

# 工程力学基础 II

## 材料力学

刘耀乙 主编

## 内 容 简 介

本书是与《工程力学基础 I 理论力学》一书配套使用的教材,全书共 11 章,内容包括 绪论 拉伸 压缩与剪切 扭转 平面图形的几何性质 弯曲内力 弯曲应力 弯曲变形 应力状态理论与强度理论 组合变形 交变应力 压杆稳定等。

本书适于作为中、少学时工程力学课程的教学用书。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

工程力学基础 II ,材料力学 /刘耀乙主编 .—北京 :北京理工大学出版社,2004.6

ISBN 7-5640-0233-6

I.工... II.刘... III.①工程力学—高等学校—教材②材料力学—高等学校—教材 IV.TB12

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 007058 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) 68912824(发行部)

网 址 /<http://www.bitpress.com.cn>

电子邮箱 /[chiefedit@bitpress.com.cn](mailto:chiefedit@bitpress.com.cn)

经 销 /全国各地新华书店

印 刷 /北京圣瑞伦印刷厂

开 本 /850 毫米×1168 毫米 1/32

印 张 /10

字 数 /248 千字

版 次 /2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月第 1 次印刷

印 数 /1~6000 册

定 价 /14.00 元

责任校对 /张 宏

责任印制 /刘京凤

---

图书出现印装质量问题,本社负责调换

# 前 言

《工程力学基础》包括理论力学、材料力学两部分内容。为了便于选用,两部分各自成册。

本套教材是针对相关专业根据新世纪之教学目标所制订的中、少学时工程力学教学计划要求而编写的。在编写过程中,作者始终力求做到理论分析严谨、结论描述简明、应用说明采用实例,以利于提高学生分析问题、解决问题的能力。

本教材的理论力学分册由戴泽墩编写,材料力学分册由刘耀乙编写。他们在编写时主要参考了北京理工大学历届使用过的多种自编教材以及教学实践和教学研讨成果,并参阅了兄弟院校的有关教材和教学经验交流资料。在此,谨向上述文献资料的作者表示衷心的感谢。

随着我国教学改革不断深化,加之编者水平有限,本书难免存在不足和错误之处,恳盼专家、读者指正。

编 者

2004年1月

# 目 录

第 1 章 绪论.....	1
§ 1.1 材料力学的任务 .....	1
§ 1.2 变形固体的基本假设 .....	2
§ 1.3 杆件变形的基本形式 .....	2
§ 1.4 内力的概念 截面法 .....	4
§ 1.5 应力的概念 .....	7
本章内容小结.....	8
思考题.....	9
第 2 章 拉伸、压缩与剪切.....	10
§ 2.1 轴向拉伸或压缩时杆件的受力与变形特征.....	10
§ 2.2 轴向拉伸或压缩时杆件横截面上的内力.....	11
§ 2.3 轴向拉伸或压缩时杆件横截面与斜截面上的 应力.....	14
§ 2.4 材料在拉伸和压缩时的力学性能.....	17
§ 2.5 许用应力、安全系数与强度条件 .....	26
§ 2.6 轴向拉伸或压缩时杆件的变形.....	31
§ 2.7 轴向拉伸或压缩时的弹性变形能.....	35
§ 2.8 轴向拉伸或压缩的静不定问题.....	36
§ 2.9 应力集中的概念.....	40
§ 2.10 剪切与挤压 .....	41
本章内容小结 .....	46
思考题 .....	49
习题 .....	51
第 3 章 扭转 .....	59

§ 3.1	传动轴的外力偶矩 扭矩与扭矩图.....	59
§ 3.2	薄壁圆筒的扭转 剪应力互等定理与剪切虎克定律.....	62
§ 3.3	圆轴扭转时横截面上的应力 强度条件.....	65
§ 3.4	圆轴扭转时的变形 刚度条件.....	72
§ 3.5	矩形截面杆扭转问题的特点.....	75
	本章内容小结 .....	76
	思考题 .....	78
	习题 .....	79
<b>第 4 章</b>	<b>平面图形的几何性质 .....</b>	<b>83</b>
§ 4.1	静矩与形心.....	83
§ 4.2	惯性矩与惯性积.....	86
§ 4.3	惯性矩的平行移轴公式.....	90
	本章内容小结 .....	94
	思考题 .....	95
	习题 .....	96
<b>第 5 章</b>	<b>弯曲内力.....</b>	<b>100</b>
§ 5.1	平面弯曲 梁的计算简图 .....	100
§ 5.2	弯曲内力——剪力与弯矩 .....	104
§ 5.3	剪力方程与弯矩方程 剪力图与弯矩图 .....	108
§ 5.4	载荷集度、剪力和弯矩间的微分关系及其应用 .....	115
	本章内容小结.....	120
	思考题.....	121
	习题.....	122
<b>第 6 章</b>	<b>弯曲应力.....</b>	<b>127</b>
§ 6.1	梁横截面上的正应力 .....	127
§ 6.2	梁横截面上的剪应力 .....	133
§ 6.3	梁的弯曲强度计算 .....	137

§ 6.4	梁在相互垂直的两个纵对称面内弯曲的合成 ...	144
§ 6.5	梁的合理截面形状 .....	145
	本章内容小结.....	147
	思考题.....	149
	习题.....	151
<b>第 7 章</b>	<b>弯曲变形.....</b>	<b>156</b>
§ 7.1	梁的挠度与横截面转角 .....	156
§ 7.2	梁的挠曲线近似微分方程 .....	157
§ 7.3	用积分法计算梁的变形 .....	159
§ 7.4	用叠加法计算梁的变形 .....	170
§ 7.5	梁的刚度条件 .....	172
§ 7.6	简单静不定梁 .....	176
	本章内容小结.....	181
	思考题.....	182
	习题.....	185
<b>第 8 章</b>	<b>应力状态理论与强度理论.....</b>	<b>189</b>
§ 8.1	应力状态及其分类 .....	189
§ 8.2	二向应力状态的应力分析 .....	191
§ 8.3	有关三向应力状态的几个重要概念 .....	199
§ 8.4	强度理论简介 .....	206
	本章内容小结.....	212
	思考题.....	214
	习题.....	215
<b>第 9 章</b>	<b>组合变形杆件的强度计算.....</b>	<b>221</b>
§ 9.1	组合变形的概念 .....	221
§ 9.2	拉伸或压缩与弯曲的组合 .....	222
§ 9.3	弯曲与扭转的组合 .....	226
	本章内容小结.....	233
	思考题.....	234

习题.....	235
<b>第 10 章 交变应力下构件的强度</b> .....	242
§ 10.1 交变应力与疲劳破坏.....	242
§ 10.2 材料的持久极限.....	245
§ 10.3 影响构件持久极限的因素.....	246
§ 10.4 对称循环下构件的疲劳强度校核.....	252
本章内容小结.....	255
思考题.....	256
习题.....	257
<b>第 11 章 压杆的稳定性</b> .....	260
§ 11.1 压杆稳定性的概念.....	260
§ 11.2 计算压杆临界载荷的欧拉公式.....	261
§ 11.3 临界应力总图.....	264
§ 11.4 压杆的稳定性计算.....	268
本章内容小结.....	271
思考题.....	272
习题.....	273
<b>附录 型钢规格表</b> .....	279
<b>习题答案</b> .....	297
<b>本书主要符号一览</b> .....	306
<b>主要参考文献</b> .....	309

# 第 1 章 绪 论

## § 1.1 材料力学的任务

在科学技术与生产的发展中,人们不断设计、制造和使用着各种各样的机械和工程结构,例如机床、汽车、船舶、飞机、桥梁、水坝、耕作机具、工业与民用建筑等等。这些机械和工程结构通常由若干零件或元件(如轴、销、连杆、梁、柱等)组成。机械和工程结构的零件或元件统称为构件。

构件一般由金属及其合金、工程塑料、复合材料、陶瓷、混凝土、木材等固体材料制成。在机械和结构工作时,构件会受到来自周围物体的力的作用,并相应地发生形状与尺寸的变化。作用在构件上的外部作用力称为外力,构件形状与尺寸的变化称为变形。当外力的大小达到一定限度时,材料会发生破坏。

为保证机械和结构的正常工作,在外力作用下的构件应具有足够的承载能力。它包括以下三个方面:

- (1) 构件应具有足够的抵抗破坏的能力,即具有足够的强度。
- (2) 构件应具有足够的抵抗变形的能力,即具有足够的刚度。
- (3) 构件应具有维持其原有平衡形态的能力,即具有足够的稳定性。例如,细长直杆受压力作用,当压力达到一定限度时可能会被压弯,其稳定性是指始终维持原有直线平衡形态的能力。

构件的承载能力与构件的形状及尺寸有关,也与材料的力学性能有关。材料的力学性能需通过实验方法测定。

一般地说,通过加大构件横截面尺寸或选用优质材料等措施,可以提高构件的强度、刚度和稳定性。但过分加大构件横截面尺

寸或盲目选用优质材料,会造成材料的浪费和产品成本的增加。

作为一门学科,材料力学主要研究固体材料的宏观力学性能,以及工程结构元件与机械零件的承载能力。材料力学的任务是研究构件在外力作用下的变形与破坏规律,为设计既经济又安全的构件,提供有关强度、刚度和稳定性分析的基本理论和方法。它对人类认识自然和解决工程技术问题起着重要的作用。

## § 1.2 变形固体的基本假设

实际工程构件的材料多种多样,其微观组织结构与性能十分复杂。在材料力学中,为研究构件在外力作用下的变形与破坏规律,首先要略去材料的某些次要属性,只考虑与问题有关的主要属性,将实际构件简化为某种力学模型。

对制造构件所用的变形固体材料,通常作以下基本假设:

(1) 连续性假设——认为构件整个体积内无空隙地充满了材料。这样,可将某些力学量表示为点的坐标的连续函数,并进行极限分析。

(2) 均匀性假设——认为构件材料各点的力学性能与点的位置无关。这样,从构件内部任何部位取出的部分,其力学性能都是相同的。

(3) 各向同性假设——认为构件材料沿各个方向具有相同的力学性能。

经长期使用与实验验证,以上述基本假设为基础建立的材料力学理论与计算公式,能够符合工程要求。

## § 1.3 杆件变形的基本形式

就几何结构特征而言,实际工程构件有不同的类型。其中,长度远大于横截面尺寸的一类构件称为杆件,它是工程中最常用和

最基本的构件。例如 机械中的连杆、传动轴 ,建筑物中的横梁、立柱等都可以简化为杆件。材料力学的研究对象主要就是杆件。

杆件各横截面形心的连线称为杆件的轴线。轴线为直线的杆件称为直杆。轴线为曲线的杆件称为曲杆。

杆件在外力作用下发生变形。外力作用方式不同 ,相应的变形形式也不同。杆件变形的基本形式有四种 ,各基本变形形式及相应的受力特征分别是 :

(1) 轴向拉伸或压缩——作用于杆件上的外力合力作用线与杆件轴线重合 ,杆件变形是沿轴线方向的伸长或缩短(图 1.1)。

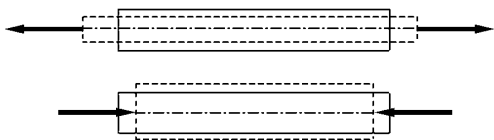


图 1.1

(2) 剪切——构件受到一对大小相等、方向相反、作用线距离很近且与构件轴线垂直的外力作用 ,构件在两个外力作用面之间发生相对错动变形(图 1.2)。

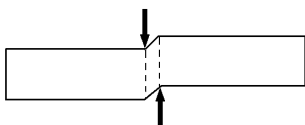


图 1.2

(3) 扭转——外力偶作用在垂直于杆件轴线的平面内 ,杆件的任意两个横截面之间绕轴线作相对转动(图 1.3)。

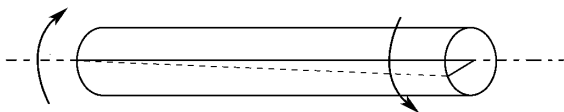


图 1.3

(4) 弯曲——横向外力作用在包含杆件轴线的纵向平面内，变形形式表现为杆件轴线由直线变为曲线(图 1.4)。

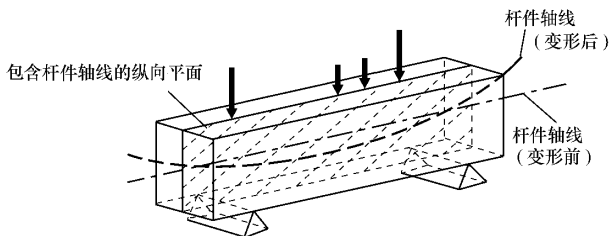


图 1.4

杆件除可能发生上述某种单一基本变形之外，还可能同时发生几种不同的基本变形，这种情况称为组合变形。

## § 1.4 内力的概念 截面法

在变形固体内部某一部分和相邻其他部分之间，本来就存在着相互作用力。当受到外力作用而发生变形时，又会产生附加的相互作用力。这种附加的相互作用力会随外力的增加而增大，到达一定限度就会引起材料的破坏，可见，它与强度问题密切相关。在材料力学中就把这种附加的相互作用力称为内力。

为了判断在外力作用下的构件是否具有足够的强度，需要计算出构件中某些截面上因已知外力而引起的内力。

设某杆件在已知外力作用下处于平衡状态，如图 1.5(a)所示，欲确定杆中某截面  $m-m$  上的内力。

为了显示截面  $m-m$  上的内力，假想地用该截面将杆件截分为两部分，如图 1.5(b)所示。杆件被截开后的两部分必然各自处于平衡状态。因作用在其中任一部分上的原有外力一般不再是平衡力系，所以，在截面  $m-m$  上必然存在着另一部分对本部分的

作用力,该作用力就是所需确定的内力。根据力的作用与反作用定律,截面各点处两侧部分之间相互作用的内力,是大小相等、方向相反的。因此,在作杆件内力分析时,可以随意选取截面两侧中的任一部分作为研究对象。

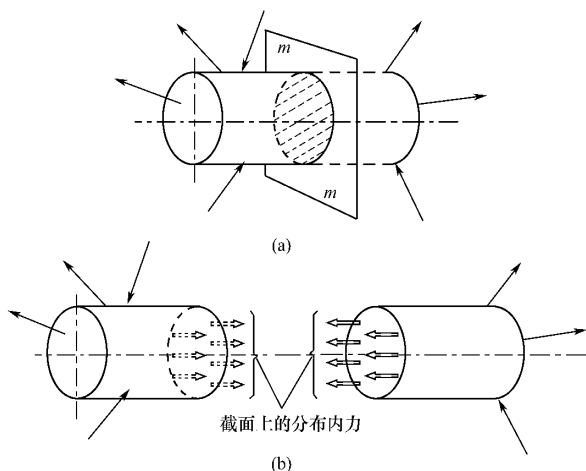


图 1.5

由变形固体的连续性假设可知,作用于杆件截面上的内力实际上是一个连续分布力系。将截面上的内力向截面某点简化,一般可得到一个主矢与一个主矩(特殊情况下可能只是一个主矢,或只是一个主矩)。通常所说的内力分析,指的就是截面内力的主矢与主矩的计算,也就是内力总和的计算。这样,只要取截面两侧中的任一部分为分离体,根据它的静力平衡方程就能够计算出截面  $m$ — $m$  上的内力。至于内力在截面上各点处的分布情况,仅利用静力平衡方程是不能确定的,这个问题的解决,正是本书后续各章的任务。

上述对受力杆件进行内力分析的方法称为截面法。该方法适用于杆件的各种受力情况,具有普遍性,是材料力学中的基本研究方法之一。概括地说,截面法的要点与步骤是:

(1)假想用一截面在需求内力处将杆件截分为两部分,保留其中一部分为研究对象,并移去另一部分;

(2)将移去部分对保留部分的作用表示为该截面上的未知内力;

(3)建立保留部分的静力平衡方程,即可确定截面上的内力。

例题 1.1 交通信号灯柱如图 1.6(a)所示,灯箱总重量为  $F$ ,不计横杆重量。试确定立柱截面  $m-m$  上的内力。

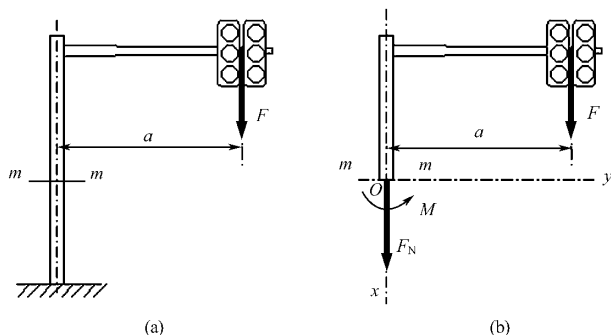


图 1.6

解 (1)假想用截面  $m-m$  将灯柱截分为两部分。保留截面以上部分为研究对象,以截面形心  $O$  为原点,选取坐标轴  $x$ 、 $y$ ,并移去截面以下部分,如图 1.6(b)所示。

(2)考虑到若将外力  $F$  向  $O$  点简化,必得一力及一力偶矩,故知移去部分对保留部分的作用必然也是一力及一力偶矩。现将该力用  $F_N$  表示,该力偶矩用  $M$  表示,并假设它们具有图 1.6(b)中所示的方向。 $F_N$  与  $M$  就是截面  $m-m$  上的未知内力。

(3)建立保留部分的静力平衡方程

$$\sum F_x = 0, \quad \text{即 } F_N + F = 0$$

$$\sum M_0 = 0, \quad \text{即 } M - Fa = 0$$

解之,得截面  $m-m$  上的内力为

$$F_N = -F, M = Fa$$

其中  $F_N$  为负,表明其实际方向与图示方向相反。

## § 1.5 应力的概念

内力虽与强度问题密切相关,但是,为研究杆件的强度,仅仅确定了截面上的内力是不够的,还必须知道内力在截面上各点处的分布情况,即需要了解截面上各点内力的集度。

仍以图 1.5(a)所示杆件为例。设在截面  $m-m$  上围绕任意点  $K$  取一微小面积  $\Delta A$ ,在  $\Delta A$  上作用有合力为  $\Delta F$  的分布内力,如图 1.7(a)所示。在  $\Delta A$  范围内,单位面积上内力的平均集度为

$$\bar{p} = \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

$\bar{p}$  是一个矢量,称为面积  $\Delta A$  上的平均应力。

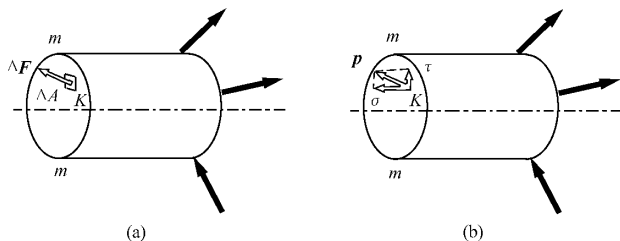


图 1.7

当面积  $\Delta A$  趋于零时,  $\bar{p}$  的极限值称为点  $K$  处的应力, 并用  $p$  表示

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1.1)$$

即, 截面上某点的应力是分布内力系在该点处的集度。

应力  $p$  是一个矢量, 通常将应力  $p$  分解为垂直于截面的分量  $\sigma$  和切于截面的分量  $\tau$  (图 1.7(b))。其中  $\sigma$  称为正应力,  $\tau$  称为剪应力。

应力的量纲是[力]/[长度<sup>2</sup>]。在国际制单位中, 应力的基本单位是  $\text{N}/\text{m}^2$  (牛/米<sup>2</sup>) , 符号为 Pa (帕), 即

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N}/\text{m}^2$$

因 Pa 这一单位甚小, 工程中常用的应力单位是 MPa (兆帕)

$$1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ MN}/\text{m}^2 = 1 \text{ N}/\text{mm}^2$$

## 本章内容小结

### 1. 几个概念

构件——机械和结构的零件或元件。

杆件——长度远大于横截面尺寸的构件。

强度——构件抵抗破坏的能力。

刚度——构件抵抗变形的能力。

稳定性——构件维持其原有平衡形态的能力。

内力——在外力作用下, 构件内部相邻部分之间产生的附加相互作用力。

应力——分布内力系在所考察截面上某点处的集度。

正应力——垂直于所考察截面的应力分量。

剪应力——切于所考察截面的应力分量。

### 2. 材料力学的任务

研究构件在外力作用下的变形与破坏规律, 为设计既经济又

安全的构件提供有关强度、刚度和稳定性分析的基本理论和方法。

### 3. 变形固体的基本假设

连续性假设——认为构件整个体积内无空隙地充满了材料。

均匀性假设——认为构件材料各点的力学性能与点的位置无关。

各向同性假设——认为构件材料沿各个方向具有相同的力学性能。

### 4. 杆件变形的基本形式

轴向拉伸或压缩、剪切、扭转、弯曲。

### 5. 截面法的要点与步骤

在需求内力处,用一截面假想将杆件截分为两部分,保留其中一部分为研究对象,并移去另一部分,用该截面的未知内力代替移去部分对保留部分的作用,建立保留部分的静力平衡方程,据此可确定截面的内力。

截面法是对受力杆件进行内力分析的基本方法。

## 思 考 题

1.1 构件的强度、刚度和稳定性各具有什么含义?

1.2 在确定杆件横截面尺寸和选择杆件材料时,设计者会面临什么矛盾?

1.3 材料力学的任务是什么?

1.4 材料力学对变形固体所作的基本假设有哪些?它们对材料力学的分析方法起到什么作用?

1.5 杆件变形的基本形式有哪几种?

1.6 什么是内力?对受力构件进行内力分析的基本方法是什么?怎样进行内力分析?

1.7 为什么要提出应力的概念?什么是正应力?什么是剪应力?

## 第 2 章 拉伸、压缩与剪切

### § 2.1 轴向拉伸或压缩时杆件的受力与变形特征

在工程结构与机械中,有很多构件在工作时承受拉伸或压缩的作用,这些构件由于外力作用而产生轴向拉伸或压缩变形。例如,气缸的紧固螺栓(图 2.1(a))和起重吊架中的杆 1(图 2.1(c))是承受拉伸的杆件,螺旋千斤顶的螺杆(图 2.1(b))和起重吊架中

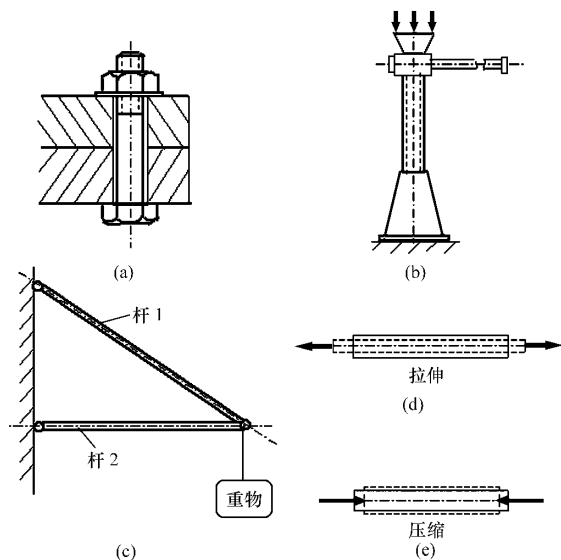


图 2.1