

- 869983

GONGCHENG LIXUE

下册

工程力学

5(3)32

4428

T. 2

杜白简



成都科技大学出版社

目 录

绪论.....	(1)
第一章 基本概念.....	(1)
§1—1 材料力学的任务.....	(1)
§1—2 材料力学的基本假设.....	(4)
§1—3 变形固体的力学模型.....	(6)
§1—4 内力与截面法.....	(7)
§1—5 应力与应变, 虎克定律.....	(10)
练习题.....	(14)
第二章 轴向拉伸与压缩.....	(16)
§2—1 材料静拉伸试验, 测定极限应力.....	(16)
§2—2 材料静压缩试验.....	(21)
§2—3 应力集中概念.....	(24)
§2—4 拉(压)构件的工作应力.....	(25)
§2—5 拉(压)强度计算.....	(31)
* §2—6 拉(压)超静定问题.....	(40)
练习题.....	(47)
第三章 剪切与挤压.....	(52)
§3—1 剪切的观察与实验.....	(52)
§3—2 剪切工作应力.....	(54)
§3—3 挤压的概念与挤压工作应力.....	(56)
§3—4 剪切、挤压、拉(压)等综合强度计算.....	(57)

练习题	(65)
第四章 扭转	(68)
§ 4—1 转矩、扭矩及扭矩图	(69)
§ 4—2 等直圆轴扭转变形及扭转工作应力	(73)
§ 4—3 圆轴扭转时的强度计算与刚度计算	(78)
* § 4—4 圆轴扭转时超静定问题	(84)
* § 4—5 非圆截面杆的扭转概念	(85)
练习题	(88)
第五章 平面弯曲梁的内力	(92)
§ 5—1 工程构件的弯曲实例	(92)
§ 5—2 平面弯曲的外力及静力平衡方程	(93)
§ 5—3 弯曲内力，剪力方程及弯矩方程	(95)
§ 5—4 剪力图及弯矩图	(100)
§ 5—5 掌握控制截面的剪力、弯矩，直接作 Q、M 图	(107)
§ 5—6 应用弯矩 M、剪力 Q、分布力集度 q 的关系，简易作图法	(112)
§ 5—7 应用叠加原理作弯矩图	(117)
练习题	(120)
第六章 平面弯曲梁的应力	(126)
§ 6—1 平面纯弯曲的实验观察	(126)
§ 6—2 纯弯曲正应力公式推导	(128)

§ 6—3 梁截面的几何性质	(132)
§ 6—4 剪切弯曲梁截面上的正应力与剪应力	(140)
§ 6—5 梁弯曲强度计算	(144)
练习题	(152)
第七章 平面弯曲梁的变形、挠度及转角	(155)
§ 7—1 梁弯曲变形的实际问题	(155)
§ 7—2 梁的挠曲线近似微分方程	(155)
§ 7—3 用直接积分法求梁的挠度及转角	(158)
§ 7—4 叠加法求梁的挠度和转角	(171)
§ 7—5 梁弯曲的刚度计算	(173)
* § 7—6 超静定梁的解法	(175)
练习题	(180)
第八章 应力状态和强度理论	(183)
§ 8—1 应力状态概念	(183)
§ 8—2 平面应力状态数解法	(184)
§ 8—3 平面应力状态图解分析法、莫尔圆	(186)
§ 8—4 空间应力状态概念	(195)
§ 8—5 强度理论概述	(200)
练习题	(207)
第九章 组合变形	(241)
§ 9—1 概述	(244)
* § 9—2 斜弯曲	(244)
§ 9—3 拉伸与弯曲的组合	(248)
§ 9—4 偏心压缩	(221)

§9—5 扭转与弯曲的组合	(223)
练习题	(228)
第十章 压杆的稳定	(232)
§10—1 构件稳定的概念	(232)
§10—2 细长压杆的临界力 P_{cr}	(233)
§10—3 欧拉公式的适用范围	(239)
§10—4 中小柔度压杆的临界应力	(240)
§10—5 压杆的稳定性计算	(245)
练习题	(249)
*第十一章 能量法	(252)
§11—1 功和能的概念	(252)
§11—2 弹性杆件变形能计算	(255)
§11—3 卡氏定理	(264)
§11—4 应用卡氏定理解超静定问题	(271)
§11—5 构件受动载荷的应力和变形	(273)
练习题	(275)
**第十二章 弹性振动	(278)
§12—1 机械振动的概念	(278)
§12—2 单自由度自由振动理论	(279)
§12—3 杆件弹性自由振动	(283)
§12—4 单自由度系统简谐受迫振动	(288)
§12—5 受迫振动理论的应用	(293)
§12—6 杆件振动时强度计算问题	(297)
练习题	(300)
材料试验指导书	(303)
§1 试验机	(303)

§2	引伸仪	(313)
§3	电阻应变仪	(318)
§4	光弹仪	(325)
§5	材料力学基本实验	(330)
附录 I	型钢规格表	(342)

绪 论

材料力学是固体力学的一个分支，是研究工程结构构件和机器零件承受载荷能力（承载能力）的一门基础学科，材料力学的理论和方法简易实用，历来就成为工程技术人员解决实际问题的武器。随着现代高速车辆、航空航天、采油采矿、特大型工程结构所需机器设备，特别是随着冶金工业、化学工业的发展，出现众多新型高强度合金材料、人工合成材料，并对材料力学提出更多更新的研究课题，推动着材料力学学科的发展。

第一章 基本概念

§ 1—1 材料力学的任务

材料力学是研究各种工程构件的承载能力。各种构件是采用不同材料制造成的，材料的实际性能千差万别，构件的形状尺寸各异，在承受不同载荷时，产生不同的变形，并产生不同形式的破坏。而在材料力学中，常见的最简单的有四种基本变形：

（一）拉伸与压缩。如图1—1(a)所示支架，水平拉杆受拉伸，斜杆受压缩。沿杆轴线上作用等值、反向的二力，离开杆端横截面的是拉力，使杆伸长，指向杆的横截面的是压力，使杆缩短。类似这种拉伸（压缩）在生活中非常普遍，绳、索受拉，砖石块受压，等等。

(二) 剪切。如图1—1(b)所示螺栓连接受横向力作用，横截面之间发生平行错动、滑移。在等值反向二力之间发生平行四边形的错动，称为剪切变形。如铡刀、剪刀切断材料就是剪切。

(三) 扭转。如图1—1(c)，轴的两端受到等值，反向的力偶矩，(绕轴线转)，轴受到搓扭，形成麻花状，称为扭转变形。两手反向拧干毛巾、衣物的水份，拧紧螺帽螺钉，都属于扭转变形。

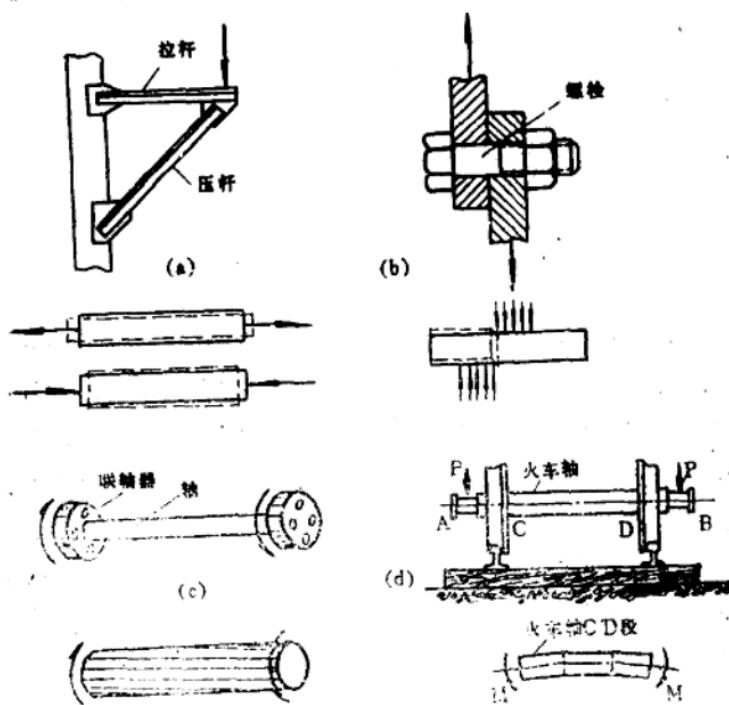


图 1—1

(四) 弯曲。如图1—1(d)，车辆受横向力，中间一段材料两端受等值、反向二力矩，但在轴线平面上作用，杆发生弯曲变形。如扁担、杠杆、桥梁、屋梁都受弯曲变形。

除了研究上述四种基本变形外，构件材料在承受载荷时，衡量它们的承载能力要采用三个力学指标：强度、刚度、稳定性。

1. 强度。构件材料抵抗外力破坏的能力。例如绳、索，只承受拉伸，就要求不被拉断，砖块受压，就要求不被压碎，轴不要扭断，车轴、梁，不要被弯断。在一定载荷作用下，要求绳、索、砖块、轴、梁有足够的强度，才不至于破坏，保证安全。

2. 刚度。构件材料抵抗变形的能力。材料受载荷作用，必然要产生变形，受拉而伸长，受压而缩短。扭转变形，弯曲变形，都要求在一定的限度内，否则构件就不能正常地工作。

3. 稳定性。要求结构构件具有保持或恢复平衡状态的能力，以至不造成构件承受载荷后，发生变形，偏离平衡位置，而又无力恢复，而使结构面目全非甚至垮台。

强度、刚度、稳定性这三个力学指标，不仅与构件材料的物理性能有关，而且与外力作用的情况有关，与构件的结构形状、尺寸大小有关。通过实验测定和理论分析，完全可以掌握计算强度、刚度、稳定性的主动权，从而保证在预定的承载条件下，使结构符合既安全又经济的原则。通常注重两方面。

主要方面。保证工程结构和机器设备，在工作中安全可靠，不出事故，当然构件的强度高、刚性大、稳定性好，如

材料选用得好一点，构件尺寸大一点，但也要恰如其分，避免成本高，造成浪费。始终坚持安全与经济的统一。

另一方面。保证材料机械加工工艺的顺利实施，也要懂得材料的强度、刚度、稳定性。

§ 1—2 材料力学的基本假设

实际工程结构和机器设备的制造，材料品种繁多，性质各异。为了建立统一的力学理论，经过反复的实验观察，抓住各种材料的主要力学性能，作出统一的科学假设。

一、均匀连续各向同性假设

认为变形的固体内部质量分布是均匀的、连续密实的、没有空隙，也没有富集稠密区，因此推断出：“在变形固体内部各点都有完全相同的物理性质，各方向都有相同的力学性能”。这个假设，对于绝大多数金属材料，特别是经过锻压锻轧后的金属材料，是很符合实际的。对于浇铸的铸件，浇灌的混凝土，如果保证生产的质量，避免气孔、缩松，也能符合均匀连续性的假设。对于天然材料、竹材、木材，在节疤又枝处就不均匀，而且顺纤维与横纤维的性能就大不一样，在设计计算中必须给予修正。天然石块就不能一概而论，质地坚硬细密的火成岩，也能符合均匀连续性的假设，片状岩石就差得多，也必须注意修正。

二、弹性小变形假设

材料力学只限于研究结构构件的弹性小变形。从材料的物理性能方面看，所谓小变形，是指结构构件受外力作用以后，产生弹性变形，并不改变外力的作用点和作用方向，或者说虽然有微小改变，但可忽略不计。所谓弹性变形，是指

当外力作用时产生了变形，当外力消除后变形也随之消除，没有丝毫的变形痕迹，完全恢复原状，没有残余变形。

三、平截面假设

可以把许多工程构件抽象为杆件，杆件是指具有长度、宽度或厚度的三维尺寸，与长度轴线相垂直处可以截取许多横截面，即在杆件表面垂直轴线x处刻划许多横直线，如图1—2。

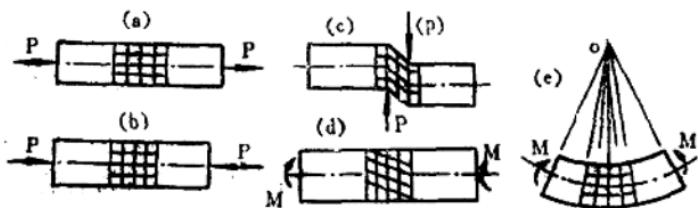


图 1—2

从几何方面来看，在不同外力、外力偶矩的作用下，发生四种基本变形。当杆受拉伸变形（图(a)），横直线相互离开；当杆受压缩变形（图(b)），横直线相互靠近；当杆受剪切（图(c)），横直线相互平行滑移错动；当杆受到扭转（图(d)），横直线相互旋转错动角 ϕ ；当杆受弯曲（图(e)），横直线绕弯曲中心O点转动过角度 θ 。

假设杆件的横截平面变形后仍保持为平面，好象刚性平面不会翘曲一样，变形只是这些横截平面之间几何位置的变化。平截面假设大大简化了实际变形的复杂性，特别是舍弃了材料内部分子之间由于变形而发生复杂的物理过程，易于推得理论计算公式，但不免带来误差。不过，实践证明，这种误差在一般工程应用中是允许的。因此，材料力学的理论方法，能解决工程实际问题。

§ 1—3 变形固体的力学模型

材料力学面对可变形的固体，既要考虑外力作用的外效应，又要考虑外力作用的内效应，相对而言，内效应（变形）是问题的主要方面。在建立变形固体受力的力学模型时，必须在前述几条基本假设的前提下，充分考虑变形问题。

理论力学的基本理论和基本方法仍然非常有用。但对于理论力学的结论，凡与变形内效应相抵触的，在材料力学中必须舍弃，或者有限制条件地使用。例如，外力可沿其作用线任意移动的推论，在材料力学中就不适用，必须舍弃。图1—2(b)为杆件受 P 力而拉伸变形，图1—2(c)为杆件受 P 力而压缩变形，绝不能把 P 力沿作用线任意移动，而混淆了两种不同的变形。再如图1—3(a)，悬臂梁 l 受分布力 q ，整根梁都有弯曲变形，若应用等效力 ql 代之，改为中点(c)处受到集中力作用，图(b)就只有左段梁有弯曲变形，右段还是直的。因此，合力投影定理只能在计算力的平衡关系时使用，而在计算变形时就不行了。又如图1—3(c)曲杆受 P 力，整根杆处处都有变形，若只研究局部竖杆的变形，(这是限制条件)，可以应用力的平移定理建成图1—3(d)图的力学模型。

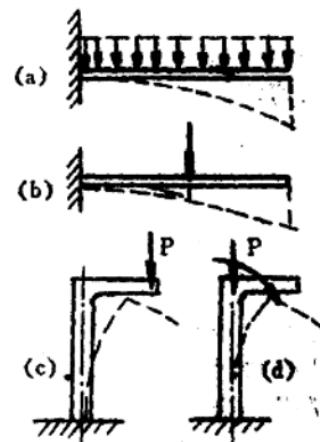


图 1—3

总之，建立变形固体的力学模型，必须注意变形这一主要方面，而外力的作用点和作用状态具有决定性的意义，不能轻易改变。

如果受力图为一般的空间力系，静力平衡方程，即力系外效应的平衡方程：

$$\begin{array}{ll} \sum X = 0 & \sum m_x(F_i) = 0 \\ \sum Y = 0 & \sum m_y(F_i) = 0 \\ \sum Z = 0 & \sum m_z(F_i) = 0 \end{array} \quad (1-1)$$

用式(1-1)能解算受力图中全部独立的未知量，称为静定问题。否则称为静不定(超静定)问题，还需研究构件的变形建立补充方程才能求解，而这正是材料力学的课题。

§ 1—4 内力与截面法

固体材料内部分子之间本来就有一种内聚力，因而能保持固体的形状，这是物理学研究的问题。材料力学中所说的内力是由于材料受到外力作用后，产生变形，同时材料内部分子之间产生一种附加的内力(简称为内力)，它反映出材料对变形的抵抗能力。当构件处于平衡状态时，内力总是与外力相互平衡的。

设有某一整体构件，受到已知平面外力系 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ 作用而平衡，(图1—4(a))。

怎样求解m-m截面处的内

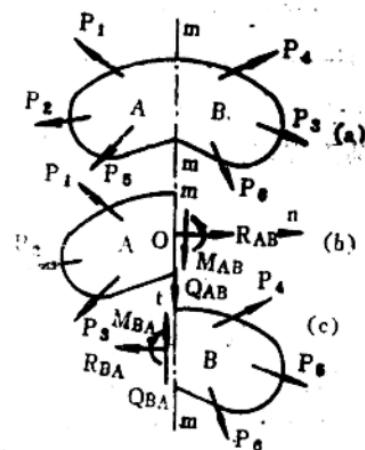


图 1—4

力？科学地假想（并非真实），把构件沿m—m截面分离为AB两局部，每一局部应该保持原有的平衡状态，即不移动，也不转动。显然，除了局部构件上原有的已知外力 P_i 之外，在截平面m—m上必定要有内力、内力矩作用才行，否则局部平衡就不可能。

按照局部构件上原有的已知平面外力系 P_i 的情况，截平面上就产生相应的内力。在截面中心取直角坐标系，法向的为 on ，切向的为 ot 。则沿法向坐标n的法向内力（正向力） R_{AB} ，沿切向坐标t的切向内力（剪切） Q_{AB} ，绕nt平面的内力偶矩 M_{AB} ，平衡外力沿nt坐标的移动，以及在nt平面上的转动。内力的脚码AB，前者表示内力（内力矩）所作用的A局部截面，后者表示来自右局部B的约束。A局部的内力反作用于B局部截面上的内力记为 R_{BA} 、 Q_{BA} 、 M_{BA} ，且 $R_{AB}=-R_{BA}$ ， $Q_{AB}=-Q_{BA}$ ， $M_{AB}=-M_{BA}$ 。由此分析知道构件截面上的内力，实质就是构件受外力作用而引起截面上的内约束力（内约束力矩）。应用截面法就能够作出AB两局部的受力图，其上包括一部分原作用的已知外力 P_i 和截平面上的未知内力 R 、 Q 、 M 组成一平面力系，则列出三条平衡方程式，即可解算三个未知的内力

$$\begin{aligned}\Sigma n \text{ (含内力)} &= 0 \\ \Sigma t \text{ (含内力)} &= 0 \\ \Sigma m_o \text{ (含内力、内力矩)} &= 0\end{aligned}\quad | \quad | \quad | \quad (1-2)$$

应用截面法求构件某截面上的内力，内力矩，应有以下步骤：（1）先求外力。以构件整体为对象，解除约束，代之以约束力，画出整体受力图。列出静力平衡方程 $(1-1)$ ，求解未知的外力（约束力）。（2）以假想截平面把构

件分为两局部，任意留下一局部，解除另一局部，代之以内力、内力矩，画出局部受力图。(3)按局部受力图(包括部分已知外力，以及未知的内力、内力矩)，列出静力平衡方程式(1—2)，求解未知的内力、内力矩。

例1—1 等截面直杆ABC如图1—5所示，已知外力P， $\alpha=30^\circ$ 及l、a，求截面为1—1以及无限靠近B点的2—2截平面上的内力、内力矩？

解 1. 先求外力(支座约束力)， X_B 、 Y_B 、 Y_C ，作整体受力图如图1—5(a)，列静力平衡方程

$$\sum X = 0 \quad P \cos \alpha - X_B = 0 \quad (1)$$

$$\sum Y = 0 \quad P \sin \alpha - Y_B + Y_C = 0 \quad (2)$$

$$\sum m_B(F_i) = 0 \quad -aP \sin \alpha + Y_C l = 0 \quad (3)$$

将 $\alpha=30^\circ$ 代入，解得 $X_B=\sqrt{3}P/2$ (向左)， $Y_C=P\alpha/2l$ (向上)， $Y_B=P(a+1)/2l$ (向下)。

2.用截面法；沿1—1截面截开留下右局部，沿2—2截面截开留下左局部，受力图如图1—5(b)、(c)。

3.列出已知外力与未知内力的静力平衡方程：

$$1-1 \text{ 截面 (留右)} \quad \sum Y = 0 \quad Y_C - Q_1 = 0 \quad (1)$$

$$\sum m_C(F_i) = 0 \quad Q_1 - \frac{l}{2} - M_1 = 0 \quad (2)$$

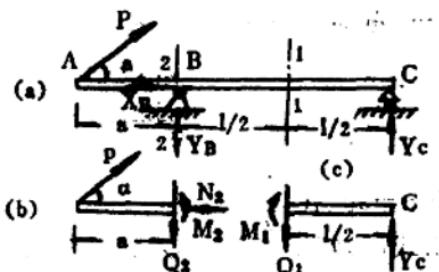


图1—5

由(1)式解得 $Q_1 = Y_c = Pa/2l$ (沿杆的横截面向下移为剪切)。

由(2)式解得 $M_1 = \frac{Pa}{4}$ (顺时针转向, 抵抗弯曲, 称为

弯曲力矩)

$$2-2\text{截面(留左)} \quad \Sigma X = 0 \quad P \cos \alpha - N_2 = 0 \quad (3)$$

$$\Sigma Y = 0 \quad P \sin \alpha - Q_2 = 0 \quad (4)$$

$$\Sigma m_B(F_i) = 0 \quad -aP \sin \alpha + M_2 = 0 \quad (5)$$

将 $\alpha = 30^\circ$ 代入

由式(3)解得 $N_2 = \sqrt{3}P/2$ (压力, 沿杆的轴线方向, 称为轴力)

由式(4)解得 $Q_2 = P/2$ (沿杆的横截面方向向下移称为剪力)

由式(5)解得 $M_2 = Pa/2$ (逆时针转向, 抵抗杆弯曲, 称为弯曲力矩)

§ 1—5 应力与应变, 虎克定律

应力, 是单位面积上内力的集度。构件受外力作用而平衡时, 设取面积 ΔA , 其上分布的内力为 ΔR , 求得内力平均分布的集度, 即单位面积上平均的内力称为平均应力 P^*

$$P^* = \frac{\Delta R}{\Delta A} \quad (1-3)$$

只有当 $\Delta A \rightarrow 0$ 的极限, 称为点的应力, 或称为完全应力(图1—6)。

$$P = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta A} = \frac{dR}{dA} \quad (1-4)$$

若将内力 ΔR 按平行四边形原理正交分解为两个：沿截平面法线方向的 ΔN （正向力）；沿截平面切线方向的 ΔQ （剪力）。与内力相应的应力也分解为两个，一个是沿截平面法线方向的 σ ，即 $\sigma \perp A$ ，称为正应力，表征截平面分开的两部分材料相互吸引（拉）或排斥（压）的力；第二个沿截平面切线方向的 τ ，即 $\tau \parallel A$ ，称为剪应力，表征截平面所分开的两部分材料相互滑移错动的力。 σ 、 τ 与强度有着非常密切的关系。由图1-6可得表达式为

$$\left. \begin{array}{l} \sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta A} = \frac{dN}{dA} \quad \text{或 } \sigma = P \cos \alpha \\ \tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta A} = \frac{dQ}{dA} \quad \text{或 } \tau = P \sin \alpha \end{array} \right| \quad (1-5)$$

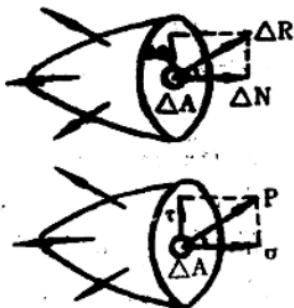


图 1-6

应力的计量单位有两种：在国际单位制中，应力单位为帕斯卡，中文代号为（帕），国际代号是（Pa）。在工程单位制中，应力单位为千克每平方厘米（kg/cm²），千克每平方毫米（kg/mm²）。两种单位制有以下换算关系：

1(Pa) = 1(N/m²)，N/m²代表牛顿每平方米。

10^3 (Pa) = 1(KPa) 千帕； 10^6 (Pa) = 1(MPa) 兆帕； 10^9 (Pa) = 1(GPa) 吉帕。