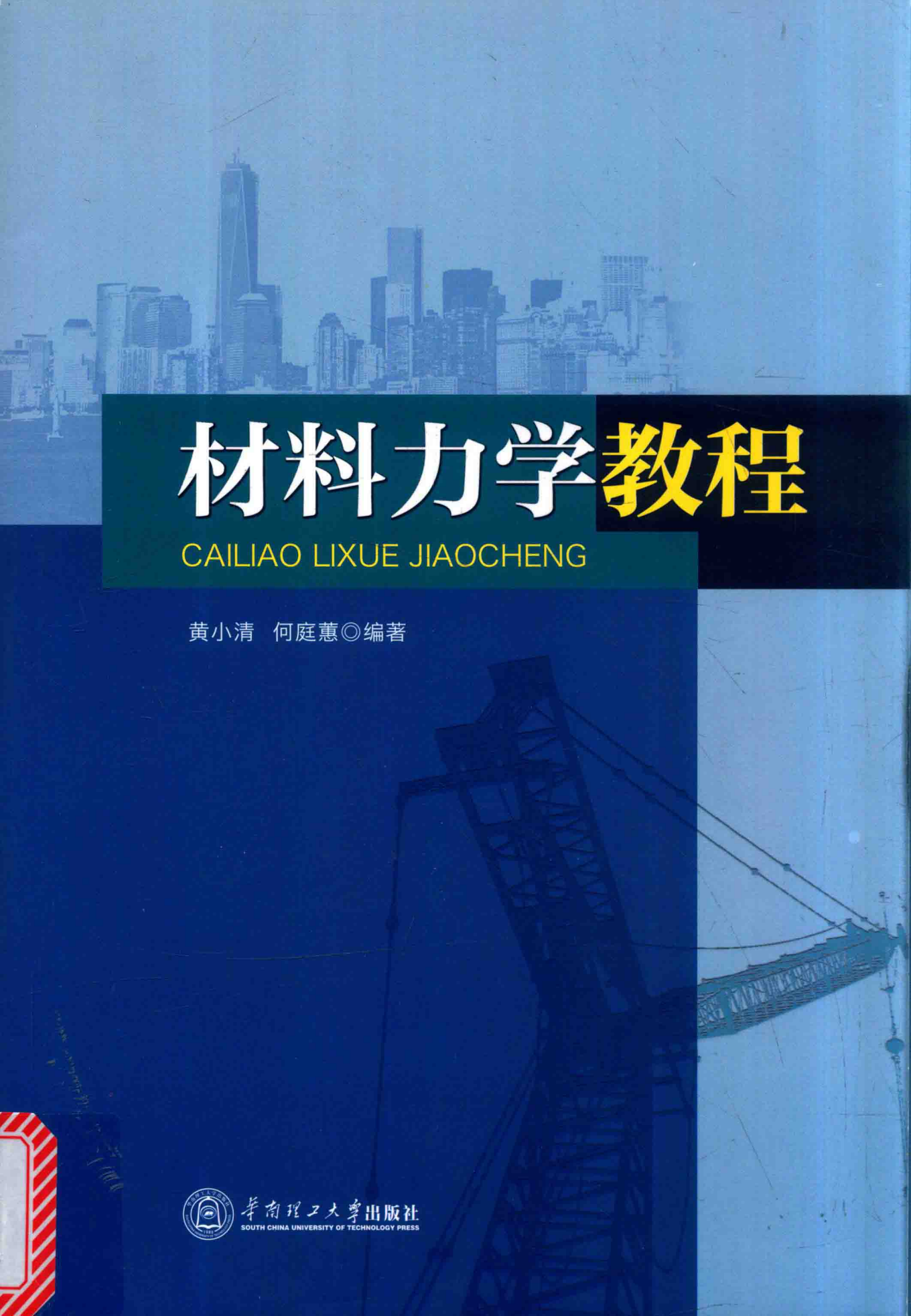




材料力学教程

CAILIAO LIXUE JIAOCHENG

黄小清 何庭蕙◎编著



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

材料力学教程

黄小清 何庭蕙 编著



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

· 广州 ·

内容提要

本教程精选了材料力学的基本内容,全书共 12 章,依次为材料力学的基本概念、杆件的内力与内力图、轴向拉压杆件的强度与变形计算、材料在拉伸和压缩时的力学性能、扭转杆件的强度与刚度计算、应力状态分析及强度理论、截面的几何性质、平面弯曲杆件的应力与强度计算、平面弯曲杆件的变形与刚度计算、组合变形杆件的强度计算、联接件的剪切与挤压的工程实用计算、压杆稳定计算。

为便于学习,每章均有导学,章后附有思考题、习题和基本概念测试,并统一提供了习题的解题思路、习题和基本概念测试参考答案。

本书可作为高等学校工科本科相关专业中、少学时材料力学课程的教材,也可用于高校成人教育与网络课程及高职高专相关专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学教程/黄小清,何庭蕙编著. —广州:华南理工大学出版社, 2016. 4

ISBN 978 - 7 - 5623 - 4874 - 0

I. ①材… II. ①黄… ②何… III. ①材料力学 - 高等学校 - 教材 IV. ①TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 038952 号

材料力学教程

黄小清 何庭蕙 编著

出版人:卢家明

出版发行:华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

<http://www.scutpress.com.cn> E-mail:scutc13@scut.edu.cn

营销部电话: 020 - 87113487, 87111048 (传真)

策划编辑:赖淑华

责任编辑:庄彦

印刷者:广州市穗彩印务有限公司

开本: 787 mm × 1092 mm 1/16 印张: 18 字数: 475 千

版次: 2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷

印数: 1 ~ 2000 册

定价: 36.00 元

版权所有 盗版必究 印装差错 负责调换

前 言

本书由原《材料力学》教材(黄小清主编,华南理工大学出版社,2011年第二版)的作者编写,是适用于中、少学时材料力学课程的教程。本书仍采用原《材料力学》教材的模块式教材体系,继续保持了内容精练、深入浅出、通俗易懂的风格和特点,并对某些章节内容作了适当的调整及删减,修改了若干例题和习题。每章新增加了导学及基本概念测试的内容,并提供了习题的解题思路、习题和基本概念测试的参考答案。

全书共分12章,内容包括:材料力学的基本概念、杆件的内力与内力图、轴向拉压杆件的强度与变形计算、材料在拉伸和压缩时的力学性能、扭转杆件的强度与刚度计算、应力状态分析及强度理论、截面的几何性质、平面弯曲杆件的应力与强度计算、平面弯曲杆件的变形与刚度计算、组合变形杆件的强度计算、联接件的剪切与挤压的工程实用计算、压杆稳定计算等。

本书可作为高等学校工科本科机械类、土木类中、少学时材料力学课程的教材,也可用于高职高专、高校成人教育与网络课程教材及供有关工程技术人员参考。

本书第1~6章由何庭蕙编写,第7~12章由黄小清编写。

本教程包含了作者数十年讲授材料力学课程的教学心得,也参考了众多的国内外优秀教材。由于水平有限,书中难免存在一些不足之处,希望读者批评指正。

作 者

2015年11月于广州

目 录

第1章 材料力学的基本概念	1
1.1 本章导学	1
1.2 材料力学的基本任务	2
1.3 材料力学的基本假设	2
1.4 杆件的内力与截面法	3
1.5 应力与应变的概念	4
1.6 杆件变形的基本形式	6
思考题	6
基本概念测试	7
第2章 杆件的内力与内力图	8
2.1 本章导学	8
2.2 轴向拉压杆的内力 轴力图	9
2.3 扭转杆的内力 扭矩图	13
2.4 平面弯曲梁的内力 剪力图和弯矩图	16
2.5 组合变形杆件的内力与内力图	27
思考题	30
习题	30
基本概念测试	35
第3章 轴向拉压杆件的强度与变形计算	38
3.1 本章导学	38
3.2 轴向拉压杆横截面上的应力	39
3.3 轴向拉压杆斜截面上的应力	40
3.4 轴向拉压杆的变形计算 胡克定律	41
3.5 轴向拉压杆的强度计算	44
3.6 拉压超静定问题	48
思考题	53
习题	54
基本概念测试	58
第4章 材料在拉伸和压缩时的力学性能	60
4.1 本章导学	60
4.2 材料在拉伸时的力学性能	61
4.3 材料在压缩时的力学性能	67

4.4 许用应力	68
4.5 应力集中的概念	69
思考题	70
习题	71
基本概念测试	72
第5章 扭转杆件的强度与刚度计算	74
5.1 本章导学	74
5.2 圆轴扭转时的应力和变形计算	75
5.3 圆轴扭转时的强度和刚度计算	81
5.4 非圆截面杆的自由扭转简介	85
思考题	87
习题	88
基本概念测试	91
第6章 应力状态分析及强度理论	92
6.1 本章导学	92
6.2 应力状态概述	93
6.3 平面应力状态分析	95
6.4 三向应力状态分析	105
6.5 广义胡克定律	107
*6.6 一般应力状态下的应变比能	109
6.7 工程中常用的四种强度理论	111
思考题	115
习题	117
基本概念测试	120
第7章 截面的几何性质	122
7.1 本章导学	122
7.2 平面图形的静矩和形心	123
7.3 平面图形的惯性矩、惯性积和惯性半径	124
7.4 惯性矩和惯性积的平行移轴公式	128
7.5 惯性矩和惯性积的转轴公式 主惯性轴和主惯性矩	130
思考题	132
习题	134
基本概念测试	135
第8章 平面弯曲杆件的应力与强度计算	136
8.1 本章导学	136
8.2 纯弯曲时梁横截面上的正应力	137

8.3 横力弯曲时梁横截面上的应力	140
8.4 梁的强度计算	146
8.5 梁的合理强度设计	152
思考题	155
习题	156
基本概念测试	161
第9章 平面弯曲杆件的变形与刚度计算	162
9.1 本章导学	162
9.2 挠曲线 挠度和转角	163
9.3 挠曲线的近似微分方程	164
9.4 积分法求梁的变形	165
9.5 叠加法求梁的变形	169
9.6 梁的刚度条件与合理刚度设计	175
9.7 用变形比较法解简单超静定梁	177
思考题	180
习题	181
基本概念测试	183
第10章 组合变形杆件的强度计算	185
10.1 本章导学	185
10.2 拉(压)与弯曲组合变形的强度计算	186
10.3 斜弯曲的强度计算	193
10.4 弯扭组合变形的强度计算	196
思考题	201
习题	203
基本概念测试	206
第11章 联接件的剪切与挤压的工程实用计算	208
11.1 本章导学	208
11.2 剪切与挤压的概念	209
11.3 剪切与挤压的工程实用计算	209
11.4 联接件的剪切与挤压强度计算算例	211
思考题	216
习题	217
基本概念测试	220
第12章 压杆稳定计算	223
12.1 本章导学	223
12.2 压杆稳定的概念	224

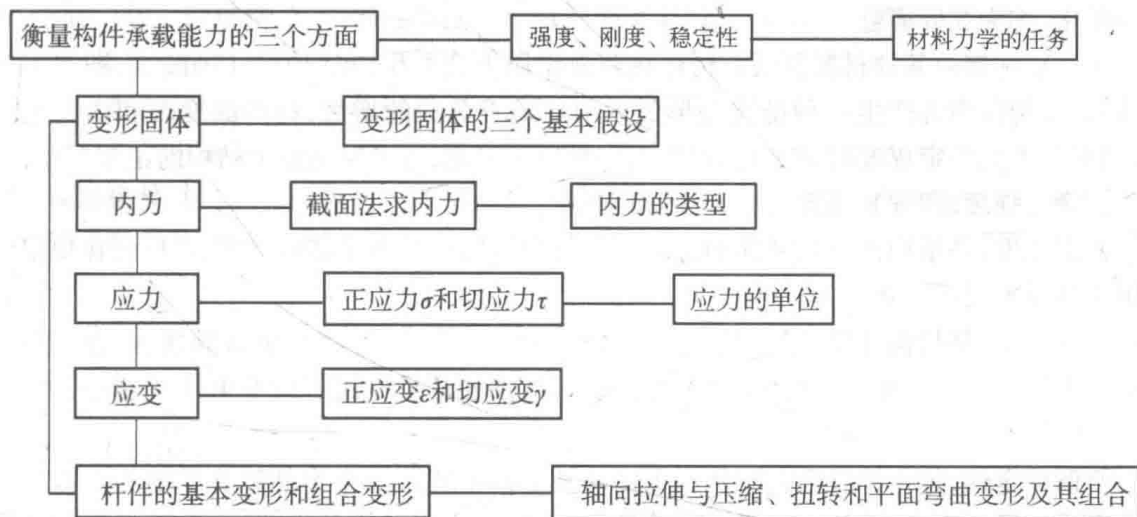
12.3 确定细长压杆临界力的欧拉公式·····	226
12.4 压杆的临界应力总图·····	229
12.5 压杆的稳定性计算·····	232
12.6 压杆稳定性的合理设计·····	237
思考题·····	238
习题·····	239
基本概念测试·····	241
习题解题思路·····	242
习题参考答案·····	259
基本概念测试参考答案·····	265
附录 型钢规格表·····	267
参考文献·····	278

第1章 材料力学的基本概念

1.1 本章导学

绪论是对材料力学课程中一些基本概念的阐述,这些基本概念是贯穿整门课程的基本假设和理论基础。

1.1.1 本章知识结构框图



1.1.2 本章学习目标

- (1)了解材料力学的研究对象和任务。
- (2)了解强度、刚度和稳定性的概念。
- (3)了解变形固体的基本假设。
- (4)掌握用截面法求解内力以及杆件内力的分类。
- (5)了解正应力、切应力和正应变、切应变的概念。
- (6)掌握杆件基本变形和组合变形的概念。

1.1.3 本章学习重点

- (1)强度、刚度、稳定性的概念及材料力学的任务。
- (2)变形固体的基本假设。
- (3)截面法求解内力以及杆件内力的分类。
- (4)正应力、切应力和正应变、切应变的概念。
- (5)杆件基本变形和组合变形的概念。

1.2 材料力学的基本任务

物体受到外力作用后,其内部会引起变形和内力,物体会发生破坏。材料力学主要研究物体受力后发生的变形、由于变形而产生的内力以及物体由此而产生的失效和控制失效的准则。

工程中各种结构或机械都是由许多杆件或零部件组成。这些杆件或零部件统称为**构件**。工程上构件的几何形状是各种各样的,可分为**杆件**、**板(或壳)**、**实体**。本课程主要的研究对象是杆件。

所谓杆件,是指长度远大于横向尺寸的构件。杆件各横截面形心的连线称为**轴线**。轴线为直线的杆件称为**直杆**;轴线为折线或曲线的杆件分别称为**折杆**或**曲杆**。如果杆件横截面的形状和尺寸沿杆的轴线保持不变,称为**等截面杆**;如果杆件横截面的形状和尺寸沿杆的轴线变化,称为**变截面杆**。

任一构件都由某种材料制成。构件在荷载作用下会发生形状和尺寸的改变,即产生变形,同时在构件内部产生一种抵抗变形的内力。随着荷载的增加,构件的变形和内力也增大,当荷载大到一定程度时,构件会丧失工作能力。因此,为了保证整个结构的正常工作,构件必须满足**强度**、**刚度**和**稳定性**的工程设计要求。

所谓**强度**,是指构件抵抗破坏的能力。任何构件均应具备足够的强度,以保证在规定的使用条件下不发生破坏。

所谓**刚度**,是指构件抵抗变形的能力。构件的变形过大,即使有足够的强度,也会影响其正常工作。工程上根据构件的不同用途,要求构件在荷载作用下的变形不得超过一定的范围。

所谓**稳定性**,是指构件在荷载作用下保持其平衡形式不发生突然转变的能力。构件的平衡形式如果发生突然转变,工程上称为**失稳**,构件将丧失承载能力,甚至导致结构物的坍塌。

一般来说,要使构件安全工作,应同时满足以上三项要求。但由于各种构件对强度、刚度和稳定性的要求程度有所不同,有的以强度为主,有的以刚度为主,有的则以稳定性为主,因此,工程上设计构件时只考虑其主要的要求便可。

此外,一个合理的构件设计,不但应该保证构件有足够的承载能力,使其能够安全可靠工作,还应该满足降低材料消耗、减轻自身重量和节约资金等经济性要求。因此,材料力学的任务就是要研究如何在满足强度、刚度和稳定性的前提下,为设计既安全又经济的构件提供必要的理论基础和计算方法。

由上可知,材料的强度、刚度和稳定性与材料的**力学性能**有关,而材料的力学性能要通过实验来测定。因此,在材料力学中,实验也占有十分重要的地位。

1.3 材料力学的基本假设

构件由固体材料组成,任何固体在外力作用下将或多或少地发生变形,因此也称为**可变形固体**,简称**变形固体**。变形固体的变形,按其变形性质可分为**弹性变形**和**塑性变形**。弹性

变形是指作用于变形固体上的外力去除后能消失的变形,而塑性变形是指作用于变形固体上的外力去除后不能消失的变形。只产生弹性变形的固体称为**弹性体**。材料力学仅研究弹性体的变形。

制造构件的材料多种多样,它们的组成和微观结构更是复杂。材料力学仅研究材料的宏观形态,为了突出主要因素,以便于工程应用,对变形固体作如下假设:

连续性假设 假设组成固体的物质不留空隙地充满了固体的体积。这个假设有助于将有关的力学量表达为固体内各点坐标的连续函数。

均匀性假设 假设组成固体的物质在固体内均匀分布并且在各处都具有相同的力学性能。这个假设有助于将用小试样测得的力学性能作为该材料的性能。

各向同性假设 假设材料沿任何方向的力学性能是完全相同的。这个假设有助于对构件进行力学分析时,可沿任意方向截取分析对象,而材料力学性能均相同。

实践表明,根据这些假设得出的力学理论,对于工程上的大多数材料都是正确的。当然,也有一些工程材料,它们的力学性能具有明显的方向性,如木材,其顺纹与横纹的强度是不同的;又如单向纤维增强复合材料,沿其纤维方向和垂直于纤维方向的力学性能也是不相同的。这类材料属于**各向异性材料**。

材料力学中研究的构件在承受荷载作用时,其变形量与构件的原始尺寸相比通常甚小,即**小变形条件**,所以,在研究构件的平衡或运动以及内部受力和变形等问题时,可按构件的原始尺寸和形状进行计算。

1.4 杆件的内力与截面法

1.4.1 内力的概念

变形固体在没有受到外力作用之前,内部质点与质点之间就已经存在着相互作用力以使固体保持一定的形状。当受到外力作用而发生变形时,各点之间产生附加的相互作用力,称为“**附加内力**”,简称“**内力**”。

内力是由外力引起并与变形同时产生的,它随着外力的增大而增大,当超过某一限度时,构件就发生破坏。所以,要研究构件的承载能力,必须要研究和计算内力。

根据变形固体的连续性假设,弹性体内各部分的内力是连续分布的。

1.4.2 截面法

截面法是显示内力和确定内力的方法。如图1-1a所示为一受力平衡的构件,若要确定其某截面的内力,则假想用一平面将该处截开,将弹性体分为A、B两部分(图1-1b),两部分在截开处的截面上均存在一分布内力系,且两部分对应点上的内力互为作用力和反作用力。由于构件整体是平衡的,所以截开的各个部分也是平衡的,作用在每部分上的外力与所截截面上的分布内力组成平衡力系。

一般情况下,截面上的内力是连续非均匀分布的空间任意力系,根据力系的简化理论,将该空间任意力系向截面的形心简化,可得一个力 F'_R 和一个力偶矩矢为 M 的力偶,它们分别称为截面的**内力主矢**和**内力主矩**(图1-1c)。

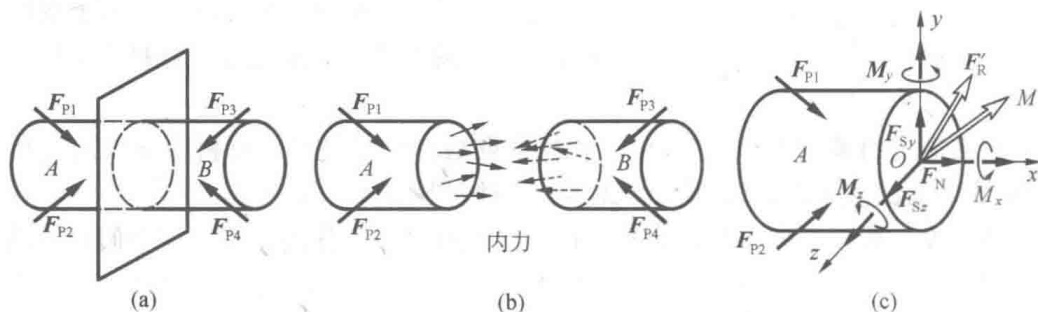


图 1-1

工程中为计算方便,通常把内力主矢和内力主矩投影到各坐标轴上,它们称为**内力分量**。图 1-1c 所示的内力主矢在三个坐标轴上的分量分别为**轴力** F_N 、**剪力** F_{Sy} 和 F_{Sz} ,内力主矩在三个坐标轴上的分量分别为**扭矩** M_x (或 T)、**弯矩** M_y 和 M_z 。

在**静定问题**中,由截开后的构件的任一部分的平衡条件,可以确定全部的内力分量。综上所述,应用截面法确定截面内力的步骤是:

- (1) 截开构件:沿欲求内力的截面处将构件截成两部分,任取其中一部分为研究对象;
- (2) 显示内力:用内力代替舍去部分对留下部分的作用;
- (3) 确定内力:建立静力平衡方程并求解,确定内力分量。

1.5 应力与应变的概念

应用截面法可以确定静定问题中杆件横截面上的内力分量,而内力分量只是杆件横截面上连续分布内力的简化结果,仅仅确定了内力分量并不能确定横截面上各点内力的大小,也不能判断杆件在哪点先破坏。因为一般情况下分布内力在各点的数值是不相等的,所以,需先确定内力在横截面上的分布规律,求各点的内力值,然后再由强度条件判断杆件是否破坏。

要分析杆件内力分布的规律,必须研究杆件的变形以及材料受力和变形之间的关系,即变形协调关系和物性关系。

1.5.1 应力

应力是分布内力在截面上某一点处的集度。

设在某一受力构件的任意截面 $m-m$ 上,围绕该截面上的某一点 K 取一微小面积 ΔA ,若作用在这一面积上的分布内力的合力为 ΔF_R (图 1-2),则称 $\frac{\Delta F_R}{\Delta A}$ 为面积 ΔA 的平均应力。当所取面积趋于无穷小时,上述平均应力趋于一极限值

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_R}{\Delta A} \quad (1-1)$$

p 称为截面 $m-m$ 上点 K 处的总应力。

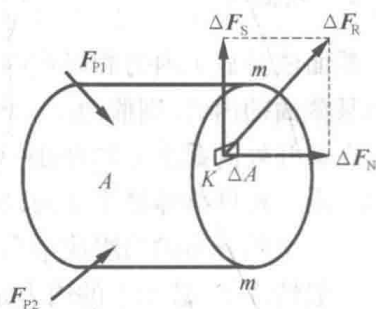


图 1-2

将 ΔF_R 沿截面的法向和切向分解为两个分量 ΔF_N 和 ΔF_S (图 1-2), 当 $\Delta A \rightarrow 0$ 时, 垂直于截面的正应力:

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_N}{\Delta A} \quad (1-2)$$

平行于截面的切应力:

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_S}{\Delta A} \quad (1-3)$$

应力的单位为 Pa, 称为“帕斯卡”, 简称“帕”, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$, 工程中常用 MPa、GPa, 其值为

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 10^{-3} \text{ kPa} = 10^{-6} \text{ MPa} = 10^{-9} \text{ GPa}$$

应力的正负号规定如下:

正应力: 设拉应力为正; 压应力为负。

切应力: 设使其对作用部分产生顺时针转动趋势者为正; 反之为负。

1.5.2 应变

为了研究杆件内各点的变形情况, 可设想将杆件分割成许多微小正六面体, 这种微元体称为单元体 (图 1-3a)。整个杆件的变形可以看成是所有单元体变形的累加。

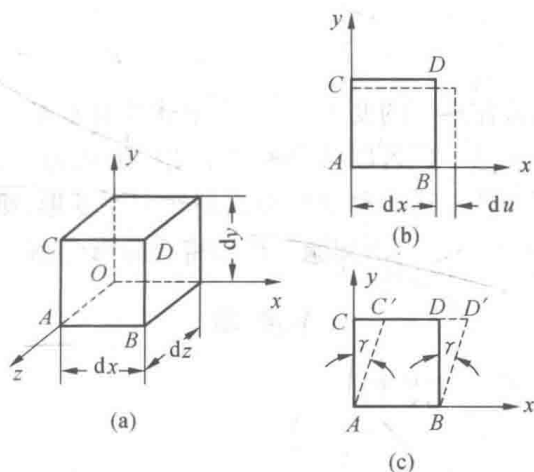


图 1-3

杆件受力后, 单元体的变形有棱边长度的改变和各棱边夹角的改变两种形式 (图 1-3 b、c)。单元体棱边产生伸长或缩短的变形称为线变形, 描述弹性体在各点处线变形程度的量, 称为正应变或线应变, 用 ε 表示; 单元体相邻棱边所夹直角的改变量, 称为切应变或角应变, 用 γ 表示。

研究如图 1-3a 所示单元体在 xy 平面内的变形表达。设单元体在 x 方向的棱边原长为 dx , 变形后的长度为 $dx + du$ (图 1-3b), 则该处沿 x 方向的正应变 ε_x 为

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (1-4)$$

而在 xy 平面内的切应变 γ 如图 1-3c 所示。

线应变是量纲一的量,规定拉应变为正,压应变为负。切应变用弧度(rad)表示。

综上所述,杆件任何一点的变形都是由正应变和切应变组成,可用它们来度量杆件内一点处的变形程度。对于各向同性材料,正应变和切应变分别与正应力和切应力相联系。

1.6 杆件变形的基本形式

作用在杆件上的外力是多种多样的,因此,杆件的变形也是各种各样的。不过这些杆件变形的形式不外乎可以归结为以下三种:轴向拉伸与压缩、扭转和平面弯曲。

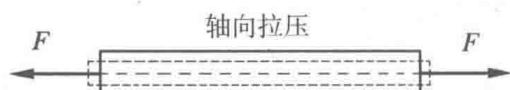


图 1-4

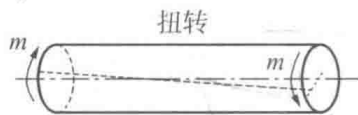


图 1-5

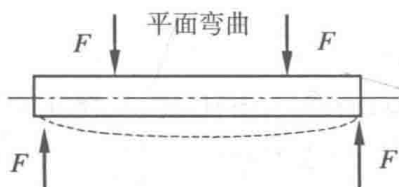


图 1-6

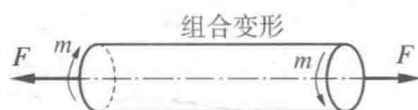


图 1-7

工程中常用杆件在荷载作用下的变形,大多为上述几种基本变形形式的组合,纯属一种基本变形形式的杆件较为少见。但若以某一种基本变形形式为主,其他属于次要变形的,则可按该基本变形形式计算。若上述几种变形形式都非次要变形,则由两种或两种以上的基本变形组合而成的变形,属于组合变形问题。后面将会分章介绍。

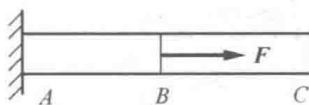
思考题

1-1 什么是构件的强度、刚度和稳定性?

1-2 材料力学对变形固体有哪些假设?

1-3 何谓内力? 何谓截面法? 一般情况下,构件横截面上的内力可用几个分量表示? 用截面法是否可以求任何受力构件的内力?

1-4 如图所示受力杆件中,哪一段内有应力? 哪一段内有应变? 哪一段内有位移?



思考题 1-4 图

1-5 杆件变形的形式有哪些? 何谓组合变形?

基本概念测试

是非判断题(在题后的括号里填√或×):

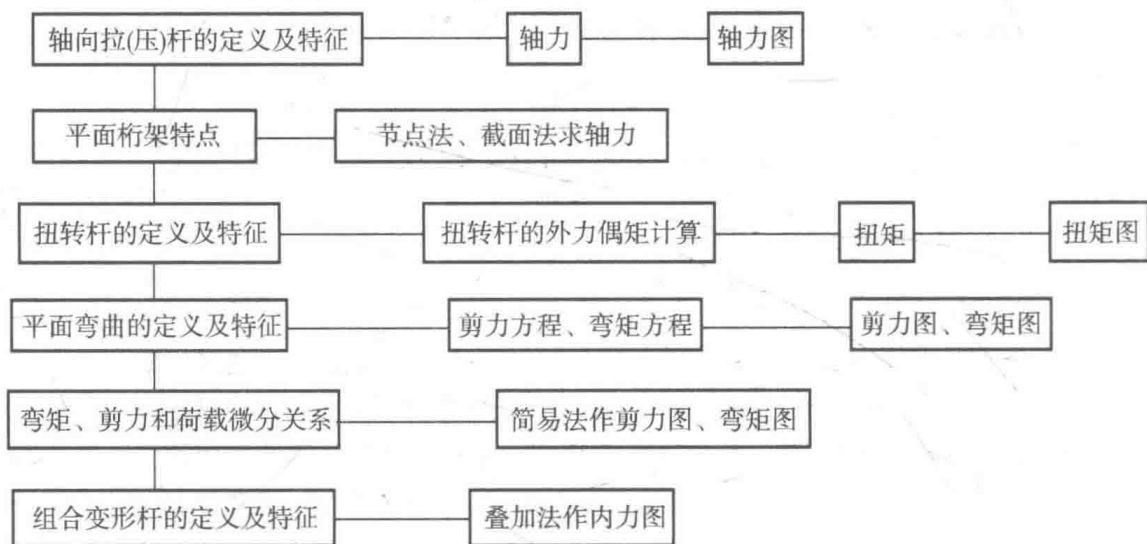
- 1-1 材料力学的主要研究对象是杆件。()
- 1-2 材料力学研究的物体模型是刚体。()
- 1-3 所谓强度,是指构件抵抗破坏的能力。()
- 1-4 构件的刚度是指其平衡形式发生突然转变。()
- 1-5 变形固体的三个假设是:连续性假设、均匀性假设、各向同性假设。()
- 1-6 弹性变形是指作用于变形固体上的外力去除后能消失的变形。()
- 1-7 截面法是求解任意受力杆件内力的唯一方法。()
- 1-8 杆件横截面上的内力最多有四种:轴力、剪力、扭矩和弯矩。()
- 1-9 截面的应力分为两种:垂直于截面的正应力和平行于截面的切应力。()
- 1-10 线应变是量纲一的量,规定拉应变为正,压应变为负。()

第2章 杆件的内力与内力图

2.1 本章导学

本章主要介绍杆件在轴向拉伸或压缩、扭转、平面弯曲等基本变形及组合变形下的内力计算方法。

2.1.1 本章知识结构框图



2.1.2 本章学习目标

- (1) 熟练利用截面法求解轴向拉、压杆的轴力和画轴力图。
- (2) 掌握平面桁架的内力计算。
- (3) 熟练掌握扭转杆的外力偶矩计算,熟练计算扭矩和画扭矩图。
- (4) 熟练列出平面弯曲杆件的剪力方程和弯矩方程,并利用剪力方程和弯矩方程作出剪力图和弯矩图。
- (5) 熟练掌握弯矩、剪力和荷载之间的微分关系,作剪力图和弯矩图。
- (6) 熟练掌握组合变形杆件的内力图作图方法。

2.1.3 本章学习重点

- (1) 轴向拉、压杆的轴力图。
- (2) 扭转杆的扭矩图。
- (3) 平面弯曲杆的剪力图和弯矩图。
- (4) 组合变形杆件的内力图。

2.2 轴向拉压杆的内力 轴力图

在工程结构和机械中,发生轴向拉伸或压缩的构件是很常见的。例如图 2-1 所示的连杆、图 2-2 所示桁架中的杆件等均是承受轴向拉伸或压缩的实例。

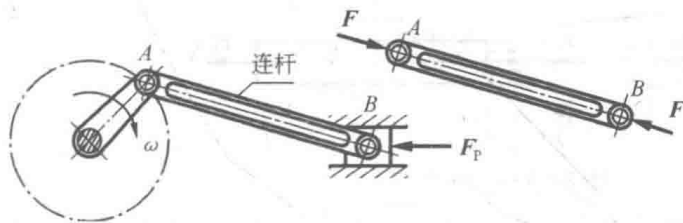


图 2-1

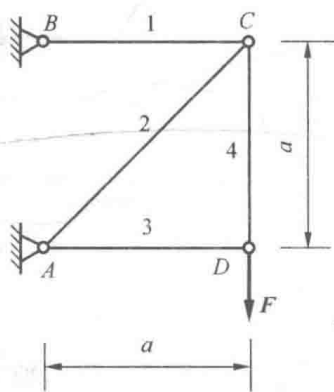


图 2-2

这类直杆的外形及加载方式虽有差异(图 2-3a、b、c),但有共同的受力特点及变形特点:作用在直杆上的外力或外力的合力作用线与杆轴线重合,杆件沿杆轴方向伸长或缩短(图 2-4a、b)。这类直杆统称为轴向拉伸或轴向压缩杆。轴向拉压变形是杆件的一种基本变形形式。

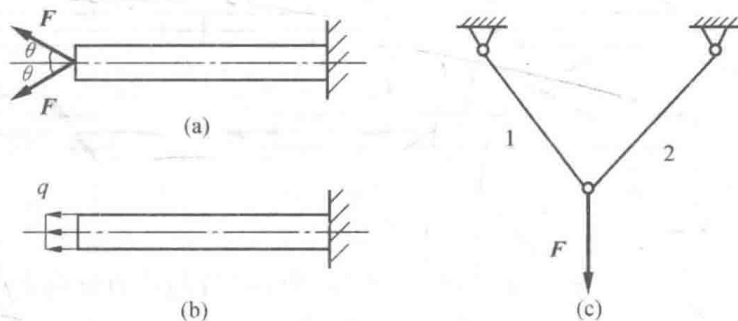


图 2-3

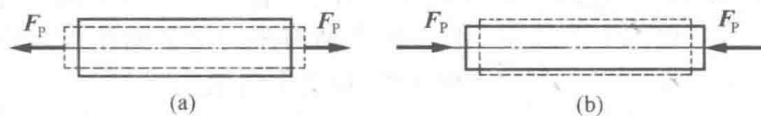


图 2-4

2.2.1 轴力

在轴向外力作用下,杆件横截面上唯一的内力分量是轴力 F_N 。