

高等学校“十一五”规划教材



材料力学

主 编 王 社
副主编 张 宏 陈 丽

CAILIAO LIXUE

西北工业大学出版社



材 料 力 学

主 编 王 社
副主编 张 宏 陈 丽

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书是根据国家教育部高等学校工科材料力学课程(中、少学时)的基本要求编写的。全书内容包括绪论、轴向拉伸与压缩、截面图形的几何性质、扭转、弯曲内力、弯曲应力、梁的位移、应力状态分析和强度理论、组合变形、压杆的稳定性、动荷载。各章后附有思考题、习题,书末附有习题参考答案。

本书可作为高等学校土建、机械、水利、地质、机电等专业本科及专科材料力学课程(中、少学时)的教材,亦可作为高等职业教育与成人教育等相关专业的材料力学教材,还可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学/王社主编. —西安:西北工业大学出版社,2008.12

高等学校“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5612-2495-3

I. 材… II. 王… III. 材料力学—高等学校—教材 IV. TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008)第 211247 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西宝石兰印务有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:17

字 数:410 千字

版 次:2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷

定 价:28.00 元

前 言

本书是根据国家教育部高等学校工科材料力学课程中、少学时(60 学时左右)的基本要求,结合我们多年的教学实践经验编写的。

材料力学作为工科院校重要的一门技术基础课,对增加学生基础知识,培养良好的学习习惯和方法,提高分析问题和解决问题的能力都起着非常重要的作用。鉴于此,本书在内容安排上注意了系统性、完整性的要求,力求做到:由浅入深,循序渐进,标题醒目,层次分明;在叙述方法上力求达到:通顺易懂,讲透重点,抓住关键,总结规律。另外,本书还注重理论联系实际,注意培养学生分析解决工程实际问题的能力和创新精神。

本书在各章后面都给出一定数量的思考题和习题,以便学生自学,并理解掌握材料力学的基本概念、基本理论和计算方法。本书的物理量的名称和符号均采用国家标准。

本书第一、二、五、六、七章由王社编写,第三、四、八章由陈丽编写,第九、十、十一章由张宏编写。全书由王社任主编并负责统稿、修改和定稿。

长安大学张新占、王虎同志详细审阅了全书,并提出了宝贵的修改意见。本书的出版,还得到了长安大学力学教研室老师以及西北工业大学出版社的大力支持和帮助,谨此一并致谢。

由于编者水平有限,书中错误或不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2008 年 5 月

目 录

第一章 绪论	1
1-1 材料力学的任务	1
1-2 变形固体及其基本假设	2
1-3 内力 截面法	2
1-4 应力与应变	3
1-5 杆件变形的基本形式	5
第二章 轴向拉伸与压缩	7
2-1 轴向拉伸与压缩的概念和实例	7
2-2 轴向拉(压)杆横截面上的内力和应力	7
2-3 轴向拉(压)杆斜截面上的应力	11
2-4 轴向拉(压)杆的变形	12
2-5 材料在拉(压)时的力学性能	16
2-6 许用应力和安全因数、强度条件	20
2-7 拉压超静定问题	22
2-8 应力集中的概念	27
2-9 连接件的强度计算	28
思考题	32
习题	33
第三章 截面图形的几何性质	39
3-1 静矩和形心	39
3-2 惯性矩和惯性积	43
3-3 惯性矩和惯性积的平行移轴公式	47
3-4 惯性矩和惯性积的转轴公式	50
思考题	53
习题	53
第四章 扭转	58
4-1 扭转的概念	58
4-2 外力偶矩的计算 扭矩和扭矩图	59
4-3 薄壁圆管的扭转	62
4-4 圆轴扭转时的应力和强度条件	65
※4-5 圆柱形密圈螺旋弹簧的应力	71

4-6 圆轴扭转时的变形和刚度条件	73
※4-7 矩形截面杆的自由扭转	76
思考题	81
习题	82
第五章 弯曲内力	87
5-1 平面弯曲的概念及梁的计算简图	87
5-2 梁的剪力和弯矩	89
5-3 剪力方程和弯矩方程 剪力图和弯矩图	92
5-4 弯矩、剪力和荷载集度间微分关系	97
5-5 用叠加法作梁的弯矩图	100
思考题	101
习题	102
第六章 弯曲应力	106
6-1 概述	106
6-2 梁横截面上的正应力	106
6-3 梁的正应力强度条件	109
6-4 梁的弯曲切应力及其强度条件	112
6-5 提高梁强度的措施	117
思考题	119
习题	120
第七章 梁的位移	126
7-1 梁的位移——挠度及转角	126
7-2 梁的挠曲线近似微分方程	127
7-3 用积分法求梁的位移	128
7-4 用叠加法求梁的位移	132
7-5 梁的刚度校核 提高梁刚度的措施	136
7-6 简单超静定梁的解法	138
思考题	139
习题	140
第八章 应力状态分析 强度理论	143
8-1 应力状态的概念	143
8-2 二向和三向应力状态的实例	145
8-3 二向应力状态分析——解析法	147
8-4 二向应力状态分析——图解法	152
8-5 三向应力状态简介	156
8-6 各向同性材料的应力、应变关系	159
8-7 复杂应力状态下的应变能与畸变能密度	165

8-8 强度理论	166
思考题	174
习题	177
第九章 组合变形	183
9-1 概述	183
9-2 拉伸或压缩与弯曲的组合	184
9-3 偏心压缩与截面核心	186
9-4 扭转与弯曲的组合	189
思考题	193
习题	194
第十章 压杆的稳定性	199
10-1 压杆稳定的概念	199
10-2 细长压杆的临界力	201
10-3 欧拉公式的适用范围、经验公式	206
10-4 压杆的稳定校核	209
10-5 提高压杆稳定性的措施	211
思考题	213
习题	214
第十一章 动荷载	219
11-1 概述	219
11-2 惯性力问题	219
11-3 杆件受冲击时的应力和变形	223
11-4 冲击韧性	230
11-5 疲劳的基本概念	231
11-6 材料的疲劳极限与应力-寿命曲线	233
11-7 影响构件疲劳极限的因素	235
思考题	238
习题	240
各章习题参考答案	243
附录 型钢规格表	250
参考文献	263

第一章 绪 论

1 - 1 材料力学的任务

一、研究构件的强度、刚度和稳定性

在工程实际中,各种机械和结构物得到广泛应用,组成这些机械的零件或结构物的杆件,统称为构件。例如,悬臂吊车架的横梁和斜杆、厂房中的梁和柱、机械中的传动轴等,都是构件。

一般来说,在工作时,结构物或机械都要承受荷载的作用。为了保证结构物或机械能安全、正常地工作,组成结构或机械的每一个构件都必须具有足够的承载能力,即满足以下要求:

1. 强度要求

所谓**强度**,是指构件在荷载作用下,抵抗破坏的能力。任何构件,在正常工作情况下,不允许发生破坏,即要求构件必须具有足够的强度。例如,房屋中的楼板梁不应断裂,冲床曲轴不可折断等。

2. 刚度要求

所谓**刚度**,是指构件在荷载作用下,抵抗弹性变形的能力。构件仅有足够的强度还是不够的,若变形过大时,仍然不能正常使用。例如,楼板梁的弯曲变形过大时,下面的抹灰层将会开裂,脱落;机床主轴变形过大时,会影响对工件的加工精度。因此,工程中对构件的变形也作了一定的限制,使构件在荷载作用下产生的变形不超过允许的范围,即要求构件必须具有足够的刚度。

3. 稳定性要求

所谓**稳定性**,是指构件具有维持原有平衡形状的一种能力。例如,受轴向压力的细长杆,当压力不大时,杆将会保持原有直线形状的平衡状态;当压力超过某一限度时,杆件将丧失直线形状的平衡状态而显著地弯曲即为失稳。因此,要求这类受压的构件不能丧失稳定性,即具有足够的稳定性。

二、合理地解决安全与经济之间的矛盾

设计构件时,既要保证构件满足强度、刚度和稳定性的要求,即安全可靠,又要使设计的构件能充分发挥材料的潜力,尽可能降低成本,节约材料和资金,即经济。这样,安全与经济之间就会产生矛盾。材料力学的任务就是在保证构件即安全又经济的前提下,为构件选择合适的材料,设计出合理的截面形状和尺寸,提供必要的理论基础和计算方法。

三、研究材料的力学性能

研究构件的强度、刚度和稳定性时,应首先了解制成构件材料的力学性能。材料的力学性能是指材料在外力作用下表现出的变形和破坏等方面的性能。研究材料的力学性能时,须通

过实验的方法来测定。此外,材料力学中一些通过假设推导出的理论结果也需要用实验来验证。所以,在材料力学中,实验分析和理论研究具有同等重要的地位。

1-2 变形固体及其基本假设

一、变形固体的弹性变形和塑性变形

工程结构的各种构件一般均由固体材料制成。任何固体在外力作用下,都要发生变形。所谓**变形**,是指制成构件的固体在外力作用下,其形状和尺寸发生了变化。由于固体具有可变的性质,故称为变形固体。

变形固体在外力作用下产生的变形,可分为**弹性变形**与**塑性变形**。**弹性变形**是指变形固体上的外力解除后可以消失的变形。而**塑性变形**是指在外力解除后不能消失而残留下来的那一部分变形。塑性变形也叫**残余变形**。

二、变形固体的基本假设

在研究构件的强度、刚度和稳定性时,为了简化问题,通常略去固体性质的一些次要因素,将其抽象为理想化的材料,然后进行理论分析。为此对变形固体作出如下的假设。

1. 连续性假设

认为在物体的整个体积内毫无空隙地充满了物质。根据这一假设可以把描述构件内力学性能的一些物理量,如应力、变形、位移等也看成是连续的,可以用坐标的连续函数表示其变化规律。

2. 均匀性假设

认为在物体内部,各点处的力学性能完全相同。根据此假设,可在物体内部任一点处取出一微小单元体进行分析研究,并将所得结果应用于整个物体。同样,通过试验所获得的大尺寸试样材料的力学性质也可应用于构件内任何微小的部分。

3. 各向同性假设

认为材料内部沿各个不同方向具有相同的力学性能。具有这种属性的材料称为**各向同性材料**。常用的工程材料如钢、玻璃以及浇注得很好的混凝土等,都可被认为是各向同性材料。如果材料内部沿不同方向具有不同的力学性能,则称为**各向异性材料**。如木材、胶合板、纤维增强复合材料等。

由于采用了上述的三个基本假设,材料力学中的理论分析及计算公式的推导变得极为简便。此外,还应指出,在工程实际中,绝大多数构件在外力作用下,产生的变形与构件原始尺寸相比,极其微小,这种变形称为**小变形**。因此,讨论受力构件的平衡与运动时,可不考虑其变形而仍按变形前尺寸进行分析计算,这样可以使得对问题的分析大为简化,引起的误差却极其微小。

1-3 内力 截面法

一、内力的概念

如前所述,结构或机械都是由一些构件所组成的。对于所研究的某一构件来说,其他构件

(或其他物体)作用于该构件上的力均属于外力。

构件在外力作用下将发生变形,随着变形的产生,其内部各质点间的相对位置发生改变,与此同时,构件内部各相邻部分间将产生相互作用力,此相互作用力称为内力。即材料力学中所研究的内力是由于外力作用而引起的,它将随着外力的变化而变化,在外力解除后,内力也随之消失。内力的分析是对构件进行强度、刚度和稳定性计算的基础。下面来讨论如何确定受力构件的内力。

二、截面法

确定内力的方法是截面法。设图 1-1(a) 所示构件在外力作用下处于平衡状态。为了显示和确定任一截面 $m-m$ 上的内力,可在该截面处假想地用一平面把构件截分为 I、II 两部分,任取一部分,例如取 I 段为研究对象,将弃取部分 II 段对保留部分 I 段的作用以内力来代替,如图 1-1(b) 所示。由于已假设物体是连续、均匀的变形体,所以内力在切开截面上应是连续分布的,即为分布内力系。而将分布内力系的合力和合力偶矩称做欲求截面上的内力。

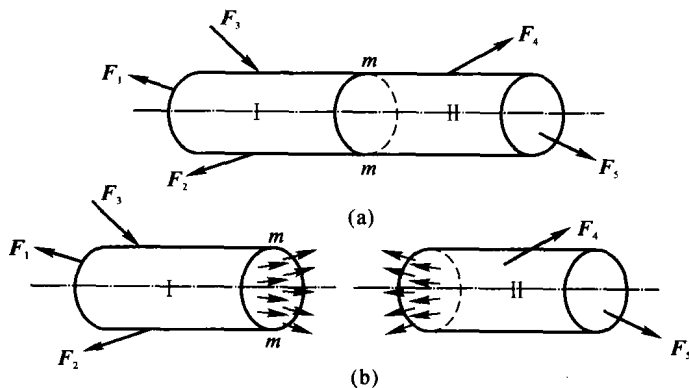


图 1-1

由于整个杆件处于平衡状态,故截开后各部分应均满足静力平衡方程。如果考虑研究对象 I 段的平衡,则根据静力平衡方程就可确定截面 $m-m$ 上的内力。若取 II 段为研究对象,用同样的方法,也可求得截面 $m-m$ 上的内力。但由牛顿第三定律可知,分别以 I 段、II 段为脱离体求出的截面 $m-m$ 上的内力数值相等而方向相反。

上述这种假想用一平面把构件分成两部分,以显示并确定内力的方法称为**截面法**,它是求内力的一般方法,其过程可归纳为以下三个步骤:

- (1) 欲求某一截面上的内力,可沿该截面假想地把构件分成两部分。
- (2) 取其任一部分为研究对象,将弃取部分对留下部分的作用代之以内力。
- (3) 对留下部分建立静力平衡方程,便可求出未知内力。

1-4 应力与应变

一、应力

在确定了构件截面上的内力后,还不能判断构件是否因强度不够而破坏。因此,仅知道构

件截面上的内力还是不够的,必须引入应力的概念。

应力是受力构件某一截面上一点处的内力集度。考虑图 1-1 所示受力构件,若在截面 $m-m$ 上,围绕点 M 取微小面积 ΔA (见图 1-2(a)),作用在 ΔA 上分布内力合力为 ΔF ,则 ΔF 与 ΔA 的比值称为 ΔA 上的平均集度,用 p_m 表示,即

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

式中, p_m 为 ΔA 上的平均应力,它是一个矢量,其大小和方向将随着 ΔF 的变化而不同,当 ΔA 趋于零时, p_m 的极值 p 为点 M 处的内力集度,即

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

式中, p 也称为截面上点 M 的总应力。

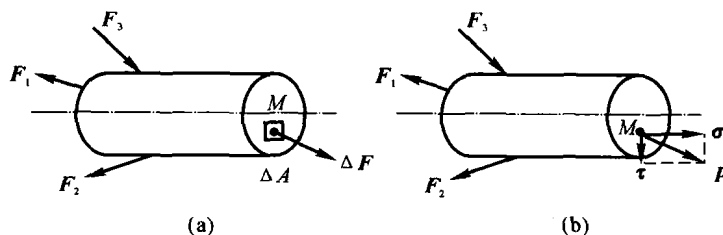


图 1-2

总应力 p 是一个矢量,通常将其分解为与截面垂直的分量 σ 和与截面相切的分量 τ (见图 1-2(b))。 σ 称为正应力, τ 称为切应力。它们的数量关系为

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

在法定计量单位制中,应力的单位是 Pa(帕),且 $1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$, $1\text{GPa} = 10^9\text{Pa}$ 。

二、应变

构件在外力作用下,每一点都会发生应力和变形。要研究构件的变形和截面上的应力分布规律,必须了解构件内各点的变形情况。构件内任一点变形的程度,可用线应变和切应变这两个量来度量。

1. 线应变

在研究受力构件内部某一点的变形时,可设想围绕该点取一个微小的正六面体,称为单元体。图 1-3(a) 是从构件内取出的一单元体,单元体的变形可能有各棱边长度的改变和相邻棱边所夹直角的改变。设所取单元体沿 x 轴方向 AB 边的原长为 Δx ,变形后其长度的改变量为 $\Delta\delta_x$,如图 1-3(b) 所示,则 $\Delta\delta_x$ 与 Δx 的比值称为棱边 AB 的平均线应变,并用 ϵ_m 表示,即

$$\epsilon_m = \frac{\Delta\delta_x}{\Delta x} \quad (1-4)$$

当线段 AB 的长度无限缩小,即当 Δx 趋于零时,有

$$\epsilon_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta\delta_x}{\Delta x} = \frac{d\delta_x}{dx} \quad (1-5)$$

称为 A 点沿 x 方向的线应变。线应变 ϵ_x 是一个无量纲的量。

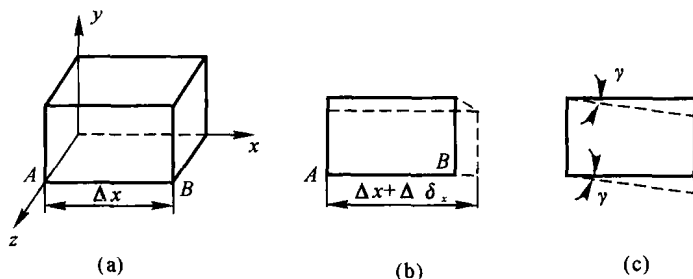


图 1-3

2. 切应变

单元体除了棱边长度发生改变外,其相互垂直的两条棱边夹角一般也会发生变化,如图 1-3(c) 所示。两条棱边所夹直角的改变量 γ 称为切应变,或角应变。 γ 切应变也是一个无量纲的量,通常用 rad(弧度)来度量。事实上,构件的变形就是每点线变形与角变形累积的结果。

1-5 杆件变形的形式

一、材料力学的研究对象

在工程实际中,构件的几何形状是多种多样的,根据构件的几何特征通常可将其分为杆件、板和壳、块体等。材料力学所研究的主要构件为杆件。所谓杆件,是指长度方向的尺寸远大于横向方向的尺寸的构件,如图 1-4 所示。工程结构中的梁、柱、机械中的传动轴等,都是杆件的例子。杆件又称为杆。

若杆的轴线为直线,则称为直杆;轴线为曲线,则称为曲杆。而材料力学中所研究的主要是等截面直杆,简称为等直杆。

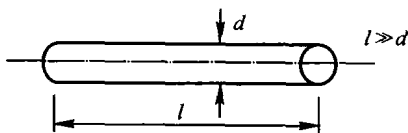


图 1-4

二、杆件变形的形式

作用在杆件上的力具有不同的类型,相应地杆件变形形式也各不相同,杆件变形的基本形式有以下四种:

(1) 轴向拉伸或压缩。作用在杆上的外力与杆的轴线重合,变形表现为杆件长度发生伸长或缩短,如图 1-5(a) 所示。例如,桁架中的杆件、起吊重物的钢丝绳等的变形。

(2) 剪切。作用在杆件上的外力为大小相等、方向相反,且相距很近的一对横向力,变形表现为杆件沿二力作用方向发生相对错动,如图 1-5(b) 所示。例如,连接构件中的螺栓、销钉等主要发生剪切变形。

(3) 扭转。作用在杆件上的外力偶,其作用面垂直于杆轴线,变形表现为各横截面绕轴线发生相对转动,如图 1-5(c) 所示。例如,机械中的传动轴等的变形。

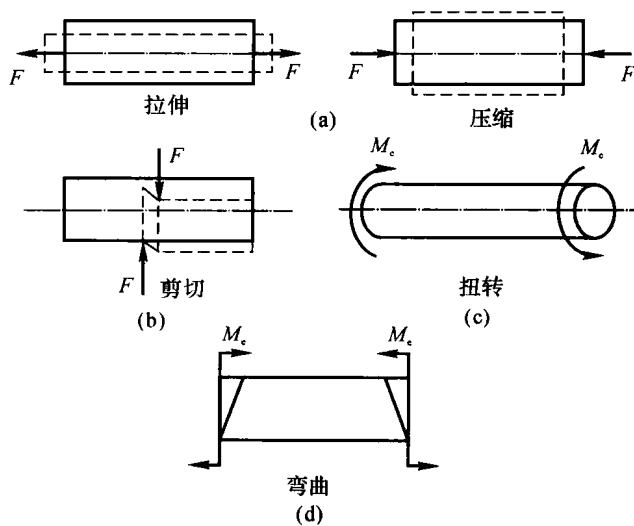


图 1-5

(4) 弯曲。作用在杆件上的外力为垂直于杆轴线的横向力, 或为位于纵向平面内一对大小相等、方向相反的力偶。变形表现为杆轴线由直变弯, 如图 1-5(d) 所示。例如, 梁的变形。

第二章 轴向拉伸与压缩

2-1 轴向拉伸与压缩的概念和实例

在工程结构和机械设备中,经常会有一些承受轴向拉伸或压缩的杆件。例如,图 2-1 所示桁架的各个杆件和做材料试验用的万能试验机的立柱等。这类杆件受力和变形的共同特点是:作用在杆件上的外力作用线与杆件轴线重合,杆件发生沿轴线方向的伸长或缩短。这种变形称为**轴向拉伸**或**轴向压缩**。这类杆件称为**拉杆**或**压杆**如图 2-2 所示。

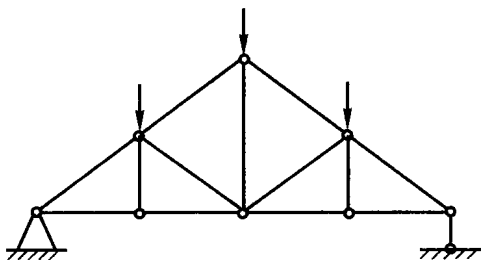


图 2-1

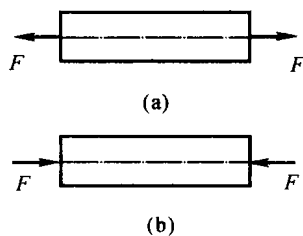


图 2-2

2-2 轴向拉(压)杆横截面上的内力和应力

一、拉(压)杆横截面上的内力——轴力

图 2-3(a) 所示为一拉杆,现欲求任一横截面 $m-m$ 上的内力。为了显示并确定内力,可采用截面法,即假想地用一平面沿 $m-m$ 将杆截成两段,任取其中一段,例如左段,作为研究对象,并将右段对左段的作用以分布内力的合力 F_N 来代替,如图 2-3(b) 所示。根据静力平衡条件,得

$$\sum F_x = 0, \quad F_N = F$$

因外力 F 的作用线与杆轴线重合,所以内力 F_N 也必与轴线重合。此内力称为**轴力**。

若取右段为研究对象,如图 2-3(c) 所示,同样可求得 $F'_N = F$ 。轴力正负号可根据杆件的变形情况来规定:以产生拉伸变形时的轴力 F_N 为正,产生压缩变形时的轴力 F_N 为负。正的轴力也称做**拉力**,负的轴力也称做**压力**。

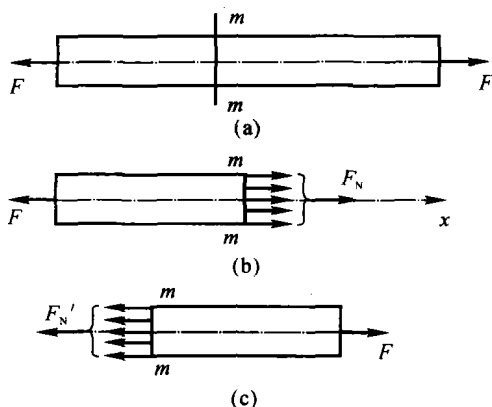


图 2-3

二、轴力图

当杆件受到多个轴向外力作用时,其各段内的轴力是不相同的。为了表明轴力随截面位置变化情况,通常须作出轴力图。其作法如下:以平行于杆轴线的坐标 x 表示横截面的位置,垂直于杆轴线的坐标 F_N 表示相应截面上的轴力,按一定的比例可绘制出轴力与横截面位置关系的图,即为轴力图。

例 2-1 等直杆 AB 受力如图 2-4(a) 所示。试求其横截面 1—1, 2—2, 3—3 上的轴力,并作轴力图。

解 (1) 求支座反力。为计算方便起见,先求支座反力 F_{RA} , 如图 2-4(b) 所示。由 $\sum F_x = 0$, 得

$$-F_{RA} + F_1 - F_2 + F_3 = 0$$

$$F_{RA} = F_1 - F_2 + F_3 = 80 - 50 + 20 = 50 \text{ kN}$$

(2) 求横截面 1—1, 2—2, 3—3 上的轴力。沿截面 1—1 假想地将杆截开, 取左段为研究对象, 以 F_{N1} 表示轴力(一般假定为拉力), 如图 2-4(c) 所示。由平衡方程

$$\sum F_x = 0, \quad F_{N1} - F_{RA} = 0$$

得

$$F_{N1} = F_{RA} = 50 \text{ kN}$$

计算结果为正, 说明 F_{N1} 的指向与假设方向相同, 即 F_{N1} 为拉力。

同理, 可求得如图 2-4(d) 截面 2—2 上的轴力为

$$F_{N2} = F_{RA} - F_2 = 50 - 80 = -30 \text{ kN}$$

计算结果为负, 说明 F_{N2} 的指向与假设方向相反, 即 F_{N2} 为压力。

同理, 可求得如图 2-4(e) 所示截面 3—3 上的轴力为

$$F_{N3} = F_3 = 20 \text{ kN}$$

式中, F_{N3} 为拉力。

(3) 作轴力图。按前述规定作轴力图的方法, 可作出杆的轴力图如图 2-4(f) 所示。

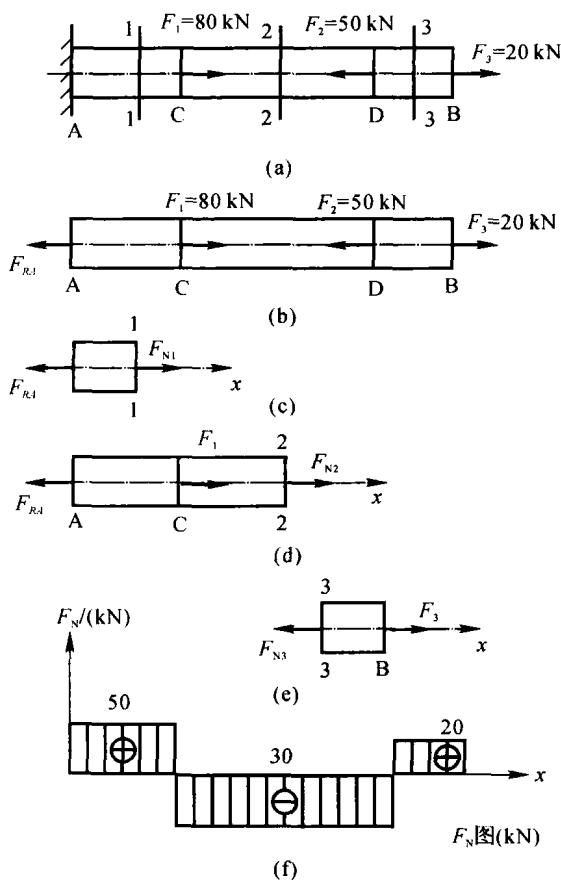


图 2-4

三、应力

若要判断受力杆件能否发生强度破坏,只知道横截面上的内力还是不够的,还要求出横截面上的应力。

由于拉(压)杆横截面上仅有与截面垂直的法向内力 F_N , 所以横截面上也只可能有与轴力相对应的正应力 σ 。为了求得正应力在截面上的分布规律,应考虑从研究杆件的变形入手。图 2-5(a) 所示为一等直杆,受力前,在杆件的侧面上画两条垂直于杆轴线的横向线 ab 和 cd 。变形后可发现横向线 ab, cd 分别平行移到了 $a'b', c'd'$ 新位置,但仍为直线,且仍然垂直于杆的轴线,如图 2-5(b) 所示。根据这一表面现象,可假设变形前为平面的横截面,变形后仍保持为平面。这就是平面假设。若设想杆是由无数条纵向纤维所组成,根据平面假设,可推断出杆任意两横截面间各纤维的伸长相等。因而它们的受力也必定相等。所以正应力在横截面上是均匀分布的,如图 2-5(c) 所示,即 σ 为一常量,于是由横截面上内力与应力之间的静力关系,得

$$F_N = \int_A \sigma dA = \sigma A$$

从而有

$$\sigma = \frac{F_N}{A} \quad (2-1)$$

式中, σ 为横截面上的正应力; F_N 为欲求正应力所在截面的轴力; A 为杆件的横截面积。 σ 的正负号规定与轴力 F_N 相同, 拉应力为正, 压应力为负。

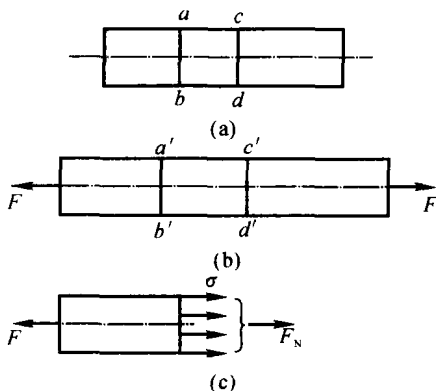


图 2-5

应当指出, 式(2-1)的适用条件是: 作用在杆件上的外力(或外力的合力)的作用线必须与杆轴线重合。

例 2-2 图 2-6(a) 所示桁架结构, 已知 BC 杆的直径 $d = 20 \text{ mm}$, AB 杆的横截面积为 540 mm^2 , $F = 3 \text{ kN}$ 。试求 AB 杆和 BC 杆横截面上的正应力。

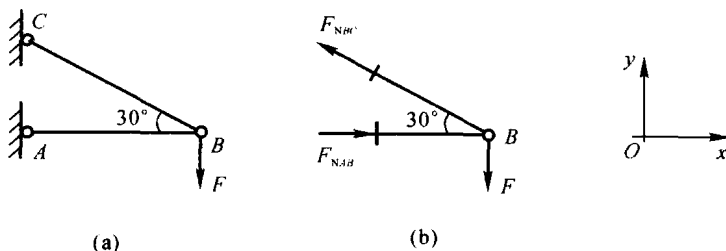


图 2-6

解 (1) 计算各杆轴力。若不考虑 AB , BC 杆的自重, 则 AB 和 BC 杆为二力杆。以节点 B 为研究对象, 各杆受力如图 2-6(b) 所示。由静力平衡条件:

$$\sum F_x = 0, \quad F_{NAB} - F_{NBC} \cos 30^\circ = 0$$

$$\sum F_y = 0, \quad F_{NBC} \sin 30^\circ - F = 0$$

求得

$$F_{NBC} = \frac{F}{\sin 30^\circ} = \frac{3}{0.5} = 6 \text{ kN} \quad (\text{拉力})$$

$$F_{NAB} = F_{NBC} \cos 30^\circ = 6 \times \frac{\sqrt{3}}{2} = 5.2 \text{ kN} \quad (\text{压力})$$

(2) 计算各杆应力。