

管线钢的海水微生物腐蚀

陈士强^{1,2}, 张盾^{1,2}

(1. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 青岛海洋科学与技术国家实验室,
山东 青岛 266237)

摘要: 以海水环境中管线钢的微生物腐蚀(MIC)为中心,就国内外与其相关的报道进行综述分析,并提出建议。首先,分析了海水中导致管线钢腐蚀的主要微生物种类及其代谢过程的特点,得出海水中腐蚀微生物具有多样性特征,代谢途径受环境参数的影响。然后,分析了海水中微生物所致管线钢腐蚀机理的研究现状,得出管线钢MIC机理主要与细菌的代谢产物、代谢活动和生物膜的形成有关,突出不同环境下管线钢MIC的复杂性。再次,介绍了海水中管线钢MIC防治的研究现状,并分析了主要防护技术的优缺点。最后,提出对海水环境管线钢MIC研究工作的建议,包括建立海水管线钢腐蚀微生物种类数据库、大力研发绿色高效MIC控制技术、加强对海水管线钢MIC基础性研究工作的投入等。

关键词: 海水环境; 管线钢; 微生物腐蚀; 防护技术

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.10.007

中图分类号: TG172.7 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)10-0039-06

Microbiologically Influenced Corrosion of Pipeline Steel in Seawater

CHEN Shi-qiang^{1,2}, ZHANG Dun^{1,2}

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China;

2. Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

ABSTRACT: This article reviewed MIC of pipeline steel in seawater, including the main populations of corrosive bacteria and proposed suggestions based on the review and analysis of relative reports in China and other countries. Firstly, the categories and metabolisms of corrosive bacteria were analyzed. It was found that the category of corrosive bacteria was diversity, and their metabolic processes were dependent on environment parameters in seawater. Secondly, analysis was conducted on MIC mechanisms of pipeline steel in seawater, and metabolic products, process of corrosive bacteria and biofilm were believed to be significant in MIC mechanisms of pipeline steel. Thirdly, analysis of the current status, advantages, and disadvantages of protection technologies against MIC of pipeline steel in seawater was carried out, and the combination of diverse protection technologies was exhibited. Finally, proposals were given on the research work of pipeline steel MIC in seawater, which included the establishment of databases on corrosive bacteria, much more efforts on the research and development of green and high-efficiency protection technologies, more investment in the fundamental research.

KEY WORDS: seawater; pipeline steel; microbiologically influenced corrosion; protection technology

海水环境为微生物的生长和繁殖提供了丰富条件,如水、营养物质和电子供受体等,尽管迄今为止

收稿日期: 2018-07-16; 修订日期: 2018-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(51771180); 国家重点研究发展计划(2016YFB0300604和2014CB643304); 鳌山人才计划

作者简介: 陈士强(1987—),男,山东人,博士后,主要研究方向为海洋微生物腐蚀。

通讯作者: 张盾(1965—),女,山东人,博士,研究员,主要研究方向为海洋微生物腐蚀。

还无法完全统计出海水中所含微生物的种类,但分子生物学技术的分析表明,单个海水样品中包含超过一万种不同类型的微生物^[1]。海水环境中微生物的存在不仅在海洋生态环境和物质循环中起到重要作用,还会影响海水中钢铁工程设施的腐蚀。微生物腐蚀(MIC)指的是微生物的生命活动间接或直接对金属腐蚀的电化学过程产生影响。目前研究表明,MIC过程主要分为以下四种形式^[2]:新陈代谢过程中产生某些具有腐蚀性的代谢产物,如酸、有机酸和硫化物等,恶化金属腐蚀的环境;生命活动影响电极反应的动力学过程;改变金属所处环境状况,如氧浓度、盐浓度、pH值等,使金属表面形成局部腐蚀电池;破坏金属表面保护性的膜,如腐蚀产物膜、非金属覆盖层或缓蚀剂的膜。MIC的一个主要特征就是金属表面伴随有生物膜的沉积,生物膜是胞外多聚物(EPS)与介质中的土粒、矿物质、微生物细胞和金属腐蚀产物的混合物。金属遭受MIC的程度往往和生物膜积聚的数量和形态有关。金属腐蚀破坏形式主要分为均匀腐蚀和局部腐蚀,其中局部腐蚀又包括点蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀开裂和沉积层下的腐蚀等。因由微生物构成的生物膜在金属表面的附着改变了金属表面的局部化学环境,为局部腐蚀的发生创造了条件。因此,MIC是典型的局部腐蚀过程^[3]。

随着陆地油气资源的日益枯竭,大力开发和利用深海和远海油气资源日益成为世界各国的发展趋势^[4]。我国拥有三百多万平方公里的广阔海域,深海和远海油气资源的开发与利用具有更广阔的发展前景,而各类海中油气输送管线是这一发展趋势不可或缺的重要组成部分^[5]。从20世纪80年代至今,我国已经投入应用的海洋管线设备总量已经超过7.5万千米,目前服役的管线钢的型号有5LB、X42、X52、X60、X65和X70,以及高级别的管线钢,如X80、X100和X120等^[6]。管线钢在服役过程中,因破坏而导致油气泄露的事故,给人民的生命和财产安全,以及生态环境造成重大威胁,引起了国内外的高度关注^[7]。大量的研究与数据统计表明,腐蚀是导致管线钢破坏的重要原因之一^[8],其中内外腐蚀引起事故分别约占总体腐蚀的55%和45%^[9]。相对于均匀腐蚀,局部腐蚀能够导致管线钢局部穿孔、结构力学性能减弱或变脆等,是影响管道安全稳定运行的最主要因素。随着我国走向深海和远海的海洋强国战略的实施,海水中管线钢的应用将日益增多,而作为海水中典型局部腐蚀形式的MIC,应该引起高度重视。

文中从以下几个方面综述了海水中管线钢MIC近年来的研究进展。

1 微生物的主要种类

海水中影响管线钢腐蚀细菌的种类繁多,按照需

氧量的不同可以分为:厌氧菌、好氧菌和兼性厌氧菌。研究表明,通常这几类细菌同时吸附在金属材料表面形成生物膜,其中,好氧菌和兼性厌氧菌首先生长繁殖,消耗掉环境中氧气,为厌氧菌的生长繁殖提供条件^[10]。以上细菌又可以分为以下几类:硫酸盐还原菌(SRB)、硫氧化细菌(SOB)、铁还原细菌(IRB)、铁氧化细菌(IOB)、锰氧化细菌(MnOB)、产酸菌(APB)、硝酸盐还原菌(NRB)以及能够代谢产生多聚物和粘泥的细菌^[11-12]。实际环境的生物膜中,这几类细菌以协同或拮抗的方式影响金属材料腐蚀过程的进行^[13],如图1所示。以上并非是微生物分类学上的概念,而是一类具有特征代谢能力细菌的统称,例如SRB指的是能够利用有机物为电子供体,硫酸盐为电子受体,代谢产生硫化物一类细菌的统称。SRB所致管线钢腐蚀是被研究最早和最多的。统计表明,仅有SRB所致的腐蚀损失占整个腐蚀损失的1/2以上^[14]。目前,海水中分离培养获得的SRB的主要种类有:*Desulfovibrio* sp.、*Clostridium Sphenoides*、*Desulfobacterium*、*Desulfovibrio Caledoniensis*、*Desulfotomaculum nigrificans*、*Desulfobacter* sp.和*Desulfotomaculum* sp.等^[10]。生物膜中常见的另一类硫代谢细菌为SOB,主要种类有:*Thiobacillus thiooxidans*、*Sulfurimonas*、*Sulfuricurvum*、*Sulfurovum*和*Thioprofundum lithotrophicum*等。近年来的研究表明,铁代谢细菌(IRB和IOB)对金属腐蚀也有非常重要的影响^[15],其中,IRB的种类主要有:*Clostridium* sp.、*Shewanellaceae*、*Ferrimonas sediminum*和*Alkaliphilus metalliredigens*等。IOB的种类主要包括:*Bacillus* sp.、*Gallionella*、*Sideroxydans*、*Mariprofundus ferrooxidans*、*Marinobacter*和*Pseudoalteromonas*等。MnOB的存在能够导致金属表面沉积MnO₂,引起腐蚀电位正移,发生局部腐蚀。目前研究发现海水中MnOB主要包括:*Bacillus*、*Staphylococcus*、*Syneccoccus*、*Propionibacterium*、*Micrococcus*、*Pseudomonas*和*Vibrio*^[16]。APB的酸性代谢产物导致体系的pH降低,增加金属的腐蚀速率,主要包括产醋酸菌和产硫酸菌:*Thiobacillus thiooxidans*、*Sporomusa sphaeroides*、*Sporomusa ovata*和*Acetobacterium* spp.等^[17]。有研究表明,海水中NRB的存在同样会影响腐蚀过程的进行,目前主要的NRB有:*Octadecabacter jejudonensis*和*Alcaligenes aquatilis*等^[18-19]。以上这些细菌并非严格地进行单一代谢途径,有些细菌可以根据环境中营养物质以及电子供受体的变化,改变自身的代谢途径。某些细菌既可以还原硫酸盐也可以还原硝酸盐,例如:*Desulfonatronospira thiodismutans*、*Desulfohalobium retbaense*和*Archaeoglobus fulgidis*等^[20],有些既可以还原三价铁也可以还原硫酸盐,例如:*Desulfuromonas acetoxidans*^[21]。还有些细菌同时具备

两种功能，例如 SOB 代谢产物通常为硫酸，因此很大一部分 SOB 也是 APB。由此可见，腐蚀微生物具有代谢多样性的特点。另外，上述仅是海水中

影响管线钢腐蚀微生物的一小部分而已，还有很多种类无法进行分离和培养。这些都给 MIC 机理和防护的研究带来了很大难度。

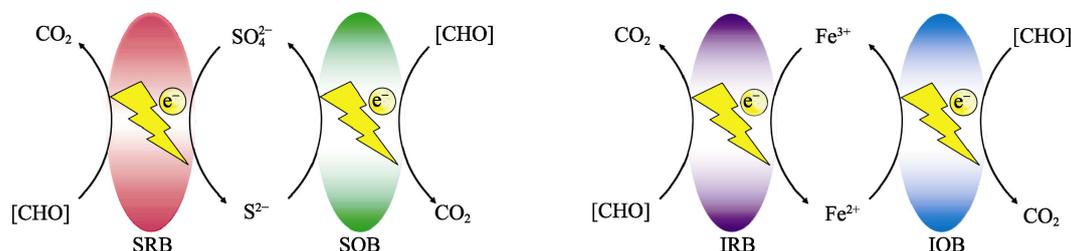


图 1 硫代谢细菌 (SRB 和 SOB) 和铁代谢细菌 (IRB 和 IOB) 代谢过程模型 ([CHO]表示有机物)

2 微生物腐蚀机理

自 MIC 发现以来，其机理研究已经历了一个多世纪，大量的腐蚀机理模型被提出^[2,7]。这些机理模型可以分为三类：代谢产物所致的腐蚀机理、代谢过程所致的腐蚀机理以及浓差电池的形成。

代谢产物所致的腐蚀机理模型是被研究最多和最早的。因影响腐蚀过程的微生物种类繁多，其代谢产物也是多种多样，例如 SRB 代谢产生的氢化酶、硫化物和胞外多聚物 (EPS) 等，APB 代谢产生的有机或无机酸等，以及 IOB 代谢产生的三价铁，都会影响腐蚀过程的进行。海水中管线钢的腐蚀是典型的电化学过程 (阴极反应和阳极反应)，在厌氧环境中，阴极反应 (析氢反应) 是控制腐蚀速率的关键步骤。很多细菌的代谢产物具有直接或间接促进阴极析氢反应去极化的作用，例如：氢化酶、硫化物和有机酸等。氢化酶所致的阴极去极化作用是最经典的 MIC 机理，也是最早从电化学的角度解释 MIC 过程。该机理认为，SRB 代谢产生的氢化酶，能够消耗腐蚀过程中产生的阴极氢，从而促进阳极溶解反应的进行^[22]。后来，研究表明，SRB 代谢产生的硫化物，与二价铁反应生成的 FeS 也具有催化阴极氢还原的能力，另外硫化物还可以阳极溶解的反应产物 (二价铁) 反应生成不溶性的 FeS，促进阳极反应的进行^[23]。SOB 和 APB 代谢产生的无机和有机酸能够降低体系中的 pH 值，溶解金属管线钢表面保护性的氧化膜，促进管线钢阴阳极的电化学活性溶解过程^[2]。IOB 氧化二价铁离子产生的三价铁离子，一方面能够与水反应生成不溶性的铁氧化物或氢氧化物以及氢离子，降低体系的 pH，另一方面三价铁是强氧化剂，能够与铁直接反应，促进管线钢的局部腐蚀过程的进行^[24]。微生物在代谢过程中除了产生无机代谢产物外，还能产生大量的有机代谢产物 EPS，EPS 分子中含有大量高活性的官能团，能够强有力地络合铁离子，促进管线钢的阳极溶解过程^[25]。

除代谢产物外，近年来的研究表明，有些细菌的

代谢过程直接参与腐蚀过程的进行。例如某些细菌能够从金属表面直接获取电子用于新陈代谢，还有些细菌代谢过程破坏保护性的腐蚀产物膜。Venzlaff 等人在研究灭活和非灭活的 SRB 生物膜对碳钢腐蚀的影响时，发现非灭活的 SRB 能够促进阴极过程的进行，其中腐蚀产物 FeS 是细菌和金属之间电子传递的媒介^[26]。有研究发现，参与电子传递的也可能是细胞膜上的细胞色素 c 或 SRB 代谢产生的导电纳米线等^[27]。有些 SRB 吸附在钢铁材料表面，通过导电性的生物膜，直接从金属表面获取腐蚀过程中产生的电子，加速钢铁阳极溶解过程^[28]。IRB 是一类利用有机物为电子供体，三价铁为电子受体的微生物。目前研究表明有三种铁还原机理：通过直接接触铁表面或通过类似“纳米导线”的鞭毛或菌毛进行电子专递；自己产生或利用环境中有效的电子穿梭体化合物传递电子；通过络合物溶解铁再进行电子转移^[29]。这个过程中，管线钢表面保护性的三价铁氧化物被还原成可溶性的二价铁离子，金属腐蚀的阳极溶解过程被促进^[7]。

形成生物膜是细菌在材料表面存在的主要形式，也是影响 MIC 最主要的过程，与材料表面的特征和所积累的营养物质有关^[30]。生物膜的主要成分包含有细菌细胞、EPS、吸附的有机和无机物质、代谢产物以及腐蚀产物等，其中 EPS 构成了生物膜的骨架。生物膜的组成决定了其具有多种性质，例如多孔性、一定的强度、流动性和物质传输性等。生物膜内细菌的代谢数量和代谢活动与体相介质中存在较大差异，这导致生物膜内外化学环境不同，例如离子的种类和浓度、pH 和溶解氧的浓度等^[30]。另外因生物膜具有层状结构，不均匀地分布在金属材料表面，在不同位置具有不同厚度和覆盖度，导致生物膜内细菌的活性和密度随着生物膜厚度的不同而不同，从而在不同位置处生物膜内化学环境也不同。这些因生物膜的吸附所致金属表面化学环境的不均一^[31]，使得金属表面形成浓差电池，例如氧浓差电池和金属离子浓差电池等。

由上可知，MIC 机理与腐蚀微生物的种类、代谢

产物的特性、代谢活动以及生物膜的微观结构等有关。以上影响因素除了极易受环境参数的变化影响以外,还共同作用于腐蚀过程,导致很难深入解析 MIC 机理。因此,目前为止还没有一个统一的理论去解释 MIC 过程。

3 微生物腐蚀的防护现状

目前针对管线钢 MIC 防护方法主要分为以下几种:机械法、化学法、电化学法和生物技术。

管道“猪”是最常用的处理管道内 MIC 的机械物理方法。管道“猪”的外形如图 2 所示,管道系统在设计时就配备了运行管道“猪”的特殊接收器和发射器,运行期间除了可以进行检测外,还可以清理管道内壁的细菌、生物膜及腐蚀产物等^[32]。超声波处理是另外一种机械物理清除方法,但是在石油管道工业中不是很常用。超声波能够使液体产生高能气泡,当这些气泡聚集时,产生的高压和高温能够破坏细菌细胞,此时配合化学杀菌剂,能够起到很好的防护效果^[7]。



图 2 带有磁通量检测工具的智能管道“猪”

杀菌剂是目前石油天然气工业中控制 MIC 主要的化学技术,通常分为两种类型:氧化型和非氧化型(见表 1)。氧化型杀菌剂能够穿透并破坏细菌细胞,例如:溴、臭氧和过氧化氢等。非氧化型的杀菌剂能够穿透生物膜,并破坏细胞膜或改变细菌获取能量的方式,例如醛类化合物、胺类化合物以及卤代类化合物等。近年来,随着环境法规和安全的限制,对杀菌剂提出了更高的要求,新型高效环保杀菌剂的开发日益增多,例如螯合剂能够增强杀菌剂对革兰氏阴性菌细胞外膜的通透性,提高杀菌效率。Wen 等人发现,乙二胺二琥珀酸三钠(EDDS)和 N-(2-羟乙基)亚氨基二乙酸(HEIDA)能够代替传统的螯合剂(EDTA)增强杀菌剂 THPS 对 *Desulfovibrio vulgaris* ATCC 7757 和 *Desulfovibrio desulfuricans* ATCC 14563 的作用^[33]。Kashif Rasool 等人开发了一种绿色高稳定性的杀菌剂分子——氧化锌交联的壳聚糖纳米颗粒,该纳米颗粒能够有效地抑制超过 73%SRB 的活性以及降

低 43%硫化物的产生^[34]。

表 1 用于控制 MIC 所用杀菌剂类型列表^[35]

杀菌剂	特性
氯气	能够有效杀灭细菌和藻类,氧化型,应用过程与 pH 有关
二氧化氯	能够有效杀灭细菌,在一定程度上能够杀灭真菌和藻类,氧化型,应用过程与 pH 无关
溴	能够有效杀灭细菌和藻类,氧化型,应用过程与 pH 有关
臭氧	能够有效杀灭细菌和生物膜,氧化型,应用过程与 pH 有关
异噻唑啉酮	能够有效杀灭细菌、藻类和生物膜,非氧化型,影响表面活性
季铵盐类化合物(QUATs)	能够有效杀灭细菌和藻类,非氧化型,应用过程与 pH 无关
戊二醛	能够有效杀灭细菌、藻类、真菌和生物膜,非氧化型,应用过程与 pH 无关
四羟基甲基硫磷酸(THPS)	能够有效杀灭细菌、藻类和真菌,非氧化型,低环境毒性,特别是针对 SRB

阴极保护(CP)和涂层是抑制 MIC 的两类主要电化学方法。CP 保护金属材料的原理是施加阴极电流抑制金属材料的阳极溶解过程。相反,涂层是通过阻止阴阳极之间的电子和离子流动实现对金属材料的保护。工业标准中规定,当 CP 电位在 -0.95 V (vs. Cu-CuSO_4) 能够保护碳钢免于 SRB 侵害。然而,有研究表明,这个电位不足以处理 MIC,需要一个更高的电位 (-1.07 V (vs. Cu-CuSO_4))^[2]。CP 能够使金属表面积累负电荷,从而排斥带负电的细菌在金属表面吸附。另外,CP 还能够引起金属表面 pH 的增加,阻止细菌的分裂和杀死已吸附的细菌。涂层是另一个在石油天然气领域广泛应用于管线内外腐蚀防护的技术。涂层系统包括煤焦油、沥青基涂层、锌涂层、塑料涂层、玻璃纤维涂层和聚合物涂层(例如熔结环氧涂层)等。合适涂层系统的选择和应用是防治 MIC 的关键。Yuan 等人^[36]研究开发了一种聚 4-乙烯基苯胺+聚苯胺的高分子复合涂层,该涂层能够有效地杀菌及抑制微生物附着,另外还能防止侵蚀性离子(Cl^- 和 S^{2-} 等)渗透到基体金属表面。然而,实际环境中,因 CP 和涂层不合理的应用,往往导致涂层剥离,这是涂层应用的短板。

近期的研究表明,改变细菌的代谢途径或利用微生物之间的拮抗作用可以用来控制 MIC。例如改变介质中电子受体种类或浓度抑制特定种类细菌的生长。Jhobalia 等人的研究结果表明,过量的硫酸盐能够增加 SRB 代谢或还原硫酸盐过程的毒性,导致 *Desulfovibrio desulfuricans* 的生长过程以及管线钢的腐蚀过程被抑制^[37]。实验室和现场应用的结果表明,硝酸盐处理能够有效地改变杀菌剂对 SRB 的作用,

硝酸盐的加入能够导致 SRB (*Desulfovibrio desulphuricans*) 转变为 NRB, 降低 SRB 在 MIC 过程中的贡献, 这个方法使得腐蚀速率降低了至少 50%^[38]。Jayaraman 等人的研究发现, 一株修饰的 *Bacillus subtilis* 在营养物质丰富的培养基中能够产生抗微生物的多肽, 抑制 SRB 的生长^[39]。尽管实验的结果表明这一方法可以用来控制 MIC, 然而在实际应用中却无法得到理想的结果。

鉴于海水中管道运行的特点, 其微生物所致管线钢腐蚀分为内腐蚀和外腐蚀。内外环境的差异, 导致其防护方法也不相同, 例如管道外为开放的海水环境, 适宜采用超声波、涂层和 CP 技术。管道内为封闭环境, 适宜采用管道“猪”、杀菌剂和生物技术等。有时一种技术方法难以满足要求, 需要两种或两种以上的方法联用。

4 结语

1) 目前所获得的腐蚀微生物的种类主要为可培养的, 还有大量不可培养的腐蚀微生物无法获取。因此, 利用分子生物学的技术通过鉴定分析, 一方面丰富海水中管线钢腐蚀微生物的种类数据, 另一方面为后续研究不可培养腐蚀微生物腐蚀机理和防护技术寻找模式菌株提供参照。微生物代谢过程的多样性与环境因子息息相关, 调查并建立各个海水环境中微生物种类与环境参数 (特别是营养物质和电子受体) 的数据库, 为腐蚀微生物的分类和后续研究提供重要依据。

2) 海水中管线钢的 MIC 是海水环境、腐蚀微生物和管线钢共同作用的结果, 其机理主要受海水环境和腐蚀微生物的影响。目前针对 MIC 机理的研究主要集中在单一菌种, 而对于实际环境中存在的多菌种混合所致腐蚀机理的研究较少。尽管微生物的生命活动能够影响环境因子的变化, 然而, 环境因子的变化同样可以影响微生物的生命活动, 因此, 环境因子与微生物代谢活动的交互作用所致管线钢腐蚀的机理值得深入探讨。生物膜的吸附是导致管线钢局部腐蚀的最主要原因, 而膜内微环境的特征, 例如离子的种类及含量、溶解氧的含量、pH 的大小以及微生物的种类等, 至今无法准确获取。

3) 尽管针对海水中管线钢 MIC 防护技术已经大量开发和应用, 然而每年因腐蚀所致的管道泄漏事故还时有发生, 因此防护技术的防护效果还有待提升。目前, 杀菌剂还是油气管道防护的主要方法, 而大量杀菌剂的应用不仅污染环境, 还导致细菌抗药性的增强, 因此, 开发绿色高效的杀菌剂迫在眉睫。海水管道所面临的 MIC 环境复杂多样, 防护方法应因地制宜。为及时合理地控制海水管线钢的 MIC, 有必要开发腐蚀微生物种类和 MIC 发生与否的快速检测技术。

海洋油气资源的开发利用是我国海洋强国战略的重要组成部分。管线钢作为海洋油气资源开发和利用的关键材料, 面临着海水中 MIC 的严重威胁, 而目前针对这一问题机理及防护技术的研究还处于初级阶段, 深层次的机理和高效绿色防护技术有待进一步研究和开发。

参考文献:

- [1] GAMFELDT L, LEFCHECK J S, BYRNES J E, et al. Marine Biodiversity and Ecosystem Functioning: What's Known and What's Next?[J]. *Oikos*, 2015, 124(3): 252-265.
- [2] LITTLE B J, MANSFELD F B, ARPS P J, et al. *Microbiologically Influenced Corrosion*[M]. Hoboken: Wiley Online Library, 2007.
- [3] LITTLE B J, LEE J S. *Microbiologically Influenced Corrosion: An Update*[J]. *International Materials Reviews*, 2014, 59(7): 384-393.
- [4] 张业圣, 李志卫. 海洋石油用管的发展现状和前景展望[J]. *钢管*, 2009(5): 1-10.
- [5] 廖柯熹, 黄琳钧, 王丹丹, 等. X65 管线钢在模拟海水环境中的腐蚀行为[J]. *腐蚀与防护*, 2017, 38(11): 856-861.
- [6] 杜伟, 李鹤林. 海洋石油装备材料的应用现状及发展建议(上)[J]. *石油仪器*, 2015(5): 1-7.
- [7] JAVAHERDASHTI R. *Microbiologically Influenced Corrosion: An Engineering Insight*[M]. Berlin: Springer, 2016.
- [8] 周晶, 陈严飞, 李昕, 等. 复杂荷载作用下海底腐蚀管线破坏机理研究进展[J]. *海洋工程*, 2008, 26(1): 127-136.
- [9] CICEK V. *Corrosion Engineering*[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2014.
- [10] LI X, DUAN J, XIAO H, et al. Analysis of Bacterial Community Composition of Corroded Steel Immersed in Sanya and Xiamen Seawaters in China Via Method of Illumina Miseq Sequencing[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017(8): 1737.
- [11] LITTLE B J, LEE J S, RAY R I. Diagnosing Microbiologically Influenced Corrosion: A State-of-The-Art Review[J]. *Corrosion*, 2006, 62(11): 1006-1017.
- [12] LITTLE B J, LEE J S, RAY R I. The Influence of Marine Biofilms on Corrosion: A Concise Review[J]. *Electrochimica Acta*, 2008, 54(1): 2-7.
- [13] KOCH G H, BRONGERS M P, THOMPSON N G, et al. Corrosion Cost and Preventive Strategies in The United States[J]. *Journal of Endocrinology*, 2002, 122(1): 23-31.
- [14] MUYZER G, STAMS A J. The Ecology and Biotechnology of Sulphate-Reducing Bacteria[J]. *Nat Rev Microbiol*, 2008, 6(6): 441-454.
- [15] LEE J S, MCBETH J M, RAY R I, et al. Iron Cycling at Corroding Carbon Steel Surfaces[J]. *Biofouling*, 2013,

- 29(10): 1243-1252.
- [16] PALANICHAMY S, MARUTHAMUTHU S, MANICKAM S T, et al. Microfouling of Manganese-Oxidizing Bacteria in Tuticorin Harbour Waters[J]. *Current Science*, 2002(5): 865-869.
- [17] KATO S, YUMOTO I, KAMAGATA Y. Isolation of Acetogenic Bacteria That Induce Biocorrosion by Utilizing Metallic Iron As The Sole Electron Donor[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2015, 81(1): 67-73.
- [18] AL-NABULSI K M, AL-ABBAS F M, RIZK T Y, et al. Microbiologically Assisted Stress Corrosion Cracking in The Presence of Nitrate Reducing Bacteria[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2015, 58: 165-172.
- [19] LI Y, XU D, CHEN C, et al. Anaerobic Microbiologically Influenced Corrosion Mechanisms Interpreted Using Bioenergetics and Bioelectrochemistry: A Review[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2018, 34(10): 1713-1718.
- [20] BONIFAY V, WAWRIK B, SUNNER J, et al. Metabolomic and Metagenomic Analysis of Two Crude Oil Production Pipelines Experiencing Differential Rates of Corrosion[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2017(8): 99.
- [21] RAMIREZ G A, HOFFMAN C L, LEE M D, et al. Assessing Marine Microbial Induced Corrosion at Santa Catalina Island, California[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016(7): 1679.
- [22] SAEID KAKOOEI, MOKHTAR CHE ISMAIL, ARIWAHOEDI B. Mechanisms of Microbiologically Influenced Corrosion A Review[J]. *World Applied Sciences Journal*, 2012, 17(4): 524-531.
- [23] BOOTH G H, TILLER A K. Cathodic Characteristics of Mild Steel in Suspensions of Sulphate-Reducing Bacteria[J]. *Corrosion Science*, 1968, 8(8): 583-600.
- [24] STIPANICEV M, TURCU F, ESNAULT L, et al. Corrosion of Carbon Steel by Bacteria from North Sea Offshore Seawater Injection Systems: Laboratory Investigation[J]. *Bioelectrochemistry*, 2014, 97: 76-88.
- [25] PÉREZ E J, CABRERA-SIERRA R, GONZÁLEZ I, et al. Influence of *Desulfovibrio* Sp. Biofilm on SAE 1018 Carbon Steel Corrosion in Synthetic Marine Medium[J]. *Corrosion Science*, 2007, 49(9): 3580-3597.
- [26] ENNING D, GARRELF S J. Corrosion of Iron by Sulfate-Reducing Bacteria: New Views of An Old Problem[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2014, 80(4): 1226-1236.
- [27] SHERAR B W A, KEECH P G, SHOESMITH D W. The Effect of Sulfide on The Aerobic Corrosion of Carbon Steel in Near-Neutral pH Saline Solutions[J]. *Corrosion Science*, 2013, 66: 256-262.
- [28] YU L, DUAN J, DU X, et al. Accelerated Anaerobic Corrosion of Electroactive Sulfate-Reducing Bacteria by Electrochemical Impedance Spectroscopy and Chronoamperometry[J]. *Electrochemistry Communications*, 2013, 26: 101-104.
- [29] WEBER K A, ACHENBACH L A, COATES J D. Microorganisms Pumping Iron: Anaerobic Microbial Iron Oxidation and Reduction[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2006, 4(10): 752-764.
- [30] WANG W, ZHANG X, WANG J. Heterogeneous Electrochemical Characteristics of Biofilm/Metal Interface and Local Electrochemical Techniques Used for This Purpose[J]. *Materials and Corrosion*, 2009, 60(12): 957-962.
- [31] MCNEIL M B, LITTLE B J. Mackinawite Formation during Microbial Corrosion[J]. *Corrosion*, 1990, 46(7): 599-600.
- [32] AL-OADAH A O, BORJAILAH W A, DAMASCHKE J, et al. In-Line Inspection with High Resolution EMAT Technology Crack Detection and Coating Disbondment[J]. *Corrosion*, 2007, 63(14): 906-917.
- [33] WEN J, ZHAO K, GU T, et al. Chelators Enhanced Biocide Inhibition of Planktonic Sulfate-Reducing Bacterial Growth[J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2009, 26(6): 1053-1057.
- [34] RASOOL K, NASRALLAH G K, YOUNES N, et al. "Green" ZnO-Interlinked Chitosan Nanoparticles for The Efficient Inhibition of Sulfate-Reducing Bacteria in Inject Seawater[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(3): 3896-3906.
- [35] HERBERT B N, ROSSMOORE H W. *Handbook of Biocide and Preservative Use*[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 1995.
- [36] YUAN S, TANG S, LV L, et al. Poly(4-vinylaniline)-Polyaniline Bilayer-Modified Stainless Steels for The Mitigation of Biocorrosion by Sulfate-Reducing Bacteria (SRB) in Seawater[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, 51(45): 14738-14751.
- [37] GU T, NESIC S, HU A, et al. *Biochemical Engineering Approaches to MIC[C]*// *Corrosion/2005*. Houston, TX: NACE International, 2005:.
- [38] BODTKER G, THORSTENSON T, LILLEBO B L, et al. The Effect of Long-Term Nitrate Treatment on SRB Activity, Corrosion Rate and Bacterial Community Composition in Offshore Water Injection Systems[J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2008, 35(12): 1625-1636.
- [39] JAYARAMAN A, HALLOCK P J, CARSON R M, et al. Inhibiting Sulfate-Reducing Bacteria in Biofilms on Steel with Antimicrobial Peptides Generated in Situ[J]. *Applied Microbiology And Biotechnology*, 1999, 52(2): 267-275.