

高等学校教材

工 程 力 学

蔡 乾 煌

高等教育出版社

TB 12

357915

C 03

高等学校教材

工 程 力 学

蔡 乾 煌

高等教育出版社

(京)112号

内 容 简 介

本书是国家教委材料力学课程教学指导小组评选出来的,适用于材料类专业及与之关系密切的热处理、焊接、冶金等专业的工程力学教材。本书体现了固体力学与材料科学相结合、相渗透的发展方向,充实了材料(金属、陶瓷、高分子等)的力学性能、应力和应变分析、强度理论等内容,而对这些专业要求不高的复杂的杆件强度计算内容作了适当的精简。本书的静力学部分精简了与物理学的重复内容,并与材料力学部分相互渗透。

高等学校教材

工 程 力 学

蔡乾煌

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

三河科教印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 15.25 字数 393 000

1992年6月第1版 1992年6月第1次印刷

印数0001—1917

ISBN7-04-003762-9/TB·195

定价 5.45元

前 言

材料类专业用《工程力学》教材的出版工作列入国家教委“1986~1990年工科材料力学教材建设规划”。国家教委高等学校工科材料力学课程教学指导小组于1987年11月发布征稿启示,1988年12月组织评审组对应征讲义进行评选,本讲义中选。此后编者根据评审组所提修改意见写成书稿提要寄送全国几十所有关院校广泛征求意见,并引起积极反响。编者根据一些比较一致的意见对书稿再次进行修改,力求使本教材能体现集体的智慧。

工程力学是大多数工程技术人员必修的技术基础课程。本教材主要是为工科院校材料类专业(如金属材料、陶瓷材料、高分子材料等)编写的力学基础教程,适用学时为80~100。由于材料的热加工专业(如热处理、焊接、冶金等)与材料类专业关系密切,因而本教材也可作为这些专业的学生学习材料力学课程的教学用书。

迄今为止,材料类专业工程力学的教学大都因袭一般工科专业工程力学的教学大纲与教材,主要包括静力学与材料力学两部分内容,也有的还包括运动学与动力学,也就是理论力学与材料力学两部分内容。本教材以材料力学内容为主体,在侧重“力学”的同时,给“材料”以足够的重视,以此形成自己的特色。

材料科学是现代科技发展浪潮中最活跃的学科之一。近二、三十年来,工程结构材料的家族成员发生了巨大变化。除传统的中、低强度钢之外,高强及超高强合金材料、结构陶瓷材料、复合混凝土材料、高分子及复合材料等新型结构材料,正越来越广泛地不同工程部门包括高技术领域得到应用。令人瞩目的动向之一是材料科学与固体力学相结合、相渗透,发展出众多的边缘学科,如金属力学、陶瓷力学、复合材料力学等。材料科学家与

力学家通力合作,对各种结构材料在不同条件下的力学性能、破坏机理与破坏准则的研究越来越深入。因此,根据学科发展趋势、专业培养目标和后续课程设置情况,材料类专业对工程力学课程提出自成特色、适应上述发展趋势的要求是很自然的。

本教材力图顺应这种要求。一方面对一些传统内容进行精选。如原来静力学的内容,鉴于学生至少已具有中学与大学物理中的力学基础知识,故在基本理论的阐述与论证方面作了一定精简,而相应增强了静力分析方法及其工程应用的训练。对于基本受力与组合受力杆件的静荷强度计算的内容,则注重于介绍基本概念和基本方法,而不要求作复杂的计算。对内力与内力图、截面图形几何性质、组合受力等内容进行了精简并不设专章,对于弯曲变形、静不定、压杆稳定的要求也大体如此。另一方面,把材料的力学性能、应力和应变分析、强度理论等内容作为重点内容予以加强与补充。如材料的力学性能,不仅针对金属,还顾及陶瓷与高分子材料;不仅介绍了各向同性,还涉及各向异性问题。在应力分析的内容中不仅介绍了解析法,还介绍了应力圆法;不仅介绍了主应力与最大剪应力,还介绍了静水应力、应力偏量等有关概念。对于强度理论,不仅介绍了四个常见的经典理论,还介绍了基于实验的唯象研究方法的莫尔理论等。为了拓宽学生的知识面并为某些后续课程提供力学基础知识,本教材还设立了专题。专题“切口应力集中与裂纹所致的脆性断裂”对含有切口、裂纹型缺陷或宏观裂纹的材料脆断分析,提供了必要的力学概念与线弹性断裂力学的基本理论。专题“材料出现塑性变形后的力学行为”则介绍了塑性力学中的有关基本概念与形变理论的要

点。

本教材划分基本要求、进一步要求(带*号)与专题三个层次,教师可以根据教学需要按这三个层次选教,学生可以根据自己的情况在教师指导下选学。这样对教师的教与学生的学都会显

得比较灵活。有些院校的材料类专业学生虽然与其它专业学生合班上理论力学课，本教材仍可作为单独开设“材料力学”课的教材，因为第一章“静力分析的基本原理与方法”所占篇幅不多，可作为学生的复习资料。本教材为了方便学生自学，每章开头都有“提要”，提出本章的重点与要求；每章后面均附有习题，书后附有答案。

在本教材试用过程中，清华大学材料科学与工程系陈南平教授、西南交通大学孙训方教授、清华大学材料力学教研组吴明德、范钦珊教授等老师提出了许多改进意见。北京航空航天大学单辉祖教授和东南大学胡增强教授对本书进行了审阅，逐章提出许多宝贵中肯的意见。在此谨向他们表示深切谢意。限于笔者的理论水平与教学经验，教材中不妥之处在所难免，恳望得到有关同仁与读者的批评与指正。

蔡乾煌 于清华大学

1990.10

目 录

绪论	1
第一章 静力分析的基本原理与方法	4
§ 1.1 力、力矩与力偶	4
§ 1.2 静力学等效原理	9
§ 1.3 力系的简化与平衡理论	18
§ 1.4 构件的约束力与受力图	22
§ 1.5 静力分析的基本方法及典型实例	30
* § 1.6 传动轴的静力分析	37
习题	40
第二章 变形体的基本概念	52
§ 2.1 变形固体的基本假设	52
* § 2.2 基本假设的物理基础	52
§ 2.3 位移、变形与应变	58
§ 2.4 内力与内力分量	62
§ 2.5 应力与应力分量	65
习题	67
第三章 拉伸	71
§ 3.1 拉杆与压杆, 圣维南原理	71
§ 3.2 横截面与斜截面上的应力	72
§ 3.3 强度条件与强度计算	76
§ 3.4 胡克定律与弹性变形	80
§ 3.5 变形能	83
§ 3.6 拉、压静不定问题	85
§ 3.7 残余应力的初步概念	91
习题	92
第四章 材料的力学性能	100
§ 4.1 材料的拉伸破坏试验及有关力学性能	100

§ 4.2	压缩破坏试验的主要结果	107
§ 4.3	影响材料力学性能的主要因素	109
* § 4.4	高分子材料的力学性能	118
§ 4.5	许用应力与安全系数	122
	习题	124
第五章	扭 转	130
§ 5.1	传动轴的扭转力偶与扭矩	130
§ 5.2	薄壁圆筒的扭转问题	133
§ 5.3	扭转圆轴的应力与变形	137
§ 5.4	扭转破坏试验及应力分析	143
§ 5.5	受扭圆轴的强度条件与强度计算	146
§ 5.6	受扭圆轴的变形和刚度计算	148
	习题	150
第六章	弯 曲	155
§ 6.1	弯曲内力	155
§ 6.2	纯弯梁的正应力与变形公式	167
§ 6.3	形心与惯性矩的计算	172
§ 6.4	横弯梁的应力与变形公式	179
§ 6.5	弯曲强度条件与合理设计	183
* § 6.6	组合梁的纯弯问题	189
§ 6.7	组合受力构件的强度问题	193
§ 6.8	弯曲变形与刚度计算	206
§ 6.9	弯曲静不定问题	219
	习题	221
第七章	压杆稳定性问题	238
§ 7.1	构件的稳定性问题及失稳特点	238
§ 7.2	细长压杆的弹性稳定临界力	241
§ 7.3	压杆的临界应力与临界应力图	243
§ 7.4	压杆稳定性校核与提高稳定性的途径	247
	习题	251
第八章	应力、应变分析基础	255

§ 8.1	应力状态概念及工程实例	255
§ 8.2	一般平面应力状态的应力分析	262
§ 8.3	空间应力状态的主应力与最大剪应力	274
§ 8.4	应力状态的分类	277
§ 8.5	应变状态概念与广义胡克定律	281
§ 8.6	平面应力状态的应变分析	288
§ 8.7	微元体的体积改变与形状改变	295
§ 8.8	比能	299
	习题	303
第九章	强度理论(破坏准则)	311
§ 9.1	概述	311
§ 9.2	经典强度理论	314
§ 9.3	莫尔理论	320
§ 9.4	强度理论的工程应用	323
* § 9.5	塑性变形的物理基础	330
	习题	335
第十章	疲劳问题	340
§ 10.1	概述	340
§ 10.2	材料的疲劳强度	344
§ 10.3	影响疲劳强度的主要因素	350
§ 10.4	对称循环下的疲劳强度条件	355
§ 10.5	复杂应力状态下的疲劳破坏准则	357
* § 10.6	平均应力对疲劳强度的影响	360
	习题	363
第十一章(专题一)	切口应力集中与裂纹所致的脆性断裂	366
	断裂	366
§ 11.1	应力集中问题	366
§ 11.2	含裂纹构件的脆断问题	370
§ 11.3	I型裂纹尖端附近的应力场	373
§ 11.4	K断裂准则	378
§ 11.5	K断裂准则的应用	383

§ 11.6 G断裂准则	386
§ 11.7 含裂纹构件的剩余寿命估算	390
习题	395
第十二章(专题二) 材料出现塑性变形后的力学行为	399
§ 12.1 概述	399
§ 12.2 材料的各种理想化弹塑性模型	400
§ 12.3 轴向受力杆件出现塑性变形后的行为	404
§ 12.4 梁的弹塑性弯曲	407
§ 12.5 塑性理论基础	413
习题	421
附录一 某些常用材料的弹性常数	424
附录二 某些常用材料在常温、静荷下的力学性能	425
附录三 型钢表	426
附录四 梁在简单载荷作用下的挠度、转角	446
附录五 交变应力作用下的有效应力集中系数曲线	450
附录六 理论应力集中系数曲线	452
附录七 常用应力强度因子及椭圆积分表	457
参考文献	461
习题答案	462

绪 论

1. 力是人们非常熟悉的物理概念。一般将作用于物体的主动力称为该物体的载荷。任何处于正常工作状态的 结构(或机械设备)都在一定载荷下完成其规定的工作。结构中的构件(或机械中的零件)承受载荷的能力是有限度的。过大的载荷往往使构件出现正常工作所不允许的过大变形,甚至破坏。过大的内压将使压力容器(如化工高压容器)出现渗漏甚至爆炸。过大的载荷将使机车车轴或船舶、航空用螺旋桨轴发生断裂。精密机床主轴的过大变形将使被加工零件达不到要求的尺寸精度与表面光洁度。大型汽轮机轴或电机转子在高速旋转时由于质量分布不均所引起的过大变形将是很危险的,并将产生振动与噪音。工程力学就是研究构件承受载荷的能力的科学。它通过对构件的静力分析,对材料与构件的变形及破坏规律的研究,建立起保证构件安全、正常工作的安全承载条件,包括保证构件不会破坏的强度条件,保证构件在规定载荷下不会产生过大变形的刚度条件,等等。

结构与构件的设计与制造要求符合“既安全又经济”的原则。这在很大程度上体现在一定载荷下对构件的合理形状与尺寸的设计和合理选材。安全承载条件为此提供了重要的依据。

影响构件承载能力的因素是多方面的、复杂的,主要有构件的受力情况、构件的几何形状与尺寸、材料的力学性能,另外还有构件的工作环境(如温度、腐蚀介质等)。因此,了解不同材料在不同受力条件、不同工作环境下的力学性能,研究构件在不同受力情况下从变形至断裂破坏全过程的各种力学响应,包括材料的破坏准则,就成为学习本课程的重要内容。

2. 工程力学的显著特点之一是工程实用性。它对研究对象作出简化与假设;它在推导与运算过程中常常采用合理的近似方法;它要求所得结果具有明确性、工程合理性与实用性(包括便

于应用、有良好的工程精度等)，并接受实验的检验与工程实际的考验。

构件的几何形状是各式各样的，但大部分工程构件可归类于杆件与板壳两类几何模型。杆件(图1a、b)的几何特征是纵向(或称轴向)尺寸比横向(横截面内)尺寸大得多。板、壳(图1c、d)的几何特征则是厚度比其它两个方向的尺寸小很多。

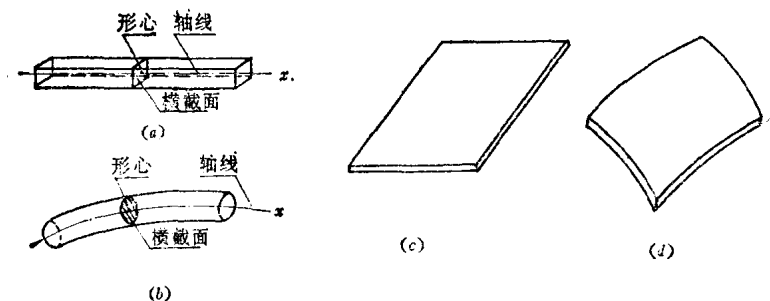


图 1

(a)直杆；(b)曲杆；(c)板；(d)壳

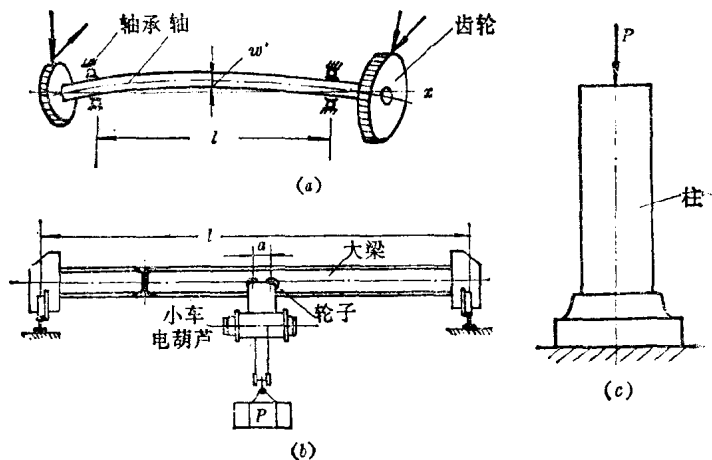


图 2

工程上的轴、梁、柱(图2a、b、c)等一般均可简化为杆件。本课程主要研究杆件。杆件的几何要素是横截面、横截面图形中心(简称形心)及各形心的连线(轴线)。常说的均匀直杆是指由同一材料制成的等截面直杆。

工程力学中关于物体与固体材料的简化(理想化)模型视研究目的的不同而不同,具体阐述将在有关章节展开。载荷的情况将分为静荷与动荷(又分冲击载荷与周期交变载荷)。

第一章 静力分析的基本原理与方法

静力学的研究对象是“刚体”。刚体是物体的一种理想化模型，它在外力作用下不变形。静力学主要研究作用于刚体上的力系的简化与平衡理论，它是学习变形固体力学包括材料力学的基础。对构件进行强度与变形计算的第一步应该完成对构件的受力分析，以确定作用于构件上的全部外力(大小与方向)。本章在给出力、力矩、力偶等基本概念和静力学等效原理的基础上，建立了空间一般力系的简化与平衡理论。本章的重点是平面力系的平衡条件及其在工程上的应用，要求牢固掌握利用平面力系平衡条件对杆件及简单结构进行静力分析的基本方法。

§ 1.1 力、力矩与力偶

在外力作用下，物体的形状与尺寸或多或少要发生变化，物体形状与尺寸的变化称为变形。绝大多数工程构件在外力作用下的变形量比起构件本身的尺寸要小得多。例如在设计传动轴(如图2a所示的齿轮轴)时，就要求在指定载荷下轴的最大垂直位

移 w 为跨度 l 的 $\frac{1}{10000} \sim \frac{5}{10000}$ ；对图2b所示的桥式起重机(天

车)主梁，则要求其最大垂直位移为跨度的 $\frac{1}{1500} \sim \frac{1}{700}$ 。如图

1.1a所示的钢梁，由于受力后发生的变形极小，变形对力的作用方向、作用点等的影响可予略去。如果受力物体的变形量比物体本身的尺寸小很多，以致在分析物体的运动和平衡时可予略去，这样的变形称为小变形。静力学中把物体抽象化为刚体，用这个力学模型来研究小变形物体的受力与平衡问题，抓住了问题的主要方面，以足够的精确度使复杂的问题大为简化。图1.1b所示的弹簧片，受力后B处的水平位移量 u 和垂直位移量 w 与跨度 l 是同一

数量级的，明显改变了力的作用点位置与作用方向。这样的变形属大变形，此时不能不影响静力分析。本课程只研究小变形问题。

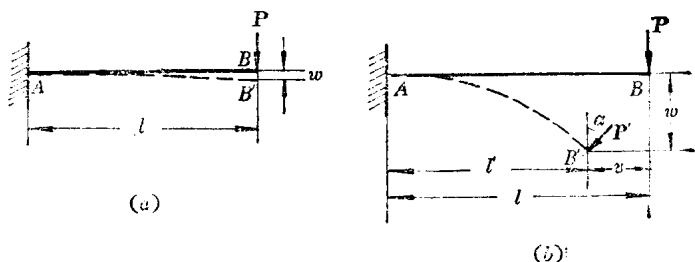


图 1.1

1. 力

力是物体间的相互作用。这种作用可以发生在两个相互接触的物体之间(例如摩擦力、挤压力等)，也可以发生在两个不直接接触而有一定距离的物体之间(例如重力、电磁力等)。物体在力的作用下一般总要产生运动效应和形变效应。运动效应是指物体在力的作用下获得加速度，从而不断改变其位置和速度等运动状态。例如高处的物体在重力作用下获得重力加速度而下落，直至冲击地面。在发生冲击作用的短暂时间内，物体的位置、速度、加速度发生一系列变化。形变效应是指物体在力作用下内部材料各部分之间的相对位置发生改变。

力对物体的作用效应取决于力的大小、方向及作用点三个要素，因此力是一个矢量，通常用图1.2所示的一定比例尺下带箭头的线段来表示。力的常用单位见表1.1

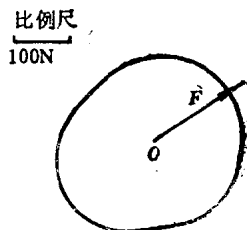


图 1.2

2. 力的作用与反作用

力既然是两个物体间的相互作用，它必然在相互作用的两物

表1.1 工程上力的常用单位

旧 工 程 单 位	法定单位(国际单位)	互 换 关 系
1公斤力(kgf)	1牛顿(N)	$1\text{kgf} = 9.8\text{N}$
1吨力(tf)	1千牛顿(kN)	$1\text{tf} = 9.8\text{kN}$

体间同时出现。如果一方给另一方以作用力，则另一方会相应地给对方以反作用力。牛顿第三定律告诉我们：作用力与反作用力大小相等、方向相反，且沿同一直线分别作用于两个相互作用的物体上。例如重力就是地球对地面上或离地面有一定距离的物体的作用力，按照作用力与反作用力定律，该物体对地球必然也有一个大小相等的反作用力。

3. 力系的等效与平衡

一个物体往往同时受许多力作用。作用于同一物体上的一群力称为力系。如果两个不同力系作用于同一物体所产生的运动效应相同，则此两力系称为等效力系。如果一个力对物体作用的运动效应与一个力系的运动效应相同，则称此力为该力系的合力。一般工程实际问题的受力情况往往比较复杂，但通过一系列力系等效处理，总可以简化为比较简单的力系，有时甚至是一个合力。

按照力系中各力的作用线是否在同一平面内来分，可将力系分为平面力系和空间力系两类。

物体在力系作用下一般要获得加速度，但也可能处于平衡状态。平衡是物体的一种特殊的运动状态，此时物体相对于地面作匀速直线运动或处于静止状态。运动是绝对的，无条件的。平衡则是相对的，有条件的，它要求力系中的诸力彼此之间满足一定的条件，即平衡条件。例如，物体在两个力作用下处于平衡的平衡条件就是我们所知的二力平衡条件：作用于同一平衡物体上的二力必须大小相等，方向相反，并沿同一作用线作用。

4. 力矩

力对物体作用的运动效应除移动之外还有转动。例如扳手、齿轮等都是力的推动下转动起来的。力对物体转动作用的效果可用力对点之矩来度量。

现以扳手为例说明力矩的概念。如图1.3a所示，扳手手柄的A端受扳手平面 $x-y$ 面内的力 F 作用，此力对螺母的运动效应之一

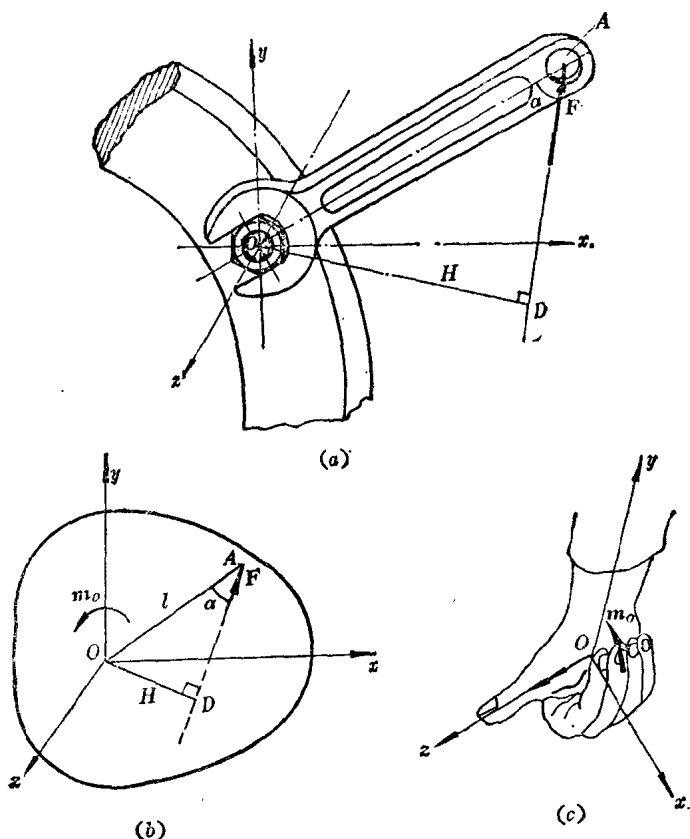


图 1.3