

船舶微生物腐蚀与防护研究进展

王毅^{1,2}, 张盾^{1,2}

(1.中国科学院海洋环境腐蚀与生物污损重点实验室 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)

摘要:近年来,随着腐蚀研究的不断深入,船舶上一些异常快速的腐蚀问题引起了人们的注意,由此发现微生物腐蚀在船舶上的大量存在。与其他工业体系相比,我国船舶系统微生物腐蚀的研究起步较晚,与国外相比,在重视程度和机理研究层面存在一定差距,亟待加强机理和防护技术领域研究。针对这个问题,文中系统分析了船舶微生物腐蚀的发生位点与危害、腐蚀微生物群落结构、船舶材料的微生物腐蚀以及防护措施等四个方面的最新研究进展,并在此基础上,提出了对船舶微生物腐蚀研究工作的建议,希望能够引起学术界和工业界的重视,以期在相关领域取得突破性进展。

关键词:船舶;微生物腐蚀;群落结构;防护技术;船舶材料;硫酸盐还原菌;

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.10.006

中图分类号: TG172.7 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)10-0033-06

Research Progress on Microbial Influenced Corrosion and Protection of Ships

WANG Yi^{1,2}, ZHANG Dun^{1,2}

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

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

ABSTRACT: In recent years, with the deepening of corrosion research, some abnormal rapid corrosion problems in ships have attracted people's attention, and it was found that MIC exists in ships. Compared with other industrial systems, the research on marine MIC in China started late. Thus, the research level still has a gap compared with foreign countries and the research in the field of mechanism and protection technology needs to be strengthened. In order to solve this problem, this paper analyzed the sites and harm of MIC in ship, corrosion microbial community in different parts, MIC of ship materials, and applicability of different protection technology. And on this basis, suggestions of marine microbial corrosion of research work were put forward. It was hoped that it will attract the attention of academia and industry in order to make breakthroughs in related fields.

KEY WORDS: ship; microbial influenced corrosion; community structure; protection technology; ship material; sulfate reducing bacteria

在自然环境中生存着许多微生物,其中有一部分微生物会附着于工程结构的表面,形成一层生物膜,生物膜内部环境与自然本体环境有着显著的差别,从

而容易引起工程结构的腐蚀。这种因微生物附着而引起的腐蚀称为微生物腐蚀(Microbiologically Influenced Corrosion,简称MIC)^[1]。最近的腐蚀调查结

收稿日期:2018-07-21;修订日期:2018-08-15

基金项目:国家重点研发计划(2016YFC1400605);国家自然科学基金(51771180,41776090)

作者简介:王毅(1981—),男,研究员,硕士生导师,主要研究方向为环境友好海洋防污材料。

通讯作者:张盾(1965—),女,研究员,博士生导师,主要研究方向为海洋微生物腐蚀与防护。

果表明,我国2014年腐蚀总成本约占当年GDP的3.34%,达21 278.2亿人民币^[2],其中,微生物腐蚀在金属和建筑材料的腐蚀成本中占20%^[3]。全世界因微生物腐蚀直接造成的损失估计每年约300~500亿美元^[4]。根据美国RI咨询公司最新研究报告显示,2015年全球杀菌剂需求将达到140万吨,市场规模达到55亿美元,并依然保持迅猛的增长速度^[5]。微生物腐蚀造成的危害越来越受到世界各国的重视,微生物腐蚀也是海洋腐蚀的重要类型之一。船舶在海洋上航行,与海水接触部分不仅受海水腐蚀的影响,还受海洋生物污损的影响,许多海洋微生物能够吸附于船底、螺旋桨、船舶管路及其他金属结构表面,并生长和繁殖,导致严重的生物污损^[6]。污损生物会破坏金属表面涂层导致金属裸露腐蚀,金属表面覆盖有石灰外壳污损生物可改变金属表面局部供氧,进而形成氧浓差电池而加剧腐蚀,部分微生物可诱发微生物腐蚀^[7]。海洋环境中的微生物腐蚀会缩短船舶的使用寿命,增加了维护、维修的费用,对船舶的安全造成严重的威胁。船舶的微生物腐蚀起初并不被人们所重视,近20年来,随着腐蚀研究的不断深入,许多异常快速的腐蚀问题引起了人们的注意,由此发现微生物腐蚀在船舶上大量存在。目前已报道的海洋微生物约有1500多种,在船舶上已发现和钢铁腐蚀有关的微生物主要是:铁细菌、氧化硫杆菌、排硫杆菌、脱硫弧菌属、脱硫肠状菌属^[8]。在众多引起微生物腐蚀的细菌中,以厌氧的硫酸盐还原菌(sulfate reducing bacteria, SRB)的数量最大、范围最广、危害最严重^[9-12]。SRB普遍存在于船舶舱底的积水中、海水管道、污水井等污泥、污水环境中。船舶的舱底积水及管系等部位也是非严格意义上的厌氧环境,给SRB的生长繁殖提供了条件,SRB能将 SO_4^{2-} 还原成 H_2S ,而 H_2S 是有害气体,在适宜条件下,它的大量积累会造成船舶内舱底板及管道的腐蚀烂穿。因此,防止船舶微生物腐蚀是材料科学、腐蚀科学和微生物学等共同关注的课题。文中总结了船舶微生物腐蚀的发生位点与危害、腐蚀微生物群落结构、船舶材料的微生物腐蚀以及防护措施等四个方面的最新研究进展,并在此基础上提出对船舶微生物腐蚀研究工作的建议。

1 船舶微生物腐蚀发生位点与危害

1.1 船体外部结构

海水飞沫、雨雪、冲洗甲板时所用的海水以及凝结水会侵蚀船体水上结构,但该部位由于营养物质匮乏,一般认为发生微生物腐蚀的概率很小。生物污损能破坏船体水下部分表面防腐涂层,使漆膜脱落,微生物在漆膜破损处可以直接与金属基体接触诱发微生物腐蚀。

1.2 船体内部结构

船体内部结构不直接接触海水,发生大型生物污损概率较低,但船体内部结构有六个区域有发生微生物腐蚀的潜在可能性,分别是燃油系统、润滑油系统、冷却水系统、舱底积水部位、压载舱水部位和油轮油舱。其中,水、营养物质、温度以及环境是微生物生存的几个要素^[13]。

1) 大量微生物的生长需要大量的水,通常要求的质量分数超过1%。

2) 燃油和润滑油中的碳水化合物和各种化学添加剂,以及水中可利用的营养物质均可供微生物利用。海港附近用于清洗压载舱的已经被污染的海水也含有营养有机物和农肥,以及遗留下的石油降解微生物,这些都会为压载舱水中的微生物生长提供营养物质。此外,船舶内部货舱中的货物残留(如尿素、肥料和糖等)、少量的杀菌剂残留、锈层以及死掉的微生物都有可能充当货舱微生物生长的营养物质。

3) 一般认为,船体内部结构温度在15~35℃,会给微生物提供理想的生长环境。如果船体内部结构温度低于5℃或高于70℃时,都不利于微生物生长。

2 船体内部结构腐蚀微生物群落特征

2.1 微生物种类

目前,一般认为与海洋环境微生物腐蚀有关的腐蚀微生物有三种基本类型:细菌、霉菌和酵母菌。

1) 细菌为杆状细胞(通常1~5μm)。目前已知与船舶微生物腐蚀有关的细菌主要是:铁细菌、氧化硫杆菌、排硫杆菌、脱硫弧菌属、脱硫肠状菌属^[8]。

2) 霉菌是丝状微生物,能在油水界面和表面形成网状污染,也能制造有抵抗力的孢子,从而导致污染在油相中蔓延。例如,*Hormoconis resiniae*是油箱中最常见的一种霉菌,会破坏涂层以及合金结构。若没有生物杀灭剂,在4~6周内某些聚氨酯涂层将会被穿透,导致金属底层结构晶间脱落。此外,*Hormoconis resiniae*还有可能导致电偶腐蚀。

3) 酵母菌是丝状或者卵状细胞(通常5~10μm)。酵母菌属于真菌,在水中生长,以燃油中的碳水化合物为食,可以氧化碳化合物产生大量的低分子量化合物,如有机酸,可被SRB利用。霉菌和酵母菌对氧气的需求也给SRB的生长创造了良好的条件。在实际船舶内部结构中,往往是多种微生物共存^[13]。

2.2 船舶内部结构腐蚀微生物来源

1) 海水。每升海水中一般含有不超过 10^3 个细菌和可以忽略不计的酵母菌和霉菌。然而,在海港、河口、油罐等地方的海水中,细菌含量远大于 10^3 ,而且含有大量的SRB^[13]。

2) 炼油厂。燃油在出厂时就含有腐蚀微生物^[13]。

3) 船舶内部结构舱底部位。船舶内部结构舱底的污水和持续的碳氢化合物供应,以及不能完全抽干的环境特点都给 SRB 的生长提供了良好的环境,主要发生点蚀^[13]。

4) 燃料油。在整个燃料油供给过程中均有可能产生腐蚀微生物污染。船舶内部处于温暖环境中的储罐是理想的微生物培养场所。双基底储罐由于温度低不利于微生物生长^[13]。

5) 润滑油。在矿物液压油系统中会发生微生物污损。这是因为在操作过程中,产生的热量会刺激微

生物生长。如果进入空气,根据分压氧含量不同会保持好氧微生物的持续生长。在通常的操作压力下,微生物生长不会被抑制或者破坏,它们也有可能作为泡沫产生空泡腐蚀。可调螺距螺旋桨液压系统极易遭受微生物污损,因此常用注入杀菌剂杀灭微生物^[13]。

2.3 船舶内部结构微生物腐蚀的症状

微生物腐蚀会导致船舶内部结构出现一系列症状,根据发生部位不同,症状也不尽相同,具体的情况见表 1^[13]。

表 1 微生物污损导致燃油、润滑油、舱底水和压载舱水系统症状

媒介	燃油系统	润滑油系统	舱底水和压载舱水系统
目视	当微生物到一定生物量会导致燃油变色、浑浊和污损 细菌产生的生物表面活性剂将会降低油相的表面张力,使得水相,微生物以及其他污染物可以稳定地存在并悬浮在油相当中 与清洁燃油和水相关的净化器和聚结器会发生故障 储罐点蚀	油变黏滑,在曲柄箱门出现粘液层锈层 在轴颈上面出现蜜色薄膜,随后与点蚀有关 在白色合金轴承、销和轴颈表面出现黑色菌株 在金属部位可看到棕色或灰/黑色沉淀 净化用回转筒和新机械加工面发生腐蚀 在曲柄箱里看到污泥积累,在净化器排渣过程污泥会过度积累 曲轴箱的涂层会发生剥落	形成自身是黑色或者剥离后是黑色的粘液层和污泥层 钢结构、管路和储罐底部的点蚀 电镀层的快速腐蚀
操作	在几个小时之内细菌聚合物就会阻塞过滤器和节流孔板 污损滤器、泵和注射器导致失效 在燃烧过程中不均匀的燃料流量和变动会加速活塞环和气缸套磨损率加速和影响凸轮轴输出扭矩	额外的损耗 腐臭的或者硫化物味道 增加油酸度或者突然失去碱性 净化器不能降低油品中的含水量 在恶劣气象条件下滤器阻塞 持续的破乳问题 降低冷凝器的换热效率	不寻常的污损和硫化物味道 结构损坏 管道吸力损耗

3 船舶材料的微生物腐蚀

陈德斌等^[8]对各海区不同类型的舰船舱底积水进行了检测,发现几乎所有被测舰船都存在 SRB,甚至连海港内都有 SRB 存在,只是其数量较舱室内低 3~4 个数量级而已。美国海军 8 艘军舰的 80 个油箱中均检测到可培养微生物^[14]。加拿大海军在军舰的油箱燃料口接口处发现了细菌、真菌和酵母菌,研究证明 *Hormoconis resiniae* 是主要的污损微生物^[15]。澳大利亚皇家海军对舰船微生物腐蚀进行了大量的调查,目的是防止 SRB 腐蚀产生的 H₂S 对舰船设备的腐蚀。调查结果表明,在澳大利亚皇家海军和外国海军军舰的舱底水等地方均发现了 SRB、好氧大肠杆菌的存在。对 37 艘船舶(包括渡轮和油轮)的舱底水微生物测试的历史结果表明,包括 SRB 在内的厌氧、好氧微生物,酵母菌和霉菌是普遍存在的^[16]。

3.1 船体钢的微生物腐蚀

SRB 对碳钢腐蚀的影响较大^[17-19]。早在 1966 年,Copenhagen^[20]就报道了在船舱底的疑似微生物腐蚀。船尾螺旋桨附近的 8 mm 碳钢板在 2 年内腐蚀穿孔,

腐蚀速率达到 4 mm/a,比同样钢板在海水中的腐蚀速率(0.127 mm/a)快 30 多倍,SRB 腐蚀产物 FeS 的存在证明了微生物腐蚀的发生。日本学者管野照造的研究认为,碳钢在含与不含 SRB 的海泥中的腐蚀速率之比为 37:17。乌拉诺夫斯基曾评定在 SRB 作用下,钢的腐蚀速度加速 50%~60%。巴切尔逊曾测量 SRB 对钢腐蚀的加速可达 20 倍。有人测定了含 SRB 的舱水浸泡的钢质船板,其腐蚀速度是 25 mg/(dm²·d),而无菌钢的腐蚀速度是 2.6 mg/(dm²·d),两者相差几乎 10 倍^[8]。

1994 年,我南海某舰舱底板发生严重腐蚀。在主机舱、副机舱和尾轴舱,发现直径 8~20 mm、坑深 3~6 mm 的溃疡状蚀坑 217 个,年溃疡腐蚀率为 1.5~3.0 mm/a,最大溃疡腐蚀率为 4.5 mm/a,其中左主机齿轮箱左侧一处已腐蚀穿孔,坑径 80 mm,孔径 20 mm。其余为溃疡状蚀坑,呈椭圆形,有的蚀坑呈阶梯状。经国内有关专家勘验分析,事故主要原因是由微生物腐蚀所引起,并首次提出了治理舰船微生物腐蚀的建议^[8]。2000 年,我国有 6 艘某型舰艇船底在下水后不到 2 年的使用期间就发生了多处的腐蚀穿孔。经检测,舱内积水部位单位体积内 SRB 数量约

是舷外海水的 $10^3 \sim 10^4$ 倍,说明 SRB 在舰船的舱底水中大量存在。同时,勘验结果还表明,其腐蚀形貌具备 SRB 腐蚀的明显特征:腐蚀产物带有难闻气味,外貌为黑色沾糊状覆盖在钢板上,蚀坑往往是一些开口的阶梯形圆锥体,坑内侧有许多同心圆环,坑内是黑色的腐蚀产物,产物下可以看到光泽的金属表面^[8]。

2007 年 Mart^[21]报道了澳大利亚皇家海军军舰在不到 1 年时间,10 mm 船体板就发生腐蚀穿孔,折算腐蚀速率可高达 10 mm/a,微生物腐蚀被认为是导致这一异常过程的重要原因。Wade 等^[22-23]在澳大利亚皇家海军 7 艘军舰的舱底水中,取样详细研究了四种金属材料的微生物腐蚀,包括两种澳大利亚海军军舰用船体钢和两种不锈钢。浸泡 116 天后,对比研究发现,与浸泡在天然海水中的材料相比,浸泡在舱底水中的海军军舰用船体钢腐蚀速率加快,点蚀敏感性增大,出现了半球型的点蚀坑,表明船体钢在舱底水中的腐蚀与 SRB 导致的微生物腐蚀有关。而对于两种不锈钢样品,没有证据表明其在天然海水和舱底水中的腐蚀与微生物腐蚀有关。

Hill^[24]曾经报道了 11 mm 船体钢不到 6 个月就腐蚀穿孔,这是有报道以来最快的微生物腐蚀速率之一。Cleland^[25]讨论了在压载舱发生的微生物腐蚀,在 2 年内腐蚀速率达到 6 mm/a。在单体和双体油轮的储油罐中裸露底板的微生物腐蚀速率为 2 mm/a^[26]。

3.2 船体其他金属材料的微生物腐蚀

除钢铁材料外,SRB 对船舶上的不锈钢、铝、锌、铜及其合金都会产生不同程度的腐蚀作用。大量的失效事例分析表明,铜镍合金具有微生物腐蚀敏感性。关于 Cu-Ni 合金海水管系的微生物腐蚀国内外都开展了研究工作^[27],美国海军研究室的 Wagner 和 Little

等人对合金腐蚀的特点、形貌和腐蚀产物的成分进行了研究。Pope 等人对电厂海水冷却系统中合金的微生物腐蚀进行了研究,并从合金腐蚀产物膜下分离出了产氨菌。刘光洲等^[28]对船舶的海水管系常用的 B10 管进行了微生物腐蚀试验,结果表明,B10 合金在含有 SRB 的 Postgate C 培养基中,腐蚀速度大大增加,合金中的铁、镍元素被选择性溶解,腐蚀形态呈海绵状。段东霞等^[29]从浸泡在海水中的铜镍合金表面分离纯化出了 SRB,并深入研究了其对 B10 及 B30 合金在海水中腐蚀行为的影响。实验结果表明,铜镍合金不能抑制 SRB 在其上附着成膜,并且 SRB 的存在会造成 B10、B30 腐蚀电位明显负移,使其发生严重的脱镍腐蚀。

不锈钢的微生物腐蚀常常发生在焊缝及热影响区。研究表明,不锈钢材料的微观组织和表面结构对金属抗微生物腐蚀是有影响的,特别是钝化层的性质对微生物腐蚀有较大影响。在不锈钢的微生物腐蚀中起作用的微生物主要有藻类、SRB、铁氧化菌及锰氧化菌等。在不锈钢材料表面,由于需氧菌的新陈代谢作用,消耗氧气,在生物膜下产生一个氧浓差电池。另外,由于铁氧化菌和锰氧化菌的生长活动,在金属表面形成局部沉淀,阻碍了氧气在生物膜中的扩散,使生物膜的中心部分形成无氧环境,适合 SRB 的生长和繁殖。在 SRB、铁氧化菌和锰氧化菌的共同作用下,点蚀产生。也有人认为,在金属表面形成的沉淀瘤,造成了微小缝隙,从而产生缝隙腐蚀^[8]。

以上研究结果表明,在船舶的多处部位均会发生微生物腐蚀和发现腐蚀微生物,而腐蚀速率显著高于在相同条件下的海水腐蚀速率(0.1 mm/a)。一些腐蚀实例见表 2。

表 2 船舶典型部位微生物腐蚀腐蚀实例

位置	证据				腐蚀速率/(mm·a ⁻¹)	参考文献
	腐蚀微生物	微生物腐蚀产物	高腐蚀速率	相关腐蚀形貌		
船底舱板		✓	✓		4	[20]
燃料储罐及其附属设备	✓	✓	✓			[14]
燃料储罐	✓					[15]
船底舱和机舱	✓					[31-33]
船底舱板、污泥储罐、饮用水储罐	✓		✓	✓	>10	[21]
船底舱	✓	✓	✓	✓		[22-23]
引擎冷却系统		✓	✓			[34]
海水冷却管路	✓	✓	✓	✓	2	[30]
船体钢,压载舱	✓	✓	✓	✓	8	[35]
压载舱	✓	✓	✓		6	[25]
货油舱	✓	✓	✓		2	[26]
船体钢和船底舱	✓	✓	✓		22	[16,24]

4 船舶微生物腐蚀防护措施

由于微生物腐蚀严重危害船舶安全,造成重大损失,因此研究船舶微生物腐蚀防治方法具有重要的现实意义。根据微生物的生理特性、腐蚀活动规律和作用对象等因素,船体内部结构微生物腐蚀防治方法分为物理方法、化学方法和生物方法等^[6, 8, 13, 36]。

4.1 物理方法

1) 曝气法。实践中发现,短时曝气法难以杀灭水中的 SRB, 因为有研究表明 SRB 可耐受 4.5 mg/L 的溶解氧。同时利用游离氧杀灭厌氧细菌会导致金属腐蚀速率明显提高,点蚀更为严重。因此,选用此法杀菌需要十分慎重^[26]。

2) 紫外线杀菌。紫外线具有杀菌作用,对船舶上的腐蚀微生物同样有效^[37]。一般紫外灯在 254 nm 波长附近有很强的辐射,而这个波长恰好能为核酸所吸收,因而照射一段时间就能使腐蚀微生物致死^[14]。用波长为 254~257 nm 的紫外线进行辐射杀菌可减缓船舱底积水和管路中的 SRB 腐蚀。与未经紫外线处理相比,对碳钢腐蚀速率下降 25%~50%^[36]。但对于船舱底的水环境,由于含有大量污水以及舱底复杂的几何形状,杀菌效果会大打折扣。同样,对于生物膜内微生物的杀灭能力有限,不能控制生物膜形成,从而抑制微生物腐蚀^[13]。

3) 电离辐射杀菌。杀菌效果与辐射剂量密切相关,小辐射剂量会改变细菌的形态和生理特征,抑制其增殖,大剂量的辐射会使细菌全部死亡^[36]。

4) 超声波杀菌。声波频率在 9~20 kHz/s 以上的超声波段可使 SRB 受到剧烈振荡而被杀灭^[13]。

5) 机械清除法。对于储罐底部和船底舱可用海绵球、刷子、清洗器和高压水枪等设备进行机械清理^[14]。增大流体速度也是一个有效的方法,但是要注意控制流速以免发生磨蚀。

6) 改变介质环境杀菌。限制周围 SRB 生长所需的营养物是降低腐蚀危害的一个重要方法^[36]。

4.2 化学方法

化学方法的主要途径是投加杀菌剂或抑制剂。目前,我国常用的杀菌剂为季胺盐、醛类、杂环类以及它们的复配物^[8]。主要问题在于腐蚀微生物产生抗药性、杀菌剂对基体金属的腐蚀性以及加药方式等。为解决这一问题,复配正越来越受到重视^[13]。但不同国家杀菌剂的使用标准不一,远洋船舶必须注意。

4.3 阴极保护方法

应用阴极保护是船舶防 SRB 腐蚀的有效手段之一^[38]。目前船舶较广泛使用的是电解防污防腐装置,可有效抑制微生物生长^[36]。

4.4 微生物法

微生物防治法就是引用生物竞争淘汰机制,通过微生物种群的替代将有害的微生物变为无害的微生物。该法安全、高效、环保,但由于机理复杂,距离实际应用尚有很大距离^[39]。

4.5 防腐蚀材料方法

从材料的制备和选择上,使用抗 SRB 腐蚀的材料即可避免或者减少 SRB 腐蚀产生的危害。可选用钛及其合金、高分子聚合物等材料^[8]。

4.6 涂防护层及表面改性

防护层材料和防护方法主要有镀锌、镀铬、水管内壁涂塑、涂环氧树脂漆以及进行氧化处理等^[36]。美国采用传统铝-钛陶瓷混合材料的纳米模式,以热喷涂工艺涂敷技术研制成功的一种纳米结构涂料,已广泛应用于船舶上,但由于该涂料制造工艺复杂、成本较高,限制了这项技术在国内的大规模应用^[8]。

5 结语

在船舶微生物腐蚀研究领域,国外起步早,认识比较深入,也发展了一些有效的防护技术。早在 1966 年 Copenhagen 就研究了船底钢微生物腐蚀机理。后续研究中也对船舶不同部位微生物腐蚀环境的差异有了分类认识和管理概念。除传统的船底水和压载舱等水环境外,也提出在燃料油和润滑油系统等部位也会因油受微生物污染进而导致设备微生物腐蚀和污损失效的理念。同时,美国等发达国家海军也对其水面作战舰艇和水下潜艇的微生物腐蚀进行过系统调查,已有多份可公开查阅的调查报告,并针对不同部位微生物腐蚀防护措施提出了建议。与国外相比,我国对于船舶生物污损认识较早。经多年实海挂板实验已对我国不同海域生物污损群落特征有了一定认识,也发展了一些防污技术。但与生物污损相比,我国对于船舶内部结构微生物腐蚀问题的研究则起步很晚。公开文献可以看到,直到 20 世纪末我国才对微生物腐蚀对于舰船设备安全有效运行的巨大破坏作用有了充分认识,对防护工作加以重视。总体而言,无论是在重视程度、机制分析和分类防护等方面与国外相比尚有巨大差距,特别是在船舶不同部位微生物腐蚀机理及相应防护措施领域的研究亟待加强。

参考文献:

- [1] LITTLE B, WAGNER P, MANSFELD F. An Overview of Microbiologically Influenced Corrosion[J]. *Electrochimica Acta*, 1992, 37: 2185-2194.
- [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] WALSH D, POPE D, DANFORD M, et al. The Effect of Microstructure on Microbiologically Influenced Corrosion[J]. JOM, 1993, 45: 22-30.
- [4] 张文毓. 海洋微生物腐蚀研究进展[J]. 全面腐蚀控制, 2017, 31(1): 8-12.
- [5] 邱成硕, 宋永波, 徐大可. 杀菌剂在工业中的发展前景[J]. 中国材料进展, 2018, 37(1): 14-18.
- [6] 顾彩香, 吉桂军, 朱冠军, 等. 船舶的腐蚀与防腐措施[J]. 船舶工程, 2010, 32(3): 1-4.
- [7] LEJARS M, MARGAILLAN A, BRESSY C. Fouling Release Coatings: A Nontoxic Alternative to Biocidal Antifouling Coatings[J]. Chemical Reviews, 2012, 112: 4347-4390.
- [8] 陈德斌, 胡裕龙, 陈学群. 舰船微生物腐蚀研究进展[J]. 海军工程大学学报, 2006, 18(1): 79-84.
- [9] BAO Q, ZHANG D, LYU D, et al. Effects of Two Main Metabolites of Sulphate-reducing Bacteria on the Corrosion of Q235 Steels in 3.5 wt% NaCl Media[J]. Corrosion Science, 2012, 65: 405-413.
- [10] CHEN S Q, WANG P, ZHANG D. Corrosion Behavior of Copper under Biofilm of Sulfate-reducing Bacteria[J]. Corrosion Science, 2014, 87: 407-415.
- [11] WU J J, ZHANG D, WANG P, et al. The Influence of *Desulfovibrio* sp and *Pseudoalteromonas* sp on the Corrosion of Q235 Carbon Steel in Natural Seawater[J]. Corrosion Science, 2016, 112: 552-562.
- [12] CHEN S Q, WANG P, ZHANG D. The Influence of Sulphate-reducing Bacteria on Heterogeneous Electrochemical Corrosion Behavior of Q235 Carbon Steel in Seawater[J]. Materials and Corrosion, 2016, 67: 340-351.
- [13] STUART R A. Microbial Attack on Ships and Their Equipment[M]. London: Lloyd's Register Technical Association Session, 1995.
- [14] NEIHOF R, MAY M. Microbial and Particulate Contamination in Fuel Tanks on Naval Ships[J]. International Biodeterioration Bulletin, 1983, 19: 59-68.
- [15] HAGGETT R D, MORCHAT R M. Microbiological Contamination-biocide Treatment in Naval Distillate Fuel[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 1992, 29: 87-99.
- [16] HILL E C, HILL G C. Microbial Proliferation in Bilges and Its Relationship to Pitting Corrosion of Hull Plate of In-shore Vessels[J]. Pitting, 1993, 105: 175-182.
- [17] LI E E, WU J J, ZHANG D, et al. D-phenylalanine Inhibits the Corrosion of Q235 Carbon Steel Caused by *Desulfovibrio* sp[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2018, 127: 178-184.
- [18] DEYAB M A. Efficiency of Cationic Surfactant as Microbial Corrosion Inhibitor for Carbon Steel in Oilfield Saline Water[J]. Journal of Molecular Liquids, 2018, 255: 550-555.
- [19] ZHANG J, LI X L, WANG J W, et al. Influence of Calcareous Deposit on Corrosion Behavior of Q235 Carbon Steel with Sulfate-Reducing Bacteria[J]. Journal of Ocean University of China, 2017, 16: 1213-1219.
- [20] COPENHAGEN W J. Accelerated Corrosion of Ship's Bottom Plate[J]. British Corrosion Journal, 1966(1): 344-344.
- [21] MART P. MIC in Naval Vessels[C]. Conference on Microbial Corrosion.[s.l.]: [s.n.], 2007.
- [22] WADE S A, TRUEEMAN A R, MART P, et al. Investigation of the Potential for MIC in the Bilge Waters of Australian Naval Vessels[J]. Cambridge University Press, 2009, 65(2): 246-260.
- [23] WADE S A, MART P, TRUEEMAN A R. MIC of Steels in the Bilge Waters of Maritime Vessels[C]. Australasian Corrosion Association-Corrosion and Prevention 2009. Coffs Harbour: NSW, 2009.
- [24] HILL E C. Microbial Corrosion in Ships Tanks-Detection and Remediation[J]. Tankcare 2000, 1996, 9: 37-49.
- [25] CLELAND J H. Corrosion Risks in Ships Ballast Tanks and the IMO Pathogen Guidelines[J]. Engineering Failure Analysis, 1995(2): 79-84.
- [26] HUANG R T, MCFARLAND B L, HODGEMAN R Z. Microbial Influenced Corrosion in Cargo oil Tanks of Crude Oil Tankers[J]. Corrosion, 1997, 53(6): 500-514.
- [27] 刘光洲. 船舶 Cu-Ni 合金海水管系的微生物腐蚀与控制[J]. 海洋科学, 2005, 29(7): 87-90.
- [28] 刘光洲, 钱建华, 马焱, 等. B10 合金的硫酸盐还原菌腐蚀研究[J]. 电化学, 2002, 8(2): 191-194.
- [29] 段东霞, 刘光洲, 蔺存国. 硫酸盐还原菌对舰船管路系统腐蚀的影响[J]. 装备环境工程, 2008, 5(6): 85-88.
- [30] NICKLIN G J E. Living with the Threat of Microbiologically Influenced Corrosion in Submarine Seawater Systems: The Royal Navy's Perspective[C]// 9th Intl Naval Engineering Conference. [s.l.]: [s.n.], 2008.
- [31] UPSHER J F. A Review of Microbially Induced Corrosion (MIC) of Steel and a Preliminary Investigation to Determine Its Occurrence in Naval Vessels[M]. Australia: DSTO Material Research Laboratory, 1993.
- [32] HODGEMAN D K, UPSHER J F, FLETCHER L E. Hydrogen Sulfide Generation in Shipboard Oily-Water Waste. Part 1. Origin of the Hydrogen Sulphide[M]. Australia: DSTO Material Research Laboratory, 1995.
- [33] UPSHER J F, FLETCHER L E, HODGEMAN D K. Hydrogen Sulfide Generation in Shipboard Oily-Water Waste. Part 2. Microbiological Aspects[M]. Australia: DSTO Material Research Laboratory, 1995.
- [34] BOLWELL R. Understanding Royal Navy Gas Turbine Sea Water Lubricating Oil Cooler Failures When Caused by Microbial Induced Corrosion ("SRB")[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the Asme, 2006, 128: 153-162.
- [35] CAMPBELL S A, SCANNELL R A, WALSH F C. Microbially-assisted Pitting Corrosion of Ship's Hull Plate[J]. Industrial Corrosion, 1990, 8: 1-14.
- [36] 顾彩香, 李伟, 朱冠军, 等. 硫酸盐还原菌的船舶腐蚀研究进展[J]. 水运工程, 2010(5): 52-56.
- [37] ABU BAKAR A, ALI M, NOOR N M, et al. Control of Microbiologically Influenced Corrosion using Ultraviolet Radiation[J]. Sains Malaysiana, 2017, 46: 1323-1331.
- [38] 管方, 翟晓凡, 段继周, 等. 阴极极化对硫酸盐还原菌腐蚀影响的研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2018, 38(1): 1-9.
- [39] 胥震, 欧阳清, 易定和. 海洋污损生物防除方法概述及发展趋势[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2012, 24(3): 192-198.