

研究生力学丛书

Mechanics Series for Graduate Students

材料力学 行为试验与分析

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

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”复合结构核材料、导电高分子薄膜、生物等现代材料(Advance Materials)的宏观力学行为检测与表征方法。通过先进的 SEM 原位研究手段,用大量图片和数据对这些材料的微结构与力学行为间的关系,以及加工工艺力学等涉及的诸多问题进行了分析讨论。书中以“案例”分析方式解释了所研究材料的力学行为形成机理、影响因素和工业应用前景。本书的最大特点是更关注材料小尺度力学行为演化进程并对其进行分析与讨论。

全书分两个篇章,其中基础研究方法篇介绍了现代材料的一些常见力学性能的试验研究与分析方法,如微纳米压痕、单(双)向拉伸(压缩)试验法、SEM 原位观测和磁测残余应力方法;专题研究应用篇则重点介绍了 SEM 原位研究铸造镁铝合金微观破坏机理,夹杂对超高强度钢的疲劳损伤的作用,“三明治”复合结构核材料性能与加工工艺的关系,导电高分子薄膜微结构变化对力学性能的影响,生物材料力学行为检测等。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

材料力学行为试验与分析/王习术著. —北京:清华大学出版社,2007.9

(研究生力学丛书)

ISBN 978-7-302-15514-0

I. 材… II. 王… III. ①材料力学—行为—试验—教材 ②材料力学—行为—分析—教材 IV. TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 092016 号

责任编辑:杨倩 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

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印刷者:清华大学印刷厂

装订者:三河市溧源装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:170×230 印 张:25.25 插 页:1 字 数:438 千字

版 次:2007 年 9 月第 1 版 印 次:2007 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:39.80 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:023176-01

作者简介



王习术 (Wang Xishu) 1959年12月生, 四川省开江县人。1982年7月获重庆大学学士学位, 1989年7月获中国矿业大学硕士学位, 1993-1997年留学日本, 获得日本鹿儿岛大学固体力学博士学位。1997年5月-1998年12月在清华大学工程力学系做博士后, 合作导师余寿文教授。1999年任清华大学工程力学系副教授至今。主要研究领域: 固体材料微结构与力学行为理论与实验研究, 疲劳强度与结构可靠性理论与应用研究。已出版中、英、日科学论文106篇, 其中近5年在SCI源刊收录论文35篇, EI收录23篇, ISTP收录8篇。在SCI杂志上他引36次(2005-2007年度)。与他人合作出版译作一部 (“Metal Forms: A Design Guide” 排名第二)。先后担任国际杂志(如 Philosophical Magazine/Letters, International Journal of Fatigue, Cement and Concrete Research) 通讯评审员及国内《试验技术与试验机》杂志编委, 中国机械工程学会高级会员。曾任教育部同济大学固体力学实验室高级访问学者(2000-2001年度), JSPS日本九州大学工学部特别研究员(2003年度短期), 清华大学材料力学实验教学课程负责人(1999-2003)。获得专利4项(3项实用新型, 1项发明), 参加国家“973”项目2项, 主持国家自然科学基金项目2项, 与美国、澳大利亚、日本开展国际合作项目3项, 横向课题多项。

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:材料小尺度性能的特征及其尺度效应研究与材料小尺度破坏机理研究已成为材料逆向设计最重要的一个环节。随着科学技术和实验研究方法的发展,过去一些被认为难以解决的问题,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。

全书分为基础研究方法篇和专题研究应用篇。为了满足初学固体材料力学实验研究学生的教学内容,本书在基础研究方法篇中系统介绍了材料力学实验主要的杆(梁)力-位移、应力-应变检测的相关实验案例。这些案例主要包括硬度与性能间的关系试验法、纳米压痕试验中的问题及相关算法,单向拉伸和压缩曲线的获得与试样微细观破坏现象的解释与分析方法,应力集中和缺口效应的影响,薄膜拉伸试验方法、电阻应变片测量应变方法与分析,最后对复合材料的单向和双向性能检测方法及典型案例进行了讨论。目的是由浅入深地启发学生如何从试验过程中寻找新现象,发现新问题,然后根据这些问题和阅读相关文献,撰写出科学论文。本篇内容是作者8年来在清华大学本科生材料力学实验教学中的经验与总结,其中也包括我的同事们参与的部分工作。

在专题研究应用篇中主要对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研究,对作者近5年在SEM原位试验研究方法取得的最新研究成果进行了重点介绍。同时,对因辊压工艺导致的“三明治”复合结构板材不同力学行为等诸多问题展开了讨论。

对近年来出现的新型材料——导电高分子薄膜材料,作者不仅介绍了微米厚度薄膜力学性能的检测方法,得到了导电高分子薄膜弹性模量的尺度临界参考值,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-韧性关系的一种分析方法。

在生物材料力学行为研究章节中主要介绍蜻蜓翅膀微结构对其力学性能的影响以及仿生初探,猴头上颚矫正牵引中新生骨质强度与牵引过程中的关系等内容。此外,对苍蝇为什么能在光滑的玻璃面上快速行走及其吸附机理等问题,通过苍蝇腿尖局部微结构的实验研究进行了介绍,同时为了讨论吸附机理,还对“爬山虎”植物吸盘的细胞微结构进行直接观测和分析。

对于应用于工程实际的大型焊接结构,对影响其寿命的主要因素之一的残余应力进行了无损检测与分析方法研究,通过实际案例介绍了作者近年来在磁测技术与分析方面的研究成果。

这些研究成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,材料涉及轻金属、超高强度钢、“三明治”复合结构核材料以及导电高分子膜材料、生物材料。通过具体试验案例,侧重试验过程与结果分析,许多内容已受到国内外学术界的充分重视。

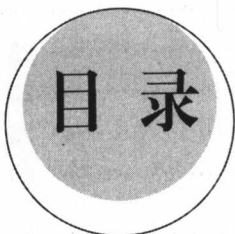
固体材料力学行为的SEM原位研究及显微结构在外场力(热)作用下的演化行为研究已成为材料科学与实验力学研究的交叉内容,其研究结果将成为材料改性和逆向设计的重要依据。

本书的主要内容是在科技部“973”(2004CB619304)、国家自然科学基金(50571047)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成果基础之上撰写的。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。

王习木

2007年3月于清华园



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	10
1.4.4 疲劳行为	11
1.4.5 蠕变行为	12
参考文献	13
第 2 章 硬度试验与分析	14
2.1 硬度简介	14
2.1.1 日常生活中的硬度	14
2.1.2 硬度在材料力学性质中的意义	14
2.1.3 材料硬度试验方法	15
2.2 金属材料硬度的定义与试验方法	15
2.3 硬度试验结果分析	19
2.3.1 材料硬度与强度间的关系	19
2.3.2 拉伸强度与各种硬度间的换算关系	22



2.4	纳米硬度测试及相关计算	23
2.4.1	纳米压痕测试原理	23
2.4.2	纳米硬度与传统硬度的区别	25
2.4.3	典型案例	25
	参考文献	26
第3章	单向拉伸压缩试验与分析	27
3.1	引言	27
3.1.1	弹性阶段	31
3.1.2	屈服阶段	35
3.1.3	强化阶段	39
3.1.4	颈缩阶段	40
3.2	金属材料拉伸现象的细微观解释	41
3.2.1	金属材料的弹性	41
3.2.2	金属材料的屈服	42
3.2.3	金属材料的应变强化	43
3.2.4	材料紧缩阶段出现断裂	44
3.3	弹性破坏与断裂准则	45
3.4	应力集中和缺口效应对材料断裂的影响	46
3.4.1	加载速率或应变速率对材料力学性能的影响	48
3.4.2	拉伸试验的步骤	48
3.5	特殊试样的拉伸压缩试验方法与分析	49
3.6	断口分析	55
	参考文献	57
第4章	力-变形电测试验方法与分析	59
4.1	引言	59
4.2	电阻应变片及转换原理	63
4.3	温度补偿问题	70
4.4	电阻应变仪	70
4.5	应变测量与应力分析方法	70
	参考文献	84



第 5 章 复合材料的力学性能检测方法	85
5.1 复合材料单向力学性能的试验测定	85
5.2 纤维和基体性能的测定	86
5.2.1 纤维性能及测定方法	87
5.2.2 基体性能测定方法	88
5.2.3 弯曲试验	89
5.2.4 层间剥离试验	91
5.3 复合材料的双向力学性能检测	92
5.4 典型案例分析: 聚酰胺/蒙脱土微纳米复合薄膜拉伸行为特性	98
参考文献	104
第 6 章 小尺度下力学行为 SEM 原位试验与分析	107
6.1 引言	107
6.2 SEM 原位力学行为试验工作原理与特点	108
6.2.1 扫描电子显微镜的工作原理与特点	108
6.2.2 试样的加热、加载下的 SEM 原位试验	115
6.3 SEM 原位力学行为试验用试样制备技术	119
6.4 SEM 原位扫描图片景深比较	123
参考文献	123
第 7 章 残余应力检测与分析	125
7.1 引言	125
7.2 残余应力的测量方法	126
7.2.1 物理式残余应力测试方法	126
7.2.2 机械式残余应力测试方法	126
7.3 机械式平面残余应力测试方法	127
7.3.1 小孔释放法基本原理	127
7.3.2 反向加载的载荷计算	127
7.3.3 用应变花测量残余主应力及方向	128
7.4 机械式三维残余应力的测试与分析方法	132
7.4.1 应用广义胡克定律的测量方法	132
7.4.2 应用三维静力平衡方程式的测量方法	134



7.5 磁测残余应力方法 136

7.5.1 磁测技术分类 137

7.5.2 巴克豪生效应在无损检测与评估中的应用 138

7.5.3 影响磁测残余应力的主要因素 141

7.5.4 四极磁探头的磁测残余应力模型 145

7.6 磁测残余应力试验分析 147

7.7 磁测残余应力的实际应用实例 148

7.7.1 宝山钢铁厂新型钢材焊接残余应力检测 148

7.7.2 扬子石化压力容器焊缝附近残余应力检测 150

参考文献 159

第8章 疲劳试验基本概念与方法 162

8.1 引言 162

8.2 疲劳试验方法简介 165

8.3 疲劳的基本概念 167

8.4 疲劳裂纹扩展速率的评价方法 178

8.4.1 疲劳裂纹扩展的线弹性破坏力学 178

8.4.2 疲劳裂纹扩展的弹塑性破坏力学 181

8.5 一种简单疲劳寿命预测方法 186

8.6 特殊条件下的疲劳行为 193

8.6.1 接触疲劳 193

8.6.2 微动疲劳 193

8.6.3 多轴疲劳 194

8.6.4 疲劳寿命的表征 195

8.6.5 聚合物材料的疲劳问题 196

参考文献 197

第2篇 专题研究应用篇

第9章 镁铝合金微观力学行为试验研究 202

9.1 引言 202

9.1.1 镁及镁铝合金的性能特点 202

9.1.2 镁铝合金的工业应用 203



9.1.3	镁铝合金的发展方向	206
9.1.4	镁铝合金的研究现状	206
9.2	铸造镁铝合金疲劳裂纹萌生与扩展行为研究	207
9.2.1	材料与试验方法	207
9.2.2	疲劳小裂纹萌生规律	209
9.2.3	疲劳小裂纹扩展特征	211
9.2.4	疲劳裂纹扩展速率的评价方法	214
9.3	高温下的镁铝合金疲劳行为研究	217
9.3.1	高温条件下铸造 AM50 合金的疲劳裂纹扩展速率表征	217
9.3.2	影响铸造 AM50 合金高温疲劳裂纹扩展速率的变化机理	218
9.4	Ca/Sr 添加对铸造镁铝合金的力学行为影响	220
9.4.1	Ca/Sr 添加对 AZ91D 合金的组织及力学性能的影响	220
9.4.2	Ca/Sr 添加镁铝合金的原位拉伸试验研究与分析	222
9.5	缺口对铸造镁铝合金的力学行为影响讨论	229
9.5.1	应力集中的影响	229
9.5.2	有限元模拟分析	230
	参考文献	241
第 10 章 超高强度钢的微观力学行为 SEM 原位试验与分析		246
10.1	引言	246
10.1.1	超高强度钢的力学性能特点	246
10.1.2	超高强度钢的应用	247
10.1.3	超高强度钢总体发展趋势	248
10.1.4	含夹杂物的超高强度钢微观破坏机制研究的意义	249
10.1.5	夹杂物附近疲劳裂纹萌生方式	249
10.2	超高强度钢的一般制备工艺	250
10.2.1	金属的强化手段	250
10.2.2	本实验研究中所用的超高强度钢	251
10.3	含夹杂物的超高强度钢的 SEM 原位静态拉伸试验与分析	253



10.3.1	实验设备与试样制备	253
10.3.2	SEM 原位静态拉伸试验结果与分析	254
10.4	含夹杂物的超高强度钢的 SEM 原位疲劳试验与分析	255
10.5	夹杂物形状、大小对裂纹萌生与扩展的影响分析	258
10.5.1	夹杂物形状对裂纹萌生与扩展的影响	258
10.5.2	夹杂物形状对裂纹萌生位置的影响	259
10.5.3	夹杂物大小的影响	261
10.5.4	压痕标记对裂纹扩展的影响	262
10.6	含夹杂物的超高强度钢的应力应变场有限元模拟分析	265
10.6.1	疲劳微裂纹萌生的两个模型：棘轮效应与 Shake-Down 模型	265
10.6.2	硬质夹杂周围应力场的有限元分析	265
	参考文献	272
第 11 章	导电高分子薄膜力学行为试验研究	275
11.1	引言	275
11.2	导电高分子薄膜制备工艺与力学	280
11.2.1	导电高分子制备过程	280
11.2.2	导电高分子薄膜沉积机理与分析	281
11.3	导电高分子薄膜力学行为试验与分析	294
11.3.1	实验方法及装置简介	294
11.3.2	导电聚噻吩薄膜材料试验结果与讨论	296
11.3.3	导电聚吡咯薄膜的强度参数检测及比较	300
11.3.4	小结	302
11.4	导电高分子薄膜显微结构与力学行为间的关系	302
11.5	断口分析与聚吡咯薄膜微结构分析	304
	小结	310
	参考文献	311
第 12 章	“三明治”复合结构材料的力学行为试验研究	313
12.1	引言	313
12.1.1	国内外对夹层板的研究简述	313
12.1.2	夹层板的理论设计基础	316



12.2	“三明治”复合结构材料的制备工艺特点	321
12.3	“三明治”复合结构材料的力学行为试验与分析	323
12.3.1	拉伸试验结果与分析	323
12.3.2	U_3Si_2 -Al 复合燃料板三点弯曲试验与分析	328
12.3.3	U_3Si_2 -Al 复合燃料板疲劳试验结果与分析	330
12.4	“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	333
12.4.1	DSCM 对 SEM 图片的适应性实验	337
12.4.2	刚体位移实验	338
12.4.3	SEM 原位弯曲载荷对应的图像序列	339
12.5	复合材料层压板疲劳寿命简便估计方法	343
	参考文献	344
第 13 章 生物材料微结构与力学行为检测		346
13.1	引言	346
13.2	典型案例一	347
13.3	典型案例二	358
13.4	典型案例三	366
13.5	典型案例四	371
13.6	典型案例五	374
	参考文献	376
附录 A 试验研究报告写作范例		377
附录 B 研究性论文写作范例		382
	参考文献	389
索引		390

第 1 篇 基础研究方法篇

第1章

绪 论

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资基础,一切高技术的发展更离不开材料。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。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。发展中的国家对高技术的理解可以分成三个层次:第一层次称作技术的改进;第二层次称作技术的复合;第三层次称作技术的改造。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的一些力学行为研究方法和概念以及