

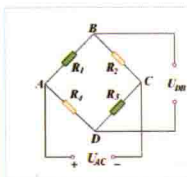
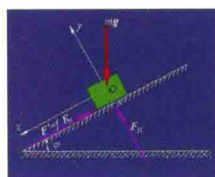


普通高等教育“十二五”规划教材

卓越工程师教育培养计划——现代力学精品教材

# 工程力学实验教程

杨少红 刘 燕 主编



科学出版社

普通高等教育“十二五”规划教材  
卓越工程师教育培养计划——现代力学精品教材

# 工程力学实验教程

杨少红 刘 燕 主编

科学出版社

北京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

### 内 容 简 介

本书内容包括基本实验、综合设计实验、习题和实验设备等。基本实验对学生进行基本知识、基本概念、基本方法和基本技能的系统训练。综合设计实验主要培养学生的综合、分析、创新能力,有助于学生开动脑筋,充分应用所学的知识,提高动手能力和创新能力。精选的习题既可帮助学生自学、预习相关理论知识,又可用于实验课的能力考核。介绍实验设备时考虑到尽量包含现用的仪器、设备,既介绍了实验室多年来一直使用的老设备,又介绍了实验室新购置的较先进的电子仪器和设备。

本书既可以作为工科类各专业工程力学、材料力学等基础课程的配套实验教材,也可以作为电测应力分析等研究生课程的理论教材,还可以供工程技术人员在测定相关力学量时参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程力学实验教程/杨少红,刘燕主编. —北京:科学出版社,2015.11

普通高等教育“十二五”规划教材 卓越工程师教育培养计划. 现代力学精品教材

ISBN 978-7-03-046187-2

I. ①工… II. ①杨… ②刘… III. ①工程力学-实验-高等学校-教材  
IV. ①TB12-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 260650 号

责任编辑:王雨舸/责任校对:董艳辉

责任印制:彭超/封面设计:蓝正

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>

武汉中远印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

开本:787×1092 1/16

2016年1月第一版 印张:13

2016年1月第一次印刷 字数:295 000

定价:29.80元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前言

工程力学实验是工程力学课程的重要组成部分,涵盖了理论力学实验和材料力学实验的有关内容,并形成一个新的教学体系,与理论教学相辅相成。通过实验教学,不仅帮助学生加深对所学理论知识的理解,熟悉基本力学量的测量,更重要的是帮助学生提高动手能力,培养学生的工程意识和创新精神,让学生学会使用实验手段观察力学现象,探索力学规律,训练实验基本技能,为解决工程实际问题奠定良好的基础。

《工程力学实验教程》依据国家和军队关于工程力学实验教学的基本要求,以工程力学实验课程的层次化、模块化教学体系为基础,为学生提供一个观察力学现象、熟悉仪器使用、了解材料性能、巩固力学规律的平台为目标,按照经典与现代相结合的原则选择实验教学内容,突出力学性能测试的原理和规律,强化电测技术的应用,最终构成内容丰富、使用方便的工程力学实验教材。

本书共分为6章。第1章实验理论主要学习实验方法(包括电测法和光测法)、数据处理、误差分析等相关理论知识;第2章为理论力学实验,包括静力学、运动学、动力学中的工程应用;第3章为力学性能测试实验,包括低碳钢和铸铁材料的拉伸、压缩和扭转等实验;第4章为电测应力分析实验;第5章为综合设计实验;第6章为实验设备原理简介。每章后设计自测练习题,共100余道。附录一列出了材料的拉伸性能名称新旧标准对照表;附录二列出了相关力学实验国家标准名称,供参考;附录三为各章习题参考答案。

本书融汇了作者多年的实验教学经验,讲述清楚,文字简练。提出的实验目的清楚、明确;实验原理介绍概念清晰,结论正确;实验步骤安排条理性、可操作性好。在本书编写过程中,力图体现以下特色:

(1) 实验内容丰富,包括基本实验、综合设计实验、习题和实验设备等。基本实验对学员进行基本知识、基本概念、基本方法和基本技能的系统训练。综合设计实验主要培养学员的综合、分析、创新能力,有助于学员开动脑筋,充分应用所学的知识,提高动手能力和创新能力。精选的习题既可帮助学生自学、预习相关理论知识,又可用于实验课的能力考核。介绍实验设备时考虑到尽量包含现用的仪器、设备,既介绍了实验室多年来一直使用的老设备,又介绍了实验室新购置的较先进的电子仪器和设备。

(2) 实验教学内容与科学研究项目和工程问题密切联系,形成良性

互动。书中部分实验项目是从科研内容、工程实际中简化来的实验问题,有较强的研究和工程应用背景。有利于加强学生的工程概念和工程意识,培养学生用实验手段解决工程实际问题的能力,是培养学生创新精神的重要途径,对于增强学生的实验研究能力非常重要。

(3) 适用范围广。本书共安排 36 个实验,其中 10 个理论力学实验,10 个材料力学性能实验,10 个电测静应力分析实验,6 个综合性、设计性实验,供不同专业和不同学时要求选用。实验全部采用新标准、新符号,使学生掌握最新标准的测试方法。本书既可以作为工科类各专业工程力学、材料力学等基础课程的配套实验教材,也可以作为电测应力分析等研究生课程的理论教材,还可以供工程技术人员在测定相关力学量时参考。

本书绪论、第 1.5 节、第 2.2~2.10 节、第 3.1~3.9 节、第 4.1~4.8 节、第 6.5~6.7 节和附录由杨少红编写,第 1.1 节、第 2.1 节、第 5 章由刘燕编写,第 1.2~1.4 节由胡明勇编写,第 3.10 节、第 4.9、4.10 节由吴菁编写,第 6.1~6.4 节由黄方编写。全书由杨少红负责统稿。

本书由章向明教授主审。章向明教授在力学实验教学方面经验丰富,提出许多宝贵意见和建议,在此表示衷心感谢。

编者

2015 年 9 月

# 目 录

|                         |      |
|-------------------------|------|
| 绪论                      | (1)  |
| 第 1 章 实验理论              | (4)  |
| 1.1 金属材料的力学性能           | (4)  |
| 1.1.1 金属材料拉伸时的力学性能      | (4)  |
| 1.1.2 金属材料压缩时的力学性能      | (9)  |
| 1.1.3 金属材料扭转时的力学性能      | (10) |
| 1.2 电测法的基本原理            | (13) |
| 1.2.1 电阻应变计             | (13) |
| 1.2.2 测量电路              | (17) |
| 1.2.3 应变计接入电桥的方法        | (19) |
| 1.2.4 测量电桥的应用           | (20) |
| 1.3 光测法的基本原理            | (26) |
| 1.3.1 光学的基本知识           | (26) |
| 1.3.2 平面应力-光学定律         | (29) |
| 1.3.3 平面偏振光场通过受力模型的光场效应 | (30) |
| 1.3.4 等倾线和等差线           | (31) |
| 1.4 振动理论基础              | (32) |
| 1.4.1 振动理论简介            | (33) |
| 1.4.2 单自由度线性系统自由振动      | (36) |
| 1.4.3 单自由度线性系统定常强迫振动    | (41) |
| 1.5 误差分析与数据处理           | (44) |
| 习题 1                    | (48) |
| 第 2 章 理论力学实验            | (55) |
| 2.1 创新与应用演示实验           | (55) |
| 2.1.1 轿车千斤顶             | (55) |
| 2.1.2 塑料套会自动套在鞋上的机器     | (57) |
| 2.1.3 旋转式、往复式剃须刀        | (58) |
| 2.1.4 质点系动量定理的演示        | (61) |
| 2.1.5 实现动平衡的演示          | (62) |
| 2.2 动静滑动摩擦系数的测试         | (65) |
| 2.3 微型电机效率的测定           | (67) |
| 2.4 物体转动惯量的测定           | (70) |
| 2.5 简谐振动系统振幅与频率的测量      | (72) |

|              |                                 |              |
|--------------|---------------------------------|--------------|
| 2.6          | 简支梁固有频率与振型测量(激振法).....          | (75)         |
| 2.7          | 悬臂梁试验模态分析(锤击法).....             | (78)         |
| 2.8          | 圆盘结构试验模态分析(锤击法).....            | (79)         |
| 2.9          | 单自由度振动系统动态参数测量.....             | (82)         |
| 2.10         | 阻尼器对结构频率的影响 .....               | (84)         |
|              | 习题 2 .....                      | (85)         |
| <b>第 3 章</b> | <b>力学性能测试实验 .....</b>           | <b>(88)</b>  |
| 3.1          | 金属材料拉伸实验.....                   | (88)         |
| 3.2          | 金属材料压缩实验.....                   | (92)         |
| 3.3          | 圆轴扭转强度实验.....                   | (95)         |
| 3.4          | 引伸计法测材料弹性模量 $E$ .....           | (98)         |
| 3.5          | 金属材料剪切实验.....                   | (99)         |
| 3.6          | 剪切弹性模量 $G$ 的测定 .....            | (101)        |
| 3.7          | 冲击实验 .....                      | (102)        |
| 3.8          | 疲劳实验 .....                      | (105)        |
| 3.9          | 金属材料残余延伸强度 $R_{e0.2}$ 的测试 ..... | (108)        |
| 3.10         | 压杆稳定实验.....                     | (110)        |
|              | 习题 3 .....                      | (115)        |
| <b>第 4 章</b> | <b>电测应力分析实验.....</b>            | <b>(119)</b> |
| 4.1          | 纯弯曲梁的正应力测定实验 .....              | (119)        |
| 4.2          | 材料弹性模量 $E$ 和泊松比 $\mu$ 的测定 ..... | (123)        |
| 4.3          | 薄壁圆筒在弯扭组合变形下主应力测定 .....         | (127)        |
| 4.4          | 偏心拉伸实验 .....                    | (130)        |
| 4.5          | 组合梁应力分析实验 .....                 | (134)        |
| 4.6          | 电测压杆稳定实验 .....                  | (137)        |
| 4.7          | 电阻应变片灵敏系数标定 .....               | (139)        |
| 4.8          | 悬臂梁的应力测定 .....                  | (142)        |
| 4.9          | 薄壁圆筒在弯扭组合变形下内力素的测定 .....        | (145)        |
| 4.10         | 电测法测定剪切弹性模量 $G$ .....           | (148)        |
|              | 习题 4 .....                      | (150)        |
| <b>第 5 章</b> | <b>综合设计实验.....</b>              | <b>(156)</b> |
| 5.1          | 复合材料拉伸实验 .....                  | (156)        |
| 5.2          | 薄壁构件拉伸实验 .....                  | (159)        |
| 5.3          | 光弹性演示实验 .....                   | (160)        |
| 5.4          | 刚架与桁架实验 .....                   | (162)        |
| 5.5          | 开口薄壁梁弯曲中心及内力测定 .....            | (166)        |
| 5.6          | 工字形薄壁杆件应力测试实验 .....             | (168)        |
|              | 习题 5 .....                      | (170)        |

|                            |       |
|----------------------------|-------|
| 第 6 章 实验设备原理简介             | (171) |
| 6.1 液压万能材料试验机              | (171) |
| 6.2 CMT 5000 系列微机控制电子万能试验机 | (173) |
| 6.3 CTT 502 电子扭转试验机        | (175) |
| 6.4 XL 3418C 材料力学多功能实验台    | (178) |
| 6.5 INV-1601 型振动与控制教学实验系统  | (179) |
| 6.6 压杆试验台                  | (181) |
| 6.7 便携式数码光弹仪               | (182) |
| 参考文献                       | (185) |
| 附录                         | (186) |
| 附录一 工程力学实验新标准术语和表示         | (186) |
| 附录二 相关力学实验国家标准             | (188) |
| 附录三 习题答案                   | (189) |

# 绪 论

## 一、课程概况

工程力学是一门理论性和实践性较强的专业基础课程,是一门系统地引导学生利用力学理论解决工程实际问题的理论课程,培养学生将工程实际问题提炼成力学问题(即力学建模),从而进行求解的能力。其中很多理论都是建立在大量的实验结果的基础上,很多的假设和推导出的公式,必须通过实验来验证;而且力学概念比较抽象,学生通过实验可以加深对概念的理解和对知识的感性认识。

工程力学包括理论力学和材料力学两部分内容。理论力学是研究物体机械运动一般规律的科学。与理论力学有关的实验数据,需要通过实验来测量,如两物体间的静、动滑动摩擦因素  $f_s, f_d$ , 点的运动速度  $v$ , 加速度  $a$  等。理论力学中有许多定理,用实验验证后,使学员印象深刻,终生难忘,还可以在广阔空间里开拓应用,如动量矩守恒定理、质心运动原理、共振现象等。一些研究性的数据需要用理论力学实验来完成,如简支梁的固有频率、减振器的特性、用三线摆求非均质摇臂的转动惯量等。材料力学是研究构件承载能力的科学,通常考虑材料的本构关系,如弹性阶段的胡克定律等,需要通过实验测量的方法加以确定。材料的各种力学性能参数反映材料的重要物理特性,也需要由实验来测定。因而,学习工程力学,必须注重工程力学实验。

工程力学实验是工程力学课程的重要组成部分,是研究、解决工程实际问题的重要手段之一。由于其明显的学科特点,工程力学实验也是对学员进行全面的素质教育和能力培养的有利平台。以知识和技能的传授为载体,结合先进的教学理念、恰当的教学方法、创造优良的教学条件就能营造出适合学员自主学习、突出个性培养的环境和氛围,从而为高素质人才的培养奠定基础。

## 二、实验内容

工程力学实验主要包括以下三方面的内容:

(1) 验证工程力学的理论和定律。工程力学不是纯粹由严谨的逻辑推理建立起来的理论学科。在工程力学的研究中,引进了许多假设与简化。如关于材料的连续性、均匀性及各向同性的假设,关于构件的小变形条件。实际上材料弹性范围的线性关系也不是严格的,尤其是工程力学中引入了平面假设等来简化变形几何关系。虽然这些假设简化了工程力学的理论,但是由这些假设出发推导出的工程力学理论的有效性、精确程度、应用范围如何呢?最简便易行的方法,就是通过实验进行验证。这样的验证,对于工程力学这种实践性较强的学科,从思维逻辑和理论的完整性来说,是不可缺少的。

(2) 研究和检验工程材料的力学性能。在工程力学理论建立的过程中,要求研究材料的力学性能,并确定有关的材料参数(如  $E, \mu$  等)。此外还需要确定材料的其他力学性能参数

(如  $R_{el}$ ,  $R_m$  等)。精确地测量上述力学量,是对构件进行准确可靠的力学分析和计算,最后正确作出力学预测和判断的前提。在实验课程的学习中,通过检测材料力学性能的基本训练,掌握材料的力学性质,还可通过动手实践,掌握基本的测量方法,为以后的专业实验乃至工程实践打下坚实的基础。

(3) 实验应力分析。即采用测量方法,确定许多无理论计算可用的复杂受力构件的应力分析状态和变形状态,以便检验构件的安全性或者为设计构件提供依据。

基于以上三方面的考虑,本课程所安排的实验是围绕工程力学理论课程的内容,结合相关的实验设备,为解决工程实际问题而设计的。具体内容包括学习实验原理、实验方法和实验技术,常用设备的原理和使用方法以及实验数据的处理等。

### 三、实验方法

目前,对于很多重要的工程构件或结构,由于数学上的困难,仅靠理论分析,难于求得理论解析解。采用级数法、差分法、有限元法等数值方法,也要求对载荷和边界条件进行合理的简化,但是对有些实际问题是不容易作得精确的。而工程力学的实验研究,正是求解这些复杂问题的有效而且可靠的方法。对于重要的实际问题,实验测试研究是不可缺少的,它可以与理论解、数值解相互佐证。大型结构的理论分析、数值计算是信息量很大的浩繁工程,为避免疏失、错误,通过实验方法来研究是非常必要的。原则上说,任何与材料受力、变形伴随发生并且与受力、变形有确定的数量关系的可测量的物理量,都能够用来直接或间接地对有关的力学量进行测量。目前,在工程力学实验中,采用最多、最有效的方法是机测法、电测法和光测法。

机测法多数是直接测量。如采用刻度尺测量长度、直角尺测直角,用游标卡尺、螺旋测微器、千分表、杠杆引伸仪等只经过简单机械转换的仪器度量位移,用标准砝码加载,用弹簧秤测力,以及由这些仪器、工具组合而成的专用加载测量装置。上述简单的仪表、设备只适用于精度要求不高、受力不很大的简单测量。而直接使用各种专用的万能材料试验机、扭转试验机、疲劳试验机等进行力学测试,尽管不同机型对各类力学量或非力学量之间所作的转换、传递的方式各异,但是通常都可以将它们归为机测法的范畴。机测法常用于采用标准试件测定材料的力学性能参数;标定材料的物理关系;对小型构件或加载方式较简单的小尺寸结构模型,模拟实际受力进行实验测量。机测方法具有简单、实用、价格低、测试效率高的优点。

构件在受力变形时,使有关电路或电场中的电阻、电容、电感、场强等参数发生改变,由此产生电信号。电测法就是利用这种性质,使用专业仪器,对上述信号加以放大、处理和显示,来间接测量力学量的方法。最常见的是用电阻应变计和电阻应变仪来测量构件表面的应变,通过分析可以间接获得应力、位移等力学量。这种方法的优点是测量精度高,应用范围广泛,价格低,便于遥控及动态、高温测量,便于信息的采集、传输、处理等。

光测法是近 30 年发展较快的一种测量方法。现有光弹性测量、激光全息干涉法、散斑干涉法、贴片法、云纹法等。它的原理是利用光波在某些透明介质材料制成的受力模型中所产生的暂时双折射光波干涉条纹图或光波反射产生的干涉条纹图来分析、确定各测量点的应力。光测法的优点是能够测量整个应力场的应力分布。它不仅能测量构件表面的应力,而且也能采用冻结、切片技术测定试件内部测量点的应力。

## 四、实验规则及要求

### 1. 做好实验前的准备工作

(1) 按实验的预习要求,认真阅读实验教程,复习有关理论知识,明确实验目的,掌握实验原理,了解实验的步骤和方法。

(2) 对实验中所使用的仪器、实验装置等应了解其工作原理,以及操作注意事项。

(3) 必须清楚地知道本次实验须记录的数据项目及其数据处理的方法。

### 2. 严格遵守实验室的规章制度

(1) 按课程规定的时间准时进入实验室。保持实验室整洁、安静。

(2) 未经许可,不得随意动用实验室内的机器、仪器等一切设备。

(3) 实验时,应严格按操作规程操作机器、仪器,如发生故障,应及时报告,不得擅自处理。

(4) 实验结束后,应将所用机器、仪器擦拭干净,并恢复到正常状态。

### 3. 认真做好实验

(1) 接受教师对预习情况的抽查、质疑,仔细听教师对实验内容的讲解。

(2) 实验时,要严肃认真、相互配合,仔细地按实验步骤、方法逐步进行。

(3) 实验过程中,要密切注意观察实验现象,记录好全部所需数据,并交指导教师审阅。

### 4. 实验报告的一般要求

实验报告是对所完成的实验结果整理成书面形式的综合资料。通过实验报告的书写,培养学习者准确有效地用文字来表达实验结果。因此,要求学习者在自己动手完成实验的基础上,用自己的语言扼要地叙述实验目的、原理、步骤和方法,所使用的设备仪器的名称与型号、数据计算、实验结果、问题讨论等内容,独立地写出实验报告,并做到字迹端正、绘图清晰、表格简明。



# 第 1 章 实验理论

本章主要介绍实验中应用到的理论知识,包括金属材料拉伸、压缩和扭转时的力学性能,电测法和光测法的基本原理,振动理论基础,以及误差分析与数据处理。

## 1.1 金属材料的力学性能

材料在外力作用下所表现出的变形和强度方面的特性,称为材料的力学性能。有的书中也称为材料的机械性能。材料的力学性能是通过拉伸、压缩、剪切、扭转、弯曲、疲劳等实验测定的。

拉伸和压缩实验是材料的基本力学性能实验。低碳钢和铸铁是两种典型的金属材料。

### 1.1.1 金属材料拉伸时的力学性能

#### 一、低碳钢拉伸时的力学性能

拉伸试验按照新标准 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》的规定进行,温度范围为  $10 \sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,试样采用标准试样,并在试验机上完成。

低碳钢是指含碳量在  $0.3\%$  以下的碳素钢,是工程中使用非常广泛的材料。通过试验可获得低碳钢的应力-应变曲线,如图 1-1-1 所示。通过低碳钢的  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线(新标准用  $R$ - $e$  表示)可分析低碳钢在受力变形过程中所表现出的力学性能。低碳钢由于受拉力作用逐渐伸长至最后断裂,大致可分为以下 4 个阶段。

#### 1. 弹性阶段(OA 段)

受力的开始阶段,拉力较小,应力较小,变形也较小。如果卸除载荷,变形能够完全消失,即拉力降为零,试件的伸长量也降为零,说明试件的变形完全是弹性的,故此阶段称为弹性阶段。 $\sigma$ - $\epsilon$  曲线 OA 段为弹性阶段。弹性阶段的应力最高值,即图 1-1-1 中对应的应力值称为弹性极限,用  $\sigma_e$  表示。

弹性阶段除  $AA'$  一小段外, $OA'$  段是直线,应力与应变成正比,满足胡克定律

弹性阶段除  $AA'$  一小段外, $OA'$  段是直线,应力与应变成正比,满足胡克定律

$$\frac{\sigma}{\epsilon} = \tan\alpha = E \quad (1.1.1)$$

$E$  称为材料的弹性模量。

弹性阶段称为比例阶段,比例阶段的应力最高

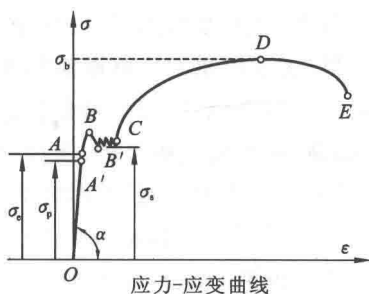


图 1-1-1 低碳钢的拉伸图

值,即图 1-1-1 中  $A'$  点对应的应力值,为比例极限,用  $\sigma_p$  表示。常见的低碳钢 Q235 的比例极限为 200 MPa。也可以采用图解法测定弹性模量,如图 1-1-2 所示,弹性模量  $E$  可由此阶段任意两点的应力差  $\Delta\sigma$  和相应两点的应变差  $\Delta\epsilon$  相除得到。

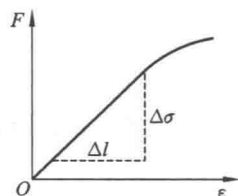
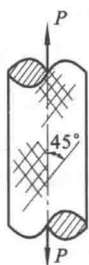


图 1-1-2 图解法测定弹性模量

弹性模量  $E$  是衡量材料刚度好坏的指标,它表示材料抵抗弹性变形的能力。由于比例极限和弹性极限的值非常接近,试验中很难加以区别,常将两者视为相等。

## 2. 屈服阶段(BC 段)

当应力超过弹性极限后不久, $\sigma$ - $\epsilon$  曲线呈锯齿形波动线上下摆动,说明应力基本保持不变而应变却急剧增加,即载荷不变,变形持续增加。材料暂时失去了抵抗变形的能力,这种现象称为屈服或流动,故此阶段称为屈服阶段。图 1-1-1 中  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线的 BC 段为屈服阶段。对应波动曲线的最低点称为下屈服点,下屈服点对应的应力值称为屈服极限,用  $\sigma_s$  表示(新标准称为下屈服强度,用  $R_{el}$  表示)。常见的低碳钢 Q235 的屈服极限  $\sigma_s = 235$  MPa。



如果试件表面经过磨光,屈服时,试件表面会出现一些与试件轴线成  $45^\circ$  的条纹,称为滑移线,这是材料内部晶格之间相对滑移而形成的,如图 1-1-3 所示。

## 3. 强化阶段(CD 段)

经过一段时间的屈服之后, $\sigma$ - $\epsilon$  曲线逐渐上升,说明材料恢复了抵抗变形的能力,试件继续变形所需的拉力逐渐增加,这种现象称为材料的强化,此阶段称为强化阶段。图 1-1-1 中  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线的 CD 段为强化阶段。强化阶段的应力最高值,即  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线图中 D 点对应的应力值,是材料所能承受的最大应力值,称为强度极限,用  $\sigma_b$  表示(新标准称为抗拉强度,用  $R_m$  表示)。常见的低碳钢 Q235 的  $\sigma_b = 400$  MPa。

屈服极限  $\sigma_s$  和强度极限  $\sigma_b$  是衡量材料强度好坏的两个重要指标。 $\sigma_s$  标志材料出现显著的塑性变形; $\sigma_b$  标志材料失去承载能力。

## 4. 局部颈缩阶段(DE 段)

在应力达到强度极限  $\sigma_b$  前,沿试件长度变形是均匀的;当应力达到强度极限  $\sigma_b$  后,试件的变形开始集中于某一局部区域内,横截面面积出现局部迅速收缩,这种现象称为局部颈缩,故此阶段称为局部颈缩阶段。由于局部截面的收缩,试件继续变形所需的拉力逐渐减小,最后,试件被拉断。如图 1-1-4 所示为试件断裂过程图。

试件拉断后,弹性变形瞬间消失,塑性变形永久地残留在试件中,残留的塑性应变为  $\epsilon_p = \frac{l_1 - l_0}{l_0}$ ,  $l_0$  是原始标距,  $l_1$  是断后标距。将此塑性应变用百分率表示为

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1.1.2)$$

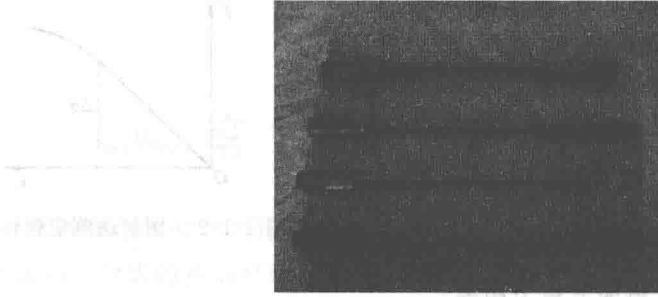


图 1-1-4 试件局部颈缩和断裂过程

$\delta$  称为材料的延伸率(新标准称为断后伸长率,用  $A$  表示)。试样断裂后的残余变形的分布是非均匀的,主要集中在颈缩处,断口附近的变形最大,距离断口位置越远,变形越小,如图 1-1-5(a) 所示。

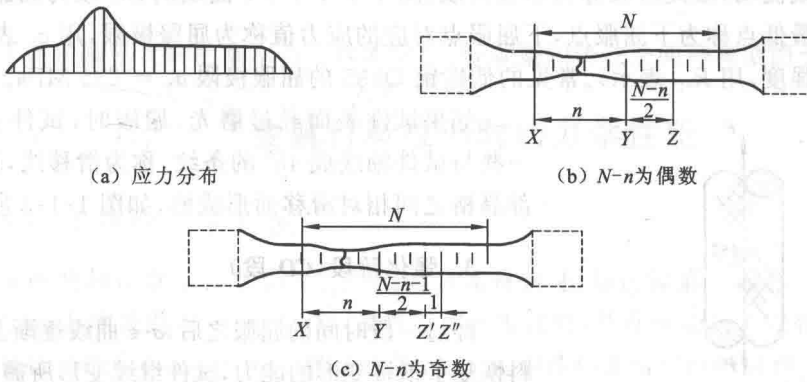


图 1-1-5 移位法(断口移中法)测定断后伸长率

如断裂处与最接近的标距标记的距离小于原始标距的  $\frac{1}{3}$  时,为了避免试样报废,可采用移位法(也称断口移中法)测定断后伸长率:

(1) 试验前将试样原始标距细分为 5 mm(推荐)到 10 mm 的  $N$  等份。

(2) 试验后,以符号  $X$  表示断裂后试样短段的标距标记,以符号  $Y$  表示断裂后试样长段的等分标记,此标记与断裂处的距离最接近于断裂处至标距标记  $X$  的距离。

如  $X$  与  $Y$  之间的分格数为  $n$ ,按如下测定断后伸长率:

(1)  $N-n$  为偶数,如图 1-1-5(b) 所示,测量  $X$  与  $Y$  之间的距离  $l_{xy}$  和测量从  $Y$  至距离为  $\frac{1}{2}(N-n)$  个分格的  $Z$  标记之间的距离  $l_{yz}$ 。按照下式计算断后伸长率为

$$A = \frac{l_{xy} + 2l_{yz} - L_0}{L_0} \times 100 \quad (1.1.3)$$

(2)  $N-n$  为奇数,如图 1-1-5(c) 所示,测量  $X$  与  $Y$  之间的距离  $l_{xy}$  和测量从  $Y$  至距离分别为  $\frac{1}{2}(N-n-1)$  和  $\frac{1}{2}(N-n+1)$  个分格的  $Z'$  和  $Z''$  标记之间的距离  $l_{yz'}$  和  $l_{yz''}$ 。按照下

式计算断后伸长率为

$$A = \frac{l_{xy} + l_{yz'} + l_{yz''} - L_0}{L_0} \times 100 \quad (1.1.4)$$

设试件受拉前的横截面面积为  $S_0$ , 断裂后断口处的横截面面积为  $S_1$ , 则

$$\psi = \frac{S_1 - S_0}{S_0} \times 100\% \quad (1.1.5)$$

$\psi$  称为截面收缩率(新标准称为断面收缩率, 用  $Z$  表示)。原始横截面的计算准确度依赖于试样本身特性和类型, 可参照 GB/T 228.1—2010。直径大于 4 mm 的圆形横截面试样, 测量每个尺寸应准确到  $\pm 0.5\%$ 。直径小于 4 mm 的圆形横截面试样, 测量每个尺寸应准确到  $\pm 1\%$ , 应在两个相互垂直方向测量试样的直径, 取其算术平均值计算横截面积。

材料的塑性变形越大, 则  $\delta$  和  $\psi$  的值越大, 因此, 材料的延伸率  $\delta$  和截面收缩率  $\psi$  是衡量材料塑性好坏的两个重要指标。

工程上通常按延伸率的大小将材料分为两大类:  $\delta > 5\%$  称为塑性材料, 如低碳钢、青铜等;  $\delta \leq 5\%$  称为脆性材料, 如铸铁、混凝土、石料等。

## 5. 冷作硬化

在拉伸试验过程中, 当应力达到强化阶段任一点  $F$  时, 逐渐卸除载荷, 应力-应变曲线将沿与  $OA$  近乎平行的直线  $O_1F$  变化直至点  $O_1$ 。  $O_1O_2$  表示的试件卸载前的弹性应变部分在卸载中消失, 而  $OO_1$  表示的试件卸载前的塑性应变部分在卸载后则永久保留。说明过了屈服点后, 试件的变形中有一部分是弹性的, 而另一部分是塑性的, 卸载后, 弹性变形消失, 塑性变形保留。如果卸载后重新加载, 则应力-应变曲线将大致沿  $O_1FDE$  的曲线变化, 直至断裂, 如图 1-1-6 所示。

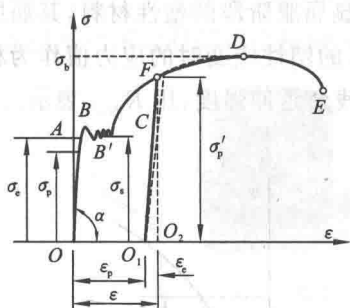


图 1-1-6 材料的冷作硬化过程

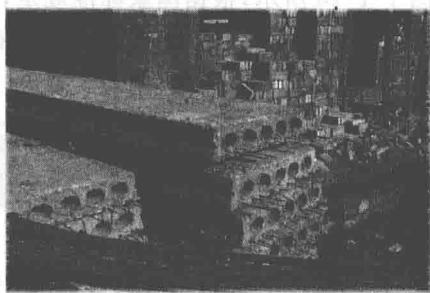
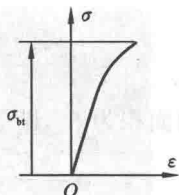


图 1-1-7 冷作硬化工程实例

由此可以看出, 重新加载时, 材料的比例极限提高了, 而重新加载断裂后的塑性应变减少了  $OO_1$  这一部分, 这种在常温下将钢材拉伸超过屈服极限, 使材料的比例极限提高称为冷作硬化。如图 1-1-7 所示, 预制板中钢筋常采用冷作硬化提高材料的强度, 即提高材料在弹性范围内的承载能力。

## 二、铸铁拉伸时的力学性能

灰口铸铁是脆性材料的典型代表, 从拉伸试验可得到它的应力-应变曲线, 如图 1-1-8 所示。



铸铁拉伸试验应力-应变曲线

图 1-1-8 铸铁的拉伸图

可总结灰口铸铁的拉伸试验有如下特点:

(1) 从试件开始受力到被拉断,变形始终很小,断裂时,应变也只是原长的  $0.4\% \sim 0.5\%$ ,断口垂直于试件的轴线。

(2) 拉伸过程中,无屈服阶段,也无颈缩现象,只有强度极限  $\sigma_b$ ,其值约为  $\sigma_b \approx 120 \sim 180 \text{ MPa}$ ,远低于低碳钢的强度极限。

(3) 应力-应变之间不成正比,没有明显的直线段,实际使用时, $\sigma$ - $\epsilon$  曲线的曲率很小。工程上,弹性模量  $E$  以总应变为  $0.1\%$  时的割线斜率来度量。

### 三、其他塑性材料拉伸时的力学性能

塑性材料除低碳钢外,还有锰钢、铝、青铜等,它们的拉伸应力-应变曲线如图 1-1-9 所示。

与低碳钢相比,青铜强度低,但塑性好;锰钢强度高,塑性也好;这些材料的塑性都好,所以属塑性材料,但都没有明显的屈服阶段。

如图 1-1-10 所示,根据国家标准规定,对于没有明显屈服阶段的塑性材料,其屈服极限  $\sigma_s$  用名义屈服极限  $\sigma_{0.2}$  表示。即取对应于试件产生  $0.2\%$  的塑性应变时的应力值作为材料的屈服极限,称为名义屈服极限,用  $\sigma_{0.2}$  表示(新标准称为残余延伸强度,用  $R_{p0.2}$  表示)。

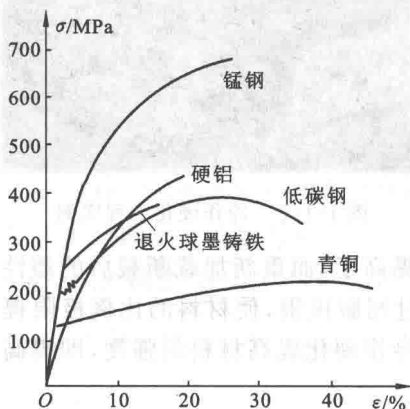


图 1-1-9 其他塑性材料的拉伸图

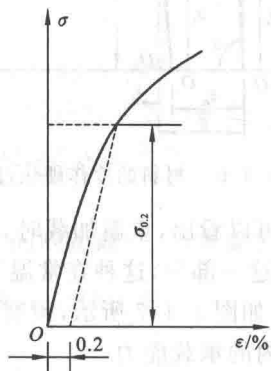


图 1-1-10 名义屈服极限

## 1.1.2 金属材料压缩时的力学性能

### 一、低碳钢压缩时的力学性能

金属材料的压缩试件一般为圆柱形。为了避免试件被压弯,圆柱不能太高,通常取高度为直径的1.5~3倍。低碳钢压缩时的应力-应变曲线如图1-1-11所示,为了便于比较,在图中用虚线绘出拉伸时的应力-应变曲线。可以看出:

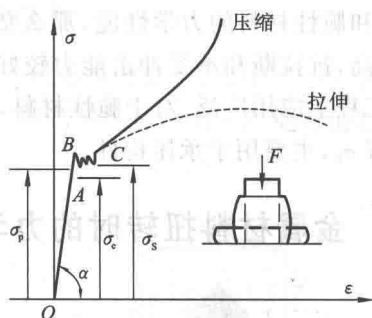


图 1-1-11 低碳钢的压缩曲线图

(1) 在屈服以前,压缩曲线和拉伸曲线基本重合,这说明低碳钢压缩时的弹性模量  $E$ 、比例极限  $\sigma_p$  和屈服极限  $\sigma_s$  (新标准称为下压缩屈服强度,用  $R_{eLC}$  表示) 都与拉伸时基本相同。

(2) 试件屈服后,出现显著的塑性变形,越压越扁成鼓形,如图1-1-12所示,横截面面积不断增大,由于上下压板与试件之间摩擦力约束了试件两端的横向变形,试件不可能被压断,因此得不到压缩时的强度极限  $\sigma_b$  (新标准称为抗压强度,用  $R_{mC}$  表示)。

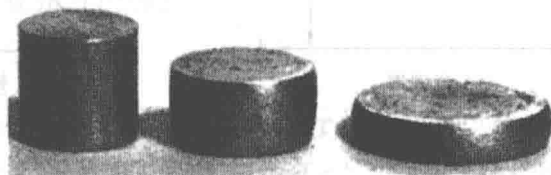


图 1-1-12 低碳钢试样的压缩破坏

### 二、铸铁压缩时的力学性能

脆性材料压缩时的力学性能与拉伸时有很大的差别,如图1-1-13所示。

其典型代表铸铁的  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线如图1-1-13所示(虚线是拉伸曲线)。铸铁在压缩时没有较明显的塑性变形,铸铁的抗压强度  $\sigma_{bc}$  远大于其抗拉强度  $\sigma_b$ ,大约是抗拉强度的4~5倍。

破坏时,沿与轴线成  $45^\circ \sim 55^\circ$  的斜截面裂开,如图1-1-14所示。由于铸铁一类的脆性材料的抗压能力比其抗拉能力强,通常将脆性材料做成承压构件。