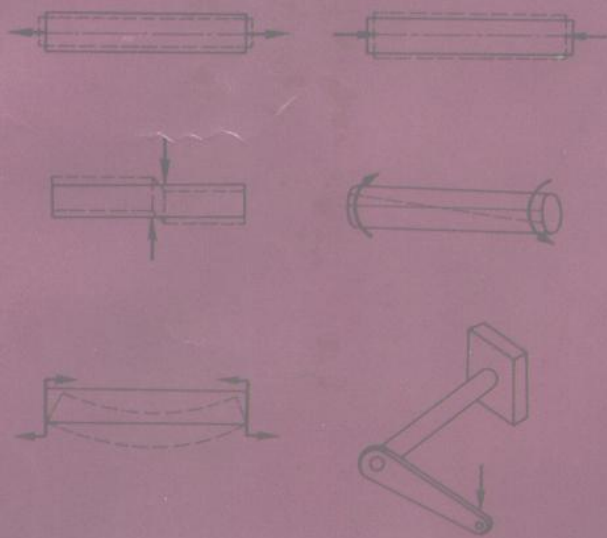


CAILIAO LIXUE CAILIAO LIXUE

# 材料力学

宋子康 蔡文安 编



同济大学出版社

410144

(2)

# 材 料 力 学

宋子康 蔡文安 编



同济大学出版社

责任编辑 解明芳  
封面设计 陈益平

## 材料力学

宋子康 蔡文安 编  
同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号 邮编:200092)

新华书店上海发行所发行  
同济大学印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32 印张: 19.625 字数: 570 千字

1998 年 5 月第 2 版 1998 年 5 月第 1 次印刷

印数:1—6000 定价:18.00 元

ISBN 7-5608-1907-9/O·163

## 再版前言

本书在原张大伦、李宗琰主编的《材料力学》基础上,经过近十年来的教学实践,并根据国家教委制订的“材料力学课程教学基本要求”编写而成。编者于1996年9月着手对原《材料力学》进行修改,总体上保持原来的特色,本书主要更改如下:

1. 根据现有的教学时数,为了确保课程教学的基本要求,删去原书中“复合材料力学”和“线弹性断裂力学”两章。

2. 原书中“梁的补充问题”不再单列成章,而将有关内容分插在相关章节中。

3. 为了加强应力状态理论的指导作用,把“应力状态分析”这一章紧接在“拉压”和“剪切”这两章内容之后,以便能为后续各章服务,并能得到广泛应用。

4. 由于目前计算机的应用已经相当普及,故在内容偏多的情况下,删去了原书中“微机在材料力学中的应用”这一部分。

5. 为了面向21世纪和加强对外交流的需要,专业外语日趋重要。材料力学中的术语在工程上占有较大的比重,因此,编写本书时,注意为读者提供专业名词或术语的英文名称,并在书末有工程名词汉、英、德对照表,以利查阅。

6. 考虑到携带方便,本书不再分上、下两册,合并为整册出版。

参加本书编写的有宋子康(第一、二、八、十、十一、十二、十五章)、蔡文安(第三、四、五、六、七、九、十三、十四章和附录)。

上海铁道大学徐通元教授和同济大学洪善桃教授对书稿进行了审阅,并提出很多宝贵的意见,特此致谢。

本书所有插图均由张蕙瑛女士精心绘制,谨表谢意。

限于编者的水平,对本书不足之处,恳请广大读者提出宝贵意见和建议,以便今后再次编写时,使之更臻完善。

编者

1997年9月

# 目 录

|                              |      |
|------------------------------|------|
| 第一章 绪论及基本概念 .....            | (1)  |
| § 1-1 材料力学的任务 .....          | (1)  |
| § 1-2 变形固体的物性假设 .....        | (3)  |
| § 1-3 内力及截面法 .....           | (4)  |
| § 1-4 内力的集度——应力 .....        | (7)  |
| § 1-5 工程构件的分类 .....          | (9)  |
| § 1-6 杆件变形的基本形式 .....        | (10) |
| 思考题 .....                    | (12) |
| 习 题 .....                    | (12) |
| 第二章 轴向拉伸与压缩 .....            | (15) |
| § 2-1 轴向拉伸与压缩的概念和工程实例 .....  | (15) |
| § 2-2 横截面上的内力和应力 .....       | (15) |
| § 2-3 斜截面上的应力 .....          | (19) |
| § 2-4 轴向拉伸与压缩时的变形 .....      | (21) |
| § 2-5 强度条件与刚度条件 .....        | (29) |
| § 2-6 应力集中的概念 .....          | (33) |
| § 2-7 材料在拉伸时的力学性能 .....      | (34) |
| § 2-8 材料在压缩时的力学性能 .....      | (42) |
| § 2-9 塑性材料和脆性材料力学性能的比较 ..... | (44) |
| § 2-10 安全系数 许用应力 .....       | (45) |
| § 2-11 拉压杆的超静定问题 .....       | (47) |
| § 2-12 圆筒形薄壁容器 .....         | (56) |
| 思考题 .....                    | (60) |
| 习 题 .....                    | (62) |
| 习题答案 .....                   | (74) |
| 第三章 剪 切 .....                | (77) |

|                                      |       |
|--------------------------------------|-------|
| § 3-1 剪切的概念和工程实例 .....               | (77)  |
| § 3-1 剪切的实用计算 .....                  | (78)  |
| § 3-2 挤压的实用计算 .....                  | (80)  |
| 思考题 .....                            | (87)  |
| 习 题 .....                            | (88)  |
| 习题答案 .....                           | (94)  |
| <b>第四章 应力状态分析</b> .....              | (95)  |
| § 4-1 应力状态的概念 .....                  | (95)  |
| § 4-2 平面应力的应力状态分析——数解法 .....         | (96)  |
| § 4-3 平面应力的应力状态分析——图解法(应力圆)<br>..... | (103) |
| § 4-4 应力状态分类 .....                   | (108) |
| § 4-5 空间应力分析 一点的最大应力 .....           | (108) |
| § 4-6 广义虎克定律 .....                   | (110) |
| 思考题 .....                            | (115) |
| 习 题 .....                            | (116) |
| 习题答案 .....                           | (122) |
| <b>第五章 扭 转</b> .....                 | (124) |
| § 5-1 扭转的概念和工程实例 .....               | (124) |
| § 5-2 自由扭转杆件的内力计算 .....              | (126) |
| § 5-3 关于剪应力的一些常用性质 .....             | (129) |
| § 5-4 圆轴扭转时横截面上的应力 .....             | (132) |
| § 5-5 扭转变形计算 强度条件和刚度条件 .....         | (137) |
| § 5-6 圆轴受扭破坏分析 .....                 | (144) |
| § 5-7 矩形截面杆的自由扭转 .....               | (145) |
| § 5-8 薄壁杆件的自由扭转 .....                | (148) |
| § 5-9 圆柱形密封圈螺旋弹簧 .....               | (153) |
| 思考题 .....                            | (157) |
| 习 题 .....                            | (158) |

|                                                    |       |
|----------------------------------------------------|-------|
| 习题答案 .....                                         | (165) |
| <b>第六章 梁的内力</b> .....                              | (167) |
| § 6-1 弯曲平面弯曲的概念 .....                              | (167) |
| § 6-2 静定梁的分类 .....                                 | (168) |
| § 6-3 剪力方程和弯矩方程 .....                              | (170) |
| § 6-4 用分布荷载集度 $q$ 、剪力 $Q$ 、弯矩 $M$ 的关系作内力图<br>..... | (178) |
| § 6-5 按叠加原理作弯矩图 .....                              | (189) |
| 思考题 .....                                          | (191) |
| 习 题 .....                                          | (191) |
| 习题答案 .....                                         | (196) |
| <b>第七章 梁的应力</b> .....                              | (199) |
| § 7-1 梁的正应力和正应力强度条件 .....                          | (199) |
| § 7-2 梁的剪应力和剪应力强度条件 .....                          | (209) |
| § 7-3 梁内一点的应力状态 主应力迹线 .....                        | (219) |
| § 7-4 弯曲中心 平面弯曲的充要条件 .....                         | (221) |
| § 7-5 提高梁承载能力的措施 .....                             | (224) |
| 思考题 .....                                          | (228) |
| 习 题 .....                                          | (230) |
| 习题答案 .....                                         | (244) |
| <b>第八章 梁的变形</b> .....                              | (246) |
| § 8-1 梁截面的挠度和转角 .....                              | (246) |
| § 8-2 梁挠曲线的近似微分方程 .....                            | (248) |
| § 8-3 用积分法求梁的变形 .....                              | (250) |
| § 8-4 用共轭梁法求梁的变形 .....                             | (258) |
| § 8-5 用叠加法求梁的变形 .....                              | (267) |
| § 8-6 梁的刚度校核 提高梁弯曲刚度的措施 .....                      | (276) |
| § 8-7 用变形比较法解简单超静定梁 .....                          | (280) |
| 思考题 .....                                          | (286) |

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 习 题 .....                      | (289) |
| 习题答案 .....                     | (297) |
| <b>第九章 能量法</b> .....           | (301) |
| § 9-1 概述 .....                 | (301) |
| § 9-2 应变能的计算 .....             | (303) |
| § 9-3 余功 余能 余比能 .....          | (310) |
| § 9-4 卡氏定理 .....               | (311) |
| § 9-5 运用卡氏第二定理理解超静定问题 .....    | (321) |
| 思考题 .....                      | (331) |
| 习 题 .....                      | (332) |
| 习题答案 .....                     | (340) |
| <b>第十一章 强度理论</b> .....         | (344) |
| § 10-1 强度理论的概念及材料的两种破坏形式 ..... | (344) |
| § 10-2 四个常用的强度理论及其评述 .....     | (345) |
| § 10-3 莫尔强度理论 .....            | (354) |
| 思考题 .....                      | (359) |
| 习 题 .....                      | (360) |
| 习题答案 .....                     | (362) |
| <b>第十一章 组合变形</b> .....         | (363) |
| § 11-1 概述 .....                | (363) |
| § 11-2 斜弯曲 .....               | (365) |
| § 11-3 拉伸(压缩)与弯曲的组合 .....      | (373) |
| § 11-4 偏心拉伸和偏心压缩 .....         | (377) |
| § 11-5 截面核心 .....              | (382) |
| § 11-6 扭转与拉压以及扭转与弯曲的组合 .....   | (385) |
| § 11-7 组合变形的一般情况 .....         | (390) |
| 思考题 .....                      | (393) |
| 习 题 .....                      | (395) |
| 习题答案 .....                     | (410) |

|                                        |       |
|----------------------------------------|-------|
| <b>第十二章 压杆稳定</b> .....                 | (413) |
| § 12-1 压杆稳定的概念 .....                   | (413) |
| § 12-2 细长压杆临界力的欧拉公式 .....              | (417) |
| § 12-3 欧拉公式的适用范围 临界应力总图 .....          | (422) |
| § 12-4 压杆稳定的实用计算—— $\varphi$ 系数法 ..... | (429) |
| § 12-5 提高压杆稳定性的措施 .....                | (435) |
| 思考题 .....                              | (442) |
| 习 题 .....                              | (443) |
| 习题答案 .....                             | (452) |
| <b>第十三章 动荷载</b> .....                  | (454) |
| § 13-1 概述 .....                        | (454) |
| § 13-2 惯性力问题 .....                     | (455) |
| § 13-3 冲击荷载 .....                      | (460) |
| § 13-4 提高构件抵抗冲击能力的措施 .....             | (468) |
| § 13-5 材料的动力强度和冲击韧度 .....              | (470) |
| 思考题 .....                              | (474) |
| 习 题 .....                              | (474) |
| 习题答案 .....                             | (480) |
| <b>第十四章 构件的疲劳强度计算</b> .....            | (482) |
| § 14-1 交变应力和疲劳破坏 .....                 | (482) |
| § 14-2 交变应力的基本参数 .....                 | (485) |
| § 14-3 S-N 曲线和持久极限 .....               | (486) |
| § 14-4 影响构件持久极限的主要因素 .....             | (488) |
| § 14-5 对称循环下构件的疲劳强度计算 .....            | (495) |
| § 14-6 持久极限曲线 .....                    | (498) |
| § 14-7 非对称循环下构件的疲劳强度计算 .....           | (501) |
| § 14-8 弯扭组合变形时构件的疲劳强度计算 .....          | (504) |
| 思考题 .....                              | (507) |
| 习 题 .....                              | (508) |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 习题答案                      | (512) |
| <b>第十五章 极限荷载</b>          | (514) |
| § 15-1 概述                 | (514) |
| § 15-2 超静定杆系的极限荷载         | (516) |
| § 15-3 圆轴受扭时的极限扭矩         | (521) |
| § 15-4 梁的极限弯矩 塑性分析        | (524) |
| § 15-5 残余应力               | (535) |
| 思考题                       | (537) |
| 习 题                       | (539) |
| 习题答案                      | (542) |
| <b>附录 I 平面图形几何性质</b>      | (543) |
| § I-1 静矩和形心               | (544) |
| § I-2 惯性矩和惯性积             | (547) |
| § I-3 惯矩和惯积的平行移轴公式        | (550) |
| § I-4 惯矩和惯积的转轴公式          | (551) |
| § I-5 惯性主轴 主惯矩 形心主惯矩      | (553) |
| 思考题                       | (557) |
| 习 题                       | (558) |
| 习题答案                      | (564) |
| <b>附录 II 平面应力条件下的应变分析</b> | (566) |
| § II-1 平面应力条件下的应变分析       | (566) |
| § II-2 一点应变实测和应力计算        | (571) |
| 思考题                       | (575) |
| 习 题                       | (576) |
| 习题答案                      | (578) |
| <b>附录 III 型钢规格表</b>       | (580) |
| 1. 热轧等边角钢(GB700—79)       | (580) |
| 2. 热轧不等边角钢(GB701—79)      | (586) |
| 3. 热轧普通工字钢(GB706—65)      | (591) |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 4. 热轧普通槽钢(GB707—65) ..... | (595) |
| 附录Ⅳ 工程名词汉、英、德对照表 .....    | (599) |

# 第一章 绪论及基本概念

## § 1-1 材料力学的任务

力学是研究物体机械运动的一门科学。力对物体的作用可表现出许多方面的效应,诸如力对物体作用的运动效应、变形和破坏效应等。随着研究对象、研究效应和研究方法的不同,形成了名目繁多的力学学科。

在理论力学中,由于它所研究的问题是力对物体的运动效应,限于物体的平衡和位置的变化,所以把物体当作不变形的刚体来处理。但在自然界中,不存在受力后不变形的物体,所有的物体受力作用以后,或多或少都会发生变形,乃至破坏。材料力学是一门紧密结合工程实际的学科,它以工程构件或称零件、部件(member)为研究对象,工程构件都由固体制成,它们在外力或称荷载(load)作用下,都会产生微小的变形,因此,材料力学的研究对象为变形固体。

在结构物或机器正常工作时,一般都承受着一定的外力,同时组成结构物或机器的每一个构件也都受到一定的力的作用。要使每个构件在受力后能够正常地工作,就必须具有足够承担荷载的能力(简称承载能力),在力学上为了工程构件能够安全可靠地工作,提出下列三方面的要求:

### 一、具有足够的强度(strength)

强度是指材料或由材料所做成的构件抵抗破坏的能力。如果说某种材料的强度高,就是指这种材料牢固而不易破坏。如果说某一工程构件(例如梁、板、柱等)的强度足够,是指该构件在荷载作用下不会发生破坏。在通常情况下,绝不允许构件的强度不足,

如房屋的横梁在受弯曲时不能被折断,起重机钢丝绳在起吊重物时不能被拉断等。

## 二、具有足够的刚度(rigidity)

刚度是指材料或由材料所做成的构件抵抗变形的能力。刚度大意味着变形小,有时,构件的强度虽然足够,但是受力后因变形过大,而不能保证其正常使用,例如,楼板梁因弯曲过度导致变形太大,往往会使得下层天花板上的石灰粉饰开裂、脱落;齿轮轴发生过大的弯曲变形时,则导致齿轮轴与轴承的间隙过小或消失,造成旋转不自如,磨损严重等;精密机床对构件的刚度要求更高,否则,被加工的零件达不到精度的要求。因此,在工程上还要求构件的变形在一定的限度以内,保证有足够的刚度。

## 三、具有足够的稳定性(stability)

稳定性是指构件保持原有平衡状态的能力。细长直杆承受压力的能力远低于承受拉力的能力,这是由于受压时,随压力的增加,细长直杆会突然变弯,丧失了进一步承载的能力。这种在压缩时,由直线的平衡状态转变为曲线的平衡状态,称为丧失稳定(简称失稳)。同材料,同截面的受压短杆与细长杆相比,短杆不易弯曲,承压能力较高,其稳定性也较好。构件的失稳往往会造成灾难性的事故,所以,对于安全可靠的构件需要有足够的稳定性。

综上所述,要使结构物或构件安全可靠,就必须满足上面的三项要求。如果单从力学的角度看,一般来说,加大构件的横截面尺寸,选用优质的材料都有利于提高构件的强度、刚度和稳定性,但随之也提高了工程的造价,增加了材料的消耗和结构物的自重,这又违背了经济的原则。可见安全与经济是一对矛盾,而材料力学的任务,正是为了解决这一矛盾,具体地说,它是研究工程构件受力作用后的变形和破坏的规律,为设计工程构件的形状和尺寸,选用合适的材料提供强度、刚度和稳定性的计算依据,力求使设计出来的工程构件,既安全可靠,又经济实用。

对构件强度、刚度和稳定性的要求,与所用材料的力学性能

(或称机械性质 mechanical property)有关。材料的力学性能,必须通过实验来测定。此外,材料力学的理论结果需用实验来验证,有些单靠现有理论解决不了的复杂问题,也需借助实验方法来解决。因此,实验研究和理论分析在材料力学中具有同等重要的地位。

## § 1-2 变形固体的物性假设

恩格斯在《自然辩证法》中教导我们:“只要自然界在思维着,它的发展形式就是假设。”

变形固体的性质是错综复杂的,为了研究的方便,只有忽略与所研究问题无关的或次要的因素,突出主要的因素,才能达到研究的目的。通常对于变形固体,根据其主要性质,作出如下的基本假设:

### 一、连续性假设 (assumption of continuity)

认为物体在整个体积内部毫无空隙地充满了物质。根据这一假设,可将物体内部的物理量如应力、变形、位移等用连续函数来表示。

### 二、均匀性假设 (assumption of homogeneity)

认为物体内各处的力学性能完全相同。根据这一假设,我们可以从物体中取出任一微小部分进行研究分析,并将所得结论应用于整个物体。

### 三、各向同性假设 (assumption of isotropy)

认为物体在各个方向具有相同的力学性能。具有这种性质的材料称为各向同性材料。

变形固体连续性、均匀性和各向同性的假设,说明物体的性质不是坐标位置、坐标方向的函数。

根据近代物质结构理论分析,认为一切物体均由微粒(分子、原子等)组成,各微粒之间都存在着空隙。即使是金属材料,从微观结构的角度来看,也是由无数微小晶粒所组成,晶粒与彼此交接

处的晶界,性能也不一致,但由于实际构件的尺寸远远大于晶粒的尺寸,且晶粒又是排列无序,所以,从统计平均值的观点,也就是宏观地看,可以认为物体是连续、均匀和各向同性的。钢材经辗轧或冷拔后,其晶粒排列表现出一定程度的方向性,这类材料称为单向同性材料。也有一些材料,如木材、纤维增强复合材料等,其力学性能随方向的不同而不同,称为各向异性材料。材料力学主要研究各向同性的变形固体。

还应指出的是,在工程实际中,构件在外力作用下所产生的变形与其原始尺寸相比,通常是很微小的,这种变形情况称为小变形。实验结果表明,当外力不超过某一限值时,绝大多数材料制成的物体在外力解除后(或称卸载)能恢复原有的形状和尺寸,物体的这种性质称为弹性。随着外力的解除能恢复的变形称为弹性变形(elastic deformation)。但当外力过大时,在外力解除后只能部分复原而残留下一部分不能恢复的变形称为塑性变形(plastic deformation),或称残余变形、永久变形。在结构和机械正常工作时,一般要求构件只发生弹性变形,而不允许出现塑性变形。

综上所述,在材料力学中,实际物体被看作是连续、均匀、各向同性的变形固体,并只限于研究弹性范围内的小变形情况。

## § 1-3 内力及截面法

### 一、内力(internal force)

内力是指物体内部各质点之间的相互作用力。物体不受外力时,其内部各质点之间也存在着内力,它使质点间相对位置保持不变,吸力与斥力相平衡,从而使物体保持一定的几何形状。当物体受外力作用而发生变形时,内部质点间的相对距离增大或者减小,吸力与斥力也发生了变化,即产生了“附加内力”。材料力学研究的内力,就是物体内部各部分之间由于外力作用而引起的附加内力,简称为内力。

## 二、截面法 (method of section)

内力既看不见又摸不着,它是一个抽象的概念,为了求得内力,通常采用截面法。如图 1-1a)所示的杆件在外力作用下处于平衡,为了求任一横截面  $m-m$  上的内力,可在  $m-m$  处用一个假想的截面把杆件截开,分为 I, II 两个部分,任取其一部分,例如左部 I 为脱离体,并将右部 II 对左部 I 的作用以截面上的内力来代替,如图 1-1b)所示。由于物体假设是均匀连续的,所以内力在截面上是连续分布的,这里的内力代表分布力的合力(可以是力和力偶矩),如合力  $X, Y, Z$  和合力偶矩  $M_x, M_y, M_z$  等。

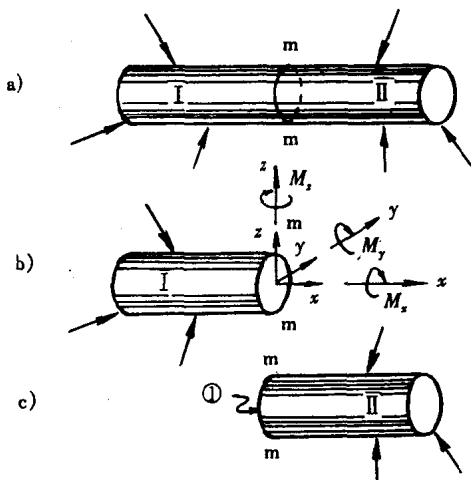


图 1-1 截面法求内力

(图中①表示内力与左截面等值,但方向相反)

由于杆件原来处于平衡状态,从中截取的任一部分在外力和内力的作用下,也必然处于平衡状态,于是考虑脱离体 I 的平衡,列出静力平衡方程,即可求出截面  $m-m$  上的内力。若取右部 II 为脱离体,同样可用静力平衡条件求出截面  $m-m$  上的内力。显

然,由牛顿第三定律可知,分别由 I, II 两部分求出同一  $m-m$  截面上的内力是等值而反向的(见图 1-1c))。

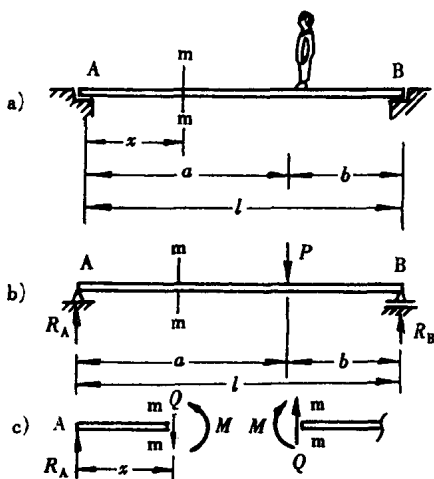
这种假想地用截面将构件截开,取其任一部分为脱离体,用静力平衡方程求出需求截面上的内力的方法,称为截面法,它是广泛应用于计算构件内力的基本方法,其步骤可归纳如下:

1. 截开 在需求内力的截面处用假想的截面将构件截开,分成两个部分;

2. 脱离 取任一部分为脱离体(一般取外力较少的一部分),在被截开的截面上用内力代替另一部分对该部分的作用;

3. 平衡 对脱离体建立静力平衡方程,并由此解出截面上的内力。

**例 1-1** 在木(跳)板上站有重量为  $P$  的人,位置如例 1-1 图 a),求木板截面  $m-m$  上的内力(不计木板的自重)。



例 1-1 图

**解** 首先必须求出木板上作用的外力,此时人重  $P$  及支座反