



21世纪高等教育应用型精品课程规划教材

工程力学

(下册)

邱小林 冯新红 包忠有 郭纪林 编著



 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

21 世纪高等教育应用型精品课程规划教材

工 程 力 学

(下册)

邱小林 冯新红 编著
包忠有 郭纪林

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本教材是按 90 ~ 96 课时编写的, 适用于高等教育应用型院校对《工程力学》课程安排为中等学时的各专业, 亦适用于自学使用。内容包含静力学基本理论, 构件的强度、刚度和稳定性计算, 以及运动学和动力学基本概念。

本教材中除例题和习题以外, 还有一定数量的思考题及题后分析, 以帮助使用本教材的读者进一步提高分析问题和解决问题的能力, 实现我们抛砖引玉的目标。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

工程力学/邱小林等编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2009. 8

ISBN 978 - 7 - 5640 - 2522 - 9

I. 工… II. 邱… III. 工程力学 - 高等学校 - 教材 IV. TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 131159 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (办公室) 68944990 (批销中心) 68911084 (读者服务部)

网 址 / [http:// www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 960 毫米 1/16

印 张 / 36.5

字 数 / 745 千字

版 次 / 2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 4000 册

总 定 价 / 66.00 元 (共 2 册)

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 边心超

图书出现印装质量问题, 本社负责调换

江西省高等教育应用型机电类专业 专家委员会主席团

顾 问	罗玉峰	张岐生	郭纪林			
主 任	陈智刚	京玉海				
主任委员	杨良根	周 青	何世松	陈根琴	冯新红	
	魏春雷	熊 科	杨 文	朱江峰	余 萍	
	肖文福	方晓勤	李 奇	林知秋	邱小林	
	包忠有					
秘 书 长	熊 坚					
副秘书长	纪伟鹏					

前 言

本教材系按 90 ~ 96 课时编写的,适用于高等教育应用型院校对《工程力学》课程安排为中等学时的各专业,亦可供自学之用。

在内容的安排上,先讲授静力学基本理论,然后讲述构件的强度、刚度和稳定性计算,最后讲授运动学和动力学基本理论。

本教材吸收了众多学者的教学经验,在例题和习题的选择上,紧紧围绕相应的基本理论,并配以合适的题后分析及相应的思考题,以启发读者能深入思考,从中找出规律性的东西,提高读书质量。这其中包括了读者易于误解之处以及需要灵活掌握的方法,力求在分析问题和解决问题时避免呆板,防止死记硬背。建议读者在做完每一道习题之后,亦应进行题后分析,把书读活读好,扎扎实实地掌握其基本理论、基本概念及解题技巧,并在生产实践中加以灵活应用。

本教材由南昌理工学院邱小林教授、江西渝州科技职业学院冯新红老师、华东交通大学包忠有教授、南昌理工学院郭纪林教授编著,华东交通大学余学文副教授也参加了编写。

欢迎使用本教材的教师和读者对本教材提出宝贵意见,以帮助我们不断提高学术水平。

编 者
于江西南昌

目 录

第二篇 材料力学

第 17 章 轴向拉伸和压缩	4
§ 17.1 轴向拉伸和压缩及工程实例	4
§ 17.2 轴向拉压杆的内力·截面法	5
§ 17.3 轴向拉压杆的应力	8
§ 17.4 轴向拉压杆的强度条件	11
§ 17.5 轴向拉压杆的变形·胡克定律	15
§ 17.6 轴向拉压杆的变形能	20
§ 17.7 材料拉伸、压缩时的力学性质	21
§ 17.8 应力集中的概念	25
§ 17.9 拉压超静定问题	26
小结	31
思考题	32
习题	33
第 18 章 剪切和扭转	39
§ 18.1 剪切及剪切的实用计算	39
§ 18.2 拉(压)杆连接部分的强度计算	40
§ 18.3 剪切胡克定律和剪应力互等定理	45
§ 18.4 扭转·扭矩和扭矩图	46
§ 18.5 圆杆扭转时的应力·强度条件	49
§ 18.6 圆杆扭转时的变形·刚度条件	53
§ 18.7 圆杆扭转时的变形能	54
§ 18.8 矩形截面杆的扭转	55
小结	56
思考题	57
习题	58

第 19 章 梁的内力	61
§ 19.1 工程中的弯曲问题	61
§ 19.2 梁的荷载和支反力	62
§ 19.3 梁的内力	64
§ 19.4 剪力图和弯矩图	71
§ 19.5 弯矩·剪力·荷载集度间的关系	75
§ 19.6 剪力·弯矩分析的边界荷载法	76
小结	81
习题	82
第 20 章 截面的几何性质	86
§ 20.1 静矩	86
§ 20.2 惯性矩和惯性积	88
§ 20.3 惯性矩的平行移轴公式	91
§ 20.4 主轴与主惯性矩·形心主轴与形心主惯性矩	92
§ 20.5 组合截面惯性矩的计算	92
小结	94
习题	95
第 21 章 梁的应力	97
§ 21.1 梁的正应力	97
§ 21.2 梁的正应力强度条件	103
§ 21.3 矩形截面梁的剪应力	107
§ 21.4 其他形状截面梁的剪应力	111
§ 21.5 梁的剪应力强度条件	113
§ 21.6 梁的合理截面形状及变截面梁	116
§ 21.7 弯曲中心的概念	118
小结	121
思考题	122
习题	123
第 22 章 梁的变形	127
§ 22.1 挠度和转角	127
§ 22.2 挠曲线的近似微分方程	128

§ 22.3	积分法计算梁的位移	130
§ 22.4	叠加法计算梁的位移	137
§ 22.5	梁的刚度条件	142
§ 22.6	超静定梁	144
§ 22.7	梁弯曲时的变形能	148
小结		149
思考题		150
习题		152
第 23 章	应力状态和强度理论	155
§ 23.1	应力状态的概念	155
§ 23.2	平面应力状态下任意斜截面上的应力	157
§ 23.3	主应力和极值剪应力	160
§ 23.4	平面应力状态的几种特殊情况	163
§ 23.5	应力圆	169
§ 23.6	主应力迹线的概念	175
§ 23.7	空间应力状态下任一点的主应力和最大剪应力	177
§ 23.8	广义胡克定律	179
§ 23.9	强度理论	184
小结		191
思考题		193
习题		194
第 24 章	组合变形	198
§ 24.1	组合变形的概念	198
§ 24.2	斜弯曲	199
§ 24.3	拉伸(压缩)与弯曲的组合变形	202
§ 24.4	偏心拉伸(压缩)	205
§ 24.5	截面核心的概念	209
§ 24.6	弯曲与扭转的组合变形	210
小结		213
习题		214

第 25 章 压杆稳定	218
§ 25.1 压杆稳定的概念	218
§ 25.2 两端铰支细长压杆的临界力	219
§ 25.3 杆端约束对临界力的影响	222
§ 25.4 临界应力·欧拉公式的适用范围	224
§ 25.5 压杆的稳定条件	230
§ 25.6 提高压杆稳定性的措施	233
小结	234
思考题	235
习题	236
第 26 章 动应力	239
§ 26.1 概述	239
§ 26.2 杆件作匀加速直线运动时的应力	240
§ 26.3 杆件作匀速转动时的应力	243
§ 26.4 杆件受冲击时的应力	244
§ 26.5 交变应力与疲劳破坏的概念	249
小结	250
习题	251
附表 型钢表	253
习题答案	262

第二篇

材料力学

一、本篇研究的主要内容

本篇主要研究构件的强度、刚度和稳定性。

构件是组成结构物或机械的基本部件。例如房屋结构中的梁和柱子、机械中的轴等均匀构件。构件一般都承受一定的外力或重物的重量,这些力和重量称为**荷载**。

工程中为保证构件能安全、正常地工作,对构件有下列要求:

1. 强度要求

强度要求是不允许构件在荷载作用下发生破坏。构件的**强度**是指**构件抵抗破坏的能力**。如果构件的强度不足,它在荷载作用下就可能被破坏。例如房屋中的楼板梁,当其强度不足时,在楼板荷载作用下,就可能断裂。

2. 刚度要求

刚度要求是限制构件的变形。构件在荷载作用下都要产生变形,工程中构件的变形不允许过大,当变形过大时,会影响正常使用。例如房屋中的楼板梁变形过大时,下面的灰层就会开裂、脱落;机床上的轴变形过大时,会影响加工精度,等等。因此在工程中,根据不同的工程用途,对构件的变形给以一定的限制。

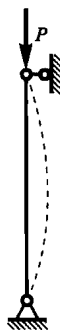
构件的**刚度**是指**构件抵抗变形的能力**。构件的刚度愈大,愈不易变形,即抵抗变形的能力愈强。

3. 稳定性要求

有些构件在荷载增大到超过某一限度时,其原有的平衡形式可能突然发生改变。例如中心受压的细长直杆(绪图-1),当压力 P 不太大时,杆可以保持直线形式的平衡,当压力 P 增大到超过某一限度时,杆就不能继续保持直线状态,而会突然从原来的直线状态变为弯曲状态,并可能进而折断。这种现象称为**丧失稳定**,简称**失稳**。

对构件的稳定性要求就是要求此类构件工作时不能丧失稳定。

一般说来,满足了上述三方面要求,构件就能安全、正常地工作。而构件的强度、刚度和稳



绪图-1

定性则是本篇将要研究的主要内容。

二、变形体及其基本假设

在前面第一篇中,讨论力系作用下物体的运动规律时,是将物体看成刚体,即不考虑物体形状和尺寸的改变。实际上,自然界中的任何物体在外力作用下,都要或大或小地产生变形,也就是它的形状和尺寸都会有些改变。由于本篇将要研究的内容都与受力体的变形相联系,因而物体的可变形性质就成为其重要的基本性质而不容忽略。因此,在本篇中,须将所研究的物体看作可变形的物体即变形体。

变形体在外力作用下产生的变形分为**弹性变形**与**塑性变形**。弹性变形是指作用在变形体上的外力去掉后可完全消失的变形(相应的物体称为**弹性体**)。如果外力去掉后,变形不能全部消失而留有残余变形,此残余变形称为塑性变形。

工程中大多数的构件在荷载作用下,其几何尺寸的改变量与构件本身的尺寸相比通常是很微小的,这类变形称为“**小变形**”。与此相反,有些构件在荷载作用下,其几何尺寸的改变量比较大,这类变形称为“**大变形**”。

本篇中主要研究弹性变形且限于小变形范围。

变形体有多方面的性质。在研究构件的强度、刚度和稳定性时,为了使问题得到简化以便建立理想化模型,对变形体作如下的基本假设:

1. 连续、均匀性假设

连续是指材料内部没有空隙,均匀是指材料的力学性质各处都一样。连续、均匀性假设即认为构件在其整个体积内毫无空隙地充满了物质,且材料的力学性质各处都相同。

2. 各向同性假设

此假设认为材料沿不同方向具有相同的力学性质。常用的工程材料如钢、玻璃以及浇注得很好的混凝土等都可认为是各向同性材料。

综上所述,本篇在研究构件的强度、刚度和稳定性时,是将构件视为连续、均匀、各向同性的弹性体且限于小变形范围。

三、杆件变形的基本形式

工程中构件的种类很多,有杆件、板、壳和块体之分。本篇所研究的只是其中的杆件。所谓杆件是指其长度相对其横向尺寸大得多的构件。

杆件在不同的外力作用下,其产生的变形形式也各不相同,但变形的基本形式总不外下列几种:

1. 轴向拉伸或压缩[绪图-2(a)、(b)]

在一对大小相等、方向相反、作用线与杆件轴线重合的外力作用下,杆件的长度发生改变,即伸长或缩短。

2. 剪切[绪图-2(c)]

在一对相距很近、方向相反的横向力作用下,杆件的横截面沿外力方向发生错动。

3. 扭转[绪图-2(d)]

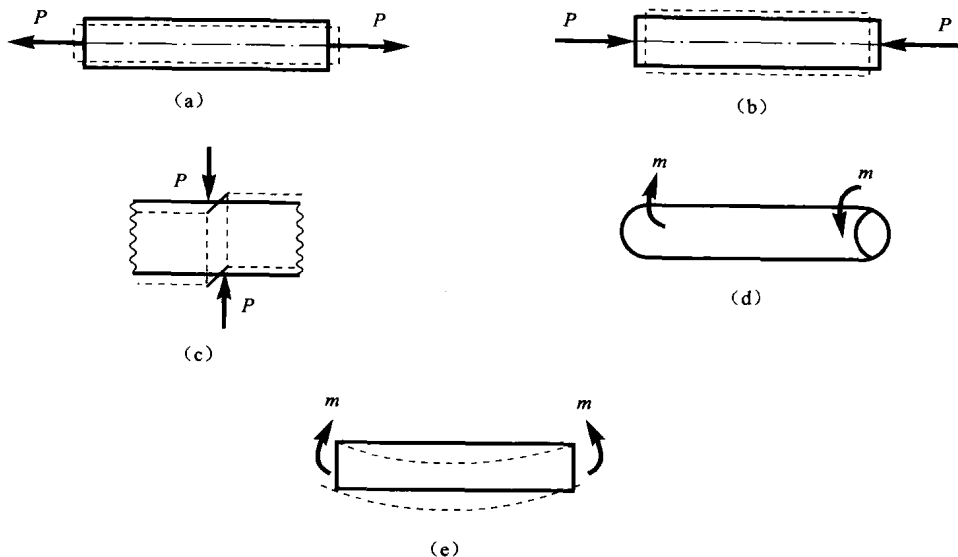
在一对大小相等、方向相反、位于垂直杆件轴线的两平面内的力偶作用下,杆件的任意二横截面发生绕轴线的相对转动。

4. 弯曲[绪图-2(e)]

在一对大小相等、转向相反、位于杆件纵向平面内的力偶作用下,杆件的任意二横截面发生相对转动,此时杆件的轴线变为曲线。

工程中的杆件可能同时承受不同形式的外力,变形情况可能比较复杂,但不论怎样复杂,其变形均是由基本变形所组成。

下面各章将对杆件的各种基本变形以及同时发生两种或两种以上基本变形的组合变形分别加以讨论。



绪图-2

第17章

轴向拉伸和压缩

导言

- 本章主要研究杆件在轴向拉伸和压缩时的内力、应力、变形和强度计算以及材料的力学性质和拉压超静定问题。
- 本章在第二篇中属重点章之一。本章涉及的一些基本概念、研究方法和有关定律,在第二篇中具有普遍意义。
- 在本篇的研究中,将经常应用第一篇中静力学的有关知识。

§ 17.1 轴向拉伸和压缩及工程实例

轴向拉伸或压缩变形是杆件的基本变形形式之一。当作用在杆件上的外力的作用线与杆件的轴线重合时,杆即发生轴向拉伸或压缩变形,外力为拉力时,即为轴向拉伸[图 17-1(a)],外力为压力时即为轴向压缩[图 17-1(b)]。轴向拉伸、压缩又简称为拉伸、压缩。这类杆件称为轴向拉、压杆或拉、压杆。

轴向拉伸、压缩的杆件在工程中是常见的。如图 17-2 所示的桁架(屋架),在结点荷载作用下,组成桁架的各杆件均为轴向拉伸或轴向压缩杆件。其他如起重设备中的吊索、房屋建筑中的某些柱子等也都是拉伸、压缩杆件。

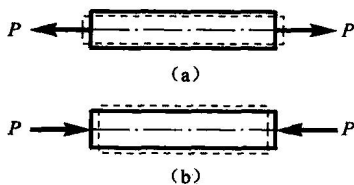


图 17-1

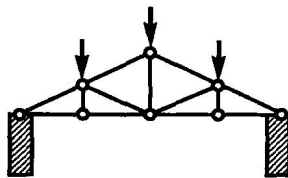


图 17-2

§ 17.2 轴向拉压杆的内力·截面法

17.2.1 内力及其求法

杆件在外力作用下将发生变形,与此同时,杆件内部各部分间将产生相互作用力,此相互作用力称为内力。内力随外力的变化而变化,外力增大,内力也增大,外力去掉后,内力将随之消失。

杆件的强度、刚度等问题均与内力这个因素有关,在分析这些问题时,经常需要知道杆件在外力作用下某一横截面上的内力值。求杆件任一横截面上的内力,通常采用下述的截面法。

现用截面法求图 17-3(a) 所示轴向受拉杆 $a-a$ 横截面上的内力。在 $a-a$ 处用一假想的平面将杆件截开并任取其中一分离体,例如取左侧分离体[图 17-3(b)],将右侧分离体对左侧分离体的作用以力的形式表示之。由于杆件是连续体(根据连续性假设),内力在横截面上是连续分布的,通常是将截面上的分布内力用位于

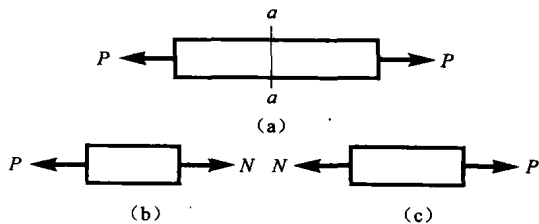


图 17-3

截面形心处的合力 N 来代替, N 即为 $a-a$ 截面上的内力。杆件原来处于平衡状态,截开后的分离体也应保持平衡,由平衡方程

$$\sum X = 0; \quad N - P = 0$$

得

$$N = P$$

N 的作用线与杆件的轴线重合,此种内力称为轴力。为了区分拉伸与压缩,对轴力的正负号作如下规定:拉力(N 指向其所在截面的外法线方向)为正;压力(N 指向其所在截面)为负。

用截面法求内力的步骤可归纳为:

- (1) 在求内力的截面处,用假想平面将杆件截开。
- (2) 任取其中一分离体,将弃掉部分对保留部分的作用以内力来代替(即暴露出内力)。
- (3) 考虑分离体平衡,由平衡方程确定内力值。

在进行第二步时,取哪部分分离体都可以,杆件截开后内力总是成对出现,二分离体上的内力总是等值反向,二者为作用与反作用关系。

这里应指明一点:在求杆件的内力时,不能任意应用静力等效原理(如力和力偶沿其作用线和作用面的移动,力的合成、分解、平移等)。例如图 17-4 所示的轴向受拉杆件,当 P 作用在杆端时[图 17-4(a)],整个杆都受拉,杆的各横截面上都产生轴力;当将 P 沿其作用线移至 B 处时[图 17-4(b)],只有力作用点以上部分受拉,二者的效果明显不同。

例 17-1 试求图 17-5(a)所示杆 1—1 截面上的轴力。

解 在 1—1 处截开,取左侧分离体并暴露出内力[图 17-5(b)],该分离体处于平衡状态,由平衡方程

$$\sum X = 0: N_1 + 4P - 6P = 0$$

得

$$N_1 = 2P$$

求得的 N_1 为正值,表明图 17-5(b)中 N_1 的方向与实际相一致,即为拉力(做题时,未知内力 N 的方向均按拉力方向标出,求得 N 为负值时,则表明其方向与实际相反,即为压力)。

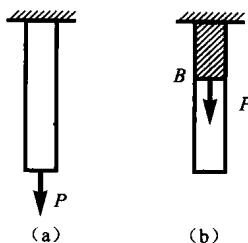


图 17-4

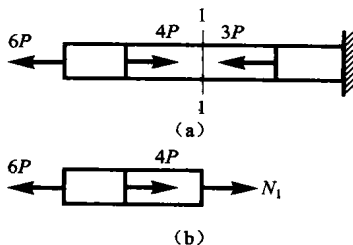


图 17-5

1—1 截面上的轴力也可通过右侧分离体来求,但应注意:画右侧分离体的受力图时,不能漏掉右端的约束反力。

17.2.2 轴力图

轴力图是用图形来表示杆件各横截面上轴力沿轴线的变化规律,例如图 17-6(a)所示的轴向受拉杆,其轴力图如图 17-6(b)所示。图中垂直于杆轴线方向的坐标(按一定比例画出)代表杆的相应截面上的轴力,因各截面上的轴力相同,故轴力图为平行于基线的直线(基线平行于杆件的轴线)。图中⊕号表示轴力为拉力,压力则标以⊖号。

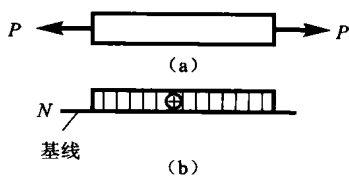


图 17-6

当杆件上作用有多个轴向外力时,不同段中横截面上的轴力也各不相同,画出轴力图后,可更直观地看到杆件各段轴力的变化规律。

例 17-2 试画出图 17-7(a)所示杆件的轴力图。

解 此杆 AB、BC、CD 各段的轴力不同,需分三段画轴力图。每段内各截面的轴力均为常量,故轴力图为三条水平线。

AB 段:在 AB 段内从 1—1 处将杆截开,取左侧分离体[图 17-7(b)],由平衡方程

$$\sum X = 0: N_1 - 4 = 0$$

得

$$N_1 = 4 \text{ kN (拉力)}$$

BC段:在BC段内从2—2处将杆截开,取左侧分离体[图17-7(c)],由平衡方程

$$\sum X = 0: N_2 + 7 - 4 = 0$$

得

$$N_2 = -3 \text{ kN (压力)}$$

CD段:在CD段内从3—3处将杆截开,取右侧分离体[图17-7(d)],由平衡方程

$$\sum X = 0: 2 - N_3 = 0$$

得

$$N_3 = 2 \text{ kN (拉力)}$$

杆的轴力图如图17-7(e)所示,正、负轴力分别画在基线的两侧。

画杆件的轴力图关键在于用截面法求杆件各段的轴力,当熟练掌握截面法后,求杆件某截面的轴力时,可不必一一画出分离体及其受力图,只要根据杆上的轴向外力即可直接得出。轴力总是与分离体上的轴向外力相平衡,即轴力等于截面一侧轴向外力的代数和。

例 17-3 试画图17-8(a)所示杆件的轴力图。

解 画此杆件的轴力图仍需分三段,每段内各截面的轴力均为常量。从杆件上的轴向外力可得:AB段各截面上的轴力为 $2P$ (拉力);BC段各截面上的轴力为 $6P$ (拉力);CD段各截面上的轴力为 $-3P$ (压力)。杆件的轴力图如图17-8(b)所示。

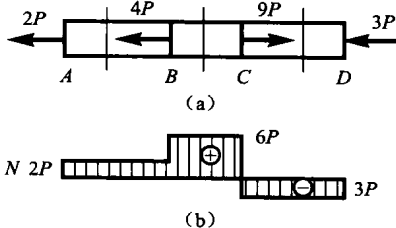


图 17-8

例 17-4 一杆件承受轴向均布荷载如图17-9(a)所示, q 为轴向均布荷载的集度,即作用在杆件单位长度上的轴向外力,试画出该杆的轴力图。

解 此杆在 q 作用下各截面上的轴力值均不同,需先找出轴力沿杆长的变化规律,再依规律画出轴力图。

在距左端为 x 处将杆截开,取左侧分离体,截面上的内力用 $N(x)$ 表示[图17-9(b)]。考虑该分离体平衡,由平衡方程

$$\sum X = 0: N(x) - qx = 0$$

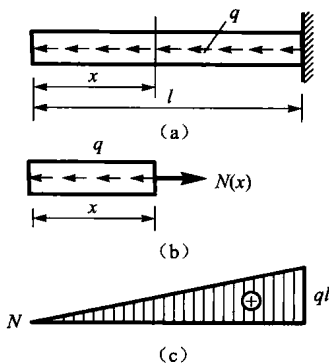


图 17-9

得

$$N(x) = qx$$

由此可知, $N(x)$ 为 x 的线性函数。当 $x=0$ 时, $N(x)=0$; $x=l$ 时, $N(x)=ql$, 杆的轴力图如图 17-9(c) 所示。

§ 17.3 轴向拉压杆的应力

17.3.1 应力的概念

为了解决杆件的强度问题, 不仅要知道当外力达到一定值时杆件可能沿哪个截面破坏, 而且还需知道该截面上哪个点首先开始破坏。因而仅知道杆件截面上内力的合力是不够的, 还需进一步研究截面上内力的分布情况, 从而引入应力的概念。

图 17-10(a) 所示为任意受力杆件, 现研究 $a-a$ 截面上 K 点附近的内力[图 17-10(b)]。围绕 K 点在截面上取小面积 ΔA , 若 ΔA 上分布内力的合力为 ΔP , 则 $\frac{\Delta P}{\Delta A}$ 为 ΔA 范

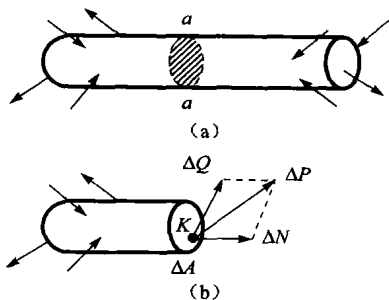


图 17-10

围内单位面积上的内力, 将 $\frac{\Delta P}{\Delta A}$ 称为小面积 ΔA 上的平均应力并用 p_m 表示, 即

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

将 ΔP 沿截面的法向与切向分解为 ΔN 与 ΔQ , 同理有

$$\sigma_m = \frac{\Delta N}{\Delta A} \quad \tau_m = \frac{\Delta Q}{\Delta A}$$

σ_m 与 τ_m 分别称为小面积 ΔA 上的平均正应力与平均剪应力。

截面上内力的分布一般是不均匀的, 所以平均应力 p_m 、 σ_m 和 τ_m 都与所取的 ΔA 的大小有关, ΔA 越小, 平均应力就越接近 K 点的实际。为了消除 ΔA 大小的影响, 取下列极限

$$\left. \begin{aligned} p &= \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \\ \sigma &= \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta N}{\Delta A} \\ \tau &= \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta A} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

p 称为 K 点的总应力, σ 称为 K 点的正应力 (因 σ 的方向垂直于其所在截面, 故又称为垂直应力), τ 称为 K 点的剪应力。由 (1) 式可知, 应力就是一点处分布内力的集度。

式 (1) 定义的应力是指 $a-a$ 截面上 K 点的应力, 也就是说, 应力是与“截面”和“点”这两