

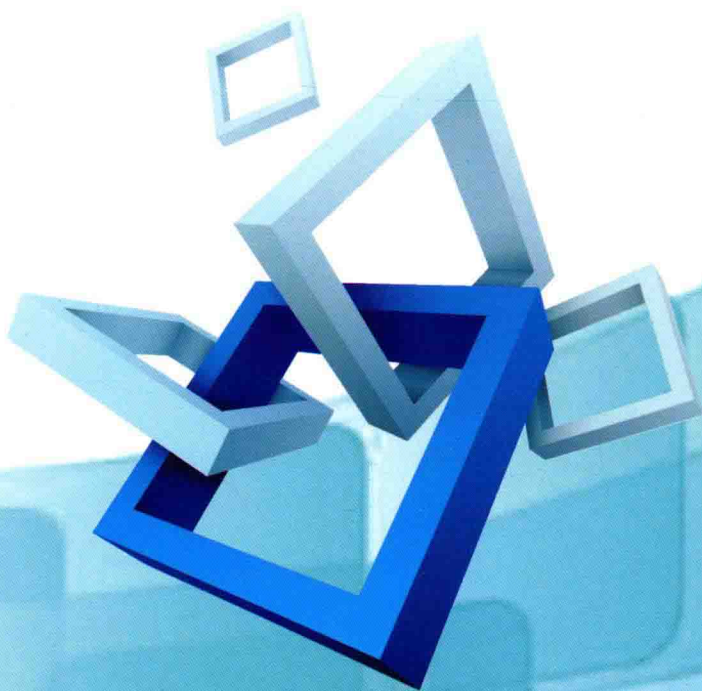


普通高校“十二五”规划教材

材料力学

CAI LIAO LI XUE

冯锡兰等 ○ 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高校“十二五”规划教材

材料力学

冯锡兰等 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书是根据“材料力学”课程教学的基本要求编写的面向 21 世纪的课程教材。为了适应新世纪教学改革形势,在沿用传统体系的基础上,对部分内容进行了精简和重组,加强了与工程应用的结合,适用于 50~70 学时的教学安排。

本书共 12 章,内容包括:绪论、轴向拉伸和压缩、剪切、扭转、弯曲内力、弯曲应力、弯曲变形、应力状态和强度理论、组合变形、压杆稳定、动载荷和交变应力。每章后均附有思考题和习题。

本书可作为高等院校工科本科的相关专业的教材,也可供有关工程技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学 / 冯锡兰等编著. -- 北京:北京航空航天大学出版社, 2014. 12

ISBN 978-7-5124-1651-2

I. ①材… II. ①冯… 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(2014)第 279407 号

版权所有,侵权必究。

材 料 力 学

冯锡兰等 编著

责任编辑 金友泉

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:20 字数:448 千字

2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-1651-2 定价:38.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

本书是作者在近几年教学改革研究、实践的基础上,结合多年来的教学经验编写而成的。

全书共计12章,主要包括:材料力学的基本概念、构件在拉伸和压缩、剪切、扭转、弯曲四种基本变形形式下的强度计算和刚度计算,应力状态和强度理论,组合变形构件的强度计算,压杆的稳定性计算,动载荷和交变应力。全书各章均附有思考题和习题。

本书在妥善处理传统经典内容的继承和现代科技成果的引进,以及知识的传授与能力的培养方面进行了积极的探索,坚持理论严谨、逻辑清晰、由浅入深的原则,力求使该教材具有新的内容、新的体系,便于教师和学生使用。

本书由冯锡兰等编著,蒋志强、韩光平、王含英承担了相应的编写工作。全书由冯锡兰统编定稿。

本书得到国家自然科学基金(51105344、51401182、U1404518),河南省创新型科技团队、河南省科技创新杰出人才计划(134200510024),河南省高校科技创新团队支持计划(2012IRTSTHN014),郑州市创新型科技人才队伍建设工程资助计划(112PCXTD350),河南省重点学科与郑州航院重点学科计划,航空科学基金(2012ZD55009、2012ZE55011、2013ZB55003、2013ZD55007),河南省基础与前沿技术研究计划(122300410313、142102210504)、河南省重点科技攻关计划(132102210323、142102210590),河南省教育厅自然科学基金基础研究计划(12A460011、14A460014、14A410009、14A140026),郑州市科技攻关计划(112PPGY248-2、20140580)等资助。同时还感谢北京航空航天大学出版社给予的大力支持!

因编著者水平有限,书中的缺点与不足,敬请广大读者批评指正。

编著者
2015年6月

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	3
1.3 外力及其分类	4
1.4 内力、截面法和应力的概念	5
1.5 应 变	7
1.6 杆件变形的基本形式	8
思考题	10
习 题	10
第 2 章 轴向拉伸和压缩	12
2.1 轴向拉伸与压缩的概念和实例	12
2.2 轴向拉伸或压缩时横截面上的内力和应力	13
2.3 轴向拉伸或压缩时斜截面上的应力	17
2.4 轴向拉伸或压缩时的变形	18
2.5 材料拉伸时的力学性能	20
2.6 材料压缩时的力学性能	25
2.7 轴向拉伸或压缩时的强度计算	26
2.8 应力集中的概念	31
2.9 拉伸与压缩的静不定问题	32
2.10 轴向拉伸或压缩的应变能	37
思考题	39
习 题	41
第 3 章 剪 切	48
3.1 剪切的概念和实例	48
3.2 剪切的实用计算	49
3.3 挤压的实用计算	53
思考题	56
习 题	57

第4章 扭 转	60
4.1 扭转的概念和实例	60
4.2 扭转时的内力	61
4.3 薄壁圆筒的扭转	64
4.4 圆轴扭转时的应力	66
4.5 圆轴扭转时的变形	71
4.6 圆轴扭转时的强度和刚度计算	72
4.7 圆截面杆件扭转时的应变能	79
4.8 非圆截面杆扭转的概述	80
4.9 圆柱形密圈螺旋弹簧的应力	84
思考题	86
习 题	86
第5章 弯曲内力	91
5.1 弯曲的概念和实例	91
5.2 受弯杆件的简化	92
5.3 剪力和弯矩	94
5.4 剪力方程和弯矩方程、剪力图和弯矩图	97
5.5 剪力、弯矩和载荷集度间的关系	104
思考题	106
习 题	107
第6章 弯曲应力	114
6.1 梁弯曲时的正应力	114
6.2 惯性矩的计算	120
6.3 梁弯曲时的强度计算	125
6.4 弯曲切应力	129
6.5 提高弯曲强度的措施	135
思考题	141
习 题	143
第7章 弯曲变形	148
7.1 工程中的弯曲变形问题	148
7.2 梁的挠曲线近似微分方程	149
7.3 用积分法求弯曲变形	151
7.4 用叠加法求弯曲变形	156
7.5 梁的刚度校核	161

7.6 简单静不定梁	163
思考题	166
习 题	168
第 8 章 应力状态和强度理论	174
8.1 应力状态的概念	174
8.2 平面应力状态分析——解析法	176
8.3 平面应力状态分析——图解法	182
8.4 空间应力状态	186
8.5 复杂应力状态下的应变能密度	190
8.6 材料的破坏形式	192
8.7 强度理论	194
思考题	202
习 题	203
第 9 章 组合变形	207
9.1 组合变形和叠加原理	207
9.2 拉伸或压缩与弯曲的组合变形	209
9.3 弯曲与扭转的组合变形	214
思考题	220
习 题	221
第 10 章 压杆稳定	226
10.1 压杆稳定的概念	226
10.2 细长压杆的临界压力	228
10.3 临界应力及临界应力总图	233
10.4 压杆的稳定性计算	238
10.5 提高压杆稳定性的措施	240
思考题	242
习 题	243
第 11 章 动载荷	247
11.1 动载荷与动应力的概念	247
11.2 用动静法分析动应力	247
11.3 杆件受冲击时的应力和变形	251
11.4 冲击韧性	257
思考题	259
习 题	259

第 12 章 交变应力	263
12.1 交变应力与疲劳失效	263
12.2 交变应力的循环特征、应力幅和平均应力	265
12.3 材料的持久极限	266
12.4 影响持久极限的因素	268
12.5 对称循环下构件的疲劳强度计算	273
12.6 持久极限曲线	275
12.7 不对称循环下构件的疲劳强度计算	276
12.8 弯扭组合交变应力的强度计算	279
12.9 提高构件疲劳强度的措施	281
思考题	283
习 题	283
附 录	287
附录 1 型钢表	287
附录 2 第 1 章到第 12 章习题答案	304
参 考 文 献	312

第 1 章 绪 论

本章将介绍材料力学的任务、研究对象,变形固体的基本假设,杆件的基本变形形式及内力、应力、应变等材料力学的一些基本概念,使读者对本课程有一个概括的认识。

1.1 材料力学的任务

工程结构或机械的各组成部分,如建筑物的梁和柱、机床的轴等,统称为构件。在静力学中,根据力的平衡关系,已经解决了构件的外力计算问题,然而在外力作用下如何保证构件正常的工作,还是一个有待于进一步解决的问题。

1. 构件正常工作应满足的条件

为保证工程结构或机械的正常工作,组成结构或机械的每一个构件都应有足够的能力担负起应当承受的载荷。因此,它应满足以下要求:

(1) 构件应具备足够的强度(即抵抗破坏的能力),以保证在规定的使用条件下,不发生意外的破坏。

例如,建筑工程中使用的吊车如图 1-1 所示。吊车在吊起重物时,绳索不能断裂,否则会造成灾难性事故。



图 1-1

(2) 构件应具备足够的刚度(即抵抗变形的能力),以保证在规定的使用条件下,不产生过大的变形。图 1-2 所示的车床主轴 AB,受力后若变形过大,就会影响工件的加工精度,破坏齿轮的正常啮合,同时引起轴承的不均匀磨损,从而造成车床不能正常工作。

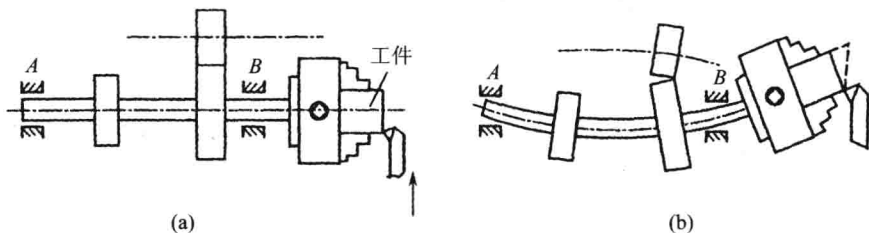


图 1-2

(3) 构件应具备足够的稳定性(即保持其原有平衡状态的能力),以保证在规定的使用条件下不产生失稳现象。如图 1-3 所示,顶起汽车的千斤顶螺杆,若突然变弯、丧失工作能力将会造成严重的事故。



图 1-3

以上三项是确保构件正常工作的基本条件。

2. 材料力学的任务

在工程实际中,构件除了应满足正常工作的条件外,还应考虑经济方面的要求。为了安全可靠,往往希望选用优质材料与较大的截面尺寸;但是,由此又可能造成材料浪费与结构笨重。可见,安全与经济、安全与质量之间存在矛盾。因此,如何合理地选用材料,如何恰当地确定构件

的截面形状和尺寸,便成为构件设计中十分重要的问题。

材料力学的任务就是在满足强度、刚度和稳定性的要求下,为设计既经济又安全的构件,提供必要的理论基础和计算方法。

事物总是一分为二的,有时对某些构件也会提出相反的要求。例如,为保护主要部件而设置的安全装置,在超载时应首先破坏,从而避免主要部件受到损坏。又如为减轻冲击作用而安装的缓冲弹簧,则要求有较大的变形。这类问题,也需要用材料力学提供的理论基础来计算。

3. 材料力学的研究对象

工程实际中的构件,形状多种多样,按照其几何特征,主要分为杆件与板件。

一个方向的尺寸远大于其他两个方向尺寸的构件,称为杆件,简称为杆。杆件是工程中最常见、最基本的构件。根据轴线与横截面的特征,杆件可分为直杆与曲杆、等截面杆与变截面杆,如图 1-4 所示。

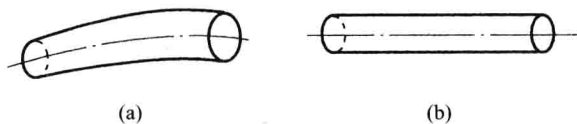


图 1-4

一个方向的尺寸远小于其他两个方向尺寸的构件称为板件。平分板件厚度的几何面称为中面,中面为平面的板件称为板,中面为曲面的板件称为壳,如图 1-5 所示。

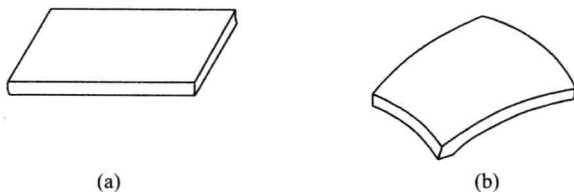


图 1-5

材料力学的主要研究对象是杆,以及由若干杆组成的简单杆系;同时也研究一些形状与受力均比较简单的板与壳。至于较复杂的杆系与板壳问题,则属于结构力学与弹性力学的研究范畴。

1.2 变形固体的基本假设

固体因外力作用而变形,故称为变形固体或可变形固体。固体有多方面的属性,研究的角度不同,侧重面各不一样。研究构件的强度、刚度和稳定性时,为抽象出力学模型,掌握与问题有关的主要属性,略去一些次要属性,对变形固体作下列假设。

1. 连续性假设

认为组成固体的物质不留空隙地充满了固体的体积。实际上,组成固体的粒子之间存在着空隙并不连续,但这种空隙的大小与构件的尺寸相比极其微小,可以不计。于是就认为固体在其整个体积内是连续的。这样,当把某些力学量看作是固体的点的坐标的函数时,对这些量就可以进行坐标增量为无限小的极限分析。

2. 均匀性假设

认为在固体内到处有相同的力学性能。就使用最多的金属来说,组成金属的各晶粒的力学性能并不完全相同。但因构件或构件的任一部分中都包含着数量极多的晶粒,而且无规则地排列,固体的力学性能是各晶粒力学性能的统计平均值,所以可以认为各部分的力学性能是均匀的。这样,如从固体中取出一部分,不论大小,也不论从何处取出,力学性能总是相同的。

材料力学研究构件受力后的强度、刚度和稳定性,把它抽象为均匀连续的模型,可以得出满足工程要求的理论。对发生于晶粒那样大小范围内的现象,就不宜再用均匀连续假设。

3. 各向同性假设

认为无论沿任何方向,固体的力学性能都是相同的。就金属的单一晶粒来说,沿不同的方向,力学性能并不一样。但金属构件包含数量极多的晶粒,且又杂乱无章地排列,这样,沿各个方向的力学性能就接近相同了。具有这种属性的材料称为各向同性材料,如钢、铜、玻璃等。

沿不同方向力学性能不同的材料,称为各向异性材料,如木材、胶合板和某些人工合成材料等。

变形固体因外力作用而引起的变形,按不同情况,可能很小也可能相当大。但材料力学所研究的问题,限于变形的大小远小于构件原始尺寸的情况,这种情况称为小变形。这样,在研究构件的平衡时,就可略去构件的变形,而按变形前的原始尺寸进行分析计算。

例如,图 1-6 中,简易吊车的各杆因受力而变形,引起支架几何形状和外力位置的变化。但由于 δ_1 和 δ_2 都远小于吊车的其他尺寸,所以,在计算各杆的受力时,仍然可用变形前的几何形状和尺寸。今后将经常使用小变形的概念以简化分析计算。至于构件变形过大,超出小变形条件的,一般不在材料力学中讨论。

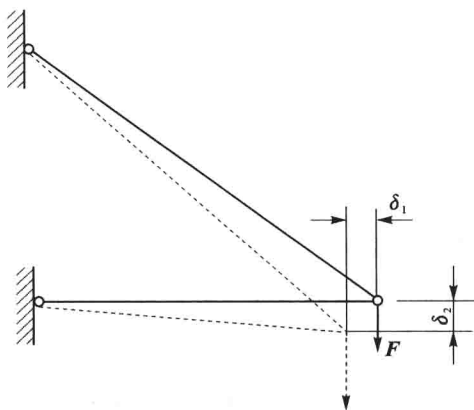


图 1-6

1.3 外力及其分类

当研究某一构件时,可以设想把这一构件从周围物体中单独取出,并用力来代替周围各物体对构件的作用。这些来自构件外部的力就是外力。按外力的作用方式可分为表面力和体积力。表面力是作用于物体表面的力,又可分为分布力和集中力。分布力是连续作用在物体表面的力,如作用于油缸内壁上的油压力,作用于船体上的水压力等。有些分布力是沿杆件的轴线作用的,如楼板对屋梁的作用力。若外力分布面积远小于物体的表面尺寸,或沿杆件轴线分布范围远小于轴线长度,就可看做是作用于一点的集中力,如火车轮对钢轨的压力,滚珠轴承对轴的反作用力等。体积力是连续分布于物体内部各点的力,例如物体的自重和惯性力等。

载荷按随时间变化的情况,又可分成静载荷和动载荷。若载荷缓慢地由零增加到某一定值,以后即保持不变,或变动很不显著,即为静载荷。例如,把机器缓慢地放置在基础上时,机器的重量对基础的作用便是静载荷。若载荷随时间而变化,则为动载荷。按其随时间变化的

方式,动载荷又可分为交变载荷和冲击载荷。交变载荷是随时间作周期性变化的载荷,例如当齿轮转动时,作用于每一个齿上的力都是随时间作周期性变化的。冲击载荷则是物体的运动在瞬时内发生突然变化所引起的载荷,例如,急刹车时飞轮的轮轴、锻造时汽锤的锤杆等都受到冲击载荷的作用。

材料在静载荷下和在动载荷下的性能颇不相同,分析方法也颇有差异。因为静载荷问题比较简单,所建立的理论和分析方法又可作为解决动载荷问题的基础,所以首先研究静载荷问题。

1.4 内力、截面法和应力的概念

1. 内力与截面法

物体因受外力作用而变形,其内部各部分之间因相对位置改变而引起的相互作用就是内力。我们知道,即使不受外力作用,物体的各质点之间依然存在着相互作用的力。材料力学中的内力,是指外力作用下,上述相互作用力的变化量,所以是物体内部各部分之间因外力而引起的附加相互作用力,即“附加内力”。这样的内力随外力的增加而加大,达到某一限度时就会引起构件破坏,因而它与构件的强度是密切相关的。

为了显示出构件在外力作用下 $m-m$ 截面上的内力,用平面假想地把构件分成 I、II 两部分(见图 1-7(a))。任取其中一部分,例如 II 作为研究对象。在部分 II 上作用的外力有 F_3 和 F_4 ,欲使 II 保持平衡,则 I 必然有力作用于 II 的 $m-m$ 截面上,以与 II 所受的外力平衡,如图 1-7(b)所示。根据作用与反作用定律可知,II 必然也以大小相等、方向相反的力作用于 I 上。上述 I 与 II 间相互作用的力就是构件在 $m-m$ 截面上的内力。按照连续性假设,在 $m-m$ 截面上各处都有内力作用,所以内力是分布于截面上的一个分布力系。今后把这个分布内力系向截面上某一点简化后得到的主矢和主矩,称为截面上的内力。

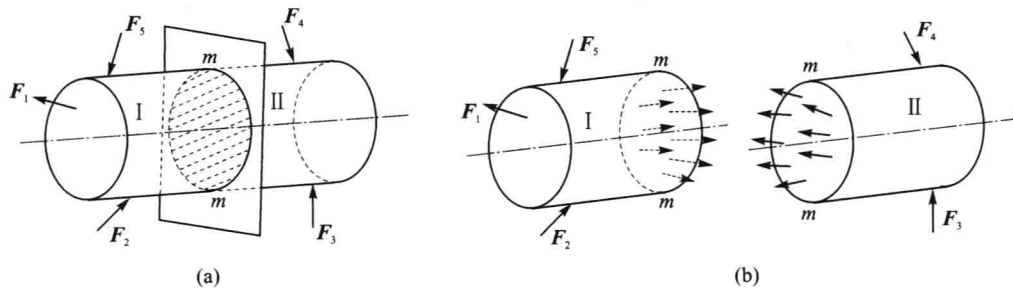


图 1-7

对所研究的部分 II 来说,外力 F_3 、 F_4 和 $m-m$ 截面上的内力保持平衡,根据平衡方程就可

以确定 $m-m$ 截面上的内力。

上述用截面假想地把构件分成两部分,以显示并确定内力的方法称为截面法。可将其归纳为以下三个步骤:

- (1) 欲求某一截面上的内力时,就沿该截面假想地把构件分成两部分,任意地留下一部分作为研究对象,并弃去另一部分。
- (2) 用作用于截面上的内力代替弃去部分对留下部分的作用。
- (3) 建立留下部分的平衡方程,确定未知的内力。

2. 应力

通过截面法,可以求出构件的内力。但是仅仅求出内力还不能解决构件的强度问题,因为同样的内力作用在大小不同的截面上,却会产生不同的结果。这说明构件的危险程度取决于分布内力的聚集程度。

为此,引入一个新的物理量,用应力来度量截面上分布内力的集中程度。内力的分布集度称为应力,以单位面积上的内力来衡量。

图 1-8 所示为从图 1-7 所示的受力构件中取出的分离体。现分析内力在 C 点的集中程度:围绕 C 点取微小面积 ΔA (见图 1-8(a)), ΔA 上分布内力的合力为 ΔF 。 ΔF 的大小和方向与 C 点的位置和 ΔA 的大小有关。 ΔF 与 ΔA 的比值为

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

p_m 是一个矢量,代表在 ΔA 范围内,单位面积上内力的平均集度,称为平均应力。随着 ΔA 的逐渐缩小, p_m 的大小和方向都将逐渐变化。当 ΔA 趋于零时, p_m 的大小和方向都将趋于某一极限。这样得到

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

p 称为 C 点的应力。它是分布内力系在 C 点的集度,反映内力系在 C 点的强弱程度。 p 是一个矢量,一般说既不与截面垂直,也不与截面相切。通常把应力 p 分解成垂直于截面的分量 σ 和切于截面的分量 τ (见图 1-8(b))。 σ 称为正应力, τ 称为切应力。

在我国法定计量单位中,应力的单位是 Pa(帕),称为帕斯卡, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。由于这个单位太小,使用不便,通常使用 MPa,其值为 $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$ 。

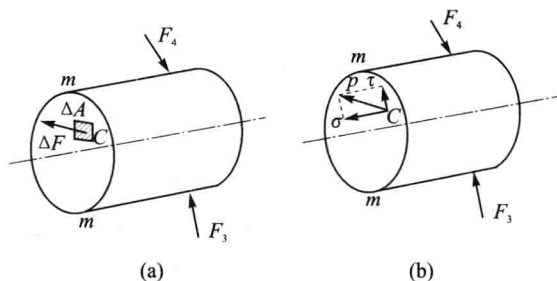


图 1-8

1.5 应 变

在外力作用下,构件发生变形,同时引起应力。为了研究构件的变形及其内部的应力分布,需要了解构件内部各点处的变形。为此,假想地将构件分割成许多细小的单元体。

构件受力后,各单元体的位置发生变化,同时,单元体棱边的长度发生改变(见图 1-9(a)),相邻棱边所夹直角一般也发生改变(见图 1-9(b))。

设棱边 Ka 有原长为 Δs ,变形后的长度为 $\Delta s + \Delta u$,即长度改变量为 Δu ,则 Δu 与 Δs 的比值,称为棱边 Ka 的平均正应变或线应变,并用 $\bar{\epsilon}$ 表示,即

$$\bar{\epsilon} = \frac{\Delta u}{\Delta s}$$

一般情况下,棱边 Ka 各点处的变形程度并不相同,平均正应变的大小将随棱边的长度而改变。为了精确地描写 K 点沿棱边 Ka 方向的变形情况,应选取无限小的单元体即微体,由此所得平均正应变的极限值,即

$$\epsilon = \lim_{\Delta s \rightarrow 0} \frac{\Delta u}{\Delta s} \quad (1-2)$$

称为 K 点沿棱边 Ka 方向的正应变或线应变。采用类似方法,还可确定 K 点沿其他方向的正应变。

当棱边长度发生改变时,相邻棱边之夹角一般也发生改变。微体相邻棱边所夹直角的改变量(见图 1-9(b)),称为切应变,并用 γ 表示。切应变的单位为 rad。

综上所述,构件的整体变形是各微体的局部变形的组合结果,而微体的局部变形则可用正应变和切应变度量。

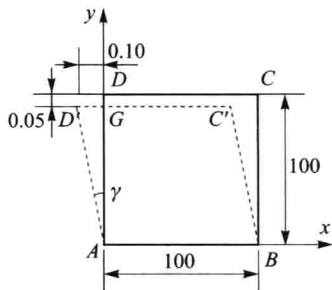


图 1-10

例 1-1 图 1-10 所示板件 $ABCD$,其变形如虚线所示。试求棱边 AB 与 AD 的平均正应变以及 A 点处直角 BAD 的切应变。

解: 棱边 AB 的长度未改变,故其平均正应变为

$$\bar{\epsilon}_x = 0$$

棱边 AD 的长度改变量为

$$\Delta u = \overline{AD'} - \overline{AD} =$$

$$\begin{aligned} & \sqrt{(0.100 \text{ m} - 0.05 \times 10^{-3} \text{ m})^2 + (0.10 \times 10^{-3} \text{ m})^2} - 0.100 \text{ m} \\ &= -4.99 \times 10^{-5} \text{ m} \end{aligned}$$

所以,该棱边的平均正应变为

$$\bar{\epsilon}_y = \frac{\Delta u}{AD} = \frac{-4.99 \times 10^{-5} \text{ m}}{0.100 \text{ m}} = -4.99 \times 10^{-4} \quad (\text{a})$$

负号表示棱边 AD 为缩短变形。

A 点处直角 BAD 的切应变 γ 为一很小的量,因此,

$$\gamma \approx \tan \gamma = \frac{D'G}{AG} = \frac{0.10 \times 10^{-3} \text{ m}}{0.100 \text{ m} - 0.05 \times 10^{-3} \text{ m}} \approx 1.00 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

应当指出,一般构件的变形均很小。在这种情况下,由于切应变 γ 很小,直线 AD' 的长度与该直线在 y 轴上的投影 AG 的长度之差值极小。因此,在计算正应变 $\bar{\epsilon}_y$ 时,通常即以投影 AG 的长度代替直线 AD' 的长度,于是得棱边 AD 的平均正应变为

$$\bar{\epsilon}_y = \frac{\overline{AG} - \overline{AD}}{\overline{AD}} = \frac{(0.100 \text{ m} - 0.05 \times 10^{-3} \text{ m}) - 0.100 \text{ m}}{0.100 \text{ m}} = -5.00 \times 10^{-4}$$

与式(a)所述解答相比,误差仅为 0.2%。

1.6 杆件变形的基本形式

构件在工作时的受力情况各不相同,受力后所产生的变形也随之而异。对于杆件来说,其受力后所产生的变形有四种基本形式。

1. 拉伸或压缩

图 1-11(a)表示一简易吊车,在载荷 F 的作用下, AC 杆受到拉伸(见图 1-11(b)),而 BC 杆受到压缩(见图 1-11(c))的情况。这类变形形式是由大小相等、方向相反、作用线与杆件轴线重合的一对力引起的,表现为杆件的长度发生伸长或缩短。起吊重物的钢索、桁架中的杆件、液压油缸的活塞杆等的变形,都属于拉伸或压缩变形。

2. 剪 切

图 1-12(a)表示一铆钉连接,在力 F 作用下,铆钉即受到剪切。这类变形形式是由大小相等、方向相反、相互平行的力引起的,表现为受剪杆件的两部分沿外力作用方向发生相对错动(见图 1-12(b))。机械中常用的连接件,如键、销钉、螺栓等都产生剪切变形。

3. 扭 转

图 1-13(a)所示的汽车转向轴 AB ,在工作时发生扭转变形。这类变形形式是由大小相等、转向相反、作用面都垂直于杆轴的两个力偶引起的(见图 1-13(b)),表现为杆件的任意两个横截面发生绕轴线的相对转动。汽车的传动轴、电动机和水轮机的主轴等,都是受扭杆件。

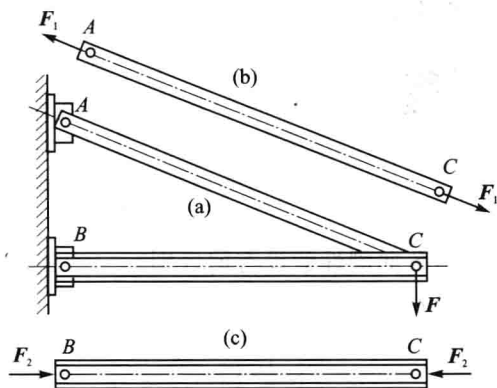


图 1-11

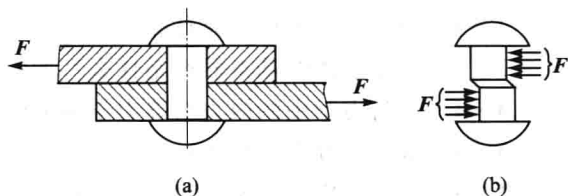


图 1-12

4. 弯 曲

图 1-14(a)所示的火车轮轴的变形,即为弯曲变形。这类变形形式是由垂直于杆件轴线的横向力,或由作用于包含杆轴的纵向平面内的一对大小相等、转向相反的力偶引起的,表现为杆件的轴线由直线变为曲线(见图 1-14(b))。在工程中,受弯杆件是最常遇到的情况之一。桥式起重机的大梁、各种心轴以及车刀等的变形,都属于弯曲变形。

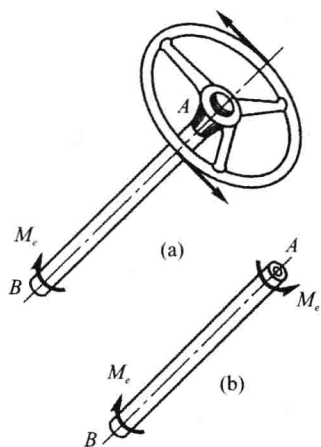


图 1-13

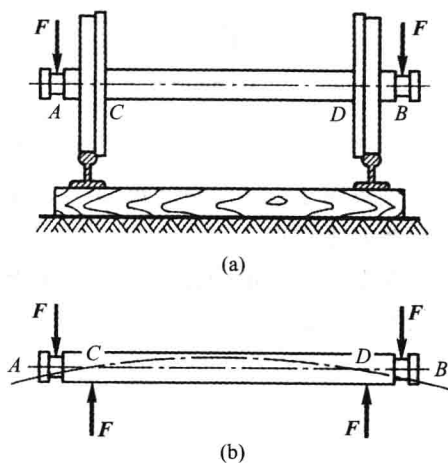


图 1-14

还有一些杆件同时发生几种基本变形,例如车床主轴工作时发生弯曲、扭转和压缩三种基本变形;钻床立柱同时发生拉伸和弯曲两种基本变形。这种情况称为组合变形。在本书中,首