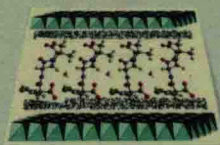


中国腐蚀状况及控制战略研究丛书·典藏版
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

层状无机功能材料 在海洋防腐防污领域的应用

王毅 张盾 编著

插层



分子容器

剥离/组装



防污薄膜

水滑石

层状材料



原位生长



防污薄膜

蒙脱土

石墨



复合



防腐涂料



科学出版社

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书·典藏版

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

层状无机功能材料 在海洋防腐防污领域的应用

王 毅 张 盾 编著

科学出版社

内 容 简 介

本书对层状无机功能材料在海洋防腐防污领域的应用现状进行了梳理和分类,介绍了层状无机功能材料的分类、基本结构、制备和在海洋防腐防污领域的应用,目的在于促进层状无机功能材料在海洋防腐防污领域应用的发展和成熟。全书共分6章,分别介绍了海洋腐蚀与生物污损研究的意义和现状,层状无机功能材料的分类、结构、制备方法和应用,层状无机功能材料型纳米容器在海洋防腐防污领域的应用,层状无机功能材料基薄膜在海洋防腐防污领域的应用,层状无机功能材料作为填料在防腐防污涂层中的应用,层状无机功能材料在其他领域的应用和展望。

本书内容丰富,数据翔实,可读性强,可以为海洋相关科研院所,海洋开发类企业,海洋工程、化工、能源和石油化工企业中对海洋腐蚀和生物污损防护有兴趣的读者提供重要参考,也可供高等院校的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书:典藏版/侯保荣主编. —北京:科学出版社, 2018.1

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-056255-5

I. ①中… II. ①侯… III. ①腐蚀-调查研究-中国 IV. ①TG17

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第002936号

责任编辑:李明楠 李丽娇/责任校对:贾娜娜

责任印制:张伟/封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2018年1月第一次印刷 印张:18 1/8

字数:365 000

定价:3200.00元(全32册)

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“中国腐蚀状况及控制战略研究”丛书

顾问委员会

主任委员：徐匡迪 丁仲礼

委 员（按姓氏笔画排序）：

丁一汇	丁仲礼	王景全	李 阳	李鹤林	张 偲
金翔龙	周守为	周克崧	周 廉	郑皆连	郝吉明
胡正寰	柯 伟	侯立安	聂建国	徐匡迪	翁宇庆
高从堦	曹楚南	曾恒一	缪昌文	薛群基	魏复盛

“中国腐蚀状况及控制战略研究”丛书

总编辑委员会

总 主 编：侯保荣

副总主编：徐滨士 张建云 徐惠彬 李晓刚

编 委（按姓氏笔画排序）：

马士德	马化雄	马秀敏	王福会	尹成先	朱锡昶
任小波	任振铎	刘小辉	刘建华	许立坤	孙虎元
孙明先	杜 敏	杜翠薇	李少香	李伟华	李言涛
李金桂	李济克	李晓刚	杨朝晖	张劲泉	张建云
张经磊	张 盾	张洪翔	陈卓元	欧 莉	岳清瑞
赵 君	胡少伟	段继周	侯保荣	宫声凯	桂泰江
徐玮辰	徐惠彬	徐滨士	高云虎	郭公玉	黄彦良
常 炜	葛红花	韩 冰	雷 波	魏世丞	

丛 书 序

腐蚀是材料表面或界面之间发生化学、电化学或其他反应造成材料本身损坏或恶化的现象,从而导致材料的破坏和设施功能的失效,会引起工程设施的结构损伤,缩短使用寿命,还可能导致油气等危险品泄漏,引发灾难性事故,污染环境,对人民生命财产安全造成重大威胁。

由于材料,特别是金属材料的广泛应用,腐蚀问题几乎涉及各行各业。因而腐蚀防护关系到一个国家或地区的众多行业和部门,如基础设施工程、传统及新能源设备、交通运输工具、工业装备和给排水系统等。各类设施的腐蚀安全问题直接关系到国家经济的发展,是共性问题,是公益性问题。有学者提出,腐蚀像地震、火灾、污染一样危害严重。腐蚀防护的安全责任重于泰山!

我国在腐蚀防护领域的发展水平总体上仍落后于发达国家,它不仅表现在防腐技术方面,更表现在防腐蚀意识和有关的法律法规方面。例如,对于很多国外的房屋,政府主管部门依法要求业主定期维护,最简单的方法就是在房屋表面进行刷漆防蚀处理。既可以由房屋拥有者,也可以由业主出资委托专业维护人员进行防护工作。由于防护得当,许多使用上百年的房屋依然完好、美观。反观我国的现状,首先是人们的腐蚀防护意识淡薄,对腐蚀的危害认识不清,从设计到维护都缺乏对腐蚀安全问题的考虑;其次是国家和各地区缺乏与维护相关的法律与机制,缺少腐蚀防护方面的监督与投资。这些原因就导致了我国在腐蚀防护领域的发展总体上相对落后的局面。

中国工程院“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目工作的开展是当务之急,在我国经济快速发展的阶段显得尤为重要。借此机会,可以摸清我国腐蚀问题究竟造成了多少损失,我国的设计师、工程师和非专业人士对腐蚀防护了解多少,如何通过技术规程和相关法规来加强腐蚀防护意识。

项目组将提交完整的调查报告并公布科学的调查结果,提出切实可行的防腐蚀方案和措施。这将有效地促进我国在腐蚀防护领域的发展,不仅有利于提高人们的腐蚀防护意识,也有利于防腐技术的进步,并从国家层面上把腐蚀防护工作的地位提升到一个新的高度。另外,中国工程院是我国最高的工程咨询机构,没有直属的科研单位,因此可以比较超脱和客观地对我国的工程技术问题进行评估。把这样一个项目交给中国工程院,是值得国家和民众信任的。

这套丛书的出版发行,是该重大咨询项目的一个重点。据我所知,国内很多领域的知名专家学者都参与到丛书的写作与出版工作中,因此这套丛书可以说涉及

了我国生产制造领域的各个方面,应该是针对我国腐蚀防护工作的一套非常全面的丛书。我相信它能够各领域的防腐工作者提供参考,用理论和实例指导我国的腐蚀防护工作,同时我也希望腐蚀防护专业的研究生甚至本科生都可以阅读这套丛书,这是开阔视野的好机会,因为丛书中提供的案例是在教科书上难以学到的。因此,这套丛书的出版是利国利民、利于我国可持续发展的大事情,我衷心希望它能得到业内人士的认可,并为我国的腐蚀防护工作取得长足发展贡献力量。

徐卫迪

2015年9月

丛书前言

众所周知,腐蚀问题是世界各国共同面临的问题,凡是使用材料的地方,都不同程度地存在腐蚀问题。腐蚀过程主要是金属的氧化溶解,一旦发生便不可逆转。据统计估算,全世界每 90 秒钟就有一吨钢铁变成铁锈。腐蚀悄无声息地进行着破坏,不仅会缩短构筑物的使用寿命,还会增加维修和维护的成本,造成停工损失,甚至会引起建筑物结构坍塌、有毒介质泄漏或火灾、爆炸等重大事故。

腐蚀引起的损失是巨大的,对人力、物力和自然资源都会造成不必要的浪费,不利于经济的可持续发展。震惊世界的“11·22”黄岛中石化输油管道爆炸事故造成损失 7.5 亿元人民币,但是把防腐蚀工作做好可能只需要 100 万元,同时避免灾难的发生。针对腐蚀问题的危害性和普遍性,世界上很多国家都对各自的腐蚀问题做过调查,结果显示,腐蚀问题所造成的经济损失是触目惊心的,腐蚀每年造成损失远远大于自然灾害和其他各类事故造成损失的总和。我国腐蚀防护技术的发展起步较晚,目前迫切需要进行全面的腐蚀调查研究,摸清我国的腐蚀状况,掌握材料的腐蚀数据和有关规律,提出有效的腐蚀防护策略和建议。随着我国经济社会的快速发展和“一带一路”战略的实施,国家将加大对基础设施、交通运输、能源、生产制造及水资源利用等领域的投入,这更需要我们充分及时地了解材料的腐蚀状况,保证重大设施的耐久性和安全性,避免事故的发生。

为此,中国工程院设立“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目,这是一件利国利民的大事。该项目的开展,有助于提高人们的腐蚀防护意识,为中央、地方政府及企业提供可行的意见和建议,为国家制定相关的政策、法规,为行业制定相关标准及规范提供科学依据,为我国腐蚀防护技术和产业发展提供技术支持和理论指导。

这套丛书包括了公路桥梁、港口码头、水利工程、建筑、能源、火电、船舶、轨道交通、汽车、海上平台及装备、海底管道等多个行业腐蚀防护领域专家学者的研究工作经验、成果以及实地考察的经典案例,是全面总结与记录目前我国各领域腐蚀防护技术水平和发展现状的宝贵资料。这套丛书的出版是该项目的一个重点,也是向腐蚀防护领域的从业者推广项目成果的最佳方式。我相信,这套丛书能够积极地影响和指导我国的腐蚀防护工作和未来的人才培养,促进腐蚀与防护科研成果的产业化,通过腐蚀防护技术的进步,推动我国在能源、交通、制造业等支柱产业上的长足发展。我也希望广大读者能够通过这套丛书,进一步关注我国腐蚀防护技术的发展,更好地了解和认识我国各个行业存在的腐蚀问题和防腐策略。

在此,非常感谢中国工程院的立项支持以及中国科学院海洋研究所等各课题承担单位在各个方面的协作,也衷心地感谢这套丛书的所有作者的辛勤工作以及科学出版社领导和相关工作人员的努力,这套丛书的顺利出版离不开每一位参与者的贡献与支持。

侯保荣

2015年9月

序

21 世纪是海洋的世纪，高速发展的蓝色经济正逐步成为我国经济新的增长点。海洋资源开发速度和利用规模惊人，这对各类海洋工程设施的安全服役提出了严苛要求。但是，海洋是最为苛刻的自然腐蚀环境，服役其中的海洋工程设施由于直接受到海水腐蚀等影响，不仅造成资源的无谓消耗，而且会导致严重灾害性事故。除海洋腐蚀外，生物污损也会造成船舶航速下降、管线阻塞以及海洋平台载荷增加等问题，影响海洋工程设施安全有效运行。因此，开发利用海洋就必须重视海洋防腐防污技术。

近年来，随着人类环保意识的增强，海洋防腐防污技术绿色化已经成为大势所趋。而环境友好海洋防腐防污技术的发展依赖于新材料的应用。层状无机功能材料作为一类具有二维层状空间结构的化合物，具有独特的超分子插层结构。该类材料种类丰富，具有独特的物理化学特性，在海洋防腐防污领域具有广阔的应用前景。

本书作者制备了系列分子容器型天然产物防污剂插层水滑石材料，突破了插层组装技术瓶颈，解决了天然产物防污剂光热稳定性差和易失活的难题，为新型环境友好防污涂层技术发展做出了尝试和贡献。本书还涵盖了近年来国内外有关层状无机功能材料在海洋防腐防污领域应用的最新研究成果。

相信此书的出版会使人们对层状无机功能材料在海洋环境腐蚀与生物污损防护领域的应用有一个更为全面和深入的认识，对相关基础理论和应用研究具有推动作用。

侯保荣

2016 年 4 月

前 言

海洋是人类生存和发展的资源宝库。各类海洋工程设施浸入海水后会同时发生海洋腐蚀和生物污损两个自然过程。海洋腐蚀会对海洋工程设施造成腐蚀损坏,导致巨大经济损失,甚至发生灾害性事故。生物污损会造成海洋平台载荷增加、管线堵塞、船舶设施航速下降等问题,不仅降低设备使用性能,还会显著减低设施和材料的安全有效运行。因此,要保障海洋工程设施安全服役,必须大力发展海洋腐蚀与生物污损防护技术。

海洋腐蚀与生物污损防护技术的进步有赖于新材料的研发与应用。特别是近年来,随着人类环保意识的增强,一些传统防腐防污技术由于不具有环境友好性相继遭受限用和禁用。在此催动下,世界各国相继开展了环境友好海洋腐蚀与生物污损防护新材料的研发工作,并取得了丰硕的成果。

层状无机功能材料是一类具有二维层状空间结构的化合物,具有独特的物理化学性质,已经成为化学、材料学等领域的研究热点。近年来,将其应用于环境友好海洋腐蚀与生物污损防护领域也取得了一定的研究进展。本书作者在国家重点基础研究发展计划(2014CB643304)、国家自然科学基金(21101160)、中国科学院“百人计划”和重要方向性项目、山东省及青岛市自然科学基金的支持下,在天然产物防污剂分子插层水滑石缓释防污技术领域取得了一定的进展,开发了系列具有超分子插层结构的缓释防污材料,弥补了天然产物防污剂分子光热稳定性差和制备成涂层易失活的缺陷,为新型天然产物防污剂在防污涂料中的应用提供了新的解决方案。此外,还利用原位生长技术在金属基体表面制备了水滑石型微纳结构涂层,经过表面疏水化处理或者焙烧后具有良好的防微生物污损性能。

将层状无机功能材料应用拓展到海洋腐蚀与生物污损领域具有重要的科学意义,有助于获取环境友好、性能优异的防腐防污材料。未来,随着材料制备和表征技术的进步,必将有更多的层状无机功能材料被应用于该领域,有力推动该领域技术进步。但是现阶段,层状无机功能材料在海洋防腐防污领域应用发展时间不长,急需一本关于这方面的著作,使读者加深对其在海洋防腐防污领域应用的了解。本书正是为这一需求而编写的。

本书对层状无机功能材料在海洋防腐防污领域的应用现状进行了梳理和分类。按照分类,编排章节,介绍了层状无机功能材料分类、基本结构、制备和在海洋防腐防污领域的应用,目的在于促进层状无机功能材料在海洋防腐防污领域应用的发展和成熟。全书共分6章。第1章简要介绍海洋腐蚀与生物污损研究

的意义和现状；第2章简要介绍层状无机功能材料的分类、结构、制备方法和应用；第3章重点介绍层状无机功能材料型纳米容器在海洋防腐防污领域的应用；第4章着重介绍层状无机功能材料基薄膜在海洋防腐防污领域的应用；第5章介绍层状无机功能材料作为填料在防腐防污涂层中的应用；第6章简要介绍层状无机功能材料在其他领域的应用和展望。

感谢中国工程院重大咨询项目对本书出版的资助。

由于作者水平有限，本书难免存在不足和疏漏，恳请广大读者批评指正！

王 毅 张 盾

2016年4月

目 录

丛书序

丛书前言

序

前言

第 1 章 海洋防腐防污概述	1
1.1 研究意义	1
1.2 海洋环境腐蚀概述	2
1.2.1 海洋腐蚀环境分区	2
1.2.2 海洋环境腐蚀影响因素	4
1.2.3 海洋环境腐蚀主要破坏形式	7
1.2.4 海洋环境腐蚀防护技术	8
1.3 海洋生物污损概述	9
1.3.1 生物污损机制	9
1.3.2 生物污损影响因素	10
1.3.3 防污技术概述	13
第 2 章 层状无机功能材料	28
2.1 阳离子型层状无机功能材料	29
2.1.1 层状硅酸盐	29
2.1.2 层状磷酸盐	43
2.1.3 层状钛酸盐	54
2.2 阴离子型层状无机功能材料	61
2.2.1 LDH 的基本结构	61
2.2.2 LDH 的制备方法	67
2.2.3 LDH 的应用	75
2.3 中性层状无机功能材料	92
2.3.1 石墨烯	92
2.3.2 过渡金属二硫族化合物	98
第 3 章 层状无机功能材料型纳米容器在海洋防腐防污领域的应用	105
3.1 智能防腐涂层	105

3.1.1	智能防腐涂层的防腐机理	105
3.1.2	智能防腐涂层研究现状	106
3.1.3	存在的问题	109
3.2	纳米容器	110
3.2.1	纳米容器概述	110
3.2.2	典型纳米容器体系	110
3.2.3	层状无机功能材料型纳米容器可控释放机理	112
3.3	层状无机功能材料型纳米容器在智能防腐领域的应用	115
3.3.1	LDH 型纳米容器在智能防腐领域的应用	115
3.3.2	MMT 型纳米容器在智能防腐领域的应用	126
3.4	层状无机功能材料型纳米容器在海洋防污领域的应用	129
3.4.1	概述	129
3.4.2	NPA-LDH 制备及缓释防污性能	130
3.4.3	GO/NPA-LDH 复合薄膜制备及防污性能研究	151
第 4 章	层状无机功能材料基薄膜在海洋防腐防污领域的应用	161
4.1	金属材料腐蚀防护方法	161
4.1.1	概述	161
4.1.2	铝及铝合金常用防护方法	162
4.1.3	镁及镁合金常用防护方法	165
4.1.4	铜的腐蚀与防护	167
4.2	LDH 薄膜制备技术	169
4.2.1	物理混合法	169
4.2.2	化学溶氧化法	169
4.2.3	旋转涂膜法	170
4.2.4	胶体沉积法	170
4.2.5	原位生长法	170
4.2.6	电化学沉积法	171
4.3	层状无机功能材料基防腐薄膜	171
4.3.1	铝及铝合金表面	171
4.3.2	镁及镁合金表面	183
4.3.3	铜及铜合金表面	187
4.4	层状无机功能材料基防污薄膜	192
4.4.1	LDH/羧甲基壳聚糖仿生纳米复合水凝胶防污薄膜	192
4.4.2	层层自组装法制备氧化钛纳米片溶菌酶复合抗菌薄膜及其性能研究	204
4.4.3	原位生长制备 Mg-Al MMO 抗菌薄膜	214

第 5 章 层状无机功能材料作为填料在防腐防污涂层中的应用	220
5.1 海洋防腐涂料种类	220
5.2 纳米添加剂改性环氧有机涂层	222
5.2.1 无机纳米材料/环氧有机涂层发展现状	222
5.2.2 层状无机功能材料/环氧有机涂层	223
5.3 纳米添加剂改性聚氨酯有机涂层	227
5.3.1 无机纳米材料/PU 有机涂层发展现状	227
5.3.2 层状无机功能材料/聚氨酯有机涂层	230
5.4 纳米添加剂改性聚苯胺有机涂层	234
5.4.1 无机纳米材料/PANI 有机涂层发展现状	234
5.4.2 层状无机功能材料/PANI 有机涂层发展现状	242
第 6 章 层状无机功能材料在其他领域的应用及展望	244
6.1 其他领域的应用	244
6.1.1 基于层状无机功能材料的涂层无损监/检测技术	244
6.1.2 在钢筋混凝土腐蚀防护领域的应用	245
6.2 展望	246
参考文献	248

第1章 海洋防腐防污概述

1.1 研究意义

海洋是人类生存和发展不可缺少的空间环境,是解决人口剧增、资源短缺、环境恶化三大难题的希望所在。我国拥有 18 000 多千米的大陆海岸线、6500 个面积在 500 平方米以上的沿海岛屿和 37 万平方千米拥有 12 海里领海权的海域面积,这为我国发展海洋经济提供了十分广阔的天地。开发海洋资源,发展海洋经济已成为国家发展的重要支柱。

海洋工程设施浸入海水后会同时发生海洋腐蚀和生物污损两个相互作用共同影响的自然过程。海洋工程设施由于直接受到海水腐蚀以及干湿交替等影响,不仅会造成腐蚀损坏和功能丧失,缩短使用寿命,造成资源、材料和能源的巨大浪费,而且会导致灾害性事故。例如,1980 年北海油田上正在作业的一钻井平台因六根撑管先后断裂而发生剪切开裂,10 105 吨重的平台在 25 分钟倾覆,123 人罹难,造成近海石油钻探史上一一起罕见的灾难。挪威事故调查委员会的检查报告表明这起事故是由腐蚀疲劳断裂引发的^[1]。

据世界各国统计,每年因腐蚀所造成的经济损失约占 GDP 的 2%~4%,超过火灾、水灾、旱灾以及台风等灾害所带来的损失总和。英国在 1970 年发表的著名的 Hoar 报告指出,英国每年腐蚀损失为 13.65 亿英镑,占 GDP 的 3.5%^[2]。美国 1984 年腐蚀损失为 1680 亿美元;1989 年腐蚀损失为 2000 亿美元,约占 GDP 的 4.2%;1998 年腐蚀损失为 GDP 的 3.1%,约合 2760 亿美元^[2]。日本腐蚀防蚀协会用 Uhlig 和 Hoar 两种方法在 1975 年和 1999 年分别进行了两次腐蚀损失调查,1997~1998 年的调查报告指出,日本的腐蚀直接损失约为 39 380 亿日元^[2]。我国 2014 年 GDP 达到 636 463 亿人民币,腐蚀损失按 4% 计算,也超过了 25 000 亿人民币,而一般认为海洋腐蚀损失至少占 1/3 以上。已有研究表明,如果采取有效的控制和防护措施,其中 25%~40% 是可以避免的,这样每年可以节约巨额资金。惊人的腐蚀损失告诉我们,开发海洋必须重视海洋腐蚀的研究,以保证海洋工程设施能够长期安全运行,这对于顺利开发海洋资源、国民经济建设和国家海防安全都具有十分重要的保障意义。

海洋污损生物是海洋环境中栖息或附着在船舶和各种水下人工设施上对人类经济活动产生不利影响,给投资者带来负效益的动物、植物和微生物的总称。主要包括一些大型藻类、水螅、外肛动物、龙介虫、双壳类、藤壶和海鞘。全世界记录

的污损生物有 4000 余种,其群落组成有明显地域性,并呈季节性变化^[3]。大多数污损生物幼虫营浮游生活,成体营附着或固着生活。这些生物在水下人工设施表面附着、聚集,给人类经济活动带来的危害称为生物污损,这是人类开始从事海洋开发就遇到的生物危害。世界各国每年花费大量费用用于防除海洋生物污损,据最近一次统计,仅用于商业运输目的船舶上去除污损的费用,就约合 300 亿美元。此外,据不完全统计,全世界仅生物污损给各种水下工程设施与舰船设备造成的损失就可达每年 65 亿美元以上。因此,开发新型、高效、经济的海洋防生物污损(简称防污)材料不仅对我国具有重要战略意义,而且还有很大的经济效益和社会效益。

严重的海洋生物污损造成海洋平台载荷增加、管线堵塞、船舶设施航速下降等问题,不仅降低了设备的使用性能,还会显著降低设施和材料的安全有效运行。对于海洋船舶设施而言,生物污损代价巨大,会大大增加舰船外壳动力阻力。例如,会使 100 μm 厚的生物膜增加摩擦阻力 10% 以上;1mm 厚的生物膜摩擦阻力增加 80%,使船速降低 15%。船舶生物污损严重时,船底生物附着可达十多厘米厚,对近万平方米船底的大型商用船舶或军用舰船来说,将造成航速下降、能耗增加,严重影响设备性能的发挥和安全运行。生物污损还可堵塞海水淡化设备中的关键膜部件、海水输送管道或者换热器内部管道,引起传质或传热效率降低;增加海上石油平台重量,造成平台超负荷运行;增加设施物截面积,增大波涛和海流引起的动力载荷效应,带来安全隐患。污损生物附着在船底声呐等设备上,会引起设备信号减弱甚至失灵;造成仪表及转动机构失灵,影响浮标、阀门等设备的正常使用;覆盖在牺牲阳极表面,使得牺牲阳极污损失效。另外,硫酸盐还原菌(sulfate-reducing bacteria, SRB)和铁细菌等海洋细菌的附着以及细菌自身代谢导致的阴极去极化,会加速海上金属结构电化学腐蚀,破坏金属表面保护层,引发局部腐蚀;污损生物在钢表面附着加剧金属腐蚀;污损生物会破坏金属表面涂层,使金属裸露而导致金属腐蚀;有石灰外壳的污损生物覆盖在金属表面,改变了金属表面的局部供氧,形成氧浓差电池而加剧腐蚀;一些藻类由于光合作用产生氧气,增加水中的溶解氧浓度,从而加速金属腐蚀。此外,还会对水产养殖业造成不利影响。据不完全统计,全世界仅生物污损给各种水下工程设施造成的损失就达每年 2000 亿美元以上^[4]。因而,深入研究生物污损问题,发展防污技术已显得尤为重要,并引起世界各国的重视。

1.2 海洋环境腐蚀概述

1.2.1 海洋腐蚀环境分区

从腐蚀的角度,海洋环境分为海洋大气区、浪花飞溅区、海水潮差区、海水

全浸区和海底泥土区五个不同的区带^[1]。海水全浸区还可以细分为浅海区和深海区。典型海洋环境五个区带及腐蚀行为的分类总结见表 1-1^[2]。各种材料在不同腐蚀区带，有着不同的腐蚀特点和影响因素。因此，材料在不同区带的腐蚀规律不能一概而论，要分别研究对待。

表 1-1 不同海洋环境区域的腐蚀特点

海洋区域	环境条件	腐蚀特点
海洋大气区	风带来小海盐颗粒，影响因素有：高度、风速、雨量、温度、辐射等	海盐粒子使腐蚀加快，但随离海岸距离不同而不同
浪花飞溅区	潮湿、充分充气的表面，无海生物沾污	海水飞溅、干湿交替，腐蚀剧烈
海洋潮差区	周期浸没、供氧充足	因氧浓差电池形成阴极而受到保护，阴极区往往形成石灰质
海水全浸区	海水通常为饱和状态，影响因素有：含氧量、流速、水温、海生物、细菌等	腐蚀随温度和海水深度变化，生物因素影响较大
海底泥土区	常有细菌（如 SRB）	泥浆通常有腐蚀性，引起微生物腐蚀

1. 海洋大气区

海洋大气区是指海洋环境中常年不直接接触海水的部分。海洋大气区腐蚀受多种因素影响，是不同因素相互作用引起的。一般认为，距离海岸线 200m 以内的区域称为海洋大气腐蚀环境。与陆地大气区相比，海洋大气区金属表面存在含盐液滴，使得该区带腐蚀比内陆严重许多。海洋大气区腐蚀与海盐沉积、风浪条件、距离海面高度和在空气中暴露时间长短等因素有关。对海洋大气区腐蚀产生重要影响的其他因素还有表面水分、降雨、日光照射、温度、大气中的腐蚀气体，以及表面的尘埃和细菌等。在距离海岸线较近的工业大气中，往往含有二氧化硫、二氧化碳等有害气体，这对金属腐蚀也有较大影响^[1]。

2. 浪花飞溅区

浪花飞溅区是指海水飞沫能够喷洒到其表面，但在海水涨潮时又不能被海水浸没的部位^[5]。由于受到海水周期润湿，经常处于干湿交替状态，氧供应充分，盐分高，温度差异大及波浪冲击等是造成浪花飞溅区腐蚀严重的重要因素。例如，同一种钢在浪花飞溅区腐蚀速度比在海水中快 3~10 倍。此外，钢铁材料在浪花飞溅区腐蚀状况也与该海域气象条件密切相关^[6, 7]。

3. 海洋潮差区

海洋潮差区是指涨潮时被海水浸没，退潮时又暴露在空气中的位置，即海水