

“十二五”普通高等教育本科规划教材

Strength of Materials

材料力学

钟大鸣 主编 高淑杰 副主编



化学工业出版社

014057557

TB301-43

102

“十二五”普通高等教育本科

Strength of Materials

材料力学

钟大鸣 主编 高淑杰 副主编



TB301-43
102



北航

C1745959



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是根据教育部颁发的《材料力学B类(中学时)和C类(少学时)课程教学基本要求》,结合国内应用型本科院校教学实际状况而编写的。

全书共9章,内容包括绪论、轴向拉伸与压缩、扭转、弯曲内力、弯曲应力、弯曲变形、应力状态分析及强度理论、组合变形、压杆稳定。各章均附有思考题与习题,书后并附有习题答案。

本书具有体系合理、论述严谨、基础理论与工程应用兼顾、专业面宽与教学适用性强、注重学生的能力培养等特点。

本书可作为高等工科院校土木类、机械类专业的本科教学用书,也可供成人教育师生及相关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学/钟大鸣主编. —北京:化学工业出版社,
2014.9

“十二五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-122-20969-6

I. ①材… II. ①钟… III. ①材料力学-高等学校-
教材 IV. ①TB301

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第131556号

责任编辑:杨 菁

责任校对:陶燕华

文字编辑:李 玥

装帧设计:张 辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张10½ 字数264千字 2014年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:29.00元

版权所有 违者必究



前言

FOREWORD

材料力学是高等工科院校多数专业开设的一门非常重要的技术基础课，对学生未来的工作与继续学习都有极大的帮助。随着我国高等教育的普及，为满足愈来愈广泛的应用型本科院校的教学需要，结合编者多年来工程实践与高校教学的经验体会，我们努力编写了这本较为通用的中等学时数的材料力学教材，以求满足相应的读者群体需求。

本书在严格论述材料力学基础理论的同时，尤为注重基本概念的更新与拓展、工程应用的加强以及教学内容的精选与组织，并在新的科技成果引进与传统内容的继承上进行了积极探索，力求使其论述严谨、理论与应用结合紧密、重视学生的能力培养。

讲授本书的内容，约需 50~70 学时（不包括实验学时）。

本书由辽宁科技学院钟大鸣（第一章、第九章）、高淑杰（第二章、第三章）、韩颖烨（第四章、第五章、第六章）、李瑞洋（第七章、第八章）编写。全书由钟大鸣任主编，高淑杰任副主编。沈阳建筑大学张晓霞教授、辽宁科技学院徐桂春副教授对书稿进行了仔细的审阅，并提出了许多宝贵的意见。在此，编者致以诚挚的感谢。

受编者水平所限，书中定会存有不当与缺憾，恳请读者批评指正。

编者

2014 年 3 月

目录

CONTENTS

第一章 绪论

第一节 材料力学的主要任务与研究对象	1
第二节 材料力学的基本假设	2
第三节 外力与内力	2
一、外力	2
二、内力与求解方法（截面法）	3
第四节 材料的应力	4
第五节 材料的应变与构件的变形	5
一、材料的应变	5
二、构件的变形	5
第六节 胡克定律	5
第七节 杆件变形的基本形式	6

第二章 轴向拉伸与压缩

第一节 轴向拉伸与压缩概述	8
第二节 截面法、轴力及轴力图	9
一、截面法与杆件轴力	9
二、轴力图	10
第三节 拉（压）杆的应力	11
一、拉（压）杆横截面上的应力	11
二、拉（压）杆斜截面上的应力	13
第四节 拉（压）杆的变形及胡克定律	14
第五节 材料在拉伸和压缩时的力学性能	18
一、材料拉伸和压缩试验的试件与设备	18
二、低碳钢试样拉伸时的力学性能	18
三、其他金属材料在拉伸时的力学性能	21
四、金属材料在压缩时的力学性能	22
第六节 强度条件、安全因数、许用应力	23
第七节 简单拉压静不定问题	25
一、静不定问题的概念及解法	25

二、温度应力和装配应力	27
第八节 剪切与挤压的实用计算方法	29
一、剪切变形与剪切面	29
二、剪切实用计算方法	29
三、挤压实用计算方法	30
第九节 轴向拉（压）杆的应变能	32
第十节 应力集中的概念	33
思考题	35
习题	36

第三章 扭转

第一节 扭转概述	42
第二节 薄壁圆筒的扭转	43
第三节 传动轴的外力偶矩、扭矩及扭矩图	44
一、传动轴的外力偶矩	44
二、扭矩及扭矩图	44
第四节 等直圆截面杆扭转时的应力、强度条件	46
一、横截面上的应力	46
二、斜截面上的应力	48
三、强度条件	51
第五节 等直圆截面杆的扭转变形与刚度条件	52
一、扭转变形	52
二、刚度条件	54
第六节 等直圆截面杆扭转时的应变能	54
第七节 非圆截面杆自由扭转时的应力和变形	55
第八节 薄壁截面杆自由扭转时的应力和变形	57
一、开口薄壁截面杆	57
二、闭口薄壁截面杆	59
思考题	62
习题	62

第四章 弯曲内力

第一节 构件的弯曲	67
第二节 梁的计算简图	68
一、支座形式与支反力	68
二、典型梁的分类	68
第三节 剪力与弯矩	69
第四节 剪力图与弯矩图	71
第五节 剪力、弯矩及荷载集度间的微分关系	74
第六节 平面刚架的弯矩图绘制	77
思考题	78
习题	78

第五章 弯曲应力

第一节 梁弯曲时的正应力	80
一、弯曲应力简介	80
二、纯弯曲梁段横截面上的正应力分析	80
三、梁弯曲时的正应力强度条件	84
第二节 梁弯曲时的切应力	86
一、矩形截面梁横截面上的切应力	87
二、其他形状截面的切应力	88
三、切应力强度条件	88
思考题	89
习题	89

第六章 弯曲变形

第一节 弯曲变形的概念	92
第二节 挠曲线近似微分方程	93
第三节 积分法求解梁的弯曲变形	93
第四节 叠加法求弯曲变形	96
第五节 梁的刚度校核	99
第六节 简单静不定梁	100
第七节 提高梁强度和刚度的措施	103
一、合理安排梁的受力方式	103
二、合理选择梁的截面形状	103
思考题	103
习题	104

第七章 应力状态分析及强度理论

第一节 应力状态概述	106
第二节 平面应力状态分析	107
一、平面应力状态分析的解析法	107
二、平面应力状态分析的图解法（应力圆法）	110
第三节 空间应力状态分析	113
第四节 广义胡克定律	114
第五节 强度理论	116
一、最大拉应力理论	117
二、最大拉应变理论	117
三、最大切应力理论	118
四、畸变能理论	118
思考题	121
习题	122

第八章 组合变形

第一节 组合变形概述	125
------------------	-----

第二节 梁的斜弯曲	126
一、斜弯曲时梁的正应力	126
二、斜弯曲时梁的强度条件	127
第三节 拉伸（压缩）与弯曲的组合变形	128
第四节 弯曲与扭转的组合	130
思考题	132
习题	133

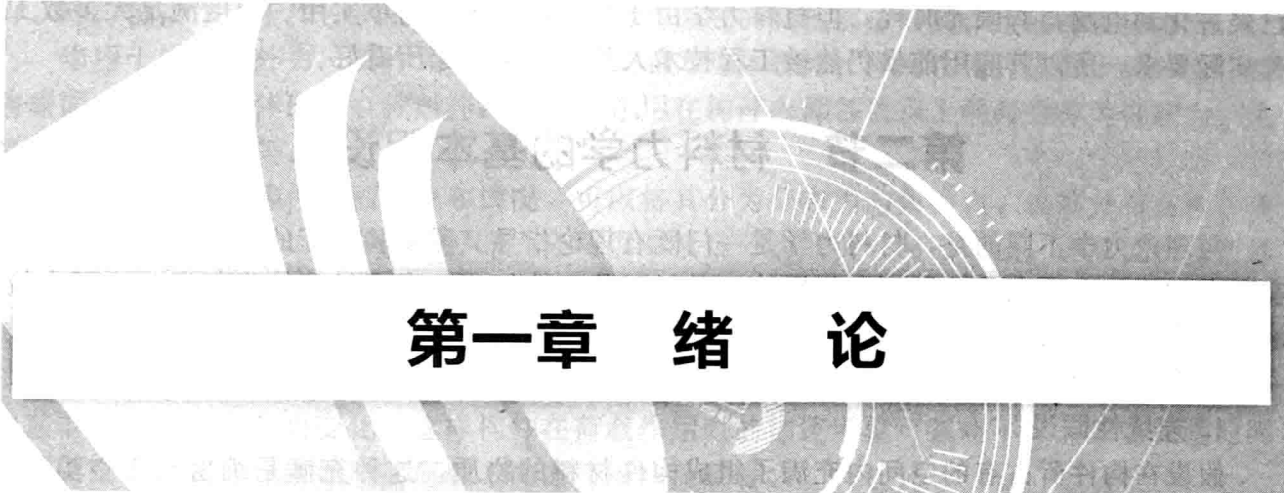
第九章 压杆稳定

第一节 压杆稳定的基本概念	136
第二节 两端铰支的细长压杆稳定临界力	137
第三节 其他约束条件下细长压杆的稳定临界力	138
第四节 欧拉公式的适用范围与临界应力	139
一、临界应力与杆件柔度	139
二、欧拉公式的适用范围	140
三、中、小柔度压杆的临界应力与经验公式	140
第五节 受压杆件的稳定性计算	142
一、安全系数法计算压杆稳定性	142
二、折减系数法计算压杆稳定性	143
第六节 提高压杆稳定性的常用措施	143
一、合理选择截面	143
二、合理设计杆端约束	143
三、合理设计压杆长度	143
四、适当选择合适的材料	144
思考题	144
习题	144

附录

附录一 常用型钢表	146
附录二 习题答案	152

参考文献



第一章 绪 论

第一节 材料力学的主要任务与研究对象

任何机器设备或工程结构物都是由若干构件组成。在荷载作用下，其构件会产生形变，过大的形变会影响构件的正常使用。同时构件内部也会产生相应的阻碍形变的抗力（内力），当这种阻碍形变的抗力超过一定限度时，构件就会破坏而失去承载能力。但不计经济成本，而使用过多的材料来制作构件，则既不合理，也会削弱构件的使用功能。而材料力学的任务则正是为设计既经济又安全（使之满足强度、刚度及稳定性的要求）的构件，提供必要的理论基础与计算方法。

构件的强度是指构件本身在承受荷载作用时抵抗破坏的能力。这包括构件的两种破坏形式：一是指构件的脆性断裂；二是指构件的塑性变形。前者大多发生于脆性材料的破坏，后者大多发生于塑性材料的破坏。而构件材料的这种力学属性则主要取决于材料的伸长率及断面收缩率。

构件的刚度是指构件本身在承受荷载作用时抵抗变形的能力。这种变形主要是指构件在荷载作用下的弹性变形。而构件变形的弹、塑性区分，就是看其荷载去除后构件的变形能否消失。

构件的稳定性是指构件在荷载作用下能否保持原有平衡状态的能力。例如细长杆件在超过某一限值的轴心压力（临界力）作用时会突然发生屈曲变形而失去原有平衡状态，继而丧失承载能力。细长杆件的受压失稳是结构物破坏的一种极其重要的形式，非常遗憾的是，在工程实际中构件这种极其重要的破坏形式却经常被人们所忽视。

材料力学的主要研究对象是杆状构件，初等材料力学中这种杆状构件主要是指金属材料制成的等截面直杆，尤其是指钢材制成的等直杆件。但需要着重指出的是：切不可因此限定材料力学的适用范围。机器设备及工程结构物中许多构件本来就是等直杆件，或者可近似地看作等直杆件。因而，材料力学的适用范围的确可以拓展得非常宽泛，而这正是材料力学得以被工程师们甚至力学专家非常喜爱并广泛应用的原因。事实上，在工程实际中许多变截面杆件、曲杆及非金属材料杆件的强度问题也大都由工程师们借助材料力学的方法加以解决，而这在许多教科书中也被介绍，并被相应的规范标准加以确定。

这里需要提及的是材料力学解决问题的方法是一种既有理论指导，又非常贴近实用的方法。这种方法求解问题的精度与可靠性一般来说足以满足工程实际的要求，这已经被无数工程实例所证实，并被进一步的理论与实验研究所认可。同时，尽管结构物的安全可靠设计

已经进化到电脑与有限元时代,但材料力学由于其理论明晰、简单实用、精度满足大多数工程实际要求,所以其应用前景仍然被工程技术人员及力学专家所看好。

第二节 材料力学的基本假设

与理论力学不同的是,材料力学是一门既有理论指导又需实验验证的科学;同时,工程实际中的构件本质上是一种可变形固体,其材料的具体组成与微观结构非常复杂。为了有效地研究构件在荷载作用下的响应(强度、刚度、稳定性),有必要对构件材料的物理性质做一些合理的假设。

1. 连续性假设

假设在构件所占有的空间内充满了组成构件材料的物质,这种充满是绵密且无空隙的,可以借助数学的手段去描述与定义。此外,这种充满与绵密的状态在构件变形后也是成立的。

2. 均匀性假设

材料在荷载作用下所表现出来的力学性能(又称机械性能)与其在构件内部的几何位置无关,即认为是均匀的。据此假设,从构件内部任何部位所切取的微小单元体其力学性质与构件整体的力学性质均可视作相同,即具有其代表性。但需要提及的是,对于发生于金属晶粒级别那样大小范围内的力学现象,均匀性假设就不再适用了。

统计规律表明,现代大工业生产规模产出的金属材料在上述意义上的连续性与均匀性假设,均可得到很好的保证。

3. 各向同性假设

在上述两个假设基础之上自然地会有材料沿各个方向上的力学性能一致的推论,这便是材料的各向同性假设。其实单一的金属晶粒其力学性能是有明显的方向差异的;但作为金属构件整体来说,由于其包含了无数的金属晶粒,且其排列又杂乱无序,因而其力学性质在各个方向上就趋于一致了,宏观上就可视其为各向同性。

至于力学性能具有明显方向性的材料,如木材、竹材、材料分布有明显方向性的合成材料等,则属于各向异性材料。其力学问题的求解应按各向异性材料力学处理。

还应该指出,其实轧制金属力学性能也是具有一定的方向性的,但基于设计、施工及差异量级等原因,往往无法过多考虑这种方向性的力学差异,皆按各向同性材料处理。

4. 线弹性、小变形假设

此假设认为,构件材料在荷载作用下的形变响应与所受外力成线弹性关系。其次,构件在荷载作用下的形变与其自身原始几何尺寸相比极其微小。

这样,在求解构件的内力与形变等材料力学问题时,均可按其原有几何尺寸进行,同时其相关方程也表现为线性方程,便于求解。至于非线性问题,则应按相应的非线性力学去加以解决。

第三节 外力与内力

一、外力

材料力学所研究的对象是杆状构件,故此,可以将所研究的构件从其周围的物体中分离出来,并用力来取代它们之间的相互作用。这样构件之外的物体作用于其上的力均称为外

力。外力包括作用于构件上的荷载，也包括与之关联的其他部分对其作用的约束反力。

作用于构件的外力按其作用方式可分为表面力与体积力。作用在构件表面上的外力，称为表面力，诸如流体压力、接触作用力等。作用在构件内部各质点上的外力称为体积力，主要指重力、惯性力等。

按照表面力在构件表面的分布情况，可以将其分为分布力与集中力。连续分布在构件表面一定范围的力，称为分布力（分布力还可以继续细分为线荷载与面荷载，即单位长度所作用的荷载与单位面积所作用的荷载）。如若某一分布力的作用面积远小于构件的表面面积，则可将这一分布力视作作用于一点处的力，我们称其为集中力。

按照荷载随时间变化的情况，又可将其分为静荷载与动荷载。前者随时间变化极其缓慢或基本不随时间改变而变化，这样构件在荷载作用时的加速度就可忽略不计。后者则随时间改变而有明显变化，诸如周期荷载、冲击与爆炸荷载等。

构件在静荷载与动荷载作用下的力学响应是有明显差异的。两种问题的分析方法也不尽相同，静荷载作用时构件的力学响应是材料力学求解问题的基础，而动荷载作用时的力学响应则必须考虑构件的质量与加速度等因素。

二、内力与求解方法（截面法）

构件在外力作用下会有形变发生，与此相应，构件内部各部分间也将产生相互作用力，这种阻碍构件发生形变的相互作用力称为内力。材料力学中所提及的内力是由外力引起的，内力随外力的变化而变化，外力去除后，内力也将随之消失。我们必须明确材料力学所涉及的内力是指随外力而产生的附加内力，而不是外力施加前材料内部就已经存在的相互作用力，诸如分子、原子、晶粒间等原有的相互作用力。

构件的强度、刚度、稳定性与内力的大小及其在构件内部的分布情况密切相关。故此，我们需要确定求解构件内力的方法，这就是所谓的截面法。

图 1-1 (a) 所示受力物体代表任一受力构件。为了显示与计算其上某一截面的内力，我们可以在该截面处用一假想平面将该构件截为两部分，并依求解方便为原则，舍去其中的一部分，将舍掉部分对保留部分的作用以力的形式表示，此力就是该截面上我们要求解的内力。由于在材料力学的基本假设中我们已有构件材料是连续、均匀的假设，所以内力在截面上也是连续分布的。通常是将截面上的分布内力用简化到该截面形心处的主矢与主矩来表征。我们可以用六个分量来表示 [图 1-1 (b)]，即 F_x 、 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z 。由于构件在外力作用下处于平衡状态，所以截开后所保留的部分也应该是平衡的，这样由空间力系的六个平衡方程就可以求出该截面内力的六个分量。

需要说明的是，随着荷载作用方式与构件的变形形式不同，截面上内力分量也有所不同，可能是其中的一个分量，也可能是其中的几个内力分量。例如等直杆受轴心拉压荷载作用，其横截面上的内力分量就只有一个，即 F_x （或用 F_N 表示）。

用截面法求解构件截面内力其步骤可归结如下。

① 在欲求解内力的截面处，用一假想的截面将构件截为两部分。

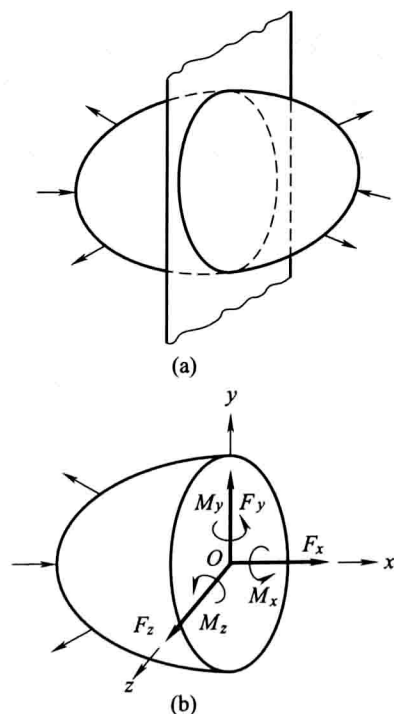


图 1-1 构件在外力作用下的形变

② 舍掉一部分，保留剩下的部分，并将舍掉部分对保留部分的作用用内力来代替。

③ 考虑保留部分的平衡，由平衡方程来求解其内力值。

截面法是求解构件内力一种非常有效的方法，在材料力学的各个章节中均有应用与介绍，读者对此应给予足够的注意。

第四节 材料的应力

上节中我们介绍了内力、内力的求解方法（截面法），从中可以得知，内力是外力的函数，内力随外力变化而变化。对任一构件而言，单从强度的角度看，内力越大，构件应越不安全；当内力达到一定数值时，构件就要发生破坏。但实际上内力的大小有时还不能确切地反映一个构件真正的危险程度，尤其是对于几何形状有差异的构件，其危险程度更是难以通过内力水平来进行比较。例如两个截面尺寸不同的受轴向拉伸的等直杆，如果所受拉力相同，则内力值亦相同。但显然两杆的安全裕度是不同的，粗杆要比细杆强度储备更大一些。为了更好地解决构件的强度问题，有必要进一步研究内力在构件截面上具体的分布情况，即需要研究截面上的应力状况。

如图 1-2 (a) 所示，在构件截面 $m-m$ 上任一点 k 的周围取一微元面积 ΔA ，并设作用在该面积上的内力为 ΔF ，则 ΔF 与 ΔA 的比值，称为该微元面积上的平均应力，并用 P_{av} 表示，即

$$P_{av} = \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1-1)$$

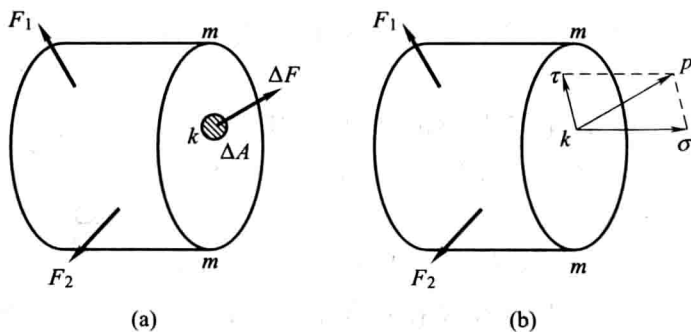


图 1-2 内力在构件截面上的分布情况

通常情况下，内力在整个截面上并非均匀分布，上式应为包含 k 点的微元面积 ΔA 上的平均应力，而 k 点的应力则为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1-2)$$

显然，应力 p 具备矢量的全部特征，其方向即是 ΔF 的极限方向。为了分析问题方便起见，通常将其正交分解为垂直于截面的应力分量与平行于截面的应力分量，这便是正应力 σ 与切应力 τ （亦称剪应力）。由矢量的合成法则可得

$$p^2 = \sigma^2 + \tau^2 \quad (1-3)$$

我国法定的计量单位规定，力与面积的基本单位分别为 N 与 m^2 ，应力的单位为 Pa ， $1Pa = 1N/m^2$ 。工程上应力的常用单位为 MPa （兆帕）， $1MPa = 10^6 Pa$ 。

第五节 材料的应变与构件的变形

一、材料的应变

在外力作用下, 构件会发生形变, 同时构件材料的内部会产生应力, 以抵抗这种形变。构件内部各点的微小形变构成了相应部位的应变。研究这种材料的应变, 可以更好地掌握构件内部各点的应力分布规律。

构件在荷载作用下, 其内部各点处的微元体 (亦称单元体) 的位置与形状都会发生变化, 微元体的棱边长度与相邻棱边的夹角也会发生改变。如图 1-3 所示。

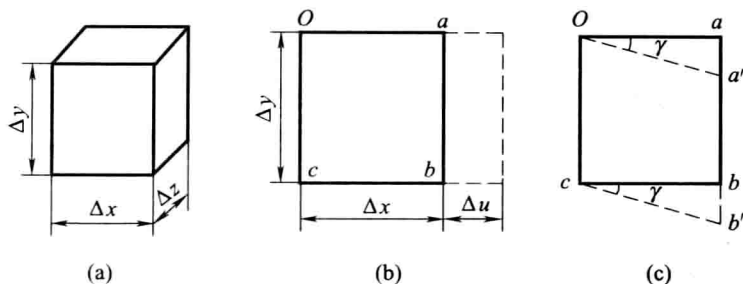


图 1-3 构件在荷载作用下微元体的位置与形状的变化

设微元体沿 x 方向的棱边原长为 Δx , 变形后为 $\Delta x + \Delta u$, 绝对伸长为 Δu , 其相对伸长为 $\Delta u / \Delta x$, 即为 x 方向上的平均线应变。取其极限, 则为该点处沿 x 方向的线应变, 即

$$\epsilon_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta x}$$

由类似的方法, 也可以求得该点处其他方向上的线应变。

当微元体棱边长度发生改变时, 相邻棱边的夹角一般也会发生改变。微元体相邻棱边所夹角的改变量, 称其为切应变 (亦称剪应变), 并用符号 γ 表示。

这里应指出, 线应变是无量纲量, 切应变的单位是 rad (弧度), 但其本质也是无量纲量。

二、构件的变形

构件的变形是指构件整体空间位置上的改变, 即构件中各点及各截面在空间位置上的改变。其实构件的整体变形是其内部所有微元体局部变形的组合结果。构件的整体变形可分为线位移与角位移。例如, 矩形截面简支梁在竖向荷载作用下会产生弯曲变形, 最具代表性的梁的轴线则由直线变形为纵对称面内的曲线, 这样, 其轴线上任一点既有线位移, 也有角位移。梁轴线上所有点的位移组合, 就构成了梁的整体变形。构件的线位移是有量纲的物理量, 单位为长度单位; 而角位移仍然是无量纲量, 其单位为 rad (弧度)。

一般说来, 构件的变形是指构件整体空间位置上的改变, 其参照物是定坐标系。而材料的应变是指构件中某一点处微元体在应力作用下产生的形变, 其参照物是微元体自身。

第六节 胡克定律

前面已经讨论过, 材料力学中应力的两种主要形式为相互正交的正应力与切应力。构件内部相应的形变响应也有两种, 即正应变与切应变。试验表明, 若构件的材料确定, 则应力

与应变间具有某种特定的关系。本节研究典型微元体在单向受力与纯剪切受力时应力与应变间的这种特定关系。

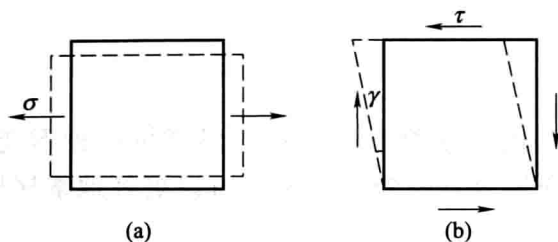


图 1-4 典型微元体在单向受力与纯剪切受力时应力与应变的关系

如图 1-4 (a) 所示, 微元体在正应力 σ 作用下, 沿正应力作用方向产生正应变 ϵ , 试验表明, 如果其应力水平低于某一限值时 (弹性限度), 正应力与正应变成正比, 即

$$\sigma = E\epsilon \quad (1-4)$$

式中, E 为材料的弹性模量。

如图 1-4 (b) 所示, 纯剪切试验表明, 微元体在切应力 τ 作用下, 会产生如图所示的切应变 γ , 如果其应力水平低于某一限值时, 则切应力与切应变也成正比, 即

$$\tau = G\gamma \quad (1-5)$$

式中, G 为材料的切变模量, 或称材料的剪切弹性模量。

式 (1-4) 与式 (1-5) 两式被称为材料的胡克定律与材料的剪切胡克定律。通常也被称为材料的本构关系。

基于大量的试验结论, 对于工程中的绝大多数材料, 在一定的应力水平限度内, 上述两式均能较好地与试验结果吻合。

由于正应变与切应变均为无量纲量, 故此可以看出两种弹性模量均于应力具有相同的量纲。在我国法定计量单位制中, 其单位为 GPa。1GPa=10⁹Pa。

材料的两种弹性模量均为材料的力学性能参数, 其数值与材料自身特性有关, 可由试验确定。常见的钢与合金钢的两种模量值分别为 $E=200\sim 220\text{GPa}$, $G=75\sim 80\text{GPa}$ 。铝与铝合金的两种模量值分别为 $E=70\sim 72\text{GPa}$, $G=26\sim 30\text{GPa}$ 。

需要指出的是, 尽管工程实际中结构物由于构件的刚度较大, 其弹性变形很小, 材料的应变数值也非常小, 但由于材料的两种弹性模量的数值很大, 所以其构件内部的应力水平可以是很高的。

第七节 杆件变形的的基本形式

工程上组成结构物的构件种类很多, 诸如杆、板、壳及块体等, 在荷载作用下其变形形态也有所不同。本节只介绍材料力学所研究的最为典型的构件, 即等直杆的变形问题。由于作用的荷载形式不同, 杆件产生的形变响应也各不相同。但分析归纳后可以确定, 其变形可以是下面的几种基本变形之一, 也可以是几种基本变形的组合。

1. 轴向拉压变形

在作用线沿杆轴线的外力作用下, 杆件产生沿其轴线方向的伸长或缩短。杆件的这种变形可称其为轴向拉压变形。如图 1-5 (a)、(b) 所示。

2. 剪切变形

在一对大小相等、方向相反、作用线相距较近的横向外力作用下, 杆件的横截面沿外力的方向产生相对错动。杆件的这种变形可称其为剪切变形。如图 1-5 (c) 所示。

3. 扭转变形

在一对旋向相反的力偶作用下 (力偶矢量方向沿杆的轴线方向), 杆件的任意两横截面产生相对转动的变形。杆件的这种变形可称其为扭转变形。如图 1-5 (d) 所示。

4. 弯曲变形

在一对方向相反的力偶作用下（力偶矢量方向垂直杆的轴线），杆件将在纵向平面内发生弯曲变形，杆件的轴线也由直线变为曲线。杆件的这种变形可称其为弯曲变形。如图 1-5（e）所示。

工程实际中的杆件由于其荷载作用复杂，其变形也相应复杂。但不论怎样，其变形均是由以上四种基本变形组成的。

后续各章将就上面叙述的杆件基本变形加以分别讨论，最后还要对其组合变形进行分析研究。

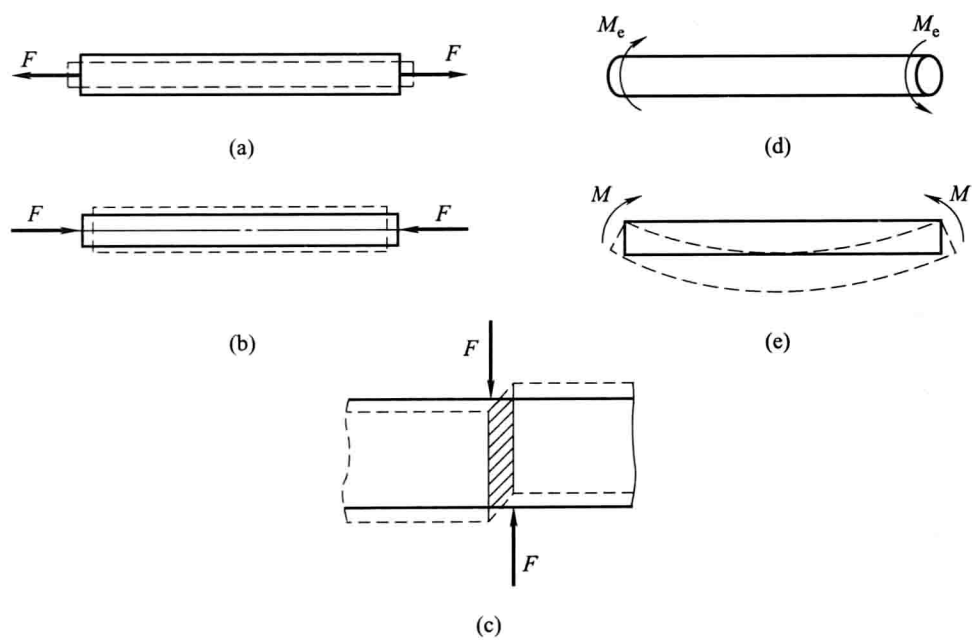


图 1-5 杆件变形的形式

第二章 轴向拉伸与压缩

第一节 轴向拉伸与压缩概述

轴向拉伸与压缩变形是杆件的基本变形之一。其主要特点是：构件为直杆；荷载沿其轴线作用；杆件的主要变形为轴向伸长或缩短，但其杆件轴线仍为直线。

工程实际中，有许多轴心受力构件。如图 2-1 所示的简单桁架，在荷载作用下， AB 杆轴心受拉，产生轴向拉伸变形； BC 杆轴心受压，产生轴向压缩变形。图 2-2 所示为构件的螺栓连接，当螺母拧紧时，螺栓杆将受到轴心拉力，产生轴向拉伸变形。诸如此类，虽然这些杆件的截面形式、受力方式及连接方式各有不同，但是就其受力与变形的规律，均可归类为轴向拉伸与压缩构件。

以杆件轴心受拉与受压之分，可将其分为轴心拉杆与轴心压杆。两者的受力和变形如图 2-3 所示。

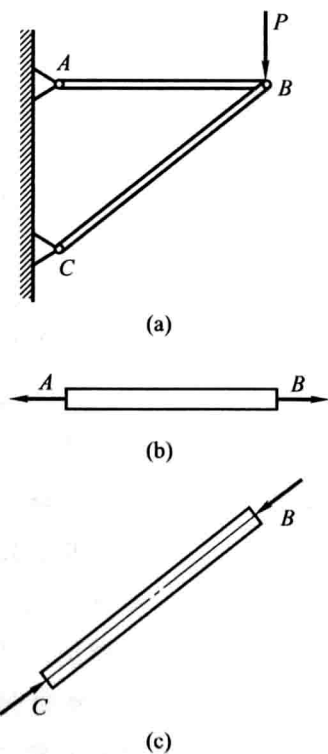


图 2-1 简单桁架受力分析

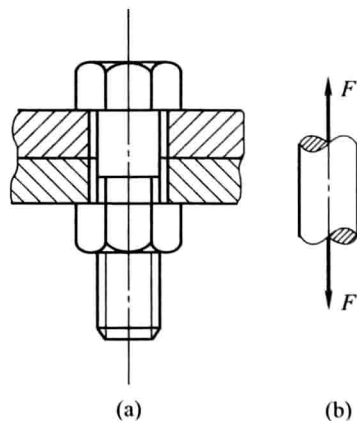


图 2-2 螺栓连接受力分析

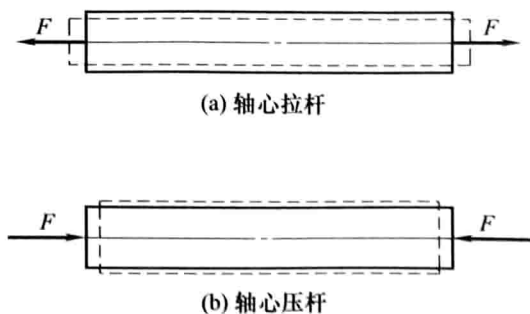


图 2-3 轴心拉杆与轴心压杆的受力与变形

本章主要研究构件在轴向拉伸、压缩时的强度与刚度问题,构件连接的实用计算方法以及工程材料在拉伸与压缩时所涉及的力学性能等问题。

第二节 截面法、轴力及轴力图

一、截面法与杆件轴力

由于内力是构件内部相邻部分之间为阻碍发生形变而产生的相互作用力,为了解等直杆内力,可应用第一章中所述的截面法,具体应用如下。

设一等直杆在两端轴心拉力 F 的作用下处于平衡状态,欲求杆件横截面 $m-m$ 上的内力 [图 2-4 (a)]。为此,假想一平面沿横截面 $m-m$ 将杆件截分为 I、II 两部分,任取一部分 (如部分 I),弃去另一部分 (如部分 II),并将弃去部分对留下部分的作用以截面上的内力来代替。

对于留下部分 I 而言,截面 $m-m$ 上的内力 F_N 就成为外力。由于整个杆件处于平衡状态,杆件的任一部分也为平衡状态。于是,杆件横截面 $m-m$ 上的内力必定是与其左端外力 F 共线而方向相反的轴向力 F_N [图 2-4 (b)]。内力 F_N 的数值可由平衡条件求得。

由平衡方程

$$\sum F_N = 0, F_N - F = 0$$

得

$$F_N = F$$

式中, F_N 为杆件横截面 $m-m$ 上的内力,其作用线与杆的轴线重合,即垂直于横截面并通过其形心。这种内力称为轴力,通常用 F_N 表示。

若取部分 II 为留下部分,由截面法也可得出相同的结果,见图 2-4 (c)。轴心压杆亦然,如图 2-5 所示。

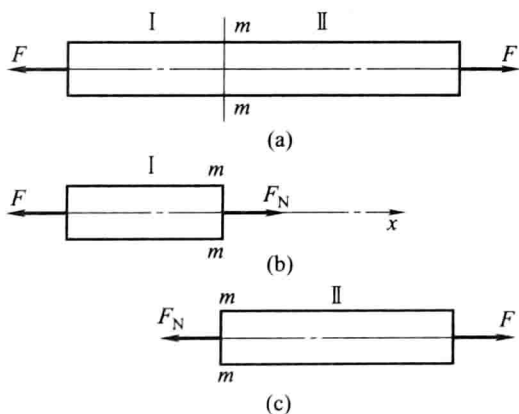


图 2-4 拉伸时的轴力

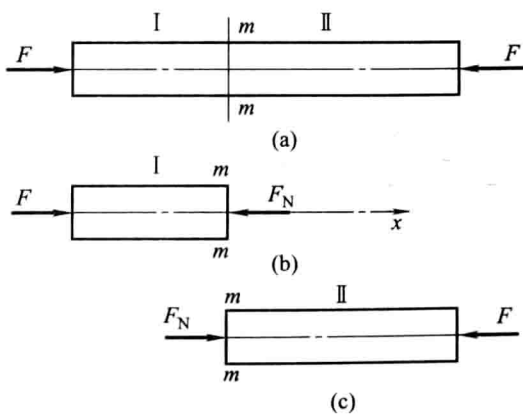


图 2-5 压缩时的轴力

必须指出,静力学中的力 (或力偶) 的可移性原理,在用截面法求解内力的过程中是有限制的。例如图 2-6 (a) 所示拉杆在自由端 A 承受集中力 F , 由截面法可得,杆任一横截面 $m-m$ 或 $n-n$ 上的轴力 F_N 均等于 F [图 2-6 (b)、(c)]。若将集中力 F 由自由端 A 沿其作用线移至杆的 B 点处 [图 2-6 (d)], 则其 AB 段内任一横截面 $m-m$ 上的轴力都将等于零 [图 2-6 (e)], 而 BC 段内任一横截面 $n-n$ 上的轴力仍等于 F [图 2-6 (f)], 保持不变。这与杆件真实受力状况并不相符。同理,将杆上的荷载用一个静力等效的相当力系来代替,在求解内力的过程中也应有所限制。