



普通高等教育力学“十二五”规划教材

材料力学

CAILIAO LIXUE

主编 王钦亭

 郑州大学出版社



普通高等教育力学“十二五”规划教材

材 料 力 学

CAILIAO LIXUE

主编 王钦亭

郑州大学出版社

郑 州

图书在版编目(CIP)数据

材料力学/王钦亭主编. —郑州:郑州大学出版社,
2015.9

ISBN 978-7-5645-1458-7

I. ①材… II. ①王… 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 (2013) 第 111290 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:张功员

全国新华书店经销

河南龙华印务有限公司印制

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:18.75

字数:432 千字

版次:2015 年 9 月第 1 版

邮政编码:450052

发行部电话:0371-66966070

印次:2015 年 9 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-5645-1458-7

定价:35.00 元

本书如有印装质量问题,由本社负责调换

本书作者

Authors

主	编	王钦亭		
副	主	编	廖明成	蔺海晓 陈亚娟
编	委	王钦亭	廖明成	蔺海晓
		陈亚娟	丁亚红	常旭

前言

Preface

材料力学是许多工科类专业的一门技术基础课。本教材主要内容有杆类构件在各种基本变形时的内力分析、应力分析及强度条件、变形分析及刚度条件、超静定问题的解法、应力状态、强度理论、组合变形、压杆稳定、交变应力与疲劳破坏等。

本教材根据教育部高等学校力学教学指导委员会力学基础课程教学指导分委员会、理工科非力学专业力学基础课程教学基本要求,结合编者多年的教学体会编写。教材按照其内容的内在联系及其特点,将全部内容划分为杆件的基本变形和杆件的组合变形两个单元,每个单元既相对独立又互有联系。在杆件的基本变形部分,相对于传统的教材有较大的变动,采用了按内力分析、应力分析与强度计算、变形分析与刚度计算、超静定问题的求解为主线的编排方式,便于学生掌握统一的研究方法、对比公式的相似性,同时也便于总结规律,提高教学效率。

本教材加入了编者多年来的教学体会,例如内力的快速计算方法、节点位移的解析计算方法,并且加入部分电算程序。在本教材的编写过程中,编者力求做到概念准确、论述清楚,便于理解。并在此基础上,例题选择尽量结合工程实际,以帮助读者理解概念,掌握理论,提高分析问题和解决问题的能力。本教材各章还配有思考题、习题及其答案,可帮助读者对内容的理解。

参加本书编写的人员有河南理工大学王钦亭(绪论、第1章、第8章、第10章)、廖明成(第6章、第7章)、蔺海晓(第4章、第5章、第9章)、陈亚娟(第2章、第3章、附录)。全书由丁亚红、常旭修改与统稿。

本教材在编写时参考了大量的优秀教材,在此表示衷心的感谢。

本教材是河南省教研教改项目(2012SJGLX117)和国家自然科学基金项目(51108161)的成果之一,得到了两个项目的共同资助。

由于编者水平所限,书中难免存在不当之处,敬请读者批评指正。

编者

2013年2月

目录

CONTENTS

▷▷▶ 1

绪论	1
0.1 工程中的力学问题	1
0.2 材料力学的主要任务	2
0.3 杆类构件的基本变形形式与组合变形形式	2
0.4 变形固体的基本假设	4

第一单元 杆件的基本变形

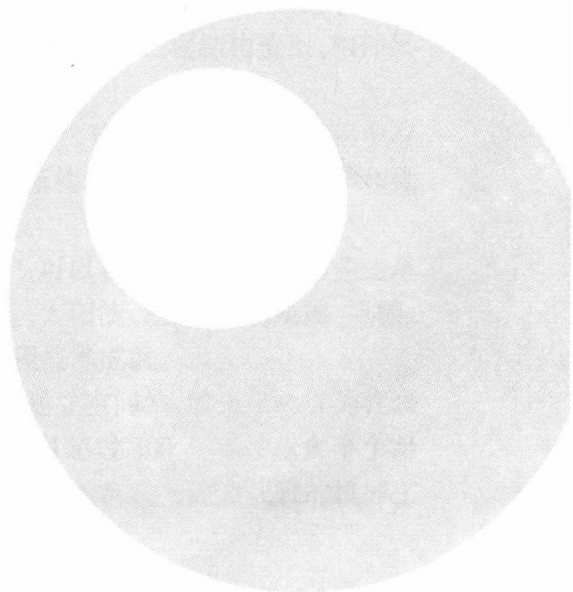
第1章 杆类构件的内力分析	9
1.1 内力的概念·截面法	9
1.2 轴向拉伸与压缩时杆件的内力与内力图	12
1.3 受扭杆件的内力与内力图	15
1.4 受弯杆件的内力与内力图	18
第2章 杆类构件的应力分析与强度计算	34
2.1 应力的概念	34
2.2 轴向拉伸与压缩时杆件的应力·强度条件	35
2.3 材料的力学性能	40
2.4 应力集中的概念	46
2.5 圆轴扭转应力·强度条件	47
2.6 截面的几何性质	53
2.7 梁的弯曲应力·强度条件	58
2.8 提高构件强度的措施	70
第3章 连接件的实用计算	84
3.1 连接件的概念	84
3.2 剪切的实用计算	85
3.3 挤压的实用计算	86
第4章 杆类构件的变形	92
4.1 变形与应变的概念	92
4.2 轴向拉伸与压缩时杆件的变形	93
4.3 圆轴扭转时的变形·刚度条件	98

4.4	梁的变形·刚度条件	101
4.5	提高构件刚度的措施	117
第5章	简单的静不定问题	130
5.1	静不定问题的概念及其求解方法	130
5.2	拉压静不定问题	131
5.3	扭转静不定问题	137
5.4	弯曲静不定问题	138

第二单元 杆件的组合变形

第6章	复杂应力状态分析·强度理论	157
6.1	应力状态的概念	157
6.2	平面应力状态分析	158
6.3	三向应力状态简介	164
6.4	复杂应力状态下的应力应变关系	166
6.5	强度理论	169
第7章	组合变形	182
7.1	组合变形的概念与实例	182
7.2	双向弯曲	183
7.3	拉伸(压缩)与弯曲的组合变形	186
7.4	弯曲与扭转的组合变形	191
第8章	压杆稳定	202
8.1	压杆的稳定性概念	202
8.2	细长压杆的临界压力	204
8.3	中、小柔度杆的临界应力·经验公式	208
8.4	压杆的稳定计算	213
8.5	提高压杆稳定性的措施	217
第9章	交变应力与疲劳破坏	224
9.1	交变应力与疲劳破坏的概念	224
9.2	交变应力的循环特征	225

9.3 材料的疲劳极限	227
9.4 构件的疲劳极限	228
9.5 对称循环应力下构件的疲劳强度计算	232
9.6 提高构件疲劳强度的措施	234
*第10章 能量法简介	237
10.1 能量法概述	237
10.2 杆件的应变能计算	237
10.3 卡氏第二定理	242
10.4 用能量法解静不定问题	248
10.5 冲击问题简介	252
附录 型钢表	263
习题参考答案	280
参考文献	288



绪论

0.1 工程中的力学问题

力学既是基础学科,又是技术学科。力学与数学、物理、天文、地学和生物学一起,并列为七大基础学科。作为基础学科,它所阐述的规律带有普遍的性质。作为技术学科,力学与土木、水利、机械、船舶、航空、能源、生物工程等学科,有着紧密的联系。

力学是一门历史悠久的学科。力学从一开始就与工程紧密相连。

在古代,人们用劳动中所积累的经验开始创造了斜面、杠杆、滑轮等简单的工具或机械,应用于农田灌溉、建筑、运输等方面,从而逐渐积累了一些初步的力学知识。那时的力学虽然没有形成完善的理论体系,但是已经显示出力学在工程中的重要作用,一些成果已经与现代力学理论的计算结果非常接近,例如,隋代工匠李春于 581 ~ 618 年主持建造的赵州桥是世界上第一座最大的石拱桥,桥的设计完全符合力学原理,其压力线完全通过拱轴,充分利用了石材抗压强度高的特性,虽经多次地震,但至今仍保持完好。宋代的《营造法式》已指出矩形截面木梁的高宽比应为 1.5,而现代力学理论的计算结果是 1.414。

到牛顿时代,力学形成了一门科学,其理论体系逐渐发展、完善。随着生产的发展,力学与工程的关系日趋紧密。在许多工程领域,如果没有力学理论的支撑,许多工程技术是无法实现的。

在建筑结构方面,现代工程结构向大跨度、高耸、大型、轻型、多功能方向发展,它需要满足抗震、抗风、抗冲击、美观等多方面的需求。因此,现代工程结构单凭经验是无法适应设计要求的,必须依靠现代的力学理论和计算方法,对工程结构造型、构件尺寸、形状、材料等做出优化。

在交通运输方面,大跨度桥梁、大型隧道、地铁的设计、建造等这些大型工程中存在一系列流体力学、固体力学及流固耦合的问题,需要新构思和新途径,提出科学和优化的设计和制作方案。

在能源工程方面,煤炭的采掘、巷道的开挖及支护,可以在大风浪下安全作业的单台价值超过 10 亿美元的海上采油平台,可控热核反应、太阳能、地热、生物质能、风能、潮汐能等,都是在力学理论的指导或支持下取得的工程技术成就。

大型水利设施如三峡大坝的设计建造,人类登月、建立空间站、航天飞机等为代表的航天技术,以速度超过 5 倍声速的军用飞机、起飞质量超过 300 t、尺寸达大半个足球场的民航机为代表的航空技术,以单机功率达百万千瓦的汽轮机组为代表的机械工



业,以排水量达 $5 \times 10^5 \text{ t}$ 的超大型运输船和航速可达 30 多节、深潜达几百米的潜艇为代表的船舶工业,甚至如两弹引爆的核心技术,都涉及大量的力学理论。

此外,某些大型设备或工程,如大直径运输管道、长大深埋隧道、露天边坡、大运河、大堤坝、大飞机场、大海港以及海洋工程、高速公路和铁路等,这些重大工程的灾害、健康监测、安全评定、灾变防治理论和技术,都需要力学理论作指导。

0.2 材料力学的主要任务

0.2.1 构件的承载能力

工程中各种结构和机械都是由若干构件所组成的。为了保证工程构件在外力作用下安全可靠地工作,应满足以下三方面的要求。

(1)强度要求 强度是构件在外力作用下抵抗破坏的能力。强度要求是指按照设计要求,构件在外力作用下不发生断裂或不出现不允许的塑性变形。例如,提升重物的钢丝绳不允许被拉断,压力容器不允许发生爆炸等。

(2)刚度要求 刚度是构件在外力作用下抵抗变形的能力。刚度要求是指构件的弹性变形不超出工程许可的范围。例如,机床主轴工作时,如果弹性变形超过允许范围,将影响加工精度,同时也会加大齿轮的磨损和噪声。

(3)稳定性要求 稳定性是构件保持原有平衡形式不变的能力。稳定性要求是指构件在外力作用下应具有保持原来平衡形式不变的能力。例如,内燃机中的挺杆比较细长,在工作时必须保持直线状态,不能发生弯曲。

强度、刚度和稳定性统称为构件的承载能力。

0.2.2 材料力学的任务

工程构件能否安全可靠地工作,与构件的受力及构件本身的承载能力有关,而构件的承载能力与构件的材料、截面形状和尺寸有关。因此,材料力学的任务是分析、确定构件的受力情况,在保证安全、适用和经济的前提下,为构件选择适当的材料、合适的截面形状和尺寸,提供必要的理论基础和计算方法。

0.3 杆类构件的基本变形形式与组合变形形式

在工程中,实际构件有各种不同的形状。材料力学主要研究长度远大于横截面尺寸的一类构件,称为杆件。实际杆类构件受力与变形有各种形式,但都可归纳为轴向拉伸(或压缩)、剪切、扭转和弯曲这四种基本变形形式,以及由两种或两种以上基本变形形式共同形成的组合变形形式。



0.3.1 拉伸或压缩

当杆件两端承受沿轴线方向的拉力或压力时,杆件将产生轴向伸长或压缩变形。这种受力与变形形式称为轴向拉伸或压缩,简称拉伸或压缩。其变形分别如图 0.1(a)和图 0.1(b)所示。

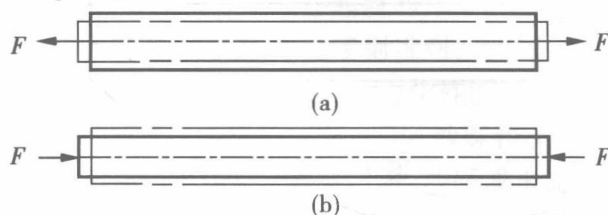


图 0.1 轴向拉压变形

0.3.2 剪切

作用线垂直于杆件轴线的力称为横向力。当两个大小相等、方向相反、作用线互相平行、相距很近的横向力同时作用在杆件上时,杆件的两个相邻截面将产生相互错动,这种变形称为剪切变形,对应的受力与变形形式称为剪切。其变形如图 0.2 所示。

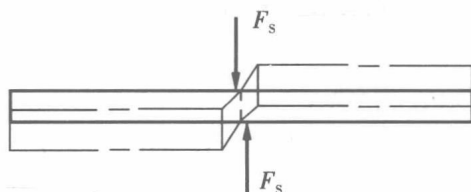


图 0.2 剪切变形

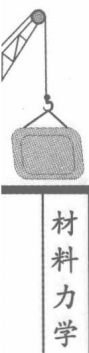
0.3.3 扭转

当作用面互相平行的两个力偶作用在杆件的两个横截面内时,杆件的任意横截面将产生绕杆件轴线的相对转动,这种变形称为扭转变形,对应的受力与变形形式称为扭转。其变形如图 0.3 所示。



图 0.3 扭转变形

当外加力偶或横向力作用于杆件纵向的某一平面内时,杆件将发生弯曲变形,其



轴线将弯曲成曲线,其变形如图 0.4(a) 所示。

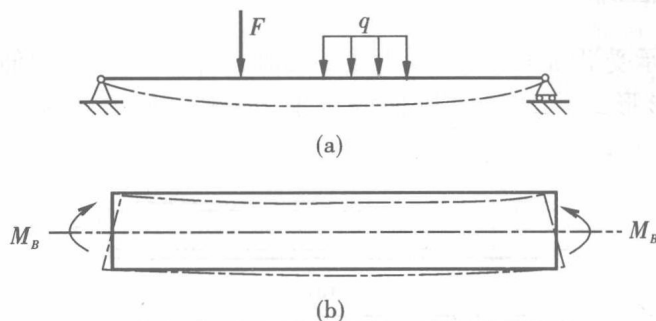


图 0.4 弯曲变形

0.3.4 组合变形

如果在外力作用下,杆件同时发生两种或两种以上基本变形,则称为组合变形。实际杆件的受力无论多么复杂,在一定条件下均可简化为基本受力形式的组合。

值得注意的是,杆件的基本变形形式有以上四种,每种变形形式的受力与变形各不相同,在工程上为了对其加以区分,通常将只承受拉伸的杆件称为杆,只承受压缩的杆件称为压杆或柱,主要承受扭转的杆件称为轴,而把主要承受弯曲的杆件称为梁,在以后的讨论我们将不加声明地采用这种称呼。

0.4 变形固体的基本假设

今天的物质观,使人们能够用分子、原子、质子、中子、各种光子以及更小的粒子等来描述各种物质的组成成份。随着物理学的发展及实验手段的提高,更小的粒子还在不断地被科学家们在实验中发现。然而,从这些细节出发来研究宏观构件的性质,这在目前来说一方面太过于复杂,另一方面如此巨大的计算量在计算上仍不可行。对变形固体而言,通常我们在研究其强度、刚度和稳定性时,总是采取忽略一些微观结构上的细节,抓住与问题有关的主要因素的方法,来对变形固体做出合理的假设,从而抽象出合理的可计算的理想模型。

0.4.1 连续性假设

连续性假设是指假设组成固体的物质不留空隙地充满了固体的体积。

从微观结构上看,实际的变形固体,就其物质结构来说,都具有不同程度的空隙,但是这些空隙与构件的尺寸相比非常微小,可以忽略不计。于是,固体物质在其整个体积内是连续的。进而,物体的一些物理量就成为了连续的变量,可以表示为坐标的连续函数,同时可以对这些量进行坐标增量为无限小的极限分析。

当然,对于明显的非连续体(例如,出现了裂隙的构件),则在分析研究与计算中



必须设法反映出物体所有的非连续性。

0.4.2 均匀性假设

均匀性假设是指假设固体内各处都有相同的力学性能,即同一物体中各部分材料的力学性质不随坐标位置而改变。

就使用最多的金属来说,组成金属的各晶粒的力学性能并不完全相同,但构件或构件任一部分都包含为数极多的晶粒,且无规则排列,而固体的力学性能是各晶粒的力学性能的统计平均,因此,可以认为各部分的力学性能是均匀的。对于混凝土一类的多组分材料也有类似的情况。在混凝土中,石块、沙砾和水泥混杂地固结在一起,但一般的混凝土结构的体积都远比其组分材料石块、沙砾或水泥块要大得多,从混凝土结构中取出的一个混凝土试块,其中也包含大量的石块、沙砾和水泥,因此从统计平均的观点来看,这种多组分材料仍然可以假设为各部分性质均匀的材料。

根据这一假定,我们可以从物体中的任何位置取出一小部分来研究材料的力学性能,然后把所得的结果应用于整个物体,也可以把由大尺寸试件在试验中所获得的材料的力学性能应用于物体任何微小部分上去。当然,对于发生于晶粒那样大小的范围内的情况或明显的非均匀体(例如,钢筋混凝土结构、具有松软夹层的岩石等)就不宜再用均匀性假设。

0.4.3 各向同性假设

各向同性假设是指假设物体在任何一个方向受力所表现出的力学性质是完全相同的。

大多数工程材料虽然微观上不是各向同性的,例如金属材料,其单个晶粒呈结晶各向异性,但当它们形成多晶聚集体的金属时,由于取向随机,因而在宏观上还是表现为各向同性。

根据这一假定,我们可以用一个与材料有关的参数来描述一点在各个方向上的某种力学性能。对于具有明显各向异性性质的材料,例如木材、竹材和经过冷拉的钢丝等,这一假定是不成立的。可以想象的是,要描述各向异性材料一点处各个方向上的性能,仅用一个材料参数是不够的,须用多个,这方面的问题请读者自行参阅相关书籍。

0.4.4 小变形假设

小变形假设是指假设物体在外力作用下所产生的变形与物体本身的几何尺寸相比是很小的。

实际上,在工程静力学中已经采用了上述关于小变形的假定,因为实际物体都是可变形物体,所谓刚体便是实际物体在变形很小时的理想化。因而当我们考虑构件的平衡和运动规律时,仍可沿用刚体的有关概念、方法和结论,而在除此之外的其他场合,必须使用变形体的概念。读者在以后的分析中将会发现,小变形假设在分析变形几何关系等问题时将使问题大为简化。

第一单元 杆件的基本变形

第 1 章 杆类构件的内力分析

1.1 内力的概念·截面法

物体在未受外力作用时,其内部相邻各物质点之间存在着相互作用的作用力,使物体保持一定的形状和尺寸。物体在外力作用下,其内部各物质点之间因为相对位置发生改变而引起原有相互作用力的改变,这种内部作用力的改变量称为“附加内力”。材料力学中研究的正是这种附加内力,并简称为内力。

内力计算是杆件强度、刚度和稳定性计算的基础。本章讨论各种基本变形情况下的内力计算。

1.1.1 截面法

如图 1.1(a)所示的物体受多个外力作用,处于平衡状态。在外力作用下,物体内部各物质点之间因为相对位置发生改变而引起内力,若要获得任一截面 $m-m$ 上的内力,可以假想地用 $m-m$ 平面将物体切为两部分,弃掉一部分,保留一部分,例如保留左半部分 A ,如图 1.1(b)所示。此时 A 部分 $m-m$ 截面上将受 B 部分对它的作用力。根据作用力与反作用力定律, B 部分 $m-m$ 截面也必然受到 A 部分大小相等、方向相反的反作用力作用。

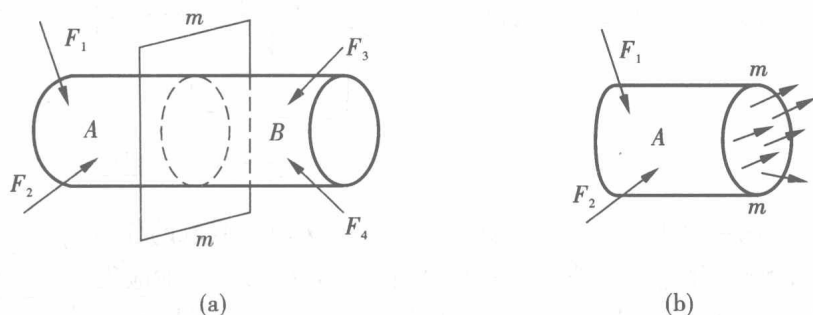


图 1.1 截面法示意图

根据连续性假定,上述 $m-m$ 截面上的内力是分布于截面上的分布力系。在材料力学中,通常我们将该分布力系向截面某一点进行简化以计算其主矢和主矩,并称该主矢和主矩为截面上的内力。

由于整体平衡的要求,所截开的每一部分也必须是平衡的。即作用在所截开截面