

材料力学

习宝琳 主编

华南理工大学出版社

高等工程力学系列教材

内 容 简 介

本书内容包括绪论,内力及内力图,拉伸和压缩、剪切,应力状态和应变状态,强度理论,扭转,弯曲应力,弯曲变形,组合变形杆的强度计算,能量法,交变应力,压杆稳定,电测应力分析和连续梁矩阵位移法。各章附有习题,书后给出答案。

本书可作为机械制造、焊接、模具制造和金属热处理等专业(80~90学时)材料力学课程的教材,还可供有关工程技术人员参考。

材 料 力 学

习宝琳 主编

责任编辑 湛柏琼

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

武汉大学出版社印刷总厂印刷

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 12.375 字数: 272 000

1989年12月第1版

1989年12月第1次印刷

印数: 1 - 7 000

ISBN 7-5609-0373-8/O·63

定价: 2.45元



前 言

本书受东北、华中地区高等工程专科学校教材协调委员会委托,根据一九八七年七月在哈尔滨召开的力学课程组会议,制定的机械专业材料力学课程基本要求编写的。在内容上适当地照顾到其他专业的需要。本书可作为机械专业(80~90学时)或其他相近专业材料力学课程的教材,还可供工程技术人员参考。

本书重视基本理论、基本概念和基本方法的阐述,并针对专科教育的特点,加强了与工程实际的联系,以利于提高读者分析问题和解决问题的能力。

参加本书编写的有:沈阳冶金机械专科学校杨常山(绪论、第一章),沈阳黄金学院吴建中(第二、三章),湖南省轻工业专科学校彭培勇(第四、十三章),湖南省邵阳工业专科学校钟国筑(第五、八章),郑州机械专科学校赵芳印(第六、十一、十二章),郑州纺织工学院赵勇源(第七章),哈尔滨机电专科学校习宝琳(第九、十章)。由习宝琳任主编,赵勇源任副主编。并由沈阳冶金机械专科学校李树嘉副教授担任主审。

由于编者水平有限,书中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

1988. 4

序

十年来,我国的高等教育事业蓬勃发展,尤其是高等专科教育的发展更为迅速。为了进一步提高教学质量,急需编写、出版适合专科教学要求的教材。教材是师生进行教学活动的重要依据,决定着课程甚至专业的教学水平和教学效果。因此切实搞好教材建设,使专科学校的教材能充分体现专科的培养目标,符合教学大纲与教学计划的要求,是当前专科学校深化教学改革中的一项十分重要而又紧迫的工作。

各高等专科学校为了适应教学需要,根据专科的特点和教学要求,自编了部分教材或讲义,在一定程度上克服了长期使用本科教材因而难以体现专科特点的弊病。为了进一步提高教材编写和出版的质量,在国家教委的支持下,在华中理工大学出版社的积极倡导下,沈阳冶金机械专科学校、郑州机械专科学校、哈尔滨机电专科学校和湖南省轻工业专科学校等14所专科学校,于1987年5月成立了“东北、华中地区高等工程专科学校教材协调委员会”,组织和协调有关工程专科学校的教材编写工作。

经参加“协调委员会”的各校负责同志的协商,决定首先编写一套适用面较广的教材,并由各校组织学术水平较高、教学经验丰富的教师分工合作,进行编写。由于参加编写教材的教师的共同努力,以及华中理工大学出版社的大力支持,现已编写好了一套适用于高等工程专科学校的教材,它们是高等数学、线性代数、概率与数理统计、大专物理、理论力学、材料力学、工程力学、电工电子技术基础、金属热加工、工程材料、机械原理、机械设计和机械工艺学。这些教材将由华中理工大学出版社陆续分批出版。

这套教材是在认真分析了十年来使用的国内外高校教材、自编讲义和较系统地总结了多年的教学经验的基础上编写出来的,因此较好地体

现了专科特点,符合一般专科教学计划和教学大纲的要求,适合全日制高等工程专科学校以及夜大、职大、函大的工程专科班使用。

这套教材的特点是,符合专科培养目标,内容的深度、广度适当,突出理论联系实际,注意知识的应用和学生能力的培养,适当介绍与反映了现代科学技术的新成就。这套教材不仅具有专科的特色和富于启发性,而且文字简练,结构严谨,插图清晰,是目前比较理想的专科教材,希望推广使用。

由于编写高等工程专科教材是一项新的工作,很多问题尚在探索之中,加之水平有限,编写时间较短,书中难免存在缺点和错误。殷切希望使用本教材的教师和广大读者批评指正。

东北、华中地区高等工程专科学校

教材协调委员会主任于勤兹

于1988年5月

目 录

绪论	(1)
§ 0-1 材料力学的任务	(1)
§ 0-2 变形固体及其基本假设	(2)
§ 0-3 材料力学的研究对象 杆件变形的基本形式	(3)
§ 0-4 内力 截面法 应力的概念	(5)
§ 0-5 应变 变形与位移	(8)
第一章 内力 内力图	(11)
§ 1-1 杆件拉伸(压缩)时的内力——轴力	(11)
§ 1-2 杆件扭转时的内力——扭矩	(13)
§ 1-3 杆件弯曲时的内力——剪力和弯矩	(16)
§ 1-4 剪力方程和弯矩方程 剪力图和弯矩图	(22)
§ 1-5 弯矩、剪力和载荷集度间的关系	(26)
习题	(30)
第二章 拉伸和压缩 剪切	(34)
§ 2-1 直杆拉伸时横截面上的应力	(34)
§ 2-2 拉伸和压缩时斜截面上的应力	(36)
§ 2-3 直杆拉伸和压缩时的变形 虎克定律	(38)
§ 2-4 拉伸和压缩时材料的机械性质	(41)
§ 2-5 拉伸和压缩时的强度计算	(47)
§ 2-6 剪切和挤压	(51)
§ 2-7 拉伸和压缩时的超静定问题	(57)
§ 2-8 拉伸和压缩时的应变能	(62)
§ 2-9 应力集中	(64)
习题	(66)
第三章 应力状态和应变状态	(76)

§ 3-1	应力状态的概念	(76)
§ 3-2	平面应力状态下斜截面上的应力	(76)
§ 3-3	图解法求平面应力状态下斜截面上的应力	(78)
§ 3-4	主应力与主平面	(81)
§ 3-5	三向应力状态的应力圆 最大剪应力	(86)
§ 3-6	二向应变状态分析	(90)
§ 3-7	复杂应力状态下应力与应变的关系	(96)
* § 3-8	三向应力状态下的应变比能	(101)
习题		(103)
第四章	强度理论	(106)
§ 4-1	强度理论的概念	(106)
§ 4-2	四个常用的强度理论	(107)
§ 4-3	强度理论的应用	(110)
* § 4-4	莫尔强度理论	(110)
习题		(113)
第五章	扭转	(114)
§ 5-1	圆轴扭转时的应力和变形	(114)
§ 5-2	圆轴扭转时的强度、刚度及应变能计算	(121)
* § 5-3	圆柱形密圈螺旋弹簧的应力和变形	(127)
* § 5-4	矩形截面杆扭转的概念	(131)
习题		(134)
第六章	弯曲应力	(138)
§ 6-1	纯弯曲时梁横截面上的正应力	(138)
§ 6-2	轴惯性矩 平行移轴公式	(146)
§ 6-3	弯曲时正应力的强度计算	(150)
§ 6-4	梁横截面上的剪应力	(154)
§ 6-5	梁的主应力	(162)
§ 6-6	考虑剪应力时的强度计算	(164)
习题		(166)

第七章 弯曲变形	(173)
§ 7-1 挠曲线微分 方程	(173)
§ 7-2 积分法求梁的变 形	(175)
§ 7-3 迭加法求梁的 变形	(182)
* § 7-4 有限差分法求梁的变 形	(192)
§ 7-5 梁的刚度条件 刚度计 算	(197)
§ 7-6 梁的合理设 计	(200)
§ 7-7 简单静不 定梁	(204)
§ 7-8 弯曲应 变能	(206)
习 题	(207)
第八章 组合变形杆件的强度计算	(211)
§ 8-1 概 述	(211)
§ 8-2 拉(压)弯组合变 形	(211)
§ 8-3 偏心拉伸或压缩 截面 核心	(215)
* § 8-4 斜弯 曲	(217)
§ 8-5 弯扭组合变 形	(221)
习 题	(229)
第九章 能量法	(236)
§ 9-1 概 述	(236)
§ 9-2 杆件应变能的计 算	(236)
§ 9-3 莫尔定理及其 应用	(237)
§ 9-4 应用能量法解冲击 问题	(246)
习 题	(256)
第十章 交变应力	(262)
§ 10-1 概 述	(262)
§ 10-2 材料的持久极限及其测 定	(266)
§ 10-3 影响构件持久极限的因素 构件的持久极 限	(269)
§ 10-4 对称循环下构件的疲劳强度计 算	(274)
* § 10-5 非对称循环下构件的疲劳强 度计算	(277)

* § 10-6 弯扭组合变形时轴的疲劳强度计算	(280)
§ 10-7 提高构件疲劳强度的措施	(282)
习题	(283)
第十一章 压杆稳定	(287)
§ 11-1 压杆稳定的概念	(287)
§ 11-2 计算临界压力的欧拉公式	(289)
§ 11-3 欧拉公式的适用范围 经验公式	(294)
§ 11-4 压杆稳定性校核	(298)
§ 11-5 提高压杆稳定性的措施	(301)
习题	(302)
第十二章 电测应力分析	(306)
§ 12-1 概述	(306)
§ 12-2 电测法的基本原理	(306)
§ 12-3 电桥接法及应力测定	(309)
§ 12-4 二向应力状态下主方向未知时应力的测定	(313)
习题	(319)
*第十三章 连续梁矩阵位移法	(321)
§ 13-1 基本概念	(321)
§ 13-2 等截面直杆的转角位移方程	(327)
§ 13-3 连续梁的位移法基本方程	(329)
§ 13-4 单元刚度矩阵	(332)
§ 13-5 整体刚度矩阵	(334)
§ 13-6 支承条件的引入	(339)
§ 13-7 非结点载荷	(340)
§ 13-8 计算步骤及例题	(342)
习题	(346)
附录 型钢表	(348)
习题答案	(376)
参考书目	(386)

绪 论

§ 0-1 材料力学的任务

机器或工程结构，都是由许多构件组成。当机器或工程结构工作时，每个构件都要承受一定的外力（载荷）。为保证机器或工程结构能正常地工作，每个构件都应有足够的承载能力，这种承载能力主要从下述三方面来衡量：

一、在外力作用下，构件应有抵抗破坏的能力，即构件应具有足够的强度。

二、在外力作用下，构件应有抵抗变形的能力，使其不发生过大的变形，即构件应具有足够的刚度。如图0-1所示的齿轮轴，因其变形过大，导致轴上齿轮发生非正常地啮合及轴承的不均匀磨损。

三、在外力作用下，构件应具有保持其原有平衡状态的能力，即构件应具有足够的稳定性。如图0-2所示内燃机中的挺杆

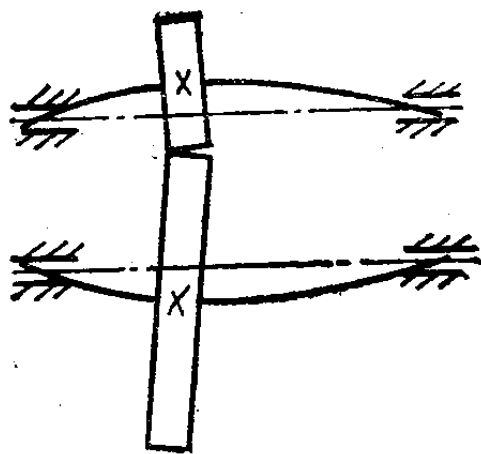


图 0-1

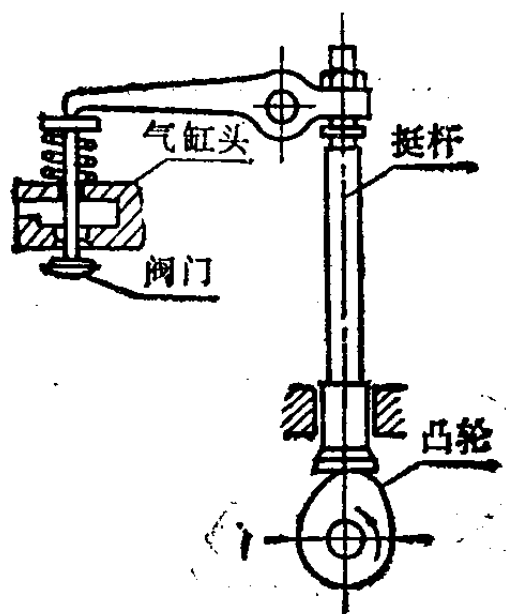


图 0-2

杆，在压力作用下，应始终保持直线平衡状态。否则，将影响内燃机的正常工作。

当构件满足上述三项要求时，认为所设计的构件是安全的。一般说来，选用较好的材料或选择较大的横截面尺寸，就能保证构件安全工作。但这与降低消耗、减轻构件自重和节省资金相矛盾。另外，在材料力学中还研究材料的机械性质，材料的机械性质需通过试验来测定。同时，实验可验证理论分析结果是否正确，还可解决现有理论尚不足以解决的构件设计问题。因此，在材料力学中实验研究和理论分析同样重要。

综上所述，**材料力学是研究构件承载能力的科学，即研究构件强度、刚度和稳定性计算的科学**。其任务是：在保证构件既安全又经济的前提下，为构件选择合适的材料、确定合理的截面形状和尺寸，为工程技术人员提供必要的理论基础和计算方法。

必须指出，构件设计是否合理，还应考虑其加工和装配等方面的问题。否则，作出的设计可能与实际不符。

§ 0-2 变形固体及其基本假设

构件均由固体材料制成。固体材料在外力作用下会发生变形，故称为变形固体。就其变形性质来说，分为弹性变形和塑性变形。当所受力不超过一定限度时，外力卸除后，其变形可完全消失，这样的变形称为弹性变形。当所受外力超过一定限度时，外力卸除后，其变形只能部分消失，而遗留下一部分不能消失的变形。外力卸除后不能消失的变形称为塑性变形。

变形固体材料的组成和微观结构是相当复杂的，其性质也是多方面的。在材料力学中，就变形固体与研究构件强度、刚度和稳定性有关的主要性质作出一些假设，将变形固体抽象为

一种理想的材料模型。采用这些假设，可使问题的分析和计算得以简化。

一、连续性假设 从物质结构来说，组成变形固体的各微粒之间并不连续，即有空隙。但是，由变形固体制成的构件尺寸比微粒及微粒间的空隙大得多，因此可以认为，组成变形固体的材料毫无空隙地充满了变形固体的几何空间。

二、均匀性假设 就工程中使用的金属材料来说，它是由极多的微小晶粒组成的，各晶粒的性质并不一样。但是，因变形固体内充满了极多的晶粒，从统计学观点看，变形固体的性质是所有晶粒性质的统计平均值，故可以认为变形固体内各点处的性质完全相同。

三、各向同性假设 认为变形固体在各个方向上的机械性质完全相同。就金属晶粒来说，在不同方向上，其机械性质并不一样。但变形固体内包含着数量极多的晶粒，而且其排列错综复杂，必然使得变形固体在各个方向上的机械性质趋于相同。

四、小变形条件 小变形是指构件受力后产生的变形与构件的原始尺寸相比小得多。在材料力学中仅限于研究这种情况。

根据上述假设，可以应用连续函数来描述材料力学的有关问题，可以把构件的任何微小部分材料性质的研究结论用于整个构件。反之，也可把由大尺寸试件测得的材料性质，用于构件的任何微小部分。在研究构件的平衡和运动时，可略去构件的变形，按其原始尺寸计算。

由上述假设所得到的理论与实际情况是相符合的。

§ 0-3 材料力学的研究对象 杆件变形的基本形式

构件按其几何形状特征，可分为杆、板、壳和块体等。若

构件的长度远大于其横截面尺寸，则称其为杆件。杆轴线（横截面形心的连线）为直线时，称为直杆。横截面大小和形状不变的直杆，称为等截面直杆，简称等直杆。材料力学研究的对象主要是等截面直杆。

根据杆件受力情况，其变形的基本形式有以下四种：

一、拉伸和压缩 图 0-3 所示吊架的杆 AC 受拉伸，而杆 BC 受压缩。这类杆所受外力的特点是：外力作用线与杆轴线重合。杆变形的特点是：杆沿轴线方向伸长或缩短。

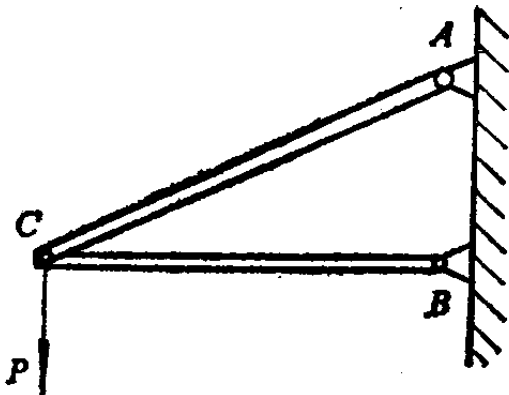


图 0-3

二、剪切 图0-4铆联接中的铆钉受到剪切。这种变形是由大小相等、方向相反、作用线平行且距离很近的一对外力引起的，其变形特点是：受剪切杆件在两外力之间局部区域内的相邻截面，沿外力方向发生相对错动。

三、扭转 图0-5所示汽车转向轴 AB 受到扭转。其受力特点是：在垂直于杆轴线的平面内作用有力偶。其变形特点是：杆件各横截面绕其轴线作相对转动。

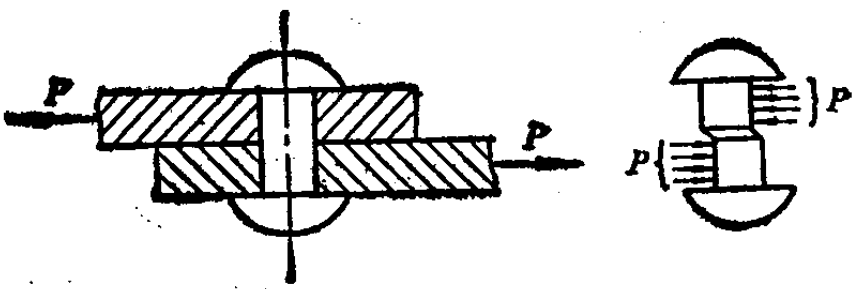


图 0-4

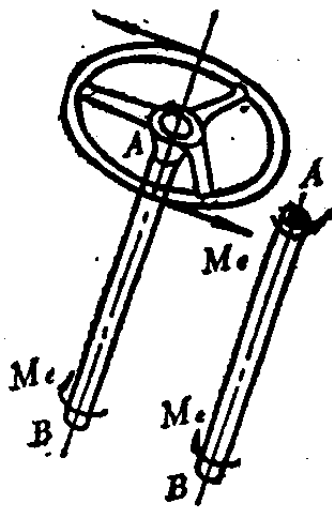


图 0-5

四、弯曲 图0-6所示跳板为弯曲变形。其受力特点是：在杆轴线平面内作用有力偶或垂直轴线的横向外力。其变形特点是：杆的轴线由直线变为曲线。

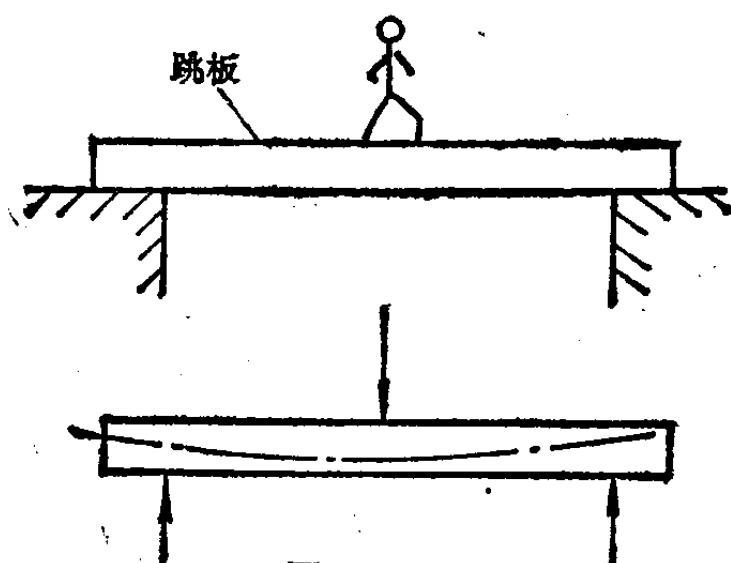


图 0-6

杆件同时发生几种基本变形的情况称为组合变形。

§ 0-4 内力 截面法 应力的概念

杆件受外力作用发生变形，其内部各部分之间发生相对位置改变，由此而引起杆件各部分之间的相互作用称为杆件的内力。由于变形固体有弹性，因而内力能抵抗外力引起的变形。内力随外力的增加而加大，到达某一限度时，就会导致杆件被破坏。因而内力与杆件的强度是密切相关的，研究杆件的内力成为材料力学的重要内容。

研究内力可用截面法。设杆件在空间任意力系作用下处于平衡状态（图0-7(a)）。为了显示出杆件 $m-m$ 截面上的内力，用平面 S 假想地将杆沿截面 $m-m$ 切分为Ⅰ、Ⅱ两部分。因每个部分仍应处于平衡状态，故Ⅰ与Ⅱ之间在截面 $m-m$ 上必然有相互作用的力，以保持各自的平衡，Ⅰ与Ⅱ之间的相互作用力就是杆在截面 $m-m$ 上的内力。由均匀连续性假设可知，内力是一

个分布力系，将该分布力系向截面形心简化后得到其主矢和主矩。若取杆轴线为 x 轴的空间直角坐标系，则可将主矢和主矩分解为六个分量（图0-7(b)）。以后把这六个分量称为截面上

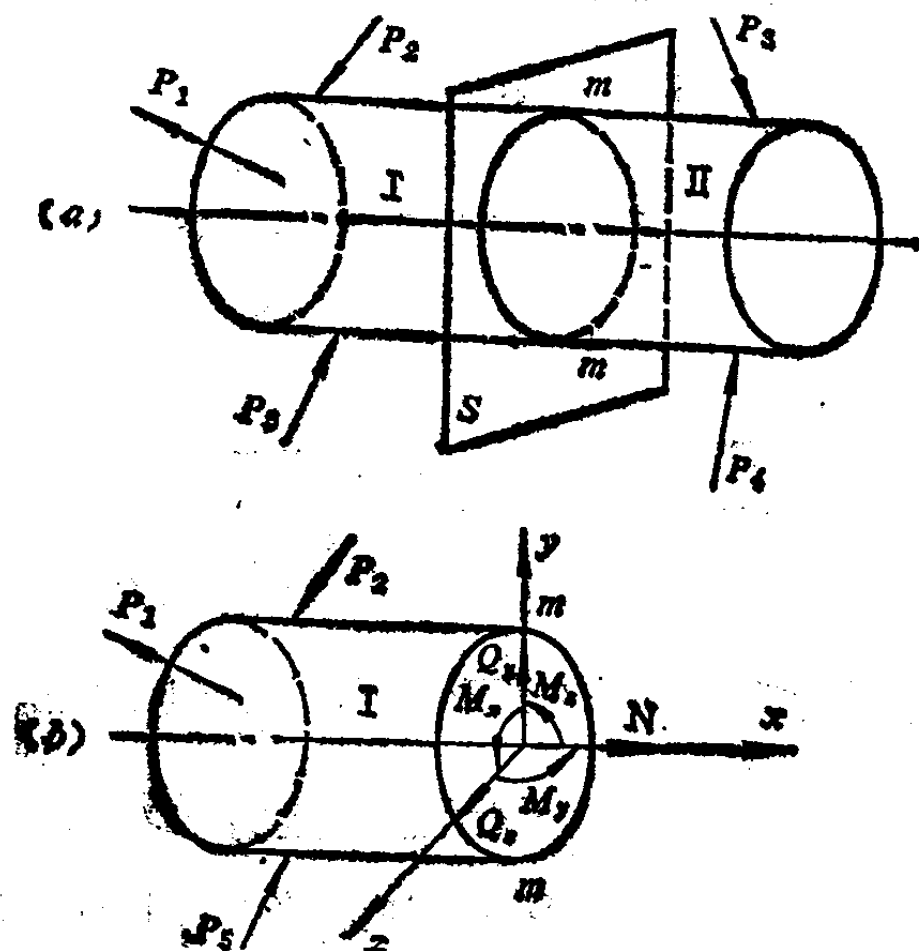


图 0-7

的内力。这六个内力分别对应着某种变形形式，依其所对应的变形形式，六个内力分量可归纳为四种内力，即

一、轴力 沿杆轴线的内力分量 N （ x 轴方向），它垂直于杆的横截面。

二、剪力 沿 y 轴和 z 轴的分量 Q_y 和 Q_z ，它们与截面相切。

三、扭矩 绕 x 轴的主矩分量 M_x ，它是一个力偶，其作用面就是 $m-m$ 截面。

四、弯矩 绕 y 轴和 z 轴的主矩分量 M_y 和 M_z ，它们也是

力偶，其作用面均为包含轴线的纵向平面。

杆件在截面 $m-m$ 上的内力，可根据任意部分的平衡条件确定，即用平衡方程由已知外力求得截面上的内力（六个内力分量）。

上述求解内力的方法称为截面法，可将其归纳如下：沿着所求内力的截面，假想将杆分成两部分；取任意一部分为研究对象，并画出另一部分对该部分的作用力；根据所研究部分的平衡条件，由已知外力确定未知的内力。

截面法只能求得某截面上分布内力系的主矢和主矩的分量，为了进一步研究截面上某点受力的强弱程度和分布内力系的情况，引入应力的概念。设在截面上某点 K 的周围取微面积 ΔA ， ΔA 上内力的合力为 ΔP （图0-8（a）），则比值

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

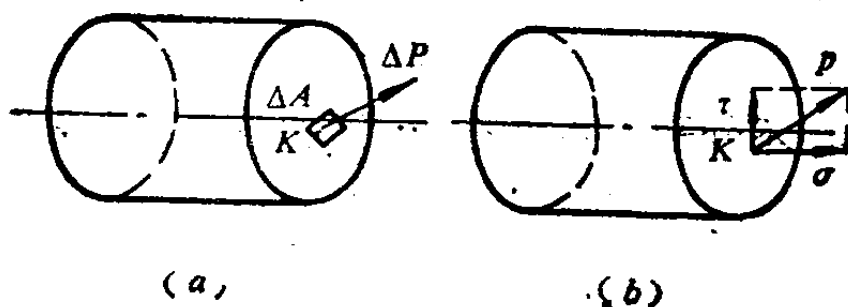


图 0-8

表示出 ΔA 上内力的强弱程度， p_m 称为 ΔA 上的平均应力，或称平均集度。一般情况下，内力沿截面并非均匀分布，平均应力 p_m 随所取 ΔA 的大小而不同，为了更精确地反映出 K 点处内力的强弱程度，应使 ΔA 无限缩小，使之逼近于 K 点，平均应力的极限（用 p 表示）

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

才能真实地表明 K 点处的内力集度，称为 K 点的应力。

K 点的应力 p 是一个矢量。一般情况下，它既不垂直于截面，也不与截面相切。为分析方便，常将 p 分解为垂直于截面的分量 σ 和与截面相切的分量 τ （图 0-8 (b)）。 σ 称为正应力， τ 称为剪应力，而 p 称为全应力。

在国际单位制中，应力的单位是 N/m^2 （牛顿/米²），称为帕斯卡或简称帕，其符号为 Pa。在工程中通常使用兆帕，其符号为 MPa， $1\text{MPa} = 10^6\text{Pa} = 10^6\text{N/m}^2 = 1\text{N/mm}^2$ 。有时还使用吉帕斯卡，其符号为 GPa， $1\text{GPa} = 10^9\text{Pa}$ 。

§ 0-5 应变 变形与位移

在四种基本变形形式中，就整个杆件来看，杆件变形后的形状并不相同，也较复杂。若将杆件分割成无数个微立方体，则每个微立方体的变形构成杆件的变形。而每个微立方体的变形却很简单，不外乎是其边长的改变和各邻边（各邻面）之间夹角的改变。

围绕杆件内 M 点取一微小立方体（图 0-9 (a)），它与 x 轴平行的棱边长为 Δx ，变形后边长 Δx 改变了 Δu ， Δu 称为 Δx 的绝对变形。若线段 Δx 上各点处的变形程度相同，则比值

$$\epsilon = \frac{\Delta u}{\Delta x}$$

称为线段 Δx 的线应变。若线段 Δx 上各点处的变形程度不同，则上述比值只是线段 Δx 的平均线应变，而 M 点沿 x 方向的线应变为