

金属材料的海洋腐蚀与防护

Corrosion and Protection of Metals in Marine Environment

朱相荣 王相润 等编著



国防工业出版社

金属材料
的海洋腐蚀与防护
**Corrosion and Protection
of Metals in Marine
Environment**

朱相荣 王相润 等编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

金属材料的海洋腐蚀与防护/朱相荣等编著. —北京:
国防工业出版社, 1999. 3

ISBN 7-118-02055-9

I. 金… II. 朱… III. ①金属材料-海水腐蚀②金属材料-防腐 IV. TG172.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 40407 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 9½ 242 千字
1999 年 3 月第 1 版 1999 年 3 月北京第 1 次印刷
印数: 1—1500 册 定价: 19.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由国防工业出版社列出出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模
主任委员 黄宁
副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾铎
秘书长 崔士义
委员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成
(以姓氏笔划为序)
刘仁 朱森元 朵英贤 宋家树
杨星蒙 吴有生 何庆芝 何国伟
何新贵 张立同 张汝果 张均武
张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安
侯正明 莫梧生 崔尔杰

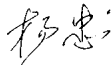
序

人类已进入海洋开发的新时代。海洋资源开发、海上运输、海港和海防建设等需要大量的金属材料,掌握这些材料在海洋环境中的腐蚀数据、腐蚀规律和防护技术,对海洋设施的合理选材、安全使用、降低成本等均起着重大作用。因此,广大的海洋工程技术人员急需有关金属材料在我国各海域中腐蚀及防护技术方面的书籍。正值国际海洋年之际,朱相荣教授等编著的《金属材料的海洋腐蚀与防护》即将出版,由衷地感到高兴和快慰。

为开发我国的海洋用钢,原冶金部组织了北京钢铁研究院、北京钢铁学院以及鞍钢、武钢、包钢、上钢等单位研究所的力量,于1975年建立了青岛海洋用钢试验站,1985年更名为冶金部钢铁研究总院青岛海洋腐蚀研究所。该所与美、英、日、瑞典等国的学者有着广泛的学术交流和合作,并结合我国海洋情况开展了大量试验和研究工作,为我国金属材料在海洋环境中的使用,积累了大量有关腐蚀数据和规律方面的资料。本书就是该所20多年来研究成果和实践经验的结晶,也凝聚着本领域兄弟单位的一些科技成果。

本书主要编著者朱相荣教授1960年毕业于北京航空学院材料系腐蚀与防护专业,近40年一直从事本专业工作,特别是自1976年至今他专注于海洋腐蚀与防护的试验、研究,在国内外学术刊物上发表论文60余篇。

本书乃是金属材料在我国的海洋腐蚀与防护领域里较系统的书籍,具有较高的学术水平和应用价值,它的问世定将对我国海洋工程科研、教学等有关人员起到积极的借鉴作用。



1998年10月

前 言

本书的大部分编著者从事金属材料腐蚀与防护试验研究工作30余年,其中20余年专门从事金属材料的海洋腐蚀与防护的测试和研究。本书不同于一般的腐蚀防护知识性或教学性书刊,它着重介绍国产金属材料在我国海洋环境中的腐蚀数据与行为以及金属材料在海洋环境中的腐蚀控制方法,并从设计、选材和防蚀工程角度,以金属材料为主线,阐述它们在海洋环境中出现的腐蚀形态及相应的防护措施。其中大多数内容是编著者通过大量的实海腐蚀试验和防护工程实施中,经多年积累的数据整理提炼出来的,而且在某些环节中还提出了一些新的见解,如低电位差金属间接触腐蚀的特征、海洋环境因素对钢腐蚀的影响、关于钢的大气腐蚀性实验数据与国际标准差异等。个别章节中尚缺乏国产材料的实践经验,系引用国外结果。希望本书能成为从事金属材料及防护技术研究的同仁、海洋用金属材料使用者及其他工程技术人员的实用参考书。

各章节编者如下:朱相荣编写绪论、第1、3、4、5、6、8、9章;王相润编写第2章;侯文泰、梁采凤编写7.1节,朱相荣编写7.2节,张朝玉编写7.3~7.5节;黄桂桥编写第10章;杨朝晖编写第11章;韩冰编写第13章;朱相荣、邹中坚编写第12章;纪鹏编写第14章。全书由青岛海洋大学王庆璋教授校审,张晶、郁春娟协助书稿的整理,在此谨表谢意。

本书中部分国产常用金属材料的腐蚀数据取自国家自然科学基金委员会重大项目“材料自然环境腐蚀”“八五”海水腐蚀数据汇编,在此,向国家自然科学基金委员会材料学部及参加该项工作的兄弟单位的技术人员,诚致谢意。

内 容 简 介

本书阐述了金属材料在海洋环境中的腐蚀原理、电化学特性及腐蚀形态,并展示出国产金属材料在我国海洋环境中的长期腐蚀数据;总结了金属材料在海洋环境中的腐蚀行为和腐蚀规律,并提出一些新见解;还介绍了腐蚀控制的主要原理和方法。

本书是从事金属材料腐蚀与防护的研究、工程、教育及管理人士的实用参考书。

This book expounds the corrosion principle, electrochemical character as well as corrosion types of metals in marine environment and shows the long-term corrosion data of common metals (made in China) in Chinese marine environment; summarizes the corrosion behaviour and corrosion law of metals in marine environment as well as put out some new view; introduces the main principle and method of corrosion control.

It's a practical reference book for people of researching, engineering, education and management on corrosion and protection of metals.

目 录

绪 论

一、海洋腐蚀与防护的重要性	1
二、海洋腐蚀分类	2
三、海洋腐蚀控制方法	3

第 1 篇 海洋腐蚀及其原理

第 1 章 海洋腐蚀的电化学性质	6
1.1 海水性质与海水腐蚀的电化学特征	6
1.2 海洋环境各个区带的腐蚀特征	13
1.3 海洋腐蚀的复杂性	19
第 2 章 海洋腐蚀形态及其试验评定方法	21
2.1 海洋腐蚀形态	21
2.2 海洋腐蚀试验评定方法	33
第 3 章 海水中接触腐蚀	42
3.1 海水中接触腐蚀现象	42
3.2 电偶序与接触腐蚀	45
3.3 影响接触腐蚀的因素	53
3.4 控制接触腐蚀的措施	57
第 4 章 金属材料在高流速海水中的腐蚀行为	60
4.1 高流速海水中腐蚀的行为	60
4.2 金属材料在含泥沙海水中的腐蚀行为	69
4.3 空泡腐蚀	73
第 5 章 海生物附着对金属材料腐蚀的影响	76
5.1 大型海生物的污损及其控制方法	76

5.2	微生物的腐蚀及其控制	82
第6章	海洋环境中的应力腐蚀及腐蚀疲劳	88
6.1	海洋环境中的应力腐蚀	88
6.2	海洋环境中的腐蚀疲劳	97

第2篇 金属材料在海洋环境中的腐蚀

第7章	碳钢、低合金钢的海洋腐蚀	109
7.1	碳钢、低合金钢海洋大气腐蚀	109
7.2	碳钢、低合金钢海洋飞溅带腐蚀数据及其特征	126
7.3	碳钢、低合金钢海水潮差带及全浸带的腐蚀	133
7.4	碳钢、低合金钢在泥沙带中的腐蚀	145
7.5	有关碳钢、低合金钢的海水局部腐蚀机理	146
第8章	铸铁在海洋环境中的腐蚀	154
8.1	海洋环境中常用的铸铁	154
8.2	铸铁中合金元素对耐蚀性的影响	157
8.3	一些铸铁在海水中的腐蚀性能数据	158
第9章	不锈钢在海洋环境中的腐蚀	161
9.1	概述	161
9.2	不锈钢的晶间腐蚀	165
9.3	不锈钢在海水中的孔蚀	167
9.4	不锈钢的缝隙腐蚀	170
第10章	有色金属及合金的海洋腐蚀	175
10.1	铜及铜合金	175
10.2	铝及铝合金	186
10.3	钛及钛合金	194
10.4	其它有色金属及合金	198

第3篇 金属材料海洋腐蚀的防护

第11章	利用金属涂、镀层控制腐蚀的方法	201
11.1	金属热喷涂	201

11.2	金属热浸镀·····	210
第 12 章	利用非金属涂层控制腐蚀的方法 ·····	220
12.1	海洋环境中常用的防腐蚀涂层·····	220
12.2	防腐蚀涂料的发展·····	229
12.3	影响防蚀涂层性能的主要因素及改善措施·····	232
12.4	海洋工程中涂层保护方案的选用·····	233
第 13 章	电化学阴极保护技术 ·····	236
13.1	概述·····	236
13.2	牺牲阳极保护法·····	244
13.3	外加电流阴极保护法·····	252
13.4	阴极保护新进展·····	259
第 14 章	海洋环境防腐蚀的其它方法 ·····	262
14.1	缓蚀剂防腐技术·····	262
14.2	电解防污技术·····	272
14.3	钢筋混凝土构筑物的防腐·····	278

Contents

Introduction

1. Importance of marine corrosion and protection	1
2. Marine corrosion classification	2
3. Method of marine corrosion control	3

Section I Marine corrosion and its principle

Chapter 1 Electrochemical properties of marine corrosion ...	6
1.1 Seawater properties and electrochemical characteristics of seawater corrosion	6
1.2 Corrosion characteristics in five zones of marine environment	13
1.3 Complexity of marine corrosion	19
Chapter 2 Types of marine corrosion and testing evaluation methods	21
2.1 Types of marine corrosion	21
2.2 Methods of testing and evaluation of marine corrosion	33
Chapter 3 Contact corrosion in seawater	42
3.1 Contact corrosion phenomenon in seawater	42
3.2 Galvanic series and contact corrosion	45
3.3 Effecting factors of contact corrosion	53
3.4 Measures of controlling contact corrosion	57
Chapter 4 Corrosion behaviour of metals in high	

	velocity seawater	60
4.1	Corrosion behaviour of metals in high velocity seawater	60
4.2	Corrosion behaviour of metals in silty seawater	69
4.3	Cavitation corrosion	73
Chapter 5 Effect of biofouling on metals in marine environment		
	environment	76
5.1	Macro-biofouling phenomenon and it control methods	76
5.2	Microbial corrosion and its control methods	82
Chapter 6 Stress corrosion and corrosion fatigue of metals in marine environment		
	metals in marine environment	88
6.1	Stress corrosion in marine environment	88
6.2	Corrosion fatigue in marine environment	97
Section 2 Corrosion of metals in marine environment		
Chapter 7 Marine corrosion of carbon steels and low alloy steels		
	low alloy steels	109
7.1	Marine atmospheric corrosion of carbon steels and low alloy steels	109
7.2	Corrosion of carbon steels and low alloy steels in splash zone	126
7.3	Corrosion of carbon steels and low alloy steels in tidal zone and full immersion zone	133
7.4	Corrosion of carbon steels and low alloy steels in sea mud zone	145
7.5	Localized corrosion mechanism of carbon steels and low alloy steels in seawater	146

Chapter 8 Corrosion of cast irons in marine

environment	154
8.1 Common cast irons in marine onvironment	154
8.2 Effect of alloy elements on corrosion resistance of cast irons	157
8.3 Corrosion data of some cast iron in seawater	158

Chapter 9 Corrosion of stainless steels in marine

environment	161
9.1 Outline	161
9.2 Intergranular corrosion of stainless steels	165
9.3 Pitting corrosion of stainless steels in seawater	167
9.4 Crevice corrosion of stainless steels	170

Chapter 10 Marine corrosion of non-ferrous metals

in marine environment	175
10.1 Copper and its alloys	175
10.2 Aluminium and its alloys	186
10.3 Titanium and its alloys	194
10.4 Other non-ferrous metals	198

Section 3 Corrosion protection of metals
in marine environment

Chapter 11 Corrosion control methods by Metallic

coating	201
11.1 Metal thermal spraying	201
11.2 Hot-dip metal coating	210

Chapter 12 Corrosion control methods by non-motallc

coating	220
12.1 Common anticorrosion coating in marine environment	220
12.2 Development of anticorrosion coating	229

12. 3	Effecting factors and improving measures for coating properties	232
12. 4	Selection of coating protection scheme in marine environment	233
Chapter 13 Electrochemical cathodic protection		
	technology	236
13. 1	Outline	236
13. 2	Sacrificial anodes protection methods.....	244
13. 3	Cathodic protection methods of impressed current	252
13. 4	New progress of cathodic protection	259
Chapter 14 Other methods of corrosion protection		
	in marine environment	262
14. 1	Inhibition anticorrosion technology	262
14. 2	Electrolysis antifouling technology	272
14. 3	Anticorrosion of reinforced concrete structure	278

绪 论

一、海洋腐蚀与防护的重要性

占地球面积 71% 的辽阔而神秘的海洋是生命的摇篮,是人类取之不尽的资源宝库。人类未来也寄希望于海洋。它除了提供人类大量动植物资源外,还能从中提取食盐、钾、镁、溴以及碘、钠等工业原料和淡水。据联合国第一委员会的报告,海底还蕴藏着大量的矿产,如果按现在地面上的铝、锰、铜、镍、钴、钼尚可用 100 年估算,那么它们在海底的储量分别可用 2 万年、40 万年、5 千年、15 万年、20 万年和 3 万年。这些矿产绝大部分目前还不能开发利用,但是,开发国际海底和公海资源的潜力很大,随着海洋技术的发展,将来是可以开发利用的。海洋也是各国之间相互交往的天然渠道,并在国防上有着非常重要的地位。近年来,海洋开发与宇宙开发、原子能开发并列成为世界三大开发方向。21 世纪将是一个“海洋开发的新时代”。海洋开发首先要面对恶劣的海洋环境。金属材料在海洋中的腐蚀损失相当严重,欲选择适合于海洋工程的金属材料,必须了解它的腐蚀行为。据统计,全世界每年生产的钢铁约有 30% 遭受腐蚀,10% 的钢铁将变为无用的铁锈。我国 1995 年最新统计,腐蚀经济损失高达 1500 亿元人民币,约占国民生产总值(GNP)的 4%^[2]。海洋腐蚀的损失约占总腐蚀损失的 1/3,每年腐蚀的经济损失比因火灾、风灾、水灾、地震等自然灾害的损失总和还大。在航空航天、船舶、舰艇及机械结构方面因腐蚀造成的事故屡屡发生,由此造成人员伤亡和贻误战机是不可弥补的憾事。国内外有不少这类事例,如 70 年代初国内某船舶存在严重的局部腐蚀,经研究,是因异种壳板钢的接触腐蚀所致,并由此促使研制成一种新钢种^[3]。又如,1985 年 8 月 12 日日本一架波音 747 客机由