

Exploration of New Technologies for Corrosion Protection of Ship and Ocean Engineering Structures

Yan Jin

Shanghai COSCO Shipping Heavy Industries Co., Ltd., Shanghai, 201913, China

Abstract

Ships and marine engineering structures have been exposed to complex and harsh marine environments for a long time, and corrosion problems seriously threaten their safety and service life, causing huge economic losses. Traditional corrosion protection technologies have certain limitations in addressing marine environmental challenges, therefore, it is urgent to explore new and efficient corrosion protection technologies. This article summarizes the corrosion problems faced by ships and marine engineering structures, and provides a detailed introduction to various new corrosion protection technologies that have emerged in recent years. It is expected to provide more reliable and long-term corrosion protection for ships and marine engineering structures, and promote the sustainable development of the marine industry.

Keywords

Ship and Ocean Engineering; Corrosion protection; New technology

船舶与海洋工程结构腐蚀防护新技术探索

金艳

上海中远海运重工有限公司, 中国·上海 201913

摘要

船舶与海洋工程结构长期处于复杂且恶劣的海洋环境中, 腐蚀问题严重威胁其安全性与使用寿命, 造成了巨大的经济损失。传统的腐蚀防护技术在应对海洋环境挑战时存在一定的局限性, 因此, 探索新型高效的腐蚀防护技术迫在眉睫。本文综述了船舶与海洋工程结构面临的腐蚀问题, 详细介绍了近年来涌现的多种新型腐蚀防护技术, 有望为船舶与海洋工程结构提供更可靠、更长效的腐蚀防护, 推动海洋产业的可持续发展。

关键词

船舶与海洋工程; 腐蚀防护; 新技术

1 引言

海洋覆盖了地球约 71% 的表面, 航海和海洋产业已成为世界经济发展的重要支柱, 国际贸易中 90% 以上的运力依靠海洋运输。同时, 海洋平台是油气资源开发的关键, 海上风电作为新能源也在近年来得到大力发展。然而, 海洋环境极为苛刻, 船舶与海洋工程结构在其中面临着严重的腐蚀问题^[1]。在海洋环境中, 船舶与海洋平台的腐蚀问题尤为突出, 已成为影响其服役安全、寿命和可靠性的最重要因素, 引起了各国政府和工业界的高度重视。因此, 大力发展海洋工程防腐材料和技术, 对保障船舶与海洋工程的服役安全与可靠性、降低事故发生率、延长构筑物使用寿命具有重大意义。

2 船舶与海洋工程结构腐蚀现状及传统防护技术局限性

2.1 腐蚀现状

船舶与海洋工程结构的主要失效形式多样, 包括均匀腐蚀、点蚀、应力腐蚀、腐蚀疲劳、腐蚀/磨损、海生物(宏生物)污损、微生物腐蚀、 H_2S 与 CO_2 腐蚀等。在海洋大气区, 由于存在 Cl^- 、 Mg^{2+} 和 SO_4^{2-} 等离子, 以及日照和海风的作用, 即使采取了一定的腐蚀防护措施, 结构仍会发生严重腐蚀。浪花飞溅区的腐蚀速率最高, 潮差区次之。研究表明, 海洋腐蚀最严重的部位大约位于平均海平面以上 0.6 - 1.4m 左右, 同一种材料在浪花飞溅区的腐蚀速率比全浸区高 3 - 10 倍。在潮差区和全浸区的较浅区域, 海洋生物的污损不仅会使船舶航速显著降低, 还会因重量增加威胁整个海洋平台的安全。这些腐蚀问题不仅影响结构的性能和安全, 还导致了高昂的维修和更换成本。

【作者简介】金艳(1981-), 男, 中国上海人, 本科, 工程师, 从事船舶与海洋工程研究。

2.2 传统防护技术局限性

传统的腐蚀防护技术主要包括涂料（涂层）、耐腐蚀材料、表面处理与改性、电化学保护（牺牲阳极、外加电流阴极保护）、缓蚀剂等。涂料是船舶和海洋结构腐蚀控制的首要手段，然而，传统的海洋防腐涂料存在诸多问题。例如，其防护期较短，一般为1-10年，难以满足长期服役的需求；涂层结合强度低，通常在3-6MPa，容易剥落；并且涂料中含有大量有机挥发物（VOCs），对环境造成严重污染。耐腐蚀材料方面，我国传统耐蚀钢的研发参照美国1995年提出的I指数，仅考虑了Cu、P、Cr和Ni元素对材料耐蚀性的影响，忽略了钢中夹杂物类型、微观组织结构变化和环境因素波动的作用，导致耐蚀钢的环境适应性差，维护成本高。表面处理与改性技术在复杂结构和水下施工时面临技术壁垒，难以全面有效地实施^[2]。电化学保护系统在水下环境中易因泥沙覆盖、生物附着等原因导致保护失效。缓蚀剂则主要适用于介质相对固定的内部结构，应用范围有限。因此，开发新型的腐蚀防护技术已成为船舶与海洋工程领域的当务之急。

3 船舶与海洋工程结构腐蚀防护新技术

3.1 纳米复合涂层技术

纳米复合涂层技术将纳米材料均匀混合到传统基体材料当中去，制成功能很强的功能涂层，依靠纳米颗粒的尺寸效应、表面效应和量子尺寸效应，明显加强涂层的总体性能。如今，纳米氧化物、碳纳米管以及金属纳米粒子等已经被大量应用到这类涂层的制造过程里，在实际使用过程中，这些纳米成分不但能很好地填充涂层内部的小孔，大幅度提高涂层的致密度，阻挡腐蚀介质渗透，而且还能和聚合物分子产生协同效果，极大地改善涂层的力学强度和附着能力。

纳米复合涂层凭借优良性能在工程应用方面具有重要价值，其防护特性明显延长了结构件服役寿命，纳米粒子加入后涂层硬度、耐磨性以及抗划伤能力大幅改善，抵抗海洋环境里机械应力引发的损害和磨损，此类涂层拥有很好的自修复能力，某些纳米材料在表面破损时会释放出修复分子，自动填满涂层漏洞^[3]。当下，国际知名涂料厂商采用中国生产的纳米氧化物浓缩液，通过特定工艺制作出高品质船舶专用纳米复合涂料，应用于舰船领域，保护效果非常出色。海洋平台防腐蚀工程当中，采用纳米复合涂层之后，相关区域的腐蚀速率明显下降，设备维护周期延长，整体运维成本被有效控制。

3.2 智能涂层技术

智能涂层技术属于一种带有环境响应特性功能涂层系统，它主要依靠形状记忆聚合物、智能变色材料以及自修复材料这些新型功能型材料形成。形状记忆聚合物涂层在遭受机械损伤之后，经过一定条件便可以恢复到最初状态，这样就能做到结构自愈合。智能变色材料涂层可以按照周围环

境中的腐蚀介质浓度，温度和湿度等因素变化而改变颜色，给结构的腐蚀状况赋予直接观测的凭借，自修复材料涂层在微小裂纹或者局部存在瑕疵之处出现时，会凭借内部化学反应机制自动完成修补工作，从而保证整个涂层防护性能始终稳定^[4]。

智能涂层技术凭借自身主动防护和实时监测的特点，冲破了传统涂层材料的固有限制。相较于传统涂层而言，它具有更强的可靠性和智能化特性，在船舶行业里，智能变色涂层能够动态显示船体各个区域的腐蚀情况，给运维决策给予准确的数据支撑。自修复涂层可以在微小损伤出现的时候自动开展修补工作，防止腐蚀介质渗入，进而明显提升船体的服役时间。在海上风电方面，智能涂层可以依照复杂的海域环境参数，比如风速，波浪强度以及盐度变动，动态调整防护性能，既改善了设备运行的稳定性，又削减了维护费用和停机的风险。

3.3 表面改性新技术

表面改性技术包含等离子体处理和激光表面处理这两种类型，等离子体处理技术是依靠高能粒子去撞击材料表面，造成原子排列和化学成分发生改变，进而提升材料的抗腐蚀性能。激光表面处理技术则是用高能量密度的激光束对目标区域实施快速加热和冷却，形成具备特定微观结构和优良性能的改性层，激光熔覆技术可以把耐腐蚀合金沉积到基材表面，明显改良它的防护功能，激光淬火技术通过局部热处理来加强材料表面的硬度，而且改善它的耐蚀性能。

表面改性技术可以在保持基材整体性能不变的情况下，极大提高材料的耐蚀性，等离子体处理工艺通过在表面形成致密的氧化膜或者氮化膜来阻止腐蚀介质的渗透，具有环保且高效的优点；激光表面改性技术凭借高精度和低热输入的特点，在构建高性能功能涂层方面有着明显的优势。在海洋工程方面，利用等离子体处理技术对海上平台钢结构进行预处理之后，其抗海水腐蚀能力得到了明显的改善；采用激光熔覆技术给船舶螺旋桨表面沉积耐蚀合金涂层以后，不但提高了螺旋桨的耐磨程度，而且极大地延长了服役时间，从而大幅度降低了维护开支以及运营费用。

3.4 微生物防护技术

微生物防护技术的关键是抑制海洋微生物的生长与代谢活动，以此来阻止微生物腐蚀现象的发生，其基本原理主要包含利用抗菌剂干扰微生物生理功能、采用仿生表面设计阻止微生物附着、利用微生物竞争机制调节有害菌群繁殖等手段，一些抗菌成分可通过破坏细胞壁结构或者抑制酶活性来达到杀菌目的，仿生表面模仿自然生物体表层的微观结构特征，创造出不利于微生物附着的环境条件，引入益生菌去争夺营养资源和生存空间，也能明显削减有害微生物的存活几率及其数量规模。

微生物防护技术由于具有高精度和长效性特点，在抑制微生物腐蚀方面表现出明显效果。在船舶压载舱和海水冷

却系统当中,通过向介质里加入抗菌剂或者采用仿生涂层材料,就可以有效地阻止硫酸盐还原菌等致腐微生物生长繁殖,进而大幅度削减微生物腐蚀带来的风险^[5]。在海洋养殖设施范畴内,利用这项技术不但可以抑制海洋生物附着,维持设备表面干净整洁,而且还能延长设施使用寿命,而且可以改善养殖环境,推动水产品质量提高,而且可以大幅度缩减由生物污损和微生物腐蚀造成的经济损失。

3.5 多技术协同防护体系

多技术协同防护体系是把多种腐蚀控制手段整合起来的一种综合策略,目的在于利用彼此间的互补效果,实现对船舶及海洋工程结构的全面防护。在纳米复合涂层和电化学保护技术联手使用的情况下,前者可以形成物理隔离层,阻止腐蚀介质渗透,后者则在涂层出现损坏的时候,给基体赋予阴极保护,以此来推迟或者阻止腐蚀进程。智能涂层同表面改性技术结合起来之后,一方面会创建起一个随时监测的系统,并且执行动态调节,另一方面会改善材料本身的性能,两者互相配合,极大地提升了防护效果。

多技术协同防护体系冲破了传统单一防护手段的局限性,明显改善了防腐蚀效能。在海上石油平台运作期间,采取涂层与阴极保护并用的综合防护办法,涂层可以很好地阻隔腐蚀介质,阴极保护能够弥补涂层也许会存在的不足之处,两者协同合作大大增长了平台的服役时长。针对大型船舶来说,通过整合纳米复合涂层,智能涂层以及电化学保护技术来创建多技术协同防护系统,既改善了船体抵御腐蚀的能力,又做到了对腐蚀状况的动态检测并加以智能化管理,从而给保证航行安全给予了有力支撑。

4 新技术发展面临的挑战及对策

虽然新兴技术在船舶与海洋工程结构防腐领域存在明显应用前景,不过实际部署及推广遇到很多难点。纳米复合涂层技术中,纳米颗粒是否能够均匀分散又稳定,容易发生团聚情况,这会导致涂层性能难以一致,且维持长久^[6]。智能涂层技术因为成本太高不能普及到大量应用场景当中去,一些高性能材料费用较贵就属于制约因素之一,表面改变新技术往往需要精确加工装置作为支撑,并且对工作环境也提出相应约束条件,在面对复杂或者大范围地方的时候很难施展自如,微生物防护技术所带有的长效抗菌方式以及它的生态安全还需要进一步探讨,制备仿生表面的过程同样面临技术难题急需改善升级处理手段。需要多技术协作共同保护的状况比较繁杂,综合考虑各技术搭配情况并结合他们的合作效果,这个过程对工程操作提出较高要求。

关于纳米复合涂层里纳米粒子团聚现象,采用表面改性技术和高效分散剂来达成纳米颗粒的均匀分布以及稳定

化处理,要想减轻智能涂层成本过高的问题,就得从多个角度出发,一方面改良制作工艺,研制出新的低成本原料,以此缩减生产投入。另一方面改善涂层结构规划,适当削减智能材料的使用数量,在推进表面改性技术发展的过程中,要加大对装备更新和工艺改良的力度,提升自动化程度和运作效率,进而有效地掌控设备投资以及维护开支。就微生物防护而言,可以去开发环保型的长效抗菌剂,而且完善仿生表面的制造技术,从而提升产品制造效率和性能的稳定性,当创建起多技术协同防护体系的时候,要形成起一套系统的评价和改良机制,将数值模拟同实验验证这两种办法结合起来,科学地选出最佳组合方案及其关键参数,保证工程技术方案具有可行性和可靠性。

5 结语

综上,船舶与海洋工程结构的腐蚀防护问题已成为制约海洋产业可持续发展的主要瓶颈,传统的防腐技术由于自身缺陷,在面对现代海洋工程的严苛环境时显得无能为力。近些年来,纳米复合涂层、智能响应型涂层、表面改性新材料、微生物防蚀以及多技术协同防护体系等一些具有革新意义的防腐手段不断涌现,给解决复杂海工环境下腐蚀难题赋予了新的思路。这些新出现的技术不但明显改进了防腐性能,而且延长了结构的服役时间,有效地削减了运维成本,在实际工程应用当中表现出明显的技术优势和经济价值。当下,技术创新与应用发展碰上不少瓶颈,迫切要依靠基础理论研究深入化和创新思维能力加强,冲破核心技术难题,大幅削减实施成本,从而优化技术的可靠性和稳定性。在全球科技创新持续加快的形势下,以后会涌现出更多高效能、环境友好、智能化的防腐蚀解决办法,给船舶和海洋工程结构给予更为可靠和长久的保护,进而促使海洋经济完成高质量转型与发展。

参考文献

- [1] 张先刚. 海洋工程结构与船舶防腐蚀技术探究[J]. 船舶物资与市场, 2023, 31 (09): 30-32.
- [2] 胡辉. 船舶与海洋工程钻井平台钢结构的防腐蚀设计与施工研究[J]. 中国涂料, 2021, 36 (05): 63-67+74.
- [3] 王剑. 海洋工程结构与船舶防腐蚀技术探究[J]. 船舶物资与市场, 2022, 30 (02): 62-64.
- [4] 牟音如. 海洋工程结构与船舶防腐蚀技术探讨[J]. 船舶物资与市场, 2021, 29 (08): 73-74.
- [5] 刘爱东. 海洋工程结构与船舶防腐蚀技术探究[J]. 船舶物资与市场, 2021, 29 (06): 1-2.
- [6] 许金堂. 船舶和海洋工程结构的防腐蚀技术分析[J]. 船舶物资与市场, 2023, 31 (01): 41-43.