

埋地燃气管道土壤腐蚀环境评价及防腐涂层选型优化

郑立兵 杨玉虎 杨珊珊 (山东港华燃气集团有限公司, 山东 济南 250101)

摘要: 土壤腐蚀是诱发埋地燃气管道泄漏、破裂的首要致因, 严重威胁城市燃气供应系统的稳定安全。针对传统土壤腐蚀评价维度单一、防腐涂层选型缺乏针对性适配的行业痛点, 本文构建“多因子综合评价-性能精准适配”全链条技术体系。通过深度识别土壤电阻率、 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 浓度等 7 项核心腐蚀因子, 采用层次分析法 (AHP) 与熵权法组合赋权, 结合模糊综合评价法实现土壤腐蚀环境的精细化分级; 建立防腐涂层关键性能与腐蚀等级的动态适配模型, 提出“环境评价-性能匹配-成本优化-施工验证”的选型优化流程。经实际工程应用验证, 优化后的涂层服役寿命延长 30% 以上, 管道腐蚀失效风险降低 45%, 为埋地燃气管道防腐工程设计提供了科学、高效的技术支撑。

关键词: 埋地燃气管道; 土壤腐蚀; 环境综合评价; 防腐涂层; 选型优化; 组合赋权法

中图分类号: TU996.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 006-0166-03

Evaluation of Soil Corrosion Environment and Optimization of Coating Selection for Buried Gas Pipelines

Zheng Libing, Yang Yuhu, Yang Shanshan (Shandong Ganghua Gas Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250101, China)

Abstract: Soil corrosion is the primary cause of leakage and rupture in buried gas pipelines, posing a serious threat to the stable and safe operation of urban gas supply systems. Addressing the industry challenges of single-dimensional soil corrosion assessment and the lack of targeted compatibility in anti-corrosion coating selection, this study establishes a comprehensive technical system of “multi-factor comprehensive evaluation-performance precise matching.” By deeply identifying seven core corrosion factors such as soil resistivity and $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ concentration, the study employs a combination of the Analytic Hierarchy Process (AHP) and entropy weight method for weighting, along with fuzzy comprehensive evaluation to achieve refined classification of soil corrosion environments. A dynamic matching model between key coating performance and corrosion grades is developed, proposing an optimized selection process of “environmental assessment-performance matching-cost optimization-construction verification.” Practical engineering applications demonstrate that the optimized coating extends service life by over 30% and reduces pipeline corrosion failure risk by 45%, providing scientific and efficient technical support for the anti-corrosion engineering design of buried gas pipelines.

Keywords: buried gas pipelines; soil corrosion; comprehensive environmental assessment; anti-corrosion coatings; type selection optimization; combined weighting method

埋地燃气管道作为城市能源输送网络的核心组成, 长期服役于复杂多变的土壤环境中, 土壤腐蚀已成为制约管道服役寿命的关键瓶颈。土壤腐蚀具有隐蔽性强、渐进性破坏、修复难度大的特点, 传统评价方法多聚焦单一腐蚀因子 (如 pH 值、土壤含水量), 忽视了多因子间的协同腐蚀效应, 导致评价结果与实际腐蚀情况偏差较大; 同时, 防腐涂层选型多依赖工程经验, 缺乏与土壤腐蚀环境的精准匹配, 常出现涂层过早失效或过度防腐造成成本浪费的问题。

1 埋地燃气管道土壤腐蚀环境评价体系构建

1.1 腐蚀影响因子识别与筛选

土壤腐蚀是化学腐蚀、物理作用与微生物代谢协同作用的复杂过程。依托全国 12 座典型城市的 36 组土壤样本检测数据, 结合 108 起土壤腐蚀事故的深度复盘分析, 筛选出对管道腐蚀起主导作用的 7 项核心影响因子, 各因子的关键特性与阈值如下:

①土壤电阻率 (ρ): 直观反映土壤导电性能,

其数值高低与电化学腐蚀反应速率呈负相关, 实际工程中阈值范围为 $1-100 \Omega \cdot \text{m}$; ②土壤 pH 值: 决定土壤腐蚀的类型与强度, 分为酸性 (<6.5)、中性 ($6.5-8.5$)、碱性 (>8.5) 三类腐蚀环境, 取值区间为 $4.0-9.5$; ③含水量 (w): 影响土壤电解质的传导效率, 当含水量处于 $10\%-30\%$ 区间时, 腐蚀反应速率显著加快, 此区间为腐蚀临界区间; ④ $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 浓度 (C): 两类离子均能加速管道金属表面的阳极溶解过程, 易诱发电蚀、缝隙腐蚀, 关键阈值分别设定为 500mg/kg 、 1000mg/kg ; ⑤氧化还原电位 (E_h): 表征土壤的氧化还原状态, 当 $E_h < 200\text{mV}$ 时, 土壤处于强还原环境, 厌氧腐蚀反应加剧; ⑥土壤质地 (T): 按颗粒组成为砂土、壤土、黏土三类, 黏土因透气性差、水分易积聚, 易滋生厌氧腐蚀微生物; ⑦硫酸盐还原菌 (SRB) 含量 (N): SRB 代谢产生的硫化氢会加速金属腐蚀, 当含量超过 10^4 个/g 时, 管道腐蚀速率将提升 3 倍以上。

表 1: 不同准则层权重分布表

准则层	指标层	AHP 主观权重	熵权客观权重	组合权重
化学腐蚀因子	土壤 pH 值	0.15	0.13	0.14
	Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻ 浓度	0.18	0.21	0.20
	氧化还原电位 (Eh)	0.09	0.08	0.08
物理环境因子	土壤电阻率 (ρ)	0.16	0.17	0.17
	含水量 (w)	0.07	0.06	0.06
	土壤质地 (T)	0.05	0.05	0.05
微生物腐蚀因子	硫酸盐还原菌 (SRB) 含量	0.30	0.30	0.30

表 2: 各涂层中核心性能参数

涂层类型	附着力 (MPa)	耐盐雾腐蚀 (h)	耐阴极剥离 (mm)	耐微生物腐蚀	设计使用寿命 (年)	单位成本 (元 / m ²)
三层聚乙烯 (3PE)	≥ 10	≥ 3000	≤ 8	中等	25-30	180-220
熔结环氧粉末 (FBE)	≥ 12	≥ 4000	≤ 5	较强	30-35	200-240
聚氨酯 (PU) 涂层	≥ 8	≥ 2500	≤ 10	较弱	15-20	120-150
聚脲 (SPUA) 涂层	≥ 15	≥ 5000	≤ 3	强	35-40	300-350

1.2 评价指标体系设计

为兼顾评价的科学性与客观性,采用层次分析法 (AHP)与熵权法组合赋权,构建三级评价指标体系:①目标层:土壤腐蚀综合风险指数 (R),用于全面表征土壤对埋地管道的腐蚀风险程度;②准则层:涵盖化学腐蚀因子 (权重 0.42)、物理环境因子 (权重 0.28)、微生物腐蚀因子 (权重 0.30)三大维度,分别对应不同类型的腐蚀作用机制;③指标层:包含上述 7 项核心影响因子,通过 AHP 主观赋权与熵权客观赋权相结合的组合赋权法,最终确定各指标的综合权重 (见表 1)。

2 防腐涂层性能适配分析与选型优化

2.1 常用防腐涂层性能对比

选取工程中应用广泛的 4 类防腐涂层,通过实验室加速老化试验、现场服役数据统计,系统分析其核心性能参数,具体对比结果见表 2 (试验条件参照 GB/T23257-2017《埋地钢质管道防腐涂层技术规范》)。

2.2 涂层性能与腐蚀环境适配模型

针对不同腐蚀等级的环境特性,结合涂层核心性能参数,建立“腐蚀等级-涂层性能-应用场景”三维适配模型,具体适配方案如下:

①弱腐蚀 (I 级):土壤年均腐蚀速率 <0.05mm/a,优先选用聚氨酯 (PU) 涂层。该涂层施工便捷、成本低廉,耐磨性能优异,能满足低腐蚀环境下的基础防

腐需求;对于运维条件良好、设计寿命要求较高的项目,可选用 3PE 涂层,其三层复合结构能保障 20 年以上稳定服役。②中腐蚀 (II 级):土壤年均腐蚀速率 0.05-0.2mm/a,推荐选用 3PE 涂层。其聚乙烯外层的机械防护性能与环氧粉末内层的化学防腐性能形成互补,在 pH5.0-9.5、含水量 15%-30% 的土壤环境中,能有效抵御离子侵蚀与机械损伤,减少管道大修频次。③强腐蚀 (III 级):土壤 Cl⁻/SO₄²⁻ 浓度 >500mg/kg,腐蚀介质活性强,选用熔结环氧粉末 (FBE) 涂层。该涂层通过静电喷涂高温固化形成致密薄膜,孔隙率 <0.1%,耐化学介质侵蚀与阴极剥离性能突出,搭配阴极保护系统后,服役寿命可达 30 年以上。④极强腐蚀 (IV 级):土壤处于高盐、高湿、强还原环境 (如沿海盐碱地、湿地),采用聚脲 (SPUA) 涂层 + 阴极保护复合方案。聚脲涂层 10s 快速固化,形成无缝整体防护膜,抗微生物穿透与抗冲击性能优异,在 Cl⁻ 浓度 >3000mg/kg 的极端环境中,配合牺牲阳极保护,可实现 25 年以上无腐蚀失效。

同时,结合土壤质地优化涂层选择,砂土区域土壤颗粒坚硬,优先选用柔韧性好的 3PE 涂层 (邵氏硬度 D60-D70,抗冲击强度 >50J),避免回填过程中颗粒划伤涂层,黏土区域透气性差、SRB 易滋生,选用透气性优的 FBE 涂层,搭配抗菌底漆降低微生物腐蚀风险。

2.3 选型优化流程

构建“环境评价-性能匹配-成本优化-施工验证”的全流程涂层选型优化框架,具体步骤如下:

①土壤环境系统检测:按照 HJ/T 166-2004《土壤环境监测技术规范》,在管道敷设区域布设采样点,采集 0-50cm 深度土壤样本,完成 7 项核心腐蚀因子的实验室检测;②腐蚀等级精准判定:运用组合赋权-模糊综合评价法计算综合风险指数(R),确定土壤腐蚀等级;③涂层初步筛选:基于适配模型,筛选 2-3 种符合腐蚀等级要求的候选涂层;④全寿命周期成本优化:结合候选涂层的初始成本、施工成本、运维成本,采用寿命周期成本(LCC)分析法,筛选成本效益最优的涂层方案;⑤施工验证与调整:在特殊地质段落设置试验段,通过涂层附着力测试、现场施工适配性验证,最终确定最优选型方案。

3 案例分析

3.1 项目概况

某城市新建高压燃气管道工程,管线全长 28km,途经砂土、壤土、黏土三类土壤区域,其中 1.2km 路段穿越郊区盐碱地(Cl^- 浓度达 950mg/kg),土壤环境复杂多样。为提升管道防腐可靠性、控制工程成本,对沿线 6 个代表性区域开展土壤腐蚀环境评价与涂层选型优化。

3.2 土壤腐蚀环境评价

按照优化后的采样流程,在 6 个代表性区域各设置 5 个梅花形采样点,采集 0-50cm 土壤样本并混合制成 1kg 分析样本,经风干、过筛处理后,采用电位法测定 pH 值、四电极法测定土壤电阻率、离子色谱法分析 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 浓度。结合组合赋权-模糊综合评价模型计算,各区域腐蚀等级判定结果如下:

①区域 1(砂土,河道平原): $\text{pH}=7.2$,土壤电阻率 $=25\Omega\cdot\text{m}$,综合风险指数 $R=0.27\rightarrow$ I 级弱腐蚀;②区域 2(壤土,城郊农田): $\text{pH}=6.8$,土壤电阻率 $=12\Omega\cdot\text{m}$,综合风险指数 $R=0.38\rightarrow$ II 级中腐蚀;③区域 3(盐碱地,沿海滩涂): Cl^- 含量 $=1.2\%$, $\text{pH}=8.9$,土壤电阻率 $=3\Omega\cdot\text{m}$,综合风险指数 $R=0.75\rightarrow$ IV 级极强腐蚀;④区域 4(黏土,湖相沉积): $\text{pH}=7.5$,土壤电阻率 $=8\Omega\cdot\text{m}$,综合风险指数 $R=0.56\rightarrow$ III 级强腐蚀;⑤区域 5(砂壤过渡带,河流阶地): $\text{pH}=7.1$,土壤电阻率 $=15\Omega\cdot\text{m}$,综合风险指数 $R=0.32\rightarrow$ II 级中腐蚀;⑥区域 6(湿地周边):氧化还原电位 $=-150\text{mV}$,综合风险指数 $R=0.63\rightarrow$ III 级强腐蚀。

3.3 涂层选型与应用效果

根据全流程选型优化框架,确定各区域涂层方案

如下:

① I 级弱腐蚀区域(区域 1):选用聚氨酯(PU)涂层,单位成本 135 元/ m^2 ,兼顾防腐性能与成本控制;② II 级中腐蚀区域(区域 2、5):采用 3PE 涂层,单位成本 200 元/ m^2 ,适配中等腐蚀环境的综合防护需求;③ III 级强腐蚀区域(区域 4、6):选用熔结环氧粉末(FBE)涂层,单位成本 220 元/ m^2 ,强化耐化学腐蚀与抗阴极剥离能力;④ IV 级极强腐蚀区域(区域 3):采用聚脲(SPUA)涂层+牺牲阳极阴极保护复合方案,单位成本 330 元/ m^2 ,抵御高盐环境的极端腐蚀。

工程投运 2 年后,采用漏点检测仪、涂层厚度测量仪、剥离强度测试仪对管道进行全线路检测。结果显示,管道防腐涂层完好率达 98.7%,未发生任何腐蚀泄漏事故。与传统统一选用 3PE 涂层的方案相比,优化后的选型策略使全寿命周期成本降低 18 个百分点,基于失效模式与效应分析(FMEA)的量化评估结果显示,管道腐蚀失效风险从 27% 降至 14.8%,充分验证了本研究构建的评价体系与选型优化策略的科学性和工程实用性。

4 结论

该研究成果为埋地燃气管道防腐工程设计提供了创新技术路径,有助于提升管道安全服役水平、降低运维成本,具有重要的工程应用价值。未来可进一步引入数字孪生技术,构建土壤腐蚀动态演化模型,实现涂层服役状态的实时预测与优化调整。

参考文献:

- [1] 陈振华,陈洪源,张腾,等.不同土壤环境中 X80 钢防腐层剥离区腐蚀行为对比[J].油气储运,2025,44(12):1386-1394.
- [2] 李建国,张宏,刘畅.埋地管道土壤腐蚀因子协同作用机制研究[J].油气储运,2024,43(5):568-574.
- [3] 王磊,赵敏,陈峰,基于 AHP-熵权法的土壤腐蚀环境评价模型[J].腐蚀科学与防护技术,2023,35(6):789-795.
- [4] 刘敏,杨涛,聚脲涂层在强腐蚀土壤环境中的应用研究[J].中国腐蚀与防护学报,2025,45(2):210-216.
- [5] 张艳玲,吴刚.埋地燃气管道防腐涂层寿命周期成本分析[J].城市燃气,2024,(8):32-37.
- [6] 孙慧洁.城镇燃气管道腐蚀原因及防护措施[C]//中国城市燃气协会标准工作委员会.2022 年中国城市燃气协会标准工作委员会年会暨聚焦燃气安全赋能创新发展标准化论坛获奖论文集.淄博绿博燃气有限公司,2022:210-213.
- [7] 刘振斌.埋地燃气管道杂散电流腐蚀规律及预测模型研究[D].华南理工大学,2021.