

高等学校教材

材料力学

刘鸿文 主编

第三版·上册

高等教育出版社

0341-4-
2-3

高等学校教材

材料力学

(第三版)

上册

刘鸿文 主编



398064

高等教育出版社

(京)112号

图书在版编目(CIP)数据

材料力学 上册/刘鸿文主编.-3版(修订本).-北
京:高等教育出版社,1992.9(1998重印)
高等学校教材
ISBN 7-04-003903-6

I. 材… I. 刘… III. 材料力学-高等学校-教材 IV. T
B301

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 09595 号

*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京发行所发行

高等教育出版社印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 14 字数 330 000

1979年2月第1版 1992年9月第3版 1998年9月第7次印刷

印数 221 284-256 293

定价 13.40 元

C541-43

398054

内 容 提 要

本书是在获第一届国家优秀教材奖的第二版的基础上,根据国家教委审订的高等工业学校“材料力学课程教学基本要求”(100~110学时)修订而成。

与第二版相比较,第三版将“剪切”并入“拉伸与压缩”一章;把弯曲中的几个较深入的问题(非对称弯曲、开口薄壁杆件的剪应力、弯曲中心、用奇异函数求弯曲变形、有限差分法)另立一章,供选讲;对应力和应变的概念、能量方法、静不定结构等内容作了修改和补充。

第三版上册包括第一章到第九章和附录,计有:绪论,拉伸、压缩与剪切,扭转,弯曲内力,弯曲应力,弯曲变形,弯曲的几个补充问题,应力和应变分析,强度理论,组合变形,平面图形的几何性质。下册包括第十章到第十八章,计有:能量方法,静不定结构,动载荷,交变应力,压杆稳定,平面曲杆,厚壁圆筒和旋转圆盘,矩阵位移法,杆件的塑性变形。

与本书配套的有刘鸿文等编的《材料力学实验》。本书适用于高等工业学校机械类各专业,也可供其他专业及有关工程技术人员参考。

责任编辑: 吴向

2P20/02

第三版前言

本书第二版出版以来已有九年。这期间国家教育委员会工科大学课程教学指导委员会制订了“材料力学课程教学基本要求”，并经国家教育委员会批准试行。它就是本书这次修订的依据。

出于有利于教学的愿望，本书修订时对内容作了一些调整，例如把弯曲中几个较深入的问题集中到第七章，以便根据情况选讲或节删。为使论述较为完整和严谨，对部分内容作了修改和补充，例如应力和应变的概念、能量方法、静不定结构等。考虑到本书第二版使用较广，修订后仍然保持了原来的体系和风格。鉴于学时偏紧，第三版注意了内容的精简。但为给教学留有余地，总的说教材内容仍略多于课程的基本要求。

受材料力学课程教学指导小组的委托，哈尔滨建筑工程学院千光瑜同志审阅了书稿，提出很多中肯的意见。使用过本书第二版的广大教师也陆续提出过修改建议。对此我们都非常珍视，谨此致谢。借此机会，还向参加过本书第一版编写工作的陈瀚、吴士艳、金志刚、胡逾、胡增强、倪德耀、龚育宁、宁俊、梁广基、徐雅宜、吕荣坤等同志，深表谢意。

参加第三版修订工作的是刘鸿文、林建兴、曹曼玲等三同志。仍由刘鸿文担任主编。浙江大学教务处和材料力学教研室给予了支持。张礼明同志担任插图工作。限于编者的水平，修订后的教材恐仍有疏漏和欠妥之处，深望广大教师和读者批评指正。

编者

1991年5月

上册目录

第一章 绪论	1
§ 1.1 材料力学的任务	1
§ 1.2 变形固体的基本假设	2
§ 1.3 外力及其分类	3
§ 1.4 内力、截面法和应力的概念	4
§ 1.5 变形与应变	8
§ 1.6 杆件变形的的基本形式	11
习题	13
第二章 拉伸、压缩与剪切	15
§ 2.1 轴向拉伸与压缩的概念和实例	15
§ 2.2 轴向拉伸或压缩时横截面上的内力和应力	16
§ 2.3 直杆轴向拉伸或压缩时斜截面上的应力	22
§ 2.4 材料在拉伸时的力学性能	23
§ 2.5 材料在压缩时的力学性能	31
* § 2.6 温度和时间对材料力学性能的影响	33
§ 2.7 失效、安全系数和强度计算	36
§ 2.8 轴向拉伸或压缩时的变形	40
§ 2.9 轴向拉伸或压缩的变形能	45
§ 2.10 拉伸、压缩静不定问题	50
§ 2.11 温度应力和装配应力	53
§ 2.12 应力集中的概念	58
§ 2.13 剪切和挤压的实用计算	60
习题	66
第三章 扭转	89
§ 3.1 扭转的概念和实例	89
§ 3.2 外力偶矩的计算, 扭矩和扭矩图	90
§ 3.3 纯剪切	94

$$\tau = G\gamma$$

$$u = \frac{1}{2} \Delta l \quad \Delta l = \frac{F \cdot l}{EA}$$

$$\frac{N}{A} = \frac{F}{A} = \sigma$$

§ 3.4 圆轴扭转时的应力	97
§ 3.5 圆轴扭转时的变形	103
§ 3.6 圆柱形密封圈螺旋弹簧的应力和变形	108
§ 3.7 非圆截面杆扭转的概念	113
* § 3.8 薄壁杆件的自由扭转	118
习题	125
第四章 弯曲内力	136
§ 4.1 弯曲的概念和实例	136
§ 4.2 受弯杆件的简化	137
§ 4.3 剪力和弯矩	141
§ 4.4 剪力方程和弯矩方程 剪力图和弯矩图	144
§ 4.5 载荷集度、剪力和弯矩间的关系	150
§ 4.6 平面曲杆的弯曲内力	154
习题	155
第五章 弯曲应力	167
§ 5.1 纯弯曲	167
§ 5.2 纯弯曲时的正应力	169
§ 5.3 横力弯曲时的正应力	173
§ 5.4 弯曲剪应力	178
* § 5.5 关于弯曲理论的基本假设	187
§ 5.6 提高弯曲强度的措施	191
习题	199
第六章 弯曲变形	211
§ 6.1 工程中的弯曲变形问题	211
§ 6.2 挠曲线的微分方程	212
§ 6.3 用积分法求弯曲变形	215
§ 6.4 用叠加法求弯曲变形	222
§ 6.5 简单静不定梁	229
§ 6.6 提高弯曲刚度的一些措施	232
习题	235
第七章 弯曲的几个补充问题	253

§ 7.1 非对称弯曲·····	253
§ 7.2 开口薄壁杆件的剪应力 弯曲中心·····	260
§ 7.3 用奇异函数求弯曲变形·····	266
§ 7.4 有限差分法·····	271
习题·····	276
第八章 应力和应变分析 强度理论 ·····	284
§ 8.1 应力状态概述·····	284
§ 8.2 二向和三向应力状态的实例·····	285
§ 8.3 二向应力状态分析——解析法·····	289
§ 8.4 二向应力状态分析——图解法·····	295
§ 8.5 三向应力状态·····	301
* § 8.6 位移与应变分量·····	305
* § 8.7 平面应变状态分析·····	307
§ 8.8 广义胡克定律·····	313
§ 8.9 复杂应力状态的变形比能·····	318
§ 8.10 强度理论 概述·····	320
§ 8.11 四种常用强度理论·····	322
§ 8.12 莫尔强度理论·····	329
§ 8.13 构件含裂纹时的断裂准则·····	332
习题·····	334
第九章 组合变形 ·····	345
§ 9.1 组合变形和叠加原理·····	345
§ 9.2 拉伸或压缩与弯曲的组合·····	348
* § 9.3 偏心压缩和截面核心·····	352
§ 9.4 扭转与弯曲的组合·····	356
* § 9.5 组合变形的普遍情况·····	365
习题·····	367
附录 I 平面图形的几何性质 ·····	378
§ I.1 静矩和形心·····	378
§ I.2 惯性矩和惯性半径·····	382
§ I.3 惯性积·····	385

§ I.4 平行移轴公式.....	386
§ I.5 转轴公式 主惯性轴.....	390
习题	395
附录II 型钢表.....	400
附录III 单位换算.....	418
附录IV 上册习题答案.....	420

第一章 绪 论

§ 1.1 材料力学的任务

工程结构或机械的各组成部分,如建筑物的梁和柱、机床的轴等,统称为构件。当工程结构或机械工作时,构件将受到载荷的作用。例如,车床主轴受齿轮啮合力和切削力的作用,建筑物的梁受自身重力和其他物体重力的作用。构件一般由固体制成。在外力作用下,固体有抵抗破坏的能力,但这种能力又是有限度的。而且,在外力作用下,固体的尺寸和形状还将发生变化,称为变形。

为保证工程结构或机械的正常工作,构件应有足够的能力负担起应当承受的载荷。因此,它应当满足以下要求:

1. **强度要求** 在规定载荷作用下的构件当然不应破坏。例如,冲床曲轴不可折断,储气罐不应爆破。强度要求就是指构件应有足够的抵抗破坏的能力。

2. **刚度要求** 在载荷作用下,构件即使有足够的强度,但若变形过大,仍不能正常工作。例如,若齿轮轴变形过大,将造成齿轮和轴承的不均匀磨损,引起噪音。机床主轴变形过大,将影响加工精度。刚度要求就是指构件应有足够的抵抗变形的能力。

3. **稳定性要求** 有些受压力作用的细长杆,如千斤顶的螺杆、内燃机的挺杆等,应始终维持原有的直线平衡形态,保证不被压弯。稳定性要求就是指构件应有足够的保持原有平衡形态的能力。

若构件横截面尺寸不足或形状不合理,或材料选用不当,将不能满足上述要求,从而不能保证工程结构或机械的安全工作。相反,也不应不恰当地加大横截面尺寸或选用优质材料,这虽满足了上述要求,却多使用了材料和增加了成本,造成浪费。材料力学的

任务就是在满足强度、刚度和稳定性的要求下,为设计既经济又安全的构件,提供必要的理论基础和计算方法。

在工程问题中,一般说,构件都应有足够的强度、刚度和稳定性,但对具体构件又往往有所侧重。例如,储气罐主要是要保证强度,车床主轴主要是要具备一定的刚度,而受压的细长杆则应保持稳定性。此外,对某些特殊构件还可能有相反的要求。例如为防止超载,当载荷超出某一极限时,安全销应立即破坏。又如为发挥缓冲作用,车辆的缓冲弹簧应有较大的变形。

研究构件的强度、刚度和稳定性时,应了解材料在外力作用下表现出的变形和破坏等方面的性能,即材料的力学性能,而力学性能要由实验来测定。此外,经过简化得出的理论是否可信,也要由实验来验证。还有一些尚无理论结果的问题,须借助实验方法来解决。所以,实验分析和理论研究同是材料力学解决问题的方法。

§ 1.2 变形固体的基本假设

固体因外力作用而变形,故称为变形固体或可变形固体。固体有多方面的属性,研究的角度不同,侧重面各不一样。研究构件的强度、刚度和稳定性时,为抽象出力学模型,掌握与问题有关的主要属性,略去一些次要属性,对变形固体作下列假设:

1. **连续性假设** 认为组成固体的物质不留空隙地充满了固体的体积。实际上,组成固体的粒子之间存在着空隙并不连续,但这种空隙与构件的尺寸相比极其微小,可以不计。于是就认为固体在其整个体积内是连续的。这样,当把某些力学量看作是固体的点的坐标的函数时,对这些量就可以进行坐标增量为无限小的极限分析。

2. **均匀性假设** 认为在固体内到处有相同的力学性能。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。但因构件或构件的任一部分中都包含为数极多的晶粒，而且无规则地排列，固体的力学性能是各晶粒的力学性能的统计平均值，所以可以认为各部分的力学性能是均匀的。这样，如从固体中取出一部分，不论大小，也不论从何处取出，力学性能总是相同的。

材料力学研究构件受力后的强度、刚度和稳定性，把它抽象为均匀连续的模型，可以得出满足工程要求的理论。对发生于晶粒那样大小的范围内的现象，就不宜再用均匀连续假设。

3. 各向同性假设 认为无论沿任何方向，固体的力学性能都是相同的。就金属的单一晶粒来说，沿不同的方向，力学性能并不一样。但金属构件包含数量极多的晶粒，且又杂乱无章地排列，这样，沿各个方向的力学性能就接近相同了。具有这种属性的材料称为各向同性材料，如铸钢、铸铜、玻璃等。

沿不同方向力学性能不同的材料，称为各向异性材料，如木材、胶合板和某些人工合成材料等。

§1.3 外力及其分类

当研究某一构件时，可以设想把这一构件从周围物体中单独取出，并用力来代替周围各物体对构件的作用。这些来自构件外部的力就是外力。按外力的作用方式可分为表面力和体积力。表面力是作用于物体表面的力，又可分为分布力和集中力。分布力是连续作用于物体表面的力，如作用于油缸内壁上的油压力，作用于船体上的水压力等。有些分布力是沿杆件的轴线作用的，如楼板对屋梁的作用力。若外力分布面积远小于物体的表面尺寸，或沿杆件轴线分布范围远小于轴线长度，就可看作是作用于一点的集中力，如火车轮对钢轨的压力，滚珠轴承对轴的反作用力等。体积力是连续分布于物体内部各点的力，例如物体的自重和惯性

力等。

载荷按随时间变化的情况,又可分成静载荷和动载荷。若载荷缓慢地由零增加到某一定值,以后即保持不变,或变动很不显著,即为静载荷。例如,把机器缓慢地置放在基础上时,机器的重量对基础的作用便是静载荷。若载荷随时间而变化,则为动载荷。按其随时间变化的方式,动载荷又可分为交变载荷和冲击载荷。交变载荷是随时间作周期性变化的载荷,例如当齿轮转动时,作用于每一个齿上的力都是随时间作周期性变化的。冲击载荷则是物体的运动在瞬时内发生突然变化所引起的载荷,例如,急刹车时飞轮的轮轴、锻造时汽锤的锤杆等都受到冲击载荷的作用。

材料在静载荷下和在动载荷下的性能颇不相同,分析方法也颇有差异。因为静载荷问题比较简单,所建立的理论和分析方法又可作为解决动载荷问题的基础,所以首先研究静载荷问题。

§ 1.4 内力、截面法和应力的概念

物体因受外力作用而变形,其内部各部分之间因相对位置改变而引起的相互作用就是内力。我们知道,即使不受外力作用,物体的各质点之间依然存在着相互作用的力。材料力学中的内力,是指外力作用下,上述相互作用力的变化量,所以是物体内部各部分之间因外力而引起的附加相互作用力,即“附加内力”。这样的内力随外力的增加而加大,到达某一限度时就会引起构件破坏,因而它与构件的强度是密切相关的。

为了显示出构件在外力作用下 $m-m$ 截面上的内力,用平面假想地把构件分成 I 、 II 两部分(图 1.1a)。任取其中一部分,例如 II ,作为研究对象。在部分 II 上作用的外力有 P_3 和 P_4 ,欲使 II 保持平衡,则 I 必然有力作用于 II 的 $m-m$ 截面上,以与 II 所受的外力平衡,如图 1.1b 所示。根据作用与反作用定律可知, II 必

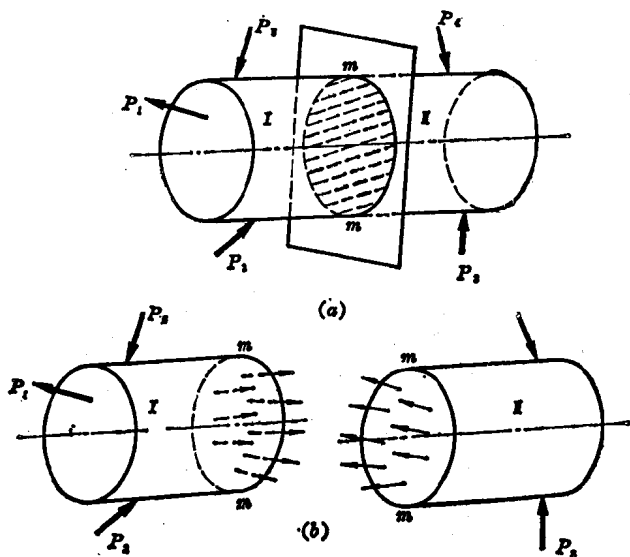


图 1.1

然也以大小相等、方向相反的力作用于 I 上。上述 I 与 II 间相互作用的力就是构件在 $m-m$ 截面上的内力。按照连续性假设, 在 $m-m$ 截面上各处都有内力作用, 所以内力是分布于截面上的一个分布力系。今后把这个分布内力系向截面上某一点简化后得到的主矢和主矩, 称为截面上的内力。

对我们所研究的部分 II 来说, 外力 P_3, P_4 和 $m-m$ 截面上的内力保持平衡, 根据平衡方程就可以确定 $m-m$ 截面上的内力。

上述用截面假想地把构件分成两部分, 以显示并确定内力的方法称为截面法。可将其归纳为以下三个步骤:

(1) 欲求某一截面上的内力时, 就沿该截面假想地把构件分成两部分, 任意地留下一部分作为研究对象, 并弃去另一部分。

(2) 用作用于截面上的内力代替弃去部分对留下部分的作用。

(3) 建立留下部分的平衡方程, 确定未知的内力。

例 1.1 钻床如图 1.2a 所示, 在载荷 P 作用下, 试确定 $m-m$ 截面上的内力。

解: (1) 沿 $m-m$ 截面假想地将钻床分成两部分。取 $m-m$ 截面以上部分进行研究 (图 1.2b), 并以截面的形心 O 为原点, 选取坐标系如图所示。

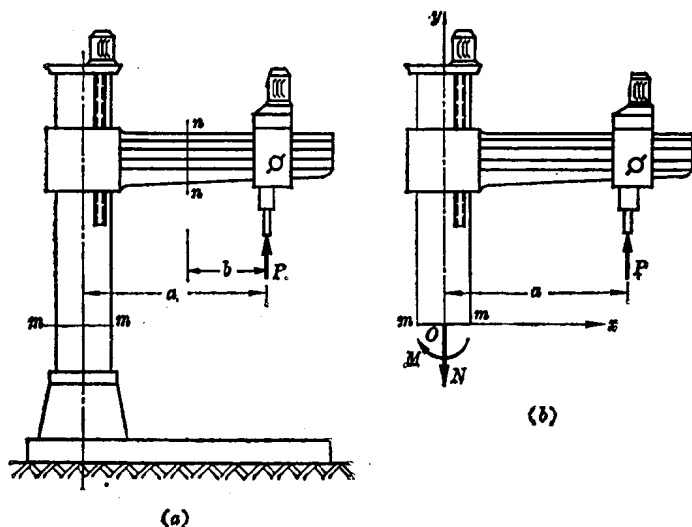


图 1.2

(2) 外力 P 将使 $m-m$ 截面以上部分沿 y 轴方向位移, 并绕 O 点转动, $m-m$ 截面以下部分必然以内力 N 及 M 作用于截面上, 以保持上部的平衡。这里 N 为通过 O 点的力, M 为对 O 点的力偶矩。

(3) 由平衡条件

$$\sum Y = 0, \quad P - N = 0$$

$$\sum m_O = 0, \quad Pa - M = 0$$

求得内力 N 和 M 为

$$N = P, \quad M = Pa$$

在例 1.1 中, 内力 N 和 M 是 $m-m$ 截面上分布内力系向 O 点简化后的结果。用它们可以说明 $m-m$ 截面以上部分的内力和外力

的平衡关系,但不能说明分布内力系在截面内某一点处的强弱程度。为此,我们引入内力集度的概念。设在图 1.1 所示受力构件的 $m-m$ 截面上,围绕 C 点取微小面积 ΔA (图 1.3a), ΔA 上分布内力的合力为 ΔP 。 ΔP 的大小和方向与 C 点的位置和 ΔA 的大小有关。 ΔP 与 ΔA 的比值为

$$p_m = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (a)$$

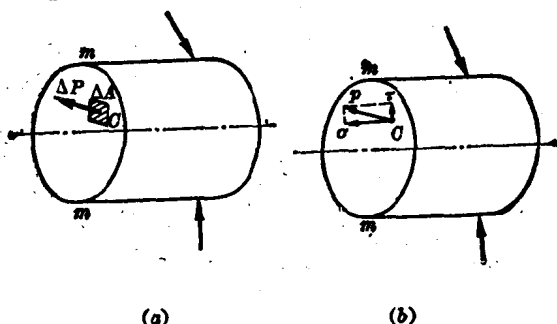


图 1.3

p_m 是一个矢量,代表在 ΔA 范围内,单位面积上内力的平均集度,称为平均应力。随着 ΔA 的逐渐缩小, p_m 的大小和方向都将逐渐变化。当 ΔA 趋于零时, p_m 的大小和方向都将趋于一定极限。这样得到

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} p_m = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1.1)$$

p 称为 C 点的应力^①。它是分布内力系在 C 点的集度,反映内力系在 C 点的强弱程度。 p 是一个矢量,一般说既不与截面垂直,也不与截面相切。通常把应力 p 分解成垂直于截面的分量 σ 和切

① 按照这里给出的应力的定义, $\Delta A \rightarrow 0$ 时, ΔA 上的内力的极限状态将是一个力,而不是一个力和一个力偶。这就暗示 ΔA 上的内力对 ΔA 内任一点的力矩都等于零。

于截面的分量 τ (图 1.3b)。 σ 称为正应力, τ 称为剪应力。

在国际制单位中, 应力的单位是牛/米² (N/m²), 称为帕斯卡或简称为帕 (Pa)。由于这个单位太小, 使用不便, 通常使用兆牛/米² = 10^6 牛/米², 记为 MN/m² 或 MPa。以往我国实际工程中使用的应力单位是公斤力/厘米², 记为 kgf/cm² 或 kg/cm²。关于国际制单位、公制单位和英制单位之间的换算关系, 已列入附录 III 中。

§ 1.5 变形与应变

材料力学研究固体的变形, 除了为研究构件的刚度外, 还因固体由外力引起的变形与内力的分布相关。

在图 1.4a 中, 固体的 M 点因变形位移到 M' 。 MM' 即为 M 点的位移。这里假设固体因受到约束, 不可能作刚性位移, M 点的位移全是由变形引起的。如允许作刚性运动, 则应在总位移中扣除刚性位移。设想在 M 点附近取棱边边长为 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 的微小正六面体 (当六面体的边长趋于无限小时称为单元体), 变形后六面体的边长和棱边的夹角都将发生变化, 如虚线所示。把上述六面体投影于 xy 平面, 并放大为图 1.4b。变形前平行于 x 轴的

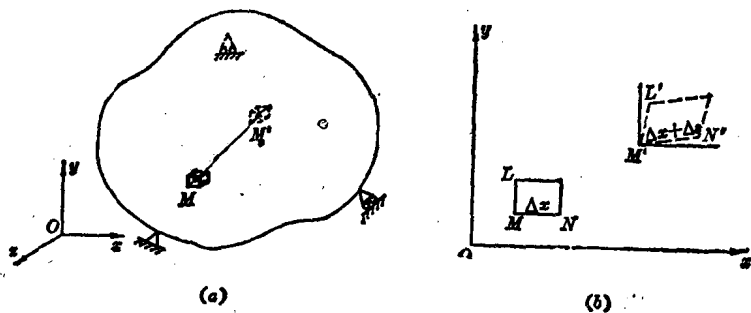


图 1.4