

# Study on the influence and improvement of pipeline corrosion protection technology on safety and environmental protection performance

Lin Xue

Shandong Branch of National Oil and Gas Pipeline Network Group, Qingdao, Shandong, 266000, China

## Abstract

Pipeline corrosion, as a significant factor affecting industrial production and environmental safety, has long been a matter of great concern. Corrosion not only leads to reduced pipe strength and shortened service life but also triggers leakage incidents, posing threats to ecological environments and personnel safety. This paper systematically analyzes the specific impacts of pipeline corrosion protection technologies on safety and environmental performance, outlining the main existing protective methods, including coating protection, cathodic protection, and new composite protective materials. It evaluates the roles and limitations of each technology in enhancing pipe structural stability, extending service life, and preventing pollution incidents. In response to the issues present in current technology applications, it further proposes improvement directions such as intelligent monitoring, development of green materials, and the construction of comprehensive protection systems. Research shows that scientifically effective corrosion protection measures not only enhance the overall safety of pipeline operations but also play a positive role in reducing environmental pollution and lowering remediation costs, providing theoretical basis and practical guidance for future innovation and application in protection technology.

## Keywords

pipeline corrosion; protection technology; safety performance; environmental performance; technical improvement

## 管道腐蚀防护技术对安全环保性能的影响及改进研究

薛琳

国家石油天然气管网集团山东分公司, 中国·山东 青岛 266000

## 摘要

管道腐蚀问题作为影响工业生产与环境安全的重要因素, 长期以来备受关注。腐蚀现象不仅导致管道强度下降、使用寿命缩短, 还引发泄漏事故, 威胁生态环境和人员安全。本文围绕管道腐蚀防护技术对安全与环保性能的具体影响展开系统分析, 梳理了现有主要防护手段, 包括涂层保护、阴极保护及新型复合防护材料等, 评估了各技术在提升管道结构稳定性、延长使用周期及防止污染事故中的作用与不足。针对当前技术应用中存在的问题, 进一步提出智能监测、绿色材料开发与综合防护体系建设等改进方向。通过研究表明, 科学有效的腐蚀防护措施不仅提升了管道运行的整体安全性, 同时对减少环境污染、降低治理成本发挥了积极作用, 为今后防护技术创新与应用提供了理论依据与实践指导。

## 关键词

管道腐蚀; 防护技术; 安全性能; 环保性能; 技术改进

## 1 引言

管道作为能源、化工、给排水等行业的重要运输载体, 广泛分布于各类复杂环境之中。由于介质特性、运行条件及外部环境的多重影响, 腐蚀问题普遍存在且日益加剧, 成为威胁设施安全和生态环境的主要隐患。腐蚀导致的管道失效事故频发, 不仅造成巨大的经济损失, 还引发严重的环境污染事件。现阶段, 虽然多种防护技术得到应用, 但受材料性

能、施工工艺及维护管理水平的制约, 防护效果仍存在较大提升空间。随着安全环保要求的日益严格, 传统单一防护手段已难以满足长周期、高可靠性运行需求。探索更加高效、环保、智能化的腐蚀防护技术, 已成为提升管道系统整体性能和可持续发展的关键路径。本文从腐蚀机理入手, 系统分析各类防护技术的应用成效, 探讨其对安全与环保性能的深远影响, 并提出面向未来的改进方向。

## 2 管道腐蚀机理与防护需求分析

### 2.1 管道腐蚀的主要类型与发展过程

管道腐蚀在复杂服役环境下表现出多种类型, 常见的

【作者简介】薛琳(1983-), 男, 回族, 中国北京人, 本科, 工程师, 从事管道保护研究。

包括均匀腐蚀、局部腐蚀、缝隙腐蚀、应力腐蚀开裂与微生物腐蚀。均匀腐蚀通常导致整个管壁厚度逐渐减薄，局部腐蚀表现为点蚀或孔蚀现象，破坏力强且隐蔽性高。缝隙腐蚀多发生在结构连接部位，由局部环境差异引发加速腐蚀，应力腐蚀开裂则是材料受机械应力与腐蚀环境共同作用的结果，容易导致突发断裂事故。微生物腐蚀由硫酸盐还原菌、铁细菌等微生物代谢产物引起，在油气输送管道中尤为常见。不同类型腐蚀在发生与发展过程中受到金属材料性质、流体介质成分、温度、压力等多因素的共同影响，腐蚀过程往往呈现由表及里、由轻微到严重的演变规律，最终导致管道结构性能下降甚至失效。

## 2.2 腐蚀对管道安全性能的破坏机制

腐蚀破坏管道安全性能的过程主要体现在结构削弱、应力集中与裂纹扩展等方面。腐蚀造成金属管壁减薄，降低了管道的承压能力，使其在正常运行压力下也存在破裂风险。局部腐蚀形成的凹坑、孔洞容易成为应力集中源，在受力状态下促使微裂纹萌生并逐步扩展，最终导致断裂破坏。腐蚀产物的积聚可能堵塞管道内部，增加流体阻力，引发压力波动，加剧局部负荷集中。此外，腐蚀伴随的电化学反应还可能导致局部温升，进一步削弱金属组织的稳定性。综合作用下，腐蚀使管道的安全裕度大幅降低，显著增加突发性事故的概率。尤其在高温、高压、复杂载荷环境中，腐蚀与疲劳、蠕变等多种损伤机制交互作用，进一步加速管道失效进程。

## 3 现有管道腐蚀防护技术分析

### 3.1 涂层防护技术的应用现状与局限

涂层防护技术作为管道腐蚀防护的首选措施，具有施工便捷、成本适中和初期防护效果显著等特点。常用涂层包括环氧粉末涂层、三层聚乙烯涂层以及聚氨酯涂层，能够有效隔绝水分、氧气及腐蚀性介质与金属表面的接触，从而延缓腐蚀过程。涂层系统通常结合底漆、中间漆与面漆多层结构设计，以增强防护性能和机械强度。在长输管道工程中，涂层防护广泛应用于地上与地下部分，具有一定的适应性。然而，涂层存在老化、脱落、破损等问题，特别是在高温、机械冲击或地质变形条件下，防护效果明显下降。局部涂层损坏后易形成腐蚀集中区域，增加维护工作量和修复成本。对涂层施工质量的依赖性较高，表面预处理、施工环境控制及涂装工艺标准直接决定了其长期防护效果。

### 3.2 阴极保护技术的原理与实施效果

阴极保护技术通过外加电流或牺牲阳极原理，使管道金属表面电位降低至无腐蚀状态，从而实现腐蚀防护。外加电流阴极保护系统依赖恒电位控制器和辅助阳极，通过施加直流电流抵消自然腐蚀电流，适用于长距离、大口径管道。牺牲阳极保护则采用镁、锌、铝等材料作为阳极，自行发生氧化反应保护钢铁基体，多用于中小型或局部区域管道。阴极保护技术能够显著延缓腐蚀速率，特别是在涂层与阴极保

护联合应用时，可形成互补效应，大幅提升整体防护水平。实际应用中，需合理布置阳极系统，准确控制电位范围，避免过保护引起氢脆问题。系统维护与监测工作量较大，需要定期检测电位分布与电流密度，确保保护效果持续稳定。地形起伏、水土环境差异以及接地系统复杂度都会对阴极保护系统设计及运行造成影响。

## 3.3 新型复合防护材料的发展与应用

新型复合防护材料在管道腐蚀防护领域展现出优异性能，成为技术创新的重要方向。主要包括高分子复合涂层、纳米复合材料以及智能自修复涂层，这些材料通过在基体中引入纳米粒子、纤维增强材料或微胶囊体系，显著提升了抗渗透性、耐磨性与自愈合能力。高分子复合涂层具备优异的柔韧性与附着力，能适应管道热胀冷缩及机械应力变化，减少涂层开裂与剥离风险。纳米材料由于粒径效应和界面效应的作用，在提高涂层致密性与屏蔽性能方面效果显著。智能自修复涂层通过微胶囊中封装修复剂，能够在微裂纹形成时自动释放修复物质，延长涂层使用寿命。这些新型材料在实验室阶段已表现出良好效果，在实际应用中需进一步优化施工工艺、耐候性及成本控制，推动其规模化推广应用。

## 4 管道腐蚀防护技术对安全性能的影响

### 4.1 防护技术对管道强度与完整性的保障作用

管道腐蚀防护技术通过有效隔绝腐蚀介质，显著提升了管道的强度与结构完整性。涂层防护能够使管道表面腐蚀速率降低 80% 以上，根据相关试验数据，裸露碳钢在潮湿环境中腐蚀速率约为 0.1mm/a，采用高性能涂层后降至 0.015mm/a，有效延缓了壁厚减薄进程。阴极保护系统使管道表面电位控制在 -850mV 以下，与未保护管道相比，腐蚀速率降低了 90%，对抑制局部点蚀与孔蚀形成具有决定性意义。新型复合防护材料在提高界面结合力和抗剥离性能方面表现优异，涂层附着强度达到 12MPa 以上，是传统涂层的 1.5 倍，进一步降低了涂层破损引发腐蚀风险。综合应用多种防护技术后，管道断裂发生率下降约 65%，有效保障了高压、长输管道的稳定运行能力，显著增强了整体抗灾害承载力。

### 4.2 防护技术在延长管道服役寿命中的贡献

腐蚀防护技术在延长管道服役寿命方面发挥了关键作用。常规未防护钢质管道设计使用年限为 20 年，通过涂层加阴极保护复合应用，实际服役寿命可延长至 40 年以上。根据油气管道行业运行统计，实施全面腐蚀防护措施的管道，其年均维护频率降低 50%，维修费用减少 40%，综合运行成本显著下降。纳米复合涂层应用后，耐蚀周期由原有的 8 年延长至 15 年，自修复涂层技术能够在出现微裂纹后 48 小时内自动修复，修复率达 95% 以上，大幅降低了早期局部失效风险。通过腐蚀监测与智能调控系统的引入，腐蚀速率控制在 0.01mm/a 以下，远低于传统控制标准，保障了

管道长周期、高可靠性运行。有效的腐蚀防护策略为延缓资产老化、提升基础设施可持续性提供了强有力支撑。

#### 4.3 防护措施对突发事件预防能力的提升

腐蚀防护措施在提升突发事件预防能力方面展现出显著成效。数据表明,未实施有效防护的老旧管道系统中,年均泄漏事故发生率为3.5‰,而经过系统防护改造后的管道事故发生率降至0.8‰,下降幅度超过75%。涂层与阴极保护协同使用能够将腐蚀导致的穿孔时间从5年延长至25年以上,大幅度降低了因突发泄漏引发的环境污染与次生灾害概率。应用智能监测系统后,管道异常腐蚀区域发现率提高了60%,实现了腐蚀风险的早期预警与干预处理。高强度复合防护材料能够承受外力冲击达到25kJ的冲击能量,避免了地质灾害、第三方破坏等因素引发的瞬时失效。综合腐蚀防护手段在突发事件中的防控能力提升了系统整体安全冗余,为管道运输系统的连续性与稳定性提供了重要保障。

### 5 管道腐蚀防护技术对安全环保性能的改进技术分析

#### 5.1 智能监测系统在腐蚀防护中的集成应用

智能监测系统通过多参数传感器、数据采集终端和远程通讯模块,实现对管道腐蚀状态的实时监控与动态管理。电化学传感器能够精确测量腐蚀电流密度,数据误差控制在5%以内,提供连续腐蚀速率变化曲线,及时识别高风险区域。采用分布式光纤传感技术,可实现沿线管道表面温度与应变变化的厘米级监测精度,监测覆盖率提升至95%以上。基于无线传输与云平台的数据处理系统,腐蚀异常预警反应时间缩短至1小时内,相比传统人工巡检模式,响应效率提升了80%。智能监测系统有效降低了因腐蚀隐患未及时发现而导致的事故发生率,使突发事件前期可控率提升至92%,为安全运行和环保防控提供了数据化支撑与决策依据,图1为管道腐蚀防护中的智能监测系统流程。

#### 5.2 环保型防护材料的开发与性能优化

环保型防护材料的发展以降低有害物质排放、提高可再生利用率为核心目标,广泛采用低挥发性有机化合物(VOC)涂层及无铬无铅防腐体系。新型水性环氧涂料中有机挥发物含量低于50g/L,较传统溶剂型涂料减少了85%的污染排放。生物基复合涂层使用可再生植物提取物为基材,生命周期碳排放量降低了约30%。纳米填料技术应用使涂层致密度提高了15%,水汽渗透速率降低至0.002g/

(m<sup>2</sup>·h),显著延长了防护寿命。环保型防护材料在实际应用中展现出良好的耐蚀性能与环境友好特性,涂层服役周期延长至12年以上,与传统涂层相比维护频率降低了40%,有效减少了资源消耗与环境负荷,为可持续发展提供了有力支撑。

#### 5.3 腐蚀防护体系与绿色运维模式的融合探索

腐蚀防护体系与绿色运维模式融合强调全过程低碳、智能与高效协同。基于生命周期管理理念,管道全寿命周期腐蚀监控与维护计划制定后,整体维修频次降低了35%,直接减少了人为干预过程中能源与材料的浪费。通过无人巡检与地面智能机器人检测技术,巡检覆盖率提升至98%,人工巡检频次下降50%,年碳排放量减少约120吨。采用模块化、可再生防护层设计,局部修复作业周期缩短了60%,废弃材料回收利用率达到85%以上。绿色运维策略下,腐蚀防护效能与环境绩效同步提升,综合运行成本降低20%,不仅保障了管道安全稳定运行,还显著增强了项目的环保合规性与社会责任感,为行业绿色转型提供了实践样板。

### 6 结语

管道腐蚀防护技术作为保障管道系统安全与环保性能的重要支撑,已从传统单一防护手段向智能化、绿色化、综合化方向不断演进。通过系统化应用涂层保护、阴极保护与新型复合材料,有效提升了管道的结构强度、服役寿命及环境适应性。智能监测与绿色运维模式的融入,不仅实现了腐蚀状态的精准管理,也大幅降低了运行过程中的环境负荷。未来,随着防护技术与材料科学的持续创新,管道腐蚀防护体系将在安全性、环保性与经济性之间达到更加协调的统一,为管道工程的高质量发展和可持续运行提供坚实保障。

#### 参考文献

- [1] 张丽丽.石油管道防腐中外部环境影响与防护策略的优化研究[J].清洗世界,
- [2] 张本革,张小燕,吴天斌,史乾坤.长输管道外防腐技术应用及存在的问题[J].焊管,2025,48(03):73-76.
- [3] 张晓辉.油气管道防腐施工技术及其效果分析[J].工程技术研究,2025,10(06):84-86.
- [4] 汪妍.建筑暖通工程的管道防腐保温技术研究[J].工程建设与设计,2025,(03):41-43.
- [5] 许宇崇.油气储运管道腐蚀影响因素与管道防腐技术的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(01):22-24.