

21世纪应用型机电规划教材

材料力学

主 编 陈 振 王庆武



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

21 世纪应用型机电规划教材

材料力学

主编 陈 振 王庆武

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书为 21 世纪应用型机电规划教材丛书之一,是根据材料力学教学大纲的要求,并结合当前时代特点,力求保留国内材料力学教材的结构严谨、逻辑性强等特点,又突出实验与实践教学,编写时注重知识体系的完整性和实用性。增加了实验应力分析内容,增加了工程实际的基础训练习题与思考讨论题,其目的就是针对学生的特点,在对基础理论知识的理解和掌握的基础上,加强实践能力与试验技能的培养。全书共分 12 章,主要内容包括轴向拉伸和压缩、剪切、扭转、平面图形的几何性质、弯曲内力、弯曲应力、弯曲变形、应力状态理论与强度理论、组合变形、压杆稳定、能量法等。

本书可作为普通高等工科、高等职业院校相关专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学 / 陈振, 王庆武主编. --北京:北京航空航天大学出版社, 2011. 3

ISBN 978 - 7 - 5124 - 0346 - 8

I. ①材… II. ①陈… ②王… III. ①材料力学
IV. ①TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 023339 号

版权所有,侵权必究。

材料力学

主编 陈 振 王庆武

责任编辑 刘 晨

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:emsbook@gmail.com 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:12 字数:269 千字

2011 年 3 月第 1 版 2011 年 3 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 978 - 7 - 5124 - 0346 - 8 定价:25.00 元

本书编委

主 编：陈 振 王庆武(佳木斯大学)

副主编：江丽炜 韩庆林 郭晓云(佳木斯大学)

主 审：孙红旗(佳木斯大学)

参 编：高佳丹 叶 琼 张灵丹 林洪波 徐莉丽
邱 洋 陈俊龙 宋欣曙 胡 滔 赵勤佳
陈谢和 余圣辆 林 乐 莫庆莱 鲍春丽
夏静静 姚林峰

前 言

材料力学是工科院校很多专业中一门重要的专业基础课程。

随着现代科学技术的飞速发展,新材料、新技术、新方法不断涌现,所以对教师与学生也提出了新的更高的也非常切合实际的要求。为适应这种要求,我们在总结多年理论与实践教学经验的基础上,并汲取了国内许多优秀教材的长处而编写了本书。在编写过程中,认真按照材料力学教学大纲的要求,并结合当前时代特点,与时俱进,力求保留国内材料力学教材的结构严谨、逻辑性强等特点,又突出实验与实践教学,增加了实验应力分析内容,增加了工程实际的基础训练习题与思考讨论题。其目的就是针对院校学生的特点,在对基础理论知识的理解和掌握的基础上,加强实践能力与试验技能的培养。本书注重理论联系工程实际,反映现代强度设计新方法。各章注意精选适合不同层次学生要求的典型例题、讨论题、思考题和配套习题。

书中的主要符号、术语等完全采用国家标准。本书内容丰富,定位适中,既突出了基本概念和基本理论,又注重了内容上的拓宽和更新;既力求用较少的课时完成基本要求,又为各种不同的需要提供了较大的选择余地,同时加强了工程概念和工程应用的内容。

本书第1、3、10章由陈振编写;第5、7、8章由王庆武编写;第2、4章由江丽炜编写;第6、11章由韩庆林编写;第9、12章由郭晓云编写。

本书可作为普通高等工科、高等职业院校相关专业的教材,也可作为成人教育学院教师、学生及有关工程技术人员的教学参考书。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,欢迎各位读者批评指正。

作 者
2011年1月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 材料力学的任务	1
1.2 可变形固体的基本假设	2
1.3 材料力学中的几个基本概念	3
1.3.1 外力、内力及应力的概念	3
1.3.2 位移、变形与应变	5
1.4 杆件变形的基本形式	7
1.4.1 轴向拉伸或压缩	7
1.4.2 剪 切	7
1.4.3 扭 转	7
1.4.4 弯 曲	8
习 题	8
第 2 章 轴向拉伸与压缩	9
2.1 轴向拉伸与压缩的概念及实例	9
2.2 拉压杆的内力及内力图	10
2.3 拉压杆截面上的应力	11
2.3.1 横截面上的应力	11
2.3.2 斜截面上的应力	13
2.4 拉压杆的变形	14
2.4.1 纵向变形及纵向应变	14
2.4.2 横向变形与横向应变	15
2.4.3 胡克定律	15
2.5 材料在拉伸和压缩时的力学性能	19
2.5.1 材料的拉伸与压缩试验	19
2.5.2 低碳钢拉伸时的机械性质	20
2.5.3 铸铁拉伸时的力学性质	23
2.5.4 材料在压缩时的力学性质	23

目 录

2.6 拉压杆的强度计算	24
2.6.1 许用应力和安全系数	24
2.6.2 轴向拉伸和压缩时的强度计算	25
2.7 拉压杆的超静定问题	27
习 题	29
第3章 剪 切	31
3.1 剪切概述	31
3.2 连接件的剪切与挤压实用计算	32
3.2.1 剪切强度的实用计算	32
3.2.2 挤压强度的实用计算	33
习 题	34
第4章 扭 转	36
4.1 概 述	36
4.2 轴的内力——扭矩及扭矩图	37
4.2.1 轴的外力偶矩的计算	37
4.2.2 轴扭转时的内力、扭矩和扭矩图	37
4.3 薄壁圆筒的扭转	39
4.3.1 薄壁圆筒扭转时的应力	39
4.3.2 薄壁圆筒扭转时的变形	40
4.3.3 剪应力互等定理	41
4.3.4 纯剪切·剪切胡克定律	41
4.4 圆轴扭转时的应力与变形	42
4.4.1 圆轴扭转时横截面上的应力	42
4.4.2 极惯性矩 I_P 和抗扭截面模量 W_P 的计算	44
4.4.3 圆轴扭转的强度条件	46
4.5 圆轴在扭转时的变形和刚度条件	47
4.5.1 圆轴扭转时的变形	47
4.5.2 圆轴扭转时的刚度条件	48
习 题	49
第5章 平面图形的几何性质	52
5.1 形心和静矩	52
5.1.1 形 心	52
5.1.2 静 矩	53
5.1.3 组合图形的静矩和形心	54

5.2 惯性矩和惯性积	55
5.2.1 惯性矩和极惯性矩	55
5.2.2 惯性积	57
5.3 平行移轴公式	57
5.4 惯性矩和惯性积的转轴公式	59
5.4.1 转轴公式	59
5.4.2 主惯性轴与主惯性矩	60
习 题	61
第 6 章 弯曲内力	63
6.1 平面弯曲的概念与梁的分类	63
6.1.1 平面弯曲的概念	63
6.1.2 梁的计算简图	64
6.2 梁的内力——剪力和弯矩	65
6.3 剪力方程与弯矩方程·剪力图与弯矩图	68
6.4 载荷集度、剪力和弯矩之间的微分关系	72
习 题	75
第 7 章 弯曲应力	77
7.1 梁横截面上的正应力	77
7.1.1 弯曲变形的基本假设	77
7.1.2 梁横截面上的正应力	78
7.2 梁横截面上的切应力	81
7.2.1 矩形截面	81
7.2.2 圆形截面	83
7.2.3 工字形截面	84
7.3 梁的弯曲强度条件	84
7.3.1 弯曲正应力强度条件	84
7.3.2 弯曲切应力强度条件	86
7.4 梁的合理设计	88
7.4.1 合理选取截面形状	89
7.4.2 合理设计梁的外形	90
习 题	91
第 8 章 弯曲变形	93
8.1 梁的挠度与横截面转角	93
8.2 梁的挠曲线近似微分方程	94

8.3	积分法求梁的变形	95
8.4	叠加法求梁的变形	98
8.5	梁的刚度条件	100
8.6	超静定梁	101
	习 题	103
第 9 章	应力状态理论与强度理论	106
9.1	应力状态的概念	106
9.2	二向应力状态分析	108
9.2.1	解析法	108
9.2.2	图解法	110
9.3	三向应力状态分析	113
9.4	强度理论	114
9.4.1	强度理论的概述	114
9.4.2	常用的四种强度理论	115
	习 题	117
第 10 章	组合变形	119
10.1	概 述	119
10.2	斜弯曲	120
10.3	弯扭组合变形	124
10.4	弯拉(压)扭组合变形	127
10.5	偏心拉(压)与截面核心	129
	习 题	132
第 11 章	压杆稳定	134
11.1	压杆稳定的概念	134
11.2	压杆的临界力的欧拉公式	135
11.2.1	两端铰支压杆临界力的欧拉公式	135
11.2.2	不同杆端约束情况下压杆临界载荷的欧拉公式	137
11.3	欧拉公式的适用范围·经验公式	138
11.4	压杆的稳定性校核	141
	习 题	143
第 12 章	能量法	145
12.1	应变能及其计算	145
12.1.1	应变能概念	145
12.1.2	应变能的计算	146

12.2 互等定理.....	148
12.3 余 能.....	149
12.4 卡氏定理.....	150
12.4.1 卡氏第一定理.....	150
12.4.2 卡氏第二定理.....	151
12.5 莫尔定理.....	152
习 题.....	159
附录.....	162
附录 A 简单载荷作用下梁的挠度和转角	162
附录 B 型钢规格表	164
参考文献.....	180

第 1 章

绪 论

1.1 材料力学的任务

工程中遇到的各种机械或建筑物都由若干部件(零件)组成。这些部件(零件)称为构件,根据其几何特征可分为杆件、板、壳、块体等。

要保证机械或建筑物安全地工作,显然其组成的各构件需安全地工作。即要有足够的承受载荷的能力,简称为承载能力。如果构件设计薄弱,或选用的材料不恰当,不能安全地工作,将会影响到整体的安全工作,甚至造成严重事故。另一方面,如果构件设计得过于强大,或选用的材料过好,虽然构件、整体都能安全工作,但构件的承载能力不能充分发挥,既浪费材料又增加重量和成本,也是不可取的。

显然,构件的设计是否合理有着相互矛盾的两个方面,即安全性和经济性。既要有足够的承载能力,又要经济、适用。解决这对矛盾正是材料力学的任务所在。材料力学为解决上述矛盾提供理论依据和计算方法。而且,材料力学还在基本概念、基本理论和基本方法等方面,为机械零件、结构力学等后继课程提供了基础。

为了保证整个结构或机械正常地工作,构件应当有足够的的能力负担起应当承受的载荷,因此它应当满足以下要求:

(1) 强度要求。

在规定的载荷作用下,构件不能发生破坏。例如,房屋建筑物的横梁不能折断,隧道不能坍塌,压力容器不能爆裂。强度要求就是指构件应有足够的抵抗破坏的能力。

(2) 刚度要求。

在载荷作用下,构件除了必须满足强度要求外,还要求不能有过大的变形。例如,铁路桥梁在列车通过时若变形过大,则必将影响列车的正常行驶,危及行车安全;机床主轴变形过大,将影响加工精度。刚度要求就是指构件应有足够的抵抗变形的能力。

第1章 绪论

(3) 稳定性要求。

有些细长的受压构件,如房屋中的柱、铁路桁架桥的受压弦杆、千斤顶的螺杆等,应始终维持原有的直线平衡形态,保证不被压弯。稳定性要求就是指构件应有足够的保持原有平衡状态的能力。

构件的强度、刚度和稳定性与其所用的材料有关。同样尺寸、形状的构件,当分别用不同的材料来制作时,它们的强度、刚度和稳定性也各不相同。因此,对构件的强度、刚度和稳定性的研究离不开对材料的力学性质的研究。材料的力学性质需要通过试验的方法来测定。试验研究和理论 research 是材料力学缺一不可的两个基本研究手段。

1.2 可变形固体的基本假设

构件所用的材料从物质结构到力学性能都是各不相同的,在进行强度、刚度和稳定性计算时,需要对材料加以理想化,一方面忽略某些枝节的、次要的因素,使问题得到简化,另一方面抓住主要的、共同的特征,使问题的解答满足工程中所要求的精确度。材料力学对材料有三个基本假设:

(1) 连续性假设。

即认为物体在其整个体积内毫无空隙地充满了物质。实际上变形固体从其物质结构而言,组成固体的粒子之间是有空隙的,但这些空隙的大小和构件的尺寸相比极其微小,故假设固体内部是密实无空隙的。根据这一假设,物体内的一些物理量(例如应力、变形和位移等)就可用位置坐标的连续函数表示,便于利用高等数学中的微积分方法。

(2) 均匀性假设。

即认为物体在其整个体积内材料的结构和性质相同,认为材料质量的分布是均匀的,各点处的力学性能完全相同。就使用最多的金属来说,组成金属的各晶粒的力学性能并不完全相同。但因构件是由为数极多的晶粒无规则地排列组成,物体的力学性能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。根据这一假设,可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。

各向同性假设认为物体在所有方向上均具有相同的物理和力学性能。从微观上讲,大多数工程材料不是各向同性的。例如,金属材料,其单个晶粒呈结晶各向异性,但当它们形成多晶聚集体的金属时,排列无序,从统计平均值的观点,宏观上可认为是各向同性的。这个假设并不是对所有的材料都适用,存在各向异性的材料,如木材、胶合板、纤维增强复合材料等,其中最重要的是正交各向异性。材料力学所研究的对象只限于各向同性可变形固体。

1.3 材料力学中的几个基本概念

1.3.1 外力、内力及应力的概念

1. 外力

外力是指物体所受到的其他物体对它的作用力。

按其来源分类可分为主动力和约束反力。一般而言,主动力是载荷;约束反力是支反力,它是为了阻止物体因载荷作用产生的运动趋势所起的反作用。

按其作用范围分类,可分为表面力和体积力。所谓表面力是指作用于物体表面的力,可进一步分为分布力和集中力。分布力是指连续作用于物体表面的较大面积上的力,如液体等对容器的压力,其量纲是[力/长度²],国际单位制中常用单位是牛顿每平方米(N/m^2)或千牛每平方米(kN/m^2)。所谓体积力是指连续分布于物体内部各点的力如物体的自重和惯性力等,其量纲是[力/长度³],国际单位制中的单位是牛顿每立方米(N/m^3)或千牛每立方米(kN/m^3)。

按载荷随时间变化的情况分类,可把载荷分为静载荷和动载荷。若载荷缓慢地由零增加到某一定值以后即保持不变,或变动很不显著,即为静载荷。动载荷则指的是随时间改变的载荷。按其随时间变化的方式,动载荷又可分为交变载荷与冲击载荷。交变载荷是随时间作周期性变化的载荷,如当齿轮转动时作用于每一个齿上的力都是随时间按周期变化的。冲击载荷则是物体的运动在瞬时发生突然变化所引起的载荷,如汽锤杆在锻压时所受的载荷。

2. 内力

构件受到外力作用而产生变形时,构件内部各质点间的相对位置将发生变化,同时,各质点间的相互作用力也发生了改变。上述相互作用力由于物体受到外力作用而引起的改变量,就是材料力学中所研究的内力。严格地讲,它是由于外力的作用所引起的“附加内力”,通常简称为内力。其特点是:内力随外力增加而增大,但有一定限度,超过这一限度,构件就会发生破坏。

为了揭示在外力作用下构件所产生的内力,确定内力的大小和方向,通常采用截面法。

一个物体受外力作用处于平衡状态,假想用一平面把物体截为 I、II 两部分如图 1-1 所示,则截面上一定存在分布的内力系。由于整体是平衡的,截开的每一部分也必然是平衡的,每一部分原有的外力与截面上所暴露的内力组成平衡力系,利用静力平衡方程可求出内力。这样求出的内力实际上是内力的合力(力或力偶)。

以图 1-2 所示拉杆为例,说明用截面法求受轴向拉(压)杆件内力的步骤。

第 1 步:截断。如果要求杆上任一横截面 $m-m$ 上的内力,就用一假想平面从所求内力处将杆件截开为两部分,如图 1-2(a)所示。

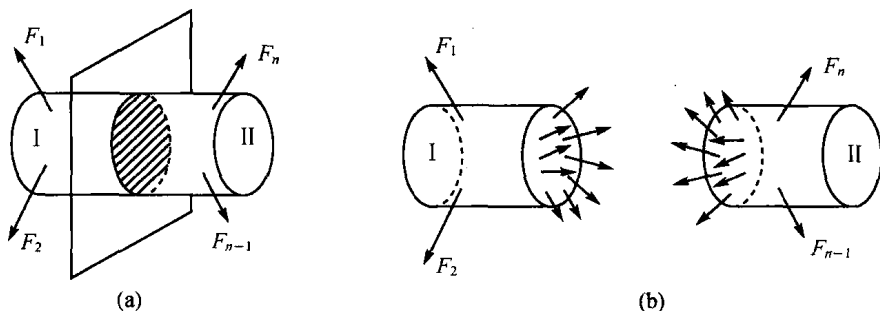


图 1-1

第2步:取出。取出其中的任一部分(如左边部分)弃去另一部分,将原来作用在取出部分上的外力照样画出,如图1-2(b)所示。

第3步:代替。弃去部分对保留部分的作用以作用在截面上的内力代替。根据共线力系的平衡条件可知,内力的合力作用线必与杆的轴线重合,该合力用 N 表示,其指向面为背离截面的方向,如图1-2(b)所示。

第4步:平衡求解。因总体平衡,部分也应平衡,列出静力学平衡方程求解未知内力。由左段的平衡条件:

$$\sum X = 0 \quad N - P = 0$$

得:

$$N = P$$

结果为正,表明所设内力方向正确。取右段计算结果也一样,所得内力与由左段求得的大小相等,但方向相反,如图1-2(c)所示。

对于压杆,也可通过上述步骤求得任一横截面上的内力,但内力为负,表明内力的实际方向是指向截面。

由上述可见,直杆在轴向拉伸或压缩时,横截面上只有作用线与杆轴线重合的内力,这种内力称为轴力。轴力 N 的正负号规定为:背离截面为正,指向截面为负。

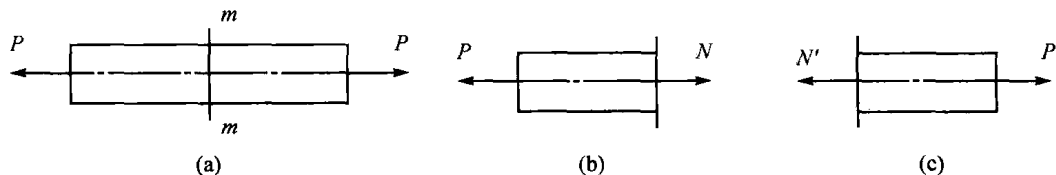


图 1-2

3. 应 力

仅仅靠内力不足以描述构件的强度,因为只考虑内力的大小而不考虑承受此内力的截面

的大小,是不能确定此构件的承载能力的,所以需要讨论内力的密集程度。若内力在截面上是均匀分布的,那么截面上的内力除以截面面积,得到单位面积上的内力,称为应力。

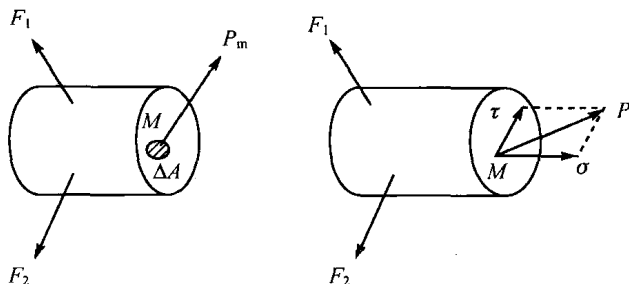


图 1-3

一般情况下,内力并非均匀分布。截面上围绕 M 点取微小面积 ΔA (图 1-3), 设 ΔA 上分布内力的合力为 ΔF_R , 那么称

$$\frac{\Delta F_R}{\Delta A} = P_m \quad (1-1)$$

为 ΔA 上的平均应力, P_m 的大小及方向随 ΔA 的大小而改变。当所取的微面积趋于无穷小时, 上述平均应力趋于一极限值, 即

$$\lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_R}{\Delta A} = P \quad (1-2)$$

称为 M 点的总应力。若将 P 分解为两个分量, 一个沿界面法向方向为 σ , 一个沿界面切线方向为 τ , 则称 σ 为正应力, 称 τ 为剪应力, 显然有

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

应力的量纲为: [力/长度²]; 应力的单位为 Pa(帕), 常用 $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$ 。

1.3.2 位移、变形与应变

前面已讲过, 物体受力后, 其形状和尺寸的改变称为变形, 怎样描述变形呢? 首先定义两个基本量:

- (1) 物体变形时, 其中任意一点将产生移动, 这种移动称为线位移。
- (2) 物体变形时, 其中的线段或平面会发生转动, 这种转动称为角位移。

如图 1-4 所示, 左端固定、右端自由的杆件, 受到集中荷载 P 作用后, 变形成为图中虚线所示形状, 这时杆端点 A 的线位移为 AA_1 , 杆端平面的角位移为 θ 。

线位移和角位移并不足以完全表示变形(构件作刚体运动时也会产生线位移、角位移), 但可用线段伸长、缩短, 角度的扩大和缩小来描述物体的变形, 这样, 称线段长度的改变为线变

第1章 绪论

形,角度的改变为角变形。

由于研究的对象是均匀连续的,可以将物体看做由许多微小的正六面体组成,首先研究每一个六面体的变形,然后再组合成物体整体变形。

对于一个微小的正六面体,变形可用两种形式描述(图 1-5):

- (1) 棱边长度的改变。
- (2) 棱边之间所夹直角的改变。

图 1-5(a)为初始状态,其沿 x 轴方向的棱边 AB 原长为 Δx ,变形后为 $\Delta x + \Delta u$,如图 1-5(b)所示, Δu 为 AB 线段的绝对变形,其大小与原长的长短有关。当 AB 线段内各点处的变形程度相同时,则比值为

$$\epsilon = \frac{\Delta u}{\Delta x} \quad (1-4)$$

称为线段 AB 的相对变形,即线应变。它是一个无量纲的量。若线段 AB 内各点处的变形程度不同,则此比值是线段 AB 的平均线应变。当 Δx 趋于零时, AB 上任意点 M 点沿 x 方向的线应变为

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

当构件发生变形后,上述正六面体除棱边的长度发生改变外,两条垂直线段 AD 和 AB 之间的夹角也将可能发生变化,如图 1-5(c)所示,不再保持为直角,这种直角角度的改变量 γ 称为剪应变。它也是一个无量纲的量,通常用弧度(rad)来度量。

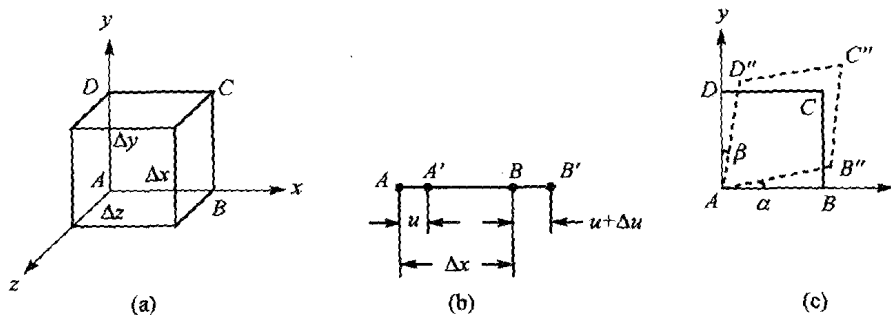


图 1-5

显然,当整个物体变形时,它所包含的所有微小单元体也将随着变形,而每一单元体的变形不外乎是各棱边长度的改变和各棱边间(或各平面间)角度的改变两种。故无论实际物体的变形怎样复杂,我们都可以把它看作是两种基本应变的综合。

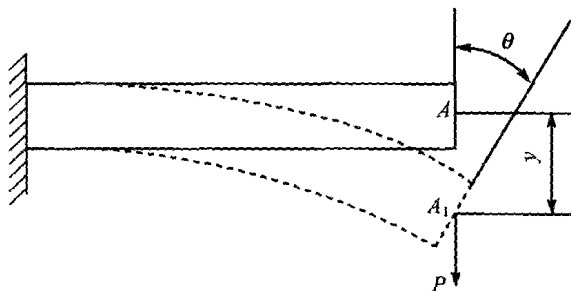


图 1-4

小变形条件 固体因外力作用而引起的变形,按不同情况,可能很小也可能相当大。但材料力学所研究的问题,限于变形的大小远小于构件原始尺寸的情况。这样,在研究构件的平衡和运动时,就可忽略构件的变形,而按变形前的原始尺寸进行分析计算。今后将经常使用小变形的概念以简化分析计算。至于构件变形过大,超出小变形条件,一般不在材料力学中讨论。

1.4 杆件变形的基本形式

杆件受力的情况各种各样,相应的变形也形式各异。如前所述,就杆件一点周围的一个微元体而言,它的变形不外乎线应变和角应变,所有的微元体变形的积累形成杆件整体的变形。而杆件变形的的基本形式有下列4种。

1.4.1 轴向拉伸或压缩

当杆件受到沿轴线方向的拉力或压力作用时,杆件将产生轴向伸长或缩短变形。直杆两端承受一对大小相等、方向相反的轴向力是最简单的情况,如图1-6所示。实际上,理论力学中提到的二力杆,都是轴向拉伸或压缩的例子。

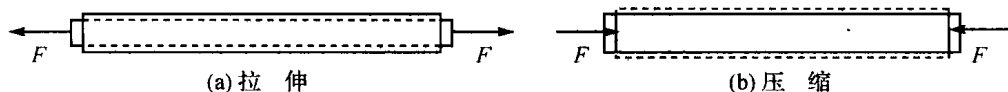


图 1-6

1.4.2 剪 切

这类变形的发生是由大小相等、方向相反、作用线相互平行且沿杆件横向作用的一对力引起的,表现为受剪杆件的两部分沿外力作用方向发生相对错动,如图1-7所示。机械中常用的连接件,如键、销钉、螺栓等均发生此类变形。

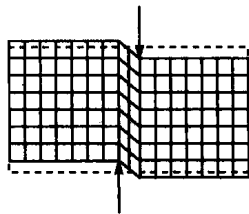


图 1-7

1.4.3 扭 转

当作用在杆件上的力可组成横截面内的力偶时(力偶矢量方向与杆件轴向相同),杆件的横截面将绕其轴线相互转动,这样的受力变形