

高等学校试用教材

GongCheng Lixue

工 程 力 学

[材料力学]

莫淑华 习宝琳 主编
姜宝林 王秋生 主审

人民交通出版社

内 容 提 要

本书是黑龙江省高等学校试用教材, 主要内容包括: 拉伸和压缩, 圆轴的扭转, 梁的弯曲, 联接件的强度计算, 应力状态和强度理论, 组合变形杆件的强度计算, 冲击应力和交变应力, 压杆稳定, 材料力学问题的数值解法等, 可供工程专科、电大、夜大、函大及中专学校学生使用, 也可供工程技术人员参考。

高等学校试用教材

工程力学

[材料力学]

莫淑华 习宝琳 主编

姜宝林 王秋生 主审

版式设计: 崔凤莲 责任校对: 张莹

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街 10 号)

各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

开本: 850× 1168 $\frac{1}{32}$ 印张: 8.75 字数: 23.5 千

1998 年 8 月 第 1 版

1998 年 8 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数: 0001- 3050 册 定价: 17.00 元

ISBN 7-114-03016-9

· TB · 00013

《工程力学》[材料力学]编委会名单

名誉主任：王光远 董 浩
主 任：杜善义 何钟怡
副 主 任：王致清 张 桥 苏 群
委 员：赵经文 王殿富 方广盛 王祥林 欧进萍
王 彪 姜宝林 莫淑华 刁宝琳 徐 胜
王秋生

主 编：莫淑华 刁宝琳
主 审：姜宝林 王秋生

前 言

本书是受黑龙江省高等教育力学专业委员会的委托,适应教育改革的需要,为我省高等学校工程专科基础力学课程编写的教材。

编写过程中,我们一方面严格遵循国家教委最新制定的高等学校工程专科基础力学课程的教学基本要求,并根据高等学校工程专科培养应用型人才的教育特点,努力以马克思主义世界观作指导,以“掌握基本概念,强化应用”,提高综合问题分析能力为主要目的;另一方面针对多年来基础力学课程本身在教学中存在的一些问题,对传统的体系作了必要的调整及优化,以通用的功能模块形式建立起新的课程内容体系。本书力求做到内容精炼、简明,结构严谨、合理,理论联系工程实际。本书采用符号均为 GB 3100 ~ 3102—93《量和单位》中规定的符号。

本书的主要特点:

(1)将基础力学中的理论力学、材料力学统一为工程力学,划分成四个功能模块,即静力学、材料力学、动力学、工程力学实验,可适用于工程专科一般专业的基础力学课程。

(2)加强了矢量分析与计算,应用数学手段,简化力学分析过程,侧重工程实际应用,强化综合问题的分析方法。

(3)增加力学问题的数值解法,提高应用计算机解决工程实际问题的能力。

(4)增设工程力学实验,强化学生从事工程实际的动手能力,加强用电测法、光测法等解决工程强度问题。

本书按功能模块分为四册,总学时约为 160 ~ 180 学时,可供工程专科、电大、夜大、函大及相近层次的学校等根据不同专业需

要,任意组合选用。通过本书的学习,读者能够解决工程实际问题中的一般力学问题,并为进一步阅读或学习其它力学著作打好基础。本书也供工程技术人员参考。

参加本书编写工作的人员有:莫淑华、习宝琳、王淑娟、蔡青、孙林、洪晓晖、姜艳、陆夏美、史红、郭玉敏、于英。

参加本书计算机调制及绘图的人员有:赵晓晨等。

在编写本书的过程中得到了黑龙江省教委、黑龙江省力学学会及有关学校、领导的大力支持和兄弟院校的热情指导和帮助,同时,还吸取了有关资料中的部分内容,在此表示衷心的感谢。

哈尔滨工业大学的赵经文教授、王殿富教授和东北林业大学的方广盛教授复审了书稿,西安交通大学的张陵教授对本书提出了许多宝贵的改进意见,在此谨致谢意。

由于水平有限,难免有不足和欠妥之处,欢迎读者提出宝贵意见。

目 录

引言.....	1
第一章 拉伸和压缩.....	3
§ 1-1 拉伸和压缩的概念	3
§ 1-2 轴力 轴力图	3
§ 1-3 拉杆(或压杆)横截面上的应力	6
§ 1-4 拉杆(或压杆)的变形 胡克定律	8
§ 1-5 材料在拉伸和压缩时的力学性质	11
§ 1-6 拉伸和压缩时的强度计算	16
§ 1-7 拉杆(或压杆)斜截面上的应力拉压破坏分析	19
§ 1-8 应力集中的概念	20
§ 1-9 拉压静不定问题	22
习题	27
第二章 圆轴的扭转	33
§ 2-1 概述	33
§ 2-2 扭矩和扭矩图	34
§ 2-3 切应力互等定理 剪切胡克定律	37
§ 2-4 圆轴扭转时的应力和变形	40
§ 2-5 圆轴扭转时的强度和刚度条件	45
§ 2-6 圆轴扭转时的破坏分析	48
习题	50
第三章 梁的弯曲	55
§ 3-1 概述	55
§ 3-2 梁横截面上的内力——切力和弯矩	58

§ 3-3	弯矩、切力、分布载荷集度之间的关系	63
§ 3-4	对称弯曲梁横截面上的正应力	66
§ 3-5	轴惯性矩 平行移轴公式	71
§ 3-6	对称弯曲梁横截面的切应力	74
§ 3-7	弯曲强度条件及其应用	79
§ 3-8	弯曲变形 挠曲线近似微分方程	82
§ 3-9	积分法求梁的变形	84
§ 3-10	叠加法求梁的变形	89
§ 3-11	梁的刚度条件及其应用	94
§ 3-12	提高梁强度和刚度的主要措施	95
§ 3-13	简单静不定梁	99
	习题	101
第四章 联接件的强度计算		
§ 4-1	概述	110
§ 4-2	剪切与挤压的实用计算	111
§ 4-3	铆钉(或螺栓)联接承受偏心载荷时的强度计 算	116
	习题	120
第五章 应力状态和强度理论		
§ 5-1	应力状态的概念	125
§ 5-2	平面应力状态分析	125
§ 5-3	三向应力状态的应力圆 最大切应力	133
§ 5-4	三向应力状态下应力与应变的关系应变比能	136
§ 5-5	强度理论简介	140
	习题	145
第六章 组合变形杆件的强度计算		
§ 6-1	概述	148
§ 6-2	拉(压)弯组合变形	148
§ 6-3	弯扭组合变形	153

习题.....	159
第七章 冲击应力 交变应力.....	164
§ 7-1 冲击应力	164
§ 7-2 交变应力的概念	169
§ 7-3 材料的持久极限	172
§ 7-4 影响构件持久极限的主要因素构件的 持久极限	175
习题.....	180
第八章 压杆稳定.....	182
§ 8-1 压杆稳定的概念 临界压力	182
§ 8-2 临界应力 经验公式	185
§ 8-3 压杆稳定性校核提高压杆稳定性的措施	189
习题.....	192
第九章 材料力学问题的数值解法.....	195
§ 9-1 轴向拉、压静定问题的数值解法	195
§ 9-2 直杆扭转静定问题的数值解法	203
§ 9-3 弯曲静定问题的数值解法	211
§ 9-4 组合变形的数值解法	224
附 录 型钢表.....	243
习题答案.....	259

引 言

机器或工程结构都是由许多零件或构件组成。当机器或工程结构工作时,每个零件或构件将承受一定的外力(载荷),为保证机器或工程结构能正常地工作,每个零件或构件都应具有足够的承载能力,其承载能力由以下三方面来衡量。

在外力作用下,零件或构件应具有抵抗破坏的能力,即应具有足够的强度。

在外力作用下,零件或构件应具有抵抗变形的能力,使其不发生过大的变形,即应具有足够的刚度。

在外力作用下,零件或构件应具有保持其原有平衡状态的能力,即应具有足够的稳定性。

零件或构件的承载能力,不仅与其几何尺寸和形状有关,还与所用材料的力学性质有关。一般说来,选用较大横截面尺寸或选用较好材料,能使零件或构件具有足够的承载能力,保证机器或工程结构安全工作。但这与降低消耗、减轻自重和节约资金相矛盾。

综上所述,材料力学是研究构件承载能力的科学,即研究构件强度、刚度和稳定性计算的科学。其任务是:在保证构件既安全又经济的条件下,为构件选择合适的材料、确定合理的截面形状和尺寸,为工程技术人员提供必要的理论基础和计算方法。

构件均由变形固体材料制成。变形固体材料的组成和微观结构是相当复杂的,其性质也是多方面的。在材料力学中,就变形固体材料与研究构件强度、刚度和稳定性有关的主要性质作出一些假设,将变形固体材料抽象为一种理想的材料模型。采用这些假设可使问题的分析与计算得以简化。其具体假设如下:

均匀连续性假设 这个假设认为组成变形固体的材料毫无空

隙地充满了变形固体的几何空间,而且变形固体内各点的力学性质完全相同。

各向同性假设 这个假设认为,变形固体材料在不同的方向上具有相同的力学性质。

小变形条件 小变形是指构件受力后产生的变形与构件的原始尺寸相比较十分微小。

实际构件形状多种多样,当构件的长度远大于其横向尺寸,则称其为杆。杆件各横截面形心的连线称为杆的轴线。轴线为直线,且各横截面形状和大小不变的杆,称为等截面直杆,简称等直杆。材料力学的研究对象主要是等直杆。

根据杆的受力情况,其变形形式有:拉伸和压缩、剪切、扭转、弯曲,以及组合变形。

第一章 拉伸和压缩

§ 1-1 拉伸和压缩的概念

如图 1-1 所示吊架的斜杆 AB 受到拉力 F_1 作用,而水平杆 BC 受到压力 F_2 作用,又如起重钢绳、油压机的立柱等,在工作时也受到拉力或压力作用。上述杆件的外形和加载方式虽不相同,但均可画成图 1-1 所示的计算简图。这类杆件所受外力的作用线与杆的轴线重合,杆件的变形为轴向伸长或缩短。这种变形称为轴向拉伸变形或轴向压缩变形,简称拉伸或压缩变形。

图 1-1

§ 1-2 轴力 轴力图

杆件工作时承受的载荷与支反力,对于一个杆件来说都属于它的外力。在外力作用下,杆件发生变形,杆件各部分之间发生相对位置改变,由此而引起杆件各部分之间的相互作用称为杆件的内力。由于变形固体有弹性,内力能抵抗外力引起的变形,故内力与杆件的刚度密切相关。内力随外力的增加而变大,达到一定限度

时,就会导致杆件的破坏,故内力与杆件的强度密切相关。可见,研究杆件的内力是非常重要的。

研究杆件的内力采用截面法。为了求图 1-2a 所示处于平衡状态杆件横截面 $m - m$ 上的内力,需要将该截面上的内力显示出来。

图 1-2

为此用一平面假想地将杆沿截面 $m - m$ 截开,分为 I 和 II 两部分。因每个部分仍应处于平衡状态,故 I、II 部分之间在截面 $m - m$ 上必然有相互作用的力,以保持各自的平衡,I 与 II 部分之间的相互作用力就是杆件在截面 $m - m$ 上的内力,该内力可根据 I 或 II 部分中的任意部分的平衡条件求得,即用平衡方程由已知外力求得该截面上的内力。由均匀连续假设可知,内力是一个分布内力系,应用平衡方程只能求得该分布内力系的合力 N 。如取 I 部分为研究对象,列平衡方程(图 1-2b)

$$\sum X = 0, \quad N - F = 0 \quad N = F$$

由于合力 N 的作用线与杆的轴线重合,故称 N 为轴力。若轴力的指向与横截面的外法线方向一致时,则杆件产生拉伸变形,该轴力称为拉力;反之称为压力。通常将拉力规定为正,压力规定为负。用截面法求轴力时,可先假设为拉力。

若沿杆轴线作用的外力较多时,则杆件各部分的横截面上的轴力不同。这时应分别用截面法求出每段杆的轴力,并用轴力图表示出轴力沿杆轴线的变化情况。轴力图的做法是:选取一个坐标系,其横坐标轴与杆轴线平行,用横坐标表示杆横截面的位置,用纵坐标表示相应横截面上的轴力;将拉力(正值)画在横坐标轴的上侧,压力(负值)画在横坐标的下侧。

例 1-1 求图 1-3a 所示杆件的轴力,并画出轴力图。已知 F_1

$= 3\text{kN}$, $F_2 = 2\text{kN}$ 。

图 1-3

解:(1)求支座反力 由杆 ABC 整体的平衡条件 $\sum X = 0$, 求得固定端处的支反力 F_A (图 1-3b)

$$F_A = F_1 - F_2 = 3 - 2 = 1\text{ kN}$$

(2)求各段杆的轴力:沿截面 I-I 将 AC 杆截开,取左段为研究对象,用 N_1 表示该截面的轴力,如图 1-3c 所示。由其平衡条件 $\sum X = 0$, 求得

$$N_1 = F_A = 1\text{ kN (拉力)}$$

沿截面 II-II 将杆 AC 截开,取左段为研究对象,用 N_2 表示该截面上的轴力,如图 1-3d 所示。由该段的平衡条件 $\sum X = 0$, 求得

$$N_2 = F_A - F_1 = 1 - 3 = -2\text{ kN (压力)}$$

(3)画轴力图 由求得的 N_1 和 N_2 ,按一定的比例尺画出轴力图,如图 1-3 e 所示。

截面法求内力的步骤归纳如下:沿着所求内力的截面,假想地将杆截成两部分;选取其中任意一部分为研究对象;并画出另一部分对该部分的作用力;必须假设该内力为正值拉力;根据所研究部分的平衡条件,由已知外力确定未知内力。

§ 1-3 拉杆(或压杆)横截面上的应力

1. 应力的概念

截面法只能求得某截面上分布内力系的合力,一般情况下,分布内力系并非均匀分布,为了描述截面上某点处受力的强弱程度和分布内力系的情况,引入应力的概念。设在截面上某点 K 的周围取微面积 A , A 上内力的合力为 P ,如图 1-4a 所示,则比值

$$p_m = \frac{P}{A} \quad (1-1)$$

表示出 A 上内力的强弱程度, p_m 称为 A 上的平均应力,或称为

图 1-4

内力的平均集度。因内力并非均匀分布,故平均应力 p_m 随所取 A 的大小而变化,为了精确地反映出 K 点处内力的强弱程度,应使 A 无限缩小,使之逼近 K 点,平均应力的极限(用 p 表示)

$$p = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{P}{A} = \frac{dP}{dA}$$

才能真实地表明 K 点处的内力集度,称为 K 点的应力。

K 点的应力 p 是一个矢量。一般情况下,它既不垂直于截面,也不与截面相切。常将 p 分解为垂直于截面的分量 p_n 和与截面相切的分量 p_t ,如图 1-4b 所示。称为正应力,称为切应力,而 p 称为全应力,三者之间的关系为

$$p^2 = p_n^2 + p_t^2$$

在国际单位制中,应力的基本单位是 N/m^2 (牛顿/米²),称为帕斯卡,简称帕,其符号为 Pa。在工程中通常使用兆帕,其符号为

MPa , $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 10^6 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ N/mm}^2$ 。有时还使用吉帕, 其符号为 GPa , $1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa}$ 。

2. 拉杆(或压杆)横截面上的应力

取一横截面面积为 A 的等直杆, 在其表面画上与杆轴线垂直的直线 $m - m$ 和 $n - n$, 如图 1-5a 所示。然后施加拉力 F 使其变形, 可以看到, 直线 $m - m$ 和 $n - n$ 分别平移至 $m' - m'$ 和 $n' - n'$ 的位置。根据观察到的变形现象, 从变形的可能性出发, 作出如下假设, 横截面在变形后仍为垂直于杆轴线的平面。该假设称为平面假设。

图 1-5

设想拉杆是由无数条纵向纤维所组成, 由平面假设可知, 拉杆任意两个横截面间的所有纵向纤维只产生伸长变形, 且各条纵向纤维伸长量相等。前者说明横截面上只有正应力; 后者说明横截面上各点的正应力相等, 其分布情况如图 1-5b 所示。于是, 直杆拉伸时横截面上的正应力为

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

上式也适用于直杆压缩情况。正应力符号规则与轴力符号规则相同, 即正号表示拉应力, 负号表示压应力。

例 1-2 试计算如图 1-6a 所示杆横截面上的最大正应

图 1-6

力。已知 $d_1 = 20 \text{ mm}$, $d_2 = 30 \text{ mm}$, $F_1 = 20 \text{ kN}$, $F_2 = 50 \text{ kN}$ 。

解: 1. 作出杆的轴力图, 如图 1-6b 所示。

2. 计算各段杆的应力 每段杆的应力分别为

$$= \frac{N_1}{A_1} = \frac{20 \times 10^3}{20^2 / 4} = 63.7 \text{ M Pa (拉应力)}$$

图 1-7

$$= \frac{N_2}{A_2} = - \frac{30 \times 10^3}{30^2 / 4} = - 42.5 \text{ M Pa (压应力)}$$

由计算结果可知, 杆内最大正应力为 63.7 M Pa , 发生在 AB 段, 是拉应力。

例 1-3 如图 1-7a 所示支架, 其水平圆杆直径 $d = 30 \text{ mm}$, 矩形截面斜杆的尺寸为 $60 \times 100 \text{ mm}^2$, $\tan = 3/4$, $F = 24 \text{ kN}$ 。试求各杆的正应力。

解: 由图 1-7b 所示受力图, 用平衡条件可求得 $N_1 = 32 \text{ kN}$, $N_2 = - 40 \text{ kN}$ 。

各杆的正应力分别为

$$= \frac{N_1}{A_1} = \frac{32 \times 10^3}{30^2 / 4} = 45.3 \text{ M Pa (拉应力)}$$
$$= \frac{N_2}{A_2} = - \frac{40 \times 10^3}{60 \times 100} = - 6.67 \text{ M Pa (压应力)}$$

§ 1-4 拉杆(或压杆)的变形 胡克定律

直杆受到轴向拉力(或压力)作用时, 将使杆轴向伸长(或缩

短)和横向尺寸减小(或增大),其变形情况如图 1-8 所示。杆长度的改变量为

$$l = l_1 - l$$

l 称为杆的纵向绝对变形,其大小与杆原长 l 等有关。为了度量杆的变形程度,必须计算单位长度的变形量。对于轴力为常数的等直杆。其变形处处相同,因此可用比值

$$= \frac{l}{l}$$

表示杆的纵向变形程度,称为杆的纵向线应变,或称为纵向正应变,它是一个无量纲的量。

图 1-8

同理,横向变形程度用比值

$$= \frac{a}{a} = \frac{a_1 - a}{a}$$

来表示,称为横向应变。

实验表明,在弹性范围内横向应变与纵向应变成正比,即

$$= -$$

式中,比例常数 μ 称为横向变形系数,或称为泊松比,它是一个无量纲的量,其数值与材料有关。

实验表明,当杆件横截面上的正应力 σ 未超过某极限值时,杆件的绝对变形量 l 与轴力 N 、杆长 l 成正比,与杆横截面面积 A 成反比,引进比例常数 E ,可有

$$l = \frac{Nl}{EA} \tag{1-2}$$

将式 $\sigma = N/A$ 及 $\epsilon = l/l$ 代入上式,得

$$\sigma = E \epsilon$$