

化工设备换热器的常见腐蚀及优化经济性分析

孙利根 (江苏佳安安全科技有限公司, 江苏 盐城 224000)

摘要: 换热器腐蚀问题是当下化工生产中的一个突出难题, 直接威胁设备长周期安全运行并影响经济效益。本文重点剖析了换热器常见腐蚀类型, 包括电化学腐蚀、化学介质腐蚀及物理因素腐蚀, 对其作用机理与关键影响要素进行梳理。在此基础上, 从选材、表面处理、工艺调控与结构优化等维度, 提出具有针对性的防腐策略。此外, 研究还构建了经济性评估框架, 对各项措施的初期投入、运维成本及潜在风险进行综合分析, 以为化工企业在设备管理决策中平衡技术可行性与经济性提供参考。

关键词: 化工设备; 换热器; 腐蚀机理; 防治措施; 经济性分析

中图分类号: TQ050.9 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2026) 005-0095-04

Common Corrosion of Heat Exchangers in Chemical Equipment and Analysis of Optimizing Economic Performance

Sun Ligen (Jiangsu Jia'an Safety Technology Co., Ltd., Yancheng Jiangsu 224000, China)

Abstract: Corrosion of heat exchangers is a prominent problem in current chemical production, directly threatening the long-term safe operation of equipment and affecting economic benefits. This paper focuses on analyzing the common types of corrosion in heat exchangers, including electrochemical corrosion, chemical medium corrosion, and physical factor corrosion, and summarizes their action mechanisms and key influencing factors. Based on this, targeted anti-corrosion strategies are proposed from aspects such as material selection, surface treatment, process regulation, and structural optimization. In addition, an economic performance assessment framework is constructed to comprehensively analyze the initial investment, operation and maintenance costs, and potential risks of various measures, with the aim of providing a reference for chemical enterprises in making equipment management decisions to balance technical feasibility and economic performance.

Keywords: Chemical equipment; Heat exchanger; Corrosion mechanism; Prevention measures; Economic performance analysis

在现代化工生产中, 换热器承担着工艺介质间热量交换的关键职能, 其应用遍及石油炼制、化肥、精细化工等诸多领域。一台换热器的性能优劣, 往往直接决定着整个装置的运行效率、能耗指标与安全平稳性。然而, 化工生产环境通常极为严苛, 高温、高压且介质成分复杂, 这使得换热器成为最容易因腐蚀而发生故障的设备之一。有统计数据显示, 在化工设备各类故障中, 腐蚀原因导致的失效占比超过 30%, 其中换热器的问题尤为典型和集中。腐蚀所带来的后果, 轻则导致设备穿孔、介质泄漏, 造成直接损坏; 重则可能引发工艺紊乱、生产中断, 甚至酿成火灾、爆炸等灾难性事故, 给企业带来难以估量的经济损失与安全威胁。因此, 如何针对换热器的腐蚀问题, 科学地选择一种既经济有效又防护可靠的策略, 已成为保障化工企业安全稳定运行的重要课题^[1]。

1 化工设备换热器常见腐蚀类型与机理分析

1.1 电化学腐蚀

电化学腐蚀是引发化工换热器设备腐蚀中最普遍也是腐蚀强度最大的腐蚀类型, 腐蚀机理主要是金属表面与电解质溶液接触发生的电化学反应导致金属材料

的破坏。当换热器工作过程中金属表面会产生许多微观的阴阳极区域, 形成一个完成的腐蚀电池, 在阳极会发生如 $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ 所示的金属溶解反应, 而在阴极区域则发生如 $\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$ 所示的氧还原反应或是如 $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ 所示的氢离子还原反应。上述的电化学反应在换热器内部长期持续反应最终导致换热器金属材料腐蚀故障。

电化学腐蚀对化工设备的腐蚀速率受到很多因素的影响, 其中主要包含介质的成分、温度以及在设备中的流速等。在换热器循环液中的一些 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等阴离子通常具有较强的侵蚀性能破坏化工设备表面的钝化膜进而加剧了电化学腐蚀的速率。据统计, 循环液中的 Cl^- 从 50mg/L 升高至 200mg/L 时, 金属的腐蚀速率可增高 2-3 倍, 当温度每升高 10℃ 时腐蚀速率也会成倍增加。同时设备运行过程中循环液的流速也会对设备产生一定的冲刷腐蚀, 尤其是在换热器管道的弯头或变径处腐蚀显著^[2]。

1.2 化学介质腐蚀

化学介质腐蚀是化工设备换热器常见腐蚀的另一个重要因素。不同化学介质性质不同产生的腐蚀类型

和破坏程度也不同。氯离子腐蚀是化工换热器面临的另一严峻挑战。氯离子具有体积小、穿透力强的特点，能够穿透金属表面氧化膜，引发点蚀和缝隙腐蚀。在含氯环境中，奥氏体不锈钢换热器特别容易发生应力腐蚀开裂，这种破坏通常在没有明显预兆的情况下突然发生，造成灾难性后果。研究表明，当 Cl^- 浓度超过 100mg/L 、温度高于 60°C 时，304 不锈钢换热管发生应力腐蚀开裂的风险显著增加。氨腐蚀则主要发生在化肥生产和相关化工装置中，特别是在存在氧和铜离子的条件下，氨会与铜合金材料形成可溶性的铜氨络合物，导致铜合金换热管快速减薄失效。某化肥企业变换装置汽提塔预热器的失效分析显示，硫化氢铵 (NH_4HS) 在壳程流动死区内富集，造成了列管外壁的严重腐蚀穿孔。

除了上述常见化学介质腐蚀外，现代化工生产中还会遇到一些特殊介质腐蚀问题。例如，在煤化工和石油化工装置中，换热器可能接触含有有机酸、氰化物、酚类等复杂成分的介质；在精细化工和制药行业，则可能面临含氟、含溴等卤素化合物的腐蚀挑战。这些特殊介质的腐蚀机理往往更为复杂，需要针对性地研究防护策略。值得注意的是，化学介质腐蚀常常与电化学腐蚀相互促进，形成协同破坏效应，加剧设备损坏程度^[3]。

1.3 物理因素腐蚀

除了电化学和化学介质腐蚀因素以外，一些物理因素如循环水垢、热应力等腐蚀问题。垢下腐蚀，是换热器面临的另一典型物理因素腐蚀问题。当循环水中含有钙、镁等硬度离子时，容易在换热表面结垢，形成不均匀的沉积层。垢层下方形成闭塞区，与周围环境间的物质传输受阻，导致 pH 值下降、 Cl^- 浓度升高，形成局部强腐蚀环境。垢下腐蚀的破坏性往往比均匀腐蚀大得多，因为它通常以局部点蚀形式出现，穿孔风险极高。研究显示，在相同水质条件下，存在垢层的区域腐蚀速率可达清洁表面的 3-5 倍。微生物腐蚀也与物理因素密切相关，微生物在金属表面形成的生物膜不仅直接参与腐蚀反应，还会改变局部环境的物理化学性质，如形成氧浓差电池、产生酸性代谢产物等，从而加速腐蚀进程。

热应力腐蚀，是高温高压换热器中需要特别关注的物理因素腐蚀类型。由于换热器各部位温度分布不均，不同材料的热膨胀系数差异，以及制造过程中形成的残余应力等因素，设备内部会产生复杂的热应力场。在特定介质环境中，这种应力与腐蚀协同作用，可能导致应力腐蚀开裂。对于管壳式换热器而言，管板与换热管连接处、U 型管弯头部位以及壳体与管箱

连接区域都是热应力集中的高风险区。通过优化换热器结构设计和改进制造工艺，如采用有限元分析优化应力分布、选择热膨胀系数匹配的材料组合、实施适当的焊后热处理等措施，可以有效降低热应力腐蚀风险。

2 化工设备换热器腐蚀防治技术措施

2.1 材料选择与表面处理优化

在化工设备换热器腐蚀防护中，科学选材与表面处理至关重要。在具体材料的选择过程中应充分考虑运行设备的腐蚀环境与经济性。在常规水介质中，碳钢材料因具有导热性好、成本低的特点仍是首选材料，但需要做好水处理工作。对于含有 Cl^- 等腐蚀性循环液，奥氏体不锈钢材料如 304、316L 等材料具有良好耐腐蚀性，但在高温高浓度环境条件下需要注意应力腐蚀对金属面的影响。在酸性腐蚀环境中，双相不锈钢材料具有耐酸性腐蚀和耐应力腐蚀优势。而对于含有氢氟酸等极端介质，则需考虑采用钛材、哈氏合金等特种金属材料^[4]。

换热器防腐的表面处理技术主要是通过优化材料表层性能来提升化工设备的耐腐蚀性。①化学镀镍磷合金技术能在复杂化工设备表面形成均匀致密的非晶态镀层，可有效防止点蚀和缝隙腐蚀；②热喷涂技术如等离子喷涂技术可增加耐蚀金属或陶瓷涂层，形成一层坚硬的物理屏障；③超疏水表面技术可以通过构筑特殊微观结构降低表面能，减少介质滞留，从而抑制腐蚀。在实际应用防腐技术中，经济性也是企业必须权衡的核心。价格高昂的耐蚀材料虽能延长寿命，但初始投资大。所以，决策时应充分考量设备在流程中的重要性、潜在的停产损失与维修成本。对于核心设备，采用高等级材料通常是合理的；对于非关键设备，采用“碳钢+强化防护”的组合方案可能更具性价比。

2.2 化工设备换热器循环液水质与工艺介质处理

在化工生产中循环液的水质管理是循环水系统换热器腐蚀控制的核心环节。循环水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等离子浓度直接影响水的腐蚀性和结垢倾向。维持适当的水化学平衡，既要防止结垢，又要避免过度软水处理造成的腐蚀加剧。通常通过控制循环水浓缩倍数、投加缓蚀剂和阻垢剂、调节 pH 值等手段来实现这一平衡。研究表明，将循环水的 pH 值控制在 8.0-9.0 范围内，配合使用磷酸盐类缓蚀剂和聚羧酸类阻垢剂，可将碳钢的腐蚀速率降低至 0.075mm/a 以下。此外，微生物控制也是水质管理的重要组成部分，通过定期投加氧化性（如氯气）和非氧化性（如异噻唑啉酮）杀菌剂，可以有效抑制生物

膜形成，减少微生物腐蚀风险。

工艺介质预处理是另一类重要的腐蚀控制措施。对于原料中含有腐蚀性成分如硫化氢、氯化物等的工艺物流，应尽可能在进入换热器前进行脱除处理。例如，在炼油装置中，通过设置原料油脱盐脱水单元，可以将氯盐含量降低至 3mg/L 以下，显著减轻下游换热设备的腐蚀压力。对于氨汽提塔预热器等特定设备，通过优化设备结构避免介质流动死区的形成，是防止腐蚀性物质（如硫化氢铵）富集的有效方法。某化工企业的实践表明，将预热器由卧式改为立式结构，并调换管壳程工艺介质，成功解决了因 NH_4HS 富集导致的列管腐蚀泄漏问题。

除上述措施外，在线腐蚀监测技术的应用也为化工生产防腐工艺优化提供了数据支持。通过安装腐蚀探针、挂片等监测装置，实时跟踪换热器关键部位的腐蚀状况，可以及时调整工艺参数或采取干预措施，避免腐蚀失控。特别是电化学噪声、线性极化电阻等在线监测技术，能够提供瞬时的腐蚀速率信息，为工艺参数动态优化创造条件。

2.3 结构设计与维护策略改进

为了杜绝化工设备换热器腐蚀问题，保障设备的安全稳定运行，需从设计源头来抑制换热器腐蚀，关键在于实现流场的优化分布。例如，在传统的管壳式换热器中，通过将折流板与换热管、壳体的间隙分别控制在约 0.6mm 和最小范围，可以有效减少壳程流动死区，研究证明，采用该措施后，可将综合性能提升 3.5%。而采用折流杆支撑替代传统弓形折流板，不仅能基本消除死区，还能将壳程压降降低 50% 以上，并显著缓解结垢和振动问题。这些设计细节的改进，对于预防因滞留、结垢或冲刷导致的局部腐蚀至关重要。

此外，科学制定周期性的运维管理策略，能够有效保障换热器的安全稳定运行，延长设备的服务年限。具体可以定期清洗换热设备，预防结垢腐蚀，维护换热效率；或者对于已经产生的结垢问题，可以采用高压冲洗与酸（碱）化学清洗等措施来清洁化工设备表面的结垢。根据以往对设备维护的经验，化工设备换热器需每年至少进行 1-2 次，系统性的机械清洗或化学清洗，以维持设备的良好运行状态。

3 化工设备换热器腐蚀防护的经济性分析

3.1 经济性评估模型构建

在评估防腐策略的经济性时，构建一个超越初期投资的综合分析框架极为重要。一个常被忽视的维度是，腐蚀与结垢导致的传热效率衰减会持续推高系统运行能耗。研究表明，传热系数每下降 10%，相关能耗可能增加 8%-15%。因此，经济模型必须将这种长

期的、隐性能耗成本纳入生命周期成本（LCC）计算。此外，笔者建议在评估高等级耐蚀材料（如不锈钢、钛材）时，应将其在严苛工况下可能实现的更高设计流速、更小传热面积所带来的设备紧凑化收益也进行量化，这能更全面地体现其技术经济价值。

运行成本涵盖了换热器在使用过程中产生的各项费用，其中能源消耗是最主要的组成部分。腐蚀导致的换热表面粗糙度增加、结垢和堵塞都会降低传热效率，增加泵送功率需求，从而提高能耗。研究表明，轻微腐蚀可使换热器传热系数降低 10%-20%，相应的能耗增加可达 8%-15%。水处理成本是循环水系统换热器运行费用的另一重要部分，包括缓蚀剂、阻垢剂、杀菌剂的投加费用以及补水成本等。合理的水处理方案虽然会增加化学品支出，但能有效控制腐蚀速率，延长设备使用寿命，从长期看通常具有正的经济效益。

维护维修成本包括定期检查、清洗、部件更换以及意外故障修复等费用。腐蚀越严重的换热器，其维护频率和维修费用越高。特别是当腐蚀导致介质泄漏时，不仅需要更换损坏部件，还可能造成工艺停产损失，这部分间接成本往往远高于直接维修费用。对于连续生产的化工企业，一次意外的停产损失可能远超直接的维修费用，这必须在经济模型中予以充分考虑。

3.2 实践案例经济性对比分析

为直观展示不同腐蚀防护方案的效益差异，通过具体案例的经济性对比，为化工企业提供决策参考。以某大型煤化工项目循环水系统为例，该系统共有 12 台水冷器，最初采用碳钢材质配合常规水处理方案。由于循环水中 Cl^- 浓度较高（平均 180mg/L），加之系统运行温度偏高（50-65℃），换热器腐蚀问题突出，平均使用寿命仅 5-6 年，年维护费用高达 96 万元（含清洗、堵漏、局部更换等）。更严重的是，因换热器泄漏导致的非计划停车年均 0.8 次，每次停车损失约 150 万元。

为彻底解决腐蚀问题，企业评估了三种升级方案：一是全面更换为 316L 不锈钢换热器，初期投资约 2160 万元；二是保留碳钢外壳，仅将换热管升级为不锈钢材质，初期投资约 1080 万元；三是采用碳钢换热器配合高级表面处理（化学镀镍磷合金），初期投资约 1020 万元。在论证改造方案时，企业对三种选项进行了为期 10 年的全生命周期成本分析（见表 1）。分析结果显示，尽管全面更换为 316L 不锈钢换热器（方案一）的初始投资最高，但其优异的耐腐蚀性带来了极长的使用寿命和最低的年维护费，使得 10 年总成本反而最低。相较于方案三采用碳钢换热器配合高级

表1 换热器不同腐蚀防护方案的经济性比较

防护方案	初期投资 (万元)	年运行成本 (万元)	年维护成本 (万元)	预期寿命 (年)	10年总成本 (万元)
碳钢 + 常规水处理	50	12.5	8.0	6	205
不锈钢材质	180	10.2	3.5	15	277
碳钢 + 表面处理	85	11.0	4.5	10	230
高级合金材质	350	9.8	2.0	20	438

表面处理（化学镀镍磷合金）这一方案虽然初期投入费用低，但表面涂层时间长了可能会有局部破损风险，长期的维护维修总成本较高，所以从长远来看方案一反而更具经济性，最终选择方案一全面升级不锈钢材质^[5]。

4 结束语

总之，化工换热器的腐蚀防控是一项需多维协同的系统工程。本研究认为，未来的发展方向不仅在于材料的升级，更在于通过革命性的结构设计来根除腐蚀环境。例如，基于三周期极小曲面(TPMS)的换热器，其天然形成的连续、光滑、无死区的流道，能从物理结构上极大削弱介质滞留与局部腐蚀的风险，代表了从“被动防腐”到“主动设计免疫”的重要趋势。将此类结构创新可能带来的更长免维护周期、更低运行

阻力纳入经济性模型，将是实现更高层次安全与经济效益统一的关键。

参考文献：

- [1] 高合龙. 制约化工设备防腐蚀工作顺利开展的因素分析 [J]. 设备管理与维修, 2023(12):142-145.
- [2] 胡宗武, 刘建国, 邢蕊, 等. 单相流条件下 90° 水平弯管冲刷腐蚀行为研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020,40(02):115-122.
- [3] 阙莉莉, 崔强. 换热管腐蚀机理初探 [J]. 石油和化工设备, 2025,28(09):230-234.
- [4] 唐猛, 王明梅, 童文辉, 等. 化工换热器常见腐蚀问题及防控措施 [J]. 仪器仪表用户, 2024,31(03):61-63.
- [5] 吴野. 化工机械设备腐蚀与防腐措施研究 [J]. 石化技术, 2025,32(08):257-259.



广告