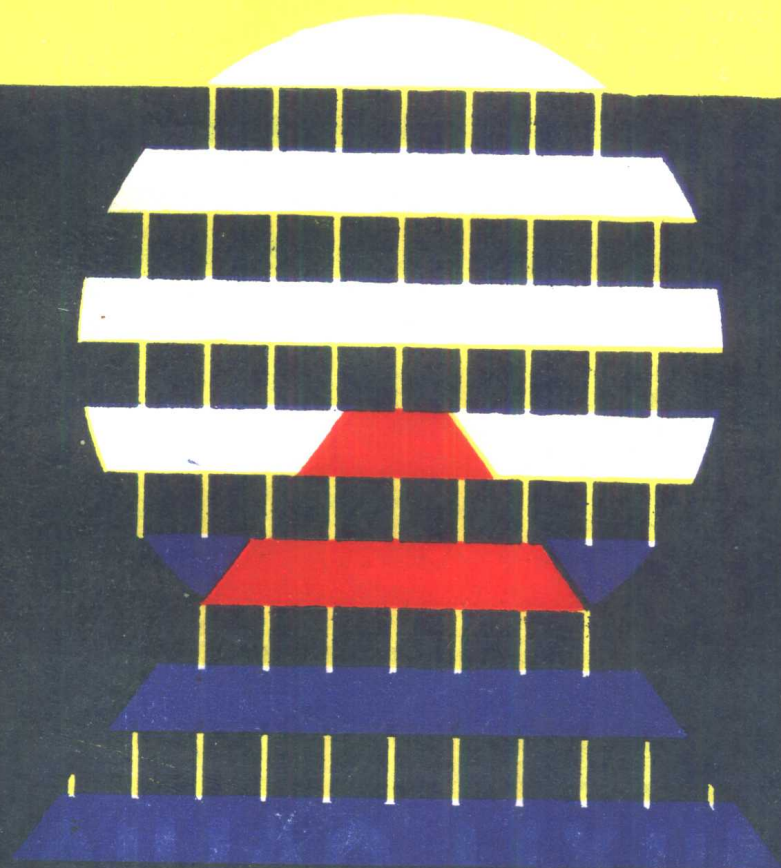


CAILIAO LIXUE

材料力学

- 许本安 李秀治
- 上海交通大学出版社



SHANGHAI JIAOTONG DAXUE CHUBAN SHE

材料力学

许本安
李秀治 编著

上海交通大学出版社

提 要

本书是根据原教育部高等院校工科力学教材编审委员会制定的中学时类型的材料力学教学大纲编写而成的。适用于作为90学时的动力机械、电机冶金等专业的教材。

全书共十四章，其中种*号的章节，可按各专业教学要求删选。每章末尾均附有思考题和习题。

材 料 力 学

上海交通大学出版社出版

(淮海中路1984弄19号)

新华书店上海发行所发行

浙江上虞汤浦印刷厂排版

江苏太仓印刷厂印装

开本850×1168毫米 1/32 印张 19.75 字数490,000

1988年6月第1版 1988年7月第1次印刷

印数: 1—10000

ISBN 7-313-00171-1/03

技书科目: 172—246

定价: 3.70元

前 言

本书是根据原教育部高等院校工科力学教材编审委员会制定的中学时类型的材料力学教学大纲编写而成的。教材内容以上海交通大学金忠谋先生编写的材料力学为基础,参考并吸收了近年来国内外材料力学教材中的长处,结合编者多年教学实践经验,作了某些增删和补充。

本书重视材料力学基本概念和基本理论的阐述,对于应力与变形的分析研究采用反复巩固讨论、逐次加深理解的作法。鉴于初学者常易发生的概念性错误,在各章后面都设置了一定数量的思考题,以期帮助学生掌握所学的基本概念、理论和方法。在选择例题与习题时,力求联系工程实际,扩充知识面,以提高分析问题和解决问题的能力。全书共有例题 128 道,思考题 119 道,习题 288 道。为使学生掌握专业英语词汇,本书对第一次出现的力学常用名词均用英语注明。近年来,不少学校在组织实施教学中引入了计算机的应用,以利于培养学生的程序设计能力。为此,作为一种尝试,本书给出少量例子说明用计算机求解力学问题的方法,并编写在有关内容的后面。

本书由上海交通大学工程力学系许本安和李秀治编写,许本安编写第一至第九章,李秀治编写第十至第十四章,最后由许本安通稿。金忠谋同志审阅了全书,提出了许多宝贵的修改意见,书中底图由吴孟伟同志绘制,在此一并表示深切谢意。

由于编者水平所限,错误或不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

一九八六年十二月

目 录

第一章 绪论 基本概念	(1)
§ 1-1 材料力学的任务	(1)
§ 1-2 变形固体及其基本假设	(3)
§ 1-3 内力、截面法与应力的概念	(5)
§ 1-4 位移、变形与应变的概念	(9)
§ 1-5 杆件变形的基本形式	(11)
思考题.....	(13)
习题.....	(15)
第二章 轴向拉伸与压缩	(17)
§ 2-1 拉伸与压缩的概念与实例	(17)
§ 2-2 拉伸(压缩)时横截面上的内力与应力	(18)
§ 2-3 拉伸(压缩)时的强度条件	(21)
§ 2-4 拉伸(压缩)时斜截面上的应力	(26)
§ 2-5 拉伸(压缩)时的变形	(29)
§ 2-6 拉伸时材料的机械性质	(39)
§ 2-7 压缩时材料的机械性质	(47)
§ 2-8 许用应力与安全系数	(49)
§ 2-9 拉伸(压缩)变形能	(51)
§ 2-10 应力集中概念	(54)
§ 2-11 拉压超静定问题	(56)
* § 2-12 结构的极限分析概念	(67)
思考题.....	(68)
习题.....	(72)
第三章 剪切实用计算	(85)

§ 3-1	剪切的概念与实例	(85)
§ 3-2	剪切与挤压的实用计算	(86)
§ 3-3	纯剪切实例——薄壁圆筒扭转试验	(93)
	思考题	(96)
	习题	(97)
第四章	扭转	(103)
§ 4-1	扭转概念与实例	(103)
§ 4-2	圆轴扭转时的应力与变形	(104)
§ 4-3	圆轴扭转时的强度条件与刚度条件	(112)
§ 4-4	圆轴扭转时斜截面上的应力	(118)
* § 4-5	圆柱形密圈螺旋弹簧	(120)
§ 4-6	矩形截面杆扭转的概念	(123)
* § 4-7	圆轴扭转的极限扭矩	(127)
	思考题	(128)
	习题	(131)
第五章	弯曲内力	(142)
§ 5-1	弯曲的概念与实例	(142)
§ 5-2	弯曲时的内力——剪力与弯矩	(143)
§ 5-3	剪力图与弯矩图	(147)
§ 5-4	剪力、弯矩与分布载荷集度间的关系	(152)
§ 5-5	叠加法作弯矩图	(160)
* § 5-6	平面刚架的内力图	(161)
	思考题	(164)
	习题	(165)
第六章	弯曲应力	(175)
§ 6-1	纯弯曲时梁的正应力	(176)
§ 6-2	弯曲正应力的强度条件	(181)
§ 6-3	梁的合理截面形状	(189)
* § 6-4	等强度梁的概念	(191)

§ 6-5 弯曲剪应力	(192)
* § 6-6 弯曲中心(剪切中心)的概念	(205)
* § 6-7 梁的极限弯矩概念	(208)
思考题	(210)
习题	(214)
第七章 梁的变位·超静定梁	(225)
§ 7-1 引言	(225)
§ 7-2 挠曲线近似微分方程	(228)
§ 7-3 两次积分法	(228)
§ 7-4 叠加法	(234)
§ 7-5 简单超静定梁的解法	(245)
§ 7-6 连续梁与三弯矩方程	(249)
§ 7-7 迭代法解连续梁的计算程序	(255)
思考题	(265)
习题	(267)
第八章 应力状态理论与强度理论	(275)
§ 8-1 一点应力状态概念	(275)
§ 8-2 二向应力状态分析	(279)
§ 8-3 三向应力圆及最大剪应力	(288)
§ 8-4 广义虎克定律	(291)
§ 8-5 三向应力状态的弹性变形比能	(296)
* § 8-6 材料三个弹性常数 E, G, μ 间的关系	(297)
§ 8-7 强度理论的概念	(298)
§ 8-8 四个古典强度理论	(299)
思考题	(307)
习题	(310)
第九章 组合应力	(319)
§ 9-1 概述	(319)
§ 9-2 斜弯曲	(322)

§ 9-3 拉伸(压缩)与弯曲的组合	(328)
§ 9-4 扭转与弯曲的组合	(334)
思考题	(345)
习题	(349)
第十章 电测应力分析概念	(361)
§ 10-1 概述	(361)
§ 10-2 电测应力分析的基本原理	(362)
§ 10-3 应力、应变的测量	(370)
§ 10-4 电测应力中其他问题简介	(378)
思考题	(381)
习题	(382)
第十一章 变形能法	(384)
§ 11-1 概述	(384)
§ 11-2 外力功的计算	(384)
§ 11-3 构件变形能的计算	(388)
§ 11-4 单位载荷法	(395)
§ 11-5 图形互乘法	(405)
§ 11-6 变形能法解超静定问题	(409)
§ 11-7 功的互等与位移互等定理	(413)
* § 11-8 力法 正则方程	(415)
思考题	(420)
习题	(422)
第十二章 动载荷	(431)
§ 12-1 概述	(431)
§ 12-2 等加速运动构件的应力计算——惯性力法	(432)
§ 12-3 冲击时应力和变形计算	(441)
§ 12-4 冲击实例及提高构件抗冲击性能的措施	(445)
§ 12-5 冲击韧度	(455)

* § 12-6 单自由度强迫振动时的应力计算·····	(457)
思考题·····	(462)
习题·····	(463)
第十三章 构件的疲劳强度计算·····	(472)
§ 13-1 交变应力与疲劳破坏·····	(472)
§ 13-2 材料的疲劳极限及其测定方法·····	(477)
§ 13-3 构件的疲劳极限·····	(481)
§ 13-4 构件的疲劳强度计算·····	(491)
§ 13-5 提高构件疲劳强度的措施·····	(502)
思考题·····	(505)
习题·····	(506)
第十四章 压杆的稳定性·····	(510)
§ 14-1 压杆稳定性的概念·····	(510)
§ 14-2 细长压杆的临界力——欧拉公式·····	(512)
§ 14-3 压杆的临界应力·····	(519)
§ 14-4 压杆的稳定计算·····	(526)
§ 14-5 提高压杆稳定性的措施·····	(536)
* § 14-6 能量法求临界力·····	(538)
思考题·····	(543)
习题·····	(544)
附录 I 截面图形的几何性质·····	(554)
I-1 静矩和形心·····	(554)
I-2 惯矩和惯性半径·····	(557)
I-3 惯性积和主惯性轴·····	(561)
I-4 惯矩和惯积的平行移轴公式·····	(562)
* I-5 惯矩和惯积的转轴公式·····	(571)
习题·····	(576)
附录 II 型钢规格表·····	(581)
习题答案·····	(601)

第一章 绪论 基本概念

(Introduction Some Fundamental Concepts)

§ 1-1 材料力学的任务

机械及工程结构中的每一个基本组成部分，统称为**构件**。一切构件都是由**固体形态**的材料制成，在**载荷**作用下，构件的**形状和尺寸**将发生一定的改变，称为**变形 (Deformation)**。同时，在构件内部将产生一定的**内力 (Internal force)**。随着载荷的继续增加，构件的变形程度与内力也逐步增大，最后将导致构件的过度变形或破坏。为保证机械和结构正常工作，要求任何一个构件都要有足够的承受载荷作用的能力，简称为**承载能力**。所谓“足够”，是指构件的承载能力不必过大而造成浪费，更不能不足而影响其正常工作。构件的承载能力通常由以下三个方面来衡量：

(一) **强度 (Strength)** 它表示构件抵抗破坏的能力。构件具有足够的强度是保证其正常工作最基本的要求。

(二) **刚度 (Stiffness)** 它表示构件抵抗变形的能力。在某些情况下，构件承受一定外力后，虽不致发生断裂，但若变形过大，也会导致构件不能正常工作。例如，机床主轴在工作时因

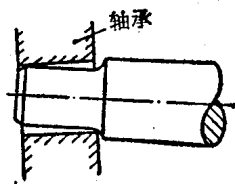
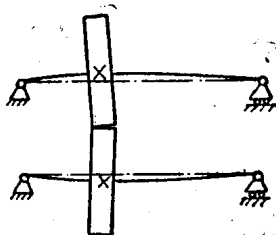


图 1-1

承受载荷作用而产生弯曲变形,如图 1-1 所示,若变形过大,将影响机床对工件的加工精度以及造成主轴轴承的严重磨损等。因此,对有些构件,除了要有足够的强度以外,还要求它有足够的抵抗变形的能力,即应有足够的刚度。

(三) 稳定性 (stability) 对于承受压缩力的细长直杆,例如,内燃机中的挺杆(图 1-2),千斤顶中的螺杆(图 1-3),厂房或矿井里的支柱等,当压缩力较小时,受压杆件能够保持其直线的平衡形式,但随着压缩力的增加,压杆会从直线的平衡形式突然变弯而丧失工作能力。这种突然改变杆件原有直线平衡形式的现象,称

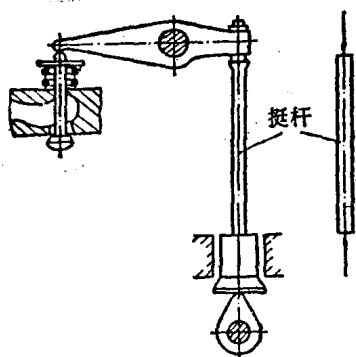


图 1-2

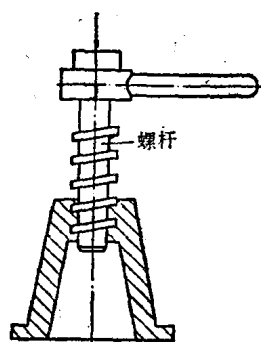


图 1-3

为压杆丧失稳定性,简称为失稳(Buckling)。所谓稳定性,就是指构件保持其原有几何平衡形式的能力。因此,对于类似于细长压杆这类构件,还要求它具有足够的稳定性。

显然,构件的强度、刚度、稳定性与构件所选用的材料、截面几何形状和尺寸等因素密切相关。材料力学的任务就是要研究它们之间的内在联系,为合理地解决工程构件的设计提供必要的理论基础知识和计算方法。

材料力学的理论研究常以实验为基础,同时,理论公式的正确与否,也需要经受实验的检查,构件材料的机械性质(力学性质)

则更需要直接依靠实验来测定。因此，理论分析与实验研究在材料力学中具有同等重要的地位。材料力学是一门理论与实验并重的学科。

材料力学研究的都是工程生产中的实际问题，它对生产实践起着重要的指导作用，同时，生产实践的发展也不断推动材料力学的发展，使它的理论日臻完善与丰富。密切联系工程生产实际以掌握理论是学好材料力学的正确方法。

§ 1-2 变形固体及其基本假设

在理论力学中，主要研究物体受力时的平衡与运动规律问题，而物体受力时所引起的微小变形对其平衡与运动来说影响极小，它只是个次要的因素。因此，可把物体抽象地作为不变形的刚体 (Rigid body)，以简化问题的研究。这种根据研究问题的主要性质，对研究对象作出某些假设，把它抽象为理想模型的方法，在一般学科的研究中起着相当重要的作用。当材料力学研究构件的强度与刚度问题时，这时物体的变形是一个主要因素。因此，刚体的概念在此不适用，它必须把一切构件都看作可变形的固体 (Deformable body)。而变形固体的性质是多方面的，为了简化问题，并便于研究，也常根据其主要方面对变形固体作出如下简化假设：

(一) 均质连续性假设 (Assumption of homogeneity and continuity)

它认为在构件整个几何容积内充满密实、均匀、连续的物质，且其机械性质在各处都一样，不因其在构件的不同部位而有所区别。

(二) 各向同性假设 (Assumption of isotropic)

它认为物体在各个方向上都有相同的性质。具有这种属性的材料，称为各向同性材料 (Isotropic materials)。

由近代物理学可知，一切物体都是由不连续的微粒子(分子、原子等)组成。从金属晶体的微观结构来看，每个单晶体的性质也都具有明显的方向性。如果根据这种复杂的物质微观构造来研究构件的力学性质，那将是十分困难的。然而，从宏观的角度来看，与构件的尺寸相比，物体内部的空隙极其微小，可以忽略不计。同时，我们研究的并非某个单晶体的力学性能，而是构件受力后所表现的宏观总体性能，也就是说，研究的是为数众多、且无规则排列的晶体群所表现出来的统计学上的平均性能。因此，可以认为，物体的性质具有均匀连续和各向同性特点。工程中大多数材料(如钢、铜等金属，塑料及调灌得很好的混凝土等)都可认为是各向同性的。对于轧制的钢材，晶体排列比较有序，是属于单向同性材料，而在各向同性假设基础上建立的材料力学公式也可近似用到这类材料的计算中去。此外，还有一些材料，它们的机械性质具有明显的方向性，称为**各向异性材料**(Anisotropic materials)，如胶合板、玻璃纤维织品等复合材料，它们的理论研究要复杂得多，在复合材料力学中有专门论述。

根据上面两个假设，今后，我们可以把构件看作由无数性质相同、彼此连续、极微小的正六面体(简称**单元体**)所组成，分析研究这些单元体(Element)的受力和变形，便可推断整个构件的承载能力。

(三) 小变形假设(Assumption of small deformation)

工程构件在外力作用下所产生的变形，与构件原始尺寸相比一般总是很微小的。因此，当我们对构件作静力平衡分析或运动分析时，可以不计其变形，而按变形前的原始尺寸来考虑，从而使计算大大简化。如图 1-4 所示的对称桁架，在 P 力作用下，结点 A 移动到 A' ，角 α 减小为角 α' 。则 AB 、 AC 杆的内力为

$$N_1 = N_2 = \frac{P}{2 \cos \alpha'},$$

式中：变形后的 α' 角又必须通过未知的内力 N_1, N_2 才能求出。这

样,杆件内力的计算就变得复杂得多。如果在分析结点 A 的静力平衡时,考虑到结点 A 的位移 δ 远远小于杆件的原始尺寸而可以忽略的话,则计算杆件内力 N_1 , N_2 时,便可用原来的夹角 α 来代替 α' , 即

$$N_1 = N_2 = \frac{P}{2 \cos \alpha},$$

从而使计算大为简化。

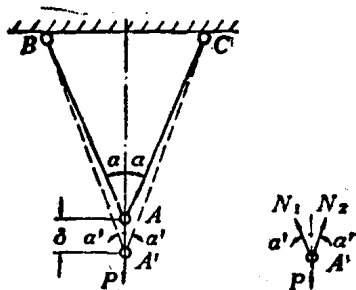


图 1-4

§ 1-3 内力、截面法与应力的概念

(一) 内力(Internal force)的概念

通常说来,物体的内力是指物体内部质点之间的相互作用力,在物体没有受到外力作用时它就存在着的。正是这种内力,使物体各个部分紧密相连,并保持一定的几何形状。

材料力学中所讲的内力,则是指物体在外力作用下引起的内部相互作用力的变化量,称为“附加内力”。这种附加内力随着外力的增加而增大,并与外力保持平衡。当外力增大,以致使附加内力达到某一极限值时,构件便产生破坏。因此,这种附加内力是与构件的强度密切相关的。材料力学研究的就是这种附加内力,以后简称为内力。

(二) 内力的计算——截面法(Method of section)

为了显示和确定内力,可应用截面法。设一杆件两端受到拉力 P 的作用下处于平衡,图 1-5(a),欲求任一横截面 $m-m$ 上的内力,可用一个假想的截面将杆件 $m-m$ 处截成两段,任取其中一段,例如第 I 段,图 1-5(b),作为示力对象进行分析。由于整个杆件处于平衡状态,因此,被截开的任一部分也必然处于平衡状态。

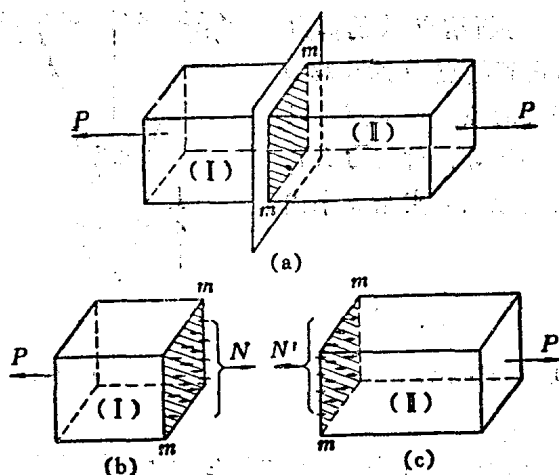


图 1-5

所以,第 I 段杆除受外力 P 作用外,在截面 $m-m$ 上必然有内力 N 的作用,它与外力取得平衡,即与外力 P 等值、反向、共线。该内力 N 实际上就是第 II 段杆对第 I 段杆的作用力。同理,如果取第 II 段杆作为示力对象,如图 1-5(c),根据其平衡条件,在 $m-m$ 截面上也必定有内力 $N' = P$ 的作用,而 N' 则是第 I 段杆对第 II 段杆的作用力。 N 与 N' 互为作用与反作用力,即是 I、II 段杆在 $m-m$ 截面上相互作用的内力。必须指出, I、II 段杆之间的相互作用遍及整个 $m-m$ 截面,因此,其相互作用的内力也是遍布在整个 $m-m$ 截面上连续分布的内力系。应用平衡条件所求得的内力 $N = P$ 只是这个分布内力系的合力。

上述求内力系合力的方法,称为**截面法**。它是材料力学中应用很广泛的基本方法,可将其过程归纳为下面三个步骤:

1. 在杆件需求内力的截面处,假想将此截面切开,截成两部,任取一部分作为示力对象进行研究,画出作用在它上面的外力。

2. 将另一部分对研究部分的作用以内力代替。
3. 对研究部分建立平衡方程式,从而确定截面上内力的大小和方向。

例题 1-1

图 1-6(a)所示为一台钻床,钻孔时,钻头受到 $P = 15\text{kN}$ 的压力, P 力作用线到立柱轴线的距离 $e = 40\text{cm}$ 。试求钻床立柱横截面 $m-m$ 上的内力。

解: 用假想截面将 $m-m$ 处截开,取其上部(I)作为示力对象,见图 1-6(b),研究其平衡。在外力 P 作用下(I)部保持平衡,因此,在截面 $m-m$ 处必然有内力 N 和内力矩 M 的作用,其方向如图所示。由平衡条件

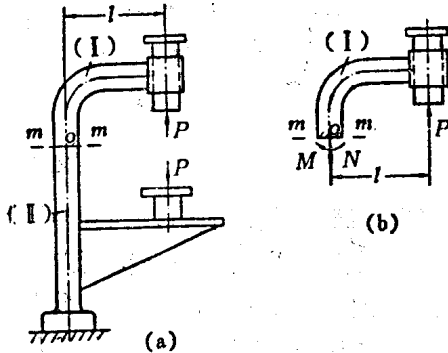


图 1-6

$$\begin{aligned}\sum Y = 0, \quad \therefore N &= P = 15\text{kN}; \\ \sum M_o = 0, \quad \therefore M &= P \cdot e = 15 \times 0.4 = 6\text{kN} \cdot \text{m}.\end{aligned}$$

最后,必须指出,在研究构件的内力或变形时,不允许应用力的可移性原理,这点可从下面例子来了解。如图 1-7(a)所示的杆件,在端点 A 作用一拉力 P ,由截面法可求得 $m-m$ 截面上的内力 $N = P$ 。若将 P 力沿作用线移至 B 点,如图 1-7(b),则 $m-m$ 截面上的内力为 0。同样道理,在研究杆件内力时,也不允许力偶在其作用平面上移动。总之,在研究内力时,适用于刚体力学中的“一个力系可用另一个与它静力相当的等效力系来代替”的原理都不适用。

(三) 应力(Stress)的概念

上述用截面法求得的内力是截面上分布内力系的合力或合力偶,这个合力的大小并不能用来描述截面上各点承受内力的强弱

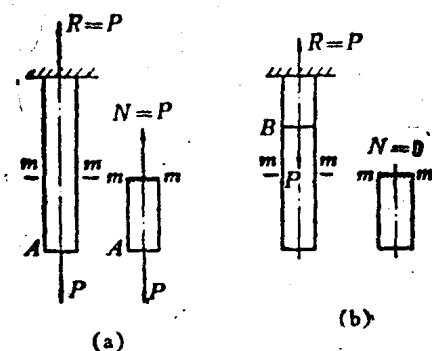


图 1-7

程度。而今后我们所最关心的常常是在构件中承受内力最严重的所谓“危险点”。为了描述截面上各点承受内力的程度,以及内力在截面上的分布状况,我们引入内力集度(即应力)的概念。

如图 1-8 (a)所示,设在受力物体内某一截面 $m-m$ 上任取一点 K ,围绕 K 点取微面积 ΔA ,若在 ΔA 上作用的内力为 ΔP ,则在 ΔA 上的内力平均集度为

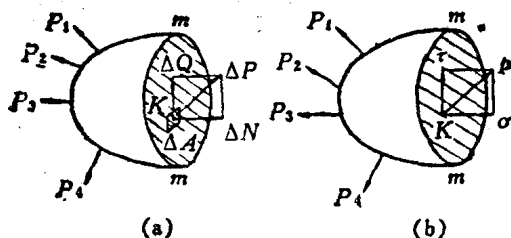


图 1-3

$$P_m = \frac{\Delta P}{\Delta A}, \quad (1-1)$$

P_m 称为作用在 ΔA 上的平均全应力。如果所取微面积 ΔA 越小,则 P_m 就越能准确表示 K 点所受内力的密集程度。当 ΔA 趋于