

005155

3-1-0199

材料力学

(上 册)

北京航空学院

西北工业大学 合编

南京航空学院

单 辉 祖 主编



国防工业出版社

TB301

11

05155

材 料 力 学

(上 册)

北京航空学院

西北工业大学 合编

南京航空学院

单 辉 祖 主编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书分上、下两册。上册包括：绪论、杆的拉伸与压缩、轴的扭转、梁的内力、梁的正应力、梁的剪应力、梁的变形、复杂应力状态的应力和应变分析、强度理论及其应用等九章。下册包括：按能量法计算位移、静不定结构分析、考虑材料塑性的强度计算、连接件的强度计算、压杆稳定问题、疲劳强度问题、实验应力分析的电测法和光弹性法、弹性理论平面问题和断裂力学简介等九章。全书每章后均附有习题，并在附录中给出了答案。

本书可作为机械类、航空类材料力学课程的教材，还可供工程技术人员参考。

材 料 力 学

(上 册)

北京航空学院

西北工业大学 合编

南京航空学院

单 辉 祖 主编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张11⁹/₁₆ 296千字

1981年8月第一版 1981年8月第一次印刷 印数：00,001—22,000册

统一书号：15034·2229 定价：1.45元

前 言

本书是根据高等航空工业院校材料力学教材会议制定的材料力学编写大纲编写的。可作为航空类多学时材料力学课程的试用教材，也可作为机械类多学时材料力学课程的试用教材。

全书分上、下两册出版。上册包括：绪论、杆的拉伸与压缩、轴的扭转、梁的内力、梁的正应力、梁的剪应力、梁的变形、复杂应力状态的应力和应变分析、强度理论及其应用等九章。下册包括：按能量法计算位移、静不定结构分析、考虑材料塑性的强度计算、连接件的强度计算、压杆稳定问题、疲劳强度问题、实验应力分析的电测法和光弹性法、弹性理论平面问题和断裂力学简介等九章。第一章至第十六章为基本内容，第十七、十八章和其它章节中带有*号或用小字排印的部分为选学内容。教师在使用本书时可根据教学大纲要求对内容进行适当取舍或补充。

本书由北京航空学院、西北工业大学和南京航空学院合编。其中第一至第七章、第十二、十三、十五章由北京航空学院高镇同、韩耀新、方汝琰、吴鹤华、单辉祖编写；第八、九、十四、十八章由西北工业大学徐钦鸣、钱良、杨炳章、原明昭编写；第十、十一、十六、十七章由南京航空学院吴永端、邓宗彦、陶宝祺、庄玉华编写。

全书由单辉祖负责主编，高镇同、钱良、吴永端参加了定稿工作。

本书承天津大学贾有权进行了认真的审阅，提出了不少宝贵意见；此外，在编写过程中，还得到北京航空学院等三院校材料力学教研室许多同志的支持和帮助。谨此致谢。

由于编者水平有限，书中缺点和错误一定不少，欢迎读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 绪论	1
§ 1-1 材料力学的任务	1
§ 1-2 材料力学的基本假设	2
§ 1-3 材料力学的研究对象	3
第二章 杆的拉伸与压缩	6
§ 2-1 引言	6
§ 2-2 轴力和轴力图	7
§ 2-3 拉(压)杆横截面上的应力	13
§ 2-4 材料在拉伸和压缩时的机械性能	16
§ 2-5 拉(压)杆的强度条件及其应用	25
§ 2-6 拉(压)杆斜截面上的应力 拉压破坏现象分析	30
§ 2-7 拉(压)杆的变形和虎克定律	32
§ 2-8 桁架的节点位移	38
§ 2-9 简单静不定杆系	42
* § 2-10 装配应力和热应力	48
习 题	53
第三章 轴的扭转	62
§ 3-1 引言	62
§ 3-2 扭矩和扭矩图	63
§ 3-3 薄壁圆管的扭转剪应力 剪应力互等定理和剪切虎克定律	65
§ 3-4 圆轴横截面上的扭转剪应力	70
§ 3-5 极惯性矩和抗扭截面模量	74
§ 3-6 扭转破坏试验和轴的强度条件	76
§ 3-7 圆轴扭转斜截面上的应力 扭转破坏现象分析	81
§ 3-8 圆轴的扭转变形和刚度条件	83
§ 3-9 扭转静不定问题	87
§ 3-10 矩形截面杆的扭转问题	90
§ 3-11 薄壁杆的扭转问题	94

习 题	102
第四章 梁的内力	110
§ 4-1 引言	110
§ 4-2 梁的外力	111
§ 4-3 剪力和弯矩	116
§ 4-4 剪力、弯矩方程和剪力、弯矩图	120
§ 4-5 M 、 Q 、 q 间的微分关系式	127
§ 4-6 利用 M 、 Q 、 q 间的微分关系绘制 Q 、 M 图	129
§ 4-7 刚架的内力	137
§ 4-8 曲杆的内力	139
习 题	141
第五章 梁的正应力	149
§ 5-1 引言	149
§ 5-2 弯曲实验和平面假设	149
§ 5-3 对称弯曲正应力公式	151
§ 5-4 简单截面的 I_x 和 W_x	155
§ 5-5 组合截面的惯性矩	158
§ 5-6 梁的强度计算	165
§ 5-7 提高弯曲强度的主要措施	169
§ 5-8 简单非对称弯曲的正应力	176
§ 5-9 一般非对称弯曲的正应力	180
§ 5-10 惯性积和主惯性矩的计算	186
§ 5-11 弯拉(压)组合强度计算	194
习 题	197
第六章 梁的剪应力	218
§ 6-1 矩形截面梁的弯曲剪应力	218
§ 6-2 开口薄壁梁的弯曲剪应力	223
§ 6-3 开口薄壁梁的剪力	230
* § 6-4 单闭室薄壁杆的剪流	236
习 题	244
第七章 梁的变形	249
§ 7-1 引言	249
§ 7-2 挠度和转角	249

§ 7-3 挠曲轴微分方程	251
§ 7-4 计算梁变形的积分法	253
§ 7-5 计算梁变形的叠加法	260
§ 7-6 斜弯曲变形分析	265
§ 7-7 简单静不定梁	266
习 题	271
第八章 复杂应力状态的应力和应变分析	277
§ 8-1 引言	277
§ 8-2 平面应力状态应力分析	279
§ 8-3 应力圆	284
§ 8-4 三向应力状态应力分析	289
§ 8-5 平面应变状态应变分析	294
§ 8-6 广义虎克定律	297
§ 8-7 弹性常数 E 、 G 、 μ 间的关系	299
习 题	300
第九章 强度理论及其应用	305
§ 9-1 引言	305
§ 9-2 关于断裂的强度理论	306
§ 9-3 关于屈服的强度理论	308
§ 9-4 强度理论的应用	309
§ 9-5 弯扭组合与弯拉(压)扭组合的强度计算	314
§ 9-6 薄壁圆筒的强度计算	320
习 题	323
附 录	329
附录一 常见截面的几何性质	329
附录二 简单载荷作用下的梁的变形	331
附录三 型钢规格表	334
附录四 上册习题答案	350

第一章 绪 论

§ 1-1 材料力学的任务

机器和结构都是由许多零件或构件组成的。当机器和结构工作时，这些零构件将受到外力的作用，同时，它们的尺寸和形状也随之发生变化。零构件的尺寸和形状的变化称为**变形**。实践表明：作用力愈大，零构件产生的变形也愈大，而当作用力过大时，零构件将产生过分的变形，甚至折损、毁坏。显然，零构件在工作时产生过分变形或意外破坏一般都是不允许的。

为了使整个结构或机器在一定外力作用下能安全地工作，必须对零构件的设计提出如下一些要求：

1. 零构件应具备足够的**强度**（即抵抗破坏的能力），以保证在外力作用下不发生破坏；

2. 零构件应具备足够的**刚度**（即抵抗变形的能力），以保证在外力作用下不过分变形；

3. 零构件应能维持其原有平衡形态来承担外力，即具备平衡的**稳定性**●。

以上三项是保证零构件安全工作的基本要求。当然，正确设计一个零构件，还应考虑生产制造的经济性和工艺性，对飞行器来说，还应尽量减小结构重量以改善其飞行性能。为了安全可靠，往往需要将零构件设计得粗些、厚些，但是，为了经济并使结构轻巧，则又希望尽量少用材料。可见，安全与经济、安全与性能之间存在一定矛盾。材料力学与有关学科相配合，提供了解决这种矛盾的方法。

● 关于稳定性问题将在第十四章介绍。

材料力学的主要任务是：研究零构件在外力作用下的受力、变形和破坏的规律，为合理设计零构件提供有关强度、刚度和稳定性计算的基本理论和方法。

零构件的强度、刚度和稳定性均与其所用材料的性能有关。材料的性能是通过试验测定的。通过试验还可以了解材料变形的基本规律和零构件的变形情况。材料力学就是以上述试验为基础，并利用有关的力学知识和数学方法建立其理论的。显然，这些理论还必须经过试验和实践的检验。因此，材料力学是一门理论和实践紧密结合的科学。

§ 1-2 材料力学的基本假设

制作零构件所用的材料是多种多样的，但它们都具有一个共同特点，即都是固体，而且在受力后会产生变形。所以，由这些材料构成的物体统称为**可变形固体**。材料力学研究的零构件即属于可变形固体。

对于真实的固体，就其物质结构和具体组成来看，是一个非常复杂的研究对象。为了便于进行理论分析，现根据其主要性质作如下假设。

一、连续性假设

在材料力学中，假设在物体的整个体积内都毫无空隙地充满了物质。实际上，在一般工程材料的内部均存在不同程度的空隙（包括材料的微观缺陷和夹杂等）。然而，当这些空隙的大小和零构件的尺寸相比为极小时，通常均可忽略不计，即认为材料是密实的[●]。这样，物体内的一些物理量即可用坐标的连续函数表示。

二、均匀性假设

一般工程材料都具有不同程度的非均匀性。例如，金属材料是由许许多多的微小晶粒组成的，各晶粒的性能不完全相同，而

● 含裂纹构件的力学分析见第十八章。

且, 晶粒交接处的晶界物质与晶粒本身的性能差异更大。但是, 由于零构件的尺寸远大于晶粒的尺寸 (例如在一立方厘米的钢材内包含数十万个晶粒), 零构件材料的性能即可看作是 所有组成部分性能的统计平均值。因此, 在材料力学中, 假设材料的性能与其所在位置无关, 即认为是均匀的。根据这个假设, 从零构件任何部位所切取的微小单元体 (简称微体), 都具有与零构件相同的性能。

三、各向同性假设

沿各个方向具有相同性能的材料称为各向同性材料。金属晶粒的性能是具有方向性的, 但由于零构件中所包含的晶粒极多, 而且晶粒的排列又是不规则的, 所以, 从统计平均的观点来看, 仍可假设金属材料的性能与所取方向无关, 即认为是各向同性的。应该指出, 金属材料经辗压后, 其中某些晶粒往往沿一定方向排列, 因而表现出一定程度的各向异性。但是, 当其不显著时, 也可忽略不计, 而认为是各向同性的。至于由加强纤维 (碳纤维、硼纤维等) 制成的复合材料, 则属于各向异性体, 在“复合材料力学”中专有论述, 不在本书讨论范围之内。

实践表明, 在上述假设基础上所建立的理论是符合工程要求的。

§ 1-3 材料力学的研究对象

零构件的形状也是多种多样的, 按照其几何特征主要可分为杆件和板件。

横向尺寸远小于纵向尺寸的零构件称为杆件 (图 1-1)。杆件的形状和尺寸由轴线和横截面决定。轴线和横截面间有一定关系, 即横截面垂直于轴线, 轴线通过横截面的形心。根据轴线和横截面的特征, 杆件又可分为: 等截面杆和变截面杆 (图 1-1, a 、 b); 直杆和曲杆 (图 1-1, c)。

厚度远小于其它两方向尺寸的构件称为板件 (图 1-2)。平分

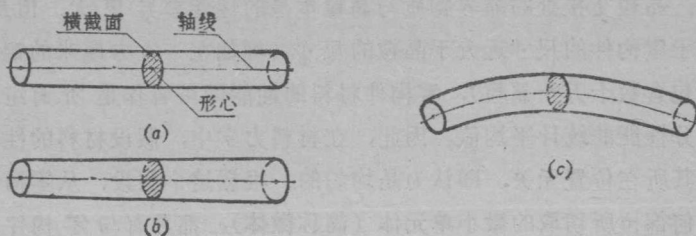


图 1-1

板件厚度的面称为**中面**。板件的形状和尺寸由中面和厚度来决定。中面为平面的是**板** (图 1-2, a); 中面为曲面的是**壳** (图 1-2, b)。



图 1-2

材料力学的主要研究对象是杆件。在表 1-1 中给出了几种典型的受力杆件：作动筒的活塞杆，发动机架的斜撑杆，传动轴和起落架的轮轴。这些杆件的受力情况不同，故变形形式也不同。总的说来，可归结为三种基本变形形式：**轴向拉伸(压缩)**，**扭转**和**弯曲**。其它更复杂的变形形式可看成是某几种基本变形形式的组合。例如图 1-3 所示螺旋桨轴，其变形形式即属于拉、扭组合。

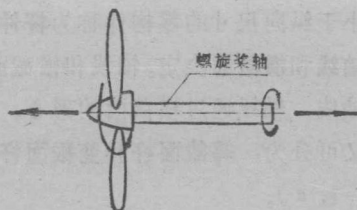
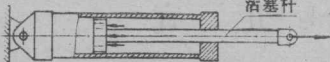
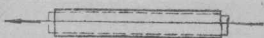
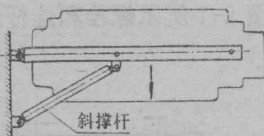
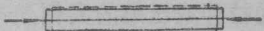
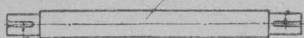
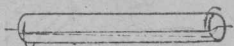
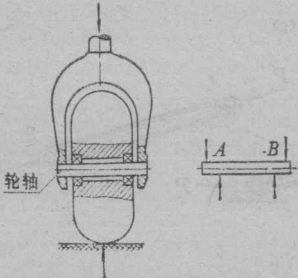
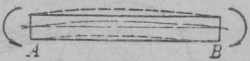


图 1-3

本书首先介绍各种基本变形形式，然后讨论组合变形形式。

表 1-1

	工 程 实 例	变 形 形 式
轴向拉伸	 活塞杆	
轴向压缩	 斜撑杆	
扭 转	 传动轴	
弯 曲	 轮轴	

第二章 杆的拉伸与压缩

§ 2-1 引言

在结构和机器中，很多构件受到拉伸或压缩的作用。例如，表 1-1 所示活塞杆和斜撑杆，图 2-1 所示螺栓和连杆，都是杆件受拉伸或压缩的实例。

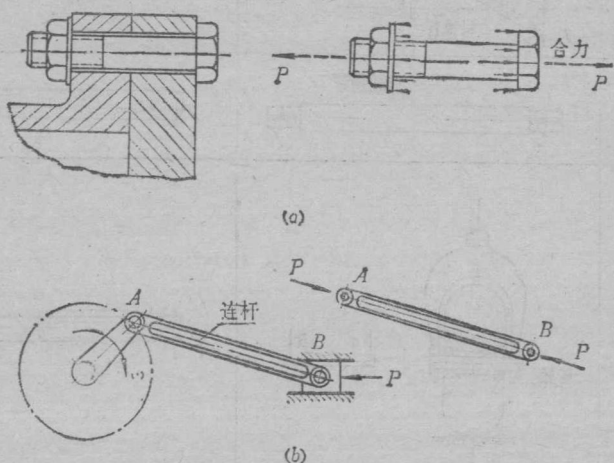


图 2-1

这些受力构件的共同特点是：构件是直杆，外力合力的作用线沿杆件轴线。在这种情况下，杆件的主要变形是轴向伸长或轴向缩短（图2-2）。这种变形形式称为轴向拉伸或轴向压缩，这类杆件称为拉(压)杆。

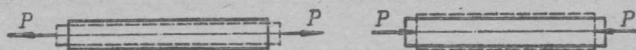


图 2-2

有一些直杆，例如图 2-3 所示两级作动筒的活塞杆，承受两个以上的轴向外力，这种构件仍属于拉（压）杆，称为多力杆。

本章研究拉（压）杆的强度和刚度问题，并结合其受力和变形分析，介绍材料力学的基本概念和基本分析方法。

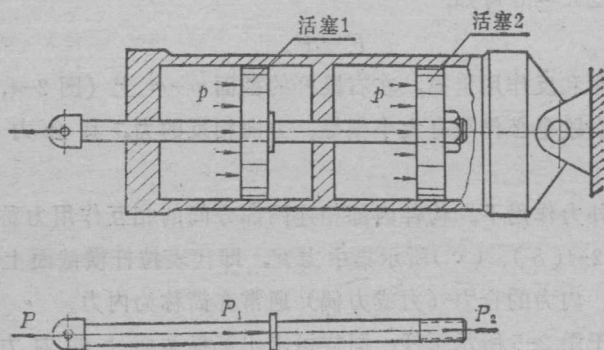


图 2-3

§ 2-2 轴力和轴力图

为了解决拉（压）杆的强度和刚度问题，首先需要了解拉（压）杆内部的受力情况。

图 2-4(a) 所示拉杆，在轴向载荷 P 作用下处于平衡状态。

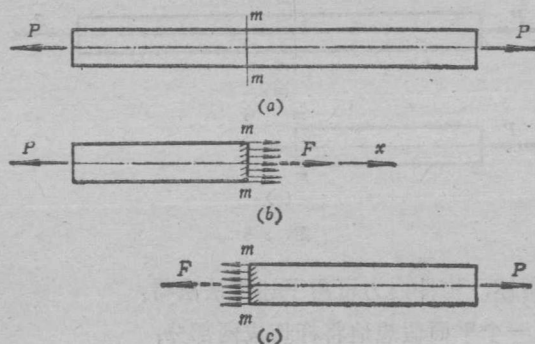


图 2-4

为了研究杆件内部的受力情况，首先在任一横截面 $m-m$ 处将其假想地切开，并任选一段，例如左段（图 2-4, b ），作为研究对象。左段原处于平衡状态，假想切开后仍应保持平衡。可见，在截面 $m-m$ 上，右段对左段必有作用力。设其合力为 F ，则由平衡方程 $\sum X = 0$ 可知，

$$F = P。$$

根据作用和反作用定律，在右段杆的截面 $m-m$ 上（图 2-4, c ），左段对右段也必作用有大小相等、方向相反的力，其合力仍等于 P 。

在外力作用下，构件内部相连两部分间的相互作用力称为**内力**。图 2-4(b)、(c)所示集中力 F ，即代表拉杆横截面上内力的合力。内力的合力（力或力偶）通常亦简称为**内力**。

对于图 2-5 所示压杆，同样可求出其横截面上的**内力**或**内力的合力**为

$$F = P。$$

可见，不论是拉杆，还是压杆，横截面上的**内力**均沿杆件轴线，这种**内力**称为**轴力**。轴力或为拉力（图 2-4, b 、 c ），或为压力（图 2-5, b ），为区别起见，通常将拉力规定为正的，将压力规定为负的。

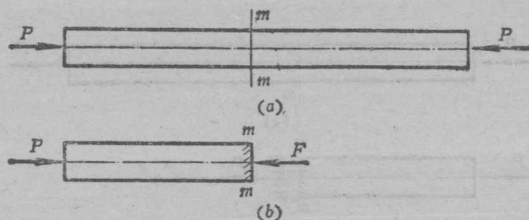


图 2-5

综上所述，构件**内力**可用下述方法求得：

1. 用一个平面假想地将杆切成两部分；
2. 移去一部分，保留一部分，并用**内力**代替移去部分对保

留部分的影响；

3. 根据保留部分的平衡条件，由已知外力计算内力。

上述方法称为截面法，它是材料力学中经常用到的方法。

现在，用截面法分析多力杆的内力。

图 2-6(a) 所示多力杆，承受三个轴向载荷。由于横截面 B 处作用有外力，杆件 AB 段和 BC 段的内力将不相同，因而需要分段研究。利用截面法，在 AB 段内任一横截面 1-1 处将杆切

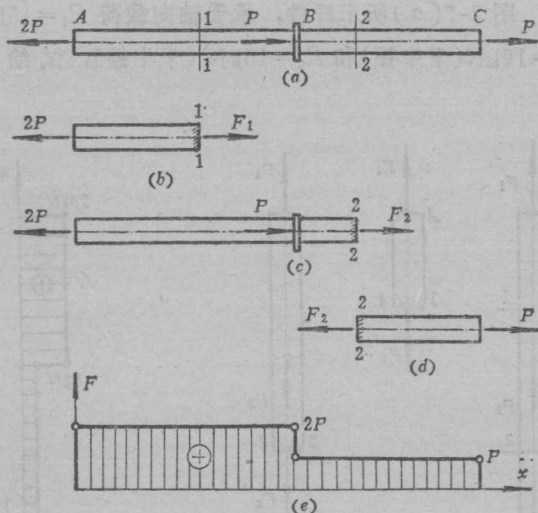


图 2-6

开，并选左段研究其平衡（图 2-6, b），显然， AB 段的轴力为

$$F_1 = 2P。$$

对于 BC 段，仍用截面法，在任一横截面 2-2 处将其切成两段（图 2-6, c、d），根据左段的平衡条件，得 BC 段轴力为

$$F_2 = 2P - P = P；$$

同样，若以右段为研究对象（图 2-6, d），根据右段的平衡条件，得

$$F_2 = P。$$

可见，无论选择哪一段为研究对象，计算结果均相同。

上述实例表明，在多力杆的不同杆段内，轴力将不相同。为了形象地表示轴力沿杆轴的变化情况，常采用图线表示法。作图时，沿杆轴方向取坐标表示横截面的位置，以垂直于杆轴的另一坐标表示轴力，这样，轴力沿杆轴的变化情况即可用图线表示，这种图线称为轴力图。例如，上述多力杆 AC 的轴力图即如图 2-6(e) 所示。

例 1 图 2-7(a) 所示杆件，承受轴向载荷 $P_1=15\text{kN}$ (千牛顿)、 $P_2=10\text{kN}$ (千牛顿) 和 $P_3=15\text{kN}$ (千牛顿)，试绘杆的轴力图。

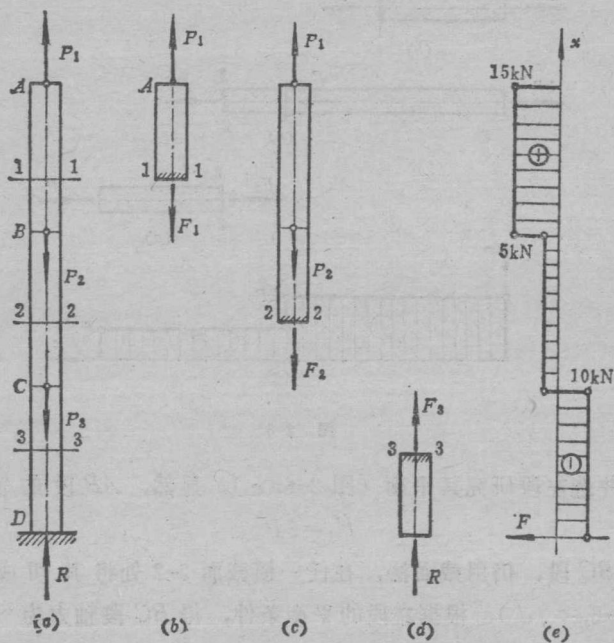


图 2-7

解 1. 计算支反力

设支反力为 R (图 2-7, a)，由平衡方程