

Study on corrosion mechanism and optimization of protection system for surface gathering and transportation pipelines in high-sulfur oil and gas fields

Shijia Xing

Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing, Heilongjiang, 163000, China

Abstract

Surface gathering and transportation pipelines in high-sulfur oil and gas fields operate under harsh conditions for extended periods, subject to corrosion from corrosive media such as hydrogen sulfide. These pipelines are prone to various types of corrosion damage, posing significant threats to production safety and economic efficiency. This study comprehensively examines common corrosion mechanisms and micro-structural principles in such pipelines, analyzing their causes through multiple dimensions including medium composition, operational parameters, and material properties. By examining domestic and international case studies, the paper identifies deficiencies in existing corrosion protection systems, highlighting challenges such as failure of external anti-corrosion coatings, poor adaptability of cathodic protection, and limitations in internal corrosion prevention technologies. Based on corrosion mechanisms and operational data, the research proposes an optimized pipeline protection system encompassing material selection, structural optimization, process improvement, and intelligent monitoring. The findings demonstrate that comprehensive optimization can enhance pipeline safety, extend service life, and support green, efficient development. Finally, the article outlines future directions for digital and intelligent corrosion monitoring and protection, providing valuable references for industry research and practical applications.

Keywords

Highly sour oil and gas fields; gathering and transportation pipelines; corrosion mechanism; protection system; material selection; intelligent monitoring

高含硫油气田地面集输管道腐蚀机理与防护体系优化研究

邢世佳

大庆油田有限责任公司, 中国·黑龙江 大庆 163000

摘 要

高含硫油气田地面集输管道长期处于苛刻环境, 受硫化氢等腐蚀性介质侵蚀, 易出现多种腐蚀破坏, 严重威胁油气田安全生产与经济效益。本文全面梳理了该类管道常见腐蚀类型及微观机理, 从介质成分、操作参数、材料性能等多维度剖析腐蚀成因。结合国内外典型案例, 分析现有腐蚀防护体系缺陷, 指出外防腐层失效、阴极保护适应性差、内防腐技术受限等难题。基于腐蚀机理与运行数据, 提出涵盖材料选型、结构优化、工艺改进和智能监测的管道防护体系优化路径。研究表明, 综合优化可提升管道安全运行水平、延长服役寿命, 助力绿色高效开发。最后, 文章展望了数字化、智能化腐蚀监测与防护方向, 为行业研究与实践提供参考。

关键词

高含硫油气田; 集输管道; 腐蚀机理; 防护体系; 材料选择; 智能监测

1 引言

随着油气资源开发向深层、高含硫等复杂环境推进, 高含硫油气田的开发规模不断扩大。地面集输管道作为油气田开发的重要基础设施, 承载着原油、天然气及伴生水的长距离输送任务。高含硫油气田生产过程中, 原油和天然气中往往含有大量硫化氢、二氧化碳等腐蚀性介质, 这些成分对钢

质管道造成严重的化学、电化学腐蚀甚至硫化应力开裂等破坏, 成为制约油气田集输系统安全、经济运行的突出问题。腐蚀一旦发展到一定程度, 将导致管道穿孔泄漏、设备损坏、生产中断, 甚至引发重大安全 and 环境事故。因此, 系统研究高含硫油气田地面集输管道的腐蚀机理, 优化全生命周期防护体系, 是提升油气田安全生产和可持续发展的关键技术路径。本文以典型高含硫油气田为对象, 分析集输管道腐蚀的内在机制和主要影响因素, 梳理现有防护体系存在的短板, 并探讨多元化、系统化防护技术的创新方向, 以期高含硫油气田集输管道防腐蚀工程提供理论支撑和技术借鉴。

【作者简介】邢世佳(1985-), 男, 中国黑龙江齐齐哈尔人, 本科, 工程师, 从事油气田地面建设研究。

2 高含硫油气田地面集输管道腐蚀类型与机理分析

2.1 常见腐蚀类型及特征

高含硫油气田集输管道在服役过程中,面临极其复杂且严峻的腐蚀环境,主要包括硫化氢腐蚀、二氧化碳腐蚀、微生物腐蚀、缝隙腐蚀、点蚀以及应力腐蚀等多种类型。硫化氢腐蚀是此类环境中最为常见且危害严重的腐蚀形式之一, H_2S 在管道内壁与金属反应生成硫化铁等腐蚀产物,且伴随着氢原子渗入金属基体,引发氢脆现象,导致材料力学性能明显退化,易出现裂纹和断裂,极大地威胁管道的安全运行。二氧化碳腐蚀则是由 CO_2 溶解于水形成碳酸,引发碳钢局部腐蚀,尤其在低流速或停滞区容易形成腐蚀坑,影响管道完整性。微生物腐蚀,尤其是由硫酸盐还原菌(SRB)引起的腐蚀,通过代谢产生硫化物,进一步加剧局部环境的腐蚀性,形成局部坑蚀甚至穿孔。

缝隙腐蚀和点蚀多发生在焊缝、法兰连接、密封垫片及沉积物积累区域,这些区域由于氧浓度差异和局部环境恶化,极易产生局部腐蚀穿孔,难以通过常规检测发现,具有较强隐蔽性和突发性。应力腐蚀破裂(SCC)则是在管道所承受的内部压力或焊接残余应力与腐蚀介质协同作用下发生的裂纹扩展,常见于高应力集中区域,裂纹一旦形成便可迅速扩展,严重时导致管道断裂事故。上述腐蚀类型常常并存,表现为多发性、隐蔽性和突发性,给油气田集输管道的安全运行带来极大挑战。

2.2 硫化氢腐蚀机理与微观过程

硫化氢腐蚀作为高含硫油气田管道腐蚀的主要机理,其过程涉及复杂的电化学反应和物理化学变化。 H_2S 溶解于管道内流体后,首先与金属表面发生反应,生成硫化铁(FeS)等腐蚀产物,这些产物在一定条件下形成保护层,但往往不均匀且不稳定。与此同时, H_2S 还会分解产生氢原子,氢原子极易渗透进金属晶格内部,聚集形成氢分子气泡,造成晶格膨胀,诱发金属基体内部微裂纹扩展,导致材料发生氢脆断裂。

硫化氢腐蚀的速率受多种因素影响,其中温度、压力、 H_2S 分压和介质含水量尤为关键。高温高压环境促进 H_2S 在流体中的溶解与扩散,加速腐蚀反应;含水量增加则有利于电化学腐蚀过程的开展。此外,硫化氢腐蚀通常与二氧化碳腐蚀同时发生,两者相互作用使腐蚀产物更加复杂,腐蚀机制更加多样,极大增加了防护的难度。微观上,腐蚀产物层结构的变化、氢气的生成与渗透以及金属基体应力状态的改变,共同决定了硫化氢腐蚀的严重程度和破坏模式。

2.3 影响腐蚀行为的关键因素

管道腐蚀行为受多维因素综合影响,涉及介质成分、运行条件、材料特性和环境变化等方面。首先,介质成分中, H_2S 、 CO_2 、 Cl^- 离子及水分含量是腐蚀行为的决定性因素。高含水率和氯离子浓度往往加剧腐蚀过程,促进电化学反应

的进行;而 H_2S 和 CO_2 的存在则直接影响腐蚀机理及速率。其次,操作条件如温度、压力和流速对腐蚀过程有显著影响。高温可增强腐蚀反应活性,高压促进腐蚀介质与金属的接触和溶解,流速过低易导致水膜形成和沉积物积累,增加局部腐蚀风险,流速过高则可能引发流动腐蚀和机械磨损。

管道材质的化学成分、微观组织结构及焊接工艺也对腐蚀敏感性产生重要影响。材料中杂质含量较高、组织不均匀或存在残余应力,会显著提高腐蚀速率及氢脆风险。焊缝及热影响区的金相组织变化,往往是腐蚀裂纹的优先萌生区域。此外,管道内壁的表面光洁度和涂层完整性直接影响腐蚀保护效果,粗糙或受损的内壁易形成腐蚀起始点[1]。

运行时间及工况变化同样关键。在启动、停输及重新启用等特殊工况期间,腐蚀速率常出现明显跃升,这是因为工况变化引起介质成分、温度和流态的剧烈波动,破坏原有的保护膜,增加局部腐蚀风险。因此,准确识别和评估腐蚀影响因素,是制定高效、科学防腐措施的基础,是保障管道安全运行的前提条件。

综上所述,高含硫油气田集输管道腐蚀具有类型多样、机理复杂、影响因素多维的特点。系统深入理解各种腐蚀类型的特征、硫化氢腐蚀的微观机理及关键影响参数,对于设计合理的腐蚀监测、评估与防护方案,提升管道安全性和使用寿命具有重要指导意义。

3 现有防护体系的应用现状与问题分析

3.1 外防腐层的技术现状与失效机理

外防腐层是地面集输管道防止土壤和大气环境腐蚀的重要屏障,常用材料包括环氧煤沥青、三层聚乙烯(3PE)及聚氨酯等。但实际工程应用中,因施工质量控制不严格、材料老化降解、紫外线长期照射及阴极保护电流引起的阴极剥离等因素,防腐层易出现起泡、开裂和脱落等失效问题,导致局部管道表面直接暴露在腐蚀介质及土壤水分环境中。这不仅加速了管道外壁的局部腐蚀进程,也明显削弱了阴极保护系统的保护效果,产生明显的“短板效应”,尤其在富含硫、强渗透性环境下表现突出[2]。

3.2 阴极保护系统的适应性与局限

阴极保护技术通过外加电流或牺牲阳极方式,降低管道金属的腐蚀电位,是外防腐层后的第二重防线。高含硫油气田集输管道受外防腐层局部失效、土壤电阻率高低不一、杂散电流干扰等因素影响,阴极保护系统往往难以实现全线均匀保护。牺牲阳极消耗快,维护成本高;外加电流受供电系统稳定性影响,难以应对复杂环境波动。部分场站区域因接地系统混杂、地形复杂,存在保护“死角”。此外,阴极过度保护还可能诱发涂层剥离、局部析氢等新的腐蚀问题[3]。

3.3 内防腐与阻垢缓蚀剂的应用难题

内防腐常采用涂层、衬里和化学药剂(缓蚀剂、阻垢剂等)结合方式。高含硫介质下,传统内防腐涂层易被硫化

氢、二氧化碳等侵蚀,致使涂层失效。部分缓蚀剂在高温、高压及多相流环境下易发生分解、沉积甚至产生副产物,影响长期防护效果。高含水、多杂质的油气混输环境对内防腐材料的附着力、柔韧性、耐腐蚀性提出更高要求,实际应用中内防腐层常因冲刷、化学分解等失效,导致局部腐蚀风险加剧。合理选择与动态优化内防腐手段,仍是防护体系的难点之一。

4 腐蚀监测与评估技术的发展与应用

腐蚀监测与评估是高含硫油气田集输管道防护体系的核心环节。现代监测手段主要包括电化学探针、超声波检测、管道智能检测仪(PIG)、壁厚测量、腐蚀 coupons(挂片)、以及腐蚀产物分析等。近年来,随着数字化、智能化技术发展,分布式光纤传感、无线监测、远程数据采集等新兴技术在腐蚀监测中得到广泛应用。现场监测数据与仿真分析结合,可以动态掌握管道腐蚀速率、腐蚀分布、关键风险点等信息,为防护措施的调整与优化提供科学依据。智能监测系统还能实现异常报警、趋势预测和寿命评估,有效提升管道安全运行的预见性和精细化管理水平。

实际案例显示,针对高腐蚀风险区段实施重点监测,配合智能数据平台分析,可大幅度降低因腐蚀引发的泄漏事故。多种监测手段的融合应用,提高了腐蚀管理的时效性和准确性,为集输管道全生命周期安全运行提供数据支撑[4]。

5 防护体系的优化与创新方向

优选耐硫化氢、耐 CO₂、耐应力腐蚀的管道材料,是防止高含硫腐蚀的根本措施。目前常用材料包括 Cr-Mo 合金钢、低合金高强钢、奥氏体不锈钢、复合管道等。针对不同油气田介质特点,可采用包覆、复合衬里、焊接工艺优化等方法,提升整体耐腐蚀性能。管道结构设计上,优化焊接工艺、减少应力集中区域、科学布置排液、排气和取样点,可有效减缓局部腐蚀和应力腐蚀开裂风险。

建立外防腐层+阴极保护+内防腐多元集成的综合防护体系,是提升高含硫油气田管道安全的有效路径。外防腐层需根据土壤、气候、埋深等因地制宜选型,并强化施工质量管理。阴极保护应动态调整保护电位、优化阳极分布,并与智能监测系统联动,提升保护适应性。内防腐技术结合新

型高分子涂层、柔性衬里和高效缓蚀剂,多措施协同防控内腐蚀。实践证明,复合防护体系的协同增效,远优于单一防护手段[5]。

数字化、智能化技术的应用,为高含硫油气田集输管道的防护管理带来新机遇。建设智能管道系统,将腐蚀监测、数据采集、风险分析、寿命预测和维护决策集成于一体,实现“感知—分析—决策—执行”的闭环管理。基于大数据和人工智能的风险评估模型,可对不同区域、不同工况下的腐蚀趋势做出预警和应对建议。数字管道平台还可实现多专业协同、远程运维与应急响应,为集输管道安全运行和防护体系持续优化提供坚实保障。

6 结语

高含硫油气田地面集输管道的腐蚀防控,是保障油气田安全高效运行和资源绿色开发的关键环节。面对复杂多变的腐蚀机理与日益严苛的服役环境,必须从材料、结构、工艺、监测和管理多维度出发,构建科学完善的多元化防护体系。近年来,随着智能监测、数字化管理和高性能新材料的推广应用,高含硫油气田集输管道腐蚀防护水平显著提升。未来,应持续推进腐蚀机理基础研究,强化现场数据与模型仿真的深度融合,完善标准规范体系,加快智能化、信息化防护手段的落地,助力油气行业本质安全与绿色发展目标的实现。只有不断创新与完善防护技术,才能有效延长管道寿命、减少事故发生、降低运维成本,为高含硫油气田集输系统安全与经济运行提供坚实保障。

参考文献

- [1] 闫静,文绍牧,喻智明,等.高含硫气田开发腐蚀控制关键技术进展与发展方向[J].天然气工业,2024,44(11):136-148.
- [2] 文绍牧,肖杰,计维安,等.四川盆地特高含硫气田安全高效开发关键技术创新与成功实践[J].天然气工业,2024,44(11):37-49.
- [3] 赵海均.川东北高含硫气田勘探开发生产政府安全监管机制研究[D].中共四川省委党校,2024.
- [4] 张明彦.聚焦发展新质生产力打造中国石油“特高含硫气田”品牌[J].中国石油企业,2024,(05):53-55.
- [5] 葛枫,贾长青,李宏.四川盆地罗家寨高含硫气田安全高效开发与长期稳产关键技术[J].天然气工业,2023,43(09):85-92.