

海洋腐蚀防护的现状与未来*



侯保荣 张 盾 王 鹏

中国科学院海洋研究所 青岛 266071

摘要 海洋环境是最为恶劣的自然腐蚀环境；海洋腐蚀问题是海洋工程安全服役面临的主要威胁，也给国民经济带来巨大的损失。未来人类对海洋开发的深度和广度将不断拓展，也将面临不断出现新的腐蚀问题的挑战。文章结合目前海洋开发研究的现状及未来发展趋势，介绍了海洋腐蚀环境特点，分析了我国海洋腐蚀防护现状及需求，并对海洋腐蚀防护研究以及相关政策规章的制定提出了建议。

关键词 海洋环境，腐蚀与防护，规划建议

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2016.12.006

海洋蕴藏着丰富的资源，具有潜在的巨大经济利益和战略性的国防地位。海洋事业的发达程度是一个国家科技力量和水平的综合体现，也是一个国家经济发展和国家地位的标志。

海洋腐蚀问题是海洋开发过程中面临的威胁之一。由海洋腐蚀所引起的灾难性事故案例很多，造成了很多极其巨大的损失。1980年，英国北海“亚历山大基定德”号钻井平台桩腿上的焊缝被海水腐蚀，裂纹在波浪载荷的反复作用下不断扩展，导致倾倒，123人遇难。2010年4月20日，英国石油公司墨西哥湾“深水地平线”钻井平台海底阀门失效导致爆炸，致死11人，随后3个月海底原油不断涌出，溢出量超过400万桶，成为美国海域最严重的环境灾难。由于3000 m深海环境的复杂性，历时3个多月，几乎动用了所有的力量才堵住了海底原油的泄露。2013年11月22日，山东青岛经济开发区排水暗渠发生爆炸，造成62人死亡，直接经济损失超过7.5亿元。国务院特别重大事故调查组调查报告指出，该事故直接原因是“输油管道与排水暗渠交汇处管道腐蚀减薄、管道破裂、原油泄漏”。

除了安全问题，海洋腐蚀也带来了巨大的经济损失。2016年3月，全球腐蚀调查报告表明，世界平均腐蚀损失约占全球国民生产总值（GNP）的3.4%。一般认为，海洋腐蚀

*资助项目：中国工程院重大咨询项目（2015ZD08），国家支撑计划项目（2012BA B15B00），国家“973”计划项目（2014CB643300），国家海洋局公益性项目（201005028）

修改稿收到日期：2016年12月2日

损失约占总腐蚀损失的 1/3。因此海洋腐蚀的损失是惊人的。根据国内外经验，如果采用有效的防护措施，25%—40% 的腐蚀损失可以被避免。

综上，海洋腐蚀会造成设施装备结构损伤、使役寿命缩短，是关系到国计民生的重要问题。严重的腐蚀还可能引起突发性灾难事故，污染环境，危及人民群众的生命财产安全。

1 海洋环境腐蚀特点

海洋环境是腐蚀性最为严酷的自然环境。海水是一种具有很强腐蚀性的电解质溶液，含有大量的盐类，包括氯化钠以及含有钾、溴、碘等元素的盐类。海水中溶解有氧气、氮气、二氧化碳等气体，而其中的氧气是引起海水中碳钢、低合金钢等金属结构物腐蚀的重要影响因素。表层海水氧气是饱和的，大约为 8 mg/L，腐蚀性更强。海水温度有周期性的变化，一般来说，钢铁等的腐蚀速度会随着海水温度的升高而增加。另外，海水含有丰富的氧微量元素和营养盐类等，这为海洋生物的生存和繁殖提供了必要的条件。而海洋生物的存在则会影响金属材料的腐蚀行为与机制。

通常来说，从腐蚀的角度可将海洋环境分为 5 个不同区带：海洋大气区、浪花飞溅区、海洋潮差区、海水全浸区和海底泥土区（表 1）^[1]。

1.1 海洋大气区腐蚀特点

大气是金属材料接触最多的环境介质，据统计，80% 的金属构件在大气环境中使用。我国有 18 000 多公里的海岸线，金属材料多处于海洋大气环境中；且海洋

大气中富含多种盐粒，对金属有较强腐蚀性。金属材料的大气腐蚀是以电化学机理进行的。金属暴露在大气环境中，会从大气环境中吸收水分，并在金属表面形成一层薄层电解液膜。这层电解液膜的存在使得金属表面发生电化学反应成为可能。金属表面吸水量是与大气环境的相对湿度有关的。在相对湿度为 75% 时，吸附的水分子层厚度约为 5 层。一般来讲，水膜的厚度大于 5 层，就可进行电化学腐蚀过程。大气污染性气体及大气悬浮粒子会沉降在金属表面的薄液层中，并影响和参与材料的大气腐蚀过程。

1.2 浪花飞溅区腐蚀特点

在海洋环境中，海水的飞沫能够喷洒到其表面，但在海水涨潮时又不能被海水所浸没的部位通常称为浪花飞溅区。在浪花飞溅区，材料长期处于干湿交替的环境中，供氧量充分，且由于海水的飞溅，其飞沫可以直接打到金属表面，使其腐蚀很严重，一般为海水全浸区的 5—10 倍，是海洋环境中典型的强腐蚀区。中科院海洋环境腐蚀与防护重点实验室开展了持续的海洋浪花飞溅区腐蚀机理和防腐蚀技术研究，成功开发矿质包覆防护技术，解决了浪花飞溅区腐蚀问题。同时，开发了钢筋混凝土结构防腐与修复技术，在海洋工程结构防护中得到广泛应用。

1.3 海洋潮差区腐蚀特点

海洋潮差区处于平均高潮线与低潮线之间，该区域作为氧浓差电池的阴极区而受到保护，腐蚀速率较低。但是，该区域存在海洋生物污损及好氧菌附着腐蚀现象。腐蚀生物会通过氧浓差电池等多种方式加速金属基

表 1 不同海洋环境区域的腐蚀特点比较

海洋区域	环境条件	腐蚀特点
海洋大气区	影响因素包括盐雾眼、雨量、湿度、温度、阳光辐射等	发生腐蚀、老化，部分环境存在霉菌腐蚀
浪花飞溅区	材料表面受到海水冲击，潮湿、供氧充分	受到海水飞溅、干湿交替作用，腐蚀严重
海洋潮差区	材料周期浸没，供氧充足	发生腐蚀及生物污损，腐蚀速率相对较低
海水全浸区	影响因素包括含盐量、压力、溶解氧、水温、海生物、细菌等	发生腐蚀及生物污损，腐蚀速率随温度、海水深度等因素变化
海底泥土区	存在大量厌氧微生物（如硫酸盐还原菌等）	发生典型的厌氧微生物腐蚀

底腐蚀,诱发局部腐蚀破坏等问题。据报道,微生物腐蚀所致腐蚀损失占总腐蚀损失的20%左右^[2]。

1.4 海水全浸区腐蚀特点

在海水全浸区,由于腐蚀与氧含量密切相关,因此腐蚀速率随深度增加有所减轻。然而,该区域覆盖范围较广,随着深度的增加,海水压力、pH值、盐度、海洋生物和含氧量会发生明显的变化,均匀腐蚀速率降低,电偶腐蚀、缝隙腐蚀和点蚀等局部腐蚀加剧。另外,该区域腐蚀存在多因素交互作用的特点,氢致开裂、应力腐蚀和腐蚀疲劳规律与机理都会发生显著的变化,材料在海洋环境下发生环境敏感断裂的倾向更为严重。

1.5 海底泥土区腐蚀特点

在海底泥土区,由于氧气浓度较低,腐蚀速率通常较低。但是,在有腐蚀微生物存在条件下,微生物代谢活动会加速金属的腐蚀,改变腐蚀机制。中科院海洋所在微生物腐蚀研究领域积累了大量成果,研究了海洋微生物腐蚀机理^[3,4],开发了腐蚀微生物快速检测传感器技术^[5,6],以及多种海洋微生物腐蚀防护新材料技术^[7,8]。

2 我国海洋腐蚀与防护现状

2.1 我国海洋腐蚀现状

为深入了解我国现阶段腐蚀状况,中国工程院特别设立了“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目。组织了包括近30位院士在内的200位科技工作者,针对基础设施、水环境、能源、交通运输和生产制造五大领域的铁路、机场、公路桥梁、港口码头、水利工程、船舶、飞机、火车、煤炭工业、电力系统、城市供水、海水养殖、文物/古迹、海水淡化、海洋平台及装备、海底管道、海洋石油装备、建筑、汽车、石油天然气工业、冶金、电子工业、造纸业、化工、电信、家电、制药业、采矿业、食品加工、医疗器械、农业等30多个重点行业进行腐蚀成本和防护策略的调查研究。在此基础上,借助数学和经济学的理论和方法,计

算我国的腐蚀成本。

经过问卷调查、实地考察、案例调研、会议交流、专题座谈、上网检索、模拟计算、统计分析等系统工作,调查结果表明,2014年,我国腐蚀成本约占我国GDP的3.34%,达到21278.2亿元人民币,每位公民承担的腐蚀成本超过1555元。

与发达国家相比,我国腐蚀调查工作开展晚,重视程度低。此次腐蚀成本调查的开展对于加强人们对腐蚀危害的认识,提高人们的防腐蚀意识有重要的意义。

2.2 我国海洋腐蚀与防护需求现状

目前,发展海洋经济和海洋科技已经被我国提升到前所未有的战略高度,海岸工程、海洋开采、水下工程等战略性新兴海洋产业正在迅速兴起,发展和建造各类新型高水平深海钻井设备、舰艇、深潜器和海洋空间站等设施是海洋资源开发和维护国防安全的根本物质保障。另外,我国海岸线长,随着近年来经济高速发展,海岸工程、码头、跨海桥梁建设体量迅猛扩张,使用了大量各类结构材料。我国正在开展包括环渤海经济区、黄三角经济区、山东半岛蓝色经济区、江苏沿海经济区、长三角经济区、珠三角经济区和海峡西岸经济区的链式经济区带的建设。在开展近海海洋工程建设的同时,海上设施也不断在向远海和深海拓展,目前,我国在海洋油气田开发、港口建设、跨海大桥、海底管线、船舶工程和深海勘探等领域已建和在建大量的各种海洋钢结构及钢筋混凝土结构设施。这些海上设施广泛分布在我国沿海一线和南海、东海等重点海域,贯穿海洋大气区、浪花飞溅区、海洋潮差区、海水全浸区和海底泥土区等不同的海洋腐蚀环境,遭受十分严重的腐蚀破坏。海洋腐蚀及生物污损严重威胁着这些重大工程设施安全运行。然而,目前多数海洋工程结构处于裸露或欠保护状态,海洋工程结构安全堪忧,腐蚀损失巨大。保证各种海洋工程设施的耐久性和安全性,降低重大灾害性事故发生,延长这些重大工程设施使用寿命,是我国

经济发展中需要迫切解决的关键性问题和共性问题。

过去十年间,我国的海港、桥梁、隧道以及海岸工程建设蓬勃发展,沿海地区钢结构和钢筋混凝土结构设施的数量迅速增长。在跨海大桥建设方面,最近几年已竣工和开工建设的有东海大桥、杭州湾大桥、厦门海沧大桥、舟山大陆连岛工程、上海长江大桥、青岛海湾大桥等。海洋石油开发是我国海洋开发的重点之一,我国已建有近 200 个海洋钢结构石油平台。在港口建设方面,我国重大港口设施如曹妃甸码头等正在建设中。重大海洋工程设施通常设计有五十年甚至上百年的服役寿命,然而,在多种海洋腐蚀环境因素协同作用下,据有关调查,我国部分海港码头设施在建成十几年到二十年已出现钢筋锈蚀。据估计,钢筋混凝土年腐蚀损失大于 1 000 亿元。我国在役的大量临海设施将进入腐蚀破坏的高风险期,严重威胁到正常的生产运营,也势必会造成严重的经济和社会损失。这些设施亟待科学的腐蚀控制和修复。这已经不单单是技术方面的问题,更是关系到国家发展和社会进步的重要问题。

3 我国海洋腐蚀防护未来发展建议

在国际海洋资源处于激烈竞争状态的今天,有必要针对我国海洋工程设施腐蚀污损防护重大需求,开展海洋腐蚀与生物腐蚀机理及防护技术的开发研究,解决海洋工程腐蚀防护的共性 & 关键性问题,同时将我国海洋工程设施腐蚀防护纳入国家战略,提高海洋腐蚀防护的重视程度,从国家层面上推动我国海洋防腐蚀产业发展。

(1) 在不同海洋环境因子对腐蚀作用的过程和机理研究方面。有必要围绕海洋环境腐蚀影响因子对常用工程材料腐蚀过程的作用机制进行研究。研究干湿交替、合金元素、防护涂层、光照、腐蚀产物结构等因素对于钢结构和钢筋混凝土结构腐蚀机理的影响因素。揭示海洋环境 5 个腐蚀区带(海洋大气区、浪花飞溅区、海水潮

差区、海水全浸区和海底泥土区)诱发腐蚀机理,掌握腐蚀防护核心要素,为海洋采油平台、海底管线等的设计和防腐提供科学依据和对策。

(2) 在海洋污损生物腐蚀的关键过程、机理和防护技术研究方面。有必要针对海洋环境中微生物腐蚀与生物污损问题,开展不同海域微生物腐蚀机理研究。重点分析材料表面生物膜组成与结构演化过程与机制,提出腐蚀微生物诱发典型海洋工程金属材料腐蚀机制;分析海洋阴极保护下钢结构表面生成的钙质沉积层与污损生物群落的相互促进和抑制的过程,揭示微生物活动对金属材料局部腐蚀的作用机制,并在分子水平阐明材料类型、表面物理化学性质、生物活性分子对生物附着过程的影响机理,实现对生物附着过程的调控。基于上述理论研究,开发基于材料表面物理化学性质、表面微观结构、光催化性质等的海洋生物腐蚀及污损防护技术。

(3) 在海洋腐蚀防护与监测技术开发及应用方面。有必要针对海洋腐蚀防护的需求,开发包含钢结构浪花飞溅区腐蚀防护技术、海洋钢筋混凝土结构腐蚀防护与修复补强技术、海洋腐蚀监测技术、腐蚀探测预警技术在内的集成化海洋环境腐蚀防护技术。制定防腐技术性能检测规范、现场施工质量规范、现场质量检测规范,形成一套先进的防腐设计规范和质量管理体系。并以此为基础,建立近海腐蚀监测实验站和腐蚀防护技术示范基地,加速成果推广与转化。

(4) 在海洋腐蚀防护标准与防护意识方面。在海洋防腐防污技术研究基础上,有必要加快建立海洋腐蚀防护技术企业、地方及国家标准,引导腐蚀产业健康发展,保障海洋工程设施安全运行,减低经济损失。同时加强海洋腐蚀教育以及科普宣传力度,通过强化对相关领域技术人员的教育,提升专业人员对海洋腐蚀防护的重视程度;并通过媒体宣传等方式,提高全民腐蚀防护意识。

参考文献

- 侯保荣. 海洋腐蚀环境理论及其应用. 北京: 科学出版社, 1999.
- Zhang P, Xu D, Li Y, et al. Electron mediators accelerate the microbiologically influenced corrosion of 304 stainless steel by the *Desulfovibrio vulgaris* biofilm. *Bioelectrochemistry*, 2015, 101: 14-21.
- Wan Y, Zhang D, Liu H, et al. Influence of sulphate-reducing bacteria on environmental parameters and marine corrosion behavior of Q235 steel in aerobic conditions. *Electrochim Acta*, 2010, 55(5): 1528-1834.
- Wu 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. *Corros Sci*, 2016, 112: 552-562.
- Qi P, Wan Y, Zhang D. Impedimetric biosensor based on cell-mediated bioimprinted films for bacterial detection. *Biosens Bioelectron*, 2013, 39(1): 282-288.
- Wan Y, Lin Z, Zhang D, et al. Impedimetric immunosensor doped with reduced graphene sheets fabricated by controllable electrodeposition for the non-labelled detection of bacteria. *Biosens Bioelectron*, 2011, 26(5): 1959-1964.
- Wang P, Zhang D, Lu Z, et al. Fabrication of slippery lubricant-infused porous surface for inhibition of microbially influenced corrosion. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, 8(2):1120-1127.
- Wan Y, Zhang D, Wang Y, et al. Vancomycin-functionalised Ag@TiO₂ phototoxicity for bacteria. *J Hazard Mater*, 2011, 186(1): 306-312.

Marine Corrosion and Protection: Current Status and Prospect

Hou Baorong Zhang Dun Wang Peng

(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract Marine environment is the most aggressive natural environment. Marine corrosion is the main threaten to the safety of marine engineering, and also brings a huge economic loss to the country. Human beings will face new challenges from the corrosion in the future marine exploitation. In this paper, the characters of marine corrosion environment are introduced. The current status and requirements about marine corrosion and protection are analyzed. Finally, the proposal about future research of marine corrosion protection and introduction of regulations are offered.

Keywords marine environment, corrosion and protection, planning proposal

侯保荣 工程院院士, 中科院海洋所研究员, 国家海洋腐蚀防护工程技术研究中心主任。近40年一直从事海洋腐蚀防护技术研究, 主持了我国近海腐蚀环境调查与研究, 建立了海洋腐蚀环境的理论体系。E-mail: baoronghou@163.com

Hou Baorong Academician of Chinese Academy of Engineering; holds the position of professor in Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences; and chairman of National Research Center of Marine Corrosion Protection Engineering Technology, China. For 40 years, he focused on researching marine corrosion protection technology. He presided of the investigation and research of corrosion environment in Chinese offshore. He builds up the academic system of marine corrosion environment. E-mail: baoronghou@163.com

张盾 女，中科院海洋所研究员，中科院“百人计划”学者，中科院海洋环境腐蚀与生物污损重点实验室主任。中国腐蚀与防护学会副理事长，中国海洋湖沼学会海洋腐蚀与污损专业委员会主任。主要从事海洋环境腐蚀与生物污损研究。E-mail: zhangdun@qdio.ac.cn

Zhang Dun Male, Research professor, in Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (CAS); awardee of Hundred Talents Program of CAS; director of CAS Key Laboratory of Marine Environmental Corrosion and Biofouling; director of Marine Corrosion and Biofouling Board of Chinese Limnology and Oceanography Society. She is engaged in marine environmental corrosion and bio-fouling research. E-mail: zhangdun@qdio.ac.cn