

# 石油管道化学防腐工艺中的安全保障技术探讨

田晓庆 (山东胜利建设监理股份有限公司, 山东 东营 257000)

**摘要:** 为攻克复杂工况下石油管道因腐蚀引发的结构劣化与安全威胁难题, 本文对化学防腐工艺里的关键安全保障技术开展了全面探究, 着重剖析化学品管控、本质安全规划、作业管控、人员防护以及检测评价等核心部分, 倡导搭建多维度协同的安全管控体系, 增强防腐作业的工程稳固性与操作可靠性。借助智能监控与信息化举措, 达成了防腐流程中风险的即时察觉与应急响应机制的改进。研究结果可为油气管道运维单位的防腐设计与安全管理工作提供技术借鉴和实践依据。

**关键词:** 石油管道; 化学防腐工艺; 安全保障技术

**中图分类号:** TE988 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 002-0151-03

## Discussion on safety technology in pipeline chemical anticorrosion process

Tian Xiaqing (Shandong Shengli Construction Supervision Co., LTD., Dongying Shandong 257000, China)

**Abstract:** To address the structural degradation and safety hazards caused by corrosion in oil pipelines under complex operating conditions, this study conducts a comprehensive investigation into critical safety assurance technologies in chemical anti-corrosion processes. The analysis focuses on core aspects including chemical control, intrinsic safety design, operational management, personnel protection, and monitoring evaluation. We advocate establishing a multi-dimensional collaborative safety management system to enhance the engineering stability and operational reliability of anti-corrosion projects. Through intelligent monitoring and information technology initiatives, real-time risk detection and improved emergency response mechanisms in anti-corrosion processes have been achieved. The research findings provide technical references and practical guidance for anti-corrosion design and safety management in oil and gas pipeline operations.

**Keywords:** Oil pipelines; Chemical anti-corrosion processes; Safety assurance technologies

石油管道作为能源输送的重要基础设施, 其长时间稳定运转直接关乎石油行业的安全与经济成效。受多样复杂工况影响, 金属管道很容易出现腐蚀损坏, 引发渗漏、爆管等高危事件。化学防腐作为高效防腐手段, 在石油领域大量应用, 但使用时存在较高操作风险和环境压力。开展对防腐工艺中安全保障技术的深度探究, 对提高管道系统整体防护水平具备关键工程意义。

### 1 化学防腐基本原理

化学防腐的基本原理依赖于对金属腐蚀反应路径的控制与中断, 核心机制在于抑制电化学反应过程中的阳极金属溶解或阴极氧还原反应。在石油管道系统中, 金属材料在含水、含氧或含其他腐蚀性离子的环境中极易形成原电池结构, 从而引发局部或广泛腐蚀。通过施加缓蚀剂、形成保护性化学膜或诱导钝化层生成, 可有效降低金属电极电位差与电子迁移速率, 从源头抑制腐蚀反应的连续性。

不同类型的腐蚀抑制剂, 如阳极型、阴极型或混合型缓蚀剂, 其作用机制各异, 但均以阻断腐蚀介质接触或改变电极过程为基本手段<sup>[1]</sup>。化学防腐方法强调环境适配性与腐蚀机理匹配度, 必须根据管道材质、运行介质及环境参数精准选择防护方案, 以实现腐蚀控制的长期稳定性与工艺可控性。

### 2 石油管道化学防腐工艺的安全保障技术

#### 2.1 化学品安全管理技术

化学品安全管理是石油管道化学防腐系统中保障运行稳定性的基础技术环节, 其核心在于实现对易燃、易爆、有毒及强腐蚀性物质的全生命周期控制。从物资入库到现场应用, 必须执行分级分类管理体系, 依据《化学品分类与标签规范》(GB30000.2 ~ 29) 进行危险性分级与标签标准化作业。以有机胺类缓蚀剂为例, 其闪点多在 65℃ 以下, 属于低闪点液体, 储存时应保持环境温度在 30℃ 以下, 相对湿度控制在 60% 以内, 通风换气频率不低于每小时 6 次。储罐材料应采用 316L 不锈钢材质, 厚度  $\geq 5\text{mm}$ , 内壁喷涂防渗透聚合涂层以抵抗化学侵蚀。运输过程中应采用专用密封容器, 抗震等级不低于 0.5g, 确保在装卸过程中无泄漏、无静电积聚。作业现场必须配备防爆型气体检测设备, 其检测灵敏度不低于 1ppm, 实时监测挥发性有机物浓度, 并与 PLC 系统联动实现超限报警与连锁停机<sup>[2]</sup>。操作区配置化学品泄漏应急池, 容量应达到单次最大使用量的 150%, 确保泄漏事故在第一时间受控。

#### 2.2 工艺系统的本质安全设计

石油管道化学防腐工艺的本质安全设计应以“系统本质无害化、风险最小化”为核心原则, 构建具备

抗误操作、自我诊断与故障隔离能力的技术体系。在工艺设计初期,应对腐蚀介质种类、防腐剂浓度、反应速率及热效应进行多参数动态模拟,采用CFD与FEM联用仿真,确保系统在最大负载与极端环境下的稳定性。以自动加药系统为例,关键组件如计量泵应具备脉动阻尼装置,流量精度控制在 $\pm 1.5\%$ 以内,具备防干运行保护和高压自动泄压功能。加药管线采用聚偏二氟乙烯(PVDF)材质,额定耐压不低于1.6MPa,耐温区间 $-20^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$ ,抗化学溶胀系数 $\geq 0.95$ ,确保在高腐蚀性环境下保持长期密封性<sup>[3]</sup>。系统控制部分应采用冗余架构PLC控制单元,具备分布式IO隔离与热备份切换机制,关键控制逻辑应配置三级联锁保护:液位超限、压力突变、温度漂移分别触发不同等级响应策略。反应釜与储液罐体应设计为负压吸附型结构,一旦系统泄压失效自动进入隔离状态。此外,应配置自清洁过滤模块,过滤精度 $\leq 10\mu\text{m}$ ,确保微粒不堵塞管路系统。

### 2.3 作业过程中的安全控制技术

化学防腐作业过程中存在多类型高风险操作点,需采用分层控制策略与多级联锁系统相结合的方式实施过程安全控制。首先,关键作业区域必须设置可编程安全控制单元(SIS),独立于主PLC系统运行,响应时间不应超过0.5s,用以处置高压喷涂失控、高温热解、混合物反应失衡等突发异常。现场压力控制点应配备高频响应压力变送器,测量精度优于 $\pm 0.25\%\text{FS}$ ,设定三级报警阈值,确保在压力异常趋势初现时即触发限流装置。操作人员进入封闭施工区前,必须通过生物识别系统与智能工单系统绑定,避免误操作与非授权启停风险。喷涂工艺应采用闭环流量控制系统,反馈响应周期不大于200ms,可实现加药剂量误差不超过 $\pm 1.2\%$ 。所有移动操作平台及化学加注点应配置抗静电接地系统,接地电阻应小于 $10\Omega$ ,同时使用热像仪监控关键连接部位的发热异常<sup>[4]</sup>。每一防腐作业单元须设定过程控制限值与边界条件,超过设定范围即强制中断工艺流程,通过本质失效响应机制防止风险扩散,构建具备动态感知与自主干预能力的安全控制结构。

### 2.4 环境与人员保护技术

为减少化学防腐操作里有害物质对作业环境和人员健康的危害,应建立以主动防护为核心的多层次环境调控与个体防护架构。室内工作区域需配置高效通风与局部排风体系,风量设计应达成每小时空气置换次数不少于15次,废气收集率应达到90%及以上,且连接含催化氧化模块的尾气处理设备,让VOCs排放浓度控制到 $30\text{mg}/\text{m}^3$ 以内。作业区环境监测系统需整

合 $\text{PM}_{2.5}$ 、VOC及有毒气体(如HCl、 $\text{NO}_x$ )的在线检测单元,检测频率至少达到1次/min,一旦浓度超出标准,便开启自动通风与语音报警系统。就人员防护而言,应强制配置符合EN 136标准的全封闭正压防毒面具,滤芯需每8h更换一次,且要穿着达到EN 14605等级的防化服,其抗渗透等级需至少达到4级。重要作业岗位应当设置生理参数监测器具,实时对运动状态、皮肤温度和心率进行监测,一旦出现异常信号便启动应急响应。于各作业区的入口位置建造负压式除尘吹淋空间,避免有毒颗粒扩散到外部空间<sup>[5]</sup>。防护技术应覆盖整个工序环节,包含物料接触、装卸、操作及清洗时段,搭建从源头阻止、过程隔离到末端清洁的循环式环境与人员保护架构。

### 2.5 检测与评估技术

需融合多维度理化参数开展石油管道化学防腐系统性能检测与安全评估,搭建基于实时监测与模型预测相互结合的技术体系。借助脉冲电火花检漏法开展防腐层完整性检测,检测电压根据涂层厚度设定,若涂层厚度是 $1000\mu\text{m}$ ,推荐将检测电压定为10kV,检漏要达到能检测出直径0.1mm针孔的灵敏度。采用线性极化电阻(LPR)法能达成对腐蚀速率评估的动态监测,其精准度在 $\pm 5\%$ 以内,同时设置与管道母材材质相同的腐蚀挂片,以此验证长期趋势。挂片所采用的材质要与管道母材一致,暴露时间应达到180天及以上。

要在现场借助便携式X射线荧光光谱仪(XRF)对涂层中的重金属含量开展快速筛查工作,保证达环保限值要求,例如Cr(VI)浓度不得超出0.1%。利用超声相控阵(PAUT)的厚度测量系统应将整个焊缝和关键接头区域纳入覆盖范围,厚度检测精准度达 $\pm 0.1\text{mm}$ 以内,可实现对涂层剥离和底材局部减薄现象的识别。借助多源数据整合,能搭建腐蚀发展趋向预测模型,把神经网络算法与贝叶斯推理办法整合,达成剩余寿命预测误差在 $\pm 10\%$ 的控制目标。需将全部检测结果整合进结构化数据库,借助GIS系统开展空间映射与时间序列分析,为维护决策供给数据支持。

## 3 安全保障体系的构建与管理机制

### 3.1 安全技术标准与规范体系

化学防腐工艺的安全保障体系必须建立在系统完备的技术标准与强制性规范基础上。其核心依据之一为《石油天然气工程设计防火规范》(GB 50183-2004),该规范对防腐作业区的火灾危险等级划分、防爆区域控制界限、防火间距与防护结构等级提出量化要求,有效指导腐蚀介质作业区域的风险隔离与火灾防控设计。另一项关键标准为《化学品安全技术说

说明书内容和项目顺序》(GB/T 16483-2008), 其对涉及防腐材料的危害分类、理化特性、毒理学信息、泄漏应急处理、储存控制条件等内容作出技术性规定, 确保信息传递的完整性与一致性。标准执行过程中应结合企业内部操作规程与质量管理体系, 建立从材料采购、设备选型、工艺控制到现场监督的全流程标准化体系。技术规范体系化应用不仅规范操作边界, 还能在事故预防、隐患排查与过程评估中提供量化依据, 为构建具有工程约束力的安全保障框架提供制度支撑。

### 3.2 安全培训与作业许可制度

防腐工艺涉及的高危操作必须依托严密的安全培训与作业许可制度加以管控, 确保人员具备相应技术资质和风险识别能力。作业人员应通过三级培训体系完成专业课程学习, 包括化学品识别、应急响应、个人防护、设备操作规程及风险控制方法, 培训周期不得低于每年 48 学时, 考核合格率须达到 90% 以上。关键岗位人员需取得《危险化学品从业人员安全培训合格证》(国家安全监管总局令第 30 号) 后方可上岗。作业许可制度应采用双人双签机制, 施工前 24h 内完成《高危化学作业单元作业票》的审批, 票据中需明确化学品种类、作业时限、安全防护措施及应急预案。审批流程需经安环部、技术部与作业责任人逐级确认, 并通过电子许可系统归档留存。同时应设置动态吊销机制, 任何关键防护措施不到位或环境条件不符合许可要求时, 系统自动中止操作流程。通过制度化培训与准入管控, 形成以能力认证为基础、以风险评估为前提、以闭环管理为支撑的作业安全管控体系。

### 3.3 风险预警与事故应急机制

应依托多维参数感知、实时数据比对以及动态响应举措, 构建石油管道化学防腐作业的风险预警体系。系统运用设置高敏感度传感器阵列对关键工艺节点实施监测, 如加药处压力起伏、反应区域升温速度以及可燃气体浓度改变, 实时数据经过边缘计算处理后被上传到中央预警平台。平台借助多因素模糊推理算法对阈值偏离情况开展等级判别, 按风险级别给出不同响应指令。若监测值相较于设定上限的偏离幅度超过 15%, 系统会自动开启一级响应机制, 包含紧急停止加药剂、关闭作业区域入口以及启动强排装置。应急响应系统需配备由独立电源支撑的多级协同装置, 包含泄漏液体收集封闭、气体爆炸抑制药剂喷洒以及自动广播装置。

事故起始阶段, 调度平台能借助 3D 作业场景建模模块迅速确定风险源并引导人员撤离路线。每月需对全部应急预案开展桌面演练与现场验证, 使系统具

备迅速恢复控制的能力与规范的处置流程, 形成预警-响应-控制的完整闭环体系。

### 3.4 安全管理信息化与数字化手段

化学防腐作业的安全管理数字化体系应以工业物联网 (IIoT) 架构为核心, 集成传感层、通信层与数据决策层, 实现风险实时识别与可视化管理。系统通过 RFID 定位技术对人员与设备实施动态监控, 关键作业点设有 UWB 标签, 定位误差控制在  $\pm 30\text{cm}$  以内。数据通过 5G 通信专网低延迟回传至云平台, 平台基于数字孪生建模同步映射现场状态, 并接入 AI 故障预测模型进行趋势判断与异常识别。每一防腐任务的工艺参数、人员分布、化学品用量及环境变量均被自动记录并生成时间戳溯源日志。通过集成 BIM+SCADA 平台, 可实时联动监测、报警与指令下发, 实现“看得见、控得住、溯得回”的管理闭环。界面端采用多层级权限分配制度, 保障各类用户精准获取对应信息, 提高调度效率与处置速度。数字系统还支持统计回顾与绩效分析, 协助决策层评估作业效率、合规性与风险控制水平, 最终实现安全管理从经验驱动向数据驱动的转型。

## 4 结语

总而言之, 石油管道在长期服役过程中面临严峻的腐蚀威胁, 化学防腐工艺虽能有效提升防护性能, 但其本身的化学特性与操作复杂性也带来多重安全风险。构建科学的安全保障体系, 必须从化学品管理、本质安全设计、作业控制、环境防护到智能化监测多维协同, 形成闭环式技术防线。唯有将安全保障技术深度融入防腐全流程, 才能真正实现管道运行的高效与可持续。

### 参考文献:

- [1] 张丽丽. 石油管道防腐中外部环境对防护策略的优化研究 [J]. 清洗世界, 2025, 41(06): 101-103.
- [2] 王凤生, 张春雨, 王鹏. 油田管道防腐层检测技术及管道维护探讨 [J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(06): 197-202.
- [3] 易顶珍. 石油化工管道防腐蚀技术的应用和改进研究 [J]. 中国设备工程, 2023, (15): 174-177.
- [4] 于立才. 石油管道化工防腐的安全技术探讨 [J]. 中国设备工程, 2023, (07): 225-227.
- [5] 崔岩. 石油管道防腐机理与技术探究 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(19): 186-188.

### 作者简介:

田晓庆 (1991.09-), 男, 汉, 山东省滨州市, 本科, 工程师, 研究方向: 化工石油管道。