

油气储运管道腐蚀防护技术的研究与应用进展

耿 超 张保健 (山东东明石化集团有限公司, 山东 菏泽 274500)

摘 要: 油气储运管道作为能源输送的核心基础设施, 承担着将石油、天然气等能源资源从生产地输送到消费地的重要任务, 其安全运行直接关系到国家能源安全和社会经济的稳定发展。然而, 管道在长期运行过程中, 不可避免地会面临腐蚀问题。腐蚀不仅会缩短管道的使用寿命, 还可能导致泄漏、爆炸等严重事故, 造成巨大的经济损失和环境污染, 甚至威胁人民生命财产安全。因此, 如何有效防止和延缓管道腐蚀, 一直是油气储运领域研究的重点和难点。

关键词: 油气管道; 腐蚀机理; 阴极保护; 智能监测; 防护技术

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 014-0010-03

Research and application progress of corrosion protection technology for oil and gas storage and transportation pipelines

Geng Chao, Zhang Baojian (Shandong Dongming Petrochemical Group Co., Ltd., , Heze Shandong 274500, China)

Abstract: As the core infrastructure of energy transmission, oil and gas storage and transportation pipelines undertake the important task of transporting oil, natural gas and other energy resources from production to consumption, and their safe operation is directly related to national energy security and stable economic and social development. However, in the process of long-term operation, pipelines will inevitably face corrosion problems. Corrosion will not only shorten the service life of pipelines, but also lead to serious accidents such as leaks and explosions, causing huge economic losses and environmental pollution, and even threatening the safety of people's lives and property. Therefore, how to effectively prevent and delay pipeline corrosion has always been the focus and difficulty of research in the field of oil and gas storage and transportation.

Keywords: oil and gas pipelines; corrosion mechanism; cathodic protection; intelligent monitoring; Protective technology

随着我国油气管道里程的快速增长 (预计 2025 年达 24 万公里), 管道腐蚀问题日益凸显。据统计, 腐蚀导致的管道失效占事故总量的 40% 以上, 造成的经济损失年均超过百亿元。2019 年国家管网集团成立后, 管道腐蚀防控被提升至本质安全的高度, 推动了防护技术的标准化与创新应用。本文从腐蚀机理、防护技术、工程实践及发展趋势等方面, 系统梳理当前研究与应用进展。

1 我国油气储运管道防腐技术现状

我国油气储运管道防腐技术经过多年的发展, 已形成了一套相对完善的体系, 涵盖了外防腐、内防腐以及腐蚀监测与检测等多个方面。然而, 随着管道网络的扩展和运行环境的复杂化, 防腐技术仍面临诸多挑战。

1.1 外防腐技术

外防腐技术是管道防腐的第一道防线, 主要包括涂层防护和阴极保护两种方法。

涂层防护: 我国广泛使用的涂层材料包括环氧粉末、聚乙烯 (PE) 和三层聚乙烯 (3PE) 等。其中, 3PE 涂层因其优异的机械性能和防腐性能, 已成为长输管道的首选防腐材料。然而, 在复杂地质条件 (如

高湿度、高盐度土壤) 和极端气候环境下, 涂层的耐久性和附着力仍需进一步提升。此外, 涂层施工质量的不均匀性也是影响防腐效果的重要因素。

阴极保护: 阴极保护技术通过电化学方法抑制管道腐蚀, 主要包括强制电流法和牺牲阳极法。我国在阴极保护技术的应用上已较为成熟, 但在高电阻率土壤、杂散电流干扰等特殊环境中, 保护效果仍不理想。此外, 阴极保护系统的长期稳定运行和智能化管理也是当前研究的重点。

1.2 内防腐技术

内防腐技术主要针对管道内壁的腐蚀问题, 尤其是在输送高含硫、高含水油气介质时, 内腐蚀问题尤为突出。

内涂层: 内涂层技术主要用于天然气管道, 常见的内涂层材料包括环氧树脂和聚氨酯等。这些涂层能够有效隔离腐蚀介质与管壁的接触, 但在高含硫油气环境中, 涂层的耐化学腐蚀性能和抗冲击性能仍需进一步提高。

缓蚀剂: 缓蚀剂技术广泛应用于油气田集输管道, 通过添加缓蚀剂可以有效减缓管道内壁的腐蚀速率。我国在缓蚀剂的研发和应用方面已取得一定成果, 但

针对不同腐蚀环境（如高含硫、高含二氧化碳）的缓蚀剂配方仍需优化。此外，缓蚀剂的环境友好性和经济性也是未来研究的重点。

1.3 监测与检测技术

腐蚀监测与检测技术是保障管道安全运行的重要手段，我国在这一领域已取得显著进展，但仍存在一些不足。

在线监测：我国已开发出多种在线监测系统，如电位监测、腐蚀速率监测等，能够实时掌握管道的腐蚀状态。然而，现有监测系统的精度和稳定性仍需提高，尤其是在复杂环境下的适应性有待加强。

智能检测：智能清管器和漏磁检测技术是管道内检测的主要手段，能够有效识别管道的腐蚀缺陷和几何变形。然而，这些技术的应用成本较高，且对管道的清洁度要求较高，限制了其在大规模管道网络中的推广应用。

1.4 存在的问题与挑战

尽管我国油气储运管道防腐技术已取得显著进展，但仍面临以下挑战：

复杂环境的适应性：我国油气管道途经多种复杂环境，如高盐度土壤、高含硫油气田等，现有防腐技术在这些环境中的效果有限。

技术成本与经济效益：一些先进的防腐技术（如智能检测、纳米涂层）成本较高，难以大规模推广应用。

智能化与信息化水平：腐蚀监测与检测技术的智能化和信息化水平仍需提升，以实现更高效、精准的管道安全管理。

我国油气储运管道防腐技术已形成较为完善的体系，但在复杂环境适应性、技术成本和智能化水平方面仍需进一步突破。未来，应加强新型材料、先进技术和智能化监测系统的研发与应用，以提升管道的安全性和经济性，为我国能源输送提供坚实的保障。

2 腐蚀防护技术的研究与应用进展

油气储运管道作为能源输送的关键设施，其安全运行对国家经济和能源安全至关重要。然而，管道腐蚀问题一直是影响其寿命和安全的主要隐患。随着我国油气需求的增长和管道网络的扩展，腐蚀防护技术的研究与应用显得尤为重要。本文将概述我国油气储运管道防腐技术的现状，并探讨其研究与应用进展。

2.1 我国油气储运管道防腐技术现状

①外防腐技术。涂层防护：我国广泛使用环氧粉末、聚乙烯等涂层材料，技术成熟，但在复杂地质条件下的应用仍需改进。阴极保护：强制电流和牺牲阳极法是常用技术，但在高电阻率土壤中的应用效果有限。

②内防腐技术。内涂层：主要用于天然气管道，

技术相对成熟，但在高含硫油气环境中的耐久性有待提高。缓蚀剂：广泛应用于油气田集输管道，但针对不同腐蚀环境的缓蚀剂研发仍需加强。

③监测与检测技术。在线监测：我国已开发出多种在线监测系统，但在精度和稳定性上仍有提升空间。智能检测：智能清管器和漏磁检测技术逐步应用，但高成本限制了其推广。

3 研究与应用进展

3.1 新型防腐材料

纳米涂层：纳米复合涂层材料的研究取得进展，具有优异的防腐性能。

自修复涂层：自修复涂层材料的研究处于实验阶段，未来有望实现工程应用。

3.2 先进防护技术

微生物防腐：利用微生物抑制腐蚀的技术处于探索阶段，具有环保优势。

电化学防腐：新型电化学防腐技术如脉冲电流保护等正在研究中。

3.3 智能化监测与检测

大数据与人工智能：大数据和人工智能技术在腐蚀监测中的应用逐步深入，提高了监测精度。

无人机与机器人：无人机和机器人技术在管道检测中的应用逐步推广，提高了检测效率。

3.4 结论与展望

我国油气储运管道防腐技术已取得显著进展，但仍面临诸多挑战。未来，应加强新型防腐材料、先进防护技术和智能化监测检测技术的研究与应用，提升管道的安全性和经济性，为能源输送提供坚实保障。

4 油气储运管道腐蚀防护技术的未来发展趋势

4.1 智能化与数字化趋势

①物联网腐蚀监测网络构建。随着物联网技术的飞速发展，构建全面、高效的基于物联网的腐蚀监测网络成为油气储运管道腐蚀防护的关键方向。通过在管道沿线密集部署各类传感器，如腐蚀速率传感器、电位传感器、湿度传感器、应力传感器等，可实时采集管道运行过程中的多种关键数据。这些传感器将数据通过无线通信模块传输至云端服务器，形成庞大的管道运行数据库。

在这个监测网络中，每个传感器如同一个“神经元”，能够敏锐感知管道周围环境和自身状态的细微变化。例如，腐蚀速率传感器利用电化学原理，实时监测管道金属表面的腐蚀电流，精确计算腐蚀速率，并将数据即时上传。这种全方位、实时性的数据采集，打破了传统监测方式的局限性，实现了对管道腐蚀状况的动态跟踪。

②全生命周期管理实现。基于物联网腐蚀监测网络收集的数据,借助大数据分析、人工智能和机器学习算法,能够对油气储运管道进行全生命周期管理。从管道的规划设计阶段开始,就可利用历史数据和模拟分析,预测不同环境下管道可能面临的腐蚀风险,优化管道材质选择和防护方案设计。

在管道施工阶段,通过实时监测施工过程中的应力变化、涂层完整性等参数,确保施工质量符合防腐要求。管道投入运行后,持续的监测数据用于分析腐蚀发展趋势,预测剩余使用寿命。当发现腐蚀速率异常或出现潜在风险时,系统能够自动发出预警,并依据预设的决策模型,提供针对性的维护建议,如调整缓蚀剂注入量、启动备用阴极保护装置或安排及时维修等。这种全生命周期管理模式,实现了从被动应对腐蚀问题到主动预防和精准治理的转变,大大提高了管道运行的安全性和经济性。

4.2 绿色防护技术趋势

①生物可降解缓蚀剂开发。传统缓蚀剂在有效抑制管道腐蚀的同时,部分存在环境污染问题。开发生物可降解缓蚀剂成为绿色防护技术的重要研究方向。生物可降解缓蚀剂通常以天然生物材料为原料,如植物提取物、微生物代谢产物等。这些材料具有良好的生物相容性和可降解性,在完成缓蚀使命后,能在自然环境中通过微生物分解等方式转化为无害物质,减少对土壤、水体等环境的污染。

研究表明,某些植物中的生物碱、黄酮类化合物等成分具有良好的缓蚀性能。通过提取、纯化和结构修饰这些天然成分,可制备出高效的生物可降解缓蚀剂。此外,利用微生物发酵技术,生产具有缓蚀功能的生物聚合物也是一个新兴的研究领域。这些生物可降解缓蚀剂不仅环保,还可能具有独特的吸附和成膜机制,在复杂的油气输送环境中发挥更好的缓蚀效果。

②低能耗阴极保护系统研发。阴极保护作为重要的腐蚀防护手段,传统的外加电流阴极保护系统能耗较高。研发低能耗阴极保护系统对于降低能源消耗、实现绿色防护具有重要意义。一方面,通过改进辅助阳极材料和结构,提高阳极的电流效率,减少电能损耗。例如,采用新型纳米复合材料制备辅助阳极,可降低阳极极化电阻,提高电流输出效率。

另一方面,利用智能控制技术,根据管道实时腐蚀状况动态调整保护电流。通过传感器实时监测管道电位和腐蚀速率,控制系统自动调节输出电流大小,避免过度保护造成的能源浪费。此外,探索利用可再生能源(如太阳能、风能)为阴极保护系统供电,构建独立的、可持续的低能耗阴极保护体系,也是未来

的发展趋势之一。在一些偏远地区的油气管道,太阳能阴极保护系统已得到初步应用,并取得了良好效果。

4.3 材料科学突破趋势

①高熵合金工程化应用探索。高熵合金作为一种新型合金材料,具有独特的微观结构和优异的性能,在油气储运管道腐蚀防护领域展现出巨大潜力。高熵合金由五种或五种以上主要元素组成,且各元素原子百分比在5%–35%之间。其原子排列混乱,形成了复杂的晶体结构,赋予材料高强度、高硬度、良好的耐腐蚀性和抗氧化性等特性。

在油气输送环境中,高熵合金有望用于制造管道本体或关键部件,如弯头、阀门等易腐蚀部位。由于其良好的耐腐蚀性,可显著延长管道使用寿命,减少维护成本。然而,目前高熵合金的大规模制备和加工工艺仍面临挑战,限制了其工程化应用。未来需要进一步研究高熵合金的熔炼、成型和加工技术,降低生产成本,提高材料性能稳定性,推动其在油气储运管道领域的广泛应用。

②自修复涂层工程化推进。自修复涂层能够在涂层出现损伤时自动修复,恢复防护性能,为管道腐蚀防护提供了新的思路。自修复涂层的工作原理主要基于微胶囊技术、形状记忆聚合物技术等。例如,在涂层中嵌入含有修复剂的微胶囊,当涂层受到外界损伤导致微胶囊破裂时,修复剂释放并与催化剂反应,在损伤部位形成新的保护膜,实现涂层的自修复。

自修复涂层在油气储运管道中的应用可有效应对涂层在施工、运行过程中可能出现的划伤、磨损等问题,保持涂层的完整性和防护效果。目前,自修复涂层在实验室研究阶段已取得一定成果,但要实现工程化应用,还需解决修复剂的长期稳定性、微胶囊与涂层的相容性以及自修复效率等问题。随着材料科学和工程技术的不断进步,自修复涂层有望在未来成为油气储运管道腐蚀防护的重要手段之一。

5 结束语

油气管道腐蚀防护技术的进步是保障能源运输安全的核心。传统技术通过优化与组合提升了可靠性,而智能化、绿色化技术的融合将推动防护体系向高效、可持续方向发展。未来需加强跨学科合作,结合工程实践需求,攻克技术瓶颈,为我国油气管网的安全运行与高质量发展提供支撑。

参考文献:

- [1] 陈健峰,陈次昌,税碧垣,等.管道完整性管理技术集成与应用[J].油气储运.2011(2).
- [2] 税碧垣,艾慕阳,冯庆善.油气站场完整性管理技术思路[J].油气储运.2009(7).