

海洋环境低水位加速腐蚀研究进展

吴佳佳^{1,2,3}, 王鹏^{1,2,3}, 张盾^{1,2,3}

(1.中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋大科学研究中心, 山东 青岛 266071; 3. 青岛国家海洋科学与技术实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 以海洋环境中一个非常重要的局部腐蚀形式——低水位加速腐蚀 (ALWC) 为对象, 自其检测、发生原因、防护三个方面就国内外的文献报告进行综述分析。在检测方面, 首先介绍了常用的宏观观察这一被动形式, 并突出其特征, 然后介绍了利用海水中可溶性无机氮含量作为 ALWC 发生概率预测这一主动形式, 分析其优势与不足。在发生原因方面, 在对将 ALWC 认定为一种典型的微生物腐蚀 (MIC) 形式的认知过程进行介绍之后, 重点分析了微生物对 ALWC 作用机制不清晰的原因, 并建议在后续研究中突出动态演变过程, 结合高通量测序等分子生物学技术, 确定在不同的阶段影响 ALWC 的关键微生物, 且进一步在大气-海水体系下研究典型菌株及其协同作用的影响, 提出微生物对 ALWC 的作用机制。在防护方面, 根据新建和已建钢结构设施分别对传统和针对 ALWC 所具有的 MIC 与局部腐蚀特性的新型高效防护方法进行了介绍, 并分析了防护方法的优缺点。

关键词: 低水位加速腐蚀; 海洋环境腐蚀; 微生物腐蚀; 腐蚀监测; 腐蚀防护方法; 腐蚀作用机制

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.10.005

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)10-0027-06

Research Progress on Accelerated Low Water Corrosion in Marine Environments

WU Jia-jia^{1,2,3}, WANG Peng^{1,2,3}, ZHANG Dun^{1,2,3}

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

2. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071;

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

ABSTRACT: This article takes accelerated low water corrosion (ALWC) as the object, which is a significant local corrosion pattern in marine environments, to review and analyze the related literature and reports in three aspects: detection, cause, and protection. For the detection, macroscopic observation as a passive method was introduced firstly, and the characteristics were emphasized; and then the advantages and defects of an active approach were analyzed, in which ALWC prediction was achieved by the positive linear correlation between the content of dissolved inorganic nitrogen in seawater and ALWC occurrence probability. For the cause, it was focused on factors leading to the indeterminacy in the action mechanisms of microorganisms towards ALWC, after the description of the cognitive process on the view that ALWC was a typical form of microbially influenced corrosion (MIC). It was suggested to highlight the dynamic development process in the future studies, and ascertain key microorganisms for ALWC at different stages with the aid of molecular biological techniques like high-throughput sequencing. Also the impact of typical strains and their synergy was investigated in the atmosphere-seawater systems, and the function

收稿日期: 2018-07-13; 修订日期: 2018-08-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFB0300604)

作者简介: 吴佳佳 (1986—), 女, 山东人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为海洋环境微生物腐蚀机理。

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环境腐蚀与生物污损。

mechanism of microorganisms towards ALWC was proposed. For protection, traditional and novel efficient protection methods designed for ALWC with the unique MIC and local corrosion features were described on the basis of new and former steel structures, and the merits and disadvantages of these approaches were analyzed.

KEY WORDS: accelerated low water corrosion; marine environmental corrosion; microbially influenced corrosion; corrosion monitoring; protection method against corrosion; corrosion action mechanism

由于海洋环境的腐蚀苛刻性,海洋腐蚀给人类造成巨大的经济损失与安全隐患。相较于全面腐蚀,局部腐蚀的危害性更大,而低水位加速腐蚀(Accelerated Low Water Corrosion, ALWC)就是海洋环境中的一种典型局部腐蚀形式。所谓ALWC,是指贯穿大气-海水跃变区的金属材料在紧邻低潮线下发生严重腐蚀(腐蚀速率可达到或超过1.0 mm/a,远高于人们所预期的0.05 mm/a的全面腐蚀速率)的现象^[1-2],典型腐蚀损失曲线如图1所示^[3],常见于在港口、码头长期服役的钢桩上。据统计,由ALWC造成的港口、码头等设施的损失约占其资产价值损失的33%~66%^[4],其重要性不言而喻。与此同时,ALWC还具有普遍性,在英国、法国、美国、澳大利亚、加拿大、日本、挪威等沿海国家均有报道。

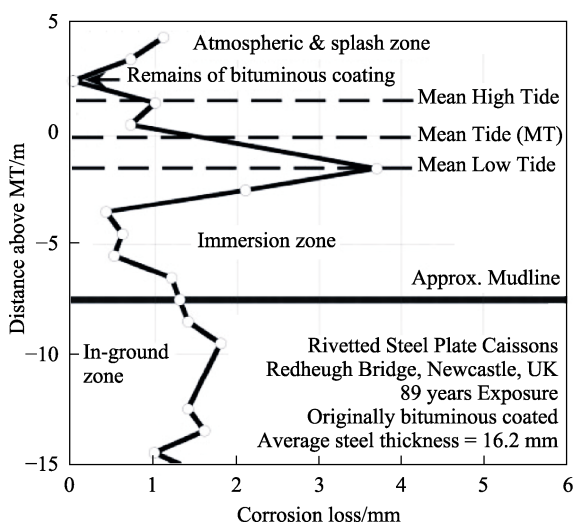


图1 英国列德豪大桥的一沉箱的腐蚀损失曲线

传统上认为,ALWC是一个“现代”现象。其实不然,早在20世纪50年代,停泊在美国圣地亚哥军港的退役舰船被发现在紧邻水线下发生严重的腐蚀^[5]。20世纪60年代,Arup和Glantz等就丹麦20个港口的钢桩腐蚀状况进行了调研,发现钢桩在服役25~35年后发生腐蚀穿孔,服役15~35年钢桩的腐蚀速率约为0.25~0.5 mm/a,最大的腐蚀速率发生在紧邻低潮线下^[6]。相较于这些早期的零星报道,20世纪80年代有关钢结构设施在紧邻低潮线下加速腐蚀的报道迅速增多,且“ALWC”的概念在此时被提出。在欧洲煤钢联营、英国贸易与工业部等机构的多个项目的资助下,人们对ALWC进行了大量研究,大大推动

了对该局部腐蚀形式的认识。文中将从ALWC的检测、发生原因、防护三个方面对现有的研究报道进行综述,期望能够使人们从如何判定ALWC的发生、如何发生、如何防护的角度对这一腐蚀形式有一定的认识。

1 ALWC的检测

与其他腐蚀形式相似,ALWC的早期检测非常重要,检测既可以通过对工程设施的现状状况进行直接评价这一被动方式来实现,又可以通过腐蚀预测的主动方式来实现。被动方式的检测可靠性高,但腐蚀预警能力差;主动方式的检测符合人们对腐蚀预警的期望,但需确定科学合理的腐蚀预测模型。

1.1 被动方式

目前,在工程上判定ALWC是否发生最可靠的方法依然是宏观观察。值得注意的是,由于ALWC往往发生在紧邻低潮线下,所以不容易被看到。同时,由于长时间的服役,工程设施表面常常被大量海洋生物覆盖,发生ALWC的区域极有可能被掩盖。根据宏观观察的工程经验,ALWC可划分为早期、中期和发展期三个阶段。在早期,表面呈现亮橙色腐蚀产物,其内层为黑色或灰色的泥状腐蚀产物,靠近基体存在金属光泽的腐蚀坑,这一阶段对预涂钢桩来说服役5年后可观察到。在中期,表面覆盖有大量海洋生物,划开后可观察到上述的早期分层腐蚀形貌,并伴随有硫化氢的臭鸡蛋味和钢的部分凹陷与减薄。在发展期,金属发生穿孔或呈现大的孔洞,即使在清除掉海洋生物与腐蚀产物后未发现穿孔,用手指敲打可导致金属构件击穿。因而,对工程设施的宏观形貌进行观察,并与上述ALWC的工程判定经验相比对,即可判定工程设施是否发生ALWC。

1.2 主动方式

主动方式的ALWC检测主要源于Melchers等人的工作,他们认为ALWC可在短期内被检测与预测^[2,7-8]。为了验证其想法,他们在澳大利亚沿太平洋的海岸线上选取13个位点进行实海实验,这些位点的海水受污染程度不同,暴露时间为1~3年。根据质量损失结果获得的腐蚀损失曲线表明,金属在多个海域3年内即可观察到明显的ALWC现象,远短于文献所报道观察到ALWC发生的时间。他们进一步定义金属在

低水区（平均低潮线与最低低潮线之间的区域）与全浸区的腐蚀损失的比值为 R ，结果发现 R 与可溶性无机氮含量（ N ）呈正相关性（如图 2 所示^[8]），且这一线性关系适用于已报道的在不同海域暴露 5~9 年的实海挂样。因而，可以用可溶性无机氮含量来预测发生 ALWC 的可能性，对受污染程度小的海域，海水的 N 值小，ALWC 的发生概率小。随着海水污染程度的增加， N 值增大，ALWC 发生概率增大。值得注意的是，这里的 N 值至少是 1 年的平均值。以 N 值为 ALWC 发生与否的指示，这种检测方法方便、快捷，但由于 N 值可能处于不断变化中， R 与 N 之间的关系式可因海域的不同存在一定的偏差，其预测精度还有待提高。

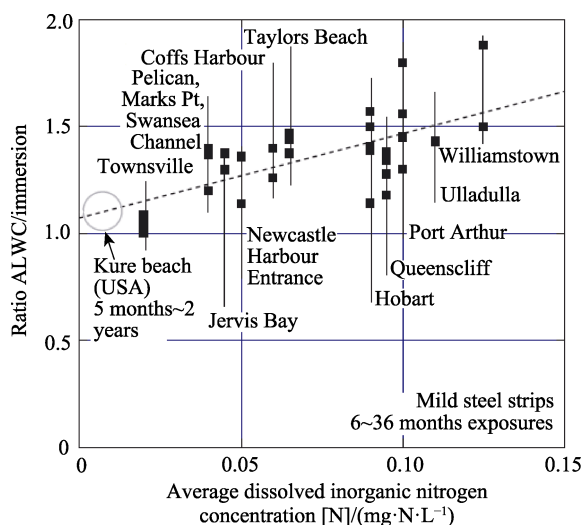


图 2 金属在低水区和全浸区腐蚀损失的比值与海水中平均可溶性无机氮含量之间的关系曲线

2 ALWC 的发生原因

认识一种腐蚀形式，离不开对其发生原因的探究。早期的研究认为，ALWC 与经典的水线腐蚀在电化学上有相似之处，氧浓差电池被认为是主要诱因^[9-10]。随着研究的深入，ALWC 的发生被认为与微生物密切相关。目前，ALWC 作为一典型微生物腐蚀（Microbially influenced corrosion, MIC）形式的观点已被广泛接受，但其机理仍然不清楚^[11-14]。

2.1 微生物是引起 ALWC 的重要原因

微生物在 ALWC 中的作用早在 20 世纪 50、60 年代就被暗示，如 Peterson 等人认为，氧浓差电池和 MIC 是导致在海水污染严重的美国圣地亚哥军港的退役舰船于紧邻水线下发生严重腐蚀的可能原因^[5]，Arup 和 Glantz 发现丹麦多个港口钢桩的最大腐蚀速率发生在紧邻低潮线下，且以渔业发达的港口更严重^[6]。进入 20 世纪 80 年代，科学家通过对腐蚀产物和代表性微生物的分析，将 ALWC 的发生与 MIC 直

接联系起来。Genin 等对服役约 20 年的钢桩进行了研究，发现 ALWC 腐蚀产物的成分包括绿锈、 FeS 、 FeS_2 、 Fe_3O_4 和 $\alpha\text{-FeOOH}$ ，硫酸盐还原菌的作用被强调^[15]。由于 ALWC 的复杂性，基于腐蚀产物和代表性微生物的分析往往难以给出全面合理的解释，如 Gubner 调查了欧洲 22 处港口的钢桩，发现尽管在钢桩腐蚀产物层中均检测到硫酸盐还原菌及其特征性产物 FeS ，但是在其中 10 个港口的钢桩并未发生 ALWC^[16]。

Melchers 等人的工作为微生物作为 ALWC 的重要原因提供了强有力的支持^[2,7-8]。他们不以腐蚀产物和代表性微生物为参量，而是以海水的平均可溶性无机氮含量为参量，发现 ALWC 的发生与该参量的大小呈正相关性。由于无机氮作为海水中微生物的重要营养物质，往往是其生长代谢的限制因素，进而微生物在 ALWC 中的重要作用被证实。同时，他们进一步对 20 世纪 80 年代 ALWC 现象突出的问题给出了合理解释。他们认为自 20 世纪 50 年代，水上污染、化肥渗出、污水排放等原因导致海水污染水平和可溶性无机氮含量的提高，进而使得置于其中的钢桩遭受 MIC，ALWC 现象是由早期或长期的海水污染与相对缓慢的腐蚀响应共同作用的结果，只是在 80 年代才明显显现出来而已^[17]。

2.2 微生物对 ALWC 的作用机制不清晰

目前，微生物对 ALWC 的作用机制不清晰主要体现在关键微生物的认定及其腐蚀作用机制存在争议。得益于高通量测序等分子生物学技术的发展，腐蚀产物层中的微生物多样性得以呈现^[18-19]，这为 ALWC 关键微生物的认定提供了便利。目前人们往往在特定的某一时间点，根据宏观腐蚀形貌选择腐蚀程度不同的区域，进行生物膜的群落结构组成分析，确定可能的腐蚀促进菌株。如 Hicks 等发现发生与未发生 ALWC 的表面生物膜中的微生物群落结构不同，在发生 ALWC 的部位微生物大多隶属于 α -、 β -变形菌门和蓝细菌门，且有铁氧化菌 *Siderooxidans litho-autotrophicus* 和铁还原菌 *Rhodospirillum rubrum* 的存在，他们认为这些铁代谢菌有可能起到腐蚀促进作用^[20]。Paisse 等发现尽管在发生与未发生 ALWC 的部位生物膜中均分布有硫酸盐还原菌，但在发生 ALWC 的部位活性硫酸盐还原菌的比例明显高，且存在隶属于 *Desulfobacula* 和 *Desulfospira* 属的特异性菌株，进而他们提出这些特异性硫酸盐还原菌菌株可能是引起 ALWC 的重要原因^[21]。Marty 等对部分浸于海水中 9 个月的碳钢发生与未发生 ALWC 的部位生物膜中的硫酸盐还原菌的群落组成进行了分析，发现发生 ALWC 部位的生物膜中存在具有直接电子传递功能的硫酸盐还原菌 *Desulfopila corrodens*，且其占有很高比例，*Desulfopila corrodens* 的重要性被提出^[22]。这些研究一方面推动了人们对引起 ALWC 的关键微

生物的认识,另一方面所体现出的在认定 ALWC 关键微生物上的争议也值得人们深思。关键微生物的认定存在争议除与海域、季节、材料等的差异有关外,忽视生物膜的动态演变过程也是一重要原因。生物膜中微生物的数量与群落结构组成随时间的推演而变化^[23-25],微生物对 ALWC 的作用会不会在不同的阶段有不同的微生物起作用?如果有,不同阶段起作用的微生物是什么?这些问题还未有报道进行解答。因此,在后续研究中,突出动态演变过程,将对 ALWC 关键微生物的认定争议的解决提供思路。

缺乏大气-海水跃变体系下典型菌株及其协同作用对腐蚀的影响研究,是造成关键微生物对 ALWC 作用机制不清晰的一个重要原因。目前有关关键微生物对 ALWC 的作用机制报道主要借鉴已有的海水全浸区研究结果,如特定硫酸盐还原菌的直接电子传递机制^[26-27]、铁氧化菌与铁还原菌的铁代谢协同机制^[28]、硫酸盐还原菌与硫氧化菌的硫代谢协同机制等^[29]。相较于海水全浸区,ALWC 发生所在的大气-海水跃变环境区在溶解氧、水等的分布上存在剧烈变化^[30],溶解氧和水不仅对腐蚀产生直接影响,还可影响微生物的生长分布代谢及其在金属材料表面的附着与分布,因而可能使得微生物对 ALWC 的作用机制不同于海水全浸区的。遗憾的是,目前还未有文献关注大气-海水跃变体系下典型菌株及其协同作用对金属材料腐蚀过程的影响。因而,在后续研究中,可在获得不同的阶段对 ALWC 起作用的关键微生物的基础上,在大气-海水体系下研究典型菌株及不同菌株之间的协同作用对腐蚀过程的影响,揭示其作用机理,进而推动关键微生物对 ALWC 的作用机制存在争议问题的解决。

3 ALWC 的防护

ALWC 的防护与其他腐蚀形式既有相似之处,也有面向其具有 MIC 性质的局部腐蚀特性的专用腐蚀防护方法,以下将针对新建和已建钢结构设施分别进行介绍。

对于新建和规划中的钢结构设施,可从环境、选材、设计、外加防护四个方面实施腐蚀防护。从环境的角度,由于 ALWC 的发生概率与海水中可溶性无机氮的含量存在正相关性,所以如果可能的话,控制或降低周围海水中的可溶性无机氮含量是应对 ALWC 的一种有效方式。对海水而言,其具体措施包括降低排放污水中氨、硝酸盐、亚硝酸盐的含量,减少化肥渗出等。从选材的角度,鉴于微生物对 ALWC 的重要性,可以选择含具有杀菌作用元素(如 Cr、Cu、Mo 等)的低合金钢,但目前这种方式的有效性与经济性还有待进一步评判。如 Moulin 等测定了中碳钢、含 1%与 2% Cr、含 0.5% Mo、含 0.5% Cu 的钢试样在实海低水区暴露 11 个月的腐蚀速率与微生

物数量,发现合金元素的添加对微生物的数量和腐蚀速率没有显著影响,但实验室加速实验表明,微生物的存在可使得腐蚀速率显著增大,且 CrCuNi 钢的腐蚀速率小于中碳钢和只添加 Cr、Mo、Cu 或 Si-Cr 的合金钢^[31]。从设计的角度,应留有足够的腐蚀余量,值得注意的是,腐蚀余量的设计不应以海水全浸区的为标准,而应考虑紧邻低潮线下的高腐蚀速率。从外加防护的角度,比较传统的方法是阴极保护与涂层,且两者往往联用。实施阴极保护,其不仅可以对 ALWC 进行防护,亦可对其他形式的腐蚀进行防护。据报道,如果不施加阴极保护,ALWC 可导致钢结构设施的使用寿命缩短 2/3^[3]。对构件进行重防腐涂装的涂装,将降低阴极保护所需的外加电量和牺牲阳极用量,同时也能够在阴极保护失效时确保腐蚀防护效果。同时,如果条件不允许实施阴极保护的话,要确保整个构件的电连接性,以保证后续需要施加阴极保护时能够顺利实施。

对于已建钢结构设施,除可以对整个构件使用传统的阴极保护与涂层保护外,还可采取周期性物理清洗和针对 ALWC 发生局部区域的高效防护方法。周期性物理清洗作为一种低成本的新方法,其初衷是清除掉表面的腐蚀产物层及部分微生物,进而破坏 ALWC 的发生条件达到防护效果。在实际过程中,这一方法需慎重,因为其在抑制由微生物附着引起的腐蚀加速的同时,使得构件暴露新鲜表面进而使腐蚀速率增大,防护效果取决于两者之间的博弈,风险系数大。如 Moulin 等在不同的港口对钢桩进行了相似的周期性物理清洗处理,发现防护效果因海域不同而存在差异,有的海域这一方法对后续腐蚀没有显著影响,有的则加速,也有的起到较好的防护效果^[31]。英国的 Mott MacDonald 公司及其合作者提出了一种新的针对 ALWC 发生区域的高效环境友好型防护技术,该技术包括三个步骤:清洗、杀菌和碱性涂层沉积。清洗是采用物理方法将 ALWC 发生区域的表面腐蚀产物层去除,杀菌是通过电解海水产生短期、控制剂量的氯气来处理清洗过的表面以杀灭微生物,碱性涂层沉积是通过海水中天然盐类的沉积原位形成保护性涂层。该技术施工周期短(5~7 天)、不需要大型设备,其获得了英国政府、工程与物理研究协会提供的 62.5 万英镑的项目资助。目前该技术已经商品化,据报道,采用其防护的设施在十几年内未再发生 ALWC^[32]。

4 结语

ALWC 作为海洋环境中的一典型局部腐蚀形式,具有严重的腐蚀破坏性和分布普遍性。为了降低 ALWC 带来的腐蚀损失,可从早期检测、发生原因认知、科学防护三个方面做工作。

1) 采取主动方式与被动方式相结合,充分发挥

前者腐蚀预测、后者检测可靠性高的优势, 实现对 ALWC 的精准早期检测。

2) 针对微生物是引起 ALWC 的重要原因但其作用机制不清晰的现状, 在后续研究中应突出动态演变过程, 结合高通量测序等分子生物学技术, 确定在不同的阶段影响 ALWC 的关键微生物, 并进一步在大气-海水体系下研究典型菌株及其协同作用的影响, 提出微生物对 ALWC 的作用机制。

3) 在利用阴极保护与涂层保护传统技术的基础上, 根据 ALWC 所具有的 MIC 与局部腐蚀特性, 开发有针对性的高效环境友好型防护技术, 并评判其防护效果与可行性。

参考文献:

- [1] BEECH I B, CAMPBELL S A. Accelerated Low Water Corrosion of Carbon Steel in the Presence of a Biofilm Harboring Sulphate-reducing and Sulphur-oxidising Bacteria Recovered from a Marine Sediment[J]. *Electrochimica Acta*, 2009, 54: 14-21.
- [2] MELCHERS R E, JEFFREY R J. Accelerated Low Water Corrosion of Steel Piling in Harbours[J]. *British Corrosion Journal*, 2013, 48: 496-505.
- [3] MORLEY J. Corrosion of Steel Foundation Caissons from the Old Redheugh Bridge in Newcastle upon Tyne[J]. *British Corrosion Journal*, 1986, 21: 177-184.
- [4] BREAKELL J E, SIEGWART M, FOSTER K, et al. Management of Accelerated Low Water Corrosion in Steel Maritime Structures[M]. London: CIRIA, 2005.
- [5] PETRESON M H, WALDRON L J. Investigation of Mild Steel Corrosion Rate in San Diego Harbor[J]. *Corrosion*, 1961, 17: 188t-190t.
- [6] ARUP H H, GLANTZ G. An Evaluation of Corrosion of Sheet Steel Piling in Danish Harbors[C]// *Proc 2nd Int Cong Metallic Corrosion*. New York: [s.n.], 1963: 424-431.
- [7] MELCHERS R E, JEFFREY R. Corrosion of Long Vertical Steel Strips in the Marine Tidal Zone and Implications for ALWC[J]. *Corrosion Science*, 2012, 65: 26-36.
- [8] MELCHERS R E. Influence of Dissolved Inorganic Nitrogen on Accelerated Low Water Corrosion of Marine Steel Piling[J]. *Corrosion*, 2012, 69: 95-103.
- [9] EVANS U R. Water-line Corrosion[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 1936, 55: 210-213.
- [10] EVANS U R. The Corrosion and Oxidation of Metals: Scientific Principles and Practical Applications[M]. London: Edward Arnold, 1960.
- [11] CHEUNG C W S, WALSH F C, CAMPBELL S A, et al. Microbial Contributions to the Marine Corrosion of Steel Piling[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 1994, 34: 259-274.
- [12] JEFFREY R, MELCHERS R E. Effect of Vertical Length on Corrosion of Steel in the Tidal Zone[J]. *Corrosion*, 2009, 65: 695-702.
- [13] JEFFREY R, MELCHERS R E. Corrosion of Vertical Mild Steel Strips in Seawater[J]. *Corrosion Science*, 2009, 51: 2291-2297.
- [14] JAMES M N, HATTINGH D G. Case Studies in Marine Concentrated Corrosion[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2015, 47: 1-15.
- [15] GENIN J M R, OLOWE A A, RESIAK B, et al. Microbially Induced Corrosion of Steel Sheet Piles in a Harbour and the Presence of Green Rust Two compound, in COSTA J M and MERCER A D, *Progress in the Understanding and Prevention of Corrosion*[M]. London: The Institute of Metals, 1993: 1177-1184.
- [16] GUBNER R J. Accelerated Low Water Corrosion of Carbon Steel in Tidal Waters[D]. UK: University of Portsmouth, 1998.
- [17] MELCHERS R E. Modelling Long Term Corrosion of Steel Infrastructure in Natural Marine Environments, in LIENGEN T, FERON D, BASSEGUY R, et al., *Understanding biocorrosion*[M]. UK: Woodhead Publishing, 2014.
- [18] RAJALA P, CARPEN L, VEPSALAINEN M, et al. Influence of Carbon Sources and Concrete on Microbially Induced Corrosion of Carbon Steel in Subterranean Groundwater Environment[J]. *Corrosion*, 2016, 72: 1565-1579.
- [19] 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.
- [20] HICKS R E. Structure of Bacterial Communities Associated with Accelerated Corrosive Loss of Port Transportation Infrastructure[R]. Madison: Great Lakes Maritime Research Institute, 2007.
- [21] PAISSE S, GHIGLIONE J F, MARTY F, et al. Sulfate-reducing Bacteria Inhabiting Natural Corrosion Deposits from Marine Steel Structures[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, 97: 7493-7504.
- [22] MARTY F, GUEUNE H, MALARD E, et al. Identification of Key Factors in Accelerated Low Water Corrosion through Experimental Simulation of Tidal Conditions: Influence of Stimulated Indigenous Microbiota[J]. *Biofouling*, 2014, 30: 281-297.
- [23] HUTTUNEN-SAAIRIVIRTA E, RAJALA P, MARJAAHO M, et al. Ennoblement, Corrosion, and Biofouling in Brackish Seawater: Comparison between Six Stainless Steel Grades[J]. *Bioelectrochemistry*, 2018, 120: 27-42.
- [24] 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.
- [25] THIERRY D. Onset of Microbial Influenced Corrosion

- (MIC) in Stainless Steel Exposed to Mixed Species Biofilms from Equatorial Seawater[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2017, 164: C532-C538.
- [26] DEWALD E, MACKINNON A, TOMMASINI R, et al. Marine Sulfate-reducing Bacteria Cause Serious Corrosion of Iron under Electroconductive Biogenic Mineral Crust[J]. Environmental Microbiology, 2012, 14: 1772-1787.
- [27] BEESE-VASBENDER P F, NAYAK S, ERBE A, et al. Electrochemical Characterization of Direct Electron Uptake in Electrical Microbially Influenced Corrosion of Iron by the Lithoautotrophic SRB *Desulfopila Corrodens* Strain IS4[J]. Electrochimica Acta, 2015, 167: 321-329.
- [28] WANG H, HU C, ZHANG L, et al. Effects of Microbial Redox Cycling of Iron on Cast Iron Pipe Corrosion in Drinking Water Distribution Systems[J]. Water Research, 2014, 65: 362-370.
- [29] LIU W. Rapid MIC Attack on 2205 Duplex Stainless Steel Pipe in a Yacht [J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 42: 109-120.
- [30] 胡杰珍. 海洋环境跃变区碳钢腐蚀行为与机理研究[D]. 北京:北京科技大学, 2016.
- [31] MOULIN J M, MARSH E, CHAO W T, et al. Prevention of Accelerated Low-water Corrosion on Steel Piling Structures due to Microbially Influenced Corrosion Mechanisms[R]. Report EUR 20043 EN, 2001.
- [32] MADEN G. A Sustainable and Cost-Effective Treatment for Accelerated Low Water Corrosion[J]. IABSE Symposium Report, 2013, 99: 1747-1751.