化工机械设备防腐蚀能力探讨

张　华

国家能源集团宁夏煤业煤制油分公司　宁夏　银川　750001

摘　要：化工机械设备长期处于复杂腐蚀工况中，腐蚀问题是影响设备运行安全、降低生产效益的核心难题。本文阐述化工设备化学、电化学、物理三类腐蚀机理，分析材料、工况、人为运维三大防腐影响因素，梳理各类主流防腐蚀技术的应用优势与适配场景。针对当前防腐工艺不规范、智能化水平不足等问题，提出针对性优化策略，并展望新型防腐材料与智能防腐技术的绿色化、数字化发展趋势，为化工设备防腐运维提供参考。

关键词：化工机械设备；防腐蚀能力；技术及应用

引言：化工行业生产工况复杂，机械设备长期接触酸碱、电解质等腐蚀介质，同时受到高温高压、机械应力等作用，极易发生各类腐蚀损伤。设备腐蚀不仅会造成结构破损、性能衰减，缩短设备使用寿命，还易引发介质泄漏、安全事故，大幅增加企业运维与生产成本，制约化工行业稳定发展。基于此，深入探究化工机械设备腐蚀规律，优化防腐蚀技术与管理模式，对保障生产安全、提升设备运行效率具有重要的现实意义。

1 化工机械设备腐蚀基础理论与主要类型

1.1 化工机械设备腐蚀核心机理

（1）化学腐蚀机理：属于纯化学反应腐蚀形式，设备金属直接与化工生产中的酸碱、气体等腐蚀介质发生反应，整个过程无电流产生，会逐步破坏金属表层结构，多发生在高温、干燥的化工生产工况中。（2）电化学腐蚀机理：是化工设备最主要的腐蚀形式。金属表面与电解质介质接触后形成原电池，持续发生氧化还原反应，造成金属表层持续剥落腐蚀，普遍存在于潮湿、含电解质的生产环境中。（3）物理腐蚀机理：无化学反应参与，主要由外部物理作用引发损伤。介质高速冲刷、机械磨损、高温热冲击、压力交变等作用，会直接造成设备表层破损、脱落，长期作用会加剧设备结构损伤。

1.2 化工设备常见腐蚀类型

（1）均匀腐蚀：腐蚀均匀覆盖设备整体表面，使设备壁厚均匀减薄，持续降低设备结构强度与承压能力，是最常见、损伤最直观的腐蚀类型。（2）局部腐蚀：包含点蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀三类，腐蚀仅集中在设备局部位置，隐蔽性极强，不易日常排查，极易造成设备突发破损、失效。（3）应力腐蚀：设备在腐蚀介质和机械应力双重协同作用下产生局部裂纹，裂纹会持续扩张，最终导致设备开裂，破坏性极强，易引发重大设备故障[1]。

2 化工机械设备防腐蚀能力影响因素分析

2.1 设备材料自身性能因素

（1）基材材质特性。不同设备基材耐蚀性能差异显著，决定基础防腐能力。碳钢成本低但耐蚀性弱，适于常规温和工况；不锈钢抗锈蚀强，可耐受多数弱酸弱碱；合金材料组织稳定，耐高温、耐强腐蚀性优异；非金属材料酸碱耐受度良好。材质性能差异是腐蚀程度不同的核心原因。（2）材料加工工艺缺陷。加工制造中的工艺问题易埋下腐蚀隐患，如焊接缝隙、焊缝不均、打磨不平整等缺陷，易形成局部死角积聚腐蚀介质；热处理不当会破坏材料金相结构，导致局部性能劣化，增加局部腐蚀发生概率。（3）材料适配性问题。化工介质复杂、工况多变，若材质与介质、温度、压力等环境不匹配，无法适配腐蚀特性，会持续发生化学或电化学腐蚀，长期运行加速设备破损老化，显著降低使用寿命[2]。

2.2 生产工况环境因素

（1）介质因素。生产介质是诱发设备腐蚀的关键外部条件，介质酸碱浓度越高、腐蚀性越强，设备腐蚀速率越快；介质中含有的杂质、颗粒物等会改变介质理化性质，破坏设备表层防护结构，加剧电化学腐蚀与冲刷腐蚀，加速设备失效。（2）温压条件。高温高压是化工生产常见工况，高温会加快介质与金属材料的化学反应速率，激活金属腐蚀活性；高压会挤压设备表层结构，弱化材料抗蚀性能，双重作用下会大幅提升腐蚀速度，加重设备腐蚀损伤。（3）运行工况波动。设备频繁启停、生产负荷大幅波动，会使设备承受交变机械应力，易引发应力集中，诱发应力腐蚀与疲劳腐蚀，长期工况

波动会导致设备表层产生细微裂纹，逐步扩展造成设备结构性损坏。

2.3 运维管理与人为因素

（1）日常防腐检测不到位。局部腐蚀、隐性腐蚀隐蔽性较强，常规巡检若检测手段单一、排查不全面，无法及时发现早期腐蚀问题，导致小腐蚀隐患持续扩大，最终引发设备严重失效。（2）设备维护保养不规范。设备防腐涂层、防护衬层长期运行易出现破损、脱落，若未及时检查修复，设备金属基体直接暴露在腐蚀介质中；同时防护装置失效未及时更换，会彻底丧失防腐防护作用。（3）检修工艺不合理。设备检修过程中，操作人员打磨、拆装、焊接等不规范操作，会损伤设备表层防护结构和金属基体，人为制造腐蚀缺陷，加速后续设备腐蚀损坏。

3 化工机械设备主流防腐蚀技术及应用

3.1 材料选型优化防腐技术

（1）耐蚀金属合金材料选型应用。哈氏合金、钛合金等高端耐蚀合金材料，具备极强的抗腐蚀、耐高温和抗氧化性能，能够适应强酸碱、高盐及高温高压等苛刻化工工况，多用于精细化工、腐蚀介质浓度较高的核心设备制造。该类材料稳定性高、使用寿命长，可有效抑制电化学腐蚀与点蚀问题，保障设备长期稳定运行。（2）非金属防腐材料应用。氟塑料、玻璃钢、防腐橡胶等非金属材料耐腐蚀性能优良，对大多数酸碱介质具备良好耐受性。其中氟塑料适用于强腐蚀、高温介质工况；玻璃钢整体成型性好、整体性强，多用于储罐、塔器设备；防腐橡胶柔韧性强、抗冲刷效果好，常用于管道、小型容器内衬防腐[3]。（3）材料复合搭配防腐工艺。单一防腐材料难以同时满足高性能与低成本需求，复合搭配工艺可综合不同材料优势，根据设备工况、介质特性、运行温度压力进行差异化选型。通过普通基材搭配高端防腐辅料、金属与非金属组合使用的方式，在保证设备整体耐蚀性能的前提下，有效控制设备制造成本，实现防腐性能与经济性的平衡。

3.2 表面防护防腐技术

（1）防腐涂层技术。防腐涂层是化工设备最常用的表层防护手段，油漆涂层施工便捷、性价比高，适用于常规常温常压设备；石墨烯涂层致密性强、耐磨耐蚀，可有效阻隔腐蚀介质渗透；陶瓷涂层耐高温、抗氧化性能突出，适合高温工况设备，施工中需保证涂层均匀、无针孔缺陷，提升防护效果。（2）衬里防护技术。衬里防护主要包含衬胶、衬塑、衬瓷三种工艺，通过在设备内壁贴合防腐层，隔离金属基体与腐蚀介质。衬胶抗冲击、耐磨损，适配流体冲刷工况；衬塑整体性好、耐酸碱范围广；衬瓷耐高温、耐腐蚀性能优异，可有效解决极端工况下设备内壁快速腐蚀问题。（3）金属镀层防护技术。金属镀层主要采用电镀、化学镀、热喷涂工艺，在设备金属表面附着一层稳定性更高的耐腐蚀金属防护层。该技术可填补基材表面细微缺陷，阻隔原电池反应发生，显著提升基材耐蚀、耐磨性能，多用于泵体、风机叶轮、管道配件等精密动设备的防腐防护[4]。

3.3 电化学防腐与工艺防护技术

（1）阴极保护技术。阴极保护分为牺牲阳极法与外加电流法，核心原理是通过改变金属电极电位，抑制金属氧化腐蚀。牺牲阳极法结构简单、无需供电，适用于储罐、地下管道等设备；外加电流法保护范围广、可调性强，适合大型、长周期运行的化工设备。（2）阳极保护技术。阳极保护技术适用于可钝化的金属设备，通过外加阳极电流使金属表面形成致密钝化膜，阻断腐蚀反应持续进行。该技术防腐稳定性高、损耗小，主要应用于浓硫酸、有机酸等特定介质工况的塔器、储罐设备。（3）介质优化防护。通过工艺手段改善介质腐蚀特性，降低腐蚀源头危害。在生产介质中添加适配缓蚀剂，可在金属表面形成保护膜，抑制腐蚀反应；同时通过过滤、净化等方式去除介质内腐蚀性杂质，降低介质活性，从根源减缓设备腐蚀速率。

3.4 不同设备防腐技术适配案例分析

（1）大型静设备防腐方案。反应釜、储罐等静设备运行工况稳定、接触介质时间长，多采用基材优化 + 衬里防护 + 涂层防护组合方案。针对强腐蚀工况选用合金基材，常规工况搭配衬胶、衬塑工艺，外壁采用防腐涂层防护，可大幅延长设备使用寿命。（2）动设备防腐技术落地。泵、风机、管道等动设备长期承受介质冲刷与交变应力，易发生冲刷腐蚀与疲劳腐蚀，多采用热喷涂金属镀层、耐磨陶瓷涂层及专用耐蚀管材，提升设备耐磨、抗冲刷能力，适配连续运行工况需求。（3）极端工况防腐效果对比。高温、高压、强腐蚀极端工况下，单一防腐技术防护效果有限，复合防腐技术优势显著。材料优化搭配电化学防护、介质缓蚀处理的组合方案，相比单一涂层、单一材质防护，耐腐蚀、抗老化能力更强，设备故障概率与运维成本显著降低。

4 化工机械设备防腐技术优化策略与行业发展展望

4.1 现有防腐技术应用存在的问题

（1）传统防腐技术综合性能短板突出。现阶段多数

化工设备仍采用常规涂层、衬里等传统防腐技术，普遍存在使用寿命短、工况适配性不足等问题。传统防腐工艺难以适配高温、高压、强冲刷的复杂工况，长期运行后易出现老化、脱落、失效等问题，需要频繁维修更换，大幅增加设备运维成本与企业生产损耗。（2）防腐施工工艺规范性不足。部分设备防腐施工与检修过程缺乏标准化管控，存在表面处理不彻底、涂层厚度不均、衬里贴合度不足、固化养护不到位等不规范操作。此类工艺缺陷会造成防腐层存在气泡、缝隙、破损等隐患，短期内看似防护达标，实际极易引发局部腐蚀，导致防腐体系提前失效。（3）防腐技术与智能化运维脱节。目前行业防腐管控多依赖人工巡检、定期检修的传统模式，防腐技术应用与智能化运维体系融合度较低。缺乏在线监测、实时数据采集和智能分析手段，腐蚀问题多为事后补救，无法实现腐蚀隐患的提前预判与精准治理，成为行业防腐管理的主要短板。

4.2 提升设备防腐蚀能力的优化策略

（1）优化设备结构设计。从设备设计源头规避腐蚀风险，改进设备结构形式，消除设备死角、凹槽、缝隙等易积聚腐蚀介质的部位。同时优化结构受力布局，规避应力集中问题，减少应力腐蚀、疲劳腐蚀的发生条件，从根本上降低设备腐蚀概率。（2）规范防腐施工与检修工艺。建立标准化、规范化的防腐作业流程，统一施工、检修、验收标准。严格把控设备表面除锈、清洁、涂装、衬里施工等关键工序，规范检修操作流程，杜绝人为工艺缺陷，保障防腐层施工质量，提升防腐体系的稳定性与耐久性。（3）构建智能化防腐管控体系。建立常态化腐蚀检测、监测机制，引入定期检测与在线监测相结合的管理模式。依托监测数据建立腐蚀预警机制，实时掌握设备腐蚀状态，及时发现隐性腐蚀隐患，实现腐蚀问题早发现、早处理，形成全过程、动态化的防腐管理体系[5]。(4) 优化设备结构设计对于化工设备防腐蚀管理的重要性是不言而喻的。在优化结构设计的过程中，设计人员应当注重有效避免物料残余堆积、局部应力集中问题的出现而造成容器出现缝隙或局部物料出现滞留加剧腐蚀速率等情况的出现。

4.3 新型防腐技术发展与应用前景

（1）新型防腐材料迭代应用。纳米防腐材料、智能缓蚀剂等新型材料成为行业研发热点，纳米材料具备致密性强、附着力高、耐蚀性优异的特点，可大幅提升防腐层使用寿命；智能缓蚀剂可根据介质环境自适应发挥防护作用，适配复杂化工工况，应用前景广阔。（2）智能监测技术普及落地。随着工业智能化发展，在线腐蚀监测、智能预警、数据溯源等技术逐步普及。通过实时采集设备腐蚀数据，精准分析腐蚀速率与隐患风险，打破传统人工运维的局限性，推动化工设备防腐管理向数字化、精准化方向转型。材料腐蚀传感监测在材料基因工程研究、材料服役失效评价、耐蚀新材料开发、重大工程装备安全服役健康状态监测中均扮演着重要的角色。（3）绿色长效防腐成为发展主流。在低碳环保政策导向下，低污染、无毒性、长寿命的绿色防腐技术成为未来核心发展方向。行业逐步摒弃高污染、短周期的传统防腐工艺，聚焦低碳防腐材料与节能防腐技术研发，实现防腐效果、经济效益与生态效益的协同发展。

结束语

综上所述，化工机械设备腐蚀类型多样、影响因素繁杂，传统防腐技术存在工况适配性差、运维滞后等诸多短板。为有效提升设备防腐蚀能力，需从设备设计、材料选型、施工工艺、运维管理多维度优化，结合工况选用复合防腐技术。同时，依托工业智能化发展，推动新型防腐材料与智能监测技术落地应用，践行绿色防腐理念，可有效规避腐蚀风险，助力化工行业安全、高效、可持续发展。

参考文献

[1] 彭海鸿. 提高化工机械设备防腐蚀能力探讨 [J]. 化工管理,2022,11(30):134-137.

[2] 秦淑环. 提高化工机械设备防腐蚀能力研究 [J]. 化工设计通讯,2023,45(9):96-101.

[3] 时义. 提高化工机械设备防腐蚀能力探讨 [J]. 中国设备工程,2021,9(13):153-155.

[4] 韩雨蒙. 提高化工机械设备防腐蚀能力 [J]. 石化技术,2024,25(7):320-322.

[5] 蒋立恒. 提高化工机械设备防腐蚀能力探讨 [J]. 当代化工研究,2022,13(2):119-122.