

土壤环境中管线钢硫酸盐还原菌腐蚀

许进¹, 白云龙^{1,2}, 徐大可³, 杜翠薇⁴, 孙成¹

(1.中国科学院金属研究所 材料环境腐蚀研究中心, 沈阳 110016; 2.沈阳工业大学
石油化工学院, 沈阳 111003; 3.东北大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110819;
4.北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 腐蚀是世界各国共同面临的问题之一, 每年因腐蚀造成的经济损失占全国 GDP 的 3%~5%, 其中土壤腐蚀约占总腐蚀的 20%。金属的土壤腐蚀是一种自发的冶金逆过程, 它不仅会导致埋地金属构筑物腐蚀破坏, 还会引发管线泄漏、燃烧和爆炸等事故, 给社会带来巨大的经济损失和社会危害。微生物腐蚀是埋地管线钢腐蚀的重要腐蚀类型之一, 其中以硫酸盐还原菌引起的腐蚀最为严重。从环境因素、材料因素和微生物因素三个方面, 对土壤环境中管线钢硫酸盐还原菌腐蚀进行了简要概述。埋地管线钢微生物腐蚀研究最多的是环境因素的影响, 包括土壤类型、土壤含水量、土壤阴离子、化肥、农药、土壤宏电池和剥离涂层。材料因素的研究多集中在阴极保护、外加应力和杂散电流等因素的影响。相比前两种影响因素, 微生物因素最为复杂, 也是研究最少的一个方面。微生物因素的研究是一个全新的研究领域, 包括膜内生物酶的影响以及膜内电子传递等。今后一段时间, 埋地管线钢微生物腐蚀仍以环境和材料因素等多因素的耦合作用为主要研究方向。

关键词: 土壤腐蚀; 硫酸盐还原菌腐蚀; 埋地管线钢; 环境因素; 材料因素; 微生物因素

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)07-0263-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.07.029

Sulfate Reducing Bacteria Influenced Corrosion of Pipeline Steel in Soil

XU Jin¹, BAI Yun-long^{1,2}, XU Da-ke³, DU Cui-wei⁴, SUN Cheng¹

(1.Center of Environmental Corrosion of Materials, Research Institute of Metal, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2.School of Petrochemical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 111003, China;
3.School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
4.School of Materials Science and Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: Corrosion is one of problems faced by all countries in the world. Every year economic loss influenced by the corrosion accounts for 3%~5% of national GDP of which about 20% is caused by soil corrosion. The soil corrosion of the metal is a spontaneous reverse metallurgic process which results in the corrosion and damage of the metal structures in the soil, and even leads to leakage, burning and explosion of buried pipelines, thus bringing huge economic losses and social risks. Microbiological influenced corrosion (MIC) is one of the most important corrosion types for the corrosion of buried pipeline steel, and

收稿日期: 2019-03-21; 修订日期: 2019-05-15

Received: 2019-03-21; Revised: 2019-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51771213, 51871228, 51471176)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51771213, 51871228, 51471176)

作者简介: 许进 (1978—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为土壤微生物腐蚀。

Biography: XU Jin (1978—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: soil and microbiological influenced corrosion.

通讯作者: 孙成 (1965—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为土壤腐蚀。邮箱: xujin@imr.ac.cn

Corresponding author: SUN Cheng (1965—), Male, Doctor, Professor, Research focus: soil corrosion. E-mail: xujin@imr.ac.cn

sulfate reducing bacteria (SRB) influenced corrosion is the most severe among MIC corrosion. The work discussed the SRB influenced corrosion of the buried pipeline steel from following three aspects: environmental factor, material factor, and microbiological factor. The environmental factors studied mostly included soil type, water content of soil, anionic ions of soil, fertilizer, pesticide, soil macrocell, and disbonded coating. The investigations of material factors mainly focused on the effects of cathodic protection, stress, and stray current. Comparing with first two factors, the microbiological factors was the most complicated, and seldom discussed. In the future, the SRB influenced corrosion of buried pipeline steel will still concentrate on the coupling effects of multiple factors, such as environmental factors and material factors. The microbiological factor is a new studying field, including the effect of enzyme on the corrosion of the buried pipeline steel and the transfer of electrons in biofilms.

KEY WORDS: soil corrosion; SRB influenced corrosion; buried pipeline steel; environmental factor; material factor; microbiological factor

腐蚀是金属（材料）与周围环境发生化学或电化学反应，遭受破坏而引起性能劣化的现象。它是一种自发的冶金逆过程，给人类社会带来巨大的经济损失和社会危害，是世界各国共同面临的问题之一。据统计，各国每年因腐蚀产生的经济损失占全国 GDP 的 3%~5%，远远大于自然灾害及各类事故的损失。金属土壤腐蚀是金属腐蚀的重要方面之一，它不但导致金属腐蚀破坏，还会引发管线泄漏、燃烧和爆炸等事故^[1]。土壤环境中的材料腐蚀问题不仅是腐蚀科学研究领域中的一个重要课题，也是地下工程应用亟需解决的一个实际问题。

土壤腐蚀通常是指埋藏于土壤环境中金属构筑物发生的腐蚀，而土壤使材料发生腐蚀的性能称为土壤腐蚀性。美国是开展土壤腐蚀研究最早的国家。早在 20 世纪初，美国国会就意识到了埋地金属腐蚀问题的严重性，并委托美国国家标准局于 1910 年组织并开展大规模的全美土壤腐蚀试验站网的工作。1957 年，美国国家标准局的 Romanoff 编写并出版了《地下腐蚀》一书^[2]。我国对于金属土壤腐蚀研究始于 20 世纪 50 年代末，由国家科学技术委员会组织，并建立了“全国大气、海水、土壤腐蚀试验站网”，开始了我国材料土壤环境腐蚀试验工作。近几十年来，各国研究人员对金属的土壤腐蚀进行了大量的研究工作^[3-13]。早期研究主要集中于土壤理化性质因素（如温度^[14]、湿度^[15]、pH 值^[16]和阴离子^[17]）对金属腐蚀的影响。然而，土壤微生物的影响并未得到足够的重视。早在 1963 年就有报道指出微生物增大了弱腐蚀性土壤中管线钢的腐蚀速率^[18]。但当时微生物腐蚀的重要性并未得到广泛的关注。现今，普遍认为微生物腐蚀是引起埋地管线外腐蚀的主要原因之一^[19-20]，同时一些传统的管线保护措施还可能对微生物腐蚀起到加速促进作用^[21]。美国腐蚀工程师协会（NACE）在 2002 年的报告中指出：美国每年的腐蚀损失为 2760 亿美元，其中由微生物腐蚀引起的损失达到 20% 以上。澳大利亚每年由于微生物腐蚀引起的经济损失高达 60 亿美元^[22]。中国科学院海洋研究所侯保荣院士在“我国腐蚀状况及控制战略研究”中指出，2014

年我国腐蚀总成本超过 2.1 万亿元人民币，约占当年 GDP 的 3.34%。据统计，在各类腐蚀破坏中，由微生物引起的腐蚀损失约占 20%，油井中 75% 以上的腐蚀以及地下管线和线缆中 50% 的腐蚀来自于微生物腐蚀（主要是硫酸盐还原菌引起的）^[23]。近年来微生物腐蚀研究表明，几乎所有常用材料都会产生由微生物引起的腐蚀。因此，有必要提高人们对埋地金属微生物腐蚀的认知，尽可能地降低由其引起的危害和经济损失，以及由微生物腐蚀引起的基础设施的失效和破坏。

本文主要是针对土壤环境中管线钢硫酸盐还原菌（SRB）腐蚀的研究进行综述，以加强人们对土壤环境中管线钢硫酸盐还原菌腐蚀危害的认识，提高防护意识。众所周知，微生物腐蚀发生需要三个基本条件——介质（土壤环境）、材料（埋地金属）和微生物，下面将分别从这三个方面对埋地管线钢 SRB 腐蚀进行简要概述。

1 土壤环境因素

1.1 土壤类型

土壤是一种固、液和气三相共存的介质，其类型多种多样，不同类型土壤对埋地金属微生物腐蚀的影响各异。国内外学者针对不同土壤中管线钢微生物腐蚀进行了大量的研究。一些学者认为，SRB 的引入对埋地管线钢腐蚀起加速作用。贾思洋等^[24]发现污染土壤中碳钢的腐蚀速率远大于经灭菌处理后土壤中碳钢的腐蚀速率，试验分析显示，污染土壤中含有大量的 SRB，而 SRB 的存在大大促进了污染土壤中碳钢的腐蚀。梅鹏和祝焱贤等^[25-26]研究了红壤中 X100 钢微生物腐蚀规律，结果表明，SRB 的引入导致 X100 钢腐蚀电位发生负移，增强了管线钢的腐蚀敏感性，同时也加速了管线钢的腐蚀。他们还指出，在酸性土壤中铺设管线时，必须要考虑 SRB 对其腐蚀行为的影响。刘宏伟和程玉峰^[27]针对加拿大里贾纳地区粘土中 X52 管线钢 SRB 腐蚀进行了研究，发现 SRB 大大加速了埋地管线钢的腐蚀，腐蚀速率增大近 6 倍。另

一些学者则发现, 在一些情况下, SRB 的引入改变了管线钢表面产物膜的结构, 使得产物膜致密性增大, 进而抑制了管线钢的腐蚀。伍远辉等^[28]研究了黄壤中 Q235 钢的 SRB 腐蚀行为, 研究表明, 接菌土壤中 Q235 钢腐蚀速率随时间呈先减小后增加的趋势。前期腐蚀速率的降低主要是由于碳钢表面形成了一层致密的产物膜, 而后期腐蚀速率的增大则是由于产物膜破裂以及 SRB 的阴极去极化作用所引起的。吴堂清等^[29]发现接菌酸性土壤中 X80 钢的开路电位负于灭菌土壤中钢的开路电位, 试验前期活性微生物膜对管线钢腐蚀起抑制作用, 后期微生物代谢产物的增多则促进了管线钢的腐蚀。同时指出, SRB 的代谢产物(硫化物和磷化物)在腐蚀产物中的沉积, 改变了腐蚀产物层的组成和结构。他们还推断, SRB 和金属间的直接电子转移可能是促进局部腐蚀发生的主要原因。孙福洋等^[30]研究了库尔勒土壤中 X100 钢微生物腐蚀规律, 他们认为 SRB 的存在改变了钢表面微环境, 从而导致了有菌和无菌土壤环境中钢表面产物膜的差异性。钢表面形成的微生物膜和产物膜结合而成的复合膜层对腐蚀起一定的抑制作用。胥聪敏等^[31-32]对近中性土壤和滨海盐碱土中 X100 管线钢的 SRB 腐蚀规律进行了研究, 结果表明, SRB 的新陈代谢影响了 X100 钢的腐蚀行为。试验前期, 钢表面形成了一层微生物膜和腐蚀产物相结合的复合膜层, 该膜层对腐蚀性介质的传质过程起到一定的阻碍作用, 进而减缓了钢的腐蚀。但随着 SRB 活性的减弱, 产物膜的这种阻碍作用随之减弱, 最终导致钢的腐蚀速率增大。

上述研究主要针对具体类型土壤中管线钢的 SRB 腐蚀。但是, 由于土壤组成的复杂性, 很难通过某一特定土壤的研究找出相应的腐蚀规律。因此, 一些学者针对土壤理化性质(如含水量、阴离子、农药、化肥及宏电池效应等)的变化进行了更有针对性的研究。

1.2 含水量

含水量是影响埋地金属腐蚀的主要因素之一, 它是构成腐蚀电池的先决条件, 同时也影响着土壤的其他理化性质。随着土壤含水量的改变, 土壤中 SRB 等微生物的新陈代谢也会相应受到影响, 进而改变埋地管线钢微生物腐蚀。研究表明, 管线钢微生物腐蚀与土壤电阻率之间并未存在明显相关性, 但是土壤含水量对微生物腐蚀具有较大影响^[33]。何斌等^[34]研究了土壤含水量对埋地碳钢微生物腐蚀的影响。结果表明, SRB 加速了埋地碳钢的腐蚀, 当土壤含水量达到 15% 时, 碳钢的腐蚀速率和最大点蚀深度达到极大值。刘宏伟和程玉峰^[27]认为土壤含水率的增大有利于 SRB 的生长, 同时使得微生物膜厚度增加, 进而加速了管线钢的微生物腐蚀。同时还指出, 含水量的不同将导致管线钢表面腐蚀产物层结构的差异性。高含水量时, 管线钢表面腐蚀产物层为单层结构, 而低含水

量时则为双层结构。王欣等^[35]对土壤水分蒸发过程中 Q235 钢 SRB 腐蚀行为进行了研究, 他们发现随着水分的蒸发, 土壤中氧气含量逐渐增大, 高的氧含量虽然抑制了 SRB 生长, 但是在 SRB 和氧气的交叉作用下, Q235 钢的腐蚀速率仍明显高于灭菌土壤中钢的腐蚀速率。

1.3 阴离子

土壤中含有大量可溶性离子, 一些阴离子(如氯离子、硫酸根离子和碳酸根离子)对金属腐蚀会产生严重影响, 其中氯离子影响最为严重, 同时也是研究最多的阴离子。研究发现氯离子和 SRB 都会引起埋地金属的局部腐蚀, 并且在一定条件下对金属腐蚀具有协同作用^[36-37]。周书峰等^[38]研究了土壤环境中氯离子对 Q235 钢 SRB 腐蚀的影响, 他们发现当氯离子含量高于 1% 时, 接菌和灭菌土壤中 Q235 钢的腐蚀速率相差不大; 当氯离子含量小于 1% 时, 接菌土壤中 Q235 钢的腐蚀速率明显高于灭菌土壤中钢的腐蚀速率。接菌土壤中 Q235 钢的点蚀速率大于灭菌土壤中的点蚀速率。王丹等^[39]也指出氯离子和 SRB 对 X80 钢表面点蚀坑的形成具有协同促进作用。

土壤中除了氯离子外, 硫酸根离子和碳酸根离子也会对埋地金属腐蚀产生影响。硫酸根离子是 SRB 新陈代谢过程中所需的重要物质之一。在 SRB 的作用下, 硫酸根离子被还原产生大量的硫化物, 这些硫化物吸附在金属表面成为阴极, 在金属表面形成腐蚀微电池, 进而加速了金属的局部腐蚀。碳酸根离子使得管线钢表面形成一层致密并具有保护性的产物膜, 降低了管线钢的腐蚀速率, 而 SRB 的引入破坏了这层膜的保护性, 从而加速了碳钢的腐蚀^[40-41]。

1.4 化肥和农药

我国是农业大国, 为了提高农作物的产量以及降低病虫害的危害, 就会对农作物施加化肥和农药, 而作为农作物的载体, 土壤也不可避免地会吸收部分化肥和农药, 这些农药和化肥的残留也会对埋地金属微生物腐蚀产生影响。研究表明, 硝酸根离子和铵根离子的引入会增大土壤环境微生物的活性, 进而增强埋地金属的腐蚀^[42-43]。孙成和李喜明等^[44-45]研究了尿素对土壤中碳钢微生物腐蚀的影响, 结果表明, 尿素对土壤中 SRB 活性的增强作用是导致土壤中碳钢腐蚀速率发生变化的主要因素。尿素对接菌土壤中碳钢的腐蚀起加速作用, 而对灭菌土壤中碳钢的腐蚀起抑制作用。随着尿素浓度的升高, 碳钢腐蚀速率逐渐增大, 点蚀坑半径和深度也随之增大。赵琳琳等^[46]对土壤中杀虫剂对 Q235 钢微生物腐蚀的影响进行了研究, 她们发现随着杀虫剂浓度的增大, SRB 数量逐渐减少, Q235 钢腐蚀速率逐渐减低, 当杀虫剂含量为 5 mg/kg 时, Q235 钢的腐蚀速率达到极小值。

1.5 土壤宏电池

土壤是一种具有腐蚀性的电解质,土壤中金属的腐蚀过程主要是电化学过程。不同类型土壤中,金属腐蚀具有明显的差异性。当某一长输管线同时经过不同类型土壤介质时,就会构成土壤宏电池,从而加速阳极区埋地管线的腐蚀。国内外学者对于土壤宏电池腐蚀进行了大量的研究^[47-49],但是对于微生物作用下金属宏电池腐蚀研究相对较少。伍远辉等^[50]研究发现接菌土壤中宏电池电流和电动势大于灭菌土壤中的宏电池电流和电动势,并指出接菌和灭菌土壤中宏电池阳极区钢的腐蚀速率分别是自然埋藏条件下钢腐蚀速率的 4.93 倍和 2.45 倍,SRB 的引入大大加速了阳极区钢的腐蚀。贾思洋等^[51]研究了含 SRB 污染土壤中 Q235 钢的宏电池腐蚀规律,结果表明,接菌污染土壤中阳极区 Q235 钢的腐蚀速率远大于灭菌污染土壤中阳极区钢的腐蚀速率。

1.6 剥离涂层

埋地管线通常采用防腐涂层进行腐蚀控制,但是由于涂层本身缺陷以及外部原因等,导致涂层失去粘结力而发生剥离,土壤中的腐蚀性介质和微生物进入缝隙内,最终导致剥离涂层下缝隙内金属发生腐蚀。对于土壤中剥离涂层下缝隙内管线钢微生物腐蚀的研究相对较少。Abedi 等^[52]对伊朗一条泄漏的输油管线进行了失效分析,结果表明,由于管线上包覆的聚乙烯涂层发生剥离,导致管道基体与土壤环境接触,最终在应力和 SRB 共同作用下发生腐蚀开裂。许进和杨佳星等^[53-57]通过自制模拟剥离涂层试验装置,并在模拟装置中引入三电极体系,从电化学角度系统研究了土壤环境中剥离涂层下缝隙内管线钢 SRB 腐蚀规律。他们发现相同阴极极化电位下,SRB 的引入增大了缝隙内阴极极化电流,同时指出即使缝口处阴极极化电位达到 -1150 mV (CSE),缝隙内仍存在大量 SRB。他们还指出,SRB 代谢产物硫化物的增多,直接导致剥离涂层下缝隙内 Q235 钢的腐蚀速率增大。

2 材料因素

土壤环境中金属材料的腐蚀除了受到土壤介质本身的影响外,还受到金属自身一些性质变化的影响,如阴极极化、应力和杂散电流等。李国华等^[58]研究了阴极保护作用下土壤中 Q235 钢微生物腐蚀规律,他们发现相同阴极极化电位下,接菌土壤中 Q235 钢所需阴极极化电流密度大于灭菌土壤中钢所需的电流密度,接菌土壤中 Q235 钢的腐蚀速率大于灭菌土壤中钢的腐蚀速率。他们还指出,试样周围土壤中 SRB 数量随阴极极化电位的负移而逐渐减少,但是即使阴极极化电位达到 -1050 mV ,Q235 钢附近土壤中仍有大量 SRB 存活。孙成等^[59]认为,相同阴极极化

电位下,SRB 降低了埋地管线钢的阴极保护效率。虽然更负的阴极电位能够抑制 SRB 的生长,但是在试样周围土壤中仍存活大量的 SRB。他们指出当阴极保护电位为 -1050 mV 时,试样周围 SRB 的数量是未施加阴极保护下 SRB 数量的 1/10。刘涛和程玉峰^[60]则发现在含 SRB 土壤中, -850 mV (CSE) 的阴极保护电位对 X70 管线钢并不能起到有效的保护。虽然降低阴极保护电位(-1000 mV)能够有效抑制管线钢的均匀腐蚀,但是对于钢表面点蚀的抑制作用有限。

吴堂清等^[61-64]系统地研究了土壤环境中应力作用下 X80 管线钢的 SRB 腐蚀规律,他们认为 SRB 和外应力不仅可以单独促进管线钢的腐蚀,而且还能对其产生协同加速作用。外应力使得管线钢表面腐蚀产物变得疏松,孔隙度变大,增强了管线钢局部腐蚀的敏感性。他们认为 SRB 代谢产生的硫离子促进了 H^0 的生成,同时阻碍了 H^0 结合,并加速了氢向管线钢内部扩散。而生物膜下溶液的酸化则促进了 H^+ 的还原,增加了 H^0 含量,提高了管线钢 SCC 的敏感性,改变了管线钢 SCC 过程和断裂模式。他们还发现,SRB 诱发的点蚀对管线钢 SCC 裂纹萌生和扩展起重要促进作用。王丹等^[65-66]也发现 SRB 的存在促进了 X80 管线钢的阳极溶解过程,诱发了钢的点蚀萌生,增大了管线钢 SCC 的机率。他们认为土壤中 SRB 数量越多,X80 钢的点蚀电位越低,应力腐蚀敏感性越大。他们还发现在 SRB 不同生长时期,X80 钢具有不同的腐蚀机制。赵健等^[67]也发现 SRB 对 X70 钢的应力腐蚀起促进作用。

卿永长等^[68]对交流电作用下 Q235 钢微生物腐蚀规律进行了研究,结果表明,交流电对 SRB 的新陈代谢过程产生较大影响。交流电产生的交变电场减弱了微生物膜与基体金属之间的吸附力,促使微生物膜发生脱附。同时指出交流电导致 Q235 钢表面形成疏松多孔的产物膜,进而加速了钢的腐蚀。产物膜致密性的降低和脱落则促进了钢表面点蚀的萌生和扩展。

3 微生物因素

土壤是生命体最重要的栖息环境之一,其中含有大量各种各样的微生物。研究表明^[69-70],1 g 土壤中约含有 10^{10} 个细菌,种类超过 4000 种以上,而人们所知道的仅占其中的一小部分。细菌是微生物腐蚀中研究最多的一种微生物。它们能在埋地管线钢表面形成一层微生物膜,进而对钢的腐蚀产生影响。SRB 是自然界硫循环中主要的微生物之一,也是微生物腐蚀中研究最多、对埋地金属腐蚀影响最大的一种细菌。据报道,厌氧腐蚀中,50%~80%腐蚀由 SRB 引起或参与^[71]。土壤环境中管线钢 SRB 腐蚀研究多集中在土壤环境和材料性质变化方面的影响,而对于 SRB 本身对埋地管线钢腐蚀影响的研究相对较少。孙成等^[72]指出,虽然土壤中游离态的氧对 SRB 具有一定

的抑制作用, 但 SRB 本身通过吸附一些含非游离态氧的物质, 在其周围形成一层保护层, 从而减弱了游离态氧对其侵害作用, 最终吸附于钢表面并形成微生物膜, 对钢的腐蚀产生影响。刘涛和程玉峰^[61]发现, 阴极保护促进了埋地管线钢表面微生物膜的形成和粘附作用, 而微生物膜的形成降低了阴极保护对管线钢腐蚀保护的效率。

4 结论

土壤介质的复杂多样性使得土壤腐蚀一直是腐蚀研究领域里一个冷门学科。但随着基础建设和能源工业的迅速发展, 与土壤环境相关的腐蚀问题越来越严重, 并逐渐受到重视, 特别是土壤环境中 SRB 引起的腐蚀。但是由于土壤介质本身一些性质的限制, 使得土壤微生物腐蚀无法进行更深入的研究。这就需要一些新的研究方法和测试手段以配合土壤微生物腐蚀的深入研究。在今后一段时期, 土壤微生物腐蚀仍主要集中于环境因素和材料因素的研究, 如多因素耦合作用下埋地金属微生物腐蚀规律研究等。

微生物因素的研究将是一个全新的研究领域, 如埋地管线钢 SRB 腐蚀过程中形成的生物膜和腐蚀产物复合膜内微生物酶如何影响腐蚀的萌生和发展, 复合膜内电子如何从零价铁传输到电子受体上等。随着科技的不断进步, 测量仪器和方法的不断改进和提高, 土壤微生物腐蚀研究也必将从简单的腐蚀因素研究逐渐进入微观机理研究的领域。

参考文献:

- [1] 李成保. 金属的土壤腐蚀[J]. 土壤, 1979, 21(3): 110-114.
LI Cheng-bao. Soil corrosion of metals[J]. Soil, 1979, 21(3): 110-114.
- [2] 吴沟. 国外土壤腐蚀试验工作概况[J]. 材料保护, 1983, 23(5): 32-37.
WU Jun. Survey of soil corrosion test in foreign country[J]. Materials protection, 1983, 23(5): 32-37.
- [3] 张淑泉, 银耀德, 高英. 三峡站低碳钢土壤腐蚀行为研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1996, 8(3): 59-62.
ZHANG Shu-quan, YIN Yao-de, GAO Ying. An investigation on soil corrosion behaviour of mild steel in three gorges station[J]. Corrosion science and protection technology, 1996, 8(3): 59-62.
- [4] 孙成, 韩恩厚, 李洪锡, 等. 原位测试研究土壤环境因素对碳钢的腐蚀影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002, 22(4): 16-19.
SUN Cheng, HAN En-hou, LI Hong-xi, et al. In-situ study of corrosion of mild steel affected by soil factors[J]. Journal of Chinese society of corrosion and protection, 2002, 22(4): 16-19.
- [5] 宋义全, 冯佃臣, 张新, 等. 新疆库尔勒土壤模拟溶液中 X70 钢的缝隙腐蚀[J]. 包头钢铁学院学报, 2006, 25(2): 144-152.
SONG Yi-quan, FENG Dian-chen, ZHANG Xin, et al. Crevice corrosion of X70 pipeline steel in Ku'erle soil simulation solution of Xinjiang[J]. Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology, 2006, 25(2): 144-152.
- [6] 刘智勇, 翟国丽, 杜翠薇, 等. X70 钢在鹰潭酸性土壤中的应力腐蚀行为[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2008, 40(2): 76-81.
LIU Zhi-yong, ZHAI Guo-li, DU Cui-wei, et al. SCC of X70 pipeline steel in Yingtan acid soil environment[J]. Journal of Sichuan University(engineering science edition), 2008, 40(2): 76-81.
- [7] 杜翠薇, 刘智勇, 梁平, 等. 不同组织 X70 钢在库尔勒含饱和水土壤中的短期腐蚀行为[J]. 金属热处理, 2008, 33(6): 80-84.
DU Cui-wei, LIU Zhi-yong, LIANG Ping, et al. Short-term corrosion behavior of X70 pipeline steel with different microstructure in Ku'erle soil with saturated water[J]. Heat treatment of metals, 2008, 33(6): 80-84.
- [8] 许进, 王海峰, 王欣, 等. 酸性土壤中模拟硝酸型酸雨作用下 X70 钢的腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2009, 29(5): 376-381.
XU Jin, WANG Hai-feng, WANG Xin, et al. Corrosion behavior of X70 steel in simulated nitric acid rain in acid soil[J]. Journal of Chinese society of corrosion and protection, 2009, 29(5): 376-381.
- [9] 王欣, 许进, 孙成, 等. 模拟硫酸型酸雨作用下的 X70 钢土壤宏电池腐蚀[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(1): 5-9.
WANG Xin, XU Jin, SUN Cheng, et al. Effects of simulated sulfate-acid rain on macrocell corrosion of steel X70 in soils[J]. Corrosion & protection, 2013, 34(1): 5-9.
- [10] 朱敏, 杜翠薇, 黄亮, 等. 含水量对连铸铜包钢在大港土壤中腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2014, 34(1): 65-69.
ZHU Min, DU Cui-wei, HUANG Liang, et al. Influence of water contents on corrosion behavior of continuous casting copper-clad steel in Dagang soil[J]. Journal of Chinese society of corrosion and protection, 2014, 34(1): 65-69.
- [11] 杜翠薇, 王胜荣, 刘智勇, 等. Q235 钢与 X70 钢在新加坡土壤环境中 1 年腐蚀行为研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(3): 231-236.
DU Cui-wei, WANG Sheng-rong, LIU Zhi-yong, et al. Corrosion behavior of Q235 and X70 steel buried in soil at Singapore for one year[J]. Corrosion science and protection technology, 2015, 27(3): 231-236.
- [12] 苑洪钟, 刘智勇, 李晓刚, 等. 外加电位对 X90 钢及其焊缝在近中性土壤模拟溶液中应力腐蚀行为的影响[J]. 金属学报, 2017, 53(7): 797-807.
YUAN Hong-zhong, LIU Zhi-yong, LI Xiao-gang, et al. Influence of applied potential on the stress corrosion be-

- havior of X90 pipeline steel and its weld joint in simulated solution of near neutral soil environment[J]. *Acta metallurgica sinica*, 2017, 53(7): 797-807.
- [13] QIN Fei, JIANG Chang-liang, CUI Xin-hua, et al. Effect of soil moisture content on corrosion behavior of X70 steel[J]. *International journal of electrochemical science*, 2018, 13(2): 1603-1613.
- [14] 曹君飞. 温度湿度对在不同腐蚀阶段碳钢土壤腐蚀行为影响的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
CAO Jun-fei. Effects of temperature and water content on soil corrosion behavior of carbon steel at different exposure time[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [15] 翁永基. 土壤湿度对管道钢腐蚀速度的影响[J]. 腐蚀与防护, 1990, 11(6): 285-288.
WENG Yong-ji. Effect of soil moisture on corrosion rate of pipeline steel[J]. *Corrosion & protection*, 1990, 11(6): 285-288.
- [16] 孙慧珍, 朱荫湄, 许晓峰. 土壤 pH 和 Eh 对金属材料腐蚀的影响[J]. 土壤学报, 1997, 34(1): 107-112.
SUN Hui-zhen, ZHU Yin-mei, XU Xiao-feng. Effect of soil pH and Eh on corrosion of metal materials[J]. *Acta pedologica sinica*, 1997, 34(1): 107-112.
- [17] 银耀德, 张淑泉, 李洪锡, 等. 碳钢的不均匀性和土壤中阴离子对腐蚀的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1995, 7(1): 81-83.
YIN Yao-de, ZHANG Shu-quan, LI Hong-xi, et al. Effect of carbon steel inhomogeneity and anions in soils on corrosion[J]. *Corrosion science and protection technology*, 1995, 7(1): 81-83.
- [18] CHAKER Victor. Effects of soil characteristics on corrosion[M]. Philadelphia: American society for testing and materials, 1989.
- [19] JACK T R, WILMOTT M J, SUTHERBY R L, et al. External corrosion of line pipe e a summary of research activities[J]. *Materials performance*, 1996, 35(3): 18-24.
- [20] LI S Y, KIM Y G, JEON K S, et al. Microbiologically influenced corrosion of carbon steel exposed to anaerobic soil[J]. *Corrosion*, 2001, 57(9): 815-828.
- [21] HUTCHINSON C, FARINHA P A, VALLINI A D. The effectiveness of petrolatum tapes and wraps on corrosion rates in a marine service environment[M]. Australia: The Australasian Corrosion Association, 2004.
- [22] JAVAHERDASHTI R. Microbially influenced corrosion: An engineering insight[M]. London: Springer, 2008.
- [23] 土壤环境中管线钢微生物腐蚀数据[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2017, 34(3): 59.
MIC data of pipeline steel in soils[J]. *Corrosion & protection in petrochemical industry*, 2017, 34(3): 59.
- [24] 贾思洋, 孙成, 张波, 等. 污染土壤中的微生物对碳钢腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2008, 28(2): 95-98.
JIA Si-yang, SUN Cheng, ZHANG Bo, et al. Influence of microbe on corrosion behaviour of carbon steel in contaminated soils[J]. *Journal of Chinese society of corrosion and protection*, 2008, 28(2): 95-98.
- [25] 梅鹏, 刘涛, 吴堂清, 等. 红壤浸出液中 X100 管线钢微生物腐蚀特征[J]. 全面腐蚀控制, 2013, 27(6): 23-26.
MEI Peng, LIU Tao, WU Tang-qing, et al. Characteristics of microbiologically induced corrosion of X100 pipeline steel in red soil extract solution[J]. *Total corrosion control*, 2013, 27(6): 23-26.
- [26] 祝焱贤, 龚喆, 吴堂清, 等. 硫酸盐还原菌对红壤中 X100 管线钢腐蚀行为的影响[J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(9): 64-69.
ZHU Liang-xian, GONG Zhe, WU Tang-qing, et al. Effects of sulfate-reducing bacteria on corrosion behavior of X100 pipeline steel in red soil[J]. *Total corrosion control*, 2015, 29(9): 64-69.
- [27] LIU Hong-wei, 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(11): 368-378.
- [28] 伍远辉, 罗宿星, 勾华, 等. 微生物对 Q235 钢在黄壤土中腐蚀行为的影响[J]. 表面技术, 2011, 40(2): 33-35.
WU Yuan-hui, LUO Su-xing, GOU Hua, et al. Effects of microbe on corrosion behavior of Q235 steel in yellow soils[J]. *Surface technology*, 2011, 40(2): 33-35.
- [29] 吴堂清, 丁万成, 曾德春, 等. 酸性土壤浸出液中 X80 钢微生物腐蚀研究: (I) 电化学分析[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2014, 34(4): 346-352.
WU Tang-qing, DING Wan-cheng, ZENG De-chun, et al. Microbiologically induced corrosion of X80 pipeline steel in an acid soil solution: (I) electrochemical analysis[J]. *Journal of Chinese society of corrosion and protection*, 2014, 34(4): 346-352.
- [30] 孙福洋, 赵国仙, 杨东平. X100 管线钢在库尔勒土壤模拟溶液中的微生物腐蚀特征[J]. 材料导报, 2014, 28(24): 47-51.
SUN Fu-xiang, ZHAO Guo-xian, YANG Dong-ping. Microbiological corrosion characteristics of X100 pipeline steel in simulated Ku'erle soil solution[J]. *Materials review*, 2014, 28(24): 47-51.
- [31] 胥聪敏, 张璇, 罗立辉, 等. X100 管线钢在含 SRB 的近中性土壤溶液中的腐蚀行为[J]. 钢铁研究学报, 2017, 29(7): 562-569.
XU Cong-min, ZHANG Xuan, LUO Li-hui, et al. Corrosion behavior of X100 pipeline steel in near neutral pH soil solution with action of SRB[J]. *Journal of iron and steel research*, 2017, 29(7): 562-569.
- [32] 胥聪敏, 张璇, 罗立辉. 海滨盐碱土壤中硫酸盐还原菌对 X100 管线钢腐蚀行为的影响[J]. 材料保护, 2017, 50(6): 40-43.
XU Cong-min, ZHANG Xuan, LUO Li-hui. Effect of sulfate reducing bacteria on corrosion behavior of X100 pipeline steel in seaside saline-alkali soil simulated solution[J]. *Materials protection*, 2017, 50(6): 40-43.
- [33] SANI F M, AFSHAR A, MOHAMMADI M. Evaluation

- of the Simultaneous effects of Sulfate reducing bacteria, soil type and moisture content on corrosion behavior of buried carbon steel API 5L X65[J]. International journal of electrochemical science, 2016, 11(5): 3887-3907.
- [34] 何斌, 孙成, 韩恩厚, 等. 不同湿度土壤中硫酸盐还原菌对碳钢腐蚀的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2003, 15(1): 1-4.
HE Bin, SUN Cheng, HAN En-hou, et al. Effects of SRB on corrosion of carbon steel in soils with different humidities[J]. Corrosion science and protection technology, 2003, 15(1): 1-4.
- [35] WANG Xin, XU Jin, SUN Cheng. Influence of sulfate reducing bacteria on corrosion of steel Q235 during natural evaporation in soils[J]. Advanced materials research, 2013, 610-613(1-4): 243-246.
- [36] 孙成, 韩恩厚. 土壤中SRB及 Cl^- 对1Cr18Ni9Ti不锈钢腐蚀的相互影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2003, 23(1): 47-52.
SUN Cheng, HAN En-hou. Effects of SRB on corrosion of 1Cr18Ni9Ti stainless steel in soils of Cl^- [J]. Journal of Chinese society for corrosion and protection, 2003, 23(1): 47-52.
- [37] 孙成, 韩恩厚, 张淑泉. 土壤中硫酸盐还原菌对1Cr13不锈钢腐蚀的影响[J]. 材料研究学报, 2003, 17(2): 192-197.
SUN Cheng, HAN En-hou, ZHANG Shu-quan. Effects of sulfate reducing bacteria on corrosion of 1Cr13 stainless steel in soils of Cl^- [J]. Chinese journal of materials research, 2003, 17(2): 192-197.
- [38] 周书峰, 尹秀峰, 周卫国, 等. 在不同 Cl^- 含量土壤中硫酸盐还原菌对Q235钢腐蚀的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(4): 199-202.
ZHOU Shu-feng, YIN Xiu-feng, ZHOU Wei-guo, et al. Effects of SRB on corrosion of Q235 steel in Cl^- containing soils[J]. Corrosion science and protection technology, 2004, 16(4): 199-202.
- [39] 王丹, 谢飞, 吴明, 等. X80 管线钢在三种土壤模拟溶液中的微生物腐蚀规律[J]. 机械工程材料, 2016, 40(5): 57-61.
WANG Dan, XIE Fei, WU Ming, et al. Microbiological corrosion rules of X80 pipeline steel in three simulated soil solutions[J]. Materials for mechanical engineering, 2016, 40(5): 57-61.
- [40] 刘文霞, 孙成. 土壤中硫酸盐还原菌对碳钢腐蚀的影响[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2007, 24(6): 9-13.
LIU Wen-xia, SUN Cheng. Impact of sulfate reducing bacteria on corrosion of carbon steel in soil[J]. Corrosion & protection in petrochemical industry, 2007, 24(6): 9-13.
- [41] 刘文霞, 孙成. Cl^- 与 SO_4^{2-} 土壤中硫酸盐还原菌对碳钢腐蚀的影响[J]. 腐蚀与防护, 2008, 29(11): 661-663.
LIU Wen-xia, SUN Cheng. Effects of sulfate reducing bacteria on corrosion of carbon steel in Cl^- and SO_4^{2-} soils[J]. Corrosion & protection, 2008, 29(11): 661-663.
- [42] LITTLE B, WAGNER P, MANSFELD F. An overview of microbiologically influenced corrosion[J]. Metallurgical reviews, 1992, 36(1): 253-272.
- [43] MELCHERS R E. The effects of water pollution on the immersion corrosion of mild and low alloy steels[J]. Corrosion science, 2007, 49(8): 3149-3167.
- [44] 孙成, 李喜明, 许进, 等. 尿素对土壤中碳钢微生物腐蚀的影响[J]. 物理化学学报, 2012, 28(11): 2659-2668.
SUN Cheng, LI Xi-ming, XU Jin, et al. Effect of urea on microbiologically induced corrosion of carbon steel in soil[J]. Acta physico-chimica sinica, 2012, 28(11): 2659-2668.
- [45] 李喜明, 张春颜, 朱辉, 等. 土壤中残余尿素对Q235钢微生物腐蚀的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(5): 397-402.
LI Xi-ming, ZHANG Chun-yan, ZHU Hui, et al. Effect of urea on microbial corrosion behavior of Q235 steel in soil[J]. Journal of Chinese society for corrosion and protection, 2012, 32(5): 397-402.
- [46] 赵琳琳, 赵平, 孙成, 等. 杀虫剂对Q235钢微生物腐蚀影响的研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2011, 30(6): 22-24, 69.
ZHAO Lin-lin, ZHAO Ping, SUN Cheng, et al. Research on the influence of pesticide to Q235 steel microbiological corrosion[J]. Journal of Shenyang Ligong University, 2011, 30(6): 22-24, 69.
- [47] 孙成, 李洪锡, 张淑泉, 等. 关于土壤中宏电池腐蚀的研究[J]. 腐蚀与防护, 1999, 20(7): 297-299.
SUN Cheng, LI Hong-xi, ZHANG Shu-quan, et al. Macrocell corrosion in soil[J]. Corrosion & protection, 1999, 20(7): 297-299.
- [48] 孙成, 李洪锡, 张淑泉, 等. LC4 铝合金的土壤盐浓差宏电池腐蚀[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(5): 653-655.
SUN Cheng, LI Hong-xi, ZHANG Shu-quan, et al. Salt concentration difference macrocell corrosion for LC4 aluminium alloy in soil[J]. The Chinese journal of non-ferrous metals, 2000, 10(5): 653-655.
- [49] 孙成, 李洪锡, 张淑泉, 等. 土壤盐浓差宏电池对碳钢的腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2000, 12(2): 101-103.
SUN Cheng, LI Hong-xi, ZHANG Shu-quan, et al. Corrosion of carbon steel caused by salt concentration difference macrocell in soil[J]. Corrosion science and protection technology, 2000, 12(2): 101-103.
- [50] 伍远辉, 孙成, 勾华. 硫酸盐还原菌对X70钢土壤宏电池腐蚀的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2007, 19(2): 98-102.
WU Yuan-hui, SUN Cheng, GOU Hua. Effects of SRB on macrocell corrosion on X70 steel in soils[J]. Corrosion science and protection technology, 2007, 19(2): 98-102.
- [51] 贾思洋, 李超, 孙成. 含硫酸盐还原菌污染土壤中Q235钢的宏电池腐蚀研究[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(12): 954-957.
JIA Si-yang, LI Chao, SUN Cheng. Macro cell corrosion of Q235 steel in SRB contaminated soils[J]. Corrosion &

- protection, 2011, 32(12): 954-957.
- [52] ABEDI S S, ABDOLMALEKI A, ADIBI N. Failure analysis of SCC and SRB induced cracking of a transmission oil products pipeline[J]. Engineering failure analysis, 2017, 14(1): 250-261.
- [53] 杨佳星, 赵平, 孙成, 等. 硫酸盐还原菌对 Q235 钢缝隙腐蚀行为影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(1): 54-58.
YANG Jia-xing, ZHAO Ping, SUN Cheng, et al. Influence of sulphate reducing bacteria on crevice corrosion behavior of Q235 steel[J]. Journal of Chinese society for corrosion and protection, 2012, 32(1): 54-58.
- [54] XU Jin, WANG Kai-xiong, SUN Cheng, et al. Effects of sulfate reducing bacteria on corrosion of the carbon steel Q235 under the disbonded coating by electrochemical impedance spectroscopy[J]. Corrosion science, 2011, 53(4): 1554-1562.
- [55] XU Jin, SUN Cheng, YAN Mao-cheng, et al. Corrosion of carbon steel Q235 in a crevice under a simulated disbonded coating[J]. Corrosion, 2014, 70(7): 686-694.
- [56] XU Jin, SUN Cheng, YAN Mao-cheng, et al. Electrochemical behavior of steel A36 under disbonded coating in the presence of sulfate-reducing bacteria[J]. Materials chemistry and physics, 2013, 142(2-3): 692-700.
- [57] XU Jin, SUN Cheng, YAN Mao-cheng, et al. Variations of microenvironments with and without SRB for steel Q235 under a simulated disbonded coating[J]. Industrial & engineering chemistry research, 2013, 52(36): 12838-12845.
- [58] 李国华, 孙成, 齐文元, 等. 含硫酸盐还原菌土壤中阴极保护对 Q235 钢腐蚀的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005, 17(6): 8-12.
LI Guo-hua, SUN Cheng, QI Wen-Yuan, et al. Effects of cathodic protection on corrosion of Q235 steel in SRB containing soils[J]. Corrosion science and protection technology, 2005, 17(6): 8-12.
- [59] SUN C, XU J, WANG F H, et al. Effects of SRB on cathodic protection of Q235 steel in soils[J]. Materials and corrosion, 2010, 61(9): 762-768.
- [60] LIU Tao, CHENG Y F. The influence of cathodic protection potential on the biofilm formation and corrosion behavior of an X70 steel pipeline in sulfate reducing bacteria media[J]. Journal of alloys and compounds, 2017, 729(11): 180-188.
- [61] WU Tang-qing, YAN Mao-cheng, ZENG De-chun, et al. Stress corrosion cracking of X80 steel in the presence of sulfate-reducing bacteria[J]. Journal of materials science & technology, 2015, 31(4): 413-422.
- [62] WU Tang-qing, XU Jin, YAN Mao-cheng, et al. Synergistic effect of sulfate-reducing bacteria and elastic stress on corrosion of X80 steel in soil solution[J]. Corrosion science, 2014, 83(6): 38-47.
- [63] WU Tang-qing, YAN Mao-cheng, XU Jin, et al. Hydrogen permeation of X80 steel with superficial stress in the presence of sulfate-reducing bacteria[J]. Corrosion science, 2015, 91(2): 86-94.
- [64] WU Tang-qing, XU Jin, SUN Cheng, et al. Microbiological corrosion of pipeline steel under yield stress in soil environment[J]. Corrosion science, 2014, 88(11): 291-305.
- [65] 王丹, 谢飞, 吴明, 等. 硫酸盐还原菌对 X80 钢应力腐蚀开裂行为的影响[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(5): 198-203.
WANG Dan, XIE Fei, WU Ming, et al. Effect of sulfate reducing bacteria on stress corrosion cracking behavior of X80 steel[J]. Transactions of material and heat treatment, 2016, 37(5): 198-203.
- [66] WANG Dan, XIE Fei, WU Ming, et al. Stress corrosion cracking behavior of X80 pipeline steel in acid soil environment with SRB[J]. Metallurgical and materials transactions A—Physical metallurgy and material science, 2017, 48(6): 2999-3007.
- [67] 赵健, 谢飞, 宫克, 等. X70 管线钢在硫酸盐还原菌作用下的应力腐蚀开裂行为[J]. 表面技术, 2017, 46(10): 108-114.
ZHAO Jian, XIE Fei, GONG Ke, et al. Stress corrosion cracking behavior of X70 pipeline steel under the action of sulfate reducing bacteria[J]. Surface technology, 2017, 46(10): 108-114.
- [68] 卿永长, 杨志炜, 鲜俊, 等. 交流电和微生物共同作用下 Q235 钢的腐蚀行为[J]. 金属学报, 2016, 52(9): 1142-1152.
QING Yong-chang, YANG Zhi-wei, XIAN Jun, et al. Corrosion behavior of Q235 steel under the interaction of alternating current and microorganisms[J]. Acta metallurgica sinica, 2016, 52(9): 1142-1152.
- [69] TORSVIK V, GOKSOYR J, DAAE F L. High diversity in DNA of soil bacteria[J]. Applied and environmental microbiology, 1990, 56(3): 782-787.
- [70] HINSINGER P, BENGOUH A, VETTERLEIN D, et al. Rhizosphere: Biophysics, biogeochemistry and ecological relevance[J]. Plant & soil, 2009, 321(1-2): 117-152.
- [71] 吕人豪, 苗桂时, 扈芝香. 几种土壤的硫酸盐还原菌 (*Desulfovibrio desulfuricans*) 的研究[J]. 微生物学报, 1973, 13(1): 77-80.
LV Ren-hao, MIAO Gui-shi, HU Zhi-xiang. Study of *desulfovibrio desulfuricans* in soils[J]. Acta microbiologica sinica, 1973, 13(1): 77-80.
- [72] SUN Cheng, XU Jin, WANG Fu-hui. Interaction of sulfate-reducing bacteria and carbon steel Q235 in biofilm [J]. Industrial & engineering chemistry research, 2011, 50(22): 12797-12806.