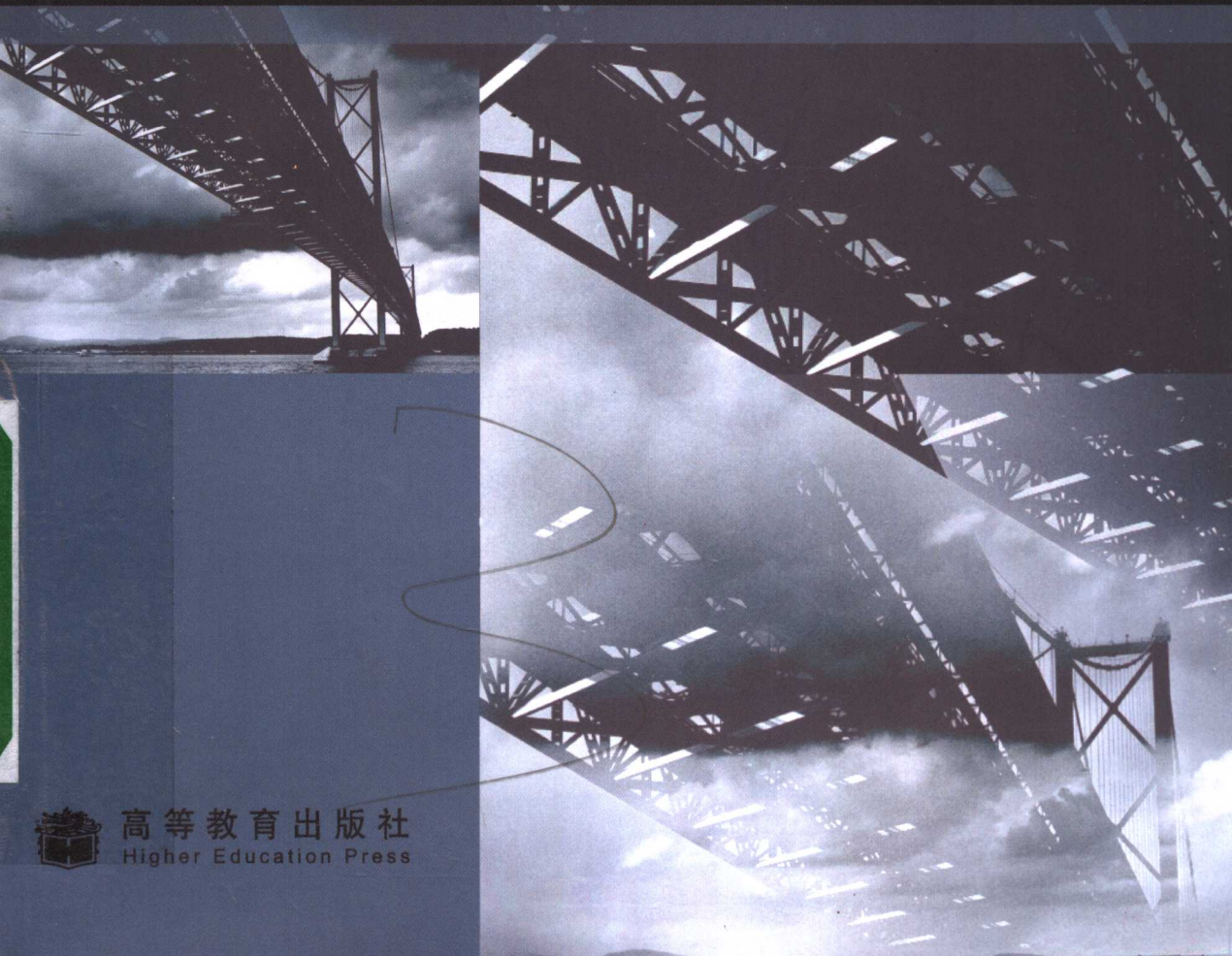




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

材料力学

■ 王世斌 亢一澜 主编 王世斌 亢一澜 王燕群 侯振德 编著



高等教育出版社
Higher Education Press

TB301/144

2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

材 料 力 学

王世斌 亢一澜 主编

王世斌 亢一澜 王燕群 侯振德 编著



高等教育出版社

Higher Education Press

内容简介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书根据教育部高等学校力学教学指导委员会新修订的课程教学基本要求,对已有教学内容和编排进行了适当调整,突出基本点和重点内容,注重加强工程的概念,适当引入和更新了部分教学内容,并且增加了研究性学习的有关内容。

全书内容包括:绪论,轴向拉伸、压缩与剪切,扭转,弯曲内力,弯曲应力,弯曲变形,应力状态与强度理论,压杆稳定,疲劳强度,能量方法,材料与构件的非线性力学行为及附录。

本书可作为高等学校机械、航空、航天、土建、水利、船舶、海洋及相关专业的材料力学课程教材。

本书配有电子教案。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学/王世斌,亢一澜主编;王世斌等编著. —北京:
高等教育出版社, 2008. 1

ISBN 978 - 7 - 04 - 022679 - 9

I. 材… II. ①王…②亢…③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 (2007) 第 190095 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010 - 58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本 787 × 960 1/16
印 张 24.75
字 数 460 000

购书热线 010 - 58581118
免费咨询 800 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2008 年 1 月第 1 版
印 次 2008 年 1 月第 1 次印刷
定 价 28.40 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 22679 - 00

前 言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,以教育部高等学校力学教学指导委员会新修订的课程基本要求为基准,在国家工科力学基础课程教学基地教学改革和课程建设的基础上,结合工程教育改革,以提高教学质量为目标,坚持继承和创新相结合,博采了国内外优秀教材的长处,对已有教学内容和章节编排进行适当调整,使其难易适度,突出基本点和重点内容,适当引入和更新了部分教学内容。本书通过加强工程概念,使教学内容具有明确的工程应用背景;在材料性质基本假定部分,除均匀连续、各向同性、小变形假定外,适当引入材料非连续(各向异性)、几何非连续(缺陷)的问题;在材料性能方面,引入新的工程材料,如复合材料(力学性能的简单概念);引入塑性概念,扩展低碳钢和铸铁为主体的内容体系,进一步强化学生的工程意识、创新意识。本教材内容设置知识延伸和扩展窗口,为学生的研究性学习和专题研究提供指导。近年来,本教材的教学内容在天津大学工科专业中进行了教学实践,取得了良好的教学效果。

本书共分十二部分,其中,第1、2章由王燕群编写,绪论、第3、4、5、7章由王世斌编写,第6、8章由亢一澜编写,第9、10章由侯振德编写,附录A由赵志岗编写。全书由王世斌统稿。本教材承大连理工大学郑芳怀教授审阅,提出了许多中肯的意见,同时还得到了天津大学国家工科力学基础课程教学基地和天津大学力学工程实验教学示范中心的老师们的关心和支持。谨此一并致谢!

由于编者水平有限,书中难免有不足之处,欢迎读者批评指正。

编 者

2007年9月

目 录

绪论	1
§ 1 材料力学的任务	1
§ 2 材料力学的基本假设	1
§ 3 材料力学的研究对象及变形形式	2
§ 4 内力、截面法和应力	4
第 1 章 轴向拉伸、压缩与剪切	6
§ 1.1 概述	6
§ 1.2 轴力和轴力图	6
§ 1.3 拉压杆件的应力与变形	8
§ 1.4 工程材料的力学性能简介	14
§ 1.5 许用应力和强度条件	27
§ 1.6 简单桁架的结点位移计算	31
§ 1.7 应力集中	34
§ 1.8 超静定问题及解法	35
§ 1.9 连接构件的实用计算	38
§ 1.10 问题与研究	44
习题	52
第 2 章 扭转	63
§ 2.1 概述	63
§ 2.2 扭矩与扭矩图	64
§ 2.3 薄壁筒扭转	66
§ 2.4 圆轴扭转时的应力与变形	68
§ 2.5 圆轴扭转的强度与刚度计算	72
§ 2.6 问题与研究	75
习题	82
第 3 章 弯曲内力	90
§ 3.1 概述	90
§ 3.2 弯曲内力——剪力与弯矩	92
§ 3.3 剪力图与弯矩图	95
§ 3.4 弯矩、剪力与分布载荷集度之间的关系	100
§ 3.5 平面刚架的内力图	103

§ 3.6 问题与研究	105
习题	107
第4章 弯曲应力	113
§ 4.1 概述	113
§ 4.2 平面弯曲正应力	114
§ 4.3 弯曲切应力及强度条件	121
§ 4.4 薄壁截面梁的弯曲切应力	126
§ 4.5 梁的合理截面形状与合理受力	131
§ 4.6 非对称弯曲	134
§ 4.7 双向弯曲、弯曲与拉压的组合	139
§ 4.8 问题与研究	144
习题	149
第5章 弯曲变形	161
§ 5.1 概述	161
§ 5.2 梁弯曲变形的度量——挠度和转角	161
§ 5.3 挠曲线的近似微分方程	162
§ 5.4 积分法求梁变形	163
§ 5.5 叠加法求梁变形	167
§ 5.6 弯曲刚度问题	174
§ 5.7 简单超静定梁	178
§ 5.8 问题与研究	182
习题	186
第6章 应力状态与强度理论	193
§ 6.1 概述	193
§ 6.2 两向应力状态的解析法	195
§ 6.3 两向应力状态的图解法——莫尔圆	200
§ 6.4 三向应力状态与广义胡克定律	206
§ 6.5 强度理论	215
§ 6.6 扭弯组合与扭弯拉(压)组合变形	224
§ 6.7 问题与研究	228
习题	236
第7章 压杆稳定	246
§ 7.1 概述	246
§ 7.2 细长压杆的临界力	248
§ 7.3 临界应力总图	253
§ 7.4 压杆稳定条件与合理设计	256
§ 7.5 问题与研究	259
习题	262

第 8 章 疲劳强度	269
§ 8.1 概述	269
§ 8.2 材料的疲劳极限	270
§ 8.3 构件的疲劳极限	273
§ 8.4 问题与研究	275
习题	278
第 9 章 能量方法	280
§ 9.1 概述	280
§ 9.2 应变能与余应变能	280
§ 9.3 克拉贝隆定理	283
§ 9.4 互等定理	283
§ 9.5 卡氏定理	285
§ 9.6 虚功原理	288
§ 9.7 单位载荷法	291
§ 9.8 冲击应力分析	296
§ 9.9 用能量法分析超静定问题	300
§ 9.10 问题与研究	308
习题	311
第 10 章 材料与构件的非线性力学行为	322
§ 10.1 概述	322
§ 10.2 典型工程材料的塑性简化模型	322
§ 10.3 拉伸和压缩杆系的弹塑性分析	323
§ 10.4 圆轴的弹塑性扭转	325
§ 10.5 梁的弹塑性弯曲	328
习题	334
附录 A 截面设计的几何学基础	337
附录 B 型钢规格表	358
附录 C 习题答案	371
参考文献	386

绪 论

§ 1 材料力学的任务

工程实际中的各类机械和结构都是由零部件组成的,这些零部件统称为构件。工程机械和结构在工作中,其构件就会受到外力作用,该外力称为**载荷**。构件在载荷作用下其几何尺寸和外形都会发生变化,称之为**变形**。构件的变形分为两类:一类是外力解除后可消失的变形,称为**弹性变形**;另一类是外力解除后不能消失的变形,称为**塑性变形**。

材料力学是固体力学的一个分支,通过研究物体(构件)在外力作用下的力与变形、破坏的规律,建立起基础理论和计算方法,使设计构件满足以下三方面的要求:

① **强度** 指构件抵抗破坏的能力,在一定的外力作用下构件不发生断裂或显著的塑性变形。

② **刚度** 指构件抵抗变形的能力,在一定的外力作用下构件不发生过大的变形。例如,机床的主轴变形过大将影响加工精度,桥式吊车梁的下垂变形过大则影响工作。

③ **稳定性** 指构件维持其原有平衡形式的能力。实践发现,有些构件在特定的载荷作用下,将不能维持其原有的平衡形式。例如,轴向受压的细长直杆,当作用力达到或超过一定数值时,直杆会突然变弯,称之为失稳。

构件具有足够的强度、刚度和稳定性是保证构件正常、安全工作的基本要求。在此基础上,设计构件时还应考虑合理选用材料和降低成本等。

§ 2 材料力学的基本假设

材料力学所研究的是可变形固体,因材料不同,其具体的组成和微观结构更是非常复杂。为此,采用如下假设对其简化。

1. 连续均匀性假设

假定物体在其占有的空间内毫无空隙地充满了物质,且各点的力学性能是

完全一样的。物体在变形前是连续的,变形后仍然是连续的,既不产生新的空隙,也不发生重叠。由于构件的宏观尺寸远大于物质的基本粒子间的间隙,统计学观点认为:这些间隙的存在对物质的宏观性能的影响可以忽略不计。

2. 各向同性假设

假定物体沿各个方向均具有相同的力学性能,这仅在宏观上成立。例如,金属由晶粒组成,沿各个方向的晶粒具有不同的力学性能,但金属构件中包含的晶粒极多,而且在排列上又是随机的,因此,在宏观尺度上,金属仍呈现为各向同性材料。工程中也有各向异性材料,如碳纤维增强复合材料、木材等。实践证明:在连续均匀、各向同性假设基础上建立起来的材料力学理论和计算方法基本上符合真实构件在外力作用下的表现,因此这些假设是成立的。

3. 小变形假设

假设构件在外力作用下几何尺寸的改变量与原始尺寸相比非常小。在考虑构件的强度和刚度问题时,往往忽略变形的影响,仍按变形前的几何形状和原始尺寸考虑。这样不仅简化了计算过程,同时也能满足工程计算的精度要求。

§3 材料力学的研究对象及变形形式

工程中的构件外形多种多样,可大致归纳为四类,即杆、平板、壳和块体(图1)。

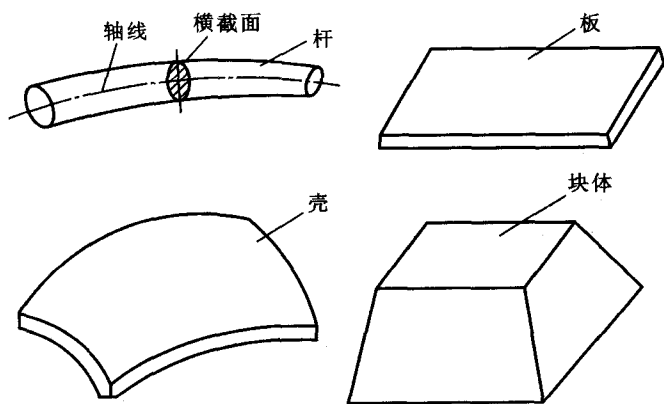


图 1

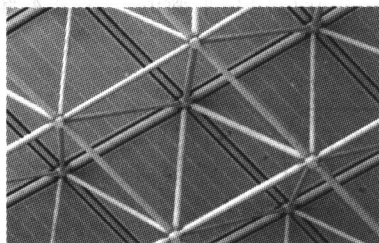
如果构件某一个方向的尺寸远大于其他两个方向的尺寸,该构件称为杆件。杆件的形状和尺寸通过轴线和横截面描述,轴线通过各横截面的形心并与横截面相互垂直。根据轴线形状不同,杆件分为直杆和曲杆两类。根据横截面尺寸

变化情况,又可分为等截面杆和变截面杆两类。

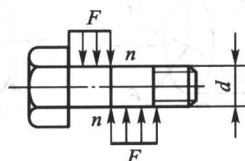
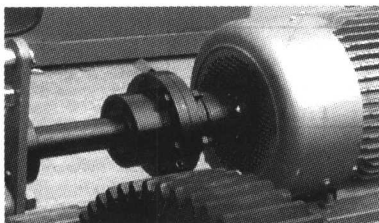
如果构件的一个方向尺寸远小于其他两个方向的尺寸,该构件称为板件。平分板件厚度的几何面称为中面。中面为平面的称为平板,中面为曲面的称为壳。

三个方向的尺寸相差不多,属同一量级的构件称为块体。

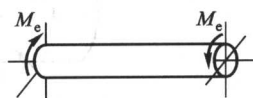
材料力学的研究对象主要是杆和由若干杆组成的杆系,同时也研究一些形状和受力简单的平板和壳。构件在外力作用下会发生变形,其变形形式因载荷不同可以多种多样。但最基本的变形形式是拉伸(压缩)、剪切、扭转和弯曲四种。由这四种基本变形可以组合成复杂的变形。图2给出了这四种基本变形的实例。空间桁架中的杆在受载时主要发生拉伸(压缩)变形(图2a)。法兰盘上的螺栓在工作时发生剪切变形(图2b),而传动轴则发生扭转变形(图2c)。桥式起重机的横梁在工作时的变形形式是弯曲(图2d)。



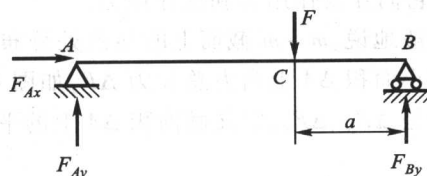
(a) 拉伸(压缩)



(b) 剪切



(c) 扭转



(d) 弯曲

图2

§ 4 内力、截面法和应力

构件在外力(包括载荷和约束力)作用下发生变形。构件内部相邻两部分之间由此产生的相互作用力称为内力。分析构件的内力,常常采用截面法。以分析图 3a 中 $m-m$ 截面上内力为例说明截面法的分析过程。

① 假想地沿 $m-m$ 截面把物体切分为 A 、 B 两部分。

② 选择 A 部分作为研究对象。在 A 部分的 $m-m$ 截面上作用着 B 部分对 A 部分的作用力。该作用力以分布内力形式作用在 $m-m$ 截面的各点上。将截面上这些分布内力合成后通常得到主矢 F 和主矩 M (图 3b)。

③ 由于构件在整体上是平衡的,被切出的 A 部分也应是平衡的。利用 A 部分的静力平衡条件可以求出主矢 F 和主矩 M 。

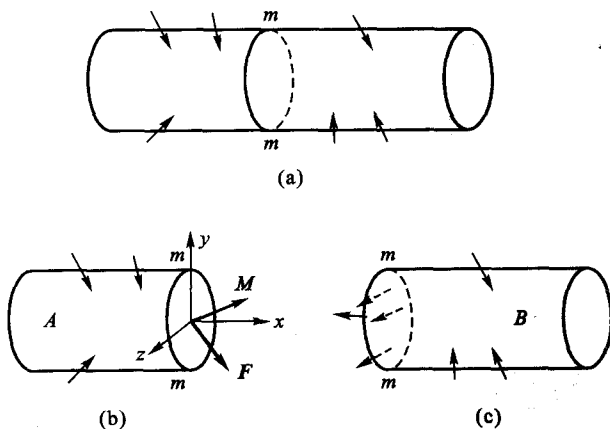


图 3

需要指出的是:如果以 B 部分为研究对象,也可求出 A 部分对其作用力。显然,它们互为作用力和反作用力。

一般地说, $m-m$ 截面上的各点处分布内力的大小和方向均不同。在 C 点周围微小面积 ΔA 上内力总和为 ΔF ,如图 4 所示。 ΔF 沿截面法线和切线的分量分别是 ΔF_N 、 ΔF_s ,定义微面积 ΔA 上的平均应力、平均正应力和平均切应力分别为:

$$p_m = \frac{\Delta F}{\Delta A}, \quad \sigma_m = \frac{\Delta F_N}{\Delta A}, \quad \tau_m = \frac{\Delta F_s}{\Delta A} \quad (1)$$

当 $\Delta A \rightarrow 0$ 时,取极限求得 C 点处的应力、正应力和切应力分别为:

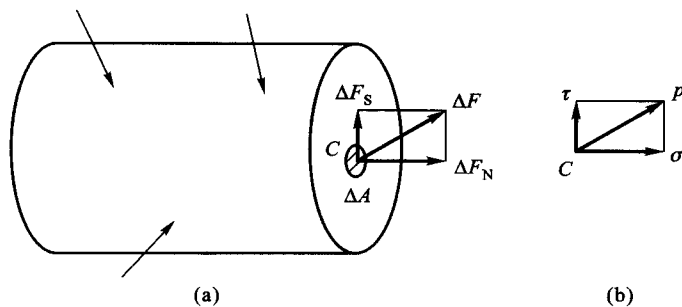


图 4

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A}, \quad \sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_N}{\Delta A}, \quad \tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_S}{\Delta A} \quad (2)$$

显然, 应力 p 沿截面的法向与切线分解后分别得到正应力 σ 和切应力 τ 。应力的国际单位是 Pa (简称帕), $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ (牛顿/米²)。材料力学中常用 MPa (10^6 Pa) 或 GPa (10^9 Pa)。

第 1 章 轴向拉伸、压缩与剪切

§ 1.1 概 述

在工程结构和机械中,常有发生轴向拉伸或压缩变形的构件,如拧紧的螺栓,油缸的活塞杆,张紧的钢索,桁架中的杆件等均是承受拉伸或压缩的实例。这类构件的受力简图如图 1-1 所示。杆件沿轴线受到向外或向内的外力或外力的合力作用,杆件发生轴向伸长或缩短变形。这种变形形式称为轴向拉伸或压缩。

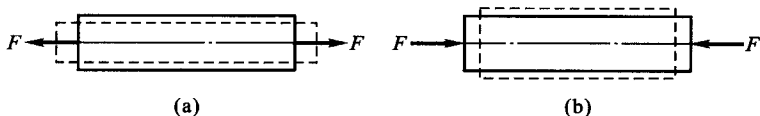


图 1-1

本章主要研究拉压杆件的强度和刚度计算,材料在拉伸与压缩时的力学性能等。此外,还将对连接构件的强度问题进行初步分析,并介绍实用计算方法。

§ 1.2 轴力和轴力图

首先研究直杆在轴向拉伸或压缩时的内力。以图 1-2a 所示的轴向拉伸直杆为例,求该杆 $m-m$ 横截面的内力。为此假想用一平面在 $m-m$ 截面处将杆截开,取左半部分为研究对象,如图 1-2b 所示。由于直杆原来处于平衡状态,切开后各部分仍应保持平衡。由平衡方程 $\sum F_x = 0$,可知 $m-m$ 截面上必有一个作用线与杆轴重合的内力 F_N ,并且 $F_N = F$ 。如果以右半部分为研究对象,如图 1-2c 所示,同理可得内力 $F'_N = F$ 。

截面内力 F_N 及 F'_N 的作用线与轴线重合,称为轴力,并且规定当杆件受拉,轴力 F_N 背离截面时为正号;反之,当杆件受压, F_N 指向截面时为负号。这样,无论以截面哪一侧为研究对象,求得的轴力正负号都相同。因此,以后讨论中不必再区别 F_N 与 F'_N ,一律用 F_N 表示。上述将杆件假想地切开,利用平衡方程建立

内力和外力之间的关系,进而确定截面内力的方法,就是绪论中提到的截面法。它是材料力学中分析内力的一个基本方法。

图 1-2a 所示的直杆只在两端受拉力,每个截面上的轴力 F_N 都等于 F 。如果直杆承受多于两个外力时,直杆的不同段上将有不同的轴力。为了表示轴力随横截面位置的变化,需要画出轴力沿杆轴线变化的图形,即轴力图。

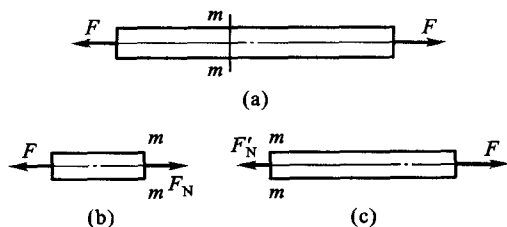


图 1-2

例 1-1 试画出图 1-3a 所示的直杆的轴力图。

解: 此直杆在 A、B、C、D 点承受轴向外力。

先求 AB 段轴力。在段内用任一横截面 1-1 截开,考察左段(图 1-3b),设在截面上作用拉力 F_{N1} 。由此段的平衡方程 $\sum F_x = 0$ 得

$$F_{N1} - 6 = 0, \quad F_{N1} = +6 \text{ kN}$$

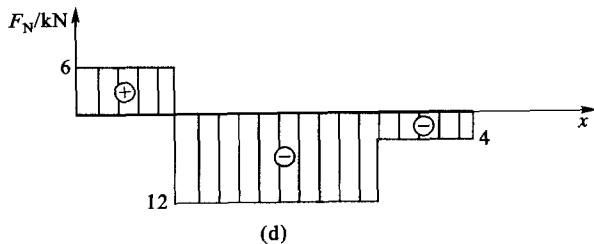
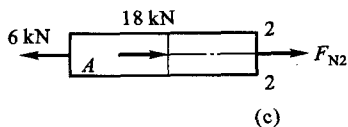
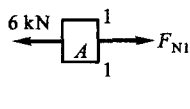
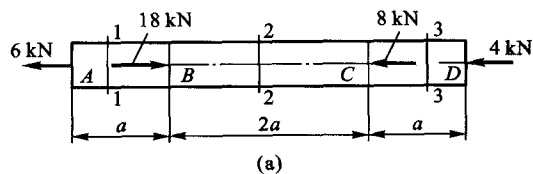


图 1-3

F_{N1} 为正号说明原先假设拉力是正确的,同时也表明轴力是正的。 AB 段内任一横截面的轴力都等于 $+6 \text{ kN}$ 。

再求 BC 段轴力,在 BC 段内用任一横截面 2-2 截开,考察左段(图 1-3c),仍设在截面上作用拉力 F_{N2} ,由 $\sum F_x = 0$ 得

$$-6 + 18 + F_{N2} = 0, \quad F_{N2} = -12 \text{ kN}$$

F_{N2} 为负号说明原先假设拉力的方向是不对的(应为压力),同时也表明轴力 F_{N2} 是负的。 BC 段内任一横截面的轴力都等于 -12 kN 。

同理,得 CD 段内任一横截面的轴力都是 -4 kN 。

然后以平行于杆轴线的坐标 x 表示横截面的位置,以垂直杆轴线的坐标表示对应横截面的轴力,即可按选定的比例尺画出轴力图(简称 F_N 图),如图 1-3d 所示。由此图可知数值最大的轴力发生在 BC 段内。

由上例可以看出,利用截面法画轴力图时,在切开的截面上总是设出正轴力(拉力) F_N ,然后由 $\sum F_x = 0$ 求出 F_N ,如 F_N 为正说明是正轴力(拉力),如得负则说明是负轴力(压力)。

§ 1.3 拉压杆件的应力与变形

1.3.1 横截面上的应力

应用截面法,可求得轴向拉压时任一横截面上的轴力。要求出各点处分布内力的集度——应力,则须知该截面上的内力分布规律。先取一等截面直杆,在其表面画出许多与轴线平行的纵线和与轴线垂直的横线,如图 1-4a 所示。在两端施加轴向拉力 F 后,杆件发生变形,如图 1-4b 所示。

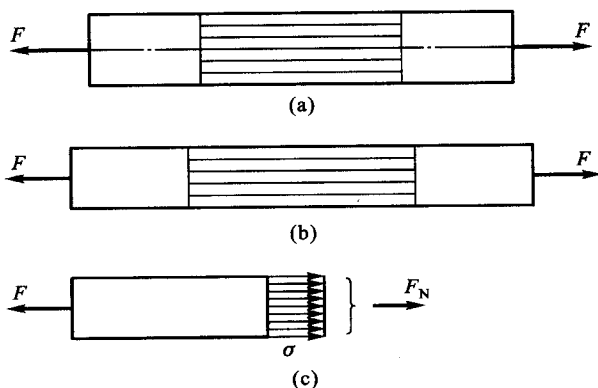


图 1-4

我们发现所有纵线的伸长都相等,而横线保持直线,并仍与纵线垂直,于是可做出如下平面假设:直杆在轴向拉压时横截面仍保持为平面。如果把杆设想为由无数纵向纤维组成,根据各纤维的伸长都相同及均匀连续性假设,可知每根纤维所受的力也相等,如图 1-4c 所示。据此可知,轴力 F_N 均匀分布在杆的横截面上。若横截面面积为 A ,于是

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

当轴力为正号(拉伸)时,正应力也为正号,称为拉应力;当轴力为负号(压缩)时,正应力为负号,称为压应力。式(1-1)适用于横截面为任意形状的等截面直杆。计算正应力时也可将轴力的绝对值直接代入,而根据变形判断正应力的正负号。

至于杆端加力方式对杆件横截面上应力分布的影响,研究表明,杆端加力方式的不同,只对杆端附近截面的应力分布有影响,受影响的长度不超出杆的横向尺寸。上述结论称为圣维南(Saint-Venant)原理。即杆端有不同的外力作用时,只要它们静力等效,则对离开杆端稍远截面上的应力分布没有影响。这一原理对于其他变形形式也适用。至于加力点附近的应力,因分布情况比较复杂,必须另行讨论。

1.3.2 斜截面上的应力

应用截面法研究斜截面上的应力。

假想将受拉杆沿任意斜截面 $k-k$ 切开,如图 1-5a 所示,将杆分成两部分,取左段为研究对象。斜截面 $k-k$ 上作用着与杆的轴线平行且均匀分布的应力 p_α ,如图 1-5b 所示。这里, $k-k$ 截面的外法线 n 与轴线 x 的夹角为 α ,规定自 x 轴逆时针方向转向 n 时, α 为正号,反之为负号。

设截面 $k-k$ 的面积为 A_α ,横截面面积为 A ,则

$$p_\alpha = \frac{F}{A_\alpha}, \quad A_\alpha = \frac{A}{\cos \alpha}$$

根据平衡条件,有

$$\sum F_x = 0, \quad p_\alpha \cdot A_\alpha - F = \frac{p_\alpha A}{\cos \alpha} - F = 0$$

所以

$$p_\alpha = \frac{F}{A} \cos \alpha = \sigma \cos \alpha$$

式中, σ 为杆横截面正应力, $\sigma = \frac{F}{A}$ 。

将应力 p_α 沿截面 $k-k$ 的法线和切线方向分解,如图 1-5c 所示,得斜截面上的正应力和切应力

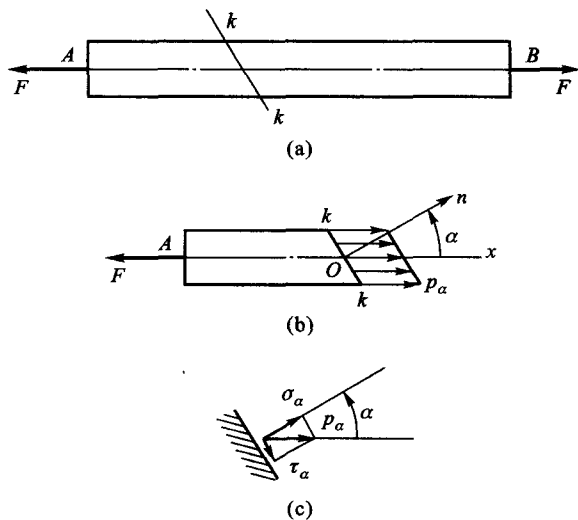


图 1-5

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\alpha} &= p_{\alpha} \cdot \cos \alpha = \sigma \cos^2 \alpha \\ \tau_{\alpha} &= p_{\alpha} \cdot \sin \alpha = \frac{\sigma}{2} \sin 2\alpha \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

应力 p_{α} 称为全应力。由此可见,在拉压杆的斜截面上有正应力和切应力同时存在,且大小随斜截面的方位 α 而变化。前面已经规定了正应力的正负号,至于切应力的正负号,按以下规则:若切应力对所在截面内侧任一点之矩为顺时针方向时,为正号;反之,则为负号。图 1-5c 的切应力 τ_{α} 为正号。由式(1-2)看出,当 $\alpha=0$ 时 σ_{α} 最大, $\sigma_{\max} = \sigma$; 当 $\alpha=45^{\circ}$ 时 τ_{α} 最大, $\tau_{\max} = \frac{\sigma}{2}$; 当 $\alpha=-45^{\circ}$ 时, τ_{α} 最小, $\tau_{\min} = -\frac{\sigma}{2}$ 。故轴向拉、压杆件的最大正应力发生在横截面上,数值最大的切应力发生在与轴线成 $\pm 45^{\circ}$ 的斜截面上,其值为最大的正应力的一半。

1.3.3 拉压杆件的变形

下面研究拉压杆件的变形计算。

1. 轴向变形和胡克定律

直杆原始长度为 l , 在轴向拉伸或压缩下, 杆的长度变为 l' , 如图 1-6a 所示, 直杆的绝对伸长(或缩短) $\Delta l = l' - l$ 称为轴向变形, 当 $l' > l$ 时, Δl 为正; 反之, Δl 为负。

实验表明, 工程上使用的材料发生变形时都有弹性阶段, 在此范围内, 轴向