

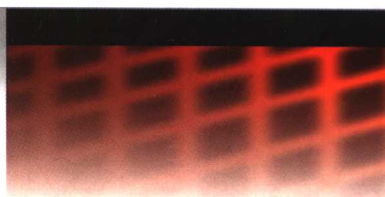


“十一五”上海重点图书
材料科学与工程研究生教学用书

现代腐蚀科学与防护技术



梁成浩 主编



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

“十一五”上海重点图书
材料科学与工程研究生教学用书

现代腐蚀科学与防护技术

梁成浩 主编



华东理工大学出版社
EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

现代腐蚀科学与防护技术/梁成浩主编. —上海:华东理工大学出版社, 2007. 9

(材料科学与工程研究生教学用书)

ISBN 978-7-5628-2130-4

I. 现… II. 梁… III. ①腐蚀-研究生-教材②防腐-研究生-教材 IV. TB304

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 115878 号

“十一五”上海重点图书

材料科学与工程研究生教学用书

现代腐蚀科学与防护技术

主 编 / 梁成浩

责任编辑 / 陈新征

责任校对 / 张 波 李 晔

出版发行 / 华东理工大学出版社

地 址:上海市梅陇路 130 号, 200237

电 话:(021)64250306(营销部)

传 真:(021)64252707

网 址:www. hdlgpress. com. cn

印 刷 / 常熟华顺印刷有限公司

开 本 / 787 mm×1092 mm 1/16

印 张 / 25

字 数 / 559 千字

版 次 / 2007 年 9 月第 1 版

印 次 / 2007 年 9 月第 1 次

印 数 / 1-4050 册

书 号 / ISBN 978-7-5628-2130-4/TB·19

定 价 / 42.00 元

(本书如有印装质量问题,请到出版社营销部调换。)

序

材料是人类历史和社会发展的标志,其研发和应用水平是一个国家科技进步和综合国力的重要体现。20 世纪 70 年代人们把材料、信息和能源誉为当代文明的三大支柱。80 年代又把新材料、信息技术和生物技术并列为新技术革命的重要标志,并列入我国“863”高技术研究发展计划。新材料技术是当代高新技术的重要组成部分,同时也是高新技术发展的基础。

人类对材料的使用始于远古的石器时代,而对材料进行系统的研究则始于 19 世纪中叶。随着物理、化学及其相关学科理论体系的形成,以及 X 射线衍射、电子衍射和电子显微术等技术的出现极大地促进了材料科学的发展;在种类上,由传统的金属和陶瓷材料派生出高分子、混凝土以及复合材料;在性能方面,也由结构向功能、智能以及结构、功能和智能复合的方向发展;在结构层次方面,也从宏观进入微观的纳米尺度。

在科学技术高速发展的今天,材料科学与工程学科有以下几个突出的特点:首先,广义上更多的学科交融。涉及物理、化学、冶金、化工、机械、电子、生物和环境等众多学科领域;第二,发展速度快。电子、航空航天等高科技领域对材料日益苛刻的需求,以及工艺手段的逐步改进有力地推动了材料科学的发展;第三,材料的种类向多元化,性能向复合化、集成化方向发展。

“材料科学与工程”系列丛书具有“新、齐、强”的特点:“新”,就是反映了最新的科技发展成果和态势;“齐”,就是涵盖了材料科学与工程学科各个领域,便于读者选择使用;“强”,就是整合了各院校相关学科及师资力量的资源优势,保证了整套丛书的质量和水平。在编写过程中,充分考虑了不同教育阶段内容的有机衔接,并根据研究生的教学要求进行相应的拓展和提升,在保持知识系统性的前提下,力求理论叙述深入浅出,保证丛书的科学性、原创性、先进性和实用性。对高等学校材料学、材料加工工程、材料物理与化学等专业的研究生,以及从事新材料研究和开发的科技工作者具有重要的应用和参考价值。

中国工程院院士

前 言

金属材料由于具有优良的物理、化学和力学性能和良好的工艺性能,在机械制造、汽车及船舶制造、交通运输、国防与科学技术等各个部门都得到广泛使用。而由金属材料带来的金属腐蚀又会给人类带来巨大的经济损失。据报道,发达国家因腐蚀造成的损失约占国民总产值的2%~4%。2002年中国工程院用Uhlig方法和Hoar方法进行腐蚀调查,结果表明,我国的年腐蚀损失(包括直接和间接损失)达4 296.28亿元。可见,金属材料的腐蚀问题已经成为影响国民经济和社会可持续发展的一个重要因素。

金属腐蚀科学与防护技术是一门综合性技术科学,与材料学、电化学、力学、化学工程学、机械工程学、生物学、电学、微生物学和计算机学等学科有密切关系。因此,编者以金属学和物理化学作为基础,编写了本教材,旨在为工科大学研究生普及和拓宽腐蚀科学知识、推广现代的防护技术提供一些方便,也适应目前世界新技术革命和我国高等工科院校的教学改革的发展。

本教材是结合编者多年的研究经验和科研成果编写而成的,较全面系统地介绍了金属材料的腐蚀机理、腐蚀控制原理及防腐蚀技术。全书共分九章,内容包括绪论、腐蚀电化学、金属的钝化、金属的腐蚀、应力作用下的腐蚀、自然环境中的腐蚀、金属材料的高温氧化、金属的防护技术和金属腐蚀寿命预测及风险评估。

本书由梁成浩任主编,具体编写分工如下:第1章、第3章、第4章、第5章、第6章、第8章的8.3节、8.4节、第9章由大连海事大学梁成浩、黄乃宝和大连理工大学王华编写;第2章由湖南大学何德良编写;第7章的7.1节、7.2节、7.3节分别由中国科学院金属研究所的李美栓、曾涛流、朱圣龙编写;第8章的8.1节、8.2节由中船重工725研究所吴建华编写。感谢王福会研究员和陈范才教授对本书提出许多宝贵的意见。

本书编写大纲承蒙中国工程院院士孙晋良审定,在此表示感谢。此外,本书编写过程中得到了大连理工大学博士研究生杨长江、梁坤、高国和王鹏等的大力帮助,借此机会对他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请广大读者给予批评指正。

编 者

2006年12月

内 容 提 要

本书是作者根据多年的研究经验和科研成果编写的,较全面系统地介绍了金属材料的腐蚀机理、腐蚀控制原理和防腐蚀技术。全书共分九章,内容包括绪论、腐蚀电化学、金属的钝化、金属的腐蚀、应力作用下的腐蚀、自然环境中的腐蚀、金属材料的高温氧化、金属的防护技术和金属腐蚀寿命预测及风险评估。作者参考了大量国内外文献资料,对金属材料腐蚀科学及其应用的发展和最新成就进行深入探讨和归纳。

本书可作为材料科学与工程技术的研究生教材,同时也可用作相关专业技术人员的参考书。

材料科学与工程研究生教学用书

近代材料科学与技术进展	陈 文	主编
材料 X 射线衍射与电子显微分析	姜传海	主编
表面化学分析	黄惠忠	主编
材料表面与界面	胡福增	主编
材料合成与制备	崔春翔	主编
材料热力学与动力学	金学军	主编
材料结构与性能	黄维刚	主编
材料加工工程	李廷举	主编
材料物理进展	田晓慧	主编
材料化学进展	薛冬峰	主编
现代腐蚀科学与防护技术	梁成浩	主编
先进复合材料	倪礼忠	主编
现代陶瓷材料及技术	曲远方	主编
现代薄膜材料与技术	蔡 珣	主编
高聚物结构与性能	董炎明	主编
聚合物分子设计及制备方法	陈晓农	主编
高分子材料流变学	金日光	主编
聚合物加工原理及进展	金日光	主编
聚合物反应原理及进展	韩哲文	主编
功能高分子材料	王国建	主编
高分子凝聚态物理及其进展	吴其晔	主编

目 录

第1章 绪论	1
1.1 金属腐蚀的基本概念	1
1.2 金属腐蚀经济损失分析	2
1.3 金属腐蚀的分类	5
1.3.1 按腐蚀过程的历程分类	6
1.3.2 按腐蚀的形式分类	6
1.3.3 按腐蚀的环境分类	8
1.4 金属腐蚀程度的表示方法	8
思考题	10
参考文献	10
第2章 腐蚀电化学	12
2.1 腐蚀电化学热力学	12
2.1.1 腐蚀电位	12
2.1.2 电位-pH图在腐蚀研究中的应用	16
2.1.3 腐蚀体系热力学分析	18
2.2 腐蚀电化学动力学	22
2.2.1 极化与腐蚀行为	22
2.2.2 析氢腐蚀动力学	25
2.2.3 应力条件下的腐蚀动力学	30
2.2.4 小孔腐蚀动力学	36
2.2.5 几种环境条件下的腐蚀动力学模型	42
2.3 腐蚀电化学研究中的新方法与新技术	48
2.3.1 微电极技术在腐蚀研究中的应用	48
2.3.2 电化学噪声技术在腐蚀研究中的应用	52
2.3.3 压电体声波传感技术在腐蚀研究中的应用	60
2.3.4 电化学扫描显微技术在腐蚀研究中的应用	63
2.3.5 电化学原位实验技术在腐蚀研究中的应用	74
思考题	83

参考文献	83
第3章 金属的钝化	88
3.1 绪言	88
3.2 金属的阳极钝化	89
3.3 金属的自钝化	93
3.3.1 金属自钝化条件	93
3.3.2 不同金属的自钝化	96
3.4 钝化理论	96
3.4.1 成相膜理论	97
3.4.2 吸附理论	99
思考题	100
参考文献	100
第4章 金属的腐蚀	101
4.1 小孔腐蚀	101
4.1.1 小孔腐蚀的形貌和特征	101
4.1.2 小孔腐蚀的机理	103
4.1.3 小孔腐蚀的敏感位置及常用材料的孔蚀	106
4.1.4 小孔腐蚀的影响因素	107
4.1.5 小孔腐蚀的防护措施	111
4.1.6 小孔腐蚀的试验方法	112
4.2 缝隙腐蚀	115
4.2.1 缝隙腐蚀的条件和特征	115
4.2.2 缝隙腐蚀的机理	115
4.2.3 缝隙腐蚀的影响因素	118
4.2.4 缝隙腐蚀的防止措施	119
4.2.5 缝隙腐蚀的试验方法	121
4.3 晶间腐蚀	122
4.3.1 晶间腐蚀的机理	122
4.3.2 不同材料的晶间腐蚀倾向	125
4.3.3 影响晶间腐蚀的因素	126
4.3.4 不锈钢焊接接头的晶间腐蚀	128
4.3.5 晶间腐蚀的防止措施	129
4.3.6 晶间腐蚀的评定方法	130
4.4 选择性腐蚀	131

4.4.1 黄铜脱锌腐蚀	132
4.4.2 石墨化腐蚀	134
4.4.3 其他合金的选择性腐蚀	134
4.4.4 影响成分选择性腐蚀的因素	134
4.4.5 成分选择性腐蚀的防止措施	135
4.4.6 成分选择性腐蚀的测试方法	135
4.5 电偶腐蚀	136
4.5.1 电动序与电偶序	136
4.5.2 电偶腐蚀的机理	138
4.5.3 电偶腐蚀的影响因素	139
4.5.4 电偶腐蚀的防止措施	140
4.5.5 电偶腐蚀的测试方法	140
思考题	141
参考文献	141
第5章 应力作用下的腐蚀	142
5.1 应力腐蚀破裂	142
5.1.1 应力腐蚀破裂的特征	142
5.1.2 应力腐蚀破裂的机理	145
5.1.3 应力腐蚀破裂的影响因素	147
5.1.4 常用材料的应力腐蚀破裂	150
5.1.5 防止应力腐蚀破裂的方法	151
5.1.6 应力腐蚀破裂的测试方法	153
5.2 氢损伤	157
5.2.1 氢损伤的特征	157
5.2.2 氢在金属中的行为	158
5.2.3 氢损伤的类型	159
5.2.4 氢损伤的机理	164
5.2.5 氢损伤的控制措施	166
5.3 腐蚀疲劳	167
5.3.1 腐蚀疲劳的特征	167
5.3.2 腐蚀疲劳的机理	169
5.3.3 影响腐蚀疲劳的因素	170
5.3.4 腐蚀疲劳的控制措施	171
5.3.5 腐蚀疲劳的实验方法	172
5.4 磨损腐蚀	172

5.4.1 湍流腐蚀	172
5.4.2 空泡腐蚀	173
5.4.3 微振腐蚀	175
思考题	177
参考文献	177
第6章 自然环境中的腐蚀	178
6.1 金属在大气中的腐蚀	178
6.1.1 大气腐蚀环境分类	178
6.1.2 铁的大气腐蚀	179
6.1.3 大气腐蚀的主要破坏形式	180
6.1.4 大气腐蚀的影响因素	180
6.1.5 大气腐蚀研究方法	183
6.1.6 大气腐蚀防止	184
6.2 金属在海水中的腐蚀	185
6.2.1 海水的性质	185
6.2.2 海水腐蚀的电化学过程	186
6.2.3 海水腐蚀环境分类	186
6.2.4 影响海水腐蚀的因素	188
6.2.5 防止海水腐蚀的措施	189
6.3 金属在土壤中的腐蚀	191
6.3.1 土壤的性质	191
6.3.2 土壤腐蚀的特点	191
6.3.3 土壤腐蚀的影响因素	192
6.3.4 土壤腐蚀类型	193
6.3.5 微生物腐蚀	194
6.3.6 防止土壤腐蚀的措施	195
6.4 金属在工业环境中的腐蚀	196
6.4.1 酸介质中的腐蚀	196
6.4.2 碱介质中的腐蚀	200
6.4.3 工业循环冷却水的腐蚀	200
6.5 人体环境中金属植入体材料的腐蚀	202
6.5.1 侵蚀性环境	203
6.5.2 腐蚀速率及测量	204
6.5.3 生物医用合金的腐蚀类型	205
6.5.4 生物医用合金的耐蚀性	206

6.5.5 表面改性	211
思考题	212
参考文献	213
第7章 金属材料的高温氧化	214
7.1 高温氧化	214
7.1.1 概述	214
7.1.2 高温氧化热力学	215
7.1.3 高温氧化动力学	218
7.1.4 高温氧化的基本理论	220
7.1.5 合金的内氧化与选择性氧化	229
7.1.6 几种典型的纯金属与合金的氧化	234
7.2 金属材料的热腐蚀	237
7.2.1 引言	237
7.2.2 熔盐化学与相稳定图	238
7.2.3 热腐蚀机制	244
7.2.4 热腐蚀电化学	253
7.2.5 抗热腐蚀技术	262
7.3 高温腐蚀防护涂层	264
7.3.1 高温涂层制备技术	266
7.3.2 新型高温涂层	266
思考题	267
参考文献	268
第8章 金属的防护技术	272
8.1 电化学保护技术	272
8.1.1 阴极保护	272
8.1.2 阳极保护	294
8.2 表面涂层技术	298
8.2.1 金属涂层	299
8.2.2 非金属涂层	325
8.3 缓蚀剂	328
8.3.1 概述	328
8.3.2 酸性介质缓蚀剂	332
8.3.3 中性介质缓蚀剂	335
8.3.4 大气腐蚀缓蚀剂	337

8.4 其他防护技术	339
8.4.1 设计选材	339
8.4.2 介质处理	341
8.4.3 耐蚀非金属材料	342
思考题	345
参考文献	345
第9章 金属腐蚀寿命预测及风险评估	348
9.1 金属腐蚀寿命预测	348
9.1.1 腐蚀数据的平均值与极值	348
9.1.2 腐蚀数据的基本分布与极值分布	350
9.1.3 实例分析	352
9.2 风险评估	365
9.2.1 风险评估的概念	365
9.2.2 风险评估常用方法	366
9.2.3 腐蚀风险评估	368
9.2.4 腐蚀风险评估事例	377
思考题	381
参考文献	382
主题索引	384

第 1 章 绪 论

1.1 金属腐蚀的基本概念

金属腐蚀与防护科学是研究金属材料在其周围环境作用下发生损坏以及如何阻止这种破坏的一门综合性科学。

金属材料在现代工农业生产中占有极其重要的地位。不仅在机械制造、交通运输、国防与科学技术等各个部门都需要大量金属材料,而且在人们日常生活的用品中也离不开金属材料。金属材料不仅具有优良的使用性能(包括材料的物理、化学和力学性能),而且还具有良好的工艺性能(包括铸造性能、压力加工性能、焊接性能、热处理性能、切削加工性能)。由此可见,金属材料是现代最重要的工程材料。但是金属材料制品,随着使用时间的推移,都有一个可使用寿命,将受到不同程度的直接或间接的损坏。通常将常见金属损坏的形式归纳为腐蚀、断裂和磨损。

腐蚀(corrosion)的定义有:①因材料与环境反应而引起的材料的破坏和变质;②除了单纯机械破坏以外的材料的一切破坏;③冶金的过程。

定义①是将腐蚀的定义扩大到整个材料领域。20 世纪 50 年代以来,随着非金属材料的迅速发展和使用,其破坏现象日益增多和严重。因此,将金属腐蚀与非金属腐蚀统一在一个定义之内。该定义可用于塑料、混凝土、橡胶、木材和油漆等的老化和损坏。

定义②旨在区别于单纯机械破坏,如机械断裂与应力腐蚀破裂、磨损和磨蚀。

定义③是指在自然界金属通常以矿石形式存在,如多数铁矿石含有铁的氧化物。冶金过程则是将矿石中氧化物还原为金属并将金属精炼或合金化成为金属材料。当钢铁腐蚀时,生成铁锈,其主要成分是水合氧化铁。可见,钢铁的腐蚀过程就是将金属氧化为矿石或化合物,是冶炼的逆过程,即回到它的自然存在状态。随着非金属材料在工业中大量的应用,非金属材料的腐蚀失效现象也日益严重,譬如油漆、塑料、橡胶和合成材料的老化和早期损伤等。实际上,金属和非金属腐蚀环境和条件以及腐蚀原理上具有很大的差异。故此,本教材只介绍金属的腐蚀而不涉及非金属材料的腐蚀问题。

通常把金属腐蚀定义为:金属与周围环境介质之间发生化学和电化学作用而引起的变质和破坏。碳钢在大气中生锈,钢质船壳在海水中的锈蚀,地下输油钢管线在土壤中的穿

孔, 热力发电站中锅炉的损坏以及轧钢过程中氧化铁皮的生成, 金属机械和装置与强腐蚀性介质(酸、碱和盐)接触而导致损坏等等都是最常见的腐蚀现象。显而易见, 金属要发生腐蚀需要外部环境, 在金属表面或界面上发生化学或电化学多相反应, 使金属转化为氧化(离子)状态。因此, 金属在环境中构成的腐蚀体系中发生的化学和电化学反应就是金属腐蚀学的主要研究内容。

断裂(fracture)是指金属材料与构件受力超过其弹性、塑性极限而发生的损坏。譬如, 机械断裂、脆性断裂、延性断裂等, 它使构件丧失原有的机械功能而失效。

磨损(wear)是指金属材料与其他物体相互作用, 因机械摩擦而引起的磨耗。例如, 发动机活塞的磨损, 车轮与轨道之间的磨损。

金属腐蚀科学是一门内容非常广泛的综合性边缘科学, 它不仅以金属学和物理化学作为基础, 还涉及材料学、电化学、力学、化学工程学、机械工程学、生物学、电学、微生物学和计算机学等学科。

总而言之, 金属腐蚀与防护科学的主要研究目的在于:

① 通过研究金属材料在腐蚀性环境中, 在其界面或表面发生的化学和电化学反应, 探索其被腐蚀破坏的作用机理及普遍规律。不仅考察腐蚀过程热力学, 而且要从腐蚀过程动力学方面研究腐蚀进行的速率及机理。

② 发展腐蚀控制技术及使用技术。基本理论研究是学科发展的基础, 但是, 腐蚀科学是一门工程应用科学, 腐蚀研究的最终目的是为了腐蚀控制。因此, 腐蚀学科的任务包括研究腐蚀过程和寻找有效的腐蚀控制方法。

③ 研究和开发腐蚀测试和监控技术, 制定腐蚀鉴定标准和实验方法。普及腐蚀科学知识, 加强技术咨询, 提供必要的教材和工具书, 是减少腐蚀损失的一项基本和长远的措施。

1.2 金属腐蚀经济损失分析

金属腐蚀给国民经济带来了巨大的经济损失。据一些工业发达国家对金属腐蚀所造成的损失调查, 金属腐蚀带来的经济损失约占国民总产值的 3%~4%, 这些结果是非常惊人的, 见表 1.1。譬如, 美国 1975 年一年用于腐蚀与防护的费用高达 700 亿美元之多。单从汽车燃油系统一项的腐蚀统计, 每年就花费 100 万美元, 汽车散热器损失约 5 200 万美元。诸如其他像化工系统、石油系统、海洋工程系统, 由于它们的环境恶劣, 预计其损失将会更大。

腐蚀除造成巨大的经济损失之外, 腐蚀事故还常常危及人身安全。近几十年来, 腐蚀造成的灾难性事故屡见不鲜。譬如, 1965 年美国有一输气管线因应力腐蚀而破损, 造成瓦斯泄漏、爆炸, 使 10 多人伤亡。又如 1985 年日本一架波音 747 客机, 由于腐蚀疲劳而坠毁, 造成 500 多人死亡。

表 1.1 世界上一些国家的金属材料腐蚀导致经济损失的统计数据

国 家	时 间	年腐蚀经济损失	占国民经济总产值/%
美 国	1949 年	55 亿美元	
	1975 年	820 亿美元	4.9
	1995 年	3 000 亿美元	4.21
	1998 年	2 757 亿美元	
英 国	1957 年	6 亿英镑	
	1969 年	13.65 亿英镑	3.5
日 本	1975 年	25 509.3 亿日元	
	1997 年	39 376.9 亿日元	
苏 联	20 世纪 70 年代中期	130 140 亿卢布	
	1985 年	400 亿卢布	
联邦德国	1968—1969 年	190 亿马克	3.0
	1982 年	450 亿马克	
瑞 典	1986 年	350 亿瑞典法郎	
印 度	1960—1961 年	15 亿卢布	
	1984—1985 年	400 亿卢布	
澳大利亚	1973 年	4.7 亿澳元	
	1982 年	20 亿美元	
捷 克	1986 年	150 亿捷克法郎	

不仅如此,由于腐蚀损耗大量金属,浪费了大量能源。据统计,每年因腐蚀要损耗 10%~20% 的金属。若以年产粗钢 5 000 万吨为例,取下限按 10% 计算的话,一年就要浪费 500 万吨,加之生产 500 万吨钢所需的人力物力,损失更是触目惊心。

另外,腐蚀引起的环境污染问题日益引起人们关注。腐蚀产生的各种工业废水、废渣和废气以及各种有害物质泄漏、排放到河流、海洋和大气中,破坏了生态平衡,危及人们健康。

同时,腐蚀还可能成为生产发展和科学进步的障碍。如 1951 年法国的拉克气田因设备的应力腐蚀开裂没有得到解决,推迟到 1957 年才全面开采。美国的阿波罗飞船的 N_2O_4 高压容器曾发生腐蚀开裂,经过研究加入 0.6% NO 之后才得到解决,否则登月计划会被推迟。

目前金属腐蚀经济损失分析常用 Uhlig 方法, Hoar 方法和 Battelle 方法。

(1) Uhlig 方法

金属腐蚀造成的经济损失可分为直接损失和间接损失。

直接损失是指更换被腐蚀的结构、机械和其他零部件所需的费用,如:

- ① 对机械、装置构件以防护为目的的镀锌、镀镍及涂层费用;
- ② 管道的阴极保护的工程设施、维护费用;
- ③ 采用耐蚀合金比采用碳钢所增加的额外费用;

- ④ 添加缓蚀剂的费用;
- ⑤ 储存金属设备及零部件干燥费用;
- ⑥ 更换家用热水器及汽车排风管费用等。

间接损失包括:停产损失——由于腐蚀造成的停产、停工和更换设备、管束造成的静止损失;产品损失——损坏管道系统中泄漏水、油、气等原料及修复的损失费用;降低生产效率——腐蚀产物堆积、附着造成管线堵塞、降低热传递效率,而提高泵功率等费用;产品污染——腐蚀泄漏引起的产品污染而导致产品报废等费用;设备、构件、装置的过度设计——为了延长设备使用寿命,设计时加大设计裕量,增加管壁厚度等费用。

可见,金属材料的腐蚀导致生产停顿、物质流失、耗损资源和能源、降低产品质量、污染环境 and 造成人员伤亡等安全事故。

2002 年中国工程院用 Uhlig 方法和 Hoar 方法进行腐蚀调查结果表明,我国的年腐蚀损失(包括直接和间接损失)达到 4 296.28 亿元。表 1.2 列出了采用 Uhlig 方法对我国 2000 年从生产、制造方面估算的腐蚀损失统计。

表 1.2 2000 年生产、制造方面的腐蚀损失统计

防护方法	表面涂层	金属表面处理	耐蚀材料	防锈油	缓蚀剂	电化学保护	合 计
经济损失/亿元	1 518.44	234.16	250.25	2.00	1.00	1.00~2.00	2 006.85~2 007.85

(2) Hoar 方法

Hoar 方法是按照各工业部门的腐蚀经济损失统计和有关防护的总费用加和的评估估算方法。用 Hoar 方法对我国 2000 年各工业部门腐蚀引起的损失统计结果列于表 1.3 中。

表 1.3 2000 年各工业部门腐蚀引起的损失统计

防护方法	化学工业	能源部门 (电力、石油、煤)	交通部门 (火车、汽车)	建筑部门 (公路、桥梁、建筑)	机械工业	合 计
经济损失/亿元	300	172.1	303.9	1 000	512.43	2 288.43

(3) Battelle 方法

Battelle 方法由 BCL/NBS 提出,通过三个世界的 GDP(国民生产总值)估算腐蚀损失,这三个世界分别为:

- 世界 I:现实的有腐蚀的世界;
- 世界 II:不存在腐蚀的假想世界;
- 世界 III:腐蚀被理想控制的世界。

从不同世界的 GDP 差值可以得到真实的腐蚀损失和可以避免的腐蚀损失,计算方式如下:

$$\text{GDP(世界 II)} - \text{GDP(世界 I)} = \text{腐蚀损失}$$

$$\text{GDP(世界 III)} - \text{GDP(世界 I)} = \text{可避免的腐蚀损失}$$