



应用型本科院校“十三五”规划教材/机械工程类

主编 张博 胡金萍

材料力学

Mechanics of Materials

- 适用面广
- 应用性强
- 促进教学
- 面向就业



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



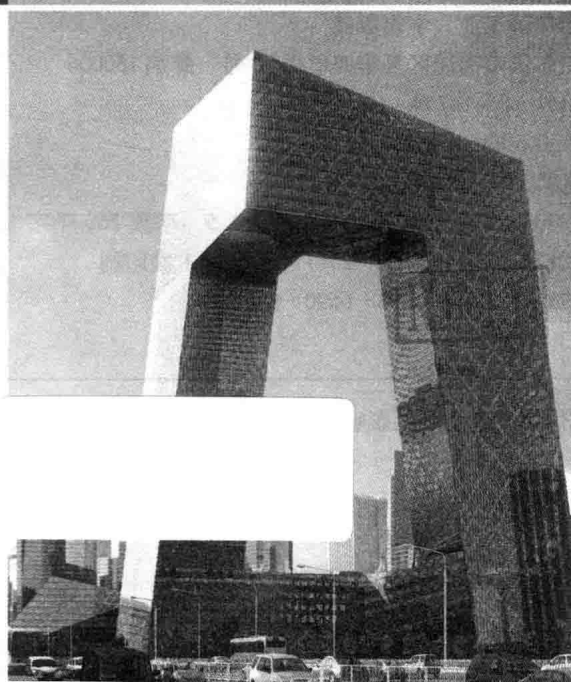
应用型本科院校“十三五”规划教材/机械工程类



主 编 张 博 胡金萍
副主编 沙 宇 褚文君 刘 斌
主 审 王春香

材料力学

Mechanics of Materials



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书在满足工科专业少学时材料力学课程基本要求的前提下,以少而精的理念进行取材和编排章节内容,着重基本内容的掌握和应用,注重理论与实践的紧密结合,突出内容的实用性和应用性。

全书共分为9章以及附录部分,主要内容有:绪论、轴向拉伸与压缩、剪切、扭转、弯曲4种基本变形的内力计算、应力计算、变形计算、强度计算及刚度计算,应力状态分析及强度理论,压杆稳定性计算;附录部分主要内容是截面图形的几何性质及常见型钢表。

本书面向培养应用型人才的高等院校,可作为机械设计制造及其自动化、土木工程等专业的教材。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学/张博,胡金萍主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2017.6

应用型本科院校“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5603-6590-9

I. ①材… II. ①张… ②胡… 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(2017)第088373号

策划编辑 杜 燕

责任编辑 张 瑞

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街10号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 11.5 字数 260千字

版 次 2017年6月第1版 2017年6月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-6590-9

定 价 23.80元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

《应用型本科院校“十三五”规划教材》编委会

主 任 修朋月 竺培国

副主任 王玉文 吕其诚 线恒录 李敬来

委 员 (按姓氏笔画排序)

丁福庆 于长福 马志民 王庄严 王建华

王德章 刘金祺 刘宝华 刘通学 刘福荣

关晓冬 李云波 杨玉顺 吴知丰 张幸刚

陈江波 林 艳 林文华 周方圆 姜思政

庾 莉 韩毓洁 蔡柏岩 臧玉英 霍 琳

序

哈尔滨工业大学出版社策划的《应用型本科院校“十三五”规划教材》即将付梓,诚可贺也。

该系列教材卷帙浩繁,凡百余种,涉及众多学科门类,定位准确,内容新颖,体系完整,实用性强,突出实践能力培养。不仅便于教师教学和学生学

习,而且满足就业市场对应用型人才的迫切需求。

应用型本科院校的人才培养目标是面对现代社会生产、建设、管理、服务等一线岗位,培养能直接从事实际工作、解决具体问题、维持工作有效运行的高等应用型人才。应用型本科与研究型本科和高职高专院校在人才培养上有着明显的区别,其培养的人才特征是:①就业导向与社会需求高度吻合;②扎实的理论基础和过硬的实践能力紧密结合;③具备良好的人文素质和科学技术素质;④富于面对职业应用的创新精神。因此,应用型本科院校只有着力培养“进入角色快、业务水平高、动手能力强、综合素质好”的人才,才能在激烈的就业市场竞争中站稳脚跟。

目前国内应用型本科院校所采用的教材往往只是对理论性较强的本科院校教材的简单删减,针对性、应用性不够突出,因材施教的目的难以达到。因此亟须既有一定的理论深度又注重实践能力培养的系列教材,以满足应用型本科院校教学目标、培养方向和办学特色的需要。

哈尔滨工业大学出版社出版的《应用型本科院校“十三五”规划教材》,在选题设计思路上认真贯彻教育部关于培养适应地方、区域经济和社会发展需要的“本科应用型高级专门人才”精神,根据前黑龙江省委书记吉炳轩同志提出的关于加强应用型本科院校建设的意见,在应用型本科试点院校成功经验总结的基础上,特邀请黑龙江省9所知名的应用型本科院校的专家、学者联合编写。

本系列教材突出与办学定位、教学目标的一致性和适应性,既严格遵照学科体系的知识构成和教材编写的一般规律,又针对应用型本科人才培养目标

及与之相适应的教学特点,精心设计写作体例,科学安排知识内容,围绕应用讲授理论,做到“基础知识够用、实践技能实用、专业理论管用”。同时注意适当融入新理论、新技术、新工艺、新成果,并且制作了与本书配套的PPT多媒体教学课件,形成立体化教材,供教师参考使用。

《应用型本科院校“十三五”规划教材》的编辑出版,是适应“科教兴国”战略对复合型、应用型人才的需求,是推动相对滞后的应用型本科院校教材建设的一种有益尝试,在应用型创新人才培养方面是一件具有开创意义的工作,为应用型人才的培养提供了及时、可靠、坚实的保证。

希望本系列教材在使用过程中,通过编者、作者和读者的共同努力,厚积薄发、推陈出新、细上加细、精益求精,不断丰富、不断完善、不断创新,力争成为同类教材中的精品。

马长利

前 言

本书面向培养应用型人才的高等院校,可作为机械设计制造及其自动化、土木工程等专业的教材。全书共分为9章以及附录部分,主要内容有:绪论、轴向拉伸与压缩、剪切、扭转、弯曲4种基本变形的内力计算、应力计算、变形计算、强度计算及刚度计算,应力状态分析及强度理论,压杆稳定性计算;附录部分主要内容是截面图形的几何性质及常见型钢表。

本书在编写中,综合考虑应用型人才的培养目标、材料力学学时普遍减少等因素,在满足工科专业少学时材料力学课程基本要求的前提下,以少而精的理念进行取材和编排章节内容,着重基本内容的掌握和应用,注重理论与实践的紧密结合,突出内容的实用性和应用性。

本书由张博、胡金萍任主编,沙宇、褚文君、刘斌任副主编。具体编写分工如下:黑龙江东方学院建筑工程学部胡金萍编写第1、3、7章,哈尔滨剑桥学院褚文君编写第2章,黑龙江东方学院建筑工程学部蒋志楠编写第4章,黑龙江东方学院机电工程学部张博编写第5、6章,黑龙江东方学院机电工程学部沙宇编写第8章,哈尔滨剑桥学院刘斌编写第9章。

本书初稿邀请到哈尔滨工业大学王春香教授的详细审阅,并提出了宝贵的修改意见,编者表示衷心而诚挚的谢意。

由于编者水平所限,书中难免有疏漏和不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

2017年1月

主要符号表

F	力	ω	挠度
F	力的大小	θ	转角
P	重力	σ_c	弹性极限
F_R	合力	σ_p	比例极限
F_N	轴力	σ_s	屈服极限
q	载荷集度	σ_b	强度极限
$M_O(F)$	力 F 对 O 点之矩	$[\sigma]、[\tau]$	许用应力
$M_z(F)$	力 F 对 z 轴之矩	n	安全系数
M	力偶矩、弯矩	δ	延伸率
F_Q	剪力	ψ	断面收缩率
T	扭矩	I_p	极惯性矩
σ	正应力	I	惯性矩
τ	切应力	W_t	抗扭截面模量
ε	线应变	W_z	抗弯截面模量
γ	切应变	i	惯性半径
φ	扭转角	λ	柔度
σ_{cr}	临界应力	F_{cr}	临界压力

目 录

第1章 绪论	1
1.1 材料力学的任务	1
1.2 变形固体的基本假设	2
1.3 内力 截面法	3
1.4 应力 应变 胡克定律	4
1.5 杆件变形的的基本形式	6
第2章 轴向拉伸与压缩	8
2.1 轴向拉伸与压缩时的内力	8
2.2 轴向拉伸杆中的应力	10
2.3 轴向拉伸与压缩时的变形	12
2.4 拉伸与压缩时材料的力学性能	15
2.5 轴向拉伸与压缩时的强度计算	20
2.6 应力集中的概念	23
习题	24
第3章 剪切	30
3.1 剪切的实用计算	31
3.2 挤压的实用计算	33
习题	35
第4章 扭转	38
4.1 扭转的概念和实例	38
4.2 扭转外力与内力	39
4.3 薄壁圆筒的扭转	42
4.4 圆轴扭转时的应力与变形	45
4.5 圆轴扭转时的强度和刚度条件	49
习题	52
第5章 弯曲内力	59
5.1 工程中的弯曲问题	59
5.2 梁的剪力与弯矩 剪力图与弯矩图	61
5.3 载荷、剪力及弯矩间的关系	66
习题	70
第6章 弯曲应力	72
6.1 平面弯曲梁横截面上的正应力	72

6.2	梁弯曲时的正应力强度计算	77
6.3	弯曲切应力	80
6.4	提高梁弯曲强度的主要措施	84
	习题	87
第7章	弯曲变形	92
7.1	直接积分法求弯曲变形	92
7.2	用叠加法求弯曲变形	98
7.3	梁的刚度校核	102
7.4	简单静不定梁	103
	习题	107
第8章	应力状态和强度理论	110
8.1	应力状态的概念	110
8.2	平面应力状态分析的解析法	112
8.3	空间应力状态	118
8.4	广义胡克定律	121
8.5	强度理论	123
	习题	127
第9章	压杆稳定	132
9.1	压杆稳定性的概念	132
9.2	两端铰支细长压杆的临界力	133
9.3	不同杆端约束细长压杆的临界力	135
9.4	临界应力	136
9.5	压杆稳定性计算	138
9.6	提高压杆稳定性的措施	141
	习题	143
	习题参考答案	148
附录A	截面的几何性质	152
A.1	静矩与形心	152
A.2	惯性矩、极惯性矩、惯性积、惯性半径	153
A.3	平行移轴公式	156
附录B	型钢表	159
	参考文献	172

第 1 章

绪 论

1.1 材料力学的任务

各种工程结构都是由零件、部件等组成的。例如,机床由主轴、齿轮、传动轴等零件组成;房屋由梁、柱、板等组成。工程实际中的零件、部件形状是各式各样的,将其形状适当简化后作为材料力学的研究对象时,统称为构件。按其几何形状可将构件划分为杆、板、壳、块体四类,如图 1.1 所示。

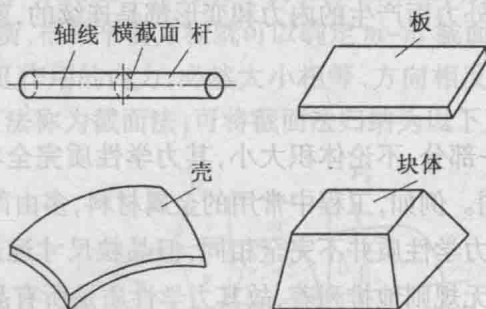


图 1.1

材料力学主要研究杆件,杆的几何特征是轴线方向的尺寸远大于横截面的尺寸,轴线为直线的杆为直杆,轴线为曲线的杆为曲杆。材料力学主要以直杆为研究对象。当外力不超过某一限度时,撤去外力后,变形将随之消失,这种变形为弹性变形;当外力超过某一限度时,外力撤去后还有一部分不能消失的变形,这种变形为塑性变形。

为保证构件在外力作用下能正常工作,应当满足以下要求:

1. 强度要求

所谓强度,指的是构件抵抗破坏(断裂或产生明显塑性变形)的能力。

2. 刚度要求

所谓刚度,指的是构件抵抗变形(弹性变形)的能力。

3. 稳定性要求

所谓稳定性,指的是构件保持原有平衡形式的能力。

构件的强度、刚度和稳定性,都与构件材料的力学性能(材料在外力作用下表现出的变形和破坏方面的特性)有关。材料的力学性能可以通过试验来测定。此外,材料力学中某些在假设条件下得到的理论分析方法是否可靠,也应由试验验证其正确性。因此,理论与试验分析是材料力学解决问题的方法。

在工程实践中,要求所设计的构件既有足够的强度、刚度和稳定性,还应从经济方面考虑尽可能选用适合的材料、合理的截面形状和尺寸。为此材料力学的基本任务就是,研究构件在外力作用下变形和破坏的规律,以便在保证构件强度、刚度和稳定性的条件下,为构件选用适合的材料、确定合理的截面形状和尺寸提供理论基础和计算方法。

1.2 变形固体的基本假设

固体因外力作用而变形,故称为变形固体。固体材料的微观结构是复杂的,而材料力学研究的是宏观范畴,因此在研究构件的强度、刚度和稳定性时,根据变形固体的主要性质做出某些假设,使分析更加简单。

1. 连续性假设

认为构件的整个体积都毫无空隙地充满物质。实际上,从物质结构来说,工程材料的内部都有不同程度的空隙,但这些空隙与构件的尺寸相比极其微小,可以忽略不计。由于这种连续性假设,构件因外力而产生的内力和变形都是连续的,就可以利用数学方法进行分析。

2. 均匀性假设

认为从构件内任取一部分,不论体积大小,其力学性质完全相同。实际上,工程材料的力学性质并不完全相同。例如,工程中常用的金属材料,多由两种或两种以上元素的晶粒组成,不同元素晶粒的力学性质并不完全相同,但晶粒尺寸远远小于构件的尺寸,并且晶粒的数目极多,而且是无规则地排列着,故其力学性质是所有晶粒力学性质的统计平均值,故可以认为构件内各部分的力学性质是均匀的。

3. 各向同性假设

认为构件在各个方向上均具有完全相同的力学性质,这种材料为各向同性材料。例如,金属材料,由于构件中所含晶粒数目极多,而且无序排列,这样各个方向上力学性质的统计平均值近似相同。还有一些材料不同方向上力学性能不同,这种材料为各向异性材料,如竹材、木材等。本书的研究范围主要是各向同性材料。

实践表明,在上述假设基础上,建立起来的理论,是能符合工程实际要求的。

变形固体在外力作用下产生变形,当变形远小于构件的尺寸时,这类问题为小变形问题。在研究这类小变形问题的平衡和运动时,可不计构件变形的影响,仍按变形前构件的原始尺寸进行分析计算。

1.3 内力 截面法

1.3.1 内力的概念

对于材料力学中的研究对象而言,其他构件作用在该构件上的力均为外力。构件内部各相邻质点之间在受外力之前有相互作用的内力,受外力作用后,构件发生变形,同时在其内部也因各部分之间相对位置的改变引起内力的改变。内力的改变量是由外力引起的附加内力。这种附加内力将随外力的增加而增大,当其达到某一限度时,就会引起构件的破坏,它与构件的强度、刚度和稳定性密切相关。材料力学中所研究的内力,是指这种附加内力。在研究构件的强度、刚度等问题时,均与这个附加内力有关,故需要知道构件在已知外力作用下某一截面上的内力值,通常采用截面法来确定这个内力值。

1.3.2 截面法

根据连续性假设,内力是分布于截面上的一个分布力系,其向截面上某一点简化后得到的合力和合力偶即为截面上的内力。为了求构件在外力作用下横截面 $m-m$ 上的内力,首先假想用 $m-m$ 横截面把杆件分成 I 和 II 两部分,如图 1.2 所示。任取其中一部分,例如取 I 部分为研究对象。根据这一部分的平衡可知,II 必然有力作用于 I 的 $m-m$ 截面以与外力 F_1 、 F_2 、 F_5 相平衡,根据平衡方程就可以确定 $m-m$ 截面上的内力。又根据作用与反作用定律可知, I 对 II 作用的内力,必然大小相等、方向相反且沿同一作用线方向。这种求横截面上内力的方法称为截面法,可将截面法归纳为以下三个步骤:

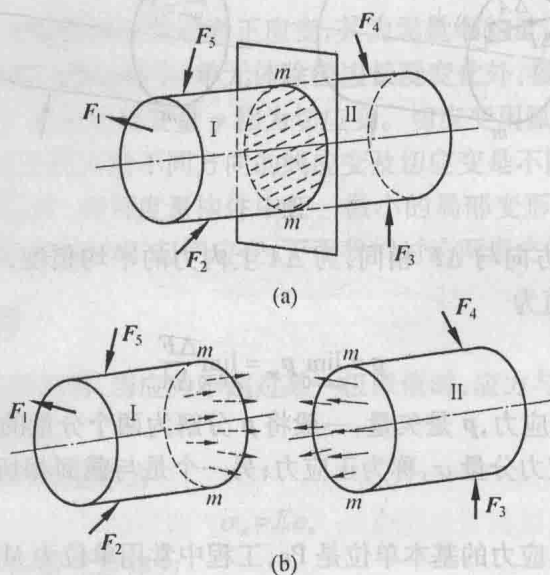


图 1.2

- (1) 沿指定截面假想地把构件分成两部分;
- (2) 弃去其中一部分,保留另一部分作为研究对象;

(3) 用作用在截面上的内力, 代替弃去部分对保留部分的作用;

(4) 建立保留部分的平衡条件, 确定未知内力。

用四个字可总结为“截、取、代、平”。

截面法是求截面上内力的一般方法。对受空间平衡力系作用的杆件, 要求 $m-m$ 截面上的内力, 则沿该截面假想地将杆件分成 I、II 两部分, 假设保留部分 I 为研究对象。可用 6 个内力分量 F_N 、 F_{Qy} 、 F_{Qz} 、 T_x 、 M_y 、 M_z 代替 II 对 I 的作用。其中 F_N 为轴力, F_{Qy} 、 F_{Qz} 为与截面相切的剪力, T_x 为绕 x 轴的力偶矩, M_y 、 M_z 为绕 y 轴、 z 轴的力偶矩。在已知外力作用下, 这 6 个内力分量, 可由保留部分空间力系的 6 个平衡方程来确定。

1.4 应力 应变 胡克定律

1.4.1 应力

上节用截面法确定的内力是截面上分布内力的合力, 其并不能说明截面上任一点处内力的强弱程度, 为此引入应力的概念。

如图 1.3 所示, 围绕受力构件的截面上任一点 C 取一微小面积 ΔA , ΔF 为 ΔA 上分布内力的合力。令 ΔF 与 ΔA 的比值为

$$p_m = \frac{\Delta F}{\Delta A}$$

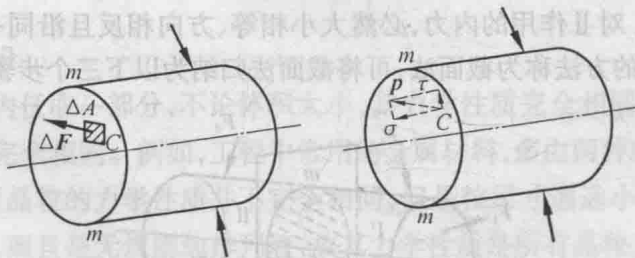


图 1.3

式中 p_m 是矢量, 方向与 ΔF 相同, 为 ΔA 上内力的平均集度, 称为平均应力。当 ΔA 趋于零时, p_m 的极限值为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} p_m = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1.1)$$

式中 p —— C 点的全应力, p 是矢量, 一般将 p 分解为两个分量的形式, 另一个是与截面垂直的应力分量 σ , 称为正应力; 另一个是与截面相切的应力分量 τ , 称为切应力。

在国际制单位中, 应力的基本单位是 Pa, 工程中常用单位为 MPa、GPa, 关系如下:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2; \quad 1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}; \quad 1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa}$$

1.4.2 应变

为了研究构件的刚度问题,及其截面上内力的分布规律,一般需要截面上各点的变形分布规律。为了研究一点处的变形情况,如图 1.4 所示取一点 M ,围绕 M 点取一微小正六面体。在外力作用下点 M 发生位移,微小六面体的棱边 MN 由原长 Δx 变为 $(\Delta x + \Delta s)$, Δs 为长度 MN 的变化量。令

$$\varepsilon_m = \frac{\Delta s}{\Delta x} \quad (1.2)$$

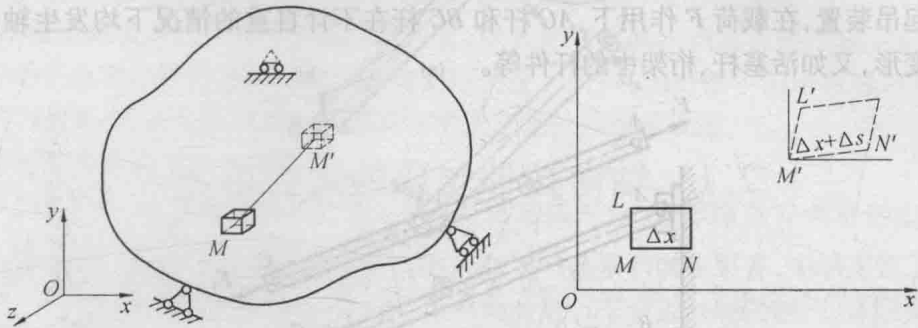


图 1.4

式中 ε_m —— MN 每单位长度的平均线应变,其与所取的长短 Δx 有关,为了消除尺寸的影响,使微小正六面体的边长无限缩小,设

$$\varepsilon_x = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta x} = \frac{ds}{dx} \quad (1.3)$$

式中 ε_x —— M 点沿 x 方向的线应变或者正应变,其为无量纲的量。

上述微小正六面体在变形过程中,单元体除棱边长度变化外,棱边的夹角变形前为直角,变形后该直角减小 γ ,直角的改变量 γ 称为切应变。切应变用弧度来度量。

一般情况下,构件内不同点沿不同方向的线应变及切应变是不同的,它们都是位置的函数。有了正应变与切应变,即可度量构件中任一微小的局部变形。应力与应变是相对应的,正应力引起正应变,切应力引起切应变,下面我们讨论两者之间的关系。

1.4.3 胡克定律

材料的力学性能试验表明,当应力不超过某一极限值时,应力与应变之间存在正比关系,这一关系即为胡克定律。

单向应力状态下的胡克定律为

$$\sigma_x = E\varepsilon_x \quad (1.4)$$

纯剪切应力状态下的胡克定律为

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy} \quad (1.5)$$

式中 E ——弹性模量;
 G ——剪切弹性模量。

二者量纲与应力的量纲相同,二者数值由试验测定。

1.5 杆件变形的的基本形式

杆件的受力形式千变万化,其变形形式也各不相同,但都可归纳为以下 4 种基本形式。

1. 轴向拉伸与压缩

当杆件承受作用线沿轴线方向的载荷时,将产生轴向伸长或者缩短的变形。如图 1.5 所示一起吊装置,在载荷 F 作用下, AC 杆和 BC 杆在不计自重的情况下均发生轴向拉伸与压缩变形,又如活塞杆、桁架中的杆件等。

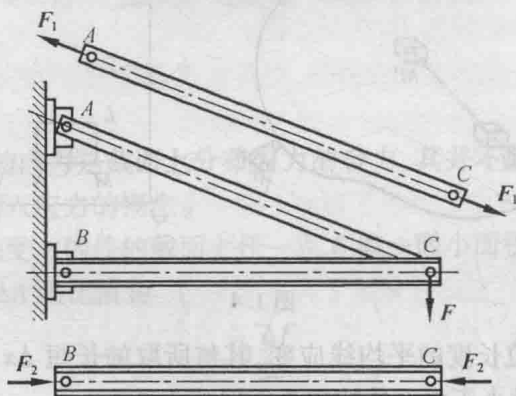


图 1.5

2. 剪切

当杆件承受大小相等、方向相反、互相平行、相距很近的两个横向力作用时,将沿外力作用方向发生相对错动,即为剪切变形。如图 1.6 所示的铆钉连接件,又如机械中常用的连接件轴销、螺栓、键等。

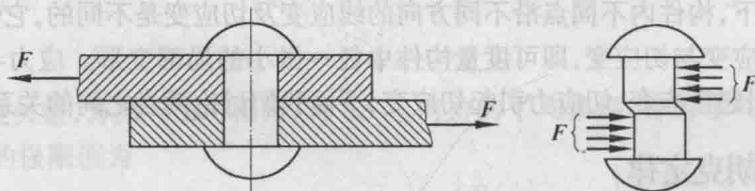


图 1.6

3. 扭转

当作用在杆件上的载荷是作用面垂直于轴线方向的力偶时,其任意两个横截面将发生绕轴线的相对转动,这就是扭转变形。如图 1.7 所示的汽车转向轴,又如螺丝刀杆、电动机的主轴等。

4. 弯曲

当杆件上的载荷是垂直于轴线方向的横向力,或是力偶矩矢垂直于轴线方向的力偶时,杆件的轴向将由直线变形为曲线,这就是弯曲变形。如图 1.8 所示的火车轮轴,还有

起重机大梁等。

实际工程中的杆件可能为上述基本变形之一,也可能是上述几种基本变形的组合变形。部分的内力符号

1.1.2 轴力图

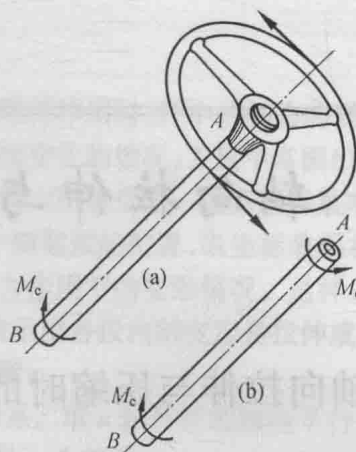


图 1.7

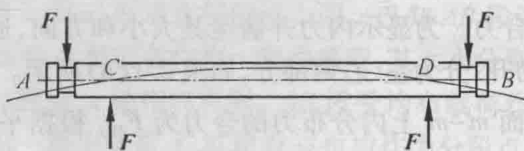
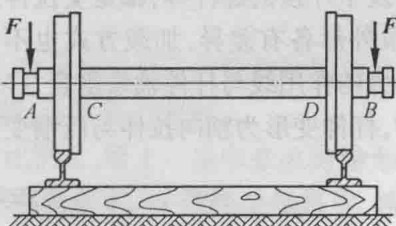


图 1.8