

海洋水下设施生物污损及其控制技术研究进展

段继周^{1,2,3}, 刘超^{1,2,3}, 刘会莲^{1,2}, 孙佳文^{1,2,3,4}, 张一梦^{1,2,3}, 王楠^{1,2,3,4},
翟晓凡^{1,2,3}, 管方^{1,2,3}, 郑萌^{1,2,3}, 张杰^{1,2,3}, 王秀通^{1,2,3}, 侯保荣^{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. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 海洋腐蚀与防护开放工作室, 山东 青岛 266237; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 随着经济和社会的发展, 以及我国海洋强国战略的实施, 海洋水下设施不断投入使用, 严苛的海洋环境使得生物污损问题凸显。生物污损会对海洋水下设施功能造成严重的危害, 缩短其服役期, 影响其正常运行。因此, 需要采取有效的防护措施, 抑制或减少生物污损, 实现海洋水下设施的有效运行。本文综述了海洋生物污损及其形成过程, 总结了生物污损对海洋水下设施的危害, 概述了几种我国沿海发现的典型污损生物, 总结了目前采用的生物污损控制技术或解决方案, 并讨论了近年来新型防污策略的发展及生物污损控制技术未来的发展方向。

关键词: 海洋水下设施; 生物污损; 附着生物; 防污技术

中图分类号: TG172 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)08-0162-16

DOI: 10.11759/hyqx20200325004

海洋水下设施, 包括部分或全部与海水接触的移动或固定式设施设备及构筑物等, 诸如海洋船舶、海上平台、滨海电站、海水管路, 以及码头钢桩、海上风电、海水养殖网箱和海洋浮标等海洋观测与探测设施等, 是海洋经济发展和海洋资源开发利用的重要基础设施设备。海洋环境中, 海洋腐蚀和生物污损是这些设施设备普遍存在的问题。其中, 水下设施生物污损不仅可能引起设施材料腐蚀, 还会造成诸如船舶航行阻力增加, 滨海电站冷源系统管路堵塞等而影响重要设施设备的正常功能, 造成重要经济损失和生态环境影响。生物污损因其影响的广泛性和防治复杂性而成为广为关注的世界性难题。特别是近年来, 随着海洋经济社会发展, 各类新型水下海洋设施设备不断投入使用, 生物污损正成为制约许多水下设施设备安全有效运行的限制条件甚至瓶颈因素。进一步研究和认识生物污损现象, 研究发展合理、有效的措施抑制或减轻海洋生物污损, 实现海洋水下设施的长期安全运行, 具有重要的经济和社会意义^[1]。

本文概述了海洋生物污损的危害, 简要综述了生物污损形成过程、目前微生物群落和污损生物群落附着和污损机制的研究进展, 概述了目前所采用的生物污损控制技术及解决方案, 并讨论了近年来新型防污策略的发展, 对生物污损控制技术未来发

展进行了展望。

1 海洋生物污损的危害

海洋生物污损(biofouling)可以定义为海洋污损生物在各类人造构筑物设施上发生附着聚集, 并对人们的生产活动产生不利影响的现象^[2]。海洋生物污损是自人类从事海事活动以来一直要面对的问题, 也是目前海洋开发所面临的难题之一。

公元前四世纪的文献里就有藤壶附着令船舶减速的报道^[3]。在过去的几十年中, 经常有船壳、航行浮标、水下设备、海水管道系统、工业或滨海市政进水口、石油钻井平台以及相关海洋水下结构物发生生物污损的报道^[4]。

舰船上附着的污损生物会增加表面粗糙度, 增加航行阻力, 增加燃料消耗。据估计, 与新涂刷的防污涂层相比, 生物污损可导致舰船额外的轴功率增

收稿日期: 2020-03-25; 修回日期: 2020-04-20

基金项目: 中科院先导专项课题(No. XDA13040404); 中国科学院基础前沿科学研究计划从 0 到 1 原始创新项目(ZDBS-LY-DQC025); 国家重点研发专项课题(2017YFB0903702)

[Foundation: The Strategic Priority Project of CAS, No. XDA13040404; The Key Research Program of Frontier Sciences, CAS, No. ZDBS-LY-DQC025; National Key Research and Development Project, No. 2017YFB0903702]

作者简介: 段继周, 研究员, 主要研究方向为海洋微生物腐蚀与生物污损, E-mail: duanjz@qdio.ac.cn

大 9%(薄的黏液污损,下同)至 84%(藤壶等重钙质污损,下同)。相对于无任何污损的船体表面,生物污损会导致全球航运业燃料消耗增加值为 44 百万~408 百万吨,CO₂ 排放量增加值为 134 百万~1 238 百万吨,由此造成的航行成本增加 220 亿~2 040 亿美元^[5]。

生物污损还会降低管道有效内径,甚至堵塞管道,降低冷却水流量。对于滨海电厂海工构筑物,特别是长距离输水隧道,生物污损会增加厂用耗电量,降低机组微增出力,影响安全级设备的取水,导致金属材料的腐蚀。附着的污损生物会堵塞电厂的过滤系统设施,造成海水过滤系统失效,甚至影响机组的正常运行^[6-7]。

海洋生物污损会增加海洋水下设施的维护成本。如清除固着在进水管或涵洞壁上的海洋污损生物通常需要停机,清除费用和停机造成的损失都非常昂贵。1971 年, Dunkerque 电站对生物污损的涵洞进行维护,清理耗时 4 000 个工时,清理出了 360 m³ 的海洋生物^[8]。

海水养殖网箱上附着的海生物会堵塞网眼,限制海水交换,增加养殖水产患病几率,导致养殖网箱结构变形甚至损坏。因此,生物污损会给海水养殖业造成巨大经济损失。据估算,由生物污损导致的经济损失约占海水养殖业总生产成本的 5%~10%(约合 15 亿~30 亿美元/年)^[9]。

生物污损还会对海洋观测设施造成损坏,导致仪器传动机构失灵、信号失真、可靠性降低,甚至带来安全隐患^[10-11]。很多在线监测仪器维护周期一般在 10~60 天,即使使用铜网防护,也需要每 5 个月维护一次。频繁的维护增加巨大的生产成本,而对于深、远海的监测仪器,无法进行定期维护,极大地限制其在实际中的应用^[12]。

此外,生物污损带来的物种入侵问题,也越来越受到关注。特别是国际航运带来的生物入侵,被认为是对世界海洋和生物多样性保护的主要威胁。国际海事组织(IMO)继 2004 年发布船舶压载水和沉积物控制和管理指导准则之后,2011 年又发布了船舶生物污损控制与管理指导准则。新西兰、澳大利亚、美国加利福尼亚州等国家或地区制定了新的有关规则,要求商业船舶入港前需要清除船壳及水下附属设施表面附着的污损生物^[13-15]。生物污损及其影响的环境与生态安全问题正在得到广泛重视。

2 海洋生物污损形成过程与影响因素

海洋生物污损是一个复杂的自然现象,海水中

营附着或固着生活的海洋生物会在材料表面定殖生长,从而完成其生命周期,形成适应环境的污损生物群落。通常包括以下几个主要的生长步骤,即条件膜、生物膜、微型生物污损和大型生物污损等阶段,可以分为初期、中期和后期附着阶段^[5, 16-17]。

(1) 条件膜的形成:浸水材料表面在很短的时间内(数秒到数分钟)通过物理吸附、静电相互作用等吸附海水中溶解的蛋白质、多糖、糖蛋白等有机分子,形成条件膜。

(2) 微生物膜的初步形成:海水中的细菌、单细胞藻类等,在几小时内,在条件膜表面形成的多物种初期生物膜。这种初期的细菌附着被认为是一种可逆附着,主要与微生物与材料间的弱相互作用(如范德华力和静电力)相关。初期微生物膜可进一步发展为成熟的微生物群落。

(3) 微型污损群落的形成:在浸海几天的时间内,微生物膜内的细菌进一步生长繁殖,会分泌形成胞外聚合物(EPS),并通过分泌化学物质等进一步吸引有关微生物、藻类孢子甚至原生动物的进一步附着,同时吸附海水中的有机颗粒等,在某些材料表面会形成黏液层,它们不断生长繁殖,形成微型污损生物群落,通常称为微型生物污损(microfouling),或软污损(soft fouling),也称为污损黏膜(slime)。

(4) 宏观污损生物群落的形成:在微生物膜及或微型污损群落基础上,在几周的时间内,处于浮游期的大型污损生物幼虫(如藤壶、贻贝、多毛纲动物等)选择固着在微污损群落生物膜上,经进一步变态发育,形成以硬壳钙质生物为主的宏观(大型)生物污损(marofouling),或称为硬污损(hard fouling)。

实际上,海洋污损生物群落并不完全按照上述的顺序形成,因为海洋生物的多样性及复杂性,污损生物附着的顺序可能是随机的。此外,大型污损生物也未必一定要在微生物膜表面附着及生长,其也可以直接固着在浸水材料表面,导致生物污损^[18]。

从初期、中期到后期的生物污损发展过程,污损生物群落存在附着演替现象,最终通常微型和大型污损生物共同形成生物污损,也经常表现为某一种优势污损生物如藤壶、贻贝等聚集附着现象。

然而,在实际环境中,污损生物群落的形成过程和表现现象是十分复杂多样的,会受到环境以及物种间竞争等多种因素的影响,与海域、季节、温度等环境条件及材料表面特征等有复杂关系。

海洋污损生物受环境条件的影响明显,通常决定了海洋附着生物的种类和数量。一般地,海洋污损生物的种类和数量随纬度的升高而降低。我国温带、亚热带和热带海域的污损生物类型具有显著差异,近海和远海的污损生物类型也具有显著差别^[19]。季节交替也会改变污损的程度。Want 等人^[20]调查了英国苏格兰 Orkney 岛沿海主要污损生物在一年中不同月份的附着情况。同一地点,秋冬季的污损程度要显著低于春夏季。每个月都存在附着的优势物种。此外,海水深度也会影响生物污损,如船舶水线部位以进行光合作用的藻类为主,而水线下则以藤壶等硬壳生物为主。此外,江河的入海口位置与远海的污损程度也显著不同。

其实,海水的温度、盐度、营养物的浓度、溶解氧、光照、pH 值等是影响污损生物的种类和数量的本质因素,因为其直接影响生物的生长及繁殖。虽然海洋的这些因素总体上是稳定的,但随着日夜的交替和季节的更迭会发生值得关注的变化,从而影响附着生物的生长及繁殖。值得注意的是,随着全球气候变暖和海洋环境的污染,将会在一定程度上影响海洋生物的生长,导致某种或几种海洋生物的“暴发”,导致严重的生物污损事件。此外,水流速度也会影响海洋生物的附着。一般地,海洋生物不容易在水流速度高的情况下附着。

海洋水下设施材料本身的性质(如材料的组成、结构以及表面状态等)均可影响海洋生物的附着,材料不同,附着种类和数量会有显著差别,比如硅基材料表面,藻类的附着通常占有优势^[21-22]。如未经采取任何防护措施的低碳钢和混凝土表面在浸水后不久均可发现有生物附着^[23-24]。研究发现,材料的表面性能(如表面浸润性、表面光滑程度、表面亲疏水性、表面能、表面带电性等)也会影响海洋生物在材料表面的生长及繁殖^[25-27]。一般地,表面能低的光滑表面或带电表面或有毒物释放的表面不利于海洋生物的附着。此外,生物物种间的相互作用(如捕食、寄生、竞争、互利共生)也会影响附着种类和数量。

3 海洋污损生物群落

如上文所述,海洋生物污损可以分为微型生物污损和大型生物污损,微型生物污损进一步分为微生物膜群落和微型生物群落,通常是多物种的共生生长,而大型污损生物更常见的是某一种或两种污损生物的聚集性生长。

3.1 微生物膜群落

各种环境中,微生物 90%以上是以生物膜的形式存在的,海洋环境也是类似的^[28-30]。附着微生物群落的组成很可能是由生物膜的调节和材料表面的相互作用决定的。在材料表面生物膜群落中,微生物-材料基体、微生物之间、以及微生物种群之间的合作、竞争、交流构成了微生物群落的组成、结构、时空动态和功能^[31]。微生物能够感知和响应表面环境信号,并通过改变基因表达来改变其细胞表面化学、生理和附着行为^[32],不同的微生物也可能具有不同的表面黏附机制^[33]。

材料表面微生物群落除了与浸海时间、海域、深度等环境参数密切相关外,其附着种类还与材料基体成分等有密切关系。比如在高分子材料和玻璃表面,优势微生物是海洋红杆菌(*Rhodobacter*)和单胞菌属(*Alteromonas*);在钢铁材料表面,在浸泡初期主要是陆丹氏菌(*Loktanella*)和假单胞菌(*Pseudoalteromonas*),也可能存在铁氧化菌(*FeOB*)^[34]。但材料长期浸泡后,厌氧硫酸盐还原菌成为主要的优势微生物^[35-36]。

在金属材料表面的微生物群落,会对金属的腐蚀产生重要影响,可以称其为腐蚀微生物群落。材料在海洋水下环境腐蚀的典型特征是微生物的附着和膜下微生物腐蚀,这与单纯的氯化钠盐水腐蚀或人工海水腐蚀有很大的区别^[37]。

我们最近的研究发现^[38],天然海水中铜合金、铝合金和碳钢等不同金属材料表面生物膜微生物群落结构组成差异显著。铜合金生物膜样品细菌丰度低,优势菌为产酸菌属(*Lactobacillus*);铝合金表面细菌丰度最高,优势菌为芽孢杆菌属(*Bacillus*),碳钢外表面为可产生胞外多聚物(EPS)的假单胞菌属(*Pseudomonas*),而锈层内则以硫酸盐细菌(SRB)为主,且具有不同的优势 SRB 物种。同时也发现,在材料表面都发现有较高多样性的古菌群落,其中在铜表面生长有较高的氨氧化古菌,而钢铁锈层中则主要存在甲烷嗜热球菌属(*Methanothermococcus*)和甲烷球菌属(*Methanococcus*)等古菌。

海洋腐蚀微生物群落与金属材料基体密切相关,海洋腐蚀微生物群落引起的微生物腐蚀通常可以采用阴极保护、杀菌剂、防腐涂镀层等进行控制,在本文中不作重点论述。

当材料浸入到海水中,微生物在材料表面会形成条件膜。形成条件膜后,细菌和硅藻等微生物会相

继在这层“土壤”上附着生长,形成一层由水、无机物、有机物、微生物及其胞外聚合物(EPS)组成的微生物膜或黏膜。EPS 主要包括蛋白质、多糖、糖醛酸、丙酮酸盐、醋酸盐、硫酸盐、酯类以及少量的核酸、脂质等,整体具有负电性^[39]。

3.2 微型污损生物群落

细菌、单胞藻(硅藻等)和原生动物组成了微型生物膜,污损生物分为3类:体型大于1 mm 为大型污损生物;体型在0.5~1.0 mm 为小型污损生物;体型小于0.5 mm 为微型污损生物^[40]。在生物繁殖季节,海洋工程材料表面海洋细菌首先附着,紧接着海洋单胞藻在材料表面附着,随着时间延长,它们会组成聚合体;海洋原生动物在浸海15天左右开始出现,海洋后生污损生物幼体依不同大型污损生物繁殖季节先后出现,此后材料表面大型污损生物大量生长^[41]。

材料表面海洋细菌的附着以球菌和杆菌为主,附着海洋细菌已被描述的有几万种,大多数细菌是污损生物的最小个体,是污损生物食物链的第一提供者,即初级生产力。材料浸泡2周后单胞藻开始附着,以硅藻为主,是微型污损生物膜骨干,其体内能分泌出胶状物使硅藻大量聚集,硅藻壳壁上胶质孔位控制其群体形状,硅藻集中繁殖可构成各式型体,不管组成体多大,它们是单细胞的微型生物^[42]。硅藻被称为“海洋牧草”,为原生动物和后生污损生物提供饵料,但海

域浑浊,它的优势地位也可能被蓝藻取代^[43]。

原生动物是海洋微食物网的重要组成部分,在海洋初-次级能量流动和碳循环过程中起着重要的枢纽作用^[44]。通常它们依群体存在,已报道的世界整体环境中发现6万多种,在海洋工程表面的研究报道较少,作为污损生物报道的主要有尖触虫(*Ephelota* sp.)、钟虫(*Vorticella* sp.)、聚缩虫(*Zoothamnium* sp.)和球长虫(*Anthophysa* sp.)、有孔虫(*Foraminifera*)^[45]。原生动物也是最原始的低等单细胞动物同时也是最复杂的生命单体。因为在同一个细胞中要兼营运动、营养、呼吸、排泄、生殖等通常动物的所有功能^[40]。

在微型污损生物群落中,小型动物群落和原生动物对细菌、硅藻的摄食作用存在明显的时空差异,在冬季和春季,尽管细菌生物量很高,但捕食关系不明显,而在夏末和整个秋季,小型动物和原生动物可利用53%的细菌,其中鞭毛虫、纤毛虫及小型动物对细菌摄食的贡献率分别为:51%、21%及28%^[46]。

3.3 宏观污损生物

海洋污损生物的附着过程通常都有从其浮游态(藻类孢子或生物幼虫)到附着态(变态成体)的附着转变过程。海藻(图1)、贻贝(图2)、藤壶(图3)等是典型的污损生物,经常在材料设施表面观察到其污损附着现象。也是实验室最经常应用到的污损生物研究对象和模式污损生物。下面简要介绍上述三种典



图1 海藻
Fig. 1 Marine algae

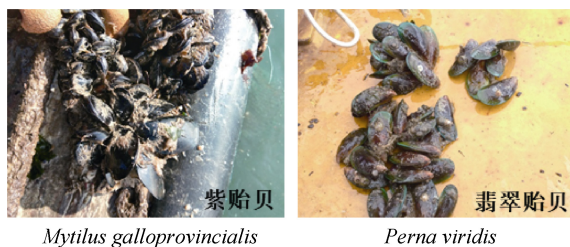


图2 贻贝
Fig. 2 Mussels

型污损生物的附着和分布情况,同时也对其他污损生物(图4)做简要介绍。

海藻生长在海水中,可以进行光合作用并释放氧气。我们通常所说的海藻一般指大型藻类。常见的海藻主要有:红藻(如海头红、石花菜)、褐藻(如裙带菜、海蒿子)和绿藻(如孔石莼)等。

大型藻类的黏附机理研究较多的是石莼。石莼的黏附主要经历两个阶段:浮游阶段(自由游动的孢子)和底栖阶段^[47]。其中,底栖阶段在海藻附着中起

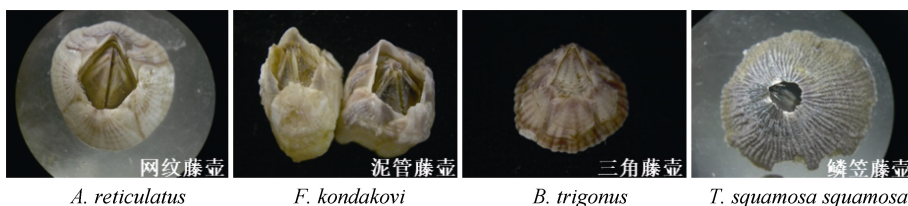


图3 藤壶

Fig. 3 Barnacles

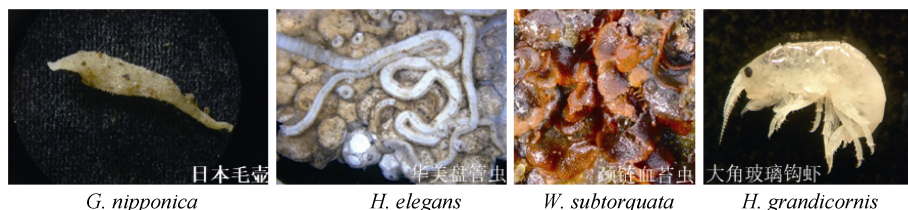


图4 其他的污损生物

Fig. 4 Other fouling marine organisms

重要作用。底栖阶段是由游动孢子到基体表面定植进行永久黏附的过程, 主要包括三个步骤: 1) 表面着陆与探索, 这是一个选择性过程, 与孢子本身的生物学性质(比如是否具有鞭毛)以及基体材料的表面物理化学性质有关。2) 黏附过程, 分为初级黏附与次级永久性黏附。游动孢子探寻到合适的基体表面, 很快就会分泌胶黏剂, 完成初级黏附(约 1 min)。此后孢子不断分泌胶黏剂, 在孢子周围扩散, 在基体材料表面形成一层薄薄的“胶垫”, 牢牢地固着在基体材料表面。并且鞭毛逐渐消失, 产生新的细胞壁, 完成次级永久黏附(约 20 min)。此后, 细胞不断分裂, 逐渐长成大型藻类植株^[48]。

通常认为孢子在水中的运动是随机的、无选择性的。但是近来的研究显示, 一些游动孢子是具有趋光性、趋触性和趋化学性的。Wheeler 等^[49]研究发现石莼(*Ulva intestinalis*)的游动孢子会利用附着细菌产生的一种群体感应化合物[酰化高丝氨酸内酯 AHL(Acyl-Homoserine Lactone)]在细菌生物膜表面进行探索。一旦游动孢子在合适的基体表面着陆并探索到 AHL 时, 游动孢子就会降低游动速度, 逐渐完成附着。

贻贝是许多污损生物群落的优势组成之一, 其种类繁多, 广泛分布于世界海洋。在我国沿海, 受到关注的污损贻贝类主要是紫贻贝(*Mytilus galloprovincialis*)和翡翠贻贝(*Perna viridis*)。贻贝通常采用足的前端探寻附着位点, 找到合适的位点后, 贻贝会分泌黏附蛋白将自身用蛋白质足丝固定在基体材料上, 通常以密集集群形式生活^[50]。足丝由从贝壳间分泌的众多足丝

线(thread)构成, 它一端连接着贻贝自身, 另一端则通过具有高界面结合强度、耐久性和韧性的斑块(plaque)黏附在基体材料表面。足丝中存在着多种具有不同功能的黏附蛋白, 分布在足丝线的不同部位, 统称为贻贝足丝蛋白(Mussel foot protein, Mfps)。它以液体形式分泌, 然后在体外固化形成足丝线和斑块^[51-52]。

藤壶是节肢动物门甲壳亚门颚足纲鞘甲亚纲蔓足下纲的一类动物, 根据柄部的有无分为有柄目和无柄目 2 个组群。其中, 造成水下设施危害的主要是无柄目藤壶亚目藤壶科的一些种类, 它们常常形成密集的集群。另外, 有柄目的鹅荖荷(*Lepas anserifera*)也是常见的污损物种。

藤壶在全球的海洋中普遍存在, 从北冰洋到南大洋中均可生存, 从潮间带直到数千米的深海都有分布。值得注意的是, 藤壶可以在低盐的河口区域生存, 却不能在淡水中生存。全世界约有 500 多种藤壶, 其中我国约有 110 种^[53]。其中, 纹藤壶(*Amphibalanus amphitrite*)在黄、渤海为优势种, 网纹藤壶(*Amphibalanus reticulatus*)则在热带和亚热带海区占优势; 泥管藤壶(*Fistulobalanus kondakovi*)多出现在沿海河口的咸淡水交汇处; 三角藤壶(*Balanus trigonus*)、红巨藤壶(*Megabalanus rosa*)和钟巨藤壶(*Megabalanus tintinnabulum*)等种类分布于盐度较高的海域。环境因子可对藤壶类的生长发育、繁殖附着、分布状况及形态特征等产生显著影响, 这些环境因子可包括盐度、水温、波浪、潮位、营养元素等^[54]。

藤壶在材料表面的固着过程主要由3个阶段构成:浮游的无节幼虫阶段;浮游向永久固着过渡的腺介幼虫的表面探索阶段;腺介幼虫变态发育成成虫的永久黏附阶段。其中,后两个阶段对藤壶附着作用最大。目前国内外学者对幼虫对表面的探索行为、幼虫分泌的胶黏剂与永久黏附行为及藤壶胶进行了广泛的研究,试图破解各种胶黏剂的成分及理解藤壶附着的机理。目前普遍认为幼虫的黏附分为非永久性黏附和永久性黏附两个阶段。腺介幼虫会利用成对的触角以踩高跷的方式在表面移动,并分泌由单个纳米蛋白丝或纤维聚集束组成的临时黏结物质[足迹蛋白(footprint proteins)]^[55],以搜寻合适的附着位置,一旦表面合适,腺介幼虫就会分泌永久性的黏结物质,在表面完成腺介幼虫-金星幼虫-藤壶幼体-藤壶成虫的变态发育及成长过程^[56],在成长过程中还会分泌黏附性更强的藤壶胶,牢牢地黏在材料表面。藤壶附着后将不能移动,通常喜欢在潮间带营群居性生活,这一现象的最新解释是已经附着的藤壶会不断释放出化学信息素,从而促进了其他藤壶幼体前来附着^[57]。

海洋中能够导致生物附着的海洋生物众多,除了上述的海洋污损生物外,在海洋水下人工设施表面还会附着其他生物,这些生物有地域特性和时空特性,在某些地域或某个时间点上会大量繁殖,造成危害,有时还会大规模暴发,严重影响海洋水下设施的正常运行。

一般地,经济性生物牡蛎的附着量通常要少于贻贝和藤壶,但是也会存在个例,尤其是位于内湾内的滨海水下设备,这是由于湾口位置水流往往比较通畅,更适合牡蛎的附着、生长和繁殖。

海鞘生长快,繁殖迅速,能在短时间内产生大量附着的幼虫,是海洋污损生物群落中的重要成员,对海洋水下人工设施会产生严重危害。如滨海电厂取水系统里流速较慢的取水槽等经常会发现有海鞘大量附着。海鞘附着污损具有明显的地域性和季节特点,并与深度有关^[58]。

在海洋水下设施中,经常会发现水螅虫的附着。很多水螅虫呈现草状或树枝状,且成群附着生长。如果大量附着的水螅虫群体死亡、脱落,很容易就会发生堆积而导致水管路细管的堵塞。如果水螅虫类在取水口处的过滤设备上大量附着生长,最终会将过滤设备的格栅包围起来,就会导致取水阻力增加,压差增大。

除了附着污损生物外,浮游性生物经常也会引起管路设施的堵塞现象。近十年来在我国沿岸海域经常会发生赤潮现象(浮游植物暴发产生);以及某些滨海电厂附近海域也时常会发生水母暴发发现象,这都会导致取水系统过滤设备的严重堵塞,引发生产安全等问题。

对海洋水下设施或滨海电站造成危害的海洋生物主要有海绵类如白枝海绵(*Leucosolenia variabilis*)、管栖蠕虫如华美盘管虫(*Hydroides elegans*)、苔藓动物如颈链血苔虫(*Watersipora subtorquata*)、钩虾类如拟钩虾(*Gammaropsis* sp.)、水母类如海月水母(*Aurelia aurita*)、纽鳃樽类(如梭形纽鳃樽)、浮游植物如夜光藻(*Noctiluca scintillans*)和浮游动物如桡足类的拟长腹剑水蚤(*Oithona similis*)等。

4 海洋生物污损控制技术

海洋生物污损的控制技术可以分为基于物理、化学和生物原理的技术,物理防污包括机械清除、紫外线抗菌防污技术等,化学防污包括防污涂料、电解防污、杀生剂防污技术等,以及污损生物幼虫预报观测的生物学技术等。

其中,防污涂料可以应用于舰船等各类移动和固定水下设施,应用最广泛;电解防污及杀生剂防污主要用于冷却水管路、压载水舱等密闭或半密闭体系;机械清除技术特别是水下自动化污损清除技术得到快速发展。

目前所采取的生物污损控制技术主要是抑制污损生物的附着以控制污损生物特别是大型污损生物在表面的聚集性生长,降低对水下设施的影响。目前,尽管有些防污技术对大型污损生物有效,但是大多数防污技术主要还是抑制污损生物的幼虫或幼体。由于海洋污损生物的多样性及复杂性,目前尚没有一种技术能够解决所有的生物污损问题。在实际的生产中,防污措施的选择往往要考虑几种影响因素,这些影响因素主要包括:生产效率、成本、环保法规等。在实际生产实践中,某些物理方法、杀生剂、防污涂层等已经广泛用于预防和控制生物污损。

4.1 物理防污方法

物理防污方法,一般是指采用物理措施来消除生物污损。目前针对船体外表面或大型海水隧洞等海水冷源系统设施,可以采用的物理措施主要有有机

械清除技术(包括水下机器人),其他物理方法如海水过滤、水流速度控制、热处理、超声波技术、紫外杀菌防污、渗透压控制、降低氧气浓度等^[59-65]。下面重点对水下机械清除特别是近年来发展的水下软清除(Grooming)技术作简要介绍。

对于船壳、取水涵洞中生长的硬壳污损生物如贻贝、藤壶等,需要采用人工和机械装备对其铲除清理。机械清除技术最早主要是针对已发生污损的船舶等设施表面进行机械清理,该过程主要在船舶坞修期间。水下许多非移动式设施如海水管道、钢桩等也需要污损清除。近年来,随着自动化和智能化技术的发展,水下机器人污损清除技术也逐渐发展,由最初的潜水员操作的水下清除向水下自动化清除装置发展,清洗技术由最初的高压水技术向空化射流技术发展。

人们对水下污损清除的认识也在不断发展。严重的生物污损会降低船舶航速,增加油耗,由此船舶水下软清除(Grooming)的概念被提出^[66-67],即在发生硬壳污损前就对水下船体进行污损清除,从而减小硬壳污损的形成,降低船舶油耗。近年来,新西兰、澳大利亚等国家制定了新的有关规则,要求船舶入港前需要视船体污损情况进行必要的清除,减小物种入侵,也促进了水下软清除技术的发展。

最初的水下自动化软清除装置比较简易,将人工清除用的海绵橡胶球、复合摩擦材料等直接搭载在可行驶的小型活动装置上。美国海军 DDG51 护卫舰上曾经使用过这种简易技术,他们设计的水下清除装置总质量约为 25 kg,功率约为 300 W,擦除速率达 3.8 m²/min,污损生物清除速率达 70%,全船清除一次大约需要 13 小时,这是水下污损清除机器人的雏形,其擦除效果有限,仅适用于污损生物附着的初期。最近的试验研究表明,水下软清除技术可以将污损生物附着面积由 100%最低降低到 6.3%左右。水下清除技术的发展也对防污涂层技术的发展提出了进一步挑战。水下清除技术会在一定程度上加速原有防污涂料中有效成分和黏接剂微塑料成分向海水中的释放,被刷洗掉的活体生物,同样会进入到海水中带来可能的物种入侵问题。无毒低表面能防污技术更适合水下软清除技术的需求^[68]。清除不彻底、机器人的操作灵活性及应用成本较高是目前水下机器人清除技术存在的主要问题。

在水下清除的自动化革新方面,近年来众多从

事水下机器人开发的公司研发了各种类型的水下污损清除机器人,总的说来,机器人的两个关键核心技术是紧密吸附和有效清除。一种综合利用了电磁力、反向波轮和浮力材料的合力,控制机器人在被清除表面运行,可以达到精准控制的效果。我们与有关单位合作,开展了水下自动化生物污损机械清除的研发和示范工作,该水下机器人具有良好的可操作性、智能化和可视性,清除能力 300 m²/h,工作深度可达 20 m,行进速度 5.6 m/min,污损清除效率可达到 95%以上(图 5),负重能力约 650 N。提高自动化程度和深水作业性能及可视性与集成信息技术成为未来发展的趋势。

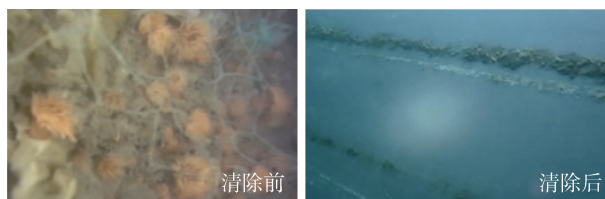


图 5 水下自动化污损清除机器人清除前后的船体表面照片
Fig. 5 Images of the ship hull groomed with an underwater robot

4.2 化学防污方法

化学防污一般是指利用特定的化学措施或药剂对海洋生物及其孢子、幼虫等进行趋避、活性抑制或杀灭,达到抑制海洋生物在水下设施表面附着或聚集的目的。根据采用化学手段的不同,化学防污主要分为化学药剂法、电解防污法、涂装防污涂料法等。

化学方法的优点是施工简便、抗污高效、适用范围广泛、经济性好,也是目前船舶、滨海电厂等工业上通常采用的方法。化学防污方法会直接或间接使用杀生剂,所有应用的技术都需要得到生物安全风险评估和认证。理想的杀生剂技术是趋避污损生物而不是杀灭;或具有短的半衰期,可以快速降解为无毒物质。

4.2.1 化学药剂法

是向待处理体系中投加一定量具有防污生物活性的化学药剂,而达到抑制污损生物附着的效果。化学药剂最大的优点是见效快,对以海水为介质的封闭系统有效,如船舶压载舱,滨海电厂的冷却水循环系统等。加药法的缺点是每种化学药剂仅对某一种或几种生物有效,易导致金属腐蚀,有较大的

环境风险。一般地,加药法采用的化学物质按杀生机理分为氧化型和非氧化型杀生剂。其中氧化型杀生剂一般是卤素及其化合物(如次氯酸钠)、臭氧、双氧水等。非氧化型杀生剂常见的有季铵盐、金属盐溶液(如铜离子盐溶液)、烷芳基胺等。目前,工程实践中往往交替使用非氧化型杀生剂和氧化型杀生剂,不仅可以降低维护成本,也可以避免生物产生耐药性^[69]。

来自天然物质(如细菌、植物、动物或某些矿物质)的杀生剂被称为生物基杀生剂(或称生物农药, biopesticides)^[70]。目前发现的具有防污活性的天然产物主要有:无机酸、有机酸、大环内酯类、萜类、酚类、甾醇类和吡啶类化合物等。关于天然防污剂,已经有详细的综述^[71]。另一个比较成功的例子是,基于荧光假单胞细菌的配方 Zequanox® (主要有效成分 *Pseudomonas fluorescens* strain CL 145A cells)对贻贝附着具有很好的抑制效果,已经于 2011 年在美国 EPA 注册。Zequanox®由死去的荧光假单胞细胞组成,该细胞中含有对贻贝有毒的天然化合物。

尽管基于在生物中天然提取的天然产物防污剂应用潜力巨大,但是由于其在生物体内含量较低且提取工艺非常复杂,大大限制了其在海洋防污方面的大量使用。所以通过人工合成的方法合成与天然产物防污剂化学结构相似的化合物,可以进一步促进环境友好型防污剂的大量使用。如香港科技大学从细菌中发现了有机溴类新型防污剂,具有良好的防污效果和应用前景,正在开展有关防污应用的研究^[72]。Takamura 等^[73]人工合成了 8 种丁烯酸内酯和香叶醇的杂化分子,防污测试结果表明这 8 种杂化分子都对藤壶幼虫具有优异的防污能力。此外,通过有机合成方法对化合物的化学结构进行精确设计,也可以避免天然防污剂中某些毒性基团或结构,从而制备低毒/无毒的人工合成型生物基杀生剂。

总的来说,生物基杀生剂通常比常规杀生剂毒性低,仅影响目标生物,少量有效,并可在环境中迅速降解,环保性好,是未来杀生剂的发展方向之一。若干生物基杀生剂已在美国 EPA 注册^[74]。但大部分生物基杀生剂仍处于实验室的研究阶段,其中大批量生产问题和成本问题尚没有得到很好解决。

4.2.2 电解防污法

电解防污属于电化学防污技术,通过将直流电施加于特定的电极体系发生电化学反应,利用反应生成的化学物质来抑制或杀死污损生物,达到防污目的。电解防污装置通常操作比较简便,也可以进行自动化控制,因减少了人员直接接触,较直接化学加药法更加安全,还可应用于不易进行涂装的部位。在海洋平台、船舶管路以及其他以海水为介质的冷却循环水系统中已广泛使用。传统的电解防污方法主要有电解海水制氯法和电解重金属法。

电解海水制氯主要是依赖海水电解产生的含氯物质(如 HClO、ClO⁻、Cl₂)来抑制或杀死生物,达到防污目的,其原理见图 6 所示。电解海水使用的是特制的电极(如钎钛金属氧化物阳极)来产生有效氯(HClO、ClO⁻、Cl₂)。

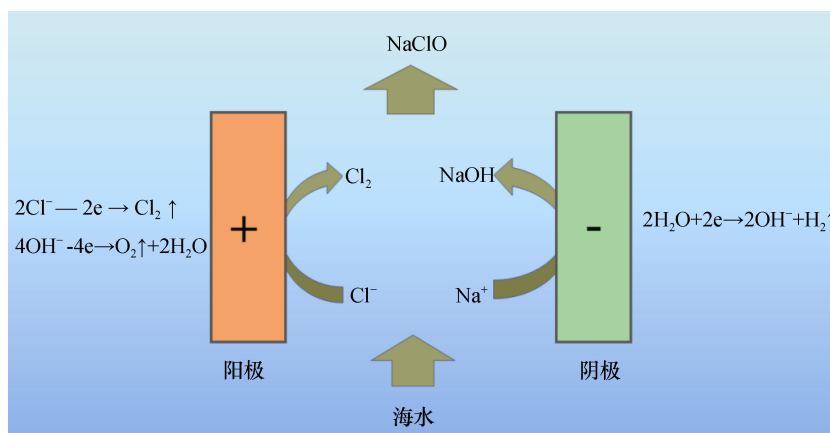


图 6 电解海水制氯示意图

Fig. 6 Chlorine evolution from electrolysis seawater

电解重金属防污主要是利用电解产生的有毒重金属离子来抑制及毒杀污损生物。目前,应用最多的

是电解铜-铝防污技术。其基本原理是:在电解槽中,电解由铜-铝组成的阳极时,铜阳极发生电化学反应

生成有毒的铜离子,起到杀灭海洋生物的目的;而铝阳极发生电化学反应生成的三价铝离子可在海水中形成絮凝物,可以充当铜离子的载体,对铜离子起到缓释作用。

电解海水制氯和电解重金属虽然目前在工程实践中得到了广泛应用,但也存在一些缺陷。对于电解海水制氯而言,随着电解的进行,电极材料表面会不断积累钙质沉淀物,增加维护成本;电解海水产生的氢气存在较大安全隐患;此外,电解海水生成的氯类化合物具有较大环境风险。电解重金属的缺点是电解产生的重金属离子(如铜离子)对水环境影响较大。

我们近年来开展了新型电解和电催化用防污电极材料的研究工作,该类电极在发生电催化电化学反应时生成的是无毒的活性氧类化合物(如活性氧自由基、过氧化氢等)。Wang 等^[75]采用简单的共沉淀法/原位包覆法制备了不同 GO 和 $MnCO_3$ 配比的氧化石墨烯气凝胶负载立方碳酸锰复合材料($GOx/MnCO_3$)。该材料具有较高的电导率和丰富的 2 电子氧还原反应(ORR)催化中心,并且产生 H_2O_2 的选择性高,稳定性好并具有良好的 ORR 催化性能。在此基础上, $GOx/MnCO_3$ 作为氧还原电催化剂,在 $0.55V_{RHE}$ 值下对不锈钢具有良好的抗菌效果。这为抗菌和防污应用提供了一种有效的和环境友好的电化学方法。

4.2.3 防污涂料技术

一百多年来,防污涂料是最广泛应用的防污技术,特别在各类海洋船舶设施上获得了广泛的应用。防污涂料目前主要包括含杀生剂的自抛光防污涂料(Self-polishing Coating, SPC)和不含杀生剂的污损释放涂料(Fouling release Coating, FRC)^[76]。SPC 防污涂料是一种典型的仿生防污技术,其作用机理主要是在海水冲刷条件下,涂层中的树脂发生缓慢水解,水解过程中会在表面暴露和缓慢释放杀生剂,从而抑制附着生物膜和幼虫的附着。这是其优点和应用广泛性所在,目前约占防污涂料市场 90% 份额。

具有水解功能的树脂是 SPC 涂料的关键技术之一。当前主要的防污树脂主要包括丙烯酸铜、丙烯酸锌和丙烯酸硅类水解树脂。在新型防污树脂领域,我国华南理工大学研发了可侧链水解的丙烯酸硅类树脂,突破了国外专利的限制^[77-79]。中国海洋大学在接枝杀生剂辣椒素及其衍生物的新型防污树脂领域取得了突破进展^[80-81]。

除了防污树脂外,杀生剂也是自抛光防污涂料中的主要成分。主要包括无机杀生剂(如氧化亚铜、硫氰酸亚铜等)和有机杀生剂如异噻唑啉酮类化合物(DCOIT)、吡啶硫铜酮等。随着人们环保意识的提高,防污涂料中杀生剂的使用受到严格限制,必须经过注册认证,满足相关法律法规的要求才能够进入防污涂料市场。一种具有潜在防污活性化合物的注册极其严格,需要提供大量的实验数据证明其安全性,因此,新型防污剂的开发时间长,成本高。近来的研究主要集中在无毒和低毒杀生剂方面,主要包括三类:从微生物代谢产物提取天然活性化合物;筛选具有防污活性的生物酶;现有杀生剂的微胶囊缓释控制技术。

尽管自抛光防污涂料有其优点,应用广泛,但有其无法逾越的固有缺陷。在防污期效方面,对于许多固定设施,如滨海电厂海水冷源管路或涵道,防污需达 10 年或更长时间,SPC 防污技术仍无法满足其长效防污需求。另外,SPC 防污技术是具水解功能的复合杀生剂技术,其树脂会水解和降解释放到海水中,形成微塑料成分^[82],其包含的杀生剂最终也会释放到水体环境中,对环境仍有一定的潜在危害。

污损释放涂料(FRC),顾名思义,主要是基于其表面的低表面能等物理特性,附着生物不容易在其表面附着,或附着不牢固,经水流冲刷等即可被“释放”^[83]。目前主要的树脂材料包括有机氟型(氟碳树脂)、有机硅型(硅橡胶、硅树脂)、氟硅改性型和无溶剂环氧型等类型。如国际油漆的 Intersleek 型号 FRC 涂料已在商用船舶中获得应用。虽然 FRC 类涂料目前市场应用低(10% 份额),但具有较好的环保效果。当前,基于低表面能、水化层等物理结构仿生防污的理念,国内外许多实验室都在开展新型防污材料的创新研究^[84-85],但目前的许多研究仍处于实验室阶段。

FRC 类涂料也存在限制和缺陷。如静态防污效果较差,无法脱除细菌、硅藻等微生物形成的黏膜层,对于许多其他水下设施不适宜应用。另外,其价格昂贵,且施工、重涂和维护都比较困难,且有机硅基防污涂料机械强度不高,易被水中杂物损伤,因此,其总体应用范围仍十分受限。因此,提高防污涂料的经济性、耐久性和环保性仍然是未来海洋水下设施防污涂料的发展方向。

目前,防污涂料主要应用于船舶水下船壳的保护,也应用于海洋水下设施如海洋平台钢桩的防污。在滨

海电厂中, 防污涂料主要应用于与海水接触的取水隧洞、拦污栅、复水器(水室)、闸门、海水冷却器等。

近年来, 我们围绕滨海设施, 尤其是滨海电厂中涉及海水设备的生物污损问题, 开展了海洋污损生物调查以及海洋防污涂料等技术的研发工作, 取得了一定的研究成果。

我们围绕滨海电厂生物污损开展了初步研究, 有针对性地对我国滨海核电站所处海域的污损生物进行了较为系统的摸底和调研; 开展了滨海电厂抗海洋生物附着的对策研究, 重点对化学处理法和释放杀生剂的防污涂料进行了较为系统的研究; 提出了滨海电厂防海洋生物污损的化学组合处理方案; 成功开发了一种滨海电厂用环保长效无锡自抛光防污涂料技术。

我们围绕海水抽水蓄能电站防污技术需求, 开发耐冲刷长效自抛光防污涂料技术, 在实海挂板中取得了优良的防污效果(图 7), 并探索研究了低表面能海洋防污涂料以及电解协同防污技术, 积累了一定的研究经验, 取得了初步的研究成果。

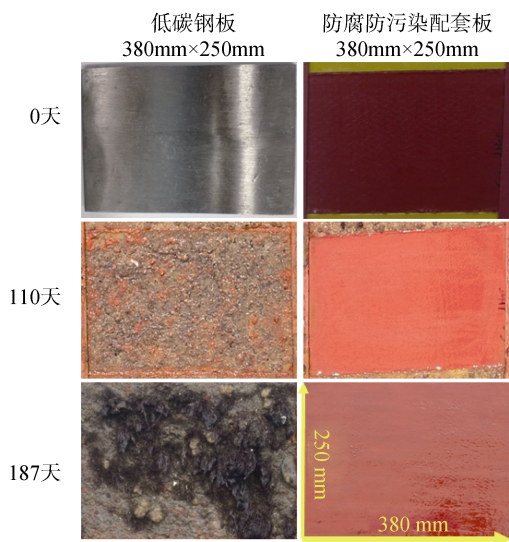


图 7 绿色环保长效无锡自抛光防污涂层实海挂片
Fig. 7 Photos of long-lasting self-polishing coatings with low content of copper in seawater

4.2.4 铜或铜合金法

利用铜或铜合金在海水中发生缓慢腐蚀并释放对海洋生物有毒性的铜离子的原理来保护海洋水下设施免遭生物污损。

一种方法是直接利用铜及铜合金充当水下结构材料。另外一种可行的方法是将铜或铜合金加工成几毫米的片层材料或筛网。在现代防污涂料出现之

前, 人们已经利用铜皮来包覆木船底部来防止海洋生物附着, 后来也发展到用镍白铜包覆金属船舶^[86]。实际应用时, 将铜或铜合金的片层材料或筛网包覆在被保护的海洋水下设施表面, 达到防止海洋生物附着的目的。值得注意的是, 若要用铜或铜合金包覆其它金属材料, 需要注意电偶腐蚀的发生, 避免伤及被保护材料。

此外, 利用电偶腐蚀的原理, 将铜及其合金与要保护的阴极材料连接, 利用两者间的电位差加速铜离子的溶出, 达到防污目的^[87]。铜及铜合金可以应用在诸如滨海电厂或船舶等的某些管路系统或拦污栅等应用防污涂料不方便的部位。

4.3 海洋防污技术发展展望

海洋防污技术总的发展趋势是向绿色、无毒、长效、功能化防污技术发展。向自然学习, 向海洋学习, 从自然防污中获取灵感。海洋防污技术的创新还要基于新材料、新技术的进一步创新发展。仿生防污技术、新型能源的光、电防污材料与技术都在进一步发展中。

4.3.1 仿生防污技术

自然界中, 许多生物通常具有完美的抵抗附着和污损的能力, 它们通常不仅具有特殊的结构, 还常常具有特别功能。自然界中大多数动植物表面都具有特殊的微观粗糙结构, 如荷叶^[88]、海豚^[89]等。人们制备了表面具有微观粗糙度结构的柔软高分子材料, 其具有自清洁和减阻效应, 在船舶表面的实验获得了较好的防污效果。此外, 研究表明, 很多海洋生物表面会分泌黏液, 如鲨鱼和盲鳗表面都有一层黏液, 可以形成亲水性的表面, 从而阻止污损生物的附着^[90]。自抛光防污涂层也是一种功能仿生设计, 其主要是模仿了动物的“蜕皮”现象。仿生防污技术在进行结构仿生研究的同时, 需要更多从功能仿生防污获得灵感, 开展进一步研究。

水凝胶(Hydrogel)是一类极为亲水的三维网络结构凝胶, 它在水中迅速溶胀并在此溶胀状态可以保持大量体积的水而不溶解。研究表明, 由于水凝胶独特的含水能力和柔软高弹的特性使其与生物表皮的黏液层高度相似, 故近年来被越来越多的开发并应用到防污涂层当中, 其防污机理主要是水凝胶表面可以形成一层水化层, 从而迷惑污损生物的判断而抑制其在涂层表面的附着。水凝胶防污涂层主要包括高度亲水中性 PEG 水凝胶^[91]、两性离子水凝胶^[92]、季铵

盐水凝胶^[93]、负载银纳米离子水凝胶^[94]等。具有自修复的仿生防污材料也在研究中^[95]。

仿生防污技术的发展对海洋生态系统的保护有十分重要的意义,是无毒防污领域的研究热点之一,但该技术往往需要很高的成本,且寿命较短,实现该类防污涂料规模化生产应用还有很大的困难。

4.3.2 其他新型防污技术

某些特定波长的光(如紫外光)具有趋避甚至杀灭生物的作用。紫外光防污机理是其可破坏细胞组织中的DNA和RNA,从而阻止细胞的再生并抑制生物的生长发育。紫外光防污具有应用安全,稳定性好,受环境影响小,抗菌谱广,可应用于任何材料表面,对周围环境影响小的特点^[96]。随着全球环境保护标准的提高及对化学防污剂使用的限制,紫外光防污成为了研究热点^[97-98]。2018年,IP公司与Philip公司合作开发了一种基于紫外发光二极管(UV-LED)的革命性技术,创新性的将紫外光辐射和有机硅基防污涂层融为一体,使涂层表面发射紫外光,从而防止海洋生物造成的污损。这比通用的紫外光抗菌技术更进了一步。此体系完全不含杀虫剂,环保安全^[99]。

模拟酶催化防污技术是指通过生物污损的仿生机制,即模拟生物酶催化,将 H_2O_2 转化成具有杀菌活性的HOBr或卤化代谢物,通过这种模拟自然防御系统,以防止细菌定植或生物膜形成^[100]。如在海洋污损生物防护中,将卤化过氧化物酶添加到涂层中,卤化过氧化物酶会将 H_2O_2 和含卤离子的海水转化为卤酸,如次氯酸,进而达到更强的防污效果^[101-104]。由于在防污酶的应用过程中,天然酶具有不稳定性和易变性(易受温度和pH影响)的特点,故不能被广泛应用。而模拟酶材料一般不受温度和pH的影响,所以发展一种具有天然酶活性的无机材料模拟酶代替天然酶是十分必要的。因此,模拟酶防污技术是一种可行性较高的新型环保防污技术。

近十多年来,柔性电子和柔性智能材料获得广泛研究,并在柔性智能穿戴、柔性电子器件、仿生皮肤、生物医学等领域获得广泛应用^[105-108]。海洋中蕴藏有丰富的能源,基于海洋波浪能、潮汐能、盐差能等海洋蓝色能源的新技术不断得到发展。中国科学院北京纳米能源与系统研究所等在2017年首次提出了基于摩擦纳米发电机(Triboelectric nanogenerator, TENG)的海洋能收集技术^[109]。TENG主要基于摩擦起电与静电感应的耦合效应,可将机械能转化为电能^[105]。该团队报道了利用TENG将海洋波浪能转换

为电能,并探索了其在抗菌防污方面的应用^[110]。将海洋能源与光、电功能化防污器件材料结合,形成新型防污功能材料技术,有望在海洋防污、环境保护和节约能源方面取得重要进步。

5 结语

海洋环境复杂,海水中生长的生物物种多样,数量庞大,涉及海水的海洋工程及设施等很容易遭受海洋生物附着的影响。生物污损通常会降低水下设施工作效率,降低水下仪器的灵敏度,影响水下结构设施的稳定性,甚至导致不易察觉的安全隐患,带来经济损失甚至人员伤害的严重问题。因此,生物污损控制也是保证海洋水下设施正常运转的重要工作内容之一。目前,虽然开发了诸多控制生物污损的方法,但都存在各自的缺点,尚没有一种方法可以应对所有的生物污损问题。因此,对于海洋水下设施的设计者来说,有必要在设计之初就采用一种或几种切实可行的控制方法,满足在经济上可行且环境上可接受。此外,生物污损的有效控制策略也要充分考虑生物污损的季节性和区域性特点以及每一种污损生物的独特生物学特性。未来,不仅要开发新的防污材料或技术,还要有针对性地对海洋水下设施所在海域进行污损生物普查,充分了解该海域污损生物的种类组成、群落结构、优势种等,以及其随时间或空间的变化规律及附着特点,研究污损生物的附着规律及机理,建立暴发性物种的预警机制,有针对性地采取生物污损控制技术。另外,生物污损涉及生物、物理、化学、材料、环境、工程、气象等多种学科,是一个多学科交叉、渗透的研究领域,因此,开发高效环保的防污技术还需要多种学科之间的交叉融合,协同创新。

参考文献:

- [1] 侯保荣. 中国腐蚀成本[M]. 北京: 科学出版社, 2017. Hou Baorong. The Cost of Corrosion in China[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [2] Yebra D M, Kiil S, Dam-Johansen K. Antifouling technology—past, present and future steps towards efficient and environmentally friendly antifouling coatings[J]. Progress in Organic Coatings, 2004, 50(2): 75-104.
- [3] Benson P, Brining D, Perrin D. Marine fouling and its prevention[J]. Marine Technology, 1973, 10(3): 37.
- [4] Cao S, Wang J, Chen H, et al. Progress of marine bio-fouling and antifouling technologies[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(7): 598-612.

- [5] Hellio C, Yebra D. *Advances in Marine Antifouling Coatings and Technologies*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2009.
- [6] 范永春. 滨海电厂厂内循环水系统防污防腐[J]. 电力勘测设计, 2006, (4): 69-72.
Fan Yongchun. Fouling and corrosion prevention in-plant circulation water system of costal power plant[J]. Magazine Office of Electric Power Survey & Design, 2006, (4): 69-72.
- [7] Venkatesan R, Murthy P S. *Macrofouling Control in Power Plants*[M]//Springer Series on Biofilms. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- [8] Taylor C J. The effects of biological fouling control at coastal and estuarine power stations[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2006, 53(1-4): 30-48.
- [9] Fitridge I, Dempster T, Guenther J, et al. The impact and control of biofouling in marine aquaculture: a review[J]. *Biofouling*, 2012, 28(7): 649-669.
- [10] Delauney L, Compere C, Lehaitre M. Biofouling protection for marine environmental sensors[J]. *Ocean Science*, 2010, 6(2): 503-511.
- [11] 于良民, 赵海洲, 李昌诚. 海洋监测仪器防污技术的对比研究[J]. 涂料工业, 2006, 36(10): 56-59, 63.
Yu Liangmin, Zhao Haizhou, Li Changcheng. Comparison study of antifouling technology for ocean monitor instruments[J]. *Paint & Coatings Industry*, 2006(10): 56-59, 63.
- [12] 孔祥峰, 姜源庆, 张婧, 等. 生物污损对海洋监测仪器的影响及其防护措施[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017, 29(6): 664-668.
Kong Xiangfeng, Jiang Yuanqing, Zhang Jing, et al. Influence of biofouling on performance of marine monitoring instruments and anti-biofouling technique[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2017, 29(6): 664-668.
- [13] Biosecurity New Zealand. Biofouling management[EB/OL]. [2020-03-04]<https://mpi.govt.nz/importing/border-clearance/vessels/arrival-process-steps/biofouling/biofouling-management/>.
- [14] Department of Agriculture, Water and The Environment, Australian Government. Managing biofouling in Australia[EB/OL]. [2020-02-04]<https://www.agriculture.gov.au/biosecurity/avm/vessels/marine-pest-biosecurity/biofouling>.
- [15] Rasmussen P L. California biofouling and ballast water management requirements 2018. [EB/OL]. (2017-12-29) https://www.bimco.org/news/environment-protection/20171229_california_biofouling-and-bwm.
- [16] Coutts A D M, Valentine J P, Edgar G J, et al. Removing vessels from the water for biofouling treatment has the potential to introduce mobile non-indigenous marine species[J]. *Marine pollution bulletin*, 2010, 60(9): 1533-1540.
- [17] Qian P Y, Lau S C K, Dahms H U, et al. Marine biofilms as mediators of colonization by marine macroorganisms: implications for antifouling and aquaculture[J]. *Marine Biotechnology*, 2007, 9(4): 399-410.
- [18] Clare A S, Høeg J T. Balanus amphitrite or Amphibalanus amphitrite? A note on barnacle nomenclature[J]. *Biofouling*, 2008, 24(1): 55-57.
- [19] 杨天笑, 曹文浩, 陈池, 等. 热带、亚热带近海设施生物污损特点与研究展望[J]. 广东化工, 2012, (15): 15-16.
Yang Tianxiao, Cao Wenhao, Chen Chi, et al. Biofouling on Offshore facilities in tropics and subtropics[J]. *Guangdong chemical*, 2012, (15): 15-16.
- [20] Want A, Crawford R, Kakkonen J, et al. Biodiversity characterisation and hydrodynamic consequences of marine fouling communities on marine renewable energy infrastructure in the Orkney Islands Archipelago, Scotland, UK[J]. *Biofouling*, 2017, 33(7): 567-579.
- [21] Howell D, Behrends B. A review of surface roughness in antifouling coatings illustrating the importance of cutoff length[J]. *Biofouling*, 2006, 22(6): 401-410.
- [22] Callow M E, Fletcher R L. The influence of low surface energy materials on bioadhesion-a review[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 1994, 34(3): 333-348.
- [23] 李晓龙, 张杰, 张鑫, 等. 海洋污损生物的附着对Q235 碳钢表面阴极保护钙质沉积层形成的影响[J]. 材料工程, 2018, 46(6): 88-94.
Li Xiaolong, Zhang Jie, Zhang Xin, et al. Effect of marine fouling organisms adhesion on formation of calcareous deposits formed by cathodic protection on surface of Q235 carbon steel[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(6): 88-94.
- [24] 王甲春, 阎培渝. 海洋混凝土污损生物腐蚀机理的研究进展[J]. 混凝土, 2009, (10): 24-26.
Wang Jiachun, Yan Peiyu. Literature review of corrosion mechanism of marine fouling organisms on concrete[J]. *Concrete*, 2009, (10): 24-26.
- [25] Ista L K, Callow M E, Finlay J A, et al. Effect of substratum surface chemistry and surface energy on attachment of marine bacteria and algal spores[J]. *Appl Environ Microbiol*, 2004, 70(7): 4151-4157.
- [26] Huggett M J, Nedved B T, Hadfield M G. Effects of initial surface wettability on biofilm formation and subsequent settlement of *Hydroides elegans*[J]. *Biofouling*, 2009, 25(5): 387-399.
- [27] Howell D, Behrends B. A review of surface roughness in antifouling coatings illustrating the importance of cutoff length[J]. *Biofouling*, 2006, 22(6): 401-410.
- [28] Costerton J, Stewart P S, Greenberg E P. Bacterial biofilms: a common cause of persistent infections[J].

- Science, 1999, 284(5418): 1318-1322.
- [29] Flemming H C, Wingender J. The biofilm matrix[J]. Nature Reviews Microbiology, 2010, 8: 623-633.
- [30] Azam F, Long R A. Oceanography – sea snow microcosms[J]. Nature, 2001, 414: 495-498.
- [31] Dang H., Lovell C R. Microbial Surface colonization and biofilm development in marine environments[J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 2016, 80(1): 91-138.
- [32] Steinberg P D, De Nys R, Kjelleberg S. Chemical cues for surface colonization[J]. Journal of Chemical Ecology, 2002, 28(10): 1935-1951.
- [33] Chagnot C, Zorgani M, Astruc T, et al. Proteinaceous determinants of surface colonization in bacteria: bacterial adhesion and biofilm formation from a protein secretion perspective[J]. Frontiers in Microbiology, 2013, 4: 303.
- [34] Dang H, Lovell C R. Microbial surface colonization and biofilm development in marine environments[J]. Microbiology & Molecular Biology Reviews, 2015, 80(1): 91-138.
- [35] Zhang T, Fang H. Phylogenetic diversity of a SRB-rich marine biofilm[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2001, 57(3): 437-440.
- [36] 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: 1737.
- [37] 赵伟, 苏璐璐, 段继周, 等. 天然海水中微生物膜对碳钢腐蚀行为的影响[J]. 海洋科学, 2012, 36(9): 24-31.
- Zhao Wei, Su Lulu, Duan Jizhou, et al. Effect of biofilms on corrosion of carbon steel in seawater[J]. Marine Sciences, 2012, 36(9): 24-31.
- [38] Zhang Yimeng, Ma Yan, Duan Jizhou, et al. Analysis of marine microbial communities colonizing various metallic materials and rust layers[J]. Biofouling, 2019, 35(4): 429-442.
- [39] Flemming H C. The perfect slime[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2011, 86(2): 251-259.
- [40] 马士德, 陈旭森, 刘传安, 等. 防污涂料/海水界面的原生动物初探[J]. 广西科学院学报, 2017, 33(2): 114-118.
- Ma Shide, Chen Xumiao, Liu Chuan'an, et al. A preliminary study of protozoan on anti-fouling coatings/seawater interface[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2017, 33(2): 114-118.
- [41] 马士德, 王科, 郑萌, 等. 镜检中的污损生物研究——青岛港湾微型污损生物群落变化及主要物种的初步研究[J]. 全面腐蚀控制, 2013, 27(12): 49-51, 59.
- Ma Shide, Wang Ke, Zheng Meng, et al. Fouling organism research in microscope examination——preliminary study on community change of micro fouling organisms in Qingdao Bay and the main species[J]. Total Corrosion Control, 2013, 27(12): 49-51, 59.
- [42] Jeon M S, Oh J J, Kim J Y, et al. Enhancement of growth and paramylon production of *Euglena gracilis* by co-cultivation with *Pseudoalteromonas* sp. MEBiC 03485[J]. Bioresource Technology, 2019, 288: 121513.
- [43] 马士德, 徐利婷, 刘会莲, 等. 青岛港湾污损生物及其量化初探[J]. 中国涂料, 2019, 34(2): 60-65.
- Ma Shide, Xu Liting, Liu Huilian, et al. Preliminary Study on Fouling Organisms and Their Quantification in Qingdao Harbor[J]. China Coatings, 2019, 34(2): 60-65.
- [44] 李洁, 徐奎栋. 南黄海夏秋季纤毛虫等微小型浮游动物丰度和生物量变动及其与沙海蜇旺发的关系[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(3): 612-625.
- Li Jie, Xu Kuidong. Abundance and biomass of nano-and microzooplankton in particular ciliates in relation to the mass occurrence of *Nemopilema nomurai* in the Southern Yellow Sea in summery and autumn[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2016, 47(3): 612-625.
- [45] Liu W, Jiang J, Xu Y, et al. Diversity of free-living marine ciliates (Alveolata, Ciliophora): faunal studies in coastal waters of China during the years 2011–2016[J]. European Journal of Protistology, 2017, 61: 424-438.
- [46] 杜永芬, 徐奎栋, 类彦立. 海洋微型和小型底栖生物相互作用研究综述[J]. 海洋科学集刊, 2009, 49: 163-173.
- Du Yongfen, Xu Kuidong, Lei Yanli. Research progress in the interactions of marine micro-and meiobenthos[J]. Studia Marina Sinica, 2009, 49: 163-173.
- [47] Callow M E, Callow J A, Pickett - Heaps J D, et al. Primary adhesion of enteromorpha (chlorophyta, ulvales) propagules: quantitative settlement studies and video microscopy 1[J]. Journal of Phycology, 1997, 33(6): 938-947.
- [48] Maggs C A, Callow M E. Algal Spores, version 1.0[M]// Encyclopedia of Life Sciences. London: Nature Publishing Group, 2003: 1-6.
- [49] Wheeler G L, Tait K, Taylor A, et al. Acyl-homoserine lactones modulate the settlement rate of zoospores of the marine alga *Ulva intestinalis* via a novel chemokinetic mechanism[J]. Plant, Cell & Environment, 2006, 29(4): 608-618.
- [50] Yonge C. The 'Mussel' Form and Habit[C]// Bayne B L. Marine Mussels: Their Ecology and Physiology[M]. Cambridge, U K: Cambridge University Press, 1976.
- [51] 朱曜曜, 丁海兵, 孙承君. 贻贝黏性蛋白组成、作用机理与应用[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(4): 560-570.
- Zhu Yaoyao, Ding Haibing, Sun Chengjun. The resea-

- rch progress on mussel adhesive proteins[J]. *Advances in Marine Science*, 2014, 32(4): 560-570.
- [52] 孙承君. 海洋贻贝粘附机理及应用探讨[C]//中国海洋湖沼学会、中国海洋湖沼学会腐蚀与污损专业委员会. 中国海洋湖沼学会第十次会员代表大会 2012 海洋腐蚀与生物污损学术研讨会摘要集, 2012: 8.
- [53] 陈长春, 项凌云, 刘汉奇. 海洋污损生物藤壶的附着与防除[J]. *海洋环境科学*, 2012, 31(4): 621-624.
Chen Changchun, Xiang Lingyun, Liu Hanqi. Adhesion mechanism and prevention of marine biofouling barnacle[J]. *Marine Environment Science*, 2012, 31(4): 621-624.
- [54] 严涛, 黎祖福, 胡煜峰, 等. 中国沿海无柄蔓足类研究进展[J]. *生态学报*, 2012, 32(16): 5230-5241.
Yan Tao, Li Zufu, Hu Yufeng, et al. A review on the balanomorph barnacles in the coastal waters of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 5230-5241.
- [55] Guo S, Zhu X, Janczewski D, et al. Measuring protein isoelectric points by AFM-based force spectroscopy using trace amounts of sample[J]. *Nature Nanotechnology*, 2016, 11(9): 817-823.
- [56] Kamino K. Mini-review: barnacle adhesives and adhesion[J]. *Biofouling*, 2013, 29(6): 735-749.
- [57] Qi Y, Wu Z, He J, et al. Conspicuous cues that induce spore settlement in the biofouling and green tide-forming alga *Ulva tepida* provide a potential aggregation mechanism[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2019, 145: 104807.
- [58] 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.
Xu Zhen, Ou Yangqing, Yi Dinghe. Antifouling method of marine fouling organisms—A review[J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2012, 24(3): 192-198.
- [59] Kawabe A, Treplin F. Control of macrofouling in Japan, existing and experimental methods[J]. *Research Reports*, 1986, 23, 1-42.
- [60] Venkatesan R, Murthy P S. *Macrofouling Control in Power Plants*[M]//Springer Series on Biofilms. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008, 1-27.
- [61] Zhang H, Wang Y N, Peng J Z. Research on the design and control strategy of cleaning robot for power plant condenser[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2008, 35(6): 31-35.
- [62] 陈满, 彭鹏, 麻建超, 等. 海水抽水蓄能电站防污方案研究[J]. *装备环境工程*, 2018, 15(10): 60-66.
Chen Man, Peng Peng, Ma Jianchao, et al. Antifouling strategies for seawater pumped storage power plant[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2018, 15(10): 60-66.
- [63] 华丕龙, 单凤霞. 广州蓄能水电厂淡水壳菜生境调查及防治初探[J]. *水力发电*, 2014, 40(11): 82-85.
Hua Pilong, Shan Fengxia. Habitat survey and prevention of *Limnoperna lacustris* in Guangzhou pumped storage power station[J]. *Water Power*, 2014, 40(11): 82-85.
- [64] 王丹, 董海杰, 于超. 超声波防海生物技术标准在海平上平台应用[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2018, 38(24): 7-9.
- [65] 济南欧航机电设备有限公司. 英国 Ultrasonic 船用超声波防污清洁设备[EB/OL]. [2020-03-25]<http://hbshebei.bjx.com.cn/product/329637.html>.
- [66] Hunsucker K Z, Vora G J, Hunsucker J T, et al. Biofilm community structure and the associated drag penalties of a groomed fouling release ship hull coating[J]. *Biofouling*, 2018, 34(2): 162-172.
- [67] Tribou M, Swain G. The effects of grooming on a copper ablative coating: a six year study[J]. *Biofouling*, 2017, 33(6): 494-504.
- [68] Tamburri M N, Davidson I C, First M R, et al. In-water cleaning and capture to remove ship biofouling: An initial evaluation of efficacy and environmental safety[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, 7(437): 1-14.
- [69] 刘敏杰. 非氧化性杀生剂与氧化性杀菌剂交替使用在珠江电厂冷却水处理中的应用[J]. *热力发电*, 2010, 39(8): 61-63.
Liu Minjie. Alternatively using non-oxidizing biocide and oxidizing insecticide in cooling water treatment at Zhujiang Power Plant[J]. *Thermal Power Generation*, 2010, 39(8): 61-63.
- [70] Glomski L M. *Zebra Mussel Chemical Control Guide, Version 2.0*[M]//Engineer Research and Development Center Vicksburg MS Environmental Lab, 2015.
- [71] Qian P Y, Xu Y, Fusetani N. Natural products as antifouling compounds: recent progress and future perspectives[J]. *Biofouling*, 2009, 26(2): 223-234.
- [72] Qian P Y, Li Z, Xu Y, et al. Mini-review: Marine natural products and their synthetic analogs as antifouling compounds: 2009-2014[J]. *Biofouling*, 31(1-2): 101-122.
- [73] Takamura H, Ohashi T, Kikuchi T, et al. Late-stage divergent synthesis and antifouling activity of geraniol-butenolide hybrid molecules[J]. *Organic & Biomolecular Chemistry*, 2017, 15(26): 5549-5555.
- [74] USEPA. What are biopesticides?[EB/OL]. (2014-04-08) <http://www.epa.gov/pesticides/biopesticides/whatarebiopesticides.html>.
- [75] Wang N, Ma S, Duan J, et al. Electrocatalytic oxygen reduction to hydrogen peroxide by oxidized graphene aerogel supported MnCO₃ cubic for antibacteria in neutral[J]. *Electrochimica Acta*, 2020, 340: 135880.
- [76] Bodkhe R B, Stafslie S J, Daniels J, et al. Zwitterionic

- siloxane-polyurethane fouling-release coatings[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2015, 78: 369-380.
- [77] Xu W, Ma C, Ma J, et al. Marine biofouling resistance of polyurethane with biodegradation and hydrolyzation[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2014, 6(6): 4017-4024.
- [78] Ma C, Xu L, Xu W, et al. Degradable polyurethane for marine anti-biofouling[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2013, 1(24): 3099-3106.
- [79] Xie Q, Pan J, Ma C, et al. Dynamic surface antifouling: mechanism and systems[J]. *Soft Matter*, 2019, 15(6): 1087-1107.
- [80] Zhang L, Shan C, Jiang X, et al. High hydrophilic antifouling membrane modified with capsaicin-mimic moieties via microwave assistance (MWA) for efficient water purification[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 338: 688-699.
- [81] Zhang L, Xu J, Tang Y, et al. A novel long-lasting antifouling membrane modified with bifunctional capsaicin-mimic moieties via in situ polymerization for efficient water purification[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, 4(26): 10352-10362.
- [82] Monfared H, Sharif F. Design guidelines for development of tin-free antifouling self-polishing coatings using simulation[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2008, 63(1): 79-86.
- [83] Chen R, Xie Q, Zeng H, et al. Non-elastic glassy coating with fouling release and resistance abilities[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(1): 380-387.
- [84] Shivapooja P, Yu Q, Orihuela B, et al. Modification of silicone elastomer surfaces with zwitterionic polymers: short-term fouling resistance and triggered biofouling release[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(46): 25586-25591.
- [85] Li L, Yan B, Yang J, et al. Injectable self-healing hydrogel with antimicrobial and antifouling properties[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(11): 9221-9225.
- [86] 黄克竹, 赵九夷. 铜及铜合金的防污性能[J]. *材料开发与应用*, 1990, 3: 24-26.
- [87] 隋佳利. 铜合金偶合加速腐蚀行为及防污性能研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016.
Sui Jiali. Study on the accelerated galvanic corrosion behavior and antifouling performance of copper alloy[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2016.
- [88] Bellotti N, Amo B D, Romagnoli R. Tara tannin a natural product with antifouling coating application[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2012, 74(3): 411-417.
- [89] Lu Z, Chen Z, Dong L, et al, Flexible hydrophobic antifouling coating with oriented nanotopography and nonleaking capsaicin[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(11): 9718-9726.
- [90] Wong T S, Kang S H, Tang S K Y, et al. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity[J]. *Nature*, 2011, 477: 443-447.
- [91] Lundberg P, Bruin A, Klijnstra J W, et al. Poly (ethylene glycol)-based thiol-ene hydrogel coatings— curing chemistry, aqueous stability, and potential marine antifouling applications[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2010, 2(3): 903-912.
- [92] Venault A, Zheng Y S, Chinnathambi A, et al. Stimuli-responsive and hemocompatible pseudozwitterionic interfaces[J]. *Langmuir*, 2015, 31(9): 2861-2869.
- [93] Fan L, Yang J, Wu H, et al. Preparation and characterization of quaternary ammonium chitosan hydrogel with significant antibacterial activity[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2015, 79: 830-836.
- [94] Szabó T, Mihály J, Sajó I, et al. One-pot synthesis of gelatin-based, slow-release polymer microparticles containing silver nanoparticles and their application in anti-fouling paint[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2014, 77(7): 1226-1232.
- [95] Liu C, Ma C, Xie Q, et al. Self-repairing silicone coatings for marine anti-biofouling[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, 5(30): 15855-15861.
- [96] MacKenzie A F, Maltby E A, Harper N, et al. Periodic ultraviolet-C illumination for marine sensor antifouling[J]. *Biofouling*, 2019, 35(5): 483-493.
- [97] Bueley C, Olender D, Bocking B. In-situ trial of UV-C as an antifoulant to reduce biofouling induced measurement error[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2014, 9(4): 49-67
- [98] Roszell J. UV-C as a pre-treatment option against microalgae in drinking water facilities[D]. Guelph, Canada: University of Guelph, 2020.
- [99] Jongerius M E P, Visser C, Swain G, et al. UVC antifouling solutions: Device design simulation and experimental verification: Philips Royal, AkzoNobel, 2018.6.
- [100] Herget K, Frerichs H, Pftzner F, et al. Functional enzyme mimics for oxidative halogenation reactions that combat biofilm formation[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(36): 1707073.
- [101] 李跃瑞, 蔺存国, 王利. 海洋污损生物黏附机制与酶防污技术研究进展[J]. *舰船科学技术*, 2017, 39(4): 1-7.
Li Yuerui, Lin Cunguo, Wang Li. Attachment mechanisms of marine fouling organisms and progress of enzyme based antifouling technology[J]. *Ship Science and Technology*, 2017, 39(4): 1-7.
- [102] Herget K, Hubach P, Pusch S, et al. Haloperoxidase mimicry by CeO₂-x nanorods combats biofouling[J].

- Advanced Materials, 2017, 29(4): 1603823.
- [103] Wang Y, Chen C, Zhang D, Wang J. Bifunctionalized novel Co-V MMO nanowires: Intrinsic oxidase and peroxidase like catalytic activities for antibacterial application[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2020, 261, 118256.
- [104] 王楠. 碳基催化材料的制备及抗菌防污机制的研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2020.
Wang Nan. Research of carbon-based catalytic materials preparation and antibacterial and antifouling mechanisms[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academic of Science, 2020.
- [105] Horejs C. Flexible electronics: Lasting memories are in sight[J]. Nature Reviews Materials, 2018, 3: 18002.
- [106] Huang S, Liu Y, Zhao Y, et al. Flexible electronics: stretchable electrodes and their future[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(6): 1805924.
- [107] Tan R K L, Reeves S P, Hashemi N, et al. Graphene as a flexible electrode: review of fabrication approaches[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 5(34): 17777-17803.
- [108] Zhang Q, Yue F, Xu L, et al. Based porous graphene/single-walled carbon nanotubes supported Pt nanoparticles as freestanding catalyst for electro-oxidation of methanol[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2019, 257: 117886.
- [109] Wang Z L. Catch wave power in floating nets[J]. Nature, 2017, 542(7640): 159-160.
- [110] Long Y, Yu Y, Yin X, et al. Effective anti-biofouling enabled by surface electric disturbance from water wave-driven nanogenerator[J]. Nano Energy, 2019, 57: 558-565.

Research progress of biofouling and its control technology in marine underwater facilities

DUAN Ji-zhou^{1, 2, 3}, LIU Chao^{1, 2, 3}, LIU Hui-lian^{1, 2}, SUN Jia-wen^{1, 2, 3, 4},
ZHANG Yi-meng^{1, 2, 3}, WANG Nan^{1, 2, 3, 4}, ZHAI Xiao-fan^{1, 2, 3}, GUAN Fang^{1, 2, 3},
ZHENG Meng^{1, 2, 3}, ZHANG Jie^{1, 2, 3}, WANG Xiu-tong^{1, 2, 3}, HOU Bao-rong^{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, China; 3. Open Studio for Marine Corrosion and Protection, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 4. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Received: Mar. 25, 2020

Key words: marine infrastructure; biofouling; fouling organisms; antifouling

Abstract: In recent years, more and more ships, platforms, and other underwater facilities have been applied in the sea. Marine biofouling frequently occurs in the harsh marine environment. Biofouling affects the efficiency of the underwater facilities and may even lead to huge economic loss. Thus, it is necessary to take effective measures to control biofouling for the efficient operation of the ships, offshore structures and other infrastructures in the sea. This review summarizes the harm of biofouling to marine infrastructures, briefly introduces marine biofouling and its formation process, and details organisms found in the coast of China. And the attachment mechanism of typical organisms is also reviewed in this paper. Biofouling control technologies or solutions are reviewed and new anti-fouling strategies developed in recent year are also described. Last, the trend of antifouling technology in the future are also discussed in this review.

(本文编辑: 丛培秀)