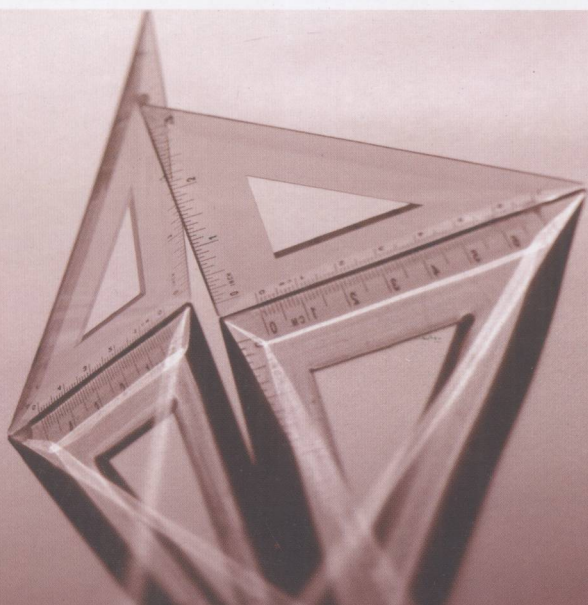




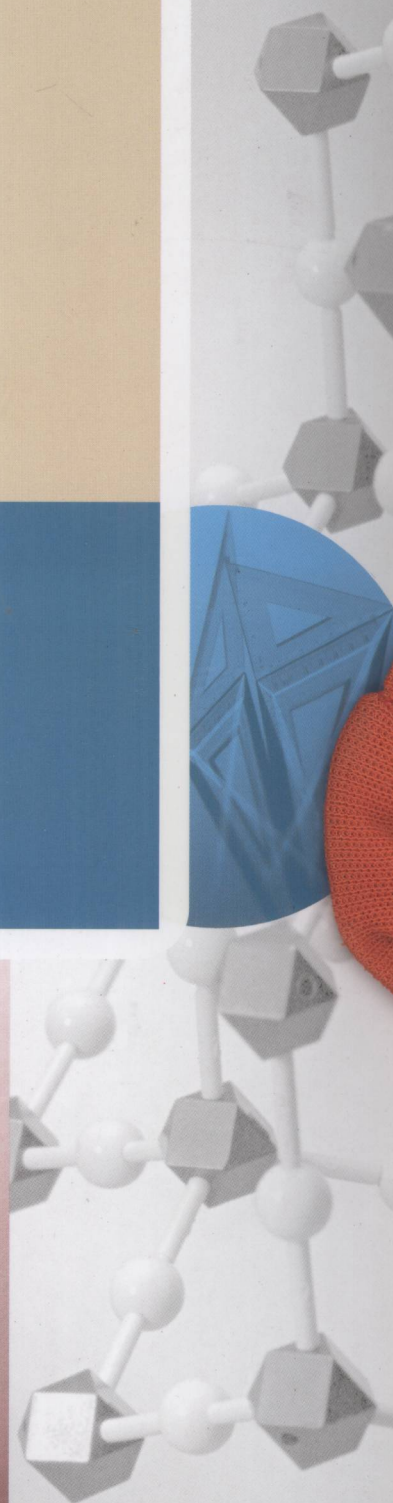
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

材料的宏微观 力学性能

周益春 郑学军 编著



高等教育出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

材料的宏微观力学性能

周益春 郑学军 编著

高等教育出版社

内容简介

本书比较全面和系统地介绍了金属结构材料、非金属结构材料和各种功能材料的宏微观力学性能以及它们在各种载荷作用下的宏微观破坏机制。本书注重科学(基础理论)与工程(应用)、宏观与微观、结构(材料)与功能(材料)的结合,而且融进了国内外最新的科研成果,如应变梯度理论与尺度效应、跨尺度数值模拟、微观破坏力学分析、智能材料力学性能、薄膜材料力学性能、涂层材料力学性能等。本书除绪论外共14章,可分为四个模块。其中:第一模块介绍研究材料宏微观力学性能所需要的理论基础,包括第1章弹塑性力学基础和第2章宏微观破坏力学基础;第3章到第6章为第二模块,主要从工程的角度具体介绍材料的常见力学性能及其表征方法,如基本力学性能、硬度、断裂韧性和残余应力等;第7章和第8章为第三模块,主要介绍在工程中的应用最广的金属材料的力学性能,包括金属的疲劳、蠕变、疲劳和蠕变的交互作用以及金属材料在环境介质中的力学性能;第四模块包括第9章至第14章,为专题部分,首先介绍计算机在分析材料力学性能中的应用即宏观计算材料力学,其后主要介绍特殊材料即智能材料、薄膜材料、高分子材料、陶瓷材料和复合材料的宏微观力学性能。另外,本书配有实验指导,分必做实验和选做实验(由湘潭大学出版社出版)。

本书可作为材料科学与工程、力学、机械等专业本科生的教材,亦可作为相关专业研究生、教师、科研人员及工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

材料的宏微观力学性能/周益春,郑学军编著. —北京:高等教育出版社,2009.11

ISBN 978-7-04-028036-4

I. 材… II. ①周…②郑… III. 材料力学性质—高等学校—教材 IV. TB303

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第127522号

策划编辑	庚欣	责任编辑	李京平	封面设计	于涛	责任绘图	尹莉
版式设计	马敬茹	责任校对	刘莉	责任印制	陈伟光		

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 中青印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 30.25
字 数 740 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2009年11月第1版
印 次 2009年11月第1次印刷
定 价 38.40元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 28036-00

郑 重 声 明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话：(010)58581897/58581896/58581879

传 真：(010)82086060

E-mail：dd@hep.com.cn

通信地址：北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮 编：100120

购书请拨打电话：(010)58581118

编 委 会

主 任：周益春

副主任：郑学军 杨 丽 龙士国

委 员：周益春 郑学军 李江宇 罗文波 龙士国

毛卫国 杨 丽 黄勇力

序

材料的宏微观力学性能是材料科学的一个重要领域,结构型和功能型材料在制备(制造)、加工和使用过程中都涉及一系列的力学问题。材料高效、安全、低耗和环保性能的实现,材料的使用效率及使用寿命的预测,都建立在其力学性能的系统分析之上。对材料的宏微观力学性能进行科学分析的能力是材料专业本科生和研究生必备的素质之一。周益春、郑学军编著的《材料的宏微观力学性能》为相关教学和科研人员提供了一套高水平的教材。

该教材比较系统地介绍了金属结构材料、非金属结构材料和各种功能材料的宏微观力学性能,以及在各种载荷作用下材料的宏微观破坏机制。在编写过程中注重结构与功能、宏观与微观、科学理论与工程应用的结合,融进了国内外前沿的研究成果,如应变梯度理论与尺度效应、跨尺度数值模拟、微观破坏力学分析、智能材料力学性能、薄膜材料力学性能、涂层材料力学性能等。

这套教材的编写体现出了三个显著特征。

一是科学方法与科学理论的有机结合。现代材料科学的发展日新月异,真正掌握该学科的科学方法比单纯死记硬背一些基本理论更为重要。该教材在介绍本学科基本理论、主要结论的同时,始终重视研究方法的介绍,并将三者有机串联起来,增强了教学内容的吸引力,有助于激发学生科研兴趣和创新活力。

二是教学改革与科学研究的有机结合。该教材凝聚了该教学团队十多年坚持给本科生讲授材料力学性能课程的宝贵经验,融合了本团队在材料学科人才培养方面的一系列教育教学改革成果。不仅如此,该教材还融入了该团队在材料力学性能方面的许多科研成果,引入和介绍了材料和力学学科的最新研究方法和前沿成果,提升了教材的学术品位。

三是理论与工程应用的有机结合。材料科学是工程实践与实际应用性很强的学科。该教材注重科学理论与工程应用的关联,从宏观与微观、理论计算与实验、材料制备与性能检测等方面,把基本理论与应用研究成果融为一体,丰富了教材内容,能够全面培养学生的动手能力和创新能力。

该教材的编写成员长期从事力学和材料学科的教学和科研工作,其中编委会主任周益春教授是“国家杰出青年科学基金”和“国家教学名师”获得者,目前任湘潭大学“低维材料及其应用技术教育部重点实验室”主任。编委会副主任郑学军教授也是“国家杰出青年科学基金”获得者。湘潭大学材料的宏微观力学性能课程于2005年被评为国家精品课程,其教材于2006年被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。以该教材作者作为中坚力量的材料与器件教研组于2007年获得首批国家级教学团队称号。

我相信,该教材的出版将在材料学科人才培养、推动力学与材料学科的交叉融合等方面发挥良好的作用。为此,我乐于作序并向读者推荐!

黄伯云

(中国工程院院士、中国科学技术协会副主席、中南大学校长)

前 言

随着科学技术与国民经济的发展,对材料品种的要求日益增多,且材料使用条件也愈趋严苛,对其质量的要求也越来越高。材料在特定条件下的使用效率及使用寿命,是评定材料性能好坏的主要依据,高效、安全、低耗和环保是进行材料开发和应用研究中永恒的追求。据一些工业化国家统计,因材料和结构的破坏所造成的损失占国民经济生产总值的 8% ~ 12%。破坏事故还会造成人员的伤亡,其损失是无法估量的。目前,我国的情况比西方发达国家还要严重。另一方面,开发新材料还存在很大潜力。由于影响材料使用性能的因素错综复杂,如材料的固有性质、设计和加工状态、使用环境和操作条件等,人们不可能从一开始就设计出完美的材料,新事物都是在无数次的失败基础上积累经验后逐渐被认知的。

在“节约”和“和谐”型社会中,为了设计和制造出高效、安全、低耗和环保的材料,并对材料的使用效率及使用寿命有一个比较明确的预测,我们就必须对结构型和功能型材料在制备(制造)、加工和使用过程中遇到的力学行为及其破坏等有关力学问题有一个清晰的认识。

为了使材料科学与工程学科的本科生理解材料力学行为的基础理论,并使学生能够将其应用于“研究和开发出与社会及其生态和谐相处的高性能新材料、改善传统材料”,本书第一作者从 1996 年开始为材料类本科生讲授材料力学性能课程。要讲授这门课程首先就要有合适的中文教材。我们先选择国内有影响的材料力学性能教材作为参考。在讲授过程中,我们逐渐发现这些教材的主要内容是有关结构材料及其宏观性能的,这与我国材料学科的发展历史相符合,我国材料学科一般是从金属材料及热处理、焊接、模具、高分子材料等逐步发展起来的。而事实上,材料科学与工程既包含“科学”的意义,即研究材料的组织、结构与性质的关系,探索自然规律,这属于基础研究;同时又包含“工程”的意义,即材料又是面向实际、为经济建设服务的,是一门应用科学,研究与发展材料的目的在于应用,而具有实用价值的材料又必须通过合理的工艺流程才能制备出来。因此,“材料科学与工程”是研究材料组成、结构、材料的生产过程、材料性能与使用效能以及它们之间关系的一门学科,具有“科学”和“工程”相结合的特征。

材料科学有三个重要属性:一是一种多学科交叉的学科。它是物理、力学、化学、冶金学、计算科学相互融合与交叉。二是一种与实际使用结合非常密切的学科。发展材料科学的目的在于开发新材料,提高材料的性能和质量,合理使用材料,同时降低材料的成本和减少污染等。三是材料科学是一个正在发展中的学科。不像物理学、化学和力学已经有一个很成熟的体系,材料科学体系将随各有关学科的发展而得以充实和完善。

材料科学技术是近年来发展最快的科技领域之一,它不仅创造了大量高性能新材料和前所未有的加工方法,同时也使传统材料的生产发生了巨大的变化。20 世纪 90 年代以来,材料科学技术发生了“革命性”的变化,这种发展趋势可以概括为如下几点:①材料科学与工程正迅速形成一门统一的学科,更加重视与实际应用的结合;②深入微观层次,有目的地发现和开发新物质、新材料;③材料复合化是一个重要发展趋势;④理论-计算机模拟-实验的结合是发展新材料的

重要研究方法;⑤从技术创新的趋势看,现代材料科学技术创新的趋势是更廉价、更快、性能更好;⑥出现新材料的研究—开发—生产—应用一体化的趋势。

基于材料科学与工程学科的特征、属性和发展趋势,我们认为主要针对结构材料及其宏观性能的材料力学性能的教材已不适合。因此,从1998年开始我们尝试性地为学生讲授材料的宏微观力学性能课程,2005年该课程被评为国家精品课程,2006年本书被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书以材料学科与固体力学学科的交叉为主线,始终体现三个结合(特色):“科学”(基础理论)与“工程”(工程应用)的结合;“宏观”与“微观”的结合;“结构”(材料)与“功能”(材料)的结合。本书是湘潭大学材料与光电物理学院、湘潭大学低维材料及其应用技术教育部重点实验室承担本课程的有关老师集体智慧和劳动的结晶,通过集体讨论本书的主要内容并分头写出初稿,最后由主编定稿。本书的分工如下:绪论由周益春、龙士国编写,第1章和第2章由周益春编写,第3章由黄勇力编写,第4章由杨丽、龙士国、周益春编写,第5章由黄勇力编写,第6章由郑学军编写,第7章由毛卫国编写,第8章由杨丽编写,第9章由龙士国、陈尚达编写,第10章由李江宇、谢淑红编写,第11章由郑学军、周益春编写,第12章由罗文波编写,第13章由毛卫国编写,第14章由龙士国编写。另外,部分博士和硕士研究生也参与了该教材的编著工作,尤其是肖良红、虞学红、吴丹、章莎、周兆锋、马增胜、贺军、欧铜钢和吴波等同学,他们或为教材的编写出谋划策,或帮我打印文字、画图,或帮我查找文献,或帮我指导学生的实验,或帮我辅导习题。在各章编写初稿后,我与各章的编写者至少进行过五次以上的大修改,包括每一个字和每一句话的斟酌、每一个公式的推导、每一个图的选取和再加工等,前后历经五年时间。本书的许多成果直接来源于有关教材、专著和学术论文,本书编著者的部分研究成果得到了2个国家自然科学基金杰出青年基金项目(周益春、郑学军)、2个国家自然科学基金重点项目、2个国家863材料领域项目、20个国家自然科学基金面上项目和青年项目、1个教育部重大项目培育基金项目的资助。本书不仅是作者十余年讲授经验的总结,更是力学界、材料界的前辈们和老师们,如师昌绪先生、郑哲敏先生、潘际銮先生、李恒德先生、黄克智先生、白以龙院士、黄伯云院士、杨卫院士、杨挺青教授、段祝平教授、张统一教授、黄永刚教授、方岱宁教授、杨奇斌教授等鼓励的结果,相当多的章节直接来自于他们的专著或者论文,黄伯云院士还专门为本书作了序。在此,对所有引用成果的作者、项目支持的有关部门、参与部分章节编写的有关教师和同学表示由衷的感谢。

由于材料的宏微观力学性能涉及面太宽,而作者水平有限,本书无论从选材,还是问题的提炼等都是很不完善的。为此,深切期待着广大读者的指正与帮助。

周益春

湘潭大学材料与光电物理学院

湘潭大学低维材料及其应用技术教育部重点实验室

2009年3月

目 录

绪论	1	参考文献	50
0.1 材料科学与工程及其发展历史 与趋势	2	习题	50
0.2 材料学科与固体力学学科的交 叉发展	4	第2章 宏微观破坏力学基础	53
0.3 材料宏观性能与微观结构的关 系越来越紧密	6	2.1 宏观破坏力学分析	53
0.4 功能材料与结构材料的力学性 能同等重要	8	2.1.1 裂纹的分类及裂纹尖端附近的 弹性应力场	55
0.5 内容概述	9	2.1.2 应力强度因子	59
参考文献	10	2.1.3 小范围屈服下的塑性修正	60
第1章 弹塑性力学基础	12	2.1.4 断裂判据和断裂韧性	65
1.1 预备知识	12	2.1.5 弹塑性断裂力学	69
1.1.1 弹塑性力学的研究对象和任务	12	2.2 微观破坏力学分析	72
1.1.2 弹塑性力学的基本假设	13	2.2.1 损伤的基本概念及损伤的分类	72
1.1.3 弹性与塑性	13	2.2.2 例:一维蠕变损伤	74
1.1.4 张量概念和求和约定	15	2.2.3 各向同性损伤	76
1.2 应力	17	2.2.4 各向异性损伤	79
1.2.1 外力和应力	17	2.2.5 损伤与断裂的交互作用	82
1.2.2 平衡方程和应力边界条件	21	2.2.6 纳观断裂力学	84
1.2.3 主应力和主方向	24	参考文献	84
1.2.4 球形应力张量和应力偏量张量	26	习题	85
1.3 应变	27	第3章 材料的基本力学性能	87
1.3.1 变形和应变	27	3.1 材料的基本力学性能	87
1.3.2 主应变和主方向	32	3.1.1 材料在拉伸时的力学性能	87
1.4 应力应变关系	34	3.1.2 材料在压缩时的力学性能	92
1.4.1 各向同性弹性体的胡克定律	34	3.1.3 材料在扭转时的力学性能	94
1.4.2 弹性应变能函数	38	3.1.4 材料在弯曲时的力学性能	97
1.4.3 屈服函数和屈服曲面	40	3.2 材料基本力学性能的测试	99
1.4.4 两个常用屈服准则	43	3.2.1 材料拉伸性能的测试	100
1.4.5 增量理论	47	3.2.2 材料压缩性能的测试	102
1.4.6 全量理论	49	3.2.3 材料扭转性能的测试	104
		3.2.4 材料弯曲性能的测试	106
		3.2.5 材料剪切性能的测试	107
		3.2.6 材料基本力学性能测试方法的	

应用新进展	108	4.9.1 尺度效应	130
参考文献	109	4.9.2 应变梯度理论对硬度尺度效应的解释	132
习题	109	4.9.3 表面自由能对硬度尺度效应的影响	134
第4章 材料的硬度及其尺度效应	111	参考文献	137
4.1 材料硬度的概论	111	习题	138
4.1.1 材料硬度的定义	111	第5章 材料断裂韧性的测试	140
4.1.2 材料的硬度试验	112	5.1 平面应变断裂韧性 K_{IC} 的测试	140
4.2 布氏硬度	113	5.1.1 测量断裂韧性的常用方法和 K_{IC} 的表达式	140
4.2.1 布氏硬度的测定原理和表示方法	113	5.1.2 试件的尺寸要求	143
4.2.2 布氏硬度的相似原理和测定方法	114	5.1.3 临界载荷的确定	144
4.2.3 布氏硬度试验的特点和适用范围	115	5.1.4 测试平面应变断裂韧性 K_{IC} 的步骤	145
4.3 洛氏硬度	116	5.2 表面裂纹断裂韧性 K_{IE} 的测试	148
4.3.1 洛氏硬度的测定原理和方法	116	5.2.1 应力强度因子 K_I 的表达式	149
4.3.2 洛氏硬度试验的优缺点及应用	118	5.2.2 试件的尺寸要求	150
4.3.3 表面洛氏硬度	118	5.2.3 临界载荷的确定	151
4.4 维氏硬度	119	5.3 平面应力断裂韧性 K_C 的测试	152
4.4.1 维氏硬度的测定原理和方法	119	5.3.1 应力强度因子 K_I 的表达式	153
4.4.2 维氏硬度试验的应用和特点	121	5.3.2 试件尺寸的选择	154
4.5 动态压痕法测材料的硬度	121	5.3.3 K_C 值的确定	154
4.5.1 肖氏硬度	121	5.4 J 积分临界值 J_{IC} 的测试	156
4.5.2 锤击式布氏硬度	122	5.4.1 测试方法	156
4.6 划痕法测材料的硬度	123	5.4.2 临界点的确定	158
4.6.1 试验原理和计算公式	123	5.5 裂纹张开位移 COD 临界值 δ_c 的测试	160
4.6.2 划痕过程的应力分析	124	5.5.1 δ 的表达式	160
4.6.3 划痕硬度与其他力学性能的关系	124	5.5.2 V_c 的确定	163
4.7 显微硬度	125	5.5.3 $\delta_R - \Delta a$ 曲线	164
4.7.1 显微硬度试验原理	126	参考文献	165
4.7.2 努氏硬度压头的特点	126	习题	166
4.7.3 显微硬度试验的特点及应用	127	第6章 材料的残余应力	168
4.8 纳米硬度	128	6.1 残余应力概论	168
4.8.1 纳米压痕硬度	128	6.1.1 残余应力的产生	168
4.8.2 纳米划痕硬度	129	6.1.2 残余应力的调整与消除	171
4.9 材料的尺度效应及其对硬度的影响	130	6.2 残余应力的测试方法	175

6.2.1 残余应力的机械测量方法	175
6.2.2 残余应力的物理测量方法	180
6.3 残余应力对材料力学性能的影响	188
6.3.1 残余应力对静性能的影响	188
6.3.2 残余应力对脆性破坏和抗应力腐蚀开裂的影响	193
6.3.3 残余应力对疲劳强度的影响	195
参考文献	199
习题	200
第7章 金属材料的蠕变与疲劳	202
7.1 金属材料的蠕变概论	203
7.1.1 蠕变概念	203
7.1.2 蠕变曲线	203
7.1.3 蠕变实验结果的表征	204
7.1.4 稳态蠕变率与应力的关系	206
7.1.5 稳态蠕变率与温度的关系	207
7.1.6 应用举例	208
7.2 金属材料蠕变机制和蠕变机制图	210
7.2.1 金属材料的蠕变机制	210
7.2.2 蠕变变形机制图	212
7.2.3 在复杂应力下的蠕变变形	213
7.3 金属材料的疲劳概述	214
7.3.1 疲劳定义	214
7.3.2 疲劳的分类	215
7.3.3 疲劳载荷	215
7.3.4 交变应力	216
7.4 金属材料疲劳破坏和疲劳机理	217
7.4.1 疲劳强度及疲劳极限	217
7.4.2 疲劳破坏机理	217
7.4.3 疲劳裂纹扩展的一般规律	219
7.5 金属材料疲劳破坏的研究方法	222
7.5.1 $S-N$ 曲线	222
7.5.2 Goodman 图	224
7.5.3 复杂应力状态下的材料疲劳	

破坏	226
7.6 金属材料疲劳循环的应力-应变曲线	227
7.6.1 单晶体的循环变形力学特性	227
7.6.2 应变率和保载的影响	228
7.7 蠕变疲劳交互作用	229
7.7.1 蠕变疲劳波形	230
7.7.2 蠕变疲劳交互作用的本质	231
7.7.3 蠕变疲劳断裂机制图	232
参考文献	233
习题	235
第8章 材料在环境介质中的力学性能	236
8.1 应力腐蚀断裂	237
8.1.1 应力腐蚀断裂及其断裂特征	237
8.1.2 应力腐蚀的测试方法与评价指标	238
8.1.3 应力腐蚀断裂机理	243
8.1.4 防止应力腐蚀断裂的措施	246
8.2 氢脆	247
8.2.1 氢脆的类型	247
8.2.2 氢致延滞断裂抗力指标与测试方法	248
8.2.3 氢脆机理	250
8.2.4 氢脆与应力腐蚀的关系	252
8.2.5 防止氢脆的措施	254
8.3 腐蚀疲劳断裂	254
8.3.1 腐蚀疲劳定义及其特点	254
8.3.2 腐蚀疲劳机理	255
8.3.3 腐蚀疲劳裂纹扩展	256
8.3.4 防止腐蚀疲劳的措施	257
8.4 腐蚀磨损脆性	258
8.4.1 腐蚀磨损脆性的定义与特点	258
8.4.2 腐蚀磨损机理	258
8.4.3 腐蚀磨损脆性与应力腐蚀的异同	259
8.4.4 腐蚀磨损脆性的防护措施	260
8.5 其他环境敏感断裂或脆化	

问题	261	10.1.1 智能材料的概念及特点	302
8.5.1 辐照脆化	261	10.1.2 智能材料的应用	303
8.5.2 液(固)态金属脆性的现象和 特点	265	10.1.3 智能材料的分类	305
8.5.3 金属脆性的机制	266	10.2 形状记忆合金	305
参考文献	267	10.2.1 形状记忆效应和超弹性	305
习题	269	10.2.2 形状记忆合金的微结构和记 忆机制	306
第9章 宏微观计算材料力学	270	10.2.3 形状记忆合金的数学模型	308
9.1 材料结构的层次与计算材 料学	270	10.3 磁致伸缩材料与铁磁记忆 合金	314
9.1.1 材料系统与材料结构层次	271	10.3.1 磁晶各向异性	314
9.1.2 计算材料学的产生与主要 方法	271	10.3.2 磁致伸缩效应	314
9.1.3 计算材料学的发展趋势	273	10.3.3 铁磁记忆合金	316
9.2 宏观计算材料力学	274	10.3.4 磁力耦合的数学模型	317
9.2.1 有限单元法的产生	274	10.4 铁电与压电材料	325
9.2.2 弹性力学的矩阵表示和变分 原理	275	10.4.1 电致伸缩效应	325
9.2.3 有限元法的分析过程	278	10.4.2 铁电效应	326
9.2.4 非线性有限元简介	282	10.4.3 压电效应	329
9.2.5 有限元软件	283	10.4.4 力电耦合的数学模型	330
9.3 细观计算材料力学	284	参考文献	333
9.3.1 多晶体均匀化处理方法	284	习题	335
9.3.2 多晶体变形的模拟方法	285	第11章 薄膜的力学性能	336
9.4 纳观计算材料力学	290	11.1 薄膜的概述	336
9.4.1 分子动力学的基本原理	290	11.2 薄膜弹性模量和应力-应变 关系	338
9.4.2 恒温分子动力学	293	11.2.1 薄膜的弹性模量	338
9.4.3 分子动力学在材料断裂行为中的 应用	294	11.2.2 薄膜的应力-应变关系	339
9.5 跨尺度计算与分析	295	11.3 薄膜的残余应力	345
9.5.1 跨尺度计算与分析的必要性	295	11.3.1 残余应力的来源	345
9.5.2 跨尺度计算与分析的类型	296	11.3.2 残余应力的测量	346
9.5.3 有限元与分子动力学相结合 的跨尺度模拟	297	11.4 薄膜的界面断裂韧性	353
参考文献	299	11.4.1 膜与基底界面间结合类型	353
习题	301	11.4.2 界面断裂韧性的测量方法	354
第10章 智能材料力学性能	302	11.5 铁电薄膜的断裂与极化	356
10.1 智能材料概论	302	11.5.1 铁电薄膜断裂的概念	356
		11.5.2 铁电薄膜断裂性能表征	357
		11.5.3 非等双轴失配应变下外延铁电 薄膜的极化	360

11.5.4 外延铁电薄膜中退极化对极化态的影响	363	13.1.1 陶瓷材料的概念	407
11.6 可延展性薄膜的屈曲	365	13.1.2 陶瓷材料的特点	407
11.6.1 可延展性薄膜的概念	365	13.1.3 陶瓷材料的微观结构	407
11.6.2 弹性基底上波浪状单晶硅带状物的制备	365	13.1.4 陶瓷材料的热物理性能	408
11.6.3 可延展性薄膜的屈曲分析	366	13.2 陶瓷材料的力学性能	408
11.6.4 可延展性薄膜的应用	369	13.2.1 陶瓷材料的弹性变形	409
参考文献	370	13.2.2 陶瓷材料的塑性变形	409
习题	374	13.2.3 陶瓷材料的超塑性变形	409
第 12 章 高分子材料力学性能	375	13.2.4 陶瓷材料的硬度	411
12.1 高聚物的粘弹性	375	13.2.5 陶瓷材料的耐磨性	411
12.1.1 应力松弛和应变率效应	376	13.3 陶瓷材料的断裂韧性及测试方法	412
12.1.2 频率相关性能	377	13.3.1 陶瓷材料的静态韧性	412
12.1.3 温度相关性能	378	13.3.2 陶瓷材料断裂韧性测试方法	412
12.1.4 时间-温度等效原理	379	13.4 陶瓷材料的强度	416
12.2 高聚物线粘弹性行为的力学模型	381	13.4.1 陶瓷材料的抗弯强度	416
12.2.1 粘弹性力学行为的简单描述	382	13.4.2 陶瓷材料的抗压强度	417
12.2.2 蠕变柔量和松弛模量	385	13.4.3 陶瓷材料的抗拉强度	417
12.2.3 一维微分型本构关系	386	13.4.4 影响陶瓷材料强度的主要因素	418
12.2.4 一维积分型本构关系与 Boltzmann 叠加原理	387	13.5 陶瓷材料的抗热振性	419
12.3 高聚物的高弹性	389	13.5.1 陶瓷材料的抗热振断裂	419
12.3.1 高弹性的热力学分析	390	13.5.2 陶瓷材料的抗热振损伤	420
12.3.2 高弹变形的统计理论	391	13.6 陶瓷材料的蠕变	421
12.3.3 高弹材料的应力-应变关系	393	13.6.1 陶瓷材料蠕变机理	421
12.3.4 高弹大变形的唯象理论	394	13.6.2 陶瓷材料的蠕变实验举例分析	423
12.4 高聚物的屈服与断裂	395	13.7 高性能陶瓷涂层材料概述	424
12.4.1 高聚物的塑性屈服	395	13.7.1 高性能陶瓷涂层的特点	425
12.4.2 玻璃态高聚物的银纹化	399	13.7.2 高性能陶瓷涂层——热障涂层	425
12.4.3 高聚物的强度与脆韧转变	402	13.8 高性能陶瓷涂层的力学性能	428
参考文献	403	13.8.1 涂层的弹性模量和泊松比的测定	428
习题	405	13.8.2 拉伸法测量热障涂层的界面结合强度	429
第 13 章 陶瓷及陶瓷涂层材料的力学性能	406	13.8.3 热障涂层四点弯曲实验	432
13.1 陶瓷材料的概述	407		

13.8.4 热障涂层的热疲劳实验	433	14.2.3 纤维增强复合材料的破坏 特性	455
13.8.5 热障涂层屈曲破坏实验	435	14.3 颗粒增强复合材料的力学 性能	457
参考文献	440	14.3.1 颗粒增强金属基复合材料的 增强机理	457
习题	442	14.3.2 PMMC 在拉伸与疲劳载荷下的 破坏	459
第 14 章 复合材料力学性能	443	14.3.3 PMMC 的激光热冲击与热疲劳 破坏	461
14.1 复合材料概论	444	14.4 复合材料的应用与发展趋势	464
14.1.1 复合材料的概念	444	14.4.1 复合材料的应用	464
14.1.2 传统材料与复合材料的性能 特点	445	14.4.2 复合材料的发展趋势	465
14.1.3 增强纤维、增强颗粒及金属 基体	447	参考文献	466
14.2 纤维增强复合材料的力学 性能	449	习题	468
14.2.1 单向复合材料的弹性性能	449		
14.2.2 单向复合材料的强度	453		

绪 论

材料是人类用于制造物品、器件、构件、机器或其他产品所用的那些物质,它是人类赖以生存和发展的物质基础。历史学家曾将人类的历史划分为石器时代、铜器时代、铁器时代等,由此可见,新材料的推出与应用对人类的文明形成与进步发挥着重要的作用。材料、信息、能源被人们视为现代文明的三大支柱。材料具有重要性、普遍性和多样性的特点。由于具有多样性的特点,其分类方法尚没有统一标准。常见的两种分类方法是结构材料与功能材料,传统材料与新型材料。结构材料是以力学性能为基础,用来制造受力构件,当然结构材料对物理或化学性能也有一定要求,如光泽、热导率、抗辐照、抗腐蚀、抗氧化等;功能材料则主要是利用物质的独特物理、化学性质或生物功能等而形成的一类材料。一种材料往往既是结构材料又是功能材料,如铁、铜、铝等。传统材料是指那些在工业中已批量生产并大量应用的材料,如钢铁、水泥、塑料等。这类材料由于其量大、产值高、涉及面广,又是很多支柱产业的基础,所以又称为基础材料。新型材料(先进材料)是指那些正在发展,且具有优异性能和广阔应用前景的一类材料。新型材料与传统材料之间并没有明显的界限,传统材料通过采用新技术,提高其技术含量,提高性能,大幅度增加其附加值而成为新型材料;新型材料在经过长期生产与应用之后也将成为传统材料。传统材料是发展新材料和高技术的基础,而新型材料又往往能推动传统材料的进一步发展^[1]。

力学的起源是和人类活动紧密相关的。从人类的生活活动、生产活动开始便出现了力学。比如,要搬一块石头,用手搬不动就用棍子去撬,这就涉及一个基本的力学规律。力学的发展经历了如下几个阶段:17世纪以前,力学处于初期的发展阶段,主要是生活生产实践方面的;从17、18世纪直到19世纪,力学处于以牛顿力学为代表的经典力学阶段;20世纪中叶以后,力学的发展被称为现代力学。现代力学大致包含三个部分,即固体力学、流体力学和一般力学。固体力学主要研究可变形固体在外界因素(如载荷、温度、湿度等)作用下,其内部各个质点所产生的位移、运动、应力、应变以及破坏等的规律。

材料的力学性质是指材料在外载荷作用下的力学行为。最常用的力学性质包括:弹性模量,描述应力和应变之间的比例关系;屈服强度,指材料发生塑性形变的最小应力;硬度,描述材料软硬的程度等。

人类最早学会利用的材料性质便是力学性质,如石器时代利用的是石头的强度和硬度。认识和开始系统地理解材料的力学性质起始于19世纪中叶,这时人们利用金相显微镜对材料微观组织进行研究。材料的力学性能主要由其先天的才能(材料的成分)和后天的努力(材料的微观结构)决定^[2]。随着科学技术的发展,人们对结构材料的力学性能要求越来越高;由于器件的小型化与集成化,其所使用的功能材料的力学性能日显重要。同时,结构材料与功能材料也在结合,既要求结构材料具有一定的功能,也要求功能材料有一定的结构强度。提高结构材料和功能材料的力学性能的主要途径便是从微观结构即提高其微观力学性能入手。另外,材料设计是人们发展材料的目标,要实现材料优化设计,也必须了解材料的微观性能。因此,材料的宏微观力学性能是材料与力学的一个重要交叉点。

0.1 材料科学与工程及其发展历史与趋势

人类的历史可以说是材料发展的历史,连续不断地开发和使用新材料构筑了今天的文明,对于人类社会来说,材料是不可缺少的。人类使用材料的历史,从过去到现在共经历了七个时代,见表 0.1^[3]。

表 0.1 人类使用材料的七个时代

序 号	开 始 时 间	时 代
1	公元前 10 万年	石器时代
2	公元前 3000 年	青铜器时代
3	公元前 1000 年	铁器时代
4	公元元年	水泥时代
5	1800 年	钢时代
6	1950 年	硅时代
7	1990 年	新材料时代

从远古的石器时代到公元前的青铜器时代和铁器时代,金属材料的使用标志着社会生产力的发展,人类开始逐渐进入文明社会。到 19 世纪钢时代的来临,引起世界范围内的工业革命,从而产生了若干经济发达的强国。继钢时代之后,1950 年开始了硅时代,这是信息技术革命的时代,对当今世界产生了深远的影响。在钢时代和硅时代,人们强烈地认识到材料科学对社会发展与进步的作用。无论是专门从事材料研究的科技人员,还是经济学家、财政金融的银行家、企业界的巨头,直到作为经济决策人的国家领导阶层,都密切关注材料研究的动向和发展趋势,以便及时把握住时机,作出正确判断与决策。我们以英国技术政策的失误来说明这一问题。英国在钢时代到来之时,由于有一定技术政策预见性,因此在世界钢铁生产中占有一定的优势,也给英国的经济发展带来巨大的活力。但在二战后,日本认识到那时的世界仍处于钢时代,必须要有自己的低成本和高质量的钢。1952 年日本才生产 700 万吨钢,而英国却已生产 1 700 万吨钢,但到 1962 年,亦即 10 年之后,日本的钢产量猛增到 2 755 万吨,而英国的钢产量为 2 082 万吨,再过 10 年即 1972 年,日本的钢铁产量已达 9 690 万吨,而英国只有 2 500 万吨,日本处于遥遥领先地位。日本这一技术政策推动了后来日本的汽车工业和其他一些主要使用钢材的产业的极大发展。在 1970 年以后,日本认识到世界已处于硅时代,因此在保持钢的生产优势的同时,瞄准了硅材料,发展半导体产业,使得家用电器的生产在世界市场中占有绝对优势。然而,英国却忽视了硅时代的到来,由于没有相应的技术政策和战略眼光,其结果是英国 2 000 名研究硅材料的科学家流入美国硅谷。1988 年仅就信息技术产品而言,英国对日本的贸易赤字就达 22 亿英镑,这还不包括由硅片控制的自动聚焦照相机之类的产品。英国人今天抱怨说,“英国没有硅工业了,英国从第一流的经济大国变为第二流的经济发达国家,而日本却从第二流的经济发达国家变为第一流的经济大国,英国恰似一个仍停留在石器时代的国家,而没有进展到青铜器时代”^[4]。

现在人们已认识到材料是人类进化史的里程碑,现代文明的重要支柱。科学技术的进一步发展,人类生活水平的进一步提高,特别是世界人口的迅速增加,资源的加速枯竭,生态环境的不断恶化,都对材料科学技术提出了更高的要求。当前材料科学与工程领域正进入一个史无前例的创新发展时期,新材料是其他高新技术发展的支撑和先导,其研究水平和产业化规模已成为衡量一个国家和地区经济发展、科技进步和国防实力的重要标志。

“材料”是早已存在的名词,但“材料科学”的提出却只是20世纪60年代初的事。1957年,苏联人造卫星首先上天,美国朝野上下为之震惊,认为自己落后的主要原因之一是先进材料落后,于是在一些大学相继成立了十余个材料研究中心,采用先进的科学理论与实验方法对材料进行深入研究,取得重要成果。从此,“材料科学”这个名词便开始流行^[1]。

材料科学所包含的内容往往被理解为研究材料的组织、结构与性质的关系,探索其自然规律,这属于基础研究。实际上,材料是面向实际、为经济建设服务的,是一门应用科学,研究与发展材料的目的在于应用,而具有实用价值的材料又必须通过合理的工艺流程才能制备出来,通过批量生产才能成为工程材料。所以,在“材料科学”这个名词出现后不久,就提出了“材料科学与工程”。工程是指研究材料在制备过程中的工艺和工程技术问题。因此,“材料科学与工程”是研究材料组成、结构、生产过程、材料性能与使用效能以及它们之间关系的一门学科。因而把组成与结构、合成与生产过程、性质及使用效能称之为材料科学与工程的四个基本要素^[1]。把四要素联系在一起,便形成一个四面体,正如同著名材料方面的学术期刊《Acta Materialia》的封面所描述的。

材料科学与工程四要素模型的特点主要有两个^[1]:一是性质与使用效能有一个特殊的联系,材料的使用效能便是材料性质在使用条件下的表现。环境对材料性能的影响很大,如受力状态、气氛、介质与温度等。有些材料在一般环境下的性能很好,而在腐蚀环境介质下性能却显著下降;有的材料在光滑样品时表现很好,而在有缺口的情况下性能大为下降,特别有些高强度材料尤为如此,但凡有一个划痕,就可能造成灾难性破坏。因此,环境因素的引入对工程材料来说十分重要。二是材料理论和设计或工艺设计有了一个适当位置,它处于四面体的中心。因为这四个要素中的每一个要素,或几个相关要素都有其相应理论,根据理论建立模型,通过模型可以进行材料设计或工艺设计,以达到提高性能及使用效能、节约资源、减少污染以及降低成本的最佳状态。这是材料科学与工程的终极目标。

根据以上所述,材料科学有三个重要属性^[1]:一是一种多学科交叉的学科。它是物理、力学、化学、冶金学、计算科学相互融合与交叉的结果。二是一种与实际使用结合非常密切的学科。发展材料科学的目的在于开发新材料,提高材料的性能和质量,合理使用材料,同时降低材料的成本和减少污染等。三是材料科学是一个正在发展中的学科。不像物理学、化学和力学已经有一个很成熟的体系,材料科学体系将随各有关学科的发展而得到充实和完善。

材料科学技术是近年来发展最快的科技领域之一,它不仅创造了大量高性能新材料和前所未有的加工方法,同时也使传统材料的生产发生了巨大的变化。20世纪90年代以来材料科学技术已经发生了“革命性”的变化,这种发展趋势可以概括为如下几点^[5]:①深入微观层次,有目标地发现和开发新物质、新材料;②材料复合化是一个重要发展趋势;③薄膜、涂层科学和技术愈来愈受到重视^[6];④理论-计算机模拟-实验的结合是发展新材料的重要研究方法^[7];⑤从技术创新的趋势看,现代技术创新的趋势是更小、更廉价、更快、性能更好;⑥出现新材料的研究一开