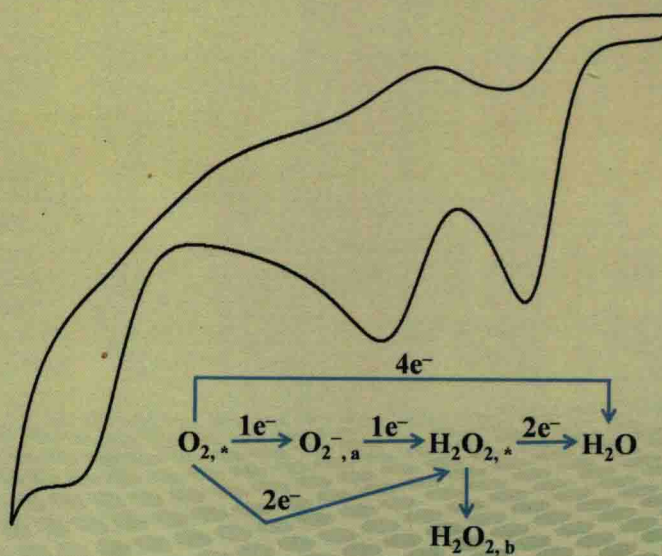


中国腐蚀状况及控制战略研究丛书·典藏版
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

海洋环境腐蚀过程 阴极溶解氧还原反应

张 盾 吴佳佳 编著



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

海洋环境腐蚀过程 阴极溶解氧还原反应

张 盾 吴佳佳 编著

科学出版社

内 容 简 介

本书以在海洋环境腐蚀中扮演重要角色的溶解氧还原反应为研究对象,在就该电化学反应的动力学特点、机理与模型、常用研究方法等进行初步介绍后,重点阐述钢铁材料和典型有色金属材料上该电化学反应的路径与特点、海洋微生物膜对该电化学反应的影响,并对海洋环境中该电化学反应的有效利用进行概述。

本书可供从事腐蚀与防护、电分析化学等领域研究和应用人员阅读、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:贾伟娟

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:13 1/8

字数:265 000

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、传统及新兴能源设备、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,它不仅表现在防腐蚀技术方面,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锈处理。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蚀工作者提供参考,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。

徐匡迪

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

海洋强国、21 世纪海上丝绸之路等国家战略的提出，彰显了国家对蓝色海洋开发利用的规划。港口码头、跨海大桥、海洋石油平台等工程设施的安全服役是实现海洋开发利用的重要保证，而海洋的腐蚀苛刻性给这些设施的耐久性和稳定性带来了巨大挑战。因此，海洋环境腐蚀防护工作责任重大。

腐蚀防护工作的开展需根植于腐蚀机理，因而海洋环境腐蚀机理的研究至关重要。海洋环境腐蚀在本质上是电化学腐蚀，对绝大多数工程金属材料来讲，阴极反应为溶解氧还原反应。虽然溶解氧还原反应在海洋环境腐蚀中具有重要作用，但由于其是一个涉及氧的溶解扩散与吸附、多电子还原、产物脱附与扩散等过程的复杂反应，且反应路径对材料的化学组成、微观结构等敏感，专注海洋环境中的溶解氧还原反应的研究报道并不多。本书作者围绕海洋环境中溶解氧还原反应开展了大量研究工作，包括不同钢铁材料在典型海洋环境介质中溶解氧还原反应的路径与反应动力学、不同处理方法对钢铁材料上溶解氧还原反应的影响、海洋腐蚀微生物对溶解氧还原反应的影响等。这些研究结果对人们深入认识海洋环境腐蚀机理具有重要的参考价值 and 意义。

本书的思路流畅，从海洋环境腐蚀电化学过程概述引出溶解氧还原反应，到溶解氧还原反应常用研究方法原理与应用实例，再到钢铁材料和典型有色金属材料上的溶解氧还原反应及海洋微生物对该电化学反应的影响，最后到海洋环境溶解氧还原反应的利用，一气呵成。在第 3~6 章中，作者对每一分类的研究报道理解深刻，因而使读者对相关研究的现状有清晰的认识。与此同时，书中的理论基础全面、研究数据详实。此外，在第 6 章中，作者给出了海洋环境溶解氧还原反应的利用，转害为利，拓宽了该书的读者范围。

相信此书的出版，将会使得人们对海洋环境中溶解氧还原反应有更为全面的认识，对丰富海洋环境腐蚀机理研究具有重要意义。

侯保荣

2016 年 4 月

前 言

波澜壮阔的海洋作为生命的母体与摇篮，孕育了万千生命。三四十亿年前，原始海洋出现了原始生命——古细菌，而随着生命的演化，蓝细菌的登场带来了氧气，氧气的出现使得地球慢慢成为生命的伊甸园。目前，地球上绝大多数生物，尤其是人和高等动物，需要以氧为氧化剂从有机物的氧化中获取能量来维持生命，因此，氧气对生命至关重要。而对非生命体来讲，氧气可能有毒害性，如钢铁材料的吸氧腐蚀。

由于海水呈弱碱性且溶解有相当量的氧，除电位很负的镁及其合金外，几乎所有的工程金属材料在海水中的电化学腐蚀都属于吸氧腐蚀，即阴极反应为溶解氧还原反应。鉴于溶解氧还原反应在海洋环境腐蚀中的重要性，非常有必要对该电化学反应进行深入研究，以深化海洋腐蚀机理认识，为海洋工程设施的腐蚀防护提供依据。目前，溶解氧还原反应的研究主要集中于新能源领域，而在腐蚀领域的研究报道不多。作者团队围绕海洋环境腐蚀溶解氧还原反应开展了大量工作，为了让更多的同行或对海洋环境腐蚀感兴趣的人们对该电化学反应有更深的认识，我们对已获得的有关海洋环境腐蚀溶解氧还原反应的研究结果进行了整理，展现在这本专著中。

本书共 6 章。第 1 章首先概述海洋环境腐蚀引出溶解氧还原反应，并从反应动力学、机理与模型等方面对溶解氧还原反应进行初步介绍；第 2 章主要介绍溶解氧还原反应的常用研究方法，在阐述研究方法的工作原理后给出应用实例；第 3 章和第 4 章分别介绍钢铁材料和典型有色金属材料上的溶解氧还原反应，钢铁材料按纯铁、碳钢、低合金钢和合金钢四部分进行介绍，典型有色金属材料主要涉及铜、铝、锌、镍及其合金；第 5 章介绍海洋微生物膜对溶解氧还原反应的影响，按照先天然海洋微生物膜后典型单菌株的顺序，单菌株中尤其突出了铁细菌和硫酸盐还原菌的作用；在介绍了溶解氧还原反应对海洋工程材料的破坏作用后，在最后一章（第 6 章）中介绍海洋环境中溶解氧还原反应的有效利用，这部分主要包括海水金属空气电池和沉积物微生物燃料电池。

本书中涉及的研究结果是在国家重点基础研究发展计划、国家自然科学基金、中国科学院“百人计划”、山东省自然科学基金、青岛市自然科学基金等项目课题的资助下完成的，在此表示诚挚谢意。特别感谢匡飞博士、陈士强博士、孙蓉硕

士、李永娟硕士、刘怀群硕士对溶解氧还原反应研究的贡献。感谢中国工程院重大咨询项目对本书出版的资助。

科学研究是不断发展的，由于作者的知识水平和现阶段学术认知所限，本书难免存在不足之处，欢迎读者批评指正。

张 盾 吴佳佳

2016年5月

目 录

丛书序

丛书前言

序

前言

第 1 章 海洋环境腐蚀电化学过程	1
1.1 海洋环境腐蚀概述	1
1.1.1 海洋环境因素与腐蚀特征	1
1.1.2 海洋环境腐蚀常见类型	3
1.1.3 海洋环境腐蚀常用防护方法	5
1.2 海洋环境腐蚀电化学反应	8
1.2.1 电化学反应基础	8
1.2.2 海洋环境腐蚀阳极反应	10
1.2.3 海洋环境腐蚀阴极反应	11
第 2 章 溶解氧还原反应常用电化学研究方法	21
2.1 循环伏安法	21
2.1.1 基本原理	21
2.1.2 应用实例	25
2.2 极化曲线法	26
2.2.1 基本原理	26
2.2.2 应用实例	28
2.3 电化学阻抗谱法	29
2.3.1 基本原理	29
2.3.2 应用实例	37
2.4 旋转圆盘电极法	41
2.4.1 基本原理	41
2.4.2 应用实例	45
2.5 旋转圆环-圆盘电极	46
2.5.1 基本原理	46
2.5.2 应用实例	49

第3章 钢铁材料上的溶解氧还原反应	54
3.1 纯铁上的溶解氧还原反应	55
3.2 碳钢上的溶解氧还原反应	57
3.2.1 预钝化 Q235 钢在模拟海水中的溶解氧还原反应	58
3.2.2 预钝化 Q235 钢在模拟混凝土孔隙液中的溶解氧还原反应	61
3.2.3 不同处理方法对 20 钢在模拟海水中溶解氧还原反应的影响	69
3.3 低合金钢上的溶解氧还原反应	72
3.3.1 预钝化 X60 钢上的溶解氧还原反应	72
3.3.2 不同处理方法对 X60 钢上溶解氧还原反应的影响	75
3.4 合金钢上的溶解氧还原反应	78
3.4.1 不锈钢上的溶解氧还原反应	78
3.4.2 不同处理方法对不锈钢上溶解氧还原反应的影响	81
第4章 典型有色金属材料上的溶解氧还原反应	85
4.1 铜及其合金上的溶解氧还原反应	85
4.1.1 铜及其合金简介	85
4.1.2 不同处理方法对铜上溶解氧还原反应的影响	86
4.1.3 其他因素对铜及其合金上溶解氧还原反应的影响	89
4.2 铝及其合金上的溶解氧还原反应	94
4.2.1 铝及其合金简介	94
4.2.2 AA2024-T3 高强度铝合金上的溶解氧还原反应	95
4.3 锌及其合金上的溶解氧还原反应	96
4.3.1 锌及其合金简介	96
4.3.2 锌上的溶解氧还原反应	97
4.3.3 锌合金上的溶解氧还原反应	98
4.4 镍及其合金上的溶解氧还原反应	99
4.4.1 镍及其合金简介	99
4.4.2 镍上的溶解氧还原反应	100
4.4.3 镍合金上的溶解氧还原反应	101
第5章 海洋微生物对溶解氧还原反应的影响	102
5.1 天然海洋微生物膜对溶解氧还原反应的影响	102
5.1.1 天然海洋微生物膜的形成发展过程	102
5.1.2 天然海水中钝性金属材料的开路电位正移现象	108
5.1.3 天然海洋微生物膜对溶解氧还原反应的作用机制	109
5.2 典型单菌株对溶解氧还原反应的影响	113
5.2.1 溶解氧还原反应电化学活性微生物的菌种多样性	114

5.2.2 铁细菌对溶解氧还原反应的作用	116
5.2.3 硫酸盐还原菌对溶解氧还原反应的作用	121
第 6 章 海洋环境中溶解氧还原反应的利用	148
6.1 海水金属空气电池	148
6.1.1 海水铝空气电池	148
6.1.2 海水镁空气电池	168
6.2 沉积物微生物燃料电池	173
6.2.1 微生物燃料电池	173
6.2.2 沉积物微生物燃料电池	178
参考文献	186

第 1 章 海洋环境腐蚀电化学过程

海洋作为资源宝库与安全屏障对我国经济发展和国防建设具有重要战略意义，而其腐蚀环境苛刻性严重威胁各种海洋工程基础设施、船舶等的安全使用，因而金属材料在海洋环境中的腐蚀与防护研究至关重要。腐蚀是材料在环境作用下引起的破坏或变质，从热力学角度来看，这是一个吉布斯自由能降低的过程，因而可自发进行。按照反应机理的不同，腐蚀可划分为化学腐蚀和电化学腐蚀两大类。就化学腐蚀而言，金属与氧化剂在同一位点进行电子传递发生反应；而电化学腐蚀的氧化过程（阳极反应）和还原过程（阴极反应）在不同的位点等量进行，海洋环境腐蚀本质上是电化学腐蚀过程。电化学腐蚀遵从电化学反应的基本规律，其速率与界面状态密切相关，而界面状态除与金属材料特性有关外，还受环境因素的影响。在本章中，我们首先从海洋环境因素与腐蚀特征、海洋环境腐蚀常见类型及常用防护方法出发就海洋环境腐蚀进行概述，紧接着围绕海洋环境腐蚀的电化学本质从电化学反应基础、海洋环境腐蚀阳极反应和阴极反应进行介绍。由于本书以溶解氧还原反应为中心，所以在本章中就该电化学反应的基础进行了较为详细的论述，主要包括基本反应方程式与标准电位、反应动力学、反应机理与模型等。

1.1 海洋环境腐蚀概述

1.1.1 海洋环境因素与腐蚀特征

与其他腐蚀环境相比，海洋环境的腐蚀性强。海水不仅是盐度为 3.2%~3.7%、pH 为 8~8.2 的天然强电解质溶液，更是一个含有悬浮泥沙、溶解气体、生物及腐败的有机物的复杂体系。影响海水腐蚀的环境因素可划分为三类：化学因素、物理因素和生物因素（表 1-1）^[1]，不同环境因素的影响常常是相互关联的，其对不同金属材料腐蚀的影响不同。与此同时，当同一金属材料处于同一海域的不同部位时，由于腐蚀环境的差异也会导致腐蚀速率不同。

表 1-1 海水腐蚀影响因素^[1]

化学因素	物理因素	生物因素
溶解的气体 氧	海水流速 空气泡	生物污着： 硬壳类

续表

化学因素	物理因素	生物因素
二氧化碳	悬浮泥沙	非硬壳类
化学平衡	温度	游动和非游动类
盐度	压力	植物生命活动:
pH		产生氧
碳酸盐溶解度		消耗二氧化碳
		产生碳化氢
		动物生命活动:
		消耗氧
		产生二氧化碳

海洋腐蚀环境一般划分为海洋大气区、浪花飞溅区、海洋潮差区、海水全浸区和海底泥土区五个区带。从图 1-1 中可以看出，钢铁材料在海洋环境中的腐蚀

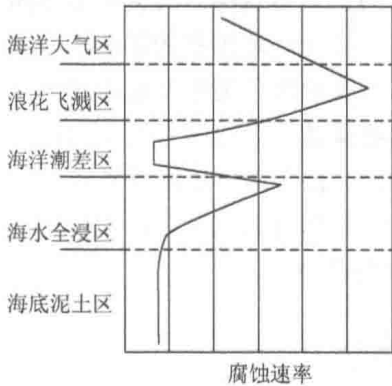


图 1-1 钢铁材料在海洋环境中不同区带的腐蚀速率图^[2]

存在两个明显的腐蚀峰值。第一个峰值发生在平均高潮线以上的浪花飞溅区，这是钢铁设施腐蚀最严重的区域，也是最严峻的海洋腐蚀环境。在浪花飞溅区，海水飞溅、干湿交替频率高、海盐粒子量大、氧供应充分，光照和浪花冲击使得腐蚀产物层剥离，使得腐蚀最为剧烈，碳钢的年平均腐蚀速率可达 0.2~0.5mm。第二个峰值通常发生在平均低潮线以下 0.5~1.0m 处，这与该区域溶解氧含量高、流速较大、水温较高、海生物繁殖快等密切相关，碳钢的年平均腐蚀率为 0.1~0.3mm。不同区带的典型环境条件与腐蚀特征总结于表 1-2 中。

表 1-2 海洋环境不同区带的环境条件与腐蚀特征

腐蚀区带	环境条件	腐蚀特征
海洋大气区	含有大量海盐颗粒，影响因素有高度、风速、降雨量、温度、辐照等	海盐粒子的存在加速腐蚀，腐蚀速率随大气层离海面高度的增加而减小、随离海岸的距离的增大而减小
浪花飞溅区	海水飞溅、干湿交替、海盐粒子量大、供氧充分	腐蚀剧烈，且因光照和升温而加剧
海洋潮差区	周期浸没、供氧充足	因氧浓差电池的形成作为阴极受到保护，腐蚀速率小
海水全浸区	常年海水浸泡，影响因素有溶解氧、流速、水温、盐度、pH、污染物、生物因素等	腐蚀速率随海水深度变化
海底泥土区	含氧量低、温度低	腐蚀速率较小，微生物影响大

影响金属材料在海水环境中腐蚀的化学因素中,最重要的是溶解氧。由于海水呈弱碱性,除电极电位很负的镁及其合金外,目前所有的工程金属材料在海水中的腐蚀都属于氧去极化腐蚀,即溶解氧是海水腐蚀的去极化剂。对碳钢、低合金钢等在海水中不发生钝化的金属,海水中含氧量增加,会加速阴极去极化过程,使金属腐蚀速率增加;对那些依靠表面钝化膜提高耐蚀性的金属,如铝、不锈钢等,含氧量增加有利于钝化膜的形成和修补,使钝化膜的稳定性提高,点蚀和缝隙腐蚀的倾向性减小。

海水的盐度分布取决于海区的地理、水文、气象等因素。在不同海区、不同纬度、不同海水深度,海水盐度会在一个不大的范围内波动。水中含盐量直接影响到水的电导率和含氧量,随着水中含盐量的增加,水的电导率增加而含氧量降低,所以,将在某一含盐量存在一个腐蚀速率峰值。

一般说来,海水 pH 的升高有利于抑制海水对钢的腐蚀。海水的 pH 主要影响钙质水垢沉积,从而影响海水的腐蚀性。pH 升高,使得钙沉积层容易形成,海水腐蚀性减弱。在施加阴极保护时,这种沉积层起到了非常重要的作用。

流速和温度是影响金属材料在海水中的腐蚀速率的重要物理因素。海水的流速及波浪都会对腐蚀产生影响。当流速很小时,腐蚀阴极过程受溶解氧的扩散控制,随流速的增加,溶解氧扩散加速,腐蚀速率增大;流速的进一步增加,供氧充分,阴极过程受溶解氧的电化学还原控制,腐蚀速率相对稳定;当流速超过某一临界值时,金属表面的腐蚀产物膜被冲刷,腐蚀速率急剧增加。在水轮机叶片、螺旋桨推进器等装置中,由于高速运动形成流体空泡,进而产生高压冲击波造成空泡腐蚀。海水温度升高,溶解氧的扩散速度加快,这将促进腐蚀过程进行;同时,海水中氧的溶解度降低,促进保护性钙质水垢生成,这又会减缓金属材料在海水中的腐蚀。温度升高的另一效果是促进海洋生物的繁殖和覆盖导致缺氧,或减轻腐蚀(非钝化金属),或引起点蚀、缝隙腐蚀和局部腐蚀(钝化金属)。

海洋环境中存在着多种动物、植物和微生物,与海水腐蚀关系较大的是附着生物。最常见的附着生物有两种:硬壳生物(软体动物、藤壶、珊瑚虫等)和非硬壳动物(海藻、水螅等)。海生物对腐蚀的影响很复杂,包括通过其形成的非完整均匀附着膜造成氧浓差电池、改变海水介质的局部微环境造成酸性条件、穿透或剥落破坏金属表面的保护层和涂层等。在海底泥土中缺氧的条件下,厌氧细菌(主要是硫酸盐还原菌)是导致金属腐蚀的主要原因。

1.1.2 海洋环境腐蚀常见类型

由于海洋腐蚀环境的苛刻性,金属材料在其中均会受到不同程度的腐蚀,且由于材料性质的不同表现出不同的腐蚀形式。一般可将腐蚀形式划分为全面腐蚀