

浅析化工机械设备及管线腐蚀管理与维护

贺建英

陕西榆能化学材料有限公司 陕西 榆林 719300

摘 要：化工机械设备及管线是化工生产的核心基础设施，其腐蚀问题直接威胁生产安全与经济效益。本文围绕化工机械设备及管线腐蚀问题展开研究。分析了腐蚀类型与原理；探讨了工机械设备及管线自身材料、表面状态、结构设计及外部介质、温湿度、流速压力等影响因素；随后介绍在线监测与定期检测技术；最后提出材料选择优化、表面防护、工艺控制及全周期管理四大维护策略。研究旨在为化工企业降低腐蚀风险、保障生产安全提供切实可行的技术与管理参考，助力企业减少经济损失。

关键词：化工机械设备及管线；腐蚀类型；管理与维护策略

引言：在化工产业集中区域，设备长期接触酸碱、活性离子等介质，腐蚀现象频发，易引发泄漏、爆炸等事故，导致生产中断与巨额损失。当前部分企业对腐蚀管理重视不足，存在监测技术落后、维护策略单一等问题。鉴于此，本文系统剖析腐蚀类型、影响因素、监测技术及维护策略，旨在填补现有管理短板，为化工企业构建科学的腐蚀管理体系提供理论与实践支撑，推动行业安全高效发展。

1 化工机械设备及管线腐蚀类型与原理

1.1 化学腐蚀的类型与原理

化学腐蚀是指化工机械设备及管线表面与非电解质介质发生直接化学反应，导致材料损坏的过程。该类腐蚀不涉及电子转移，反应产物直接在材料表面形成。在化工生产环境中，常见的介质包括干燥的气体（如氧气、二氧化碳、硫化氢）、液态的非电解质溶液（如某些有机溶剂）等。当设备表面与这些介质接触时，材料中的金属原子会与介质中的活性组分发生化学反应，形成相应的化合物（如氧化物、硫化物等）。若生成的化合物结构疏松、附着力差，无法形成连续的保护膜，会导致介质持续与内部金属接触，使腐蚀过程不断加剧；若产物结构致密且附着力强，则能在一定程度上阻碍后续腐蚀反应的进行。

1.2 电化学腐蚀的类型与原理

电化学腐蚀是化工领域更普遍的腐蚀类型，其核心是基于原电池原理，涉及电子的转移过程。当机械设备及管线的金属材料处于电解质介质（如含酸、碱、盐的水溶液）中时，由于材料成分不均、表面状态差异（如氧化膜破损）或介质浓度梯度等因素，会在金属表面形成无数微小的原电池。其中，电位较低的区域为阳极，金属原子在此失去电子被氧化成金属离子进入介质；电

位较高的区域为阴极，介质中的氧化性物质（如氢离子、氧气）在此获得电子被还原。电子通过金属基体从阳极流向阴极，形成持续的电流回路，导致阳极区域的金属不断溶解，最终造成设备或管线的腐蚀损坏。

1.3 其他特殊腐蚀的类型与原理

除上述两类基本腐蚀外，化工设备及管线还可能面临多种特殊腐蚀，典型包括应力腐蚀、点蚀和生物腐蚀。（1）应力腐蚀是金属材料在特定介质与拉应力共同作用下发生的腐蚀，此时应力会破坏材料表面的保护膜，同时加速阳极区域的金属溶解，导致材料在低于其强度极限的应力下发生断裂。（2）点蚀则是一种局部腐蚀，通常起源于金属表面的缺陷（如划痕、夹杂物）或保护膜的薄弱点，介质中的氯离子等活性离子会在此处富集，破坏局部钝化膜，形成微小蚀孔，蚀孔内部因浓度差会形成自催化效应，使腐蚀向纵深方向快速发展。（3）生物腐蚀则是由微生物的生命活动引发或加速的腐蚀过程，微生物通过代谢产生酸性物质、形成生物膜改变局部介质环境，或直接参与电极反应，从而加速金属材料的腐蚀^[1]。

2 化工机械设备及管线腐蚀影响因素

2.1 设备与管线自身因素

设备与管线自身的固有属性是影响腐蚀的基础条件，主要体现在以下三个方面。（1）材料特性。不同金属材料的化学成分、晶体结构差异直接决定其耐腐蚀能力，如合金中铬、镍等元素的含量会影响钝化膜的稳定性，进而改变材料抗腐蚀性能；材料的纯度与杂质含量也会导致局部电化学不均，诱发腐蚀。（2）表面状态。设备表面的粗糙度、氧化膜完整性至关重要，粗糙表面易形成介质吸附层，增加腐蚀反应接触面积，而破损的氧化膜会暴露新鲜金属表面，成为腐蚀起始点。（3）结

构设计。设备中的缝隙、拐角、焊接接头等部位若存在设计缺陷，易造成介质滞留、浓度富集或应力集中，为局部腐蚀提供有利条件。

2.2 外部环境因素

外部环境是加速或诱发腐蚀的关键诱因，主要包括以理介质特性、温度与湿度、流速与压力三个维度。

(1) 介质特性。介质的化学成分(如酸、碱、盐的种类与浓度)直接决定腐蚀反应的强度，活性离子(如氯离子)会破坏金属钝化膜，氧化性物质则会加速阴极还原反应；介质的pH值变化会改变腐蚀反应的热力学趋势，影响腐蚀速率。(2) 温度与湿度。温度升高会加快腐蚀反应的动力学过程，同时可能改变介质的物理化学性质(如溶解度、扩散速率)；高湿度环境会在设备表面形成水膜，为电化学腐蚀提供电解质环境，促进腐蚀发生。(3) 流速与压力。介质流速过快可能导致设备表面保护膜磨损，引发冲刷腐蚀；过高的压力会增加介质的渗透能力，同时可能加剧应力腐蚀开裂的风险^[2]。

3 化工机械设备及管线腐蚀监测与检测技术

3.1 在线监测技术

在线监测技术可实时获取设备及管线腐蚀状态，无需中断生产，核心包括腐蚀电位监测、电阻探针监测与超声波在线监测。腐蚀电位监测通过参比电极接触设备金属表面，持续测量电位差，依据电位变化判断金属钝化膜完整性及腐蚀趋势，适用于电解质环境。电阻探针监测利用金属探针腐蚀减薄与电阻变化的线性关系，将探针植入设备，通过专用仪器采集电阻数据换算腐蚀速率，实现均匀腐蚀实时量化监测。超声波在线监测在设备外壁装固定探头，定期发射超声波，根据反射时间差计算金属壁厚，实时监测壁厚减薄，适用于管道、储罐等薄壁设备。

3.2 定期检测技术

定期检测需设备停机或半停机实施，用于全面评估腐蚀程度，主要包括无损检测与理化分析检测。无损检测中，超声波检测通过手持探头移动，利用超声波界面反射特性，检测金属内部腐蚀坑、裂纹等缺陷，判断腐蚀位置与深度；射线检测通过X射线或 γ 射线穿透金属，依据射线衰减差异成影，识别内部腐蚀缺陷，适用于厚壁设备或焊接接头。理化分析检测需采集腐蚀产物与介质样本，化学分析产物成分，借光谱、电镜观察微观结构，结合介质分析判断腐蚀类型与诱因，为防腐措施提供依据^[3]。

4 化工机械设备及管线腐蚀管理与维护策略

4.1 材料选择与优化策略

材料选择需结合化工生产介质特性与操作条件，从源头降低腐蚀风险，核心策略包括以下三方面。(1) 针对性选材。优先考量材料与介质的兼容性，依据介质酸碱性、活性离子(如氯离子、硫离子)含量及温度压力范围，选择适配材料。强腐蚀环境可选含铬、镍、钼的特种合金，其表面易形成稳定钝化膜；中等腐蚀环境可采用玻璃钢、聚四氟乙烯等复合材料，兼具化学稳定性与加工便利性；轻度腐蚀环境选用经表面处理的普通碳钢，平衡防腐需求与成本控制。选材需避免“一刀切”，根据设备不同部位的腐蚀风险差异，采用差异化方案。(2) 材料性能验证。实验室要模拟实际工况，对候选材料开展腐蚀速率、应力腐蚀、晶间腐蚀试验，评估耐腐蚀极限；现场试用选取小范围部件，在实际工况下运行3-6个月，定期检测腐蚀状况以验证实验室数据。同时建立材料性能数据库，记录不同材料在各类工况下的表现，为后续选材提供支撑。(3) 材料升级迭代。结合技术发展与生产需求推进，定期评估现有设备管线的材料性能。当出现新型耐腐蚀材料或现有材料无法满足需求时，启动升级程序。升级前需进行技术经济性分析，对比新老材料的采购、安装成本与使用寿命，确保方案可行。升级过程中制定详细更换计划，避免生产中断，更换后跟踪监测以验证效果。

4.2 表面防护技术实施策略

表面防护通过构建防护层阻隔腐蚀介质，主要包括涂以下三类技术。(1) 涂层防护。注重材料选型、施工控制与后期维护，材料选择需匹配介质与环境：酸性介质设备用环氧树脂涂层，高温环境设备用300℃以上稳定的有机硅涂层，户外管线用耐候耐腐的氟碳涂层。施工中需严格预处理，通过喷砂除锈控制表面粗糙度、去除杂质，确保涂层结合牢固；涂刷时控制厚度均匀，避免漏涂、流挂、针孔等缺陷，固化后通过附着力与厚度测试验证性能。后期定期检查涂层状态，小面积破损局部补涂，大面积破损则重新预处理并施工。(2) 阴极保护适用于埋地管线、储罐底部等与电解质接触的构件，分牺牲阳极法与外加电流法。牺牲阳极法通过安装锌合金、铝合金等低电位阳极材料形成原电池，阳极优先溶解保护构件，实施时需合理确定阳极类型、数量与布置，确保电流均匀覆盖，定期检测阳极溶解状况并及时更换。外加电流法通过外部直流电源，将构件作为阴极、石墨或钛基涂层材料作为辅助阳极形成回路，抑制腐蚀，需精确控制电流密度与电位，避免氢脆或涂层脱落，定期检查阳极损耗与电路连接。(3) 表面改性适用于阀门阀芯、泵叶轮等高精度部件，通过改变表面成分

或结构提升耐腐蚀性,常见方式包括化学转化膜、物理气相沉积、化学气相沉积。化学转化膜处理将构件浸泡于特定溶液,形成致密氧化膜或磷酸盐膜,操作简单成本低;物理气相沉积通过真空蒸发、溅射沉积铬、钛等耐腐蚀金属或化合物,膜层结合牢固且耐磨损;化学气相沉积通过气态反应物在构件表面生成涂层,适用于复杂形状构件,可实现内外表面均匀覆盖。改性后需通过盐雾试验、腐蚀电位测试验证效果。

4.3 工艺控制与优化策略

工艺控制通过调节介质状态与操作参数减少侵蚀,包括以下三方面。(1)介质处理。旨在降低腐蚀性,需针对性施策:含酸性物质介质添加氢氧化钠、碳酸钠等中和剂,将pH值控制在中性或弱碱性;含氯离子、硫离子的介质用离子交换树脂、膜分离技术去除部分离子;含氧量高的介质通过热力或化学除氧器去除溶解氧。处理过程中需在线监测pH值、离子浓度、含氧量等指标,根据结果调整处理剂添加量或设备参数,确保介质腐蚀性可控。(2)操作参数优化。结合腐蚀特性控制温度、压力、流速。温度控制需避开加速腐蚀区间:不锈钢设备严控加热温度与保温时间,避免晶间腐蚀;温度敏感型腐蚀通过冷却系统稳定介质温度。压力控制需不超过设计压力,避免应力增大诱发应力腐蚀开裂,同时减少压力波动以保护表面保护膜。流速控制需确定合理范围:过低易导致介质滞留引发局部腐蚀,过高可能造成冲刷腐蚀,通过调节泵转速、阀门开度平衡生产效率与防腐需求。(3)工艺流程改进。通过优化流程减少介质接触时间与频率。间歇性生产在间隙用中性清洗液冲洗设备管线,去除残留介质;连续生产增设旁路管线,主管线有腐蚀风险时切换运行以保障维护时间。同时通过工艺整合减少腐蚀介质种类与用量,如用新型催化剂替代强腐蚀性传统催化剂,降低设备腐蚀压力。

4.4 全周期管理体系构建策略

全周期管理体系贯穿设备与管线设计、采购、安装、运行、维护、报废全过程,通过标准化流程与责任机制实现腐蚀管理系统化,核心包括四方面:(1)管理流程规范要明确各环节职责与标准。设计阶段引入腐

蚀风险评估,纳入防腐要求(如选材、设阴极保护、优化结构防积液);采购阶段验收材料设备防腐性能,核对质量文件并抽检;安装阶段监督施工,确保防护层完好、焊接接头防腐达标;运行阶段制定巡检计划,记录腐蚀状况与参数;维护阶段建档案,按腐蚀情况定预防性计划;报废阶段评估腐蚀原因,为后续提供经验。

(2)监测数据应用需建整合分析机制。将在线监测、定期检测数据及运行、维护记录纳入统一数据库,用数据挖掘分析腐蚀规律。通过数据识别高风险设备部位、评估防腐效果、分析操作参数对腐蚀的影响,同时借数字化平台实现数据共享与可视化,辅助管理决策。(3)人员能力提升要强化培训与考核。定期组织技术培训(覆盖腐蚀原理、防护技术等)及实操训练(如涂层施工、阴极保护调试);建立考核机制,将腐蚀管理知识技能考核与绩效挂钩,同时邀请专家指导,分享先进经验。

(4)应急机制建立要针对性制定预案。明确处置流程,泄漏破损时快速隔离设备防事故扩大;备齐抢修设备材料,保障高效抢修;建应急通讯机制,确保信息传递及时;定期组织演练,检验预案可行性,提升人员处置能力^[4]。

结束语:本文全面梳理了化工机械设备及管线腐蚀的关键问题与应对方案,从腐蚀原理到影响因素,再到监测技术与维护策略,形成了完整的研究框架。通过针对性的材料选择、表面防护、工艺优化及全周期管理,可有效降低腐蚀风险。未来可结合智能化技术,开发更精准的腐蚀预测模型,进一步提升管理效率。

参考文献

- [1]罗江.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,2023(21):55-57.
- [2]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(8):61-63.
- [3]贺召旺.浅析化工机械设备及管线腐蚀管理与维护[J].电脑校园,2021(11):4284-4285.
- [4]刘永伟.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(14):55-57.