

高等学校教材

材 料 力 学

陈昭怡 吴桂英 主 编

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

材料力学/陈昭怡,吴桂英主编. —北京:中国建材工业出版社,2005.2

ISBN 7-80159-808-3

I. 材… II. ①陈…②吴… 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 (2005) 第 010987 号

内 容 提 要

本书是根据高等工业学校材料力学课程教学基本要求和当前课程教学实践而编写的,可作为机械、土木等高等学校工科各专业的材料力学教材。

本书共分 14 章和 2 个附录。各章精选适当的典型例题、思考题及习题,并配有材料力学求解器 (光盘)。

本书在编写过程中,力求取材适当,论述严谨,注重理论联系实际,注意培养学生的科学思维方法及分析解决实际问题的能力,也便于自学。

材 料 力 学

陈昭怡 吴桂英 主 编

出版发行:中国建材工业出版社

地 址 北京市西城区车公庄大街 6 号

邮 编 100044

经 销 全国各地新华书店

印 刷 北京鑫正大印刷有限公司

开 本 787mm×960mm 1/16

印 张 30.25

字 数 660 千字

版 次 2005 年 2 月第一版

印 次 2005 年 2 月第一次

定 价 49.00 元

网上书店: www.ecool100.com

本书如出现印装质量问题,由我社发行部负责调换。联系电话:(010) 88386904

前 言

本书是根据高等工业学校材料力学课程教学基本要求和内容,结合机械、土木各类多学时专业的需要和特点,并考虑其他专业的需要而编写的。

全书共有十四章,即绪论,轴向拉伸与压缩,剪切,扭转,弯曲内力,弯曲应力,弯曲变形,简单超静定问题,应力状态和强度理论,组合变形,能量法,动载荷,交变应力,压杆稳定。各章均附有思考题及习题。其中带有*号的章节、例题、习题可根据专业的需要取舍。

为了适应不同专业及教学学时的需要,本书编写时,注意内容的层次及独立性,以使本书能够满足多、中、少三种学时的教学要求。

本书在重视加强基本知识的基础上,还特别重视概念的更新与拓宽、工程应用的加强以及教学内容的精选与体系的重组,力求做到论述严谨、说理透彻,使教材内容体现科学性、系统性和先进性,并便于教师与学生的使用。

随着计算机的普及与发展,结合我校十多年来积累的经验,为使学生更好地掌握课堂所学知识,编者在出版此书的基础上,还配套出版材料力学求解器(光盘)。

本书由陈昭怡、吴桂英主编,第1,2,3,4章及附录Ⅱ由韩志军编写;第5,6章由高保凤编写;第11,14章由武瑛编写;第9,10章由杨丽萍编写;第7,12,13章由吴桂英编写;第8章及附录Ⅰ由陈昭怡编写;全书习题由武瑛、杨丽萍、高保凤解答;求解器由陈昭怡、吴桂英、李志刚共同完成。

本书是太原理工大学材料力学教研室十余年的教学改革与课程建设的成果反映,又是我们长期教学经验的积累与总结。

本书在编写过程中,吸收、引用了国内兄弟院校公开出版的材料力学教材的观点、例题和习题。编者在此向这些文献的作者们致以衷心的感谢。责任编辑为本书的出版做了耐心、细致的工作,谨此表示诚挚的谢意。

限于编者水平有限,书中难免存在不足之处,衷心希望读者批评指正。

编 者

2004 年 11 月

目 录

常用符号

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 内力、截面法和应力的概念	3
§ 1-4 变形与应变	5
§ 1-5 杆件变形的基本形式	6
第 2 章 轴向拉伸和压缩	8
§ 2-1 概 述	8
§ 2-2 轴向拉伸 (压缩) 时横截面上的内力	9
§ 2-3 直杆轴向拉伸 (压缩) 时截面上的应力	10
§ 2-4 材料拉伸 (压缩) 时的力学性能	14
§ 2-5 轴向拉伸 (压缩) 时的强度计算	20
§ 2-6 轴向拉伸 (压缩) 的变形	23
§ 2-7 轴向拉伸 (压缩) 的变形能	27
§ 2-8 应力集中的概念	30
思考题	32
习 题	33
第 3 章 剪 切	39
§ 3-1 概 述	39
§ 3-2 剪切的实用计算	40
§ 3-3 挤压的实用计算	42
思考题	45
习 题	46
第 4 章 扭 转	49
§ 4-1 概 述	49
§ 4-2 圆轴扭转时的内力	50
§ 4-3 薄壁圆筒的扭转	53
§ 4-4 圆轴扭转的应力	56
§ 4-5 圆轴扭转的变形	61

§ 4-6 非圆截面杆扭转简介	65
思考题	71
习 题	72
第 5 章 弯曲内力	79
§ 5-1 概 述	79
§ 5-2 梁的简化及其典型形式	80
§ 5-3 剪力和弯矩	83
§ 5-4 剪力方程和弯矩方程 剪力图和弯矩图	86
§ 5-5 载荷集度、剪力和弯矩之间的微分关系	92
§ 5-6 用叠加原理作弯矩图	100
§ 5-7 平面刚架和曲杆的内力图	102
思考题	106
习 题	106
第 6 章 弯曲应力	114
§ 6-1 概 述	114
§ 6-2 纯弯曲时梁横截面上的正应力	115
§ 6-3 弯曲剪应力	122
§ 6-4 梁的强度条件	130
§ 6-5 提高弯曲强度的措施	138
§ 6-6 非对称截面梁的平面弯曲 弯曲中心	143
思考题	149
习 题	152
第 7 章 弯曲变形	158
§ 7-1 概 述	158
§ 7-2 挠曲线近似微分方程	160
§ 7-3 用积分法求弯曲变形	161
§ 7-4 用叠加法求弯曲变形	169
§ 7-5 梁的刚度校核 提高弯曲刚度的措施	176
思考题	180
习 题	182
第 8 章 简单超静定问题	188
§ 8-1 超静定问题及其解法	188
§ 8-2 拉压超静定问题	189
§ 8-3 扭转超静定问题	197
§ 8-4 简单超静定梁	201

思考题	211
习 题	213
第 9 章 应力状态和强度理论	218
§ 9-1 应力状态的概念	218
§ 9-2 二向应力状态分析——解析法	221
§ 9-3 二向应力状态分析——图解法	229
§ 9-4 三向应力状态的最大应力	237
§ 9-5 平面应变状态分析	239
§ 9-6 广义胡克定律	244
§ 9-7 复杂应力状态下的变形比能	249
§ 9-8 强度理论的概念	250
§ 9-9 常用的四种强度理论	251
§ 9-10 莫尔强度理论	258
思考题	261
习 题	263
第 10 章 组合变形	270
§ 10-1 概 述	270
§ 10-2 斜 弯 曲	271
§ 10-3 拉伸 (压缩) 与弯曲的组合	277
§ 10-4 扭转与弯曲的组合	286
思考题	290
习 题	292
第 11 章 能 量 法	299
§ 11-1 概 述	299
§ 11-2 外力功与变形能	299
§ 11-3 互等定理	308
§ 11-4 单位载荷法	312
§ 11-5 图 乘 法	317
§ 11-6 卡氏定理	323
§ 11-7 用能量法解超静定系统	331
思考题	336
习 题	338
第 12 章 动 载 荷	346
§ 12-1 概 述	346
§ 12-2 构件作等加速运动时的动应力计算	346

§ 12-3	构件受冲击时的应力和变形	352
§ 12-4	冲击韧度	360
§ 12-5	提高构件抗冲击能力的措施	362
思考题	.....	363
习 题	.....	365
第 13 章	交变应力	369
§ 13-1	概 述	369
§ 13-2	交变应力的循环特征、应力幅和平均应力	370
§ 13-3	材料的持久极限	371
§ 13-4	影响构件持久极限的主要因素	373
§ 13-5	交变应力下构件的疲劳强度计算	378
§ 13-6	变幅交变应力	384
§ 13-7	提高构件疲劳强度的措施	386
思考题	.....	386
习 题	.....	387
第 14 章	压杆稳定	389
§ 14-1	概 述	389
§ 14-2	细长压杆的临界压力	391
§ 14-3	欧拉公式的适用范围 经验公式	397
§ 14-4	压杆的稳定计算	403
§ 14-5	提高压杆稳定性的措施	411
思考题	.....	413
习 题	.....	414
附录 I	截面的几何性质	420
§ I-1	静矩和形心	420
§ I-2	惯性矩 极惯性矩 惯性积	423
§ I-3	平行移轴公式	429
§ I-4	转轴公式 主惯性轴和主惯性矩	433
思考题	.....	437
习 题	.....	439
附录 II	常用型钢表	443
主要参考文献	.....	454
答 案	.....	455

常用符号

符 号	意 义
A	面积
A_{bs}	挤压面积
a	加速度
C	形心
D, d	直径
E	弹性模量
e	偏心距
G	剪切弹性模量, 重量
g	重力加速度
I_y, I_z	截面对 y, z 轴的惯性矩
I_p	极惯性矩
I_{yz}	截面对 y, z 轴的惯性积
i_y, i_z	截面对 y, z 轴的惯性半径
K_d	动荷系数
k_t	理论应力集中系数
K_σ, K_τ	有效应力集中系数
K	弹簧刚度, 体积弹性模量
m	外力偶矩
T	扭矩, 动能
N	轴力, 功率, 寿命
N_0	循环基数
n	安全系数 转速, 弹簧工作圈数
n_σ, n_τ	构件的工作安全系数
$n_{\sigma\tau}$	弯扭组合交变应力作用下构件的安全系数
n_s	屈服破坏的安全系数
n_{st}	稳定安全系数
P	压强, 压力, 全应力, 外力

P_{cr}	临界压力
Q	剪力
q	分布载荷集度
R	半径
r	半径,循环特征
S_y, S_z	截面对 y, z 轴的静矩
t	温度,时间,厚度
U	变形能
u	线位移,变形比能(能密度)
u_v	体积的改变比能
u_f	形状的改变比能
V	位能,体积
v	速度,挠度
W	外力功,重量
W_t	抗扭截面模量
W_y, W_z	对 y, z 轴的抗弯截面模量
α	倾角,线膨胀系数
α_k	冲击韧度
β	倾角,表面质量系数
Δ	广义位移
δ	厚度,延伸率
$\varepsilon, \varepsilon_e, \varepsilon_p$	线应变,弹性应变,塑性应变
$\varepsilon_\sigma, \varepsilon_\tau$	尺寸系数
γ	剪应变,单位体积重力
ψ	断面收缩率
θ	体积应变,转角
ϕ	扭转角
φ	单位长度扭转角,折减系数
λ	柔度
ν	泊松比
μ	压杆长度系数
ρ	密度,曲率半径
σ	正应力
σ_t, σ_c	拉应力,压应力

σ°	极限应力
$[\sigma]$	许用应力
σ_a	应力幅
σ_b	强度极限
σ_{bs}	挤压应力
σ_{cr}	临界应力
σ_e	弹性极限
σ_m	平均应力
σ_p	比例极限
σ_r	持久极限,相当应力
σ_s	屈服极限
$\sigma_{0.2}$	名义屈服极限
τ	剪应力
$[\tau]$	许用剪应力
ω	角速度,弯矩图面积

第 1 章

绪 论

§ 1-1 材料力学的任务

在工程实际中,各种结构与机械得到广泛应用。组成结构与机械的每一部分,统称为构件。当结构或机械在正常工作时,组成它们的各个构件一般都要承受一定的力。例如,房屋中的梁要承受楼板传给它的重力,机器中的螺栓被拧紧后也要受力。这些重力和力统称为作用在构件上的载荷。

要想使结构或机械正常地工作,就必须保证组成它们的每个构件在载荷作用下能安全、正常地工作。因此,工程上对所设计的构件,在力学上有一定的要求,这些要求有以下三个方面:

1. 强度要求

所谓强度,是指构件在载荷作用下抵抗破坏的能力。强度有高低之分,在一定载荷作用下,说某种材料或某个构件的强度高,是指其比较坚固,不易破坏;说某种材料或某个构件强度低,则是指其不够坚固,较易破坏。

任何构件都不允许在正常工作情况下破坏,这就要求构件必须具有足够的强度。

2. 刚度要求

所谓刚度,是指构件在载荷作用下抵抗变形的能力。在一定载荷作用下,构件将产生形状与尺寸的改变,称为变形。说某个构件的刚度大,是指这个构件不易变形,即抵抗变形的能力强;说某个构件的刚度小,是指这个构件较易变形,即抵抗变形的能力弱。

在工程中,对构件来说,只满足强度要求是不够的,如果变形过大,也会影响正常工作。因此,根据不同的用途,对某些构件的变形给予一定的限制,使构件在载荷作用下产生的变形不能超过一定范围。这就要求构件具有足够的刚度。

3. 稳定性要求

所谓稳定性,是指构件保持其原有平衡状态的能力。对于细长受压构件,当

压力较小时,构件能保持原有的直线平衡状态。若压力增大至某一数值时,构件会突然变弯,使结构不能正常工作,这种现象称为丧失稳定。因此,对于这类细长压力构件,必须具有始终保持原有平衡状态的能力,即具有足够的稳定性。

满足了上述要求,才能保证构件安全正常地工作。

构件的强度、刚度和稳定性都与所用的材料有关。因此材料力学还要研究材料在载荷作用下表现出的力学性能。材料的力学性能需要通过实验来测定。此外,许多理论分析的结果,是在某些假设的前提下,经过简化而得到的,是否可靠,有待实验的验证。工程中还有些单靠理论分析解决不了的问题,也需借助于实验来解决。所以实验研究和理论分析均为材料力学解决问题的手段。

在设计构件时,除应满足强度、刚度和稳定性要求外,还必须尽可能合理地选用材料和节省材料,以降低成本,减轻构件的重量。为了安全可靠,往往要求选用优质材料与较大的截面尺寸,这样就可能造成材料浪费与结构笨重。可见,安全与经济及安全与重量之间存在着矛盾。

综上所述 材料力学研究的对象是构件,研究的主要内容是构件的强度、刚度和稳定性以及材料的力学性能 在材料力学的研究中,既包括理论分析又包括实验研究。

材料力学的任务是 在满足强度、刚度和稳定性的要求下,为设计既经济又安全的构件,提供必要的理论基础和计算方法。

§ 1-2 变形固体的基本假设

制造构件的材料是多种多样的,但它们都是固体,在外力作用下,所有固体都将发生变形,故称为变形固体。变形固体的性质是多方面的,而且很复杂,以不同的角度研究问题,侧重面也不一样。为了便于进行强度、刚度和稳定性的理论分析,通常忽略一些次要因素,做出某些假设,将变形固体抽象为一种理想的力学模型。材料力学对变形固体采用如下的基本假设:

1. 连续性假设

设整个物体体积内毫无空隙地充满物质,即认为结构是密实的。根据这一假设,构件内的一些力学量既可用坐标的连续函数表示,也可采用无限小的数学分析方法。同时,连续性不仅存在于变形前,而且存在于变形后,也就是说,构件内变形前相邻的质点在变形后保持相邻,既不产生新的空隙或孔洞,也不出现重叠现象。

2. 均匀性假设

设物体内的任何部分,其力学性质相同。根据这一假设,从构件内部任何部位切取的微小体积单元,都具有与构件完全相同的性质。同理,通过试样所测得的材料性质,也可用于构件内的任何部位。

在实际中,材料组成部分的力学性质往往存在不同程度的差异,例如金属是由无数微小晶粒组成,各个晶粒的力学性质不完全相同,但构件的任一部分中包含了数量极大的晶粒,而且无规则地排列,固体的力学性质是各晶粒的力学性质的统计平均值。所以可认为各部分的力学性质是均匀的。

3. 各向同性假设

认为在材料内沿各个不同方向具有相同的力学性质。具有这种性质的材料称为各向同性材料。就金属的单一晶粒来说,在不同方向上,其力学性质并不一样。但金属物体包含着数量极多的晶粒,而且各晶粒又是杂乱无章地排列的,这样其在各个方向上的性质就接近相同了。

沿不同方向力学性质不同的材料,称为各向异性材料,如木材,胶合板和纤维织品等。材料在外力作用下将产生变形,对于大多数材料,当外力不超过一定限度时,去除外力后,物体将恢复原有的形状和尺寸,这种性质称为弹性。随着外力卸除而消失的变形,称为弹性变形。当外力过大时,去掉外力后,变形只能部分消失而残留下一部分永久变形,材料的这种性质称为塑性。残留的变形称为塑性变形。

去掉外力后能完全恢复原状的物体称为理想弹性体。

本书讨论的问题,将限于材料的弹性阶段,即把物体视为理想弹性体。

工程中大多数构件在载荷作用下,其几何尺寸的改变量与构件本身的尺寸相比,常是很微小的,这类变形称为小变形。我们研究的内容将限于小变形范围。由于变形很微小,在研究构件的平衡、运动等问题时,就可以采用构件变形前的原始尺寸进行计算,使问题大为简化。

综上所述,在材料力学中,是把研究对象视为连续、均匀、各向同性的变形体,而所研究的范围,主要限于材料处于弹性阶段,且构件的变形是很微小的。

§ 1-3 内力、截面法和应力的概念

作用于构件上的载荷和支反力称为外力。构件不受外力时,内部各部分之间存在着相互作用的力,使构件维持一定的形状。当构件受到外力作用而变形时,其内部各部分之间的相互作用力将发生改变。这种因外力作用而引起的构件内各部分之间相互作用力的改变量,称为附加内力,简称内力。构件的内力随外力的增加而增大,当内力达到某一限度时,构件就会破坏,可见内力与构件的强度是密切相关的。

在研究构件的强度、刚度等问题时,均与内力这个物理量有关,因此需要知道构件在已知外力作用下某一截面(通常是横截面)上的内力值。任一截面上的内力值的确定,需要用下述的截面法。

如图 1-1a 所示构件在外力作用下处于平衡状态,欲求 $m-m$ 截面的内力,可假想将构件沿 $m-m$ 截面截开,分为 I、II 两部分,如图 1-1b,c 所示。任取其中一部分,例如 I 为研究对象,此时 II 部分作用于 I 部分的内力,根据连续性假设,沿 $m-m$ 截面连续分布。通常是将截面上的分布内力用位于该截面形心处的合力来代替,尽管内力的合力是未知的,但总可以用六个内力分量来表示。因构件在外力作用下处于平衡状态,所以截开后的保留部分也应该是平衡的,这样由空间力系的平衡方程,即可求得六个内力的分量。事实上,截面上的内力并不是都同时存在上述六个分量,可能只存在其中一个或几个。

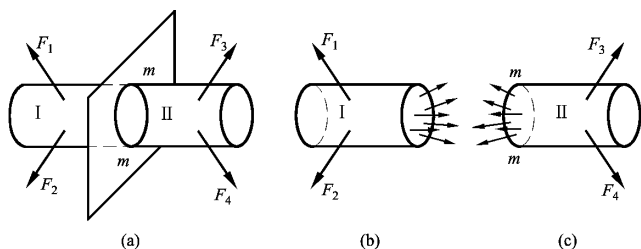


图 1-1

用截面法求内力的步骤可归纳如下：

- (1) 在要求内力的截面处,用一假设的平面将构件截为两部分。
- (2) 留下一部分,弃掉一部分(任意弃留),并将弃掉的部分对留下部分的作用以内力代替之。
- (3) 考虑留下部分的平衡,由平衡方程来确定内力值。

在确定了构件截面上的内力后,还不能判断这个构件的强度是否足够,因为同样的内力在直观上来说,分布在较大的截面积上就安全,反之就危险。因此还得知内力在截面上的分布规律以及在各点处强弱或密集的程度,即内力的集度,称为应力。如图 1-2a 所示,要研究受力构件内某截面 $m-m$ 上 k 点处的应力,围绕 k 点取一微小面积 ΔA ,设作用在该面积上的内力为 ΔF ,则 ΔF 与 ΔA 的比值,称为 ΔA 内的平均应力,并用 p_m 表示,即

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

一般情况下,内力沿截面并非均匀分布,平均应力 p_m 之值及其方向将随所取面积 ΔA 的变化而改变。为了精确地描述内力的分布情况,应使 ΔA 趋近于零,由此得到平均应力 p_m 的极限值,称为截面 $m-m$ 上 k 点处的应力,并用 p 表示,即

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

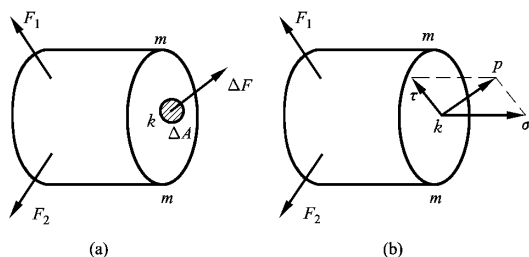


图 1-2

为了分析方便,通常将应力 p 沿截面的法向与切向分解为两个分量,如图 1-2b 所示,沿截面法向的应力分量称为正应力,用 σ 表示;沿截面切向的应力分量称为剪应力,用 τ 表示。显然

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

必须指出,由于受力构件各截面上每个点的应力一般是不相同的,它随着截面和截面上点的位置而改变。因此,仅仅说明应力的性质和数值,而不说明其所在的位置,是没有意义的。也就是说,当我们提到应力时,必须要说明该应力是发生在哪一个截面上和截面上点所在的位置。

在国际单位制中,应力的单位是牛顿/米² (N/m²),称为帕斯卡,简称为帕 (Pa)。由于这个单位太小,工程中常用的应力单位为兆帕 (MPa) 或吉帕 (GPa),其关系为: 1MPa = 10⁶Pa, 1GPa = 10⁹Pa。

§ 1-4 变形与应变

构件在外力作用下,将发生变形。构件的变形包括几何形状和尺寸的改变两部分。为了研究构件的变形,设想将其分割成无数个单元体,整个构件的变形可看成是这些单元体变形累积的结果。如图 1-3a 是从构件中取出的一个单元体,其变形可用棱边长度的改变和棱边所夹直角的改变来描述。设棱边 AB 的原长为 Δx ,变形后长度的改变量为 Δu ,如图 1-3b 所示。则比值 $\epsilon_m = \frac{\Delta u}{\Delta x}$ 称为 AB 的平均线应变 (又称正应变)。一般情况下, AB 内各点处的变形程度并不相同,为了精确描述 A 点沿 AB 方向的变形程度,应使 Δx 趋近于零,此时, A 点沿 AB 方向的线应变即为

$$\epsilon_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{du}{dx} \quad (1-4)$$

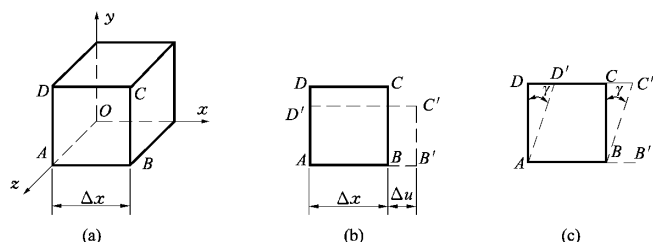


图 1-3

用类似的方法,还可确定 A 点沿其他方向的线应变。

单元变形时,除棱边的长度改变外,棱边所夹直角也将发生改变,如图1-3c所示。直角的改变量 γ 称为 A 点在 xy 平面内的剪应变 (或称角应变)。线应变 ϵ 和剪应变 γ 均为无量纲的量。

§ 1-5 杆件变形的基本形式

工程中构件的种类很多,如杆、板、壳、块体等。材料力学所研究的主要是其中的杆件。所谓杆件,是指其长度相对于其他两个横向尺寸大的多的构件。一般地,建筑工程中的梁、柱以及机器上的轴等均属杆件。

就杆件的外形来分,可分为直杆、曲杆和折杆。杆件的轴线为直线时为直杆,轴线为曲线与折线时分别为曲杆与折杆。就横截面 (垂直于轴线的截面) 来分,杆件又可分为等截面 (各截面均相同) 杆和变截面 (横截面是变化的) 杆。本书中将着重讨论等截面的直杆 (简称为等直杆)。

在不同形式的外力作用下,杆件产生的变形形式也不相同,但构件变形的基本形式总不外乎以下几种形式:

(I) 轴向拉伸或压缩 (图 1-4a, b)。杆件的变形是由大小相等、方向相反、作用线与杆件轴线重合的一对力引起的,表现为杆件的长度发生伸长或缩短。

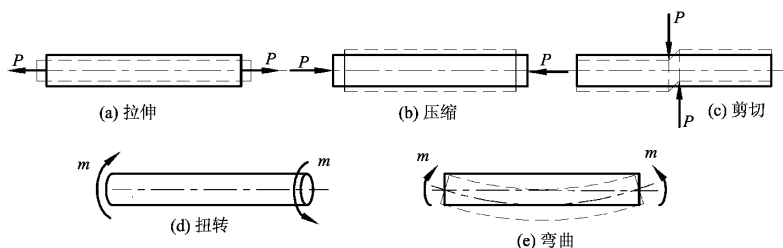


图 1-4

(2) 剪切 (图 1-4c)。杆件的变形是由一对大小相等、方向相反且作用线相距很近的横向力引起的,表现为受剪杆件的两部分沿外力作用方向发生相对错动。

(3) 扭转 (图 1-4d)。杆件的变形是由大小相等、转向相反、作用面都垂直于杆轴线的两个力偶引起的,表现为杆件的任意两个横截面发生绕轴线的相对转动。

(4) 弯曲 (图 1-4e)。杆件的变形是由垂直于杆件轴线的横向力,或由作用于包含杆轴线的纵向平面内的一对大小相等、转向相反的力偶引起的,表现为杆件轴线由直线变为曲线。

工程实际中的杆件可能同时承受不同形式的外力,变形情况可能比较复杂。但不论怎样复杂,其变形均是由基本变形组成的。

以后各章将就上述各基本变形形式及同时存在两种或两种以上基本变形的组合情况分别加以讨论。