

普通高等工科教育规划教材

新编材料力学

张少实 主编



442

TB321-43

Z34

普通高等工科教育规划教材

新编材料力学

主编 张少实

参编 王春香 薛福林

张桂莲 牟宗花

主审 盖秉政



机械工业出版社

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。本书编写过程中，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总体目标。本书在内容、体系、结构与问题表述上均有较大的更新。

全书包括应力与应变状态分析、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、静不定结构、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 16 个章节。

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。

图书在版编目 (CIP) 数据

新编材料力学/张少实主编. —北京: 机械工业出版社, 2002.7
普通高等工科教育规划教材
ISBN 7-111-09995-8

I. 新... II. 张... III. 材料力学—高等学校—教材
IV. TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 050657 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 季顺利 版式设计: 霍永明 责任校对: 张媛

封面设计: 姚毅 责任印制: 路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·11.5 印张·445 千字

0 001—8 000 册

定价: 25.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

封面无防伪标均为盗版

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作了较大幅度的更新。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、静不定结构、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 16 个章节。

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。

本书编写过程中，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部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

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 强度 刚度 稳定性	1
1.2 变形固体及其理想化	2
1.3 外力及其分类	3
1.4 变形与位移	5
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 切应力互等定律	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	20
2.7 微体平衡	24
习题	26
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 应力应变关系	41
4.1 材料的力学性能与基本实验	41
4.2 轴向拉伸和压缩实验	42
4.3 常见工程材料的应力—应变曲线	47
4.4 应力松弛与蠕变	49
4.5 各向同性材料的广义胡克定律	50
4.6 应变能	54
4.7 各向同性材料弹性常数间的关系	57
4.8 各向异性材料应力—应变关系	58
习题	59
第 5 章 轴向拉压	62

5.1	轴向拉压杆的内力	62
5.2	轴向拉压杆的应力	63
5.3	圣维南原理 应力集中	66
5.4	轴向拉压杆的变形 变形能	68
5.5	轴向拉压静不定问题 温度应力 装配应力	70
5.6	构件受惯性力作用时的应力计算	75
	习题	79
第 6 章	扭转	86
6.1	扭转杆件的内力	86
6.2	圆轴扭转横截面上的切应力	88
6.3	圆轴扭转破坏模式的分析	91
6.4	圆轴扭转变形与变形能	93
6.5	非圆截面杆扭转	94
6.6	薄壁杆的自由扭转 剪力流	96
	习题	99
第 7 章	弯曲	103
7.1	梁的内力 剪力与弯矩	103
7.2	剪力图与弯矩图	106
7.3	载荷、剪力及弯矩间的关系	109
7.4	纯弯曲梁的正应力	112
7.5	有关弯曲的讨论	118
7.6	弯曲切应力	119
7.7	开口薄壁非对称截面梁的弯曲 弯曲中心	126
7.8	梁的弹性弯曲变形 弹性曲线微分方程	128
7.9	直接积分求梁的变形	130
7.10	叠加原理与叠加法求变形	133
7.11	曲杆弯曲	137
	习题	140
第 8 章	复杂内力时杆件应力计算	149
8.1	斜弯曲	149
8.2	偏心拉伸与压缩	153
8.3	弯曲与扭转	158
	习题	160
第 9 章	能量原理	166
9.1	虚功 杆件内力的虚功	166
9.2	虚功原理及其对杆件的应用	169
9.3	莫尔定理	171
9.4	图形互乘法	175

9.5	虚功原理应用于小变形固体	179
9.6	冲击	183
	习题	187
第 10 章	静不定结构	192
10.1	静不定结构的概念及其分析方法	192
10.2	用力法分析静不定结构	194
10.3	具有对称与反对称性的静不定结构	203
10.4	连续梁	205
	习题	208
第 11 章	材料失效及强度理论	214
11.1	常用工程材料的失效模式及强度理论概念	214
11.2	关于断裂的强度理论	216
11.3	关于屈服的强度理论	217
11.4	莫尔强度理论	220
11.5	强度条件与强度计算	222
	习题	225
第 12 章	杆件的强度与刚度计算	228
12.1	强度计算与刚度计算	228
12.2	轴向拉压杆件的强度计算	229
12.3	扭转杆件的强度与刚度计算	231
12.4	弯曲杆件的强度与刚度计算	233
12.5	复杂内力时杆件的强度与刚度计算	238
12.6	提高构件强度与刚度的一些措施	242
	习题	245
第 13 章	联接	254
13.1	工程中常见的联接结构	254
13.2	剪切实用计算	255
13.3	挤压实用计算	256
13.4	焊接缝与胶粘接缝的实用计算	259
	习题	260
第 14 章	弹塑性变形与极限载荷分析	264
14.1	弹塑性变形与极限载荷法概念	264
14.2	应力—应变关系曲线的简化	266
14.3	静不定桁架的极限载荷	268
14.4	圆轴的弹塑性扭转 残留应力	269
14.5	梁的弹塑性弯曲 塑性铰	271
	习题	273
第 15 章	疲劳与断裂	276

15.1	交变应力及其描述	276
15.2	疲劳的概念与材料的疲劳极限	278
15.3	影响疲劳极限的主要因素	280
15.4	疲劳强度计算	285
15.5	变幅交变应力下构件的疲劳强度计算	288
15.6	疲劳裂纹扩展与构件的疲劳寿命	292
	习题	295
第 16 章	压杆稳定	298
16.1	压杆稳定性概念	298
16.2	确定临界力的静力法 欧拉公式	299
16.3	超过比例极限压杆的临界力计算	304
16.4	关于压杆稳定性的进一步讨论	308
16.5	中心加载压杆稳定性计算	311
	习题	315
附录		319
附录 A	截面的几何性质	319
附录 B	型钢表	333
附录 C	习题答案	346
参考文献		357

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大小的改变。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）而发生几何形状和大小的改变，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) 构件发生损坏。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，超过容许范围。例如，图 1-2 所示的车床主轴，由于工

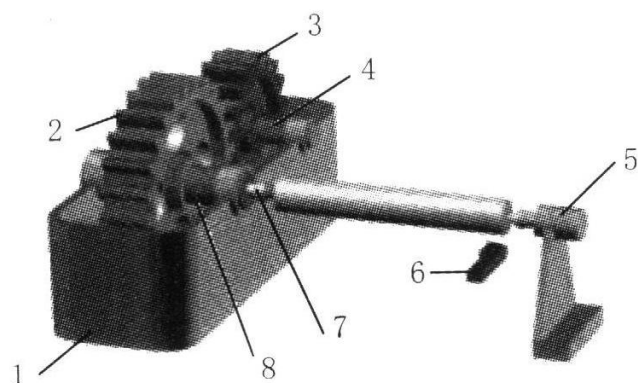


图 1-1

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

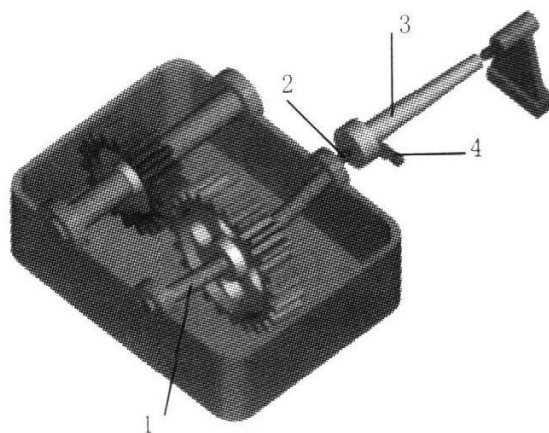


图 1-2

1—主轴 2—顶尖 3—工件 4—刀具

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,加工出的工件便带有一定的锥度。主轴变形愈大,工件锥度亦愈大。可见,若主轴变形过大而超过容许范围,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,主轴弯曲变形过大将使齿轮不能正常啮合、轴承过度磨损、引起车床振动等。

(3) 构件不能稳定地保持原来的平衡形态。图 1-3 所示为磨床工作原理图。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。

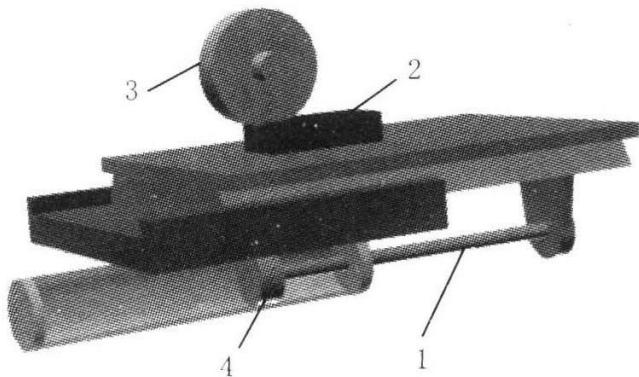


图 1-3

1—活塞杆 2—工件 3—砂轮 4—活塞

● **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**——构件保持原来平衡形态的能力。

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,势必要提高成本、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会设计出具有足够强度、刚度和稳定性,同时又具有最经济的合理构件。

1.2 变形固体及其理想化

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,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,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(见图 1-4b)、曲板(或称壳体)(见图 1-4c)。

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

变形固体的性质是多方面的,在研究强度、刚度和稳定性时,自然要关心物

此为试读,需要完整PDF请访问: www.ertongbook.com

体与强度、刚度和稳定性有关的物理性质，而对其他无关性质忽略不计，即将固体理想化处理。

1.2.1 连续性介质与非连续性介质

材料内部总会存在砂眼、气孔、位错（可视为裂纹或微裂纹）等缺陷，即便是没有缺陷，组成物质的原子、分子间亦有空隙，因而介质是不连续的。但是，如果我们是从宏观角度来研究变形固体的力学性质，那么，就可以认为物质是没有空隙地充满整个体积，即变形固体是连续性介质。这样，就可以引入无穷小概念和微积分。如果要研究裂纹对强度的影响规律（譬如断裂力学），就要正视裂纹的存在。这就是说，把变形固体抽象成连续性还是非连续性介质，完全取决于研究问题的范畴和角度。今后若不加说明，即为连续性介质。

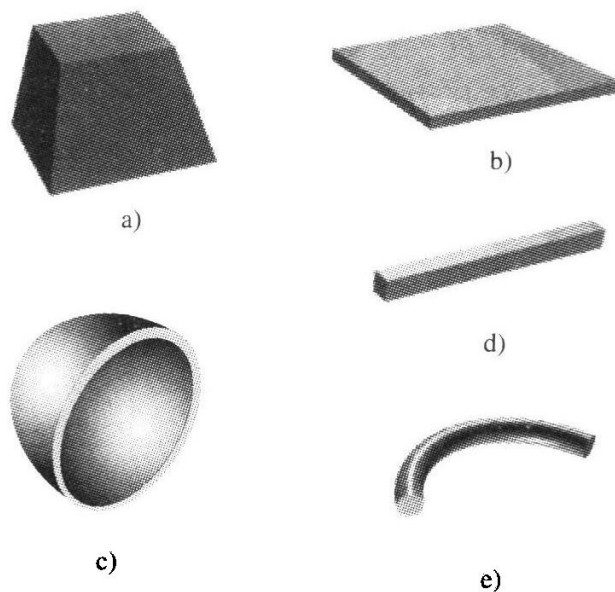


图 1-4

1.2.2 均匀性与非均匀性

材料总是包含着多种元素，例如，钢材由铁、碳等元素组成；纤维增强复合材料由纤维、基体组分材料复合而成。不同元素或组分的性质是不同的，因而，变形固体是非均匀介质。对于传统的金属材料，从宏观角度认为是均匀性介质，即材料的性质各处都相同；而对于复合材料就要承认其非均匀性。本书没有特殊说明，即为均匀性介质。

1.2.3 各向同性与各向异性

各个方向上的力学性质均相同的材料称为各向同性材料；反之为各向异性材料。传统的金属材料由晶粒构成，就单一晶粒来说，不同方向上力学性质是不一样的。但金属材料中包含着许许多多晶粒，且又杂乱无章地排列，这样，从宏观意义上各个方向的性质都一样，为各向同性材料。纤维增强复合材料，沿纤维方向和垂直纤维方向的力学性质差异很大，是典型的各向异性材料。本书主要研究各向同性材料，对各向异性材料可参阅“复合材料力学”等有关的书籍。

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是不可靠的,甚至要产生危险后果。

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,沿坐标轴正方向为正。它们的因次是 $[\text{力}][\text{长度}]^{-3}$ 。

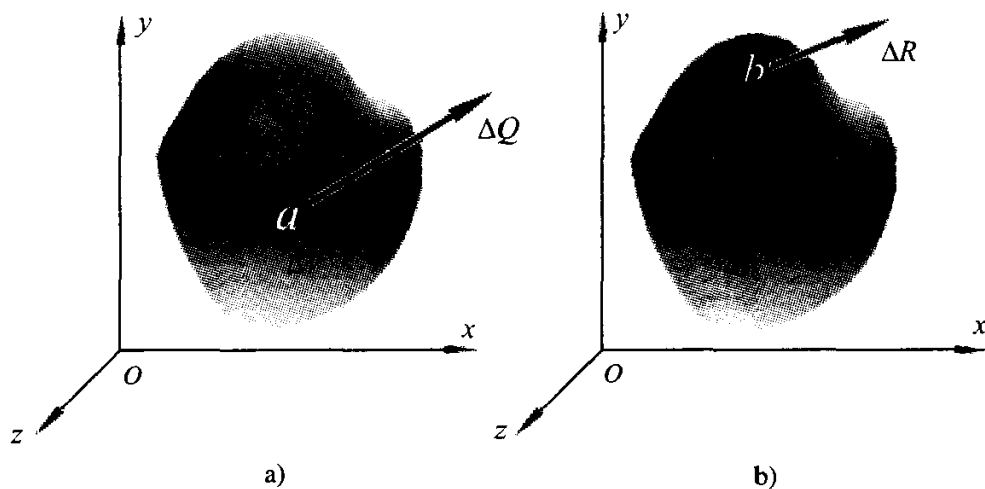


图 1-5

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 ΔR (见图 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，沿坐标轴正方向为正。它们的因次是 $[\text{力}][\text{长度}]^{-2}$ 。

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

如上所述，变形固体在外力作用下发生变形。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，在建立其静力平衡方程时变形不能消失，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。

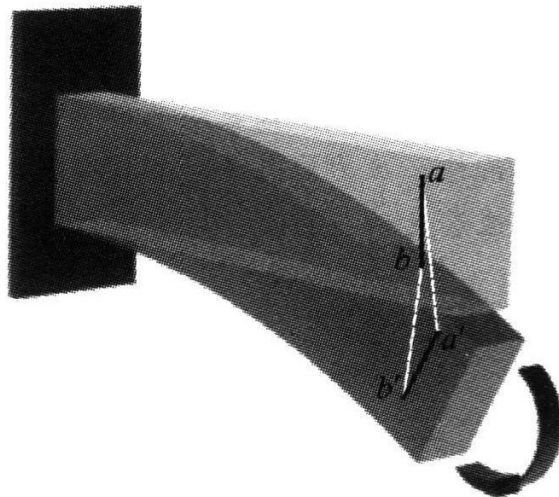


图 1-6

1.4.3 位移

物体发生变形，物体内各个质点要移动而使各个质点间的相对位置发生改变。图 1-

6 中，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。

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地作用在该截面的各个点上,对于杆件,横截面上内力,系指横截面上各点分布内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,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条件;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式。

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反力 F' ($=F$) 与之平衡(见图 2-1b)。若沿某一截面 $m-m$ 将杆件切开(见图 2-1c),则在力 F 作用下左右两部分就要分离,固定端处也不会产生约束反力 F' 。在未切开而受拉时,左右两部分不分离,说明在 $m-m$ 截面上两部分间有相互作用力。这个力完全由外力引起,并随着外力改变而改变。这个力若超过了材料所能承受的极限值,杆件就要在 $m-m$ 面处断裂,称此力为内力。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,保留左边部分,去掉右边部分,将右边部分对左边部分作用用内力 F_N 代替(见图 2-1d)。

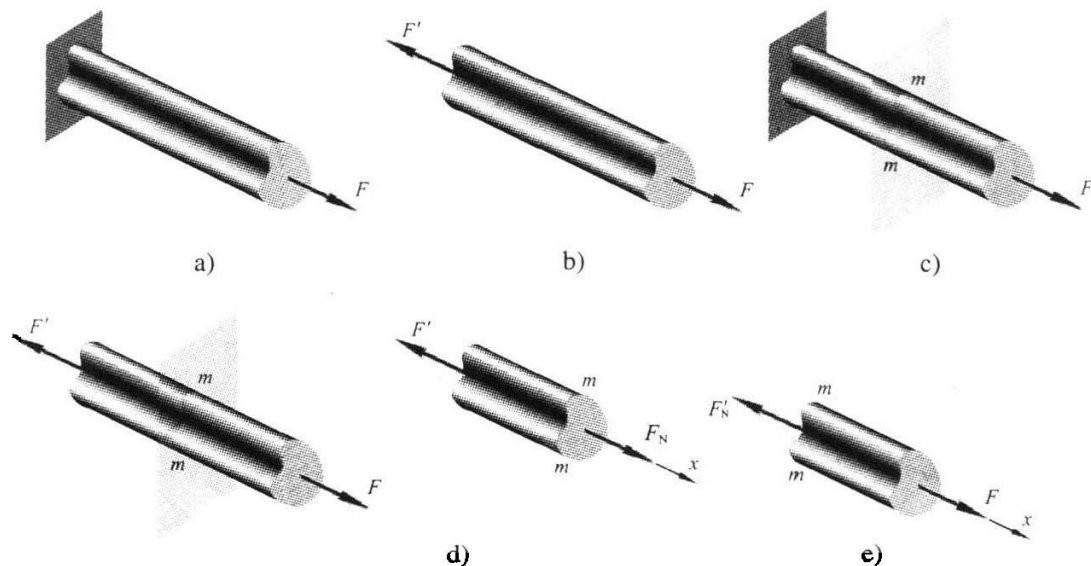


图 2-1

保留部分是平衡的，对其列静力平衡方程有

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

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**。

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简化，合成三个主矢 F_N 、 F_{S_y} 、 F_{S_z} 和三个主矩 T 、 M_y 、 M_z (见图 2-2)。这些合力与合力矩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。

2.1.3 内力的符号规定

用截面法求内力时，无论保留构件的哪一部分（例如，图 2-1e 所示保留右边部分），所得内力大小和符号应该相同，为此，今后规定，外法线沿着坐标正方向的截面称为**正面**，反之称为**负面**（图 2-1e 所示

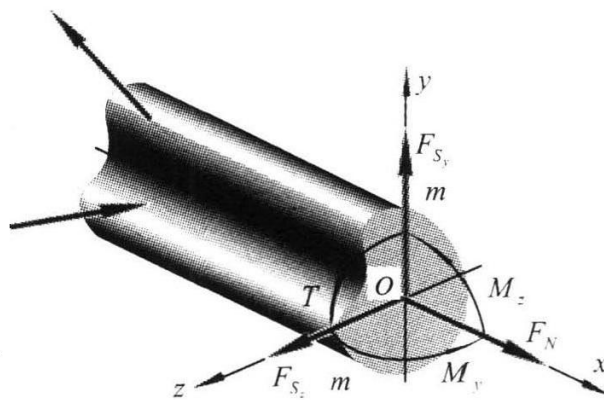


图 2-2

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。图 2-2 所示的内力分量均为正。

例 2-1 折杆受力如图 2-3a 所示 (图中尺寸单位为 mm), 试求 I—I 截面上内力。

解: 1) 求固定端 A 处的约束反力。为此以整体作为研究对象 (见图 2-3b), 列静力平衡方程, 可求出约束反力。

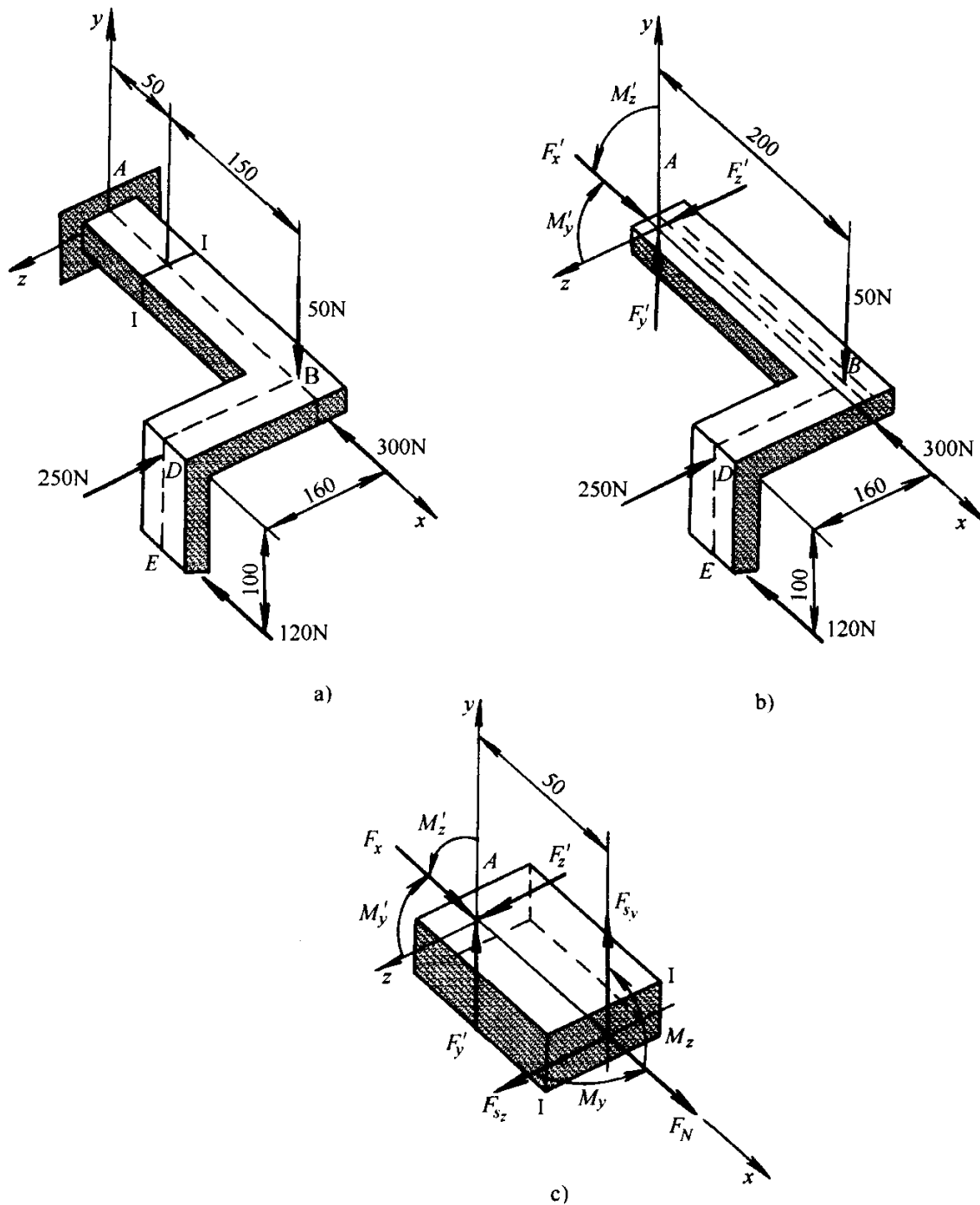


图 2-3

$$\sum F_x = 0, F'_x - 120\text{N} - 300\text{N} = 0, F'_x = 420\text{N}$$