

长输油气管道腐蚀防护技术优化与失效风险预警研究

廖兆龙 刘英杰

北京东方华智石油工程有限公司, 天津市, 300000;

摘要:长输油气管道作为能源跨区域输送的核心基础设施,其运行安全性直接关乎能源供应稳定与社会公共安全。腐蚀是导致管道失效的首要诱因,不仅会造成巨大的经济损失,还可能引发环境污染与人员伤亡事故。本文系统综述了长输油气管道腐蚀防护技术的发展现状与优化方向,涵盖传统防护技术的升级、新型防护材料与技术的研发应用;同时梳理了失效风险预警体系的核心构成,包括风险评价方法、预警模型与技术手段的研究进展。在此基础上,分析了当前该领域研究中存在的不足,并对未来发展趋势进行了展望,旨在为长输油气管道腐蚀防护与风险管控提供理论参考与技术借鉴。

关键词:长输油气管道; 腐蚀防护; 技术优化; 失效风险

DOI: 10.64216/3104-9664.25.03.046

引言

随着全球能源需求的持续增长,长输油气管道以其运输成本低、效率高、能耗少的优势,已成为油气资源跨区域调配的核心方式。我国油气管道建设规模不断扩大,截至目前已形成覆盖全国的油气输送管网体系,但管道服役环境日趋复杂,涵盖沙漠、海洋、高盐碱土壤、冻土等多种恶劣场景。腐蚀作为管道服役过程中的主要失效形式,据统计,电化学腐蚀导致的管道失效占总数的50%以上,微生物腐蚀导致的失效占比约10%,而磨损腐蚀、化学腐蚀等在特殊工况下也会对管道安全构成严重威胁。

近年来,国内外多次发生因管道腐蚀引发的泄漏、爆炸事故,造成了巨大的经济损失与恶劣的社会影响。因此,开展长输油气管道腐蚀防护技术优化与失效风险预警研究,对于提升管道完整性管理水平、延长管道使用寿命、保障能源安全具有重要的现实意义。本文从腐蚀防护技术与失效风险预警两大核心维度,系统梳理国内外研究进展,分析现存问题并展望未来发展方向,为该领域的深入研究提供全面的综述参考。

1 长输油气管道腐蚀防护技术现状与优化

1.1 传统腐蚀防护技术及升级优化

长输油气管道传统腐蚀防护技术主要包括外涂层防护、阴极保护、内防腐处理三大类,经过多年的工程应用与技术迭代,已形成较为成熟的技术体系,但在复杂环境适应性、长效性等方面仍需进一步优化。

外涂层防护是管道外腐蚀控制的核心手段,常用材

料包括环氧粉末涂料、聚乙烯(PE)防腐层、三层PE(3LPE)防腐层等。其中,环氧粉末涂料因良好的耐化学性与机械性能,在我国天然气管道内壁防腐中的应用比例已超过80%;3LPE防腐层由底漆、中间漆和面漆组成,具有优异的抗冲击性和耐久性,在室外环境下使用寿命可达50年以上。传统外涂层技术的优化方向主要集中在施工工艺改进与性能提升,例如通过优化涂层涂覆温度与厚度均匀性,减少涂层缺陷;引入纳米材料(如纳米氧化锌、纳米二氧化硅)提升涂层的抗紫外线性能与耐腐蚀性,延长其在恶劣环境下的服役寿命。

阴极保护技术是埋地管道外防腐防护的重要补充,分为牺牲阳极法与外加电流法两类。针对传统阴极保护技术在复杂环境下保护范围不足、干扰防控能力弱的问题,国内研究团队形成了埋地管道阴极保护检测及评价方法,首次提出针对沿线环境复杂多变的长输管道阴极保护设计准则,开发了适用于“公共走廊”内管道的智能化排流装置,在西部管道应用中交流干扰缓解率达100%。同时,针对油气站场的特殊工况,研发了区域阴极保护技术,有效解决了站场多管道密集布置下的腐蚀防护问题。

内防腐处理主要针对管道内输送介质引发的腐蚀,常用技术包括内涂层防护、缓蚀剂添加、耐蚀材料选用等。传统内涂层技术以环氧粉末涂覆为主,优化方向聚焦于提升涂层与管体的结合强度,减少流体冲刷导致的涂层脱落;缓蚀剂技术的优化则侧重于开发高效、环保的复合型缓蚀剂,提高其在高含硫、高CO₂等恶劣介质中的适应性,同时降低对环境的污染。在材料选用方

面,高钢级管线钢(如X90、X100、X120)的应用日益广泛,研究表明,通过优化高钢级管线钢的微观结构,可显著提升其在酸性介质中的耐腐蚀性能。

1.2 新型腐蚀防护技术研发与应用

随着材料科学与数字技术的发展,新型腐蚀防护技术不断涌现,为长输油气管道腐蚀控制提供了新的解决方案,主要包括智能防腐材料、数字孪生防护技术、微生物腐蚀防控新技术等。

智能防腐材料是近年来的研究热点,其核心优势在于能够根据环境变化自动调节性能,实现腐蚀的主动防控。其中,自修复涂料通过在涂层中嵌入微胶囊或修复剂,当涂层受损时,修复剂自动释放并填补缺陷,防止腐蚀进一步扩散,该技术已在石油化工行业关键设备防腐中得到初步验证。此外,响应型智能涂层可通过感知环境中腐蚀因子(如pH值、离子浓度)的变化,自动调整涂层的防护性能,显著提升管道在复杂环境下的腐蚀抵御能力。

数字孪生技术与防腐技术的融合为管道腐蚀防护提供了智能化新路径。通过构建管道数字孪生模型,整合管道沿线环境数据、运行参数、腐蚀检测数据等信息,可实现腐蚀发展趋势的精准预测,提前制定针对性的防护措施。同时,远程监控技术与传感器网络的结合,能够实时监测管道涂层完整性、阴极保护电位等关键指标,及时发现并处理腐蚀隐患,减少意外停工风险。

针对微生物腐蚀防控,研究重点从传统的化学杀菌转向绿色防控技术。通过筛选高效抑菌菌剂、开发微生物抑制剂,在抑制硫酸盐还原菌(SRB)等腐蚀性微生物生长的同时,降低对生态环境的影响。此外,通过优化管道内输送介质的工况参数,破坏微生物的生存环境,也成为微生物腐蚀防控的重要辅助手段。

1.3 国内外技术应用差距分析

国外长输油气管道腐蚀防护技术发展较早,技术成熟度较高。在北美地区,3LPE防腐层的市场占有率超过70%;欧洲则注重环保型防腐材料的应用,水性环氧涂料等低VOCs材料得到广泛推广。国际知名管道公司(如Enbridge管道公司)已将先进防腐技术与完整性管理体系深度融合,实现了腐蚀防护的全生命周期管控。

我国腐蚀防护技术近年来虽取得长足进步,但与国外相比仍存在一定差距。一方面,国内防腐材料市场以传统材料为主,新型智能材料的应用比例较低,3LPE

防腐层的市场占有率仅为20%左右;另一方面,在技术研发与产业结合方面存在不足,高校和科研院所的研究成果向工程应用转化的效率较低,缺乏完善的技术推广体系。此外,我国在防腐技术标准制定方面尚需完善,与国际先进标准仍有差距。

2 长输油气管道失效风险预警研究进展

2.1 风险评价方法研究

管道失效风险评价是预警体系的核心,分为定性评价与定量评价两类。传统定性评价方法包括故障树分析(FTA)、失效模式与影响分析(FMEA)、作业条件危险性评价(LEC)等,具有操作简便的优势,但评价结果易受主观因素影响,精度较低。国内早期的风险评价工作多以定性评价为主,主要应用于油气场站等简单场景。

定量风险评价(QRA)技术通过科学方法对管道失效概率和失效后果进行精确分析,减少了人为主观判断的干扰,评价结果更加客观准确,已成为国外管道风险评价的主流方法。国外早在30年前就开始收集工业事故失效案例,建立了AGA、EGIG等大型历史失效数据库,为QRA技术的发展提供了坚实的数据基础。在失效概率分析方面,国外学者开发了基于贝叶斯网络、机器学习的失效概率模型,能够综合考虑多种风险因素的相互作用;在失效后果分析方面,PHAIST等专业模拟软件可精准模拟油气泄漏后的扩散、燃烧、爆炸过程,计算事故影响范围与危害程度。

我国QRA技术研究起步较晚,目前仍处于发展阶段。虽然部分研究尝试结合模糊数学、灰色理论等方法实现定量评价,但大多处于理论研究阶段,缺乏实际工业应用。受限于国内管道失效数据库不完善、数据完整性和准确性不足等问题,失效概率模型的精度受到较大影响。在失效后果分析方面,虽引进了部分国外模拟软件,但在二次开发与本地化应用上存在不足,难以适应国内复杂的地理环境和工况条件。

2.2 风险预警模型构建

风险预警模型的核心是基于历史数据与实时监测数据,实现失效风险的精准预测。近年来,随着大数据、人工智能技术的发展,预警模型从传统的经验模型向数据驱动模型转变。

传统预警模型多基于腐蚀动力学理论,通过建立腐蚀速率与环境因素、运行参数的经验公式,预测管道剩

余寿命。该类模型计算简便，但对复杂环境的适应性较差，难以考虑多因素耦合作用下的腐蚀失效规律。

基于机器学习的预警模型成为近年来的研究热点。通过对海量管道失效数据、腐蚀检测数据的学习，机器学习算法（如神经网络、支持向量机、随机森林等）能够挖掘风险因素与失效之间的复杂非线性关系，显著提升预警精度。例如，基于贝叶斯网络的失效概率模型，可综合考虑腐蚀、第三方破坏、自然灾害等多种风险因素，准确评估管道失效概率。此外，融合数字孪生技术的预警模型，能够实现风险的动态预测与实时更新，进一步提升预警的时效性与可靠性。

2.3 预警技术手段应用

预警技术手段的发展为风险预警提供了数据支撑。目前，管道腐蚀检测技术主要包括内检测技术、外检测技术和在线监测技术。内检测技术（如漏磁检测、超声波检测）能够精准识别管道内壁的腐蚀缺陷、裂纹等损伤，是管道完整性检测的核心手段；外检测技术包括涂层检测、阴极保护检测等，用于评估管道外部腐蚀防护状态；在线监测技术通过部署传感器网络，实时采集管道运行参数、环境数据等信息，为风险预警模型提供实时数据输入。

国外已形成完善的检测-评价-预警一体化体系，通过定期开展内检测与外检测，结合实时监测数据，实现风险的全流程管控。我国在检测技术方面已基本实现自主化，但在数据整合与应用方面存在不足，各检测技术之间的协同性较差，难以形成完整的风险预警数据链。

3 现存问题与未来发展趋势

3.1 现存主要问题

尽管长输油气管道腐蚀防护与失效风险预警研究已取得显著进展，但在实际应用中仍存在诸多问题。一是腐蚀防护技术的长效性不足，在复杂恶劣环境（如海洋高盐环境、高含硫油气工况）下，现有防护技术易失效；二是管道失效数据库不完善，国内缺乏统一的失效数据收集与管理平台，数据完整性、准确性难以保障，制约了定量风险评价与预警模型的精度；三是技术融合深度不够，数字技术、智能材料与传统防护技术的结合不够紧密，尚未形成一体化的管控体系；四是成果转化效率低，科研成果与工程应用之间存在脱节，缺乏有效的技术推广机制。

3.2 未来发展趋势

未来，长输油气管道腐蚀防护与失效风险预警研究将朝着智能化、一体化、绿色化方向发展。在腐蚀防护方面，重点研发低成本、高效率、长寿命的智能防腐材料，推动数字孪生技术在防护全流程中的应用，实现腐蚀防护的主动化、精准化；在风险预警方面，构建全国统一的管道失效数据库，完善定量风险评价模型，融合大数据、人工智能、物联网技术，建立全生命周期的风险预警体系，实现从“被动维修”向“预知主动维修”的转变。

同时，加强国内外技术交流与合作，借鉴国外先进经验，完善我国腐蚀防护技术标准与完整性管理体系。推动产学研一体化发展，加快科研成果的工程转化，提升我国长输油气管道安全管理的整体水平。此外，绿色环保将成为技术研发的重要导向，开发低污染、可降解的防腐材料与防控技术，实现能源安全与生态保护的协同发展。

4 结论

长输油气管道腐蚀防护与失效风险预警是保障管道安全运行的核心技术支撑。本文系统综述了相关领域的研究进展，结果表明：传统腐蚀防护技术不断升级优化，智能防腐材料、数字孪生防护等新型技术展现出良好的应用前景，但国内外技术应用仍存在差距；风险评价方法从定性向定量转变，基于机器学习的预警模型显著提升了预警精度，但受限于数据基础与技术融合不足，预警体系的实用性仍需提升。

未来，需重点突破智能防腐材料研发、失效数据库建设、多技术融合应用等关键瓶颈，推动腐蚀防护与风险预警技术的智能化、一体化发展。同时，加强产学研合作与标准体系建设，缩小与国际先进水平的差距，为我国长输油气管道的安全稳定运行提供有力保障。

参考文献

- [1] 胡鹏飞, 文九巴, 李全安. 国内外油气管道腐蚀及防护技术研究现状及进展[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2003, 24(2): 5. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6871.2003.02.029.
- [2] 廖思成, 宋建平. 输油管道的腐蚀及防护研究[J]. 湖南农机: 学术版, 2010.