

# 长输管道防腐涂层失效机制及化工工程优化方案研究

崔 长 (东明县油田服务中心, 山东 菏泽 274500)

**摘要:** 长输管道防腐涂层失效易引发安全隐患与经济损失, 成为化工工程领域关键难题。本文聚焦涂层失效核心问题, 深度解析诱发因子与多场耦合下的演化机理及风险传导规律; 构建化工工程防腐体系优化框架, 提出材料适配、工艺调控与环境适配的集成方案; 通过工程场景应用与多维度效能评估, 验证方案的技术可行性、经济性与长效性。研究成果为长输管道防腐工程优化提供理论支撑与技术参考, 对提升管道服役安全性、延长使用寿命具有重要工程价值。

**关键词:** 长输管道; 防腐涂层; 失效机制; 化工工程; 优化方案; 效能评估

**中图分类号:** TE988.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 010-0154-03

## Research on Failure Mechanisms of Anti-Corrosion Coatings for Long-Distance Pipelines and Optimization Solutions in Chemical Engineering

Cui Chang (Oilfield Service Center, Dongming County, Heze Shandong 274500, China)

**Abstract:** The failure of anti-corrosion coatings in long-distance pipelines can easily lead to safety hazards and economic losses, making it a critical challenge in the field of chemical engineering. This study focuses on the core issues of coating failure, conducting an in-depth analysis of the inducing factors, evolution mechanisms under multi-field coupling, and risk transmission patterns. An optimization framework for the anti-corrosion system in chemical engineering is established, proposing an integrated solution involving material adaptation, process regulation, and environmental adaptation. Through practical applications in engineering scenarios and multi-dimensional performance evaluations, the technical feasibility, economic viability, and long-term effectiveness of the proposed solution are validated. The research findings provide theoretical support and technical references for optimizing anti-corrosion engineering in long-distance pipelines, offering significant engineering value for enhancing pipeline service safety and extending service life.

**Keywords:** long-distance pipelines; Anti corrosion coating; Failure mechanism; Chemical engineering; Optimization plan; performance evaluation

长输管道作为能源与化工介质输送的核心基础设施, 其服役安全性直接关系到工程稳定与生态环境。防腐涂层作为管道防护的关键屏障, 受材料特性、施工工艺与服役环境等多因素影响, 易发生失效现象, 诱发腐蚀泄漏等安全隐患, 造成重大经济损失与环境风险。

当前, 防腐工程优化仍面临失效机理认知不深入、方案适配性不足等问题。本文立足工程实际需求, 聚焦涂层失效机制与优化方案核心议题, 通过解析失效演化规律、构建集成优化框架、开展工程应用验证, 探究高效长效的防腐技术路径, 为化工工程防腐体系升级提供支撑, 对保障管道长效安全运行具有重要现实意义。

### 1 长输管道防腐涂层失效机制深度解析

#### 1.1 涂层失效诱发因子识别与分类

长输管道防腐涂层失效是材料、施工、环境三类因子协同作用的结果, 需结合工程场景系统识别分类。材料本征因子聚焦涂层自身性能缺陷, 如树脂基体相容性不足、颜填料分散不均、固化程度不达标等, 直接影响涂层致密性与附着力, 为失效埋下隐患; 施工

工艺因子涵盖表面处理精度、涂覆参数控制、固化养护条件等, 操作不规范易导致涂层与基体结合不牢固, 形成微孔隙与界面缺陷; 服役环境因子涉及土壤酸碱度、温度波动、介质侵蚀、微生物活动及机械损伤等, 复杂环境的物理化学作用会加速涂层老化降解。精准识别分类这些因子, 是后续失效机理解析与风险防控的重要基础。

#### 1.2 多场耦合作用下涂层失效演化路径

长输管道服役过程中, 涂层常处于温度场、应力场、化学场与湿度场等多场耦合环境, 失效演化呈现阶段性与复杂性特征。初始阶段, 多场耦合作用加剧涂层内部微缺陷萌生, 如温度交替引发热胀冷缩产生内应力, 导致微裂纹; 化学介质渗透与湿度作用破坏涂层分子结构, 降低力学性能<sup>[1]</sup>。中期阶段, 微缺陷逐渐扩展贯通形成腐蚀通道, 介质渗透至涂层与基体界面引发剥离, 涂层出现起泡、粉化等外观失效。后期阶段, 界面结合力完全丧失, 涂层大面积脱落, 管道基体直接暴露于腐蚀环境发生严重腐蚀, 最终导致防护功能完全失效。明确该演化路径, 可为把控失效关键节点提供理论支撑。

### 1.3 失效关键节点的微观作用机理

涂层失效关键节点的微观作用机理直接决定失效进程与严重程度。界面剥离节点的核心是界面结合力破坏，一方面介质渗透引发界面化学反应，生成可溶性产物降低物理吸附力；另一方面应力场作用下界面产生微裂缝，扩展后减少接触面积，最终引发剥离。微裂纹扩展节点与能量积累相关，多场耦合产生的内应力在缺陷处集中，超过涂层断裂强度时微裂纹启动扩展，化学介质侵蚀加速裂纹壁降解与贯通<sup>[2]</sup>。涂层老化降解节点源于分子链破坏，紫外线、温度、化学介质等引发树脂分子链断裂、交联，导致涂层硬度、弹性模量等性能下降，丧失防护能力。深入解析微观机理，是实现失效精准防控的核心前提。

### 1.4 失效风险的动态传导规律研究

长输管道防腐涂层失效风险的传导具有动态性与关联性，需结合服役全周期开展研究。风险传导始于材料、施工等因素形成的微缺陷，这些微缺陷作为风险源，在多场耦合作用下发展形成初始风险。随后风险沿“缺陷扩展—性能下降—功能失效”路径传导，初始缺陷引发涂层性能逐步衰减，降至临界值时出现局部失效，进而扩散引发整体防护体系崩溃。同时失效风险存在跨维度传导特性，涂层失效引发的腐蚀风险会传导至管道结构安全，导致管道强度下降，诱发泄漏、破裂等安全事故，进而造成经济损失与环境风险。明确该动态传导规律，可为构建精准的风险预警体系提供科学依据。

## 2 化工工程防腐体系优化设计框架构建

### 2.1 涂层材料适配性优化与性能提升策略

涂层材料的适配性与性能是防腐效果的核心保障，需结合管道服役环境与工况特征优化。基于腐蚀介质、温湿度等环境参数，建立材料适配性评价体系，筛选高耐蚀、高附着力、相容性优良的树脂基体，搭配纳米颜填料提升致密性，添加缓蚀剂、紫外线吸收剂等功能助剂增强抗老化与抗渗透能力。通过有机-无机杂化、石墨烯掺杂等改性技术，提升涂层力学强度、耐温性与导电防腐性能。同时建立长效评价机制，借助加速老化、介质浸泡等试验模拟服役环境，验证材料长期稳定性，确保优化后材料与工程需求精准适配，筑牢防腐基础<sup>[3]</sup>。

### 2.2 施工工艺参数的精准调控方案

施工工艺的精准控制是保障涂层防护效果的关键，需针对全流程制定参数调控方案。表面处理阶段，结合基体材质与锈蚀程度，优化除锈方式与等级，采用抛丸除锈+化学预处理复合工艺，确保表面粗糙度与清洁度达标；涂覆阶段，依据涂层材料特性，精准

调控涂覆温湿度、喷涂压力与速度，控制单道厚度与间隔时间，避免流挂、针孔等缺陷；固化养护阶段，适配环境条件优化固化参数，采用分段固化工艺提升均匀性，减少内应力<sup>[4]</sup>。引入智能化监测设备实时监控参数，建立偏差预警机制，保障施工过程符合标准，提升涂层施工质量稳定性。

### 2.3 服役环境适配的防腐体系集成设计

针对不同服役环境的复杂性，构建多维度适配的防腐体系集成方案，实现防护效能最大化。土壤腐蚀环境采用“底层防腐+中间粘结+外层防护”复合结构，搭配阴极保护技术，增强抗微生物侵蚀与杂散电流干扰能力；海洋或化工介质环境选用氟碳、聚脲等高性能涂层，配合密封工艺阻断介质接触；高温、温差波动环境优选耐高温改性材料，优化热膨胀匹配性，减少涂层开裂。集成设计兼顾施工便捷性与经济性，在满足不同场景防护需求的同时，确保方案具备工程可操作性，实现针对性高效防护。如图1所示：

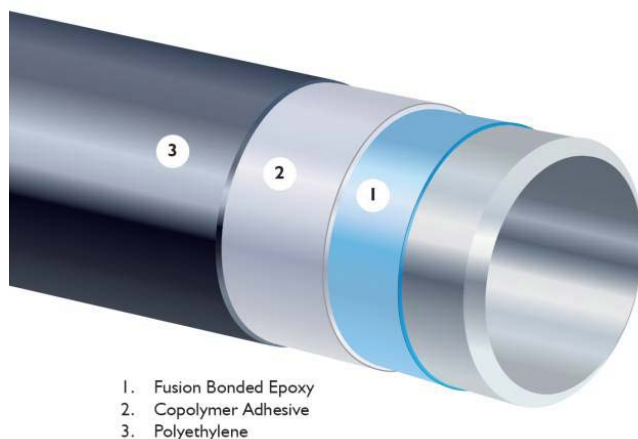


图1 长输管道三层结构防腐涂层集成结构示意图

### 2.4 优化方案的技术可行性验证

为保障方案工程适用性，从材料、工艺、体系三维度开展技术可行性验证。材料层面通过实验室测试，验证耐蚀性、附着力等关键指标，对比配方差异筛选最优方案；工艺层面搭建小型试验平台，模拟实际施工环境，评估参数合理性、操作难度与施工效率，优化流程；体系层面构建数值仿真模型，模拟不同环境下的受力、渗透与失效风险，预测使用寿命，同时选取典型工程片段开展现场小试，监测施工质量与初期防护效果<sup>[5]</sup>。通过多维度验证，明确方案技术优势与潜在问题，为后续工程应用提供全面技术保障，确保方案落地可行。

## 3 优化方案的工程应用与效能评估

### 3.1 工程应用场景构建与实施流程

结合长输管道典型服役场景，选取土壤腐蚀、化

工介质输送两类代表性工程片段构建应用场景,覆盖不同土壤电阻率、介质类型及温度工况。实施流程以“前期筹备-精准施工-过程管控-后期养护”为核心:前期完成现场环境参数检测、材料与设备选型,制定针对性施工方案;施工阶段严格遵循优化后的工艺参数,开展表面处理、涂覆固化等工序,同步启用智能化监测设备实时把控施工质量;过程管控中建立三级质检体系,对涂层厚度、附着力等关键指标抽样检测,及时整改偏差问题;后期养护阶段制定专项方案,定期开展涂层外观巡检与性能抽检,记录环境变化对涂层的影响,确保优化方案精准落地。

### 3.2 多维度效能评估指标体系建立

围绕防腐效果、工程经济性、长效稳定性构建多维度评估指标体系,兼顾量化与定性指标。防腐性能维度涵盖涂层附着力、耐介质渗透性、腐蚀速率等核心指标,通过实验室检测与现场监测获取数据;工程经济性维度包括材料成本、施工成本、运维成本及投资回报率,对比优化方案与传统方案的成本差异;长效稳定性维度聚焦涂层使用寿命预测、性能衰减速率、环境适应性等指标,结合加速老化试验与现场长期监测数据综合评价;此外,纳入施工便捷性、环保性等辅助指标,全面考量方案的工程适用性,明确各指标检测方法 with 评价标准,为效能评估提供科学依据。

### 3.3 现场试验数据采集与结果分析

现场试验周期覆盖12个月,按季度开展数据采集工作。采用专业检测设备获取涂层外观状态、附着力、厚度等直观数据,通过腐蚀传感器实时监测管道基体腐蚀速率,同步记录环境参数变化;实验室层面对现场取样的涂层样品开展耐老化、耐介质浸泡试验,测试性能衰减情况。试验数据如表1所示:

结果显示,优化方案施工后各项指标均优于传统方案,涂层无明显起泡、开裂现象,缺陷发生率显著

降低,验证了方案的实际应用效果。

### 3.4 方案的经济性与长效性综合评价

经济性评价从全生命周期视角展开,对比优化方案与传统方案的成本构成,数据如表2所示:

长效性评价结合现场监测与数值仿真结果,优化后的防腐体系使用寿命可达15年以上,较传统方案延长5年;极端环境模拟测试中,涂层性能衰减速率减缓30%,抗突发腐蚀风险能力更强。综合表明,方案兼顾经济性与长效性,符合化工工程防腐升级需求,具备广泛推广价值。

## 4 结语

本文深入解析长输管道防腐涂层失效机制,构建材料、工艺、环境适配的集成优化方案,经工程验证兼具高效性与经济性。未来可聚焦多场景适配技术研发,融合智能化监测预警手段,推动防腐工程向高效、长效、智能升级,为能源输送基础设施安全提供更坚实保障。

### 参考文献:

- [1] 郭天鹰.高阻抗涂层对管道阴极保护效率的影响分析[J].石油和化工设备,2025,28(10):265-268.
- [2] 段瑞峰.油气长输管道防腐施工质量关键控制措施研究[J].石油和化工设备,2025,28(8):233-235.
- [3] 戴健.天然气长输管道防腐技术优化及使用寿命延长策略分析[J].科技信息与研究,2025,5(9):26-30.
- [4] 孙朝忠.油气长输管道防腐施工质量关键控制措施研究[J].石油和化工设备,2025,28(10):262-264.
- [5] 吴忠蔚,陈国旋,苏怀.天然气长输管道防腐涂层性能检测及剩余寿命预测[J].当代化工,2023,52(6):1401-1404.

### 作者简介:

崔长(1975.6-),男,汉,大专,籍贯:山东省东明县,助理工程师,研究方向:化工工程。

表1 优化方案与传统方案防腐及施工核心指标对比表

指标	优化方案测试值	传统方案参考值	提升/降低幅度
涂层合格率	98.5%	85%	提升13.5%
涂层附着力	6.8MPa	5.2MPa	提升30.8%
介质渗透速率	0.02mm/a	0.05mm/a	降低60%
管道腐蚀速率	0.01mm/a	0.03mm/a	降低66.7%
施工效率	80m <sup>2</sup> /d	65m <sup>2</sup> /d	提升23.1%

表2 优化方案与传统方案全生命周期成本及收益对比表

成本类型	优化方案(万元/km)	传统方案(万元/km)	差异幅度
初期材料+施工成本	28	22	增加27.3%
年运维成本	1.2	2.5	降低52%
全生命周期成本(15年)	46	60.5	降低24%
投资回报率	35%	28%	提升7个百分点