

金属的腐蚀磨损

Corrosive Wear of Metals

姜晓霞 李诗卓 李 曙 著



化学工业出版社

工业装备与信息工程出版中心

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

金属的腐蚀磨损/姜晓霞, 李诗卓, 李曙著. —北京: 化学工业出版社, 2003.3

ISBN 7-5025-3532-2

I. 金… II. ①姜…②李…③李… III. 金属-腐蚀磨损-研究 IV. TG17

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 010317 号

金属的腐蚀磨损

Corrosive Wear of Metals

姜晓霞 李诗卓 李 曙 著

责任编辑: 陈志良

文字编辑: 王清颢

责任校对: 蒋 宇

封面设计: 蒋艳君

*

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
北京市管庄永胜印刷厂印刷
三河市东柳装订厂装订

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 451 千字

2003 年 5 月第 1 版 2003 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3532-2/TQ·1458

定 价: 38.00 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

谨以此书纪念
中国科学院金属研究所
建所五十周年！

姜晓霞 李诗卓 李 曙

序 言

腐蚀、磨损和疲劳断裂是材料在使用过程中导致功能失效最主要的原因，但在实际工作环境中，它们往往同时参与材料的破坏过程，从而导致材料的加速破坏，如应力腐蚀与腐蚀疲劳等，材料科学家在这些方面已做过大量研究工作，并出版了专著或文集，但有关腐蚀磨损（corrosive wear）方面的研究迄今尚处于开拓阶段，研究成果仍分散于有关期刊或出版物之中，而带有腐蚀性的磨损比比皆是，不能不引起人们重视。

本书作者姜晓霞和李诗卓教授长期从事腐蚀与摩擦磨损方面的工作，在实践与理论研究方面有很深的造诣；李曙研究员是后起之秀，参与这方面的工作已有多多年，并取得令人瞩目的成就，他们鼎力合作完成了这本有创新性的著作。

本书作者是在中国科学院、国家自然科学基金委员会的支持下，结合他们所承担的国家重大工程项目从事金属腐蚀磨损问题的研究。书中除了综述当前国内外材料磨蚀领域中一些有代表性的理论与实践的研究结果外，主要报道和分析了他们 20 多年来在材料磨蚀性能的测试、腐蚀与磨损的交互作用的定量表征、耐磨蚀合金的设计与防护直至工程实践方面所取得的成果。

这是国内外腐蚀磨损理论及工程应用方面的第一本著述，它的出版将对从事腐蚀环境中金属材料开发及研究人员具有重要参考价值。

师昌绪

2002. 11. 27

前 言

同属于力学与电化学交互作用造成金属损伤的应力腐蚀或腐蚀疲劳的研究已历时多年，有了许多论文和专著，目前已经可以预防或减少这些破坏形式的发生。但是，由表面（剪切）应力与腐蚀介质造成金属腐蚀磨损的研究是在 20 世纪 70 年代后期才蓬勃兴起。它包括典型摩擦副的腐蚀磨损、腐蚀性料浆和高温燃气的冲蚀以及腐蚀多相流中的气蚀等几类，材料的这类失效形式常出现在泵、阀的过流部件、管道内壁面、腐蚀介质中服役的摩擦副如动密封面及轴承等零部件，遍及石油化工、能源交通、农机、建材矿山、冶金、水利电力等行业机械设备中。

中国科学院金属研究所在“六五”期间便开展金属腐蚀磨损的研究，先后得到科学院及国家自然科学基金以及有关工业部门的支持，至今已逾 20 载。参加工作的人员大部分是硕士、博士研究生和博士后。内容涉及金属腐蚀磨损试验机的研制和测试方法的确定、腐蚀磨损交互作用的定量研究及环境致脆、耐磨蚀合金的设计及其应用以及磨蚀的防护等各个方面。本书就是在这些工作的基础上参考国内外有关文献写成的。本书的特点是内容大量取材于作者自身的工作，有些尚未公开发表过，所以本书的作者实际应该是该研究课题组全体工作人员。

本书共分 9 章，内容包括金属腐蚀磨损的试验方法、平稳及冲击加载下的腐蚀磨损、腐蚀磨损交互作用及表面膜行为，为了能更好地应用上述腐蚀磨损机理，书中还用较大篇幅介绍了耐磨蚀合金的设计及一些工程中应用实例和磨蚀的防护等。由于研究工作正处于进展之中，许多问题尚待进一步研究，更

限于作者的水平，书中的缺点错误在所难免，敬请广大读者指出以期修正。

中国科学院金属研究所 姜晓霞

2002 年 10 月

Abstract

The book "Corrosive Wear of Metals" has contained investigation methods, material removals in steady loading (rubbing pairs in liquid media) and under impact loading (erosion-corrosion), mechanism of corrosive wear (synergism between corrosion and wear) and performance of surface film. Corrosive wear resistant alloys, protections and industrial examples of corrosive wear have also occupied more spaces in this book.

It could be a useful book for students/engineers and scientists who study and apply the metallic materials.

内 容 简 介

本书是国内外第一部系统描述金属腐蚀磨损的著作，共 9 章，内容包括金属腐蚀磨损研究的各种方法；平稳加载（介质中运行的摩擦副）及冲击加载（冲蚀腐蚀等）下的腐蚀磨损；磨蚀机理-腐蚀磨蚀的交互作用及表面膜行为等。书中用了较大篇幅结合工程应用，介绍了耐磨蚀合金及磨蚀的防护以及有关行业中金属腐蚀磨蚀问题的实例。

本书可供化工、石油化工、机械、航天、冶金等相关行业涉及金属学、材料设备，腐蚀与防护专业的技术人员研究人员阅读，也可供大专院校有关专业师生参考。

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 金属腐蚀磨损的定义及其研究范围	1
1.2 金属腐蚀磨损的研究简史和现状	2
1.3 本书的宗旨	5
第 2 章 腐蚀磨损的测试和研究方法	8
2.1 概述	8
2.2 典型的腐蚀磨损试验机.....	10
2.2.1 稳态试验设备.....	10
2.2.2 料浆冲蚀试验设备.....	15
2.2.3 暂态腐蚀磨损试验机.....	17
2.3 研究腐蚀磨损机理的试验设备.....	20
2.3.1 以电化学参数测试为主的腐蚀磨损试验设备.....	21
2.3.2 以力学参数测试为主的单摆划痕试验机.....	26
2.4 腐蚀磨损的试验方法.....	31
2.4.1 试验参数的选择.....	31
2.4.2 腐蚀磨损试验结果的表达.....	33
2.5 腐蚀磨损研究的新方法.....	35
2.5.1 暂态过程的测试.....	35
2.5.2 腐蚀磨损机制图.....	37
参考文献	40
第 3 章 平稳载荷下金属材料的腐蚀磨损	42
3.1 概述.....	42
3.2 单向滑动摩擦中金属材料的腐蚀磨损.....	43
3.2.1 滑(滚)动腐蚀磨损的典型试验设备.....	43
3.2.2 滑(滚)动摩擦中金属材料腐蚀磨损的影响因素.....	44

3.2.3 金属材料的腐蚀磨损模型·····	50
3.3 往复滑动中金属材料的腐蚀磨损·····	54
3.3.1 典型的试验设备·····	54
3.3.2 影响因素·····	58
3.3.3 金属在腐蚀介质中滑动时的摩擦磨损行为·····	59
3.4 微动及其他复杂运动中金属的腐蚀磨损·····	65
3.4.1 试验设备·····	65
3.4.2 影响因素·····	69
3.4.3 微动腐蚀的模型·····	71
3.5 金属在高温滑动氧化中的摩擦学行为·····	74
3.5.1 金属摩擦系数与环境温度的关系·····	75
3.5.2 金属自生氧化膜的减摩行为·····	77
3.5.3 高温自润滑合金减摩机理及开发前景的探索·····	80
参考文献·····	86
第4章 冲击载荷下金属的腐蚀磨损 ·····	88
4.1 概述·····	88
4.2 流动介质中金属的冲蚀腐蚀·····	93
4.2.1 双相流中金属冲蚀腐蚀的影响因素·····	93
4.2.2 液-固双相流冲蚀的试验设备及方法·····	115
4.2.3 料浆冲蚀腐蚀的理论模型及研究方法·····	125
4.3 腐蚀介质中金属的气蚀行为·····	145
4.4 金属的高温冲蚀-氧化(腐蚀)·····	150
4.4.1 金属高温冲蚀-氧化的试验研究·····	150
4.4.2 金属高温冲蚀-氧化的影响因素·····	160
4.4.3 金属高温冲蚀-氧化的物理模型·····	166
4.4.4 高温冲蚀-氧化机制图·····	172
参考文献·····	192
第5章 金属腐蚀磨损的交互作用 ·····	196
5.1 概述·····	196
5.2 腐蚀磨损交互作用的定量描述及各分量测定方法·····	198

5.2.1	磨损分量的测定	199
5.2.2	腐蚀分量的测定	201
5.3	腐蚀磨损交互作用机理	214
5.3.1	磨损加速腐蚀	214
5.3.2	腐蚀加速磨损	221
5.3.3	腐蚀磨损试验中的“负”交互作用	221
5.4	腐蚀磨损交互作用中的脆性	222
5.4.1	不锈钢在酸性 Cl^- 溶液中的环境致脆	223
5.4.2	Ti 合金、高强钢在酸性介质中的环境致脆	233
5.4.3	化学镀 Ni-P 合金在 NaOH 溶液中的环境致脆 ...	246
5.4.4	铜合金在 NH_3 、 NH_4^+ 、 S^{2-} 污染海水中的环境致脆	252
5.5	腐蚀磨损交互作用中环境致脆规律及机理初探	260
5.5.1	环境致脆规律性	260
5.5.2	环境致脆机理	265
5.5.3	腐蚀磨损中的环境致脆与应力腐蚀断裂异同	269
	参考文献	271
第 6 章	腐蚀磨损过程中金属表面膜的行为	273
6.1	电位(膜)与失重	274
6.2	电位(膜)-摩擦系数(摩擦行为)	285
6.3	磨蚀过程中表面膜的破裂与再生	290
	参考文献	308
第 7 章	耐腐蚀磨损的合金	310
7.1	概述	310
7.2	耐磨蚀合金的设计	318
7.2.1	形变强化	318
7.2.2	第二相强化	332
7.2.3	热处理	338
7.2.4	微量元素合金化	343
7.2.5	耐磨蚀合金发展的实例	344

7.3 几种金属材料的腐蚀磨损行为	351
7.3.1 钢	352
7.3.2 铸铁	377
7.3.3 铜合金	400
7.3.4 铝合金	411
7.4 小结	416
参考文献	417
第8章 金属腐蚀磨损的控制	420
8.1 电化学保护法	421
8.1.1 阳极保护法	421
8.1.2 阴极保护法	421
8.2 添加剂	423
8.3 表面处理	446
8.3.1 化学镀 Ni-P 合金、刷镀 Ni-P/SiC	446
8.3.2 C、N 共渗	450
8.3.3 TiN 超硬膜	451
参考文献	453
第9章 金属腐蚀磨损的工程实例	455
9.1 石油化工	455
9.1.1 双相不锈钢磷酸料浆循环泵叶轮的失效分析	455
9.1.2 磷酸料浆泵	461
9.1.3 注水井套管的腐蚀磨损	464
9.2 采矿工业	467
9.2.1 煤矿运输用轻轨的腐蚀磨损	467
9.2.2 金矿生产中用的耐磨蚀合金	470
9.2.3 铁矿球磨(湿)中的腐蚀磨损	478
9.3 机械装备	481
9.3.1 纺织机械中的腐蚀磨损	481
9.3.2 轴承的腐蚀磨损	484
9.3.3 齿轮的腐蚀磨损	486

9.3.4 铜线材拔制工艺中的腐蚀磨损	488
9.4 能源工业	490
9.4.1 燃煤锅炉管道的高温冲蚀	490
9.4.2 新型加硼铜合金冷凝管 HSn70-1AB 的研制	494
9.4.3 铜合金冷凝器管在含砂海水中的腐蚀磨损	508
9.5 人体植入材料的腐蚀磨损	513
参考文献	516

Content

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Definition	1
1.2 History and Current Situation of Corrosive Wear	2
1.3 Purpose of This Book	5
Chapter 2 Investigation Methods in Corrosive Wear	8
2.1 Outline	8
2.2 Typical Testers for Corrosive Wear	10
2.2.1 Steady Devices	10
2.2.2 Slurry Erosion Devices	15
2.2.3 Apparatus for Transient Measurement	17
2.3 Instruments for Mechanism Investigations	20
2.3.1 Devices for Electrochemical Variable Testing	21
2.3.2 Single Pendulum Scratch Device for Mechanical Variable	26
2.4 Experimental Methods	31
2.4.1 Selection of Variables	31
2.4.2 Expression of Testing Results	33
2.5 New approach to Corrosive Wear Investigation-construction of Wear Maps	35
2.5.1 Measurement in Transient Process	35
2.5.2 Corrosive Wear Map	37
Bibliography	40
Chapter 3 Corrosive Wear of Metals in Steady Loading	42
3.1 Outline	42
3.2 Corrosive Wear in Sliding	43

3.2.1	Devices	43
3.2.2	Influential Factors	44
3.2.3	Models	50
3.3	Corrosive Wear in Reciprocating	54
3.3.1	Devices	54
3.3.2	Influential Factors	58
3.3.3	Tribological Behaviors in Reciprocating	59
3.4	Fretting and Other Complex Sliding in Corrosive Medium ...	65
3.4.1	Devices	65
3.4.2	Influential Factors	69
3.4.3	Models	71
3.5	Tribological Behaviors of Metals at Elevated Temperature	74
3.5.1	Frictional Coefficient vs. Temperature	75
3.5.2	Lubrication of Naturally Occurring Oxide Film	77
3.5.3	Anti-friction of Self-lubricating Alloy and its Developing Prospect	80
	Bibliography	86
Chapter 4	Corrosion Wear of Metals Under Impacting Loads ...	88
4.1	Outline	88
4.2	Erosion-corrosion in Fluid Media	93
4.2.1	Influential Factors	93
4.2.2	Devices for Slurry Erosion	115
4.2.3	Model and Investigation Method	125
4.3	Cavitation Erosion in Corrosive Media	145
4.4	Erosion-oxidation (Corrosion) of Metals at Elevated Temperature	150
4.4.1	Experimental Investigation	150
4.4.2	Influential Factors	160
4.4.3	Physical Model of Erosion-Oxidation	166
4.4.4	Erosion-oxidation Mechanism Maps	172

Bibliography	192
Chapter 5 Synergy Between Corrosion and Wear of Metals ...	196
5.1 Outline	196
5.2 Quantitative Determination and Expression for Synergistic Components	198
5.2.1 Wear Components	199
5.2.2 Corrosion Components	201
5.3 Synergistic Mechanisms	214
5.3.1 Wear Accelerating Corrosion	214
5.3.2 Corrosion Accelerating Wear	221
5.3.3 Negative Effect in Corrosive Wear	221
5.4 Embrittlement of Alloys in Synergism of Corrosive Wear ...	222
5.4.1 Embrittlement of Stainless Steel in Acidic Solution with Cl^-	223
5.4.2 Embrittlement of Ti Alloy and HSLA Steel in Acidic Solutions	233
5.4.3 Embrittlement of Electroless Ni-P Plating in Alkaline Media	246
5.4.4 Embrittlement of Cu Alloys in Polluted Sea Water with NH_3 , NH_4^+ or S^{2-}	252
5.5 Discussion of Environmental Embrittlement in Corrosion- wear Synergy	260
5.5.1 Characteristics of Environmental Embrittlement ...	260
5.5.2 Mechanism of Environmental Embrittlement	265
5.5.3 Comparison of Environmental Embrittlement with SCC	269
Bibliography	271
Chapter 6 Performance of Surface Film in Corrosive Wear ...	273
6.1 Potentials (film) vs. Weight Loss	274
6.2 Potentials (film) vs. Frictional Behavior	285

6.3 Scratch and growth of Passive Film of Metals	290
Bibliography	308
Chapter 7 Corrosion Wear Resistant Alloys	310
7.1 Outline	310
7.2 Design of Corrosion Wear Resistant Alloys	318
7.2.1 Deformation strengthen	318
7.2.2 Secondary Phase Strengthen	332
7.2.3 Heat Treatment	338
7.2.4 Micro-alloying	343
7.2.5 The Development Example of Corrosion Wear Resistant Alloys	344
7.3 Corrosive Wear Behavior of Several Metallic Materials	351
7.3.1 Steels	352
7.3.2 Cast Irons	377
7.3.3 Copper Alloys	400
7.3.4 Aluminium Alloys	411
7.4 Brief Summary	416
Bibliography	417
Chapter 8 Control of Corrosive Wear of Metallic Materials	420
8.1 Electrochemical Protection	421
8.1.1 Anodic Protection	421
8.1.2 Cathodic Protection	421
8.2 Additives	423
8.3 Surface Treatments	446
8.3.1 Electroless or Brush Plating of Ni-P-/SiC Alloys	446
8.3.2 Carbonitriding	450
8.3.3 TiN Hard Film	451
Bibliography	453
Chapter 9 Industrial Examples of Corrosive Wear	455
9.1 Petrochemical Industry	455