



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
首批国家材料力学精品课程主讲教材
国家精品资源共享课程材料力学主体教材

新编材料力学



张少实 王春香 主编

 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS





张少实 1943年12月生于黑龙江省肇源县，哈尔滨工业大学教授。首届国家教学名师奖获得者；首批国家精品课程和国家精品资源共享课程——哈工大材料力学课程负责人；国家教学团队——哈工大力学课程教学团队带头人；宝钢教育基金优秀教师特等奖获得者；享受国务院颁发的政府特殊津贴。曾任校资深专家咨询委员会委员；校教学督导组副组长；校教学带头人；航天学院责任教授。主持并完成国家、省部级教学改革项目25项，出版文字教材6部：其中国家“十一五”规划教材3部；出版多媒体电子教程与课件2部；获各类教学奖国家与省部级12项，校级10项。曾主持或参加属于“国家自然科学基金”、“863”、“航天预研”等科研课题22项；获原航天部科技进步二等奖1项，中国华电集团公司科技进步二等奖1项，黑龙江省节能降耗技术创新成果奖1项。



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
首批国家材料力学精品课程主讲教材
国家精品资源共享课程材料力学主体教材

新编材料力学

第 3 版

哈尔滨工业大学国家工科力学基础课程教学基地 组编

主编	张少实	王春香
参编	张桂莲	胡恒山
主审	盖秉政	高宗俊



机械工业出版社

本书是“国家工科力学基础课程教学基地”建设项目的研究成果之一，是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是“哈尔滨工业大学‘十一五’教材规划”中的重点教材。本书也是首批“国家精品课程”和“国家精品资源共享课程”主讲教材，同时是“哈工大国家力学课程教学团队”建设项目的标志性成果之一。本书编写的总体目标是，充分注意到后续课程以及当代工程设计思想、理念与方法的深刻变革，刻意追求加强与适当拓宽基础，强化应力与应变分析主线，突出力学、几何、物理三大方程，向当代前沿开设窗口与接口等。本书在内容、体系、结构与问题表述上均有较大的创新。

全书包括绪论、应力状态分析、应变状态分析、材料的力学性能与应力应变关系、轴向拉压、扭转、弯曲、组合内力时杆件应力计算、能量原理、超静定结构、材料失效及强度理论、杆件的强度与刚度计算、联接、弹塑性变形与极限载荷分析、疲劳与断裂、压杆稳定等共 16 章。

本书可作为高等工科院校本科各专业教材，亦可作为有关工程技术人员参考书。

为便于教师讲授本书，配套编制了电子教案，教师可通过 <http://www.cmpedu.com> 注册后免费下载使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

新编材料力学/张少实, 王春香主编. —3 版. —北京: 机械工业出版社, 2017. 12

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-58650-0

I. ①新… II. ①张… ②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 (2017) 第 298939 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 姜 凤 责任编辑: 姜 凤 汤 嘉 责任校对: 郑 婕

封面设计: 马精明 责任印制: 孙 炜

保定市申画美凯印刷有限公司印刷

2018 年 5 月第 3 版第 1 次印刷

184mm×260mm·21.5 印张·521 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-58650-0

定价: 49.80 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88379833

读者购书热线: 010-88379649

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

教育服务网: www.cmpedu.com

金书网: www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

第3版前言

自2009年3月对本书第一次修订起,已过去九年时间。这期间经历了哈尔滨工业大学材料力学课程建设从“国家精品课程”向“国家精品资源共享课程”的飞跃。同时,还恰逢哈尔滨工业大学力学课程教学团队建设成为国家级教学团队的有利契机。无疑,本教材在这一飞跃和契机中,得到了进一步的审视和锤炼。不仅如此,这期间移动互联网和移动通信技术获得了飞速发展,手机已经成为全民的便捷通信工具。所有这些,都为本次修订工作提供了有利条件。

本次修订,在教材内容选取、体系结构设计以及杆件应力与变形分析方法叙述等方面,仍沿用了第2版的做法。进一步传承适当拓宽和深化基础知识,突出应力与应变分析主线,凸显平衡、几何、物理三方面条件在分析、求解杆件应力和变形时的核心作用这一编写理念。

由于本版采用双色印刷,故重新绘制了全书的绝大部分插图。新插图以蓝色与亮蓝色为主色调,约定:研究对象、未知的和需要求解的力学量(约束力、内力、应力、位移、变形等)、要引起读者特别关注的线、面和体,教材中的难点与重点等,一般用亮蓝色和蓝色绘制或标注。用透明色,描述出被遮挡的或形体内部的线和面的变形情况(如弯曲等),以助于读者的形象思维和对知识的理解。不同的面(如单元体等)采用不同颜色或亮度,用渐变色模拟光照等,用以增强插图的立体感。

本次修订,设置了二维码,一些没有写入和无法写入本书中的相关教学内容和信息以及辅助教学等,被编撰并链接相应的二维码。概括起来,这些内容和信息包括:多媒体课件,动画,知识点的外延和深化,引申问题,解题思路,力学史话,前沿问题,等等。

对于上一版中个别不严谨的叙述和错误之处,作了修正。

综上所述,第3版《新编材料力学》具有如下特色:

1. 基础知识适当拓宽和深化。材料力学的基本概念(如强度、刚度、稳定性、应力、应变、应变能,等等),基本原理和理论(如切应力互等、平衡、应变连续和变形协调、应力应变关系、能量原理、互等定理、强度理论,叠加原理等等)以及基本方法(综合平衡、几何、物理三个方面条件分析和求解力学问题,能量法,叠加法等),是变形体力学最基础、最普遍的知识,它们和研究对象的形体是否为杆件没有任何必然性。因此,加强和深化这部分内容,能够从一般性或普遍性条件或问题中引出的,就不必拘泥于杆件,从而更能引导学生体悟到这些知识所具有的普遍性和基础性,而不至于使其误读为只有杆件才适用。



2. 所有插图用双色和不同亮度色调绘制, 新颖、亮丽, 形象、逼真, 透明感与立体感强。这样, 使得那些无法看到的(如构件内部点、线、面的位移和变形规律)和抽象的, 以及课程重点和难点内容(如平面假设、截面上应力分布规律等)变得可见、直观, 形象、清晰和易于理解; 使得重要和须特别关注的地方更加醒目、凸显。

3. 二维码助教, 使得本书有了支持移动网络和移动通信的功能。从而, 极大地丰富了辅助教学信息, 使本书真正成为一本能满足学生个性化学习的“立体教材”。用移动通信工具扫描相应页码的二维码, 可以获得诸如答疑、解惑、深化、外延、前沿、动态插图等更加丰富的辅助教学信息, 同时, 这些辅助教学内容容易修改和与时俱进。

参加本版修订工作的有张少实、王春香、张桂莲、胡恒山四位教授, 主编由张少实、王春香担任。张少实负责全部书稿和二维码部分的统稿以及第1、9、10、11章的修订与所辖二维码内容的编撰工作; 王春香负责部分书稿统稿以及第4、7、8、16章的修订与所辖二维码内容的编撰工作; 张桂莲负责第5、6、12、13章、附录A的修订与所辖二维码内容的编撰工作; 胡恒山负责第2、3、14、15章的修订与所辖二维码内容的编撰工作。全书所有插图和二维码所辖的59幅动画, 均由张少实绘制完成。

本书修订期间, 哈尔滨工业大学国家力学课程教学团队, 航天科学与力学系、航天学院、校本科学院和校教务处的各级领导给予了极大的关心和支持。材料力学课程组的老师, 特别是青年老师, 提出了宝贵意见, 并给予许多帮助, 特此一并感谢!

特别要提及的是, 哈尔滨工业大学固体力学学科带头人盖秉政教授和航天学院高宗俊教授, 他们不顾年事已高, 认真地审阅了全书, 并提出了宝贵意见与建议。在此, 致以崇高敬意和衷心感谢。

囿于水平, 难免错误和疏漏, 敬请老师和读者批评、斧正。

编者
2018年2月



第2版前言

本书自 2002 年第 1 版出版以来，已使用了七年。本次修订正值哈尔滨工业大学材料力学国家精品课程、力学课程国家教学团队建设工作努力展开并取得一定成效的时期；也正值普通高等教育“十一五”国家级规划教材方案实施和积极向前推进的时期。修订工作被纳入这一规划和建设工作当中，受到了学校和团队的热切关注和极大支持。团队和精品课程建设对本书修订小组提出了高标准要求，并为本书修订工作进一步指明了努力方向。

强化基础知识，深化应力与应变分析思想，突显平衡、几何、物理三方面条件在分析、求解力学问题中的核心作用，增强对理论知识的直观表述是本书的特色，也是本次修订工作所遵循的指导思想。七年来，随着教育部“教学质量工程”建设的进一步开展，随着我国教育、教学改革热潮的蓬勃兴起，随着使用本书的教师投身教学实践的继续深入，证明当前在我国材料力学教材这个生机勃勃的百花园中，具有这一特色的材料力学是有其生命力的，并已得到广大教师、学生和读者的认可。

遵循上述思想，修订后的《新编材料力学》，沿用了原来的内容、体系架构；将圆轴扭转，梁弯曲变形时应力、变形分析和求解的叙述部分内容做了改写；增加了提高构件疲劳强度措施等联系工程实际的知识；新增了少量例题；重新绘制了插图，使得全书插图风格趋于统一。

参加第 2 版修订工作的有张少实教授、王春香教授和张桂莲副教授。张少实教授担任主编，并绘制了书中的全部插图。在修订期间，哈尔滨工业大学教务处、航天学院、航天科学与力学系的领导给予了莫大的关怀和支持。团队和课程组同仁提出了中肯的意见，并给予有益的指导。特别是哈尔滨工业大学固体力学学科带头人盖秉政教授、航天学院高宗俊教授审阅了全部书稿，提出了许多宝贵意见。在此，谨致以崇高的敬意和衷心的感谢。

因为水平有限，修订后的教材难免有疏漏和欠妥之处，敬望广大教师和读者批评与给予指导。

编 者
2009 年 3 月



第1版前言

本书是“国家工科力学教学基地”建设项目的研究成果之一，是“哈尔滨工业大学‘十五’教材规划”中的重点教材。

由于计算机技术的广泛应用，AutoCAD、大型结构有限元分析软件等已成为工程师手中的得力工具。高速快捷的计算机设计与精细周密的有限元分析，再加之新型材料与先进工艺的不断涌现，使得工程设计思想、理念与方法发生了深刻变革。本书编写过程中，充分注意到工程设计的这一变革以及后续课程的改革，刻意追求如下总体目标：

加强与适当拓宽基础；强化应力与应变分析观点并以此为全书主线；突出力学、几何、物理三大方程；统一坐标系统；加强对理论知识的形象直观表述与联系工程实际；向当代前沿适当开设窗口与接口等。

由此，本书在内容、体系、结构与知识表述上均做了较大幅度的更新。特别是书中的插图，由于得益于计算机强大的绘图功能，它们改变了传统的线框图形的面貌，取而代之的是立体感与透明感较强的二维与三维图形。这样，将会得到更形象直观的描述效果，更有助于读者对知识的理解。

全书包括绪论、应力状态分析、应变状态分析、应力应变关系与材料的力学性能、轴向拉压、扭转、弯曲、复杂内力时应力计算、能量原理、超静定结构、材料失效与强度理论、杆件强度与刚度计算、联接、弹塑性变形与极限载荷分析、疲劳与断裂、压杆稳定等共 16 章。

本书由张少实教授主编，盖秉政教授主审。参加编写的老师有：王春香副教授（第 4、7、12、13 章）、薛福林副教授（第 6、9 章）、张桂莲副教授（第 8、10 章以及附录 A、B）、牟宗花副教授（第 5、16 章）、张少实（第 1、2、3、11、14、15 章）。书中的绝大部分图形是由张少实在计算机上绘制的。

本书的编写得到了国家工科力学基地建设项目基金与哈尔滨工业大学重点教材基金资助，哈尔滨工业大学教务处给予直接关怀与大力支持。在经历了五轮循环的试点教学过程中，哈尔滨工业大学实验学院、航天工程与力学系等单位积极配合、鼎力相助。哈尔滨工业大学固体力学学科带头人盖秉政教授、北京科技大学靳东来教授审阅了全书，提出了许多宝贵意见与建议。哈尔滨工业大学材料力学教研室全体老师一直关注着本书的编写工作，他们也对本书提出了宝贵意见。我们在此谨致以衷心的感谢。

囿于编者的有限水平，书中难免存在缺点、疏漏与错误之处，恳请广大教师与读者不吝指正。

编 者



目 录

第 3 版前言	
第 2 版前言	
第 1 版前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 强度 刚度 稳定性	1
1.2 变形固体及其基本假设	2
1.3 外力及其分类	3
1.4 变形与位移	4
第 2 章 应力状态分析	6
2.1 内力	6
2.2 应力的概念 正应力与切应力	9
2.3 一点的应力状态 切应力互等定理	10
2.4 二向应力状态分析 解析法	13
2.5 二向应力状态分析 图解法	17
2.6 三向应力状态分析	21
2.7 微体平衡	25
习题	27
第 3 章 应变状态分析	31
3.1 应变概念 线应变与切应变	31
3.2 位移与应变的关系 几何方程	32
3.3 应变协调条件 相容方程	34
3.4 平面应变状态分析	35
习题	38
第 4 章 材料的力学性能与应力应变关系	41
4.1 材料的力学性能与基本试验	41
4.2 轴向拉伸和压缩试验	42
4.3 常见工程材料的应力-应变曲线	46
4.4 应力松弛与蠕变	48
4.5 各向同性材料的胡克定律	49
4.6 应变能	53
4.7 各向同性材料弹性常数间的关系	56
4.8 各向异性材料应力-应变关系	56
习题	57
第 5 章 轴向拉压	60
5.1 轴向拉压杆的内力	60
5.2 轴向拉压杆的应力	61
5.3 圣维南原理 应力集中	63
5.4 轴向拉压杆的变形 变形能	65
5.5 轴向拉压超静定问题 温度应力 装配应力	67
5.6 构件受惯性力作用时的应力计算	72
习题	75
第 6 章 扭转	81
6.1 扭转杆件的内力	81
6.2 圆轴扭转横截面上的切应力	83
6.3 圆轴扭转破坏模式的分析	86
6.4 圆轴扭转变形与变形能	87
6.5 非圆截面杆扭转	88
6.6 薄壁杆的自由扭转 剪力流	90
习题	93
第 7 章 弯曲	96
7.1 梁的内力 剪力与弯矩	96
7.2 剪力图与弯矩图	98
7.3 载荷、剪力及弯矩间的关系	101
7.4 纯弯曲梁的正应力	104
7.5 有关弯曲的讨论	109
7.6 弯曲切应力	111
7.7 开口薄壁非对称截面梁的弯曲 弯曲中心	117
7.8 梁的弹性弯曲变形 弹性曲线微分 方程	119
7.9 直接积分求梁的变形	121
7.10 叠加原理与叠加法求变形	124
7.11 曲杆弯曲	128
习题	130
第 8 章 组合内力时杆件应力计算	138



8.1 斜弯曲	138	第13章 联接	234
8.2 偏心拉伸与压缩	141	13.1 工程中常见的联接结构	234
8.3 弯曲与扭转	146	13.2 剪切实用计算	235
习题	148	13.3 挤压实用计算	236
第9章 能量原理	153	13.4 焊缝与胶粘接缝的实用计算	238
9.1 虚功 杆件内力的虚功	153	习题	240
9.2 虚功原理及其对杆件的应用	155	第14章 弹塑性变形与极限载荷	
9.3 莫尔定理	158	分析	242
9.4 图形互乘法	161	14.1 弹塑性变形与极限载荷法概念	242
9.5 虚功原理应用于小变形固体	166	14.2 应力-应变关系曲线的简化	244
9.6 冲击	169	14.3 超静定桁架的极限载荷	245
习题	173	14.4 圆轴的弹塑性扭转 残余应力	247
第10章 超静定结构	177	14.5 梁的弹塑性弯曲 塑性铰	248
10.1 超静定结构的概念及其分析方法	177	习题	250
10.2 用力法分析超静定结构	178	第15章 疲劳与断裂	252
10.3 具有对称与反对称性的超静定		15.1 交变应力及其描述	252
结构	186	15.2 疲劳的概念与材料的疲劳极限	254
10.4 连续梁	188	15.3 影响疲劳极限的主要因素	256
习题	191	15.4 疲劳强度计算	260
第11章 材料失效及强度理论	196	15.5 变幅交变应力下构件的疲劳强度	
11.1 常用工程材料的失效模式及强度		计算	264
理论概念	196	15.6 疲劳裂纹扩展与构件的疲劳寿命	267
11.2 关于断裂的强度理论	198	15.7 提高构件疲劳强度的措施	271
11.3 关于屈服的强度理论	199	习题	273
11.4 莫尔强度理论	201	第16章 压杆稳定	275
11.5 强度条件与强度计算	203	16.1 压杆稳定性概念	275
习题	206	16.2 确定临界力的静力法 欧拉公式	276
第12章 杆件的强度与刚度计算	209	16.3 超过比例极限压杆临界力的计算	280
12.1 强度计算与刚度计算	209	16.4 关于压杆稳定性的进一步讨论	283
12.2 轴向拉压杆件的强度计算	210	16.5 中心加载压杆稳定性计算	286
12.3 扭转杆件的强度与刚度计算	212	习题	289
12.4 弯曲杆件的强度与刚度计算	214	附录	293
12.5 组合内力时杆件的强度与刚度		附录A 截面的几何性质	293
计算	219	附录B 型钢表 (GB/T 706—2008)	306
12.6 提高杆件强度与刚度的一些措施	223	附录C 部分习题答案	321
习题	225	参考文献	332



1

第 1 章 绪论

与理论力学不同,材料力学的研究对象——构件,不再是刚体,而是变形固体,在外力作用下将发生形状与尺寸的改变。当构件所承受的外力超过某一限度时,就要丧失承载能力而不能正常工作。因而要求构件应具有一定的强度、刚度与稳定性。材料力学就是研究构件强度、刚度、稳定性的一门科学。

1.1 强度 刚度 稳定性

材料力学将工程结构(各种机械、仪器及建筑结构等)的零部件统称为**构件**。例如,图 1-1 所示的车床主轴、齿轮、传动轴等均为构件。构件工作时因承受一定的外力(包括载荷和约束力)而发生的几何形状和尺寸的改变,称为**变形**。当构件所承受的外力超过某一限度时,就要丧失承载能力而不能正常工作。有如下三种丧失承载能力的形式:

1) 构件发生破坏。例如,图 1-1 所示的车床主轴若断裂,则车床将不能工作。又如,飞机的机翼断裂,其后果是不堪设想的。

2) 构件的变形过大,超过允许范围。例如,图 1-2 所示的车床主轴,由于工作时发生弯曲变形而使工件的回转轴线与刀具前进方向发生偏斜,这样,加工出的工件会带有一定的

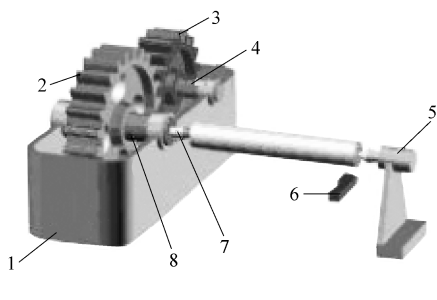


图 1-1

1—床头箱 2—主轴齿轮 3—传动轴齿轮
4—传动轴 5—尾座 6—刀具
7—顶尖 8—主轴

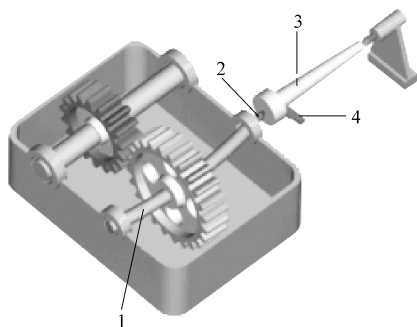


图 1-2

1—主轴 2—顶尖 3—工件 4—刀具



锥度。主轴变形越大,工件锥度亦越大。可见,若主轴变形过大而超过允许范围,那么加工出的工件就不能满足精度要求而成为废品。不仅如此,主轴弯曲变形过大还将使齿轮不能正常啮合、轴承不合理的磨损、甚至要引起车床振动等。

3) 构件不能稳定地保持原有的平衡形态。

图 1-3 所示为磨床工作原理图,当活塞杆受压时,若压力达到某一数值,在意外干扰力下,活塞杆会突然弯曲而失去原来直杆的平衡形态,从而丧失承载能力。这种破坏称为失稳(或屈曲)。

由此可见,要保证构件工作时不丧失承载能力,应要求其具有一定的强度、刚度和稳定性。

- **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**——构件保持原有平衡形态的能力。

为提高构件的强度、刚度、稳定性,而盲目地增大构件截面面积或选用优质材料,势必提高成本、浪费材料、增加构件重量、降低机械效率而不经济,在某种条件下,一味地增大构件截面面积反而会降低强度。

应用材料力学的知识能设计出具有足够强度、刚度和稳定性,同时又最节省材料、最经济的合理构件。

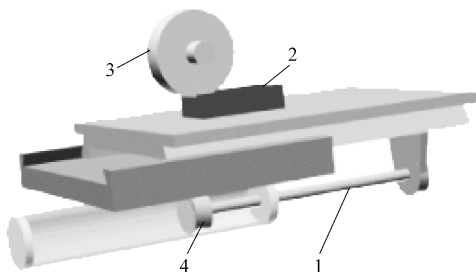


图 1-3

1—活塞杆 2—工件 3—砂轮 4—活塞

1.2 变形固体及其基本假设

实际上,任何物体受力后都要发生变形。在理论力学中从其研究任务出发,忽略了物体的变形,通常将研究对象视为刚体。而在材料力学中要研究构件的强度、刚度和稳定性,不能忽略物体的变形,因此将构件视为**变形固体**。

变形固体按其几何形状分为:

- 1) 块体,如图 1-4a 所示。
- 2) 板,如平板(图 1-4b)、曲板(或称壳体)(图 1-4c)。

3) 杆件,轴线是直线的为直杆(图 1-4d),轴线是曲线的为曲杆(图 1-4e),等截面的直杆为等直杆。

变形固体的性质是多方面的,在研究构件强度、刚度和稳定性时,自然要关心变形固体与强度、刚度和稳定性有关的物理性质,而对与其无关的性质(如导电性、导热性等)不予考虑,为此对变形固体作下列基本假设:

(1) 连续性假设 假设变形固体在其整个体积内,连续地、毫无空隙地被构成该固体的物质所充满,即变形固体内的介质是连续介质。这样,在材料力学中就可以引入无穷小概念并能运用数学中的微分、积分等分析方法。

(2) 均匀性假设 假设变形固体内各个质点(或各个部分)物质的性质都是相同的。这就是说,从变形固体内任意切取一体积单元,其物质的性质与所切取的部位、切取的大小



无关。譬如材料的弹性模量（也称杨氏模量，是我们在物理学中早就熟悉的），由于有了均匀性假设，那么它对变形固体内任何一点都具有相同的数值。

(3) 各向同性假设 假设变形固体内每一点处，沿任何方向物质的性质都是相同的。这样，若在变形固体内切取一体积单元，其物质的性质与该单元在变形固体内的方位无关，这种性质称为各向同性。具有各向同性的物体称为各向同性体，否则称为各向异性体。

从微观或细观的角度来说，制成变形固体的任何材料都是不连续、不均匀和各向异性的。例如工程中常用的金属材料，其内部总是存在诸如砂眼、气孔等各种缺陷；即便是没有缺陷，组成物质的分子、原子间还会有空隙，因而不是连续的。钢材是由铁、碳等元素组成，不同元素其性质不同，因而钢材是不均匀的。金属中包含着许许多多且排列错综复杂的晶体，就每个晶体来说，不同方向性质是不相同的，晶体是各向异性的。但是，由于是从宏观的、统计的角度来研究变形固体的力学行为，因而完全可以把变形固体假设成连续的、均匀的各向同性体。

需要说明的是，由于所面临的问题和研究的对象不同，在某种情况下不得不放弃其中某一个或某几个假设。譬如，近些年来高技术领域中广泛使用的纤维增强复合材料，是由纤维、基体和界面相复合而成。对于这类材料，即使是从宏观、统计的角度来研究，纤维、基体和界面的性质也是完全不同的；顺着纤维方向和垂直纤维方向的力学行为也是大不相同的。这样，在复合材料力学学科中，就需放弃均匀性假设和各向同性假设，把复合材料制成的变形固体视为非均匀的各向异性体。

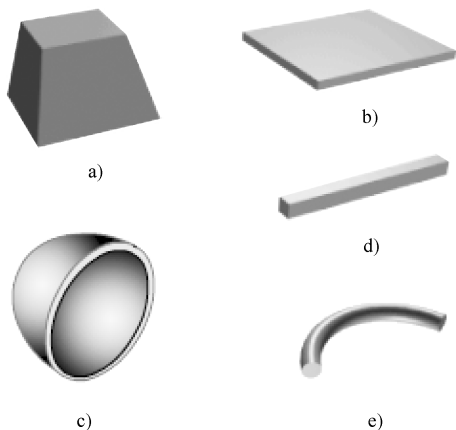


图 1-4

1.3 外力及其分类

1.3.1 静载荷与动载荷

若载荷在其作用过程中，随着时间推移不发生变化或变化十分缓慢和微小，这样引起构件变形时各质点的加速度为零或小到可以忽略的程度，则称这样的载荷为**静载荷**。例如，重力、建筑物对地基的压力等都是静载荷。反之，若载荷在其作用过程中，随着时间推移发生明显变化，引起构件变形时各质点的加速度大到不能忽略的程度，这样的载荷称为**动载荷**。譬如，锻锤对工件的打击力、内燃机气缸内的气体压力等都是动载荷。

在后面的讨论中将会看到，动载荷作用效果与静载荷大不相同。因此，在工程设计中若误把动载荷当作静载荷，则设计或分析的结果将是错误的，可能要产生危险的后果。

1.3.2 体积力与表面力

分布在物体整个体积内的力称为**体积力**，例如重力和惯性力。体积力作用在物体内部各个



质点上, 通常情况下各点处体积力是不同的。为表明物体内部某点 a 处体积力大小和方向, 围绕点 a 取一微小体积 ΔV , 如图 1-5a 所示。设 ΔV 内的体积力为 ΔQ , 则平均集度 $\Delta Q/\Delta V$ 的极限 F

$$F = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta V}$$

就是 a 点**体积力集度**。矢量 F 在坐标轴上投影 F_x 、 F_y 、 F_z 称为点 a 的体积力分量, 其指向沿坐标轴正方向者为正, 反之为负。它们的因次是 [力] [长度]⁻³。

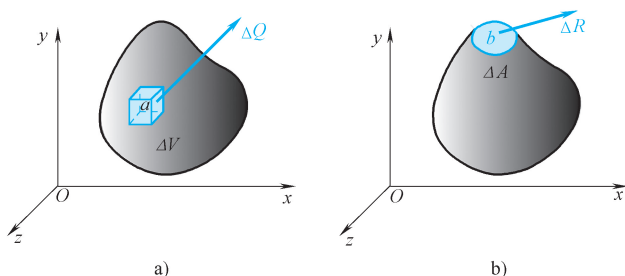


图 1-5

分布在物体表面上的力, 例如流体的压力和接触力等, 称为**表面力**。一般情况下, 物体表面各点受力是不同的, 为表明表面某点 b 处的表面力大小和方向, 围绕点 b 取一微小面积 ΔA , 其上表面力为 ΔR (图 1-5b), 则表面力平均集度 $\Delta R/\Delta A$ 的极限 S

$$S = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta A}$$

就是点 b 的**表面力集度**。矢量 S 在坐标轴上投影 S_x 、 S_y 、 S_z 称为点 b 的表面力分量, 其指向沿坐标轴正方向者为正, 反之为负。它们的因次是 [力] [长度]⁻²。

1.3.3 分布力与集中力

外力作用在构件的某一区域内, 则为**分布力**, 上述的体积力与表面力均为分布力。若力作用在构件某一极小区域内, 可视为作用在一点上, 称为**集中力**。例如, 一辆卡车对一长桥作用就可视为集中力。

1.4 变形与位移

1.4.1 弹性变形与塑性变形

变形固体在外力作用下将发生变形。若载荷完全卸去后, 变形能够消失, 使构件又恢复到原来的形状和大小, 称这种变形为**弹性变形**。反之, 变形不能消失, 被永远保留下来, 称这种变形为**塑性变形**或**残留变形**。

实验指出, 一般金属材料在一定受力限度内, 力和变形成正比 (线性) 关系, 这样的弹性体称为**线性弹性体**, 简称**线弹性体**。



1.4.2 大变形与小变形

若物体的变形量与物体变形前的尺寸相比很微小，这样在建立其静力平衡方程时可以忽略其变形量，而使用物体变形前尺寸，那么此种变形为**小变形**。反之，在建立其静力平衡方程时若无法忽略其变形量，那么这种变形为**大变形**。发生大变形时，变形与力不再呈线性关系，属非线性力学问题。材料力学只研究小变形问题。

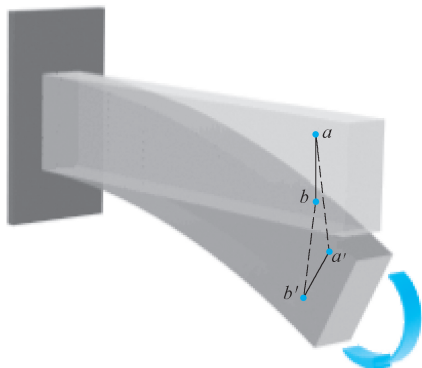


图 1-6

1.4.3 位移

物体发生变形时，物体内各个质点要移动（被固定约束的质点除外），使各个质点间的相对位置发生改变。如图 1-6 所示，点 a 在物体变形时移到点 a' ，点 b 移到点 b' 。线段 aa' 、线段 bb' 分别是点 a 、点 b 的**线位移**。变形前物体内微线段 ab 变形后移到 $a'b'$ ，线段 $a'b'$ 和线段 ab 间夹角，就是 ab 微线段的**角位移**。位移是矢量，线位移在 x 、 y 、 z 方向的分量用 u 、 v 、 w 来表示，其指向沿坐标轴正方向者为正；反之为负。



2

第 2 章 应力状态分析

在外力作用下,变形固体内部相邻各部分之间产生了相互作用力,这就是内力。内力反映出材料对外力具有抗力和传递效能。某一截面上的内力是连续作用在该截面的各个点上,对于杆件,横截面上的内力,系指横截面上各点分布内力所组成的力系向截面形心简化的合力与合力矩。一般情况下,不同横截面上内力亦不相同,可用截面法求得。

分布内力在截面一点处的强弱程度(简称分布集度),称为应力。应力在过该点截面的法向方向分量,称为正应力;在切向方向分量,称为切应力。通常情况下,构件内不同点的应力是不相同的。

用单元体来表示构件内的一个点,用单元体上作用的应力来表示该点处的应力状态,并分类为单向应力状态、纯切应力状态、二向应力状态、三向应力状态。对于同一点,一般情况下,在过该点的不同面上,应力分量是不相同的,这可用解析或图解的方法分析求解;但其主应力、主平面、主切应力、主切平面是确定不变的。

静力平衡微分方程描述了构件内部任意一点平衡时,应力分量与外力分量间应满足的关系;而应力边界条件描述了构件表面上任意一点平衡时,外力分量与应力分量间应满足的关系。

2.1 内力

2.1.1 内力的概念

图 2-1a 所示杆件,左端固定,右端承受轴向拉伸载荷 F 而发生伸长变形,同时固定端处产生沿轴向方向的约束力 F' ($=F$) 与之平衡(图 2-1b)。此时若沿某一截面 $m-m$ 将杆件切开(图 2-1c),则在外力 F 作用下左右两部分就要分离,固定端处也不会产生约束力 F' ,外力亦随之消失。在未切开而受拉时,左右两部分不分离,说明在 $m-m$ 截面上左右两部分间有相互作用力。这种力完全由外力引起,并随着外力改变而改变。这种力若超过了材料所能承受的极限值,杆件就要在某一截面处断裂,称此种力为**内力**。**所谓内力,就是受力构件相邻两部分间的相互作用力**。内力反映了材料对外力有抗力,并能将外力传递到杆件内部的其他地方。

2.1.2 内力的求法

现在要求 $m-m$ 截面内力,可假想在 $m-m$ 截面处用一平面将构件截开,保留左半部分,



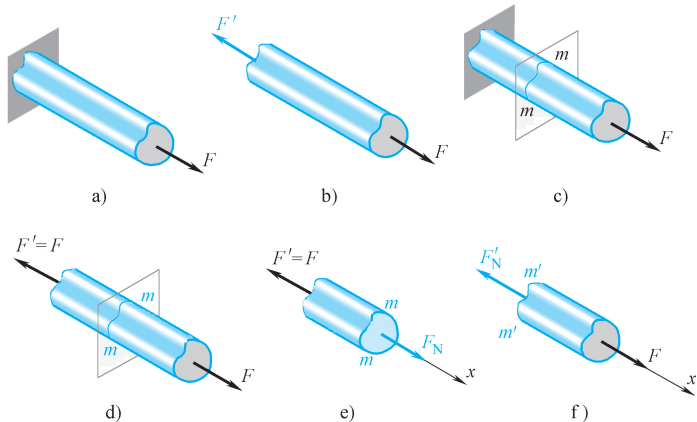


图 2-1

去掉右半部分，将右半部分对左半部分作用力用内力 F_N 代替(图 2-1e)。保留部分内力与外力是平衡的，对保留部分列静力平衡方程，有

$$\sum F_x = 0 \quad F_N - F' = 0$$

解此方程可得 $F_N = F' = F$ 。这就是说，欲求构件某一截面上内力，可假想用一平面在该截面处将构件截开，保留其中某一部分，去掉另一部分，并在该截面处将去掉部分对保留部分的作用力用内力代替，然后对保留部分列静力平衡方程，即可求得内力。这种方法称为**截面法**。

需要注意的是，内力是连续地分布在截面各个点上的力系，一般情况下可向截面形心（形心的概念可见附录 A）简化为一个主矢和一个主矩。而这个主矢与主矩在图 2-2 所示的坐标系中，又可分解为 F_N 、 F_{S_y} 、 F_{S_z} 三个主矢分量和 T 、 M_y 、 M_z 三个主矩分量。这些主矢与主矩分量就是材料力学中所谓的**内力分量**，其中 F_N 为**轴力**，使杆件发生轴向拉伸或压缩变形； F_{S_y} 、 F_{S_z} 为**剪力**，发生剪切变形； T 为**扭矩**，发生扭转变形； M_y 、 M_z 为**弯矩**，发生弯曲变形。

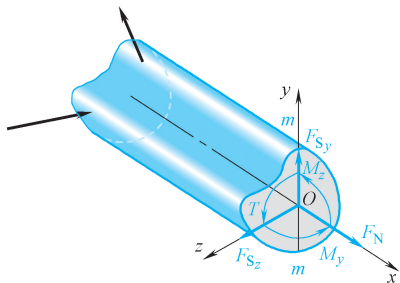


图 2-2

2.1.3 内力的符号规定

用截面法求内力时，若保留杆件 $m-m$ 截面(图 2-1d)的右半部分，将左半部分对右半部分的作用力用内力 F'_N 代替(图 2-1f)，显然 F'_N 与 F_N 是作用力与反作用力的关系。如果仍然按着理论力学的方法来规定内力的符号，那么在图示的坐标中， F_N 取正号，而 F'_N 应取负号，这样就出现了随保留部分的不同，内力符号也不相同的矛盾。合理的结果应该是，无论保留构件的哪一部分，所得内力大小和符号都应该相同。为此，规定**外法线沿着坐标正方向的截面称为正面**，**反之称为负面**(图 2-1f 所示的 $m'-m'$ 截面即为负面)；**正面上与坐标正方向相同的内力为正，反之为负**；**负面上与坐标正方向相反的内力为正，反之为负**。这样，无论保留哪一部分， F_N 与 F'_N 的符号与大小均相同。按此规定，图 2-2 中所示的内力分量均

