

普通高等教育“十三五”规划教材

Mechanics of Materials

材料力学

辽宁石油化工大学 张巨伟 王伟 主编

王文广 主审



化学工业出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

Mechanics of Materials

材料力学

辽宁石油化工大学 张巨伟 王伟 主编
王文广 主审



化学工业出版社
· 北京 ·

《材料力学》按照教育部高等学校工科力学课程教学指导委员会最新制订的“材料力学课程基本要求”编写。内容既包含了材料力学的基本理论及应用，又包含了材料力学较为深入的内容，为有潜力的学生留有深入学习的余地，可供 48~72 学时的材料力学课程选用。教材共十二章，主要内容包括绪论、拉伸与压缩、圆轴扭转、弯曲内力、弯曲应力、梁的弯曲变形与刚度、应力和应变分析、组合变形、压杆稳定、动载荷、能量方法及超静定结构以及附录部分：平面图形的几何性质、常用截面的几何性质及型钢表。此外，本教材精选了习题、综合题，并且附有参考答案。

《材料力学》可供高等院校理工类各专业本科生、大专学生作为“材料力学”课程的教材使用，还可供对材料力学感兴趣的各界人士参考阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

材料力学/张巨伟, 王伟主编; 王文广主审. —北京: 化学工业出版社, 2020.1
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-122-35821-9

I. ①材… II. ①张… ②王… ③王… 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 (2019) 第 266147 号

责任编辑: 满悦芝
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 陈 喆
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: 三河市双峰印刷装订有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张 18¼ 字数 454 千字 2020 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 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: 58.00 元 版权所有 违者必究

前言

材料力学是高等工科院校开设的专业基础课程，具有较强的理论性，内容经典，是一门应用领域非常广泛的学科。部分高校向应用型转变，是党中央、国务院重大决策部署，是教育领域人才供给侧结构性改革的重要内容。随着教学内容和课程体系改革的深入，为使学生充分利用有限的学时理解和掌握材料力学的基本理论和基本方法，编者根据教育部高等学校工科材料力学课程（中、少学时）教学的基本要求、教育部高等学校工科力学课程教学指导委员会理论课程教学改革的要求，编写了本书。教材在内容上力求既能满足广大师生的要求，又能让学生通过学习本书打下扎实的基础，并且为学生拓展能力服务。编写一本适用于中、少学时的，具有石化类院校特色的，面向“应用型”转型高校普遍适用的《材料力学》教材正是本教材编写的初衷。

在编写过程中，编者根据多年来在材料力学教学中积累的经验，注意汲取同类教材的精华，尝试用现代和实用的观点阐述材料力学的核心内容和方法，既满足了本课程的基本要求，又注意与先修课程的衔接及向专业课的过渡；在优化教学内容的同时，加强学生能力的培养。全书特点概括如下：

注重以工程实际为背景，加深对基本概念의阐述和解决工程实际问题能力的培养；在重视基本理论的前提下，加强对解题过程的分析，激发学生的学习兴趣 and 主观能动性。

本书定位明确，可作为高等学校石油、化工类相关专业本科及专科材料力学课程的教材，对于学生进一步深入学习也留有空间。

本书包含的内容共十二章。第一章由李晋、王丽编写，第二章由李晋编写，第三章、第四章由李金权编写，第五章、第六章和综合练习部分由张巨伟编写，第七章由王伟、王丽编写，第八章由王伟编写，第九章、第十章由王丽编写，第十一章、第十二章由杨雪峰编写，附录部分由张园园执笔。张巨伟、王伟作为主编负责全书统稿、修改和定稿工作。王文广担任主审。

本教材在编写过程中参考了相关的著作、教材和资料，在此一并向其作者致以谢意。衷心希望各位专家、学者以及广大读者对本书的不足之处给予指教，不胜感激。

辽宁石油化工大学力学教研室

2019年12月

目 录

第一章 绪论

第一节 材料力学的任务	1
第二节 变形固体的基本假设	1
第三节 外力与内力	2
第四节 应力与应变	3
第五节 杆件的基本变形	5
小结	7
习题	7

第二章 轴向拉伸与压缩

第一节 概述	9
第二节 轴力与轴力图	10
第三节 拉（压）杆的应力	12
第四节 材料拉（压）时的力学性能	15
第五节 拉（压）杆的强度计算	19
第六节 拉（压）杆的变形	22
第七节 简单拉压超静定问题	27
第八节 连接件的强度计算	31
小结	34
习题	35

第三章 扭转

第一节 扭转的概念和实例	40
第二节 外力偶矩的计算与扭矩和扭矩图	41
第三节 纯剪切	43
第四节 圆轴扭转时的应力	45
第五节 圆轴扭转时的变形	51

小结	54
习题	55

第四章 弯曲内力

第一节 弯曲的概念和实例	59
第二节 受弯杆件的简化	60
第三节 剪力和弯矩	61
第四节 剪力方程和弯矩方程——剪力图和弯矩图	64
第五节 剪力、弯矩、载荷集度间关系	68
第六节 平面刚架和平面曲杆的弯曲内力	72
小结	73
习题	75

第五章 弯曲应力

第一节 概述	81
第二节 纯弯曲时的正应力	82
第三节 横力弯曲梁的正应力	85
第四节 弯曲切应力	89
第五节 提高梁的抗弯曲能力的主要措施	96
小结	101
习题	101

第六章 梁的弯曲变形与刚度

第一节 梁弯曲变形的基本概念	106
第二节 梁的挠曲线近似微分方程	109
第三节 求解梁弯曲变形的积分法	111
第四节 求解梁弯曲变形的叠加法	116
第五节 用变形比较法求解简单超静定梁	122
第六节 梁的刚度条件及提高梁的抗弯曲刚度的措施	125
小结	127
习题	128

第七章 应力和应变分析、强度理论

第一节 平面应力状态分析——解析法	134
第二节 平面应力状态分析——图解法	138
第三节 三向应力状态及最大切应力	140
第四节 位移与应变分量	141
第五节 平面应变状态分析	143

第六节	广义胡克定律	145
第七节	强度理论概述	148
第八节	四种常用强度理论	148
第九节	莫尔强度理论	150
第十节	构件含裂纹时的断裂准则	152
小结		154
习题		157

第八章 组合变形

第一节	组合变形和叠加原理	161
第二节	弯曲与拉伸或压缩的组合	163
第三节	偏心压缩与截面核心	165
第四节	弯曲与扭转的组合	168
第五节	组合变形的普遍情况	171
小结		172
习题		173

第九章 压杆稳定

第一节	压杆稳定的基本概念	176
第二节	两端铰支细长压杆临界力的欧拉公式	177
第三节	不同支承条件下细长压杆临界力的欧拉公式	178
第四节	欧拉公式的应用范围	179
第五节	压杆的稳定性校核	183
第六节	提高压杆稳定性的措施	185
小结		187
习题		187

第十章 动荷载

第一节	概述	190
第二节	杆件作等加速直线运动时的应力计算	191
第三节	杆件作等角速度转动时的应力计算	193
第四节	杆件受冲击时的应力和变形	196
小结		201
习题		201

第十一章 能量法

第一节	概述	204
第二节	应变能的计算	204

第三节	应变能的普遍表达式·····	206
第四节	虚功原理·····	207
第五节	单位载荷法 莫尔积分·····	208
第六节	图乘法·····	211
第七节	弹性体系的几个互等定理·····	214
第八节	卡氏定理·····	218
小结	·····	223
习题	·····	223

第十二章 超静定结构

第一节	超静定结构概述·····	226
第二节	力法原理与力法方程·····	227
第三节	力法计算和对称性的利用·····	232
小结	·····	238
习题	·····	238

附 录

附录一	截面图形的几何性质·····	241
附录二	型钢规格表·····	251

综合练习

参考答案

参考文献

第一章 绪 论

第一节 材料力学的任务

当工程结构或机械工作时，构件将受到载荷的作用。在外力作用下，构件会发生变形甚至破坏。因此，为保证工程结构或机械的正常工作，构件应有足够的承受规定载荷的能力，应当满足以下三个方面的基本要求。

(1) 强度要求，指构件应有足够的抵抗破坏的能力，即杆件在外力作用下不会发生破坏。

(2) 刚度要求，指构件应有足够的抵抗变形的能力，即构件在外力作用下，构件即使有足够的强度，但如果变形过大，仍不能正常工作。

(3) 稳定性要求，指构件应有足够的保持原有平衡形态的能力，即在某种外力作用下，其平衡形式不发生突然改变。

材料力学的基本任务就是在满足强度、刚度和稳定性要求的前提下，为设计既经济又安全的构件提供必要的理论基础和计算方法。

一般情况下，构件都应满足以上三个要求，但对具体构件又往往有所侧重。例如，储气罐主要是要保证强度，车床主轴主要是要具备足够的刚度，而受压的细长杆则应保持稳定性。此外，对某些特殊构件还可能相反的要求。例如，为防止超载，当载荷超出某一极限时，安全销应立即破坏；为发挥缓冲作用，车辆的缓冲弹簧应有较大的变形等。

第二节 变形固体的基本假设

工程中的构件一般由固体材料制成，其具体组成与微观结构是非常复杂的。这些固体材料受力后会产生变形甚至破坏，故称为变形固体。为便于对构件强度、刚度和稳定性的研究，根据变形固体的主要性质对其作下列假设。

1. 连续性假设

该假设认为组成固体的物质毫无空隙地充满了固体的几何空间。因此，就可以将构件中

的一些力学参量表示为固体上点的坐标连续函数，并可采用数学分析中的微积分方法。而实际上，组成固体的粒子之间有空隙、并不连续，但这种空隙的大小与构件的尺寸相比极其微小，可以不计。于是，就认为固体在其整个体积内是连续的。

2. 均匀性假设

该假设认为材料的力学性能在固体内处处相同。也就是说，从构件内部任何部位所切取的微小单元体，都具有与构件完全相同的性质。而实际上，材料组成部分的力学性能往往存在不同程度的差异。例如，金属是由无数微小晶粒组成的，各晶粒的力学性能并不完全相同，但因构件内部任一部分中都包含为数极多的晶粒，而且各晶粒无规则地排列。因此，按统计学观点，固体的力学性能可以看成是各晶粒的力学性能的统计平均值，所以可以认为各部分的力学性能是均匀的。

3. 各向同性假设

该假设认为材料沿任何方向具有相同的力学性能，即认为是各向同性的。就金属的单一晶粒而言，沿不同的方向，力学性能并不一样。但金属构件包含数量极多的晶粒，且各晶粒又无规则地排列，这样，沿各个方向的力学性能就接近相同了。具有这种属性的材料称为各向同性材料，如玻璃、铸铁为典型的各向同性材料。若材料沿不同方向力学性能不同，则称为各向异性材料，如竹子、木材、多晶陶瓷等。

材料力学就是研究连续、均匀、各向同性的变形固体在受到外力作用时的强度、刚度和稳定性问题，且是在弹性范围内的小变形研究。

第三节 外力与内力

一、外力及其分类

外力是指来自构件外部的力，即假想地把构件从周围物体中取出，用力来代替周围物体对构件的作用。按外力在构件表面分布情况，可分为表面力和体积力。表面力是指作用于构件表面的力，又可分为分布力和集中力。分布力是连续作用于构件表面某一范围的力，若分布力的作用范围远小于物体的表面尺寸，或沿杆件轴线的分布范围远小于杆件长度，就可看作是作用于一点的力，称为集中力。

按载荷随时间变化的情况，又可分成静载荷和动载荷。随时间变化缓慢或者无变化的载荷，称为静载荷。若载荷随时间显著地变化或使构件产生明显的加速度，则称为动载荷，例如，起重机加速提升重物时吊索所受的力。若动载荷是随时间作周期性变化的，则称为交变载荷；例如变速箱的齿轮传动中，齿上所受的力都是随时间作周期性变化的。若动载荷是在瞬时内发生突然变化所引起的，则称为冲击载荷，例如，锻造时汽锤的锤杆、急刹车时飞轮的轮轴等受到的作用。

材料在静载荷和动载荷作用下的力学性能不同，分析方法也有差异。静载荷问题所建立的理论和分析方法是解决动载荷问题的基础。

二、内力与截面法

内力是指杆件受力变形后，内部相连各部分之间产生的相互作用的力。材料力学中的内力，是由于有外载荷的作用产生的；内部相互作用力的变化量，即是物体内部各部分之间因

外力而引起的附加相互作用力。内力随外力的增大而加大，达到某一限度时就会使构件变形甚至破坏。内力的大小与构件的强度、刚度和稳定性密切相关。因此，内力分析是材料力学的基础分析之一。

为了显示构件中的内力并确定其大小，通常用截面法。如图 1.1 所示，杆件上作用的外力有 F_1 、 F_2 、 F_3 、 $\dots$ 、 F_n ，假设构件在这些力作用下处于平衡状态。为了显示其在外力作用下 $m-m$ 截面上的内力，现用该截面假想地把构件分成左右两部分 [图 1.1 (a)]。任取其中一部分，例如选取左半部分作为研究对象，则其上作用的外力有 F_1 、 F_2 。欲使左半部分保持平衡，应将右半部分作用于左半部分 $m-m$ 截面上的力用内力来代替，如图 1.1 (b) 所示。由连续性假设可知，在 $m-m$ 截面上各处都有内力作用，所以内力是分布于截面上的一个分布力系。若取右半部分，同理。

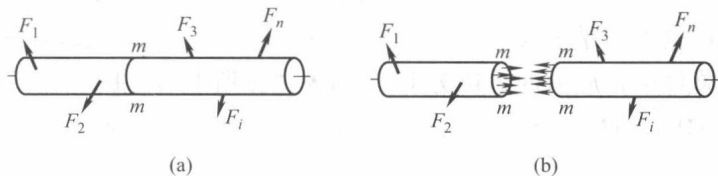


图 1.1

根据力系简化理论，将这个分布内力系向截面形心 C 简化，可得主矢 F_R 与主矩 M [图 1.2 (a)]；将主矢与主矩沿三个坐标轴分解 [图 1.2 (b)]，得内力分量 F_N 、 F_{Sy} 、 F_{Sz} 以及内力偶矩分量 M_x 、 M_y 和 M_z 。

综上所述，可将截面法归纳为以下几个步骤。

(1) 欲求构件某一截面上的内力时，可沿该截面假想地把构件切开成两部分，任取一部分（一般取受力情况较简单的部分）作为研究对象，舍去另一部分。

(2) 在选取部分的截面上加上内力，以代替舍去部分对选取部分的作用。

(3) 建立选取部分的平衡方程，求解截面上未知的内力。

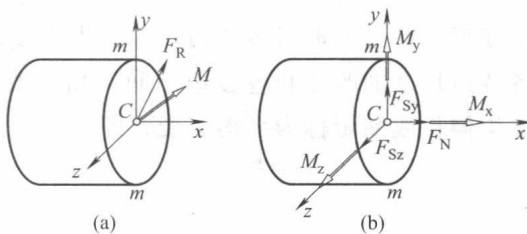


图 1.2

第四节 应力与应变

一、应力

在图 1.2 中我们可知，内力 F_R 和 M 是 $m-m$ 截面上分布内力系向 C 点简化后的结果。用它们可以说明内力与截面上部分外力的平衡关系，但不能说明分布内力系在截面内某一点处的强弱程度。现引入内力分布集度，即应力的概念。

如图 1.3 (a) 所示，在 $m-m$ 截面上有任一点 k ，若围绕 k 点取微小面积 ΔA ，作用在 ΔA 上的分布内力的合力为 ΔF ，则 ΔF 与 ΔA 的比值称为 ΔA 内的平均应力，用 p_m 表示。

$$p_m = \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1.1)$$

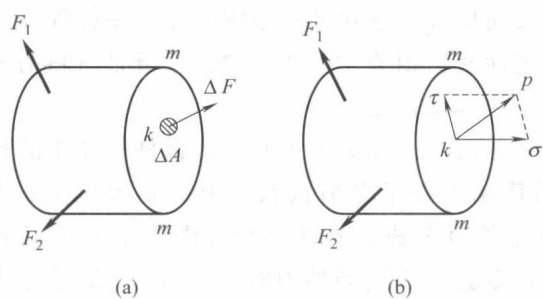


图 1.3

一般情况下，随着 ΔA 的逐渐缩小， p_m 的大小和方向都将逐渐变化。为了更精确地描述内力的分布情况，应使 ΔA 趋于零，即当 ΔA 趋于零时，平均应力将趋于某极限值。此时，称为截面 $m-m$ 上 k 点处的应力，用 p 表示。

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \tag{1.2}$$

p 即为分布内力系在 k 点的集度，反映内力系在一点的强弱程度。 p 是一个矢量，为分析方便，通常把应力 p 分解成沿截面法向与切向的两个分量，如图 1.3 (b) 所示。沿截面法向的应力称为正应力，用 σ 表示；沿截面切向的应力称为切应力，用 τ 表示。

我国法定计量单位中，应力的单位为 Pa，称为“帕斯卡”， $1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$ 。一般情况下，应力的常用单位为 MPa， $1\text{MPa}=10^6\text{ Pa}$ 。

二、应变

由于有外力作用，构件发生变形并产生内力。为了确定内力在截面上的分布规律，研究构件变形的特征，引入应变的概念。

为描述一点处应变的概念，从受力构件中任一点处取一个正六面体的微元体，如图 1.4 (a) 所示。其棱边沿三个坐标轴方向，长度分别为 Δx 、 Δy 、 Δz 。构件受力后，微元体将发生变形。假设变形后各棱边均保持为直线，各表面也保持为平面，则微元体的变形只表现为各棱边长度的改变和各棱边之间夹角的改变。如图 1.4 (b) 所示，微元体棱边单位长度的平均伸长或缩短称为平均应变，即

$$\epsilon_m = \frac{\Delta u}{\Delta x} \tag{1.3}$$

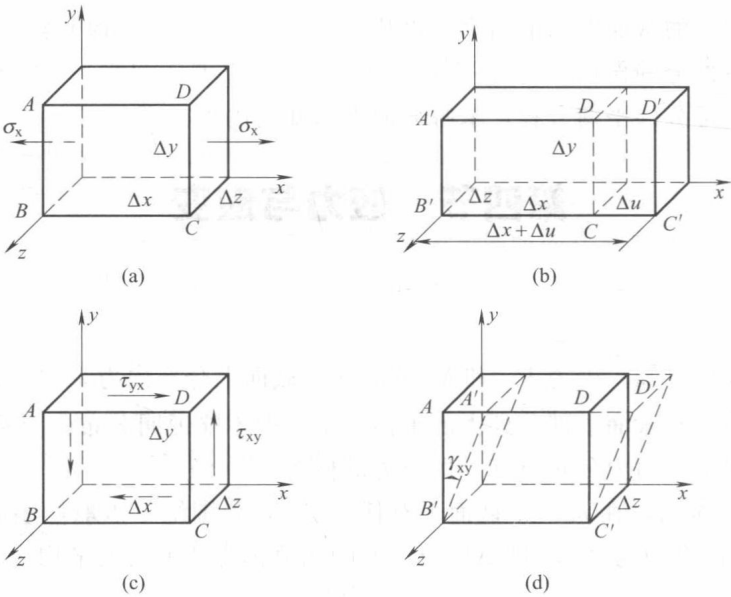


图 1.4

一般情况下,随着 Δx 的逐渐缩小, ϵ_m 的大小和方向都将逐渐变化。为了精确描述一点,如点 B 沿棱边 BC 的变化情况,对微元体变形后的位移 Δu 与变形前的位移 Δx 的比值取极限,即

$$\epsilon_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta x} \quad (1.4)$$

ϵ_x 称为 B 点沿 x 方向的正应变 (或线应变)。用同样的方法还可讨论 B 点沿 y 和 z 方向的应变。

如图 1.4 (c) 所示,微元体的各棱边除可能有长度变化外,由于有切应力存在,还可能发生相互垂直的两棱边之间的直角的改变。由图 1.4 (d) 可知,微元体在 xy 平面内的角度的变化量 γ_{xy} 为:对微元体变形前的角度与变形后的角度 $\angle A'B'C'$ 之差取极限,即

$$\gamma_{xy} = \lim_{\substack{\Delta x \rightarrow 0 \\ \Delta y \rightarrow 0}} \left(\frac{\pi}{2} - \angle A'B'C' \right) \quad (1.5)$$

γ_{xy} 称为 B 点在 xy 平面内的切应变 (或角应变),用弧度 (rad) 单位来度量。

正应变 ϵ 和切应变 γ 是度量一点处变形程度的两个基本量,它们均为无量纲量。

第五节 杆件的基本变形

工程结构或机械中,构件的形状多种多样,其中最常见、最基本的承载构件是杆件。一个方向的尺寸远大于其他两个方向尺寸的构件称为杆。杆的形状与尺寸由其轴线 (截面形心的连线) 与垂直于轴线的几何图形 (横截面) 确定,如图 1.5 所示。



图 1.5

杆件若按轴线曲直分,可分为直杆和曲杆。轴线是直线的杆,称为直杆 [图 1.6 (a)、(b)]; 轴线是曲线的杆,称为曲杆 [图 1.6 (c)]。若按横截面面积分,可分为等截面杆和变截面杆。任意横截面相同的直杆,称为等截面直杆 (或等直杆),如图 1.6 (a) 所示,它是材料力学研究的主要对象; 各横截面不同的杆,称为变截面杆 [图 1.6 (b)]。等截面直杆的分析计算原理,一般也可近似地用于曲率较小的曲杆与截面无显著变化的变截面杆。

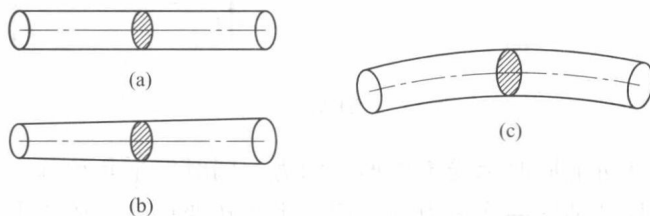


图 1.6

除此之外,材料力学研究的构件还有一些板、壳和块体。所谓板就是一个方向的尺寸远

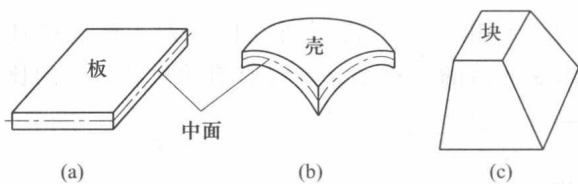


图 1.7

小于其他两个方向尺寸的构件。平分板件厚度的几何面称中面，中面为平面的板件称为板 [图 1.7 (a)]；中面为曲面的板件称为壳 [图 1.7 (b)]。而三个相互垂直方向尺寸相近的构件称为块 [图 1.7 (c)]。

构件的几何形状是多种多样的，作用在构件上的外力也是多种多样的，因此产生的变形也各有不同。杆件变形的基本形式有以下四种。

1. 轴向拉伸或压缩

杆件在大小相等、方向相反、作用线与轴线重合的一对力作用下，变形表现为杆件的伸长与缩短，如图 1.8 (a) 和 (b) 所示。例如起吊机的钢索、桁架杆件等结构的变形，都属于拉伸或压缩变形。

2. 剪切

杆件受大小相等、方向相反的一对横向外力作用，其横截面将沿外力方向发生错动，如图 1.8 (c) 所示。例如机械中常用的连接件，如螺栓、键、销钉等变形，都属于剪切变形。

3. 扭转

在垂直于杆件轴线的两个平面内，分别作用大小相等、方向相反的两个力偶，则杆的任意两个横截面将绕轴线相对转动，如图 1.8 (d) 所示。例如汽车的传动轴、电机的主轴等，都属于扭转变形。

4. 弯曲

在杆件轴线的纵向平面内，作用两个方向相反的力偶，或垂直轴线的横向力，则杆件在纵向平面内将发生弯曲变形。变形表现为轴线由直线变成曲线，如图 1.8 (e) 和 (f) 所示。例如火车的轮轴、桥式起重机的大梁等，都属于弯曲变形。

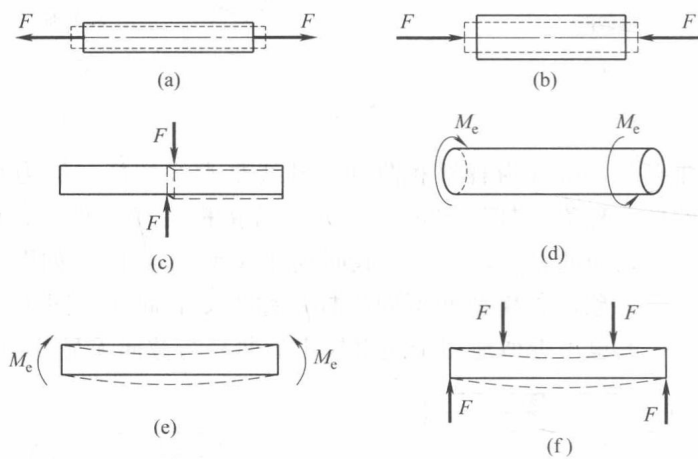


图 1.8

工程实际中，杆件可能同时承受不同形式的力，同时发生几种基本变形。例如一些传动轴，除了受到垂直于杆件轴线的两个力偶作用发生扭转变形外，还会因齿轮啮合力垂直轴线又发生弯曲变形，这样的变形称为组合变形。本书将首先讨论基本变形的强度等问题，然后再讨论组合变形。

小 结

本章介绍了材料力学的主要任务,内力、应力以及截面法的概念等内容。其主要内容为:

- (1) 构件应当满足的三个基本要求,即强度要求、刚度要求、稳定性要求。
- (2) 变形固体的基本假设,即连续性假设、均匀性假设、各向同性假设。
- (3) 用截面法求内力的几个步骤:
 - ① 假想把构件切开成两部分,任取一部分作为研究对象;
 - ② 在截面上加上内力以及所有外力;
 - ③ 建立平衡方程,求解截面上未知的内力。
- (4) 应力与应变。

$$\text{平均应力: } p_m = \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

$$\text{应力: } p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

通常把应力 p 分解成沿截面法向与切向的两个分量。沿截面法向的应力称为正应力,用 σ 表示;沿截面切向的应力称为切应力,用 τ 表示。

$$\text{平均应变: } \epsilon_m = \frac{\Delta u}{\Delta x}$$

$$\text{正应变: } \epsilon = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta x}$$

$$\text{切应变: } \gamma = \lim_{\substack{\Delta x \rightarrow 0 \\ \Delta y \rightarrow 0}} \left(\frac{\pi}{2} - \angle A'B'C' \right)$$

- (5) 杆件的基本变形形式有拉(压)、剪切、扭转、弯曲,此外还存在组合变形。

习 题

1.1 如图 1.9 所示的两个微元体,虚线表示其变形。试计算 A 处的切应变 γ 分别为何值?

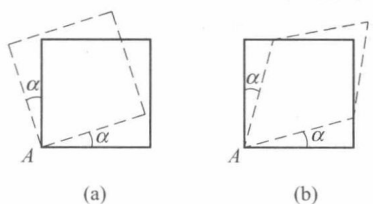


图 1.9

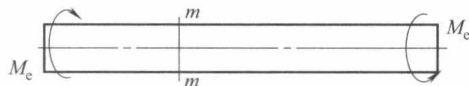


图 1.10

1.2 如图 1.10 所示的圆截面杆,两端承受一对大小相等、方向相反的力偶 M_e 作用。试分析横截面 $m-m$ 上存在的内力分量。

1.3 如图 1.11 所示的简易吊车横梁, F 力可以左右移动。试求截面 1—1 和 2—2 上的内力分量。

1.4 如图 1.12 所示,在杆件的斜截面 $m-m$ 上,任一点 A 处的总应力 $p = 100 \text{ MPa}$,其方位角 $\theta = 60^\circ$,试求该点处的正应力 σ 与切应力 τ 。

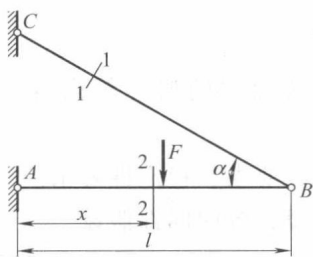


图 1.11

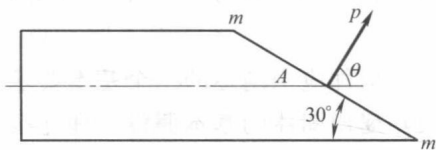


图 1.12

1.5 如图 1.13 所示的拉伸试样，标距 AB 长 $l=50\text{mm}$ 。在试验机上拉伸后，测得两点间距离的增量为 $\Delta l=2.5\times 10^{-2}\text{mm}$ 。试求 A 与 B 两点间的平均应变 ϵ_m 。

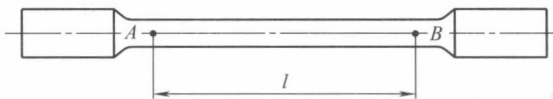


图 1.13

第二章 轴向拉伸与压缩

第一节 概 述

工程实际中,许多杆件经常受到拉伸或压缩的作用。例如在起重机的吊架中,BC 杆受

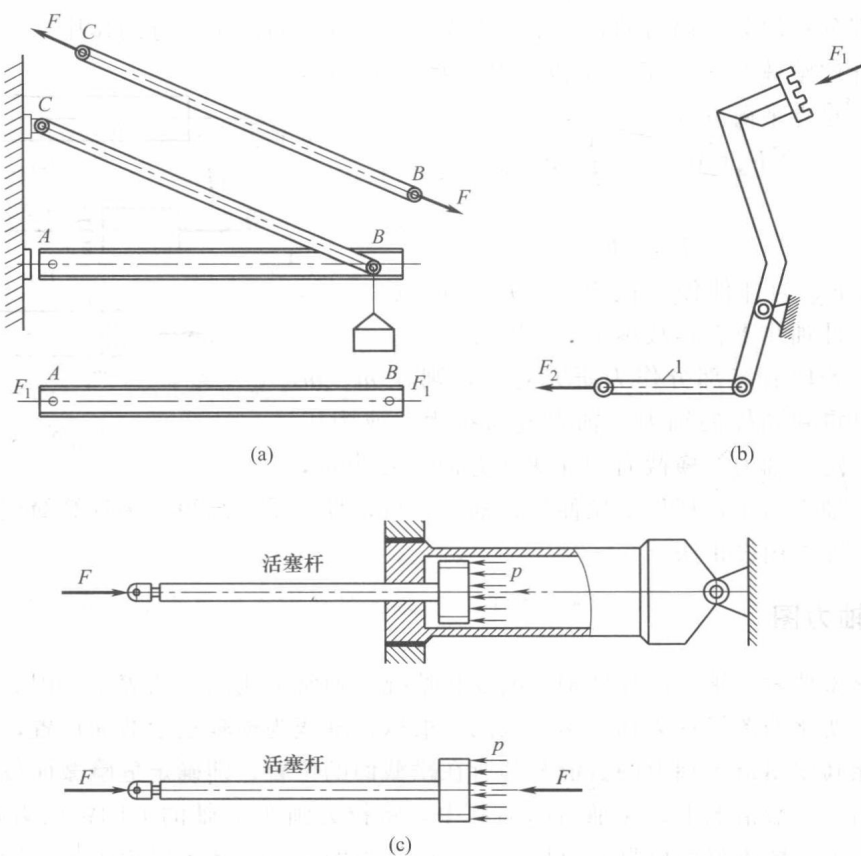


图 2.1