

# 油气田开采中管道微生物腐蚀防护技术研究现状与趋势

陆科洁 于海涛 何婷婷 赵永平 于鑫 李敏  
中海油能源发展装备技术有限公司 天津 300450

**摘要:** 在油气田开采进程里,管道微生物腐蚀问题频发,严重影响生产安全与效率。微生物借由自身生命活动,促使金属氧化,引发腐蚀。当前,化学、物理及生物防护技术各展其长,化学防护凭借缓蚀剂、杀菌剂抑制腐蚀,物理防护依靠清管去除微生物及杂质,生物防护利用微生物调控抑制有害菌。展望未来,研发绿色环保、多技术协同、智能化且基于微生物组学的精准防护技术,是攻克管道微生物腐蚀难题的关键方向。

**关键词:** 油气田开采;管道微生物;腐蚀防护技术;现状;趋势

## 引言

油气田开采作业中,管道作为输送油气的关键载体,其安全性至关重要。然而,微生物腐蚀已成为威胁管道服役寿命与稳定性的突出问题。微生物在管道表面滋生繁衍,形成生物膜,改变金属-介质界面的电化学性质,加速腐蚀进程。本文聚焦于油气田开采中管道微生物腐蚀,深入剖析其腐蚀机理,全面梳理现有防护技术,并对未来发展趋势展开探讨,旨在为提升管道防护水平、保障油气田安全生产提供理论支撑与技术参考。

## 1 油气田开采中管道微生物腐蚀机理

油气田开采中,管道微生物腐蚀是多种复杂因素协同作用的结果。微生物在管道内壁表面形成生物膜,这种由微生物及其胞外聚合物构成的黏性聚合物,为微生物的代谢活动创造了稳定环境。生物膜内氧浓度梯度分布不均,致使厌氧微生物与好氧微生物得以在不同区域共存繁衍,进一步加剧了管道腐蚀的复杂性。硫酸盐还原菌(SRB)是引发管道微生物腐蚀的关键菌种之一。其在无氧或微氧环境下,能够利用硫酸盐作为电子受体进行呼吸代谢,将硫酸盐还原为硫化物。这一过程不仅会产生具有腐蚀性的硫化氢,而且还能改变金属表面的电化学性质,破坏金属表面的钝化膜,加速金属的腐蚀进程。SRB代谢产生的硫化物与金属离子发生化学反应,形成硫化亚铁等腐蚀产物,这些产物疏松多孔,无法有效阻止腐蚀介质与金属基体的接触,从而使腐蚀持续进行。铁氧化菌(IOB)同样在管道微生物腐蚀中扮演重要角色。IOB通过氧化亚铁离子获取能量,在其代谢过程中产生的高铁离子及其水解产物,不仅会改变局部环境的pH值,形成酸性微环境,还能作为强氧化剂加速金属的阳极溶解过程。铁氧化菌产生的大量铁氧化物沉积在金属表面,会形成差异充气电池,引发局部腐蚀,最终导致管道穿孔泄漏。微生物代谢活动产生的酸性物质、酶

以及生物膜的物理屏障作用,共同破坏了管道金属表面的钝化膜,改变了金属表面的电化学性质,形成腐蚀电池。这些腐蚀电池的阴阳极反应持续进行,使得管道金属不断被腐蚀消耗,严重影响油气田管道的安全运行与使用寿命。

## 2 油气田开采中管道微生物腐蚀防护技术研究现状

### 2.1 化学防护技术

化学防护技术在油气田管道微生物腐蚀防控中占据重要地位。其中,杀菌剂的使用较为广泛。常见的杀菌剂如季铵盐类,其作用机制是通过阳离子基团吸附在微生物表面,破坏细胞膜的结构与功能,进而干扰微生物的正常代谢过程,达到杀菌的目的。在实际应用中,季铵盐类杀菌剂能有效抑制硫酸盐还原菌(SRB)、铁氧化菌(IOB)和腐生菌(TGB)等常见腐蚀微生物的生长。戊二醛类杀菌剂也具有良好的杀菌性能,它可与微生物细胞内的蛋白质发生交联反应,使蛋白质变性失活,从而实现了对微生物的杀灭。在一些油气田的注水系统中,合理投加戊二醛杀菌剂,能显著降低水中微生物的含量,减轻管道的腐蚀程度。缓蚀剂同样是化学防护的关键手段。有机缓蚀剂分子能够在金属管道表面形成一层吸附膜,这层膜可以阻止微生物与金属表面直接接触,同时也能抑制腐蚀反应的电化学过程。例如,咪唑啉类缓蚀剂,其分子结构中的氮原子等活性基团可与金属表面发生化学吸附,形成致密的保护膜,有效抑制了因微生物代谢产物引发的腐蚀反应。在含有CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S等腐蚀介质与微生物共存的复杂环境中,咪唑啉类缓蚀剂表现出较好的缓蚀效果,能降低管道的腐蚀速率。一些无机缓蚀剂如铬酸盐等,可通过在金属表面形成钝化膜来提高金属的耐蚀性,但由于铬酸盐的环境毒性问题,其应用受到一定限制。随着环保要求的提高,研发高效、低毒的新型缓蚀剂成为化学防护技术的重要发展方向<sup>[1]</sup>。

## 2.2 物理防护技术

清管是油气田管道运营中一项重要的维护技术，通过物理方式清除管道内积存的蜡、沥青质、泥沙、沉积物、腐蚀产物、生物膜（包括微生物腐蚀产物）等杂质，防止堵塞或流动效率下降，以保障管道输送效率、减少腐蚀风险并延长使用寿命。清管球可以直接剥离管壁生物膜，破坏微生物群落结构，减少腐蚀和堵塞风险。清管后暴露的管壁更易接触杀菌剂（如季铵盐、戊二醛），提高化学处理的效率。某些清管器（如机械钢刷、尼龙刷等）能有效去除腐蚀坑中的微生物及杂质，有效降低腐蚀坑中微生物的腐蚀风险。此外，定期清理工艺流程中的罐体，优化流体力学，避免低流速区域，定期高压水冲洗死水区，强制置换滞留液体，减少死水区和盲肠短节的影响，可进一步提升微生物治理效率。

## 2.3 生物防护技术

生物防护技术作为一种较为新颖的防护手段，正逐渐受到关注。生物竞争抑制技术是利用微生物之间的竞争关系来抑制腐蚀微生物的生长。例如，某些有益微生物可与SRB等腐蚀微生物竞争生存空间和营养物质。一些硝酸盐还原菌（NRB）能够利用环境中的硝酸盐作为电子受体进行代谢活动，与SRB竞争有限的电子供体，从而抑制SRB的生长和代谢，降低其对管道的腐蚀作用。在一些油田的注水系统中，引入特定的NRB菌群，可有效减少SRB的数量，缓解管道的微生物腐蚀。噬菌体技术也是生物防护的重要研究方向。噬菌体是一类专门侵染细菌的病毒。针对引起油气田管道腐蚀的SRB等细菌，可筛选或构建特异性的噬菌体。这些噬菌体能够识别并吸附在SRB表面，将自身的遗传物质注入细菌体内，利用细菌的代谢系统进行繁殖，最终导致细菌裂解死亡。山东九一生物科技股份有限公司开发的针对SRB的工程化噬菌体制剂，通过基因编辑技术将噬菌体的裂解酶编码基因与多种生物膜穿透蛋白基因进行定向多重重组，显著提升了对SRB生物膜的穿透和裂解效率。在实际应用中，该噬菌体制剂能有效降低管道内SRB的种群丰度，减少生物膜的形成，降低管道的腐蚀速率。生物防护技术具有环境友好、特异性强等优点，随着研究的深入，有望在油气田管道微生物腐蚀防护中发挥更大的作用<sup>[2]</sup>。

## 3 油气田开采中管道微生物腐蚀防护技术发展趋势

### 3.1 绿色环保型防护技术的研发

（1）在当前注重生态可持续发展的大背景下，研发绿色环保型防护技术对于油气田管道微生物腐蚀防护意义重大。以生物防治手段为例，噬菌体技术正崭露头角。从自然界极端环境中筛选出的具有高效裂解特性的

噬菌体底盘菌株，经基因编辑将其裂解酶编码基因与生物膜穿透蛋白基因定向多重重组，构建出可特异性识别硫酸盐还原菌（SRB）等有害微生物的工程化噬菌体制剂。其能高效溶解生物膜屏障，且一次投加后可在管道内持续复制，裂解效率高，综合成本降低50%以上，还能实现零残留、无毒性累积，与细菌协同进化避免耐药性问题。（2）氮气纳米气泡技术也展现出独特优势。在防腐蚀方面，氮气纳米气泡在金属表面形成致密气膜，隔绝H<sub>2</sub>O、Cl<sup>-</sup>、H<sub>2</sub>S等腐蚀介质，抑制微生物腐蚀。如在含SRB的模拟管道中，氮气纳米气泡处理后的腐蚀速率从0.3mm/年降至0.05mm/年，H<sub>2</sub>S浓度下降90%。在防垢上，通过表面电荷效应和微界面效应，减少垢层沉积量达60%-80%。（3）未来还需进一步探索和优化此类绿色技术，提升其在复杂油气田工况下的适应性和稳定性。例如开发针对不同微生物群落的特异性噬菌体组合，以及改进纳米气泡在超高温（> 180℃）油藏中的稳定性，通过表面活性剂包覆等手段增强其性能。

### 3.2 多技术协同防护体系的构建

（1）油气田管道所处环境复杂，单一防护技术往往难以满足全面防护需求，构建多技术协同防护体系成为必然趋势。将物理、化学和生物防护技术有机结合，能发挥各自优势，实现对微生物腐蚀的全方位防控。例如，在物理防护上采用涂层技术，可在管道表面形成一道物理屏障，阻止微生物附着和腐蚀介质接触。配合化学缓蚀剂的使用，抑制金属的电化学腐蚀过程。再引入生物竞争抑制技术，投放与有害微生物竞争生存资源的有益微生物，降低有害微生物的数量和活性。（2）以某油田实际应用为例，通过复合杀菌方案，将噬菌体与微量过氧化氢联用，穿透深度提升3倍，生物膜清除率达94.7%。在不同技术协同过程中，需精准调控各技术参数，如涂层厚度、缓蚀剂浓度、微生物投放量等，确保它们相互促进而非相互干扰。（3）建立多技术协同防护体系的监测与反馈机制也至关重要。实时监测管道腐蚀情况、微生物群落变化、防护技术效果等参数，根据监测结果及时调整各技术的运行参数，保证防护体系始终处于最佳工作状态，从而有效延长管道使用寿命，降低维护成本<sup>[3]</sup>。

### 3.3 智能化监测与防护技术的发展

（1）随着信息技术的飞速发展，智能化监测与防护技术在油气田管道微生物腐蚀防护领域的应用前景广阔。利用物联网传感器，可实时采集管道运行过程中的多种参数，如温度、压力、流量、腐蚀电位、微生物含量等。通过对这些数据的实时分析，能及时发现管道是

否存在微生物腐蚀风险以及腐蚀发展程度。(2)基于大数据和机器学习技术,构建腐蚀预测模型。对大量历史数据和实时监测数据进行学习和分析,预测微生物腐蚀的发生时间、位置和严重程度,提前采取防护措施,避免腐蚀事故的发生。例如,通过分析管道不同部位的腐蚀数据和环境参数,建立数学模型,预测特定区域在未来一段时间内的腐蚀速率变化趋势,为维护决策提供科学依据。(3)智能化防护设备也在不断发展。像智能泵站,它配备高精度监测装置,能依据收集到的监测数据,自动且灵活地调整防护药剂的注入量和注入时间,达成精准防护目标。远程监控平台则可实时掌握管道全线的防护状态,自动触发防护措施,实现零人工值守,大大提高防护工作的效率和准确性,降低人力成本和安全风险。

### 3.4 基于微生物组学的精准防护

(1)微生物组学研究为深入了解油气田管道内微生物群落结构、功能及其相互作用关系提供了有力手段,基于此的精准防护技术正逐渐兴起。通过宏基因组测序等技术,全面分析管道内微生物的种类、丰度和基因功能,明确不同微生物在腐蚀过程中的作用机制。(2)例如,研究发现除了常见的SRB外,铁氧化菌、腐生菌等多种微生物相互协同或抑制,共同影响着管道腐蚀。针对特定的微生物群落结构,开发精准的防护策略。若某区域管道内SRB和铁氧化菌大量存在且相互促进腐蚀,可针对性地研发能同时抑制这两种微生物的药剂或生物防治

方法。(3)根据微生物组学研究结果,还可优化管道运行条件,创造不利于有害微生物生长繁殖的环境。具体而言,通过精准调控管道内流体的温度、pH值、溶解氧含量等关键参数,引导微生物群落结构发生积极变化,使其向有利于管道防护的方向转变,从而实现从源头防控微生物腐蚀,提高防护技术的针对性和有效性<sup>[4]</sup>。

### 结语

综上所述,油气田开采中管道微生物腐蚀防护技术历经发展,已取得一定成果。但随着开采环境愈发复杂,现有技术仍面临诸多挑战。未来,应大力推动绿色环保型防护技术研发,积极构建多技术协同防护体系,深度发展智能化监测与防护技术,深入开展基于微生物组学的精准防护研究。通过不断创新与实践,切实提升管道微生物腐蚀防护能力,确保油气田开采安全、高效、可持续进行。

### 参考文献

- [1]侯保荣,闫静,王娅利,等.油气田开采中管道微生物腐蚀防护技术研究现状与趋势[J].石油与天然气化工,2022,51(5):71-79.
- [2]刘阳舟.油气管道运输中的腐蚀与防护[J].流程工业,2025(1):71-73.
- [3]郑学道.油气储运过程中的管道腐蚀机理及防护技术创新研究[J].中国化工贸易,2025(3):151-153.
- [4]袁艺鸣,张广毅,方宏远,等.排水管道微生物群落对管道腐蚀的影响[J].中国给水排水,2022,38(8):46-51.