

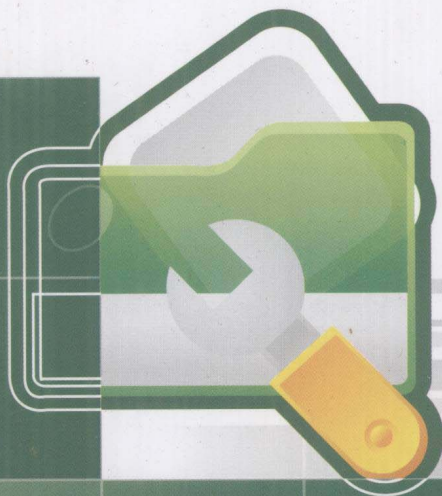


21st CENTURY

实用规划教材

21世纪全国应用型本科

大机械系列 实用规划教材



材料力学

主 编 陈忠安 王 静
副主编 孙建东 李洪来
主 审 付志一



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材

材 料 力 学

主 编	陈忠安	王 静
副主编	孙建东	李洪来
参 编	王昕彦	邹小平
	糕瑞花	周玉鑫
主 审	付志一	



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

全书共分 14 章及 6 个附录, 各章内容依次为绪论、轴向拉伸与压缩、扭转、弯曲内力、弯曲应力、梁的位移、连接件强度的实用计算、应力状态分析和广义胡克定律、强度理论、组合变形、压杆稳定、能量法、超静定问题、交变应力与疲劳强度。每章开头有教学提示和教学要求, 结尾有概要性小结, 章后配有适量的思考题和习题, 附录中还提供各章习题中计算题的参考答案。

本教材的特点是, 坚持基本性, 着重应用性, 增强适应性, 突出重点, 力求系统, 既便于教师取舍内容、组织课堂教学, 也便于学生自学。

本教材可作为普通高等学校和成人高等教育机械类专业的教材, 也可作为参加高等教育自学考试的考生和工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学/陈忠安, 王静主编. —北京: 北京大学出版社, 2009. 1

(21 世纪全国应用型本科机械类系列实用规划教材)

ISBN 978-7-301-14462-6

I. 材… II. ①陈…②王… 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(2008)第 181274 号

书 名: 材料力学

著作责任者: 陈忠安 王 静 主编

责 任 编 辑: 郭穗娟

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-14462-6/TH·0120

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 河北滦县鑫华书刊印刷厂

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19 印张 435 千字

2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 30.00 元

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

《21 世纪全国应用型本科机械系列实用规划教材》

专家编审委员会

名 誉 主 任 胡正寰*

主 任 委 员 殷国富

副主任委员 (按拼音排序)

戴冠军 江征风 李郝林 梅 宁 任乃飞

王述洋 杨化仁 张成忠 张新义

顾 问 (按拼音排序)

傅水根 姜继海 孔祥东 陆国栋

陆启建 孙建东 张 金 赵松年

委 员 (按拼音排序)

方 新 郭秀云 韩健海 洪 波

侯书林 胡如风 胡亚民 胡志勇

华 林 姜军生 李自光 刘仲国

柳舟通 毛 磊 孟宪颐 任建平

陶健民 田 勇 王亮申 王守城

魏 建 魏修亭 杨振中 袁根福

曾 忠 张伟强 郑竹林 周晓福

* 胡正寰：北京科技大学教授，中国工程院机械与运载工程学部院士

丛书总序

殷国富*

机械是人类生产和生活的基本工具要素之一，是人类物质文明最重要的一个组成部分。机械工业担负着向国民经济各部门，包括工业、农业和社会生活各个方面提供各种性能先进、使用安全可靠的技术装备的任务，在国家现代化建设中占有举足轻重的地位。20世纪80年代以来，以微电子、信息、新材料、系统科学等为代表的新一代科学技术的发展及其在机械工程领域中的广泛渗透、应用和衍生，极大地拓展了机械产品设计制造活动的深度和广度，改变了现代制造业的产品设计方法、产品结构、生产方式、生产工艺和设备以及生产组织模式，产生了一大批新的机械设计制造方法和制造系统。这些机械方面的新方法和系统的主要技术特征表现在以下几个方面：

(1) 信息技术在机械行业的广泛渗透和应用，使得现代机电产品已不再是单纯的机械构件，而是由机械、电子、信息、计算机与自动控制等集成的机电一体化产品，其功能不仅限于加强、延伸或取代人的体力劳动，而且扩大到加强、延伸或取代人的某些感官功能与大脑功能。

(2) 随着设计手段的计算机化和数字化，CAD/CAM/CAE/PDM 集成技术和软件系统得到广泛使用，促进了产品创新设计、并行设计、快速设计、虚拟设计、智能设计、反求设计、广义优化设计、绿色产品设计、面向全寿命周期设计等现代设计理论和技术方法的不断发展。机械产品的设计不只是单纯追求某项性能指标的先进和高低，而是注重综合考虑质量、市场、价格、安全、美学、资源、环境等方面的影响。

(3) 传统机械制造技术在不断吸收电子、信息、材料、能源和现代管理等方面成果的基础上形成了先进制造技术，并将其综合应用于机械产品设计、制造、检测、管理、销售、使用、服务的机械产品制造全过程，以实现优质、高效、低耗、清洁、灵活的生产，提高对动态多变的市场的适应能力和竞争能力。

(4) 机械产品加工制造的精密化、快速化，制造过程的网络化、全球化得到很大的发展，涌现出 CIMS、并行工程、敏捷制造、绿色制造、网络制造、虚拟制造、智能制造、大规模定制等先进生产模式，制造装备和制造系统的柔性可与重组已成为 21 世纪制造技术的显著特征。

(5) 机械工程的理论基础不再局限于力学，制造过程的基础也不只是设计与制造经验及技艺的总结。今天的机械工程学科比以往任何时候都更紧密地依赖诸如现代数学、材料科学、微电子技术、计算机信息科学、生命科学、系统论与控制论等多门学科及其最新成就。

上述机械科学与工程技术特征和发展趋势表明，现代机械工程学科越来越多地体现着知识经济的特征。因此，加快培养适应我国国民经济建设所需要的高综合素质的机械工程学科人才的意义十分重大、任务十分繁重。我们必须通过各种层次和形式的教育，培养出适应世界机械工业发展潮流与我国机械制造业实际需要的技术人才与管理人才，不断推动

* 殷国富教授：现为教育部机械学科教学指导委员会委员，现任四川大学制造科学与工程学院院长

我国机械科学与工程技术的进步。

为使机械工程学科毕业生的知识结构由较专、较深、适应性差向较通用、较广泛、适应性强方向转化,在教育部的领导与组织下,1998 年对本科专业目录进行了第 3 次大的修订。调整后的机械类专业变成 4 类 8 个专业,它们是:机械类 4 个专业(机械设计制造及其自动化、材料成型及控制工程、过程装备与控制、工业设计);仪器仪表类 1 个专业(测控技术与仪器);能源动力类 2 个专业(热能与动力工程、核工程与核技术);工程力学类 1 个专业(工程力学)。此外还提出了面向更宽的引导性专业,即机械工程及自动化。因此,建立现代“大机械、全过程、多学科”的观点,探讨机械科学与工程学科专业创新人才的培养模式,是高校从事制造学科教学的教育工作者的责任;建立培养富有创新能力人才的教学体系和教材资源环境,是我们努力的目标。

要达到这一目标,进行适应现代机械学科发展要求的教材建设是十分重要的基础工作之一。因此,组织编写出版面向大机械学科的系列教材就显得很有意义和十分必要。北京大学出版社的领导和编辑们通过对国内大学机械工程学科教材实际情况的调研,在与众多专家学者讨论的基础上,决定面向机械工程学科类的学生出版一套系列教材,这是促进高校教学改革发展的重大决策。按照教材编审委员会的规划,本系列教材将逐步出版。

本系列教材是按照高等学校机械学科本科专业规范、培养方案和课程教学大纲的要求,合理定位,由长期在教学第一线从事教学工作的教师立足于 21 世纪机械工程学科发展的需要,以科学性、先进性、系统性和实用性为目标进行编写,以适应不同类型、不同层次的学校结合学校实际情况的需要。本系列教材编写的特色体现在以下几个方面:

(1) 关注全球机械科学与工程学科发展的大背景,建立现代大机械工程学科的新理念,拓宽理论基础和专业知识,特别是突出创造能力和创新意识。

(2) 重视强基础与宽专业知识面的要求。在保持较宽学科专业知识的前提下,在强化产品设计、制造、管理、市场、环境等基础理论方面,突出重点,进一步密切学科内各专业知识面之间的综合内在联系,尽快建立起系统性的知识体系结构。

(3) 学科交叉与综合的观念。现代力学、信息科学、生命科学、材料科学、系统科学等新兴学科与机械学科结合的内容在系列教材编写中得到一定的体现。

(4) 注重能力的培养,力求做到不断强化自我的自学能力、思维能力、创造性地解决问题的能力以及不断自我更新知识的能力,促进学生向着富有鲜明个性的方向发展。

总之,本系列教材注意了调整课程结构,加强学科基础,反映系列教材各门课程之间的联系和衔接,内容合理分配,既相互联系又避免不必要的重复,努力拓宽知识面,在培养学生的创新能力方面进行了初步的探索。当然,本系列教材还需要在内容的精选、音像电子课件、网络多媒体教学等方面进一步加强,使之能满足普通高等院校本科教学的需要,在众多的机械类教材中形成自己的特色。

最后,我要感谢参加本系列教材编著和审稿的各位老师所付出的大量卓有成效的辛勤劳动,也要感谢北京大学出版社的领导和编辑们对本系列教材的支持和编审工作。由于编写的时间紧、相互协调难度大等原因,本系列教材还存在一些不足和错漏。我相信,在使用本系列教材的教师和学生的关心和帮助下,不断改进和完善这套教材,使之在我国机械工程类学科专业的教学改革和课程体系建设中起到应有的促进作用。

2006 年 1 月

前 言

本教材是为了适应当前高等教育大众化的需求及其应用型人才的培养目标，为机械类专业的本、专科生编写的。本教材特点是，坚持基本性，着重应用性，增强适应性，突出重点，力求系统，既便于教师取舍内容、组织课堂教学，也便于学生自学。

全书共 14 章及 6 个附录，各章内容依次为绪论、轴向拉伸与压缩、扭转、弯曲内力、弯内应力、梁的位移、连接件强度的实用计算、应力状态分析和广义胡克定律、强度理论、组合变形、压杆稳定、能量法、超静定问题、交变应力与疲劳强度。附录分别为附录 A “平面图形的几何性质”、附录 B “常用材料的力学性能”、附录 C “常见截面的几何性质”、附录 D “简单梁的挠度与转角”、附录 E “型钢规格表”、附录 F “各章部分习题答案”。

本教材由陈忠安、王静主编。参加编写的教师有陈忠安(第 1、8、14 章及附录 B、C、E、F)、王静(第 4、6、12、13 章及附录 D)、李洪来(第 3、7 章、附录 A)、孙建东(第 11 章)、王昕彦(第 2 章)、邹小平(第 5 章)、嵇瑞花(第 10 章)和周玉鑫(第 9 章)。

本教材在编写中得到了北京大学出版社有关编辑的帮助，同时得到了江苏大学、天津市军事交通学院、河北工业大学、北京联合大学、鲁东大学、三峡大学等院校领导的关心与支持。另外，编写过程中编者参阅了大量国内外材料力学名著、手册、标准及有关著作，对其所有的编著者，在此一并致谢！

本教材承蒙中国农业大学付志一教授审阅，付教授提出了很多中肯具体的宝贵意见，特此表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

2008.8

目 录

第 1 章 绪论	1	2.4.1 轴向变形与胡克定律	18
1.1 材料力学的研究对象、 内容及任务	1	2.4.2 横向变形与泊松比	19
1.1.1 材料力学的研究对象	1	2.4.3 位移	21
1.1.2 材料力学的研究内容及 任务	2	2.5 材料在拉伸与压缩时的 力学性能	22
1.2 材料力学的基本假设	3	2.5.1 材料在拉伸时的 力学性能	22
1.3 外力与内力	3	2.5.2 材料在压缩时的 力学性能	26
1.3.1 外力及其分类	3	2.5.3 温度对材料力学性能的 影响	27
1.3.2 内力及内力分量	4	2.6 许用应力与强度条件	28
1.4 应力与应变	5	2.6.1 许用应力	28
1.4.1 应力的概念	5	2.6.2 强度条件	29
1.4.2 应变的概念	6	小结	32
1.5 杆件变形的基本形式	7	思考题	33
1.5.1 轴向拉伸或轴向压缩	7	习题	33
1.5.2 剪切	7	第 3 章 扭转	37
1.5.3 扭转	7	3.1 引言	37
1.5.4 弯曲	7	3.2 传动轴的外力偶矩、扭矩及 扭矩图	38
小结	7	3.2.1 外力偶矩的计算	38
思考题	8	3.2.2 扭矩	38
习题	8	3.3 纯剪切、切应力互等定理及剪切 胡克定律	40
第 2 章 轴向拉伸与压缩	10	3.3.1 薄壁圆筒扭转时横截面上的 应力	40
2.1 引言	10	3.3.2 切应力互等定理	40
2.2 拉(压)杆件的轴力与轴力图	10	3.3.3 剪切胡克定律	41
2.2.1 轴力	10	3.4 圆轴扭转时的应力及强度条件	41
2.2.2 轴力的计算	11	3.4.1 横截面上的切应力	41
2.2.3 轴力图	12	3.4.2 截面的极惯性矩和 抗扭截面系数	44
2.3 拉(压)杆的应力	13	3.4.3 强度条件	46
2.3.1 横截面上的应力	14	3.5 圆轴扭转时的变形及刚度条件	47
2.3.2 斜截面上的应力	15		
2.3.3 圣维南原理	17		
2.3.4 应力集中	17		
2.4 拉(压)杆的变形与位移	18		

3.5.1 圆轴扭转时的变形	47	5.4 提高梁弯曲强度的措施	93
3.5.2 刚度条件	48	5.4.1 合理受力布置	93
小结	50	5.4.2 合理截面形状	94
思考题	51	5.4.3 变截面梁	95
习题	51	小结	97
第4章 弯曲内力	54	思考题	97
4.1 引言	54	习题	99
4.1.1 弯曲变形	55	第6章 梁的位移	105
4.1.2 梁的载荷及计算简图	55	6.1 引言	105
4.2 剪力与弯矩	57	6.1.1 挠度与挠曲线方程	106
4.3 剪力方程与弯矩方程、剪力图与弯矩图	59	6.1.2 转角与转角方程	106
4.4 剪力、弯矩和分布载荷集度间的微分关系	62	6.2 挠曲线的近似微分方程	106
4.4.1 微分关系与图形关系	62	6.3 用积分法计算梁的位移	107
4.4.2 用叠加法作弯矩图	65	6.4 用叠加法计算梁的位移	113
4.5 平面刚架的内力图	67	6.4.1 载荷叠加法	113
小结	69	6.4.2 位移叠加法	115
思考题	69	6.5 梁的刚度条件及提高刚度的措施	116
习题	69	6.5.1 刚度条件	116
第5章 弯曲应力	73	6.5.2 提高梁的弯曲刚度的措施	116
5.1 引言	73	小结	117
5.1.1 平面弯曲与对称弯曲的概念	73	思考题	118
5.1.2 纯弯曲与横力弯曲的概念	74	习题	118
5.2 梁的弯曲正应力及其强度条件	74	第7章 连接件强度的实用计算	121
5.2.1 纯弯曲时横截面上的应力	74	7.1 引言	121
5.2.2 纯弯曲理论在横力弯曲中的推广	79	7.2 剪切实用计算	122
5.2.3 弯曲正应力强度条件	81	7.3 挤压实用计算	123
5.3 梁的弯曲切应力及其强度条件	86	小结	127
5.3.1 矩形截面梁的弯曲切应力	86	思考题	128
5.3.2 工字形、T形等薄壁截面梁的弯曲切应力	88	习题	128
5.3.3 圆截面梁的弯曲切应力	89	第8章 应力状态分析和广义胡克定律	130
5.3.4 弯曲切应力强度条件	91	8.1 引言	130
		8.1.1 应力状态的概念	130
		8.1.2 单元体	130
		8.1.3 主应力的概念	133

8.1.4 应力状态分类	133	10.2.3 双对称弯曲的变形	167
8.2 平面应力状态分析	134	10.3 拉伸(压缩)与弯曲的组合 变形	168
8.2.1 斜截面上的应力	134	10.3.1 拉伸(压缩)与 弯曲组合	169
8.2.2 应力极值与主应力	138	10.3.2 偏心压缩	172
8.2.3 面内切应力极值	139	10.4 圆轴的扭转与弯曲的 组合变形	174
8.3 空间应力状态分析	142	小结	178
8.3.1 斜截面上的应力	142	思考题	179
8.3.2 最大应力	142	习题	180
8.4 广义胡克定律	144	第 11 章 压杆稳定	183
8.4.1 广义胡克定律内容	144	11.1 引言	183
8.4.2 体积应变	145	11.2 细长压杆临界力的欧拉公式	184
8.5 应变能密度	147	11.2.1 两端铰支等直细长压杆 的临界力	184
8.5.1 应变能的概念	147	11.2.2 两端铰支等直细长压杆的 临界应力	187
8.5.2 空间应力状态下的 应变能密度	147	11.2.3 不同杆端约束细长杆的 临界力	187
8.5.3 体变能密度和 畸变能密度	148	11.3 不同类型压杆临界力的计算	189
小结	148	11.3.1 压杆的分类	189
思考题	149	11.3.2 柔度公式	190
习题	150	11.3.3 等直压杆的类型及其 临界应力	190
第 9 章 强度理论	154	11.4 压杆的稳定性校核及提高压杆 承载能力的措施	195
9.1 引言	154	11.4.1 压杆稳定的力准则	195
9.2 四种常用的强度理论	155	11.4.2 压杆稳定的安全因数法 准则	196
9.2.1 关于脆性断裂的强度 理论	155	11.4.3 提高压杆承载能力的 措施	198
9.2.2 关于塑性屈服的强度 理论	156	小结	199
9.3 强度理论的应用	157	思考题	199
9.3.1 强度理论的统式	157	习题	200
9.3.2 强度理论的选用	158	第 12 章 能量法	203
小结	161	12.1 引言	203
思考题	162	12.2 杆件的应变能	204
习题	162	12.2.1 拉压杆的应变能	204
第 10 章 组合变形	164		
10.1 引言	164		
10.2 双对称弯曲的组合变形	165		
10.2.1 双对称弯曲的应力	165		
10.2.2 双对称弯曲的强度计算	167		

12.2.2 受扭圆轴的应变能	204	14.4.2 构件表面加工质量的影响	243
12.2.3 梁的应变能	205	14.4.3 构件外形的影响	244
12.2.4 组合变形杆件的应变能	206	14.5 对称循环下的疲劳强度条件和提高疲劳强度的措施	244
12.3 单位载荷法	209	14.5.1 构件的疲劳极限	244
12.4 冲击应力的计算	214	14.5.2 疲劳强度条件	245
小结	218	14.5.3 提高疲劳强度的主要措施	245
思考题	218	小结	247
习题	218	思考题	247
第 13 章 超静定问题	222	习题	247
13.1 引言	222	附录 A 平面图形的几何性质	249
13.2 拉(压)超静定问题	223	A.1 静矩和形心	249
13.3 扭转超静定问题	226	A.1.1 静矩	249
13.4 弯曲超静定问题	227	A.1.2 形心	249
13.5 对称性的应用	230	A.1.3 组合图形的静矩及形心	250
小结	232	A.2 惯性矩及惯性积	252
思考题	233	A.2.1 惯性矩及惯性半径	252
习题	233	A.2.2 惯性积	253
第 14 章 交变应力与疲劳强度	236	A.2.3 组合图形的惯性矩及惯性积	254
14.1 交变应力的概念	236	A.3 惯性矩的平行移轴定理	255
14.1.1 应力-时间历程	236	A.4 形心主轴及形心主惯性矩	257
14.1.2 恒幅交变应力的特征参量	237	A.4.1 转轴公式	257
14.1.3 应力循环的类型	238	A.4.2 主惯性轴、主惯性矩、形心主惯性轴及形心主惯性矩	258
14.2 金属疲劳破坏的概念	238	思考题	260
14.2.1 疲劳破坏现象	238	习题	260
14.2.2 金属疲劳破坏的特点	239	附录 B 常用材料的力学性能	263
14.2.3 金属疲劳破坏的过程	239	附录 C 常见截面的几何性质	264
14.2.4 金属疲劳的分类	239	附录 D 简单梁的挠度与转角	266
14.3 材料 $S-N$ 曲线和疲劳极限	240	附录 E 型钢规格表	269
14.3.1 材料 $S-N$ 曲线和疲劳极限	240	附录 F 各章部分习题答案	281
14.3.2 材料 $S-N$ 曲线的测定	241	参考文献	289
14.4 影响构件疲劳极限的主要因素	243		
14.4.1 构件横截面尺寸的影响	243		

第 1 章 绪 论

教学提示：在先修课程中学习了理论力学，现在又将学习材料力学，二者有什么区别和联系呢？材料力学是怎样的一门课程呢？这是每一位读者首先想了解的问题。本章重点论述材料力学课程的研究对象、任务和内容，建立材料力学分析方法的基本假设，也将介绍材料力学最重要、最基础的概念。

教学要求：通过本章的学习，明确材料力学的研究对象和任务，领会强度、刚度和稳定性的含义，理解变形固体的基本假设，建立内力、应力与应变的概念，了解杆件变形的四种基本形式。

1.1 材料力学的研究对象、内容及任务

1.1.1 材料力学的研究对象

理论力学又称刚体力学，其研究对象是刚体。理论力学研究的是力对物体作用的外效应(即平衡与运动)，将变形很小的物体简化成刚体方便了研究，但对结果影响甚微。

材料力学又称材料强度，属于变形体力学范畴，研究的是力对物体作用的内效应(即变形)，并结合材料的力学性质，对强度展开分析，其研究对象自然不能再针对刚体，而是可变形的固体，称为变形固体。在工程领域，变形固体就是构成机械或结构物的零件或元件，统称为构件。

根据在空间坐标系中三个方向尺寸的不同，可将构件分为三大类：块类、板壳类和杆类。

三个方向的尺寸比较接近的构件称为块类构件。一个方向的尺寸远小于其他两个方向尺寸的构件称为板壳类构件，如图 1.1 所示。较小的尺寸称为厚度，平分厚度的几何面称为中面。板壳类构件可用中面和厚度两个几何特征来描述。中面为平面者称为板，如图 1.1(a)所示；为曲面者称为壳，如图 1.1(b)所示。

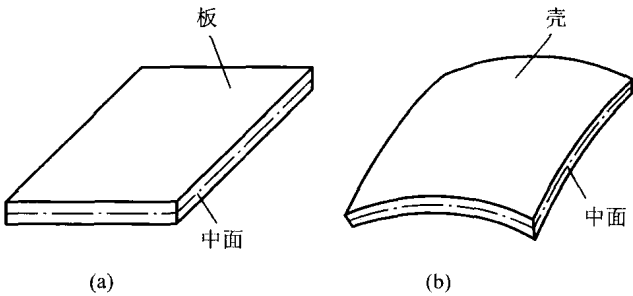


图 1.1

一个方向的尺寸远大于其他两个方向尺寸的构件称为杆类构件，简称为杆件或杆，如图 1.2 所示。杆的垂直于杆长度方向的剖面称为横截面，所有横截面形心的连线称为杆的轴线，横截面与轴线相互垂直。杆件可用横截面和轴线两个几何特征来描述。轴线为直线的杆称为直杆，如图 1.2(a)、(c)所示；轴线为曲线的杆称为曲杆，如图 1.2(b)所示。横截面的大小和形状沿轴线没有变化的杆件称为等截面杆，如图 1.2(a)、(b)所示；横截面的大小和形状沿轴线有变化的杆件称为变截面杆，如图 1.2(c)所示。等截面直杆简称为等直杆。

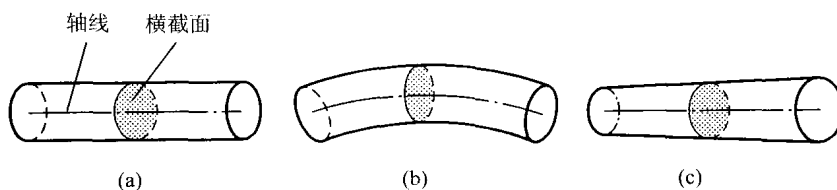


图 1.2

材料力学主要研究杆类构件，最基本的是等直杆。

1.1.2 材料力学的研究内容及任务

为了保证机械或结构物的正常工作，构件必须满足以下要求：

(1) 有足够的强度。即在规定的载荷作用下，构件不会发生破坏。例如，车轴不可折断，储气罐不应爆炸。所谓强度，就是指构件抵抗破坏的能力，强度破坏包括断裂和发生明显塑性变形(即外力撤除后不能恢复的变形)。

(2) 有足够的刚度。即在规定的载荷作用下，构件不会产生过大的变形。例如，机床主轴变形过大，将影响对工件的加工精度；桥梁变形过大，将影响车辆行驶的舒适性和安全性。所谓刚度，是指构件抵抗变形的能力，这里所指的变形是弹性变形(即外力撤除后可以恢复的变形)。

(3) 有足够的稳定性。即在规定的载荷作用下，构件应能保持原有的平衡形态。对于受压的细长杆件，如支撑房梁的柱、千斤顶的螺杆，载荷在规定范围内变化时，应能始终保持直线平衡形态，如果被压弯了，工程上称为失稳，构件将丧失承载能力，导致结构物的坍塌。所谓稳定性，是指构件在载荷作用下保持原有平衡形态的能力。

一般来说，为保证安全，构件应同时满足以上三项要求，但对于具体构件往往有所侧重。例如，储气罐侧重于强度，机床主轴侧重于刚度，细高的房柱则侧重于稳定性。当然，对于特殊构件，也可能有相反的要求。例如，安全销，为保证其他重要构件的安全，当载荷达到某一许可值时必须被切断；车辆的缓冲弹簧应该有较大的弹性变形能力。

一个设计合理的构件，不仅要满足以上安全性要求，还应该满足降低材料消耗、减轻自重和节约资金等经济性要求。安全性和经济性是一对矛盾，解决这一矛盾是材料力学的主要任务，就是要研究如何在满足强度、刚度和稳定性的前提下，为设计既安全又经济的构件提供必要的理论基础和计算方法。

1.2 材料力学的基本假设

研究构件的强度、刚度和稳定性,就要涉及构件所用材料的物理性质,而材料的物质结构又非常复杂,不可能完全如实地加以考虑。为了便于数学分析,必须抓住与问题有关的主要属性,忽略次要属性,对材料作出理想化假设。

1. 连续性假设

假定物质毫无空隙地充满构件所占有的空间,这意味着构件变形时材料的相邻部分既不相互分离也不相互挤入,一些力学量(如位移、变形)就可以表示为坐标的连续函数,研究的区域可以无限小,进而能够使用极限与微积分等数学方法。

2. 均匀性假设

假定构件各点处材料的力学性能完全相同。所谓材料的力学性能,就是材料在外力作用下所表现出来的性能。

当然,这一假设从微观上讲并不成立。例如,金属由晶粒组成,而各个晶粒的力学性能会有差异,晶粒交界处的力学性能与晶粒内部的力学性能也不同,但由于构件尺寸远大于晶粒尺寸,包含了为数甚多的晶粒,利用试样测定的材料力学性能参数,是所有晶粒性能的统计平均值,所以可以认为材料是均匀的。

3. 各向同性假设

假设构件的材料沿各个方向上的力学性能完全相同。

就工程上常用的金属材料而言,其各个晶粒并非各向同性的,但由于构件中包含的晶粒数量庞大且排列随机,宏观上并不显示出方向性的差异,因此可以认为金属是各向同性的。

对于木材、纤维增强复合材料等宏观力学性能具有明显的方向性,应按各向异性材料处理。

4. 小变形假设

假设在外力或其他外部作用(如温度)的影响下,构件所产生的变形与其本身的几何尺寸相比显得非常微小,可以忽略变形对构件几何尺寸的影响。这样,在研究构件的平衡、分析结构的变形几何关系等问题时,可用原始几何尺寸进行计算,从而使问题大大简化。

应该指出,有些特殊问题是不能使用小变形假设的。本书对此不作讨论。

1.3 外力与内力

1.3.1 外力及其分类

构件的外力是指周围物体对构件的作用力。

按作用方式,外力可分为体积力和表面力。体积力是连续分布于构件体积内每一点的

力,例如,重力和惯性力。表面力是作用在构件表面上的力,依据其作用的区域形态,表面力又分为面分布力、线分布力和集中力。实际上表面力是分布在有限分面积上的面分布力,线分布力和集中力只是其简化的结果。需要注意的是,在材料力学中画杆件的受力简图时,通常可以将横截面上的外力向截面内一点简化,但不允许将外力沿杆的轴线方向简化,除非外力的作用区域沿轴线方向的尺寸与杆的长度相比很小,从而可用合力等效替代。

依据主动性还是被动性,外力可分为载荷和约束力。载荷,依据随时间的变化情况,可分为静载荷和动载荷。若载荷由零缓慢地增加到一定值,以后保持不变,或变化很不明显,即为静载荷,如建筑物受到的雪载荷,水坝受到的静水压力等都是静载荷;若随时间显著变化或使构件各质点产生明显加速度的载荷,称为动载荷,锻锤杆受到的反冲击力、内燃机气缸内的气体压力等都是动载荷。

1.3.2 内力及内力分量

构件在没有受到外力作用之前,内部质点与质点之间就已经存在着相互作用力,从而使其保持一定的形体。当受到外力作用而发生变形时,各质点之间产生了附加的相互作用力,称为“附加内力”,简称为内力。它随着外力的增大而增大,当达到某一极限值时,构件就沿某个截面断裂。要研究构件的承载能力,首先需要研究该截面上的内力。材料力学中所说的内力,更多地是指截面内力,即由外力引起的构件某截面两侧部分之间的相互作用力。

为了显示某截面内力,假想用该截面将构件切开,分成两部分,如图 1.3(a)、(b)所示。由连续性假设可知,截面上的内力是连续的分布力系,且两截面上的内力属于作用力和反作用力的关系,为求内力,只需考虑任一部分,例如,图中的部分 I。

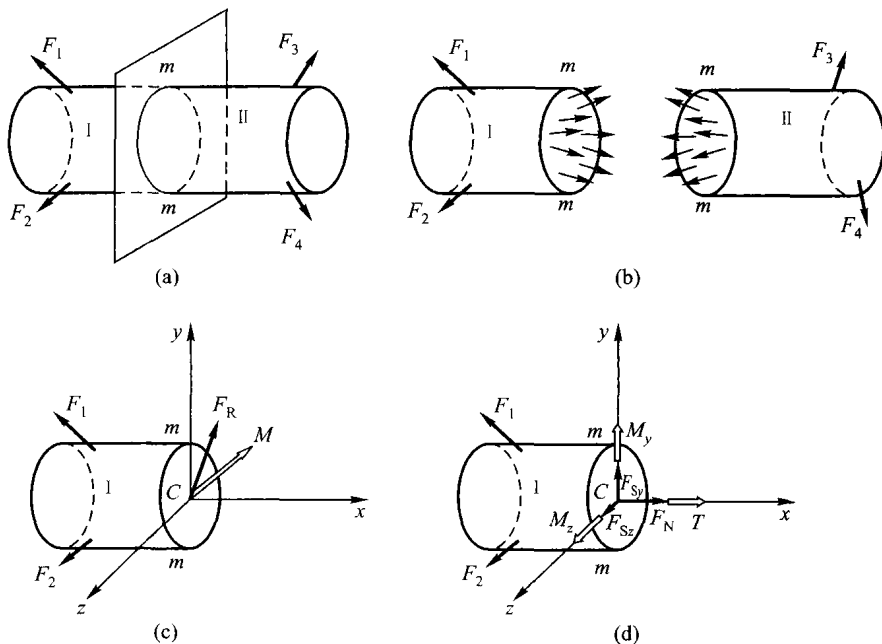


图 1.3

根据力系的简化理论,将截面上的分布内力系向截面形心简化,得一主矢 F_R 与一主矩 M 。二者的方向通常是未知的,为便于分析,建立坐标系,其中的 x 轴沿杆的轴线方向(垂直于截面),并将主矢和主矩向三个示坐标轴分解,得内力分量 F_N 、 F_{Sy} 与 F_{Sz} ,以及内力偶矩分量 T 、 M_y 与 M_z 。沿轴线方向的内力分量 F_N 称为轴力,与截面相切的内力分量 F_{Sy} 与 F_{Sz} 称为剪力;矢量沿轴线方向的内力偶矩分量 T 称为扭矩,矢量与截面相切的内力偶矩分量 M_y 与 M_z 称为弯矩。为叙述简便,以后将这六个分量统称为内力分量。

如果构件在外力作用下整体是平衡的,则它的任意取出部分也必然平衡,即截面上的内力分量与该部分上的外力构成平衡力系,可以通过平衡方程:

$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum F_z = 0$$

$$\sum M_x = 0, \sum M_y = 0, \sum M_z = 0$$

将内力由外力表示出来。可见,对于取出部分,刚体静力学的平衡理论依然成立。

上面给出了求截面内力的一般方法,称为截面法。归纳为三个步骤:

- (1) 在欲求内力的截面处,假想将构件切开,取其中一部分(含外力)为研究对象;
- (2) 用作用于截面上的内力分量代替另一部分对取出部分的作用;
- (3) 对取出部分建立平衡方程,确定未知的内力分量。

顺便指出,在画分离体受力图时,对于明显为零的内力分量,无须画出。在很多情况下,杆件横截面上的内力分量中大部分为零。

1.4 应力与应变

1.4.1 应力的概念

用截面法确定的内力分量是构件截面上分布内力的简化结果,为了描述截面上各点内力的分布情况,需要引入内力分布集度,即应力的概念。

考虑构件截面 $m-m$ 上任一点 k ,如图 1.4(a)所示,围绕点 k 取微面积 ΔA ,设作用在该面积上的分布内力的合力为 ΔF ,则比值 $\Delta F/\Delta A$ 称为小面积 ΔA 上的平均应力。当微面积 ΔA 趋于无穷小时,该平均应力的极限值为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1-1)$$

称为截面 $m-m$ 上点 k 处的应力或全应力。

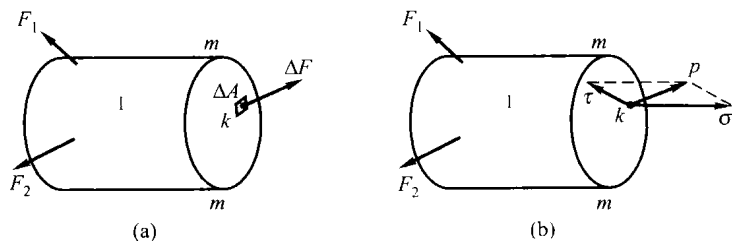


图 1.4

为便于分析, 将全应力 p 沿截面的法向和切向分解, 其法向分量称为正应力, 用 σ 表示, 切向分量称为切应力, 用 τ 表示, 如图 1.4(b) 所示。

应力的单位为 Pa, 即 N/m^2 , 工程中常用 MPa、GPa。换算关系为

$$1\text{GPa}=10^3\text{MPa}=10^9\text{Pa}$$

1.4.2 应变的概念

为研究构件的刚度, 需要研究构件的变形, 表征变形的力学量是应变分量。考虑构件内任一点 P , 在构件尚未受力时, 过点 P , 沿 x 轴方向作长为 Δx 线段 PA , 沿 y 轴方向作长为 Δy 线段 PB , 如图 1.5(a) 所示。设构件受力变形后, 点 P 、 A 、 B 分别位移到 P' 、 A' 、 B' , 线段 $P'A'$ 比原始长度 $\overline{PA}=\Delta x$ 有一个增量 Δu , 成为 $\Delta x+\Delta u$, 如图 1.5(b) 所示。比值为

$$\epsilon_m = \frac{\overline{P'A'} - \overline{PA}}{\overline{PA}} = \frac{\Delta u}{\Delta x}$$

表示线段 PA 每单位长度的伸长量, 称为平均正应变。其极限值为

$$\epsilon = \lim_{\overline{PA} \rightarrow 0} \frac{\overline{P'A'} - \overline{PA}}{\overline{PA}} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta x} \quad (1-2)$$

称为 P 点处沿 x 方向的正应变, 又称线应变。类似地可以定义沿其他任意方向的正应变。

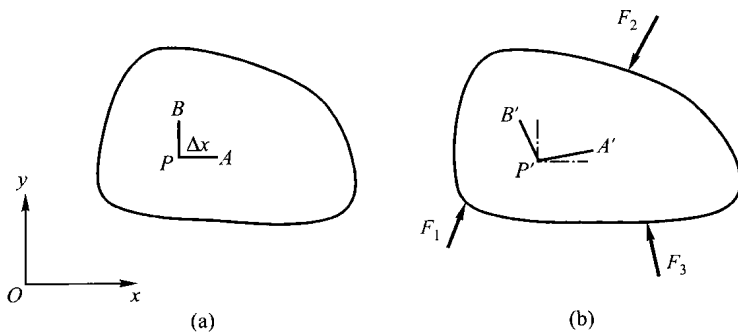


图 1.5

构件的变形不仅表现为线段长度的改变, 而且, 正交线段的夹角也可能发生改变。在图 1.5 中, 变形前 P 点处沿 x 方向的线段 PA 与沿 y 方向的线段 PB 夹角为 $\frac{\pi}{2}$, 变形后夹角成为 $\angle B'P'A'$, 角度变化量的极限值为

$$\gamma = \lim_{\substack{\overline{PA} \rightarrow 0 \\ \overline{PB} \rightarrow 0}} \left(\frac{\pi}{2} - \angle B'P'A' \right) \quad (1-3)$$

称为 P 点在 x 与 y 方向的切应变, 又称角应变。类似地可以定义其他任意两个正交方向的切应变。

正应变和切应变的量纲均为 1 (或称为无量纲), 切应变的单位为 rad (弧度)。一点处各个方向的正应变和切应变统称为应变分量, 应变分量描述了一点处的局部变形, 构件的