

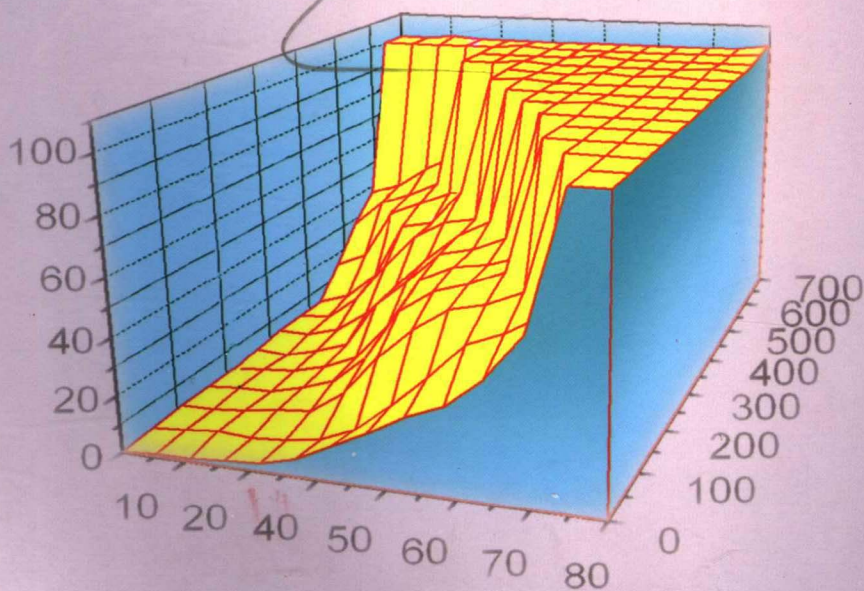
湖南省研究生精品课程

材料固体力学

Solid Mechanics in Materials

● 周益春 编著

(上册)



科学出版社

www.sciencep.com

材料固体力学

(上册)

周益春 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统阐述材料在制备(制造)、加工和使用过程中遇到的力学问题,比较全面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弹性变形、塑性变形、黏弹塑性变形以及在各种载荷作用下的破坏理论.全书分上、下两册共12章.上册第1~6章是基础部分,下册第7~12章是提高部分.上册第1~4章阐述弹性变形,第5~6章阐述塑性变形;主要讨论连续的、均匀的和各向同性固体在机械载荷作用下的静态和准静态问题.

本书可作为材料科学与工程、力学等专业研究生的教材,亦可作为有关专业教师、科研及工程技术人员的参考书.

图书在版编目(CIP)数据

材料固体力学·上册/周益春编著. —北京: 科学出版社, 2005

ISBN 7-03-015760-5

I. 材… II. 周… III. 材料力学-固体力学 IV. TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 067028 号

责任编辑: 田士勇 / 责任校对: 刘小梅

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年10月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2005年10月第一次印刷 印张: 23 1/4

印数: 1—3 000 字数: 431 000

定价: 45.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈路通〉)

序

当前材料科技人员在研究材料力学性质时,主要着重于测定材料的形变、断裂、疲劳与蠕变等性能及其与材料组织结构的关系以及生产过程乃至环境的影响,而对材料在受力状态下的行为了解不深,也不够重视;因此,在充分发挥材料在不同构件中的作用和有效使用材料之间存在问题,遇到问题也难以做出定量分析.本书从应力理论、应变理论出发,定量地讨论了弹性、屈服、塑性、黏弹塑性、断裂等基本问题,还讨论了应变梯度理论、热应力、激光作用下的材料力学行为,这些都是材料科学中十分关注的问题.通过对本书的学习,无疑对材料科学工作者或机械设计人员都会大有裨益,即,不但对材料的力学性质有深入的了解,而且学会对材料力学行为的定量分析方法.特别在本书每章后面列有若干供思考的习题,并给出答案,这对研究生或有关专业人员对材料固体力学的深入了解或思考有很大帮助,也是当前材料科学工作者需要重视的一个重要方面.

本书作者周益春教授是一位年轻有为的科学家,早年在中国科学院力学研究所获得博士学位后,又在日本东北大学进修.2002年任湘潭大学材料与光电物理学院院长,次年被授为“湖南省芙蓉学者计划”特聘教授,现任湘潭大学副校长并兼任“先进材料及其流变特性教育部重点实验室”主任.周益春教授从20世纪90年代初就在湘潭大学开始探索性地为材料类研究生讲授固体力学课程,同时他还指导研究生开展材料力学性能的研究工作,并取得系列创新性结果.因此,《材料固体力学》不仅凝结了周益春教授十余年的讲授经验,也包括了他的研究集体有关材料力学行为方面的研究成果.本书的出版将有利于我国材料科技工作者利用固体力学知识解决材料在制备、加工和使用过程中遇到的力学问题,并进一步推动固体力学与材料科学的交叉与结合.

为此,我乐于作序并向读者推荐.

周益春

2005.4.11

前 言

材料是人类进化史上的里程碑, 现代文明的重要支柱. 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. 材料科学的一个重要属性就是多学科交叉, 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. “固体力学”是研究固态物质和结构(构件)受力而发生的变形、流动和破坏的一门学科. 固态物质和结构的多样化, 使其受力后的响应丰富多彩, 如弹性、塑性、蠕变、断裂、疲劳等. 固体力学学科和材料学科都在现代工业中扮演了重要的角色. 随着科学技术的发展, 固体力学学科和材料学科的交叉越来越明显. 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, 就必须对材料在制备(制造)、加工和使用过程中遇到的, 如材料的力学行为和破坏等, 有关力学问题有一个清晰的认识.

因此, “材料科学与工程”专业的研究生或科研人员就迫切需要有固体力学的知识. 为了向材料科学与工程的研究生和科技工作者介绍材料学科中的固体力学知识, 探讨材料学科前沿研究中“力学与材料的学科交叉”问题, 作者从 20 世纪 90 年代初开始探索性地为材料专业的研究生讲授“固体力学”课程. 众所周知, 国内外已经有许多固体力学方面的教科书或专著, 如《材料力学》、《弹性力学》、《塑性力学》、《热应力》、《本构关系》、《断裂力学》等, 但这些书的主要读者和对象是以“力学”为专业的研究生或者科研人员. 以“材料科学与工程”为专业的研究生或科研人员很难将与力学有关的这些教科书或者专著全部学习完, 这就需要有一本这样的书: 既能够包含教科书的内容, 又包含专著的内容; 既能使“材料科学与工程”专业的研究生或者科研人员在 80 学时左右的有限时间内掌握迫切需要的固体力学知识, 又能对关于“用固体力学解决材料中的某些问题”的国际前沿知识有所了解.

在科技部“863”材料领域项目(2003AA331090)、科技部“863”激光技术领域青年基金项目(863-410-96-9)、两个国家自然科学基金面上项目(19772043,

10072052)、教育部留学回国人员基金重点项目(教外司留[2002]247号)、教育部跨世纪人才基金项目(教技函[2002]48)、湖南省“芙蓉学者计划”特聘教授项目(湘教通[2003]231号)等的资助下,作者在固体力学与材料科学与工程交叉领域尤其是涂层和薄膜的制备与物理力学性能方面进行了一些尝试,部分成果在本书的下册中有所体现.作为湖南省和湘潭大学研究生的精品课程(湘财教指[2003]48号),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,如师昌绪先生、郑哲敏先生、李恒德先生、黄克智先生、白以龙先生、杨卫先生、袁龙蔚先生、黄筑平教授、段祝平教授、杨奇斌教授等等鼓励的结果,相当多的内容直接来自于他们的专著,师昌绪先生还专门为本书作了序.不仅如此,十余年间听过该课的硕士和博士研究生们提出了许多宝贵的意见,尤其是龙士国、肖良红、虞学红、黄勇力、贺军、章莎等同学,他们帮我打印文字、画图、编写习题和习题答案,替我为低年级同学讲解习题课.在此,对所有引用成果的作者、项目支持的有关部门、指导我的老师、帮助我的同学表示深深的感谢.

由于材料固体力学涉及面太宽,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

湘潭大学先进材料及其流变特性教育部重点实验室

2004年12月

目 录

上 册

序

前言

绪论	1
§0.1 什么是材料科学与工程?	1
§0.2 先进材料学科的发展趋势	3
§0.3 什么是固体力学?	5
§0.4 材料学科的迅速发展对固体力学提出的挑战	7
§0.5 内容概述	10
第 1 章 应力理论	12
§1.1 外力和应力	12
§1.2 张量理论初步	16
§1.3 平衡微分方程和剪应力互等定律	26
§1.4 任意斜面上的应力和应力边界条件	28
§1.5 应力分量转换公式	31
§1.6 主应力和应力不变量	33
§1.7 球形应力张量和应力偏量张量	37
§1.8 最大剪应力和八面体剪应力	40
§1.9 应力状态和应力圆	45
§1.10 柱面坐标系和球面坐标系中的应力分量和平衡微分方程	50
习题	53
第 2 章 应变理论	55
§2.1 位移和应变	55
§2.2 应变张量的性质	63
§2.3 应变协调方程	69
§2.4 由应变求位移	71
§2.5 柱面和球面坐标系中的几何方程	76
习题	77
第 3 章 弹性本构关系和弹性问题的求解	79
§3.1 广义虎克定律	79
§3.2 应变能与应变余能	85

§3.3	虚功原理和最小势能原理	88
§3.4	功的互等定理	94
§3.5	里茨法和伽辽金法	97
§3.6	弹性力学问题的微分提法	102
§3.7	位移解法	104
§3.8	应力解法	107
§3.9	应力函数解法	111
§3.10	叠加原理	114
§3.11	解的唯一性定理	116
§3.12	圣维南原理	118
	习题	119
第 4 章	弹性平面问题	123
§4.1	平面问题及其分类	123
§4.2	平面问题的求解	129
§4.3	用直角坐标解平面问题	134
§4.4	极坐标中的平面问题	147
§4.5	平面问题的复变函数解法	168
§4.6	保角变换解法	192
	习题	209
第 5 章	屈服准则和塑性本构关系	215
§5.1	屈服条件	215
§5.2	两个常用的屈服准则	224
§5.3	弹塑性应力-应变关系的特点及几种理想模型	232
§5.4	加卸载条件和加载曲面	237
§5.5	本构关系的增量理论	244
§5.6	简单加载时的全量理论	260
§5.7	简单弹塑性问题	270
	习题	289
第 6 章	塑性平面应变问题和极限分析	292
§6.1	刚塑性平面应变问题的基本特点和基本方程	292
§6.2	应力方程的特征线	297
§6.3	特征线(滑移线)的基本性质	300
§6.4	简单应力状态	306
§6.5	边界条件	308
§6.6	用滑移线场理论求解塑性极限载荷的例题	317

§6.7 刚塑性薄圆板的轴对称弯曲	326
附录 特征线	333
习题	335
参考文献	338
主题索引	347
部分习题参考答案	353

下 册

序

前言

第 7 章 黏弹塑性本构关系	363
§7.1 固体材料动力特性的某些实验结果	340
§7.2 黏弹性理论	344
§7.3 过应力模型理论	352
§7.4 弹黏塑性模型理论和 Perzyna 本构方程	354
§7.5 拟线性本构方程理论	362
§7.6 Bodner-Partom 本构理论	364
§7.7 Zerilli-Armstrong 本构模型	369
§7.8 弹黏塑性空间球对称问题	372
§7.9 弹黏塑性梁问题	375
§7.10 电子束引起的冲击波和层裂	378
习题	384
第 8 章 均质材料断裂力学	388
§8.1 传统强度理论和裂纹的分类	388
§8.2 Westergaard 应力函数	393
§8.3 I 型裂纹尖端附近的弹性应力场	395
§8.4 II 型和 III 型裂纹尖端附近的弹性应力场	400
§8.5 应力强度因子和应力强度因子的解析求法	404
§8.6 应力强度因子的权函数求法	425
§8.7 求应力强度因子的数值法	431
§8.8 求应力强度因子的试验法	443
§8.9 热应力强度因子	444
§8.10 小范围屈服下的塑性修正	451
§8.11 断裂判据和断裂韧性	463
§8.12 弹塑性断裂力学	470

习题	477
第 9 章 应变梯度理论及其应用	482
§9.1 CS 应变梯度塑性理论——偶应力理论	482
§9.2 应变梯度塑性 SG 理论——伸长和旋转梯度理论	493
§9.3 基于细观机制的应变梯度塑性理论(MSG)	502
§9.4 二维平面弹性问题和应变梯度对应力集中的影响	512
§9.5 考虑应变梯度效应后裂纹尖端的应力场	518
习题	531
第 10 章 热应力	533
§10.1 变形体的热力学基础	533
§10.2 热弹性体的本构关系	537
§10.3 热弹性基本方程及其求解	539
§10.4 平面热应力问题	544
§10.5 板中的热应力	551
§10.6 热冲击和热冲击阻抗的估算	557
§10.7 多层介质中的热应力	565
§10.8 热波理论	571
§10.9 耦合热弹性问题	577
§10.10 耦合热弹塑性问题	585
习题	590
第 11 章 激光诱导反冲塞效应	594
§11.1 激光诱导反冲塞效应的实验现象	594
§11.2 激光诱导反冲塞效应的温度场及热弹性板分析	600
§11.3 反冲塞效应的剪切变形分析	615
§11.4 反冲塞效应的屈曲分析	624
习题	628
第 12 章 颗粒增强金属基复合材料的激光热冲击与热疲劳破坏效应	630
§12.1 颗粒增强金属基复合材料的激光热冲击破坏实验	630
§12.2 PMMC 激光热-力作用的理论分析	641
§12.3 PMMC 的激光热-力作用的数值模拟	651
§12.4 PMMC 的激光热疲劳破坏实验	663
§12.5 PMMC 激光热疲劳的数值模拟	670
习题	677
参考文献	679
主题索引	700
部分习题参考答案	688

绪 论

§0.1 什么是材料科学与工程?

材料是人类进化史上的里程碑,是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”的提出只是20世纪60年代初的事.1957年前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的研究,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.把四要素连在一起,便形成一个四面体,如著名材料方面的学术期刊 *Acta Materialia* 的封面所描述的,即如图 0.1 所示.

考虑在四个要素中的组成/结构并非同义词,即相同成分或组成通过不同的合成或加工方法,可以得出不同结构,从而材料的性质或使用效能都不会相同.因此,我国有人提出一个五个基本要素的模型,即成分、合成/加工、结构、性质和使用效能.如果把它们连接起来,则形成一个六面体,如图 0.2 所示^[1].

材料科学与工程五要素模型的特点主要有两个.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下降显著;有的材料在光滑样品时表现很好,而在有缺

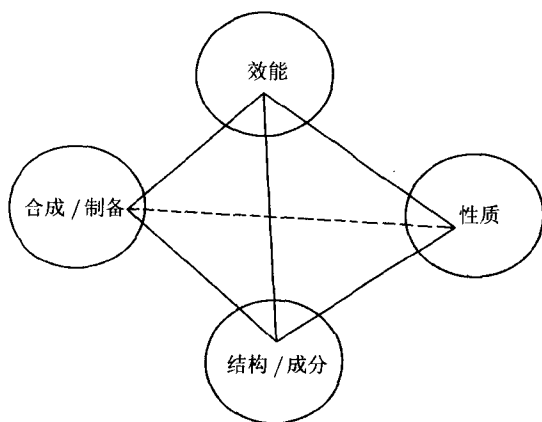


图 0.1 材料科学与工程的四个基本要素

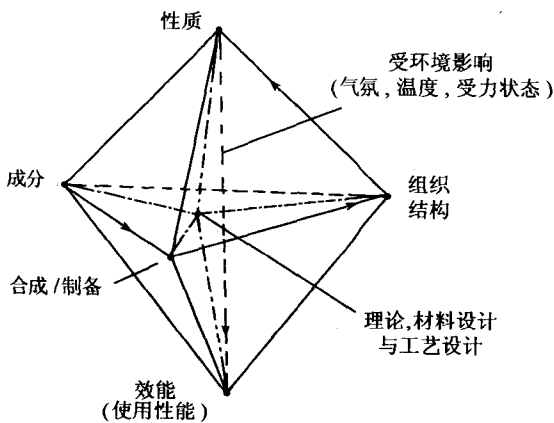


图 0.2 材料科学与工程的五个基本要素

口的情况下性能大为下降，特别是高强度材料尤为突出，但凡有一个划痕，就容易造成灾害性破坏。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，它处在六面体的中心。因为这五个要素中的每一个要素，或几个相关要素都有其理论，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、减少污染或降低成本的最佳状态。这是材料科学与工程最终努力的目标。

根据以上所述，材料科学有三个重要属性：一是多学科交叉，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科学，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科学,不像物理学、化学和力学已经有一个很成熟的体系,材料科学将随各有关学科的发展而得到充实和完善。

§0.2 先进材料学科的发展趋势

材料、信息、生物、能源是 21 世纪科技发展和社会进步的支柱,其中材料科学是基础和支撑。由于材料对国民经济各个部门的关键性基础作用,国内外对材料研究给予了高度重视并相应制订材料科学发展的国家规划,由国家在财政上予以支持,鼓励工业界—大学—研究单位的合作。我国从 20 世纪 50 年代起对新材料研究开发和传统材料的改造就十分重视,取得了大量的研究成果,支持了国民经济及国防建设的发展,在不少领域,如光学晶体、有机分离膜、稀土永磁材料、高温超导体、准晶态研究等方面,已取得举世瞩目的成绩。但与发达国家相比,在总体水平上,特别是在生产技术水平 and 新材料应用水平上还有相当大的差距,估计落后 10 年左右。材料科学与工程的发展还存在问题。不少研究课题起步不晚,成果不错,但形不成商品及产业。国家在新材料研究开发上的总投资估计超过 50 亿元,但形成的新材料生产的产值不大,这种局面大大地影响了我国工业特别是高技术产业的发展。

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:

(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,逐渐形成一门统一的材料科学与工程的新学科,它打破了把材料分为金属—非金属、有机—无机物几个孤立领域的传统概念,并用统一的观点及方法来研究一切材料。它有共同的研究领域:研究所有材料的结构—性能—合成加工—使用行为四大基本要素及其相互关系。它成为融合多种材料、多种学科的综合性的科学。大家还普遍认识到:材料加工工艺不仅是新材料转化为商品的关键,它本身也已成为一门重要的综合性的现代科学。正在迅速发展的人工构造材料工艺、无余量加工、快速凝固方法、激光及粒子束加工以及未来的智能加工系统都将极大地促进新材料的应用及制造业的发展。

(2) 深入微观层次,有目标地发现和开发新物质、新材料。如果说 20 世纪 60 年代以前新材料主要表现在块体材料中,则此后发展起来的具有新的微观结构的材料占有很大的比重。新材料与器件的紧密结合则是另一重要发展趋势,如半导体器件、超晶格、新的超导体、功能梯度材料以及新近出现的碳-60、多孔硅、碳纳米管等。形象地说,新材料的发展热点是在结构上更加复杂(信息含量大),性能极限化,而使

用量降低. 由于已经掌握了观察单个原子及一次仅一个原子层的加工技术, 近几年已经出现更多、更新的材料与器件, 其中人工构造材料又是最有潜力的进展.

(3) 材料复合化是一个重要发展趋势. 由于多种材料及多学科的交叉、融合, 使材料的复合化成为发展新材料的一种重要手段. 可以利用多种基体与增强体的复合、多种层次的复合以及利用非线性复合效应创造出具有全新性能的材料. 材料与部件(元件)的融合将改变“材料”的老概念. 由于激光、等离子体技术的发展, 材料表面处理与表面改性技术也很有前途.

(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^[2]. 由于固体物理计算方法与电子计算机的发展, 材料科学与工程可以借助大型计算机来分析、模拟材料的微观结构, 计算其性能与行为, 从而提供了一个强有力的研究工具来预测与合成具有预期性能的新材料. 近年出现的“材料微观结构设计”方法受到美国、日本科技界的普遍重视. 计算机模拟方法主要有量子力学能带计算、分子动力学计算、Monte-Carlo 方法模拟等. 钱学森在 1986 年已提出要重视这一方向, 他认为: 流行的观念太落后, “炒菜”的方法不行, 材料科学本身也要现代化. 我国高技术计划中“新材料微观结构设计”已形成一课题, 研究工作已经起步. 此外, 计算机技术的应用对新材料生产、控制和自动化也会起到重要推动作用. 可以预言, 现代计算机技术与材料科学结合将建立材料科学的理论基础并提供新的研究方法, 从根本上改变新材料研究与开发的面貌.

(5) 薄膜、涂层科学和技术愈来愈受到重视^[3]. 随着固态高科技产业(集成电路产业、固体发光和激光器件产业、磁记录材料和器件产业等)的迅速发展, 薄膜、涂层的研究和开发对生产的贡献日益巨大, 薄膜、涂层科学研究成果转化为生产力的速度愈来愈快. 这些产业的一个特点是它们使用的设备和实验仪器是接近的(当然整体规模上有很大的差距); 另一个特点是要求工艺的控制精度达到纳米级水平. 正是由于这些情况, 薄膜、涂层领域中科学研究和生产的联系变得十分紧密. 在高科技产业需求的推动下, 薄膜、涂层科学研究的深度和广度不断发展. 薄膜的研究和开发为微电子学、光电子学、磁电子学等新兴交叉学科的发展提供了材料基础, 为器件微型化和集成化创造了条件. 高质量薄膜、涂层的生长工艺, 有关薄膜和涂层的组成、晶体结构和物理力学性能成为新学科的重要组成部分, 使薄膜、涂层材料的应用进入更广阔的天地.

(6) 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. 工业界必须通过越来越小的机械容限来提高产品质量. 今天微技术的应用就是很好的例证, 体现在消费品中日益复杂的功能就是例子, 如小汽车、照相机、洗衣机和无线电话, 将越来越多的功能合并越来越小的“盒子”里, 其发展潜力呈现出了极限. 众所周知, 集成电路的发展创造了“硅时代”和“信息时代”, 集成电路在近 30 年的发展中, 遵循着在硅片上晶体管集成的数量每 18 个月增加一倍的莫尔斯指

数增长规律. 目前, 其一个硅片的线宽为 $0.25 \mu\text{m}$, 晶体管在单片硅上的集成数达到 16000 个. 据认为, 集成电路元件到了 $50 \mu\text{m}$ 的尺度就将达到物理极限. 如果电子器件的集成能力继续呈指数攀升的话, 就像“导体工业协会蓝图”预测的那样, 到那时电子器件的设计和运行原理必定要发生很大的变化. 科学家认为, 到 2005~2010 年莫尔斯定律将不再起作用. 如果半导体技术已经接近此极限, 那么开发新材料、提出晶体管结构新设计和运算新理论已迫在眉睫, 这是挑战也是商机. 从实际来看, 集成电路和系统的小型化意味着在制造中用料少、能耗少. 更小的产品运输便利、便于使用. 很多方面都证明了小型化的优越性. 为了适应科技发展的需要, 科技向纳米尺度范围推进很有益处, 很有必要. 可以说开发纳米技术既是“学驱动”也是“场驱动”.

(7) 出现新材料的研究—开发—生产—应用一体化的趋势. 材料研究与生产紧密结合将使材料科学的成果快速的发挥作用. 大量的研究集中到一个结论: 仅靠科学和技术本身不能保证经济的成功, 只有学会有效地利用技术, 把科学技术成果迅速地转变成商品时它才会发挥出巨大的作用. 现代新材料的应用要从产品设计开始, 从产品全寿命的观点出发, 把材料生产、推广应用看成一个有机结合的集成的大系统, 使之具有合理的结构与运行机制. 只有这个大系统正常地高速运行才能产生效益. 实际上, 一种材料的新的合成/加工方法 (以及过程的分析), 新条件下的使用行为研究都应是新材料研究的重要内容. 如果使用行为不清, 加工方法不好, 即使材料的某项性能非常优越, 仍然无法使用. 也就是说这种新发现的物质不能转化为可用的新材料. 我们要建立起一个共识: 材料科学是一门应用科学, 研制的新材料必须具有先进的“使用性能”, 能用它来制造有用的器件; 同时它必须具有合适的“工艺性能”, 以便能经济的生产出来. 而这两者都必须在与应用密切结合中通过应用研究而获得.

§0.3 什么是固体力学?

力学是一门基础科学, 它是研究力与运动的科学^[4]. 如同其他基础科学一样, 它有自己的理论体系, 并且在其他基础科学和工程技术方面有广泛的应用.

力学既是定量的精确科学, 又是一门实验科学. 计算机的迅速发展极大地扩展了力学的基础与应用. 分析、实验、计算已成为近代力学缺一不可的环节.

力学是认识自然的一个极其重要的手段, 甚至可以说, 任何一个重要宏观自然现象的解释与定量预报, 都离不开力学.

固体力学是力学的一个重要分支^[5]. 固体力学是研究固态物质和结构 (构件) 受力而发生的变形、流动和破坏的一门学科. 固态物质和结构的多样化, 使其受力后的响应丰富多彩, 如弹性、塑性、蠕变、断裂、疲劳等. 而众多自然现象和关键工程

问题,则是固体力学研究对象的实例. 固体力学在 20 世纪有很大的发展. 如果说 19 世纪主要限于弹性力学的话,那么在 20 世纪其领域有极大的扩展,出现了许多分支学科.

塑性力学在 20 世纪上半叶开始有较大的发展,它使结构力学建立在更为科学的基础上,并使金属的机械加工有了坚实的理论基础.

板壳的弹性理论,随着航空、航天工业的发展,已成为一门新的分支学科. 它由线性理论发展成非线性理论,扁壳与圆柱壳的非线性稳定理论,是 20 世纪固体力学重大成就之一. 它不仅可直接应用于轻型结构的设计,而且提供了一种新的数学分析手段. 缺陷敏感的思想是力学家概念上的一个重大的突破,大大增强了力学家分析问题的能力.

随着橡皮这样材料的出现,力学家面临大变形的问题. 于是在 20 世纪中叶,出现了理性力学^[6],它的一个重要目标是严格的数学与物理的原理,用普适的方法建立材料的本构关系. 这个目标虽然目前尚未达到,但是理性力学已经为材料大变形的理论提供了相当圆满的几何描述. 这种普适性的方法也同样适用于流体和流变体.

如果说结构的需求曾是推动固体力学的动力,那么从 20 世纪上半叶开始,材料研究方面的需求一步步成为主要的动力. 航天工业需要高强度材料,但它往往意味着低的韧性,于是材料断裂就成了突出的问题. 为了解决这个问题,力学家借鉴 Griffith 在玻璃方面的工作和弹塑性力学的成就,建立了断裂力学线弹性理论,并在这一基础上进而考虑塑性的影响. 这个理论是力学在 20 世纪的一大成就,其影响难以估量. 从此,带裂缝的材料不仅可以使用寿命而且可以判断它的寿命. 这对结构强度设计在概念上带来极大的革新,因为传统的设计是基于完美无暇的材料的,而对其寿命只能按纯经验的方法做出估计. 有了断裂力学之后,固体力学的分析不但讨论连续变形,也考虑物体的破坏,于是工程师可以更有把握地根据材料的真实情况设计和使用材料.

这样的理论用于有微缺陷的材料,用于大变形、不断出现的新工程材料(如复合材料),用于新出现的微型结构(如电子器件)时就出现了更深层次的问题,于是出现了损伤力学^[7]、缺陷体流变学^[8]、涂层与薄膜力学^[3]这样的提法,出现了用宏、细、微观相结合的研究途径等,深入了解微观和细观层次上物质的性状和演化的规律以求阐明宏观的本构特性.

结构力学也始终是固体力学研究的另一个大的课题. 随着塑性理论、断裂力学和计算机的发展,力学家为工程师提供了十分有效的方法,那就是现在日趋成熟的计算固体力学. 力学家和数学家一齐提出并完善了有限元法,这个方法已经成为工程师们手中的一个随时可用的法宝来解决过去不可想象的复杂结构的应力和变形的分析问题.

力学家先于有限元法, 提出了适用性更强的广义变分原理, 它使有限元方法有了更广泛的理论依据和更加灵活的手段。

固体材料和结构在冲击和动载荷下的响应是不同的, 黏弹塑性波的传播和引起的破坏是无损检测技术的重要理论基础, 研究微、细观缺陷或者损伤的演化也是研究断裂的发生、传播以及疲劳寿命的依据, 已经引起力学界的重视。

§0.4 材料学科的迅速发展对固体力学提出的挑战

力学是自然科学的七大基础科学之一, 与八大应用基础学科紧密相联。宇宙之大、基本粒子之小, 力无所不在。固体力学学科和材料学科都在现代工业中扮演了重要的角色。随着科学技术的发展, 固体力学学科和材料学科交叉越来越明显。在过去的年代, 固体力学创立了一系列重要概念和方法, 如连续介质、应力、应变、分叉、断裂韧性、有限元法等, 这些辉煌成就不但造就了近代土木建筑工程、机械制造业和航空航天工业, 而且为广泛的自然科学如偏微分方程、非线性科学、固体地球物理学、材料科学与工程等提供了范例或基本理论基础。

自然界各种物体的尺寸可以归纳为如图 0.3 所示^[9], 即小可至原子、分子和电子, 大则至宇宙, 其尺寸覆盖了从纳米到光年这样一个十分广阔的范围。而人们关心的“材料”基本上可以按四个层次来划分, 如表 0.1 所示^[10]。埃(Å)及小于埃的尺度称为物理微观, 专指物理意义上的微观。几分之一纳米到几十纳米的尺度称为纳观(nanosopic)。从亚微米到丝米之间的尺度称为细观(mesosopic)。毫米以上则称为宏观(macrosopic)。与宏观相对应, 也可以将从埃到丝米之间的尺度统称为微观(microscopic), 它又分为细观、纳观和物理微观三个逐级变小的层次。从物理模型上来看: 物理微观模型考虑复杂的电子-量子效应, 一般用量子力学来研究该尺度范围内材料的基本性质; 在纳观范围内可把物质模拟为原子作用势下结合为一体的粒

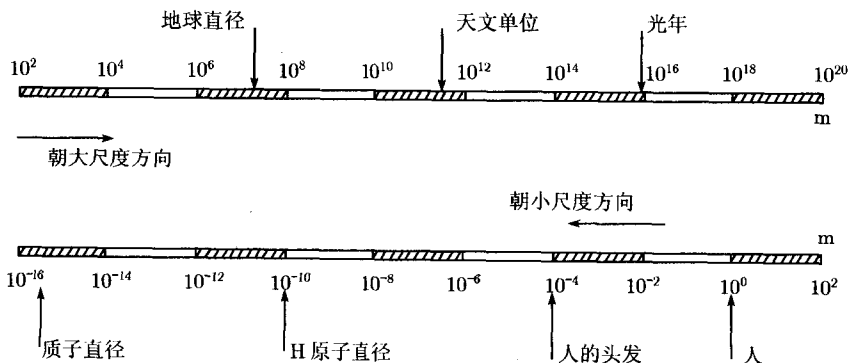


图 0.3 自然界各种物体的尺寸