

化工管道腐蚀防护技术的工程应用与长效运维策略

穆建刚 (东明县油田服务中心, 山东 菏泽 274500)

摘要: 化工管道腐蚀问题直接威胁装置运行安全与生产连续性, 需构建“机理-技术-管控-运维”一体化防护体系。研究剖析化学腐蚀、电化学腐蚀及应力腐蚀的作用机制与诱发条件, 阐述涂层防护、阴极保护、耐蚀材料选型三类核心防护技术的工艺要点与参数设计, 建立涵盖施工管控、性能检测、技术验收的质量控制体系, 提出动态监测、周期维护、数据信息化管理的长效运维策略。多维度技术与管理模式的协同应用, 可实现化工管道腐蚀风险的有效管控, 为管道全生命周期安全运行提供技术支持。

关键词: 化工管道; 腐蚀防护; 质量控制; 长效运维; 腐蚀机理

中图分类号: TQ055.81 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 010-0166-03

Engineering Applications and Long-Term Maintenance Strategies for Corrosion Protection Technologies in Chemical Pipelines

Mu Jianguang (Oilfield Service Center, Dongming County, Heze Shandong 274500, China)

Abstract: Corrosion in chemical pipelines threatens equipment safety and production continuity, requiring an integrated “mechanism-technology-control-maintenance” protection system. This study analyzes the mechanisms and inducing conditions of chemical, electrochemical and stress corrosion, expounds the process and parameter design of three core protection technologies (coating, cathodic protection, corrosion-resistant materials), establishes a quality control system (construction supervision, testing, acceptance), and proposes a long-term operation and maintenance strategy (dynamic monitoring, periodic maintenance, data management). The coordinated application of these technologies and management modes effectively controls pipeline corrosion risks, supporting their safe life-cycle operation.

Keywords: chemical pipeline; Corrosion protection; Quality Control; Long term operation and maintenance; corrosion mechanism

化工管道作为生产系统物料输送的核心载体, 其运行可靠性直接关联装置安全与生产效率。腐蚀作用引发的管道壁厚减薄、结构破损等问题, 易造成介质泄漏、生产中甚至安全事故, 因此腐蚀防护技术的应用与长效运维策略的构建具有重要现实意义。研究围绕腐蚀机理、防护技术、质量控制及运维管理形成技术框架, 通过多维度技术手段与管理模式的协同, 为化工管道全生命周期安全运行提供支撑。

1 化工管道腐蚀机理与影响因素

1.1 化学腐蚀的作用机制

化学腐蚀是化工管道表面材料与周围介质直接发生化学反应而引发的损耗现象, 不涉及电流产生, 仅通过原子或分子层面的直接作用导致材料破坏。其反应过程中, 管道材料表面原子与介质中的化学物质形成新的化合物, 造成表面损伤并逐步向内部渗透, 常见于高温、干燥或无电解质的环境中。金属管道在强酸、强碱介质中会发生氧化反应生成腐蚀产物, 非金属管道如聚丙烯管道则可能因与有机溶剂发生作用导致分子链结构破坏。

某化工企业用于输送丙酮溶剂的普通 PVC 管道, 因丙酮与管道材料发生化学溶胀反应, 仅使用 8 个月就出现表面龟裂、尺寸变形, 而采用 β 晶型 PPH 管

道后, 凭借其致密的分子链结构抵御了溶胀侵蚀, 连续 3 年运行仍保持良好完整性, 充分体现了材料化学稳定性对抵御化学腐蚀的关键作用。

1.2 电化学腐蚀的反应原理

电化学腐蚀是化工管道最常见的腐蚀类型, 其核心原理是金属管道处于电解质溶液环境时, 因材料表面电极电位差异形成微电池, 引发氧化还原反应导致金属溶解。在此过程中, 管道表面较活泼的区域作为阳极发生氧化反应, 金属原子失去电子转化为离子进入介质; 较不活泼的区域作为阴极, 介质中的氢离子或氧气得到电子发生还原反应, 形成持续的腐蚀循环。电解质的存在是反应发生的必要条件, 化工生产中的水汽、介质中的盐分等都能构成电解质环境。某石化公司二火炬至硫磺高压燃料气管线, 因燃料气中的硫化氢、氯化氢与凝结水形成 $H_2S - HCl - H_2O$ 腐蚀体系, 管道底部弯头及低点部位发生严重电化学腐蚀, 局部腐蚀速率高达 6mm/a, 投用 6 年内累计发生 19 次腐蚀泄漏, 更换管线超 2000m, 凸显了电化学腐蚀对管道运行的严重威胁。

1.3 应力腐蚀的诱发条件

应力腐蚀是拉伸应力与腐蚀介质协同作用下引发的管道脆性开裂现象, 其诱发需满足应力、腐蚀介质

和材料敏感性三大核心条件。应力来源包括管道制造过程中焊接、热处理产生的残余应力，以及运行时承受的介质压力、安装应力等外加载荷，其中残余应力引发的事故占比高达 80%。腐蚀介质需与管道材料形成特定组合，如不锈钢与含氯离子介质、碳钢与湿硫化氢介质等，这类介质能破坏材料表面钝化膜，加速裂纹萌生。材料本身的组织结构缺陷会增加敏感性，裂纹多始于应力集中部位，且发展迅速、无明显预兆。2011 年某石化公司碱洗塔出口管线，在焊接残余拉应力与 165~200℃ 的低浓度 NaOH 介质共同作用下，焊缝及热影响区发生应力腐蚀开裂；国内某炼油厂常减压蒸馏装置因加工高硫原油，减压塔顶系统在硫化物介质与应力协同作用下也出现类似腐蚀失效，均印证了应力与腐蚀介质协同作用的破坏机制。

2 化工管道腐蚀防护技术的工程应用

2.1 涂层防护技术的工艺要点

涂层防护技术通过在管道表面形成致密保护膜隔绝腐蚀介质，核心工艺要点围绕基材处理、涂层选型与施工控制展开。基材处理需实现表面除锈、除油与粗糙度达标，通常采用喷砂除锈至 Sa2.5 级标准，确保涂层附着力满足长期使用要求。涂层选型需匹配工况特性，强腐蚀环境优先选用氟聚合物或聚脲涂层，土壤埋地管道适配环氧树脂涂层，高温工况则选用耐高温陶瓷涂层。施工过程中需控制涂装环境温湿度，采用高压无气喷涂保证涂层厚度均匀，避免气泡、针孔等缺陷。某化工园区循环水管道采用环氧树脂涂层防护，经规范施工后涂层厚度达 300 μm ，在 pH 值 4~10 的介质环境中连续运行 5 年未出现腐蚀破损，有效延长了管道使用寿命。

2.2 阴极保护技术的参数设计

阴极保护技术通过电化学作用抑制管道腐蚀，参数设计需结合管道材质、环境介质与运行工况精准制定。牺牲阳极法需合理选择阳极材料，碳钢管道常用锌合金或铝合金阳极，根据管道表面积与腐蚀速率计算阳极用量，确保阳极输出电流稳定。外加电流法需确定最佳保护电位范围，碳钢管道通常控制在 -0.85V 至 -1.20V（相对饱和甘汞电极），同时匹配阳极地床位置与数量，避免保护死角。辅助参数设计中，管道绝缘接头的安装间距需按介质电阻率调整，土壤环境中一般每 2km 设置 1 个，确保保护电流有效覆盖。某滨海化工区输油管道采用外加电流阴极保护系统，通过优化阳极地床布局与保护电位参数，使管道年腐蚀速率降至 0.02mm 以下，达到充分耐腐蚀标准。

2.3 耐蚀材料选型的技术原则

耐蚀材料选型需遵循介质适配、工况匹配与经济

平衡的核心原则，综合保障管道腐蚀防护效果。介质适配原则要求根据介质酸性、腐蚀性离子含量选型，强酸性介质优先选用聚四氟乙烯或哈氏合金，含氯离子介质避免普通不锈钢，选用双相不锈钢或衬塑复合管。工况匹配原则需兼顾温度与压力参数，高温工况选用铬钼合金钢或特种工程塑料，低温环境优先采用奥氏体不锈钢，高压管道则选用高强度耐蚀合金钢。经济平衡原则需综合考量采购、安装与维护成本，普通腐蚀环境优先选用碳钢加防护涂层组合，极端工况可采用钛合金或复合材料。某热电厂脱硫系统管道，针对含氯离子酸性浆液工况，选用 2205 双相不锈钢材质，结合衬胶防护处理，在 80℃ 工作温度下实现连续 6 年稳定运行，未发生腐蚀失效问题。

3 化工管道腐蚀防护的质量控制体系

3.1 施工过程的标准化管控

施工过程的标准化管控贯穿防腐工程全流程，核心围绕基层处理、材料应用与工艺实施三大关键环节建立规范。基层处理需严格遵循清洁、干燥、粗糙的核心要求，钢材表面需通过喷射除锈达到 Sa2.5 级标准，粗糙度控制在 40~80 μm ，混凝土基层需确保 pH 值在 7~10 之间、含水率不超过 6%。材料使用需执行进场复检与相容性验证制度，底漆与面漆需配套选用，避免出现咬底现象，过期或变质材料严禁投入施工。工艺实施阶段，涂层施工采用横竖交叉刷涂或高压无气喷涂，控制每道干膜厚度在 20~40 μm ，衬里施工需逐层压实避免气泡，金属镀层后需进行封闭处理。某化工园区管道工程通过落实该标准化管控，将施工缺陷率从 8.3% 降至 1.2%，大幅提升了防护层初始质量。

3.2 防护系统的性能检测方法

防护系统的性能检测需结合常规检测与特殊检测手段，形成多维度验证体系。常规检测中，涂层厚度采用电磁感应式测厚仪抽样测量，确保合格率不低于 90%；附着力通过划格法或拉力试验评估，等级需控制在 2 级以内；阴极保护电位采用高阻抗电压表搭配 Cu/CuSO₄ 参考电极监测，保障参数达标。特殊检测针对高风险场景开展，采用超声波测厚仪检测管道壁厚，电火花检漏仪排查涂层针孔缺陷，土壤电阻率测试仪评估环境腐蚀性，智能清管器实现管道内部隐患精准定位。某沿海化工项目通过组合运用盐雾试验箱进行老化模拟测试与电化学阻抗谱检测，提前发现 3 处隐蔽涂层缺陷，避免了投用后因介质腐蚀引发的泄漏风险。

3.3 腐蚀防护的技术验收规范

腐蚀防护的技术验收规范遵循三级验收机制，明

确外观、性能与资料三大核心验收维度。外观验收要求涂层无漏涂、流挂、橘皮等缺陷,衬里无鼓泡、开裂,金属镀层均匀完整;性能验收需依据 GB/T 1771、GB/T 21246 等标准,通过耐盐雾试验、阴极保护参数测试等验证防护效果,确保涂层耐盐雾性不低于 500h。资料验收需收集完整的施工方案、材料合格证、工序检测记录等文件,整理形成标准化验收报告。验收过程需由具备资质的第三方机构参与,关键工序需签署验收记录后方可推进下一道施工。某石化管道防腐工程严格执行该验收规范,所有检测指标均符合 SH/T 3548-2024 行业标准,防护系统使用寿命较常规验收项目延长 30% 以上。

4 化工管道长效运维的策略体系

4.1 腐蚀状态的动态监测方案

腐蚀状态动态监测需构建“多技术融合+全时段覆盖”的监测体系,结合管道运行环境与介质特性选择适配技术。针对长输管道,采用分布式光纤传感系统与管道同沟敷设,通过监测散射光相位变化实时感知应变与温度异常,实现第三方施工破坏的秒级预警。对于管道内部腐蚀,运用搭载多通道传感器阵列的智能内检测机器人,生成内壁 3D 磁力线云图,精准识别壁厚损失与腐蚀缺陷,其检测灵敏度可达 0.1mm。锦州石化在 320km 长输管道运维中,整合 5G 无线报警器、高清监控与无人机巡检系统,结合 GIS 平台实现 13000 余个坐标点的腐蚀状态可视化追踪,2024 年汛期通过该系统快速定位 16 处水土流失引发的腐蚀风险点,为防护工程提供精准数据支撑。

4.2 防护系统的周期性维护策略

防护系统的周期性维护需遵循“预防性为主、分级处置”原则,建立覆盖日常、季度、年度的全周期维护机制。日常维护聚焦涂层完整性检查与阀门润滑,及时修补局部破损涂层,避免腐蚀介质渗透;季度维护重点开展管道壁厚测量,对焊缝、弯头等高应力部位强化检测,同步校验安全阀、压力表等安全附件;年度维护则进行全面压力测试与防护系统性能评估,结合腐蚀数据更换老化部件。针对地下管道阴极保护系统,定期检测牺牲阳极消耗状态与外加电流输出稳定性,确保保护电位持续达标。某石化企业通过该策略,按季度对高含硫介质管道进行缓蚀剂补充,年度开展涂层完整性检测与修复,使管道腐蚀速率控制在 0.1mm/a 以内,较传统维护模式延长使用寿命 15 年以上。

4.3 运维数据的信息化管理方法

运维数据信息化管理核心在于构建“数据整合-智能分析-决策支撑”的闭环体系,依托数字化平台

实现全生命周期管理。通过 GIS 地理信息系统搭建管道运维专属平台,整合管道路由、材质参数、检测记录等 159 项管理信息,形成多专业图层,支持 19 级缩放实景查看与数据远程共享。利用大数据与 AI 算法对腐蚀监测数据、维护记录进行深度分析,建立腐蚀速率预测模型,自动生成维修优先级清单。锦州石化的 GIS 长输管道管理平台沉淀近十年健康数据,实现检修资料与管道坐标精准关联,2024 年管道大修中通过该平台快速完成 7 段管线内检路由沟通,效率较传统方式提升数倍,同时为交叉施工项目提供精准风险评估数据,推动运维模式从“被动处置”向“主动防控”转型。

5 结语

化工管道腐蚀防护是保障化工生产安全稳定运行的关键环节,需以腐蚀机理研究为基础,通过涂层防护、阴极保护、耐蚀材料选型等核心技术的精准应用,构建覆盖施工、检测、验收的全流程质量控制体系。长效运维策略的落地则需依托动态监测技术、周期性维护机制与信息化管理平台,实现腐蚀风险的提前预警与精准管控。多技术协同与全流程管理模式的深度融合,能够显著降低管道腐蚀失效概率,延长管道全生命周期,为化工行业安全生产提供坚实的技术保障,同时为高腐蚀工况下的管道防护技术升级提供可行的实践路径。

参考文献:

- [1] 潘一,孙林,杨双春,等.国内外管道腐蚀与防护研究进展[J].腐蚀科学与防护技术,2014,26(1):4.
- [2] 赵文德.石油天然气管道的腐蚀与防护[C]//全国石油和化学工业腐蚀与防护技术论坛.中国工程建设协会;中国化工机械动力技术协会;中国石油和石化工程研究会,2009.
- [3] 祝馨.长输管道的腐蚀与防护[J].石油化工腐蚀与防护,2006,(01):51-53.
- [4] 何仁洋,唐鑫,赵雄,等.管道石油天然气腐蚀防护的相关技术研究进展[J].化工设备与管道,2013,050(001):53-55.
- [5] 辛莹.石油天然气管道腐蚀与防护技术分析[J].中国化工贸易,2017,009(033):9.
- [6] 刘保磊,张雪玲.油气田卤水提锂技术研究进展[J].有色金属(冶炼部分),2025(09).
- [7] 万广昊,侯绪东.蒸馏塔设备腐蚀防护技术改进实践[J].化学工程与装备,2026(01).
- [8] 王梦徽.耐硫酸腐蚀管道材料的特性分析及选用[J].石油化工腐蚀与防护,2023(06).