



西安交通大学

XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



“十五”规划教材

材料力学

蔡怀崇 闵行 主编



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

材 料 力 学

蔡怀崇 闵 行 主编

蔡怀崇 闵 行 凌 伟 编
刘书静 殷 民

西安交通大学出版社

• 西安 •

内容提要

本书是西安交通大学“十五”规划的基础力学教材。全书共分 15 章及 3 个附录。正文包括杆件基本变形和组合变形的强度和刚度问题以及能量法等 6 个专题。

本书注重理论联系工程实际,反映现代强度设计新方法。各章注意精选适合不同层次学生要求的典型例题、讨论题、思考题和配套习题。

本书是高学时材料力学课程的教学用书,删去部分内容可供中学时材料力学教学使用。也可供高等职业大学和成人教育学院师生及有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学/蔡怀崇,闵行主编. —西安:西安交通大学出版社,2004.2
ISBN 7-5605-1819-2

I. 材… II. ①蔡…②闵… III. 材料力学-高等学校-教材 IV. TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 119316 号

书 名:材料力学
主 编:蔡怀崇 闵 行
出版发行:西安交通大学出版社
地 址:西安市兴庆南路 25 号(邮编:710049)
电 话:(029)82668315 82669096(总编办)
(029)82668357 82667874(发行部)
印 刷:西安新视点印务有限责任公司
字 数:420 千字
开 本:727 mm×960 mm 1/16
印 张:23
版 次:2004 年 2 月第 1 版 2006 年 12 月第 3 次印刷
印 数:6 001~8 000
书 号:ISBN 7-5605-1819-2/O·204
定 价:25.00 元

前 言

本教材是高学时材料力学教材,适用于 70~80 学时的机械、能源、动力、材料、力学和土木工程等专业。删去部分内容可供中学时材料力学教学使用。

随着教学改革的不深入,学时减少和教学要求提高的矛盾日益突出。本教材力求贯彻教学改革精神:在基本内容和基本概念的叙述上力求简明;注重理论联系工程实际,反映现代强度设计的新观点和新方法;注意培养学生的科学思维方法、分析解决实际问题的能力和创新精神;便于自学等。

本教材改变了基本变形应力公式推导的传统方法;各章注意精选适合不同层次学生要求的典型例题、讨论题、思考题和配套习题,给教师在组织教学、安排课堂讨论时,提供了方便,为学生提供了自主学习和深入思考的空间;在第 4 章和第 6 章中引入了用奇异函数分析梁内力和变形的的方法,并介绍了求梁变形的力矩面积法;在第 8 章中介绍了“强度理论”;在第 13 章中介绍了变幅疲劳强度和有限寿命的计算方法;在附录 A 中介绍了平面图形几何性质的数值计算方法——边界积分方法。书中带有 * 号的内容可根据不同专业由教师选用。

本教材由西安交通大学材料力学教研室蔡怀崇、闵行、凌伟、刘书静和殷民共同编写。蔡怀崇编写第 1、3、4、5、6 章;闵行编写第 2、10、11、13 章;凌伟编写第 7、8、9 章;刘书静编写第 12、14、15 章;殷民编写附录 A、B、C。由蔡怀崇、闵行任主编。

本教材反映了西安交通大学材料力学教研室多年来的教学改革成果和长期积累的教学经验。教材编写过程中,参考了西安交通大学材料力学教研室和兄弟院校已经公开出版的教材和书籍,并引用了部分习题、例题和插图。在此特向有关作者和曾经在西安交通大学材料力学教研室任教的教师、前辈表示敬意和衷心感谢。

西北工业大学刘达教授和西安交通大学乐美峰教授审阅了全书,提出了宝贵的修改意见。责任编辑吴杰和郑丽芬为本书的出版做了非常耐心、细致的工作。谨此一并表示衷心感谢。

限于编者的水平,本教材难免有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2003.10

本书主要符号表

符 号	符 号 意 义	常 用 单 位
A	面积	m^2, mm^2
a	间距	m, mm
	加速度	m/s^2
b	宽度	m, mm
C, O	形心	
D, d	直径	m, mm
E	弹性模量	$\text{GN}/\text{m}^2 (\text{GPa})$
e	偏心距	m, mm
F	力(外力, 载荷)	N, kN
F_{Ax}	A 处沿 x 方向的支反力	N, kN
F_{cr}	压杆临界力	N, kN
F_x, F_y, F_z	力在 x, y, z 方向的分量	N, kN
G	切变模量	$\text{GN}/\text{m}^2 (\text{GPa})$
	重量	N, kN
g	重力加速度	m/s^2
H, h	高度	m, mm
I_y, I_z	截面对 y, z 轴的惯性矩	m^4, mm^4
I_p	极惯性矩	m^4, mm^4
I_{yz}	截面对 yz 轴的惯性积	m^4, mm^4
i_y, i_z	截面对 y, z 轴的惯性半径	m, mm
K_d	动荷因数	
K_t	理论应力集中因数	
K_σ, K_τ	正应力, 切应力有效应力集中因数	
k	弹簧刚度	$\text{N}/\text{m}, \text{kN}/\text{m}$
L, l	长度	m, mm

符 号	符 号 意 义	常 用 单 位
M_o	弯曲外力偶矩	$N \cdot m, kN \cdot m$
M_n	扭矩	$N \cdot m, kN \cdot m$
M_y, M_z	对 y, z 轴的弯矩	$N \cdot m, kN \cdot m$
m	质量	kg
	单位长度力偶矩	$N \cdot m/m, kN \cdot m/m$
N	轴力	N, kN
n	安全因数	
	转速	r/min
n_{st}	稳定安全因数	
P	功率	W, kW
p	压强, 压力	$N/m^2 (Pa), MN/m^2 (MPa)$
	全应力	$MN/m^2 (MPa), N/mm^2$
Q	剪力	N, kN
q	分布载荷集度	$N/m, kN/m$
R, r	半径	m, mm
r	交变应力循环特征	
S_y, S_z	截面对 y, z 轴的静矩	m^3, mm^3
s	弧长	m, mm
T	扭转外力偶矩	$N \cdot m, kN \cdot m$
	动能	$J(N \cdot m)$
t	温度	°C
	时间	s
	壁厚	m, mm
U	变形能(应变能)	$J(N \cdot m)$
u	线位移	m, mm
V	势能	$J(N \cdot m)$
	体积	m^3, mm^3
v	速度	m/s
	梁的挠度	m, mm
W	外力功	$N \cdot m, kN \cdot m$

符 号	符 号 意 义	常 用 单 位
	重量	N, kN
W^*, W_e^*, W_i^*	总虚功, 外力虚功, 内力虚功	$N \cdot m, kN \cdot m$
W_p	抗扭截面系数	m^3, mm^3
W_y, W_z	对 y, z 轴的抗弯截面系数	m^3, mm^3
α	倾角	rad, ($^\circ$)
	线膨胀系数	K^{-1}
α_k	冲击韧度	J/m^2
β	倾角	rad, ($^\circ$)
	表面质量因数	
Δ	广义位移	mm 或 rad
δ	厚度	m, mm
	延伸率	
$\varepsilon, \varepsilon_e, \varepsilon_p$	线应变, 弹性应变, 塑性应变	
γ	切应变	
	单位体积重量	$N/m^3, kN/m^3$
ψ	断面收缩率	
θ	体积应变	
Φ	单位长度扭转角	$^\circ/m$
φ	转角	rad, ($^\circ$)
λ	柔度	
μ	泊松比, 压杆长度因数	
θ	梁截面转角	rad, ($^\circ$)
ρ	密度	kg/m^3
	曲率半径	m, mm
σ	正应力	$MN/m^2 (MPa), N/mm^2$
σ^+, σ^-	拉应力, 压应力	同上
σ°	破坏(极限)应力	同上
$[\sigma]$	许用应力	同上
σ_a	应力幅	同上

符 号	符 号 意 义	常 用 单 位
σ_b	强度极限	同上
σ_{bs}	挤压应力	同上
σ_{cr}	临界应力	同上
σ_e	弹性极限	同上
σ_m	平均应力	同上
σ_p	比例极限	同上
σ_r	持久极限	同上
	径向应力	同上
σ_{ri}	相当应力	同上
σ_s	屈服极限	同上
$\sigma_{p0.2}$	名义屈服极限	同上
τ	切应力	同上
$[\tau]$	许用切应力	同上
ω	角速度	rad/s, ($^{\circ}$ /s)
	弯矩图面积	$N \cdot m^2$, $kN \cdot m^2$

目 录

前言

本书主要符号表

第 1 章 绪论	(1)
1.1 材料力学的任务	(1)
1.2 材料力学与生产实践的关系	(3)
1.3 变形固体的基本假设	(4)
1.4 内力和应力	(5)
1.5 位移、变形与应变	(8)
1.6 杆件变形的基本形式	(10)
思考题	(10)
第 2 章 轴向拉伸与压缩	(12)
2.1 概述	(12)
2.2 直杆横截面上的内力与应力	(13)
2.3 轴向拉伸或压缩时的强度计算	(16)
2.4 斜截面上的应力	(18)
2.5 轴向拉伸或压缩时的变形	(20)
2.6 材料在拉伸时的力学性质	(24)
2.7 材料在压缩时的力学性质	(29)
* 2.8 温度和时间因素对材料力学性质的影响	(30)
2.9 安全因数和许用应力	(31)
2.10 应力集中的概念	(32)
2.11 拉压超静定问题	(33)
思考题	(38)
习题	(40)
第 3 章 扭转	(48)
3.1 概述	(48)
3.2 外力偶矩、扭矩和扭矩图	(48)
3.3 圆轴扭转时的应力与强度条件	(50)
3.4 圆轴扭转时的变形与刚度条件	(56)
3.5 圆轴扭转的破坏分析	(60)
3.6 非圆截面杆和薄壁杆扭转主要结果	(62)
思考题	(66)
习题	(67)

第4章 弯曲内力	(72)
4.1 概述	(72)
4.2 梁的简化及其典型形式	(73)
4.3 梁的内力和正负号规则	(75)
4.4 剪力方程和弯矩方程 剪力图和弯矩图	(76)
4.5 弯矩、剪力和分布载荷集度之间的微分关系	(81)
思考题	(88)
习题	(89)
第5章 弯曲应力	(92)
5.1 概述	(92)
5.2 纯弯曲时梁横截面上的正应力	(93)
5.3 弯曲正应力的强度计算	(96)
5.4 弯曲切应力和切应力强度条件	(102)
5.5 提高弯曲强度的措施	(109)
* 5.6 非对称纯弯曲和剪切中心(弯曲中心)的概念	(113)
思考题	(117)
习题	(119)
第6章 弯曲变形	(124)
6.1 概述	(124)
6.2 挠曲线近似微分方程	(125)
6.3 直接积分法	(126)
6.4 叠加法求梁的变形	(129)
* 6.5 力矩面积法	(131)
6.6 梁的刚度条件和提高弯曲刚度的途径	(134)
6.7 简单超静定梁	(135)
思考题	(138)
习题	(138)
第7章 应力状态分析	(143)
7.1 应力状态的概念	(143)
7.2 二向应力状态分析 —— 解析法	(145)
7.3 二向应力状态分析 —— 图解解析法	(148)
7.4 三向应力状态的最大应力	(152)
7.5 广义胡克定律	(154)
* 7.6 平面应力状态下的应变分析	(157)
思考题	(159)
习题	(163)
第8章 强度理论	(167)
8.1 强度理论的概念	(167)

8.2 常用强度理论	(168)
* 8.3 其他强度理论简介	(170)
8.4 强度理论的应用	(171)
思考题	(176)
习题	(176)
第 9 章 组合变形	(179)
9.1 概述	(179)
9.2 斜弯曲	(180)
9.3 拉压与弯曲组合变形	(183)
9.4 弯曲与扭转组合变形	(188)
思考题	(191)
习题	(192)
第 10 章 能量法	(197)
10.1 概述	(197)
10.2 外力功与变形能	(197)
10.3 虚功原理	(203)
10.4 图乘法	(210)
10.5 功互等定理和位移互等定理	(214)
思考题	(217)
习题	(218)
第 11 章 超静定问题	(224)
11.1 概述	(224)
11.2 力法及其正则方程	(226)
11.3 结构的对称性及其利用	(235)
思考题	(238)
习题	(240)
第 12 章 动载荷	(245)
12.1 概述	(245)
12.2 惯性力问题	(245)
12.3 构件受冲击时的应力和变形	(249)
12.4 冲击韧度	(254)
12.5 提高构件抗冲击能力的措施	(255)
思考题	(256)
习题	(257)
第 13 章 疲劳强度	(261)
13.1 概述	(261)
13.2 交变应力及其循环特征	(263)

13.3	材料的疲劳极限	(264)
13.4	影响构件疲劳极限的主要因素	(266)
13.5	交变应力下构件的疲劳强度条件	(270)
* 13.6	变幅交变应力下构件的疲劳强度条件	(274)
* 13.7	构件的疲劳寿命估算	(277)
13.8	提高构件疲劳强度的措施	(280)
思考题	.....	(281)
习题	.....	(282)
第 14 章	压杆的稳定	(285)
14.1	概述	(285)
14.2	细长压杆的临界力	(287)
14.3	压杆的临界应力	(289)
14.4	压杆稳定性的校核	(294)
14.5	提高压杆稳定性的措施	(298)
思考题	.....	(300)
习题	.....	(301)
第 15 章	联接件的强度	(306)
15.1	概述	(306)
15.2	联接件的实用计算法	(307)
思考题	.....	(312)
习题	.....	(313)
附录 A	截面图形的几何性质	(316)
A.1	静矩和形心	(316)
A.2	惯性矩和惯性积	(318)
A.3	平行移轴公式	(320)
A.4	转轴公式、主惯轴与主惯矩	(321)
* A.5	利用边界积分法计算截面图形的几何性质	(323)
思考题	.....	(325)
习题	.....	(327)
附录 B	简单载荷下梁的变形	(329)
附录 C	型钢表	(333)
表 1	热轧等边角钢(GB700—79)	(333)
表 2	热轧普通工字钢(GB706—65)	(337)
表 3	热轧普通槽钢(GB707—65)	(339)
习题答案	.....	(341)
参考文献	.....	(353)

第 1 章 绪 论

1.1 材料力学的任务

力学是研究力对物体的效应的一门科学。力对物体的效应有两种:一种是引起物体运动状态的变化,称为**外效应**;另一种是引起物体的变形,称为**内效应**。理论力学研究力的外效应,即物体平衡和运动的规律。材料力学研究力的内效应,即物体变形和破坏的规律。材料力学与机械、能源、动力、土木、水利、化工、材料、航空航天等众多的工程技术有着密切的联系,是这些工程技术的理论基础。在这些工程中,广泛使用的各种机器、机械与结构,都是由许多零件和元件组成的,这些零件和元件统称为**构件**。构件工作时,一般都受到载荷的作用。为确保机器、机械和结构能够正常工作,要求构件具有一定承载能力。为此,设计构件时,从力学方面需要考虑三个主要问题。

(1) **强度问题** 构件承载时,不应该发生断裂或显著的永久变形。例如,江河的大坝(图 1-1)在水压力下,不允许发生破坏;桥梁(图 1-2)在车辆通行时,不应



图 1-1



图 1-2

该发生断裂;飞机降落时,起落架不应折断;螺栓的螺纹受撞击时,不应发生过大的永久变形使螺栓失效等。因此,构件必须具有足够的抵抗破坏的能力,即具有足够的**强度**。

(2) **刚度问题** 有些构件虽然不发生破坏,也不发生显著的永久变形,但是由

于变形超过允许的限度,也会导致机器设备不能正常工作。例如,摇臂钻床工作时,若立柱和摇臂变形过大,将会影响工件的加工精度(图 1-3);转轴变形过大会引起轴承不均匀磨损等。因此,对于这类构件必须具有足够抵抗变形的能力,即具有足够的刚度。

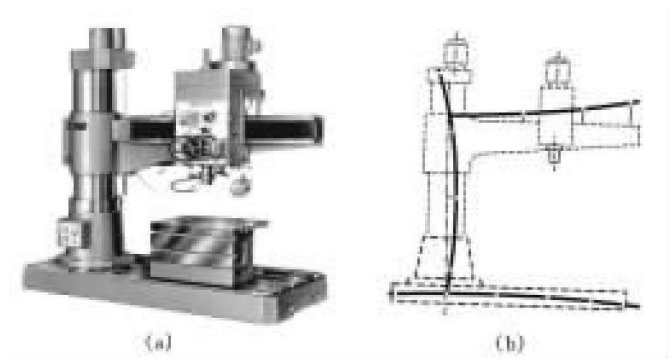


图 1-3

(3) 稳定性问题 细长受压构件,例如内燃机中的挺杆(图 1-4),千斤顶中的螺杆(图 1-5)和厂房结构中的立柱等。当压力较小时,构件能保持原有的直线平衡形式。若压力增大至某一数值时,构件会突然变弯,使结构不能正常工作,这种现象

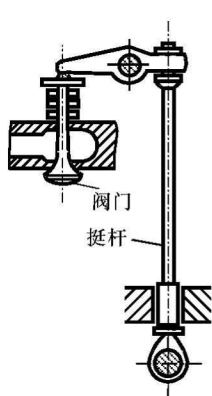


图 1-4

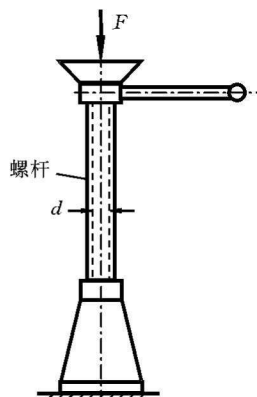
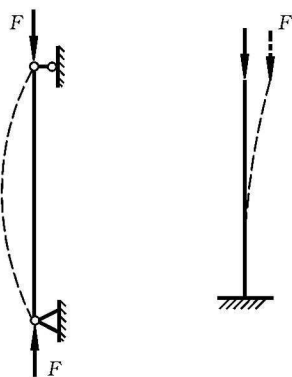


图 1-5

称为丧失稳定。因此,对于这类细长受压构件,必须具有始终保持原有平衡形式的能力,即具有足够的稳定性。

强度、刚度和稳定性统称为构件的承载能力。在设计构件时,不仅要求具有足

够的承载能力,还必须考虑降低制造成本或减轻构件自重,以保证构件既安全适用又经济合理。材料力学就是一门研究构件承载能力的科学,它的主要任务是研究构件在外力作用下的变形和破坏规律,为构件的合理设计提供基本理论和计算方法,并为学习后续课程如机械设计、结构力学、弹性力学和复合材料力学等提供必要的理论基础。

构件的承载能力与所使用材料的力学性质有关,而这些力学性质必须通过实验来测定。此外,某些较复杂的问题也必须借助于实验来解决。因此,实验研究和理论分析都是完成材料力学任务的必不可少的手段。

1.2 材料力学与生产实践的关系

人类在很早以前,就从各种建筑物和简单机械的制造和使用中,逐步积累起关于受力分析和材料强度的知识,又凭着经验和模仿的方法,设计和制造出新的建筑物和机械。例如,利用石料耐压的特性建造石拱桥;利用竹索的抗拉特性建造悬索桥;在建筑物中采用圆形截面的立柱和矩形截面的木梁等。大量的历史事实和文献记载表明:在14世纪以前,中国力学发展一直处在世界前列水平,这与当时中国生产力水平的地位是相适应的。例如,世界著名的古代建筑物——中国的长城是纪元前开始建造的;世界上现存最高的木结构建筑——山西应县木塔(图1-6(a)),距今已近一千年历史,在1305年曾经受过一次6.5级的大地震,附近民房全部坍塌,而木塔仍完整屹立至今;建于公元608年的河北赵州石拱桥(图1-6(b)),单孔净跨37 m,桥面宽10 m,是世界上第一个“敞肩拱桥”,用现代理论分析,已很接近于优化的设计;在宋代的《营造法式》中已提出,用圆木加工的矩形截

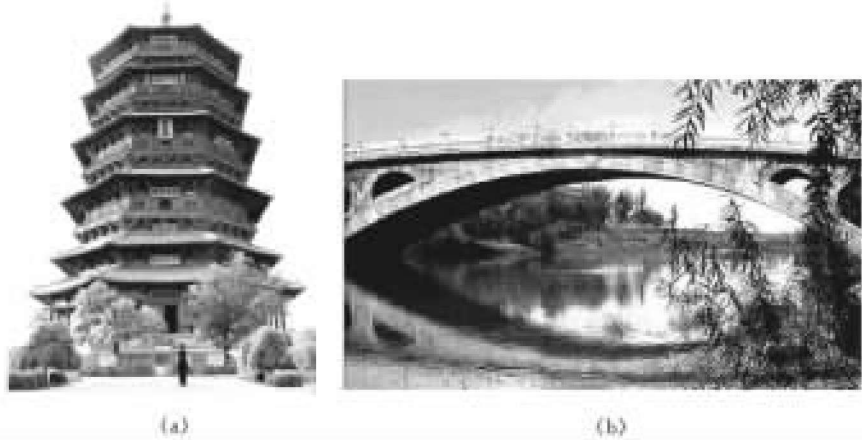


图 1-6

面梁,合理的高宽比应为 3 : 2,这与梁的弯曲理论一致。

随着生产力的迅速发展,为了建造大吨位船舶、水闸和大型建筑结构的需要,人们开始了用实验和解析的方法来研究结构和材料的强度问题。意大利的科学家达·芬奇(Leonardo da Vinci, 1452~1519 年)和伽利略(G. Galileo, 1564~1642 年)是其中的杰出代表。达·芬奇是最先用铁丝受拉来研究材料强度的,他提出了矩形截面梁的强度与宽度成正比,与长度成反比的结论。伽利略第一个用实验和理论相结合的方法,全面分析了梁的强度,他在 1638 年发表的《两种新科学》一书中,介绍了建筑材料的力学性质并首先提出了计算梁的强度公式,该书成为材料力学领域的第一部著作。1678 年英国科学家胡克(R. Hooke, 1635~1703 年)根据大量实验数据的分析结果,提出了变形与力成正比的结论,成为材料力学和物理学的一个重要定律。

随着生产力的进一步发展,新材料、新建筑、新机械和各种交通运输工具不断涌现,又对材料力学提出了更多新的课题,促进了材料力学的迅速发展。19 世纪末,材料力学逐步形成为一门独立的学科,并成为工科院校的必修课程。到 20 世纪,材料力学的研究取得了很多重大成就,出现了许多新的理论和计算方法,形成了很多新的分支学科。

新中国成立后,开始了振兴中华的大规模经济建设,完成了许多与力学有着密切关系的重大工程技术项目。例如,长江和黄河上大跨度桥梁的设计与建造,超大功率的发电动力装置,葛洲坝和正在建造中的长江三峡工程,核电站,长征系列运载火箭,海洋平台,高速列车等。这些工程的设计、制造和运行中,都存在大量的力学问题,为材料力学的研究、应用和发展提供了广阔的前景。特别是 20 世纪 60 年代中期以后,由于电子计算机的应用和普及,使计算能力发生了一场革命,材料力学工程分析更加深入到机械设计的常规工作中,大大缩短了新产品的设计周期。材料力学的理论、实验和计算方法的深入发展,无疑将对我国的机械、材料、土木、水利、交通、航空航天和兵器等工业的发展有着重大的促进作用。

1.3 变形固体的基本假设

在理论力学中,由于物体的微小变形对其平衡和运动状态影响极小,为了使研究得到简化,略去了物体的变形,而将其抽象为刚体。材料力学研究构件的强度、刚度和稳定性问题,变形成为主要因素,因此必须把构件视作可变形固体。变形固体的材料和性质是多种多样的,为了简化计算,通常略去一些次要因素,将它们抽象为理想化的模型。下面是对变形固体所作的四个基本假设。

1. 连续性假设

即认为组成变形固体的物质毫无间隙地充满了它的整个几何空间,而且变形后仍保持这种连续性。这样,物体的一切物理量都可用坐标的连续函数来表示。

2. 均匀性假设

即认为物体是由同一均匀材料组成,其各部分的物理性质相同,且不随坐标位置而变。这样就可以从中取出任一微小部分进行分析和试验,其结果适用于整个物体。

3. 各向同性假设

即认为物体在各个方向具有相同的物理性质。这样物体的力学性质不随方向而变。具备这种性质的材料称为各向同性材料。

实际上,从微观角度观察,工程材料内部都有不同程度的空隙和非均匀性,组成金属的各单个晶粒,其力学性质也具有明显的方向性。但由于这些空隙和晶粒的尺寸远远小于构件的尺寸,且排列是无序的,所以从统计学的观点,在宏观上可以认为物体的性质是均匀、连续和各向同性的。实践证明,在工程计算的精度范围内,上述三个假设可以得到满意的结果。此外,对于某些具有方向性的材料,如木材、玻璃钢等,应用上述假设,有时也可得到较满意的近似解。

4. 小变形假设

材料在外力作用下将产生变形。对于大多数材料,当外力不超过一定限度时,去除外力后,物体将恢复原有的形状和尺寸,这种性质称为**弹性**。随着外力消失而消失的变形,称为**弹性变形**。当外力过大时,去除外力后,变形只能部分消失而留下一部分永久变形,材料的这种性质称为**塑性**。残留的变形称为**塑性变形**。

为保证构件正常工作,一般不允许构件发生塑性变形。对于大多数工程材料,如金属、木材和混凝土等,其弹性变形与构件原始尺寸相比甚为微小。因此,在力学分析中,认为物体的变形与构件尺寸相比属高阶小量,可以不考虑因变形而引起的尺寸变化,称为小变形假设。这样在研究平衡问题时,仍可按构件的原始尺寸进行计算,使问题大为简化。

1.4 内力和应力

1.4.1 内力

作用于构件上的载荷和支反力称为**外力**。构件不受外力时,内部各部分之间存在着相互作用的力,使构件维持一定的形状。当构件受到外力作用而变形时,其内部各部分之间的相互作用力发生了改变。这种因外力作用而引起构件内各部分