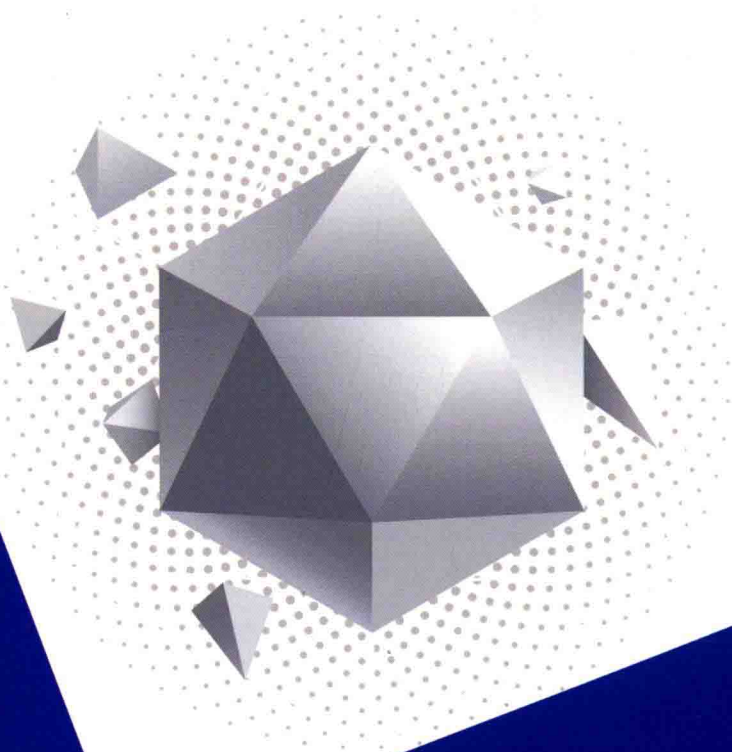


材料力学性能

Mechanical Properties of Materials

彭瑞东 / 编著



材料力学性能

彭瑞东 编著



机械工业出版社

本书比较全面和系统地介绍了固体材料在外加载荷及环境因素作用下的变形破坏特点以及相应的力学性能指标表征方法和测试方法。本书绪论中对一些描述力学状态及行为的基本概念做了简要介绍,然后分3篇详细介绍了材料力学性能的有关知识。第1篇为材料力学性能的试验评测,第1~8章。该篇内容主要围绕材料力学性能的试验测试方法展开,介绍了拉伸、压缩、扭转、弯曲、剪切等静载试验以及硬度试验方法,动态力学分析、疲劳、冲击等动载试验以及摩擦磨损试验方法,还有材料的缺口敏感性试验、断裂韧性试验、疲劳裂纹扩展试验以及环境温度和介质影响下的试验。这一部分旨在描述材料的各种力学行为,并测定相应的力学性能指标。第2篇为材料力学行为的机理分析,第9~11章。该篇内容主要围绕材料变形破坏的规律和机理展开,介绍了材料的弹性变形、塑性变形以及断裂和损伤。这一部分旨在解释材料各种力学行为的特点和机制,并探讨相应的影响因素,揭示材料力学性能的共性规律。第3篇为典型材料的力学性能特点,第12~13章。该篇内容主要分析了不同种类材料的力学性能特点,包括金属材料、陶瓷材料、高分子材料、复合材料、岩土材料等。第3篇是前两篇内容的综合应用,并进一步补充说明了各种材料的一些个性规律。这种架构体现了从现象到本质、再到应用的工程科学思想。本书着力强调宏观规律与微观机理的结合,注重各种力学性能指标的测试方法和物理意义研究,对材料的变形和破坏规律进行了科学的分类和比较。

本书可作为材料科学与工程、工程力学、机械、采矿、化工等专业本科生的教材,也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

材料力学性能/彭瑞东编著. —北京:机械工业出版社,2017.12
ISBN 978-7-111-58398-1

I. ①材… II. ①彭… III. ①材料力学性质 IV. ①TB303.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第320126号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑:赵红梅 责任编辑:赵红梅 杨璇 责任校对:肖琳
封面设计:马精明 责任印制:孙炜
保定市中国美凯印刷有限公司印刷
2018年1月第1版第1次印刷
184mm×260mm·22印张·537千字
0001—1000册
标准书号:ISBN 978-7-111-58398-1
定价:49.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

前 言

人类的文明史，就是一部人类利用材料改造自然的历史。人类从最早只能利用石块、树枝，发展到冶炼并使用铜、铁、钢等各种金属材料，20世纪初又出现并开始使用塑料、橡胶等高分子材料。目前，人类已经可以制造并使用纳米材料。综观历史，充分研究并合理认识材料的性能，对于更为有效地利用已有材料以及开发新的材料都是大有裨益的。

材料力学性能是材料性能的一个重要方面，是对材料变形和破坏行为的表征。对材料力学性能的研究也是对材料所有性质的研究中较为透彻和成熟的。因为不管是石器时代还是青铜器时代，人类最初利用材料都是力学方面的应用。发展至今，材料力学方面的应用仍是最广泛和最基础的。不过，对材料的力学研究比对材料力学方面的应用要晚得多。最初，人们根据建筑和机械制造的要求去积累材料的宏观力学性能，然后借此经验去选材、设计，这是相当粗糙的，直至后来数学和物理学的发展，人类才开始定量研究材料的宏观力学性能。如今，随着物理学、化学的蓬勃发展，随着材料科学、信息科学的日新月异，通过各种先进的检测技术，人类对材料力学性能的研究也越来越深入，越来越完善。借助高性能计算机，人类可以迅速完成对某一复杂结构的力学计算，优选出合理的方案。借助各种电子显微镜，人类可以了解材料力学行为的微细观状况，进而揭示材料力学性能的内在机理。

研究揭示材料变形破坏的力学行为特点和规律不仅是材料学和力学研究的重点，也是诸多相关工程实践中的一个基本科学问题。材料的力学行为表征和控制是一个涉及材料学、力学、物理学、化学、冶金、机械、化工、测控、安全等诸多学科的交叉领域。各种工程技术的发展对材料的力学稳定性和安全性提出了越来越高的要求，而现代测试技术以及材料加工技术的发展也为材料满足这些要求提供了保障。随着科技的发展，材料力学性能的研究也不断深入，从而得以更加科学合理地控制材料的变形破坏过程。

材料力学性能作为相关专业的一门专业基础课，在培养相关领域的科研人员和工程技术人员方面发挥着重要的作用。了解和掌握材料的力学行为规律和性能特点，不仅是材料制备和加工的基础，也是合理开展力学分析的基础。随着材料学的蓬勃发展，各种新材料层出不穷，既有材料的潜能也不断得以提升。随着力学的蓬勃发展，各种新理论不断涌现，既有理论的局限性也不断得以修正。编者在多年的教学过程和科研过程中积累了一些心得体会，深感这门课程涉及面极广，不仅有许多经典的概念和方法需要认真学习掌握，也有不少新兴的概念和方法值得了解和借鉴。尽管目前国内外有许多相关的教材，其中不乏经典传世之作，也有一些新颖独特的专著，这些都让人受益匪浅。编者

还是希望能将这十几年的教学与科研体会整理出来,通过本书与大家交流,希望能对学习和了解材料的力学性能特点有所帮助。

在本书的编撰过程中,编者力求既能涵盖相关的基本知识,又能体现一些最新知识。限于许多本科高校教学学时设置,为了便于学生自学,本书尽可能对各个知识点给出详尽解释说明,力图做到浅显易懂。

首先,本书绪论对一些描述力学状态及行为的基本概念做了简要介绍,包括载荷与应力、变形与应变,以及材料力学性能的概念。然后,为适用不同的需求,本书又分3篇进行介绍,但这3篇并不是彼此独立的,而是有机联系在一起的。

第1篇为材料力学性能的试验评测,从第1章到第8章。该篇内容主要围绕材料力学性能的试验测试方法展开,介绍了拉伸、压缩、扭转、弯曲、剪切等静载试验以及硬度试验方法,动态力学分析、疲劳、冲击等动载试验以及摩擦磨损试验方法,还有材料的缺口敏感性试验方法、断裂韧性试验方法、疲劳裂纹扩展试验方法以及环境温度和介质影响下的试验方法。这一部分旨在描述材料的各种力学行为,并测定相应的力学性能指标。通过介绍一系列试验测试方法,有助于在感性层面了解材料在不同载荷、不同环境下的力学行为特点,并掌握表征这些力学行为的一些性能指标。对于大部分工程技术人员,学习这一部分内容后即可开展相关的试验测试工作。

第2篇为材料力学行为的机理分析,从第9章到第11章。该篇内容主要围绕材料变形破坏的规律和机理展开,介绍了材料的弹性变形、塑性变形以及断裂和损伤,旨在解释材料各种力学行为的特点和机制,并探讨相应的影响因素,揭示材料力学性能的共性规律。该篇内容采用宏观规律与微观机理相结合的方法来分析材料为什么会出现各种各样的力学行为,以及影响这些行为的内在因素和外在因素。具备一定的力学和材料学知识将有助于学习和理解这一部分的内容。只有掌握了分析材料变形破坏规律和机理的方法,才能更加能动地完成第1篇介绍的试验测试工作,才能对试验测试过程中观察到的现象做出科学合理的解释。这也是在工程实践中解决材料变形破坏问题的基础。只有掌握了这些基本方法,才能科学合理地分析各种工程材料的力学性能特点,才能科学合理地实现材料的增强增韧,才能科学合理地选用材料以避免失效破坏。

第3篇为典型材料的力学性能特点,第12章和第13章。该篇内容主要围绕典型材料的结构特点分析了各自的力学性能特点,包括金属材料、陶瓷材料、高分子材料、复合材料、岩土材料等。本篇是前两篇内容的综合应用,并进一步补充说明了各种材料的个性规律。同时,这些内容也与相关专业的专业课相衔接,可供读者初步了解不同专业的研究对象,并从中得到启发并加以借鉴。

这种架构遵循了从具体到抽象再到具体的科学研究规律,体现了从现象到本质再到应用的工程科学思想。需要说明的是,3篇的内容不是彼此割裂的。第1篇以试验测试为主,重点介绍力学性能指标的定义和测定方法;第2篇以理论分析为主,重点阐释力学性能指标的意义和影响因素;第3篇以实际应用为主,重点阐释力学性能指标的评价和作用。

本书的内容遵循了大部分材料力学性能教材的主要内容,涵盖了基本静载试验、硬度试验,以及疲劳、冲击、蠕变、环境腐蚀等载荷工况,解释了弹性变形、塑性变形、

断裂等力学行为特点。此外,本书在试验部分和理论分析部分又增加了一些重要内容。在试验方面,增加了有关动态力学分析的内容,将其与疲劳相衔接,构成了材料的振动与疲劳这一章,分别解决周期载荷下黏弹性变形和疲劳破坏的问题。在冲击破坏这章中增加了有关 SHPB 冲击试验的介绍,充实了动态试验测试方法。对于断裂韧性试验、疲劳裂纹扩展试验、摩擦磨损试验也给予了相对比较详细的介绍。在理论分析部分,增加了有关损伤力学的内容。最后本书对包括岩土材料在内的各种结构材料的力学性能特点进行了简要介绍。

本书由编者在多年教学经验和教学资料的基础上整理完善、编写而成,期间得到了诸多专家学者的指正,他们提出了许多宝贵的意见,为本书的最终定稿提供了很多帮助,编者谨在此表示衷心感谢。在本书编写过程中,参考了国内外一些教材、专著以及论文,引用了一些网络资料,在此向所有作者表示感谢。

由于编者的水平有限,书中难免会有疏漏,敬请广大读者批评指正。

编者

目 录

前言	
绪论	1

第 1 篇 材料力学性能的试验评测

第 1 章 材料在单向静拉伸下的力学性能测试	13
1.1 单向拉伸试样及应力场分析	13
1.2 拉伸曲线	15
1.3 拉伸性能指标	24
1.4 拉伸断口与断裂方式	36
1.5 单向静拉伸试验的特点	37
第 2 章 材料在其他静载下的力学性能测试	38
2.1 加载方式与应力状态	38
2.2 单向压缩	41
2.3 扭转	44
2.4 弯曲	50
2.5 剪切	53
2.6 多向拉伸与压缩	55
第 3 章 材料的硬度	58
3.1 硬度测量的特点	58
3.2 布氏硬度	59
3.3 洛氏硬度	63
3.4 维氏硬度	66
3.5 显微硬度	68
3.6 肖氏硬度和里氏硬度	69
3.7 莫氏硬度	70
第 4 章 材料的振动与疲劳	72
4.1 动态力学分析	72
4.2 疲劳现象与特点	82
4.3 疲劳曲线	87
4.4 疲劳强度	91
4.5 循环应力-应变曲线	97
4.6 应变疲劳曲线	100
4.7 高周疲劳和低周疲劳	101
第 5 章 材料的冲击破坏	103
5.1 冲击载荷的特点	103
5.2 材料的应变率	105
5.3 冲击试验与吸收能量	106
5.4 SHPB 冲击试验与应力波分析	112
5.5 膨胀环试验	119
第 6 章 缺口试样的力学性能	121
6.1 缺口效应	121
6.2 应力集中系数	125
6.3 缺口敏感性试验	129
6.4 断裂韧性测定试验	135
6.5 疲劳裂纹扩展试验	146
第 7 章 材料在特殊环境下的力学性能	151
7.1 材料在高温下的力学性能	151
7.2 材料的低温脆性与韧脆转变	159
7.3 材料的抗热震性	163
7.4 环境介质中的材料力学性能试验	165
第 8 章 材料的摩擦磨损	175
8.1 材料表面的性状及检测	175
8.2 材料表面的接触和摩擦	200
8.3 材料的磨损试验	204

第 2 篇 材料力学行为的机理分析

第 9 章 弹性变形	212
9.1 弹性变形的物理机制	212

9.2 广义胡克定律	213	第 11 章 断裂和损伤	267
9.3 弹性模量	217	11.1 断裂的基本特点	267
9.4 弹性不完善性	229	11.2 脆性断裂	270
第 10 章 塑性变形	234	11.3 韧性断裂	276
10.1 塑性变形的物理机制	234	11.4 材料的韧脆转变	280
10.2 单向拉压下材料的塑性变形	246	11.5 断裂强度	284
10.3 塑性变形的影响	251	11.6 断裂韧度	288
10.4 屈服强度	254	11.7 材料的损伤	298
10.5 形变强化	263		
第 3 篇 典型材料的力学性能特点			
第 12 章 工程材料的力学性能	304	第 13 章 岩土材料的力学性能	317
12.1 金属材料的力学性能	304	13.1 岩石的力学性能	317
12.2 陶瓷材料的力学性能	305	13.2 土的力学性能	321
12.3 高分子材料的力学性能	307	13.3 混凝土的力学性能	326
12.4 复合材料的力学性能	315		
附录	329	附录 C 相关国家标准	338
附录 A 一些常见的材料力学性能参数	329	附录 D 相关专业术语及其符号	340
附录 B 几种常见的应力集中情况	335	参考文献	343

绪 论

材料的力学状态可通过材料内各点的应力状态和应变状态进行描述。材料内的应力和应变不仅与各点的位置有关，还与所关注的方向有关。通过一点的不同截面上的应力和应变是不同的。工程中常常采用近似简化的名义应力和名义应变来表示材料的受力和变形状况。严格的理论分析中就需要采用应力张量和应变张量来描述材料的力学状态。借助特定的试验技术手段，可以定量测量材料中的应力和应变大小及分布情况。对于不同材料，在不同的外载条件和环境下，材料力学状态的变化有着不同的规律，表现出弹性、塑性、黏性等不同的力学行为。材料力学行为的研究就是要解释材料力学状态变化的规律，材料力学性能的研究则是要揭示材料所能达到的极限力学状态，这两者是有机联系在一起的。描述材料力学行为和性能的物理量分为两大类，统称为材料力学性能指标。一类关注的是材料所能达到的极限状态，如屈服强度、断裂强度、疲劳强度、断裂韧度、持久强度、形变强化容量、极限延伸率等。另一类关注的是材料力学状态的变化过程，如弹性模量、形变强化指数、黏度等，但其适用范围要根据材料的极限状态来确定，也就是说要在一定的强度范围之内。另外，根据力学性能指标的量纲，可将其分为应力指标、应变指标和能量指标等。例如：各种强度和弹性模量的单位为应力的单位 Pa，可称为应力指标，极限应变、断后伸长率、持久塑性等则可称为应变指标；而韧度等具有能量的量纲，可称为能量指标。或根据各个指标的应用场合分为弹性指标、塑性指标、黏性指标、硬度指标、疲劳指标、冲击指标、断裂韧性指标等。

1. 载荷与应力

材料发生变形时，其内部组织结构间的相对位置和距离会发生变化，同时将产生附加内力而抵抗外力，并试图恢复到变形前的状态。达到平衡时，附加内力与外力大小相等、方向相反。在材料力学中所研究的内力就是这种附加内力，而材料固有的结合力属于物理学的研究范畴。不失一般性，以后将附加内力简称为内力。材料内任一截面上的内力是其两侧材料相互作用的反映。在杆系结构中，根据横截面上内力的方向及其合成后的结果，可将其分为轴力、剪力、扭矩、弯矩四种类型。采用截面法，可以根据材料所受外载及约束情况求出材料内任一截面上的内力。

材料单位面积上所受的附加内力称为应力。在简单受力情况下，可以认为材料截面上的内力是均匀分布的，于是可定义应力为

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (0-1)$$

式中， S 是截面面积； F 是截面上的内力。当取变形前的原始截面面积计算应力时，称为工

程应力或名义应力，适用于小变形的情况。在大变形情况下，需采用变形后的真实面积计算应力，称为真应力。在复杂受力情况下，各点不同方向上所受内力不同，需考虑微元截面上的应力，即

$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} \quad (0-2)$$

式中， ΔS 是微元截面面积； ΔF 是微元截面上的内力。应力 σ 的单位为 Pa。工程中应力数值一般较大，常用单位为 kPa 或 MPa。需要注意的是，应力与压力具有相同的量纲，但两者的物理含义是不同的。压力是单位面积上受到的外力，而应力是单位面积上的内力。考虑到 $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2 = 1\text{J}/\text{m}^3$ ，应力的本质是材料内部单位体积附加势能的表现。

按照应力与截面的方向关系，可以将应力分为正应力 σ 和切应力 τ 。同截面垂直的应力称为正应力或法向应力。根据其朝向性，背离力的作用平面的应力称为拉应力，朝向力的作用平面的应力称为压应力，同截面相切的应力称为切应力。

一般情况下，材料内各点处不同截面方向上的应力是不同的，但各个方向的应力之间存在一定关系。材料内各点处的应力状态可以通过围绕该点的某一单元体各个面上的应力组合来描述，可以取正六面体、正四面体、正八面体或正十二面体作为单元体。最普遍的形式是采用正六面体定义的应力状态，如图 0-1 所示，可以用一个二阶张量来表示应力，即

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (0-3)$$

式中， σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 是正应力，方向分别垂直于单元体的六个面，其作用导致材料的伸长或缩短； τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 是切应力，方向分别沿单元体的六个面，其作用引起材料的切向畸变。当单元体内没有力偶矩作用时，在单元体上两个相互垂直的平面上切应力必然成对存在，且数值相等，其方向共同指向或共同背离这两个平面的交线，即

$$\tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}, \tau_{yx} = \tau_{xy} \quad (0-4)$$

因此这时应力张量是一个对称张量。

对于材料中的每一点，在其所有截面中，存在一组特殊的截面，其上只有正应力，切应力为零，称为单元体的主平面。由主平面构成的单元体称为主单元体，相应的应力称为该点的主应力。三个主应力通常按代数值大小排列，分别称为第一主应力 σ_1 、第二主应力 σ_2 和第三主应力 σ_3 ，且 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ 。因此，一点的应力状态可以用六个应力分量来表示，也可以用三个主应力大小及其方向来表示。在给定应力状态下，主应力的大小不会随坐标系的变化而改变，而且主应力之和保持不变，与任意三个相互垂直面上的正应力之和相等，这也就是应力状态的第一不变量，即

$$I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\sigma_m \quad (0-5)$$

式中， σ_m 是平均应力，相当于静水压力作用。应力会随着外力的增加而增加，对于某一种

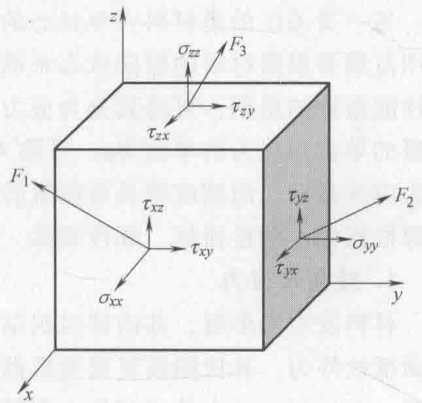


图 0-1 正六面体定义的应力状态

材料，应力的增加是有限度的，超过这一限度，材料就会被破坏。对某种材料来说，应力可能达到的这个限度称为该种材料的极限应力。极限应力值要通过材料的力学试验来测定。在简单应力状态下，极限应力可以用某一强度值表征，如抗拉强度、抗压强度、抗剪强度等。但在复杂应力状态下，需要用多个应力分量来表示应力，这些分量的组合有很多情形，所以必须结合相应的强度理论进行分析计算。材料要想安全使用，在使用时其内的应力应低于它的极限应力，否则材料就会在使用时被破坏。将测定的极限应力适当降低，规定出材料能安全工作的应力最大值，这就是许用应力。对于材料的力学行为研究，应力分布是一个重要参数。大至楼房、桥梁、公路，小到一个螺钉的设计，都要清楚明白应力分布，才能做出合适的设计，否则桥梁可能因为承重不当而塌陷，螺钉可能因为挤压过度而碎裂。

有些材料在工作时，其所受的外力不随时间而变化，这时其内部的应力大小不变，称为静应力；还有一些材料，其所受的外力随时间呈周期性变化，这时内部的应力也随时间呈周期性变化，称为交变应力。通常材料承受的交变应力远小于其静载下的强度极限时，破坏就可能发生。材料在交变应力作用下发生的破坏称为疲劳破坏。另外，材料会由于截面尺寸改变而引起应力的局部增大，这种现象称为应力集中。应力集中将大大降低构件的强度，在设计构件时应特别注意。

2. 变形与应变

在外力作用下，材料内部质点产生运动，导致材料的几何形状和尺寸发生变化。从宏观上看，有三种基本的变形形式，即线应变、切应变和体应变。

线应变表示材料在垂直于横截面方向上受到大小相等、方向相反并作用在同一条直线上的两个正应力时发生的变形，如图 0-2a 所示。

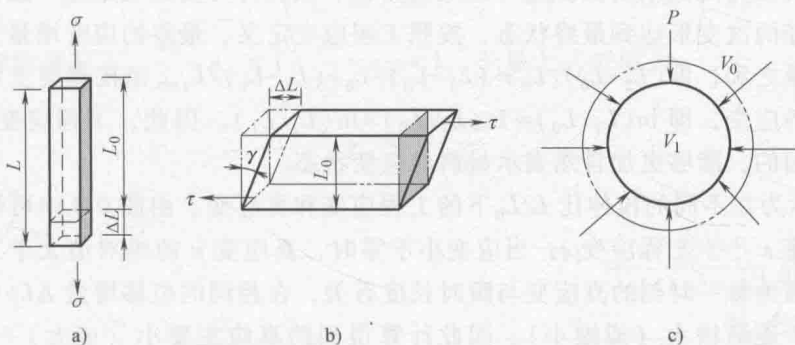


图 0-2 应变示意图

a) 线应变 b) 切应变 c) 体应变

若材料在正应力 σ 作用下长度由 L_0 伸长（或缩短）至 L ，则线应变为

$$e = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (0-6)$$

这也被称为工程应变或名义应变。

切应变表示材料在平行于横截面方向上受到大小相等、方向相反的两个切应力时发生的变形，如图 0-2b 所示。

若材料在切应力 τ 作用下发生偏斜，偏斜角为 γ ，则在小变形情况下切应变为

$$\gamma \approx \tan \gamma = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (0-7)$$

体应变表示材料周围受到均匀压应力时发生的变形,如图 0-2c 所示。

若材料在压应力 P 作用下体积由 V_0 收缩至 V_1 , 则体应变为

$$\Delta = \frac{V_1 - V_0}{V_0} = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (0-8)$$

上述工程应变(名义应变)适用于小变形的情况,在大变形时需根据实时长度来计算应变,即

$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} + \frac{L_2 - L_1}{L_1} + \dots + \frac{L_n - L_{n-1}}{L_{n-1}} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{L_{i+1} - L_i}{L_i}$$

不妨定义真应变的微小增量为

$$d\varepsilon = \frac{dL}{L} \quad (0-9)$$

于是可得真应变为

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} = \ln(L + e) \quad (0-10)$$

也称为自然应变。式中, e 是工程应变, 即 $e = (L - L_0)/L_0$ 。在拉伸情况下, 定义拉伸比为 $\lambda = L/L_0$; 在压缩情况下, 定义压缩比为 $\lambda' = L_0/L$ 。于是可得 $\varepsilon = \ln \lambda$ 或 $\varepsilon = -\ln \lambda'$, 因此真应变也称为对数应变。不难看出, 拉伸比或压缩比除了在原始状态时为 1 外, 是一个恒大于 1 的无量纲数。而无论是工程应变还是真应变, 除了在原始状态时为 0, 在拉伸时恒为无量纲正数, 在压缩时恒为无量纲负数。这与拉应力为正、压应力为负的规定是一致的。

考虑先后经两次变形达到最终状态, 按照工程应变定义, 最终的应变增量并不等于两次变形的应变增量之和, 即 $(L_2 - L_0)/L_0 \neq (L_1 - L_0)/L_0 + (L_2 - L_1)/L_1$, 但按真应变定义, 两次应变之和等于总的应变, 即 $\ln(L_2/L_0) = \ln(L_1/L_0) + \ln(L_2/L_1)$ 。因此, 工程应变是不可加的, 但真应变是可加的, 能够更加自然表示材料的应变状态。

图 0-3 所示为在不同的拉伸比 L/L_0 下的工程应变和真应变。由图 0-3 中可见: 当应变大于零时, 真应变 ε 小于工程应变 e ; 当应变小于零时, 真应变 ε 的绝对值大于工程应变 e 的绝对值。这是因为每一时刻的真应变与瞬时长度有关, 在相同的位移增量 $\Delta L > 0$ (或 $\Delta L < 0$) 下, 瞬时长度 L 逐渐增大(或缩小), 因此计算得到的真应变要小(或大)一些。不难发现, 以长度伸长 2 倍 ($L/L_0 = 2$) 或缩小 2 倍 ($L_0/L = 2$) 为例, 相应的工程应变分别为 100% 或 -50%, 而相应的真应变为 69% 或 -69%。另外当压缩变形量很大, 使 $L \rightarrow 0$ 时, 工程应变 $e \rightarrow -100\%$, 而真应变 $\varepsilon \rightarrow -\infty$, 可见真应变在大变形时也能够很好地反映材料的变形量, 而工程应变只能适用于小变形的情况。

事实上, 将 $\ln(1+e)$ 展成幂级数可得:

$$\ln(1+e) = e - \frac{e^2}{2} + \frac{e^3}{3} - \frac{e^4}{4} + \dots + (-1)^n \frac{e^{n+1}}{n+1} + \dots \quad (0-11)$$

因此当 $|e| \approx 0$, 即在小变形情况下, 近似有 $e \approx \varepsilon$ 。由图 0-3 也可看出, 当 $L \rightarrow L_0$ 时, 即小变形的情况下, 工程应变与真应变是比较接近的。只有在大变形的情况下, 两者才存在较大差异, 这时需采用真应变的定义。

材料受力产生变形时,各点处变形程度一般并不相同。为此可在该点处选一单元体,比较变形前后单元体大小和形状的变化。图 0-4 所示为平面内某点 A 处一单元体变形和位移示意图。若点 A 的位移在 x 、 y 方向的分量分别为 u 、 v 。根据材料变形的连续性,其他点的位移可用泰勒级数表示为

$$u_C = u + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx^2 + \dots \quad (0-12)$$

在小变形情况下,可以略去二阶以上高阶项,于是可得点 C 的位移分量分别为 $u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$ 和 $v + \frac{\partial v}{\partial x} dx$, 点 B 的位移分量分别为 $u + \frac{\partial u}{\partial y} dy$ 和 $v + \frac{\partial v}{\partial y} dy$ 。因此点 A 处在 x 方向的线应变为

$$\varepsilon_{xx} = \lim_{AC \rightarrow 0} \frac{A'C' - AC}{AC} = \lim_{AC \rightarrow 0} \frac{A'C_1 - AC}{AC} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\left[\left(\Delta x + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x \right) - u \right] - \Delta x}{\Delta x} = \frac{\partial u}{\partial x}$$

在 y 方向的线应变为

$$\varepsilon_{yy} = \lim_{AB \rightarrow 0} \frac{A'B' - AB}{AB} = \lim_{AB \rightarrow 0} \frac{A'B_1 - AB}{AB} = \lim_{\Delta y \rightarrow 0} \frac{\left[\left(\Delta y + v + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \right) - v \right] - \Delta y}{\Delta y} = \frac{\partial v}{\partial y}$$

在 Oxy 平面的切应变为

$$\gamma_{xy} = \alpha + \beta \approx \tan \alpha + \tan \beta = \frac{\frac{\partial v}{\partial x} \Delta x}{\Delta x + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x} + \frac{\frac{\partial u}{\partial y} \Delta y}{\Delta y + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y} = \frac{\frac{\partial v}{\partial x}}{1 + \frac{\partial u}{\partial x}} + \frac{\frac{\partial u}{\partial y}}{1 + \frac{\partial v}{\partial y}}$$

在小变形的情况下, $\frac{\partial u}{\partial x} = \varepsilon_{xx} \ll 1$, $\frac{\partial v}{\partial y} = \varepsilon_{yy} \ll 1$, 于是上式近似为

$$\gamma_{xy} \approx \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$$

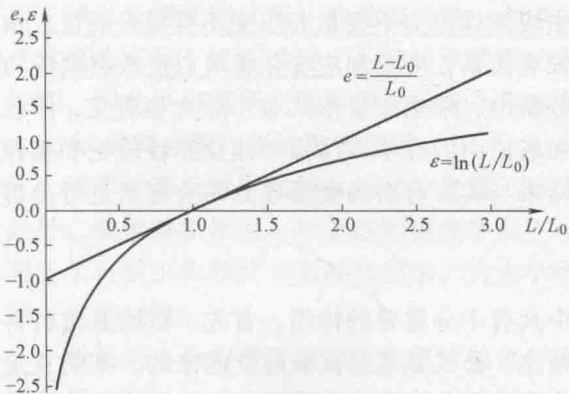


图 0-3 在不同的拉伸比 $\frac{L}{L_0}$ 下的工程应变和真应变

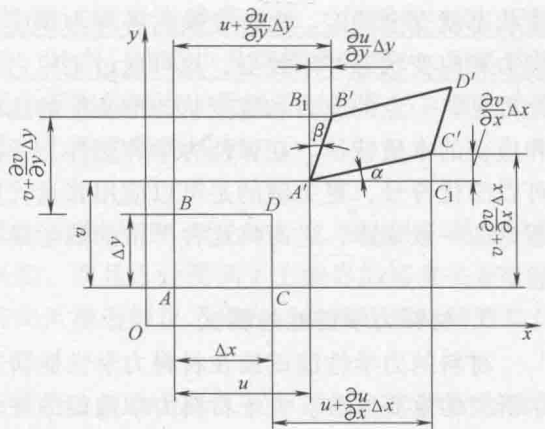


图 0-4 平面内某点 a 处一单元体变形和位移示意图

同理可得, 过点 A 的单元体在各个方向上的应变为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} & \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} & \gamma_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z} & \gamma_{zx} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (0-13)$$

因此, 与应力张量类似, 材料内某一点的应变状态可表示为二阶对称应变张量, 即

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (0-14)$$

式中, $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$ 。需要注意的是, 这一定义只适用于小变形的情况, 所以被称为小应变张量或柯西应变张量。另外, 工程中的切应变 γ_{ij} 与柯西应变张量中的切应变 ε_{ij} 定义有所不同, 即

$$\gamma_{xy} = \varepsilon_{xy} + \varepsilon_{yx} = 2\varepsilon_{xy}, \quad \gamma_{yz} = \varepsilon_{yz} + \varepsilon_{zy} = 2\varepsilon_{yz}, \quad \gamma_{zx} = \varepsilon_{zx} + \varepsilon_{xz} = 2\varepsilon_{zx} \quad (0-15)$$

应变是材料尺寸的变化率, 没有单位。由于材料应变一般很小, 所以在工程中通常采用微应变 $\mu\varepsilon$ 来表示应变 ($1\mu\varepsilon = 10^{-6}$)。

材料变形时的体积变化可表示为体应变 Δ 。单元体的体应变可表示为

$$\Delta = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{(1+\varepsilon_{xx})dx(1+\varepsilon_{yy})dy(1+\varepsilon_{zz})dz - dx dy dz}{dx dy dz} = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} + \varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yy}\varepsilon_{zz} + \varepsilon_{xx}\varepsilon_{zz} + \varepsilon_{xx}\varepsilon_{yy}\varepsilon_{zz}$$

在小变形的情况下, 可略去应变的高阶项, 于是可得

$$\Delta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = 3\varepsilon_0 \quad (0-16)$$

式中, ε_0 是平均应变。类似于应力张量, 可以定义应变张量的主应变 ε_1 、 ε_2 和 ε_3 。将切应变为零的方向称为应变主轴, 在应变主轴方向的正应变即为主应变。在给定应变状态下, 任意三个相互垂直面上的正应变之和相等, 即 $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = 3\varepsilon_0$, 称为应变状态的第一不变量。可见其物理意义即该点处的体应变。

应力和应变张量一旦确定, 则任意坐标系下的应力和应变分量均可确定, 因此应力和应变状态就完全确定。坐标变换后各应力和应变分量均发生改变, 但作为一个整体, 所描述的应力和应变状态并未改变, 这可通过主应力和主应变或应力不变量和应变不变量来表征。由此可见, 一点的应力和应变状态与坐标的选取没有关系, 应力和应变张量可以反映材料应力和应变的本质特征。在弹性力学和塑性力学的分析中, 采用张量形式表示应力和应变, 不仅可以简化符号, 更关键的是可以应用张量代数和场论中的数学方法推导建立弹性理论和塑性理论的一般规律, 进而将这种严密的数学推导结果与实际材料的变形现象结合起来进行分析验证。

3. 材料力学性能的测试

材料的力学性能试验在材料力学性能研究中具有十分重要的作用。首先, 试验是进行科学研究的重要方法。关于材料力学性能的许多结论、公式是通过试验建立起来的, 如胡克定律、疲劳极限等; 其次, 试验也是验证理论推演的一种必需的、有效的方法; 再次, 力学性能试验是解决工程实际问题的重要手段。在工程设计中, 许多力学性能指标要通过力学试验来测定, 而且对于一些复杂的实际问题, 理论分析有时误差较大, 这就需要通过试验来进行

分析。

材料的力学性能试验是在特定的材料试验系统上实现的。随着科技发展,材料试验系统的精确度越来越高,自动化程度也不断加深。这为更加精确测定材料力学性能指标提供了物质保证。

试验测定材料的力学性能指标时,试样的尺寸规格、组织结构、缺陷分布、加工精度等会对试验结果带来较大影响,因此,试样加工是材料力学性能试验的重要一环,要考虑相似原理和尺寸效应。为使试验结果具有可比性,国家及相关组织对各种试验的试样取材、加工都做了统一规定。一般来说,试样分为两大类:一类是无缺口试样,也称为光滑试样,主要用于测定材料的承载性能;另一类是缺口试样,在光滑试样的基础上按一定要求预制一定规格、数量的缺口,主要用于测定材料的破断性能。

此外,根据试验过程中应力和应变的测量方式,可分为宏观试验与全场试验。借助载荷传感器、位移传感器以及应变片测量试样特定几点的应力应变与整体变形,这是材料力学性能试验的一种主要方式,称为宏观试验。它具有简便易行、技术成熟的特点,如各种传统的静载试验、疲劳试验、冲击试验等。借助激光干涉、红外成像、声波探测、CT扫描等手段对试样各点的应力和应变进行测定,可以得到试样的应力和应变分布,称为全场试验。它具有形象直观的特点,如光弹法、云纹法、散斑法、声发射法等。

传统的力学测试设备关注的是试样所承受的载荷大小以及变形情况,通过应力和应变的测量来描述材料的力学响应与行为特点,如各种材料万能试验机、扭转试验机、疲劳试验机、冲击试验机、蠕变试验机等。传统的材料学测试设备关注的是试样的组织结构特点,通过光学成像、电子成像或衍射分析、能谱分析来描述材料的物质组成与结构特点,如各种光学显微镜、扫描电镜、工业CT机等。随着技术的进步,现在已经研发出了各种可以进行原位加载下实时观测试样组织结构变化的试验系统,如带有加载装置的扫描电镜、与材料试验机配合工作的CT扫描机等。这就使得从微细观尺度了解材料的变形破坏过程成为可能,从而为将材料宏观力学响应与微细观组织结构特点联系起来提供了试验支持。另外,将各种恒温箱、环境箱、高温炉等与材料试验机相配合,可以模拟研究材料在不同温度以及不同环境介质中的力学行为。

通过模拟材料的不同承载形式,材料力学性能试验分为静载试验(包括拉、压、弯、剪、扭以及硬度测试等)和动载试验(包括振动、冲击、疲劳以及摩擦磨损等),而且均可在常温或高温下进行试验。不同的承载形式表现出不同的特点,反映了材料某一方面的力学性能,因此要根据研究需要和材料特点选择合适的力学性能测试方法。

4. 材料力学行为的数值模拟

随着计算机科学和信息技术的发展,除传统的试验研究、理论分析这两种科学研究手段之外,数值模拟作为一种全新的研究手段正在兴起,而且已经受到了工程界的高度关注。它引起了科研工作和技术实践的变革,为多学科的交叉渗透提供了平台,加速了基础研究向应用开发的过渡。

材料的力学响应可以通过数值模拟进行分析研究,这为复杂工况下的材料力学行为模拟提供了有效手段,也对复合材料的力学行为研究开创了新的手段。数值模拟可用于各种参数研究,以探讨敏感参数及其影响规律,如尺寸、形状的影响,以及材料参数的影响等,也可用于研究材料内部结构对其宏观力学行为的影响,如孔隙分布、纤维分布等的影响。这种方

法也被称为虚拟试验方法或数值试验方法, 而将传统的实物试验方法称为物理试验方法。

材料是有结构层次的, 按空间尺度可以分为宏观、细观、微观和纳观等不同层次, 在不同尺度下有其适用的数值模拟方法。目前也在尝试将不同尺度下的数值模拟融合在一起的跨尺度或多尺度数值模拟方法, 这包括不同数值计算模型的衔接或叠合。

宏观数值模拟是以连续介质力学为基础, 采用计算力学和数值方法求解偏微分平衡方程, 从而确定材料内部宏观应力应变量的分布规律。这是大多数工程实践中直接接触到的主要范围, 其空间尺度从几毫米至几十米甚至数千千米。

数值模拟的可信度依赖于许多方面的因素, 如材料模型、物理方程与初始条件和边界条件、计算算法等。其中材料模型指的是对材料在外载作用下力学响应的描述, 包括三类基本方程, 即物态方程 (Equation of State)、本构方程 (Constitutive Equation) 和失效准则 (Failure Criterion)。物态方程用于描述材料热力学响应, 反映压力、体积和内能之间的联系。本构方程用于描述材料的变形规律, 反映材料变形时应力、应变、应变率、温度、压力、变形历史、结构内变量等之间的联系。这两者都是等式方程。失效准则用于描述材料的强度特性, 反映材料塑性屈服或起裂破坏的临界值, 是一个不等式方程。建立材料力学行为的具体描述方程并确定其参数, 需要发展相应的试验技术和测试技术, 而且还得结合相应的模型验证方法。在合理应用材料数值模型的情况下, 可以借助数值试验进一步展开和推进相关研究。

宏观数值模拟的方法有很多种, 目前广泛采用的有有限差分法 (FDM)、有限元法 (FEM)、离散元法 (DEM)、不连续变形分析法 (DDA)、数值流形法 (NMM) 等。有限差分法和有限元法是基于连续介质模型建立的数值计算方法, 是目前最主要的数值模拟方法, 有许多商业软件如 FLAC、ABAQUS、ANSYS、COMSOL 等可供使用。但传统有限元法在模拟材料断裂方面还存在较大困难, 因此发展了扩展有限元 (XFEM)、单元生死等技术来弥补这一不足。离散元法有 UDEC、3DEC、PFC 等商业软件可供使用。鉴于材料变形破坏过程的复杂性, 不同的方法具有不同的优缺点, 可以适用于不同的场合。

细观数值模拟是以细观力学为基础, 借助自洽理论、随机夹杂理论、分形理论、重整化群理论等, 发展适合各种典型细观结构的专用算法, 并构建可以表达宏细观相结合的统计型计算模型。细观数值模拟可以实现从位错、滑移、单晶和多晶不同层次探讨塑性变形的物理规律, 以及从孔洞、微裂纹、局部化带、界面失效等细观损伤基元出发定量地刻画固体材料破坏行为的孕育和发展过程。细观数值模拟具体结合材料构造来定量表述金属材料、陶瓷材料、高分子材料、岩土材料、生物材料和复合材料的力学行为, 探求材料细观组织结构的硬化与韧化机制。细观数值模拟研究的基本单元是材料的细观组织结构, 如晶粒、夹杂、相组织等, 其尺度在 $\mu\text{m} \sim \text{mm}$ 量级。

微观和纳观数值模拟是以统计力学为基础, 研究单个或多个原子、分子的运动规律及其对材料宏观力学行为的影响。目前所采用的方法主要有分子动力学、蒙特卡罗方法和第一性原理计算方法等。经典的分子动力学 (MD) 是依靠牛顿力学来模拟分子体系的运动。首先在由分子体系的不同状态构成的系统中抽取样本, 从而计算体系的构型积分, 然后以构型积分的结果为基础进一步计算体系的热力学量和其他宏观性质。分子动力学是一种确定性的热力学计算方法, 与蒙特卡罗法相比在宏观性质计算上具有更高的准确度和有效性。蒙特卡罗 (Monte Carlo) 方法, 也称为统计模拟方法, 是一种以概率统计理论为指导的数值计算方法。它首先构造或描述某一概率过程, 然后使用随机数 (或更常见的伪随机数) 实现从已知概

率分布抽样,从而得出各种随机变量的估计量。广义的第一性原理计算是指一切基于量子力学原理的计算。严格的第一性原理计算方法不使用经验参数,只用电子质量、光速、质子和中子质量等少数试验数据去做量子计算。但是这个计算速度很慢,所以就加入一些经验参数,可以大大加快计算速度,当然也会不可避免地牺牲计算结果精度。第一性原理是从头计算,不需要任何参数,只需要一些基本的物理常量,就可以得到体系基态的基本性质的原理。微观和纳观数值模拟方法可以在微纳观尺度上对材料的变形破坏机制进行模拟,但目前还很难应用到工程中。

作为一种开展研究以及辅佐工程的有效方法,数值模拟技术还在不断发展完善中。只要充分考虑各种控制方程及边界条件的影响,提供科学合理、行之有效的计算模型,就有可能给出接近真实情况的模拟结果,做出准确预测。

5. 材料力学性能的特点和分类

材料的各种力学行为都遵循一定的规律,探讨这种规律是研究材料力学性能的关键所在。只有了解了材料的本构关系、认识了材料的强度与破坏特点,才有可能合理利用材料的力学性能,并尽可能防止材料的失效与破坏。

材料力学性能是指材料在外加载荷或环境因素(温度、介质等)作用下表现出的变形能力。这种变形包括宏观可视的弹性变形、塑性变形甚至断裂,也包括各种细观损伤乃至微观晶格变形。事实上,材料的变形是一个时间、空间上的演化过程:变形是一个从无到有、从小到大的时间过程,是一个由量变到质变的发展过程。变形的宏观表象有其内在的微观机理,材料的变形能力取决于材料的组成与结构。

材料的力学性能可分为弹性、塑性、断裂与损伤四个方面。

材料的弹性性能是指材料可恢复的变形性能。弹性变形是原子系统在外力作用下离开平衡位置达到新的平衡状态的过程。现在主要采用广义胡克定律描述材料的弹性本构关系。

材料的塑性性能是指材料不可恢复的永久变形性能。塑性变形的微观机制主要是滑移。对于实际材料,塑性变形一般伴随着形变强化。不同的材料需要采用不同的屈服判别准则和塑性本构关系。

材料的断裂是材料承载的极限结局。由于实际材料具有不可避免的缺陷,材料的实际断裂强度远低于理论断裂强度。断裂力学的分析基于裂纹理论对此做出了解释。

材料的损伤理论阐明了材料在外载作用下逐渐损伤劣化的演化特点,揭示了材料力学响应的本质特点。

研究材料力学性能,就是要研究材料的本构关系、破坏形式及其物理基础,探讨化学成分和微观结构同宏观力学性能之间的关系,从而实现材料力学性能的预言和改进。这要从宏、细、微观三个层次考虑,建立宏观判据,找出微观机理。因此,材料力学性能的研究需综合力学、材料学、测试技术、分析技术等知识,是一种边缘性、综合性的研究。材料力学性能的研究要为材料的失效与破坏分析提供基础,从而促进材料的合理选用与科学应用。

一般说来,材料力学性能的研究主要包括两个方面:一是通过建立适当的模型简化研究对象,并给出定量的设计应用方法;二是借助微观分析,探讨材料力学性能的实质,以便能动地改造和提高材料的力学性能。前者注重材料宏观表现出的力学性能,故而为工程应用领域所重视;后者注重材料力学性能的机理,故而为材料学力学研究所重视。不过,宏观模型的建立和推演不能忽略材料的本征结构特点,微细观机理的研究也要最终归结到材料的宏观