



高等院校应用创新教材

MECHANICS
OF MATERIALS

材料力学

郅禄文 王国安 张 颖 © 主 编



科学出版社

高等院校应用创新教材

材料力学

郅禄文 王国安 张颖 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书根据普通高等学校土木工程专业本科教育培养目标和培养方案编写而成。在编写本书过程中,编者借鉴和吸收了国内外同类教材的优点,结合土木工程专业特点,既注重知识体系的完整性和实用性,又突出工程应用的训练。本书共分9章,主要内容包括绪论、轴向拉伸或压缩、扭转、弯曲内力与弯曲应力、梁的弯曲变形、应力状态与强度理论、组合变形及连接的实用计算、压杆稳定和能量法。

本书可作为普通高等学校土木工程专业及相关专业的教学用书,也可供土建类、水利类、机械类各专业及相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学/鄢禄文, 王国安, 张颖主编. —北京: 科学出版社, 2017
(高等院校应用创新教材)

ISBN 978-7-03-051263-5

I. ①材… II. ①鄢… ②王… ③张… 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 (2017) 第 000024 号

责任编辑: 周艳萍 / 责任校对: 王万红
责任印制: 吕春珉 / 封面设计: 耕者设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 11 月第一次印刷 印张: 19 1/2

字数: 456 000

定价: 58.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈骏杰〉)

销售部电话 010-62136230 编辑部电话 010-62151061

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-64030229; 010-64034315; 13501151303



编 委 会

主 编	郗禄文	王国安	张 颖
副主编	李红梅	刘宝会	马连华
主 审	刚芹果		

前 言

本书是为适应新形势下应用型工科专业“材料力学”课程的教学需要，参照国内各院校相关专业人才培养计划，按照“材料力学”课程教学大纲所规定的基本内容而编写的。

应用工程技术的发展对力学知识的要求越来越高，但当前“材料力学”课程的教学课时数在逐步减少。为适应新形势下应用型人才培养需求，在编写本书时，编者广泛借鉴和吸收了国内外同类教材的优点，在内容上略去繁难复杂的公式推导过程，突出工程中常见结构基本力学原理及其应用的介绍，并列举了杆件基本变形强度、刚度和稳定性计算的工程实例，第9章还介绍了能量法在结构计算和设计中的应用，对问题的分析做了必要的阐述。除第1章外，每章后附有习题，习题答案在书后给出，便于读者自学。

本书由鄧禄文、王国安、张颖担任主编，李红梅、刘宝会、马连华担任副主编，刚芹果担任主审。本书编写分工如下：河北大学鄧禄文编写第1章、第3章和附录，河北大学马连华编写第2章，华北科技学院王国安编写第4章和第5章，河北大学张颖编写第6章和第8章，河北农业大学李红梅编写第7章，河北工业大学刘宝会编写第9章。全书由鄧禄文统稿，河北大学刚芹果对全书内容进行了审阅和补充。在编写本书过程中，编者还参考和借鉴了国内同类教材、专著和相关论文资料，在此向各位作者表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，时间仓促，书中难免存在疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2017年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 材料力学的任务	1
1.2 材料力学的基本假设	2
1.3 材料力学的研究对象	3
1.4 杆件的基本变形	3
1.5 内力和截面法的概念	5
复习和小结	5
思考题	6
第 2 章 轴向拉伸或压缩	7
2.1 轴向拉伸或压缩的概念和实例	7
2.2 轴向拉伸或压缩时横截面上的内力和应力	8
2.2.1 横截面上的内力	8
2.2.2 横截面上的应力	10
2.2.3 圣维南原理	12
2.3 直杆轴向拉伸或压缩时斜截面上的应力	13
2.4 材料在拉伸或压缩时的力学性能	15
2.4.1 材料的拉伸或压缩试验	15
2.4.2 低碳钢在拉伸时的力学性能	16
2.4.3 其他金属材料在拉伸时的力学性能	19
2.4.4 金属材料在压缩时的力学性能	20
2.4.5 非金属材料在压缩时的力学性能	22
2.4.6 塑性材料和脆性材料的主要特点	24
2.5 拉（压）杆件的许用应力和强度条件	24
2.5.1 许用应力	25
2.5.2 强度条件	26
2.6 杆件在轴向拉伸或压缩时的变形	29
2.7 拉（压）杆件的超静定问题	34
2.7.1 超静定问题的提出及其求解方法	34
2.7.2 温度应力	37

2.7.3 装配应力	38
2.8 应力集中	41
2.8.1 应力集中的概念	41
2.8.2 应力集中对构件强度的影响	42
复习和小结	42
思考题	42
习题	43
第3章 扭转	47
3.1 扭转与剪切胡克定律	47
3.1.1 扭转变形	47
3.1.2 薄壁圆筒的扭转	47
3.1.3 剪切胡克定律	48
3.2 扭转圆轴外力偶矩	49
3.2.1 外力偶矩	49
3.2.2 扭矩和扭矩图	49
3.3 扭转圆轴的应力与强度条件	51
3.3.1 横截面上的应力	51
3.3.2 斜截面上的应力	54
3.3.3 强度条件	56
3.4 扭转圆轴的扭转变形与刚度条件	57
3.4.1 扭转变形	57
3.4.2 刚度条件	58
3.5 扭转超静定问题	60
3.6 非圆截面杆扭转	61
复习和小结	63
思考题	64
习题	64
第4章 弯曲内力和弯曲应力	66
4.1 弯曲的实例和平面弯曲梁的概念	66
4.1.1 弯曲的实例	66
4.1.2 平面弯曲梁的概念	66
4.2 梁的内力、剪力和弯矩	67
4.2.1 梁的计算简图	67
4.2.2 静定梁的基本形式	68
4.2.3 剪力和弯矩的概念	69
4.2.4 剪力和弯矩的符号规定	70

4.3 剪力方程和弯矩方程及剪力图和弯矩图	72
4.3.1 剪力方程和弯矩方程	72
4.3.2 剪力图和弯矩图的绘制	72
4.4 弯矩、剪力、分布荷载集度之间的关系	76
4.4.1 弯矩、剪力、分布荷载集度之间的微分关系	76
4.4.2 弯矩、剪力、分布荷载集度之间的积分关系	77
4.5 用微分关系法绘制梁的剪力图和弯矩图	78
4.6 用区段叠加法绘制弯矩图	81
4.6.1 叠加原理	81
4.6.2 区段叠加法	81
4.6.3 用区段叠加法绘制梁的弯矩图	82
4.7 平面曲杆和平面刚架的内力及内力图	86
4.7.1 平面曲杆的内力及内力图	86
4.7.2 平面刚架的内力及内力图	87
4.8 弯曲梁横截面上的正应力	89
4.8.1 纯弯曲梁横截面上的正应力	90
4.8.2 横力弯曲时梁横截面上的正应力	94
4.9 梁横截面上的切应力	96
4.9.1 矩形截面梁横截面上的切应力	97
4.9.2 其他形状截面梁横截面上的弯曲切应力	99
4.10 梁的强度计算	102
4.10.1 梁的危险截面和危险点	102
4.10.2 梁的正应力强度条件和强度计算	102
4.10.3 梁的切应力强度条件和强度计算	103
4.11 提高弯曲强度的措施	105
4.11.1 合理安排梁的支座和荷载	105
4.11.2 采用合理的截面形状	107
4.11.3 采用变截面梁和等强度梁	108
复习和小结	111
思考题	113
习题	113
第5章 梁的弯曲变形	118
5.1 引言	118
5.2 挠度和转角	119
5.3 梁的挠曲线近似微分方程	120
5.4 用积分法计算弯曲变形	121

5.5 用叠加法计算弯曲变形	126
5.6 梁的刚度校核和合理刚度设计	129
5.6.1 梁的刚度校核	129
5.6.2 梁的合理刚度设计	130
5.7 梁的超静定问题	133
复习和小结	136
思考题	137
习题	137
第6章 应力状态与强度理论	139
6.1 应力状态的概念	139
6.2 一点的应力状态分析	140
6.2.1 平面应力状态分析(解析法)	142
6.2.2 平面应力状态分析(图解法)	146
6.3 基本变形杆件的应力状态分析	150
6.4 空间应力状态分析	152
6.5 广义胡克定律	157
6.5.1 各向同性材料的广义胡克定律	157
6.5.2 各向同性材料的体应变	160
6.6 复杂应力状态下的应变能密度	161
6.6.1 应变能密度	161
6.6.2 体积改变能密度和形状改变能密度	161
6.7 强度理论及应用	163
6.7.1 强度理论的基本概念	163
6.7.2 常用强度理论	164
复习和小结	168
思考题	169
习题	170
第7章 组合变形及连接的实用计算	176
7.1 概念	176
7.2 斜弯曲	177
7.3 拉伸(压缩)与弯曲的组合	184
7.3.1 横向力与轴向力共同作用	184
7.3.2 偏心拉伸(压缩)的应力计算	185
7.4 截面核心	188
7.5 扭转与弯曲的组合	192
7.6 连接的实用计算	194

7.6.1 剪切的实用计算	196
7.6.2 挤压的实用计算	196
7.6.3 连接板的强度计算	197
复习和小结	201
思考题	202
习题	203
第8章 压杆稳定	208
8.1 压杆稳定的概念	208
8.2 两端铰支压杆的欧拉公式	210
8.3 欧拉公式应用于其他约束条件的压杆	211
8.4 临界应力与实际压杆的稳定因数	213
8.4.1 临界应力和柔度	213
8.4.2 实际压杆的稳定因数	214
8.5 受压杆件的稳定性计算	216
8.6 提高压杆稳定性的措施	217
复习和小结	219
思考题	219
习题	220
第9章 能量法	224
9.1 引言	224
9.2 应变能	224
9.3 应变能密度	226
9.3.1 拉(压)与剪切状态应变能密度	226
9.3.2 应变能密度的一般表达式	228
9.4 杆件应变能的计算	229
9.4.1 基本变形的应变能	229
9.4.2 同一基本变形中应变能不可叠加	230
9.4.3 组合变形的应变能	230
9.5 受冲击荷载时构件的应力分析及强度设计	234
9.6 互等定理	240
9.7 卡氏第二定理	241
9.7.1 卡氏第二定理的一般表达式	241
9.7.2 利用卡氏第二定理计算结构的位移	242
9.8 虚功原理	245
9.8.1 虚位移、外力虚功与内力虚功	245
9.8.2 变形体虚功原理	246

9.9 单位荷载法计算结构的位移	246
9.9.1 单位荷载法的原理	246
*9.9.2 计算莫尔积分的图乘法	251
*9.10 能量法分析超静定问题	255
9.10.1 超静定问题分析	255
9.10.2 求解超静定问题的力法典型方程	257
复习和小结	260
思考题	264
习题	264
习题答案	271
参考文献	280
附录 1 截面图形的几何性质	281
附录 2 型钢表	290

第1章 绪 论

1.1 材料力学的任务

在土木工程中,各种建筑物在施工期和使用阶段所承受的所有外力统称为荷载(load)。例如,吊车梁的重力、墙体的自重、家具和设备重力、风荷载、雪荷载、地震力和爆炸力等。建筑物中承受荷载并且传递荷载的空间骨架称为结构(structure),组成结构物的单个组成部分称为构件(member)。为了保证整个结构能够满足设计使用要求,必须要求组成结构物的每一个构件在荷载作用下能够正常工作,即必须使构件同时满足强度、刚度和稳定性三方面的要求。

1. 强度要求

在荷载作用下构件抵抗破坏的能力称为强度(strength)。对构件的设计应保证它在规定的荷载作用下能够正常工作而不会发生断裂或过大塑性变形等破坏,即应具有足够的强度。例如,钢筋混凝土梁在荷载作用下不会发生破坏。

2. 刚度要求

在荷载作用下构件抵抗变形的能力称为刚度(stiffness)。在荷载作用下构件所产生的变形应不超过工程上允许的范围,即要具有足够的刚度。例如,吊车梁如果变形过大,将会影响吊车的运行。

3. 稳定性要求

承受荷载作用时,构件在原有状态下应保持稳定的平衡,即要满足稳定性(stability)的要求。例如,工业厂房的钢柱应该始终维持原有的直线平衡状态,保证不被压弯。

材料的强度、刚度和稳定性问题均与所用材料的力学性能有关,这些力学性能均需通过材料试验来测定。对有些靠理论解决不了的问题,需借助试验来解决。因此,试验研究和理论分析是材料力学(mechanics of materials)的重要组成部分。

在设计构件时,不但要满足上述强度、刚度和稳定性的要求,还必须尽可能地合理选用材料和降低材料的消耗量,以节约材料、降低成本和减轻构件自重。显然,构件的设计存在着安全性和经济性方面的矛盾,材料力学的任务就在于,通过对构件设计的基本力学原理的学习,为解决这种矛盾提供理论依据和计算方法,以适当地选择材料以及构件的横截面形状与尺寸,使构件的设计在满足强度、刚度和稳定性要求下,做到既安

全又经济,从而使矛盾得到合理的解决。在不断解决新矛盾的同时,材料力学得到快速发展。

1.2 材料力学的基本假设

构成建筑的构件材料,虽然其物质结构和性质是多样的,但是它们都是固体,而且在荷载作用下都会产生变形——包括物体尺寸和形状的变化。这种材料统称为可变形固体 (deformable solid)。

对可变形固体材料制成的构件进行强度、刚度和稳定性计算时,为了使计算简化,通常根据所研究问题的性质,忽略一些次要因素,依据其主要性质做出一些假设,将它们抽象为某种理想模型,然后进行理论分析。

材料力学中对可变形固体通常做出如下五个假设。

1. 连续性假设

连续性假设 (continuity assumption) 认为物体在其整个体积内毫无空隙地充满了物质,结构是密实的。实际上,可变形固体内都具有不同程度的空隙,并可能存在气孔、杂质等缺陷。但是这些空隙的大小与构件的尺寸相比是极其微小的,故可以忽略不计,从而认为固体是密实的。可变形固体的变形必须满足几何相容条件,即变形后的固体既不引起“空隙”,也不发生“挤入”现象。

2. 均匀性假设

均匀性假设 (homogenization assumption) 认为物体在其整个体积内材料的结构和性质相同,从物体内取出的任何一部分,不论其体积大小如何,力学性质都是完全一致的。事实上,可变形固体基本组成部分(如晶体的晶粒)的性质存在不同程度的差异。但是因为基本组成部分的大小与构件的尺寸相比是非常微小的,并且它们在构件中的排列是不规则的,而物体的力学性质反映的是其中所有基本组成部分的统计平均量,所以可认为物体的理想性质是均匀的。

3. 各向同性假设

各向同性假设 (isotropy assumption) 认为物体在各个方向具有相同的力学性质。实际上,有些材料沿各个方向的力学性质是不同的,另一些材料沿各个方向的力学性质是完全相同的,我们将后一种材料称为各向同性材料。对于工程上常用的晶体结构的金属材料,尽管晶粒在不同方向有不同性质,但从宏观上看,仍可认为晶体结构的材料是各向同性材料。

4. 小变形假设

小变形假设 (small deformation assumption) 认为所研究的构件在承受荷载作用时,其变形量总是远小于其外形尺寸。所以,在研究构件的平衡及内部受力和变形等问题时,一般可按构件的原始尺寸进行计算。

5. 线弹性假设 (linear elasticity assumption)

工程上所用的材料,在荷载作用下均将发生变形。如果在卸载后变形消失,物体恢复原状,则称这种变形为弹性变形 (elastic deformation);但当荷载过大时,则发生的变形只有一部分在卸载后能够消失,另一部分变形将不会消失而残留下来,这种残留下来的变形称为塑性变形 (plastic deformation)。对于每种残留来讲,在一定的受力范围内,其变形完全是弹性的,并且外力与变形之间呈线性关系,因此在材料力学中所研究的大部分问题局限在弹性变形范围内。

综上所述,在材料力学中,通常把实际材料看作均匀、连续、各向同性的可变形固体,且在小变形和弹性变形范围内对其进行研究。

1.3 材料力学的研究对象

建筑构件按其几何形状通常可分为三类,即杆件、板壳和实体。材料力学所研究的主要对象为杆件。杆件是纵向(长度方向)尺寸比横向(垂直于长度方向)尺寸要大数倍的构件。杆件的几何要素为横截面和轴线。横截面为垂直于长度方向的平截面,横截面形心的连线为轴线,横截面和轴线是相互垂直的。横截面沿轴线变化的杆件称为变截面杆,轴线为直线的杆件称为直杆,轴线为曲线的杆件称为曲杆,如图 1-1 所示。梁、柱和传动轴等都可抽象为直杆。

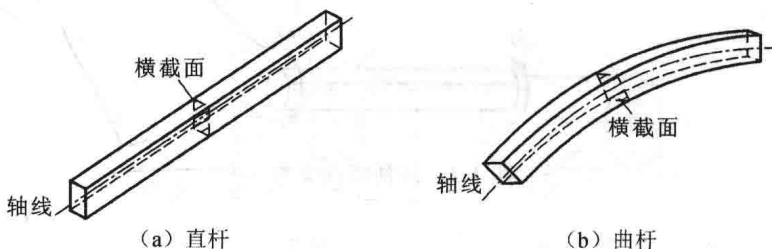


图 1-1 直杆和曲杆

材料力学主要研究等截面直杆。在工程实际中,等截面直杆的分析计算原理一般也可近似地用于曲率较小的曲杆与横截面无显著变化的变截面杆。

1.4 杆件的基本变形

在多种多样的外力作用下,杆件的变形也是多样的。其基本变形有轴向拉伸或压缩、剪切、扭转和弯曲四种形式,杆件的其他复杂变形都可看成以上四种基本变形的组合。

1. 轴向拉伸或压缩

在一对作用线与杆轴线重合的等值反向外力作用下,直杆发生长度改变的变形,这

种变形形式称为轴向拉伸或压缩 (axial tension or compression), 如图 1-2 所示。例如, 在荷载作用下, 简单桁架中的杆件就只发生轴向拉伸或压缩。

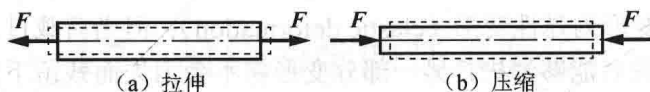


图 1-2 杆件轴向拉伸或压缩变形

2. 剪切

在一对相距很近的等值、反向的横向外力作用下, 杆件横截面沿外力作用方向发生相对错动变形, 这种变形形式称为剪切 (shearing), 如图 1-3 所示。

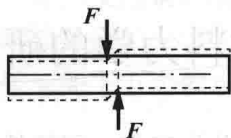


图 1-3 杆件剪切变形

3. 扭转

在一对转向相反、作用面垂直于直杆轴线的外力偶 (M_e) 作用下, 直杆的相邻横截面将绕轴线发生相对转动, 杆件表面纵向线变成螺旋线, 而轴线仍维持直线, 这种变形形式称为扭转 (torsion), 如图 1-4 所示。机械中传动轴的主要变形就包括扭转。

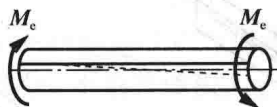


图 1-4 杆件扭转变形

4. 弯曲

在一对作用在杆件纵向平面内的等值反向力偶作用下, 杆件将在纵向平面内发生弯曲变形, 变形后的杆轴线将弯成曲线, 这种变形形式称为纯弯曲 (bending), 如图 1-5 所示。梁在横向力作用下的变形就是纯弯曲和剪力的组合, 通常称为横力弯曲。

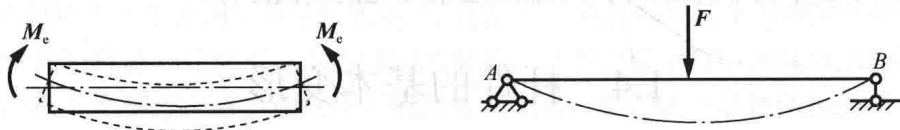


图 1-5 杆件弯曲变形

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, 只发生一种基本变形形式的杆件较为少见。若以某一种基本变形形式为主, 其他变形形式属于次要变形的, 则可按该基本变形形式计算; 若几种变形形式都是非次要变形的, 则属

于组合变形问题。

1.5 内力和截面法的概念

1. 内力

杆件内部各质点间存在相互作用力,当杆件受到外力作用而变形时,杆件内部各质点间的相互作用力将发生变化。这种由外力作用而引起的质点间相互作用力的改变量,即为材料力学所研究的杆件内力。由于假设杆件是均匀、连续的可变形固体,因此杆件内部相邻部分之间相互作用的内力实际上是一个连续分布的内力系,该力系的合成结果(力或力偶)简称为内力。

2. 截面法

由于内力是杆件内相邻部分之间的相互作用力,为了显示内力,可应用截面法,其一般步骤如下:

- 1) 假想在需求内力的截面处把杆件截为两部分,取其中任一部分为隔离体。
- 2) 分析隔离体的受力情况,找出作用在隔离体上的外力和截面处的内力。
- 3) 应用平衡条件求出截面未知内力 X 。

假设一截面将杆件截开,使内力显现出来,应用静力平衡方程求解内力,这就是截面法的基本思想,如图 1-6 所示。

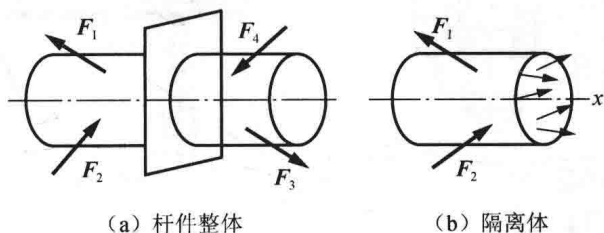


图 1-6 截面法

复习和小结

材料力学的任务在于使构件的设计在满足强度、刚度和稳定性的要求下,合理地选择材料及构件的横截面形状和尺寸,使之既安全又经济。本章介绍了材料力学的五个基本假设和主要研究对象,给出了杆件的四种基本变形形式:轴向拉伸或压缩、剪切、扭转和弯曲,介绍了杆件横截面内力和截面法的基本概念。

思考题

1. 材料力学的任务是什么？
2. 材料力学的基本假设是什么？
3. 材料力学的主要研究对象是什么？
4. 杆件的基本变形有哪些？
5. 截面法的基本步骤是什么？