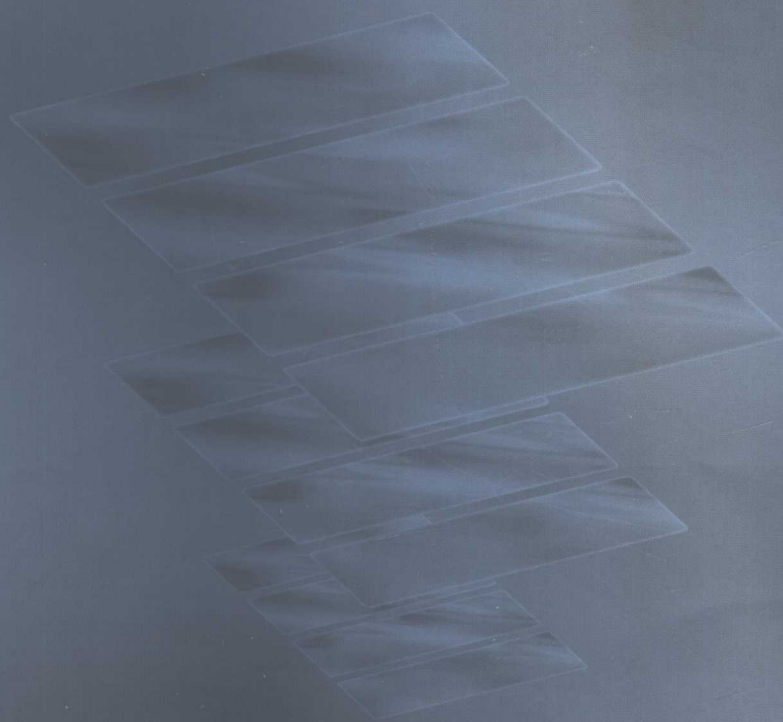


现代腐蚀科学和防蚀技术全书

材料的耐蚀性 和腐蚀数据

黄建中 左禹 主编



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

现代腐蚀科学和防蚀技术全书

材料的耐蚀性和腐蚀数据

黄建中 左禹 主编

化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心
·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

材料的耐蚀性和腐蚀数据/黄建中, 左禹主编. —北京:
化学工业出版社, 2002.10
(现代腐蚀科学和防蚀技术全书)
ISBN 7-5025-4067-9

I. 材… II. ①黄…②左… III. ①材料-腐蚀-研究
②材料-耐蚀性-研究 IV. TB304

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 070565 号

现代腐蚀科学和防蚀技术全书

材料的耐蚀性和腐蚀数据

黄建中 左禹 主编

责任编辑: 段志兵

责任校对: 蒋 宇

封面设计: 潘 峰

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 40 字数 1000 千字

2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4067-9/TQ·1605

定 价: 90.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

现代腐蚀科学和防蚀技术全书

编辑委员会

顾问	师昌绪	闵恩泽	徐滨士				
	汪家鼎	徐 僖	欧阳世翕				
主任委员	肖纪美						
副主任委员	曹楚南	柯 伟	陈逢阳				
委 员	(按姓氏笔画序)						
	左 禹	吴再思	吴荫顺	宋师哲	李金桂	杨 武	
	肖纪美	陈志良	陈逢阳	林昌健	郑家桢	柯 伟	
	曹楚南	黄建中					
编辑组	吴荫顺	张小红	段志兵				

序

21 世纪之初，在全世界范围内，已大步地从“传统”的农业社会文明迈入“现代”工业社会文明少数国家已在考虑“工业后”社会的文明，“可持续发展”已逐渐成为不少国家，包括中国的基本发展战略。

在这种大形式下，材料，从生产到消费，都必须考虑在可持续发展战略指引下工作，因而材料的腐蚀科学和防蚀技术逐渐更为人们重视。金属材料的腐蚀所导致的经济损失，约占国民生产总值（GNP）的 4%；减少材料的腐蚀，不仅可以减少这种经济损失，并且可减少环境污染，节约资源和能源。

为了尝试总结并融合当前最新的腐蚀科学理论和防蚀技术的成就，展望本世纪高新技术的要求，中国腐蚀与防护学会和化学工业出版社共同组织编写了这套《现代腐蚀科学和防蚀技术全书》。这套书也是上世纪出版的《腐蚀与防护全书》的新版本，旨在用新的形式反映新时期腐蚀与防护的发展水平。希望这套书能直接而高效地为我国经济建设和国防建设服务。

这套书的内容包括材料腐蚀学原理，防腐蚀工程技术，腐蚀试验、检测和监测，腐蚀科学技术的工业应用，共 6 册。从内容、组织和编写，尽可能做到雅俗共赏。希望科研院所、高等院校、工矿企业中对腐蚀科学和防蚀技术有兴趣的广大读者，从阅读中受益。

敬请读者及有关专家指正。

北京科技大学 肖纪美

2002 年 6 月

前 言

从 20 世纪 70 年代起,人们就将信息、能源、材料作为当代文明的三大支柱,而材料则始终是发展各种技术、提高人民生活水平的物质基础,是人类可持续发展的主要决定因素之一。

处于不同环境的各种材料都会不可避免地发生腐蚀。

材料腐蚀缩短了材料使用寿命,造成巨大的经济损失。据统计,全球每年因腐蚀损失达 7000 亿美元,占各国国民生产总值 (GNP) 2%~4%,腐蚀损失为综合自然灾害损失即地震、台风、水灾等损失总和的 6 倍!我国 1995 年统计,腐蚀损失达 1500 亿人民币。

材料腐蚀增加了材料用量,材料发生腐蚀后,其中一部分是不可再生的,即发生不可逆的资源损耗;亦增加了材料制造所需能源的损耗,增加了冶炼中排放 CO_2 和 SO_2 气体量,加重了全球温室效应和酸雨、酸雾的形成,对环境造成严重危害。

材料腐蚀使设备和管道破裂,会使物质向外泄漏,造成对大气、土壤、江河、湖泊的严重污染。

材料腐蚀往往使生产中断,发生停电、停水、停气,严重地影响人们的正常生产和生活;设备腐蚀破坏,有时还危及人身安全。

然而,材料腐蚀并非完全无法控制,相反,随着防腐蚀理论研究的不断深入,新的耐蚀材料和防腐蚀技术不断出现及推广以及严格的科学管理,其中一部分腐蚀可以防止或减轻。以美国为例,由于大量新材料、新技术的推广应用,腐蚀造成的损失从 1995 年占 GNP4.9% 降到 1995 年的 4.2%,比预期降低 14.3%,估计其中仍有 35% 约 1000 亿美元损失可避免。

实践证实,提高材料的耐蚀性是一条根本性的防腐蚀途径。在协调新世纪材料与环境的关系中,耐蚀材料扮演着重要角色,耐蚀材料亦是所谓“环境材料”中的最重要成员。

在实际中,常需要根据具体介质环境,合理选用耐蚀材料;或者要寻找适当的热处理和表面改性等方法,挖掘材料的耐蚀性潜力;在现有材料不能满足耐蚀要求时,还要研究开发新的耐蚀材料;有时还要运用和发展材料表面技术以改善和提高其耐蚀性能,这都要求人们具有材料学和材料腐蚀学知识,需要弄清所用材料的腐蚀特征、规律、机理和影响因素,需要了解材料耐蚀性原理,如合金化作用,杂质的影响等等。本书各章节的编撰即是围绕这些内容进行安排、并对近 10 年来的最新研究成果给予了关注。本书的出版,希望能尽量满足读者对这些方面知识的要求,如若对我国各领域防腐水平的提高,对材料耐蚀理论知识的传播和普及,对新型耐蚀材料的研制和材料表面技术的发展有所裨益,有着微薄贡献,我们将感到非常高兴和欣慰。

参与本书编撰的人员有:黄建中(第 1 章、第 4 章 4.3 节)、刘灿楼(第 2 章)、顾宝珊和汪兵(第 3 章)、陆正良(第 4 章 4.1、4.2、4.5 节)、王伟(第 4 章 4.4 节)、范海枝(第 5 章)、黄乾尧(第 6 章)、江社明(第 7 章)、左禹(第 8 章、第 14 章)、梁成浩和陈小平(第 9 章)、王向东(第 10 章)、吉静(第 11 章)、李静(第 12 章)、杨儒(第 13 章)。最后分别由黄建中、左禹审定。

我们清楚地知道，尽管本书编著者都是长期从事相关领域的研究者和大学教师，但由于各人阅历、经验以及学术水平各有差异，本书难免存在这样那样的不足、缺点甚至错误，恳请广大读者批评指正，我们将衷心感谢！

编著者

2002 年 6 月

内 容 提 要

本书为《现代腐蚀科学和防蚀技术全书》的一种，专门介绍材料的耐蚀性，提供部分腐蚀数据。

书中阐述了金属材料、非金属材料和复合材料的耐蚀性，具体分析了各种材料在腐蚀性环境里的腐蚀现象和机理，环境因素、材料结构和成分对材料耐蚀性的影响，材料在各种环境中的耐蚀能力及一些腐蚀数据。对于各种材料，尤其是新材料的分类、制备、物理力学性能、应用等也作了简明介绍，以期读者对材料有比较全面的认识。

本书由长期从事耐蚀材料制备分析研究、应用的专家合著而成，知识信息丰富、全面。适于材料专业、冶金专业或防腐蚀专业的工程技术人员、科研人员和大专院校师生阅读。

目 录

上篇 金属材料的耐蚀性和腐蚀数据

第 1 章 金属与合金的耐蚀理论 3

1.1 腐蚀热力学与动力学概论 3	
1.1.1 腐蚀热力学 3	
1.1.2 腐蚀动力学 6	
1.2 耐蚀合金化途径 7	
1.2.1 提高金属热力学稳定性 7	
1.2.2 抑制腐蚀发生的阴极过程 7	
1.2.3 抑制腐蚀发生的阳极过程 8	
1.2.4 增加金属表面电阻 10	
1.3 合金元素与耐蚀性 11	
1.3.1 合金元素对阳极极化特性的影响 11	
1.3.2 合金元素对阴极极化的影响 12	
1.3.3 主要合金元素对金属耐蚀性的影响 14	
1.3.4 金属表面合金化 21	
1.4 纯净度与耐蚀性 25	
1.4.1 杂质对钢铁耐蚀性的影响 25	
1.4.2 杂质对有色金属耐蚀性的影响 28	
1.4.3 洁净钢的冶金工艺 30	
1.4.4 纯净度与耐蚀性 32	
1.5 表面与耐蚀性 34	
1.5.1 表面膜特征理论 34	
1.5.2 钝化膜理论 37	
1.5.3 化学转化膜理论 39	
参考文献 44	

第 2 章 铸铁 47

2.1 铸铁的分类、特点和一般应用 47	
2.1.1 普通铸铁 47	
2.1.2 合金铸铁 47	
2.2 铸铁的腐蚀及合金元素对铸铁耐蚀性的影响 49	
2.3 铸铁的耐蚀性 51	
2.3.1 普通铸铁 51	

2.3.2 高硅铸铁 55	
2.3.3 高铬铸铁 60	
2.3.4 高镍铸铁 62	
2.3.5 其他耐蚀铸铁 65	
2.4 铸铁的耐热性能 66	
参考文献 71	

第 3 章 碳钢及低合金钢 72

3.1 碳钢的耐蚀性 72	
3.1.1 冶金因素对碳钢耐蚀性影响 72	
3.1.2 碳钢在自然环境中的耐蚀性 74	
3.1.3 碳钢在化工介质中的耐蚀性 78	
3.2 耐大气腐蚀低合金钢 81	
3.2.1 合金元素对钢耐大气腐蚀性能的影响 81	
3.2.2 国内外耐大气腐蚀钢 85	
3.2.3 碳钢、低合金钢大气腐蚀机理 90	
3.2.4 耐大气腐蚀钢的使用 91	
3.3 耐海水腐蚀低合金钢 93	
3.3.1 合金元素对海洋用钢耐蚀性的影响 94	
3.3.2 国内外耐海水腐蚀钢 95	
3.3.3 耐海水腐蚀钢的耐蚀性 100	
3.4 耐硫酸露点腐蚀低合金钢 105	
3.4.1 硫酸露点腐蚀的机理 105	
3.4.2 耐硫酸露点腐蚀用低合金钢 106	
3.4.3 耐硫酸露点腐蚀低合金钢的耐蚀性能 107	
3.5 耐硫化物腐蚀用钢 108	
3.5.1 钢的硫化物应力腐蚀破裂与影响因素 108	
3.5.2 耐硫化物应力腐蚀破裂用低合金钢 110	
3.5.3 抗高温硫化物腐蚀低合金钢 111	
3.6 抗氢、抗氮、抗氨作用低合金钢 117	
3.6.1 氢、氮、氨与钢的作用 117	

3.6.2 合金元素对钢的抗氢腐蚀性能的影响	120
3.6.3 抗氢、抗氮低合金钢	121
参考文献	124
第4章 不锈钢	126
4.1 马氏体不锈钢	126
4.1.1 概述	126
4.1.2 马氏体不锈钢的耐蚀性	127
4.1.3 典型钢种的耐蚀性数据	130
4.2 铁素体不锈钢	133
4.2.1 概述	133
4.2.2 普通铁素体不锈钢的成分、组织	134
4.2.3 普通铁素体不锈钢的耐蚀性能	137
4.2.4 高纯高铬铁素体不锈钢	142
4.2.5 典型钢种的耐蚀性与数据	144
4.3 奥氏体不锈钢	148
4.3.1 概述	148
4.3.2 奥氏体不锈钢耐均匀腐蚀性能	149
4.3.3 奥氏体不锈钢耐点腐蚀性能	153
4.3.4 奥氏体不锈钢耐缝隙腐蚀性能	155
4.3.5 奥氏体不锈钢耐晶间腐蚀性能	156
4.3.6 奥氏体不锈钢耐应力腐蚀开裂(SCC)性能	159
4.3.7 奥氏体不锈钢在高温气体中的耐蚀性	163
4.3.8 奥氏体不锈钢在特殊介质中的耐蚀性	165
4.4 双相不锈钢	165
4.4.1 概述	165
4.4.2 合金元素与相组织对双相不锈钢耐蚀性的影响	167
4.4.3 典型双相不锈钢牌号及其耐蚀性	172
4.4.4 双相不锈钢主要应用	180
4.5 沉淀硬化不锈钢	182
4.5.1 沉淀硬化不锈钢的成分与组织	182
4.5.2 沉淀硬化不锈钢耐蚀性	184
参考文献	188
第5章 铁镍基和镍基耐蚀合金	191
5.1 铁镍基耐蚀合金	191
5.1.1 镍铁铬合金	191

5.1.2 镍铁铬钼合金	193
5.1.3 镍铁铬钼铜合金	195
5.2 镍基耐蚀合金	204
5.2.1 镍铜合金	204
5.2.2 镍铬合金	208
5.2.3 镍钼合金	216
5.2.4 镍铬钼合金	223
5.2.5 镍铬钼铜合金	235
参考文献	240

第6章 耐热钢与高温合金

6.1 金属材料的高温力学行为与强化机制	241
6.1.1 蠕变	241
6.1.2 应力松弛	242
6.1.3 机械疲劳	242
6.1.4 热疲劳	243
6.1.5 金属材料高温强化机制	244
6.2 金属材料高温氧化和高温腐蚀行为	248
6.2.1 高温氧化	248
6.2.2 氢腐蚀	254
6.2.3 热腐蚀	255
6.3 耐热钢	257
6.3.1 耐热钢种类及其组织	257
6.3.2 合金元素的作用	258
6.3.3 钢的组织结构的作用	258
6.3.4 耐热钢牌号、成分、性能及其用途	262
6.4 铁基高温合金	271
6.4.1 合金种类	271
6.4.2 合金元素作用	272
6.4.3 合金牌号、成分及性能	272
6.5 镍基高温合金	273
6.5.1 合金种类	273
6.5.2 合金组织	274
6.5.3 合金元素的作用	275
6.5.4 合金的牌号与性能	276
6.6 钴基高温合金	279
6.6.1 合金元素的作用	279
6.6.2 合金组织	279
6.6.3 合金牌号及其性能	279
6.7 其他高温合金	280
6.7.1 定向凝固高温合金	280
6.7.2 粉末高温合金	282

6.8 金属间化合物	283
6.8.1 概述	283
6.8.2 金属间化合物的强度	284
6.8.3 金属间化合物的塑韧性	284
6.8.4 抗氧化性能	285
6.8.5 几种金属间化合物材料	286
6.9 耐热钢和高温合金的应用	287
6.9.1 航空发动机上的应用	287
6.9.2 航天火箭发动机上的应用	288
6.9.3 工业燃气轮机上的应用	288
6.9.4 汽车工业中的应用	288
6.9.5 石油化工工业中的应用	289
6.9.6 原子能工业中的应用	290
6.9.7 水泥和搪瓷工业中的应用	290
6.9.8 玻璃工业中的应用	291
6.9.9 冶金工业中的应用	291
6.9.10 电力工业中的应用	291
参考文献	292
第7章 有色金属及合金	293
7.1 铝及铝合金	293
7.1.1 概述	293
7.1.2 铝及铝合金的腐蚀行为	293
7.1.3 铝及铝合金的耐蚀性	297
7.2 镁及镁合金	302
7.2.1 概述	302
7.2.2 镁及镁合金的腐蚀行为	302
7.2.3 镁及镁合金的耐蚀性	304
7.3 铜及铜合金	307
7.3.1 概述	307
7.3.2 铜及铜合金的腐蚀行为	307
7.3.3 铜及铜合金的耐蚀性	310
7.4 铅、锌、锡及其合金	315
7.4.1 概述	315
7.4.2 铅、锌、锡的腐蚀行为	315
7.4.3 铅、锌、锡在各介质中的耐蚀性	315
7.5 钛及钛合金	320
7.5.1 概述	320
7.5.2 钛及合金的腐蚀行为	320
7.5.3 钛合金的耐蚀性	323
7.6 锆及锆合金	325
7.6.1 概述	325
7.6.2 锆及锆合金的腐蚀行为	326

7.6.3 锆及锆合金的耐蚀性	328
7.7 钨、钼、钽、铌	329
7.7.1 概述	329
7.7.2 钨、钼、钽、铌的电化学特性	329
7.7.3 钨、钼、钽、铌的耐蚀性	331
7.8 贵金属	335
7.8.1 概述	335
7.8.2 电化学特性	337
7.8.3 贵金属的耐蚀性	337
参考文献	338

第8章 非晶态合金

8.1 非晶态合金的结构	340
8.1.1 非晶态合金的结构特点及其表征	340
8.1.2 非晶态结构模型	342
8.1.3 非晶态合金的结构缺陷	342
8.2 非晶态合金的形成和制备方法	343
8.2.1 非晶态合金形成的热力学与动力学	343
8.2.2 非晶态合金的制备方法	343
8.3 非晶态合金的耐腐蚀性	345
8.3.1 非晶态合金与晶态合金耐蚀性的差异	345
8.3.2 合金组成对耐蚀性的影响	346
8.3.3 非晶态合金的局部腐蚀	348
8.3.4 非晶态合金的氢致脆化	348
8.4 非晶态合金的其他性能	350
8.4.1 非晶态合金的磁学与电学性能	350
8.4.2 非晶态合金的力学性能	352
8.4.3 非晶态合金的催化性能和贮氢性能	356
8.5 非晶态合金的应用	356
参考文献	357

第9章 功能材料

9.1 概述	359
9.1.1 功能材料的分类	359
9.1.2 新型功能材料的发展趋势	359
9.2 软磁材料	361
9.2.1 软磁材料的种类	361
9.2.2 软磁材料的腐蚀	364
9.3 永磁材料	367
9.3.1 永磁材料的种类	367

9.3.2 永磁材料的腐蚀	370
9.3.3 稀土磁体的防腐蚀涂层	371
9.3.4 粘结永磁性材料腐蚀	374
9.4 形状记忆合金	374
9.4.1 形状记忆效应和形状记忆合金	375
9.4.2 形状记忆合金的耐蚀性	377
9.4.3 形状记忆合金的应用	384
9.5 医用生物材料	386
9.5.1 生物医学材料的种类	386
9.5.2 生物医学材料的耐蚀性	391
参考文献	401
第 10 章 涂镀层钢板	405
10.1 镀锌及其合金钢板	405
10.1.1 概述	405
10.1.2 镀锌层的腐蚀原理	406
10.1.3 镀锌层的保护原理	407

10.1.4 镀锌层的耐蚀性	407
10.1.5 热镀锌合金化钢板耐蚀性	408
10.1.6 镀锌合金的耐蚀性	409
10.2 镀铝板	412
10.2.1 镀铝板的主要品种	412
10.2.2 镀铝板的耐蚀性	413
10.3 镀锡及无锡钢板	416
10.3.1 概述	416
10.3.2 镀锡板罐头的耐蚀性	416
10.3.3 镀铬钢板	420
10.4 有机涂层钢板	422
10.4.1 概述	422
10.4.2 有机涂层钢板的耐蚀性	422
10.4.3 有机涂层钢板(彩板)的使用 寿命	428
参考文献	429

下篇 非金属材料、复合材料的耐蚀性和腐蚀数据

第 11 章 通用高分子材料	433
11.1 通用高分子材料的耐蚀性	433
11.2 聚氯乙烯	434
11.2.1 聚氯乙烯的物理、力学性质	434
11.2.2 聚氯乙烯的耐化学腐蚀性	435
11.2.3 聚氯乙烯的加工及应用	437
11.3 聚乙烯	438
11.3.1 聚乙烯的物理、力学性能	438
11.3.2 聚乙烯的耐化学腐蚀性	438
11.3.3 聚乙烯的应用	439
11.4 聚丙烯	440
11.4.1 聚丙烯的物理、力学性质	440
11.4.2 聚丙烯的耐化学腐蚀性	441
11.4.3 聚丙烯的应用	443
11.5 环氧树脂	445
11.5.1 环氧树脂的种类及其固化	445
11.5.2 环氧树脂的物理、力学性能和 耐化学腐蚀性	450
11.5.3 环氧树脂的应用	450
11.6 不饱和聚酯	453
11.6.1 不饱和聚酯的种类和特性	455
11.6.2 不饱和聚酯常用其他辅助剂	459
11.6.3 不饱和聚酯树脂的应用	459
11.7 酚醛树脂	462

11.7.1 酚醛树脂的种类	463
11.7.2 固化后酚醛树脂的性质及 应用	464
11.8 呋喃树脂	466
11.8.1 呋喃树脂的种类	466
11.8.2 呋喃树脂的特性	466
11.8.3 呋喃树脂的应用	467
第 12 章 特种高分子材料	469
12.1 特种高分子材料的耐蚀性	469
12.2 氟碳材料	470
12.2.1 氟塑料的性能与应用	470
12.2.2 氟碳涂料及涂层的合成、性能 与应用	480
12.3 聚苯硫醚	484
12.3.1 聚苯硫醚基本性能	484
12.3.2 聚苯硫醚的耐化学腐蚀性	485
12.3.3 聚苯硫醚涂料及涂层的合成、性 质与应用	486
12.3.4 聚苯硫醚工程材料的应用	489
12.4 氯化聚醚	490
12.4.1 氯化聚醚的基本性能	490
12.4.2 氯化聚醚耐化学腐蚀性	492
12.4.3 氯化聚醚涂料及涂层的合成、性 能与应用	493

12.4.4 氯化聚醚工程材料的应用	494
12.5 聚醚醚酮	495
12.5.1 聚醚醚酮的基本性能	495
12.5.2 聚醚醚酮的耐化学腐蚀性	497
12.5.3 聚醚醚酮涂料及涂层的合成、性能与应用	497
12.5.4 聚醚醚酮工程材料的应用	498
12.6 聚酰亚胺	498
12.6.1 聚酰亚胺的基本性能	499
12.6.2 聚酰亚胺的耐化学腐蚀性和分解特性	502
12.6.3 聚酰亚胺涂料及涂层的合成、性能与应用	507
12.6.4 聚酰亚胺工程材料的应用	511
第 13 章 无机非金属材料	513
13.1 概论	513
13.1.1 无机非金属材料定义与分类	513
13.1.2 无机非金属材料的作用与地位	513
13.1.3 无机非金属材料的生产工艺	514
13.2 硅酸盐材料	515
13.2.1 硅酸盐材料的结构特征和耐腐蚀性	515
13.2.2 硅酸盐玻璃	521
13.2.3 硅酸盐陶瓷	532
13.2.4 硅酸盐水泥	540
13.3 结构陶瓷	557
13.3.1 氧化物陶瓷	557
13.3.2 氮化物陶瓷	560
13.3.3 碳化物陶瓷	563
13.3.4 硼化物陶瓷	564
13.3.5 硅化物陶瓷	565
13.4 碳素材料	565
13.4.1 概述	565
13.4.2 石墨制品	566

13.4.3 不透性石墨材料	572
13.4.4 金刚石制品	582
13.4.5 碳纤维	583
主要参考文献	584

第 14 章 复合材料

14.1 复合材料概述	586
14.1.1 复合材料的分类	586
14.1.2 复合材料的基体材料	586
14.1.3 复合材料的增强材料	588
14.1.4 复合材料的界面	594
14.2 金属基复合材料	598
14.2.1 金属基复合材料的种类	598
14.2.2 金属基复合材料的制造技术	598
14.2.3 铝基复合材料	599
14.2.4 镍基复合材料	602
14.2.5 钛基复合材料	603
14.2.6 金属基复合材料的应用	604
14.2.7 金属基复合材料的耐腐蚀性	604
14.3 聚合物基复合材料	607
14.3.1 聚合物基复合材料的分类	607
14.3.2 聚合物基复合材料的成型加工方法	608
14.3.3 聚合物基复合材料的基本性能	610
14.3.4 聚合物基复合材料的耐腐蚀性	612
14.3.5 聚合物基复合材料的应用	615
14.4 陶瓷基复合材料	616
14.4.1 陶瓷基复合材料的种类和基本性能	616
14.4.2 陶瓷基复合材料的成型工艺	619
14.4.3 陶瓷基复合材料的应用	619
14.5 其他类型复合材料	619
14.5.1 水泥基复合材料	619
14.5.2 碳/碳复合材料	624
参考文献	625

上篇 金属材料的耐蚀性和 腐蚀数据

第 1 章 金属与合金的耐蚀理论

1.1 腐蚀热力学与动力学概论^[1~3]

1.1.1 腐蚀热力学

众所周知,自然界存在的金属除个别贵金属如 Au、Pt 等外,绝大多数在热力学上是不稳定的,因为这些金属都是从天然矿石经过高温熔炼而来,它们有一种向矿物质“回归”的倾向,铁生锈即为实例。在生锈过程,金属铁变为 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 化合物,如氧化物和氢氧化物(铁锈),这些化合物类似于磁铁矿(Fe_3O_4)、褐铁矿($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$)。另一例为,镁合金制成的飞机轮子碎片掉入海底 28 年后,完全变为了晶态镁矿石。

某一给定状态的金属(M, Me^{n+} 或 Me_2O_n)能否自发反应转化为另一状态,先决条件是反应发生伴随能量释放,这时金属发生腐蚀。如若转化反应要求供给能量,则意味着转化不能自发进行,此时金属处于稳定状态,腐蚀不发生。这些规律即可用热力学上的吉布斯自由能判据来描述,即

$$\left. \begin{aligned} (\Delta G)_{T,p} < 0 & \text{ 腐蚀自发发生} \\ (\Delta G)_{T,p} = 0 & \text{ 平衡稳定状态} \\ (\Delta G)_{T,p} > 0 & \text{ 腐蚀不自发发生} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

$(\Delta G)_{T,p}$ 是在恒温恒压体系中体系腐蚀反应自由能的变化,它可通过反应中各物质的化学位计算获得:

$$(\Delta G)_{T,p} = \sum_i \nu_i \mu_i \quad (1-2)$$

式中 ν_i 为化学反应式中第 i 种物质的化学计量系数,规定反应物系数取负值,生成物取正值。式(1-1)可改为:

$$\left. \begin{aligned} (\Delta G)_{T,p} &= \sum \nu_i \mu_i < 0 & \text{自发发生} \\ (\Delta G)_{T,p} &= \sum \nu_i \mu_i = 0 & \text{平衡状态} \\ (\Delta G)_{T,p} &= \sum \nu_i \mu_i > 0 & \text{非自发发生} \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

多数金属腐蚀属电化学腐蚀,电化学腐蚀的倾向性,还可用电极电位或标准电极电位来判断。

腐蚀电池中金属阳极发生溶解(腐蚀),其电位为 E_A ,而腐蚀剂在阴极发生还原反应,其电位为 E_C 。金属腐蚀发生倾向可写成:

$$\left. \begin{aligned} E_A - E_C &= 0 & \text{平衡状态} \\ E_A - E_C &> 0 & \text{电位为 } E_A \text{ 的金属不会自发腐蚀} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

式(1-4)表明,当金属电位比腐蚀剂的还原反应电位更负时,金属腐蚀才能自发进行,否则金属不发生腐蚀。例如,在无氧的还原性酸中,只有金属的电位比该溶液中氢电极电位更负时,才能发生析氢腐蚀;在含氧的溶液中只有金属的电位比该溶液中氧电极电位更负

时, 才能发生吸氧腐蚀。当两种金属组成电偶时, 电位较负的金属构成阳极, 发生腐蚀; 电位较正金属不发生腐蚀。

通常所说电极电位是相对于标准氢电极而言, 所以式 (1-4) 可改写为:

$$\left. \begin{aligned} E_M - E_H < 0 \quad &\text{金属有析氢腐蚀倾向} \\ E_M - E_H > 0 \quad &\text{金属不发生析氢腐蚀} \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

式中 E_M 表示金属相对于饱和甘汞电极的电位, 显然, 金属电位越负, 析氢腐蚀的可能性越大。

金属电极电位与金属本性、介质成分、体系温度、压力有关。在一些情况下, 难于获得

表 1-1 金属在 25℃ 时的标准电极电位 (E_H°) 及其腐蚀稳定性的一般热力学特性
(电极反应 $M \rightleftharpoons M^{n+} + ne$, 在表中用 M-ne 符号表示)

热力学稳定性的一般特性	金属及其电极反应	E_H° / V	热力学稳定性的一般特性	金属及其电极反应	E_H° / V
(1) 热力学上很不稳定的金属 (贱金属)。甚至在不含氧及氧化剂的中性介质中也能被腐蚀	Li-e	-3.045	(2) 热力学上不稳定的金属 (贱金属)。无氧时在中性介质中是稳定的, 但在酸性介质中能被腐蚀	Cd-2e	-0.402
	Re-e	-2.925		In-3e	-0.342
	R-e	-2.925		Tl-e	-0.336
	Cs-e	-2.923		Mn-3e	-0.283
	Ra-2e	-2.92		Co-2e	-0.277
	Ba-2e	-2.90		Ni-2e	-0.250
	Sr-2e	-2.89		Mo-3e	-0.20
	Ca-2e	-2.87		Ge-4e	-0.15
	Na-2e	-2.714		Sn-2e	-0.136
	La-3e	-2.52		Pb-2e	-0.126
	Ce-3e	-2.48		W-3e	-0.11
	Y-3e	-2.372		Fe-3e	-0.037
	Mg-2e	-2.37	(3) 热力学上中等稳定的金属 (半贵金属)。当无氧及氧化剂时, 在中性和酸性介质中是稳定的	Sn-4e	+0.007
	Am-3e	-2.32		Bi-3e	+0.216
	Sc-3e	-2.08		Sb-3e	+0.24
	Pu-3e	-2.07		Re-3e	+0.30
	Th-4e	-1.90		As-3e	+0.30
	Np-3e	-1.86		Cu-2e	+0.337
	Be-2e	-1.85		Tc-2e	+0.40
	U-3e	-1.80		Co-3e	+0.418
	Hf-4e	-1.70		Cu-e	+0.521
	Al-3e	-1.66		Rh-2e	+0.60
	Ti-2e	-1.63		Tl-3e	+0.723
	Zr-4e	-1.53		Pb-4e	+0.784
	U-4e	-1.50		Hg-e	+0.789
	Ti-3e	-1.21		Ag-e	+0.799
	V-2e	-1.18		Rh-3e	+0.80
	Mn-2e	-1.18	(4) 高稳定性金属 (贵金属)。在含氧的中性介质中不腐蚀, 在含氧或氧化剂的酸性介质中可能腐蚀	Hg-2e	+0.854
	Nb-3e	-1.10		Pb-2e	+0.987
	Cr-2e	-0.913		Ir-3e	+1.00
	V-3e	-0.876		Pt-2e	+1.19
	Ta-Ta ₂ O ₅	-0.81	(5) 完全稳定的金属。在含氧的酸性介质中是稳定的, 含氧化剂时能够溶解在络合剂中	Au-3e	+1.50
	Zn-2e	-0.762		Au-e	+1.68
	Cr-3e	-0.74			
	Ga-3e	-0.53			
	Fe-2e	-0.440			