

材料力学

*Mechanics
of
Materials*

陆才善 主编

蒋璐 何丽南 蔡怀崇

西安交通大学出版社

材 料 力 学

陆 才 善 （主编）

蒋 璐 何丽南 蔡怀崇

西安交通大学出版社

内 容 提 要

本书是参照高等工业学校材料力学(中学时)教学大纲,职工高等工业专科学校材料力学教学大纲,以及高等教育自学考试机械类专业专科材料力学课程自学考试大纲编写的教材。

全书共有十五章及附录。每章有小结,其中包括重点内容,主要公式,主要概念及应注意的问题。还附有复习思考题及习题。全书共分四个阶段,每个阶段末都有自我检查题。附录中有答案。

本书可供工科大专中低学时专业的学生,以及要参加自学考试的读者使用。还可作为职工大学、业余大学、函授大学等的材料力学教材或教学参考书。

材 料 力 学

陆 才 善 (主编)

蒋 璐 何丽南 蔡怀崇

责任编辑 陈 瀚

*

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路28号)

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 20.625 字数: 493 千字

1989年6月第1版 1989年6月第1次印刷

印数: 1—4,000

ISBN7-5605-0197-4/O·40

定价: 3.70 元

序 言

本书是参照高等工业学校材料力学(中学时)教学大纲,职工高等工业专科学校材料力学教学大纲,以及高等教育自学考试机械类专业专科材料力学课程自学考试大纲编写的教材。

本书编写时力求注重基础,突出重点,精选内容,并有较丰富的例题。一些由基础理论衍生的问题,及技巧性问题,尽量在例题中解决。对重点及难点内容,阐述力求清楚,以利教学,并减轻自学困难。书中带裂纹体断裂的概念,材料的断裂韧性简介,为本学科新水平的反映。

全书共有十五章及一个附录。书中打*的部分可供选学(非自学考试内容)。正文(不包括复习思考题及习题,自我检查题)的篇幅较为恰当。按不同要求,本书适用于60~80学时。

每章后有小结,其中包括重点内容,主要公式,主要概念及应注意的问题。还附有复习思考题及习题。在每章的适当处,指出必做的题号。全书共分四个阶段,每个阶段末都有自我检查题,覆盖材料力学全部内容。在附录中有复习思考题、习题及自我检查题的答案。

本书可供工科大专中低学时专业的学生,以及要参加自学考试的读者使用。还可作为职工大学、业余大学、函授大学等的材料力学教材或教学参考书。

编写分工为:陆才善编写第一、二、三、六、七章,及第十四章中的§14-7;蔡怀崇编写第四、八、十二章;蒋潞编写第九、十、十一章;何丽南编写第五、十三、十四、十五章。主编陆才善。

本书由空军工程学院杨耀池教授及西安交通大学陈瀚教授审阅,并由陈瀚教授担任责任编辑。他们提出了很多宝贵的修改意见,在此表示深切的感谢。

限于编者的水平,书中疏漏、不妥、错误之处在所难免,深望使用本书的广大师生及读者,不吝提出批评和指正。

编 者

1988年10月

中华人民共和国法定计量单位

表 1 国际单位制的基本单位*

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克(公斤)	kg
时间	秒	s

表 2 国际单位制的辅助单位*

量的名称	单位名称	单位符号
平面角	弧度	rad

表 3 国际单位制中具有专门名称的导出单位*

量的名称	单位名称	单位符号	其它表示式例
频率	赫[兹]	Hz	s^{-1}
力, 重力	牛[顿]	N	$kg \cdot m/s^2$
压力, 压强, 应力	帕[斯卡]	Pa	N/m^2
能量, 功	焦[耳]	J	$N \cdot m$
功率	瓦[特]	W	J/s
摄氏温度	摄氏度	℃	

表 4 国家选定的非国际单位制单位*

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时间	分	min	1min=60s
平面角	[角]秒	($''$)	$1''=(\pi/648000)\text{rad}$
	[角]分	($'$)	$1'=60''$
	度	($^{\circ}$)	$1^{\circ}=60'$
旋转速度	转每分	r/min	$1\text{r/min}=(1/60)\text{s}^{-1}$

表 5 用于构成十进倍数和分数单位的词头*

所表示的因数	词头名称	词头符号
10^9	吉[咖]	G
10^6	兆	M
10^3	千	k
10^2	百	h
10^1	十	da
10^{-1}	分	d
10^{-2}	厘	c
10^{-3}	毫	m

只摘录与本书有关的部分。

主要符号表

符 号	符 号 意 义	常 用 单 位
α	平面角 线膨胀系数 理论应力集中系数	弧度, 度 $1/^\circ\text{C}$
β	平面角 表面质量系数	弧度, 度
γ	重度 剪应变	$\text{N/cm}^3, \text{kN/m}^3$ 弧度, 度
δ	延伸率	
Δ	间隙 位移(广义)	mm mm 或弧度
Δ_s	静变形	mm 或弧度
Δ_d	动变形	mm 或弧度
Δl	轴向伸长(缩短)	mm
ε	线应变	
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	沿 x, y, z 轴的线应变	
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	主[线]应变	
ε_e	弹性应变	
ε_p	塑性应变	
$\varepsilon_\sigma, \varepsilon_\tau$	尺寸系数(疲劳)	
θ	平面角, 梁截面转角 体积应变	弧度, 度
$[\theta]$	许用转角	弧度, 度
λ	弹簧伸缩变形量 压杆柔度(长细比)	mm
μ	泊松比(横向变形系数) 压杆支座系数(长度系数)	
ρ	半径, 曲率半径	mm, m
σ	正应力	Pa, MPa
σ^0	破坏[正]应力	
$[\sigma]$	许用[正]应力	
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	沿 x, y, z 轴的正应力	
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	主应力	
$\sigma_l, \sigma_{\text{拉}}, \sigma^+$	拉应力	
$\sigma_y, \sigma_{\text{压}}, \sigma^-$	压应力	

续表 1

符 号	符 号 意 义	常 用 单 位
σ_r	径向[正]应力	单位同上
σ_θ	切向(周向)[正]应力	
σ_e	弹性极限	
σ_p	比例极限	
σ_s	屈服(流动)极限	
$\sigma_{0.2}$	名义屈服极限	
σ_b	强度极限	
σ_{xd}	相当应力	
σ_r	持久极限(循环特征为 r)	
σ_{lj}	临界应力	
σ_j	静[正]应力	
σ_d	动[正]应力	
τ	剪应力	
τ^0	破坏剪应力	
$[\tau]$	许用剪应力	
φ	平面角, 扭转角	弧度, 度
Φ	单位长度扭转角	$^\circ/\text{m}$
$[\Phi]$	许用单位长度扭转角	$^\circ/\text{m}$
ψ	断面收缩率	rad/s
ψ_σ, ψ_τ	材料敏性系数	
ω	角速度	
a	加速度	
	长度	
A	截面面积	
c	弹簧指数	
d, D	直径	
E	[拉压]弹性模量	
f	挠度	
$[f]$	许用挠度	mm
F	轴力	
G	剪切弹性模量	
i	惯性半径(迴转半径)	
I_p	极惯性矩	
I_y, I_z	惯性矩(对 y 轴, 对 z 轴)	
I_{yz}	惯性积(对 $y-z$ 轴)	
k	修正系数	

续表 2

符 号	符 号 意 义	常 用 单 位
K	弹簧刚度(弹簧常数)	N/mm
	体积弹性模量	N/mm ² , MN/m ²
K_{σ}, K_{τ}	有效应力集中系数	
K_d	动荷系数	
l, L	长度	mm, cm, m
m	线分布力偶矩集度	$\frac{N \cdot m}{m}, \frac{kN \cdot m}{m}$
M	弯矩	N·m, kN·m
$M_i (i=0, 1, 2, \dots)$	外力偶矩	N·m, kN·m
M_n	扭矩	N·m, kN·m
n	安全系数	
	弹簧有效圈数	
	转速	r/min
p	全应力	Pa, MPa
	压强	Pa, MPa
P	集中力 广义力	N, kN
	功率	kW
$[P]$	许可载荷	N, kN
P_{li}	临界力	N, kN
q	线分布力集度	N/m, kN/m
Q	剪力	N, kN
r	半径	mm, cm
	循环特征	
R	半径	mm, cm
	支反力	N, kN
S	静矩	cm ³
t	温度, 皮带拉力	℃, N, kN
	时间	s
	座标轴(切向)	
T	转矩, 皮带拉力	N·m, kN·m, N
	动能	N·m, kN·m
u	比能	N/mm ² , MN/m ²
u_p, u_v	形状改变比能, 体积改变比能	N/mm ² , MN/m ²
U	变形能	N·m
V	位(势)能	N·m

续表 3

符 号	符 号 意 义	常 用 单 位
W	体积	cm^3, m^3
W	功	$\text{N} \cdot \text{m}$
W_p	抗扭截面模量(圆截面杆)	cm^3
W_n	抗扭截面模量	cm^3
W_z	抗弯截面模量	cm^3
$X_i(1, 2, 3 \dots)$	多余未知力(广义)	N, kN 或 $\text{N} \cdot \text{m}, \text{kN} \cdot \text{m}$
y	挠度	mm

目 录

序言

中华人民共和国法定计量单位

主要符号表

第一章 绪论 基本概念

§ 1-1 材料力学的性质与任务	(1)
§ 1-2 变形固体的基本假设	(2)
§ 1-3 材料力学研究的主要构件的几何特征 外力及其分类	(3)
§ 1-4 杆件变形的基本形式	(4)
§ 1-5 内力 截面法 应力	(4)
§ 1-6 位移 应变	(7)
§ 1-7 材料力学和其它课程的关系	(8)

第二章 拉伸与压缩

§ 2-1 概述	(9)
§ 2-2 轴向拉伸(压缩)时横截面上的内力和应力	(9)
§ 2-3 轴向拉伸(压缩)时斜截面上的应力	(12)
§ 2-4 拉(压)杆的强度计算	(14)
§ 2-5 拉伸时材料的力学性质	(16)
§ 2-6 压缩时材料的力学性质	(21)
§ 2-7 安全系数与许用应力	(23)
§ 2-8 轴向拉伸或压缩时的变形	(23)
§ 2-9 轴向拉伸或压缩时的变形能	(28)
§ 2-10 应力集中的概念	(30)
§ 2-11 简单超静定问题	(31)
小 结	(35)
复习思考题及习题	(37)

第三章 剪 切

§ 3-1 概述	(44)
§ 3-2 剪切与挤压的实用计算	(44)
§ 3-3 剪切虎克定律 三个弹性常数(E, μ, G)间的关系介绍 剪应力互等定理	(48)
小 结	(50)
复习思考题及习题	(51)

第四章 扭 转

§ 4-1 概述	(53)
§ 4-2 外力偶矩的计算 扭矩和扭矩图	(53)
§ 4-3 等直圆杆扭转时的应力与强度条件	(55)
§ 4-4 圆轴扭转时的变形与刚度条件	(60)
§ 4-5 圆杆扭转的破坏情况	(61)
§ 4-6 圆柱形密圈螺旋弹簧	(62)
§ 4-7 矩形截面杆扭转结果简介	(63)
小 结	(64)
复习思考题及习题	(65)

第五章 平面图形的几何性质

§ 5-1 概述	(70)
§ 5-2 静矩和形心	(70)
§ 5-3 惯性矩、惯性半径和惯性积	(73)
§ 5-4 平行移轴定理	(77)
§ 5-5 形心主惯性轴和形心主惯性矩	(79)
小 结	(80)
复习思考题及习题	(82)
自我检查题(I)	(84)

第六章 弯曲内力

§ 6-1 概述	(89)
§ 6-2 梁的计算简图	(89)
§ 6-3 剪力 弯矩	(91)
§ 6-4 剪力方程与剪力图 弯矩方程与弯矩图	(93)
§ 6-5 弯矩、剪力与均布载荷集度间的关系	(101)
小 结	(105)
复习思考题及习题	(106)

第七章 弯曲应力

§ 7-1 概述	(109)
§ 7-2 纯弯曲时的正应力	(109)
§ 7-3 横力弯曲时的正应力 梁按正应力的强度计算	(113)
§ 7-4 横力弯曲时的剪应力	(119)
§ 7-5 提高弯曲强度的措施	(123)
小 结	(124)
复习思考题及习题	(125)

第八章 弯曲变形

§ 8-1 概述	(130)
§ 8-2 挠曲线近似微分方程	(131)
§ 8-3 用直接积分法求梁的变形	(132)
§ 8-4 叠加法求梁的变形	(135)
§ 8-5 梁的刚度条件和提高弯曲刚度的措施	(138)
§ 8-6 简单超静定梁	(144)
小 结	(146)
复习思考题及习题	(147)
自我检查题(Ⅱ)	(150)

第九章 应力状态分析

§ 9-1 概述	(156)
§ 9-2 平面应力状态斜截面上的应力	(157)
§ 9-3 应力圆	(158)
§ 9-4 主应力、主平面和极值剪应力	(162)
§ 9-5 三向应力状态的最大应力	(169)
§ 9-6 广义虎克定律	(170)
§ 9-7 三向应力状态下的弹性比能	(173)
小 结	(174)
复习思考题及习题	(176)

第十章 强度理论

§ 10-1 概述	(182)
§ 10-2 四个常用的强度理论	(182)
§ 10-3 强度理论的应用	(186)
小 结	(190)
复习思考题及习题	(191)

第十一章 组合变形时杆件的强度计算

§ 11-1 组合变形的概念	(194)
§ 11-2 拉伸(压缩)与弯曲的组合	(195)
§ 11-3 弯曲与扭转的组合	(199)
小 结	(205)
复习思考题及习题	(206)
自我检查题(Ⅲ)	(210)

第十二章 能量法和超静定问题

§ 12-1 杆件变形能的计算	(214)
-----------------	-------

§ 12-2 卡氏定理	(220)
* § 12-3 功的互等定理和位移互等定理	(225)
§ 12-4 用卡氏定理解超静定问题	(226)
小 结	(230)
复习思考题及习题	(231)

第十三章 动载荷

§ 13-1 概述	(236)
§ 13-2 惯性力问题	(236)
§ 13-3 冲击载荷	(239)
§ 13-4 提高构件 承受冲击能力 的措施	(244)
小 结	(245)
复习思考题及习题	(246)

第十四章 疲劳强度

§ 14-1 概述	(250)
§ 14-2 交变应力的循环特征	(251)
§ 14-3 材料的持久极限	(252)
§ 14-4 构件持久极限 影响构件持久极限的主要因素	(253)
§ 14-5 疲劳强度计算	(256)
§ 14-6 提高构件疲劳强度的措施	(258)
* § 14-7 带裂纹体断裂的概念 材料的断裂韧性简介	(259)
小 结	(262)
复习思考题及习题	(263)

第十五章 压杆稳定

§ 15-1 概述	(265)
§ 15-2 细长压杆的临界力 欧拉公式	(266)
§ 15-3 杆端不同约束时细长压杆的临界力	(268)
§ 15-4 压杆的临界应力 临界应力总图	(269)
§ 15-5 压杆的稳定校核	(272)
§ 15-6 提高压杆稳定性的措施	(276)
小 结	(277)
复习思考题及习题	(278)
自我检查题(IV)	(282)

附 录

1. 型钢表	(286)
2. 复习思考题及习题答案	(303)

第一章 绪论 基本概念

§ 1-1 材料力学的性质与任务

材料力学与理论力学一样，都属于固体力学。

理论力学的任务，是研究物体机械运动的规律。它不考虑物体受力后变形和断裂这类问题，所以它假设物体是刚体，即物体受力后是不发生形状改变的。

机器的零件，如车床床头箱中的主轴，内燃机中的连杆等，及工程结构中的构件，如锅炉、行车的大梁等，以后统称为构件。构件所承受的主动外力，称为载荷（支座反作用力简称支反力，属被动外力，所以不是载荷）。当构件承受载荷后，材料力学研究的，正是变形和断裂这类问题，所以不能把构件当作刚体，而必须如实地视为变形固体。

构件承受载荷后，可能产生下列三个方面的问题，使构件不能正常工作，或称失效，即

（一）强度问题

构件承载后，可能发生破坏。破坏包括下列两种：

（1）断裂（破裂）：如自行车链条，汽车的传动轴都可能发生断裂；自行车内胎，锅炉都可能发生破裂（图 1-1），因此失效。

（2）过大的永久变形：如螺栓的螺纹，由于受到撞击而发生不能恢复的过大的永久变形，以致螺母不能旋动，这个螺栓就失效。

我们称以上情况为构件因强度不够而发生破坏。所以，强度是指受载构件抵抗破坏的能力。

（二）刚度问题

构件或结构受载后，由于变形而产生位移。如车床切削工件，车床与工件都因承受切削力而变形，如图 1-2 所示（只画出工件夸张的变形）。由变形而产生的位移将影响工件加工尺寸的精度。因而，对变形产生的位移要制定允许值。假如位移超过允许值，我们就称此构件或结构的刚度不够。所以，刚度是指受载构件或结构抵抗变形的能力。

（三）稳定性问题

一根细长直杆，受轴向压力 P 作用，当压力 P 较小时，杆保持直线形状的平衡。当压力 P 大到某个值后，杆会突然发生微弯，如图 1-3 所示。即在微弯形状下平衡。这种现象称为丧失稳定性。详细情况将在第十五章“压杆稳定”中介绍。

结构承载后，为保证其正常工作，构件都应该具有足够的承受载荷的能力，简称承载能力。材料力学就是研究构件承载能力的一门科学。实践告诉人们，构件是否具有足够的承载能力，必须从构件的强度、刚度及稳定性三方面考虑。要保证构件安全适用，就必须具有足够的强度，而对于某些构件还必须具有足够的刚度或稳定性。可是，我们又不应该任意加大构件的尺寸来满足上述要求，而必须尽可能地选用合适的材料、截面形状和尺寸，以降低材料的消耗，减轻自重。因此，材料力学的主要任务就是在保证构件既安全适用又尽可能经济

的前提下，为构件选择适当的材料、截面形状和尺寸。



图 1-1

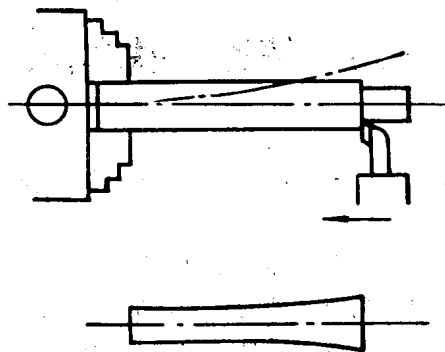


图 1-2

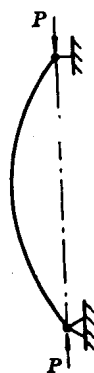


图 1-3

§ 1-2 变形固体的基本假设

为了进行理论分析，还须把变形固体理想化，即作出下列三个基本假设：

(一) 连续性假设

认为物体在其整个体积内都毫无空隙地充满了物质，材料是密实的。

由于这个假设，所以可用微分、积分等数学工具，如取微长 dx 、微面积 dA 等。

(二) 均匀性假设

认为物体任一部分，不论其体积大小，其力学性能都是一样的。

由于这个假设，所以只要是同一种材料制成的构件与试件，力学性能都一样。由试件测得的力学性能，可用于构件。

(三) 各向同性假设

认为材料沿各个方向的力学性能都一样。

由于这个假设，所以只要是同一种材料制成的构件或试件，落料时不论沿那个方向，都具有相同的力学性能。

在以上三个基本假设的基础上，我们预计构件的承载能力，在工程要求的精确度范围内，能为实验或实践所证实，这就说明了以上假设在工程上是可行的。

除上述三个基本假设外，材料、构件及结构还要满足小变形条件。这可用下述求支反力的例子加以说明。

如图1-4(a)所示的梁，跨度 l 。承受集中力 P 后，由于弯曲变形，跨度减小为 $l - \Delta$ 如图 (b) 所示。因为梁满足小变形条件，即 $\frac{\Delta}{l} \ll 1$ ，所以

$$l - \Delta = l \left(1 - \frac{\Delta}{l} \right) \approx l$$

即在求支反力时，梁的跨度仍用弯曲前的尺寸 l 。

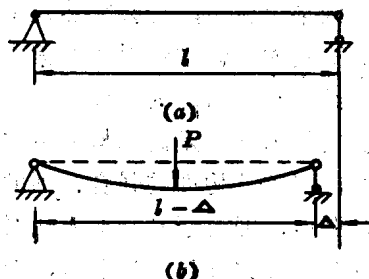


图 1-4

必须指出, 由于材料力学的研究对象是变形固体, 所以对研究对象为刚体的理论力学中的概念, 在材料力学中运用时必须慎重对待。只有在物体的变形可以忽略不计的问题中, 例如求上述梁的支反力问题, 才能运用静力平衡方程式。假如物体的变形不能忽略不计, 则必须在物体变形后, 进行刚化, 才能运用静力平衡方程式。

§ 1-3 材料力学研究的主要构件的几何特征 外力及其分类

(一) 主要构件的几何特征

材料力学研究的主要构件的形状为棱柱形杆, 大多为直杆, 直杆的几何特征是纵向(长度方向)尺寸远比横向(垂直于长度方向)尺寸为大。

直杆有两个主要几何因素, 即横截面和轴线。前者是垂直于长度方向的截面, 后者是横截面形心的轨迹。等截面的直杆简称等直杆, 如图 1-5 所示为矩形截面等直杆。

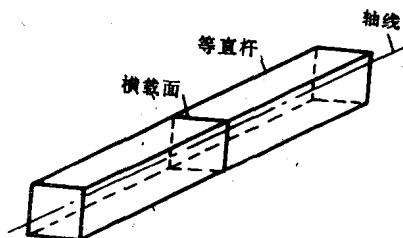


图 1-5

轴线弯曲的杆称曲杆。

(二) 外力及其分类

载荷(温度变化也属载荷。这里的载荷不包括温度变化)及支反力都属外力, 外力可有下列不同分类:

(1) 按其作用的方式

1. 体积力(场力): 如物体自重, 惯性力等, 它们是连续分布在物体内部所有各处。通常用集度来度量大小, 体积力集度为单位体积内的力, 工程上常用单位为 N/mm^3 , kN/m^3 等。

2. 表面力(接触力): 两物体相接触而传递的力。外力中主要是这种力。表面力也用集度来度量大小, 表面力集度为单位表面积上的力, 工程上常用单位为 MN/m^2 (MPa), GN/m^2 (GPa) 等。

由于材料力学中主要研究对象是等直杆, 其纵向尺寸远大于横向尺寸, 所以可用轴线来代表等直杆。

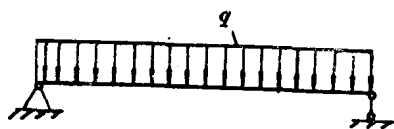


图 1-6

度量等直杆的体积力或表面力大小, 用线分布集度 q 表示。如果是均匀分布的均布载荷 q (如等直杆的自重), 就是沿轴线单位长度上的力, 如图 1-6 所示。工程上常用单位为 N/m , kN/m 等。

有些表面力是两个物体在很小接触表面上的相互作用, 如火车轮与钢轨接触处的表面力。考虑整根钢轨时, 可将这种力看作为作用在一点处的集中力。工程上常用单位为 N , kN 等。

(2) 按其随时间改变的情况

1. 静载荷: 载荷由零缓慢地增加到一定数值后, 即保持不变, 或变动很不显著。例如由起重机械在地基上安装车床, 当车床缓慢地全部落到地基上后, 地基承受的即静载荷。

2. 动载荷：载荷随时间而改变。又可分为

i. 交变载荷：载荷随时间作周期性改变。例如内燃机的连杆，随时间承受拉伸与压缩周期性改变的交变载荷。

ii. 冲击载荷：两物体在撞击的瞬间所产生的载荷。例如空气锤的锤杆，在锻造锻件时承受的载荷。

§ 1-4 杆件变形的基本形式

杆件在外力作用下，其形状和尺寸的改变称为变形。作用在杆件上的外力可能是多种多样的，所以杆件的变形也可能是多种多样的。但任何复杂的变形都可分解为一种或几种基本变形，最多可以分解为四种基本变形，即：

(一) 轴向拉伸或轴向压缩：这种基本变形由一对作用线与轴线重合的外力所引起，如图 1-7(a)、(b)所示。

(二) 剪切：这种基本变形由一对相距很近，方向相反的横向外力所引起，如图 1-7(c)所示。

(三) 扭转：这种基本变形由一对转向相反，作用在垂直于轴线的两个平面内的转矩所引起，如图 1-7(d)所示。

(四) 弯曲：这种基本变形由一对转向相反，作用在一个包含轴线的纵向平面内的力偶矩所引起，如图 1-7(e)所示。

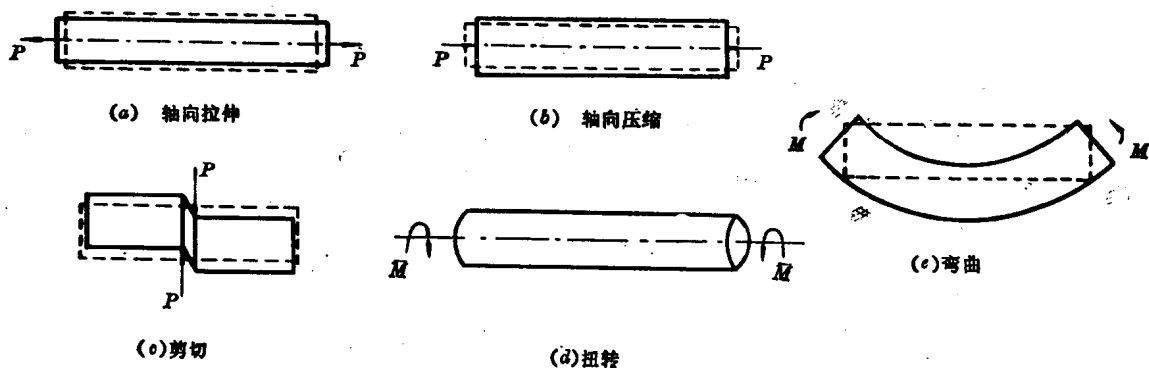


图 1-7

由两种或两种以上的基本变形组合而成的变形称为组合变形。我们先研究基本变形，在此基础上，再研究组合变形。

§ 1-5 内力 截面法 应力

(一) 内力

在外力作用下，物体将发生形状和尺寸的改变，这时物体的内部将产生一种抗力，与外