

# 材料力学

【第二版】

【宝范 吴家骥 编 陈维新 主编】

高等教育出版社

本书是根据教育部 1980 年审订的 60 学时材料力学教学大纲(草案)的要求,将华东化工学院与无锡轻工业学院合编的《工程力学》1979 年版中的材料力学部分进行修订,单独成册,并以《材料力学》书名出版。

本书内容包括:绪论及基本概念,拉伸与压缩,剪切,扭转,平面弯曲,复杂应力状态及强度理论,组合变形时杆件的强度计算,压杆稳定,动载荷,交变应力等十章。

本书适合作高等工业学校化工、轻工等类专业的教材,也可供其他专业(60 学时左右)选用。

高等学校教材

材料力学

(第二版)

贾宝范 吴家骥 编

陈维新 主编

\*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

北京印刷三厂印装

\*

开本 850×1168 1/32 印张 11.5 字数 278,000

1986 年 3 月第 2 版 1986 年 3 月第 1 次印刷

印数 00,001—17,120

书号 15010·0694 定价 2.10 元

## 第二版前言

本书是根据教育部1980年审订的60学时材料力学教学大纲(草案)的要求,将华东化工学院与无锡轻工业学院合编的《工程力学》(1979年版)中的材料力学部分进行修订,单独成册,并以《材料力学》书名出版。

本书对有些章节作了增删和修改。例如:增加了应力圆、\*扭转变形能、\*圆柱形密封圈螺旋弹簧、\*用叠加法作弯矩图等内容;删去了原来用解析法求主应力、主平面的内容。

书中注有“\*”号的题材,根据专业需要,可选择讲授。

各章都补充了一部分习题,难易都有,以供选用。

本书修订分工如下:

华东化工学院贾宝范编写第五、六、七、八章;无锡轻工业学院吴家骥编写第一、二、三、四、九、十章;陈维新负责主编。

在修订过程中,承蒙材料力学教材编审小组、高等教育出版社和兄弟院校给予大力支持。华东化工学院和无锡轻工业学院的有关同志对本书提出了很多有益的意见。书中增补的和重画的插图是由华东化工学院费志亨同志描绘的。还有些同志对验算习题解答、缮写和校对誊清稿,做了大量工作。在此一并致谢。

本书承大连工学院郑芳怀同志和南京工学院胡增强同志审阅,他们提供了许多宝贵的意见和建议,谨此表示衷心的感谢。

限于编者的水平,书中缺点和不妥之处在所难免。请广大教师和读者指正,以便今后加以改进。

编 者

1984年10月

• 1 •

### 主要字符表

字 符	字 符 意 义	常 用 单 位
$F, P$	集中力	kN, N
$G$	重 力	kN, N
$T$	张 力	kN, N
$T$	动 能	J
$V$	位 能	J
$R$	合力, 约束反力	kN, N
$p$	压强(内压力)	Pa, MPa
$q$	连续分布载荷集度	N/m
$X, Y, Z$	力的投影	kN, N
$H$	水平约束反力	kN, N
$V$	垂直约束反力	kN, N
$x, y, z$	坐标轴	—
$x_c, y_c, z_c$	重心(形心)、质心坐标	m, mm
$\alpha_\sigma$	应力集中系数	—
$\alpha$	角 度	°
$a$	内径/外径	—
$M_T$	扭 矩	N·m
$M$	力偶矩, 弯矩	N·m
$m$	集中力偶矩	N·m
$m$	质 量	kg
$V$	体 积	m <sup>3</sup> , mm <sup>3</sup>
$A$	面 积	m <sup>2</sup> , mm <sup>2</sup>
$\sigma$	正应力	Pa, MPa
$\tau$	剪应力	Pa, MPa
$[\sigma]$	许用正应力	Pa, MPa
$[\tau]$	许用剪应力	Pa, MPa
$\varepsilon$	线应变	—
$\gamma$	角应变	—
$\sigma_p$	比例极限	Pa, MPa
$\sigma_b$	强度极限	Pa, MPa
$\sigma_s$	屈服极限	Pa, MPa
$\sigma_{0.2}$	名义屈服极限	Pa, MPa
$\sigma_{oru}$	挤压应力	Pa, MPa

续表

字 符	字 符 意 义	常 用 单 位
$[\sigma_{cr}]$	许用挤压应力	Pa, MPa
$\sigma_m$	平均应力	Pa, MPa
$\sigma^0$	危险应力	Pa, MPa
$E$	拉压弹性模量	Pa, GPa
$G$	剪切弹性模量	Pa, GPa
$\mu$	横向变形系数(泊松比)	—
$\delta$	延伸率	—
$\psi$	截面收缩率	—
$l$	长 度	m, mm
$\Delta l$	绝对伸长(缩短)	m, mm
$n, n_s, n_t$	安全系数	—
$n$	转 数	转/分
$W$	功	J
$N, N_K$	功 率	HP, kW
$U$	变形能	J
$u$	能密度	J/m <sup>3</sup>
$D, d$	直 径	m, mm
$R, r$	半 径	m, mm
$N$	轴 力	kN, N
$Q$	剪力, 惯性力	kN, N
$I_p$	极惯矩	m <sup>4</sup> , mm <sup>4</sup>
$W_p$	抗扭截面模量	m <sup>3</sup> , mm <sup>3</sup>
$\varphi$	扭转角, 角位移	rad
$\varphi$	折减系数, 焊缝系数	—
$\theta$	单位长度扭转角	°/m
$\theta$	体积应变	—
$\theta$	梁的转角	rad
$y$	梁的挠度	mm
$f$	梁的最大挠度	mm
$t$	壁 厚	mm
$I_y, I_z$	轴惯矩	m <sup>4</sup> , mm <sup>4</sup>
$W_y, W_z$	抗弯截面模量	m <sup>3</sup> , mm <sup>3</sup>
$S_y, S_z$	静 矩	m <sup>3</sup> , mm <sup>3</sup>
$s$	距 离	m, mm

续表

字 符	字 符 意 义	常 用 单 位
$u_v$	体积改变的能密度	J/m <sup>3</sup>
$u_f$	形状改变的能密度	J/m <sup>3</sup>
$P_{cr}$	临界载荷	kN, N
$i$	惯性半径,	m, mm
$\lambda$	柔度	—
$n_{cr}$	稳定安全系数	—
$[\sigma_{cr}]$	稳定许用应力	Pa, MPa
$\sigma_{cr}$	临界应力	Pa, MPa
$\sigma_{st}$	静应力	Pa, MPa
$\sigma_d$	动应力	Pa, MPa
$r$	循环特征	—
$\sigma_s, \tau_s$	应力振幅	Pa, MPa
$\sigma_{max}, \sigma_{min}$	最大正应力, 最小正应力	Pa, MPa
$\sigma_m, \tau_m$	平均应力	Pa, MPa
$\sigma_{-1}, \tau_{-1}$	对称循环的持久极限	Pa, MPa
$K_\sigma, K_\tau$	有效应力集中系数	—
$\varepsilon_\sigma, \varepsilon_\tau$	绝对尺寸影响系数	—
$\beta$	表面质量系数	—
$[n]$	许用安全系数	—
$t$	时间	s
$v$	速度	m/s <sup>2</sup> , mm/s <sup>2</sup>
$a$	加速度	m/s <sup>2</sup> , mm/s <sup>2</sup>
$a_n$	法向加速度	m/s, mm/s
$\omega$	角速度	rad/s
$C$	弹簧系数	N/m, N/mm
$\Delta$	弹簧伸长	m, mm
$\Delta_{st}$	静伸长	m, mm
$\sigma_r$	径向正应力	Pa, MPa
$\sigma_t$	周向正应力	Pa, MPa
$\sigma_z$	轴向正应力	Pa, MPa
$\rho$	曲率半径	m, mm
$K_d$	动荷系数	—

# 目 录

## 主要字符表

<b>第一章 绪论及基本概念</b> .....	1
§ 1-1 材料力学的任务.....	1
§ 1-2 变形固体的性质及其基本假设.....	2
§ 1-3 材料力学研究的主要对象——杆件及杆件变形的基本形式.....	4
<b>第二章 拉伸与压缩</b> .....	8
§ 2-1 轴向拉伸与压缩的概念和实例.....	8
§ 2-2 轴向拉伸与压缩时直杆横截面上的内力和应力.....	9
§ 2-3 轴向拉伸与压缩时直杆斜截面上的应力.....	15
§ 2-4 许用应力 拉伸与压缩时的强度条件.....	17
§ 2-5 轴向拉伸与压缩时的变形.....	22
§ 2-6 拉伸时材料的机械性质.....	26
§ 2-7 压缩时材料的机械性质.....	34
§ 2-8 变形能的概念.....	37
* § 2-9 温度对材料机械性质的影响.....	40
* § 2-10 材料的蠕变和松弛现象.....	41
§ 2-11 应力集中现象的概念.....	42
§ 2-12 安全系数的选择.....	43
§ 2-13 简单拉、压超静定问题的解法.....	46
习题.....	54
<b>第三章 剪切</b> .....	61
§ 3-1 剪切的观念和实例.....	61
§ 3-2 剪切和挤压的假定计算及其强度条件.....	62
习题.....	72
<b>第四章 扭转</b> .....	76
§ 4-1 扭转的概念和实例.....	76

§ 4-2	外力偶矩和扭矩的计算	78
§ 4-3	纯剪切的的概念 剪切虎克定律	82
§ 4-4	圆轴扭转时的应力和变形	85
§ 4-5	圆轴扭转时的强度和刚度条件	91
* § 4-6	扭转时的变形能	96
* § 4-7	密圈螺旋弹簧	97
	习题	100
<b>第五章</b>	<b>平面弯曲</b>	<b>106</b>
§ 5-1	弯曲的概念和实例	106
§ 5-2	梁的支座及其反力	108
§ 5-3	剪力和弯矩	112
§ 5-4	剪力图和弯矩图	115
§ 5-5	弯矩、剪力和分布载荷集度之间的微分关系	123
* § 5-6	用叠加法作弯矩图	127
§ 5-7	弯曲时梁的正应力	129
§ 5-8	常用截面的惯矩 平行移轴公式	136
§ 5-9	弯曲正应力的强度条件	143
§ 5-10	直梁弯曲时的剪应力及其强度条件	150
§ 5-11	梁的合理截面	156
§ 5-12	梁的挠度和转角	158
§ 5-13	挠曲线的近似微分方程及其积分	160
§ 5-14	用叠加原理求梁的变形	171
§ 5-15	梁的刚度校核	174
§ 5-16	简单超静定梁的解法	175
	习题	180
<b>第六章</b>	<b>复杂应力状态及强度理论</b>	<b>195</b>
§ 6-1	一点应力状态的概念	195
§ 6-2	复杂应力状态实例——薄壁容器的计算	198
§ 6-3	平面应力状态的分析	200
§ 6-4	平面应力状态分析的图解法——应力圆	204
§ 6-5	三向应力状态中的最大应力	213
§ 6-6	广义虎克定律	215



§ 6-7 复杂应力状态下的能密度·····	218
§ 6-8 强度理论·····	220
习题·····	227
<b>第七章 组合变形时杆件的强度计算</b> ·····	<b>232</b>
§ 7-1 概述·····	232
§ 7-2 弯曲与拉伸或压缩的组合·····	233
§ 7-3 偏心拉伸或压缩·····	242
§ 7-4 扭转与弯曲的组合·····	247
习题·····	253
<b>第八章 压杆稳定</b> ·····	<b>260</b>
§ 8-1 压杆稳定的概念·····	260
§ 8-2 细长压杆的临界载荷——欧拉公式·····	262
§ 8-3 欧拉公式的适用范围·····	267
§ 8-4 压杆稳定的实用计算·····	272
§ 8-5 压杆的截面形状和材料的选择·····	279
习题·····	282
<b>第九章 动载荷</b> ·····	<b>286</b>
§ 9-1 动载荷的概念·····	286
§ 9-2 构件作匀加速直线运动和匀速转动时的应力计算·····	287
§ 9-3 构件受冲击时的应力和变形计算·····	292
* § 9-4 提高构件抵抗冲击能力的措施·····	301
习题·····	303
<b>第十章 交变应力</b> ·····	<b>307</b>
§ 10-1 交变应力的概念和疲劳破坏现象·····	307
§ 10-2 交变应力的循环特征·····	309
§ 10-3 对称循环下构件的持久极限及强度条件·····	313
* § 10-4 提高构件持久极限的方法·····	324
习题·····	325
习题答案·····	326
附录 I 型钢表·····	336
附录 II 主要材料的机械性质表·····	356

# 第一章 绪论及基本概念

## § 1-1 材料力学的任务

在化工、轻工等工业生产中，有大量的结构、设备和机器。这些结构、设备和机器都是由构件组成的。所谓构件就是用以组成结构、设备和机器的元件。

当结构、设备和机器工作(即承受载荷或作机械运动)时，构件将受到一定的载荷作用。分析这些构件在其载荷作用下，是否能安全可靠地进行正常工作，就是材料力学所要研究的内容。

只有保证结构、设备和机器的每一个构件在载荷作用下能正常工作，才能保证结构、设备和机器的正常工作。要达到这一目的，构件必须满足下述几个要求：

(1) 构件在载荷作用下必须不致破坏，或者说，构件必须具有足够的强度。

(2) 构件在载荷作用下的变形必须在许可的范围内，或者说，构件必须具有足够的刚度。这是因为对某些构件来讲，在载荷作用下虽然没有破坏，但因其变形超过了许可的范围，往往就不能正常工作。

(3) 在载荷作用下，构件必须保持其原有的平衡状态，或者说，构件必须具有足够的稳定性。这是因为构件一失去其原有的平衡状态，也就不能正常工作，甚至会引起构件或整个结构、设备和机器的坍塌破坏。

设计构件时，必须满足上述所提到的强度、刚度和稳定性三方面的要求。

在保证构件满足上述三方面要求的同时，要尽量选用适当的材料和减少材料的消耗量，以达到节约资金的经济要求。

综上所述，材料力学的任务就是对构件进行强度、刚度和稳定性的分析和计算，在保证构件能正常、安全地工作的前提下最经济地使用材料。

在材料力学中，为进行上述的分析和计算，不仅要研究构件的受力状态与变形之间的关系，还要研究材料在不同条件下(不同的受力方式和温度等)的机械性质。材料的机械性质也称为力学性质。

保证构件的安全和最经济地使用材料，是两个反映在生产上的相互矛盾的基本要求，因为前者常常要求多用材料，而后者则要求少用材料，这一矛盾促进了材料力学不断地向前发展。

## § 1-2 变形固体的性质及其基本假设

在理论力学中，将研究的物体看成是刚体，即假定受力后物体的几何形状和尺寸是不变的。实际上，刚体是不存在的，任何物体在外力作用下都将发生变形，而且当外力达到某一定值时，物体还会发生破坏。在理论力学中，构件的微小变形对静力平衡和运动分析是一个次要的因素，故可不加考虑；但在材料力学中，研究的是构件的强度、刚度以及稳定性等问题，对于这些问题，构件的变形虽然很小，却是一个主要的因素，必须加以考虑而不能忽略。所以在材料力学中，所研究的一切物体都是变形固体。

外力使组成物体的各微粒之间的位置发生相对变动，物体就产生变形。同时，一般物体都具有一定的抵抗这种变形的能力，即在外力除去之后，物体能完全或部分地恢复其原有的形状。变形固体的这个重要性质，称为弹性。

物体的变形可分为两种：一种是除去外力后自行消失的变形，

称为弹性变形；另一种是除去外力后不能消失的变形，称为塑性变形或残余变形。物体所具有的能产生较大残余变形的性质，称为塑性。

实践指出，对于用金属、木材等常用材料制成的构件，当所受外力不超过某一限度时，可以将变形看成是完全弹性的，这个变形阶段称为弹性阶段；若外力超过了这一限度，构件就要发生显著的塑性变形，就不能再看成是完全弹性的。在材料力学中，主要研究材料在弹性阶段内的受力性质。

下面介绍几个关于变形固体的基本假设和有关的概念，作为理论分析的基础。

(1) 材料的均匀连续假设 假设物体的性质在各处都是相同的，而且构成物体的物质是毫无间隙地充满了物体的整个几何容积。

实际上，组成物体各微粒(或原子)之间是有空隙的，物体的性质也不是各处都相同的。但要根据物体的粒子构造来研究物体的受力情况和变形就非常复杂。由于研究的物体比组成它的微粒或原子以及微粒、原子之间的空隙要大得很多，而且微粒、原子的排列也是不规则的，所以将物体看成均匀连续体在宏观上是合理的。实践证明，根据这个假设所得的理论与用一般尺寸的试件所作实验结果甚为一致。因此，在材料力学中，对物体的材料可假设为均匀连续的。

这个假设，对于钢、铜等金属材料是合适的；对于砖、石、混凝土等材料则较差，但仍被采用。

根据这个假设，我们可以认为物体内各处的变形、位移等物理量都是连续的，因此可以用位置坐标的连续函数来表示；同时，我们还可以从物体的任何部分取出无限小单元体来进行研究<sup>①</sup>，并

<sup>①</sup> 材料力学中所取的无限小单元体，是远远大于分子的。

且将由实验中所得到的材料性质,用到这种单元体上去。

(2) **材料的各向同性假设** 假定材料在各个不同的方向都具有相同的力学性质。

铸钢、铸铜和浇注得很好的混凝土,一般当作各向同性材料。有些材料,如钢丝、轧钢、纤维整齐的木材等,只在一定的方向上才有相同的力学性质,它们都是各向异性材料。

(3) **小变形假设** 即假定物体的几何形状及尺寸的改变与其总尺寸相比较是很微小的。

由于物体的变形很小,因而在建立静力平衡方程或用到物体尺寸时,可以采用变形前的尺寸和形状。这样就使实际计算大为简化,由此所引起的误差一般非常微小。

除上述几项基本假设外,在材料力学中还将采用一些简化内力及变形的假设,在后面有关章节中再分别介绍。

### § 1-3 材料力学研究的主要对象——杆件 杆件变形的基本形式

生产实践中遇到的构件,形状是多种多样的,有杆、板和壳等,其中杆是材料力学的主要研究对象。在本教材中,只研究直杆。

一个构件,若它的长度远大于它的横向尺寸,就称为杆件或杆。杆件有两个主要的几何因素,即轴线和横截面,前者是杆的各截面的形心连线(如图 1-1 中所示的点划线),后者是垂直于轴线的截面(如图 1-1 中虚线所示的截面)。轴线为曲线的杆称为曲杆,

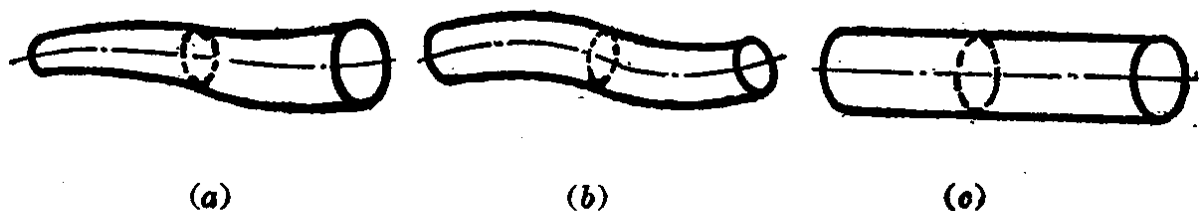


图 1-1

见图 1-1, *a* 及 *b*; 轴线为直线的杆称为直杆, 见图 1-1, *c*。通过直杆轴线的截面, 称为杆的纵截面, 如图 1-2 所示的平面 *E*。根据杆的各横截面相等或不相等, 可以把杆分为等截面杆, 见图 1-1*b*, 及 *c*, 以及变截面杆, 见图 1-1, *a*。

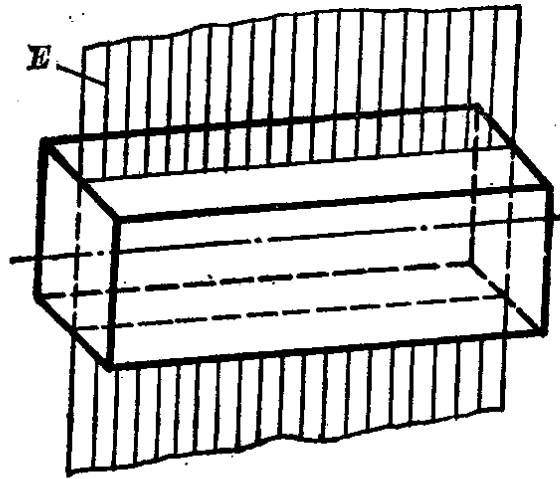


图 1-2

若构件的厚度远小于其它两个方向的尺寸, 则称为板或壳。中面为平面的称为板, 见图 1-3, *a*; 中面为曲面的称为壳, 见图 1-3, *b*。

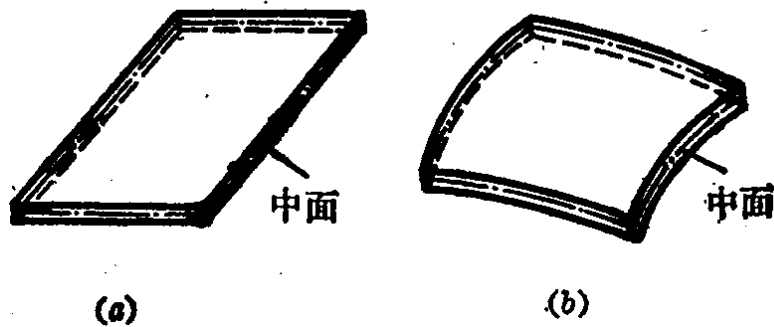


图 1-3

由于外力作用, 杆件产生的变形是各种各样的, 但基本变形有下列几种形式:

(1) 轴向拉伸及压缩 在图 1-4, *a* 中三角形支架的 *AB* 杆, 受到沿轴线的拉力作用, 产生拉伸变形, 见图 1-4, *b*; 而 *AC* 杆受到沿轴线的压力作用, 产生压缩变形, 见图 1-4, *c*。

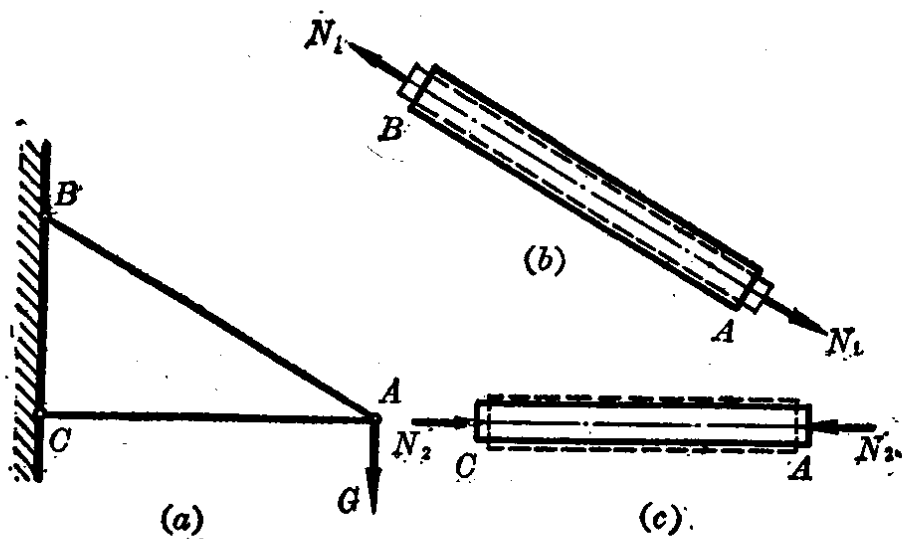


图 1-4

(2) 剪切 图 1-5 所示的杆件，受到一对相距很近、方向相反的横向力  $P$  作用，就产生剪切变形。

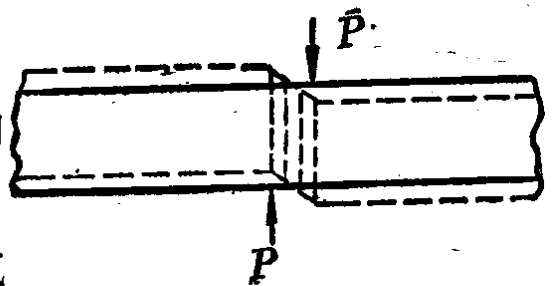


图 1-5

(3) 扭转 图 1-6, a 所示为汽车方向盘的驾驶杆，在工作时受到如图 1-6, b 所示的力偶作用，杆件即产生扭转变形。

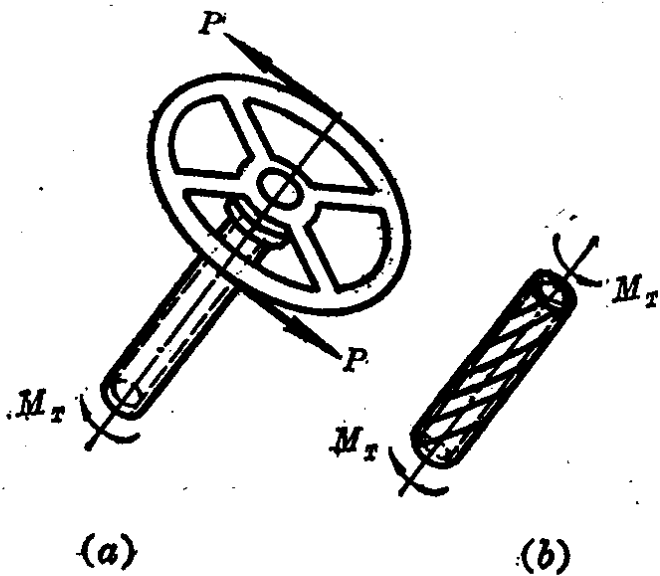


图 1-6

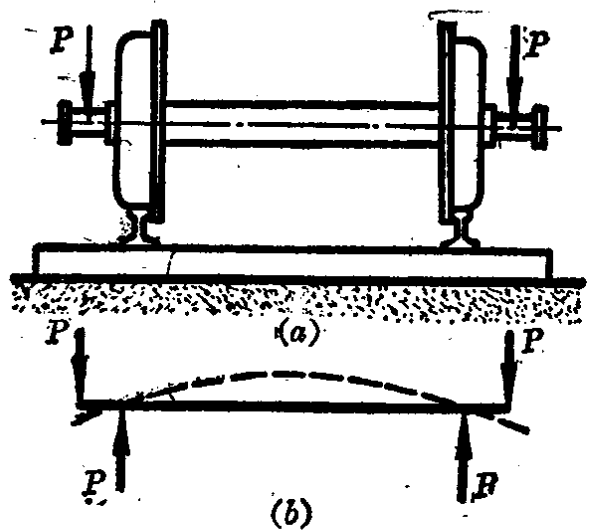


图 1-7

(4) 弯曲 图 1-7, a 所示的火车轮轴，在工作时受到如图 1-7, b 所示的作用于纵截面内的力偶作用，杆件将产生弯曲变形。

在工程实践中,有时杆件的变形较为复杂,不过总可以看成是由上述几种基本变形组合而成的,并称之为组合变形。

作用在构件上的载荷,按载荷作用的性质,可以分为静载荷与动载荷。所谓静载荷是指很缓慢地加到构件上的载荷,而且以后就不再改变,或者改变得很缓慢。在静载荷作用下,构件内各质点不产生加速度,或加速度很小,可以略去不计;也就是说;可以认为物体的各部分都处于静力平衡状态。

若载荷随时间而显著变化,就是动载荷。在动载荷作用下,构件内各质点将引起显著的加速度。冲击载荷和交变载荷都是动载荷。

在静载荷和动载荷作用下,材料的性质有较大的差异。由于静载荷的问题较为简单,而且为研究静载荷而建立的理论和方法,又是解决动载荷问题的基础,所以在材料力学中,首先研究静载荷问题。



## 第二章 拉伸与压缩

### § 2-1 轴向拉伸与压缩的概念和实例

轴向拉伸与轴向压缩(也称为简单拉伸与简单压缩),是指等直杆在其两端沿着轴线受到拉力而伸长与受到压力而缩短。在工程实际中,构件受到轴向拉伸或压缩的实例很多。如图 2-1 所示的旋臂式吊车中,  $AB$  和  $AC$  两杆就是受到轴向拉伸和轴向压缩的

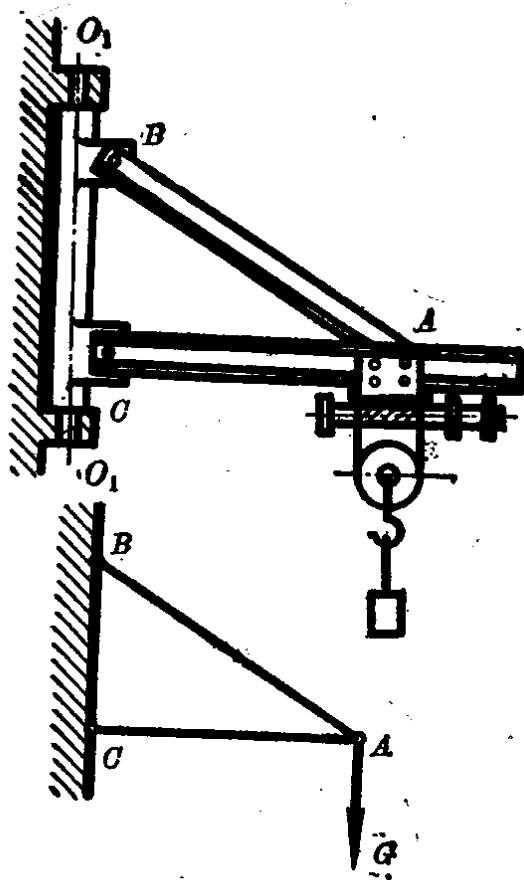


图 2-1

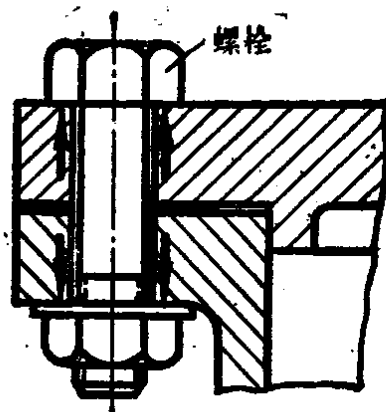


图 2-2

构件。又如紧固法兰用的螺栓(图 2-2), 拉床的拉刀等都是受拉伸作用的构件; 内燃机的连杆(图 2-3), 容器支架的立柱(图 2-4)等都是受压缩作用的构件。这些构件都可看作受轴向拉、压的直