

●普通高等学校“十一五”规划教材●

Mechanics of Materials

材料力学

上册

经来旺 宫能平 主编

中国科学技术大学出版社

● 普通高等学校“十一五”规划教材 ●

Mechanics of Materials

材料力学

上册

主 编 经来旺 宫能平

副主编 刘丹丹 陈树峰

卢小雨



中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书介绍了材料力学中的基本知识,内容详实丰富,叙述深入浅出,理论联系实际,适合土木工程、机械制造、工程地质、材料、采矿工程、资源与环境、航空航天等专业本、专科学生作为教材使用,对现场工程技术人员也有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学.上册/经来旺,宫能平主编.—合肥:中国科学技术大学出版社,2009.7
(安徽省高等学校“十一五”省级规划教材)
ISBN 978-7-312-02429-0

I. 材… II. ①经… ②宫… 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(2009)第109303号

出版 中国科学技术大学出版社
安徽省合肥市金寨路96号,邮编:230026
网址:<http://press.ustc.edu.cn>
印刷 安徽联众印刷有限公司
发行 中国科学技术大学出版社
经销 全国新华书店
开本 710 mm×960 mm 1/16
印张 14.25
字数 285 千
版次 2009 年 7 月第 1 版
印次 2009 年 7 月第 1 次印刷
定价 25.00 元

中国科学技术大学出版社

前 言

随着高等学校教学改革的不深入,学时数大幅减少,教学内容的更新和教材的更替已势在必行。目前工科类专业材料力学课程的学时数已从 20 世纪 80 年代的 120~140 学时降至 70 学时,但大多数学校所用教材依然未变,显然不符合时代的要求。高等学校的教学内容应该随着科学技术的发展不断更新,作为教学内容载体的教材也理应不断地完善和发展。

本教材一方面在满足国家教学大纲的基础之上,对教学内容进行了更新和完善;另一方面,基于理论联系实际的考虑,大部分章节增加了工程实例一节,使得学生可以更为清楚地了解本门课程各部分理论在工程实践中的作用。各章后面配备的习题也大多来自于工程实践,这对学生较早地熟悉工程实践具有极大的促进作用。

本教材为安徽省高等学校“十一五”省级规划教材,读者对象主要包含土木工程、机械制造、工程地质、材料、采矿工程、资源与环境、航空航天等专业的本、专科学生,对现场工程技术人员也同样具有较高的参考价值。

本书由经来旺、宫能平主编,副主编为刘丹丹、陈树峰、卢小雨。考四明编写了第 1 章,吕庆洲编写了第 2 章、附录 I、附录 II、附录 III,卢小雨编写了第 3、4 章,经来胜编写了第 5、6、7 章。教材第 1、2、3 章由刘丹丹初审,教材第 4、5、6 章由陈树峰初审,教材第 7 章、附录 I、附录 II、附录 III 由卢小雨初审。全书由宫能平二审,经来旺终审。教材内容的设计、规划、统稿由经来旺主持完成。

本书的编写得到了安徽省教育厅、安徽理工大学、淮南联合大学的大力支持,在此一并致谢!

本书受到了安徽省教育厅和安徽理工大学的资助,在此深表感谢!

受编者水平所限,加之成稿仓促,书中谬误之处在所难免,恳请有关专家及读者批评指正,以利完善。

编 者

2008 年 10 月 30 日

目 录

前言	I
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	2
1-3 外力及其分类	3
1-4 内力和截面法的概念	3
1-5 应力和应变	5
1-6 杆变形的基本形式	7
第 2 章 轴向拉伸与压缩	9
2-1 工程实例	9
2-2 截面上的内力	10
2-3 截面上的应力	12
2-4 轴向拉伸和压缩变形的计算	15
2-5 轴向拉伸和压缩时材料的力学性能	18
2-6 轴向拉伸和压缩时构件的强度条件	24
2-7 圆筒形薄壁压力容器的应力	27
2-8 应力集中的概念	28
2-9 变形能的概念和功能原理	29
2-10 拉伸和压缩静不定问题	32
本章小结	38
习题	38
第 3 章 剪切	44
3-1 剪切和挤压的工程实例	44
3-2 剪切的实用计算	45
3-3 挤压的实用计算	48
3-4 焊接实用计算	50
本章小结	52
习题	52

第4章 扭转	56
4-1 工程实例	56
4-2 扭转构件横截面上的内力	57
4-3 切应力互等定理	61
4-4 圆轴扭转时的应力	62
4-5 圆轴扭转时的变形和刚度条件	68
4-6 扭转变形能	71
4-7 圆柱形密圈螺旋弹簧的计算	71
4-8 非圆截面杆的扭转	75
4-9 扭转静不定问题	81
本章小结	82
习题	83
第5章 弯曲内力	88
5-1 平面弯曲的概念	88
5-2 受弯杆件的简化	89
5-3 剪力与弯矩	90
5-4 剪力图与弯矩图	94
5-5 剪力、弯矩和分布载荷集度之间的微分关系	99
5-6 按叠加原理作弯矩图	105
5-7 平面曲杆的弯曲内力	107
本章小结	109
习题	110
第6章 弯曲应力	115
6-1 概述	115
6-2 梁纯弯曲时的正应力	116
6-3 横力弯曲的正应力及强度条件	122
6-4 梁弯曲时的切应力	129
6-5 弯曲中心的概念	138
6-6 提高梁承载能力的措施	141
本章小结	146
习题	146
第7章 弯曲变形	154
7-1 工程实例	154
7-2 梁的挠曲线近似微分方程及其积分	156
7-3 用叠加法计算梁的变形	163

7-4 简单静不定梁的解法	169
7-5 梁的刚度条件及提高梁刚度的措施	173
7-6 弯曲变形能	175
本章小结	177
习题	178
附录 I 平面图形的基本性质	185
附录 II 型钢表	199
附录 III 习题答案	214

第1章 绪 论

1-1 材料力学的任务

随着社会的发展,各种类型的结构物和机械得到了广泛的应用。组成各种结构物的元件和机械的零件,统称为构件,如建筑物中经常使用的梁、板、柱和机床中的轴、齿轮等。构件有各种形状,其中杆件是材料力学的研究对象。杆件的明显特征是某一方向的尺寸远大于其他两方向的尺寸。构件在工作时,将受到载荷作用,例如建筑物中的梁受自身重力和其他外部载荷对其作用,机床的轴受到齿轮的啮合力作用等。在外部载荷作用下,构件的尺寸和形状将发生改变,这种改变称为变形。由于固体材料的特性,构件本身具有一定的抵抗破坏的能力,这种能力会因为组成构件材料的不同而具有不同的限度。

为了保证每个构件都能正常地工作,必须对构件进行设计,选择合适的尺寸及材料,使其能安全地承担一定的载荷。为此,它应当满足以下要求:

① 强度要求。要求构件具有足够的抵抗破坏的能力,使其在规定的载荷作用下不被破坏。例如桥梁墩柱抵抗压坏的能力、钢筋混凝土梁抵抗断裂的能力。

② 刚度要求。要求构件具有足够的抵抗变形的能力,使其在规定的载荷作用下不至于因为变形过大而失效。例如,铁路桥梁在承受列车载荷时,如果下垂或侧移过大,就会影响列车的平稳运行;再如机床主轴,即使强度满足要求,但如果变形过大影响加工精度,也不能正常使用。

③ 稳定性要求。要求构件具有足够的保持原有平衡形态的能力。例如,细长直杆受轴向压力作用,当压力增大到一定限度后,就会在侧向干扰力作用下由直线平衡状态过渡到曲线平衡状态。

正常情况下,构件满足了强度、刚度、稳定性三方面的要求后,就能够保证结构安全、正常地发挥使用功能。但是结构的制作仅仅满足安全性、稳定性和变形的要求是不够的,如用建造摩天大厦的材料去建造平房,把火车和重型卡车的轮轴用在轿车上,如此构件的安全性、稳定性和变形的要求确实得到了保证和提高,但显然是不合理的,也是不必要的。在构件和结构设计的过程中,除了要考虑强度、刚度和稳定性三方面的要求外,经济、成本也是必须考虑的内容。任何构件的设计只有

同时满足了上述的各项要求时,才能称之为合理的设计,材料力学恰好能够解决上述问题。

在满足强度、刚度、稳定性的要求下,以最经济的代价为构件确定合理的截面形状和尺寸、选择适宜的材料,为构件设计提供必要的理论基础和计算方法,这就是材料力学的任务。很多情况下,并不是所有的构件都需要校核强度、刚度和稳定性,如氧气瓶通常只校核其强度,传动轴只考虑其强度和刚度。

1-2 变形固体的基本假设

固体材料在外力作用下或多或少总要发生变形,所以把它称为变形固体。在研究构件的强度、刚度和稳定性时,可以略去变形固体的次要性质,抓住主要性质做某些假设,抽象出理想的力学模型。这样可使问题得到简化,并由此得出一般性的理论结果。在材料力学中,对变形固体做如下基本假设:

1. 连续性假设

即认为在固体的整个体积内毫无空隙地充满着物质。实际上,从物质结构上看,各种材料都是由无数颗粒组成的,而且各颗粒的性质也不尽一致,当所考察的物体几何尺度足够大时,颗粒之间空隙的大小和构件尺寸相比极其微小,可以不计。例如常用的金属材料,它是由极微小的晶粒(如每立方毫米的钢料中一般含有数百个晶粒)组成的,如果用晶粒大小的量级去衡量,晶粒之间可能存在空位,各晶粒的性质也不尽相同。然而我们所研究的构件或构件的某一部分,其尺寸远大于晶粒,所以可把金属构件看成是连续体。这样,当研究构件内部的变形与受力等问题时,就可用坐标的连续函数来描述。

2. 均匀性假设

即认为固体内部各处的力学性质相同。对于金属材料而言,单个晶粒的力学性质并不完全相同,但是由于晶粒的排列通常是随机的,金属材料的力学性能是它所含晶粒性质的统计平均值,因而可认为金属构件各处的力学性能是均匀的。

总之,在宏观研究中,我们把变形固体抽象为连续均匀的力学模型,通过试件所测得的材料力学性能,可用于构件内部的任何部位。

3. 各向同性假设

即认为沿固体的各个方向,材料的力学性能均相同。例如金属材料,就单个晶粒来说,其力学性能是有方向性的,但只要晶粒的排列是杂乱无章的,从统计学的观点,材料在各个方向上的力学性能就接近相同了。所以在宏观研究中,一般可将金属材料看成是各向同性的。具有这种性质的材料称为各向同性材料,如钢、玻璃等。

沿不同方向力学性能不同的材料称为各向异性材料。木材、胶合板在各个方

向上的力学性能一般说来是不同的,属于各向异性材料。

另外,除上述基本假设外,还有小变形假设:即认为物体在外载荷(包括热载荷)作用下所产生的弹性变形都是极其微小的,比构件本身的尺寸要小得多。基于此,在对构件进行受力分析时,通常不考虑变形的影响,而仍用变形前的尺寸。

工程材料在载荷作用下均要发生变形,当载荷不超过一定范围时,绝大多数的材料在卸载后均可恢复原状,但当载荷过大时,卸载后有一部分变形将不能消失。能完全消失的那部分变形称为弹性变形,不能消失而留下的变形称为塑性变形。工程上,多数构件在正常工作条件下,均要求材料处于弹性变形阶段。所以,材料力学所研究的大部分问题,多局限于弹性变形范围内。

1-3 外力及其分类

为了研究问题的方便,常把一构件从周围物体中单独取出,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。构件所受到的外力包括载荷和约束反力。

按外力的作用方式可分为表面力和体积力。表面力作用于物体的外表,又可分为分布力和集中力。分布力是连续作用在物体表面的力,如建筑物所受的风压力,船体所受到的水压力等。若外力分布面积远小于物体的表面尺寸,就可看作为作用于一点的集中力,如建筑中立柱对顶板的作用力,火车轮对钢轨的压力等。体积力是连续分布于物体内部各点的力,例如重力和惯性力等。

按外力随时间变化的情况,可分为静载荷和动载荷。若载荷不随时间变化,或变化速率很慢,就可看成静载荷。如建筑物对基础的作用,可以看成静载荷。如果载荷随时间而变化,则称为动载荷。常见的动载荷有随时间做周期性变化的交变载荷和由于物体的运动突然改变而产生的冲击载荷。齿轮传动时,其上每个齿受力是按周期变化的,因此为交变载荷;而打桩机对桩的作用是瞬间完成的,因此为冲击载荷。动载荷作用下,材料的性能不同于静载荷作用时的情况,分析方法也存在差异,但静载荷所建立的理论和分析方法可以作为研究动载荷问题的基础。

1-4 内力和截面法的概念

1. 内力

构件在外力作用下发生变形,其内部各部分之间因相对位置的改变而引起的相互作用力称为内力。我们知道,未受外力作用时,物体的各质点之间的相互作用

力已经存在;当外力作用后,原有的相互作用力会发生改变,这一改变量称为附加内力。材料力学中研究的就是这种附加内力,通常简称为内力。物体受外力作用产生变形的同时,引起了内力,当外力增加使内力超过某一限度时,材料就会破坏。

2. 截面法

对于一个可变形物体,要研究其内部某一点处的受力和变形,通常要用一个通过该点的截面将这个可变形物体假想地截开。

如图 1-1(a)所示物体,为了研究构件内某一点的受力和变形情况,现用通过该点的 I-I 截面将构件一分为二,并取其中任一部分(图中为左边部分)为研究对象,该部分称为分离体。如图 1-1(b)所示,由于构件在外力作用下发生了一定程度的变形,所以构件内部质点间存在有距离的改变,因此,截面 I-I 两侧的质点间有附加力产生,当沿着 I-I 截面假想地将构件分开后,在截开截面上应作用有另一分离体对该分离体的作用力,这些作用力分布在截开截面上的各个部位,是一个分布力系,若将其向截面内某点简化即可获得一个合力和合力矩,如图 1-1(c)所示,该合力和合力矩通常被称为截面上的内力。

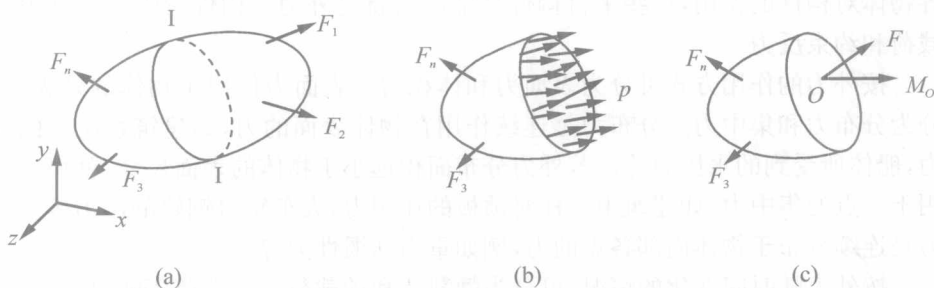


图 1-1

根据静力学平衡原理,对分离体建立静力学平衡方程即可确定截开截面上的内力。这种用截面假想地把构件分成两部分,以显示并确定内力的方法称为截面法。

根据上述过程,截面法的步骤可概括为以下三步:

- ① 欲求某一截面上的内力,就沿该截面将构件假想地一分为二,保留其中的一部分为研究对象,同时弃去另一部分;
- ② 用作用在截面上的内力代替弃去部分对留下部分的作用;
- ③ 对留下部分建立静力学平衡方程,求出未知的内力。

1-5 应力和应变

物体的破坏总是从内力集度最大处开始的,因此只求出截面上分布内力的合力(力和力偶)是不够的,必须进一步确定截面上各点处内力分布的集度。为此,引入应力的概念。

1. 应力

如图 1-2 所示,若在受力物体的某截面上围绕一点 M 取出一个微小面积 ΔA ,该面积上作用的内力的合力为 ΔF , ΔF 的大小和方向与 M 点的位置和 ΔA 的面积有关。 ΔF 与 ΔA 的比值 $\frac{\Delta F}{\Delta A}$ 为面积 ΔA 上的内力的平均集度,称为平均应力。

内力是连续地作用在整个截面上的,在此微小面积上的分布会随着 ΔA 的减小而逐渐趋于均匀,当 ΔA 趋于无穷小时,获得的极限就称为 M 点处的应力,具体表示如下:

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

从表达式的物理意义来理解,应力指的就是内力的集度,其量纲是“力/长度²”。国际单位制中,应力的单位是帕斯卡,简称帕(Pa), $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$,常用单位有 MPa 和 GPa, $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$, $1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa}$ 。



图 1-2

为了分析材料破坏的原因,通常将作用在截面上的应力沿垂直于截面和相切于截面的两个互相垂直的方向分解,其中垂直于截面的应力分量用 σ 表示,相切于截面的应力分量用 τ 表示; σ 称为正应力, τ 称为剪应力或切应力。 p 、 σ 、 τ 三者之间具有如下关系:

$$p = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2} \quad (1-2)$$

2. 应变

变形物体在外力作用下,其形状和尺寸都将发生改变,即发生变形。构件发生变形过程中,其内部任意一点都将产生位置的移动,这种移动称为线位移。同时,构件上的线段或平面还将发生转动,这种转动称为角位移。因物体的刚体运动也

可产生线位移和角位移,因此物体的变形要用线段长度和角度的改变来描述,为此引入应变的概念。

(1) 线应变

图 1-3(a) 所示为从构件中取出的棱边边长分别为 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 的微小六面体(当六面体的边长趋于无穷小时称为单元体),把这个六面体投影到 xOy 平面上,如图 1-3(b) 所示。构件受力变形后,单元体每一点都发生了位移, A, B, C, D 分别移动到 A', B', C', D' , 线段 AB 的原长为 Δx , 变形后为线段 $A'B'$, 长度为 $\Delta x + \Delta s$ 。这里 $\Delta s = \overline{A'B'} - \overline{AB}$, 代表线段 AB 的长度变化。

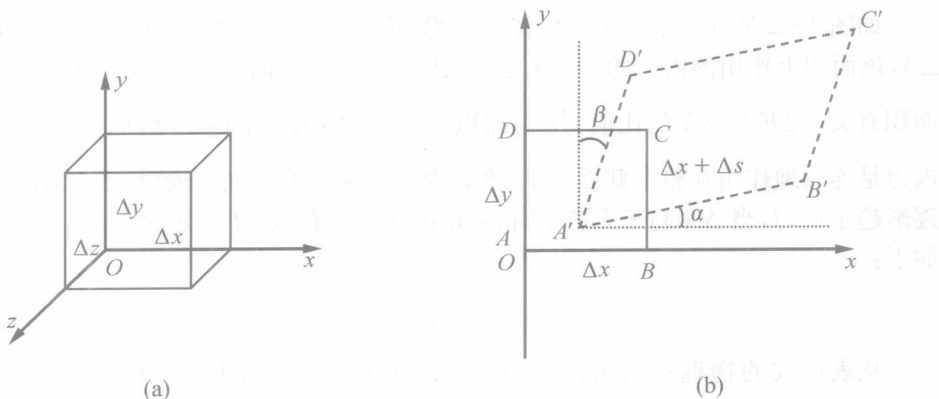


图 1-3

将线段 AB 的长度变化与原长的比值记为 ϵ_m :

$$\epsilon_m = \frac{\overline{A'B'} - \overline{AB}}{\overline{AB}} = \frac{\Delta s}{\Delta x} \quad (1-3)$$

用 ϵ_m 表示线段 AB 每单位长度的平均伸长或缩短,称为平均应变。如果 B 点无限接近 A 点,则线段 AB 趋近于 0, ϵ_m 的极限为

$$\epsilon = \lim_{\overline{AB} \rightarrow 0} \frac{\overline{A'B'} - \overline{AB}}{\overline{AB}} = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta x} \quad (1-4)$$

ϵ 称为 A 点沿 x 方向的线应变或简称为线应变。同理,可以得到 y 和 z 方向的线应变。

线应变的物理意义是构件中一点沿某一方向变形量的大小。线应变的量纲为“长度/长度”。

(2) 角应变

棱边长度发生改变的同时,相邻棱边之间的夹角通常也发生变化。图 1-3(b) 中,当 $\overline{A'B'} \rightarrow 0, \overline{A'D'} \rightarrow 0$ 时,两棱边直角改变量 $\gamma = \alpha + \beta$, 这种直角的改变量称为 A 点在 xOy 内的切应变或角应变。切应变的量纲是“度”。

1-6 杆变形的的基本形式

工程实际中的杆件可能受到各式各样的外力作用,故杆件的变形也可能是各种各样的,但概括起来只有4种基本变形,具体表述如下:

① 轴向拉伸或压缩:杆变形由大小相等、方向相反且作用线与杆轴线相重合的外力所引起,如图1-4(a)、(b)所示,表现为沿杆件轴向的伸长或缩短。如桁架的杆件、活塞连杆等的变形都属于轴向拉伸或压缩变形。

② 剪切:杆的变形由一对大小相等、方向相反且作用线相距很近的横向外力所引起,如图1-4(c)所示,表现为受剪变形的两部分沿外力作用方向发生相对错动。如铆钉、销钉、螺栓等连接构件的变形都属于剪切变形。

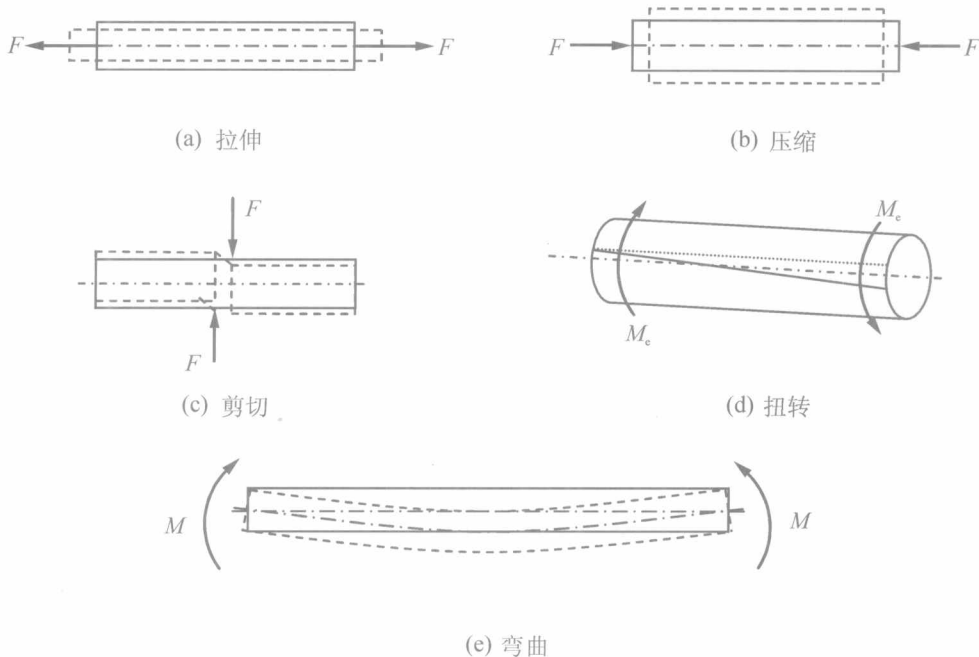


图1-4 基本变形

③ 扭转:杆的这种基本变形是由一对转向相反、作用在垂直于杆轴线的二平面内的力偶所引起的,如图1-4(d)所示,表现为杆件的任意两个横截面发生绕轴线的相对转动。如汽车的传动轴、电机主轴等的变形都属于扭转变形。

④ 弯曲:杆的变形由一对大小相等、转向相反、作用面均垂直于杆件轴线的两个力偶引起,如图1-4(e)所示,表现为杆件的任意两个横截面发生绕轴线的相对

转动。如建筑物中的梁、各种转轴等的变形都属于弯曲变形。

实际受力杆件的变形多为上述几种基本变形形式的组合,这种情况称为组合变形。常见的有弯曲与轴向拉伸(压缩)组合、弯曲和扭转组合、扭转与轴向拉伸(压缩)组合等形式。我们将先分别研究 4 种基本变形形式下的强度和刚度计算,在此基础上再讨论组合变形。至于压杆的稳定性问题,将在后续章节专门讨论。

第2章 轴向拉伸与压缩

2-1 工程实例

在工程实际和日常生活中,有许多杆件会发生轴向拉伸或压缩变形,下面通过对杆件轴向拉伸或轴向压缩的受力分析和变形分析,介绍材料力学分析内力的基本方法,研究材料的力学性能,解决轴向拉(压)杆件的强度和刚度问题。

在现实生活中,杆件发生轴向拉伸或压缩变形的实例很多。例如,图2-1所示的三角构件中,BC杆受到轴向拉力的作用,沿杆件轴向产生伸长变形;而AB杆则受到轴向压力的作用,沿轴线产生缩短变形。又如图2-2(a)中的桁架结构,其中杆件1、2为受压杆件,杆件3、4、5为受拉杆件。再如图2-2(b)中的螺栓紧固两钢板时,螺栓受垂向拉力作用发生拉伸变形。上述构件均是因两端沿轴线方向受到拉力(压力)而伸长(缩短)的直杆,这类构件称为拉杆(或压杆)。

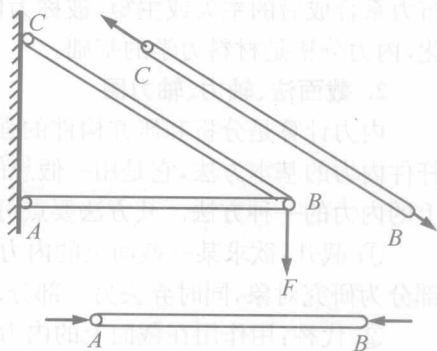
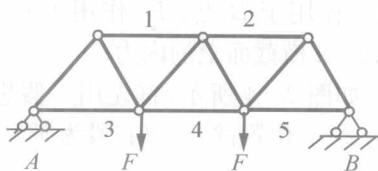
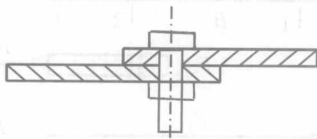


图 2-1



(a)



(b)

图 2-2

综合以上所述可以看出,工程实际问题中的拉伸或压缩杆件可以简化为等截面直杆,即如图2-3所示。这些轴向拉(伸)、压(缩)杆的受力与变形特点为:

① 受力特点:外力或外力的合力的作用线与杆件的轴线重合。

② 变形特点:沿杆件轴线方向的纵向伸长或缩短,沿横截面方向的横向变细或变粗。

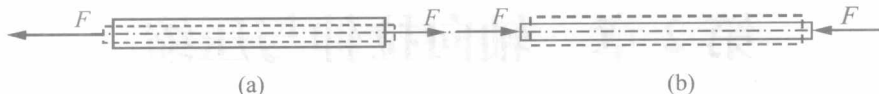


图 2-3

2-2 截面上的内力

1. 内力

结构构件在受到载荷作用时,构件的形状和尺寸大小将发生变化,构件内部各质点的位置也会发生相应的变化,于是构件内部质点间就会产生相互作用的附加内力。根据连续性假设,各质点间相互作用的附加内力应是连续分布的力系,该分布力系合成后的主矢或主矩,被称为内力。内力的大小随外力和变形的改变而变化,内力分析是材料力学的基础。

2. 截面法、轴力、轴力图

内力计算是分析和研究构件的强度、刚度、稳定性问题的基础,而截面法是求杆件内力的基本方法,它是用一假想的截面将构件截开,由静力平衡条件求出截面上的内力的一种方法。其方法要点可归纳为三个步骤,具体如下:

① 截开:欲求某一截面上的内力,就沿该截面假想地把构件一分为二,保留一部分为研究对象,同时弃去另一部分。

② 代替:用作用在截面上的内力来代替弃去部分对留下部分的作用。

③ 平衡:建立保留部分的静力学平衡条件,由平衡条件求出该截面上内力的大小和方向。

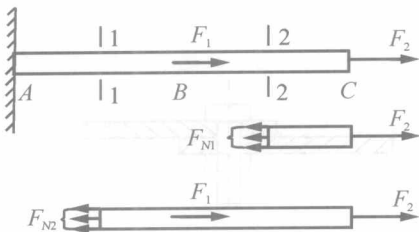


图 2-4

例 2-1 如图 2-4 所示,一杆件 AC 受轴向力 F_1 作用于 B 点、 F_2 作用于 C 点,试求 1-1、2-2 横截面上的内力。

解 如图 2-4 所示,首先用一假想截面将杆件沿 2-2 位置截开,取右段为研究对象,弃去左段。

用分布内力的合力 F_{N1} 来代替左段对右段的作用。

由平衡条件 $\sum F_x = 0$ 可得

$$F_2 - F_{N1} = 0$$