

金属防腐蚀手册

中国腐蚀与防护学会
《金属防腐蚀手册》编写组

内 容 提 要

本手册是《金属腐蚀手册》的姊妹卷。着重介绍了电化学保护原理及应用；金属表面防护技术；缓蚀剂；防腐蚀油漆及涂料；耐腐蚀非金属材料；防蚀设计；以及金属腐蚀失效分析等。本手册中列有大量的图表及有关数据；特别可贵的是引用了大量国内的研究、应用数据，阐述了这些防腐蚀技术应用的具体环境和条件。

本手册可供国民经济中各部门从事腐蚀与防护的设计人员、施工人员、设备维修人员以及研究人员参考之用；亦可供大专院校有关专业师生参考。

责任编辑 任 侃

金属防腐蚀手册

中国腐蚀与防护学会

《金属防腐蚀手册》编写组

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 上海新华印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 32.25 插页4 字数 770,000

1989年6月第1版 1989年6月第1次印刷

印数：1—4,300

ISBN 7-5323-0547-3/TG·24

定价：17.80元

序

人类从使用金属材料制造的工具、器皿以来，就开始了与金属腐蚀现象进行斗争，并发明和发展了许多行之有效的防腐蚀技术，如表面处理、合金化、油漆涂层、镀金术等。

近世纪来，随着工业技术的发展，由于金属腐蚀而造成的腐蚀破坏事故不断发生，因此人们也通过不断地研究、分析和总结腐蚀破坏的原因，找出对策，并在充分应用现代电化学及材料科学理论和实验方法的基础上，总结了金属腐蚀的基本规律，发展了金属腐蚀理论，进而用这些理论来指导生产实践，即研究、开发和推广应用许多经典的和现代的防腐蚀新技术，逐渐地发展、丰富和形成了腐蚀科学的完整体系。由此不难看出，金属腐蚀理论包括腐蚀科学与防护技术两个方面，是一门综合性的、适用性很强的应用学科。

为了提高经济效益，近些年来，国内外的腐蚀与防护科技工作者，在研究、开发与推广应用防腐蚀新技术方面进行了大量的工作。例如，苏联为了解决金属腐蚀问题，在1981~1985年以及到1990年的发展规化中，专门列出了金属防腐蚀技术研究项目；在欧洲委员会的基础技术研究发展规划中，防腐蚀技术的研究也列为专项研究内容；美国对腐蚀与防护也很重视，1975年美国国会拨专款对当年的由于腐蚀所造成的经济损失进行过调查，结果表明，当年的损失竟达700亿美元之巨。

我国自建国以来，党和政府对腐蚀科学寄予广泛的重视。在国家科委中设立了腐蚀科学学科组，作为党和国家发展腐蚀与防护科学的参谋和咨询机构。它协助国家科委制订了我国在各个时期的腐蚀科学发展规划。1979年，中国腐蚀与防护学会成立后，进一步组织与动员全国广大的腐蚀与防护科技工作者，通过各种学术交流活动，举办各类学习班、技术展览会等措施，开发并推广了各种防腐蚀新技术，收到了极好的社会效益和经济效益。例如，电化学保护技术已在我国的海洋开发、石油化学工业、地下构筑等方面获得了极广泛的应用，并逐步走向规范化、法令化阶段；缓蚀剂的理论研究与实际应用，正在建立我国自己的体系；油漆涂料的研究、生产和应用都具有我国的特色，也正在建立我国独特的体系；金属镀也获得了很大的发展，镀锌、镀锡、镀铝以及合金镀层等技术，正在走向工业化生产，喷镀、等离子镀、离子注入等新技术正在研究、开发和推广应用；作为防腐蚀极有前景的非金属材料，正在工业生产中，特别是在化学工业中，获得了极广泛的推广应用并取得了很大的经济效益；设计防腐蚀及防腐蚀技术管理也正在逐渐受到各界人士的重视。

· 仅从上述，不难看出，金属防腐蚀技术已成为工农业和国防工业发展中保证安全生产，提高经济效益不可缺少的组成部分。因此，进一步研究、开发和推广金属防腐蚀技术是腐蚀与防护科技工作者的重要任务。

上海科学技术出版社根据我国工农业及国防科学技术发展的需要，继支持我会编辑出版了《金属腐蚀手册》之后，又大力支持我们编辑出版《金属防腐蚀手册》一书。现在，经国内有关单位和专家的大力支持与辛勤劳动后，这本手册业已编写完毕，即将问世。我们深信，

《金属防腐蚀手册》一书的编辑出版,不仅会对我国广大的腐蚀与防护科技工作者有所裨益,而且将对发展我国的腐蚀与防护科技事业起到一定的作用。

中国腐蚀与防护学会理事长

张文奇

1986年9月

前 言

《金属防腐蚀手册》是在中国腐蚀与防护学会的组织与关怀下,在上海科学技术出版社的大力支持下,继《金属腐蚀手册》出版之后,编辑出版的又一本大型腐蚀与防护科技工具书。

众所周知,研究金属腐蚀机理,探求腐蚀破坏原因,主要目的是为了找出设备的“病由”,以便“对症下药”。这里指的“对症下药”就是提出防止设备或金属材料腐蚀的有效措施。由此不难看出,开发与推广应用防腐蚀技术是腐蚀与防护科技工作者的一项重要任务。开发与推广防腐蚀技术也是一项经济效益大、确保安全生产、防止环境污染的重要手段。从这一意义来讲,编辑出版《金属防腐蚀手册》对工农业生产实践期望能起到有益的作用。

本手册共分八章。分别邀请国内有关专家,从防腐蚀技术的基本原理出发,结合我国的实际情况,汇集了大量的国内外有关数据撰写而成。内容包括:绪论;电化学保护原理及应用;金属表面防护技术;缓蚀剂;防腐蚀油漆及涂料;耐腐蚀非金属材料;防腐蚀设计及金属腐蚀失效分析等。特别是介绍了许多我国腐蚀科技工作者多年来在实践中取得的成功经验,这是十分可贵的。

本手册的第一、八章由北京钢铁学院朱日彰教授编写;第二章由大连工学院火时中教授编写;第三章由冶金工业部顾国成高级工程师编写;第四章由北京大学杨文治教授等编写;第五章由铁道科学研究院席时俊副研究员编写;第六章由北京化工学院卜成华副教授编写;第七章由北京钢铁学院杨德钧副教授编写。全书由朱日彰、顾国成、杨文治三位任主编。

中国腐蚀与防护学会理事长、北京钢铁学院张文奇教授对本手册的编写始终给予极大的关怀和指导,并在百忙中为手册撰写了序言,谨表示衷心的感谢。在本手册编写过程中,还得到了学会副秘书长袁玉珍同志以及学会办公室同志的很大帮助,谨致谢意。

由于这类手册在国内尚属空白,对编者来说也是一项新的尝试,自揣错误及不当之处在所难免,恳切希望广大读者提出批评意见。

编者 1986年9月

目 录

序	1	§ 4 外加电流阴极保护系统	22
前言	3	§ 4.1 辅助阳极	22
第一章 绪论	1	一、可溶性阳极材料	24
§ 1 目的和意义	1	二、微溶性阳极材料	25
§ 2 回顾与展望	1	三、不溶性阳极材料	26
§ 3 内容和任务	2	§ 4.2 阳极屏	27
第二章 电化学保护原理及应用	4	§ 4.3 参比电极	28
§ 1 电化学保护	4	一、铜/硫酸铜电极	28
§ 1.1 分类	4	二、银/氯化银电极	29
§ 1.2 应用范围	4	三、锌电极	30
§ 2 阴极保护原理	4	四、甘汞电极	30
§ 2.1 电化学腐蚀的概念	4	§ 4.4 供电电源	30
一、电极电位	4	一、恒电位仪	31
二、腐蚀电池	6	二、整流器	32
三、极化	6	三、直流发电机	33
§ 2.2 阴极保护原理	7	四、太阳能电池	33
§ 2.3 阴极保护参数	8	§ 5 阴极保护在工业上的应用	34
一、保护电位	8	§ 5.1 阴极保护的应用	34
二、保护电流密度	9	§ 5.2 近海平台的阴极保护	34
三、最佳保护参数	9	一、阴极保护设计的准备	34
§ 3 牺牲阳极	11	二、阴极保护设计	35
§ 3.1 对牺牲阳极性能的要求	11	三、牺牲阳极系统和外加电流系统的比较	37
§ 3.2 镁阳极	12	四、对阴极保护系统的监控	39
一、纯镁	12	§ 5.3 船舶的阴极保护	39
二、Mg-Mn 系合金	13	一、船舶的外加电流阴极保护	40
三、Mg-Al-Zn-Mn 系合金	14	二、船舶的牺牲阳极阴极保护	41
§ 3.3 锌阳极	14	三、船舶阴极保护的数据	42
一、纯锌	15	§ 5.4 港湾设施的阴极保护	43
二、Zn-Al-Cd 系合金	16	一、阴极保护设计参数	43
三、其他锌合金	16	二、码头的阴极保护	44
§ 3.4 铝阳极	18	三、港湾设施阴极保护数据	46
一、Al-Zn-Hg 系合金	18	§ 5.5 地下管线的阴极保护	46
二、Al-Zn-Sn 系合金	19	一、土壤的腐蚀性	46
三、Al-Zn-In 系合金	19	二、地下管线阴极保护参数	46
§ 3.5 牺牲阳极电化学性能的测试方法	21	三、地下管线阴极保护设计	48
一、试样制备	21	§ 5.6 化工设备的阴极保护	53
二、试验条件	21	一、碱液蒸发锅	53
三、试验步骤	22	二、碱液贮槽	53
§ 3.6 牺牲阳极的形状及尺寸	22	三、氯碱二效蒸发罐	53
		四、联碱冷析结晶器	53
		五、不锈钢(SuS 33)结晶槽	53

六、不锈钢冷却蛇管	53
§ 6 阳极保护原理	53
§ 6.1 金属的钝性	53
§ 6.2 阳极保护原理	54
§ 6.3 阳极保护参数	55
一、致钝电流密度	55
二、维钝电流密度	55
三、稳定钝化区的电位范围	55
§ 7 阳极保护系统	55
§ 7.1 辅助阴极材料	57
一、包铂阴极	58
二、哈氏合金C阴极	58
三、铬镍不锈钢阴极	59
四、其他阴极材料	59
§ 7.2 参比电极	60
一、汞/硫酸汞电极	60
二、金属氧化物电极	60
三、金属电极	61
§ 7.3 恒电位仪	62
§ 8 阳极保护在工业中的应用	62
§ 8.1 硫酸生产	62
一、贮槽的保护	63
二、热交换器的保护	63
三、三氧化硫发生器的保护	64
§ 8.2 化肥生产	64
一、碳化塔的保护	65
二、氨水罐群的保护	65
三、其他设备的保护	66
§ 8.3 纸浆生产	66
参考文献	66
第三章 金属表面防护技术	68
§ 1 概论	68
§ 1.1 金属镀层	68
一、热镀	68
二、渗镀	68
三、电镀	68
四、喷镀	69
§ 1.2 非金属涂层	69
一、无机涂层	69
二、有机涂层	69
§ 2 金属表面预处理	69
§ 2.1 除油	69
一、碱液化学除油	69
二、电化学除油	71
三、有机溶剂除油	72
§ 2.2 除锈	72
一、化学酸洗	72
二、电化学酸洗	76
三、机械除锈	77
§ 3 热镀	78
§ 3.1 热镀锌	78
一、热镀锌原理	78
二、热镀锌方法	81
三、热镀锌制品的发展	83
四、镀锌层的防蚀性能	83
§ 3.2 热镀铝	86
一、热镀铝原理	86
二、热镀铝方法	87
三、镀铝钢材的性能	88
四、55% 铝-锌合金镀层钢板	90
§ 3.3 热镀锡	90
一、热镀锡钢板	90
二、镀锡铜丝	91
§ 3.4 热镀铅-锡合金	91
一、热镀铅-锡合金原理	91
二、热镀铅-锡合金的方法	92
三、铅-锡合金镀层钢板的特性	94
§ 4 渗镀	95
§ 4.1 扩散镀层形成的机理	95
§ 4.2 渗锌	98
一、渗锌层的形成方法	98
二、锌扩散镀层的成分和结构	99
三、影响渗锌层厚度、结构和性能的主要因素	100
四、渗锌层的性能	101
§ 4.3 渗铝	103
一、渗铝层的形成方法	103
二、渗铝层的组分与结构	104
三、影响渗铝层厚度的因素	105
四、渗铝钢材的特性	106
§ 4.4 渗铬	107
一、渗铬层的形成方法	107
二、影响渗铬层形成的因素	108
三、渗铬层的组分与结构	109
四、渗铬钢材的性能	110
§ 4.5 渗硅	113
一、渗硅层的形成方法	113
二、渗硅层的组分与结构	114
三、影响渗硅层厚度和质量的因素	115
四、渗硅层的性能	116
§ 4.6 渗硼	116
一、渗硼层的形成方法	117
二、渗硼层的组分与性能	119
§ 4.7 二元和三元渗镀层	120
一、铝-铬共渗	120
二、铬-镍共渗	120
三、铬-硅共渗	120

四、铬-钛共渗	121	二、铬酸盐膜的组分与结构	157
五、铝-钛共渗	122	三、铬酸盐膜的防蚀作用	157
六、铬-硅-铝共渗	122	四、铬酸盐膜的其他特征	158
§ 5 电镀	124	五、影响铬酸盐膜厚度和性质的各种因素	159
§ 5.1 镀铜	124	六、铬酸盐处理工艺	161
一、氰化物镀铜	124	§ 6.4 钢铁上的化学氧化膜	162
二、焦磷酸盐镀铜	126	一、化学氧化膜的形成机理	162
三、硫酸铜镀铜	127	二、氧化膜的性能	163
§ 5.2 镀黄铜	128	三、影响氧化膜质量的因素	163
§ 5.3 镀镍	129	四、氧化处理的工艺过程	163
一、普通镀镍	129	§ 7 其他表面镀层技术	164
二、光亮镀镍	131	§ 7.1 喷镀	164
三、黑色镀镍	131	一、喷镀方法	164
§ 5.4 镀铬	132	二、喷镀层的性质及应用	166
一、电镀铬的工艺特点	132	§ 7.2 离子镀	167
二、镀铬过程的电极反应	132	一、离子镀的原理	167
三、镀铬电解液组分及其对电镀工艺的影响	133	二、离子镀的工艺特征	168
四、镀铬的种类	134	§ 7.3 离子注入	168
§ 5.5 镀锡	136	一、离子注入技术的特点	168
一、硫酸亚锡型电解液	136	二、离子注入技术的发展前景	169
二、卤化亚锡型电解液	137	参考文献	161
三、氟硼酸亚锡型电解液	137	第四章 缓蚀剂	171
四、碱性锡酸盐电解液	137	§ 1 概论	171
§ 5.6 镀锌	138	§ 1.1 缓蚀剂的定义、特点和使用情况	171
一、氰化镀锌	138	§ 1.2 缓蚀剂的作用特征及其分类	171
二、硫酸盐镀锌	139	一、阳极、阴极和混合型缓蚀剂	171
三、锌酸盐镀锌	140	二、吸附型、钝化型和沉淀型缓蚀剂	172
§ 5.7 快速电镀	140	§ 1.3 缓蚀剂的选用原则	173
一、快速电镀的特点	140	一、腐蚀介质	173
二、快速电镀的应用范围	141	二、金属	174
§ 5.8 电铸	141	三、缓蚀剂的复配问题	174
一、电铸镍	142	四、缓蚀剂的毒性问题	174
二、电铸铜	143	§ 1.4 缓蚀剂的测试和研究	174
§ 6 化学转化涂层	143	一、实验室测试方法 I——失重法	175
§ 6.1 铝及铝合金的阳极氧化	144	二、实验室测试方法 II——电化学法	175
一、阳极氧化膜的形成机理	144	三、实验室腐蚀测试方法的标准化问题	177
二、阳极氧化膜的组织结构	144	四、现场测试和监控	177
三、阳极氧化膜的性能	145	五、缓蚀剂的研究、开发和展望	177
四、阳极氧化方法	145	六、缓蚀剂专业会议和专门文献	171
五、氧化膜的染色	148	§ 2 酸性介质缓蚀剂	178
六、封闭处理	149	§ 2.1 概述	178
§ 6.2 磷酸盐膜	149	§ 2.2 酸性介质的类型、特性及使用场合	178
一、磷酸盐膜的形成机理	149	一、硫酸	178
二、磷酸盐膜的组分与结构	150	二、盐酸	179
三、磷酸盐膜的性能	152	三、硝酸	180
四、影响磷酸盐膜质量的主要因素	152	四、氢氟酸	180
五、磷酸盐处理工艺	154	五、氨基磺酸	180
§ 6.3 铬酸盐膜	156	六、磷酸	180
一、铬酸盐膜的形成过程	157		

七、柠檬酸	180
八、甲酸	181
九、乙酸	181
十、环烷酸	181
十一、硫化氢	181
十二、碳酸	182
§ 2.3 酸性介质缓蚀剂	182
一、硫酸溶液中的缓蚀剂	182
二、盐酸溶液中的缓蚀剂	183
三、硝酸溶液中的缓蚀剂	184
四、氢氟酸溶液中的缓蚀剂	184
五、氨基磺酸溶液中的缓蚀剂	185
六、磷酸溶液中的缓蚀剂	186
七、柠檬酸溶液中的缓蚀剂	186
八、甲酸、乙酸溶液中的缓蚀剂	186
九、硫化氢用的缓蚀剂	186
十、石油工业用缓蚀剂	186
§ 2.4 各种工艺条件对腐蚀及缓蚀剂缓蚀效果的影响	187
一、金属	187
二、酸的种类	187
三、酸的浓度	187
四、缓蚀剂浓度	187
五、温度	187
六、介质流动速度	188
七、三价铁离子 (Fe^{3+})	188
§ 2.5 缓蚀剂的选择及应用实例	189
§ 3 中性介质缓蚀剂	196
§ 3.1 中性介质的类型和应用场合	196
§ 3.2 水质稳定剂	196
一、使用循环冷却水的意义	196
二、循环冷却水系统产生的危害	196
三、水处理的意义——水质稳定剂的应用	198
四、水质稳定剂的主要类型及分子结构	198
五、几种主要缓蚀剂的缓蚀效果与缓蚀机理	198
六、几种常用阻垢剂的阻垢效果与作用机理	204
七、几种常用杀菌灭藻剂的效果与作用机理	206
八、水质分析与水质类型的判断	209
九、缓蚀、阻垢效果的评价	210
十、冷却水处理工艺过程与应用配方示例	211
§ 3.3 其他中性介质缓蚀剂	214
§ 4 大气腐蚀缓蚀剂	216
§ 4.1 大气腐蚀的特征及影响因素	216
§ 4.2 大气腐蚀的形成和腐蚀产物	217
§ 4.3 防止大气腐蚀的缓蚀剂	218
一、作用机理	218
二、大气缓蚀剂的分类	219
§ 4.4 大气缓蚀剂应用示例	229
参考文献	232

第五章 防腐蚀油漆及涂料	234
§ 1 概论	234
§ 1.1 定义及基本概念	234
§ 1.2 涂装目的和涂料的构成	234
§ 1.3 涂装系	235
§ 2 防腐蚀涂料	235
§ 2.1 概述	235
§ 2.2 防锈颜料与防锈底漆	236
一、分类及临界颜料体积浓度	236
二、铁红	237
三、云母氧化铁 (MIO)	237
四、片状铝粉	237
五、红丹 (Red Lead)	238
六、铅酸钙 ($2CaO \cdot 2PbO_2$)	238
七、氰化铅 ($PbCN_2$)	238
八、碱式硫酸铅 ($PbO \cdot 2PbSO_4$)	239
九、碱式铬酸锌	239
十、四盐基铬酸锌	239
十一、碱式硅铬酸铅	239
十二、偏硼酸钡 ($BaB_2O_4 \cdot H_2O$)	240
十三、金属锌粉——富锌底漆	240
十四、其他	240
§ 2.3 用于保护性涂料的漆料	242
一、油和油性树脂	242
二、酚醛树脂	242
三、醇酸树脂	243
四、乙烯树脂	244
五、环氧树脂	245
六、聚氨酯树脂	248
七、聚酯树脂	250
八、丙烯酸树脂	251
九、氯化橡胶漆	251
十、有机硅树脂	254
十一、氟树脂	254
§ 2.4 防蚀涂料的新发展	254
一、厚膜涂料	254
二、粉末涂料	255
三、高固体份涂料	256
四、水性漆	257
五、其他	258
§ 3 防腐蚀涂装	258
§ 3.1 涂装前的表面处理	258
§ 3.2 钢铁材料的前处理	260
一、喷射除锈	260
二、使用工具的表面处理	261
三、酸洗	262
四、脱脂	262
五、化学处理	262
六、磷化底漆	262

§ 3.3 非铁金属材料的表面处理	262	第六章 耐腐蚀非金属材料	313
一、 锌	262	§ 1 概论	313
二、 铝	263	§ 2 塑料	314
三、 铜	265	§ 2.1 聚氯乙烯	314
§ 3.4 涂装方法	265	一、 聚氯乙烯的物理性能	314
一、 刷涂 (brush coating)	265	二、 聚氯乙烯的力学性能	315
二、 喷涂 (Air Spray)	266	三、 聚氯乙烯的耐腐蚀性能	315
三、 高压无气喷涂 (Airless Spray)	268	§ 2.2 聚丙烯	324
四、 静电喷涂 (Electrostatic Spraying)	270	一、 聚丙烯的物理性能	324
五、 电泳涂装 (Electrodeposition)	272	二、 聚丙烯的力学性能	325
六、 其他涂装方法	274	三、 聚丙烯的耐腐蚀性能	325
七、 涂料干燥	276	§ 2.3 聚乙烯	331
§ 4 漆膜的防腐蚀评价	276	§ 2.4 聚四氟乙烯	331
§ 4.1 影响保护作用的漆膜的物理化学特 性	277	§ 2.5 聚三氟氯乙烯	333
一、 附着力	277	§ 2.6 聚全氟乙丙烯	335
二、 漆膜的浸渗特性	278	§ 2.7 聚苯硫醚	336
三、 某些力学性质	280	§ 2.8 氯化聚醚	338
四、 涂层耐久性	281	§ 2.9 酚醛树脂	340
§ 4.2 漆膜的曝露试验	283	一、 酚醛树脂的固化	340
一、 天然曝露试验	283	二、 固化后酚醛树脂的性能	340
二、 人工加速老化试验	285	§ 2.10 环氧树脂	341
三、 加速腐蚀试验	286	一、 环氧树脂的固化剂	342
§ 4.3 电化学腐蚀试验	287	二、 环氧树脂的性能	342
一、 电位测定	287	§ 2.11 不饱和聚酯	345
二、 漆膜阻抗的测定	288	一、 辅助剂	345
三、 漆膜的 CRM 仪器测定	290	二、 不饱和聚酯的耐腐蚀性能	346
四、 其他	290	§ 2.12 呋喃树脂	347
§ 5 防腐蚀涂装实例	290	§ 3 橡胶	348
§ 5.1 钢结构	290	§ 3.1 天然橡胶	348
一、 桥梁	290	一、 天然橡胶板的配方	349
二、 海洋钢结构	292	二、 三种橡胶板的选用	350
三、 工业设备	294	三、 使用条件	351
§ 5.2 铁道车辆	295	§ 3.2 合成橡胶	351
一、 结构设计方面	295	一、 氯丁橡胶	351
二、 材质方面	295	二、 丁苯橡胶	351
三、 制造和修理工艺	295	三、 丁腈橡胶	352
四、 涂料和涂装工艺	296	四、 丁基橡胶	354
§ 5.3 船舶	298	五、 氯磺化聚乙烯橡胶	355
§ 5.4 汽车	302	六、 氟橡胶	356
§ 5.5 机械类	306	§ 4 玻璃钢	358
一、 机床	206	§ 4.1 玻璃钢的性能特征	358
二、 工矿机械	307	一、 轻质高强	358
三、 精密机器	309	二、 耐腐蚀性能好	358
§ 5.6 其他	309	三、 电绝缘性能优良	358
一、 集装箱	309	四、 具有一定的耐热性能	359
二、 埋设管道	310	五、 优良的工艺性能	359
三、 贮罐	311	§ 4.2 影响玻璃钢耐腐蚀性能的因素	359
参考文献	312	一、 合成树脂的种类及固化度	359

二、玻璃纤维及其制品	363	一、硫胶合剂的性能	400
三、玻璃钢的结构	364	二、硫胶合剂的原料和配比	400
§ 4.3 耐腐蚀玻璃钢设备、装置破坏原因分析	364	三、硫胶合剂的熔制	401
§ 4.4 玻璃钢的耐腐蚀性能	367	四、施工中注意事项	401
§ 4.5 玻璃钢的选用	371	§ 7.3 酚醛树脂胶合剂	401
§ 4.6 玻璃钢应用实例	371	一、酚醛胶合剂的性能	403
§ 5 耐腐蚀硅酸盐材料	371	二、酚醛胶合剂的原材料	403
§ 5.1 天然耐腐蚀硅酸盐材料	372	三、酚醛胶合剂的配制	403
一、花岗岩	372	§ 7.4 改性酚醛胶合剂	403
二、石棉	372	一、环氧改性酚醛胶合剂	405
§ 5.2 化工陶瓷	374	二、糠醇改性酚醛胶合剂	405
一、化工陶瓷的组成与分类	374	三、酚醛-有机硅、酚醛-环氧-有机硅胶合剂	406
二、化工陶瓷性能	374	§ 7.5 呋喃树脂胶合剂	406
三、化工陶瓷设备及管道适用范围	375	一、糠醇胶合剂	406
四、化工陶瓷设备的安装与使用	375	二、糠酮胶合剂	407
五、高铝陶瓷和氮化硅陶瓷	376	三、糠酮甲醛胶合剂	408
§ 5.3 玻璃	377	四、呋喃系胶合剂应用实例	410
一、化工玻璃的种类及组成	377	§ 8 材料的选择与测试方法	410
二、化工玻璃的性能	377	§ 8.1 材料选择程序	410
三、玻璃衬里(钢衬玻璃)	378	一、使用介质条件的调查研究	410
四、玻璃管道的使用	379	二、初步确定可用材料的种类	410
§ 5.4 化工搪瓷	379	三、耐腐蚀试验	410
一、化工搪瓷设备的性能	380	四、模拟及挂片试验	411
二、化工搪瓷设备的使用范围	381	五、耐水蒸汽渗透扩散试验	411
三、化工搪瓷设备的维护与修补	381	六、其他	411
四、搪瓷设备应用实例	382	七、综合判断	411
§ 6 不透性石墨	383	§ 8.2 耐腐蚀试验测试方法	411
§ 6.1 浸渍类不透性石墨	384	一、静态浸渍法	411
一、酚醛树脂浸渍石墨	384	二、动态浸渍法	412
二、呋喃树脂浸渍石墨	385	参考文献	414
三、水玻璃浸渍石墨	387	第七章 防蚀设计	415
§ 6.2 压型不透性石墨	388	§ 1 防蚀设计的意义及主要内容	415
一、酚醛压型不透性石墨性能	388	§ 2 防蚀设计前应考虑的腐蚀环境和因素	416
二、制造过程简介	388	§ 3 选材	417
三、高温炭化管	391	§ 3.1 材料性能的鉴别与评定	417
§ 6.3 浇注类不透性石墨	392	一、金属材料性能	417
一、浇注类不透性石墨的物理及力学性能	392	二、非金属材料性能	417
二、制造工艺过程简介	392	§ 3.2 选材顺序	418
§ 7 耐腐蚀胶合剂	393	§ 3.3 选材时应考虑的因素	418
§ 7.1 水玻璃胶合剂	394	§ 4 防蚀结构设计	425
一、水玻璃胶合剂的性能	394	§ 4.1 结构件形状应尽可能简单和合理	426
二、水玻璃胶合剂的原料	394	§ 4.2 防止残余水分和冷凝液的腐蚀	426
三、水玻璃胶合剂的配制	396	§ 4.3 防止电偶腐蚀	428
四、水玻璃胶合剂的硬化和酸化处理	397	§ 4.4 防止缝隙腐蚀	433
五、改性水玻璃胶合剂	397	§ 4.5 防止应力腐蚀断裂	434
六、水玻璃胶合剂应用实例	399	§ 4.6 防止环境差异引起的腐蚀	436
§ 7.2 硫胶合剂	399	§ 4.7 防止液体流动形式(湍流、涡流等)	

造成的腐蚀	436
§ 4.8 设备和构筑物的位置合理性	438
§ 4.9 非金属材料的结构设计	439
§ 5 防蚀强度设计	440
§ 6 其他防蚀设计	440
§ 7 防蚀管理	441
参考文献	441
第八章 金属腐蚀失效分析	442
§ 1 概论	442
§ 1.1 定义	442
§ 1.2 腐蚀失效分析的目的和意义	442
一、腐蚀失效造成了巨大的经济损失	442
二、腐蚀带来了许多灾难性的事故	443
三、腐蚀耗竭了有限的资源和宝贵的能源	443
四、腐蚀毒化、污染了环境	443
§ 2 金属腐蚀失效的类型及其特征	444
§ 2.1 金属腐蚀失效的类型及其在失效中所占的比例	444
§ 2.2 腐蚀环境与腐蚀失效类型间的关系	445
§ 2.3 工程中常见的金属腐蚀失效类型的特征及其产生的条件	446
§ 2.4 影响金属腐蚀失效破坏的主要因素	448
一、环境因素	448
二、材质因素	448
三、设备的结构设计及加工制造因素	448
四、操作因素	448
五、储运包装因素	448
六、偶然因素	449
七、管理因素	449
§ 3 金属腐蚀失效分析的原则、程序和步骤	449
§ 3.1 金属腐蚀失效分析的基本原则	449
一、对体系进行完整的分析研究	449
二、调查研究的原则	449
三、分析验证的原则	450
§ 3.2 腐蚀失效分析的程序和步骤	450
一、调查阶段	450
二、腐蚀事故残骸的查找与拼凑	451
三、对调查的材料进行综合分析研究、制订腐蚀失效事故的分析研究方案	451
四、实验室的分析研究阶段	451
五、模拟验证阶段	452
六、总结讨论	453
七、写出腐蚀失效分析报告	453
§ 4 金属腐蚀失效分析的基本方法	453
§ 4.1 试样	453
一、取样的原则	453
二、必须保持试样的原始状态和腐蚀产物	453
三、正确的取样方法	454
四、断口的保护和清洗	454
五、试样的保存	454
§ 4.2 宏观分析方法及其在腐蚀失效分析中的应用	454
§ 4.3 化学分析方法在腐蚀失效分析中的应用	455
一、材质成份的分析与复验	455
二、对产生腐蚀破坏的环境介质进行化学组成的分析	455
三、腐蚀产物的成份分析	455
§ 4.4 力学性能试验方法在腐蚀失效分析中的应用	456
§ 4.5 无损检验方法在腐蚀失效分析中的应用	457
一、射线探伤法	457
二、电磁探伤法	457
三、声试验探伤法	457
四、渗透探伤法	457
五、热试探伤法	453
§ 4.6 光学显微分析技术在腐蚀失效分析中的应用	453
§ 4.7 电子光学显微分析技术在腐蚀失效分析中的应用	462
一、透射电子显微镜技术	462
二、扫描电子显微镜技术	464
三、电子探针 X 射线显微分析技术	467
四、俄歇电子能谱分析技术	469
§ 5 金属材料断裂的断口分析	470
§ 5.1 断口的类型	470
一、按断裂的方式分类	470
二、按断裂的性质分类	470
三、按宏观断口的外貌及材料的冶金缺陷分类	471
§ 5.2 断口的宏观分析	471
一、拉伸断口的特征——断口三要素	471
二、冲击断口的宏观形貌	472
三、疲劳断口	473
四、应力腐蚀与氢脆断口	475
五、实际部件断口的宏观分析	476
§ 5.3 断口的微观分析	479
一、解理断口的微观特征	479
二、准解理断口的微观特征	481
三、韧窝断口的微观特征	482
四、疲劳断口的微观特征	483

五、晶间断裂断口的微观特征	485	一、热交换器的点腐蚀破坏	498
六、应力腐蚀断裂及氢脆断口的微观特征	485	二、法兰与密封圈接触产生的缝隙腐蚀	498
§ 6 腐蚀失效的实例分析	487	§ 6.3 晶间腐蚀破裂实例分析	499
§ 6.1 应力腐蚀断裂失效实例	487	§ 6.4 高温腐蚀破坏实例分析	500
一、不锈钢的应力腐蚀断裂实例	487	乙烯裂解炉炉管破坏分析	500
二、碳钢及低合金钢的应力腐蚀断裂实例	494	参考文献	501
§ 6.2 点腐蚀和缝隙腐蚀失效实例	498		

第一章

绪 论

§1 目的和意义

众所周知,金属腐蚀给国民经济造成了巨大的经济损失,甚至带来灾难性的事故,浪费了宝贵的资源与能源,而且污染了环境。但是专家们指出,如果采取确当的防腐蚀措施,有些腐蚀事故是可以避免的,在一定程度上,腐蚀是可以得到控制的,经济损失是可以减少的。据估计,如果将现有的防腐蚀技术在生产实践中推广应用,将有30~40%由腐蚀所造成的经济损失能够得到挽回。这个数字是相当可观的。以美国1975年的腐蚀经济损失700亿美元为例,倘使按30%计算,那么每年就可以节约210亿美元。由此可见,研究金属防腐蚀技术措施,推广防腐蚀新技术,确是一件十分重要的任务。

防止金属腐蚀或者说控制金属腐蚀,方法很多,但是,环境条件不同,采用的防腐蚀措施也不同,不能生搬硬套。因此,对防腐蚀技术的介绍,必须讲明应用的具体条件。从这一点出发,本手册的编写宗旨是尽量介绍一些现时行之有效的、比较成熟的防腐蚀技术和数据及其具体使用条件,供广大从事腐蚀与防护的科技工作者、设计人员参考选用。

§2 回顾与展望

应该说,人类差不多在使用金属材料的同时,就开始与腐蚀现象作斗争,也就是说从那时开始,人们就开始了防腐蚀技术的研究。我们的祖先在防腐蚀技术方面曾做出了卓越的贡献。早在公元前三世纪,我国已采用金汞齐鍍金术在金属表面上镀金以增加美观,同时达到防腐蚀的目的。近年来出土的春秋战国时期的武器,秦始皇时代的青铜剑和大量的箭镞,有的至今毫无锈蚀*,经初步鉴定,箭镞表面上有一层致密的黑色氧化层,分析表明,含铬约百分之二;而青铜并不含铬,很可能表面保护层是用含铬化合物人工氧化并经高温扩散制得的。这说明,早在两千多年前,就有可能在我国创造了与现代铬酸盐(或重铬酸盐)钝化处理相似的防腐蚀技术。可称为中国文明史中的一项奇迹。

从产生腐蚀反应的历程来看,如果把腐蚀性的环境与材料隔离开,就可能防止腐蚀过程的产生与发展。从这个意义来讲,表面涂(镀)层是一种防止腐蚀的良好措施。实践中,我国从远古就使用各类植物油漆(包括生漆)进行表面涂层以防止腐蚀,此法沿用至今。

由以上几例,不难看出,人们从古代开始就创造了许多防止或者控制腐蚀的技术。随着工业、农业与科学技术的发展,防腐蚀技术也不断地获得了新的进步。根据工业生产需要,发展了各类金属镀层,从比较经典的电镀、热浸镀,发展到扩散镀、金属喷镀(如等离子喷镀、磁控溅射等)、离子注入等新技术;从天然油漆涂层发展到各种有机和无机涂层。除了镀层、涂层防腐蚀技术之外;电化学保护、缓蚀作用等防腐蚀技术极为重要的组成部分,随着它

* 北京钢铁学院中国冶金简史编写小组编,《中国冶金简史》,科学出版社,1978年出版,p. 121。

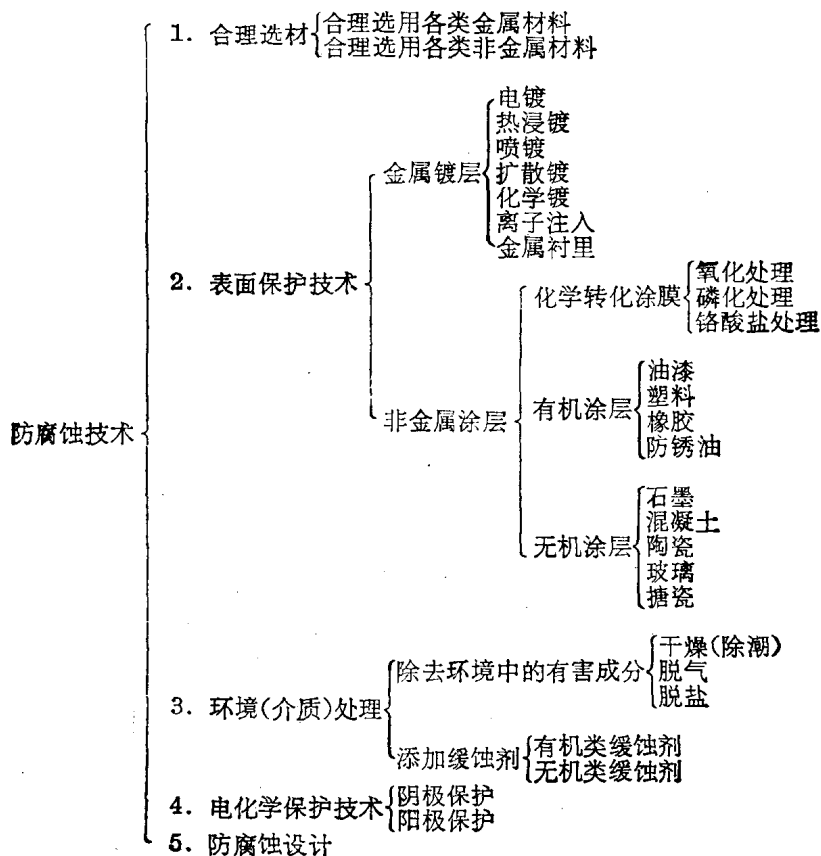
们的研究、开发与推广应用,已逐渐形成了防腐蚀技术这一非常重要的分支学科。

当前,世界各工业发达国家都对防腐蚀技术的研究、开发和推广应用寄予极大的关注。例如,美国政府曾就埋地管线的保护从法律上作了规定,制定了相关的法令:各类埋地管线必须进行保护和进行定期检查。如果埋地管线不加防腐蚀保护,就要承担法律责任。苏联也十分重视防腐蚀技术的研究与推广应用工作。为了解决金属腐蚀问题,在1981~1985年和到1990年的发展规划中,专门列出了一项金属防腐蚀技术的研究项目。为执行该项目,还成立了由国家科委、计委、建委及国家标准委员会领导的国家防腐蚀局。在欧洲委员会的基础技术研究发展计划中,防腐蚀技术的研究也列为专项研究内容。

我国自建国以来,防腐蚀技术也获得了一定的发展,许多防腐蚀技术在工农业生产中得到了推广应用。以缓蚀剂为例,我国已研制成了许多种锅炉酸洗缓蚀剂,油气田开发使用的缓蚀剂等,为我国的工业生产解决了许多问题。但是,也应看到,我国的防腐蚀工作尚处在一个无法规法令、无规范、未系列化与标准化的阶段,腐蚀问题尚未引起足够的重视。因此,防腐蚀技术的研究、开展与推广应用仍须继续努力,以引起各有关方面足够的重视。

§3 内容和任务

经过长期的实践,人们总结了许多与金属腐蚀作斗争的经验,找到了很多成功的防腐蚀措施,它们日趋完善,行之有效。当前,在国民经济中获得广泛应用的防腐蚀方法,归纳起来主要有以下几种:



以上都是经过长期实践比较成熟的防腐蚀方法。本书将按照上述内容进行阐述。鉴于有关合理选材的金属材料的耐蚀性部分已在本手册的姊妹卷“金属腐蚀手册”中作了较详细的介绍,故在此不再赘述。但非金属材料的耐蚀性及其合理选用在本手册中将进行详细介绍。此外,本手册中还增加了金属腐蚀失效分析一章,供广大读者参阅。

本手册的任务是向广大读者介绍各种防止或控制金属腐蚀的技术措施及其基本原理、具体数据和应用范围,以期对广大腐蚀与防护科技工作者、有关设计人员及设备维修人员有所裨益。

(朱日彰)

第二章

电化学保护原理及应用

§1 电化学保护

§ 1.1 分类

电化学保护分两类:

1. 阴极保护

在金属表面上通入足够的阴极电流,使阳极溶解速度减小,从而防止腐蚀。这种方法又分为牺牲阳极保护和外加电流阴极保护。

2. 阳极保护

在金属表面上通入足够的阳极电流,使金属电位达到并保持在钝化区内,从而防止腐蚀。

§ 1.2 应用范围

1824年 Davy 提出了阴极保护方法,用锌牺牲阳极来防止固定木船铜包皮的铁螺钉的腐蚀。但是这种方法到本世纪 30 年代才在工业上开始应用。目前阴极保护方法主要用于下列介质中:

- (1) 淡水及海水中 防止码头、船舶、平台、闸门、冷却设备等的腐蚀;
- (2) 碱及盐类溶液中 防止贮槽、蒸发罐、熬碱锅等的腐蚀;
- (3) 土壤及海泥中 防止管线及电缆等的腐蚀。

阴极保护方法还可防止某些金属的局部腐蚀,如点蚀、应力腐蚀断裂、腐蚀疲劳等。

阴极保护方法较为简便,相当经济,效果良好,但不适用于酸性介质及非电解质中。

阳极保护方法的发现和应用都较晚。1954年,Eddeleanu 在实验室中证明了恒电位仪可以控制腐蚀。1958年阳极保护方法首次在工业上应用。目前这种方法主要用于下列介质中:

- (1) 硫酸、磷酸及有机酸中 防止贮槽、加热器、三氧化硫发生器的腐蚀;
- (2) 液体肥料中 防止贮槽、碳化塔等的腐蚀;
- (3) 纸浆中 防止蒸煮锅等的腐蚀。

阳极保护方法是效率较高又很经济的防腐蚀技术,特别适用于强氧化性介质中。

§ 2 阴极保护原理

§ 2.1 电化学腐蚀的概念

一、电极电位

金属在电解液中,在界面上产生的电位差称为电极电位。