



新世纪

新世纪应用型高等教育
机械类课程规划教材

材料力学

新世纪应用型高等教育教材编审委员会 组编

主 编 任德斌

主 审 马红艳

大连理工大学出版社



新世纪应用型高等教育
机械类课程规划教材

新世纪

材料力学

新世纪应用型高等教育教材编审委员会 组编

主 编 任德斌
副主编 李乐新 黄 强
主 审 马红艳

大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

材料力学 / 任德斌主编. —大连: 大连理工大学出版社, 2009. 11

新世纪应用型高等教育机械类课程规划教材
ISBN 978-7-5611-5206-5

I. ①材… II. ①任… 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(2009)第 211125 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84703636 传真:0411-84701466

E-mail: dutp@dutp.cn URL: <http://www.dutp.cn>

大连理工印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:185mm×260mm 印张:12.75 字数:310 千字

印数:1~3000

2009 年 11 月第 1 版

2009 年 11 月第 1 次印刷

责任编辑:吴媛媛

责任校对:王 哲

封面设计:张 莹

ISBN 978-7-5611-5206-5

定 价:24.00 元

前 言

《材料力学》是新世纪应用型高等教育教材编审委员会组编的机械类课程规划教材之一。

本教材是根据应用型本科机械类专业的教学改革需要而编写的。全书以材料力学教学大纲的基本要求和近年来应用型本科院校的机械类专业教学计划为依据,结合作者多年的教学实践和改革的经验编写而成。

本教材在编写过程中力求突出以下特色:

1. 在内容安排上体现机械类专业的常用材料和常用结构,以讲清概念、强化应用为重点。

2. 循序渐进,由浅入深,突出培养学生分析问题和解决问题的能力,将理论知识融入到实践训练之中,将知识点和能力要求贯穿于教材之中,从实际出发,使学生在应用中学习。

3. 注意与后续课程的衔接,有意识地培养学生学习和深入研究问题的积极性。

本教材包括 13 章和一个附录:分别为绪论;轴向拉伸与压缩;剪切与挤压;扭转;平面图形的几何性质;梁的内力;梁的弯曲应力与强度计算;弯曲变形;应力状态;强度理论;组合变形;压杆稳定;动荷载。

本教材既可作为应用型本科机械类专业的教材和参考书,也可供相关的工程技术人员使用。

本教材由沈阳建筑大学任德斌任主编,沈阳理工大学李乐新和洛阳理工大学黄强任副主编。具体编写分工如下:任德斌编写第 1~4 章、第 6~7 章和附录,李乐新编写第 5 章和第 8 章,黄强编写第 9~13 章。全书由任德斌负责统稿和定稿。大连理工大学马红艳老师审阅了全书,并提出了许多宝



贵的意见和建议,在此深表感谢!

最后,恳请使用本教材的广大读者,对书中的错误和不足予以关注,并将意见和建议及时反馈给我们,以便修订时完善。

所有意见和建议请发往:gzjckfb@163.com

欢迎访问我们的网站:<http://www.dutpgz.cn>

联系电话:0411—84707492 84706104

编 者

2009 年 11 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 材料力学的基本任务与地位	1
1.2 变形固体及其分类	2
1.3 变形固体的几个基本假设	2
1.4 内力 截面法 应力	3
1.5 位移与应变	5
1.6 杆件变形的基本形式	6
小 结	7
思考题	7
习 题	8
第 2 章 轴向拉伸与压缩	9
2.1 杆件轴向拉伸与压缩的概念和工程实例	9
2.2 杆件的内力计算与轴力图	10
2.3 杆件轴向拉伸与压缩时横截面上的应力	12
2.4 杆件轴向拉伸与压缩时的变形	15
2.5 材料在拉伸与压缩时的力学性能	18
2.6 失效、安全因数和强度计算	22
2.7 拉伸和压缩时的超静定问题	26
2.8 温度应力与装配应力	28
小 结	32
思考题	32
习 题	33
第 3 章 剪切与挤压	35
3.1 剪切与挤压的概念以及工程实例	35
3.2 剪切的实用计算	36
3.3 挤压的实用计算	37
小 结	40
思考题	41
习 题	41

第4章 扭 转	43
4.1 扭转的概念与工程实例	43
4.2 圆轴扭转时的内力——扭矩的计算	44
4.3 薄壁圆筒扭转时横截面上的切应力	47
4.4 切应力互等定理	48
4.5 等直圆轴扭转时横截面上的切应力和强度条件	49
4.6 等直圆轴扭转时的变形——扭转角的计算和刚度条件	53
小 结	55
思考题	56
习 题	56
第5章 平面图形的几何性质	58
5.1 静矩和形心	58
5.2 惯性矩和惯性半径	60
5.3 惯性积	62
5.4 平行移轴公式	63
5.5 转轴公式 主惯性轴	66
习 题	69
第6章 梁的内力	71
6.1 梁弯曲的概念与计算简图	71
6.2 梁的内力——剪力与弯矩	74
6.3 梁的剪力和弯矩方程 剪力图和弯矩图	77
6.4 分布荷载集度、剪力、弯矩之间的微分关系	80
6.5 利用叠加法作梁的弯矩图	87
小 结	89
思考题	89
习 题	89
第7章 梁的弯曲应力与强度计算	93
7.1 梁横截面上的正应力	93
7.2 弯曲切应力	98
7.3 梁的强度条件	105
7.4 梁的合理强度设计	110
小 结	114
思考题	114

习 题	115
第 8 章 弯曲变形	116
8.1 工程中梁的变形、转角和挠度	116
8.2 梁挠曲线的近似微分方程	117
8.3 用积分法求梁的弯曲变形	118
8.4 用叠加法求梁的弯曲变形	124
8.5 梁的刚度条件与校核	125
8.6 简单超静定梁的计算	128
8.7 提高抗弯刚度的措施	129
小 结	131
思考题	132
习 题	132
第 9 章 应力状态	134
9.1 应力状态的概念	134
9.2 平面应力状态的解析法	136
9.3 广义胡克定律	141
小 结	145
思考题	146
习 题	146
第 10 章 强度理论	148
10.1 强度理论的概念	148
10.2 四种常用的强度理论	149
小 结	155
思考题	155
习 题	156
第 11 章 组合变形	157
11.1 组合变形概述	157
11.2 斜弯曲	157
11.3 偏心拉伸与偏心压缩	160
11.4 扭转与弯曲	163
小 结	166
思考题	166
习 题	166

第 12 章 压杆稳定	168
12.1 压杆稳定性的概述	168
12.2 细长压杆临界力	169
12.3 临界应力和欧拉公式的适用范围	173
12.4 压杆的稳定性条件	176
小 结	178
思考题	179
习 题	180
第 13 章 动荷载	181
13.1 构件作等加速运动时的应力计算	181
13.2 构件受冲击时的应力和变形	183
小 结	186
思考题	187
习 题	187
附 录	189
参考文献	196

第1章

绪论

1.1 材料力学的基本任务与地位

工程结构和机械的各组成部分在工作时起到承受荷载的作用,这些组成部分统称为构件,例如,框架结构中的梁、柱等都是构件,构件由固体材料制成。作用于构件上的力称为荷载,在荷载作用下,固体材料具有抵抗破坏的能力,但这种能力是有限的,为了保证结构在承受荷载时能够正常地工作,首先要求各构件在荷载作用下能够正常工作,不发生破坏,不然会影响整个结构的安全性。其次还要求各个构件不会产生过大的变形,否则会影响结构的正常使用。此外,对受压的细长构件,还要求在荷载作用下,能保持原有的直线平衡状态,不会突然变弯而失去稳定性。

因此,对正常工作的构件有三方面的能力要求:

(1)强度要求:构件应有足够的抵抗破坏的能力,在规定荷载作用下构件不发生断裂和屈服。例如,屋梁不应折断,储气罐不应破裂等。

(2)刚度要求:构件应具有足够的抵抗变形的能力,在规定荷载作用下所产生的变形不超过工程上所允许的范围。例如,车床主轴不能有过的变形,否则会影响加工精度等。

(3)稳定性要求:构件应具有足够的维持原有的平衡形式的能力,在规定荷载作用下构件不发生突然的失稳。例如,千斤顶的丝杆、驱动装置的活塞,在工作的时候应该始终保持原有的直线平衡形态,保证不被压弯等。

在工程上,为了保证每一构件具有足够的强度、刚度和稳定性,应该合理地选择构件的材料、截面尺寸和形状。如果选用不当,将不能满足上述要求,从而不能保证构件安全地工作。但在工程设计时,也不应一味选用优质材料或不恰当地加大截面尺寸,这样虽然满足了安全要求,却增加了成本。正确地处理安全和经济之间的矛盾,是工程设计中一个非常重要的任务。

要研究构件的强度、刚度和稳定性,还应该了解材料在外力作用下表现出来的变形和破坏等方面的性能,即材料的力学性能。材料的力学性能参量是理论计算中必不可少的依据。

在工程设计中是利用材料力学的知识来解决上述问题的。材料力学是固体力学的一个分支,也是大部分工程技术学科的基础。这门学科的主要任务是:研究各种工程材料在外力作用下的力学性能;在保证构件安全和尽可能经济合理的前提下,为构件选择适当的材料、合适的截面形状和尺寸;为工程设计提供必要的理论基础和计算方法。

在材料力学中,试验有着重要的地位,首先,材料的各种力学性能要通过试验来测定;其次,经过简化得出的理论也需要由试验来验证;此外,一些尚无理论总结的问题,也要借助试验方法来解决。因此,试验分析和理论研究同是完成材料力学任务的方法。

1.2 变形固体及其分类

工程中的固体有各种不同的形状,一般按几何特征将其分为三类:

(1)杆件:一个方向的尺寸(长度)远大于其他两个方向尺寸的构件,如图 1-1 所示,与杆件长度方向垂直的截面叫横截面,各横截面形心的连线称为轴线。轴线为直线的杆件称为直杆,轴线为曲线、折线的杆件,分别称为曲杆和折杆。沿着轴线各横截面的大小和形状不变的杆件称为等截面杆,发生改变的杆件称为变截面杆。

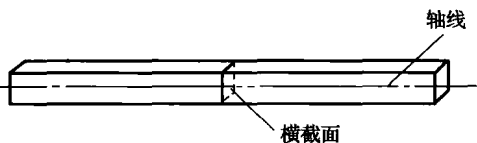


图 1-1

(2)板和壳:一个方向的尺寸(厚度)远小于其他两个方向尺寸的构件。平分板厚度的几何面称为中面,中面是平面的称为板(图 1-2(a)),中面是曲面的称为壳(图 1-2(b))。

(3)块体:三个方向(长、宽、高)的尺寸相差不大的构件,如图 1-3 所示。

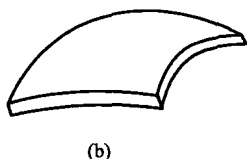
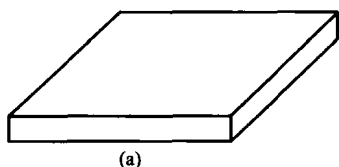


图 1-2

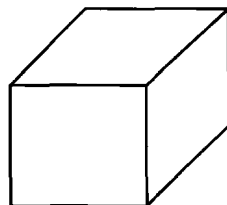


图 1-3

材料力学的研究对象是各类杆件。

1.3 变形固体的几个基本假设

固体因受外力作用发生变形,故称其为变形固体或可变形体。固体材料种类繁多,从物质结构到力学性能都各不相同。在研究构件强度、刚度和稳定性时,为了抽象出力学模型,需要忽略一些次要因素,对变形固体做下列假设:

1. 连续性假设

认为材料是密实的,在整个体积内没有空隙。实际上,组成固体的介质之间并不连续,而是存在着空隙,但这种空隙尺寸与整个构件的尺寸相比很小,因而可以不考虑。根据这一假设,描述构件受力和变形的一些物理量,都可以表示为各点坐标的连续函数,从而便于利用高等数学中的微积分方法。

2. 均匀性假设

认为固体内各点处的力学性能完全相同。实际上,组成构件材料的各个微粒或晶粒,彼

此的性能并不完全相同。但由于构件的任一部分中都包含有为数极多的晶粒,而且排列得很不规则,因而固体的力学性能是各晶粒的力学性能的统计平均值,可以认为材料各部分的力学性能是均匀的。根据这一假设,可以在构件中截取任意微小部分进行研究,然后将所得的结论推广到整个构件。

3. 各向同性假设

认为变形固体在所有方向上均具有相同的物理和力学性能。铸钢、铸铜和做得很好的混凝土,可以认为是各向同性材料。实际上,这类构件材料的各个组成晶体是各向异性的。但这些晶体都远小于构件尺寸且又杂乱排列,从统计平均值的观点来看,宏观上可以认为是各向同性的。

如果材料在各个方向上的力学性能不同,称为各向异性材料,如木材、胶合板、纤维增强复合材料等。

4. 小变形假设

此假设认为构件的变形和构件的原始尺寸相比非常微小,在研究平衡问题时均可按构件的原始尺寸和形状进行,使计算得到简化。对大多数金属材料来说,这一假设是合理的,但对橡胶、塑料等能够产生大变形的物体则不适用。

进行强度、刚度和稳定性研究时,不能忽略构件的变形。

1.4 内力 截面法 应力

1. 内力的概念 截面法

当研究某一构件时,可以设想把这一构件从周围物体的约束中分离出来,并用力来代替周围各物体对构件的作用。这些来自构件外部的力就是外力,包括作用在杆件上的荷载以及杆件所受的约束反力,可以利用理论力学中的静力平衡方程来求解外力。

变形固体在外力作用下变形时,其内部各质点之间的相对位置会变化,与此同时,各质点间相互作用的力也会发生改变。我们知道,即使不受外力作用,物体内部各质点之间也有相互作用力(如分子之间的凝聚力)。材料力学中研究的内力,是指在外力作用下,物体内部各质点之间相互作用力的变化量。这样的内力随外力的变化而变化,到达某一限度时就会引起构件破坏,因而它与构件的强度和变形是密切相关的。

为了揭示构件在外力作用下 $m-m$ 截面上的内力,假想用—个平面把物体截为 I、II 两部分,如图 1-4(a)所示。任取其中一部分,例如取 I 部分为研究对象,弃去 II 部分。由于构件整体是平衡的,截开的每一部分也必然是平衡的,则 II 部分必然有力通过 $m-m$ 截面作用于 I 部分上,与 I 部分所受的外力平衡,如图 1-4(b)所示。根据作用与反作用定律可知, I 部分必然也以大小相等、方向相反的力通过 $m-m$ 截面作用在 II 部分上。上述 I 部分与 II 部分之间相互作用的力就是构件在 $m-m$ 截面上的内力。由于物体的连续性,内力实际上是分布于整个截面上的一个分布力系,因此利用静力平衡方程求得的内力实际上是内力的合力。要确定内力在截面上的分布规律往往很复杂,今后就把这个分布内力系向截面上某一点简化后得到的主矢和主矩,称为截面上的内力。

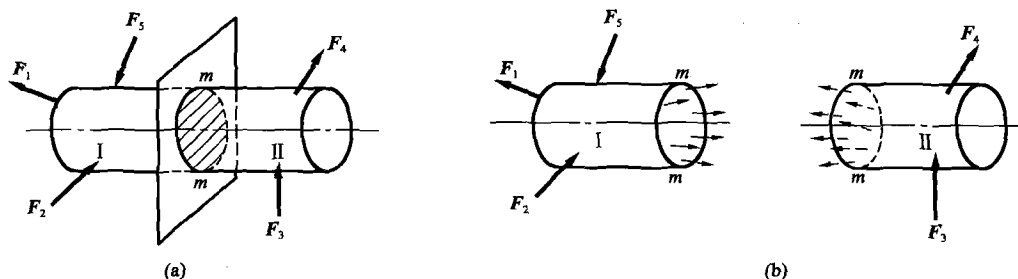


图 1-4

【例 1-1】钻床如图 1-5(a)所示,在荷载 F 作用下,试确定 $m-m$ 截面上的内力。

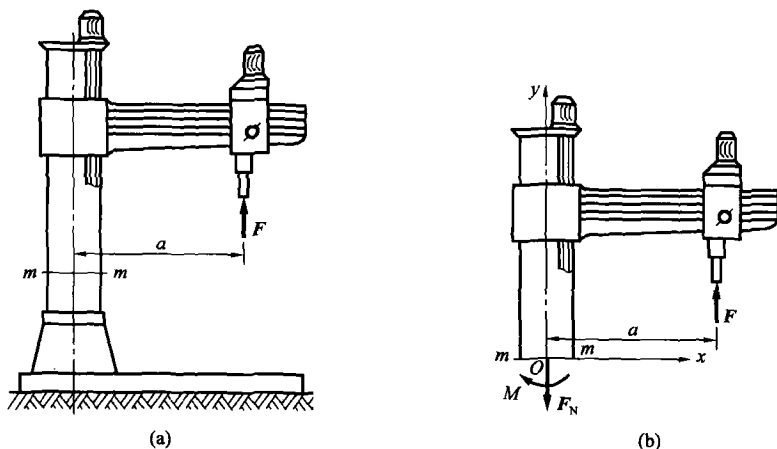


图 1-5

解 (1)沿 $m-m$ 截面假想地将钻床分成两部分。取 $m-m$ 截面以上部分进行研究,如图 1-5(b)所示,并以截面的形心 O 为原点。选取坐标系如图 1-5(b)所示。

(2)为保持上部分的平衡, $m-m$ 截面上必然有通过点 O 的内力 F_N 和绕点 O 的力偶矩 M 。

(3)由平衡条件

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

$$\sum M_O = 0, Fa - M = 0$$

所以有

$$F_N = F, M = Fa$$

上述用一个截面假想把构件截成两部分,从而揭示并确定内力的方法称为截面法。可以将其归纳为以下四个步骤:

- (1)截:欲求某一截面的内力,沿该截面将构件假想地截成两部分。
- (2)取:取其中任一部分为研究对象,而弃去另一部分。
- (3)代:用作用于截面上的内力,代替弃去部分对留下部分的作用力。
- (4)平:建立留下部分的平衡条件,由外力确定未知的内力。

2. 应力

仅靠内力不足以反映构件的强度,因为强度不仅与内力的大小有关,还与承受此内力的截面大小有关,因此引入应力概念来反映内力的集度。

设在如图 1-6(a)所示受力构件的 $m-m$ 截面上,围绕 C 点取微小面积 ΔA , ΔA 上分布内力的合力为 ΔP , ΔP 的大小和方向与 C 点的位置和 ΔA 的大小有关。 ΔP 与 ΔA 的比值为

$$p_m = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-1)$$

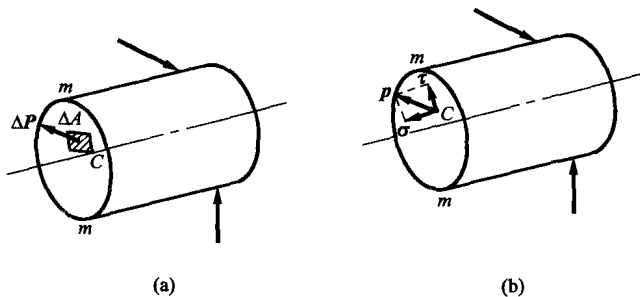


图 1-6

p_m 是一个矢量,表示在 ΔA 范围内单位面积上的内力的平均集度,称为平均应力。当 ΔA 趋于零时, p_m 的大小和方向都将趋于极限,这样得到

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} p_m = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA} \quad (1-2)$$

p 称为 C 点处的全应力,它是分布力系在 C 点的集度,反映内力系在 C 点的强弱程度。 p 是一个矢量,通常把应力 p 分解成垂直于截面的分量 σ 和平行于截面的分量 τ ,如图 1-6(b)所示, σ 称为正应力, τ 称为切应力。

应力的国际单位制基本单位为 N/m^2 , $1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$ (帕斯卡),通常使用 MPa 和 GPa , $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$, $1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa}$ 。

1.5 位移与应变

物体受力后形状和尺寸的改变称为变形。固体上任意一点变形前后移动的距离称为线位移,线段(或平面)变形前后转动的角度称为角位移。如图 1-7(a)所示,固体的 M 点因变形位移到 M' 点,线段 MM' 即为 M 点的位移。在固体受到约束、不会产生刚体位移的情况下, M 点的位移全是由变形引起的。如果有刚体位移,应该在总位移中扣除刚体位移。设想在 M 点附近取棱边边长分别为 Δx 、 Δy 、 Δz 的微小正六面体(当六面体的边长趋于无限小时称为单元体),变形后六面体的边长和夹角都发生了变化,如虚线所示。把此六面体投影到 xy 平面上并放大,如图 1-7(b)所示。变形前平行于 x 轴的线段 MN 原长为 Δx ,变形后 M 和 N 点分别位移到 M' 和 N' 点,线段 $M'N'$ 的长度为 $\Delta x + \Delta s$ 。这里 $\Delta s = \overline{M'N'} - \overline{MN}$ 表示线段 MN 长度的变化。线段 MN 转过一个角度 α 到线段 $M'N'$ 。

$$\epsilon_m = \frac{\overline{M'N'} - \overline{MN}}{\overline{MN}} = \frac{\Delta s}{\Delta x} \quad (1-3)$$

ϵ_m 表示线段 MN 每单位长度的平均伸长或缩短量,称为平均线应变。逐渐缩小 N 点和 M 点之间的距离,使 $\overline{MN}$ 趋近于零,则 ϵ_m 的极限为

$$\epsilon = \lim_{\overline{MN} \rightarrow 0} \frac{\overline{M'N'} - \overline{MN}}{\overline{MN}} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta x} \quad (1-4)$$

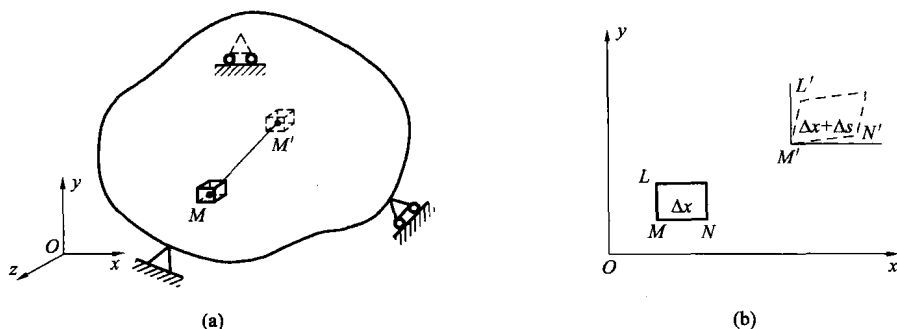


图 1-7

ϵ 称为 M 点沿 x 方向的线应变或正应变。线应变, 即单位长度上的变形量, 是量纲为一的量。用相似的方法, 还可以讨论 M 点沿 y 和 z 方向的线应变。

正交线段 MN 和 ML 变形后, 分别为 $M'N'$ 和 $M'L'$, 变形前后其角度的变化是 $\left(\frac{\pi}{2} - \angle L'M'N'\right)$, 当 N 和 L 趋近于 M 时, 上述角度变化的极限值是

$$\gamma = \lim_{\substack{MN \rightarrow 0 \\ ML \rightarrow 0}} \left(\frac{\pi}{2} - \angle L'M'N' \right) \quad (1-5)$$

γ 称为 M 点在 xy 平面内的切应变或角应变。切应变, 即微单元体两棱边直角的改变量, 为量纲一的量。切应变一般用弧度表示。

1.6 杆件变形的基本形式

工程结构中的杆件受力有各种情况, 相应的变形也有各种形式。但杆件的基本变形只有四种, 杆件其他的复杂变形可以看成是这四种基本变形的组合, 称为组合变形。

1. 轴向拉伸或压缩

这种变形形式是由大小相等、方向相反、作用线与杆件轴线重合的一对力引起的, 表现为杆件长度的伸长或缩短。如图 1-8(a) 所示为拉伸变形, 如图 1-8(b) 所示为压缩变形。

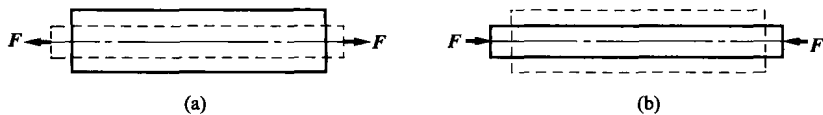


图 1-8

2. 剪切

这种变形形式是由大小相等、方向相反且相距很近的一对横向力作用在杆件上引起的, 表现为受剪杆件的两部分沿外力作用方向发生相对错动(图 1-9)。如钢结构中的螺栓受力后的变形。应该指出的是, 大多数情况下剪切变形与其他变形形式共同存在。

3. 扭转

这种变形形式是由大小相等、转向相反、作用面都垂直于杆件轴线的一对力偶引起的, 表现为杆件的任意两个横截面发生绕轴线的相对转动(图 1-10)。如汽车的传动轴受力后的变形。

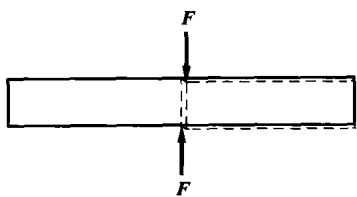


图 1-9

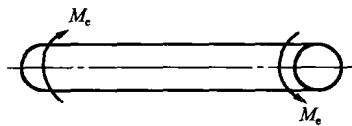
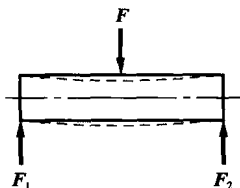


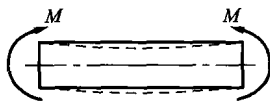
图 1-10

4. 弯曲

这种变形形式是由垂直于杆件轴线的横向力(图 1-11(a))或作用于包含杆件轴线的纵向平面内的一对大小相等、方向相反的力偶(图 1-11(b))引起的,表现为杆件轴线由直线变为受力平面内的曲线。横截面绕其平面内某一轴转动。



(a)



(b)

图 1-11

小 结

1. 材料力学的研究对象是各类杆件。
2. 材料力学的基本假设包括连续性假设、均匀性假设、各向同性假设和小变形假设。
3. 构件应满足强度、刚度和稳定性的要求。
4. 杆件有四种基本变形形式:轴向拉伸或压缩、剪切、扭转和弯曲。
5. 在外力作用下,物体内部各质点之间相互作用力的变化量称为内力。一般采用截面法求解截面上的内力。
6. 应力 p 是单位面积上的内力,可以分解为垂直于截面的正应力 σ 和平行于截面的切应力 τ 。
7. 物体受力后形状和尺寸的改变称为变形。反映一点附近变形程度的量是应变。



思考题

- 1-1 材料力学和理论力学的研究对象有什么区别?
- 1-2 什么是构件的强度、刚度与稳定性?
- 1-3 位移、变形和应变有何区别和联系?
- 1-4 什么是内力? 如何求内力?
- 1-5 应力与内力的关系是什么?

习 题

1-1 试求如图 1-12 所示结构 $m-m$ 和 $n-n$ 两截面上的内力,并指出 AB 和 BC 两杆的变形分别属于哪种基本变形。

1-2 在如图 1-13 所示简易吊车的横梁上,力 P 可以左右移动, AB 杆长度 L 和 α 角已知,试求截面 1-1 和 2-2 上的内力及其最大值(α 角为变量)。

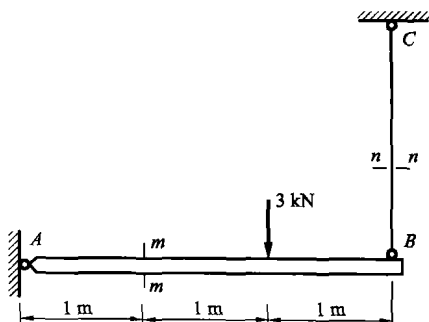


图 1-12

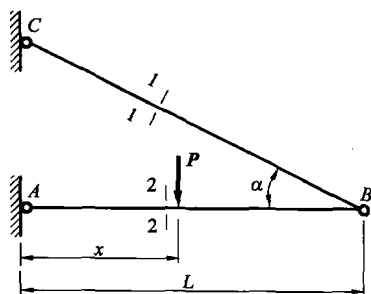


图 1-13

1-3 如图 1-14 所示,拉伸试件上 A 、 B 两点的距离 l 为标距,受拉力作用后,测量出两点间距离的增量为 $\Delta l = 5 \times 10^{-2}$ mm。若杆件的原长 $l = 100$ mm,试求 A 与 B 两点间的平均线应变 ϵ_m 。

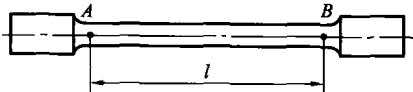


图 1-14

1-4 如图 1-15 所示三角形薄板因受外力作用而变形,角点 B 垂直向上的位移为 0.03 mm,但 AB 和 BC 边仍保持为直线。试求 OB 的平均线应变,并求 AB 与 BC 两边的角度改变量。

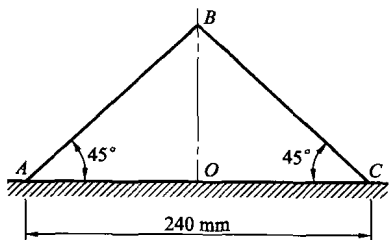


图 1-15

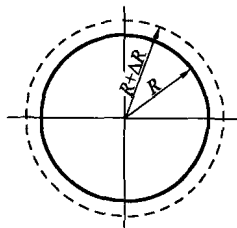


图 1-16