

卓越工程师教育培养计划配套教材

工程基础系列

材料力学

曹丽杰 主编

刘小妹 李培超 副主编

刘立厚 主审



清华大学出版社

卓越工程师教育培养计划配套教材

工程基础系列



材料力学

曹丽杰 主编

刘小妹 李培超 副主编



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是根据力学基础课程教学指导分委员会《材料力学课程教学基本要求》和“卓越工程师教育培养计划”的要求编写的。

全书共 11 章基本内容和 3 个附录。基本内容包括:轴向拉伸和压缩、剪切与挤压、扭转、弯曲内力、弯曲应力、弯曲变形、应力状态分析和强度理论、组合变形、压杆稳定和动载荷。附录包括:截面图形的几何性质、梁的挠度与转角和型钢表。每章后附有思考题、习题,书后附有部分习题答案。

本书强调工程应用,引入了和卓越试点专业领域相关的工程实例以及例题、习题,注重与卓越试点专业的专业课的衔接与融合。全书理论简明扼要、层次分明、详略得当。可作为汽车车辆工程、城市轨道交通车辆工程等卓越试点专业的材料力学课程的教材,也可作为高等学校应用型本、专科各专业,如机械、材料、热能、航空等专业材料力学课程的教材,还可供有关工程技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

材料力学/曹丽杰主编. —北京:清华大学出版社, 2013.2

(卓越工程师教育培养计划配套教材·工程基础系列)

ISBN 978-7-302-31367-0

I. ①材… II. ①曹… III. ①材料力学—高等学校—教材 IV. ①TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 013984 号

责任编辑:庄红权 赵从棉

封面设计:常雪影

责任校对:刘玉霞

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:三河市君旺印装厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:15.75

字 数:379 千字

版 次:2013 年 2 月第 1 版

印 次:2013 年 2 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:29.80 元

产品编号:050681-01

卓越工程师教育培养计划配套教材

总编委会名单

主 任：丁晓东 汪 泓

副主任：陈力华 鲁嘉华

委 员：(按姓氏笔画为序)

丁兴国	王岩松	王裕明	叶永青	刘晓民
匡江红	余 粟	吴训成	张子厚	张莉萍
李 毅	陆肖元	陈因达	徐宝钢	徐新成
徐滕岗	程武山	谢东来	魏 建	

卓越工程师教育培养计划配套教材

——工程基础系列编委会名单

主 任：徐新成 程武山

副主任：张子厚 刘晓民 余 粟

委 员：（按姓氏笔画为序）

王明衍	刘立厚	朱建军	汤 彬	吴建宝
张学山	张敏良	张朝民	李 路	陈建兵
林海鸥	范晓兰	胡义刚	胡浩民	唐觉民
徐红霞	徐滕岗			



《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020)》明确指出“提高人才培养质量。牢固确立人才培养在高校工作中的中心地位,着力培养信念执著、品德优良、知识丰富、本领过硬的高素质专门人才和拔尖创新人才。……支持学生参与科学研究,强化实践教学环节。……创立高校与科研院所、行业、企业联合培养人才的新机制。全面实施‘高等学校本科教学质量与教学改革工程’。”教育部“卓越工程师教育培养计划”(简称“卓越计划”)是为贯彻落实党的“十七大”提出的走中国特色新型工业化道路、建设创新型国家、建设人力资源强国等战略部署,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020)》实施的高等教育重大计划。“卓越计划”对高等教育面向社会需求培养人才,调整人才培养结构,提高人才培养质量,推动教育教学改革,增强毕业生就业能力具有十分重要的示范和引导作用。

上海工程技术大学是一所具有鲜明办学特色的地方工科大学。长期以来,学校始终坚持培养应用型创新人才的办学定位,以现代产业发展对人才需求为导向,努力打造培养优秀工程师的摇篮。学校构建了以产学研战略联盟为平台,学科链、专业链对接产业链的办学模式,实施产学合作教育人才培养模式,造就了“产学合作、工学交替”的真实育人环境,培养有较强分析问题和解决问题能力,具有国际视野、创新意识和奉献精神的高素质应用型人才。

上海工程技术大学与上海汽车集团公司、上海航空公司、东方航空公司、上海地铁运营有限公司等大型企业集团联合创建了“汽车工程学院”、“航空运输学院”、“城市轨道交通学院”、“飞行学院”,校企联合成立了校务委员会和院务委员会,企业全过程参与学校相关专业的人才培养方案、课程体系和实践教学体系的建设,学校与企业实现了零距离的对接。产学合作教育使学生每年都能够到企业“顶岗工作”,学生对企业生产第一线有了深刻的了解,学生的实践能力和社会适应能力不断增强。这一系列举措都为“卓越工程师教育培养计划”的实施打下了坚实基础。

自2010年教育部“卓越工程师教育培养计划”实施以来,上海工程技术大学先后获批了第一批和第二批5个专业8个方向的试点专业。为此,学校组成了由企业领导、业务主管与学院主要领导组成的试点专业指导委员会,根据各专业工程实践能力形成的不同阶段的特点,围绕课内、课外培养和学校、企业培养两条互相交叉、互为支撑的培养主线,校企双方共同优化了试点专业的人才培养方案。试点专业指导委员会聘请了部分企业高级工程师、技术骨干和高层管理人员担任试点专业的教学工作,参与课程建设、教材建设、实验教学建设等教学改革工作。



“卓越工程师教育培养计划配套教材——工程基础系列”是根据培养卓越工程师“具备扎实的工程基础理论、比较系统的专业知识、较强的工程实践能力、良好的工程素质和团队合作能力”的目标进行编写的。本系列教材由公共基础类、计算机应用基础类、机械工程专业基础类和工程能力训练类组成,共 21 册,涵盖了“卓越计划”各试点专业公共基础及专业基础课程。

该系列教材以理论和实践相结合作为编写的理念和原则,具有基础性、系统性、应用性等特点。在借鉴国内外相关文献资料的基础上,加强基础理论,对基本概念、基础知识和基本技能进行清晰阐述,同时对实践训练和能力培养方面作了积极的探索,以满足卓越工程师各试点专业的教学目标和要求。如《高等数学》适当融入“卓越工程师教育培养计划”相关专业(车辆工程、飞行技术)的背景知识并进行应用案例的介绍。《大学物理学》注意处理物理理论的学习和技术应用介绍之间的关系,根据交通(车辆和飞行)专业特点,增加了流体力学简介等,设置了物理工程的实际应用案例。《C 语言程序设计》以编程应用为驱动,重点训练学生的编程思想,提高学生的编程能力,鼓励学生利用所学知识解决工程和专业问题。《现代工程图学》等 7 本机械工程专业基础类教材在介绍基础理论和知识的同时紧密结合各专业内容,开拓学生视野,提高学生实际应用能力。《现代制造技术实习题集》是针对现代化制造加工技术——数控车床、数控铣床、数控雕刻、电火花线切割、现代测量等技术进行编写。该系列教材强调理论联系实际,体现“面向工业界、面向世界、面向未来”的工程教育理念,努力实践上海工程技术大学建设现代化特色大学的办学思想和特色。

这种把传统理论教学与行业实践相结合的教学理念和模式对培养学生的创新思维,增强学生的实践能力和就业能力会产生积极的影响。以实施卓越计划为突破口,一定能促进工程教育改革和创新,全面提高工程教育人才培养质量,对我国从工程教育大国走向工程教育强国起到积极的作用。

陈关龙

上海交通大学机械与动力工程学院教授、博士生导师、副院长
教育部高等学校机械设计制造及自动化教学指导委员会副主任
中国机械工业教育协会机械工程及自动化教学委员会副主任



本书为“卓越工程师教育培养计划”系列教材,是按照力学基础课程教学指导分委员会《材料力学课程教学基本要求》和“卓越计划”要求而编写的。卓越工程师培养是一种全新的工程人才培养模式,是以社会需求为导向,立足于应用型、强调工程实践,目标是培养在工程技术领域工作的、能把学到的知识与社会需求对接的优秀工程师。

上海工程技术大学是教育部提出的“卓越工程师教育培养计划”首批试点高校之一,卓越培养试点专业是汽车车辆工程、城市轨道交通车辆工程,培养适应汽车产业、城市轨道交通车辆产业发展的需要,能够在汽车产品生产一线、汽车产品开发现场工作和城市轨道交通车辆的运行保障及维护、故障诊断及维修的优秀工程技术应用人才。为了更好地配合“卓越计划”的开展与实施,对上述两专业的卓越班级的“材料力学”课程进行了改革探索,根据上海工程技术大学以培养应用型工程师为主的“材料力学”课程教学体系的教学改革与实践,编写了本书。

本书重点阐明了材料力学的基本概念、基本理论和基本方法,内容包括轴向拉伸与压缩、剪切与挤压、扭转、弯曲内力、弯曲应力、弯曲变形、应力状态分析和强度理论、组合变形、压杆稳定和动载荷等章节。本书简明扼要、层次分明、详略得当。书中的实例和卓越工程师培养试点专业汽车车辆工程、城市轨道交通车辆工程结合紧密,体现专业特点。对每一种基本变形,按照外力、内力、应力、变形、强度和刚度问题,循序渐进地展开分析。编写时,精选了思考题、习题,以更好地使学生掌握材料力学的基本概念、基本理论和分析方法。

本书适用学时为 48~64 学时。除了适合车辆工程、城市轨道交通卓越班以外,还可适用于和上述学时相当的机械、材料、热能、航空等专业的材料力学或工程力学课程教材。

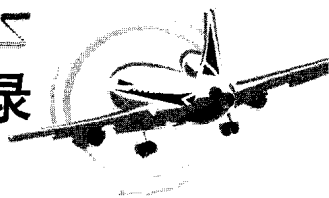
本书由上海工程技术大学机械工程学院工程力学部编写。其中,曹丽杰编写第 1~4 章、第 9 章、第 11 章和附录 A,刘小妹编写第 5~7 章,李培超编写第 8 章、第 10 章。全书由曹丽杰任主编,刘立厚副教授审阅。

在本书的编写过程中,得到了上海工程技术大学教务处、机械工程学院和其他学院领导的热情帮助,在此表示感谢。同时,借鉴了国内外的许多优秀教材,吸取了它们的长处,选用了其中的部分经典例题、思考题和习题,在此对其作者深表感谢。

由于编者水平有限,书中不当和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2013 年 1 月



第 1 章 绪论	1
1.1 材料力学的任务及研究对象	1
1.1.1 强度 刚度 稳定性	2
1.1.2 材料力学的研究对象	2
1.2 变形固体及其基本假设	3
1.2.1 变形固体的变形性质	3
1.2.2 变形固体的基本假设	3
1.3 外力与内力	4
1.3.1 外力及其分类	4
1.3.2 内力与截面法	4
1.4 应力与应变	5
1.4.1 应力	5
1.4.2 应变	6
1.5 杆件变形的基本形式	7
思考题	8
第 2 章 轴向拉伸和压缩	9
2.1 轴向拉伸和压缩的概念及工程实例	9
2.2 轴向拉压杆的内力 轴力 轴力图	10
2.3 轴向拉压杆的应力 强度条件	11
2.3.1 横截面上的应力	11
2.3.2 斜截面上的应力	12
2.3.3 圣维南原理	13
2.3.4 强度条件	15
2.4 轴向拉压杆的变形 胡克定律	17
2.4.1 轴向线应变 胡克定律	18
2.4.2 横向线应变 泊松比	18



2.4.3 叠加原理	19
2.5 轴向拉压杆的应变能 比能	22
2.5.1 应变能 比能	22
2.5.2 能量法求节点位移	24
2.6 材料在拉伸和压缩时的力学性能	25
2.6.1 试件尺寸 试验设备	25
2.6.2 低碳钢拉伸时的力学性能	26
2.6.3 其他材料拉伸时的力学性能	28
2.6.4 材料压缩时的力学性能	29
2.7 极限应力 安全系数 许用应力	30
2.8 简单拉压超静定问题	30
2.8.1 超静定的概念和一般解法	30
2.8.2 装配应力和温度应力	33
2.9 应力集中	35
2.9.1 应力集中的概念	35
2.9.2 应力集中对构件强度的影响	36
思考题	36
习题	38
第3章 剪切与挤压	43
3.1 剪切的概念及工程实例	43
3.2 剪切的实用计算	44
3.3 挤压的实用计算	44
思考题	49
习题	49
第4章 扭转	1
4.1 扭转的概念及工程实例	1
4.2 外力偶矩的计算 扭矩和扭矩图	52
4.2.1 外力偶矩的计算	52
4.2.2 扭矩和扭矩图	52
4.3 薄壁圆筒的扭转 剪切胡克定律	54
4.3.1 薄壁圆筒扭转的应力	54
4.3.2 切应力互等定理	55
4.3.3 剪切胡克定律	55
4.4 圆轴扭转的应力 强度条件	56
4.4.1 圆轴扭转横截面上的应力	56
4.4.2 横截面的极惯性矩 I_p 与抗扭截面系数 W_p 计算	58
4.4.3 圆轴扭转的强度条件	59



4.5 圆轴扭转的变形 刚度条件	60
4.5.1 圆轴扭转变形 扭转角	60
4.5.2 圆轴扭转的刚度条件	60
4.6 简单超静定轴	63
4.7 圆轴扭转破坏的原因分析	65
4.7.1 圆轴扭转破坏现象 危险点的受力	65
4.7.2 破坏原因分析	66
4.8 密圈螺旋弹簧的强度计算	66
思考题	67
习题	69
第5章 弯曲内力	73
5.1 弯曲的概念及工程实例	73
5.2 梁的剪力和弯矩	74
5.3 剪力方程和弯矩方程 剪力图和弯矩图	77
5.4 剪力、弯矩、载荷集度间的关系	80
5.5 叠加原理画弯矩图	84
5.6 平面刚架和曲杆的内力图	85
5.6.1 刚架内力	85
5.6.2 曲梁内力	86
思考题	87
习题	88
第6章 弯曲应力	92
6.1 纯弯曲时的正应力	92
6.1.1 矩形截面梁纯弯曲	92
6.1.2 梁横截面上的正应力	93
6.2 弯曲正应力的强度条件	96
6.3 弯曲切应力 强度条件	99
6.3.1 弯曲切应力	99
6.3.2 切应力强度条件	103
6.4 提高梁的弯曲强度的措施	106
6.4.1 梁的合理截面形状	106
6.4.2 梁的合理受力	108
思考题	109
习题	111
第7章 弯曲变形	114
7.1 基本概念及工程实例	114



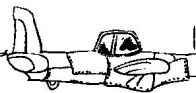
7.2	挠曲线的近似微分方程	115
7.3	积分法求弯曲变形 挠曲线大致形状	116
7.3.1	积分法求弯曲变形	116
7.3.2	挠曲线大致形状	119
7.4	叠加法求弯曲变形	120
7.4.1	载荷叠加法	120
7.4.2	逐段分析求和法	121
7.5	超静定梁的解法	123
7.6	梁的刚度条件 提高梁弯曲刚度的措施	125
7.6.1	梁的刚度条件	125
7.6.2	提高梁弯曲刚度的措施	126
	思考题	127
	习题	128
第8章	应力状态分析和强度理论	131
8.1	应力状态的概念	131
8.1.1	一点的应力状态	131
8.1.2	应力状态的研究方法	131
8.1.3	主应力和应力状态的分类	133
8.2	平面应力状态分析——解析法	134
8.2.1	任意斜截面上的应力	134
8.2.2	主应力与主平面	135
8.2.3	最大切应力	136
8.3	平面应力状态分析——图解法	138
8.3.1	应力圆方程	138
8.3.2	应力圆的绘制	138
8.3.3	应力圆与单元体之间的对应关系	139
8.3.4	利用图解法分析平面应力状态	139
8.4	三向应力状态分析	140
8.5	广义胡克定律	142
8.6	复杂应力状态下的应变能密度	144
8.7	强度理论概述	145
8.8	关于断裂的强度理论	146
8.8.1	最大拉应力理论(第一强度理论)	146
8.8.2	最大拉应变理论(第二强度理论)	146
8.9	关于屈服的强度理论	147
8.9.1	最大切应力理论(第三强度理论)	147
8.9.2	畸变能密度理论(第四强度理论)	148
	思考题	149



习题	150
第 9 章 组合变形	154
9.1 组合变形的概念及工程实例	154
9.2 斜弯曲	155
9.2.1 斜弯曲的概念	155
9.2.2 矩形截面斜弯曲梁的计算	155
9.2.3 圆形截面斜弯曲梁的计算	157
9.3 拉伸(压缩)与弯曲组合	158
9.4 偏心压缩 截面核心	161
9.4.1 偏心压缩	161
9.4.2 截面核心	162
9.5 弯曲与扭转组合	164
思考题	167
习题	169
第 10 章 压杆稳定	173
10.1 压杆稳定性的概念	173
10.2 细长压杆的临界载荷	175
10.2.1 两端铰支	175
10.2.2 两端非铰支细长压杆的临界载荷	177
10.3 压杆的临界应力	178
10.3.1 临界应力	178
10.3.2 欧拉公式的适用范围	179
10.3.3 临界应力的经验公式	179
10.4 压杆的稳定计算	183
10.4.1 压杆稳定条件	183
10.4.2 折减系数法	183
10.5 提高压杆稳定性的措施	185
思考题	186
习题	186
第 11 章 动载荷	189
11.1 动载荷与动应力	189
11.2 构件作等加速运动时的应力计算	189
11.2.1 构件作等加速直线运动时的应力计算	189
11.2.2 构件作等速转动时的应力计算	191
11.3 构件受冲击时的应力和变形的计算	192
11.3.1 自由落体冲击	193



11.3.2 水平冲击·····	194
11.3.3 提高构件抗冲击能力的措施·····	197
11.4 冲击韧性·····	198
思考题·····	199
习题·····	200
附录 A 截面图形的几何性质·····	202
A.1 静矩 形心坐标·····	202
A.1.1 静矩·····	202
A.1.2 形心坐标·····	202
A.2 惯性矩 极惯性矩·····	204
A.2.1 惯性矩·····	204
A.2.2 极惯性矩·····	204
A.2.3 简单图形的惯性矩·····	204
A.2.4 组合截面的惯性矩·····	206
A.3 惯性积 惯性半径·····	206
A.4 平行移轴定理·····	207
A.5 转轴公式 主惯性矩·····	209
思考题·····	210
习题·····	210
附录 B 梁的挠度与转角·····	213
附录 C 型钢表·····	215
部分习题答案·····	228
参考文献·····	236



绪 论

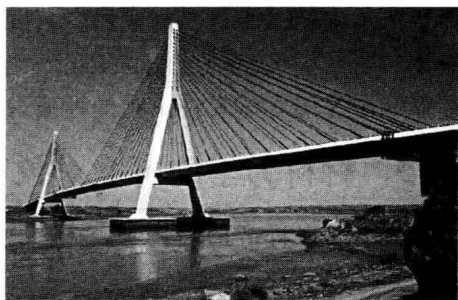
1.1 材料力学的任务及研究对象

材料力学(mechanics of materials)是变形体力学的分支之一,是一门为工程实际设计提供必要理论基础的技术基础课,也是一门理论与工程实际相结合的课程。材料力学的基本任务是研究物体在外力作用下的受力、变形及失效破坏的规律,为合理设计构件提供基本理论与方法。材料力学研究的物体是**变形体**(deformable body)。

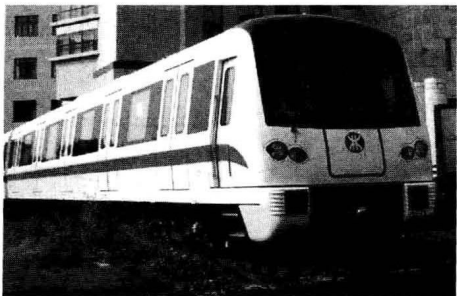
工程中的各种机械和结构(图 1.1(a)~(d))都是由众多零、部件组成,这些零、部件是组成结构的最基本单元,称为**构件**(member)。为保证整个机械结构正常工作,组成结构的每个构件在受外载荷时都应具有足够的承载能力,满足强度、刚度和稳定性的要求。



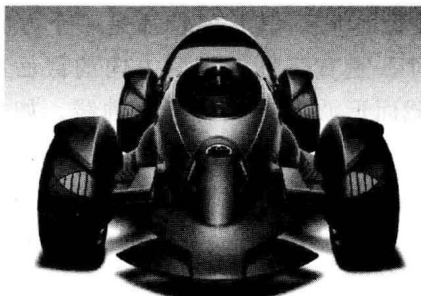
(a)



(b)



(c)



(d)

图 1.1



1.1.1 强度 刚度 稳定性

为保证构件能够正常地工作,首先,要求构件在载荷作用下不发生破坏。例如,起重机在吊运货物时,若吊索发生断裂,则整个起重机就将停止工作。其次,构件受外力时,其尺寸与形状发生变化,称为变形,构件在载荷作用下还要求不发生过度的变形。例如,机床主轴工作时变形过大,则将影响加工精度。此外,对于受压杆件,要求它在载荷作用下,具有保持原有直线平衡形态的能力。例如,活塞杆,当沿杆轴线方向的压力达到某一极限值后,杆轴线会从直线形状突变为曲线,将细长压杆出现的这种现象称为构件在原有形状下的平衡丧失了稳定性,简称失稳。

综上所述,对构件设计提出如下三个方面的要求。

(1) **强度(strength)** 构件在确定外力的作用下,不发生断裂,具有足够的抵抗破坏的能力。

(2) **刚度(rigidity)** 构件在确定外力的作用下,其变形或位移不超过工程允许的范围,具有足够的抵抗变形能力。

(3) **稳定性(stability)** 构件在某些受力形式(例如轴向压力)下,其原有形状下的平衡不会发生突然转变,具有足够的抵抗失稳的能力。

在构件设计时,具备了足够的强度、刚度、稳定性,则说明其安全可靠性达到了要求。此外,从经济性考虑,还应尽可能地合理选用材料与节省材料,从而降低制造成本并减轻构件重量。可见,安全可靠和经济节省是相互矛盾的,构件设计必须在满足“必要的强度、刚度、稳定性”的前提下,尽可能地减少成本。

构件是由不同的工程材料制成的,构件的强度、刚度、稳定性问题均与所选用材料的力学性能有关。**材料的力学性能(mechanical properties of material)**是指材料在外力的作用下抵抗变形和破坏等方面表现出来的性质,这些力学性质均需通过材料力学试验来测定。

1.1.2 材料力学的研究对象

构件具有各种各样的形式,根据它们的主要几何特征,大致可归纳为如下三类。

1. 杆(bar)

如图 1.2 所示,其几何特征是一个方向的尺寸(长度)远大于其他两个方向(宽度和高度)的尺寸。垂直于杆件长度方向的截面称为横截面,横截面形心的连线为杆的轴线。如果杆的轴线是直线,则称为直杆;轴线为曲线时,称为曲杆。各横截面尺寸不变时,叫等截面杆;否则,为变截面杆。杆是工程中最基本的构件,是材料力学的主要研究对象。

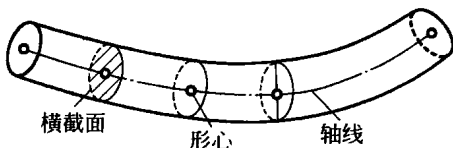


图 1.2

2. 板和壳(plate)

如图 1.3 所示,其几何特征是两个方向的尺寸(长度和宽度)远大于另一个方向(厚度)的尺寸,成平面形状的称为平板(图 1.3(a)),成曲面形状的称为曲板或壳(图 1.3(b))。板



和壳在石油和化工的压力容器、船舶、飞机及现代建筑中用的较多。

3. 块体(lump)

如图 1.4 所示,其几何特征是三个方向(长、宽和高)的尺寸属于同一量级的大小,机械上的短粗铸件就是块体。

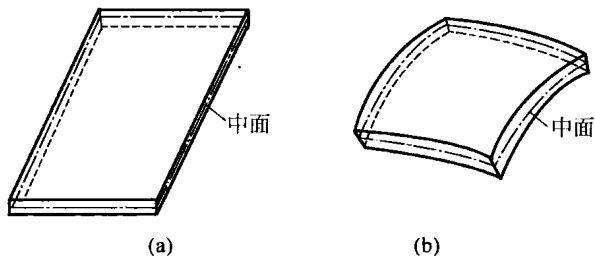


图 1.3
(a) 平板; (b) 曲板

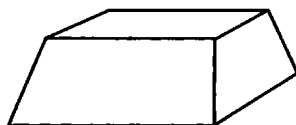


图 1.4

1.2 变形固体及其基本假设

1.2.1 变形固体的变形性质

理论力学中的绝对刚体是不存在的,由实验可知,任何固体在外力作用下都会发生变形,即它的形状和尺寸大小总会有些改变,称为变形固体。

变形固体的变形分为两类:一种是当外力去除后能自行消失的变形,称为弹性变形(elastic deformation);另一种是外力去除后不能消失的变形,称为塑性变形(plastic deformation)或残余变形(residual deformation)。

1.2.2 变形固体的基本假设

工程中变形固体材料的性质是多种多样的,而且其微观结构和力学性质也非常复杂。在进行强度、刚度和稳定性的研究时,通常对变形固体作如下假设。

1. 连续性假设(continuity hypothesis)

认为在物体的整个体积内毫无空隙地充满了物质,其结构是密实的。实际的变形固体都具有不同程度的空隙,但这些空隙的大小与构件的尺寸相比极其微小,可将它们忽略不计。根据这一假设,可以把描述构件内力学性能的一些物理量——如应力、变形、位移等也看成是连续的,可以用坐标的连续函数表示其变化规律。

2. 均匀性假设(homogeneity hypothesis)

认为在物体内,各点处的力学性能完全相同,与位置无关。根据这一假设,可在物体内任一点处取出一微小单元进行分析研究,并将所得结果应用于整个物体。同样,通过试验所获得的大尺寸试样材料的力学性能也可应用于构件内任何微小的部分。