

材料力学实验

付朝华 胡德贵 蒋小林 编

清华大学出版社

材料力学实验

付朝华 胡德贵 蒋小林 编

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书参照教育部基础力学实验教学示范标准(2000年讨论稿)编著。为了适应开放式、自主研究型实验教学模式的要求,本书将材料力学实验的实验原理、测试方法和实验设备等内容独立出来,分别在第二章、第三章和第五章集中介绍;而在第四章的实验内容部分,减少了实验的具体过程的说明,增补了实验前和实验后的思考题,力求激励学生主动、积极地参与到实验教学中来。本书中的14个实验,既包括了材料力学的基础性实验教学内容,也包括了提高性和综合性实验教学内容;另外,还有部分力学前沿领域中的研究性和探索性实验教学内容。

本书适于独立设课的高校材料力学实验使用,也可作为高等学校工科各专业材料力学课程实验教学的配套教材。

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

材料力学实验 / 付朝华,胡德贵,蒋小林编. --北京:清华大学出版社,2010.2
ISBN 978-7-302-22004-6

I. ①材… II. ①付… ②胡… ③蒋… III. ①材料力学—实验—高等学校—教材
IV. ①TB301-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第009342号

责任编辑:佟丽霞 李 嫚

责任校对:赵丽敏

责任印制:李红英

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:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170×230

印 张:6.5

字 数:125千字

版 次:2010年2月第1版

印 次:2010年2月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:12.00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:032542-01

前

言

近年来,随着高等教育逐步普及,高等教育培养方针的深化改革,实验教学方法与动手能力的培养已经引起各方重视。为了满足社会的需求,我们根据多年的教学与科研积累,推出了这本材料力学实验教材。

全书内容是在教育部基础力学实验教学示范标准(2000年讨论稿)中实验教学内容要求的基础上编著的,内容主要包括:高等院校大面积基本材料力学实验教学内容以及针对部分优秀学生为对象开展的提高性实验内容和实验方法讨论;最后介绍部分力学前沿领域中的研究性实验内容和方法;同时本书也反映了“985”清华大学在创建一流大学过程中材料力学实验教学改革的部分成果。

教育部基础力学实验教学示范中心的教学任务主要包含:①示范中心所在院校大面积基本实验教学;②示范中心所在院校适度规模专题性提高型实验教学;③面向全社会开放式实验教学;④面向教育工作者和力学工作者的示范教学内容。

本书主要由清华大学力学实验教学示范中心付朝华、胡德贵、蒋小林编写。另外,王习术参加了本书部分内容的编写工作,付朝华负责最后统编完稿。

本书由清华大学殷雅俊教授审阅,为本书编写给予了很大的帮助和指导,提出了很多宝贵意见,谨此致谢。

限于编者水平,本书难免有不妥之处,恳请广大师生和读者批评指正。

编者

2009年6月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 实验在材料力学中的地位	1
第二节 材料力学实验的内容	1
第三节 材料力学实验注意事项	2
第二章 材料力学基本性能及测试方法	4
第一节 拉伸实验条件	4
第二节 典型材料的应力-应变曲线	6
第三节 金属材料拉伸现象的细观解释	9
第四节 拉伸实验步骤	13
第三章 电测法的基本原理	15
第一节 敏感元件——电阻应变片的工作原理	16
第二节 测量电路——电桥的工作原理	19
第三节 组桥方式举例	20
第四节 温度补偿方法	21
第五节 应力测量与计算方法	23
第四章 材料力学实验	25
第一节 试验机操作实验	25
第二节 电测组桥实验	27
第三节 常温静荷拉伸破坏实验	29
第四节 弹性模量和泊松比测定实验	33
第五节 矩形截面梁弯曲正应力实验	37
第六节 组合梁应力分析实验	39
第七节 弯扭组合受力下的圆管应力与内力测定实验	43

第八节	大挠度杆稳定实验	45
第九节	弯扭管贴片实验	48
第十节	复合材料力学行为研究实验	51
第十一节	三角架结构应力与内力测试实验	54
第十二节	框架内力分析实验	56
第十三节	开口薄壁杆件应力分布特性研究实验	58
第十四节	光测演示实验	61
实验一	光弹性实验	61
实验二	云纹干涉法实验	66
第五章	常用实验设备	72
第一节	材料试验机结构原理	72
第二节	负荷传感器和引伸计	75
第三节	WDW-100 型电子万能试验机操作要点	78
第四节	CSS-2210 型电子万能试验机操作要点	81
第五节	WDW-3020 型电子万能试验机操作要点	84
第六节	其他材料试验机简介	86
第七节	静态电阻应变仪结构原理	89
第八节	YE2539 高速静态应变仪操作要点	92
附录 A	金属拉伸实验新旧国家标准符号对照表	95
附录 B	力学性能测试实验常用国家标准列表	97
参考文献	98

绪 论

第一节 实验在材料力学中的地位

材料力学是研究材料或者构件承载能力的科学。实验是材料力学重要的有机组成部分。材料力学实验起源于伽利略。作为材料力学的奠基人之一,他提出了一个重要思想——几何相似的结构物,尺寸越大越为软弱。为验证这一思想,他用简单的拉伸方法探索了材料的强度,进而借助悬臂梁的弯曲实验,研究了梁的承载能力。材料力学的基石之一是胡克定律,它是胡克先生通过弹簧的拉压实验建立起来的理论。如果没有实验,材料力学所涉及的三大问题——强度问题、刚度问题和稳定性问题便无从谈起。实验不仅是材料力学的基础,而且也是检验材料力学理论正确性的标准。材料力学理论是建立在真实材料理想化、实际构件典型化、公式推导假设化基础之上的,它是否正确、是否能在工程实际中应用,只有通过实验验证才能断定。此外,工程实际中的构件几何形状和承受的载荷都十分复杂,构件中的应力单纯靠计算难以得到正确的数据,因此,必须借助实验应力分析手段才能解决。

近代工业技术要求工程技术人员合理地设计各种构件和零件,开发优质材料,使之达到强度高、刚度好和重量轻等目的。这促进了材料力学的发展,相应的材料力学实验也不断地采用新技术以适应新的要求。因此,本书适当地介绍了一些新设备、新技术和新方法。

第二节 材料力学实验的内容

材料力学实验一般包括以下四个方面的内容。

1. 测定材料的力学性能

材料力学只能计算出在外载荷作用下构件内应力的大小。为了建立强度条件必须了解材料的强度、韧度和硬度等力学性能特性。这些特性只能通过基本力学

性能指标的测定及分析得到。另外,通过拉伸、压缩、弯曲、冲击、疲劳等实验,可以测定材料的弹性模量、强度极限、冲击韧性、疲劳极限等力学参数。这些参数是设计构件的基本依据。通过力学参数的测定、变形过程和破坏现象的观察和断口的分析,便可了解材料的力学性能,掌握力学性能测试的基本方法。

2. 验证理论公式

材料力学中的许多公式都是在简化和假设的基础上(平面假设、材料均匀假设、弹性和各向同性假设)推导出来的。例如弹性杆件的弯曲理论就是以平面假设为基础推导出来的。用实验验证这些理论的正确性和适用范围,有助于加深对理论的认识和理解。通过这类实验的学习,学生们应对所学的书本知识有一个真实的、完整的认识,尤其可以通过理论解与实测结果的比较,对理论的适用范围及精确度建立一个正确的概念。这方面的内容有梁弯曲正应力的测试、弯扭组合变形实验和压杆稳定性实验等。

3. 应力分析实验

工程中很多实际构件的受力情况,无法用材料力学公式进行计算。近年来虽然可以用有限元等数值计算方法计算,但还是需要简化模型。同时有限元计算结果的精确性,也需要通过实验应力分析加以验证。此外,零件设计中的应力集中系数的确定,机器和建筑结构中的应力实测等,均需要靠实验应力分析的方法来实现。电测法和光测法都属于实验应力分析方法。本书对电测应力分析方法做了比较详细的讲述,并简单介绍了光测应力分析方法。

4. 综合性和探索性实验

与验证性实验或基础性实验不同,综合性实验着重于综合——不仅是实验技术和实验方法的综合,而且是材料力学理论与材料力学实验的有机结合,是材料力学理论在材料力学实验中的综合应用。探索性实验则更进一步——不仅要在探索中完成实验,而且要通过实验再现科学探索的一般过程,即实现“假设(假说)→理论模型→实验验证→修正假设(假说)→完善理论模型→……”的循环。

第三节 材料力学实验注意事项

在常温、静载条件下,材料力学实验所涉及的物理量并不多,主要是测量作用在试样上的力和变形。载荷一般要求较大,由几千牛顿到几百千牛顿,故设备较大;而试样的变形相对比较小,有时可以小到 0.001 mm ,相对变形可小到 $10^{-6}\sim 10^{-5}$,因而变形测量设备必须精密。在进行实验时,力与变形要同时测量,非一人

所能为之,因此,材料力学实验大都是2~4人一组。这就要求实验小组成员要有很好的配合与协作。实验时(尤其是初学者)应注意以下几方面。

1. 实验前的准备工作

首先要明确实验目的、原理和步骤,然后选定被测样品或实验装置的加载方式及加载部位。根据材料的极限强度或实验要求制定加载方案(衰减挡设定、加载速率设定、实验最大极限载荷设定等)。

参加实验的同学应严格遵守操作规程和实验室的规章制度,听从实验室指导教师的指挥和安排。实验小组的成员,应分工明确,相互配合,在小组长(负责加载者)的统一领导下完成实验。

2. 实验操作并测取数据

在实验过程中,要密切观察实验现象;小组成员虽有分工,但要及时轮换,每个学生都要自己动手完成所有实验内容。现在大多数实验设备都用计算机控制,因此要注意根据图形随时记录一些相关数据,并保存自己的图形和数据,严禁删除别人的文件或重叠别人的文件名。

除实验指导书中规定的实验方案外,学生也可以根据实际目的、原理自己设计实验方案,经主管教师认可后实施。

3. 数据整理并书写报告

顾名思义,实验报告是对所做实验的一个综合总结。通过实验报告的书写,培养学生准确有效地用文字来表达实验结果的能力。因此,要求学生在动手完成实验的基础上,用自己的语言简明扼要地叙述实验目的、实验仪器设备、实验原理与方法、实验步骤;实验数据列表、数据计算、实验结果;实验结论、实验现象或结果的分析与讨论等内容。要求每个同学独立地写出实验报告,并做到字迹工整、图表简明。

第二章

材料力学基本性能及测试方法

材料的使用性能包括物理、化学、力学等性能。对于用于工程中作为构件和零件的结构材料,人们最关心的是它的力学性能。力学性能也称为机械性能。任何材料受力后都要产生变形,变形到一定程度即发生断裂。这种在外载作用下材料所表现的变形与断裂的行为叫力学行为,它是由材料内部的物质结构决定的,是材料固有的属性。同时,环境如温度、介质和加载速率对于材料的力学行为有很大的影响。因此材料的力学行为是外加载荷与环境因素共同作用的结果。材料力学性能是材料抵抗外加载荷引起的变形和断裂的能力。

材料的力学性能通过材料的强度、刚度、硬度、塑性、韧性等反映。定量描述这些性能的是力学性能指标。力学性能指标包括屈服强度、抗拉强度、断后伸长率、截面收缩率、冲击韧性、疲劳极限、断裂韧性等。这些力学性能指标是通过一系列实验测定的。实验包括静载荷实验、疲劳实验、冲击实验等。其中静载荷拉伸实验是测定大部分材料基本力学性能指标的通用办法。材料力学性能指标的测定要依据统一的规定和方法进行,即国家标准,比如《金属材料拉伸试验标准》GB 228。依据这个标准,可以测定金属的屈服强度、抗拉强度、断后伸长率、截面收缩率等基本力学性能指标。其他材料如高分子材料、陶瓷材料及复合材料力学性能也应依据各自的标准进行测定。本书主要介绍的是金属材料室温拉伸实验,指标的定义和符号规定均采用 GB 228—2002。附录中的 GB 228—2002(2002 年颁布)和 GB 228—87(1987 年颁布)两个标准符号对照仅供参考。

第一节 拉伸实验条件

拉伸实验的条件是常温、静荷、轴向加载,也就是要求实验在室温下进行,是以均匀缓慢的速度对被测试样施加轴向拉伸载荷。

拉伸试样应依据国家标准制作。金属材料的拉伸试样通常有圆截面和矩形截面两种。图 2.1(a)和(b)分别为圆形试样和矩形试样的示意图。拉伸试样由三部分

组成,即工作部分、过渡部分和夹持部分。工作部分必须保持光滑均匀以确保单向应力状态。 L_0 称为试样的平行长度, L_c 称为试样的原始标距。拉伸试样分为比例试样和定标距试样。除特殊情况外,一般应按比例试样的要求加工试样。比例试样就是对试样的原始截面积与原始标距长度的比例有特定要求的试样。比例试样的原始标距与试样原始横截面积的关系如下式所示

$$L_0 = k\sqrt{S_0} \quad (2-1)$$

式中,系数 k 取 5.65 时称为短试样,取 11.3 时称为长试样。如果是圆形试样,那么当试样标距与试样直径的比为 5,即 $L_0 = 5d_0$ 时称为短试样, $L_0 = 10d_0$ 时称为长试样。国家标准规定使用短比例试样。如实验采用的是长标距试样或非比例试样,应在实验测试报告中明确标注。

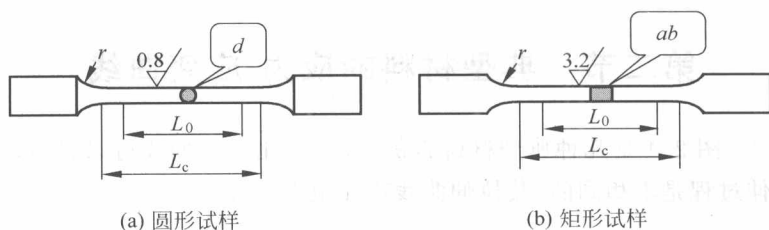


图 2.1 拉伸试样示意图

试样的过渡部分必须有适当的台肩和圆角,以降低应力集中,保证该处不会断裂。试样两端的夹持部分用以传递载荷,其形状和尺寸与所用试验机的夹具结构有关,如试样夹持部分采用图 2.1 的形式,则试样夹持部分的长度不应小于夹具长度的 2/3。

进行拉伸实验时,要使外力通过试样的轴线以确保材料处于单向应力状态。在加载过程中,通过定时检测作用在试样上的载荷 F (单位为 N 或 kN) 和试样的伸长 ΔL (单位为 mm),可得到 F 与 ΔL 的关系曲线,即被测材料的拉伸曲线(也称拉伸图)。 F - ΔL 曲线形象地体现了材料在拉伸过程中的变形过程以及各阶段受力和变形的关系,但是 F - ΔL 曲线的定量关系不仅取决于材质而且受试样几何尺寸的影响。因此,在工程上常常将其转化为与试样尺寸无关的 σ - ϵ 曲线。应力 σ 通过载荷 F 除以试样原始横截面积 S_0 而得到,即

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (2-2)$$

其应力 σ 的单位一般为 MPa ($1 \text{ MPa} = 1 \text{ N/mm}^2$);应变 ϵ 通过试样的伸长 ΔL 除以试样的原始标距 L_0 而得到,即

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2-3)$$

应变是一个无量纲量,在应力-应变关系曲线中,作为 X 轴坐标的应变值常表示为百分数形式。如试样原标距 L_0 为 100 mm,在加载过程试样的标距 L 变为 102 mm,即 $\Delta L=2$ mm,应变 ϵ 即为 2%。 σ - ϵ 曲线与 F - ΔL 曲线形状相似,但消除了几何尺寸的影响,因此它代表了材料属性,便于人们直接从应力-应变曲线上观察、认识、分析及确定材料的力学性能及特性。

很明显,随着外加载荷的不断增加,试样的横截面积和试样的长度总是在不断改变。因此应力 σ 和应变 ϵ 不能代表被测材料真实的应力和应变,所以按上述方法得到的应力常称作名义应力或工程应力,得到的应变常称作名义应变或工程应变,其曲线称为名义应力-应变曲线或工程应力-应变曲线。

第二节 典型材料的应力-应变曲线

图 2.2~图 2.4 是几种典型材料的 σ - ϵ 曲线。由这些曲线可以看出,不同材质的材料拉伸过程是不相同的,其拉伸曲线存在很大差异。

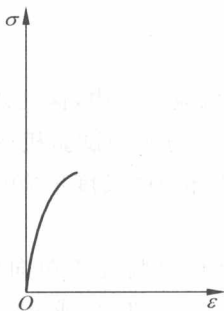


图 2.2 脆性材料拉伸示意图

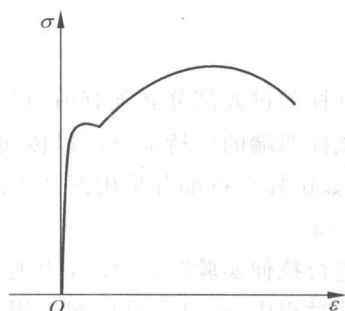


图 2.3 金属韧性材料拉伸示意图

下面以低碳钢材料为例,介绍金属韧性材料的拉伸过程、材料力学特性和基本力学性能指标的定义方法。

低碳钢具有良好的塑性。由图 2.5 可以看出,低碳钢的整个拉伸过程明显地分成四个阶段:弹性阶段、屈服阶段、强化阶段、颈缩阶段。

(1) 弹性阶段(OA)。这个阶段的变形是弹性的,如果在这个阶段卸载,试样仍恢复到原先的尺寸,表明试样没有任何残余变形。这个阶段的初始部分是直线,力与变形符合线性关系也就是符合胡克定律,即

$$\sigma = E\epsilon \quad (2-4)$$

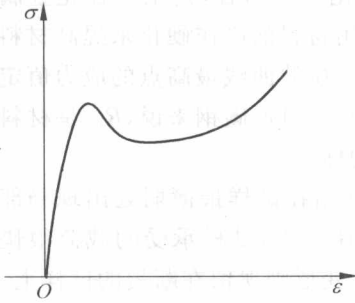


图 2.4 聚合物拉伸示意图

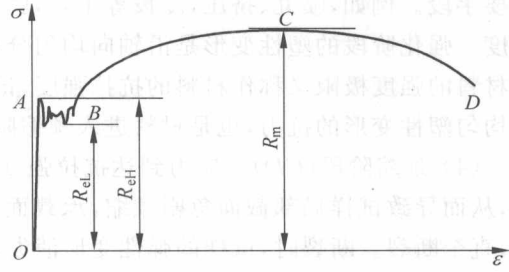


图 2.5 低碳钢应力-应变曲线

式中,比例系数 E 代表直线的斜率,称为材料的弹性模量,其常用单位为 MPa 或 GPa。 E 的大小反映了材料抵抗弹性变形的一种能力,代表了材料的刚度。此外,材料在发生轴向伸长的同时还发生横向收缩。其横向应变 ϵ' 与轴向应变 ϵ 之间也满足线性关系,两者之比的绝对值称为材料的泊松比 μ ,即

$$\mu = \left| \frac{\epsilon'}{\epsilon} \right| \quad (2-5)$$

式中, E 和 μ 都是材料弹性常数。

(2) 屈服阶段(AB)。在超过弹性阶段后出现明显的屈服现象,表现为在此阶段曲线出现锯齿形的上下微小波动,而变形快速增加,表明材料暂时丧失了抵抗继续变形的能力。屈服现象是金属材料开始产生宏观塑性变形的标志。从屈服阶段开始,材料的变形就包含可恢复的变形(弹性)和不可恢复的变形(塑性)两部分。如果试样表面足够光滑、材料杂质含量少,将可以看到试样表面有 45° 方向的滑移线。这个现象说明在此阶段开始产生的塑性变形与 45° 斜面所存在的最大剪应力有关。通常把这一阶段的曲线形象地称作屈服平台。对应于应力突然下降的点称为上屈服强度 R_{eH} ;对应于屈服平台的最低峰值(去除初始瞬时效应)称为下屈服强度 R_{eL} 。由于上屈服强度受实验加载速度、试样夹持状态等影响不够稳定,而下屈服强度比较稳定、再现性较好,所以工程上常将下屈服强度定义为材料的屈服极限 σ_s 。 σ_s 是材料开始进入塑性变形的标志。结构、零件的应力一旦超过 σ_s ,材料就会屈服,零件就会因为出现塑性变形而失效。因此强度设计时常以屈服极限 σ_s 作为确定许可应力的基础。

(3) 强化阶段(BC)。屈服阶段结束后, σ - ϵ 曲线又开始上升,表明材料恢复了对继续变形的抵抗能力。这种对塑性变形的抗力反映了金属材料具有的应变强化的特性。如果在这一阶段卸载,弹性变形将随之消失,而塑性变形将永远保留,其卸载路径与弹性阶段的直线平行。卸载后若重新加载,材料的弹性阶段线将加长、后继屈服强度明显提高,但塑性将降低。这种现象称作冷作硬化。冷作硬化是金

属材料极为宝贵的性质之一。塑性变形与应变强化二者结合,是工厂强化金属的重要手段。例如,喷丸、挤压、冷拔等工艺,就是利用材料的冷作硬化来提高材料的强度。强化阶段的塑性变形是沿轴向均匀分布的。拉伸曲线最高点的应力值定义为材料的强度极限又称作材料的抗拉强度,记作 R_m 。对低碳钢来说, R_m 是材料最大均匀塑性变形的抗力,也是材料进入颈缩阶段的标志。

(4) 颈缩阶段(CD)。应力到达抗拉强度后,开始在试样最薄弱处出现局部变形,从而导致试样局部截面急剧颈缩,承载面积迅速减少,试样承受的载荷很快下降,直至断裂。断裂时,试样的弹性变形消失,塑性变形则遗留在断裂的试样上。

材料的塑性是指材料断裂前发生塑性变形的能力。金属材料的塑性大小一般用断后伸长率 A 和断面收缩率 Z 两个塑性指标来表示,其数学表达式为:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (2-6)$$

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\% \quad (2-7)$$

式中, L_0 、 S_0 分别表示试样的原始标距长度和原始横截面积; L_u 、 S_u 分别表示试样断裂后的标距和断口面积。对于长比例试样,断后伸长率应在 A 后加上脚注 11.3, 即 $A_{11.3}$; 对于不符合比例要求的定标距试样,其断后伸长率则应附以该标距数值的脚注,如某非比例试样的标距为 40 mm, 则断后伸长率用 $A_{40\text{ mm}}$ 表示。

工程上通常认为,材料的断后伸长率 $A > 5\%$ 属于韧性断裂,相反则属于脆性断裂。韧性断裂的特征是断裂前有较大的宏观塑性变形,断口形貌是暗灰色纤维状组织。低碳钢断裂前发生很大的塑性变形,其断口如图 2.6(a)、(b) 所示,断口为杯状,周边为 45° 的剪切唇,断口组织为暗灰色纤维状,因此是一种典型的韧性断裂断口。



图 2.6 金属典型材料拉伸破坏断口

铸铁材料的 σ - ϵ 曲线如图 2.2 所示,其拉伸过程比较简单,可以近似认为经弹性阶段直接过渡到断裂,强度指标只有 R_m ,其断口如图 2.6(c) 所示,断口与正应力垂直,断面平齐为闪光的结晶状组织,是一种典型的脆性断口。很明显,铸铁是典型的脆性材料。脆性材料常在没有任何预兆的情况下(特别是在拉伸载荷和冲击载荷作用时)发生突然断裂。因此,这类材料若使用不当,极易发生事故。

大多数金属材料的拉伸曲线介于低碳钢和铸铁之间,常常只有两三个阶段。

对于没有明显物理屈服现象的材料,如硬铝合金,其屈服强度只能采用规定非比例延伸下的应力来表示,被称作规定非比例延伸强度 R_p 。如无特殊要求,一般以非比例延伸率为 0.2% 对应的应力代表材料屈服强度,即 $R_{p0.2}$ 。 $R_{p0.2}$ 通常用图解法测定。具体方法如图 2.7 所示,在被测材料的 σ - ϵ 曲线上过 X 轴应变值 0.2% 处作弹性阶段直线的平行线,平行线与 σ - ϵ 曲线的交点即为 $R_{p0.2}$ 。

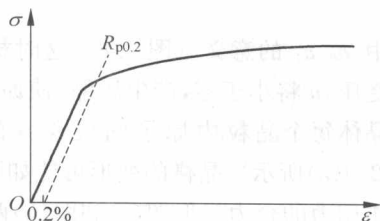


图 2.7 $R_{p0.2}$ 图解法测定示意图

除了金属材料之外,在工程上还有很多非金属材料作为结构材料使用,比如高分子材料和复合材料。高分子材料又叫聚合物,其特殊的内部结构造成这种材料独有的特点和繁多的种类。图 2.4 是一种典型的聚合物拉伸曲线示意图。对比图 2.3 和图 2.4 可知,聚合物材料力学性能与金属材料差异很大,其高弹性、粘弹性及很大的断裂伸长率是这种材料独具特色的力学特性。复合材料是由两种或两种以上组分材料组合的,其性能集中了组分材料的优点,并大大优于组分材料。结构用的复合材料主要是以高聚物为基体,增强材料采用连续纤维如玻璃纤维、碳纤维等组成的纤维增强复合材料。俗称为玻璃钢的材料就是玻璃纤维与环氧树脂复合而成的复合材料,其强度和刚度都比较高,又有绝缘和重量轻等特点,因此在很多地方替代金属。

第三节 金属材料拉伸现象的细微观解释

材料受力时的力学行为,应由细观、微观构造及其性质所决定。

金属材料都具有晶体固态结构。由一个晶核生成的晶体中的原子都按一定规则、形状整齐地排列,这种晶体称为单晶体。多数金属材料是由许多随机分布的小晶体(称为晶粒)组成的,称为多晶体。

每个单晶体内金属原子按一定规则构成一空间点阵。下面我们仅以最简单的简单立方点阵在一个点阵平面内各原子受力时的力学表现解释金属材料的力学性能。

1. 金属材料的弹性和线性

金属原子之间随着原子间距的改变,将呈现图 2.8 所示的吸力(曲线 1)和斥力(曲线 2)的共同作用(a 为原子中心距离),两者可合成为曲线 3 所示的合力。原子间的相互作用力,本质上是电荷间的库仑力。当材料承受外力作用时,为了保证平衡,要求原子间沿外力作用方向伸长。沿此方向金属原子间的平均距离由 a_0 增

大为 a_1 , 即发生位移。

$$u = a_0 - a_1 \quad (2-8)$$

式中, a_0 , a_1 的意义见图 2.8。这时材料内部原子间产生拉力, 与外力平衡。如果材料受压, u 将小于零, 产生压缩, 使原子间产生压力与外力平衡。构件受拉、受压时, 多晶体每个晶粒内原子间位移 u 的方向, 不一定是金属原子键的结合方向(如图 2.9(a)所示)。晶格的变形可能如图 2.9(b)所示, 每个金属原子受力实际是邻近原子作用力的合力。但图(a)和图(b)两种情况的外观表征是一致的。易知只要金属内原子之间晶格结构不变化, 当外力去除时, 位移 u 也随之消失, 材料表现为完全弹性。

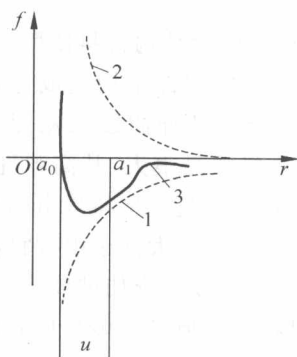


图 2.8 两原子间相互作用力示意图

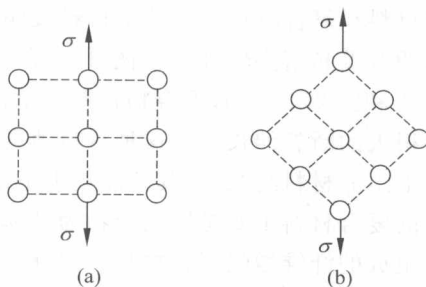


图 2.9 不同晶轴方向晶粒的受力

由于晶粒受力变形过程中受外界因素影响, 规则的晶格点阵排列中间也包含有各种缺陷而生成位错, 这些结构上的缺陷大大降低了材料的强度。可见材料不发生塑性变形的弹性阶段, 位移 u 只能在图 2.8 中 a_0 的微小领域内变化, 这时原子间的位移和受力之间显然有近似的线性关系。因而, 由此组集成的宏观材料的变形和受力, 也必然有线性关系。

2. 金属材料的屈服

金属材料受晶轴方向拉伸时, 可以破坏联系金属原子间的金属键; 金属材料受沿晶轴方向剪切时也可以使相邻两排原子交错结合成新的金属键, 从而使晶格结构发生不可逆转的永久改变。材料由此产生的这种永久变形称为塑性变形。

由上述分析, 可以用理论计算出金属材料的理论强度, 但这种计算结果与实际测试结果相差 1000 倍。(理论计算结果大于实际测试结果)

大多数研究解释了两种差别的原因是由于实际材料晶体内部在晶格生成过程中不可避免地存在初始缺陷——晶格的畸变引起。位错是引起晶格畸变的特殊缺陷。在众多位错理论书中特别详细地介绍了这方面的知识。在这里简单地可以认为, 位错在外力作用下发生的定向移动(称为滑移), 滑移的结果将使靠近晶粒表面

的位错移动到晶粒间的晶界处或者试样的外表面而形成滑移线或者滑移带。如果用光线照射时,能看出明暗相间的条纹。由于拉伸试样的最大剪应力在与轴呈 45° 角的截面上,因而条纹首先发生在这一方向。

从分析不难看出金属晶格的滑移,是由于作用在晶面内的剪应力引起,它将使材料发生永久变形。

低碳钢在屈服过程中,其应力-应变曲线上会产生锯齿形的应力值。这一现象主要是因为低碳钢材料是多晶体材料。由许多晶粒组成的多晶体,各晶粒的晶面方向是随机分布的,由于滑移首先沿 45° 角的截面上发生(最大剪应力作用方向),滑移发生后,对应新的晶格,金属原子间的伸长将消失,原子间的引力也随之消失,从而导致该晶粒内材料的卸载,也使整个试样发生微小的卸载。随着位移控制加载继续进行,试样载荷又呈上升,直至晶面上剪应力较大的下一个晶粒发生滑移,试样载荷又下降。各晶粒逐次轮回经历加载、滑移、卸载、再加载……的过程。在屈服阶段,滑移累积所引起的试样变形要远远大于试样在弹性阶段所发生的弹性变形。该阶段试样所受的载荷,只是在晶格发生初始滑移所需要的应力的附近作微小波动,形成了一段“屈服平台”。

3. 金属材料的应变强化

金属材料的塑性变形是因为晶体内部位错的定向移动造成的,但必须有一定大小的剪应力作用于晶面上,这种移动才能发生。使晶面方向产生滑移时的剪应力,这时刚好能克服晶体的滑移阻力,使滑移能够进行。随着晶格滑移的数量的积累,在各晶粒的内部,将出现多个位错连续分布或堆积于晶界处的现象。这种连续分布的位错群,称为位错的塞积。根据对原子间库仑力的作用分析,可以得出位错的塞积将增大对进一步滑移的阻力,这一结果也适于晶界处。因而,当晶粒内的位错塞积群达到一定密度时,必须加大作用于各晶面上的外力,即加大试样表面上的外力,才能克服由位错带来的滑移阻力,进而继续驱使位错群的移动,使晶体进一步累积滑移或塑性变形。可见,金属材料发生塑性变形的物理本质,就是晶格位错在外力作用下,不断产生、增殖、塞积和运动的宏观表现。

如果在强化阶段卸载,显然由晶格滑移产生的塑性变形不会消失,可以恢复的只能是对应当前晶格的原子间的位移 u ,即弹性变形。既然都是弹性变形的卸载,这时材料的受力和变形的变化量之间当然应该服从线性关系。重复加载时,晶体内的位错群已经积累到一定程度,如果要使试样继续发生塑性变形,显然施加的外力必须能克服卸载前的滑移阻力,即达到或超过卸载前的外力值。这时对应的应力值为材料的后继屈服极限。在强化阶段卸载,显然材料的后继屈服极限高于初始的屈服极限,这种现象称为材料的冷作硬化。经过冷作硬化处理的材料或者构件,能使其承受更大的外力作用而不发生塑性变形,即扩展了材料弹性阶段的范围。这种处理方法在工程中得到了广泛的应用。