



普通高等教育“十二五”规划教材

工程力学 (II)

主 编 王海容
副主编 胡玮军 危洪清
主 审 邓 晖



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



普通高等教育“十二五”规划教材

工程力学 (II)

主 编 王海容
副主编 胡玮军 危洪清
主 审 邓 晖



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书是根据教育部高等教育司组织制定的普通高等学校理论力学和材料力学教学的基本要求编写,共分为(I)、(II)两册。其中:(I)册为理论力学部分,包括静力学、运动学、动力学的全部必修内容和部分选修内容,共10章。(II)册为材料力学全部必修内容和部分选修内容,包括绪论、杆件的轴向拉压、扭转、弯曲、剪切、组合变形、压杆稳定、动载荷、能量方法等,共10章。本书理论严谨,结构紧凑,表述简洁,与后续《弹性力学》、《流体力学》、《机械原理》等课程建立了自然的联系。书末附有附录和习题参考答案。

本书可作为高等院校土木、交通、水利、地矿、材料、能源、动力和机械类专业本科生教材或教学参考书,也可供有关工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程力学. 2 / 王海容主编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2011.8
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5084-8720-5

I. ①工… II. ①王… III. ①工程力学—高等学校—教材 IV. ①TB12

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第172520号

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 工程力学(II)
作 者	主 编 王海容 副主编 胡玮军 危洪清 主 审 邓 晖
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 14.5印张 344千字
版 次	2011年8月第1版 2011年8月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	27.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

本套书是根据教育部高等教育司组织制定的普通高等学校理论力学和材料力学教学的基本要求，结合工科类学校学生培养目标和某些专业工程力学少课时的需要，在传统的《理论力学》和《材料力学》教材的基础上，以实用为主、够用为度的原则加以整合而编写的，共分为（Ⅰ）、（Ⅱ）两册。

工程力学既是自然科学的理论基础，又是现代工程技术的理论基础。在日常生活和生产实际中具有非常广泛的应用。它包括理论力学和材料力学两部分，这两部分都是工程设计中最基本的知识。本书是《工程力学》材料力学部分，主要任务是研究构件在外力作用下的变形规律和材料的力学性能，从而建立构件满足强度、刚度和稳定性要求所需的条件，为安全、经济地设计构件提供必要的理论基础和科学的计算方法。

本书共分10章，各章后附有习题供选做并书后有习题答案可供参考。本书可作为高等院校土木、交通、水利、地矿、材料、能源、动力和机械类专业本科生教材或教学参考书。也可供有关工程技术人员参考。

本书由教学经验丰富的老师编写，其中胡玮军编写第2、6、7、10章，王海容编写第1、4、5、9章，危洪清编写第3、8章，由邓晖审稿。在本书的编写过程中得到了邵阳学院机械与能源工程系领导、老师们的大力支持，在此深表感谢！

由于时间仓促，以及编者水平有限，书中难免存在疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

2011年5月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 材料力学的任务	1
1.2 变形固体的基本假设	1
1.3 内力和应力的概念	2
1.4 杆件变形的基本形式	3
第 2 章 轴向拉伸、压缩和剪切	4
2.1 概述	4
2.2 轴向拉伸或压缩时内力和应力	4
2.3 材料的力学性能	7
2.4 许用应力、轴向拉（压）杆的强度计算	13
2.5 轴向拉伸和压缩的变形	16
2.6 拉伸和压缩的超静定问题	19
2.7 应力集中	25
2.8 剪切和挤压的实用计算	26
习题	31
第 3 章 扭转	36
3.1 概述	36
3.2 扭转时的内力	37
3.3 纯剪切	38
3.4 圆轴扭转时的应力和变形	40
3.5 圆轴扭转时的强度和刚度计算	44
3.6 圆柱形密圈螺旋弹簧应力及变形的计算	47
3.7 非圆截面等直杆的纯扭转	51
习题	52
第 4 章 弯曲应力	56
4.1 弯曲的概念及计算简图	56
4.2 梁的剪力与弯矩·剪力图和弯矩图	57

4.3 梁横截面上的正应力	66
4.4 弯曲切应力	69
4.5 平面弯曲梁的强度计算	73
4.6 提高弯曲强度的措施	77
习题	80
第5章 弯曲变形	85
5.1 梁的位移·挠度与转角	85
5.2 挠曲线近似微分方程·积分法求弯曲变形	85
5.3 叠加法求梁的变形	90
5.4 梁弯曲时的刚度条件	93
5.5 简单静不定梁的解法	94
5.6 提高弯曲刚度的措施	96
习题	96
第6章 应力状态分析	99
6.1 概述	99
6.2 平面应力状态分析的解析法	102
6.3 平面应力状态分析的图解法	103
6.4 三向应力状态的最大应力	108
6.5 广义胡克定律	110
6.6 复杂应力状态下的变形比能	114
6.7 材料的失效和强度理论	115
习题	119
第7章 组合变形	122
7.1 概述	122
7.2 斜弯曲	122
7.3 拉伸(压缩)与弯曲的组合变形	126
7.4 弯曲与扭转的组合变形	129
习题	132
第8章 压杆稳定	137
8.1 压杆稳定的概念	137
8.2 压杆的临界压力和临界应力	139
8.3 压杆稳定性校核	145
8.4 提高压杆稳定性的措施	149
习题	150
第9章 动载荷	153

9.1 概述	153
9.2 构件作变速运动时应力与变形的计算	153
9.3 杆件受冲击时应力和变形的计算	157
9.4 交变应力及构件的疲劳强度计算	160
习题	170
第 10 章 能量方法	174
10.1 概述	174
10.2 变形能的计算公式及其特征	174
10.3 应变能的普遍表达式	180
10.4 功的互等定理和位移互等定理	181
10.5 卡氏定理	182
10.6 虚功原理及单位载荷法	186
习题	191
附录 A 平面图形的几何性质	195
附录 B 型钢表 (GB/T 706—2008)	206
习题答案	218
参考文献	226

第 1 章 绪 论

1.1 材料力学的任务

工程中各种机械或建筑物都是由很多部件（零件）组成的。这些部件（零件）称为构件，根据其几何特征可分为：杆件、板、壳、块体和薄壁杆件等。机械或建筑物通常都受到各种外力的作用，这些外力称为载荷。为了保证机械或建筑物安全地工作，必须要求其组成的构件在承受载荷时具有足够的承载能力。在材料力学中，衡量构件的承载能力，有以下三方面的内容。

- (1) 构件在载荷作用下具有足够的抵抗破坏的能力，即构件必须具有足够的强度。
- (2) 构件在载荷作用下具有足够的抵抗变形的能力，即构件必须具有足够的刚度。
- (3) 构件在载荷作用下保持原有稳定平衡状态的能力，即构件必须具有足够的稳定性。

在结构设计中，往往一方面构件必须满足强度、刚度及稳定性要求；另一方面要尽量降低成本和减轻结构的自重。材料力学就是研究构件在外力作用下受力变形与破坏规律，在保证构件既安全又经济的前提下，为构件选择恰当的材料，确定最合理的截面形状与尺寸，提供理论依据、计算方法和实验技术。

1.2 变形固体的基本假设

材料力学的研究对象是变形固体。为了简化计算，常根据所研究问题的性质，略去一些次要因素，作出某些假设得出理想化的模型，从而使所研究的问题简化。材料力学中对变形固体做了如下几个假设。

1.2.1 连续均匀性假设

认为变形固体在其整个几何体内毫无空隙地充满了物质，并且整个几何体内材料的结构和性质相同。事实上，组成固体的粒子之间并不连续，但它们之间所存在的空隙与构件的尺寸相比，极其微小，可以忽略不计。根据这一假设，可从变形固体中取任何微小部分来研究材料的性质，然后延拓于整个构件。物体内的一些物理量（如应力、变形和位移等）可用位置坐标的连续函数表示。

1.2.2 各向同性假设

认为变形固体在各个方向具有相同的力学性质。具备这种属性的材料称为各向同性材料。工程中的金属材料，每个晶粒在不同的方向有不同的性质。但构件中晶粒的数量极多，晶粒的尺寸及其间的间隙与构件尺寸相比均极其微小，且晶粒在构件内错综交叠地排

列着, 所以材料的力学性质是组成材料的所有晶粒的性质的统计平均量, 在宏观上可以认为晶体结构的材料是各向同性的。至于均匀的非晶体材料, 如塑料、玻璃等都可认为是各向同性的。根据这一假设, 我们就可在材料的某一处研究某一方向的性质后, 其结果用于其他方向。

1.2.3 小变形假设

认为变形固体在外力作用下产生的变形与构件原有尺寸相比较非常微小, 根据这一假设, 在计算中可以不考虑外力作用点处微小位移, 而按变形前的位置和尺寸进行计算。

1.3 内力和应力的概念

1.3.1 内力

对于研究的构件来讲, 其他构件和物体作用其上的力均为外力。作用于构件上的外力, 企图改变构件的形状和大小, 则在构件内部将产生附加内力以抵抗外力, 阻止构件发生变形和破坏。这种在外力作用下产生的构件相连两部分的相互作用力, 在材料力学中称为内力。这种内力为附加内力, 它随外力增加而增大, 当达到某一限度时, 物体就会发生破坏, 所以它与构件的承载能力密切相关。

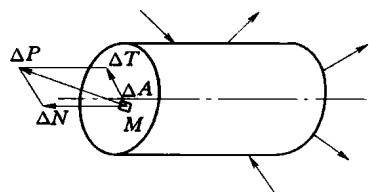


图 1.1

1.3.2 应力

所谓应力指内力在截面上的密集程度, 即内力集度。

在截面上围绕一点 M 取一微小面积 ΔA (见图 1.1), 其上的内力为 ΔP , 则称 ΔP 与 ΔA 的比值为面积 ΔA 上的平均应力, 即

$$p_{\text{平均}} = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1.1)$$

当 ΔA 趋于零则得到点 M 的应力, 即

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA} \quad (1.2)$$

在实用上常把应力当作作用于单位面积上的内力。应力的国际单位是牛顿/米² (N/m²), 称为帕斯卡 (Pa), 通常还有兆帕 (MPa), 1MPa=10⁶Pa; 吉帕 (GPa), 1GPa=10⁹Pa。

若将力 ΔP 分解为垂直于截面的分力 ΔV (法向分力) 和平行于截面的分力 ΔT (切向分力), 则可得

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta A}, \quad \tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad (1.3)$$

我们称 P 为截面上点 M 的全应力, σ 为点 M 的正应力, τ 为点 M 的切应力, 又称剪应力。它们之间有如下关系

$$\sigma = p \sin \alpha, \quad \tau = p \cos \alpha, \quad p = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2} \quad (1.4)$$

因通过一点 M , 可作出无穷多个截面, 故描述给定点处的应力时, 不仅要说明其大小, 而且还要说明其所在的截面方位。

1.4 杆件变形的形式

工程结构中很多构件，其纵向（长度方向）尺寸远大于横向（垂直于长度方向）尺寸，常称为杆件。杆有两个主要的几何因素，即轴线和横截面。轴线是杆件各横截面形心的连线；横截面就是杆件上与轴线正交的各面。如果杆的轴线为直线，则称为直杆，若直杆的各横截面形状及面积均相等，称其为等直杆；若杆的轴线为曲线，通常称为曲杆。横截面大小不等的杆称为变截面杆。材料力学主要研究等直杆。

杆件受力的情况各种各样，相应的变形也形式各异。材料力学研究杆件轴向拉伸或压缩、剪切、扭转和弯曲四种基本变形（见图 1.2）及其组合。各种基本变形的受力特点及其变形特点在后面章节中再述。

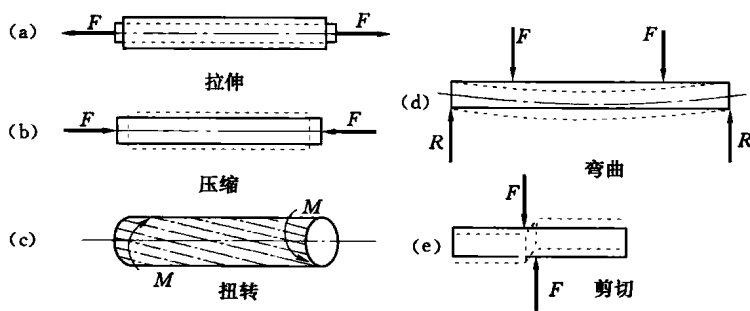


图 1.2

第 2 章 轴向拉伸、压缩和剪切

2.1 概 述

在工程中经常见到承受拉伸或压缩的杆件。例如紧固螺钉 [图 2.1 (a)], 当拧紧螺帽时, 被压紧的工件对螺钉有反作用力, 螺钉承受拉伸; 千斤顶的螺杆 [图 2.1 (b)] 在顶起重物时, 则承受压缩。前者发生伸长变形, 后者发生缩短变形。直杆沿轴线受大小相等、方向相反的外力作用, 受拉伸或压缩杆大多是等截面直杆, 其受力特点是: 作用于杆件上外力的合力作用线与杆件的轴线重合, 杆件产生沿轴线方向的伸长或缩短。这种变形形式称为轴向拉伸或压缩。

若把承受轴向拉伸或压缩的杆件的形状和受力情况进行简化, 则可以简化如图 2.2 所示的受力简图。图 2.2 中用实线表示受力前的外形, 虚线表示变形后的形状。

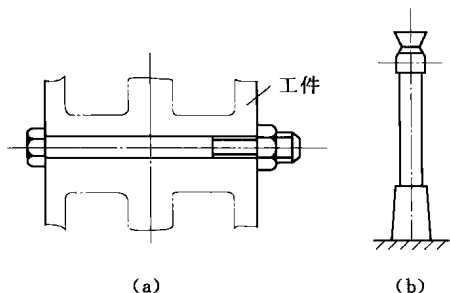


图 2.1

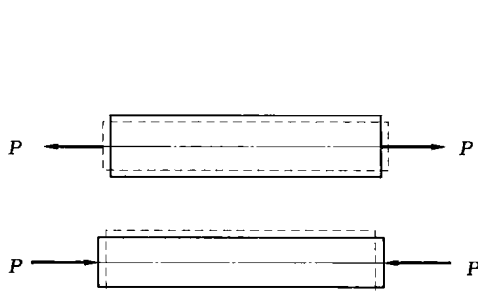


图 2.2

本章研究拉（压）杆的强度和刚度问题以及连接件的强度实用计算, 并介绍材料的基本力学性质和材料力学的一些基本概念和分析方法。

2.2 轴向拉伸或压缩时内力和应力

2.2.1 轴力与轴力图

为了对拉（压）杆进行强度计算, 首先需要分析其内力。以图 2.3 为例, 为显示出拉杆横截面上的内力, 可用截面法假想将杆沿 $m-m$ 截面处切开, 分为 I、II 两部分。假定保留 I 部分, 则 II 部分对保留下来的 I 部分的作用, 用内力来代替, 设其合力为 N 。由于直杆原来处于平衡状态, 切开后各部分仍应维持平衡。根据保留部分的平衡图 2.3 (b) 可得

$$N = P$$

当然也可保留Ⅱ部分 [图 2.3 (c)], 这时用 N' 代表Ⅰ部分对Ⅱ部分的作用力, 同样可得

$$N' = P$$

因为外力 P 的作用线与杆件的轴线重合, 内力的合力 N 的作用线也必然与杆件的轴线重合, 所以 N 称为轴力, 并且规定, 当杆件受拉伸, 即轴力 N (或 N') 背离截面时为正号; 反之, 杆件受压缩, 即 N 指向截面时为负号。

当沿杆件轴线作用的外力多于两个时, 在杆件各部分的截面上, 轴力不尽相同。为了表示轴力随截面位置的变化, 往往画出轴力沿杆件轴向方向变化的图形, 即轴力图。

【例 2.1】试画出图 2.4 (a) 所示直杆的轴力图。

解: 此杆在 A、B、C、D 点承受轴向外力。使用截面法, 先在 AB 段内取 1—1 截面, 假想地将直杆分成两段, 弃去右段, 并画出左段的受力图 [图 2.4 (b)], 用 N_1 表示右段对左段的作用。设 N_1 为正的轴力, 由此段的平衡方程 $\sum F_x = 0$, 得

$$N_1 - 2P = 0$$

所以

$$N_1 = 2P (\text{拉力})$$

N_1 得正号, 说明原先假设拉力是正确的。

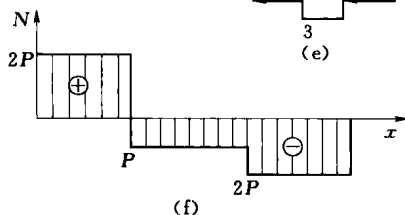
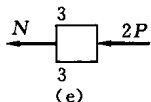
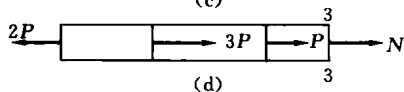
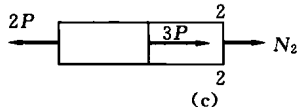
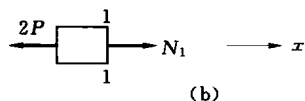
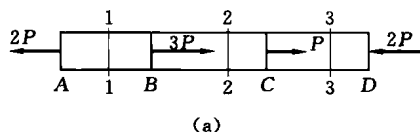


图 2.4

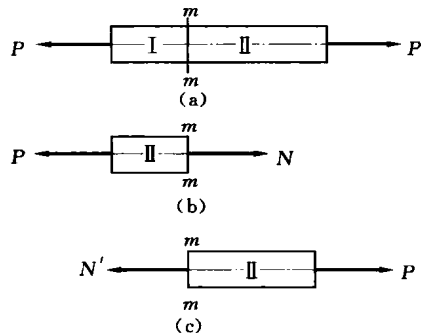


图 2.3

同理取截面 2—2, 由截面左边一段 [图 2.4 (c)] 的平衡方程 $\sum F_x = 0$ 得

$$N_2 + 3P - 2P = 0$$

所以

$$N_2 = -P (\text{压力})$$

N_2 得负号, 说明原先假设为拉力是不正确的, 应为压力。

类似地, 取截面 3—3 [图 2.4 (d)], 得

$$N_3 + P + 3P - 2P = 0$$

即

$$N_3 = -2P (\text{压力})$$

如果研究截面 3—3 右边一段, 如图 2.4 (e) 所示, 由平衡方程 $\sum F_x = 0$ 得

$$N_3 + 2P = 0$$

即

$$N_3 = -2P (\text{压力})$$

所得结果与前面相同。

然后以 x 轴表示截面的位置, 以垂直 x 轴的坐标表示对应截面的轴力, 即可按选定的比例尺画出轴力图, 如图 2.4 (f) 所示。在轴力图中, 将拉力画在 x 轴的上侧, 压力画在 x 轴的下侧。这样, 轴力图不但显示出杆件各段的轴力的大小, 而且还可

以表示出各段内的变形是拉伸或是压缩。

2.2.2 横截面上的应力

前面应用截面法，可以求得任意横截面上内力的总和，现在进一步分析横截面上的应力情况。首先研究该截面上的内力分布规律，通过实验观察杆受力后的变形现象，并根据现象做出假设和推论；然后进行理论分析，得出截面上的内力分布规律，最后确定应力的方向和大小。

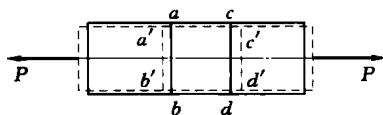


图 2.5

现取一等直杆，拉压变形前在其表面上画垂直于杆轴的直线 ab 和 cd (图 2.5)。拉伸变形后，发现 ab 和 cd 仍为直线，且仍垂直于轴线，只是分别平行地移动至 $a'b'$ 和 $c'd'$ 。于是，可以作出如下假设：直杆在轴向拉压时横截面仍保持为平面。根据这个“平面假设”

可知，杆件在它的任意两个横截面之间的伸长变形是均匀的。又因材料是均匀连续的，所以杆件横截面上的内力是均匀分布的，即在横截面上各点处的正应力都相等。若杆的轴力为 N ，横截面积为 A ，于是得

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (2.1)$$

正应力符号规定：拉应力为正，压应力为负。

【例 2.2】 图 2.6 (a) 为一变截面拉压杆件，其受力情况如图 2.6 所示，试确定其危险截面。

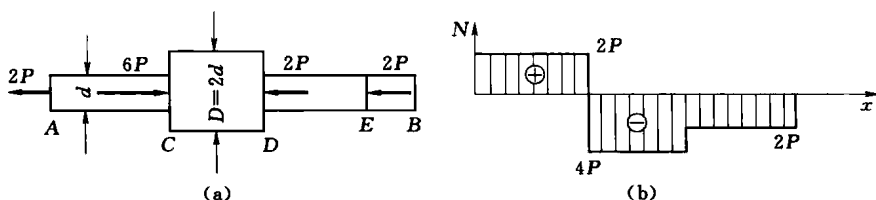


图 2.6

解：运用截面法求各段内力，作轴力图，如图 2.6 (b) 所示。

AC 段： $N_1 = 2P$ CD 段： $N_2 = -4P$

DE 段： $N_3 = -2P$ EB 段： $N_4 = 0$

根据内力计算应力，则得

$$\text{AC 段:} \quad \sigma_1 = \frac{N_1}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{8P}{\pi d^2}$$

$$\text{CD 段:} \quad \sigma_2 = \frac{N_2}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{-4P}{\pi d^2}$$

$$\text{DE 段:} \quad \sigma_3 = \frac{N_3}{\frac{\pi d^2}{4}} = -\frac{8P}{\pi d^2}$$

最大应力所在的截面称为危险截面。由计算可知，AC 段和 DE 段为危险截面。

2.3 材料的力学性能

构件的强度和变形不仅与构件的尺寸和所承受的载荷有关，而且还与构件所用材料的力学性能有关。材料的力学性能一般通过试验得到。

这里，主要介绍材料在常温（就是室温）、静载（速度平稳、载荷缓慢地逐渐增加）下的拉伸试验和压缩试验。这是材料力学性能试验中最常用的试验。

为了便于比较试验所得的结果，对试件的形状、加工精度、加载速度、试验环境等，国家标准 GB/T 228—2002《金属材料室温拉伸试验方法》都有统一规定。在试件上取长为 l 的一段（图 2.7）作为试验段， l 称为标距。对圆截面试件，标距 l 与直径 d 有两种比例，即

$$l=5d, \quad l=10d$$

前者称为 5 倍试件，后者称为 10 倍试件。

2.3.1 低碳钢拉伸时的力学性能

低碳钢是指含碳量在 0.3% 以下的碳素钢。这类钢材在工程中使用较广，在拉伸试验中表现出的力学性能也最为典型，因此常用它来阐明塑性材料的一些特性。

拉伸试验在万能试验机上进行。把试件安装在试验机上后开动机器，试件受到自零渐增拉力 P 的作用，这时在试件标距 l 长度内所产生的相应的拉伸变形为 Δl 。把对应的 P 和 Δl 绘制成 $P-\Delta l$ 曲线，称为拉伸图。一般试验机能自动绘出 $P-\Delta l$ 曲线。

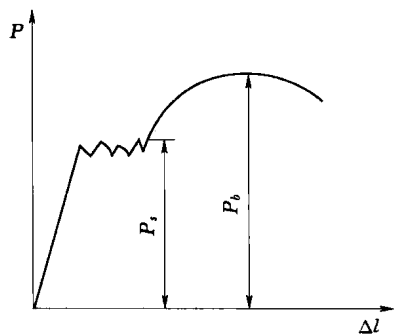


图 2.8

图 2.8 所示的拉伸图，描绘了低碳钢试件从开始加载直至断裂的全过程中力和变形的关系。但这图形受到试件几何尺寸的影响。为了消除尺寸的影响，获得反映材料性质的图线，将纵坐标 P 及横坐标 Δl ，分别除以试件原来的截面面积 A 及原来的长度 l ，由此得出材料的应力 $\sigma = \frac{P}{A}$ 与应变 $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$ 的关系曲线，称为应力应变曲线或 $\sigma-\epsilon$ 曲线。低碳钢的应力应变曲线如图 2.9 所示。根据它的变形特点，大致可分为四个阶段。

1. 弹性阶段

在图 2.9 中 oa' 段内材料是弹性的，即卸载后，变形能够完全恢复。这种变形称为弹性变形。与 a' 点对应的应力 σ_e 称为弹性极限。在弹性阶段卸载后的试件，其长度不变。

在弹性阶段中，从 o 点到 a 是直线，这说明在 oa 范围内应力 σ 与应变 ϵ 成正比。与 a 点对应的应力值，称为比例极限，以符号 σ_p 表示。比例极限是材料的应力与应变成正比的最高应力。因此，胡克定律只适用在应力不超过比例极限的范围内，低碳钢的比例极限 $\sigma_p = (190 \sim 200) \text{ MPa}$ 。

图 2.9 中倾角 α 的正切为

$$\tan \alpha = \frac{\sigma}{\epsilon} = E \quad (2.2)$$

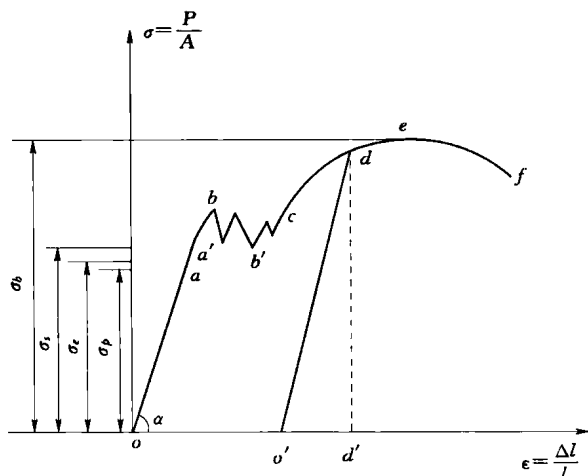


图 2.9

由此可由 $\overline{oa}$ 直线的斜率确定材料的弹性模量 E 。关于 E ，后有说明。

图 2.9 中的 a 点比 a' 略低， aa' 段已不是直线，稍有弯曲，但仍属于弹性阶段，与 a' 点对应的应力值，称为弹性极限，以符号 σ_e 表示。比例极限与弹性极限的概念不同，但两者的数值很接近，所以有时也把两者不加以区别地统称为弹性极限。在工程应用中，一般均使构件在弹性变形范围内工作。

2. 屈服阶段

弹性阶段后，在 $\sigma-\epsilon$ 曲线上出现水平或是上下发生微小波动的一段（图 2.9 上的 bc 段）。此时试件的应力基本上不变，但应变却迅速增长，说明材料对增长的变形暂时失去抵抗能力，好像在流动，这种现象称为材料的屈服或流动。在屈服阶段，对应于 b 点的应力称为上屈服极限，对应于 b' 点的应力称为下屈服极限。工程上通常取下屈服极限作为材料的屈服强度，其对应应力值以 σ_s 表示，称为屈服极限或流动极限。它的计算式为

$$\sigma_s = \frac{P_s}{A}$$

式中 P_s ——对应于试件中屈服极限的拉力；

A ——试件横截面的原面积。

表面磨光的试件屈服时，表面将出现与轴线大致成 45° 倾角的条纹（图 2.10）。这时由于材料内部相对滑移形成的，称为滑移线。因为拉伸时在与杆轴成 45° 倾角的斜截面上，切应力为最大值，可见屈服现象的出现与最大切应力有关。

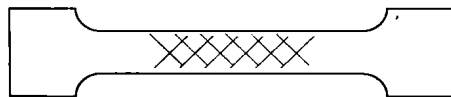


图 2.10

材料屈服表现为显著的塑性变形，而零件的塑性变形将影响机器的正常工作，所以屈服极限 σ_s 是衡量材料强度的重要指标。

3. 强化阶段

强化阶段即曲线 ce 部分。超过屈服阶段后，要使试件继续变形必须增加应力。这种形象称为材料的强化。这时 $\sigma-\epsilon$ 曲线又逐渐上升，直到曲线的最高点 e ，相应的应力达到最大值。这个最大载荷除以试件横截面原面积得到的应力值，称为强度极限，以符号 σ_b 表示。它是衡量材料强度的另一项重要指标。在强化阶段中，试件的横向尺寸有明显的

缩小。

4. 局部变形阶段

应力达到强度极限 σ_b 后，试件的变形开始集中于某一局部区域，这时该区域内的横截面逐渐收缩，形成颈缩现象。由于局部截面收缩，试件继续变形时，所需的拉力逐渐变小，最后在颈缩处被拉断。

低碳钢在拉伸过程中，经历了上述的弹性、屈服、强化和局部变形四个阶段，并有 σ_p 、 σ_e 、 σ_s 和 σ_b 四个强度特征值。其中屈服极限 σ_s 和强度极限 σ_b 是衡量其强度的主要指标。正确理解比例极限 σ_p 的概念，对于掌握胡克定律、杆件的应力分析和压杆的稳定计算都十分重要。

试件断裂后，变形中的弹性部分回复而消失，但塑性变形（残余变形）部分则遗留下来。试件工作段的长度（标距）有 l 伸长为 l' ，断口处的横截面面积由原来的 A 缩减为 A' ，它们的相对残余变形常用来衡量材料的塑性性能。工程中常用的两个塑性指标为

延伸率

$$\delta = \frac{l' - l}{l} \times 100\% \quad (2.3)$$

断面收缩率

$$\psi = \frac{A - A'}{A} \times 100\% \quad (2.4)$$

在工程上，根据断裂时塑性变形的大小，通常把 $\delta \geq 5\%$ 的材料称为塑性材料，如钢材、铜、铝等； $\delta < 5\%$ 的材料称为脆性材料，如铸铁、砖石等。必须指出，上述的划分是以材料在常温、静载和简单拉伸的前提下所得到的 δ 为依据的。而温度、变形速度、受力状态和热处理等，都会影响材料的性质。材料的塑性和脆性在一定条件下可以互相转化。

工程上常用的轴、齿轮和连杆等零件，由于承受的不是静载荷，因而制造这些零件的材料，除了要有足够的强度外，还需要有足够的塑性指标值。

5. 卸载定律及冷作硬化

如把试件拉到超过屈服极限的 d 点（图 2.9），然后逐渐卸除拉力，应力和应变关系将沿着斜直线 do' 回到 o' 点，斜直线 do' 近似平行于 oa 。这说明：在卸载过程中，应力和应变按直线规律变化。这就是卸载定律。拉力完全卸除后，应力—应变图中， $o'd'$ 表示消失了的弹性变形，而 oo' 表示没有消失的塑性变形。

卸载后，如在短期内再次加载，则应力和应变大致上沿卸载时的斜直线 $o'd$ 变化。直到 d 点后，又沿曲线 def 变化。可见在再次加载时，直到 d 点以前材料的变形是弹性的，过 d 点后才开始出现塑性变形。比较图 2.9 中 $oabcdef$ 和 $o'def$ 两条曲线，可见在第二次加载时，其比例极限（亦即弹性阶段）得到了提高，但塑性变形和伸长率却有所降低。这种现象称为冷作硬化。冷作硬化形象经退火后又可消除。

工程中经常利用冷作硬化来提高材料的弹性极限，如起重机用的钢索和建筑用的钢筋，常用冷拔工艺以提高强度。又如对某些零件进行喷丸处理，使其表面发生塑性变形，形成冷硬层，以提高零件表面层的强度。但零件初加工后，由于冷作硬化使材料变脆变

硬，给下一步加工造成困难，且容易产生裂纹，往往就需要在工序之间安排退火，以消除冷作硬化的影响。

2.3.2 其他塑性材料拉伸时的力学性能

工程中常用的塑性材料，除低碳钢外，还有中碳钢、高碳钢和合金钢、铝合金、青铜、黄铜等，图 2.11 中给出了几种常用的金属材料在拉伸时的 σ — ϵ 曲线。

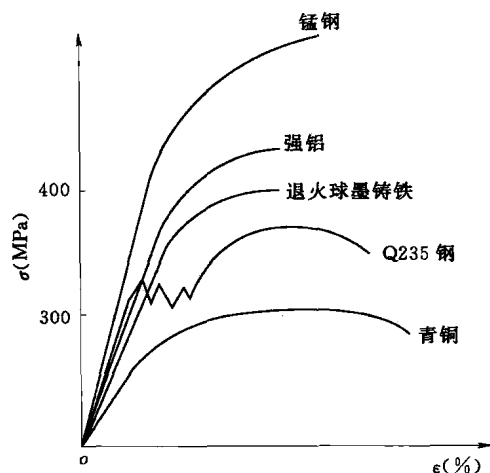


图 2.11

从曲线上可以看到：有色金属中的青铜强度较低，但塑性较高；合金钢中的锰钢，强度很高，塑性也不差；强铝和退火球墨铸铁的强度和塑性都比较好。由图 2.11 中可知，青铜、退火球墨铸铁、强铝、锰钢四种材料与低碳钢在图形上有一个显著的区别，就是前者没有明显的屈服阶段。对于没有明显屈服阶段的塑性材料，通常用名义屈服极限这个指标。按我国国家标准规定：取对应于试件卸载后产生 0.2% 的残余正应变时的应力值作为材料的屈服极限，以 $\sigma_{0.2}$ 表示，见图 2.12。图 2.12 中虚线与弹性阶段的直线相平行。

相平行。

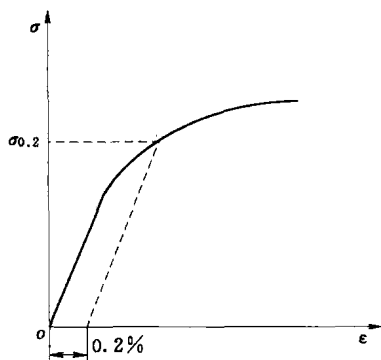


图 2.12

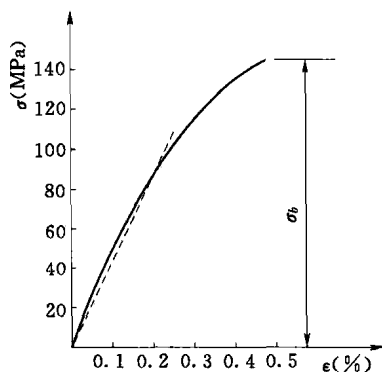


图 2.13

2.3.3 铸铁在拉伸时的力学性能

灰口铸铁拉伸时的应力—应变关系是一段微弯曲线，如图 2.13 所示。没有明显的直线部分，应力和应变不再成正比关系，弹性模量数值随应力的大小而变。在工程计算中，通常取 σ — ϵ 曲线的一条割线来近似代替开始部分的曲线，从而认为材料服从胡克定律。它在较小的拉应力下就被拉断，没有屈服和颈缩现象，拉断前的应变很小，延伸率也很小，是典型的脆性材料。铸铁拉断时的应力称为强度极限，用 σ_b 表示。它的计算式为

$$\sigma_b = \frac{P_b}{A}$$