

红壤地下设施金属构件的腐蚀与防护^①

姜 军^{1,2}, 洪志能^{1,2}, 孟令宇^{1,2,3}, 戴士祥^{1,3}, 滕 应^{1,2,3}, 徐仁扣^{1,2}

(1 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 中国科学院红壤生态实验站, 江西鹰潭 335211)

摘 要: 红壤具有 pH 低、有机酸和腐蚀性离子丰富、微生物活性强等理化与生物特征, 对地下设施金属构件造成显著的电化学腐蚀与微生物腐蚀。本文系统综述了红壤地区地下设施金属构件腐蚀的环境机制、腐蚀特征与防护策略。首先, 从腐蚀机制角度出发, 解析了析氢腐蚀、吸氧腐蚀, 以及硫酸盐还原菌、铁氧化细菌等微生物在生物膜中的代谢过程及其协同腐蚀路径, 揭示红壤环境中材料腐蚀呈现多因子耦合、空间非均匀性与时间渐进性等特征。在此基础上, 进一步探讨了材料选型、防腐涂层、阴极保护、土壤改良等多维防护技术的适用性。面向未来, 强调了智能监测、大数据分析 with 绿色功能材料交叉融合的研究发展趋势。本文为红壤区地下设施腐蚀防控提供了系统化理论支撑与工程实践指导, 对提升区域基础设施的耐久性、安全性与可持续运行能力具有重要意义。

关键词: 电化学腐蚀; 微生物腐蚀; 生物膜; 土壤 pH; 阴极保护; 土壤改良

中图分类号: TG172.4 **文献标志码:** A

Corrosion and Protection of Metal Components in Underground Facilities Within Red Soil: A Review

JIANG Jun^{1,2}, HONG Zhineng^{1,2}, MENG Lingyu^{1,2,3}, DAI Shixiang^{1,3}, TENG Ying^{1,2,3}, XU Renkou^{1,2}

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China*; 2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*; 3 *Ecological Experimental Station of Red Soil, Chinese Academy of Sciences, Yingtan, Jiangxi 335211, China*)

Abstract: Red soil is characterized by low pH, high concentrations of organic acids and corrosive ions, and elevated microbial activity, which causes significant electrochemical and microbiological corrosion to the metal components of underground facilities. This study presented a comprehensive review of the corrosion mechanisms, key influencing factors, and protective strategies for underground facilities operating in such environments. The results revealed that the hydrogen evolution and oxygen reductions are the dominant electrochemical processes, while microbiological corrosion is primarily driven by sulfate-reducing bacteria, iron-oxidizing bacteria, and other functional microorganisms residing in stratified biofilms. Corrosion in acidic red soils exhibited multi-factor coupling, spatial heterogeneity, and gradual progression over time. To address these challenges, this study proposed integrated corrosion protection strategies that encompass material selection, multilayer anti-corrosion coatings, cathodic protection systems, and soil modification techniques. Furthermore, emerging trends such as intelligent monitoring technologies, data-driven corrosion prediction models, and eco-friendly protective materials were highlighted. This work provides valuable theoretical insights and engineering guidance for the durable, safe, and sustainable management of underground infrastructures in acidic soil environments.

Key words: Electrochemical corrosion; Microbial corrosion; Biofilm; Soil pH; Cathodic protection; Soil correcting

全球每年因材料腐蚀造成的直接经济损失约 2.5 万亿美元, 占全球 GDP 的 3%~4%^[1]。我国每年因材料腐蚀造成的直接与间接经济损失约 2.13 万亿元人民币, 约占 GDP 的 3.34%^[2]。随着能源结构优化和

基础设施建设, 我国大量地下设施如钢桩、套管、储罐、电缆等广泛应用, 其腐蚀防护成为国家战略基础设施安全的重要环节。过去十年, 我国已颁布多项相关防护标准, 如 GB/T 50251—2015《给水排水管道

①基金项目: 国家重点农业科技项目(NK2022180104)资助。

作者简介: 姜军(1978—), 男, 江苏常州人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤表面电化学研究。E-mail: jjiang@issas.ac.cn

工程施工及验收规范》、GB/T 32974—2016《金属和合金的腐蚀 土壤腐蚀性分类导则》、GB/T 21448—2017《埋地钢质管道外腐蚀控制规范》、GB/T 50393—2017《城市地下综合管廊工程技术规范》等,这些标准为腐蚀监测与防护提供了关键技术依据,对提升基础设施安全与服役寿命具有重要意义。

1931年,Gill和Rogers^[3]首次发现土壤电阻率与管道腐蚀程度相关。随后研究表明,除土壤电阻率外,硫酸盐还原菌(SRB)活性^[4]、土壤水-气比^[5]、氯离子浓度、pH、氧化还原电位(Eh)及溶解氧含量等也对腐蚀有重要影响^[6-7]。我国土壤类型丰富,包括砖红壤、红壤、黄壤、黄棕壤、棕壤、黑土、潮土及多种类型的水稻土等,不同土壤在物理、化学和生物特性上差异显著,且气候、水文与土地利用差异使土壤环境呈现高度异质性^[8]。这些差异直接影响材料在不同地区的腐蚀类型和速率^[9]。

随着城市基础设施、能源管网及地下工程建设的推进,特别是“西气东输”东段管线穿越酸性红壤地区^[10],大量埋地设施长期暴露于高腐蚀环境中,导致材料退化、结构破损、失效及安全事故,严重制约了设施的耐久性与安全性。在天仁院士领导下,中国科学院南京土壤研究所电化学研究室自20世纪70年代起开展酸性红壤地下设施腐蚀与防护研究。依托该研究所及江西鹰潭农田生态系统国家野外科学观测研究站,该研究室于20世纪80年代就开展红壤环境中材料腐蚀研究(图1为1989年试验区设立的界石)揭示腐蚀规律,并为其预测与控制提供依据。鹰潭土壤环境腐蚀试验站在推动材料土壤腐蚀领域创新与水平提升方面作出了重要贡献。



图1 1989年国家材料腐蚀试验网鹰潭红壤试验站在试验区设立的界石

Fig. 1 Boundary stone marking experimental area of Yingtian Red Soil Test Station, erected by National Materials Corrosion Testing Network of China in 1989

本文旨在:①系统梳理酸性红壤地区地下设施金属构件腐蚀防护的研究现状;②深入解析红壤环境下地下设施电化学腐蚀与微生物腐蚀的机制及主控因素,揭示腐蚀的演化规律;③探讨适用于酸性红壤环境的高效防护技术与材料选择策略,构建综合防控体系;④展望未来研究趋势。本综述力求在理论与应用两方面协同推进:提升红壤区地下设施腐蚀防控能力,保障基础设施长期安全运行;深化土壤腐蚀机理与材料响应行为的理论研究,为基于地下结构智能感知与数字孪生技术支撑下的“智慧管网”平台建设提供支撑。深入研究地下设施在特定土壤环境中的腐蚀机理与防护技术,有助于指导工程设计与材料选用,并普及相关科普知识,提高腐蚀防护意识与技术应用水平,从源头上降低腐蚀风险,延长设施使用寿命。

1 红壤酸化与地下设施腐蚀

红壤在我国主要分布于长江以南的亚热带低山丘陵区,总面积约203万 km^2 ,占全国土地面积的21%。该土壤类型广泛分布于北纬 $10^\circ \sim 30^\circ$ 之间的南方热带与亚热带地区,具有典型的湿热湿润气候特征,年均温 $15 \sim 28^\circ\text{C}$,年有效积温($\geq 10^\circ\text{C}$)约为 $5\,000 \sim 9\,500^\circ\text{C}$,年降水量为 $1\,200 \sim 1\,500\text{ mm}$ ^[11]。红壤的发育是长期强烈风化脱硅、次生矿物富铝化与植物-微生物共生系统协同作用的结果^[11]。根据铁铝氧化物积累、生物富集及淋溶作用的强弱,进一步分为砖红壤、赤红壤、红壤、黄壤等类型。

红壤是一种富含铁铝氧化物的高度风化土壤,通常呈酸性,表层pH介于 $4.5 \sim 6.5$,且旱地原位pH通常比实验室测定值低0.52个单位^[12]。红壤主要形成于花岗岩、红黏土、玄武岩等钙镁元素贫乏的酸性母岩,自然酸化过程极为缓慢,南方亚热带地区的土壤pH每下降一个单位需百万年^[13]。然而,高温湿润环境中有机质分解生成腐殖酸、草酸等有机酸^[14],进一步降低土壤pH。人类活动加速红壤酸化,特别是工业排放、化石燃料燃烧、施肥与农业活动,导致土壤盐基流失与酸缓冲破坏^[15]。自然和人为干扰使南方红壤地区面临严重的酸化问题,进一步加剧了地下金属设施的腐蚀。

红壤具有低pH、丰富的腐蚀性离子(如 Cl^- 、 SO_4^{2-})和普遍的渍水现象,对埋地金属构件构成显著腐蚀威胁^[16]。研究表明^[17],Q235B碳素结构钢、X70和X80管线钢在江西鹰潭的红壤中埋藏1年后,其腐蚀质量损失率和腐蚀失厚率分别是其他地区的2.14倍~4.53倍和2.13倍~4.71倍(表1)。主要原因是:土壤酸度较高,促进金属阳极溶解反应;土壤结构不均,通气

性差,易形成氧浓差电池;黏粒含量高,增强腐蚀性离子的迁移能力;高湿度下土壤含水率持续在适宜腐蚀的范围,增强电解质导电性,维持腐蚀电偶作用。

这揭示了红壤环境对地下设施腐蚀的显著影响,并表现出特殊性和地域敏感性,提醒在南方红壤区设计与运维地下设施时需特别关注腐蚀风险。

表 1 Q235B 碳素结构钢、X70 和 X80 管线钢在 8 个地区埋藏 1 年的腐蚀指标^[17]

Table 1 Corrosion indicators for Q235B structural steel, X70 and X80 pipeline steels after one-year *in-situ* burial in eight soil districts

地区	腐蚀质量损失率(g/(cm ² ·a))			腐蚀失厚率(mm/a)		
	Q235B	X70	X80	Q235B	X70	X80
江西鹰潭	0.070 a	0.067 a	0.077 a	0.090 a	0.085 a	0.099 a
西藏拉萨	0.023 b	0.023 c	0.024 cd	0.029 b	0.029 c	0.031 cd
青海格尔木	0.022 b	0.018 c	0.017 e	0.028 b	0.023 c	0.021 e
新疆库尔勒	0.022 b	0.021 c	0.020 de	0.028 b	0.027 c	0.026 de
黑龙江大庆	0.026 b	0.031 b	0.036 b	0.033 b	0.040 b	0.046 b
辽宁沈阳	0.028 b	0.028 b	0.029 c	0.036 b	0.036 b	0.037 c
山东大港	0.028 b	0.023 c	0.028 c	0.035 b	0.030 c	0.036 c
四川成都	0.025 b	0.023 c	0.025 cd	0.032 b	0.030 c	0.032 cd

注:采用 Duncan 多重范围检验,同一列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2 红壤地下设施腐蚀与防护的研究现状

为揭示酸性红壤地下设施腐蚀研究的热点与趋势,本文基于 Web of Science 核心合集与中国科学引文数据库(CSCD)构建文献样本,利用 Citespace 6.3.1 进行科学计量学分析。检索采用“acid*soil”(*表示通配符)与“corrosion”为关键词,获取相关文献 1 965 篇,最终筛选出有效样本 184 篇,包括 SCI 文献 116 篇和 CSCD 中文文献 68 篇。为探讨领域焦点与前沿演化,进行引文突增检测,识别大量引用的关键词或文献,揭示研究热点与潜在前沿^[18]。突增强度最高的

前 9 个关键词包括 X70 钢(X70 steel)、阳极溶解(anodic dissolution)、应力腐蚀开裂(stress corrosion cracking)、管线钢(pipeline steel)、X80 管线钢(X80 pipeline steel)、点蚀(pitting corrosion)等(图 2),显示出研究聚焦从“整体腐蚀”向“局部腐蚀机制”深化,特别是在微观行为如点蚀、阳极溶解方面的突破^[19]。X70 与 X80 管线钢腐蚀性能成为核心研究内容,探索了不同红壤条件下的服役响应和材料适配性^[20];“应力-腐蚀”协同机制与应力腐蚀开裂行为研究日趋深化,聚焦在酸性土壤环境下的裂纹萌生、扩展及失效模式^[21],显示出正朝向高精度、材料定向与微观机理解析方向加速发展。

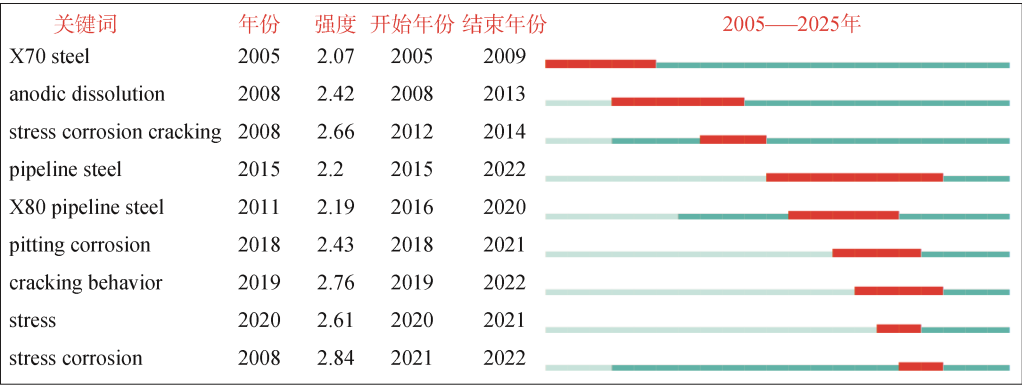


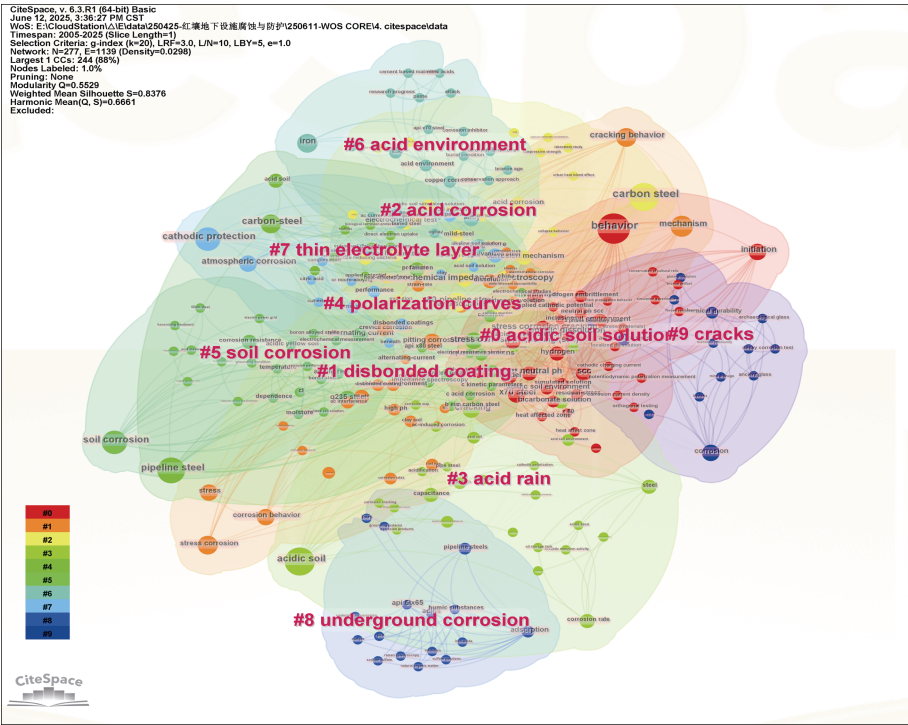
图 2 以“acid*soil”和“corrosion”为主题词检索得到自 2005 年起 184 篇文献中引文突增强度最高的前 9 个关键词

Fig. 2 Top 9 keywords with strongest citation bursts identified from 184 publications (since 2005) using “acid * soil” and “corrosion” as topic keywords

图 3 展示了基于文献计量的关键词共现网络,高频主题词包括: #0 酸性土壤溶液(acidic soil solution)、#1 脱黏涂层(disbonded coating)、#2 酸腐蚀(acid corrosion)、#3 酸雨(acid rain)、#4 极化曲线(polarization curves)、#5 土壤腐蚀(soil corrosion)、#6 酸环境(acid environment)、#7 薄液层(thin electrolyte layer)、#8 地下腐蚀(underground corrosion)、#9 裂纹(cracks)。这些主题词从环境特征、腐蚀机制到结构失效等多个维度

构建了研究图谱，反映出酸性土壤环境中地下设施腐蚀研究的系统化、机制化和多尺度交叉发展趋势。例如，#0 酸性土壤溶液反映了酸性土壤作为腐蚀电解质的基本特征，低 pH、高导电性和腐蚀性阴离子如 Cl^- 、 SO_4^{2-} 构成金属腐蚀的驱动因素^[22]；#3 酸雨研究不仅关

注土壤酸性影响，还涉及酸雨渗透带与地表径流的协同作用，强调土壤-大气-水界面的腐蚀加剧机制^[23]；#6 酸环境关键词则扩展了研究范围，涵盖污泥堆场、工业废弃地、含硫矿渣土层等复杂介质环境，显示腐蚀场景的多样性与工程应用的复杂性^[24]。



(节点大小表示关键词出现频次；颜色表示主题集群)

图 3 基于自 2005 年以来 184 篇文献的关键词共现网络
Fig. 3 Keywords co-occurrence map based on 184 publications (since 2005)

自 2005 年以来，酸性红壤地下设施腐蚀与防护技术的研究不断深入，在腐蚀机制解析、腐蚀因子识别、防护材料开发与技术集成、智能化监测系统应用等方面取得显著进展。总体来说，研究演进可分为 3 个阶段：①腐蚀特性识别与基础调查阶段(2005—2012 年)，重点是土壤理化与生物特性表征及腐蚀风险识别，结果表明红壤具有低 pH、高含水率、强微生物活性等典型腐蚀风险因子^[25]；②微生物-电化学腐蚀机制与防护材料研究阶段(2013—2019 年)，研究转向微生物腐蚀机理与局部腐蚀行为，同时开发与验证新型防腐材料(如多层环氧涂层、锌基牺牲阳极材料、抗酸复合水泥基材料等)^[2]；③系统性防护集成与智能监测融合阶段(2020—2025 年)，研究聚焦多因子耦合腐蚀机制与智能监测系统构建，推动建立电化学-微生物-环境三元耦合模型，并逐步实现智能腐蚀监测技术的工程化^[10]。这一演进反映了从单因子识别到多因子耦合机制，从静态防护到智能响应式管理的转变，为地下设施长期安全服役提供技术支撑。

3 红壤地下设施腐蚀的机制及影响因素

一般而言，红壤由于低 pH，能直接促进金属表面氢离子去极化反应，并通过氧化铁锰等矿物催化加速氧化还原反应，形成典型电化学腐蚀条件。同时，红壤中广泛的微生物群落，尤其是 SRB 等厌氧菌，通过代谢活动促进微生物腐蚀。此外，红壤具有一系列不利于地下设施耐久性的特性，如高黏粒含量、强吸水性，促进电解质膜持续形成；干湿交替频繁，加剧腐蚀产物破裂与金属暴露；低 pH 缓冲容量，难以抑制局部酸化。这些因素共同作用，导致地下设施金属构件在红壤中易发生显著的电化学与微生物协同腐蚀，表现出时间演化性、空间分异性和机制耦合性。

3.1 地下设施金属构件的电化学腐蚀

电化学腐蚀是金属材料与周围介质(如土壤、水体或湿润空气)接触时，通过自发氧化还原反应引起的腐蚀现象，实质为腐蚀电池作用，由阳极金属溶解与阴极电子消耗共同驱动。在酸性土壤环境中，析氢

腐蚀为主导机制，吸氧腐蚀仅在局部富氧区域偶发(图 4)。析氢腐蚀多发生在深层土壤、生物膜内或酸性渗滤液等 pH<5.0 的厌氧环境中。此过程中，铁在阳极溶解($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$)，阴极区域氢离子还原为氢气($2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow$)^[26]。当土壤中存在 SRB 时， H_2 会被其代谢消耗，打破 H_2 的钝化积累效应，加速阳极电子转移，进一步加剧阳极腐蚀反应^[27]，形成典型的微生物-电化学协同腐蚀机制。

虽然红壤整体氧含量较低，但在表层土壤、植被根际区或孔隙度较大的通气带，吸氧腐蚀仍可能局部发生。该过程以氧作为电子受体($\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^-$)^[28]，生成的 OH^- 可使局部 pH 升高，诱导腐蚀产物沉积。若金属表面存在氧浓度差异，如缝隙、涂层缺陷区，易形成氧浓差电池，进而诱发点蚀或缝隙腐蚀^[29]。

3.2 地下设施金属构件的微生物腐蚀

在多种自然环境中,不同类型的微生物能够在材

料表面附着、繁殖，其生命活动往往诱导或加剧金属腐蚀。地下设施的土壤环境中，金属腐蚀与碳、氮、铁、硫等生物地球化学循环密切相关，参与这些循环的微生物是腐蚀的主要驱动者^[30]。常见的腐蚀微生物包括：SRB、硫氧化菌(SOB)、产酸菌(APB)、铁氧化细菌(IOB)、铁还原细菌(IRB)、硝酸盐还原菌(NRB)及产黏液细菌等(表 2)。这些微生物通过生物膜形式聚集在材料表面，通过定殖和代谢活动在材料-土壤界面形成独特“微环境”。一些微生物利用胞外电子传递(EET)能力，与金属材料发生电子交换^[31]，诱发强烈局部腐蚀。生物膜为微生物群体提供物理屏障和营养保持^[32]，更通过代谢产物的释放与传输，改变金属表面条件(如 pH、氧浓度、电极电位、离子迁移等)，已被视为微生物腐蚀的关键反应界面。因此，深入研究生物膜的形成机制、结构特征及其电化学调控效应，对揭示微生物腐蚀机理和开发防护策略具有重要理论意义与工程价值。

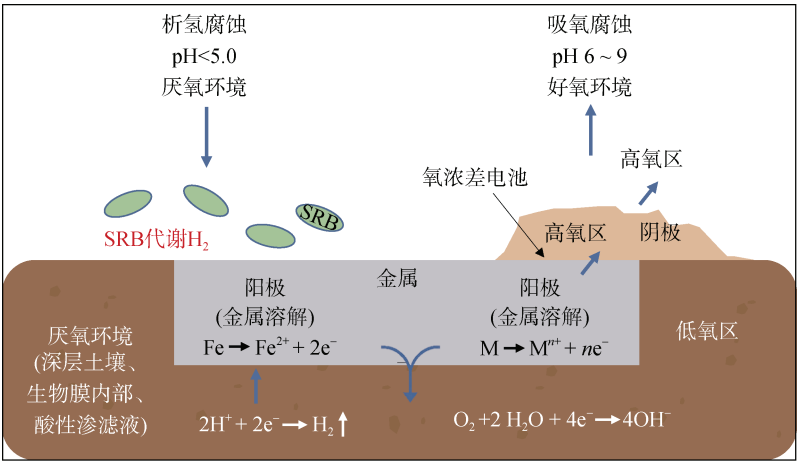


图 4 金属土壤腐蚀的电化学原理

Fig. 4 Electrochemical mechanisms of metal corrosion in soil

表 2 与金属腐蚀相关的微生物^[30]

Table 2 Microorganisms implicated in metal corrosion processes

类型	好氧/厌氧	特征	作用
硫酸盐还原细菌: <i>Desulfovibrio</i> 、 <i>Desulfobacterium</i> 、 <i>Desulfotomaculum</i>	厌氧	利用 H_2 还原 SO_4^{2-} 成 S^{2-} , 产生 H_2S 和 FeS	氢吸收阴极去极化; 腐蚀硫化铁阳极去极化; 直接吸收铁
硫氧化细菌: <i>Thiobacillus</i> 、 <i>Sulfurospirillum</i>	好氧	氧化 S^{2-} 和 SO_3^{2-} 成 H_2SO_4	酸腐蚀金属
硝酸盐还原细菌: <i>Klebsiellamobilis</i>	厌氧	还原 NO_3^- 到 NH_4^+ ; 氧化 Fe^{2+} 到 Fe^{3+}	溶解金属
铁氧化/还原细菌: <i>Acidithiobacillus</i> 、 <i>Ferrooxidans</i> 、 <i>Leptothrix</i> 、 <i>Crenothrix</i> 、 <i>Sphaerotilus</i>	好氧和厌氧	氧化 Fe^{2+} 到 Fe^{3+} ; 还原 Fe^{3+} 到 Fe^{2+} ; Mn 或 Fe 氧化或还原	氧化/还原 Fe 和 Mn 及其氧化物
产酸细菌和真菌: <i>Thiobacillus</i> 、 <i>Acetobacter</i>	好氧和厌氧	产生硝酸、硫酸或者有机酸等	溶解铁, 螯合铜、锌、铁
产黏液细菌: <i>Clostridium</i> 、 <i>Flavobacterium</i> 、 <i>Bacillus</i> 、 <i>Pseudomonas</i>	好氧和厌氧	产生胞外聚合物(生物膜)	胞外高分子结合金属离子

生物膜的形成通常分成 3 个阶段(图 5)。首先是微生物附着阶段,微生物(如 SRB、IOB、NRB 等)通过物理吸附、静电引力、范德华力等机制附着在金属表面,附着效率受温度、pH、流速及离子强度等因素影响。其次是生物膜成熟阶段,微生物在表面定殖后分泌大量胞外聚合物(EPS),这些物质构建三维基质,促使微生物实现不可逆附着,并形成复杂微生态系统。成熟的生物膜呈现群落分层,外层为好氧菌(如 IOB、SOB),内层为厌氧菌(如 SRB、产甲烷菌 MPB 等),在缺氧环境中主导腐蚀作用。然而,并非所有生物膜都严格遵循“好氧→厌氧”结构,其结构受环境因素(如淹水、频繁扰动等)与土壤深度影响。最后是生物膜动态演变阶段,随着膜的持续演化,内部形成电化学梯度和代谢通道结构,包括 pH 梯度、氧浓度梯度及促进代谢产物扩散和金属离子迁移的

离子通道,影响腐蚀行为和反应速率^[33]。这一过程不仅为微生物提供栖息环境,还改变金属表面的氧化还原状态、电势分布和局部电化学反应路径,为微生物腐蚀的发生与扩展提供基础。

红壤中的微生物种类繁多,SRB、IOB、APB 和 NRB 等关键腐蚀微生物通过各自的代谢途径及相互作用,对地下设施金属腐蚀过程产生显著影响(图 6)。SRB 还原硫酸盐生成 H_2S ,破坏金属钝化膜,并与 Fe^{2+} 生成 FeS 沉积,作为阴极反应的催化剂,加速电子转移过程,显著增强金属腐蚀^[34]。IOB 通过氧化 Fe^{2+} 为 Fe^{3+} 并生成 $Fe(OH)_3$ 等沉积物,形成局部点蚀源并消耗氧气,创造厌氧环境,有利于 SRB 的定殖与生长^[35]。APB 能代谢产生有机酸与无机酸,降低 pH 并破坏钝化膜,促进金属阳极溶解^[36]。NRB 通过硝酸盐还原反应加速阴极区电子消耗,改变腐蚀

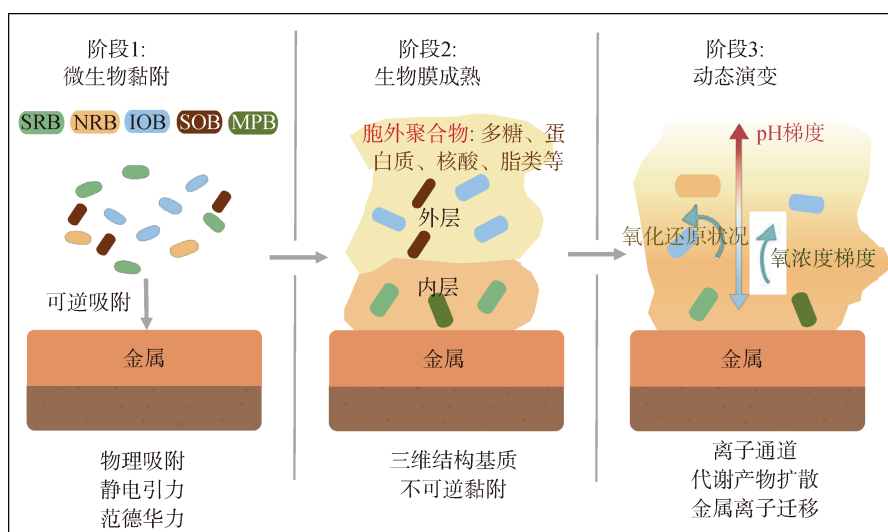


图 5 生物膜形成过程示意图

Fig. 5 Schematic representation of biofilm development stages

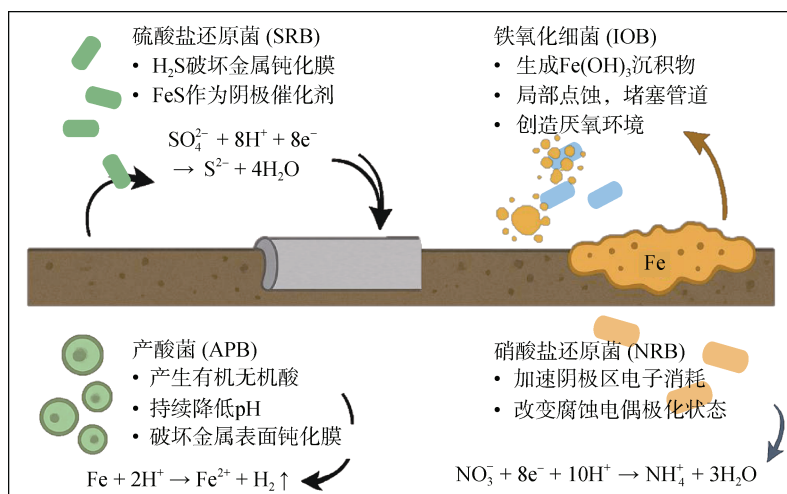


图 6 典型微生物腐蚀机制示意图

Fig. 6 Illustration of microbial corrosion mechanisms by representative microorganisms

电偶的极化状态,调控腐蚀反应动力学^[37]。这些微生物通过生物膜定殖,形成氧浓度、pH、电势等梯度,促使代谢耦合与电子共享,增强腐蚀速率^[38]。因此,微生物的群落结构与代谢路径在红壤腐蚀体系中具有重要地位。

3.3 红壤电化学腐蚀与微生物腐蚀的关系

在酸性红壤环境中,电化学腐蚀与微生物腐蚀是地下设施腐蚀的两大类型。尽管二者常耦合作用于金属表面,但在驱动机制、主导因子与能量来源上,二者有显著差异(表 3)。电化学腐蚀主要由金属表面不同区域的电位差驱动,通过金属在电解质环境中的氧化还原反应,电子在阳极-阴极之间流动并形成腐蚀原电池,推动金属溶解^[39]。相比之下,微生物腐蚀源于微生物代谢活动释放的化学能及其在金属表面形成的生物膜所构建的微环境异质性。微生物通过生成有机酸、无机酸、H₂S 或消耗氧气等,改变局部 pH、电极电位及氧化还原条件等,显著加速腐蚀反应^[40]。

表 3 酸性红壤电化学腐蚀与微生物腐蚀的差异
Table 3 Differences between electrochemical corrosion and microbial corrosion in acidic red soil

特征	电化学腐蚀	微生物腐蚀
驱动力	金属电位差和环境氧化剂	微生物代谢能和生物膜微环境异质性
阴极反应	O ₂ /H ⁺ 还原	微生物酶催化(氢化酶)或代谢物还原、直接电子摄取
反应时间	快速	持续性强、隐蔽性高
腐蚀形态	均匀腐蚀/溃疡腐蚀	点蚀
影响因素	pH、溶解氧、离子浓度	群落结构、生物膜成熟度、营养条件
防护措施	阴极保护、缓蚀剂	杀菌剂、生物膜清除、材料表面改性、抗菌涂层、导电聚合物抑制 EET

从腐蚀过程的动力学与形态特征来看,二者在启动机制、发展周期与表观形态上差异显著。电化学腐蚀起效迅速,电极电位差下可在短时间内激发腐蚀反应;而微生物腐蚀启动较慢,形成稳定生态系统后,腐蚀行为持续且隐蔽,不易早期发现^[41]。电化学腐蚀通常表现为均匀腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀等,典型产物为氧化铁层、Fe(OH)₃ 等^[42];微生物腐蚀则易诱发局部性破坏,如点蚀、凹坑腐蚀、丝状腐蚀及生物膜下腐蚀,产物多为细菌代谢残留的生物膜、有机胶体附着层及硫酸盐还原沉淀物等^[43]。电化学腐蚀主要受土壤理化属性影响,微生物腐蚀

则更多受微生物种群结构、土壤有机质、溶解氧等生物化学因素控制^[41, 44]。

在红壤环境中,尽管有机质含量较低,但由于 pH 低、微生物多样性高且适应酸性环境的能力强,电化学腐蚀与微生物腐蚀常呈现协同腐蚀的耦合机制。微生物代谢活动直接增强电化学过程,例如 SRB 代谢还原 SO₄²⁻生成 H₂S,破坏 Fe 表面钝化膜并生成 FeS 沉积膜^[45],促进极化反应并增强电化学腐蚀速率^[36]。此外,APB 可生成有机酸,降低 pH 并增强阳极溶解反应^[41]。微生物活动还通过有氧代谢消耗氧气,在金属表面形成氧浓度梯度,促进腐蚀反应的持续发展^[46]。因此,电化学腐蚀与微生物腐蚀共同作用,对地下设施造成更大腐蚀威胁。

3.4 红壤环境因素对地下设施腐蚀的影响

在红壤环境中,pH、有机质含量、含水率、电阻率及腐蚀性离子等土壤因子共同构成多因子耦合腐蚀体系,这些因子显著提高地下设施腐蚀风险,进而影响其服役寿命与结构完整性。首先,低 pH(常低于 5.0)导致 H⁺ 浓度升高,加速金属阳极溶解并破坏钝化膜,诱发晶间腐蚀与点蚀^[47]。此外,酸性条件下腐蚀产物更易溶解或迁移,削弱保护层稳定性。其次,有机质分解产生的有机酸通过缓冲反应降低局部 pH,并与金属离子形成络合物,阻碍钝化膜自愈,导致腐蚀持续并加剧^[48]。

含水率、电阻率与腐蚀性离子浓度等理化指标同样是影响红壤中地下设施腐蚀速率与形态的关键因素。首先,含水率是调控腐蚀反应速率的重要参数。红壤区降水充沛,地下土壤长期高湿,易形成连续电解质膜,为电子流动与离子迁移提供高效通道,显著增强腐蚀电池闭合条件。研究表明,X52 管线钢在高湿状态下腐蚀速率显著提高($P < 0.05$),且更有利于微生物繁殖与生物膜快速形成,进一步叠加微生物腐蚀作用^[49]。

其次,土壤电阻率越低,导电性越强,越利于电化学反应回路的形成。红壤黏粒丰富、铁铝含量高、离子迁移率大,通常表现为低电阻率。在此条件下,腐蚀电流更强、分布更广,尤其在杂散电流或电位梯度存在时,更易形成远程腐蚀回路,加剧设施底部或缺陷区的腐蚀^[50]。此外,腐蚀性阴离子(如 Cl⁻、SO₄²⁻)广泛存在于酸性红壤中,其来源于大气沉降、施肥及母岩风化等过程。这些阴离子具强络合与膜破坏能力,不仅可与金属阳离子生成易溶盐类,诱发点蚀与缝隙腐蚀,SO₄²⁻还可作为 SRB 的电子受体,协同驱动微生物腐蚀,形成离子-微生物-电化学耦合模式^[51]。

4 红壤地下设施的防腐措施

4.1 地下设施材料选择与设计

在红壤环境中,地下设施材料选择与结构设计必须充分应对其高腐蚀性特征及服役耐用性需求。红壤普遍 pH 低,富含游离铁铝氧化物,携带有机酸及腐蚀离子,并伴随较高电导率和嗜酸性微生物活性,极易诱发或加剧电化学与微生物腐蚀^[41],需采取针对性防护策略。材料体系方面,应优先选用高耐蚀合金、复合防护结构与功能涂层,并根据设施类型定制方案。对于金属管道(如油气管网),X80 管线钢因优良力学性能和焊接适应性被广泛应用,但在酸性红壤中仍可能遭受晶间腐蚀与点蚀风险,推荐配套环氧煤沥青、熔结环氧粉末等多层涂层体系,以提升介质屏蔽与电化学绝缘性能,实现长期服役^[10]。对钢筋混凝土构件,可采用低水胶比并掺抗酸腐蚀型矿物掺合料(如偏高岭土、矿渣粉),增强致密性与抗渗性,显著提升耐蚀性能。结合阴极保护或牺牲阳极系统,还可进一步降低电化学腐蚀速率^[52]。此外,设计阶段应考虑排水通风、防潮导电隔离及可维护空间预留,构建“材料-结构-环境”协同体系,保障酸性红壤区地下设施的耐久性与运行安全。

4.2 阴极保护技术

牺牲阳极法与外加电流阴极保护是目前应用最广的两种电化学防护技术,在延缓地下设施腐蚀、保障寿命方面作用显著。牺牲阳极法通过将电位更负的金属(如锌、铝、镁)与结构相连,使其优先氧化溶解,从而实现阴极极化与保护。在潮湿、导电性高的红壤环境中,该技术具有结构简单、无需外接电源、维护成本低等优势,适用于无电区域或中小型设施^[16]。但因红壤电解质活性高、微环境波动大,阳极易钝化或过早失效,限制了其长期稳定性与经济性。相比之下,外加电流保护通过恒电位仪施加直流电流,精确调控设施电极极化状态,维持保护电位在有效区间,实现更稳定、可调与可监控的防护效果。该技术尤其适合长距离油气管道、水务管廊、电力隧道等关键地下基础设施,在复杂环境中展现出优越的适应性与防护效率^[53]。为提升其在酸性红壤下的适配性与长期性,设计阶段应综合考虑红壤 pH、电阻率、含水率、腐蚀性离子分布及关键微生物活性等参数,同时结合腐蚀风险等级与结构特征,优化阳极材料、电流密度与布设策略,实现经济性与耐久性的协同优化。

4.3 微生物抑制技术

为防控微生物腐蚀,目前常用措施包括灭菌处

理、阴极保护和功能性涂层屏蔽等。其中,添加抗生素、杀菌剂或化学抑制剂是应用最广、经济高效且简便的技术方案。Jia^[54]比较了四羟甲基磷酸杀菌剂(THPS)与氨基酸混合物(D-mix)对碳钢 SRB 生物膜的控制效果。结果表明,单独施用 100 mg/kg THPS 时,附着细胞数量明显减少,腐蚀电流密度和质量损失率分别下降 45.0% 和 36.4%;而 100 mg/kg THPS 和 100 mg/kg D-mix 联合时,腐蚀电流密度和质量损失率分别降低 68.4% 和 63.6%,表现出更优协同抑制效果。此外,Rasheed 等^[55]开发氧化锌/壳聚糖纳米复合材料作为绿色抑制剂,当其均匀吸附于碳钢表面时,对 SRB 生物膜的最大抑制效率可达 74%。

除施用杀菌剂或抑制剂外,通过调控土壤湿度与温度等环境因子,也可有效限制腐蚀性微生物繁殖与活性。Liu 和 Cheng^[49]在模拟试验中设置 3 种土壤含水率(20%、60%、100%),将 X52 管线钢埋入含 SRB 土壤中进行腐蚀试验。培养 21 d 后结果表明,100% 含水率条件下 SRB 数量分别是 20% 和 60% 含水率条件下的 224.9 倍和 3.6 倍,对应腐蚀电流密度显著增加(分别增加 87.3% 和 95.1%),腐蚀速率也分别增加 40.6% 和 79.6%。此外,Sun 等^[56]研究表明,温度对 SRB 生长状态影响显著。当土壤温度由 28 °C 升至 45 °C 时,SRB 数量、代谢产物 H₂S 浓度及 L360 N 低碳钢腐蚀速率分别降低 97.6%、90.0% 和 87.8%,表明高温可破坏 SRB 酶活性和代谢路径,抑制其腐蚀能力。

4.4 土壤改良技术

在酸性红壤中,通过改良其理化性质,尤其是调节 pH、改善结构与保水能力,可有效降低地下设施的电化学与微生物腐蚀风险。首先,施用石灰、石膏等碱性调理剂可中和游离 H⁺,将酸度调至弱酸或中性范围,降低电导率与 H⁺ 活性,显著抑制电化学腐蚀。据报道,在 pH 约 4.5 的酸性红壤中施用石灰-石膏组合后,土壤 pH 稳定在 6.2~6.5,碳钢腐蚀速率较对照下降超 35%。电化学阻抗谱也显示电荷转移电阻升高、电流密度下降,反映腐蚀反应被抑制^[57]。其次,通过改良红壤结构和保水性能,可减缓氧气与水分迁移,削弱氧浓差电池和水膜通路作用,从而抑制点蚀与缝隙腐蚀。Ismail 和 El-Shamy^[58]将有机质、火山灰、膨润土等保水材料掺入压实土壤,显著降低渗透系数与氧扩散速率,使碳钢点蚀密度和腐蚀速率明显下降;同时压实还改变土壤孔隙与微生物群落,减弱 SRB 等的生存优势,降低其定殖和生物膜形成能力。

5 红壤地下设施腐蚀防护研究未来发展趋势

在可持续发展与绿色韧性建设背景下,红壤地下设施的腐蚀防护研究呈现多学科融合与智能化演进趋势。一方面,随着对红壤复杂腐蚀环境特征(强酸性、富铁铝氧化物、高微生物活性与离子迁移)的深入认知,研究正由传统“材料-腐蚀响应”思路转向“材料-微环境-腐蚀机制”多因子耦合机理建模。当前聚焦于服役环境下多因子交互机制解析,并借助电化学、微生物生态学、土壤物理等交叉方法构建预测模型与寿命评价体系,以提升设施运行的可预见性与决策科学性^[10]。另一方面,防护技术正趋于集成化与系统化。在工程应用中,通过材料选型、表面涂层、电化学阴极保护等多技术协同,构建多层次、全寿命周期的腐蚀控制体系,成为提升设施耐腐蚀性的关键路径。同时,腐蚀问题的根本解决仍依赖材料科学创新、新型功能化防护材料研发与应用加速推进。例如,纳米填料环氧涂层具备更高屏蔽与黏附性,功能梯度牺牲阳极更适应红壤复杂电化学场强分布,微生物抑制型复合材料在控制微生物腐蚀方面展现优越性能^[59]。

与此同时,基于大数据与机器学习的“智能阴极保护系统”逐步应用于长距离油气管线与城市地下管网,推动腐蚀防护向智能化、可视化与自适应控制发展。该系统集成多源传感器、无线通信网络与腐蚀电位监测等技术,可实现设施腐蚀状态的实时监测、趋势预测与极化电流智能调节。通过部署分布式节点监测土壤 pH、电阻率、电极电位及阳极消耗速率等关键参数,系统能在腐蚀初期快速预警并动态调整保护电流密度,显著提升响应效率与稳定性^[2]。在此基础上,绿色低碳理念的引入也正重塑防护材料与体系开发导向。当前研究越加关注全生命周期性能与环境影响,强调采用低毒性、可降解与环保型防腐涂层及腐蚀抑制剂。综上,红壤区地下设施防护正向“智能监测-自适应控制-绿色材料-系统集成”持续演进,有望构建更高水平的安全性、可持续性与韧性腐蚀防护体系^[60]。

6 结论

红壤区地下设施腐蚀问题具有显著的区域性特征与工程敏感性。腐蚀加剧不仅威胁设施安全,还带来高经济损失和环境风险。因此,红壤地区地下设施规划设计与施工时,需系统考虑土壤腐蚀环境影响,采取“多维协同、多重防护”策略。具体而

言,从源头优化耐腐蚀材料选型,结合阴极保护、防腐涂层与土壤环境改良,构建结构-环境-材料联动的防护体系,提升设施耐久性。展望未来,随着材料科学、传感技术与人工智能的融合,腐蚀防护技术将进一步向系统化、绿色化、智能化发展。在酸性红壤这类高腐蚀风险区域,基于环境感知与状态调控的智能腐蚀防控平台将实现设施全过程腐蚀监测、风险预警与动态防护,显著降低地下设施腐蚀风险,延长设施使用寿命,保障区域基础设施的长期安全与可持续运行。

参考文献:

- [1] Koch G, Varney J, Thompson N, et al., International measures of prevention, application, and economics of corrosion technologies study[J]. NACE International (AMPP), 2016.
- [2] Hou B R, Li X G, Ma X M, et al. The cost of corrosion in China[J]. NPJ Materials Degradation, 2017, 1: 4.
- [3] Gill S, Rogers W F. Relation of long line currents to soil corrosion[J]. Physics, 1931, 1(3): 194-204.
- [4] Wolzogen Kuhr C v, van der Vlugt I. The graphitization of cast iron as an electrochemical process in anaerobic solid[J]. Water, 1934, 18: 147-165.
- [5] Rogers W F. Relation of soil properties to corrosion of buried steel[J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1938, 30(10): 1181-1188.
- [6] Refait P, Génin J M R. The mechanisms of oxidation of ferrous hydroxychloride $\beta\text{-Fe}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ in aqueous solution: The formation of akaganeite vs goethite[J]. Corrosion Science, 1997, 39(3): 539-553.
- [7] Refait P, Abdelmoula M, Génin J M R. Mechanisms of formation and structure of green rust one in aqueous corrosion of iron in the presence of chloride ions[J]. Corrosion Science, 1998, 40(9): 1547-1560.
- [8] 文慧颖, 吴华勇, 董岳, 等. 不同土地利用方式下南亚热带赤红壤酸化特征[J]. 土壤, 2023, 55(2): 372-378.
- [9] Cole I S, Marney D. The science of pipe corrosion: A review of the literature on the corrosion of ferrous metals in soils[J]. Corrosion Science, 2012, 56: 5-16.
- [10] Duan T, Wu Z X, Wang D, et al. Effect of *B. subtilis* in simulated acid red soil on the corrosion behavior of X80 pipeline steel[J]. Bioelectrochemistry, 2024, 157: 108640.
- [11] 赵其国. 红壤物质循环及其调控[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [12] Jiang J, Zhang F, Xie E Z, et al. *In-situ* and laboratory determined Ultisol-derived paddy soil pH varied with flooding condition in subtropical China[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 252: 106608.
- [13] Jiang J, Xu R K, Zhao A Z. Surface chemical properties and pedogenesis of tropical soils derived from basalts with different ages in Hainan, China[J]. Catena, 2011, 87(3): 334-340.

- [14] 张雪晴, 张凤, 冯天华, 等. 三种 pH 电极长期原位监测土壤酸碱度的稳定性[J/OL]. 土壤学报, 2025: 1–10. (2025-06-24). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspxdbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=TRXB20250619002>.
- [15] 李科伟, 徐仁扣. 碳循环在土壤酸化与调控中的作用[J]. 土壤, 2025, 57(3): 485–497.
- [16] Shen J D, Li D S, Xu B M, et al. Study on the corrosion characteristics of grounding materials in acid red soil[J]. Coatings, 2022, 12(2): 111.
- [17] 姜军, 王辉, 张春晓, 等. 三种黑色金属的土壤腐蚀行为与土壤性质的关系[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 38–43.
- [18] Zhang H Y, Li Q Y, Zhang X, et al. Insight into the mechanism of low molecular weight organic acids-mediated release of phosphorus and potassium from biochars[J]. Science of the Total Environment, 2020, 742: 140416.
- [19] Benkhedda F, Bensaid I, Benmoussat A, et al. Corrosion of API 5L X60 pipeline steel in soil and surface defects detection by ultrasonic analysis[J]. Metals, 2024, 14(4): 388.
- [20] Ghosh R, Chinara M, Godbole K, et al. Electrochemical behavior of X70 and X80 pipeline steels in a simulated soil environment with and without the presence of chlorides[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33(17): 8884–8903.
- [21] Mohtadi-Bonab M A. Effects of different parameters on initiation and propagation of stress corrosion cracks in pipeline steels: A review[J]. Metals, 2019, 9(5): 590.
- [22] Wu Y H, Liu T M, Luo S X, et al. Corrosion characteristics of Q235 steel in simulated Yingtan soil solutions[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2010, 41(3): 142–146.
- [23] Wasim M, Shoaib S, Mubarak N M, et al. Factors influencing corrosion of metal pipes in soils[J]. Environmental Chemistry Letters, 2018, 16(3): 861–879.
- [24] Iqbal A, Medawela S, Indraratna B. Impacts of acidic soil on infrastructure development[M]//Proceedings of the 5th International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG) 2024, Volume 5. Singapore: Springer Nature Singapore, 2024: 321–331.
- [25] Yan M C, Sun C, Xu J, et al. Role of Fe oxides in corrosion of pipeline steel in a red clay soil[J]. Corrosion Science, 2014, 80: 309–317.
- [26] Smart N R. The anaerobic corrosion of carbon steel and the potential influence of sulphur species[M]. Florida: CRC Press, 2020.
- [27] Liu N, Qiu L N, Qiu L J. Carbon steel corrosion induced by sulfate-reducing bacteria: A review of electrochemical mechanisms and pathways in biofilms[J]. Coatings, 2024, 14(9): 1105.
- [28] Groysman A. Corrosion for everybody[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2009.
- [29] Kamachi Mudali U, Jayaraj J, Raman R S, et al. Corrosion: An overview of types, mechanism, and requisites of evaluation[M]. New Jersey: Wiley, 2019.
- [30] 黄焯, 刘双江, 姜成英. 微生物腐蚀及腐蚀机理研究进展[J]. 微生物学通报, 2017, 44(7): 1699–1713.
- [31] Lovley D R, Holmes D E. Electromicrobiology: The ecophysiology of phylogenetically diverse electroactive microorganisms[J]. Nature Reviews Microbiology, 2022, 20(1): 5–19.
- [32] 生弘杰, 王芳, 冯发运, 等. 基于群体感应的生物膜技术在土壤污染修复中的应用与展望[J]. 土壤学报, 2024, 61(3): 583–593.
- [33] Liu P, Zhang H T, Fan Y Q, et al. Microbially influenced corrosion of steel in marine environments: A review from mechanisms to prevention[J]. Microorganisms, 2023, 11(9): 2299.
- [34] Anandkumar B, George R P, Maruthamuthu S, et al. Corrosion characteristics of sulfate-reducing bacteria (SRB) and the role of molecular biology in SRB studies: An overview[J]. Corrosion Reviews, 2016, 34(1/2): 41–63.
- [35] Liu X Z, Wang Y H, Song Y W, et al. The respective roles of sulfate-reducing bacteria (SRB) and iron-oxidizing bacteria (IOB) in the mixed microbial corrosion process of carbon steel pipelines[J]. Corrosion Science, 2024, 240: 112479.
- [36] Wu M, Wang T, Wang S. Corrosion and sulfur-related bacteria[M]. London: IWA Publishing, 2020.
- [37] Xu D K, Li Y C, Song F M, et al. Laboratory investigation of microbiologically influenced corrosion of C1018 carbon steel by nitrate reducing bacterium *Bacillus licheniformis*[J]. Corrosion Science, 2013, 77: 385–390.
- [38] Flemming H C, Wingender J. The biofilm matrix[J]. Nature Reviews Microbiology, 2010, 8(9): 623–633.
- [39] Stanbury E E, Buchanan R A. Fundamentals of Electrochemical Corrosion[M]. Materials Park, OH: ASM International, 2000.
- [40] Telegdi J, Shaban A, Trif L. Review on the microbiologically influenced corrosion and the function of biofilms[J]. International Journal of Corrosion and Scale Inhibition, 2020, 9(1): 1–33.
- [41] Jia R, Unsal T, Xu D K, et al. Microbiologically influenced corrosion and current mitigation strategies: A state of the art review[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2019, 137: 42–58.
- [42] Revie R W, Uhlig H H. Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering[M]. New York: Wiley, 2008.
- [43] Machuca Suarez L, Lepkova K, Suarez E. The role of bacteria in under-deposit corrosion in oil and gas facilities: A review of mechanisms, test methods and corrosion inhibition[J]. Corrosion & Materials, 2019, 44(1): 80–87.
- [44] Harsimran S, Santosh K, Rakesh K. Overview of corrosion and its control: A critical review[J]. Proceedings on Engineering Sciences, 2021, 3(1): 13–24.
- [45] Enning D, Garrelfs J. Corrosion of iron by sulfate-reducing bacteria: New views of an old problem[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2014, 80(4): 1226–1236.

- [46] Usher K M, Kaksonen A H, Cole I, et al. Critical review: Microbially influenced corrosion of buried carbon steel pipes[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014, 93: 84–106.
- [47] Emori W, Okafor P C, Bassey V M. Physicochemical characteristics of soil moisture and their effects on the corrosion behavior of buried mild steel in Calabar metropolis, Nigeria[J]. *Journal of Environmental Protection*, 2018, 9(7): 801–814.
- [48] Lou Y T, He S Y, Chang W W, et al. Accelerated degradation of stainless-steel passive film by humic acid-mediated extracellular electron transfer[J]. *Corrosion Science*, 2025, 245: 112696.
- [49] Liu H W, Cheng Y F. Mechanism of microbiologically influenced corrosion of X52 pipeline steel in a wet soil containing sulfate-reduced bacteria[J]. *Electrochimica Acta*, 2017, 253: 368–378.
- [50] Fan X L, Chen Y X, Zhang J X, et al. Galvanic corrosion behavior of copper-drawn steel for grounding grids in the acidic red soil simulated solution[J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2020, 33(11): 1571–1582.
- [51] Chen X, Wang G F, Gao F J, et al. Effects of sulphate-reducing bacteria on crevice corrosion in X70 pipeline steel under disbonded coatings[J]. *Corrosion Science*, 2015, 101: 1–11.
- [52] Rasheed P A, Nayar S K, Barsoum I, et al. Degradation of concrete structures in nuclear power plants: A review of the major causes and possible preventive measures[J]. *Energies*, 2022, 15(21): 8011.
- [53] Meng X B, Zhang B, Cao F Y, et al. Effectiveness of measures on natural gas pipelines for mitigating the influence of DC ground current[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2024, 39(4): 2414–2423.
- [54] Jia R. Mechanisms of microbiologically influenced corrosion caused by corrosive biofilms and its mitigation using enhanced biocide treatment [D]. Athens: Ohio University, 2018.
- [55] Rasheed P A, Jabbar K A, Rasool K, et al. Controlling the biocorrosion of sulfate-reducing bacteria (SRB) on carbon steel using ZnO/chitosan nanocomposite as an eco-friendly biocide[J]. *Corrosion Science*, 2019, 148: 397–406.
- [56] Sun H Y, Zhong L G, Zhu Y, et al. Assessing sulfate-reducing bacteria influence on oilfield safety: Hydrogen sulfide emission and pipeline corrosion failure[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 164: 108646.
- [57] du Plessis M. The effect of gypsum form and source on soil amelioration[D]. Stellenbosch: Stellenbosch University, 2024.
- [58] Ismail A I M, El-Shamy A M. Engineering behaviour of soil materials on the corrosion of mild steel[J]. *Applied Clay Science*, 2009, 42(3/4): 356–362.
- [59] Muresan L M. Nanocomposite coatings for anti-corrosion properties of metallic substrates[J]. *Materials*, 2023, 16(14): 5092.
- [60] Kumari P, Lavanya M. Optimization strategies for corrosion management in industries with artificial neural network and response surface technology: A comprehensive review[J]. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 2024, 10(3): 59.