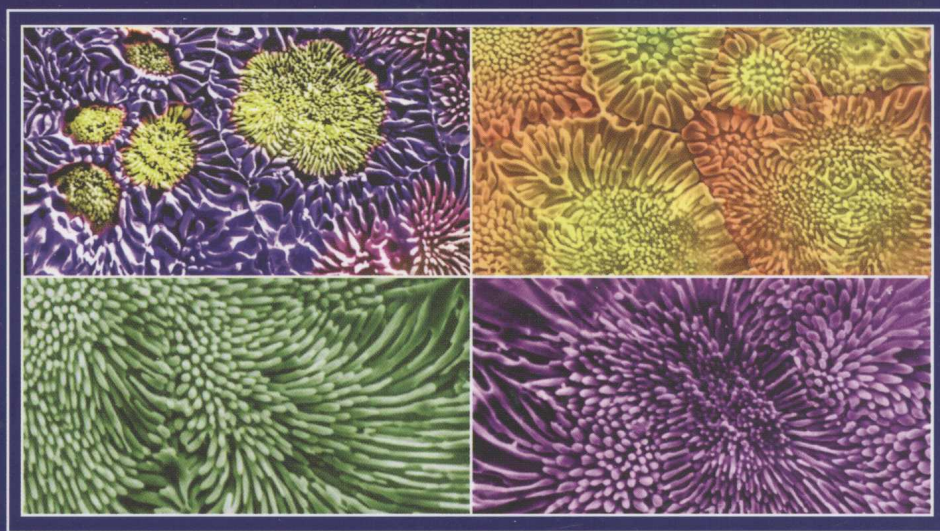


ATLAS OF MICROSTRUCTURE ON METALS CORROSION

金属腐蚀显微组织图谱

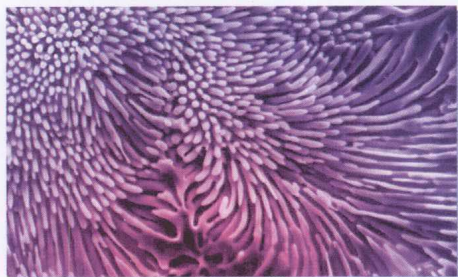
中国船舶重工集团公司第七二五研究所
海洋腐蚀与防护国防科技重点实验室

韩顺昌 等编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

ATLAS OF MICROSTRUCTURE
ON METALS CORROSION



金属腐蚀显微组织图谱

中国船舶重工集团公司第七二五研究所
海洋腐蚀与防护国防科技重点实验室
韩顺昌 等编著

内 容 简 介

本书共 15 章：第 1 章简要介绍金属腐蚀及其表征分析方法等相关知识；第 2 章～第 12 章介绍大气腐蚀、液态金属腐蚀、微生物腐蚀与海生物污损、冲刷腐蚀、脱成分腐蚀、空泡腐蚀、氢损伤、应力腐蚀、腐蚀疲劳、金属引起的脆性和表面保护膜的腐蚀破坏；第 13 章介绍金属氧化物阳极的组织与损伤；第 14 章介绍点蚀、海水腐蚀及其他腐蚀；第 15 章介绍典型失效分析案例。

本书适宜于从事材料科学和材料工程的科技工作者，以及从事腐蚀与防护工作的工程技术人员阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

金属腐蚀显微组织图谱 / 韩顺昌等编著. —北京：国防工业出版社，2008.11

ISBN 978-7-118-05748-5

I . 金... II . 韩... III . 腐蚀—显微组织 (金相学)—图谱 IV. TG17-64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 072888 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京凌奇印刷有限责任公司印刷

新华书店经售

*

开本 789×1092 1/16 印张 22½ 字数 567 千字

2008 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 150.00 元

(本书如有印装错误，我社负责调换)

国防书店：(010) 68428422

发行邮购：(010) 68414474

发行传真：(010) 68411535

发行业务：(010) 68472764

特别致谢本书所用样品与相关技术资料的支持单位

厦门海水环境材料腐蚀国家野外科学观测研究站

三亚海水环境材料腐蚀国家野外科学观测研究站

深海腐蚀与防护试验站

青岛双瑞防腐防污工程有限公司

洛阳双瑞特钢科技有限公司

厦门双瑞船舶涂料有限公司

洛阳双瑞精铸钛业有限公司

洛阳双瑞金属复合材料有限公司

洛阳双瑞万基钛业有限公司

本书为国内首部关于腐蚀与防护专业方面的金相显微组织图谱。

金属腐蚀是金属材料在自然环境和诱发环境下由于应力和化学、电化学反应综合作用下所发生的一种材料损伤，引起材料性能的恶化和失效，是一种极为普遍的损伤模式。大规模的工业和农业生产活动所产生的环境污染又加速了材料的腐蚀损伤。除普通的金属会产生腐蚀现象外，高分子聚合物、陶瓷、水泥、玻璃等材料也都会由于老化而引起品质的恶化。除了常见的电化学腐蚀外，大量的微生物如硫酸盐还原菌等在它们的生命活动中所分泌的产物也会引起金属材料的腐蚀，称作微生物腐蚀（Microbiologically Influenced Corrosion）。在工业、农业、化工和食品加工等广泛领域内都会发生微生物腐蚀，因此也更引起人们对微生物腐蚀的重视。

腐蚀所造成的损失是相当巨大的，因为在能源、环保、石油化工、交通运输、道路桥梁、港湾码头、地下管道、江河堤坝、船舶舰艇、海洋设施、航天航空和武器装备等领域都有腐蚀问题。因此每年由于腐蚀给国民经济造成的损失是相当大的。据统计，国外一些发达国家每年由于腐蚀给国家造成的经济损失占当年国民经济总收入的 4% 左右，我国因腐蚀每年给国家造成的经济损失接近国民经济总收入的 5%，超过 5000 亿元人民币。由此可见，腐蚀损伤的经济损失是十分惊人的！另外，一些发达国家由于采取了一些有效的防护措施，又能从经济损失中挽回大约 30%，这进一步说明加强腐蚀科学与防护技术研究对国民经济和国防安全的重要性！

要有效地预防和控制腐蚀，就必须加强对腐蚀机理的研究，只有从腐蚀机理上有了正确的认识，才能对相关的腐蚀损伤采取有效的防护措施。

材料表征技术是材料科学与工程的基础学科，它能从本质上分析揭示材料的微观形貌、结构组织成分与性能之间的密切关系，为新材料新工艺的研究和工艺性能的改进提供理论依据。在腐蚀科学的研究中采用先进的材料表征技术，对于腐蚀现象的深入研究和了解，特别是对腐蚀机理的深入研究具有十分重大的意义，它不但能从试验数据上为现有的一些腐蚀机理提供佐证，还能从材料损伤的微观机理上，发现一些新的现象，进一步完善和修正现存的一些腐蚀机理。作者在用扫描电镜和透射电镜等观察金属材料空泡腐蚀样品中，发现样品表面有非晶态和纳米晶，这说明在气泡爆破的瞬间，具有足以使金属熔化的高温，在急冷过程中形成非晶态或纳米晶，这就为空泡在爆破过程中出现高温现象的假设提供了

直接试验证据；在船用紫铜冷却管的高速冲刷腐蚀样品的表面上，观察到纳米晶和纳米级熔珠，同样说明在冲刷过程中有局部熔化现象出现，这就完善了人们对冲刷腐蚀机理的认识。在脱成分选择性腐蚀的研究中，作者采用彩色金相技术进行观察，发现在 $\alpha + \beta$ 黄铜中由于 β 相的缺失从而形成空洞，同时还引起周围组织的“垮塌”现象，此外还观察到在脱成分过程所形成的中间产物，在微生物腐蚀产物的能谱分析中还发现某些元素的能量位移现象，等等。诸如此类的一些新的分析和观察结果，还有许多，在已出版的书刊中尚不多见。

本书作者长期从事材料表征、失效分析和试验技术研究工作，重视分析技术的理论研究，具有丰富的实践经验。本书是作者长期材料分析实践工作的经验总结和失效分析理论成果的结晶，作者可能是国内在腐蚀失效分析中首先采用彩色金相技术的第一人。在本书中搜集了作者长期以来在腐蚀科学理论研究和腐蚀失效分析中所积累的金相、彩色金相、扫描电镜、透射电镜、X 射线能谱仪、扫描探针显微镜、X 射线衍射、俄歇电子能谱、光电子能谱仪和拉曼光谱仪等方面的研究成果和资料，以及在作者指导下一些青年科研工作者所完成的部分资料。在所涉及到的每个腐蚀专题中，首先对其腐蚀机理等作简要的概述，之后为相关主题的图谱，以图为主，图文并茂。本书对从事腐蚀科学和防护研究、材料科学和工程的科研生产人员、相关专业大专院校的师生以及从事金属结构设计的人员，都有一定的参考价值。

中国腐蚀与防护学会理事长

2008 年 3 月 28 日

金属的腐蚀损伤是一种极为重要的材料损伤和失效模式，它每年给国民经济造成巨大损失。据报道（《中国腐蚀调查报告》，化学工业出版社，2003年），我国每年支付金属腐蚀的费用约2000亿元人民币，考虑到腐蚀的间接经济损失，每年因腐蚀而造成的经济损失总计约5000亿元人民币，约占国民经济总收入的5%左右。这是一个十分惊人的数字！它说明了我国腐蚀损失的严重性和普遍性。如果能及时采取相应的防腐措施，就可以挽回30%左右的经济损失。正因为腐蚀和防护技术具有如此重要的意义，世界各国都十分重视，投入巨大的财力、物力和人力来研究腐蚀科学和腐蚀的防护技术。

在腐蚀科学研究和腐蚀工程实践中，材料表征技术不仅用于腐蚀程度的检验或用来判断腐蚀类别或属性，更重要的是用来研究金属的腐蚀行为和腐蚀损伤机理，为研究预防腐蚀损伤的新工艺和新技术提供理论基础。腐蚀科学是一门综合性的学科，在腐蚀过程中伴有电化学、生物化学、力学、摩擦学、物理学和物理冶金学等多种学科的综合作用，这些作用或过程都会在被腐蚀的金属表面或内部留下痕迹，用材料表征的方法，寻找这些痕迹，观察研究它们的特性和规律，一方面可以使我们准确地判断腐蚀的性质，另一方面可以用来论证、完善或修正已提出来的腐蚀机理，甚至根据材料损伤表征成果，提出新的腐蚀机理。

本书是在作者40余年的工作中所积累的科研与实验资料的基础上编写出来的，是一本有关金属材料腐蚀损伤的基础性著作。作者尝试着把彩色金相技术应用在失效分析中，取得了满意的效果，并观察到用黑白金相无法看到的一些效果。在腐蚀样品的电镜观察中，发现了一些新的现象。例如，在空泡腐蚀样品的扫描电镜和透射电镜观察中，作者观察到微孔和熔化现象；在对不锈钢空泡腐蚀样品的透射电镜分析中，观察到蚀坑的表面有铁的非晶态、纳米晶、马氏体和位错网等一些特殊的组织形态，这充分说明在空蚀过程中表面产生熔化现象，非晶态是熔化金属淬火形成的；在空蚀过程中表面形貌变化的观察中作者还观察到一种特有的扇状花样，是由冲击辐射波形成的破坏痕迹，这就为空泡腐蚀的冲击波理论和微射流理论提供了实验证据。在对发生了冲刷腐蚀的船用紫铜海水冷却管的高倍扫描电镜和透射电镜观察中，在冲刷腐蚀坑表面观察到纳米颗粒的形貌特征，在表面层内出现了纳米晶带，说明在冲刷过程中沙粒或金属碎屑对金属的冲击产生足以使铜熔化的高

温, 在外来物与紫铜之间形成极薄的一层铜的熔化带, 在流水和紫铜基体的急速冷却下, 形成了纳米晶。在空蚀表面观察到熔化现象并以极高的冷速 ($10^9\text{ }^\circ\text{C/s} \sim 10^{11}\text{ }^\circ\text{C/s}$) 形成非晶膜和其他相变与变形等现象。这对于冲刷腐蚀机理和空蚀机理的研究, 具有举足轻重的作用。上面所述的观察结果迄今为止在国内外文献中尚不多见。总之在本书中, 用扫描电镜和透射电镜观察等所发现的类似的一些鲜为人知的现象几乎在每个专题(章)里都有, 此处不一一列举。作者写本书的目的, 就是把这些观察和研究的成果奉献给从事材料科学和腐蚀科学的同仁, 以期对我国的腐蚀科学和腐蚀工程的发展做一点微薄的贡献。相信本书对从事材料科学和材料工程的科技工作者和从事腐蚀与防护工作的工程技术人员定能有所裨益。

本书的编写得到博士生导师孙建科和马玉璞研究员、高灵清研究员、博士生导师吴建华研究员和博士生导师许立坤研究员等的大力支持和帮助。许立坤研究员和张海峰高级工程师还编写了本书的第13章。我所检测与分析中心的张海峰、张永辉、杨之勇、侯世忠、张智强等高级工程师, 王春芬、郭海霞、张金民和李雪峰工程师, 以及海洋腐蚀与防护国防科技重点实验室的隋永强、姜丽娜工程师、阎永贵博士与钱建华同志, 和青岛双瑞防腐防污工程有限公司的韩振宇等协助完成了后期部分实验工作或参与稿件素材的编写整理等工作; 叶宏德、李治亚和张亚军高级工程师以及梁健、张新耀等同志也都对本书提供过实验帮助; 刘大扬、李文军、金晓红研究员以及赵九夷高级工程师等, 也提供了部分照片和相关资料, 金晓红研究员还协助修改了海生物污损一节; 李德勤、王东林和王秋云等一些老的合作伙伴也都曾对本书的前期工作提供过帮助。书稿完成后, 高灵清、吴建华和许立坤三位研究员审阅了全书或有关章节, 高灵清研究员还提出许多具体的修改意见。

在本书所需的试验工作中, 曾得到沈阳金属所、河南科技大学、北京钢铁研究总院结构钢研究所、故宫博物院古陶瓷研究所和苏州有色金属研究设计院等单位电镜实验室的帮助; EDAX公司的雷运涛博士协助编写和修改了EBSD一节, KEYENCE公司协助完成光学扫描显微镜的试验工作。

在此作者向对本书做出过贡献的所有人士和有关单位表示衷心的感谢!

由于作者的能力和水平有限, 书中难免有缺点和错误, 希望广大读者批评指正。

编著者
2008年3月

目录

Contents

第 1 章 绪论	001
1.1 金属材料的腐蚀	001
1.2 金属腐蚀显微组织研究方法	002
1.2.1 光学显微术	002
1.2.2 扫描电子显微镜 (SEM)	012
1.2.3 X 射线能谱仪 (EDS)	020
1.2.4 背散射电子衍射 (EBSD)	022
1.2.5 表面分析技术	028
1.2.6 扫描探针显微镜 (SPM)	033
1.2.7 拉曼光谱和红外光谱	034
1.3 金属腐蚀失效的分析程序	035
1.3.1 对程序中要点的说明	035
1.3.2 腐蚀产物分析	037
附录	040
附录 1.1 本书所使用的彩色金相侵蚀方法表	040
附录 1.2 常用断口化学清洗剂表	041
附录 1.3 常用清洗断口的电解液表	042
参考文献	042
第 2 章 大气腐蚀	045
2.1 大气 (氧) 腐蚀问题	045
2.2 大气腐蚀的分类	045
2.3 金属大气腐蚀机理	046
2.3.1 钢在大气中的腐蚀机理	046
2.3.2 铜的大气腐蚀	049
2.3.3 铝及其铝合金的大气腐蚀 - 剥蚀	049
2.4 大气腐蚀图谱	050
2.4.1 钢铁的大气腐蚀	050
2.4.2 铜合金的大气腐蚀	054

2.4.3 铝合金的剥蚀	061
参考文献	072
第3章 金属的液态金属腐蚀	073
3.1 液体金属腐蚀	073
3.2 液体金属腐蚀机理	073
3.3 高温合金的液态锂腐蚀图谱	074
3.3.1 Ni-37%Cr-11%Al-1%Y 高温合金在液态锂中的腐蚀	074
3.3.2 高温合金 GH3030 (GH30) 在液态锂中的腐蚀	075
3.3.3 高温合金 GH4037 (GH37) 在液态锂中的腐蚀	077
3.3.4 K438 高温合金在液态锂中的腐蚀	079
3.3.5 高温合金 GH4049 (GH49) 在液态锂中的腐蚀	079
参考文献	080
第4章 微生物腐蚀与海洋生物污损	081
4.1 微生物	081
4.2 微生物腐蚀的机理	084
4.2.1 微生物膜的形成	084
4.2.2 酸的形成	087
4.2.3 沉积膜下的腐蚀	087
4.2.4 腐蚀产物中合金元素化合价态变化	089
4.3 海生物污损	094
4.4 部分船舶材料微生物腐蚀形貌图谱	094
4.4.1 铝青铜	094
4.4.2 CrMoV 奥氏体不锈钢	095
4.4.3 部分船用材料的硫酸盐还原菌 (SRB) 腐蚀形貌	099
4.5 海生物污损图谱	113
参考文献	119
第5章 冲刷腐蚀 (冲蚀)	121
5.1 冲刷腐蚀概述	121
5.2 冲刷腐蚀的机理	122
5.3 冲蚀坑内表面纳米晶	124
5.4 冲刷腐蚀的影响因素	126
5.5 金属冲刷腐蚀图谱	127
5.5.1 铜合金的冲刷腐蚀	127
5.5.2 钢的冲刷腐蚀	129
5.5.3 船用海水冷却系统紫铜管道的冲刷腐蚀	131
参考文献	141
第6章 脱成分腐蚀	143
6.1 脱成分腐蚀现象	143

6.2	脱成分腐蚀机理	143
6.3	脱成分腐蚀图谱	145
6.3.1	紫铜管黄铜补焊焊缝的脱锌腐蚀	145
6.3.2	船用 B30 铜镍合金管的脱成分腐蚀	150
6.3.3	船用冷却系统黄铜管的脱成分腐蚀	152
6.3.4	Mn-Cu 阻尼合金的脱成分腐蚀	153
6.3.5	铜合金在其他工业领域的脱成分腐蚀	153
	参考文献	154
第 7 章	空泡腐蚀 (空蚀)	155
7.1	空泡腐蚀概述	155
7.2	空泡腐蚀的一般规律	156
7.3	空泡腐蚀机理与冲击表面的形貌	157
7.3.1	空泡腐蚀机理	157
7.3.2	空泡腐蚀表面的形貌	160
7.3.3	抗空泡腐蚀材料的选材原则	161
7.4	相关材料空泡腐蚀图谱	161
7.4.1	铜合金磁致伸缩空泡腐蚀损伤过程观察	161
7.4.2	转盘空泡腐蚀试验	167
7.4.3	水下喷射空泡腐蚀试验样品的电镜观察	171
7.4.4	空泡腐蚀样品横截面一些特殊现象	174
7.4.5	空泡腐蚀表面的透射电镜观察: 非晶与纳米晶	177
	参考文献	184
第 8 章	金属材料的氢损伤	185
8.1	金属的氢损伤	185
8.2	氢损伤的类型	186
8.3	金属中氢的来源	189
8.4	氢损伤机理及应力对其影响	191
8.4.1	氢损伤机理	191
8.4.2	应力对氢脆的影响	193
8.5	几种材料的氢损伤说明	193
8.6	氢脆断口特征	195
8.7	材料氢损伤图谱	197
8.7.1	氢脆 (白) 点的断口特征	197
8.7.2	船体钢焊缝中的白点断口	199
8.7.3	电镀件氢脆	202
8.7.4	钢制品的延迟开裂	205
8.7.5	铜合金氢损伤断口	206
8.7.6	双相钢的氢损伤	207
8.7.7	钛化氢引起的氢脆	210

8.8 与环境断裂相关的断裂学	213
参考文献	215
第 9 章 应力腐蚀开裂	217
9.1 应力腐蚀开裂	217
9.2 应力腐蚀开裂的机理	218
9.2.1 应力腐蚀开裂裂纹萌生机理	218
9.2.2 应力腐蚀开裂裂纹的长大(扩展)机理	219
9.3 应力腐蚀开裂的类型	222
9.4 应力腐蚀开裂图谱	222
9.4.1 不锈钢的应力腐蚀开裂	222
9.4.2 合金钢的应力腐蚀开裂	229
9.4.3 钛合金的应力腐蚀开裂	231
9.4.4 铜合金的应力腐蚀开裂	233
参考文献	235
第 10 章 腐蚀疲劳	237
10.1 腐蚀疲劳概述	237
10.2 腐蚀疲劳裂纹的萌生条件与萌生机理	238
10.3 腐蚀疲劳裂纹扩展机理	240
10.4 腐蚀疲劳的特征	240
10.4.1 腐蚀疲劳断口的特征	240
10.4.2 腐蚀疲劳与应力腐蚀的关系	241
10.5 腐蚀疲劳断口图谱	242
10.5.1 Fe-6Ni 船用钢等的腐蚀疲劳断口	242
10.5.2 黄铜等合金的腐蚀疲劳断口	244
10.5.3 不锈钢波纹管的腐蚀疲劳	245
10.5.4 高强耐蚀铜合金的腐蚀疲劳断口	249
10.5.5 钛合金的腐蚀疲劳	251
参考文献	252
第 11 章 金属引起的材料脆性	253
11.1 现象简介	253
11.2 引起材料脆性的环境	253
11.3 脆化源	254
11.4 液态金属和固态金属致金属材料脆性的机理	254
11.4.1 液态金属致脆性的机理	254
11.4.2 固态金属致脆的机理	257
11.5 对脆性敏感性的影响因素	257
11.5.1 合金强度、成分和显微组织	257
11.5.2 温度	257

11.5.3	样品几何尺寸、应力模式和应变速率	257
11.6	LME/SMIE 的金相和断口表征	257
11.7	断后脆性金属的检测	258
11.8	MIE 与 HE/SCC 之间的区别	258
11.9	固态金属致脆和液态金属致脆案例图谱	259
11.9.1	不锈钢的铜钎焊裂纹	259
11.9.2	天然气管道的铜脆	262
11.9.3	锌脆	263
11.9.4	铝引起 GH625 合金波纹管开裂	265
11.9.5	镉引起钛合金的脆性	265
11.9.6	非金属元素引起的脆性	268
	参考文献	270
第 12 章	表面膜和表面涂层及其损伤	271
12.1	表面处理膜和表面涂层	271
12.1.1	非晶膜 (Ni-P 镀层)	272
12.1.2	电镀膜	274
12.1.3	常温磷化膜 (磷化处理膜)	276
12.1.4	钢的高分子镀膜	277
12.2	表面处理膜的损伤图谱	278
	参考文献	284
第 13 章	金属氧化物阳极的组织与损伤	285
13.1	金属氧化物阳极微观形貌的基本特征	285
13.1.1	钛基体的微观形貌	285
13.1.2	金属氧化物阳极的微观结构	287
13.1.3	纳米氧化物阳极的微观结构	289
13.2	金属氧化物阳极失效图谱	292
13.2.1	金属氧化物阳极强化电解失效机理及形貌分析	292
13.2.2	金属氧化物阳极正反交替电解失效后的形貌	295
	参考文献	297
第 14 章	点蚀、海水腐蚀及其他	299
14.1	点蚀	299
14.1.1	金属的点蚀	299
14.1.2	点蚀机理	299
14.2	海洋环境腐蚀	302
14.2.1	海水腐蚀机理概述	303
14.2.2	海水腐蚀的特点	303
14.2.3	海水腐蚀形貌	304
14.3	其他腐蚀产物形貌	312

14.3.1	保护材料的转移	312
14.3.2	B30 冷凝器管上的腐蚀产物	312
14.3.3	室内腐蚀实验	313
14.4	钢海水腐蚀产物结构与组成	318
	参考文献	320
第 15 章	失效分析案例	321
15.1	烟气轮机波纹管失效分析	321
15.1.1	波纹管的工作条件和失效情况	321
15.1.2	分析结果	322
15.1.3	验证试验	325
15.1.4	讨论	325
15.1.5	结论	326
15.2	石油气田集气弯管裂纹分析	326
15.2.1	来样情况	326
15.2.2	分析结果	326
15.2.3	结论	329
15.3	铝标牌熔化引起波纹管开裂	329
15.3.1	背景材料	329
15.3.2	金相分析	330
15.3.3	彩色金相分析	330
15.3.4	能谱成分分析	332
15.3.5	结论	333
15.4	海水泵电机轴失效分析	333
15.4.1	失效件的背景材料	333
15.4.2	失效件的分析检验	334
15.4.3	结果分析与讨论	338
15.4.4	结论	339
15.4.5	建议	339
15.5	醋酸精馏塔钛过滤板腐蚀失效	339
15.5.1	情况简介	339
15.5.2	检验分析	339
15.5.3	结果分析	344
15.5.4	结论与建议	346
	参考文献	346

第 1 章 绪 论

1.1 金属材料的腐蚀

金属的腐蚀问题由来已久，从金属材料投入使用的时候起，就产生了腐蚀问题。随着生产实践和科学技术的发展，人们发现，非金属材料、陶瓷材料和玻璃等也产生腐蚀。从一般意义上来说，金属的腐蚀可分为两大类：均匀腐蚀（也称全面腐蚀）和局部腐蚀。评定材料腐蚀速度有许多方法，常用的是以每年减薄多少毫米（mm/年）或每小时每平方米克（g/（h·m²））的失重来度量，例如，腐蚀速度 <0.127mm/年的为 A 级耐蚀材料；>0.127mm/年的为 C 级，属于不耐蚀材料；介于两者之间者为 B 级。根据情况可确定为可用材料等等^[1]。

有关腐蚀的分类方法有：①按照腐蚀形态分类法，如点蚀、晶间腐蚀等等；②按腐蚀机理分类法；③按腐蚀环境分类等，如自然环境里的腐蚀、工业环境里的腐蚀以及生物环境下的腐蚀等。

按照 ASM 的定义，腐蚀分为五大类^[2]：①均匀腐蚀；②局部腐蚀；③冶金质量引起的腐蚀；④环境引起的开裂；⑤微生物引起的腐蚀。每一类腐蚀中还分有一些亚类。如，局部腐蚀可分为：点蚀、缝隙腐蚀（含丝状腐蚀）、电偶腐蚀、晶间腐蚀（含刀状腐蚀）等；环境引起的腐蚀（含应力腐蚀开裂、硫化物应力腐蚀开裂、氢脆、腐蚀疲劳和磨蚀等，而在磨蚀中又包括微动腐蚀、冲刷腐蚀和空泡腐蚀等）等。

实际上，在工程实践中所出现的腐蚀，常常是几种腐蚀形式同时出现，例如在微生物沉积物下金属的腐蚀，同时可能伴有脱成分腐蚀。微生物腐蚀所析出的氢，还可能引起金属发生氢脆，诱发腐蚀疲劳等。

但是由于产生腐蚀的原因和影响因素很多，可能出现复杂的腐蚀过程。例如由于冶金因素、机械作用因素、环境因素，或者是由于机械和环境等多种因素共同作用而引起的腐蚀等，表 1-1 的分类方法更能涵盖这些因素。

表 1-1 腐蚀损伤分类表

类别序号	类别名称	亚 类
1	均匀腐蚀	大气腐蚀；电偶腐蚀；杂散电流腐蚀；熔盐腐蚀；液体金属腐蚀；高温腐蚀（氧化，硫化，碳化及其他）
2	局部腐蚀	线（刀）状腐蚀；缝隙腐蚀；点蚀
3	冶金因素引起的腐蚀	晶间腐蚀；脱成分腐蚀
4	机械作用引起材质磨损	水滴冲击；微动磨损；空泡腐蚀；剥蚀（冲刷腐蚀）
5	环境引起开裂	应力腐蚀开裂（SCC）；氢损伤；液体金属致脆 ^① ；固体金属致脆 ^②

(续)

类别序号	类别名称	亚 类
6	机械与环境引起的损伤	腐蚀疲劳
7	微生物与污损引起的腐蚀	均匀的微生物腐蚀；局部微生物腐蚀；海洋生物引起的腐蚀

① 正常韧性金属被液体金属膜覆盖后并在拉应力作用下产生的脆性断裂；
② 在某些液体金属与金属的配伍（脆化偶）中，在低于固体的熔点发生的固体金属脆性断裂

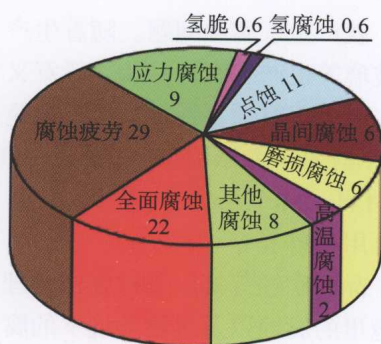


图 1-1 美国 1968 年—1971 年腐蚀事故调查统计图 (%) [1]

在实际工作中，碰到最多的腐蚀损伤事故依次是腐蚀疲劳、均匀腐蚀和应力腐蚀开裂（图 1-1），占总事故数的 70%。从全面腐蚀和局部腐蚀来看，局部腐蚀显得更为突出，占总案例数的 78%。这就是本书把关注的重点放在局部腐蚀的原因。

在本书里按照作者所积累的资料，总结出 14 个腐蚀专题予以论述（详见目录）。

在金属腐蚀损伤微观组织研究中，经常用的主要有光学金相显微镜（含体视显微镜）、扫描电子显微镜、透射电子显微镜、位向成像显微镜、俄歇电子能谱仪、光电子能谱仪、电子探针（能谱和波谱）、扫描探针显微镜（SPM，

如原子力显微镜）、X 射线衍射仪和拉曼光谱等分析仪器及其相关分析技术（如彩色金相等）。为了便于理解图谱中照片所表征出来的信息，本章对上述分析仪器和分析技术作以简介。

1.2 金属腐蚀显微组织研究方法

1.2.1 光学显微术

1.2.1.1 显微镜的组成

显微镜（含光学和电子显微镜）是由光源、物镜、投影镜和目镜或观察屏（显示屏）等部分组成，图 1-2 是显微镜的成像原理。

现代光学显微镜一般都有两部分组成，即光学显微镜与相关附件、计算机和相关软件（如定量分析、图像处理系统等）及输出部分。图 1-3 是现代光学显微镜的系统组成示意图。

在材料的金相分析中，经常使用明场和暗场技术。但是偏光、相衬、微分干涉都是不可缺少的组成部分，特别是在彩色金相分析中发挥重要作用。

1. 偏振光显微技术

在普通大型显微镜的光路中加入附件起偏振镜和检偏振镜后，就实现了偏光显微镜分析技术（图 1-4（a））。两个镜片可从光的振动方向完全平行（0°）到互相垂直（90°，即正交位置：

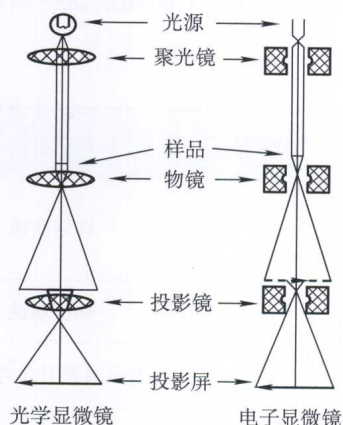


图 1-2 光学显微镜与电子显微镜光路示意图

完全消光)之间改变,观察物像对于光的反应。起偏振镜的作用是将垂直传播方向上均匀径向振动的自然光(灯光)变为在某一方向上的偏振光;检偏振镜则是分辨被物像反射出来的偏振光的状态。用白光照明,再加入灵敏色片(576nm 光程差的全波片)使各种波长的色光由于位向差不同,而成为不同偏振状态的偏振光,经过检偏振镜后,可看到偏振光的干涉色,得到良好的色彩衬度。偏光显微术不仅用来鉴定夹杂物等一些特殊相,也是获得彩色金相的重要方法。

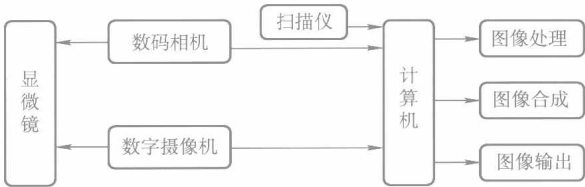


图 1-3 光学显微镜的组成示意图

2. 微分干涉显微术 (DIC)

作为微分干涉显微术的主要附件有:起偏镜(将一束细小的自然光变为直线偏振光),渥拉斯顿棱镜(把偏振光再分为振动面相互垂直而又分开很小角度的两束光,一般小于 0.5° ,故称微差光束),全波片(用于提高干涉色的序级,增加色彩饱和度)和检偏镜。检偏镜的作用:再使两束光中让振动方向平行于检偏镜偏振面的分量通过,得到在同一振动面上但分开了很小角度的两束相干光波(图 1-4 (b)),在投入高低不平的表面反射回来汇聚于一点时,由于光程差产生干涉。DIC 可鉴别 30nm ~ 300nm 的高度差,特别适合于马氏体浮凸等观察,还可以产生颜色鲜明的彩色衬度(图 1-5),在彩色金相学中很有用。

偏光技术和 DIC 技术对样品制备要求严格,一般要采用电解抛光制样才行。

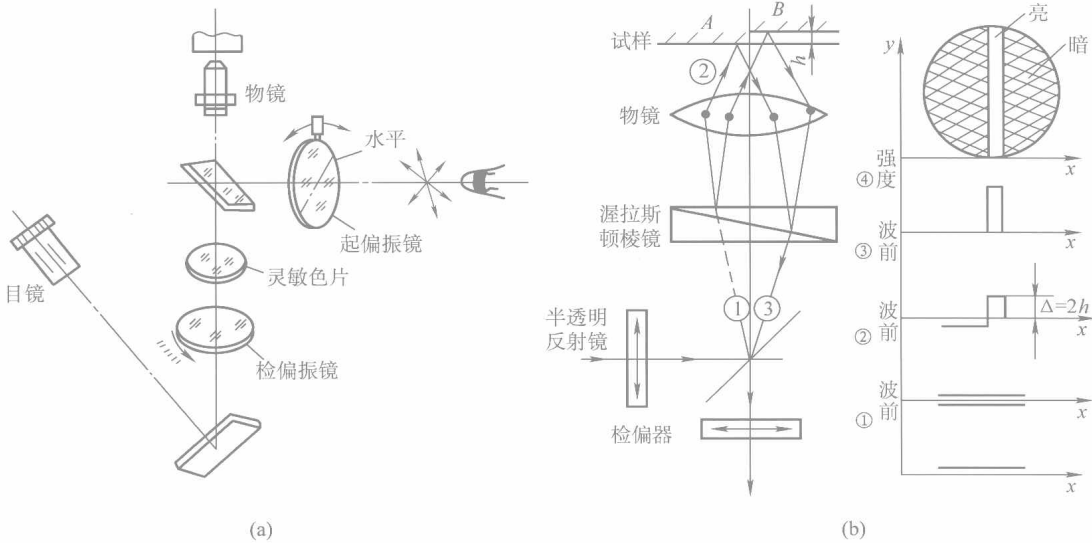


图 1-4 偏光显微术和微分干涉显微术 (DIC) 的示意图。^[3,4]

(a) 偏振光装置示意图; (b) DIC 产生示意图