

长输油气管道防腐蚀技术应用与发展方向

翟雨露 张 涛 师 帅(国家管网集团山东分公司枣庄作业区, 山东 枣庄 277100)

摘要: 长输油气管道作为国家能源输送的重要基础设施, 其防腐蚀技术直接关系到运行安全与经济效益。本文分析了管道常见的一些腐蚀类型及其成因, 系统梳理了涂层保护、阴极保护以及新型材料的应用实践, 并探讨了当前技术面临的各种挑战, 更进一步提出智能化、数字化及跨领域融合是未来发展的关键方向, 旨在为提升防腐水平与保障管道安全运行提供理论支持与实践依据。

关键词: 长输油气管道; 防腐蚀技术; 阴极保护; 智能防护

中图分类号: TE988.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 024-0133-03

Application and Development Direction of Anti-corrosion Technology for Long-distance Oil and Gas Pipelines

Zhai Yulu, Zhang Tao, Shi Shuai(National Pipeline Network Group Shandong Branch Zaozhuang Work Area, Zaozhuang Shandong 277100, China)

Abstract: Long-distance oil and gas pipelines, as an important infrastructure for national energy transmission, their anti-corrosion technology is directly related to operational safety and economic benefits. This article analyzes some common types of corrosion in pipelines and their causes, systematically sorts out the application practices of coating protection, cathodic protection and new materials, and discusses various challenges currently faced by technology. It further proposes that intelligence, digitalization and cross-domain integration are the key directions for future development. It aims to provide theoretical support and practical basis for improving anti-corrosion levels and ensuring the safe operation of pipelines.

Key words: Long-distance oil and gas pipelines; Anti-corrosion technology; Cathodic protection; Intelligent protection

1 研究背景及意义

随着我国能源需求持续增长, 长输油气管道在国家能源战略中的地位日益凸显, 其安全稳定运行成为保障能源输送和经济发展的重要基础。然而, 在长期的服役过程中, 管道受到土壤环境、气候变化及输送介质等多种因素影响, 极易发生腐蚀, 以致于带来泄漏、爆炸等重大安全隐患。

加强防腐蚀技术研究与应用, 不仅能够有效的延长管道寿命、降低维护成本, 还能够提升系统运行的可靠性与环境安全水平, 具有显著的工程意义和现实价值。

2 长输油气管道防腐蚀技术现状

2.1 长输油气管道的腐蚀问题分析

长输油气管道在复杂多变的自然环境中运行, 腐蚀问题广泛且危害严重。外部腐蚀主要由土壤湿度、电解质浓度、温度变化及微生物活动等因素引发, 尤其是在高腐蚀性土壤中更为突出; 内部腐蚀则常由油气中含水、二氧化碳、硫化氢等介质引起, 形成局部腐蚀、点蚀甚至穿孔。除此之外, 交流干扰、杂散电流等人为因素也可能加剧腐蚀速率。这些腐蚀形式不仅降低管道结构强度, 还容易引发突发性故障, 严重威胁运输安全与生态环境, 亟需系统化的防护手段进行控制与治理。

2.2 主要防腐蚀技术的应用现状

目前, 长输油气管道防腐蚀主要依赖于外防腐涂层与阴极保护的组合方式。外防腐层如熔结环氧粉末(FBE)、三层聚乙烯(3PE)和聚丙烯(3PP)涂层广泛应用, 具备良好的附着力和抗渗透性能, 是基础防护手段; 阴极保护系统则通过牺牲阳极或外加电流抑制金属腐蚀反应, 提升整体防护能力。除此之外, 管道运行中普遍配套实施在线监测、定期检测和智能化诊断等技术手段, 增强防腐系统的稳定性与响应能力。但是在高腐蚀区段、复杂地质地带或多管并行等区域, 防腐效果仍然存在不均匀、寿命短、维护难等问题, 制约了防护水平的进一步提升。

2.3 防腐蚀技术面临的挑战与瓶颈

尽管现有防腐蚀技术已在长输油气管道工程中取得广泛应用, 但在实际运行中仍面临诸多挑战与技术瓶颈。一方面, 防腐层在施工质量控制、材料老化及物理破损等方面存在隐患, 易导致局部失效; 另一方面, 阴极保护在复杂地质环境下难以实现电流均匀分布, 存在保护死角。除此之外, 管道埋设区域广、线路长, 腐蚀监测数据采集困难, 传统监测手段滞后, 无法实现早期预警和动态管理。高温高压、酸性介质等特殊输送条件下, 新材料和复合技术研发尚不成熟, 整体防腐体系的智能化、集成化水平有待提升, 亟需

突破关键技术瓶颈与建立长效运行机制。

3 长输油气管道防腐蚀技术的应用实践

3.1 防腐蚀涂层的选择与应用

防腐蚀涂层作为长输油气管道外防护的第一道屏障，其选择直接关系到整体防腐系统的性能与寿命。目前应用最广泛的材料包括熔结环氧粉末（FBE）、三层聚乙烯（3PE）和三层聚丙烯（3PP）涂层。FBE涂层具备良好的耐化学性与附着力，适用于常规埋地环境；3PE则在FBE基础上覆以胶粘剂和聚乙烯层，显著增强了机械强度和耐湿热能力，适应地质变化较大的地区；3PP涂层因其更高的热变形温度与抗蠕变性能，适用于高温输送环境如西气东输二线部分高温段。

以西气东输管道工程为例，项目沿线穿越多种地质类型，包括戈壁、盐碱地及冻土层，防腐需求复杂多变。在该工程中广泛采用3PE涂层，其优良的机械抗损伤能力和稳定的电绝缘性能，成功抵御了极端环境下的外部腐蚀侵袭；而在穿越黄土塬段和地下水位较高区域，则结合使用了FBE+外包聚乙烯结构，有效应对局部水解及微生物腐蚀问题。这一案例表明，科学合理的涂层系统设计和应用，是保障长输油气管道防腐性能和延长服役寿命的关键，对今后类似工程具有良好的借鉴意义。

3.2 阴极保护技术的实践应用

阴极保护作为长输油气管道防腐蚀体系的核心技术之一，主要分为牺牲阳极法和外加电流法两种形式。牺牲阳极法通过镁、锌或铝合金等高活性金属与管道形成原电池结构，使阳极优先腐蚀以保护管道，适用于短距离或电源不便区域；外加电流法则借助整流器施加直流电流，使管道表面极化，从而抑制腐蚀反应，适用于线路较长、腐蚀环境复杂的场景。在材料选择方面，牺牲阳极应考虑电化学性能与使用寿命匹配，而外加电流系统则对辅助阳极材料（如高硅铸铁、MMO钛阳极）提出更高的稳定性与导电性要求。此外，管道接地电阻、土壤电阻率及杂散电流干扰等参数均是阴极保护系统设计与运行中的关键因素，直接影响防护效果与能效比。

以中俄原油管道（漠大段）为例，管线全长上千公里，沿线地形复杂，穿越多年冻土区、高腐蚀性盐碱地带及森林湿地等多种土壤环境，阴极保护系统的构建面临巨大挑战。项目采用外加电流法为主，辅以局部牺牲阳极保护，通过布设高硅铸铁阳极组并引入智能恒电位控制装置，实现对不同腐蚀等级区段的动态调节。

在施工及运行过程中，通过设置参比电极进行定

点监测，结合远程监控平台进行电位趋势分析与保护电流调整，显著提高了系统响应效率与防腐精准性。工程实践表明，科学布设的阴极保护系统不仅有效提升了管道运行的安全系数，还延长了其使用寿命，为复杂环境下油气管道的腐蚀控制提供了可复制、可推广的技术路径。

3.3 新型防腐蚀材料与技术的探索

随着长输油气管道防腐蚀要求的不断提升，传统的涂层与阴极保护技术已逐渐无法满足某些极端工况下的需求。近年来，新型防腐蚀材料和技术的研发成为行业关注的重点。纳米材料和复合涂层的引入，为防腐技术提供了新的解决方案。例如，纳米涂层凭借其优异的抗腐蚀性、抗磨损性及自修复能力，逐渐成为一种研究热点。这些涂层通过增强涂层的密封性和机械强度，提高了管道在恶劣环境中的抗腐蚀能力。此外，智能化防腐材料的研发也取得了显著进展，具备能够实时感知环境变化并自动调整保护功能的能力。例如，温度敏感型或pH敏感型涂层，可以根据外界腐蚀环境的变化自适应调整其保护性能，提供动态、精准的防护。

在实际应用中，某些长输油气管道已开始试点新型防腐蚀材料。例如，国内某跨海输油管道项目引入了基于聚氨酯与纳米陶瓷复合的防腐涂层，成功提高了管道的抗老化性与抗渗透性，特别是在高湿、高盐雾环境中展现了优越的耐腐蚀性能。与此同时，随着涂层与传感技术的结合，智能防腐蚀技术也逐步落地。该项目采用了嵌入式传感器与智能防护涂层结合的方案，能够实时监测涂层的完整性与腐蚀状态，并通过数据反馈调节涂层的保护强度。这一新型防腐蚀技术不仅提升了管道的安全性，还通过精确监测与预警，降低了长期运维的风险和成本，为长输油气管道防腐技术的未来发展提供了重要方向。

4 长输油气管道防腐蚀技术的发展方向

4.1 防腐蚀技术的未来发展趋势

未来，长输油气管道的防腐蚀技术将朝着智能化、集成化和多维度综合防护方向发展。智能防腐技术将通过传感器、物联网与大数据技术的结合，实现管道腐蚀状态的实时监测与预测，借助嵌入式智能传感器采集关键数据，并通过云平台分析进行动态评估与故障预警，提升防腐效果。

同时，复合材料与自修复材料的应用也将显著推动技术进步，自修复涂层能够自动修复损伤，延长管道寿命，复合材料则结合纳米材料与导电材料，提升涂层的抗腐蚀性和力学性能，特别适用于复杂地质和极端环境下。随着新型材料和技术的成熟，未来的防

腐蚀技术将更加注重管道全生命周期的管理，通过精准监控与动态优化，提升管道安全性与经济性。

4.2 智能化与数字化防腐蚀技术的前景

智能化与数字化防腐蚀技术的前景广阔，尤其在长输油气管道的防腐体系中，信息技术的融合将极大提升防腐效果与管理效率。未来，通过物联网（IoT）和云计算技术的结合，管道上的传感器将能够实时采集包括温度、电位、湿度、腐蚀速率等关键数据，并将其上传至云平台进行大数据分析与处理。利用机器学习算法，可以分析不同环境下的腐蚀趋势，提前预测可能出现的腐蚀热点，进而优化维护方案与防护措施。这种智能化系统能够在发生潜在腐蚀前提供预警，帮助运营管理人员认真及时地调整阴极保护电流或更换涂层，避免了传统人工巡检无法发现的隐患，提高了防腐效率与管道运行的安全性。

除此之外，数字化技术的应用还将推动防腐蚀技术的可视化与自动化发展。借助数字孪生技术，管道的实际运行情况可以在虚拟平台上精确重现，从而实现对整个防腐系统的实时监控与动态调整。通过集成传感数据与维护日志，数字化平台可以生成全面的防腐状态报告，帮助决策者制定科学的维修与替换计划。与此同时，基于大数据分析的防腐蚀效果评估模型，将为长期管道保护策略的优化提供理论支持和数据依据。通过这些先进技术，管道防腐蚀管理将从传统的定期检查转变为基于实时数据与智能决策的精确管理，大大地提高了防护的精准度与可靠性，推动行业进入数字化、智能化的新阶段。

4.3 持续创新与跨领域技术融合的前景

随着长输油气管道防腐蚀技术的不断发展，持续创新和跨领域技术的融合将成为推动行业进步的关键动力。当前，传统的防腐手段面临诸多挑战，单一的防护技术往往无法应对复杂多变的环境要求。未来，通过整合材料科学、信息技术、人工智能及生物技术等多个领域的先进成果，管道防腐技术将进入一个全新的发展阶段。例如，结合纳米技术与智能涂层的研发，能够有效提升涂层的抗腐蚀性能和自修复能力，同时借助传感技术实现涂层的实时监测与自适应调节。这种跨学科的协同创新将显著提升防腐技术的综合性能，使管道能够在极端环境下提供更长久、更可靠的保护。

除此之外，跨领域技术融合也为管道防腐管理带来了新的思路。以数字孪生和大数据分析为例，通过与物联网传感器和智能监控系统的结合，可以实时监测管道的运行状态及腐蚀情况，利用数据建模与预测技术提前识别风险点，实施精准维修和预测性维护。

这种技术整合不仅提升了管道防腐的效率，还能够通过优化资源配置和减少人工干预，降低运营成本。随着持续创新和跨领域技术的不断突破，未来的长输油气管道防腐蚀技术将更加智能、高效和可持续，为保障全球能源运输安全做出更大贡献。

5 结束语

综上所述，长输油气管道的防腐蚀技术作为保障国家能源安全的重要支撑体系，正处于从传统防护向智能协同转型的关键阶段。当前阶段需在确保基础防护手段有效性的基础上，积极推动技术融合与智能化升级。未来，通过构建“感知-诊断-决策-执行”一体化的智能防腐体系，将有效延长管道寿命、减少事故风险，并提升我国油气管道技术的国际竞争力。

参考文献：

- [1] 李俊莉, 路建萍, 张颖, 等. 油气集输管道腐蚀与防护技术研究进展 [J]. 应用化工, 2024, 53(9):2231-2236.
- [2] 安鹏飞. 探究埋地钢制油气管道的防腐蚀策略及其实践 [J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(12):16-18.
- [3] 张浩, 黄宇航, 尹凡, 等. 长输油气管道阴极保护电位智能监测技术应用研究 [J]. 中国信息界, 2025(01):243-245.
- [4] 李翔, 高安杰, 程健等. 北美长输管道安全管理体系建设研究 [J]. 石油化工自动化, 2017, 53(05):1-4.
- [5] 周小超, 张智辉, 赵俊芳. 长输油气管道运维中存在的问题及预防措施 [J]. 化工管理, 2023(20):124-126+143.
- [6] 李世兵, 王强. 石油化工工程油品储运过程安全环保问题及对策分析 [J]. 清洗世界, 2022, 38(11):188-190.
- [7] 别墅. 石油化工项目建设的质量控制及安全管理探讨 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022, 42(4):27-28.
- [8] 孙英旭, 邢茂帅, 闫英才. 石油化工储运过程中的应急预案制定与实施 [J]. 中国化工贸易, 2024(21):148-150.
- [9] 宋晓琴, 李佳佳, 黄诗嵬, 田园媛, 熊柯杰, 骆宋洋. 油气站场内埋地管道区域性阴极保护技术应用中存在的问题及对策 [C]// 西南石油大学石油与天然气工程学院. 2017 全国防腐蝕新材料应用技术发展研讨会. 四川成都: 西南石油大学石油与天然气工程学院, 2017:65-67.

作者简介：

翟雨露（1985.07—），男，汉族，江苏徐州人，大学本科，工程师，管道技术管理，研究方向：长输管道防腐蚀防护。