

研究生力学丛书

Mechanics Series for Graduate Students

材料力学行为 试验与分析 (第2版)

Test and Analysis on
Mechanical Behavior of Materials

王习术 著

Wang Xishu

清华大学出版社

研究生力学丛书

Mechanics Series for Graduate Students

材料力学行为 试验与分析 (第2版)

Test and Analysis on
Mechanical Behavior of Materials

王习术 著

Wang Xishu

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书介绍了固体材料力学行为试验研究方法,特别是轻金属、超高强度钢、“三明治”复合结构材料、导电高分子薄膜、金属膜-基结构和焊点结构等现代材料(advance materials)的多尺度力学行为检测与表征方法。对这些材料的微结构与损伤力学行为间的关系,通过先进的 SEM 原位研究手段,以大量图片和试验数据分析方法进行描述,结合材料加工工艺对力学行为的影响及其他因素进行了详尽的讨论。第 2 版在保留第 1 版大部分内容的基础上,新增加了纳米颗粒金属膜-基结构界面和表面的变形、裂纹萌生的检测与失效分析,以及实际焊点结构高周疲劳失效行为的 SEM 原位检测方法和有限元分析。增加的内容对 MEMS 和大规模集成电路板的失效模式、关键控制参数等的认识具有一定的参考价值。本书的最大特点是更关注材料小尺度条件下力学行为演化过程的 SEM 原位试验检测及其结果的定量表征。

本书可作为工程力学、材料学、航空工程、土木、水利、机械、化工、核能工程等专业的高年级本科生和研究生的高等材料力学课程辅助教材,也可作为科研及工程技术人员的参考书。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

材料力学行为试验与分析/王习术著.--2 版.--北京:清华大学出版社,2010.6
(研究生力学丛书)

ISBN 978-7-302-22435-8

I. ①材… II. ①王… III. ①材料力学—实验—研究生—教材 IV. ①TB301-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 066065 号

责任编辑:黎 强 赵从棉

责任校对:赵丽敏

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170×230 印 张:27 字 数:478 千字

版 次:2010 年 6 月第 2 版 印 次:2010 年 6 月第 1 次印刷

印 数:1~2500

定 价:45.00 元

产品编号:036422-01

第2版

前言

PREFACE

当今世界,自然科学与技术以前所未有的速度发展,特别是材料学科的发展尤其突出,一些与材料相关的交叉学科层出不穷。近年来,绿色环保材料、纳米材料、超高强度钢、导电高分子薄膜材料以及生物仿生材料等相关的新工艺、新理论、新实验方法、新观点、新现象不同程度地渗入到各个研究领域。特别值得注意的是,材料微结构的变化与力学行为间的关系越来越清楚地表明:材料小尺度力学性能、应力(应变)尺度效应以及微结构对材料破坏机理的贡献的定量研究已成为材料逆向设计最重要的一个环节。过去一些被认为难以解决的问题,随着科学技术和实验方法研究的发展,例如,呈现在人们眼前的小尺度下的材料微结构演化过程已经能够实时记录,使得认识材料复杂微结构在力场、温度场的演化规律,研究各向异性以及非连续性材料的力学性质、复杂宏、微观损伤机理以及材料跨尺度性能特征及其尺度效应已成为可能。

第2版在第1版的基础上有意识地弱化传统材料力学性能检测方法的叙述,加强了专题研究应用篇中的热门研究内容。第2版仍保留第1版的从试验中获取科学问题的基本研究思想,重点介绍固体材料微结构小尺度下力学行为演化中的失效模型和定量表征方法,目的是用大量试验内容启发读者如何从试验过程中寻找新现象,发现新问题,并根据对这些问题的认识撰写出相关科学论文。同时,第2版还对原小尺度下的铸造镁铝合金、含夹杂物超高强度钢的疲劳裂纹萌生与扩展规律及相关影响进行了补充,并将作者近年在SEM原位试验研究方法方面取得的最新成果进行了重点介绍,如纳米颗粒磁溅射金属薄膜-基体结构的SEM原位失效特性研究,探索薄膜-基体结构及薄膜内的失效力表征方法,实际焊点结构的高周疲劳裂纹萌生与扩展试验方法和有限元分析模型。此外,对因辊压工艺造成的“三明治”复合结构板材不同力学行为诸多问

题也展开了讨论。

对近年出现的新型材料——导电高分子薄膜材料,不仅介绍了数微米薄膜力学性能检测方法,得到了导电高分子薄膜弹性模量的尺度临界参考值,而且还介绍了研究薄膜表面微结构与薄膜制备工艺以及薄膜强度、韧性间关系的一种分析方法。

在生物材料力学行为一章中主要介绍了蜻蜓翅膀微结构对其力学性能影响以及初步的仿生分析;对猴头上颚矫正牵引中新生骨质强度与牵引的关系进行了讨论;此外,对苍蝇为什么能在光滑的玻璃上快速行走及吸附机理等问题,通过苍蝇腿尖局部微结构的实验研究进行了回答,同时为了讨论吸附机理,还对“爬墙虎”植物吸盘的细胞微结构进行了直接观测和分析。

这些研究结果涉及固体材料力学行为宏观检测和小尺度下的性能表征方法。从工程实际应用 to 显微损伤机理评价,从绿色环保材料、超高强度钢、“三明治”复合结构材料、导电高分子膜材料到金属膜-基界面与表面损伤行为特征、生物材料的微结构与力学行为等都进行了检测与讨论。通过具体实验案例,侧重介绍试验过程与数据的模型化分析。

固体材料力学行为的 SEM 原位研究及显微结构在外场力(热)作用下的演化研究已成为材料科学与实验力学研究的重要交叉内容,越来越受到关注,其研究结果将成为材料改性和逆向设计的重要依据。

本书的主要内容是在科技部“973”(2004CB619304,2007CB936803)、国家自然科学基金(50571047,10772091)和教育部同济大学固体力学重点实验室高级访问学者资助项目的研究基础之上撰写的。同时,我的学生们的一些工作也为本书增色不少。

固体材料小尺度力学行为的 SEM 原位试验研究仍在不断发展之中,特别是材料的微结构的新变化层出不穷,我们的工作还需要与时俱进。因此,书中的一些见解和论述限于作者水平,难免存在谬误和不当之处,敬请广大读者批评指正。

王习术

2010年1月于北京清华园

目录

CONTENTS

第 1 篇 基础研究方法篇

第 1 章 绪论	2
1.1 高技术与现代固体材料	2
1.2 现代固体材料的分类	4
1.3 固体材料的力学行为概述	4
1.4 材料力学行为的研究与应用	5
1.4.1 弹性变形	5
1.4.2 塑性变形	9
1.4.3 断裂行为	9
1.4.4 疲劳行为	10
1.4.5 蠕变行为	12
参考文献	13
第 2 章 单向拉伸压缩试验与分析	14
2.1 引言	14
2.1.1 弹性阶段	18
2.1.2 屈服阶段	21
2.1.3 强化阶段	25
2.1.4 颈缩阶段	26
2.2 金属材料拉伸现象的细微观解释	27
2.2.1 金属材料的弹性	27
2.2.2 金属材料的屈服	28
2.2.3 金属材料的应变强化	29

2.2.4	材料颈缩阶段出现断裂	29
2.3	弹性破坏与断裂准则	30
2.4	应力集中和缺口效应对材料断裂的影响	32
2.4.1	缺口应力集中系数或强度降低系数	33
2.4.2	加载速率或应变速率对材料力学性能的影响	34
2.4.3	拉伸试验的步骤	34
2.5	特殊试样的拉伸压缩试验方法与分析	35
2.6	断口分析	40
	参考文献	42
第3章	残余应力检测与分析	43
3.1	引言	43
3.2	残余应力的测量方法	44
3.2.1	物理式残余应力测试方法	44
3.2.2	机械式残余应力测试方法	44
3.3	机械式平面残余应力测试方法	45
3.3.1	小孔释放法基本原理	45
3.3.2	反向加载的载荷计算	45
3.3.3	用应变花测量残余主应力及方向	46
3.4	机械式三维残余应力的测试与分析方法	49
3.4.1	应用广义胡克定律的测量方法	50
3.4.2	应用三维静力平衡方程式的测量方法	51
3.5	磁测残余应力方法	53
3.5.1	磁测技术分类	54
3.5.2	巴克豪生效应在无损检测与评估中的应用	54
3.5.3	影响磁测残余应力的主要因素	58
3.5.4	四极磁探头的磁测残余应力模型	61
3.6	磁测残余应力试验分析	63
3.7	磁测残余应力的应用实例	63
3.7.1	宝山钢铁厂新型钢材焊接残余应力检测	63
3.7.2	扬子石化压力容器焊缝附近残余应力检测	66
	参考文献	74
第4章	小尺度下力学行为 SEM 原位试验与分析	77
4.1	引言	77

4.2 SEM 原位力学行为试验的工作原理与特点	78
4.2.1 扫描电子显微镜的工作原理与特点	78
4.2.2 试样加热、加载下的 SEM 原位试验	85
4.3 SEM 原位力学行为试验用试样制备技术	88
4.4 SEM 原位扫描图片景深比较	91
参考文献	92
第 5 章 疲劳试验基本概念与方法	94
5.1 引言	94
5.2 疲劳试验方法简介	97
5.3 疲劳的基本概念	98
5.4 疲劳裂纹扩展速率的评价方法	109
5.4.1 疲劳裂纹扩展的线弹性破坏力学	109
5.4.2 疲劳裂纹扩展的弹塑性破坏力学	111
5.5 一种简单疲劳寿命预测方法	116
5.6 特殊条件下的疲劳行为	122
5.6.1 接触疲劳	122
5.6.2 微动疲劳	123
5.6.3 多轴疲劳	124
5.6.4 疲劳寿命的表征	125
5.6.5 聚合物材料的疲劳问题	125
参考文献	126

第 2 篇 专题研究应用篇

第 6 章 “三明治”复合结构材料的力学行为试验研究	132
6.1 引言	132
6.1.1 国内外对夹层板的研究简述	132
6.1.2 夹层板的理论设计基础	135
6.2 “三明治”复合结构材料的制备工艺特点	140
6.3 “三明治”复合结构材料的力学行为试验与分析	141
6.3.1 拉伸试验结果与分析	141
6.3.2 U_3Si_2 -Al 复合燃料板三点弯曲试验与分析	145
6.3.3 U_3Si_2 -Al 复合燃料板疲劳试验结果与分析	147
6.4 “三明治”复合结构核材料界面附近变形的数字散斑分析方法	150

6.4.1	DSCM 对 SEM 图片的适应性实验	153
6.4.2	刚体位移实验	154
6.4.3	SEM 原位弯曲载荷对应的图像序列	156
6.5	复合材料层压板疲劳寿命简便估计方法	159
	参考文献	161
第7章 超高强度钢的微观力学行为 SEM 原位试验与分析		162
7.1	引言	162
7.1.1	超高强度钢的力学性能特点	162
7.1.2	超高强度钢的应用	163
7.1.3	超高强度钢总体发展趋势	163
7.1.4	含夹杂物的超高强度钢微观破坏机制研究的意义	164
7.1.5	夹杂物附近疲劳裂纹萌生方式	165
7.2	超高强度钢的一般制备工艺	166
7.2.1	金属的强化手段	166
7.2.2	本实验研究中所用的超高强度钢	167
7.3	含夹杂物的超高强度钢的 SEM 原位静态拉伸试验与分析	168
7.3.1	实验设备与试样制备	168
7.3.2	SEM 原位静态拉伸试验结果与分析	169
7.4	含夹杂物的超高强度钢的 SEM 原位疲劳试验与分析	171
7.5	夹杂物形状、大小对裂纹萌生与扩展的影响分析	173
7.5.1	夹杂物形状对裂纹萌生与扩展的影响	173
7.5.2	夹杂物形状对裂纹萌生位置的影响	174
7.5.3	夹杂物大小的影响	176
7.5.4	压痕标记对裂纹扩展的影响	177
7.6	含夹杂物的超高强度钢的应力应变场有限元模拟分析	180
7.6.1	疲劳微裂纹萌生的两个模型:棘轮效应 与 Shake-Down 模型	180
7.6.2	硬质夹杂周围应力场的有限元分析	181
	参考文献	187
第8章 镁铝合金微观力学行为试验研究		190
8.1	引言	190
8.1.1	镁及镁铝合金的性能特点	190
8.1.2	镁铝合金的工业应用	191

8.1.3	镁铝合金的发展方向	193
8.1.4	镁铝合金的研究现状	194
8.2	铸造镁铝合金疲劳裂纹萌生与扩展行为研究	195
8.2.1	材料与试验方法	195
8.2.2	疲劳小裂纹萌生规律	196
8.2.3	疲劳小裂纹扩展特征	198
8.2.4	疲劳裂纹扩展速率的评价方法	200
8.3	高温下的镁铝合金疲劳行为研究	204
8.3.1	高温条件下铸造 AM50 合金的疲劳裂纹扩展速率表征	204
8.3.2	影响铸造 AM50 合金高温疲劳裂纹扩展速率的变化机理	205
8.4	Ca/Sr 添加对铸造镁铝合金的力学行为影响	207
8.4.1	Ca/Sr 添加对 AZ91D 合金的组织及力学性能的影响	207
8.4.2	Ca/Sr 添加镁铝合金的原位拉伸试验研究与分析	209
8.5	缺口对铸造镁铝合金的力学行为影响讨论	220
8.5.1	应力集中的影响	220
8.5.2	有限元模拟分析	222
	参考文献	231
第 9 章	导电高分子薄膜力学行为试验研究	235
9.1	引言	235
9.2	导电高分子薄膜制备工艺与力学	240
9.2.1	导电高分子制备过程	240
9.2.2	导电高分子薄膜沉积机理与分析	240
9.3	导电高分子薄膜力学行为试验与分析	252
9.3.1	实验方法及装置简介	252
9.3.2	导电聚噻吩薄膜材料试验结果与讨论	254
9.3.3	导电聚吡咯薄膜的强度参数检测及比较	257
9.4	导电高分子薄膜显微结构与力学行为间的关系	259
9.5	断口分析与聚吡咯薄膜微结构分析	261
9.6	热-力学参数对薄膜力学行为的影响	266
	参考文献	268
第 10 章	膜-基结构力学行为 SEM 原位检测与模型化	270
10.1	引言	270
10.1.1	常见 MEMS/ULSI 中薄膜材料简介	273

10.1.2	薄膜材料-基体的失效模式	274
10.2	磁控溅射薄膜的相关实验方法	278
10.2.1	磁控溅射薄膜的制备	278
10.2.2	薄膜内应力分析	280
10.2.3	膜-基结合强度的确定方法	283
10.3	弹性各向异性对薄膜表面稳定性的影响	290
10.3.1	薄膜系统的线性摄动分析	292
10.3.2	薄膜-基体结构中应力分布的讨论	293
10.3.3	摄动张量 $\bar{\sigma}_i$ 的 Airy 应力函数的表达	294
10.3.4	薄膜中的摄动应力分布	295
10.3.5	薄膜-基体结构的总能量确定方法	297
10.3.6	薄膜表面摄动的临界波长和最佳波长	298
10.3.7	薄膜的弹性各向异性的影响	300
10.4	膜-基结构 SEM 原位试验与失效分析	303
10.4.1	膜-基结构的失效模式概述	303
10.4.2	膜-基结构的三点弯曲时 SEM 原位失效行为试验 及模型化	307
10.4.3	单层膜-基结构中失效力应力的评价	313
10.4.4	膜-基结构的四点弯曲失效	315
	参考文献	321
第 11 章 电子器件 SMT 焊点结构的高周疲劳失效行为研究		327
11.1	引言	327
11.2	电子封装研究的必要性和复杂性	328
11.3	拉-拉疲劳载荷下焊点结构疲劳失效行为 SEM 原位研究	333
11.4	对四点弯曲疲劳载荷下焊点疲劳失效行为的 SEM 原位 观测研究	344
11.5	对 SMT 焊点结构响应的有限元分析	347
11.5.1	SnPb 块体材料的本构方程	348
11.5.2	SMT 焊点结构有限元模型的建立	350
11.5.3	基板受不同静拉伸载荷作用时的有限元计算	352
11.5.4	基板受疲劳载荷作用时的有限元计算	354
11.5.5	基板在四点弯曲载荷作用下的有限元模拟计算	356
11.6	焊点结构的应力-应变响应	359
11.6.1	拉伸(疲劳)载荷作用下的应力-应变响应	359

11.6.2 四点弯曲载荷作用下的应力-应变响应	363
11.7 SMT 焊点结构的失效评估和寿命预测	364
11.7.1 疲劳裂纹扩展速率表征	364
11.7.2 疲劳寿命模型与预测	367
参考文献	374
第 12 章 生物材料微结构与力学行为检测	377
12.1 引言	377
12.2 典型案例一：蜻蜓翅膀微结构对其飞行力学性能影响的初探 ...	377
12.3 典型案例二：猴头牵引试验与分析	388
12.4 典型案例三：扩弓试验与分析	396
12.5 典型案例四：苍蝇小腿微结构与仿生分析	401
12.6 典型案例五：“爬墙虎”植物微结构与吸附机理	403
参考文献	405
附录 A 试验研究报告写作范例	406
附录 B 研究性论文写作范例	411
参考文献	417
附录 C 中英文名词对照	418

第 1 篇 基础研究方法篇

1.1 高技术与现代固体材料

材料是人类生产活动与生活必需的物质基础,一切高技术的发展都离不开材料。从历史进程来看,人类的进步都是以材料的发展为标志。事实表明,凡是工业与科学技术发达的国家,其材料科学研究总是处于领先的位置。也就是说,现代材料的研究、开发与应用,反映了一个国家的科学技术与工业水平,尤其在人工合成材料的新时代更是如此。现代科学技术作为推动经济社会发展的巨大力量,已经为世界各国所关注,并正在努力加速科技研究成果的商品化,推动高科技的产业化。

什么是“高技术”?高技术是在相对意义上发展变化的一个概念。一般对不同的地区、不同的人以及从不同的角度、立场,它的含义各有所不同。发展中国家对高技术的理解可以分成三个层次:第一层次称做技术的改进;第二层次称做技术的复合;第三层次称做技术的改造。目前,国际上通用的高技术的定义是六大技术领域,九个技术产业。

六大技术领域包括:①生物技术(标志技术是基因工程和蛋白质工程),基因排序工程现已经完成;②信息技术(标志技术是智能计算机、智能机器人);③现代材料技术(标志技术是材料的设计与分子设计);④新能源技术(标志技术是核聚变和太阳能);⑤空间技术(标志技术是航天飞行器、宇宙输送带和永久性空间站);⑥海洋技术(标志技术是海水淡化、深海挖掘与停留)。

这六大技术形成后,由于其组合与交叉导致生物工程产业、生物医药业、光电子信息产业、智能机械、精密加工产业、软件业、超导产业、太阳能产业、空间产业和海洋产业的产生。这些高技术产业几乎都与材料密切

相关,近年美国新成立了一个“逆向材料设计”(Inverse Methods in Materials Design)专业委员会,专门讨论材料微结构与力学行为间的关系,通过对材料的表面或内部的认识,重新构造出新的高性能、低成本、多用途的现代材料。

现代材料(advanced materials)是指那些新近发展或正在发展的、具有优异性能和应用前景的一类材料。其中包括金属材料、有机合成材料、无机非金属材料 and 纳米材料等。根据其性能与用途,又可分为结构材料和功能材料。

结构材料主要以力学性能为基础,用以制造承受外力为主的元件,是航天航空、精密制造、建筑、交通运输、能源开发及有效利用的物质基础。这类材料正向更高强度、更大韧性以及更复杂环境(高温、高压、浓腐蚀、高辐照、耐磨损等)下工作的研究方向发展,同时制备出的材料呈现各向非均质、非线性、各向异性的力学性能和具有比密度、比刚度、细微观尺度的粒子或分子结构材料力学行为特征。如近年来发展迅猛的多孔金属/纳米晶粒尺度的粉末冶金材料/“三明治”复合轻质结构材料等。

功能材料则是利用物质独特的物理、化学特性或生物功能(如发光、压电、缺陷自修复等)发展起来的材料,这类材料正向多样化、高灵敏度、高精度和高稳定性方向发展。功能材料是发展信息技术和自动化控制的基础,没有功能材料,大规模集成电路、计算机的发展就会受到限制;没有灵敏度高的、性能稳定的敏感元件材料,自控和遥感便无法实现。如光电通信就是在光纤发展的基础上实现的。

现代固体材料大致有以下几个基本特征。

(1) 现代材料的生产制备是知识密集、技术密集和资金密集的一种产业,有许多现代材料出自固体物理、固体化学、有机合成和冶金学等学科的新成就。科学技术化,科学与工程技术紧密结合、互相促进。

(2) 现代材料的发展与新工艺、新技术密切相关,在很多情况下是通过极端条件(如超高压、超高温、超高真空、超高密度、超高频、强磁场、强辐射、无重力、超高纯和超快速冷却等)形成的现代材料,从而为探索、研制现代材料与新元件开辟了一条新途径,同时也为研究在极端条件下所出现的新物理、化学、力学、电学现象和效应开拓新的研究领域。

(3) 现代材料不像常规材料那样需要大规模、连续生产维持竞争能力,它们一般生产规模小,经营分散,更新换代快,而且品种变化频繁。

(4) 学科之间互相交叉、渗透和互相促进,基础学科(物理、化学、生物、力学、数学等)与理化技术(如微电子、计算机、控制工程等)新成果交织在一起。

以现代材料为例,新一代材料如导电高分子薄膜、人工关节等常常与化学工程紧密相连。化学工程的研究对象是化学工业中不同行业、不同产品制造过程中一些共同的化学、物理过程的规律。如在微电子器件加工中,许多化工电子材料是由化学工业提供的,器件加工中的许多关键技术也是化工技术。同时它们还与力学

相关联。例如,基片上的导电薄膜的可靠性优劣在于导电薄膜与基地材料的连接、依赖薄膜内是否存在残余应力及薄膜内微结构缺陷的演化等,这些力学参数直接与导电薄膜材料制备工艺相关,通过对这些力学性能参数的检测和分析,可以优化导电薄膜的制备工艺,从而得到优质、可靠的产品。因此,作者认为:材料力学行为研究尤其是小尺度力学行为的研究是现代材料通向新产品的一座桥梁。

应该指出,现代材料和常规(传统)的材料并没有明显的界限,现代材料的发展必须以常规材料为基础,而且从数量和影响看,常规材料仍将占据十分重要的地位。但是,要实现质量的不断提高,品种的不断增长,性能的不断改进和成本的不断下降,就必须对常规材料开展更多、更深入的研究,特别是宏—细—微观综合力学行为的研究。常规材料在许多情况下会发展为现代材料,而现代材料又推动了传统材料的进一步发展。因此,加强现代材料的研究开发,同时架起通向产品的桥梁已势在必行。

1.2 现代固体材料的分类

本书所指材料均为固体材料。材料多种多样,分类法也没有一个统一标准,通常按其物理、化学属性大致可以分成四类:即金属材料(metallic materials)、无机非金属材料(inorganic nonmetallic materials)、有机高分子材料(polymer materials)和复合材料(composite materials)。国外也有将固体材料分成金属、陶瓷(玻璃)、聚合物、复合材料、半导体材料五类。还可以从用途来分,如电子材料、航空材料、核材料、建筑材料、能源材料、生物材料等。

1.3 固体材料的力学行为概述

本书涉及的材料力学行为也是指固体材料的力学行为,包括材料的宏观、细观力学行为,并探索性地引入小尺度下 SEM 原位研究材料失效行为的研究方法和概念以及研究结果。在这些尺度下,主要从实验角度研究材料承受外部力、温度等作用及其响应,同时描述常见的材料内部的力产生原理、相互影响等。例如,如果材料承受一个比材料的静强度大的外力作用后可能会产生什么后果,产生一个小于材料强度的外力将会发生什么现象,如何表征材料小尺度下的力学性能特征,如何描述材料的强度,如何建立材料的损伤破坏判别标准等是本书的主要研究内容。

当研究固体材料小尺度的力学响应时,许多常规材料的力学响应在宏观中已经研究清楚,因此,为了实现固体材料的小尺度的研究目的,将借用宏观尺度下材料力学行为的研究方法和测量中的一些力学基本概念,并根据实际观测结果重新

描述其细微观特征(micro characterizations)。事实证明,固体材料的微结构与力学特性研究是材料科学与工程中最富有成效的研究领域之一(本书所指小尺度定义为 $500\text{nm}\sim 500\mu\text{m}$)。

本书主要介绍了材料科学与力学中所必需的基本概念,并从理论分析到试验方法学上多层次地叙述了近几年作者的最新研究成果,同时列举了材料科学与工程应用的一些具体实例。换句话说,用足够多的工程背景和直观的 SEM 图片说明材料小尺度下的力学行为研究现状与前景。第2版内容相对第1版主要增加了小尺度结构力学行为的 SEM 原位试验研究结果,如金属膜-基结构和焊点结构的失效模式、薄膜内失效应力表征及有限元分析等内容。

1.4 材料力学行为的研究与应用

材料力学行为(mechanical behavior of materials)是研究材料对各种载荷-变形的响应,包括弹性变形、塑性变形以及断裂、疲劳、蠕变等特征和形式的表征。

1.4.1 弹性变形

在讨论材料的力学行为时,首先讨论弹性力学行为,并作相应假设:当外力作用在物体上,弹性变形(elastic deformation)是由于原子在平衡位置发生微小迁移而引起的。因此,固体材料的基本性质就直接与原子间的结合力有关。这种位置在单位长度上的变化称为变形,而弹性变形与其他形式的变形相比,在更细微的范围内呈现出均匀性,因为它包括所有原子位置的迁移,而不是原子正好处于某一临界位置。由于弹性变形的这种内在本质,弹性行为的某些性质就可由此推论出:弹性变形是完全可逆的,因为它是原子在平衡位置附近的微小移动,没有大规模原子位置的重新排列。因此,外力取消后,原子趋向于回复到它们的原始状态,并且最终原子也确实回到它们的原位,物体也就恢复原先形状。

由于弹性变形包含固体材料中所有原子的移动,故微量成分变化对材料弹性行为的影响不大。在固体材料中,某一元素中的少数几个原子与另一元素中的少数几个原子发生交换,仅改变了被交换原子中的原子间的结合力。材料弹性反应影响的大小,大致正比于被置换的原子数及其有关的结合力的差异。通常在合金化中使用的各种元素或偶尔作为杂质掺入的元素,其变化仅为百分之几。因此一种材料的不同合金之间和它的夹杂含量之间,其弹性行为的差异通常比较小。例如,许多合金钢几乎都有相同的弹性模量($193\sim 210\text{GPa}$)。与此相比,这些不同的合金钢的屈服强度却有数量级的差异。

与上述成分变化的讨论相似,材料的弹性行为受其原始状态的影响也很小。由于弹性行为直接与原子间结合力有关,因而,任何加工过程产生的相同晶体结构