

码头钢结构的微生物腐蚀及其防护

戚鹏^{1,2,3}, 张盾^{1,2,3}, 王毅^{1,2,3}, 吴佳佳^{1,2,3}, 孙艳^{1,2,3}

(1.中国科学院海洋研究所 中国科学院海洋环境腐蚀与生物污损重点实验室, 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. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋腐蚀
与防护开放工作室, 山东 青岛 266237)

摘要: 以码头为对象, 阐述了码头的常见结构形式和钢结构在码头建设中的应用现状, 分析了港口码头的微生物腐蚀研究现状、典型的腐蚀微生物种类和微生物代谢对金属材料的影响, 论述了码头的微生物腐蚀防控方法。由于微生物腐蚀的破坏性强、发生隐蔽, 确定和监测微生物腐蚀的发生是目前的一大技术难题, 文中评述了现有的微生物腐蚀检测技术, 并展望了微生物腐蚀检测技术的发展方向。

关键词: 微生物腐蚀; 码头; 防护技术; 监测技术

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.10.008

中图分类号: TG172.7 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)10-0045-06

Microbiologically Influenced Corrosion and Protection of Steel Structure in Wharf

QI Peng^{1,2,3}, ZHANG Dun^{1,2,3}, WANG Yi^{1,2,3}, WU Jia-jia^{1,2,3}, SUN Yan^{1,2,3}

(1. CAS Key Laboratory of Marine Environmental Corrosion and Bio-fouling, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, China;

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

3. Open Studio for Marine Corrosion and Protection, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

ABSTRACT: In this paper, we briefly introduced the common structural forms of the port wharf, summarized the application status of steel structure in wharf construction, analyzed the research status of MIC in port wharf, typical species of marine corrosive bacteria, and effects of microbial metabolism on metal materials, discussed the methods for the prevention and control of MIC of the wharf. Since the microbiologically influenced corrosion is featured with high destructive effect and covertness, it is still a major technical problem to determine and monitor the occurrence of MIC. This paper reviewed existing MIC detection technology and prospected the future direction of MIC monitoring and detection technology.

KEY WORDS: microbiologically influenced corrosion; wharf; corrosion and protection technology; monitoring and detection technology

“一带一路”、“海洋强国战略”等重大战略规划为我国海洋经济带来了前所未有的发展机遇, 海洋工程装备和船舶在服役过程中不可避免地要遇到各种

腐蚀问题^[1]。根据最新的腐蚀调查结果, 2014年我国的腐蚀总成本约占当年GDP的3.34%, 总额超过21 000亿元人民币, 相当于每个中国人当年承担1 555元的腐

收稿日期: 2018-07-13; 修订日期: 2018-08-16

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2014CB643304); 国家自然科学基金项目(41506094)

作者简介: 戚鹏(1986—), 男, 山东人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为腐蚀微生物快速检测。

通讯作者: 张盾(1965—), 女, 辽宁人, 博士, 研究员, 主要研究方向为微生物腐蚀机理及控制。

蚀成本^[2-3]。微生物腐蚀是指由微生物引起的,或者由于其群体效应或代谢过程引起的腐蚀行为变化。微生物腐蚀几乎可以在所有常用工程材料表面发生,参与了工程材料在海洋底泥区、全浸区、潮差区和飞溅区的腐蚀过程,是一类不容忽视的腐蚀因子^[4-6]。有报道发现,微生物腐蚀的腐蚀速率可到常规腐蚀的10倍,其最大速率可达4 mm/a,会在很短时间内对海洋工程结构造成无法修复的伤害^[7]。

码头是水运的枢纽和核心结构,其主要作用包括停泊船只、装卸货物、客流运输等。近年来,码头建设日新月异,超级码头的建设不仅仅是经济建设的需求,更是城市形象和经济实力的体现。码头在服役期间,尤其是在海洋环境中服役过程中,不可避免地受到自然环境的考验。针对典型的环境因素,如波浪冲刷、物理磨蚀、气候变化对码头损害的影响,已经有了系统的检测方法和评价技术^[8-10]。然而,微生物腐蚀对码头服役的影响却依旧报道较少,目前已报道的微生物腐蚀监测手段,无论在理论方面还是在应用方面,都远未达到实际应用的需求,新型的微生物腐蚀监测手段仍待开发。

1 码头的结构形式

码头的结构形式有重力式码头、板桩式码头、高桩式码头和混合式码头四种^[11-12]。

重力式码头是靠码头自重、调料结构和地基强度保持其结构稳定性的,是我国应用较为普遍的一种码头形式,其优点是承载能力强,能够承受较大的地面和船舶载荷,对地面载荷和卸载工艺的适应能力强、施工简单、抗冻性和抗冰性好。重力式码头适合在地基较好、有大量砂石等建筑材料的环境修建。重力式码头由胸墙、墙身、基础、墙后回填土组成。基础的主要作用是分散胸墙和墙身传下的外力,以减少外力对地基应力的作用,阻止码头沉降。同时,重力式码头的基础也可以保护地基,减少波浪和水流对地基的冲刷作用,进而确保墙身的稳定性。墙身和胸墙是重力式码头的主体结构,是墙后回填土的存储地,主要用来承受码头上的各种外来作用力,并将作用力稳定传递至基础部分,此外墙身和胸墙还是码头功能组件的重要固定载体,用以固定各种管沟、轨道、爬梯等。墙后回填土的主要作用是形成码头地面和缓冲地面压力,通常采用粒径和内摩擦角较大的材料回填。

板桩码头是由下沉入地的基板桩墙和锚碇系统共同维持其结构稳定性。板桩码头的优点包括结构简单、材料用量少、施工方便,但其稳定性和耐久性不如重力式码头。主要应用于能够沉入板桩的环境,过去多用于中小码头的建设。板桩码头主要包括板桩墙、拉杆、锚碇结构、导梁和胸墙。板桩墙是板桩结构的主体,是沉入地基中的连续板桩结构,其作用是

保护地基免受波浪的冲刷,形成码头直立岸壁;拉杆的作用是维持板桩墙与锚碇结构的载荷传递方向,减少墙后土压对板桩结构的影响;锚碇结构用于承受拉杆拉力;导梁用于连接板桩和拉杆,保证拉杆和板桩的作用;帽梁相当于重力式码头中的胸墙,用于承受码头上的各种外来力。

高桩码头的结构简单,能够承受较大的载荷,但其耐久性比重力式码头和板桩码头差。高桩码头主要包括以下结构:上部结构、桩基、挡土结构和岸坡。上部结构是指码头地面部分,将桩基有机连接,并将地面外力传递至桩基,是各种设备和组件的固定载体;桩基用于支撑上部结构,并将上部结构传至的外力载荷传给地基,稳定地基结构;挡土结构由设置桩墙和挡墙组成,主要为了减少码头宽度和岸坡衔接距离;岸坡要求具有足够的稳定性,对特殊环境还需进行护坡处理,以降低波浪和水流的冲刷。

混合式码头根据特定的情况因地制宜采用的结构形式,通常采用直立式和斜坡式混合。

此外,码头的正常运转,还需要各种辅助设备和组件的搭配,这些设备可以成为码头设备,包括固定设备,爬梯系统,水电管道和装卸设备等。码头设备的主要作用在于保障船舶系靠和装卸作业。

2 钢结构在码头建设中的应用

钢结构是指热轧型钢、钢板、钢管或冷加工的薄壁型钢等钢材通过焊接、螺栓连接等连接形式制造的结构。与混凝土结构和木质结构的码头相比,采用钢结构建设码头具有以下优势:首先是质量低、强度高,钢结构可用于大跨度的建筑,充分发挥钢材高抗弯和抗拉的优势,大大降低了码头结构自重;其次是钢材加工工业化程度高、精度高、施工快、操作简易;三是钢结构的抗地基不均匀沉降能力强,由于港口陆地部分多是通过回填处理形成,地质沉降还未成熟,采用钢结构可以降低地基不均匀沉降产生的建筑变性;四是钢结构的受力性能优越,具有较好的韧性和塑性,能够提升建筑物的抗震性能。除此以外,钢结构还是一种无污染的环保型建筑材料,施工不受季节条件限制^[13]。目前国内的青岛港、上海港、烟台港等码头都是钢结构建设的码头。

钢管桩和钢板桩在码头建设中应用广泛,选择适宜的防护措施是建设码头钢结构的一项重要问题^[14-15]。钢管桩的承载能力、抗弯能力和耐锤击能力均较强,比较适合建设大型码头工程及自然条件较恶劣的开敞式码头。Q235、16Mn、15MnV钢是码头、港口工程中最常用的钢管桩钢材。由于码头建设对钢管桩的强度、承载能力要求更高,故通常采用经济性更好的锰钢^[16-17]。此外,码头工程中通常不采用防腐蚀特种钢,这是由于耐蚀特种钢的价格昂贵,经济性

远不如采用普通钢种搭配其他防腐蚀措施。钢板桩结构的优点是强度高、质量轻、隔水性能好、耐久性强,能够大大减少施工所需的混凝土使用量^[18-19]。根据生产工艺的差异,钢板桩可以分为冷弯薄壁钢板桩和热轧钢板桩。二者在钢种牌号、性能参数等方面并无明显差异,仅仅是加工过程存在一定差异。钢种选择主要按照屈服强度等级选用,国内常用牌号分为:Q235A—Q345D 和 09CuP—09CuPCrNi-A 两类,前者一般用于常规工程,后者则满足耐候需求,如海岸护堤、码头、人工岛礁等。

3 码头中钢结构的微生物腐蚀

虽然关于微生物腐蚀的报道已经有了 100 多年的历史,但直到近十几年来,关于微生物腐蚀的研究才越来越受到人们的重视。不同行业、领域针对微生物腐蚀也有了专属的名称,如低水区加速腐蚀(Accelerated Low Water Corrosion)、最低天文潮腐蚀(Lowest Astronomical Tide Corrosion)和加速淡水腐蚀(Accelerated Fresh Water Corrosion)^[20-24]。从这些名字中可以看出,微生物腐蚀主要发生在最低潮位附近,因此观察微生物腐蚀的发生是具有一定难度的。

低水位加速腐蚀(Accelerated Low Water Corrosion)是近 20 年来逐渐被报道并引起关注的一种腐蚀现象,特指发生在海岸线附近工程、建筑的加速局部腐蚀过程的腐蚀现象。如果不及时发现并处理低水位加速腐蚀,就可能引起建筑材料腐蚀穿孔、回填损失,严重影响到海洋工程的服役安全和寿命。当前,低水位加速腐蚀可以被认为是海洋工程材料微生物腐蚀(Microbiological Induced Corrosion)的一种,但其腐蚀产物与微生物有机物质之间的关系仍未明确。在 2005 年,国际航运协会(PINAC)和世界建筑工业研究与情报协会(CIRIA)都发布了关于定义和控制低水位加速腐蚀的相关条例,将低水位加速腐蚀规定为海洋工程设计及施工必须考虑的一项重要问题。以港口、码头建设中常用的钢桩为例,钢桩经常处于无防护状态或低保护状态,很容易受到海水介质的侵蚀,因此在设计海洋工程结构,尤其是码头、港口类长时间服役工程时,钢桩的腐蚀速率是必须考虑的一项重要数据。通常认为,钢桩的腐蚀速率与钢桩所处海域、气候、暴露条件以及测试方法都有关系,以在浪花飞溅区或潮差区的腐蚀速率最快,在 0.08~0.2 mm/a 之间。然而,在低水位加速腐蚀的情况下,钢桩的腐蚀速率能够达到 0.5 mm/a 甚至更高,是海水腐蚀平均速率的 4 倍以上,大大缩短了海洋工程结构的服役年限。图 1 展示了裸露钢材在模拟潮汐海水中腐蚀速率随不同位置的变化,可以看出,由微生物腐蚀引起的腐蚀速率最大可达 4 mm/a,平均腐

蚀速率也达 0.3 mm/a,说明微生物腐蚀能对海洋工程的安全产生巨大影响^[7]。

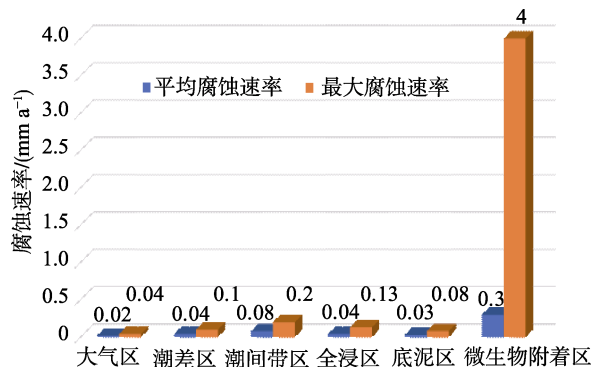


图 1 裸露钢材在模拟潮汐海水中的腐蚀速率变化

为了更好地研究港口、码头的微生物腐蚀(低水区加速腐蚀)现象,欧盟委员会在 2008 开展了一项为期 3 年的 MICSIPe (Microbiologically Induced Corrosion of Steel Structures in Port Environment) 研究项目。在欧洲范围内选取了 3 个遭受微生物腐蚀的码头(法国的 Boulogne-surMer 码头、英国的 Dover 码头和 Shoreham 码头)作为研究主体,对其微生物腐蚀产物、微生物多样性以及腐蚀检测方法进行了深入探索^[25]。国内尚未进行系统微生物腐蚀调查。

与微生物腐蚀相关的微生物多种多样,既有原核生物(细菌及古细菌),又包括在微尺度的真核生物(真菌,藻类以及原生动物)^[26-27]。其中硫酸盐还原剂(SRB)是最重要也是研究最广泛的微生物,由 SRB 引起或参与的腐蚀过程约占所有微生物腐蚀的 1/2。SRB 在自然界中分布在钢铁表面氧化膜及锈层下面,在温度高于 70 °C,压力为 700~1000 Pa 的地层中也有极强的生命力。这类细菌的特点是既能利用有机酸为给氢体,也能直接利用氢,以硫酸盐为最终电子受体进行还原作用,最终产物是硫化物,如硫化氢等。SRB 的腐蚀机理一直是微生物腐蚀的研究重点,针对 SRB 能够加速腐蚀的机理研究已经经历了一个多世纪,目前已经形成的机理包括阴极去极化机理、浓差电池机理、代谢产物机理、酸腐蚀机理和阳极固定机理。近几年,具有其他代谢特点的细菌,如硫氧化菌、铁氧化菌、巯基还原菌等,也逐渐引起人们的关注,其代谢过程或生物膜性质会改变工程材料的表面性质,进而影响其腐蚀过程^[28]。

随着生物分子技术的不断进步,鉴定微生物种群也变得越来越容易。同一海域范围内,在腐蚀区域存在的微生物种类大致相同,微生物种群结构随腐蚀位置、工程材料以及防护程度等因素表现出一定差异。在不同海域中,受海水温度、盐度和微量元素等因素的影响,在腐蚀区域存在的微生物种类会存在较明显差异。在码头、港口中,对钢铁材料过程影响最大的细菌种类包括硫酸盐还原菌(SRB)、硫氧化菌(SOB)

以及铁氧化菌 (IOB)。其中 SRB 能够酸化局部腐蚀环境, 加速腐蚀过程, 而 SOB 和 IOB 则对微生物腐蚀具有抑制作用^[25]。在微生物腐蚀严重且腐蚀时间较长的区域, 微生物的种群结构随空间变化, 这种空间的变化可以视为微环境中的硫循环代谢, SOB 和 IOB 能够将 SRB 产生的硫化物部分氧化消耗。通常而言, SRB 处于微生物种群内层, 而 SOB 或 IOB 则分布在微生物种群外层, 但一些具有硝酸盐还原性质的 SOB (*Thiothrix sp.* 或 *Thiomicrospira sp.*) 也可以在微生物种群内层被发现。除此以外, 在微生物种群结构中, SRB 的比例与码头、港口中钢铁材料的微生物腐蚀速率密切相关, 在微生物腐蚀速率高的区域, SRB 种群所占比例也会较大。这可能是由于钢铁材料, 尤其是碳钢, 是 SRB 代谢活动中一种重要的能量、电子来源。值得一提的是, 在微生物种群结构中, SRB 的种类也具有多样性, 不同 SRB 种群的基因序列、代谢活性具有一定差异, 此现象在微生物腐蚀严重的区域表现得更加明显, 但不同 SRB 种群的分布规律以及

种群比例未表现出一定的规律特点。

光合细菌是自然界中普遍存在、具有原始光能合成体系的原核生物, 是对在厌氧条件下进行不放氧光合作用的细菌的总称。光合细菌也是腐蚀区域微生物种群的一个组成部分, 主要分布于水生环境中光线能透射到的缺氧区。在码头、港口中, 与微生物腐蚀轻微的区域相比, 在微生物腐蚀严重的区域中, 尤其是低水区, 光合细菌在总微生物种群中占有较高的比例^[25], 这也可能成为标示微生物腐蚀速率的一项重要参数。

微生物生长繁殖离不开水、碳源、氮源、无机盐和生长因子等营养物质。虽然微生物的分类方式有很多, 但对腐蚀微生物而言, 按照其能量代谢方式对腐蚀微生物研究是一种较为合理的方式, 因为微生物的代谢方式直接影响到其在材料表面的代谢活性, 且不同代谢方式对腐蚀过程产生的影响也各不相同。表 1 展示了不同微生物代谢方式对金属材料局部腐蚀因素的影响^[25]。

表 1 典型微生物代谢过程及其对局部金属材料表面的影响

能量获取方式	电子供体	电子受体	代表性微生物	对局部环境的影响
光能自养/异养微生物	H ₂ O	体内物质	光合微生物 (如蓝细菌)	提升 O ₂ 浓度, 产生 H ₂ O ₂ , pH 上升, 可能产生 H ₂
	H ₂ S, S		绿色硫细菌, 紫色硫细菌	产生腐蚀性中间价态硫物质, 降低 pH
化能异养微生物	有机物 (多糖, 蛋白, 脂肪酸等)	无	发酵微生物 (如梭菌)	降低 pH, 产生 H ₂ , CO ₂ , 产生 H ₂ S
		O ₂	好氧菌 (如假单胞菌)	降低 O ₂ 浓度, 降低 pH
		SO ₄ ²⁻ , S ₂ O ₃ ²⁻ , S Fe ³⁺ , Mn ³⁺	SRB 铁还原菌, 锰还原菌	影响 pH, 产生硫化物膜 破坏氧化铁/氧化锰保护层
化能自养微生物	H ₂ O	SO ₄ ²⁻ , S ₂ O ₃ ²⁻ , S	氢营养型 SRB	影响 pH, 产生硫化物保护膜, 直接从金属获得电子
		CO ₂ →CH ₄	产甲烷菌	部分细菌能直接从金属获得电子
	CO ₂ →CH ₃ COOH	产乙酸菌	影响 pH	
	NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻	O ₂	硝化细菌	降低 pH 和氧浓度
	Fe ²⁺	O ₂	好氧铁氧化微生物	降低 pH, 影响 O ₂ 浓度, 沉积氧化铁
Mn ²⁺	NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻	厌氧铁氧化微生物	降低 pH, 影响 O ₂ 浓度, 沉积氧化铁	
	O ₂	锰氧化菌	降低 pH, 沉积氧化锰	

4 微生物腐蚀的检测手段

由于微生物腐蚀的破坏力和不可预知的性质, 检测微生物腐蚀的发生是非常有必要的。目前, 检测低水位加速腐蚀最常用的方法是通过肉眼观察, 在低潮位海平面上下观察到有较窄的附着力较差的黄色斑块, 即可推断有低水区加速腐蚀现象的发生。该黄色条带通常认为是微生物菌群的聚集体, 在黄色条带下方, 会有黑色污泥将金属基底覆盖, 该黑色污泥主要是微生物腐蚀的产物, 通常伴随有明显的臭味, 在黑色污泥下方的金属基底表面会发现大量的金属腐蚀坑。为了保证海洋工程结构的安全和使用寿命, 在工程建设前期就需要将低水区加速腐蚀的检测以及维

护纳入考虑。通常而言, 低水区加速腐蚀发生的具体位置是不能从外观观察到的, 对海洋工程材料的检查也需要配合潮水的涨落, 且低水区加速腐蚀的发生也无明显规律可言, 因此, 前期预测低水区加速腐蚀的发生是很困难的^[7, 25]。

肉眼观察的方法受观测条件和时间的影响, 无法准确、及时地发现微生物腐蚀破坏, 开发其他检测手段是非常有必要的。目前已开发的检测手段包括以下三类: 一是化学检测法, 通过测量微生物腐蚀引起的 pH 变化、腐蚀产物变化和氯离子等化学信息推测微生物腐蚀的发生; 二是生物检测法, 通过分离、培养微生物, 确定腐蚀样品中微生物的种群类别; 三是显微镜观察法, 通过显微镜分析确定微生物腐蚀发生区

域微生物的种群特征。然而,以上这些方法都是间接的推测,无法提供微生物腐蚀发生最重要、最直接的证据。

开发新型腐蚀微生物检测方法为快速确定微生物腐蚀的发生提供了可能。通过快速确定样品中腐蚀微生物的种群浓度、生物活性和分布特征,可以实现腐蚀微生物状态和腐蚀行为的整合分析,进而确定微生物腐蚀发生的关键特征因子和重要变化规律。笔者在腐蚀微生物检测领域做了大量研究,针对最重要、最复杂的腐蚀微生物SRB开发了新型快速检测技术,能够将检测时间缩短至2天以内,并将检测限降低至50 cfu/mL以下,上述指标在已报道的腐蚀微生物定量分析检测技术中处于领先水平^[29-30]。

5 码头微生物腐蚀的防控技术

在金属材料表面,一旦有发生微生物腐蚀的风险,最重要的一条防护原则是“越早介入,成效越高(Early Intervention is Key to Cost Effective Repairs)”。确定微生物腐蚀是否在码头、港口中金属工程材料发生,最有效也是最常用的办法就是肉眼观察,再结合金属材料厚度测量,腐蚀电位测量以及微生物腐蚀实验室测试对腐蚀过程进行确认。一旦微生物腐蚀发生,相关防护措施也必须立即实施。港口、码头工程位于开放的海洋环境中,其常用的微生物腐蚀防控方法包括涂层包覆以及阴极保护。

防护涂层大体上分为非金属涂层和金属涂层,其中非金属涂层一般采用耐盐耐酸的环氧漆、环氧煤沥青等;金属涂层一般热喷涂锌、铝或锌铝合金。使用涂层包覆能够避免金属表面直接被微生物附着,且涂层中添加的杀菌剂也会大大减少细菌污垢的机会^[31-32]。

阴极保护法会使阴极极化的表面吸引SRB等微生物,因此阴极保护法的使用应尽量在微生物腐蚀的区域,以使得抑制腐蚀所需的阴极保护电位负值更大,否则微生物腐蚀的速度会相较于之前没有阴极保护时而言更快。同时由于微生物腐蚀加强腐蚀反应的能力,从而加强了给定级化水平所需的阴极保护电流^[33]。除此之外,金属表面会因微生物的不断腐蚀而逐渐暴露,因而需要通过加大阴极保护电流的方法来控制微生物腐蚀,即以提升极化水平的方式抑制微生物的生长与腐蚀。采用阴极保护法还有一个好处,金属材料表面会产生碱性环境,进而抑制微生物的活动。

6 结语

微生物腐蚀的研究已经历了一个世纪之久,然而微生物腐蚀对码头的危害却一直受到忽视。文中简要

介绍了码头的结构形式和钢结构在码头中的应用情况,分析了码头微生物腐蚀的研究现状,评述了微生物在腐蚀过程中的作用形式,同时概述了现有微生物腐蚀检测方法,受观测条件和时间的影响。目前常用的微生物腐蚀现场确定手段是通过肉眼观察,这类方法无法及时、准确地发现微生物腐蚀的发生,开发新型微生物腐蚀现场检测手段的需求是非常迫切的。最后,对码头中的微生物腐蚀防护技术进行了评述,常用的防控方法包括涂层包覆以及阴极保护技术。

参考文献:

- [1] 曹文振, 胡阳. “一带一路”战略助推中国海洋强国建设[J]. 理论界, 2016(2): 50-58.
- [2] HOU Bao-rong, LI Xiao-gang, MA Xiu-min, et al. The Cost of Corrosion in China[J]. Npj Materials Degradation, 2017, 1(1): 4.
- [3] 侯保荣. 中国腐蚀成本[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [4] 夏进, 徐大可, 南黎, 等. 从生物能量学和生物电化学角度研究金属微生物腐蚀的机理[J]. 材料研究学报, 2016, 30(3): 161-170.
- [5] LITTLE B J, LEE J S. Microbiologically Influenced Corrosion[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2017.
- [6] SASAKI H. Microbiologically Influenced Corrosion[J]. Zairyo to Kankyo, 2009, 46(8): 475-480.
- [7] FORSYTH R A. Microbial Induced Corrosion in Ports and Harbors Worldwide[C]// Proceedings of the Tri International Conference on Ports.[s.n.], 2010.
- [8] 霍中艳, 陈旭东. 港口码头健康检测与评估技术研究现状及主要问题[J]. 船舶力学, 2017(s1): 665-669.
- [9] 李言涛, 陈明忠, 李彦峰, 等. 福建LNG码头钢桩浪溅区腐蚀防护示范工程[C]// 中国液化天然气储运技术交流会. 广州: 中国石油学会, 2016.
- [10] 武清玺, 江泉. 码头结构的健康诊断及安全性评价[J]. 土木工程学报, 2003, 36(11): 75-78.
- [11] 程泽坤, 程培军. 海外开敞水域码头结构新型式[J]. 水运工程, 2011(1): 124-130.
- [12] 雍新, 史宏达. 我国码头新结构型式综述[J]. 海岸工程, 2013, 32(1): 35-43.
- [13] 唐功利, 于可涛, 刘红涛. 浅析钢结构在港口工程中的应用[J]. 科技创业家, 2012(11): 28.
- [14] 朱福寿, 范卫国. 海港码头钢桩腐蚀与防护概述[J]. 港口科技, 1997(2): 8-12.
- [15] 朱锡昶, 葛燕, 朱雅仙, 等. 海水中近60年钢板桩的腐蚀状况[J]. 海洋工程, 2003, 21(2): 87-91.
- [16] 刘迎春, 柴昶. 关于钢管结构中合理选材的探讨[J]. 建筑结构, 2010(5): 84-8.
- [17] 张金成. 钢管桩在大型油品码头中的应用与研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [18] 吴民渊, 张洁, 程振兴. 钢板桩的生产工艺及应用[J]. 包钢科技, 2012, 38(2): 6-8.

- [19] 吴浩方, 陈志平. 对钢板桩有关特性参数的初步认识与分析[J]. 梅山科技, 2010(4): 1-5.
- [20] APTER A. Investigation of Accelerated Corrosion in a Fresh Water Irrigation System[C]// 2009 Undergraduate Research and Scholarship Conference. [s.n.], 2009.
- [21] 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(1): 14-21.
- [22] GUBNER R J. Biofilms and Accelerated Low-water Corrosion of Carbon Steel Piling in Tidal Waters[J]. *Handbook of Research on Environmental Taxation*, 1998, 91(11): 399-421.
- [23] SCOTT C W, CLARK G, RADNIECKI J. Accelerated Fresh Water Corrosion Study & Remediation of Steel Structures[C]// *Proceedings of the Conference on Cold Regions Engineering*. [s.n.], 2009.
- [24] SLOBBE D C, KLEES R, VERLAAN M, et al. Lowest Astronomical Tide in the North Sea Derived from a Vertically Referenced Shallow Water Model, and an Assessment of its Suggested Sense of Safety[J]. *Marine Geodesy*, 2013, 36(1): 31-71.
- [25] Directorate-General for Research and Innovation (European Commission). Microbiologically Induced Corrosion of Steel Structures in Port Environment, Improving Prediction and Diagnosis of ALWC (MICSIPÉ)[M]. Luxembourg: EU Publications, 2013.
- [26] WANG H, MASTERS S, EDWARDS M A, et al. Effect of Disinfectant, Water Age, and Pipe Materials on Bacterial and Eukaryotic Community Structure in Drinking Water Biofilm[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(3): 1426-1435.
- [27] LARSEN J, RASMUSSEN K, PEDERSEN H, et al. Consortia of MIC Bacteria and Archaea causing Pitting Corrosion in Top Side Oil Production Facilities[C]// *NACE — International Corrosion Conference Series*. [s.n.], 2010.
- [28] ENNING D, GARRELF S J. Corrosion of Iron by Sulfate-reducing Bacteria: New Views of an Old Problem[J]. *Applied & Environmental Microbiology*, 2014, 80(4): 1226.
- [29] 曾艳. 基于 DNA 传感器对硫酸盐还原菌检测的研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2016.
- [30] 戚鹏. 硫酸盐还原菌的快速检测技术研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2014.
- [31] KOPTEVA Z P, ZANINA V V, KOZLOVA I A. Microbial Corrosion of Protective Coatings[J]. *Surface Engineering*, 2005, 20(4): 275-80.
- [32] KUS E, GRUNLAN M A, WEBER W P, et al. Evaluation of Nontoxic Polymer Coatings with Potential Biofoul Release Properties Using EIS[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2005, 152(7): 461-466.
- [33] GUEZENNEC J G. Cathodic Protection and Microbially Induced Corrosion[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 1994, 34(3/4): 275-288.