

Study on the mechanism of microbial corrosion in oil and gas pipelines

Jian Cheng Lingxiang Wang Cheng Xia

Huazhong Branch of National Oil and Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

As oil and gas pipelines face challenges from complex environmental conditions during transportation, microbial corrosion has increasingly become a critical factor affecting pipeline safety and operational efficiency. This study investigates the mechanisms of microbial corrosion in oil and gas pipelines, analyzing its fundamental principles, types, and impacts on pipeline integrity. By examining the interactions between microbial corrosion and pipeline materials, we explore characteristic patterns of microbial corrosion under various environmental conditions. The paper proposes corresponding prevention strategies including microbial inhibitors, electrochemical protection, and monitoring systems, aiming to provide practical references for effective microbial corrosion control in oil and gas pipeline networks.

Keywords

microbial corrosion; oil and gas pipeline; corrosion mechanism; protection technology; microbial community

微生物腐蚀在油气管道中的作用机制研究

程坚 王凌翔 夏城

国家石油天然气管网集团有限公司华中分公司, 中国·湖北 武汉 430000

摘要

随着油气管道在运输过程中面临复杂环境条件的挑战, 微生物腐蚀逐渐成为影响管道安全与运行效率的重要因素。微生物腐蚀不仅加速管道金属的腐蚀过程, 还可能导致管道破裂、泄漏等严重后果。本文旨在探讨微生物腐蚀对油气管道的作用机制, 分析微生物腐蚀的基本原理、类型及其在油气管道中的影响。通过阐述微生物腐蚀与管道材料之间的相互作用, 探讨不同环境下微生物腐蚀的特征, 并提出相应的防控技术, 如微生物抑制剂、电化学保护以及检测与监控手段, 以期对油气管道的微生物腐蚀防治提供参考。

关键词

微生物腐蚀; 油气管道; 腐蚀机理; 防护技术; 微生物群落

1 引言

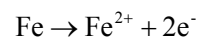
油气管道是能源运输的主要管线设施, 其运输的可靠性和稳定性, 关乎能源供给的可靠性及环境安全性。近年来随着世界范围内的石油、天然气等资源的开采, 油气管道在恶劣环境的运行越来越多, 微生物腐蚀是管道腐蚀的主要类型, 引起了人们大量研究兴趣。微生物腐蚀是在微生物作用下使金属产生电化学腐蚀的过程, 管道中在厌氧、潮湿、温度合适的位置, 更容易发生微生物腐蚀。微生物群落构成、种群以及代谢物是油气管道腐蚀发生的重要因素。本文重点阐述微生物腐蚀的基本过程、类型及油气管道受其影响, 研究其防控的手段, 以期确保油气管道在复杂环境下的长期稳定运行。

【作者简介】程坚 (1986-), 男, 中国湖北孝感人, 硕士, 工程师, 从事油气储运腐蚀控制研究。

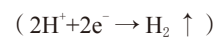
2 微生物腐蚀的基本原理

2.1 微生物腐蚀的定义与原理

微生物腐蚀 (Microbiologically Influenced Corrosion, MIC) 是指微生物 (如细菌、真菌、古菌等) 通过自身代谢活动或其代谢产物, 改变材料表面或周边环境的理化性质, 加速材料发生电化学或化学腐蚀的过程, 其核心是微生物与材料腐蚀体系的耦合作用。从作用原理看, 微生物主要通过三种途径影响腐蚀: 一是代谢产酸 (如产酸菌分解有机物生成硫酸、有机酸), 降低环境 pH 值, 破坏金属材料表面钝化膜 (如 Fe_3O_4), 促进阳极溶解反应:



二是阴极去极化, 如硫酸盐还原菌 (SRB) 在厌氧环境下将硫酸盐还原为 H_2S , 同时分泌氢化酶催化 H^+ 还原为 H_2 , 消除阴极极化效应, 加速阴极反应: ($2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow$)



三是生物膜形成,微生物吸附于材料表面分泌胞外聚合物(EPS)形成生物膜,膜内构建局部微环境(如氧浓度差、pH 梯度),引发局部电化学反应,形成阳极腐蚀区与阴极保护区,加剧局部腐蚀扩展^[1]。

2.2 微生物腐蚀的类型

微生物腐蚀按介导腐蚀的微生物功能特性,可将油气管道相关的微生物腐蚀分为四类:一是硫酸盐还原菌(SRB)腐蚀,为厌氧环境下主要类型,SRB 以有机物为碳源、硫酸盐为电子受体,代谢产生的 H₂S 与管道钢反应生成 FeS、FeS₂ 等疏松腐蚀产物,无法形成有效保护层,腐蚀速率可达 0.2-0.4mm/a,常见于埋地管道土壤层或管道内厌氧段;二是产酸菌(APB)腐蚀,包括异养产酸菌与自养产酸菌,前者分解油气介质中烃类生成有机酸,后者通过氧化无机硫生成硫酸,使环境 pH 降至 3.0-5.0,直接侵蚀钢材,在含硫油气管道或酸性土壤环境中尤为突出;三是铁氧化菌(IOB)腐蚀,IOB 将管道腐蚀产生的 Fe²⁺ 氧化为 Fe³⁺,Fe³⁺ 水解生成 Fe(OH)₃、FeOOH 等氧化物,若氧化物层疏松则形成氧浓度差电池,加速局部腐蚀,多发生于有氧的地下水或管道外壁土壤界面;四是真菌腐蚀,真菌通过分泌有机酸与酶类分解材料表面涂层或缓蚀剂,破坏防护体系,同时其菌丝生长会加剧生物膜孔隙形成,为其他腐蚀微生物提供通道,常与细菌协同引发复合腐蚀。

3 微生物腐蚀对油气管道的影响

3.1 油气管道的腐蚀类型分析

油气管道腐蚀可分为化学、电化学与微生物腐蚀(MIC)。化学腐蚀由 H₂S、CO₂ 等酸性气体直接作用引起;电化学腐蚀依赖微电池反应;MIC 则由菌群代谢改变环境加剧腐蚀,如 APB 产酸加速化学腐蚀,SRB 生成 H₂S 补充介质,生物膜增强电极电位差,使电流密度提升 2-3 个数量级。MIC 多表现为点蚀、坑蚀,穿孔速率快于均匀腐蚀 5-10 倍^[2]。

3.2 微生物腐蚀与管道材料的相互作用

菌群通过表面吸附形成 10~20 μm 厚生物膜,限制氧传输并营造厌氧环境;代谢产物如有机酸、H₂S 生成疏松 FeS 等腐蚀产物,不能形成保护膜;材料成分亦影响 MIC,如 X80 钢中 Cr、Ni 生成稳定氧化物抑制附着,其腐蚀速率较 X65 钢低 30%。

3.3 微生物腐蚀在不同环境下的影响

土壤环境中,黏土因厌氧性强,SRB 丰度可达 25%,腐蚀速率 0.3-0.4mm/a;地下水环境中,有氧区 IOB 致沉积层局部坑蚀,厌氧区 SRB 致应力腐蚀开裂;管道内,APB 产酸使 pH 降至 4.0-5.0,SRB 在积液区引发点蚀,腐蚀坑可达 5-10 μm。

3.4 微生物群落结构与腐蚀速率关系

油气管道腐蚀环境中微生物群落结构与腐蚀速率呈显著正相关。SRB 丰度>15%、APB>10%时,腐蚀速率达 0.2mm/

a 以上,两者协同可升至 0.3-0.4mm/a。IOB 单独存在可抑制腐蚀(0.05-0.08mm/a),但与 SRB 协同时速率升至 0.25mm/a。菌群多样性 <2 时优势菌群繁殖,腐蚀速率显著增加。

4 微生物腐蚀防控技术

4.1 微生物腐蚀防护材料与涂层

针对油气管道微生物腐蚀,防护材料涂层是通过材料本身“物理防护+抗菌性能”的叠加效应进行的防控,其关键在于形成致密、稳定、具有良好抗菌性能的涂层。在材料方面,研发的新型复合具有抗菌合金元素的管道钢材(X80CrNi 钢),其 Cr、Ni、Cu 元素协同提高材料防腐性能,其中 Cr 元素能在钢材表面形成 Cr₂O₃ 钝化层,提高了钢材抗酸腐蚀能力;Ni 元素能提高钝化层的稳定性,减缓生物粘膜附着;Cu 离子缓慢释放能破坏微生物细胞膜,降低 SRB、APB 菌数 2~3 个数量级,该种类钢材在含硫油、气中腐蚀速度较一般 X80 降低 40%^[3]。

4.2 微生物抑制剂的应用

微生物抑制剂通过干扰微生物代谢或破坏细胞结构实现抑菌,按作用机制可分为化学抑制剂与生物抑制剂,需结合管道环境特性选择适配类型。化学抑制剂中,季铵盐类应用最广,其阳离子基团可与微生物细胞膜阴离子位点结合,破坏膜通透性,使胞内物质泄漏,对 SRB、APB 的最低抑菌浓度(MIC)为 50-100mg/L,现场应用时通过管道加药系统注入,每季度投加 1 次即可使腐蚀速率控制在 0.05mm/a 以下;有机硫类抑制剂通过螯合微生物酶活性中心,阻断硫酸盐还原反应,在含 H₂S 环境中抑菌效果优于季铵盐类,但需控制投加量避免对管道钢产生应力腐蚀^[4]。生物抑制剂基于“以菌治菌”原理,如筛选产抗菌肽的乳酸菌,其分泌的肽类物质可特异性抑制 SRB 生长,且对环境无二次污染,在地下水环境中应用时,通过生物反应器持续投加,可使 SRB 丰度占比从 25%降至 5%以下。

4.3 电化学保护技术与微生物腐蚀

电化学保护方法是指控制管道钢电位,减小阳极溶解,并可间接控制菌的生长,一般要与其他微生物控制技术配合使用才能起到更好的效果。阴极保护法是常用的方法,包括牺牲阳极法和外加电流法:牺牲阳极法为阳极自身溶解提供保护电流,使管道钢电位控制在 -0.85V~-1.05V,抑制电化学腐蚀的同时也抑制了 SRB 的代谢活动,适用于短距离埋地管道;外加电流法为恒电位仪提供输出电流并使管道电位能够得到稳定控制,所以外加电流法应用于长输管道之中比较常见,配合深井阳极地床保护长达 100km 以上的管道,外加电流法也同样要监测生物膜的影响,因为生物膜的形成会增加管道表面的电阻,需要每过一段时间调节输出的电流。阳极保护法则常用于酸性环境中(如 APB 富集区),通过输出外加电流使管道钢表面形成稳定钝化膜,钝化区间的电位为 0.5V~0.8V,其可以耐受 pH3.0-4.0 的酸性腐蚀,并且钝化膜还可以抑制微生物的吸附,使 APB 的附着量降

低了50%，但是也需要防止电位过高引起膜破裂。

4.4 微生物腐蚀检测与监控技术

微生物腐蚀的隐蔽性要求建立“早期检测-实时监控-风险预警”体系，通过多技术融合实现腐蚀风险的精准识别。在早期检测方面，分子生物学技术可快速识别菌群类型与丰度；采用qPCR技术检测SRB的dsrA基因、APB的soxB基因，24小时内可完成定量分析，当基因拷贝数超 10^5 copies/g土壤时需启动防控措施；高通量测序技术能解析微生物群落结构，判断是否存在多菌群协同腐蚀^[5]。电化学检测技术可捕捉微观腐蚀变化：电化学阻抗谱(EIS)通过分析电荷转移电阻(Rct)判断腐蚀程度，Rct从 $10^4\Omega\cdot\text{cm}^2$ 降至 $10^3\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下时，表明生物膜已引发明显腐蚀；局部电化学阻抗谱(LEIS)可定位局部腐蚀点，分辨率达 $10\mu\text{m}$ ，适用于检测管道内壁坑蚀。实时监控方面，开发光纤传感系统，将涂覆敏感材料的光纤嵌入管道，通过光信号变化监测微生物代谢产物，数据实时传输至监控中心，响应时间 $<10\text{s}$ ；埋地管道采用阴极保护电位在线监测仪，结合微生物传感器，实现“电化学状态-微生物活性”同步监控。风险预警方面，基于检测数据构建机器学习模型，预测未来3-6个月腐蚀速率变化，当预测值超 0.1mm/a 时自动发出预警，指导运维人员提前采取防控措施。

5 案例分析

5.1 油气管道腐蚀案例概况

某长输天然气管道材质为X80钢，直径1016mm，埋深1.8m。服役8年后，在黏土土壤段出现局部泄漏，开挖检测发现管道外壁存在密集点蚀坑，最大坑深4.2mm，腐蚀产物以FeS、FeS₂为主。采集腐蚀区域土壤与产物样本分析：高通量测序显示SRB丰度占比28%、APB丰度16%；电化学测试得腐蚀电流密度 $5.2\times 10^{-4}\text{A}/\text{cm}^2$ ，腐蚀速率 0.38mm/a ，判定为SRB-APB协同引发的微生物腐蚀失效。

5.2 微生物腐蚀防控技术实施

针对管道腐蚀特征，采用“涂层修复+化学抑制剂+阴极保护优化”组合方案：对腐蚀点蚀区域打磨至Sa2.5级后，喷涂环氧纳米Ag⁺抗菌涂层；通过管道沿线加药站注入季铵盐-有机硫复配抑制剂，每2个月投加1次；优化外加电流阴极保护系统，将管道电位稳定控制在 $-0.95\text{V}\sim-1.0\text{V}$ ，每3个月校准输出电流以抵消生物膜电阻影响。

5.3 实施效果分析

实施微生物腐蚀防控技术后，相关指标均表现出显著

改善，具体如表1所示。

表1 实施效果

检测指标	实施前	实施后	变化幅度
SRB 丰度占比 (%)	28	6	降低 78.6%
APB 丰度占比 (%)	16	4	降低 75.0%
腐蚀电流密度 ($\times 10^{-4}\text{A}/\text{cm}^2$)	5.2	0.8	降低 84.6%
腐蚀速率 (mm/a)	0.38	0.06	降低 84.2%
生物膜厚度 (μm)	18	3	降低 83.3%
管道电位 (V, Cu/CuSO ₄)	-0.78~-0.82	-0.95~-1.00	负移 0.17~0.18V

SRB及APB丰度占比分别降低了78.6%和75.0%，有效地抑制了腐蚀性微生物菌体增殖，腐蚀电流密度及腐蚀速率分别降低了84.6%和84.2%，证明了微生物腐蚀的电化学活动受到有效抑制，腐蚀性菌的活动得到了抑制，管道腐蚀速率得以降低；生物膜厚度降低了83.3%，进一步验证了微生物活动抑制作用，管道的电位负移0.17~0.18V，表明了生物膜的保护作用和电化学保护效果得到提高。由上述可知，防控技术的实施使得管道抗腐蚀能力得到了有效提高，油气管道安全运行得到了保证。

6 结语

通过对微生物腐蚀作用机理的研究，采用抑制剂、防护涂层、电化学保护等微生物腐蚀控制技术降低管道的腐蚀速率以及腐蚀电流密度，改善了管道的长效稳定性。未来，针对微生物群落结构的动态变化及其对管道腐蚀速率的影响，需进一步加强监控技术的研发与应用，以更好地应对不同环境条件下的腐蚀问题，为油气管道的安全运行提供技术保障。

参考文献

- [1] 刘阳舟.油气管道运输中的腐蚀与防护[J].流程工业,2025,(01):71-73.
- [2] 娄云天,何盛宇,陈旭东,等.海洋环境中油气管道的微生物腐蚀研究进展[J].表面技术,2022,51(05):129-138.
- [3] 杨根全,张峙,胡丽华,等.某油气水混输不保温海底管道的腐蚀原因及控制措施[J].腐蚀与防护,2024,45(09):120-125.
- [4] 张润杰,曹振恒,张贵雄,等.SRB对油气管道腐蚀影响的研究进展[J].腐蚀与防护,2021,42(10):68-73+108.
- [5] 杨昊天.盐碱土对油气管道的腐蚀影响及治理对策研究[J].全面腐蚀控制,2024,38(02):86-90.