

材料力学

陈心爽 袁耀良 编著

同济大学出版社

内 容 提 要

本书是根据国家教育委员会于1986年审订的高等工业学校中学时类型材料力学课程基本要求编写而成,可作为60~90学时的建筑材料、给水排水、采暖通风、动力机械、工程(企业)管理、环境保护等土建和机械类本科专业的材料力学教材。删去部分内容后,也可作为土建和机械类专修科各专业的材料力学教材。本书还可供工程技术人员参考。

全书包括十二章基本内容及两个附录,每章末尾附有思考题、习题和习题答案。

责任编辑 解明芳
封面设计 李志云

材料力学

陈心爽 袁耀良 编著

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

同济大学印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32 印张:14.625 字数:420千字

1996年3月第1版 2006年12月第6次印刷

印数:20 101—25 200 定价:16.00元

ISBN 7-5608-1436-0/O·133

前 言

本书是根据国家教育委员会于1986年审订的中学时类型材料力学课程基本要求,结合我们的教学实践经验,并参考、吸收了近年来国内外材料力学教材的优点编写而成。

本书对材料力学基本概念、基本理论和基本方法的阐述,力求做到深入浅出、前后呼应、便于自学。针对初学者重计算而轻概念的情况,在各章后面都设置了一定数量的思考题,以帮助学生理解、掌握所学基本概念、理论和方法。本书注重理论联系实际,在选择例题和习题时,兼顾了土建类专业和机械类专业两个方面的要求,力求联系工程实际,以提高分析问题和解决问题的能力。随着改革开放的深化,专业外语学习的重要性日趋明显。材料力学的名词、术语在工程术语中占有一定比重,因此,本书对于第一次出现的力学名词,均用英文译出,以方便学生与中文对照学习。

本书由陈心爽和袁耀良编写。陈心爽编写第一、二、五、六、七、十一、十二章,袁耀良编写第三、四、八、九、十章及附录 I。本书初稿完成后,作为中学时教材,在同济大学各有关专业的教学中进行了历时3年的试用,许多学生和教师提出了不少宝贵的修改意见。在此基础上,出版前由陈心爽负责对全书统稿,并进行了全面的修改。

同济大学李宗璐教授和上海城建学院孔超群教授仔细审阅了全书内容,并提出了许多宝贵意见。本书的出版,还得到周润玉副教授、唐寿高副教授、同济大学出版社解明芳女士、张蕙瑛女士的大力支持和帮助。在此,谨表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中错误或不当之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者
1995年6月

目 录

第一章 绪论

§ 1-1	材料力学的任务	(1)
§ 1-2	变形固体及其基本假设	(2)
§ 1-3	内力 截面法 应力	(5)
§ 1-4	变形 位移 应变	(7)
§ 1-5	材料力学的研究对象	(9)
§ 1-6	杆件变形的基本形式	(10)
思考题		(11)

第二章 轴向拉伸与压缩

§ 2-1	轴向拉伸与压缩的概念及实例	(13)
§ 2-2	轴向拉伸(压缩)时横截面上的内力与应力	(14)
§ 2-3	轴向拉伸(压缩)时斜截面上的应力	(18)
§ 2-4	轴向拉伸与压缩时的强度条件	(20)
§ 2-5	轴向拉伸与压缩时的变形	(24)
§ 2-6	应力集中的概念	(32)
§ 2-7	材料在拉伸与压缩时的力学性能	(33)
§ 2-8	许用应力与安全系数	(44)
§ 2-9	拉压超静定问题	(45)
§ 2-10	拉(压)杆内的应变能	(56)
§ 2-11	圆筒形薄壁容器的应力	(58)
思考题		(60)
习 题		(62)
习题答案		(73)

第三章 剪切

§ 3-1	剪切的观念	(76)
-------	-------------	------

§ 3-2 剪切与挤压的实用计算	(76)
思考题	(85)
习 题	(86)
习题答案	(90)
第四章 扭转	
§ 4-1 扭转的概念	(91)
§ 4-2 扭矩和扭矩图 外力偶矩的计算	(92)
§ 4-3 薄壁圆管的扭转	(95)
§ 4-4 圆轴扭转时的应力和强度条件	(99)
§ 4-5 圆轴扭转时的变形和刚度条件	(105)
§ 4-6 圆轴扭转破坏现象分析	(109)
§ 4-7 矩形截面杆的扭转	(111)
思考题	(115)
习 题	(116)
习题答案	(121)
第五章 梁的内力	
§ 5-1 平面弯曲的概念	(122)
§ 5-2 梁的荷载和支座	(123)
§ 5-3 剪力和弯矩	(126)
§ 5-4 剪力方程和弯矩方程 剪力图和弯矩图	(133)
§ 5-5 弯矩、剪力和分布荷载集度间的关系	(144)
§ 5-6 按叠加原理作弯矩图	(150)
思考题	(152)
习 题	(154)
习题答案	(161)
第六章 梁的应力	
§ 6-1 纯弯曲时梁的正应力	(165)
§ 6-2 梁的正应力强度条件	(170)
§ 6-3 梁的合理截面 等强度梁的概念	(175)
§ 6-4 梁的剪应力及其强度条件	(178)

思考题	(188)
习 题	(190)
习题答案	(199)
第七章 梁的位移	
§ 7-1 梁的挠度与转角	(201)
§ 7-2 梁的挠曲线近似微分方程	(203)
§ 7-3 用积分法求梁的位移	(204)
§ 7-4 用叠加法求梁的位移	(210)
§ 7-5 梁的刚度条件	(219)
§ 7-6 简单超静定梁的解法	(220)
思考题	(224)
习 题	(227)
习题答案	(234)
第八章 应力状态分析和强度理论	
§ 8-1 应力状态的概念	(237)
§ 8-2 二向应力状态分析——解析法	(240)
§ 8-3 二向应力状态分析——图解法	(247)
§ 8-4 三向应力状态	(254)
§ 8-5 广义虎克定律	(257)
§ 8-6 三向应力状态下的比能	(262)
§ 8-7 强度理论	(263)
思考题	(274)
习 题	(278)
习题答案	(284)
第九章 组合变形	
§ 9-1 概述	(286)
§ 9-2 斜弯曲	(287)
§ 9-3 拉伸(压缩)与弯曲组合	(294)
§ 9-4 偏心拉伸(压缩)	(298)
§ 9-5 扭转与弯曲组合	(305)

思考题	(312)
习 题	(313)
习题答案	(321)
第十章 压杆的稳定性	
§ 10-1 压杆稳定性的概念	(323)
§ 10-2 细长压杆的临界力	(325)
§ 10-3 压杆的临界应力	(330)
§ 10-4 压杆的稳定计算	(336)
§ 10-5 提高压杆稳定性的措施	(347)
思考题	(349)
习 题	(350)
习题答案	(356)
第十一章 动荷载	
§ 11-1 概述	(358)
§ 11-2 惯性力问题	(358)
§ 11-3 冲击时构件的应力和变形计算	(367)
§ 11-4 提高构件抗冲击能力的措施	(378)
§ 11-5 冲击韧度	(379)
思考题	(381)
习 题	(383)
习题答案	(390)
第十二章 疲劳强度	
§ 12-1 交变应力与疲劳破坏	(392)
§ 12-2 材料的疲劳极限	(396)
§ 12-3 影响构件疲劳极限的因素	(400)
§ 12-4 对称循环下构件的疲劳强度计算	(407)
§ 12-5 提高构件疲劳强度的措施	(410)
思考题	(412)
习 题	(413)
习题答案	(415)

附录 I 截面图形的几何性质

§ I-1	静矩和形心	(416)
§ I-2	惯性矩和惯性积	(421)
§ I-3	惯矩和惯积的平行移轴公式	(425)
§ I-4	惯矩和惯积的转轴公式	(429)
习 题		(432)
习题答案		(435)

附录 II 型钢规格表

1. 热轧等边角钢(GB700—79)	(437)
2. 热轧不等边角钢(GB701—79)	(445)
3. 热轧普通工字钢(GB706—65)	(452)
4. 热轧普通槽钢(GB707—65)	(455)

第一章 绪论

§ 1-1 材料力学的任务

结构或机械的各个基本组成部分,即各个部件或零件,统称为**构件**(member)。在使用过程中,结构或机械的各个构件都要承受一定的**荷载**(load)作用。一切构件均由固体材料制成,在荷载作用下,其形状和尺寸都将发生一定程度的改变,称为**变形**(deformation)。任何一个构件,当所受荷载超过某一限度,就会发生过度的变形或破坏,而不能正常使用。因此,为了保证整个结构或机械能安全、正常地工作,每一个构件都必须具有足够的承载能力,即必须满足以下三个方面的要求:

(一) 足够的强度

所谓**强度**(strength)是指在荷载作用下构件抵抗破坏的能力。任何构件在使用期间都不允许发生破坏,即要求构件具有足够的强度。

(二) 足够的刚度

所谓**刚度**(stiffness)是指构件在荷载作用下抵抗变形的能力。在某些情况下,构件虽然具有足够的强度,即能承受一定的荷载作用而不发生破坏,但若变形过大,仍然不能正常工作。例如,楼板梁即使有足够的强度,弯曲变形过大时仍会导致天花板的石灰粉刷开裂、剥落而影响使用;机床主轴的弯曲变形超过一定限度时,会影响机床的加工精度。因此,在工程上除了要求构件具有足够的强度外,还要求它在荷载作用下产生的变形不超过允许的限度,即必须具有足够的刚度。

(三) 足够的稳定性

所谓**稳定性**(stability)是指构件保持其原有平衡形式的能力。受轴向压力作用的细长直杆,如厂房的柱子、千斤顶的螺杆等,当

压力不大时,它能够保持原有的直线平衡形式,但当压力增大到某一数值时,压杆就会从直线的平衡状态突然变弯而丧失工作能力。这种突然改变原有的平衡形式的现象,称为丧失稳定性,简称为失稳(buckling)。因此,为使这类构件能正常工作,还必须使它原有的平衡形式保持不变,即还要求它具有足够的稳定性。

综上所述,要使构件工作安全可靠,就必须使它满足强度、刚度和稳定性这三方面的要求。一般说来,设计构件时,为了满足上述三项要求,确保构件安全,往往要选用较大的截面尺寸和较好的材料,而这与降低材料消耗、节省资金、减轻自重的经济原则有矛盾。材料力学正是合理解决这种矛盾的一门学科。因此,材料力学的任务是研究构件受力后的变形和破坏规律,为构件选择适当的材料、确定合理的形状和尺寸,提供必要的理论基础和计算方法,使构件达到既安全又经济的要求。

构件的强度、刚度和稳定性与所用材料的力学性能(或称机械性质,mechanical properties)有关,而材料的力学性能须通过实验来测定。此外,材料力学的理论结果需用实验来验证,一些单靠现有理论解决不了的复杂问题,也需借助实验方法来解决。因此,实验研究和理论分析在材料力学中具有同等重要的地位。

材料力学与生产实践关系非常密切。生产的发展推动材料力学的发展,使它的研究范围不断扩大,理论、方法日臻丰富和完善。同时,材料力学的理论对生产实践也起着重要的指导作用,为构件的设计计算提供了简便实用的方法。

§ 1-2 变形固体及其基本假设

各种构件均由固体材料制成。固体在外力作用下将发生变形,故称为变形固体(deformable solid)。理论力学主要研究物体在外力作用下的平衡与运动规律问题,物体的微小变形对所研究的问题影响甚小,是一个可以忽略不计的次要因素,故可将物体看成是不变形的刚体(rigid body)。材料力学主要研究构件的强度、刚度

和稳定性问题,这时固体的变形就成为主要因素之一。因此,在材料力学的研究中必须把一切构件都看作变形固体。变形固体的性质是多方面的,为了简化问题,常略去固体的次要性质,并根据其主要性质作出假设,将它抽象为理想模型,然后进行理论分析。材料力学对变形固体所作的基本假设是:

(一) 连续性假设(assumption of continuity)

认为在物体的整个体积内毫无空隙地充满了物质。根据这个假设,可认为物体内部的物理量,如变形、位移等都是连续变化的,可以用空间坐标的连续函数来表示。

(二) 均匀性假设(assumption of homogeneity)

认为物体内部各点处的力学性能完全相同。根据这个假设,我们就可以从物体中取出任何微小部分进行研究,并将所得结论应用于整个物体,同时也可将大尺寸试件在试验中测得的材料力学性能应用于物体的任何微小部分。

(三) 各向同性假设(assumption of isotropy)

认为物体在各个方向具有相同的力学性能。具有这种属性的材料称为**各向同性材料**(isotropic materials)。

由近代物质结构理论可知,一切物体均由微粒(分子、原子等)组成,各微粒之间都存在着空隙。就工程上常用的金属而言,从微观结构的角度来看,由晶粒组成的金属物体显然不是密实连续的,而且单晶体的力学性能也有明显的方向性。但是,同实际构件的尺寸相比,物体内部晶粒之间的空隙极其微小,可以忽略不计。构件或它的任意部分所包含的晶粒数量极大,排列无序,所以构件受力后显示的整体性能是所有晶粒的性能的统计平均值。因此,从宏观的角度看,可以认为物体是连续均匀和各向同性的。工程上大多数材料,如铸钢、铸铜、玻璃,以及浇注得很好的混凝土等,都可以认为是均匀连续和各向同性的。钢材经辗轧或冷拔后,其晶粒排列表现出一定的有序性,因而只在一个方向上才有相同的性能,这类材料称为**单向同性材料**。有一些材料,如木材、胶合板、纤维增强复合材料等,其力学性能随方向的不同而不同,称为**各向异性材料**。

(anisotropic materials)。材料力学主要研究各向同性的变形固体，其计算公式也可近似地用于单向同性材料。对于复合材料，一般需放在复合材料力学中作专门研究。

上面三个基本假设是对实际工程材料的宏观性质所作的抽象和概括。此外，还应指出的是，在工程实际中，构件在外力作用下所产生的变形与构件原始尺寸相比，通常是很微小的，这种变形情况称为小变形。因此，在研究构件的平衡或运动时，可以不计其变形，而按变形前的原始尺寸进行分析计算，这样能使计算大大简化，而引起的误差非常微小。例如，图 1-1 所示的对称桁架，在 A 点处的外力 P 作用下，两杆发生变形，引起桁架的几何形状和外力作用点位置的改变(变形后的几何形状如虚线所示)。但因 A 点的位移 δ (图中的 δ 是夸大了的)远小于杆件的原始尺寸，故在求两杆的内力时，可忽略两杆的变形，按变形前的原始几何形状和尺寸进行计算。

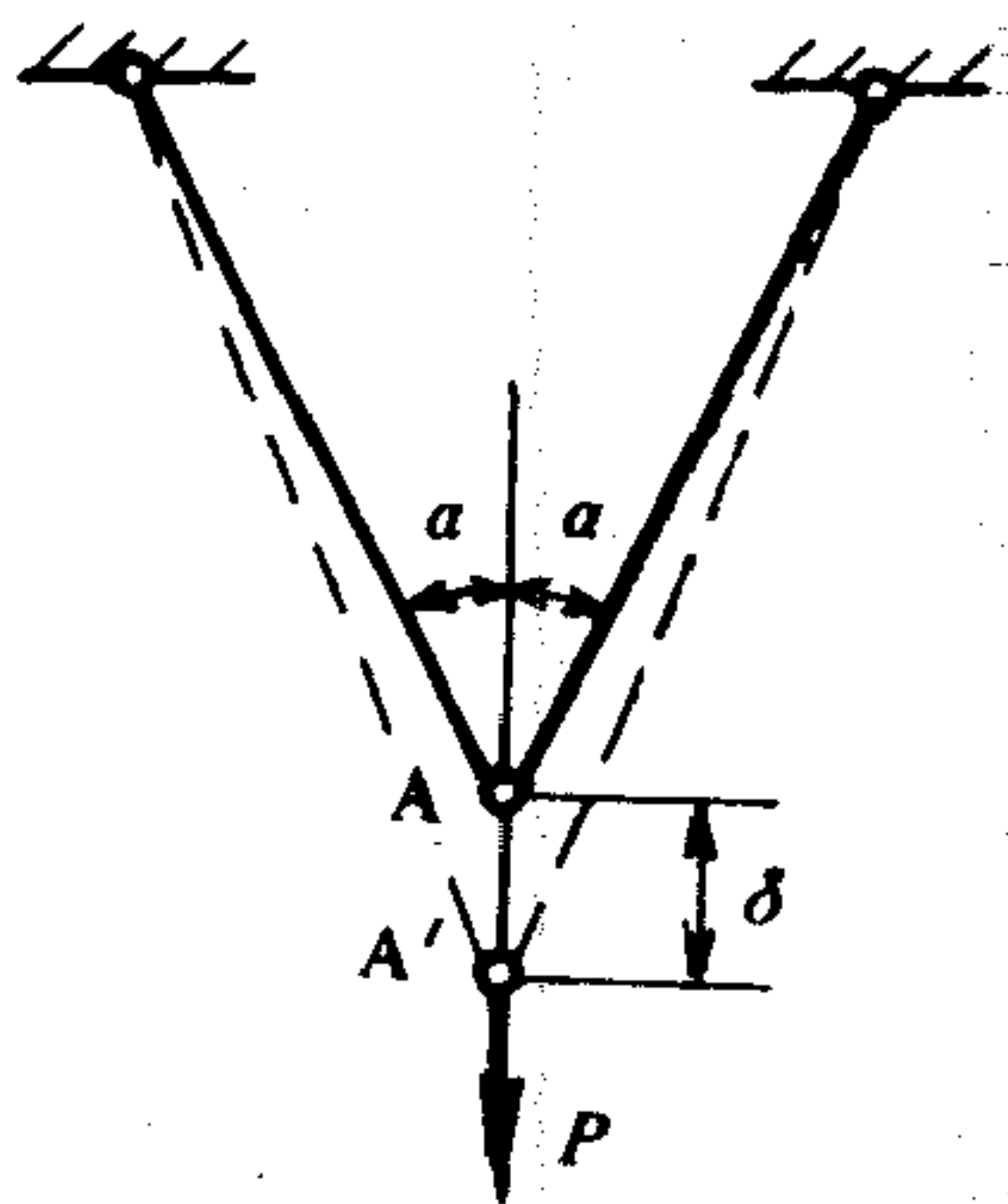


图 1-1

工程材料在外力作用下都将发生变形。实验结果表明，当外力未超过一定限度时，绝大多数材料在外力解除后又能恢复原有形状和尺寸。变形固体的这种性质称为弹性(elasticity)。随着外力的解除而消失的变形称为弹性变形(elastic deformation)。但当外力过大时，在外力解除后只能部分复原而残留下一部分不能消失的变形。外力解除后不能消失的变形称为塑性变形(plastic deformation)，或称残余变形、永久变形。在结构和机械正常工作的情况下，一般要求构件只发生弹性变形，而不允许出现塑性变形。

综上所述，在材料力学中，实际材料被看作是连续均匀、各向同性的变形固体，并且只限于研究弹性范围内的小变形情况。

§ 1-3 内力 截面法 应力

(一) 内力

物体的内力,一般是指物体内部各质点之间的相互作用力。物体未受外力作用时,其内部各质点之间就存在着内力,这种内力能使质点的相对位置保持不变,从而使物体保持一定的几何形状。当物体受外力作用而变形时,内部质点间的相对距离发生改变,从而引起内力的改变,即产生了“附加内力”。材料力学所研究的内力,就是物体内部各部分之间由外力作用而引起的附加内力,简称为**内力**(internal force)。这种内力随外力的增加而增加,到达某一极限值时构件就会发生破坏。可见,它与构件的强度、刚度、稳定性密切相关。

(二) 截面法

为了显示受力构件中的内力并确定其大小,可以采用**截面法**(method of section)。设图 1-2(a)所示的杆件在外力作用下处于平衡状态。如欲求任一横截面 $m-m$ 上的内力,可在 $m-m$ 处用一个假想的平面把杆件截成 I、II 两部分,任取其一部分,例如 I 段,作为脱离体,并将右段 II 对左段 I 的作用以截面上的内力来代替,如图 1-2(b)所示。因假设物体是均匀连续的,所以内力在截面上是连续分布的,称为分布内力系,而这里所要求的内力是截面上分布内力系的合力和合力矩。

由于整个杆件处于平衡状态,从中截出的任一部分也必然处于平衡状态。因此,考虑脱离体 I 的平衡,列出它的静力平衡方程,即可求出截面 $m-m$ 上的内力。若取 II 段作为脱离体,同样可用 II 段的平衡条件求出截面 $m-m$ 上的内力。由牛顿第三定律可知,分别由 I、II 两部分求出的 $m-m$ 截面上的内力是等值而反向的。

上述用来显示并确定构件内力的方法称为截面法,它是材料力学中广泛应用的基本方法,其过程可归纳为以下三个步骤:

(1) 在需求内力的截面处假想地用此截面将构件截开,分成

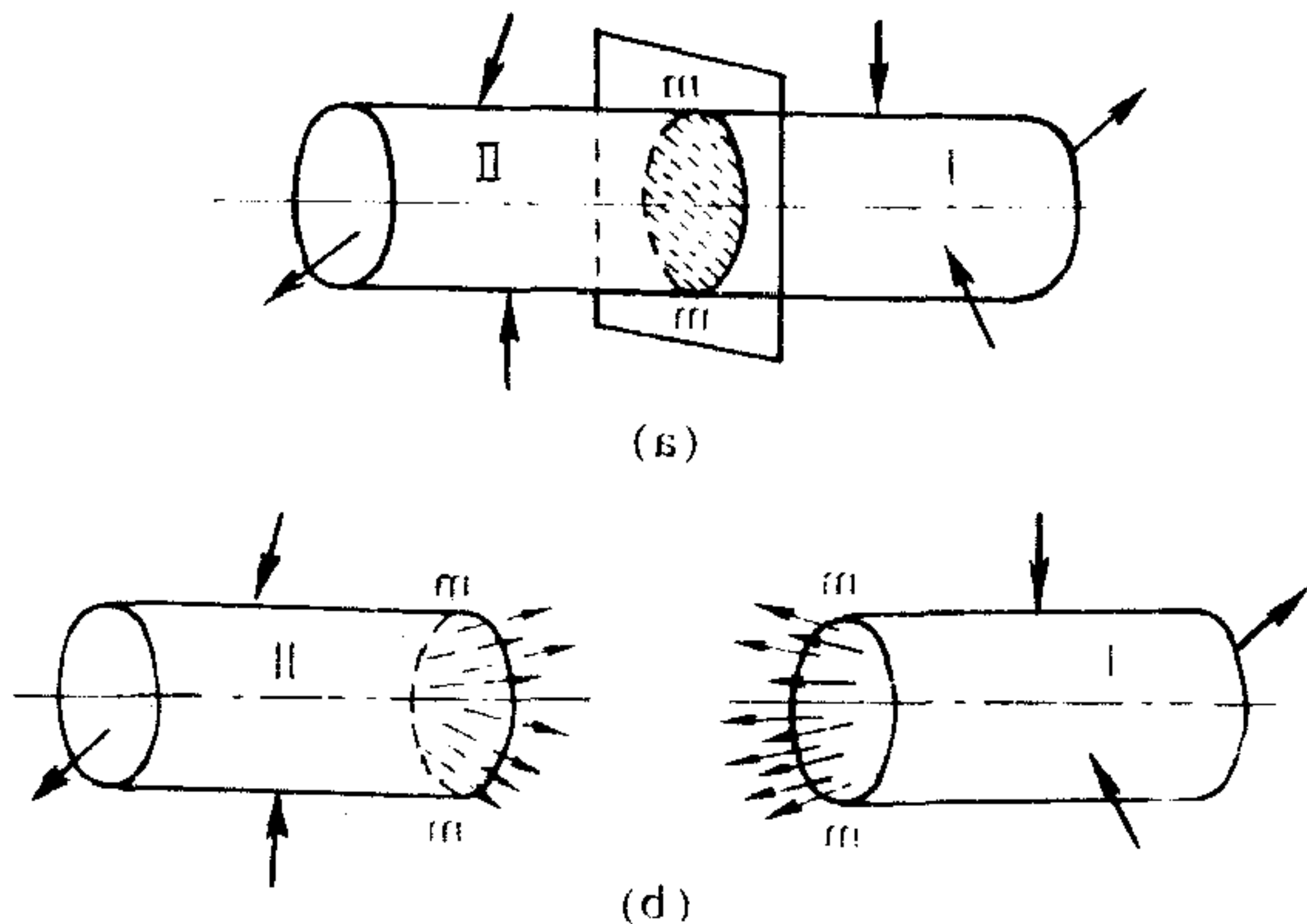


图 1-2

两部分；

(2) 取任一部分为脱离体，在其截面上用内力代替另一部分对该部分的作用；

(3) 对脱离体建立静力平衡方程，并由此解出截面上的内力。

(三) 应力

用截面法求得的内力是截面上分布内力系的合力和(或)合力矩。在一般情况下，为了判断材料的强度是否足够、材料可能从截面上哪一点开始破坏，还需要知道内力在截面上的分布规律，以及分布内力在各点处的强弱或密集程度。因此，有必要引入分布内力的集度即**应力**(stress)的概念，例如，若要研究图 1-3(a)所示受力构件内某截面 $m-m$ 上 M 点处的应力，可围绕 M 点取微小面积 ΔA ，设作用在 ΔA 上的内力为 ΔP ，于是在 ΔA 上的内力平均集度为

$$p_m = \frac{\Delta P}{\Delta A}$$

p_m 称为面积 ΔA 上的平均应力。一般情况下, p_m 的大小及方向是随 ΔA 的大小而改变的, 当 ΔA 无限地趋近于零时, p_m 的极限值 p 就是 M 点处的内力集度, 即

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA}$$

我们称 p 为截面上 M 点的总应力 (total stress)。总应力 p 是一个矢量, 通常将其分解为垂直于截面的分量 σ 和相切于截面的分量 τ , 如图 1-3(b) 所示。

σ 称为正应力 (normal stress), τ 称为剪应力 (shear stress)。应力的量纲是 [力]/[长度]², 在国际单位制中, 应力的单位是牛顿/米² (N/m²), 称为帕斯卡 (Pascal), 简称为帕, 记为 Pa。由于帕斯卡这个单位太小, 工程上常用的应力单位为兆帕 (MPa) 或吉帕 (GPa), 其关系为: 1MPa = 10⁶Pa, 1GPa = 10⁹Pa。

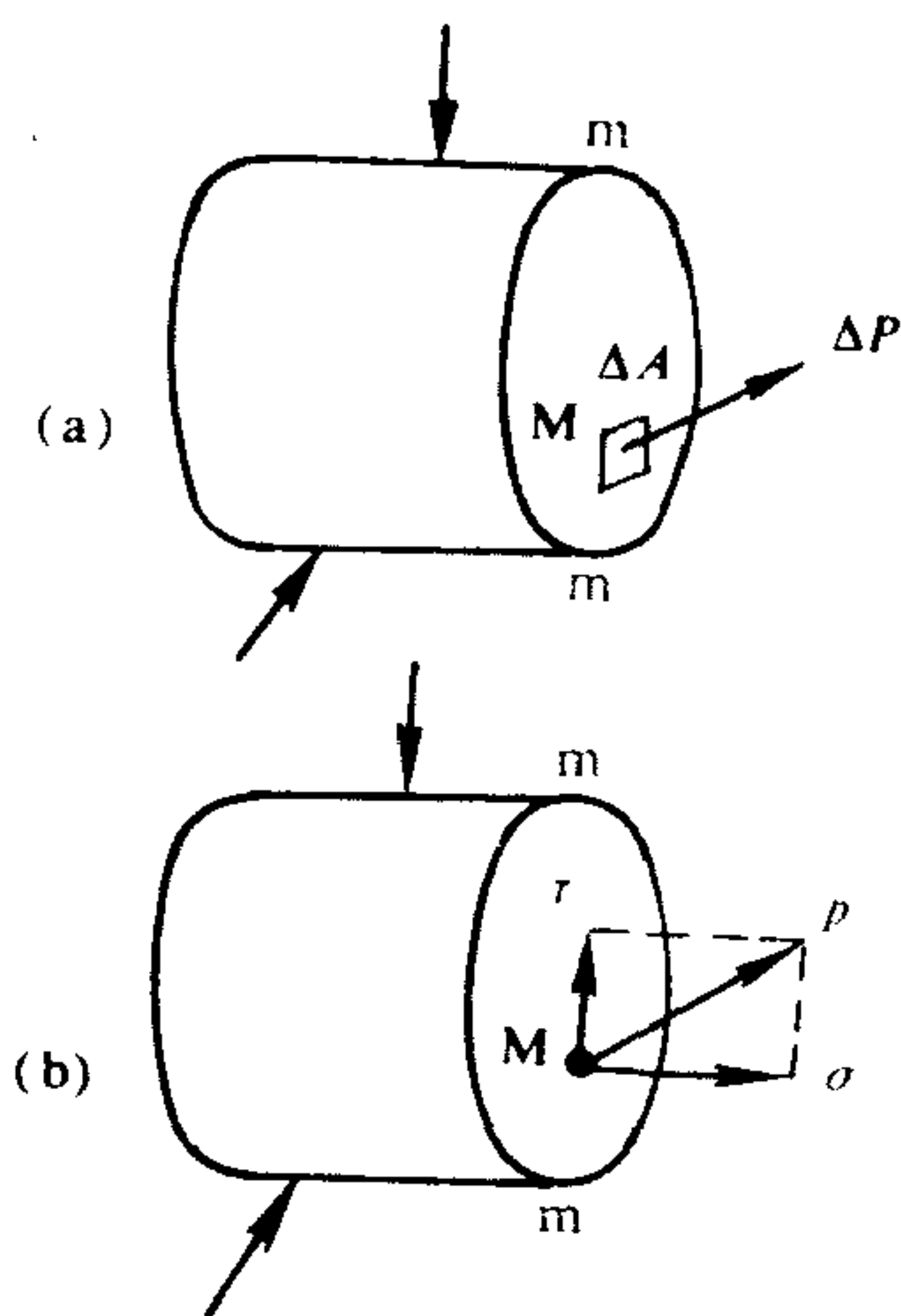


图 1-3

§ 1-4 变形 位移 应变

(一) 变形和位移

物体受力后, 其形状和尺寸的改变称为**变形**。变形后物体上的各个点、线、面的空间位置的改变量称为**位移** (displacement)。从物体上某一点的原始位置到其新位置所连成的直线, 称为该点的**线位移** (linear displacement)。物体上的某一线段或平面在物体变形后所旋转的角度, 称为该线或该面的**角位移** (angle displace-

ment)。例如图 1-4 所示的左端固定、右端自由的直杆,受横向荷载 P 作用而变形后,成为图中虚线所示的形状,这时右端平面形心的垂直线位移为 δ ,该平面的角位移为 θ 。变形和位移是两个不同的概念,但它们在数值上又有密切联系。位移不仅与杆的变形有关,还与杆的约束条件有关。

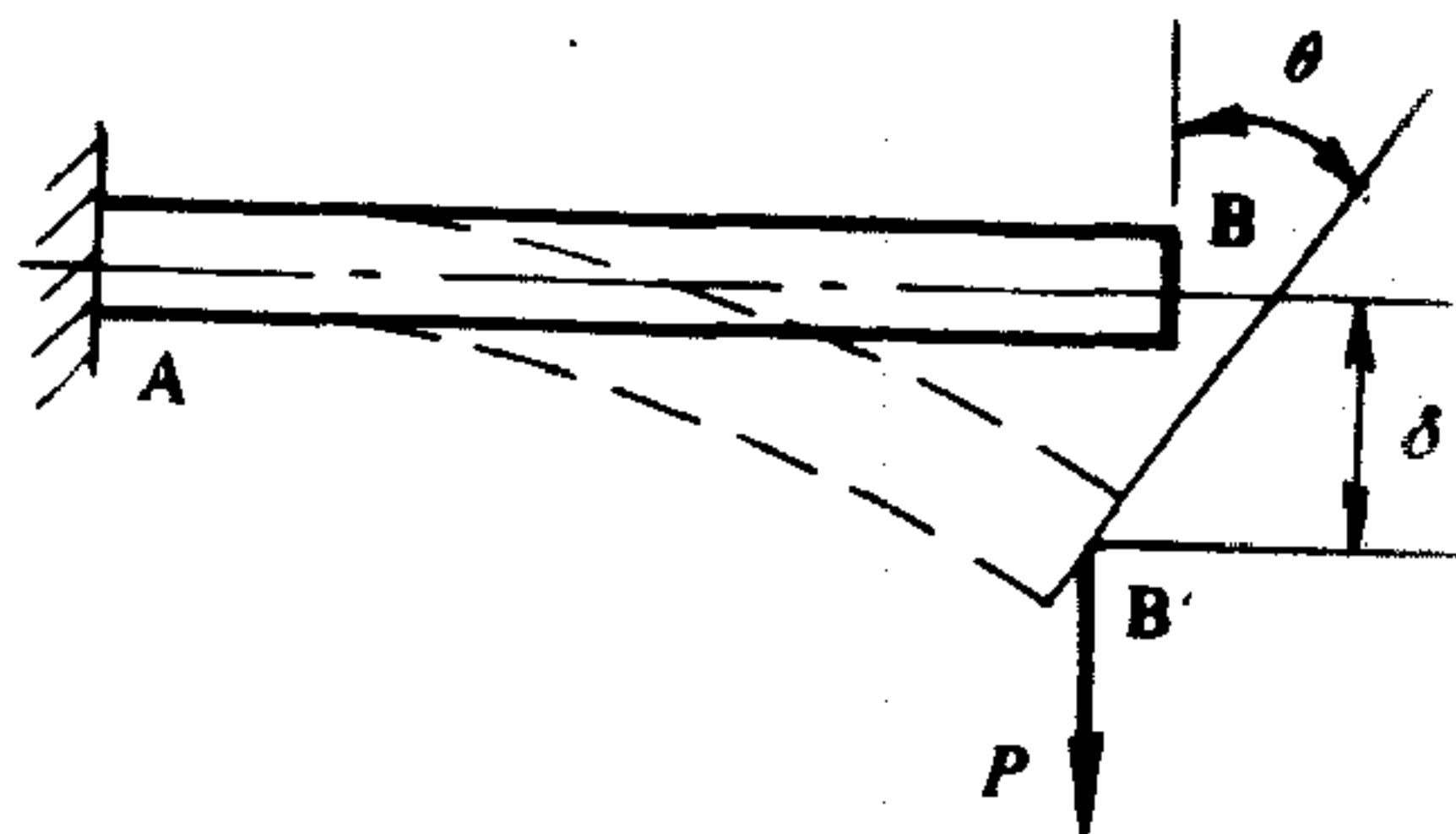


图 1-4

(二) 应变

在外力作用下,物体各点的应力一般是不同的。同样,物体各点处的变形程度一般也不相同。要研究物体内的应力的分布规律,必须首先研究物体各点处的变形情况。为了研究物体的变形,可设想把物体分割成许多微小的正六面体,称为**单元体或微元体**(element)。整个物体的变形便是所有单元体变形的总和。每个单元体的变形只有两种,即各棱边长度的改变和各棱边之间(或各平面之间)所夹直角的改变。图 1-5(a)是从构件内取出的一个单元体,设其沿 x 轴方向的棱边 AB 原长为 Δx ,变形后变为 $(\Delta x +$

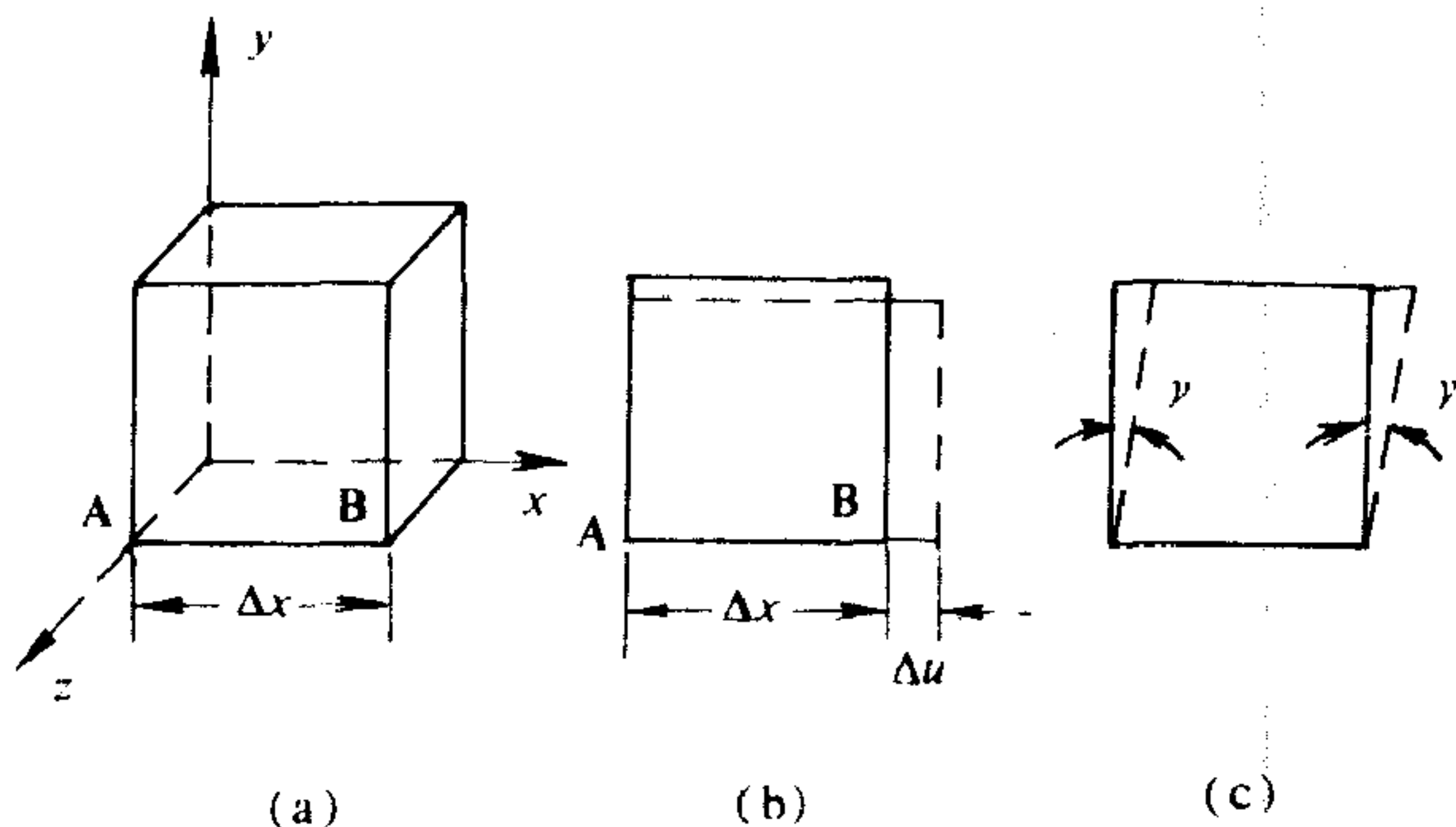


图 1-5

Δu),如图 1-5(b)所示。 Δu 称为线段 AB 的**绝对线变形**,其大小与原长 Δx 的长短有关,它不能确切地表明线段 AB 的变形程度。 Δu 与 Δx 的比值,即

$$\epsilon_m = \frac{\text{绝对线变形}}{\text{原长}} = \frac{\Delta u}{\Delta x}$$

称为线段 AB 的**相对线变形**,或称为线段 AB 的**平均线应变**。当线段 AB 的长度无限缩小,即当 Δx 趋近于零时,极限值

$$\epsilon = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{du}{dx}$$

称为 A 点沿 x 方向的**线应变**(linear strain),它表示受力物体上 A 点沿 x 方向的变形程度。线应变 ϵ 是一个无量纲的小量。

在单元体边长发生改变的同时,原来相互垂直的两条棱边所夹的直角也发生了变化,如图 1-5(c)所示。直角的改变量 γ 称为**剪应变**(shear strain),或**角应变**。 γ 也是一个无量纲的量,通常用弧度(rad)来度量。 ϵ 和 γ 是衡量构件内一点处变形程度的两个基本度量,它们分别与该点的正应力 σ 和剪应力 τ 有关。

§ 1-5 材料力学的研究对象

实际工程中的构件是多种多样的,若按几何形状分类,则可简化为杆件、板壳和块体等几个基本类型。

(一) 杆件(bars)

杆件是指长度 l 远大于横向尺寸(高度和宽度)的构件。横截面和轴线是杆件的两个主要的几何特征。横截面是垂直于杆件长度方向的截面,而轴线则为各横截面形心的连线,如图 1-6(a)所示。轴线为直线的杆称为**直杆**,轴线为曲线的杆称为**曲杆**。所有横截面都相同的杆称为**等截面杆**,横截面沿轴线变化的杆称为**变截面杆**。房屋结构中的梁和柱、机器中的连杆和传动轴等构件均可简化为杆件。

(二) 板和壳(plates and shells)