纳入数据整合。结合20℃-80℃的运行波动区间,腐蚀速率稳定在0.08 mm/a,塔体与循环水管系未出现新生漏点,年度检修频次由5次降至1次,换热端的压降与传热系数波动保持在可接受范围,说明膜层完整性与衬里屏障效应在汽液交汇区仍然可维持。需注意在负荷快速升降阶段控制剂量响应时延,把剪切应力峰值下的膜层修复能力维持在安全边界之内,从而避免局部点蚀萌发^[5]。

把上述运行表现转化为经济指标,可见年维修工时与备件更换规模同步缩减,直接维修费用年均节约约15万元,同时因停机时长缩短而带来的机会成本下降在年度总成本中形成附加收益。依据材料劣化速率与检修间隔的联动关系,设备预期寿命较基线延长约8年,塔体与关键管段的大修周期得以外推,库存与应急资源占用随之回落。与寿命周期成本对比的排序保持一致,该组合在初始投资与运行支出之间取得更为均衡的结构,使长期现值在约束条件下更低,并把运行稳定性与可实施性同时纳入工程边界,适宜在相同介质特性与负荷特性的冷凝系统进行复制应用。

4 结语

围绕含硫弱酸环境引发的膜破坏与点蚀扩展,本文把材料屏障、化学抑制与工况整定进行协同配置,形成玻璃钢衬里与缓蚀剂的组合方案,并辅以pH与流速窗口控制与关键结构整流。经与碳钢加缓蚀剂及双相不锈钢方案的十年期成本对比,该组合在总现值与运行稳定性方面表现更优,现场监测显示腐蚀速率与维修频次显著回落且年费用支出降低。研究仍受个体工况与负荷波动的限制,后续可引入更高频的在线腐蚀监测与数据驱动的剂量控制,把模型与现场的闭环校准做得更为稳健。

参考文献:

- [1] 温琛,李东虎.新形势下焦化企业节能降耗的生产实践[J].山西冶金,2025,48(11):246-249.
- [2] 王浩然,刘树娟.焦炉荒煤气余热回收装置上升管的性能优化研究[J].石油工程建设,2025,47(11):59-61.
- [3] 李义超,田宝龙,穆传冰,等.焦炉荒煤气余热回收利用方式选择分析[J].煤化工,2025,53(05):50-54.
- [4] 卢文龙.荒煤气显热回收技术在中南股份焦炉生产中的应用[J].南方金属,2025,(05):100-101+55.
- [5] 焦炉荒煤气重整气余热锅炉与干熄焦锅炉耦合发电系统[J].燃料与化工,2025,56(S1):23.