

成人高等教育理工科試用教材

材料力学

石铁君 主编

南开大学出版社

内 容 简 介

本书是根据1985年9月由河北省教育厅主持审订的成人高等教育工科《材料力学教材编写大纲》编写的。

本书内容包括：绪论与基本概念，拉伸和压缩、剪切和挤压、扭转、弯曲内力、梁的应力、弯曲变形、应力状态和强度理论、组合变形、变形能法、动载荷、交变应力、压杆稳定以及平面图形的几何性质。

本书可作为函授大学、夜大学、职工大学、职业大学等各类成人高等学校的本、专科的教材，同时可供普通高等学校各专业的专科作为教材。

材 料 力 学

主 编 石铁君

责任编辑 旭 明

南开大学出版社出版

(天津南开大学校内)

新华书店天津发行所发行

河北工学院印刷厂印刷

1988年8月第1版 1988年8月第1次印刷

开本：850×1168 1/32 印张：16

字数：400千 印数：1—10000

ISBN7-310-00042-0/TB·1 定价：2.80元

前 言

本教材是在河北省教育委员会的领导下，责成河北工学院成人教育处负责组织，为适应成人高等教育工科《材料力学》课程的教学需要而编写的。

本教材主要供函授大学、夜大学、职工大学、职业大学、电视大学等类成人高等学校的本、专科使用，同时可供普通高等学校专科使用。

本教材的基本内容适用于80学时的各类专业，加上有※号的内容能满足100学时各类专业的需要。其中有〈 〉号者用于机械类专业，有[]号者用于土建类专业。另外，连续梁及三弯矩方程、平面应变状态分析以及卡氏定理三节，仅供有关专业选用。对于少学时各类专业，可根据具体要求对基本内容作适当删减。

为了便于自学，本教材的编写力求概念清楚，理论完整，方法明确，突出重点难点。本教材的叙述较为详尽，例题也较多，使用时可根据实际情况作适当取舍。另外，本教材每章末附有小结、思考题和习题，以期对读者的学习有所帮助。

参加本教材编写工作的有：石铁君（第1、8、11、12章及附录I）、吴世滨（第2、3、10章）、罗维静（第5、6、9章）、马长培（第4、7、13章），由石铁君主编。

本教材由天津大学苏翼林教授主审。

由于编者的水平和经验所限，本教材中定会有不少缺点甚至错误，诚恳希望使用本教材的师生及读者批评指正。

编 者

1987年4月

目 录

第1章 绪论与基本概念	1
§ 1-1 材料力学的基本任务	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	4
§ 1-4 线应变与角应变	7
§ 1-5 杆件变形的基本形式	8
小结	10
思考题	11
第2章 拉伸和压缩	12
§ 2-1 拉伸和压缩的概念	12
§ 2-2 横截面上的内力	13
§ 2-3 横截面上的应力	15
§ 2-4 拉伸和压缩的强度条件	18
§ 2-5 斜截面上的应力	23
§ 2-6 拉伸和压缩时的变形 虎克定律	25
§ 2-7 材料在拉伸时的机械性能	32
§ 2-8 材料在压缩时的机械性能	38
§ 2-9 许用应力和安全系数	41
§ 2-10 拉伸和压缩的变形能和比能	42
§ 2-11 应力集中的概念	44
§ 2-12 拉、压超静定问题	64

※ § 2-13 装配应力和温度应力	53
小结	58
思考题	60
习题	60
第 3 章 剪切和挤压	70
§ 3-1 剪切的概念和实例	70
§ 3-2 剪切的实用计算	71
§ 3-3 挤压的实用计算	74
§ 3-4 纯剪切 剪切虎克定律	80
小结	83
思考题	84
习题	84
第 4 章 扭转	88
§ 4-1 扭转的概念和实例	88
§ 4-2 外力偶矩的计算	89
§ 4-3 扭矩和扭矩图	90
§ 4-4 圆轴扭转时的应力	94
§ 4-5 圆轴扭转时的强度条件	100
§ 4-6 圆轴扭转时的变形和刚度条件	104
§ 4-7 圆轴扭转时的应力分析	110
§ 4-8 圆轴扭转时的变形能	112
※ § 4-9 圆柱形密圈螺旋弹簧的计算	113
※ § 4-10 矩形截面杆的扭转简介	118
小结	120
思考题	123
习题	124

第5章 弯曲内力	130
§ 5-1 平面弯曲的概念	130
§ 5-2 梁的支座形式 梁的分类	131
§ 5-3 剪力和弯矩	135
§ 5-4 剪力图和弯矩图	140
※ § 5-5 剪力、弯矩和分布载荷集度的关系	147
§ 5-6 叠加法作弯矩图	157
※ § 5-7 平面曲杆及刚架的内力	159
小结	162
思考题	164
习题	164
第6章 梁的应力	172
§ 6-1 概述	172
§ 6-2 梁弯曲时横截面上的正应力	172
§ 6-3 正应力强度条件	181
§ 6-4 梁弯曲时横截面上的剪应力 剪应力强度条件	188
§ 6-5 梁的合理截面	199
§ 6-6 弯曲变形能	204
小结	205
思考题	207
习题	207
第7章 弯曲变形	214
§ 7-1 工程实际中的弯曲变形问题	214
§ 7-2 梁的挠度和转角 刚度条件	215
§ 7-3 挠曲线近似微分方程及其积分	216
§ 7-4 用叠加法求梁的变形	226

§ 7-5	用变形比较法解超静定问题	238
※ § 7-6	连续梁及三弯矩方程	244
§ 7-7	提高弯曲刚度的措施	251
小结		253
思考题		255
习题		256
第 8 章	应力状态和强度理论	264
§ 8-1	应力状态的概念	264
§ 8-2	二向及三向应力状态的实例	266
§ 8-3	二向应力状态分析	269
§ 8-4	三向应力状态简介	281
§ 8-5	广义虎克定律	283
§ 8-6	复杂应力状态下的变形比能	286
※ § 8-7	平面应变状态分析	288
§ 8-8	强度理论的概念	292
§ 8-9	四个强度理论及其相当应力	295
小结		303
思考题		305
习题		305
第 9 章	组合变形	310
§ 9-1	组合变形的概念	310
[※] § 9-2	斜弯曲	311
§ 9-3	拉伸(压缩)与弯曲的组合	317
§ 9-4	偏心压缩(拉伸)	320
§ 9-5	扭转与弯曲的组合	324
小结		330

思考题.....	331
习题.....	332
※第10章 变形能法.....	337
§ 10-1 变形能的概念.....	337
§ 10-2 杆件变形能的计算.....	337
§ 10-3 变形能的普遍表达式.....	343
§ 10-4 卡氏定理.....	346
§ 10-5 莫尔定理.....	351
§ 10-6 用莫尔定理理解超静定问题.....	361
小结.....	370
思考题.....	371
习题.....	372
第11章 动载荷.....	376
§ 11-1 动载荷的概念.....	376
§ 11-2 构件作匀加速直线运动和匀速转动时的应 力计算.....	377
§ 11-3 构件受冲击时应力和变形的计算.....	384
§ 11-4 提高构件抗冲击能力的措施.....	396
小结.....	399
思考题.....	400
习题.....	400
第12章 交变应力.....	404
§ 12-1 交变应力与疲劳破坏.....	404
§ 12-2 循环特性与持久极限.....	407
§ 12-3 对称循环持久极限的测定.....	409
§ 12-4 影响构件持久极限的因素.....	411

§ 12-5 提高构件持久极限的措施·····	413
小结·····	414
思考题·····	415
第13章 压杆稳定 ·····	416
§ 13-1 压杆稳定的概念·····	416
§ 13-2 两端铰支细长压杆的临界压力·····	417
§ 13-3 其他支座条件下细长压杆的临界压力·····	420
§ 13-4 欧拉公式的适用范围 超过比例极限时临 界应力的经验公式·····	422
< > § 13-5 压杆稳定计算的工作安全系数法 ·····	428
[] § 13-6 压杆稳定计算的折减系数法 ·····	430
§ 13-7 提高压杆稳定性的措施·····	433
小结·····	436
思考题·····	438
习题·····	439
附录 I 平面图形的几何性质 ·····	444
§ I-1 引言·····	444
§ I-2 静矩和形心·····	444
§ I-3 惯性矩与惯性半径·····	451
§ I-4 平行移轴公式与组合图形的惯性矩·····	457
小结·····	464
思考题·····	465
习题·····	466
附录 II 型钢表 ·····	470
附录 III 国际制词头及单位换算表 ·····	488
附录 IV 习题答案 ·····	489

第 1 章 绪论与基本概念

§ 1-1 材料力学的基本任务

人们在实践活动中，广泛地运用着各种机器和结构，例如机床、汽车、桥梁、房屋等，这些机器和结构虽然形式不同，用途各异，但都应满足以下基本的要求，这就是：**安全、适用、经济、美观**。

任何一个机器或结构，不论其构造如何复杂，总是由许多零件或构件（以后统称**构件**）组成的。为了使机器或结构安全、适用，能够正常工作，构件必须满足下面的几个条件：

1. 在给定的载荷作用下不破坏，即**要求构件有足够的强度**。例如，钢索在起吊重物时不应被拉断，齿轮的轮齿在啮合过程中不应产生不能恢复的变形。构件的断裂或者产生不能恢复的变形，都意味着构件的破坏。因此，强度是指构件抵抗破坏的能力。

2. 在给定的载荷作用下所产生的变形，不超过正常工作允许的范围，即**要求构件有必要的刚度**。这里所指的变形，是载荷去掉后可以恢复的变形。即使是这种变形，也不能超过允许范围，否则，将影响正常工作。例如，机床主轴变形过大，将影响工件的加工精度，吊车梁变形过大，吊车就不能正常行驶。因此，刚度是指构件抵抗变形的能力。

3. 在给定载荷作用下，能保持其原有的平衡形式，即**要求构件有足够的稳定性**。例如，千斤顶中的螺杆、钢结构中的细长构件，在压力作用下可能不再保持原来直线的平衡形式而被压

弯。而要正常工作，构件必须保持原有的直线平衡形式不变。所以，稳定性是指构件保持原有平衡形式的能力。

一般说来，构件应满足强度、刚度和稳定性三个要求，但具体到某一构件，根据其工作情况，又会有所侧重。

为了提高构件的强度、刚度和稳定性，通常需要选用优质材料，加大构件尺寸，这必然导致成本和重量的增加，这和经济性的要求是矛盾的。正确处理这种矛盾，是十分重要的。

材料力学的基本任务就是，在满足强度、刚度、稳定性和尽可能经济的要求下，为构件的设计提供必要的理论基础和计算方法。

另外，有些起特殊作用的构件，往往有相反的要求。例如，机器中起保险作用的安全销，要求载荷达到某一数值时破坏；车辆中起缓冲作用的弹簧，要求在载荷作用下有较大的变形等。

为了保证构件的强度、刚度和稳定性，必须研究材料的机械性能，而材料的机械性能需要由实验测定。另外，在一些假设基础上所得到的理论结果，其正确性也需要实验的验证。还有的问题，目前用理论分析尚不能满意地解决，需要依靠实验的方法。所以，**实验是理论的基础和重要补充**。材料力学中，理论研究和实验分析是紧密联系着的，并且都是解决问题的重要手段。

§ 1-2 变形固体的基本假设

制造各种构件所用的材料是多种多样的，但一般都是固体。固体在外力作用下将产生变形，称为**变形固体**。为了便于构件的强度、刚度和稳定性的研究，常略去一些次要因素，对变形固体加以简化，将其抽象为理想模型。这样，我们就能够采用理论的方法进行分析研究，从而得到一般性的结论。对变形固体所做的基本假设有：

1. **连续性假设** 即认为组成固体的物质毫无空隙地充满了固体的体积。

实际上，组成固体的粒子之间是不连续的。但是由于粒子及粒子之间的间隙与构件尺寸相比极其微小，因此可以忽略这些间隙，而认为固体在整个体积内是连续的。这样，在材料力学中就可以应用无限小的分析方法。

2. **均匀与各向同性假设** 即认为在固体的体积内，各点处的机械性质完全相同，并且固体在各个方向的机械性质也完全相同。

就应用很广的金属而言，其各个晶粒的机械性质不同，晶粒在各个方向的机械性质也不相同。但是，金属物体的一个小体积内包含着数量极多的晶粒，并且在排列上又杂乱无章，金属的性质是大量晶粒性质的统计平均值，因此，可以认为是均匀且各向同性的。

3. **小变形条件** 即材料力学所研究的问题，限于构件的变形远小于构件原始尺寸的情况。

由于有小变形的条件，在研究构件的平衡和运动时，就可忽略构件的变形，而按构件变形前的原始尺寸和形状进行分析计算。例如图 1-1 a、b 所示的结构，由于外力作用而变形，结构的

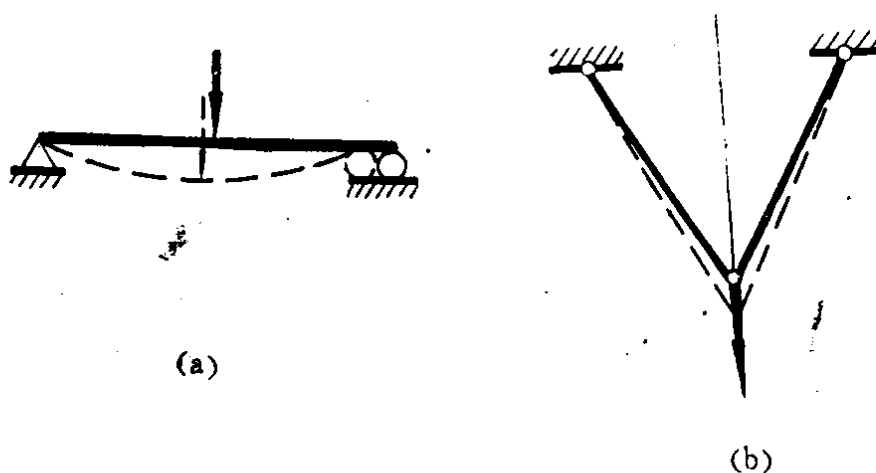


图 1-1

形状以及外力的位置都发生了变化。但由于变形很小，所以在计算图 1-1 a 所示结构的反力时，不考虑外力位置的变化，在分析图 1-1 b 所示结构各杆的受力时，不考虑各杆之间角度的变化，都按照构件未变形时的尺寸、形状来进行。小变形的条件，可以简化分析计算，而引起的误差非常微小，以后将经常利用。

大多数材料，如外力不超过一定限度，当外力去掉后，其变形可以完全恢复。这种当外力去掉后可以完全消失的变形，称为**弹性变形**。如外力超过一定限度，当外力去掉后，其变形只有一部分恢复，而残留下一部分不能恢复的变形。这种当外力去掉后不能消失的变形，称为**塑性变形**。根据强度要求，构件不应产生塑性变形，根据刚度要求，构件产生的弹性变形不能超出允许范围。

总括起来，在材料力学中，实际材料被看作是连续、均匀和各向同性的变形固体，并且在大多数情况下，是考虑弹性小变形的状态，因而可以根据构件的原始尺寸和形状进行研究。

§ 1-3 内力、截面法和应力的概念

构件在外力作用下要产生变形，其内部各质点间的相对位置将发生改变，因而各质点间的相互作用力也将发生改变。这种由于外力作用而引起的相互作用力的改变量，就是**内力**。因为构件在未受外力时，其内部各质点间已存在相互作用力，所以说，材料力学中所指的内力是附加内力。这种内力是由外力引起来的，并随外力的增大而加大，但达到某一限度时，就会引起构件的破坏。不同的材料，有不同的限度。所以内力与强度问题是有密切联系的。

为了确定构件在外力作用下某一截面的内力，通常利用截面法。

设有一个构件在若干外力作用下处于平衡状态(图 1-2 a), 如欲求截面 $m-n$ 上的内力, 则假想用一平面沿该截面将构件截开, 分成 A 、 B 两部分。任取其中一部分, 例如 A , 作为研究对象, 它仍应处于平衡状态。此时作用于 A 上的外力不再是平衡力系, 因此, B 必然有力作用于 A 的 $m-n$ 截面上, 以与 A 上作用的外力平衡(图 1-2 b)。同样, 根据作用与反作用定律, A 也以大小相等、方向相反的力作用于 B 的 $m-n$ 截面上。 A 、 B 之间的相互作用力, 就是构件 $m-n$ 截面上的内力。因此, 当分析构件某截面的内力时, 可以取截面任意一侧的部分来研究。

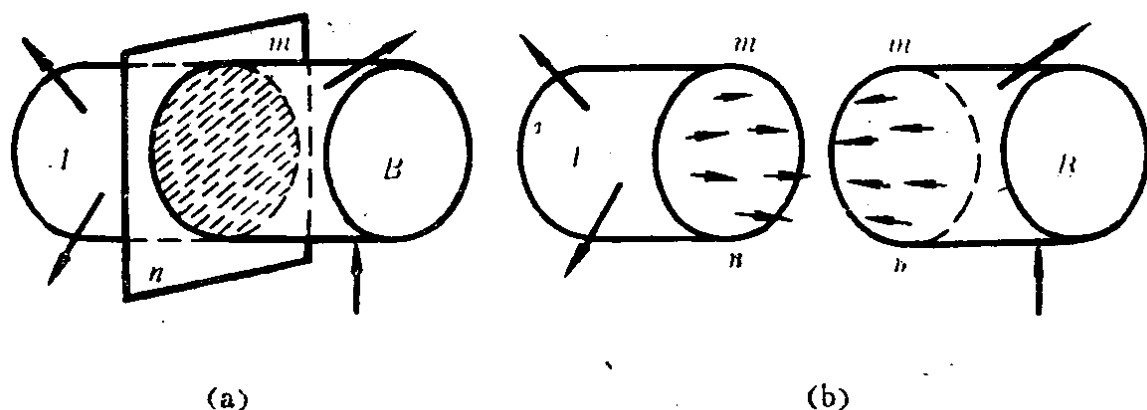


图 1-2

由于假设物体是连续的, 所以 $m-n$ 截面上的内力是连续分布的, 即 $m-n$ 截面上各处都有内力作用。如果把这个分布的内力系向截面上的某一点(通常是截面形心)简化, 就得到该力系的主矢和主矩, 即一个力和一个力偶, 有时只是一个力或只是一个力偶。今后, 把主矢和主矩称为该截面的内力。

作用在 A 上的外力, 与作用在 $m-n$ 截面上的内力保持平衡, 故根据 A 的平衡条件, 就可以求得 $m-n$ 截面上的内力。

上述截面法可以归纳为以下三个步骤:

1. 截开 在需要求内力的截面处, 沿该截面假想将构件截开, 分成两部分。
2. 代替 留下两部分中的任一部分, 将弃去部分对留下部

分的作用，用截面上的内力代替。

3. 平衡 建立留下部分的平衡条件，确定截开截面上的未知内力。

截面法是材料力学研究内力的基本方法，它和理论力学中经常采用的取分离体的方法在本质上是一致的。这种方法以后将经常使用。

但是，用截面法所求得的内力，是截面上分布内力系向截面某点简化后的结果，即是分布内力系的主矢和主矩，它不能表明内力系在截面某一点处的强弱程度，而分布内力系在截面一点处的强弱程度，正是研究构件强度所必需的。因为我们不仅需要知道构件可能沿哪个截面破坏，而且还需要知道可能从截面哪些点开始破坏。为此，我们引入内力集度的概念。

设在受力构件的某一截面上，围绕 C 点取微面积 ΔA (图 1-3 a)，因内力在截面上连续分布，若 ΔA 上内力的合力为 ΔP ，则将 ΔA 上内力的平均集度 (单位面积上的内力)

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

称为面积 ΔA 上的平均应力。

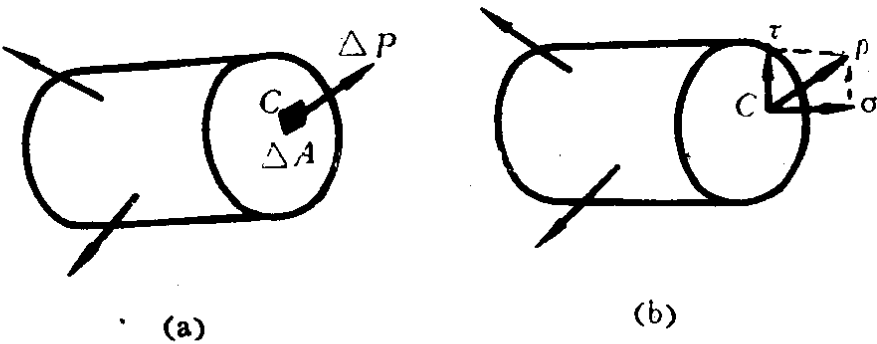


图 1-3

由于截面上的内力一般不是均匀分布的，所以平均应力 p_m 将与所取面积 ΔA 的大小有关，因而它不能准确地表明内力在 C 点的强弱程度。为了消除面积 ΔA 大小的影响，将面积 ΔA 缩小

趋近于零，平均应力的极限值

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA} \quad (1-1)$$

即表示截面 C 点处的内力集度，称为 C 点处的总应力。

一般情况下，总应力 p 既不与截面垂直，也不与截面相切。通常将总应力 p 分解为两个分量（图 1-3 b），一个在截面的法线方向，称为正应力，用 σ 表示；另一个在截面平面之内，称为剪应力，用 τ 表示。在以后的理论分析中，总是把总应力分解为正应力和剪应力。

在国际单位制中，力的基本单位是牛顿（N），长度的基本单位是米（m），所以应力的单位是牛/米²（N/m²），称为帕斯卡或简称帕（Pa）。由于这个单位太小，在工程中使用不便，通常使用 10⁶ 牛/米²（10⁶ N/m²）即兆牛/米²（MN/m²），称为兆帕（MPa）。因 10⁶ N/m² = 10⁶ N/10⁶ mm² = N/mm²，故在本书的许多计算中，长度单位用毫米（mm），而直接取 1 N/mm² = 1 MPa。目前仍在应用的工程单位与国际单位的换算，已列入附录 III。

§ 1-4 线应变与剪应变

在以后各章的叙述中将看到，为了得到受力构件截面上内力的分布规律，必须研究构件内各点处的变形。为此，可假想将构件分割成无数微小的正六面体，研究了这些微小正六面体的变形，就可了解构件内各点处的变形情况。

设在构件内的某一点 C 处，取出一个微小的正六面体（图 1-4 a），其与 x 轴平行的棱边 AB 原长为 Δx ，变形后改变了 Δu （图 1-4 b），则称 Δu 为 AB 的绝对变形。如果 AB 上各点处的变形程度相同，则比值

$$\varepsilon = \frac{\Delta u}{\Delta x} \quad (1-2)$$

代表 AB 上每单位长度的伸长和缩短，称为**线应变**或简称**应变**。

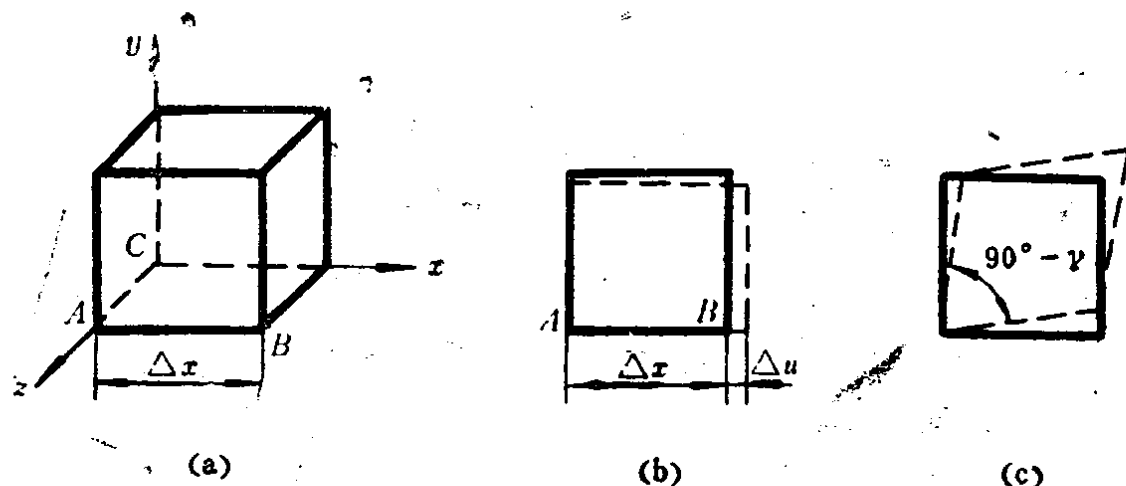


图 1-4

如果 AB 上各点处的变形程度不同，则上述比值只是 AB 的**平均线应变**，而 C 点处沿 x 方向的**线应变**应为

$$\varepsilon = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{du}{dx} \quad (1-3)$$

构件变形后，构件中的任一微小正六面体不仅棱边的长度要改变，而且原来相互垂直的两个棱边的直角也要改变（图1-4c），直角的改变量 γ 称为**剪应变**，用弧度(rad)来度量。

线应变 ε 和剪应变 γ ，是表示受力构件内一点处变形程度的两个基本量，它们都是极其微小的量，同时又都是没有量纲的量。以后将会看到，线应变 ε 和剪应变 γ 分别与正应力 σ 和剪应力 τ 相联系。在研究内力在截面上的分布规律时，首先就要研究 ε 和 γ 。

§ 1-5 杆件变形的基本形式

实际构件的形状是各式各样的，但对其形状进行简化后，大