

〔美〕 M.G.方坦纳 著
N.D.格林

腐蚀工程

第二版

化学工业出版社

TG17

13

3

腐 蚀 工 程

第 二 版

〔美〕 M. G. 方坦纳 著
N. D. 格林
左 景 伊 译

化 学 工 业 出 版 社

A 924697



内 容 提 要

本书总结了作者在42年中讲授腐蚀课程及从事腐蚀研究与防腐蚀工作的实际经验,全书从金属腐蚀原理出发,介绍了八种腐蚀形态,腐蚀试验的分类、目的及方法;论述了金属材料和非金属材料在大多数环境中的耐腐蚀性能、机械性能和物理性能。分析了腐蚀的原因,阐述了防护方法。还收集了一些有关新的耐腐蚀材料的资料。本书在第一版的基础上又增加了一些最新资料。

本书可供大专院校腐蚀和材料专业师生,国民经济各部门从事腐蚀及防腐设计、研究和施工的工程技术人员以及工厂维修人员参考。

全书由左景伊同志翻译,由北京钢铁学院张文奇等同志校阅。

M. G. Fontana N. D. Greene

Corrosion Engineering

Second Edition

McGraw-Hill Book Company 1978.

腐 蚀 工 程

第 二 版

左景伊 译

*

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张 $14^{1/2}$ 字数394印数1—7,500

1982年8月北京第1版1982年8月北京第1次印刷

统一书号15063·3376定价1.80元

序

在本书1967年的第一版中，我们处理腐蚀题材采取的不是那种从材料入手的常规办法。本书的一项独特之处是，不是根据材料，而是根据腐蚀介质或环境来介绍腐蚀资料。每一项腐蚀问题总是涉及一种特定的环境。这种方法使得为一项腐蚀问题（如有关硫酸）选材时，可以不必去查找许多章节。“等腐蚀区图”针对一定腐蚀介质的选材提供了一个快速查阅的工具。

从损失代价最大的观点考虑，对那些更重要的腐蚀环境提出了大量数据。这些腐蚀环境是酸、海水和大气。本书用大量篇幅阐述一些比较重要的题材，如腐蚀理论和形态。不过也强调了如丝状腐蚀和人体腐蚀这类题目，这是因为它们还不曾在别处广泛讨论过。由于篇幅所限，不可能提出完整的腐蚀数据，也不可能对腐蚀的各方面都进行透彻的讨论。

第一版介绍了工程和理论方面的内容、案例、基本原理和经典性的概念，这些都没有作大的变动。其理由是我们决定不按照修订版本的传统方法逐章补充，而是单独增加一章，即第12章，“截至1977年的最新资料”。由1967年以来又已取得了更多的腐蚀知识，因为我们并不打算对整个领域进行详细讨论，只在第12章中介绍了一些新的补充题材，它的顺序和第一版内容基本相同，还标明了参见的有关章节和图表序号，有时则标明所参见内容的页码。

在第12章中除了介绍这类最新资料外，还增补了几节新内容（第一版未介绍的题材），特别是在过去十年中已显示出重要意义的题材。这类题材包括煤的转化，污染控制，产品可靠性和新材料，如高纯铁素体不锈钢、金属化玻璃和复合材料。强调了质量控制和检测的重要性。在腐蚀率的表达式中首次包括了公制计量。搞实际工作的工程师将在许多年之内既要用公制，又要用英制，因此我们对两种制度都应熟悉。

我们打算在本书中提出一套完整的参考文献。不过，对那些

有兴趣深入研究某一特定问题的读者，还是提供了许多参考文献和其它补充读物。

本书的基础包括，在俄亥俄州立大学，伦色拉尔多科工程学院(Rensselaer Polytechnic Institute)，和康涅狄克大学42年来讲授腐蚀的基础课程和高级课程的经验，加上23年来在企业中从事腐蚀工程和腐蚀研究的经验。在大学任职期间我们曾积极地从事应用研究和基础研究，并在解决腐蚀问题方面担任工业的咨询工作。我们从前的学生中有许多人已成为出色的腐蚀工程师。

这本教材实际上包括了腐蚀工程和腐蚀科学的一切重要内容，包括贵金属，“稀有”金属，非金属，涂层，机械性能和腐蚀试验，同时也包括了现代理论。这种广泛的内容消除了过去腐蚀书籍中的一些缺点。本书可用于许多方面：它可用于大学课程，研究生课程，集中短训课程，工厂教育，自学，还可以作为工厂工程师和维修人员的有用的参考书。

冶金工程、材料工程、材料科学、化学工程、机械工程、化学、或其它物理科学或工程专业的教授们，可以用本教材开一门基础课，并不需要太多的基本知识，也不需要过多的准备。作为一门入门课程所需要的理论包括在第2、3、6章中，这也就是工程师（不包括专业腐蚀工程师）所需要的全部理论。理论经过了简化，并加上了实际应用，对于教师和学生都不需要大量的电化学和金属学的基础知识。书中还举出了一些例子来说明腐蚀问题的原因和防治方法。案例对工程教学是有用的。还介绍了材料的知识（包括机械性能），以使读者对材料获得一定的感性认识。

叙述近代理论的第9章和10章及第11章的一部分，适合于腐蚀高级班或长期班的第一期教材。这几章对专业腐蚀工程师很有用。贯穿这几章和前面的章节以及第12章，都强调了环境因素的重要意义。

原版中有几处小错误在再版中已经改正。

另外还有一本“题解”问题和解答单独小册子。

M. G. 方坦纳 N. D. 格林

（原序中的谢志和结束语从略）

目 录

序

第 1 章 导言	1
1-1 腐蚀的代价	1
1-2 腐蚀工程	2
1-3 腐蚀的定义	2
1-4 环境	2
1-5 腐蚀的损害	3
1-6 腐蚀的分类	5
第 2 章 腐蚀原理	7
2-1 导言	7
2-2 腐蚀率的表示方法	8
电化学概念	10
2-3 电化学反应	10
2-4 极化	14
2-5 钝化	16
环境影响	18
2-6 氧和氧化剂的影响	18
2-7 流速的影响	19
2-8 温度的影响	20
2-9 腐蚀介质浓度的影响	20
2-10 电偶效应	21
冶金因素的影响	22
2-11 金属的性质	22
2-12 环形腐蚀	25
第 3 章 腐蚀的八种形态	26
均匀腐蚀	26
电偶腐蚀或双金属腐蚀	27

3-1	EMF (电动序) 和电偶序	28
3-2	环境的影响	32
3-3	距离的影响	33
3-4	面积的影响	33
3-5	防护	35
3-6	有益的用途	36
	缝隙腐蚀	37
3-7	环境因素	37
3-8	机理	39
3-9	防止缝隙腐蚀	41
3-10	丝状腐蚀	42
	孔蚀	46
3-11	蚀孔的形状和生长	46
3-12	孔蚀的自催化作用	48
3-13	溶液成分	51
3-14	流速	52
3-15	冶金因素	52
3-16	孔蚀破坏的评定	54
3-17	防护	54
	晶间腐蚀	55
3-18	奥氏体不锈钢	55
3-19	焊缝腐蚀	57
3-20	奥氏体不锈钢晶间腐蚀的控制	59
3-21	刀线腐蚀	61
3-22	其它合金的晶间腐蚀	63
	选择性浸出	64
3-23	脱锌: 特征	64
3-24	脱锌: 机理	66
3-25	脱锌: 防止	66
3-26	石墨化	67
3-27	其它合金体系	67
3-28	高温	67

磨损腐蚀	68
3-29 表面膜	69
3-30 流速	72
3-31 湍流	74
3-32 冲击	74
3-33 电偶效应	75
3-34 金属或合金的性质	76
3-35 防止磨损腐蚀	78
3-36 空泡腐蚀	79
3-37 摩振腐蚀	81
应力腐蚀	85
3-38 裂纹形貌	88
3-39 应力影响	89
3-40 破裂时间	89
3-41 环境因素	92
3-42 冶金因素	96
3-43 机理	98
3-44 防护方法	99
3-45 腐蚀疲劳	100
氢损伤	102
3-46 特征	102
3-47 环境因素	103
3-48 氢鼓泡	103
3-49 氢脆	104
3-50 防护	106
第4章 腐蚀试验	109
4-1 导言	109
4-2 分类	109
4-3 目的	111
4-4 材料和试样	111
4-5 表面制备	112
4-6 量尺寸和称重量	114

4-7	暴露技术	114
4-8	试验周期	117
4-9	计划-间隔试验	118
4-10	充气作用	121
4-11	暴露后试样的清洗	122
4-12	温度	124
4-13	腐蚀率的标准表示法	126
4-14	电偶腐蚀	126
4-15	高温和高压	127
4-16	磨损腐蚀	129
4-17	缝隙腐蚀	132
4-18	晶间腐蚀	134
4-19	不锈钢的Huey试验	135
4-20	不锈钢的Streicher试验	135
4-21	Warren试验	135
4-22	孔蚀	136
4-23	应力腐蚀	137
4-24	高温气体	139
4-25	金属的其它试验方法	139
4-26	涂料试验	143
4-27	国际镍公司 (Inco) 试验站	145
4-28	数据的表达和归纳	146
4-29	腐蚀率列线图解法	147
4-30	结果的解释	149
第5章 材料		150
5-1	机械性能	150
5-2	其它性能	150
金属和合金		151
5-3	铸铁	151
5-4	高硅铸铁	152
5-5	其它合金铸铁	153
5-6	碳钢和铁	154

5-7	低合金钢	154
5-8	不锈钢	155
5-9	铝和铝合金	162
5-10	镁和镁合金	165
5-11	铅和铅合金	166
5-12	铜和铜合金	166
5-13	镍和镍合金	167
5-14	锌和锌合金	170
5-15	锡和镀锡铁皮	170
5-16	镉	171
5-17	钛及钛合金	171
5-18	难熔金属	172
5-19	贵金属	174
	非金属	176
5-20	天然橡胶和合成橡胶	176
5-21	塑料	177
	热塑性塑料	179
5-22	氟碳塑料	179
5-23	聚丙烯酸类树脂	180
5-24	尼龙	180
5-25	氯化聚醚	182
5-26	聚乙烯	182
5-27	聚丙烯	182
5-28	聚苯乙烯	183
5-29	硬聚氯乙烯 (PVC)	183
5-30	乙烯基塑料	183
	热固性塑料	183
5-31	环氧塑料	183
5-32	酚醛塑料	183
5-33	聚酯	184
5-34	有机硅	185
5-35	尿素塑料	185

5-36 层压和增强塑料	185
其它非金属	185
5-37 陶瓷	185
5-38 碳和石墨	186
5-39 木材	187
第 6 章 腐蚀的防止	188
选材	188
6-1 金属和合金	188
6-2 金属纯度	189
6-3 非金属材料	190
改变环境	190
6-4 改变介质状态	190
6-5 缓蚀剂	192
设计	198
6-6 壁厚	199
6-7 设计规划	199
阴极保护和阳极保护	200
6-8 阴极保护	200
6-9 阳极保护	206
6-10 阳极保护和阴极保护的比较	207
涂层	209
6-11 金属涂层和其它无机涂层	209
6-12 有机涂层	212
经济	216
6-13 经济考虑	216
第 7 章 无机酸	219
硫酸	219
7-1 钢	219
7-2 铸铁	220
7-3 化学铅	223
7-4 高硅铸铁	224
7-5 Durimet20 合金	225

7-6	镍钼和镍钼铬合金	225
7-7	综合等腐蚀区图	228
7-8	常用的不锈钢	229
7-9	蒙耐尔合金、镍、因考耐尔合金和镍铸铁	229
7-10	铜和铜合金	229
7-11	其它金属和合金	230
7-12	腐蚀总图	231
7-13	常温设备	234
7-14	硫酸工厂设备	234
7-15	非金属材料	237
	硝酸	238
7-16	不锈钢	239
7-17	第1类材料	239
7-18	第2类材料	243
7-19	第3类材料	247
7-20	混酸	247
	盐酸	248
7-21	第1类金属和合金	249
7-22	第2类金属和合金	249
7-23	第3类金属和合金	251
7-24	充气作用和氧化剂	252
7-25	非金属材料	253
7-26	氯化氢和氯	253
	氢氟酸	253
7-27	氢氟酸水溶液	254
7-28	无水氢氟酸	255
7-29	氟	256
	磷酸	259
7-30	结构材料	259
第8章 其它环境		260
8-1	有机酸	260
8-2	碱	261

8-3	大气腐蚀	262
8-4	海水	266
8-5	淡水	268
8-6	高纯水	271
8-7	土壤	272
8-8	宇宙空间	273
8-9	石油工业	275
8-10	生物腐蚀	280
8-11	人体	284
8-12	液态金属和熔盐	287

第 9 章 近代理论——原理294

9-1	导言	294
	热力学	294
9-2	自由能	294
9-3	电池电位和EMF序 (电动序)	295
9-4	热力学对腐蚀的应用	299
	电极过程动力学	301
9-5	交换电流密度	302
9-6	活化极化	305
9-7	浓差极化	306
9-8	混合极化	307
9-9	混合电位理论	309
9-10	混合电极	309
9-11	钝化	315

第 10 章 近代理论——应用321

10-1	导言	321
	预测腐蚀行为	321
10-2	氧化剂的影响	321
10-3	流速影响	323
10-4	电偶合	325
10-5	合金的评价	330
	防止腐蚀	333

10-6	阳极保护	333
10-7	贵金属合金化	335
	腐蚀率测定	337
10-8	塔菲尔线外推法	337
10-9	线性极化	339
第11章	高温下的金属-气体反应	342
11-1	导言	342
	机理和动力学	342
11-2	Pilling-Bedworth比值	342
11-3	氧化的电化学和形态学	343
11-4	氧化物缺陷结构	347
11-5	氧化动力学	349
11-6	合金化的影响	352
11-7	灾难性氧化	354
11-8	内氧化	355
	高温材料	356
11-9	机械性能	356
11-10	抗氧化性	357
	其它金属-气体反应	365
11-11	脱碳和氢腐蚀	365
11-12	硫化氢和含硫气体	369
第12章	截至1977年的最新资料	371
12-1	代价和定义	371
12-2	检查的重要性	371
12-3	腐蚀率的表示方法	372
12-4	缝隙腐蚀	374
12-5	奥氏体不锈钢铸件的表面渗碳	376
12-6	对不锈钢铸件的未来要求	378
12-7	选择性浸出和石墨化	380
12-8	摩振磨蚀	380
12-9	应力腐蚀	381
12-10	腐蚀疲劳	384

12-11	体内腐蚀	384
12-12	高纯铁素体不锈钢	387
12-13	合金成分	388
12-14	玻璃	388
12-15	金属玻璃	389
12-16	复合金属	392
12-17	塑料和弹性体(橡胶)的腐蚀	395
12-18	塑料和弹性体(橡胶)	397
12-19	缓蚀剂	402
12-20	阴极保护	402
12-21	阳极保护	405
12-22	有机涂层	405
12-23	换热器	405
12-24	腐蚀控制标准	406
12-25	经济	408
12-26	污染控制	411
12-27	污水和工厂废料处理	418
12-28	煤的转化	419
12-29	卤素对金属的腐蚀	425
12-30	有机溶剂和有机酸的腐蚀	430
12-31	海水	431
12-32	宇宙空间	431
12-33	生物腐蚀	431
12-34	人体	431
12-35	线性极化	439
12-36	高温含硫化合物对金属的腐蚀	441
12-37	合金的热腐蚀	445
12-38	燃气轮机材料	448
12-39	产品可靠性	449
12-40	未来展望	449
12-41	参考文献	450

第 1 章 导 言

1-1 腐蚀的代价 美国每年因腐蚀损失的费用和防腐蚀的费用估计为80亿美元^①。当我们考虑到，所有使用金属和其它材料的地方都会发生不同程度的腐蚀时，这笔庞大的损耗也就不足为奇了。举例来说，某厂用涂料防止钢生锈每年就要花费二百万美元，又如一家大化工厂，虽然腐蚀条件还不算特别严重，但每年花在硫酸车间的腐蚀维修费就达四十万美元。一家炼油厂采用了一项新流程，只运转16个星期，就发生了严重腐蚀问题；有些部件腐蚀掉了 1/8 英寸的厚度。

单是汽车燃油系统的腐蚀损失每年就达100万美元。汽车的散热器损失约5200万美元。汽车排气系统的腐蚀损失估计为 5 亿美元。每年大约有三百万台家用热水器需要更换。

实际上，假若没有腐蚀，我们的经济面貌会大大改变。例如，汽车、船只、地下管道和家庭用具都不需要涂层了。不锈钢工业将无存在的必要，而铜也许只会用于电器。大多数金属设备和消费产品将用钢或铸铁制造。然而腐蚀是到处都有——家庭内外、路上、海里、工厂里以及宇宙飞船内。

虽然腐蚀不可避免，但其损失是可以大大减少的。例如用一个低廉的镁阳极就能使家用热水槽的寿命延长一倍。洗掉汽车由于在道路上行驶时所沾附的防水盐也是有好处的。正确选材和良好设计会使腐蚀损失减小。一个好的涂料维修方案所节约的价值超过成本费用许多倍。这就是腐蚀工程师应占据的领域和发挥作用的地方——他的主要作用就是战胜腐蚀。

① 根据美国国会委托国家标准局调查，1975年腐蚀和防腐蚀费用为 700 亿美元。

——译注

除了直接的经济损失外，腐蚀的另一个严重问题是必将导致自然资源的耗损。例如，钢是由铁矿石炼制的，而美国国内供应能直接熔炼的高品位铁矿石的量已减少了。另一个重要因素关系到世界金属资源的供应。许多国家的迅速工业化意味着对金属资源的竞争和价格都将增加。美国已经不再是矿产资源的主要消费者了。

1-2 腐蚀工程 腐蚀工程是通过运用科学和技术，经济而又安全地防止或控制腐蚀的危害。

腐蚀工程师为了圆满完成任务，他必须熟悉腐蚀的理论和实践；材料的化学、冶金、物理和机械性能；腐蚀试验；腐蚀环境的性质；材料的生产供应和加工情况；以及有关的设计知识。他还必须具备工程师的一般才能——善于处理人与人之间的关系，有整体观念，具有思考和分析能力，理解安全的重要意义，有常识，具备组织能力，而最重要的是有坚实的经济观念。腐蚀工程师在解决腐蚀问题时，必须选择最经济的方法。经济有一个定义也就是“没有免费的午餐”。

只有很少的工程师受过正式的腐蚀教育。积极从事本领域工作的大多数人员具有化学、电学、或冶金学的基础知识。腐蚀工作人员还有另外一些职称：腐蚀专家或顾问、材料工程师和维修工艺师。

1-3 腐蚀的定义 腐蚀可以从几方面下定义：（1）由于材料与环境反应而引起的材料的破坏或变质；（2）除了单纯机械破坏以外的材料的一切破坏；（3）冶金的逆过程。定义（1）和（2）更适合于本书目的，因为我们必须考虑陶瓷、塑料、橡胶和其它非金属材料。例如，涂料和橡胶由于阳光或化学物质引起的变质，炼钢炉衬里的熔化以及一种金属被另一种熔融金属侵蚀（液态金属腐蚀），这些都属于腐蚀。也有人坚持认为腐蚀局限于金属，但定义更广泛些为佳。

定义（3）可由图1-1说明。冶金主要是指从矿石中提取金属以及将金属精炼或合金化以供应用。多数铁矿石含有铁的氧化物，而钢被水和氧腐蚀生成水合氧化铁。生锈这个词是指钢和铁的腐蚀，不过许多别的金属腐蚀时也产生它们的氧化物。

1-4 环境 实际上所有环境都有一定程度的腐蚀性。例如：空