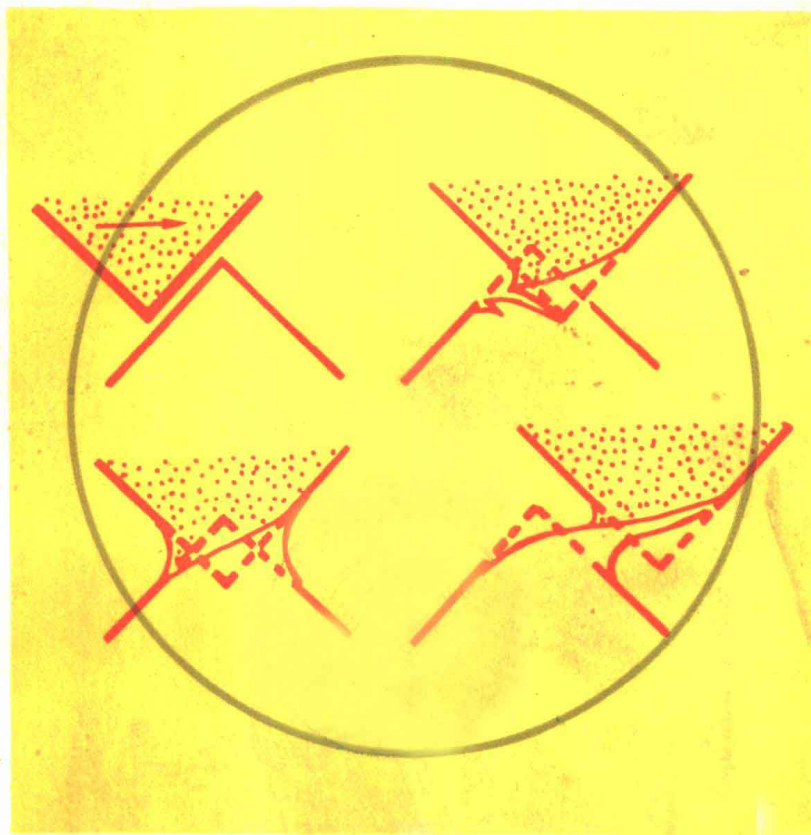


915026

材料耐磨抗蚀及其表面技术丛书



扫描电镜分析技术与应用

材料耐磨抗蚀及其表面技术丛书 编委会主编

扫描电镜分析技术与应用

材料耐磨抗蚀及其表面技术丛书 编委会主编

廖乾初 蓝芬兰 编著



机械工业出版社

内 容 简 介

本书是根据科研实践,从扫描电镜分析技术的最新进展出发,系统地阐述了扫描电镜分析技术的应用原理及其在耐磨抗蚀研究中的应用。全书共分七章,第一章扫描电镜原理和结构概述;第二章扫描电子象的衬度效应来源;第三章扫描电镜的立体分析技术;第四章扫描电镜的结晶学分析技术;第五章扫描电镜的成份分析技术;第六章扫描电镜在摩擦磨损学科方面的应用;第七章扫描电镜在腐蚀学科方面的应用。本书内容新颖,是一本有关扫描电镜及应用方面的入门读物。书中还提供了有关阐明基本磨损机制和环境断裂机制的典型扫描电镜照片,可在进行图谱分析时参考。

本书可供从事扫描电镜、材料科学和表面失效分析等工作的研究人员、工程技术人员及大专院校有关专业师生参考。

扫描电镜分析技术与应用

材料耐磨抗蚀及其表面技术丛书 编委会主编

廖乾初 蓝芬兰 编著

*

责任编辑: 常燕宾 版式设计: 霍永明

封面设计: 刘代 责任校对: 熊天荣

责任印制: 王国光

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092¹/₃₂·印张 13¹/₄·字数 289 千字

1990年3月北京第一版·1990年3月北京第一次印刷

印数001—986·定价: 10.90元

*

ISBN 7-111-01660-2/TG·429

各分册书名

第一分册 材料耐磨抗蚀及其表面技术概论

材料磨损部分

第二分册 材料的磨料磨损

第三分册 材料的粘着磨损与疲劳磨损

第四分册 材料的冲蚀磨损与微动磨损

表面处理技术部分

第五分册 化学热处理新工艺

第六分册 激光表面强化

第七分册 离子束表面强化

表面分析技术部分

第八分册 扫描电镜分析技术与应用^①

第九分册 电子能谱及离子谱技术与应用^②

第十分册 铁谱技术及在磨损研究中的应用^③

① 第六分册原书名为“自熔合金表面强化及激光表面强化”，现此书取消自熔合金部分，只保留激光强化部分，故书名变动。

② 第八分册原书名为“扫描电子显微术分析”，根据现有内容变动了书名。

③ 第九分册原书名为“表面分析的电子能谱及离子质谱技术”，根据现有内容，变动了书名。

④ 第十分册原书名为“铁谱分析技术”，根据现有内容变动了书名。

前 言

在国民经济和国防建设中，各种机械产品的零件由于磨损与腐蚀引起的早期失效与报废，从而造成能源与材料的消耗是十分惊人的。各主要工业国家都有这方面的调查统计。如美国每年由于摩擦磨损和腐蚀造成的损失各约 1,000 多亿美元，各占国民经济总产值的 4%。我国据有关部门的不完全统计，每年摩擦学损失达 400 亿元，腐蚀方面的损失也将近 200 亿元。同时，材料的磨损与腐蚀也是影响近代机械产品的性能质量和寿命，从而影响其竞争能力的重要问题。作为机械产品的设计原则，目前已从单纯的强度设计发展到针对材料强度、磨损与腐蚀三大失效原因的综合设计。因此，解决材料的耐磨与抗蚀问题，已受到国内外机械设计与制造部门、材料研究与生产部门的普遍重视。

材料的磨损与腐蚀是个相当复杂的边缘学科，它受到一系列因素的影响。解决的途径应从分析失效的原因出发，从调整或改变工况条件，改善构件设计，合理选择材料，改进工艺措施和进行表面防护等各个方面，由整个系统角度去确定解决方案。原则是从实际出发且经济有效。为此需要通过近代研究方法，弄清系统中各因素的相关关系，即弄清楚磨损与腐蚀的基本规律和失效机理，以便正确指导这方面的工程实践。因此，中国机械工程学会材料学会于 1982 年决定成立“材料耐磨抗蚀及其表面技术委员会”，其任务就是要推动综合研究解决材料耐磨抗蚀问题的学术交流活动，为节约

能源与材料消耗，提高机械产品质量发挥积极作用。为了尽快地，广泛地把这方面的基本理论知识和研究成果介绍给广大的有关工程技术人员，使其能在生产及科研实践中应用并收到实效，为此，学会决定编写一套“材料耐磨抗蚀及其表面技术”丛书，由机械工业出版社出版，为此成立了丛书编委会及顾问组。第一批丛书包括丛书概论等十个分册（分册名称附后），每册大约15~25万字左右。本套丛书共分四大部分，第一部分材料的摩擦与磨损；第二部分材料的腐蚀与防护；第三部分材料表面强化；第四部分材料的表面分析。

材料的腐蚀与防护只在第一分册概论中作一般的介绍，详细的论述将待再版时继续补充。

本丛书选材力求先进、全面，尽量作到在内容上具有一定理论深度，概念准确。为避免与其它专业丛书重复，本书力求突出材料的耐磨与抗蚀，重点放在应用上，同时内容通俗易懂，便于自学掌握。

由于作者知识水平有限，经验阅历不多，书中缺点错误在所难免，恳请广大读者和专家提出批评指教。

材料耐磨抗蚀及其表面技术丛书编委会

1984.11

第八分册 扫描电镜分析技术与应用共分七章。第一至第四章由廖乾初、蓝芬兰合编，第五至第七章由廖乾初编写，全书由廖乾初统稿。

目 录

引言	1
第一章 扫描电镜原理和结构概述	3
一、显微镜的发展现状	3
二、入射电子与物质相互作用	6
(一) 散射现象	7
(二) 入射电子和原子核的相互作用	9
(三) 入射电子和核外电子的相互作用	11
(四) 入射电子和晶格相互作用	17
(五) 入射电子和晶体中电子云相互作用	17
(六) 周期脉冲电子入射的电声效应	19
(七) 总结	21
三、工作原理和仪器结构	23
(一) 工作原理	23
(二) 真空系统	28
(三) 电子枪系统	29
(四) 透镜系统	30
(五) 扫描控制系统	34
(六) 样品室	36
(七) 检测放大系统	37
(八) 信号处理和成象显示	40
四、扫描电镜的成象特点和性质	51
(一) 成象的等效几何关系	51
(二) 透视学上的伸长缩短效应	53

(三) 逐点成象和象元的概念	54
五、构成扫描图象质量的因素和控制	56
(一) 象元的数目	56
(二) 信噪比	57
(三) 分辨率	59
(四) 焦深	63
(五) 反差	64
六、扫描电镜的特点和分析模式	66
(一) 特点	66
(二) 分析模式	69
七、近代扫描电镜的发展和展望	71
(一) 高分辨场发射扫描电镜	72
(二) 高分辨分析扫描电镜	73
(三) 高分辨低压扫描电镜 (LVSEM)	73
(四) 数字扫描电镜 (DSEM)	74
(五) 频闪扫描电镜 (Strobo-SEM)	75
(六) 环境扫描电镜 (ESEM)	76
(七) 应用技术	76
(八) 展望	76
参考文献	78
第二章 扫描电子象的衬度效应来源	80
一、概述	80
二、基本关系和定义	81
(一) 电子信息强度与人射电子强度的关系	81
(二) 二次电子系数和背反射电子系数	84
(三) 影响二次电子系数的因素	86
(四) 影响背反射电子系数的因素	89

(五) 描述信号电流的基本关系式 91

三、二次电子象 93

 (一) 基本定义和性质 93

 (二) 几何衬度 96

 (三) 电压 (或电场) 衬度 99

 (四) 磁畴衬度 (第一类磁衬度) 101

四、背反射电子象 103

 (一) 基本定义和性质 103

 (二) 几何衬度 105

 (三) 物质衬度 (原子序数衬度) 108

 (四) 磁畴衬度 (第二类磁衬度) 110

 (五) 结晶学位向衬度 112

五、其它成象模式 114

 (一) 试样电流象 114

 (二) 感生电流象 115

 (三) 低损失电子象 116

 (四) 阴极发光象 117

六、总结 119

参考文献 121

第三章 扫描电镜的立体分析技术 122

 一、概述 122

 二、立体摄影术原理 123

 (一) 体视效应 123

 (二) 拍摄立体对照片的方法 124

 (三) 注意事项 127

 三、立体对照片的复合观察 129

 (一) 基本原则 129

(二) 在平移试样法的情况下	130
(三) 在倾斜试样法的情况下	131
四、立体几何参数分析技术	132
(一) 基本原理	132
(二) 平移试样法	134
(三) 倾斜试样法	136
五、总结和展望	142
参考文献	143
第四章 扫描电镜的结晶学分析技术	145
一、概述	145
二、电子通道花样分析技术 (ECP)	146
(一) 电子通道效应现象	146
(二) 电子通道效应的理论解释	150
(三) 获得电子通道花样的电子光学条件	152
(四) 电子通道花样的测量和分析	156
(五) 应用	160
三、电子背散射花样分析技术 (EBSP)	162
(一) 电子背散射角分布的各向异性	162
(二) 获得电子背散射花样的仪器条件	165
(三) 电子背散射花样的结晶学注释	166
(四) 应用	168
四、反射电子衍射技术 (RED)	168
(一) 掠入射电子的表面衍射现象	168
(二) 获得反射电子衍射的仪器条件	169
(三) 反射电子衍射花样的分析	170
(四) 应用	170
五、X 射线柯塞尔花样分析技术 (XKP)	171

(一) 晶体对发散 X 射线束的衍射效应	171
(二) 获得 X 射线柯塞尔花样的实验条件	173
(三) X 射线柯塞尔花样的测量和分析	174
(四) 应用	176
六、各种结晶学分析技术的评价	176
参考文献	178
第五章 扫描电镜的成分分析技术	180
一、概述	180
二、X 射线波谱分析 (WDS)	182
(一) 基本原理	182
(二) X 射线波谱分析系统的结构和组成	183
(三) 分析模式	187
(四) 分析试验中一些问题	189
三、X 射线能谱分析 (EDS)	196
(一) 基本原理	196
(二) X 射线能谱分析系统的结构和组成	199
(三) 分析试验中一些问题	206
四、X 射线荧光谱分析 (XFS)	214
(一) 基本原理和分析特点	214
(二) 在样品室中 X 射线源的设计	216
(三) 最佳工作条件的选择	217
(四) 分析结果实例	218
五、应用	220
参考文献	221
第六章 扫描电镜在摩擦磨损学科研究方面的应用	222
一、概述	222
二、有关实验技术	224

(一) 二次电子象的观察方法	224
(二) Y 调制象的应用	229
(三) 磨损表面的保存和清洗	232
(四) 磨屑的收集、分散和固定方法	233
(五) 斜剖面技术	237
(六) 表面轮廓的定性分析和定量测量	243
(七) 表面的元素组成和价态分析	248
三、扫描电镜在粘着磨损问题中的应用	252
(一) 有关基本概念	252
(二) 粘着磨损的影响因素	256
(三) 粘着磨损的显微分析	258
四、扫描电镜在磨料磨损问题中的应用	262
(一) 基本概念	262
(二) 磨料磨损的影响因素	266
(三) 磨料磨损表面的微观形态和分析	267
五、扫描电镜在疲劳磨损问题中的应用	276
(一) 基本概念	276
(二) 疲劳磨损的影响因素	281
(三) 疲劳磨损的表面形态特征和分析	283
六、扫描电镜在机械零件磨损分析方面的应用	290
(一) 在钻头磨损分析中的应用	290
(二) 在车刀磨损分析中的应用	298
(三) 在轧辊磨损分析中的应用	307
七、在磨损失效分析方面的应用概要	315
参考文献	317
第七章 扫描电镜在腐蚀学科研究方面的应用	318
一、概述	318

二、有关实验技术	325
(一) 实物试样的表面处理技术	325
(二) 蚀坑分析技术	330
(三) 表面特征痕迹分析技术	341
(四) 断裂面的表面应变分析技术	346
三、分析晶间腐蚀	354
(一) 基本知识	354
(二) 晶间腐蚀的微观形态特征和分析	357
四、分析应力腐蚀断裂机制	360
(一) 有关基本知识	360
(二) 断口的形态特征和分析	367
五、分析氢致开裂机制	379
(一) 基本知识	379
(二) 断口的形态特征和分析	386
六、分析腐蚀疲劳断裂机制	397
(一) 基本知识	397
(二) 断口的形态特征和分析	403
参考文献	408

引 言

扫描电镜是一种多功能的表面分析显微镜，特别适宜于研究一些表面现象，如摩擦磨损和腐蚀等。目前，应用扫描电镜进行磨损和腐蚀研究的人员，由于专业性质不同而存在如下两种情况：或只熟悉扫描电镜分析技术；或只熟悉磨损和腐蚀专业本身知识。为了使有关研究人员在磨损和腐蚀问题的研究中得到深化，同时熟悉这两方面的专业知识是十分必要的。本分册是在这两方面专业知识间架设桥梁的一种尝试，因此，在取材内容上，应对这两方面专业知识的研究人员都有参考价值，为此，把全书分成两大部分。

本分册中第一部分系统地阐明了扫描电镜本身及其分析技术，并用尽可能少的篇幅去阐明有关扫描电镜的重要基础知识及其目前的发展动向，以便使不熟悉扫描电镜的专业人员，不必花太多的阅读时间即可掌握，而对扫描电镜的专业人员也能有所帮助。

本分册的第二部分约占全书篇幅的45%以上，并分成两章来阐明扫描电镜在磨损和腐蚀问题中的应用。为了使研究者更有效地发挥扫描电镜分析技术，并能带着明确的问题和研究目的去进行扫描电镜观察，故在叙述时采取如下次序：先介绍有关扫描电镜在磨损和腐蚀研究中最新发展的专门分析技术，以及对表面磨损和腐蚀形态特征进行解释时所要用到的有关磨损和腐蚀学科的较新基础知识，然后再从扫描电镜形态学分析的角度去阐述金属材料的磨损和腐蚀现

象。书中所引用的照片资料，除极个别外，均取自我们的研究工作，此外，在本书中所提供的有关阐明磨损和环境断裂机理的典型扫描电镜照片比其他文献资料更有系统。希望本书也能起图谱分析的作用。

第一章 扫描电镜原理和结构概述

一、显微镜的发展现状

为了了解和研究自然现象，通常第一步是用肉眼进行观察。但是，肉眼观察的能力是有限的，它能分开的最小距离一般只能达 0.2mm 左右。为了在微观、亚微观和原子尺度上去观察物质的几何形态与组织结构，就必须借助于一种观察仪器，把微观形貌放大几倍到几十万倍，以适应人眼的分辨能力，我们把这类仪器称为显微镜。最早制造的显微镜是光学显微镜，它以可见光作为照明源，其分辨率极限为 $0.2\mu\text{m}$ 。为了进一步改善显微镜的分辨率，在 50 年代又制造了以电子束为照明源的电子显微镜，目前其分辨率已达 $0.2\sim 0.3\text{nm}$ 的水平。

随着科学技术的进步，显微镜的类型与用途在不断更新和发展。但不管哪种类型显微镜，其工作原理是相同的，即采用某种照明源（或激发源），以一定方式照射或作用到被观察试样的表面上，并与被观察试样中的物质相互作用，发生各种物理效应，然后把各种物理效应所伴生的信息进行收集、处理，并放大成象，再用肉眼进行观察和照相记录。在近代的显微镜中，常用的照明源（或激发源）有光束（包括可见光、激光、和 X 光等）、电子束、离子束、声束、和电场等五种，相应的显微镜称为：光学显微镜、电子显微镜、离子显微镜、声子显微镜和场致发射显微镜等五大类。此

外, 根据照明源的性质和照射方式, 及在试样表面所产生各种物理效应、信息的性质和信息的相应放大方法不同, 又派生为若干种显微镜。关于近代各种显微镜的分类如表 1-1 所示。

表 1-1 近代显微镜的分类

照明源 (激发源)	照射 方式	物理效应	主要成象信息	显微镜名称	符号
光束	静止	反射或吸收	光子	光学显微镜	OM
	扫描	光声效应	声子	光声显微镜	SPAM
电子束	静止	透射或衍射	透射和衍射电子	普通透射电镜	OTEM
		透射或衍射	透射和衍射电子	高压透射电镜	HVEM
	扫描	透射或衍射	透射和衍射电子	扫描透射电镜	STEM
		散射和原子电离	二次电子	表面扫描电镜	SEM
		热弹性效应	声波	扫描电子声学显微镜	SEAM
离子束	扫描	溅射	二次离子	二次离子显微镜	SIMSM
声束	扫描	反射和透射	声波	扫描声学显微镜	SAM
		声光效应	光子	扫描声光显微镜	SLAM
电场	静止	场蒸发效应	正离子	场离子显微镜	FIM
	扫描	隧道效应	隧道电流	扫描隧道显微镜	STM

从表 1-1 可以看出, 如果以照明源照射试样的方式分, 又可以把显微镜分成两大类: 一类是采取静止方式照明