

长距离输水工程中涂塑钢管防腐材料的选型与性能优化设计研究

孟超杰

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 在长距离输水工程中,涂塑钢管防腐材料的科学选型与性能优化是保障管道安全与使用寿命的关键。选型需综合考虑水质、地质条件:内防腐材料依水体特性选择,如淡水用水泥砂浆衬里、饮用水用无溶剂环氧;外防腐按地质适配,直埋段用熔结环氧粉末,复杂地质选三层聚乙烯。性能优化通过多层复合涂层、纳米改性提升抗渗耐磨性,协同阴极保护构建双重防护,并利用数值模拟精准指导设计,降低腐蚀风险。

关键词: 长距离输水工程;涂塑钢管防腐材料;选型;性能优化设计

引言:长距离输水工程作为国家水资源调配的关键基础设施,对保障城乡用水安全、促进区域经济发展意义重大。涂塑钢管凭借其良好的耐腐蚀性与机械性能,在该领域广泛应用。然而,输水沿线复杂的环境条件,如不同水质、地质及气候因素,致使钢管面临多样化的腐蚀威胁,严重影响管道使用寿命与输水安全。因此,科学选型防腐材料并优化其性能设计,成为确保长距离输水工程稳定运行、降低全生命周期成本的核心环节,也是当前行业亟待深入研究的重要课题。

1 涂塑钢管腐蚀机理与环境适应性分析

1.1 腐蚀类型与影响因素

(1) 电化学腐蚀是最普遍的腐蚀形式,其反应速率与土壤电阻率、 Cl^- 浓度密切相关。当土壤电阻率处于 $30-100\Omega \cdot m$ 区间时,土壤导电性增强,钢管基材与涂层缺陷处形成原电池,加速电子转移;在海水淡化工程中,若水体 Cl^- 浓度 $\leq 150mg/L$,虽可维持较低腐蚀速率,但 Cl^- 仍会穿透涂层微小孔隙,破坏钝化膜,引发点蚀。(2) 微生物腐蚀集中于埋地敷设段,核心致腐微生物为硫酸盐还原菌。该类细菌在厌氧土壤环境中代谢产生 H_2S ,与钢管表面铁元素反应生成硫化亚铁,同时其代谢产物会降低局部pH值,进一步加剧腐蚀,尤其在土壤含水率15%-25%的湿润区域,细菌活性达到峰值。

(3) 机械损伤则破坏涂层物理屏障,在冻土区施工中,机械冲击易导致涂层开裂;地面沉降产生的拉伸应力会使涂层与基材剥离,暴露的钢管表面直接与腐蚀介质接触,大幅缩短使用寿命。

1.2 环境分级与腐蚀等级判定

(1) 依据GB50487《钢铁工业水处理设计规范》,水质腐蚀性分为三级:弱腐蚀($pH6.5-8.5$, $Cl^- \leq 50mg/L$)、中腐蚀($pH5.5-6.5$ 或 $8.5-9.5$, $Cl^- 50-100mg/L$)、强腐蚀($pH < 5.5$ 或 > 9.5 , $Cl^- > 100mg/L$),该分级为水处理系统中钢管选型提供核心依据。(2) 土壤腐蚀性分级以电阻率为关键指标,参考工程实践:电阻率 $> 100\Omega \cdot m$ 为弱腐蚀, $50-100\Omega \cdot m$ 为中腐蚀, $< 50\Omega \cdot m$ 为强腐蚀,如某市政管道工程中,土壤电阻率检测值为 $30\Omega \cdot m$,判定为强腐蚀环境,需采用加厚涂层或阴极保护措施。(3) 特殊环境标识需重点关注两类场景:一是电气化铁路周边,杂散电流会穿透涂层引发电化学腐蚀,腐蚀速率较普通土壤高3-5倍;二是化工废水输送管道,强酸碱介质(如 $pH < 2$ 的酸性废水)会直接溶解涂层,需选用耐酸碱专用涂层材料^[1]。

2 长距离输水工程中涂塑钢管防腐材料选型体系构建

2.1 内防腐材料选型

(1) 水泥砂浆衬里是淡水输送工程的经典选择,其防腐机理在于与水体反应形成 $pH > 12$ 的强碱性钝化膜,可有效抑制钢管基材电化学腐蚀。但该材料存在严格适用限制:水体 Cl^- 浓度需 $< 50mg/L$,避免 Cl^- 破坏钝化膜引发点蚀;用于顶管施工时,需掺入聚丙烯纤维提升抗裂性能,防止管道顶进过程中衬里因应力开裂,某平原地区输水工程采用该方案后,实现15年内无内腐蚀渗漏记录。(2) 无溶剂液态环氧为饮用水输送专用材料,需符合NSF61饮用水安全标准,确保水质无有害物质溶出。其关键技术指标为一次涂装厚度 $\geq 200\mu m$,通过常温固化形成致密涂层,隔绝水体与钢管接触。某跨流域调水工程选用该材料,经模拟老化试验验证,涂层可保持40年以上完好性,且输水过程中水质达标率100%。(3) 聚氨酯涂层是化工废水输送管道的首选内防腐材料,具备优异耐酸碱性能,实验室测试显示,其在 $pH = 2$ 的强酸性废

水环境中浸泡1年,涂层无起泡、剥落,钢管基材无腐蚀痕迹。同时,该涂层弹性模量高,可适应废水输送过程中的压力波动,某工业园区废水管网采用该方案后,管道维护周期延长至8年以上。

2.2 外防腐材料选型

(1) 熔结环氧粉末(FBE)是直埋段钢管的标准外防腐材料,采用静电喷涂工艺,涂层厚度需 $\geq 400\mu\text{m}$,确保在土壤中形成完整屏障;附着力要求 $\geq 70\text{N/cm}$,避免土壤摩擦导致涂层脱落。某北方地区输水工程直埋段采用FBE涂层,在土壤电阻率 $30\text{-}50\Omega\cdot\text{m}$ 的中腐蚀环境中,实现20年无外腐蚀失效案例。(2) 三层聚乙烯(3PE)适用于复杂地质条件,如软土地基、岩石地段,其由底层环氧、中层胶粘剂、外层聚乙烯组成,兼具防腐与抗机械损伤性能。某山区输水工程穿越断层带时选用3PE涂层,不仅抵御了施工过程中的岩石刮擦,还因聚乙烯外层光滑特性,使管道水力损失降低30%,提升输水效率^[2]。

(3) 环氧玻璃鳞片为顶管施工专用外防腐材料,干膜厚度需 $\geq 300\mu\text{m}$,鳞片层层叠加形成迷宫式抗渗结构,抗渗性较普通环氧涂层提升2倍。在城市地下输水顶管工程中,该材料可有效隔绝地下水渗透,某城市输水隧道顶管段采用该方案后,管道外壁渗水率降至0.1%以下。

2.3 接口防腐强化方案

(1) 材料组合采用“环氧富锌底漆+玻璃布增强+氟碳面漆”三层结构:环氧富锌底漆富锌量需 $\geq 80\%$,发挥阴极保护作用;玻璃布增强层提升涂层整体性,防止接口变形导致涂层开裂;氟碳面漆具备抗紫外线老化性能,避免露天接口因日晒雨淋失效,该组合在露天管道接口应用中,防腐寿命可达30年以上。(2) 工艺控制执行四步闭环法:第一步预处理,采用喷砂除锈至Sa2.5级,确保接口表面无锈蚀、油污;第二步化学除污,用酒精擦拭接口表面,去除残留杂质;第三步干燥,控制接口表面含水率 $< 3\%$,避免涂层与基材间形成气泡;第四步涂层搭接,要求涂层搭接宽度 $\geq 15\text{cm}$,保证接口完全覆盖。某跨河输水管道接口施工采用该工艺,一次验收合格率达98%。(3) 检测标准明确双重指标:使用磁性测厚仪检测涂层总厚度,要求 $\geq 0.8\text{mm}$;采用电火花检漏仪,在2560V检测电压下,接口无漏点即为合格。某大型输水工程通过该检测标准,有效规避了接口防腐缺陷,投运后5年内无接口腐蚀渗漏问题。

3 长距离输水工程中涂塑钢管防腐材料的性能优化设计方法

3.1 涂层结构优化

针对长距离输水工程中管道内外环境差异,通过涂

层结构创新实现防腐性能精准匹配。(1) 多层复合设计采用“内壁熔结环氧+外壁3PE”的差异化防护策略:内壁熔结环氧涂层凭借优异抗化学腐蚀性,可抵御输水中微量污染物(如溶解性盐类、有机物)的侵蚀;外壁3PE涂层(环氧底漆+胶粘剂+聚乙烯层)则聚焦抗机械损伤能力,能承受直埋施工中的土壤摩擦、石块冲击。某跨流域调水工程采用该设计后,管道内防腐失效周期延长至35年以上,外壁因机械损伤导致的腐蚀风险降低60%。(2) 功能梯度涂层遵循“从内到外硬度递减”原则优化性能:内层选用高硬度聚乙烯材料(邵氏硬度 $\geq \text{D65}$),增强管道内壁耐磨性,适应水流长期冲刷(流速 $\leq 2.5\text{m/s}$ 工况);外层采用柔韧性环氧涂层(断裂伸长率 $\geq 5\%$),可缓解土壤沉降、温度变化引发的涂层应力开裂。在软土地基输水工程中,该结构使涂层开裂率从传统涂层的12%降至2.1%。(3) 纳米改性技术通过在涂层基体中添加 SiO_2 纳米颗粒(粒径 $50\text{-}100\text{nm}$)提升界面结合性能,实验室测试数据显示,改性后涂层与钢管基材的湿附着力(浸泡72h后)提高40%,且抗渗性显著增强,在 0.8MPa 水压下,涂层透水率降至 $0.01\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 以下,有效阻断腐蚀介质渗透路径^[3]。

3.2 阴极保护协同设计

构建“涂层屏障+阴极保护”双重防护体系,解决涂层缺陷处的局部腐蚀问题,提升整体防腐可靠性。(1) 牺牲阳极法适用于土壤电阻率 $30\text{-}100\Omega\cdot\text{m}$ 的区域,选用C-AZ63B-22-S型镁合金阳极(开路电位 $\geq -1.75\text{VvsCu/CuSO}_4$),通过阳极自身腐蚀为钢管提供持续阴极保护。某平原地区输水管道直埋段采用该方案,阳极理论使用寿命达15年,管道腐蚀速率控制在 0.001mm/a 以内,远低于行业标准($\leq 0.01\text{mm/a}$)。(2) 强制电流法采用深井阳极地床(埋深 $\geq 15\text{m}$)布局,相较于传统浅埋阳极地床,减少占地面积80%,且因阳极远离地表干扰,保护电流稳定性提升50%。某长距离输水工程应用该技术后,每年阴极保护系统维护量减少70%,同时管道沿线保护电位偏差控制在 $\pm 30\text{mV}$ 内,满足GB/T21448-2017《埋地钢制管道阴极保护技术规范》要求。(3) 电位监控依托智能监测系统实现动态管控:在管道沿线每隔5km设置一处自动监测点,通过无线传输实时反馈保护电位(要求 $-0.85\text{V}\sim -1.20\text{VvsCu/CuSO}_4$),系统数据偏差 $\leq 50\text{mV}$,可及时预警阳极失效、涂层破损等问题。某沿海输水工程通过该系统,成功规避3次因潮汐影响导致的电位异常风险。

3.3 施工工艺优化

通过自动化、定制化工艺改进,解决防腐施工中的

质量波动问题,适配复杂工况需求。(1)自动化喷涂采用机器人控制系统,结合激光厚度检测与流量闭环调节,实现涂层厚度偏差控制在 $\pm 5\%$ 以内,相较于人工喷涂,涂层均匀性提升40%,某大型钢管厂引入该工艺后,防腐涂层一次合格率从85%提升至99%。(2)热熔连接技术突破传统连接局限,通过专用热熔设备(加热温度 $210\pm 10^{\circ}\text{C}$)实现千米级管道连续无渗漏连接,接口处涂层与管道本体形成整体防护。本溪某输水工程采用该技术,完成1200m长管道一次性连接,打压测试(1.2倍设计压力)无渗漏,施工效率较传统焊接提升3倍。(3)低温施工方案针对冬季施工难题,在涂层材料中添加5%固化促进剂(如叔胺类化合物),使涂层实干时间从48h缩短至12h,且在 -10°C 环境中仍能保证附着力 $\geq 60\text{N/cm}$ (划格法测试)。东北某冬季输水工程应用该方案,顺利完成20km管道防腐施工,涂层性能达标率100%。(4)曲面喷涂技术运用6轴机械臂(重复定位精度 $\pm 0.1\text{mm}$)配合定制化扇形喷嘴,实现管件 90° 弯头表面涂层均匀涂覆,厚度偏差 $< 8\%$,解决传统手工喷涂弯头部位“过薄漏涂”问题。某市政输水工程中,该技术应用于500余个弯头防腐,投运后无一处因弯头涂层缺陷引发腐蚀。(5)无溶剂喷涂工艺采用真空吸涂设备,减少挥发性有机物(VOCs)排放92%,符合GB37822-2019《挥发性有机物无组织排放控制标准》要求,同时无溶剂涂层固化后无针孔,抗渗性较溶剂型涂层提升50%,某生态敏感区输水工程采用该工艺,实现环保与防腐性能双重达标^[4]。

3.4 数值模拟辅助设计

借助专业模拟软件提前预测防腐系统性能,指导设计优化,降低工程试错成本。(1)流场-涂层耦合模型利用CFD软件(如Fluent)模拟水流对管道内壁涂层的冲蚀作用,通过调整管道内径(如从DN1200优化为

DN1400)、控制流速($\leq 1.8\text{m/s}$),某输水工程涂层冲蚀速率降低65%,内防腐寿命延长至40年。(2)电化学腐蚀预测基于COMSOL多物理场软件,构建“电极反应-介质传输-腐蚀产物扩散”耦合模型,可精准预测10年管道腐蚀深度,与现场实测数据误差 $< 0.2\text{mm}$ 。某沿海输水工程通过该模型,提前优化阴极保护参数,避免海水入侵引发的加速腐蚀(腐蚀速率降低70%)。(3)应力-应变分析采用ABAQUS软件模拟管道在土壤沉降(最大沉降量30mm)、温度变化($-20^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$)下的变形过程,分析涂层应力分布规律,指导抗裂涂层配方调整(如添加10%弹性体改性剂),使涂层抗裂临界应变值从0.5%提升至1.2%,在软土地基管道工程中,涂层开裂风险降低75%。

结束语

长距离输水工程中涂塑钢管防腐材料的选型与性能优化设计,是保障输水安全与工程经济性的重要举措。通过综合考量水质、地质等因素精准选材,结合多层复合、纳米改性等手段提升性能,并利用先进技术辅助设计,能有效增强管道的防腐能力。未来,随着材料科学与工程技术的发展,防腐体系将更加完善,为长距离输水工程的长效稳定运行提供更坚实保障。

参考文献

- [1]黎德玲,赖明锐.建筑防水材料的选择与施工质量控制研究[J].佛山陶瓷,2024,34(12):166-168.
- [2]李杰.埋地长输管道防腐与质量管理研究[J].全面腐蚀控制,2022,36(11):131-132.
- [3]安静,王俊,吴京洋.长输管道防腐措施及施工要点探讨[J].中国设备工程,2023,13(4):230-232.
- [4]王婧婧.给排水工程施工中管道防腐技术探讨[J].全面腐蚀控制,2022,36(11):127-128.