

化工设备金属材料腐蚀原因及防护策略思考

张鹏娜 王素敏

西安工业大学，陕西西安，710021；

摘要：本文明确阐述了化工设备腐蚀的常见表现形式及主要危害，强调了开展相关研究的重要性；从环境、材料、工艺三方面，分析了导致腐蚀的核心原因，明确了其根源；整理了科学的分析视角与方法，为腐蚀类型的判别提供支撑；提出了涵盖技术与管理层面的多维度防护策略；探讨了防护策略落地的保障机制，以确保效果稳定，帮助化工行业降低腐蚀风险，保障设备安全运行。

关键词：化工设备；金属材料；腐蚀原因；防护策略；保障机制

DOI：10.64216/3080-1508.26.01.059

引言

化工设备是化工生产的核心依托，其金属材料长时间与酸碱介质、高温高压环境以及各类化学物质相接触，极易产生腐蚀现象。金属材料一旦发生腐蚀，会使设备的壁厚变薄、密封失效、结构遭到破坏，这不仅增加了设备维修和更换所需的成本，还可能引发介质泄漏、爆炸等安全事故，对生产安全以及人员健康构成威胁，同时造成资源的浪费和环境的污染。

1 化工设备金属材料腐蚀的常见表现与核心危害

化工设备金属材料腐蚀的常见表现、性能影响及安全经济危害显著。外观上，均匀腐蚀使金属表面整体锈蚀剥落、失光粗糙，多见于长期接触弱腐蚀介质的设备；点腐蚀形成细小深孔，易隐藏于设备死角；缝隙腐蚀发生在连接缝隙处，会锈蚀金属并破坏密封性能，醋酸仲丁酯装置的精馏塔塔釜内壁、输醋酸介质管线弯头，就分别出现过均匀腐蚀与点腐蚀。腐蚀还会导致设备性能衰退，壁厚变薄使承载能力下降，容器或管道可能无法满足生产压力要求，需降低运行负荷；同时破坏密封面平整度，造成介质泄漏，浪费原料且干扰生产，锈渣还可能污染介质影响产品质量，醋酸仲丁酯装置反应釜曾因此出现性能问题。

2 化工设备金属材料腐蚀的关键影响因素及成因

2.1 化工生产环境里介质特性引发腐蚀的成因

化工生产中，介质的酸碱度、离子浓度、温度是腐蚀的核心驱动因素。酸性介质的氢离子会破坏金属表面结构，碱性介质若无法形成稳定保护膜也会持续腐蚀，

高浓度氯离子等还能穿透钝化膜引发局部腐蚀。浙江某石化污水汽提装置中，40℃下 H_2S 水解产 H^+ 使介质呈弱酸性，30ppm 的 Cl^- 穿透 316 不锈钢钝化膜，致弯管点蚀；某厂甘氨酸装置酸性介质（pH1.5-2.5）加速304不锈钢腐蚀。

2.2 金属材料自身成分与结构缺陷引发腐蚀的因素

金属的成分纯度、合金类型、结构完整性决定耐蚀能力，缺陷会放大腐蚀风险。某石化催化裂化装置碳钢硫含量超标（0.06%），高温下形成 $FeS-Fe$ 微电池，通过电极反应加速腐蚀致设备开裂；某高温焙烧炉抄料板用310S不锈钢，因耐蚀性不足频繁损坏。结构缺陷是腐蚀“突破口”，某合成氨装置过热器列管未焊透，高温蒸汽渗入致缝隙腐蚀断裂；某发电厂锅炉管残留 Cl^- ，在应力集中处引发晶间应力腐蚀。

2.3 化工设备制造与运行工艺不当引发腐蚀的原因

制造与运行工艺不当会诱发腐蚀。制造时，某石化复水器封头焊接夹渣，形成电位差致局部腐蚀；某高温焙烧炉炉筒焊接温度过高，焊缝晶粒粗大耐蚀性下降。某甘氨酸装置设备表面油污未清就涂漆，6个月后涂层剥落，腐蚀速率升4倍。运行中，某炼油厂常减压装置塔顶温度波动40℃，钝化膜反复破损；某石化空冷器清洗盲目加HF且超时，某发电厂锅炉酸洗用含 Cl^- 缓蚀剂，均引发过度腐蚀或应力腐蚀开裂。

3 化工设备金属材料腐蚀原因的科学分析维度与方法

3.1 基于腐蚀环境参数进行定量与定性分析的维度

对腐蚀环境参数的分析需结合定量与定性,以明确环境对腐蚀的影响。定性分析聚焦判定介质种类、形态及核心腐蚀因素,例如浙江某石化污水汽提装置泄漏后,通过定性分析确定介质含 H_2S 、 NH_3 及 Cl^- ,核心腐蚀因素为酸性环境与 Cl^- 侵蚀;某厂甘氨酸装置腐蚀分析中,定性分析明确反应介质为含羟基乙腈、盐酸的酸性物质,酸性是腐蚀主因。定量分析则通过检测获取介质 pH 值、离子浓度、温度等具体参数及变动规律,浙江某石化污水汽提装置经在线监测,测得泄漏前介质 pH 6.0~6.5、 Cl^- 浓度 25~35 ppm、温度 38~42°C,对比正常工况 (pH 7.0~7.5、 Cl^- <10 ppm),确定 Cl^- 升高与酸性增强致腐蚀。

3.2 面向金属材料微观结构的腐蚀机理分析办法

分析金属材料微观结构的腐蚀机理,需借助专业技术观察材料内部变化,以识别腐蚀类型与机理。利用金相显微镜观察显微组织,分析腐蚀前后晶粒尺寸与晶界状况,判断腐蚀路径,某发电厂锅炉过热器管断裂后,金相显微镜观察到晶界腐蚀沟,判定为晶间腐蚀;某高温焙烧炉炉筒腐蚀样品中,观察到晶粒从 50 μm 增至 80 μm 、晶界有腐蚀沟槽,确定存在晶间腐蚀。

3.3 融合设备运行工况的动态腐蚀原因追踪维度

融合设备运行工况追踪腐蚀原因,核心是关联工况变化与腐蚀发展,通过历史数据整理与实时监测判断工况影响。先整理设备运行历史数据,包括温度、压力、介质流量与成分等变动记录,分析工况波动与腐蚀的时间对应关系,某炼油厂常减压装置改炼高硫原油后,整理 2 年数据发现,原油硫含量 >1.5% 且塔顶温度 >130°C 时,1 个月内管线泄漏概率升 60%。

4 化工设备金属材料腐蚀的多维度防护技术与管理策略

4.1 关于金属材料表面改性与涂层防护的技术办法阐述

表面改性技术通过改变金属表面化学组成或构造增强耐腐蚀性,如对金属表面进行渗铬、渗氮处理,形成高耐蚀合金层,提升对腐蚀媒介的抵御能力;激光表面处理可改善金属表面微观结构,减少缺陷,提高表面硬度与耐腐蚀性。某高温焙烧炉炉筒更换时,采用渗铝

处理的 INCONEL600 合金,渗铝层厚度 50~60 μm ,铝与基体形成 Fe-Al 合金相,在高温酸性硫环境中形成稳定的 Al_2O_3 保护膜,腐蚀速率从原 0.8 mm/a 降至 0.1 mm/a,使用寿命延长至 3 年。涂层防护技术则在金属表面形成保护膜阻隔腐蚀媒介,有机涂层如环氧树脂、聚四氟乙烯涂层,化学稳定性好,适配多种腐蚀环境;无机涂层如陶瓷、金属陶瓷涂层,耐高温耐磨损,适合高温工况设备。

4.2 化工生产环境把控与介质改良的防护手段介绍

环境把控与介质改良能从根源降低腐蚀风险。环境把控上,通过管控生产环境温湿度减少腐蚀影响,如在设备周边设通风降温设备防局部高温,对潮湿环境设备采取除湿措施降空气水分。介质改良方面,在满足生产需求前提下调整介质成分,减少腐蚀性物质,如中和介质酸碱降低腐蚀程度,添加缓蚀剂在金属表面形成保护膜或抑制腐蚀反应。

4.3 化工设备全生命周期腐蚀管理的制度举措说明

全生命周期腐蚀管理需构建完备制度体系。采购阶段,制定严格材料选用标准,按设备工况选适配耐蚀材料,同时检验供应商材料质量,杜绝不合格材料入场。运行阶段,制定定期维护规划,包括检查腐蚀状况、清理表面污垢、更换老化涂层等,还需建立设备腐蚀档案,记录检查结果与维护措施,追踪腐蚀态势。针对醋酸仲丁酯装置,明确关键设备用 316L 不锈钢且硫含量达标,运行中月度测壁厚、季度清污垢、两年换涂层,通过腐蚀档案及时发现精馏塔腐蚀问题并优化,避免设备提前报废。

5 化工设备金属材料腐蚀防护策略的落地保障机制

化工设备金属材料腐蚀防护策略的落地需从技术监管、人才储备、成效监测三方面构建保障机制。技术应用上,需贯穿全流程质量监督与验收,如醋酸仲丁酯装置管线渗铬前,专家审查方案确保适配酸性工况;施工中 2 名专业人员全程监测渗铬温度 (950~1000°C)、保温时间 (4~5 小时);完工后检测渗铬层厚度 ($\geq 45 \mu m$) 并通过 500 小时盐雾试验,近 2 年合格率达 100%。人才培育上,针对装置需求每季度开展酸性介质

腐蚀机理等培训，每月组织腐蚀探针安装等实操训练。

6 结论

化工设备金属材料腐蚀问题不仅关乎行业生产安全，更对经济效益有着显著影响，解决这一问题需围绕分析、防护及保障工作进行系统性推进。明确腐蚀表现与危害是认知问题的基础，从环境、材料、工艺三方面剖析成因能精准找到问题根源，科学分析维度与方法为诊断问题提供有效工具，涵盖技术与管理层面的多维度防护策略可通过多种途径降低腐蚀风险，完善落地保障制度确保防护效果稳定持久。

参考文献

- [1] 邓连逢. 化工设备金属材料腐蚀原因及防护策略思考[J]. 世界有色金属, 2024, (19): 28-30.
- [2] 史学智. 化工设备常用金属材料腐蚀的防治方法探究[J]. 世界有色金属, 2022, (06): 199-201.
- [3] 范瑞成, 张玮琦, 王永旺, 等. 耐盐酸腐蚀的金属材料[J]. 中国锰业, 2017, 35(04): 97-100.
- [4] 蒋晓瑞. 浅析化工设备常用金属材料腐蚀原因与预防措施[J]. 化学工程与装备, 2019, (07): 247-248.
- [5] 李庆龄. 冶炼化工设备常用金属材料腐蚀原因与预防途径探索[J]. 世界有色金属, 2019, (09): 39-40.
- [6] 张俊花. 化工机械设备腐蚀原因及防腐措施[J]. 科技风, 2021, (34): 125-127.
- [7] 常亚娜, 胡德昆, 王鑫. 浅谈化工设备的腐蚀与防腐措施[J]. 化工设计通讯, 2016, 42(05): 97+102.
- [8] 张宏, 黄晓慧. 冶炼化工设备常用金属材料腐蚀原因与预防措施[J]. 世界有色金属, 2018, (22): 140-141.
- [9] 杨砾淞. 冶炼化工设备常用金属材料腐蚀原因及与预防策略[J]. 化学工程与装备, 2023, (02): 171-173.
- [10] 李晓亮. 化工设备腐蚀现象产生因素和防腐策略[J]. 云南化工, 2021, 48(07): 131-133.
- [11] 黄钊明. 高分子化工材料在化工防腐中的应用[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(08): 104-106.
- [12] 郑昌松. 石油化工设备的防腐蚀结构设计与应用[J]. 计算机产品与流通, 2018, (09): 105.
- [13] 秦博顺, 牟清清. 化工机械设备腐蚀原因及防腐方法初探[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025, (10): 146-148.
- [14] 王一. 化工设备设计的注意事项分析[J]. 化工设计通讯, 2017, 43(03): 88+126.
- [15] 李宇春. 现代工业腐蚀与防护[M]. 化学工业出版社: 201805: 194.
- [16] 陈果. 化工材料的腐蚀与防护[J]. 山东工业技术, 2018, (04): 33.
- [17] 周涛, 陈天天, 王倩倩. 关于预防化工设备腐蚀及故障的研究[J]. 化工管理, 2017, (32): 38+58.
- [18] 高孙慧, 高孙琼. 石油化工设备腐蚀机理与智能防护技术研究[J]. 中国口岸科学技术, 2025, 7(09): 49-55.
- [19] 李昕, 曲直. 论化工设备腐蚀原因及防腐措施[J]. 化工管理, 2018, (31): 149.
- [20] 范强强. 化工设备腐蚀机理研究及腐蚀监测管理系统的开发[D]. 华东理工大学, 2014.
- [21] 王红. 氟树脂在石油化工金属管道和设备腐蚀防护中的应用[J]. 涂料工业, 2018, 48(09): 82-87.
- [22] 李晓. 化工设备腐蚀机理研究及腐蚀监测管理系统的开发[J]. 现代制造技术与装备, 2016, (11): 76-77.
- [23] 黄钊明. 高分子化工材料在化工防腐中的应用[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(08): 104-106.
- [24] 刘红蕾, 董佃滨. 基于设备腐蚀风险的精细化工工艺流程本质安全设计方法[J]. 化纤与纺织技术, 2025, 54(09): 73-75.
- [25] 强整齐. 石油炼化企业腐蚀控制措施研究[J]. 化工设计通讯, 2021, 47(09): 17-18.
- [26] 王晓东. 基于节能环保的化工设备腐蚀监测技术研究[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(07): 201-203.
- [27] 关文博. 化工设备抗腐蚀材料在高温高压下的应用研究[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(06): 59-60+73.
- [28] 崔建伟, 张永帅. 化工设备腐蚀对环境污染的潜在威胁研究[J]. 清洗世界, 2025, 41(07): 145-147.
- [29] 杨廷全. 化工设备的腐蚀问题与防腐措施[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45(08): 16-18.
- [30] 王楠. 浅析化工机械设备及管线腐蚀管理与维护[J]. 中国设备工程, 2025, (08): 61-63.