

研究方法·测量技术·报告
联邦德国DECHEMA腐蚀实验教程增订本

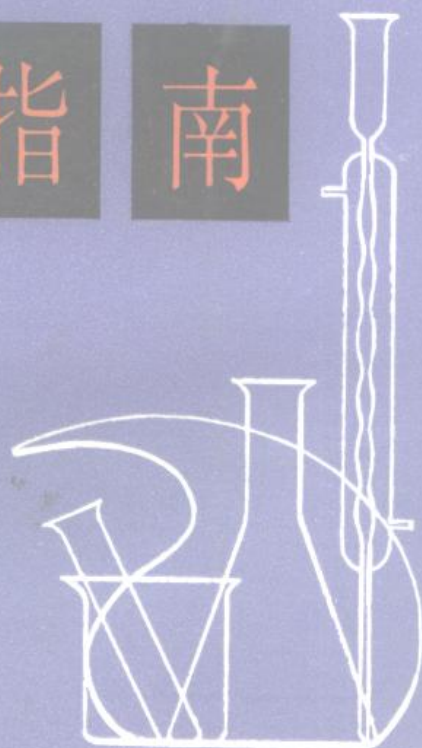
腐 蚀

实 验

指 南

E·海 兹
(联邦德国) R·亨克豪斯
A·拉 默尔

化学工业出版社



腐蚀实验指南

研究方法·测量技术·报告

联邦德国DECHEMA腐蚀实验教程增订本

〔联邦德国〕 E·海 兹 R·亨克豪斯
A·拉默尔

中国科学院金属腐蚀与防护研究所
翻译组译

化学工业出版社

内 容 提 要

本书是德国化工装备、化工技术与生物技术协会 (DECHEMA) 研究所所长长期从事腐蚀教育的结晶。书中深入浅出地介绍腐蚀科学基本原理, 着重讲述腐蚀科学的许多实验方法。所设计的实验力求体现相应的德国工业标准, 实验的内容则多是由实践中总结出的实例, 有助于读者理论联系实际地掌握实验方法的科学背景和参照本书自行设计实验或开展腐蚀检验研究工作。实验结果和所提问题的解释等均放在附录中。这样, 就为那些欲在实验中掌握这些实验的读者提供了对照检查所获实验结果的可能性。书中列出了大量参考文献, 这样可使腐蚀实验工作者能根据学到的腐蚀科学知识, 并参照合适的标准和规范开展研究工作和日常检验工作。

本书可供大专院校有关材料和腐蚀专业师生教学使用, 也可供各部门有关专业的研究工作者或检验工作者参考。

该书各章节及其相应的例题由下述同志译出: 曹楚南 (1.1~1.1.3, 第6章), 吴维崑 (1.2~1.2.2.2), 第5章, 第8章及其余部分), 杜元龙 (1.2.3~1.2.3.6), 李志强 (1.2.4~1.2.5.5), 骆继勋 (1.2.6), 李有柯 (第2章), 毕敬和陈良爽 (第3章), 李铁藩 (第4章) 和陈拱瑞 (第7章)。

写在译本的前面

本书是联邦德国化工装备、化工技术与生物技术协会 (DECHEMA) 研究所, 为工业部门和科研单位从事腐蚀工程与研究工作的工程技术人员的继续教育所编写的一本教材, 同时也兼顾了大学本科高年级学生腐蚀专业课的需要。

本书内容深入浅出, 在介绍了腐蚀科学基本原理之后, 着重向读者讲述了腐蚀科学的许多重要实验方法, 并从实践中总结出若干实例, 因而有利于读者理论联系实际, 对实验方法的科学背景有更加深刻的了解。由于本书所设计的实验, 力求体现相应的德国工业标准, 所以它不仅使初学者得到严格的训练, 也可供有经验的研究工作者或检验工作者参考。因此, 这是一本内容丰富、立论严谨的实验指南。它不仅在联邦德国广泛得到应用, 在欧洲及北美也赢得了良好声誉。

早在1978年, 在DECHEMA研究所工作的Rahmel教授即率领一个代表团到沈阳金属所进行学术交流; 1984年9月再度率领代表团来华进行学术交流, 并将本书首版赠与金属腐蚀与防护研究所, 同时还慷慨应允翻译成中文出版, 介绍给中国同行。

本书由中国科学院金属腐蚀与防护研究所组织翻译, 其中包括曹楚南、吴维蚩、杜元龙、李志强、李有柯、陈良爽及李铁藩等同志; 参加翻译的还有骆继勋 (中国科学院沈阳分院)、毕敬 (中国科学院金属研究所) 及陈拱诗 (沈阳市科协) 等同

志。译稿由曹楚南和吴维岷终校定稿。在翻译过程中，刘天祥同志对译稿文字进行了加工，付出了辛勤劳动。

师昌绪

一九八七年六月于北京

中译版序

我们同中国腐蚀科学工作者的友好交往已有近十年的历史，开始于1979年9月10日至22日由中国科学院金属研究所在沈阳举办的那次暑期班。本书中讲述的许多实验便是那次讲习班课程的组成部分和为那次讲习班设计的。

中国的朋友和同行将本书译成了中文，这使我们感到十分高兴与荣幸。我们谨向参与翻译本书的中国同事们表示我们的谢意与赞许。我们还要特别感谢吴维安教授发起翻译本书。作为同事和朋友，他曾以访问学者的身份在我们的研究所工作过两年。对于他的为人和学识，我们都非常赞赏。

我们从事教育和再教育的实践经验使我们认识到，实验既是掌握理论的重要环节，又是将所掌握的知识应用于实际的桥梁。因此我们期望并祝愿本书中译版的问世将对中国的朋友和同行们的教学有所裨益。若本书起到抛砖引玉的作用，引出更有特色的实验方案，我们一定乐于将它们编入新的德文本中。

作者

一九八七年十月于法兰克福

前 言

近些年来，腐蚀科学正日益迅速地发展成为一门独立的学科。该学科的范围主要涉及腐蚀的基本机制和防腐蚀技术。像其它新兴学科一样，腐蚀科学也是在若干传统学科，诸如金属学和物理化学，特别是其中的电化学等基础上发展起来的。今天材料科学、高分子化学和表面物理等学科又进一步有力地推动了它的发展。由于腐蚀科学具有多学科交叉的特点，所以要掌握这门学科，特别是要把它应用于实际并不是容易的事。

在德国，进行科学与技术的教育时是十分注重实验的。因为，每种理论模型最终都要经过实验的验证。反之，实验则可使理论变得直观可察。基于这一观点，DECHEMA即德国化工装备协会^①，约从20年前开始，就为科学工作者、工程师和技术人员开设腐蚀与防护方面的实验课程。其对象不仅限于高年级大学生，而特别着眼于那些在工业部门和研究部门的工作人员，帮助他们掌握腐蚀科学知识或知识更新与深造。

近年来，本课程不断扩充，增添了许多实验和标准化的检验方法，这就使得此课程发展到了一个新的阶段，它以所设计的实验及其结果显得通俗易懂而受到广泛的注意。

本书的侧重点在于实验。至于理论，则只讲述那些为理解实验所必备的一些内容。据我们多年的经验认为，工程师们对于电化学和电化学测量技术，而化学家和物理学家则对材料科学和材料检验等感到特别困难。所以，在本书第一章将简单介绍有关这些问题的基本原理。紧接着在第二章则介绍一些重要

^① DECHEMA现称德国化工装备、化工技术和生物技术协会——Deutsche Gesellschaft für Chemisches Apparatewesen, Chemische Technik und Biotechnologie e. V. ——译者注。

的腐蚀种类和防护技术的应用。实验结果和对所提问题的解释等都放在附录中，这样就为那些欲在自己的实验室中掌握这些实验的读者提供了对照检查所获实验结果的可能性。结合书中列出的大量参考文献，本书使腐蚀实验工作者能够根据学到的腐蚀科学知识，并参照合适的标准和规范来开展研究工作和日常性的检验工作。

DECHEMA研究所的许多同事，为设计实验和为建立有关实验装置曾共同付出了多年心血。正是由于他们辛勤和创造性工作的结果，才可能出版这本书。威斯巴登市的工学博士H. E. Bühler教授曾参与制定本书的提纲，法兰克福市的工学博士M. Schütz先生编写了本书1.2.4节，勒弗库森市的K. O. Cavalar先生编写本书第七章和累欧本市（奥地利-译者注）的博士H. Zitler教授提供了例题1.1的资料，在此对他们深表谢意。作者感谢杜依斯堡市的博士W. Schwenk讲师审阅过本书草稿，并提出许多有价值的建议。在完成本书的过程中，M. Schorr女士始终都是一位内行且富有建设性的合作者。作者还要感谢B. Proest女士为制作最后的书稿所付出的努力。

为建立书中所列的实验，不少工业企业和研究所慷慨提供了装备、仪器和许多实际的经验。其中特别值得提名的有，杜依斯堡市的曼内斯曼（Mannesmann）研究所和哥廷根市的邦克（G. Bank）公司。

E·海兹

R·亨克豪斯

A·拉默尔

1983年7月于美因河畔

法兰克福市

符 号 表

在本符号表中，将书中所采用的量的量纲均用国际单位系统（SI-系统）的基本单位或其导出单位表示。在正文中一般也采用国际单位系统，然而为适合书中描述的某些量的数量级，有时也采用基本单位的分数或倍数。

符号	意	义	量 纲
a	Rißlänge	裂纹长度	m
A	Oberfläche	表面积	m ²
A	Bruchdehnung	断裂延伸率	1
b	Probenbreite	试样宽度	m
B	Konstante der Stearn-Geary-Gleichung	方程的常数	V
c	Stoffmengenkonzentration	物料浓度	mol·m ⁻³
d	Durchmesser, Abstand	直径, 距离	m
D	Diffusionskoeffizient	扩散系数	m ² ·s ⁻¹
E	Elastizitätsmodul	弹性模量	N·m ⁻²
f	Formfaktor des Risses	裂纹形状因子	1
f_{CR}	Chemischer Resistenzfaktor	化学稳定性因子	1
F	Faradayzahl	法拉第常数	A·s·mol ⁻¹
F	Kraft	力	N
h	Probendicke	试样厚度	m
i	Stromdichte	电流密度	A·m ⁻²
i_{Korr}	Korrosionsstromdichte	腐蚀电流密度	A·m ⁻²
I	Stromstärke	电流强度	A
K^v	Parabolische Zunderkonstante	氧化膜生长的抛物线速率常数	kg ² ·m ⁻⁴ ·s ⁻¹
K_I	Spannungsintensitätsfaktor	应力强度因子	N·m ^{-1/2}
L	Länge	长 度	m
L	Löslichkeit	溶解度	mol·m ⁻³

续表

符号	意 义	量 纲
m	Masse	质量
Δm	Massenänderung	质量变化
M	Molar Masse	克分子质量
M_w	Mittleres Molekulargewicht	平均分子量
M_{bg}	Grenzbiegemoment	临界弯曲力矩
n	Molzahl	克分子数
p	Druck	压 力
q	Leiterquerschnitt	导体横截面积
Q	Elektrizitätsmenge	电量
R	ohmscher Widerstand	欧姆电阻
R_{el}	Elektrolytwiderstand	电解质电阻
R_m	Zugfestigkeit, Zeitstandsfestigkeit	抗拉强度, 持久强度
R_p	Dehngrenze	屈服极限
R_p	Polarisationswiderstand	极化电阻
S	Querschnitt	截面积
t	Zeit	时间
T	Temperatur	温度
u	Strömungsgeschwindigkeit	液流速度
U	Drehzahl	转数
U	Spannung, Potential	电压, 电位
U_H	Potential, bezogen auf die Standardwasserstoffelektrode	参氢标准电极的电位值
v	Potentialvorschubgeschwindigkeit	电位扫描速度
v	flächenbezogene Massenverlustrate	单位面积减重速率
V	Volumen	体 积
v_A	Abzugsgeschwindigkeit	拉伸速度
w	Abtragsrate	侵蚀速率, 减薄速率
W	Verformungsarbeit	形变功
W_b	Biegewidstandsmoment	抗弯力距
π	Schichtdicke	层 厚
z	Ladungszahl	电荷数

续表

符号	意	义	量 纲
Z	Bruch einschnurung	断裂面缩率	1
Z	Schutzwirkung	保护作用	1
e	Dehnung	延伸率	1
θ	Temperatur	温 度	$^{\circ}\text{C}$
κ	spezifische Leitfähigkeit	比电导	$\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$
γ	Kinematische Viskosität	动粘滞性	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
ρ	Dichte	密 度	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
σ	Spannung	应 力	$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
τ	Schubspannung	剪应力	$\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
ω	Winkelgeschwindigkeit	角速度	s^{-1}

目 录

例题目录

符号表

1. 导论与基础知识	1
1.1 研究工作简介	1
1.1.1 文献工作	2
1.1.2 实验工作	9
1.1.3 研究报告与检验报告	12
1.2 研究方法和测量技术	14
1.2.1 试样的预处理	15
1.2.2 化学分析实验	17
1.2.2.1 腐蚀系统的表征	18
1.2.2.2 腐蚀参量的测定	19
1.2.3 电化学研究	21
1.2.3.1 电位测量	23
1.2.3.2 电流测量	26
1.2.3.3 用外加电源进行的腐蚀研究(极化测量)	28
1.2.3.4 稳态法的应用	32
1.2.3.5 非稳态法	34
1.2.3.6 消除欧姆电压降	36
1.2.4 力学性能试验	37
1.2.4.1 拉伸试验	38
1.2.4.2 持久强度试验	41
1.2.4.3 疲劳强度试验	44
1.2.4.4 断裂力学试验	45

1.2.5	化学和力学因素共同作用下腐蚀的研究	46
1.2.5.1	应力腐蚀开裂	46
1.2.5.2	腐蚀疲劳	50
1.2.5.3	冲刷腐蚀	51
1.2.5.4	空泡腐蚀	53
1.2.5.5	摩擦腐蚀和磨损腐蚀	55
1.2.6	光学与物理方法	56
2.	无机械载荷条件下的腐蚀类型	79
2.1	均匀腐蚀和浅孔腐蚀	79
2.2	液流引起的腐蚀	85
2.3	小孔腐蚀	91
2.4	缝隙腐蚀	102
2.5	腐蚀电池的形成和接触腐蚀	105
2.6	选择性腐蚀	115
2.7	氢损伤	120
3.	在机械载荷条件下腐蚀的研究	127
3.1	应力腐蚀开裂	127
3.2	腐蚀疲劳开裂	136
4.	高温气体腐蚀的研究	139
5.	塑料腐蚀的研究	144
6.	腐蚀防护的研究	155
6.1	电化学保护方法	155
6.1.1	阴极保护	156
6.1.2	阳极保护	157
6.1.3	杂散电流腐蚀与杂散电流保护	158
6.2	缓蚀作用	170
6.3	有机涂层	176
7.	腐蚀损伤的无损检验方法	186
7.1	外观检查	186

7.2	表面缺陷检查	187
7.3	电位探针法测量裂纹深度	194
7.4	涡流法检查	195
7.5	热流法	196
7.6	超声检查	198
7.7	透射检查	202
7.8	密封性检查(检漏)	205
8.	腐蚀损伤事例的研究	210
附 录		214
附录 A1	实验的结果和讨论	214
附录 A2	腐蚀电流密度与单位面积减重速率和减薄 速率之间的换算表	280
附录 A3	材料的符号和标称成分	280
索 引		283

例 题 目 录

电 流-电 位 曲 线

1.2.1	处于电流-电位曲线不同区域的CrNi奥氏体 钢腐蚀产物的鉴定	61
1.2.2	稳态电流密度-电位曲线具有钝化区的腐蚀系统	64
1.2.3	处于活性状态金属的稳态电流密度-电位曲线	67
1.2.4	在氢氧化钠溶液中铝的总电流密度、分电 流密度-电位曲线	69
1.2.5	欧姆电位降	72

极 化 电 阻

1.2.6	由极化电阻及失重值的测算求腐蚀速度	74
1.2.7	借助于市售仪器由极化电阻的测量求腐蚀速度	76

金 相 术

1.2.8	腐蚀损伤的光学显微镜、扫描电子显微镜及 电子束显微分析的研究	77
-------	---	----

均 匀 腐 蚀 和 浅 孔 腐 蚀

2.1.1	在盐溶液液滴下铁的腐蚀	80
2.1.2	长期浸泡试验	80
2.1.3	氧腐蚀的参量	83

旋 转 圆 盘

2.2.1	介质流动引起的腐蚀 旋转圆盘	88
-------	-------------------------	----

小孔腐蚀

- 2.3.1 借助指示剂研究铬镍高合金钢的小孔腐蚀95
- 2.3.2 用恒电位法和动电位法测定小孔腐蚀电位
氯离子浓度的影响97
- 2.3.3 用恒电流方法测定小孔腐蚀电位 101

缝隙腐蚀

- 2.4.1 不锈钢的化学成分对其在含氯离子的介
质中缝隙腐蚀的影响 104

腐蚀电池的形成和接触腐蚀

- 2.5.1 接触腐蚀的演示 108
- 2.5.2 镁合金与另一种金属组成的金属偶的
接触腐蚀的研究 108
- 2.5.3 接触腐蚀的面积定则..... 111
- 2.5.4 混凝土部分覆盖碳钢形成的电池 113

选择性腐蚀

- 2.6.1 不锈钢抗晶间腐蚀稳定性的检验
硫酸铜-硫酸法 (Strauβ试验) 116
- 2.6.2 在强氧化性酸中奥氏体不锈钢抗局部腐蚀
稳定性的检验 (Huey试验) 118

氢脆和氢渗透

- 2.7.1 碳钢的氢脆 122
- 2.7.2 氢在碳钢中的渗透和硫化氢对其促进作用 123

应力腐蚀开裂

- 3.1.1 CrNi奥氏体不锈钢在沸腾MgCl₂溶液中