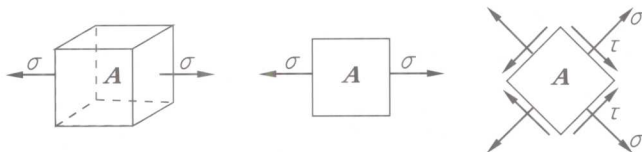
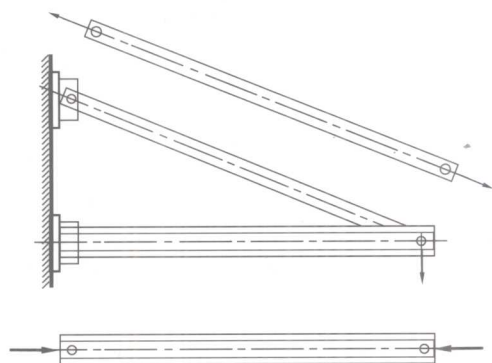


普通高等院校机械工程学科“十一·五”规划教材

材料力学

CAILIAO LIXUE

主 编 邱 克
副主编 贾玉梅



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等院校机械工程学科“十一五”规划教材

材 料 力 学

主 编	邱 克	
副主编	贾玉梅	
参 编	徐井满	高振岭
	王英利	王凤仙

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书包含了目前各院校材料力学课程的大部分内容,共12章,内容包括:绪论、杆件的轴向拉伸与压缩、剪切与挤压、扭转、弯曲内力、弯曲应力、梁的变形和刚度计算、应力和应变分析与强度理论、组合变形、压杆稳定、疲劳强度问题、能量法。本书在编写的过程中兼顾系统性的同时尽量做到理论简洁、内容完整、应用性突出。在例题和习题的选用上尽量考虑工程背景及题型的多样性,书后还附有习题答案。

本书可作为高等院校各专业材料力学课程的教材,也可作为夜大、函授大学、职工大学相应专业的自学和函授教材,同时可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学 / 邱克主编. —北京:国防工业出版社,
2009.5

普通高等院校机械工程学科“十一五”规划教材
ISBN 978-7-118-06150-5

I. 材... II. 邱... 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(2009)第 006595 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 14 $\frac{3}{4}$ 字数 332 千字

2009 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 28.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474
发行业务:(010)68472764

普通高等院校机械工程学科“十一五”规划教材 编委会名单

名誉主任	艾 兴	山东大学
	王先逵	清华大学
主 任	吕 明	太原理工大学
副 主 任	庞思勤	北京理工大学
	朱喜林	吉林大学
秘 书 长	杨胜强	太原理工大学
委 员	吴宗泽	清华大学
	潘宏侠	中北大学
	轧 刚	太原理工大学
	任家骏	太原理工大学
	陈 明	北华航天工业学院
	谭晓兰	北方工业大学
	李德才	北京交通大学
	杨 康	佳木斯大学
	石望远	北华航天工业学院
	王好臣	山东理工大学
	王卫平	东莞理工学院
	张平宽	太原科技大学
	赵 波	河南理工大学

序

国防工业出版社组织编写的“普通高等院校机械工程学科‘十一五’规划教材”即将出版,欣然为之作“序”。

随着国民经济和社会的发展,我国高等教育已形成大众化教育的大好形势,为适应建设创新型国家的重大需求,迫切要求培养高素质专门人才和创新人才,学校必须在教育观念、教学思想等方面做出迅速的反应,进行深入教学改革,而教学改革的主要内容之一是课程的改革与建设,其中包括教材的改革与建设,课程的改革与建设应体现、固化在教材之中。

教材是教学不可缺少的重要组成部分,教材的水平将直接影响教学质量,特别是对学生创新能力的培养。作为机械工程学科的教材,不能只是传授基本理论知识,更应该是既强调理论,又重在实践,突出的要理论与实践结合,培养学生解决实际问题的能力和创新能力。在新的深入教学改革、新课程体系的建立及课程内容的发展过程中,建设这样一套新型教材的任务已经迫切地摆在我们面前。

国防工业出版社组织有关院校主持编写的这套“普通高等院校机械工程学科‘十一五’规划教材”,可谓正得其时。此套教材的特点是以编写“有利于提高学生创新能力培养和知识水平”为宗旨,选题论证严谨、科学,以体现先进性、创新性、实用性,注重学生能力培养为原则,以编出特色教材、精品教材为指导思想,注意教材的立体化建设,在教材的体系上下功夫。编写过程中,每部教材都经过主编和参编辛勤认真的编写和主审专家的严格把关,使本套教材既继承老教材的特点,又适应新形势下教改的要求,保证了教材的系统性和精品化,体现了创新教育、能力教育、素质教育教学理念,有效激发学生自主学习能力,提高学生的综合素质和创新能力,为培养出符合社会需要的优秀人才服务。丛书的出版对高校的教材建设、特别是精品课程及其教材的建设起到了推动作用。

衷心祝贺国防工业出版社和所有参编人员为我国高等教育提供了这样一套有水平、有特色、高质量的机械工程学科规划教材,并希望编写者和出版者在与使用者的沟通过程中,认真听取他们的宝贵意见,不断提高该套规划教材的水平!

中国工程院院士

2008年6月

V

前 言

本书根据高等院校《材料力学》中等学时教学大纲编写,包括了目前各院校工科专业材料力学课程(60学时~80学时)的基本内容。在使用本书的过程中可根据各院校的教学特点对内容做适当的取舍。

本书的编写突出了教学的实用性,尤其是结合了工科院校的教学特点:突出理论的应用和实际问题的解决。在编写本书的过程中,对理论内容做了必要的精简,尽量做到简洁、明了,以突出结论的实用,并在例题和习题的编写上尽量兼顾理论的适用范围、工程背景和实例,以帮助读者提高应用能力。

在工程实际中就材料力学课程的内容而言,经常用到的是基本变形、组合变形,所以这些内容就构成了本书的编写重点。对于这部分内容中的共同部分:内力和应力的概念和统一的处理方法、主导思想,集中放到了绪论的内容中,然后就不同变形中的具体情况在各章节中又有针对性地详细论述。这样做既兼顾了思路的统一性又表现了各种问题的特殊性,使读者可以在总体思路清晰的基础上对具体问题做具体的处理解决。在组合变形部分,首先讲述了处理组合变形的总体思路(虽然文字不多),然后再分别讲述各种组合变形情况,这样会使读者对处理复杂变形情况有一个总体的认识和统一的指导思想,对于分析和解决更复杂的问题都十分有帮助,同时对学习和思维的训练也有一定的好处。另外,在一般材料力学的教材中不讲拉伸(压缩)、弯曲和扭转的组合变形,但是这部分内容在教学和工程实际中都具有一定的分量,所以也作为一个小节的内容编入了本书中,供读者学习和使用。压杆稳定和疲劳强度问题都是目前各工科本科院校学生必修的材料力学内容,也是工程实际中应用较多的部分,所以是本书的主要编写章节。对于中等学时材料力学教材中都没有提及的内容,我们选用能量法编入了本书,目的有二:一是可以给教学带来方便,在一本书的基础上就涉及到了主要的后续内容;二是为读者的学习带来方便。因为能量法是一个比较重要也是比较主要的处理问题的方法,不仅在工程实际中有很多应用,而且对后续课程的学习和硕士研究生的入学考试都是不可或缺的内容,编入一般的材料力学教材中十分必要。

参加本书编写的人员都是具有多年材料力学教学经验的老教师,对材料力学的内容非常熟悉,也有很多教学体会。这对教材的编写都非常有帮助。

本书由邱克(北华航天工业学院)担任主编,主要编写的内容为第1、8、9章,贾玉梅(包头机械工业学校)担任副主编,编写的内容为第6、7章。参加编写的还有徐并满(北华航天工业学院),编写的内容为第10、11、12章;高振岭(北华航天工业学院)

编写的内容为第4、5章;王英利(呼伦贝尔学院)、王凤仙(呼伦贝尔学院)二位老师联合编写了第2、3章。

限于编者水平,本书在编写的过程中可能存在不少缺点和欠妥当的地方,恳请广大教师和读者批评指正。

编 者
2008年12月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 材料力学的任务	1
1.2 材料力学的基本假设	1
1.3 内力、截面法和应力的概念	2
1.3.1 外力	2
1.3.2 内力、截面法	2
1.3.3 应力	4
1.4 变形与应变、杆件变形的基本形式	4
1.4.1 变形与应变	4
1.4.2 杆件变形的基本形式	5
第 2 章 杆件的轴向拉伸与压缩	7
2.1 轴向拉伸与压缩的概念和实例	7
2.2 轴向拉伸与压缩时横截面上的内力和应力	7
2.2.1 内力	7
2.2.2 应力	9
2.3 直杆轴向拉伸与压缩时斜截面上的应力	11
2.4 材料拉伸和压缩时的力学性能	12
2.4.1 低碳钢拉伸时的力学性能	13
2.4.2 铸铁拉伸时的力学性能	14
2.4.3 材料压缩时的力学性能	15
2.5 强度计算	15
2.6 轴向拉伸与压缩时的变形、应变能	20
2.6.1 变形与变形计算	20
2.6.2 应变能	22
2.7 拉伸与压缩时的超静定问题	25
2.8 应力集中的概念	28
习题	29
第 3 章 剪切与挤压	34
3.1 剪切与挤压的概念和实例	34
3.1.1 剪切变形	34
3.1.2 挤压变形	35
3.2 剪切	35

3.3 挤压	37
习题	39
第4章 扭转	41
4.1 扭转的概念与实例	41
4.2 外力偶矩的计算、扭矩和扭矩图	42
4.2.1 外力偶矩的计算	42
4.2.2 扭矩和扭矩图	43
4.3 纯剪切	45
4.3.1 薄壁圆筒的扭转问题	45
4.3.2 剪切互等定理	45
4.3.3 剪切胡克定律	46
4.4 圆轴扭转时的应力与强度计算	46
4.4.1 圆轴扭转时的应力	47
4.4.2 强度计算	50
4.5 圆轴扭转时的变形与刚度计算	52
4.6 圆柱形密圈弹簧的应力与变形	54
4.6.1 弹簧丝横截面上的应力	54
4.6.2 弹簧的变形	56
4.7 非圆截面杆扭转的概念	57
4.8 简单超静定轴	62
习题	64
第5章 弯曲内力	69
5.1 弯曲的概念与实例	69
5.1.1 弯曲的概念与实例	69
5.1.2 静定梁的基本形式	70
5.2 剪力与弯矩	72
5.3 剪力方程和弯矩方程及剪力图和弯矩图	75
5.4 载荷集度、剪力和弯矩间的微分关系	79
习题	83
第6章 弯曲应力	87
6.1 纯弯曲的概念	87
6.2 纯弯曲时的正应力	87
6.2.1 实验观察假设	87
6.2.2 弯曲正应力的计算	88
6.2.3 截面惯性矩和抗弯截面系数	90
6.3 横力弯曲时的正应力	92
6.4 梁的正应力强度计算	93
6.4.1 梁的正应力强度条件	93
6.4.2 梁的正应力强度计算	93

6.5	梁的切应力	96
6.5.1	矩形截面弯曲切应力	96
6.5.2	工字形截面梁及其他形状截面梁的切应力	98
6.5.3	切应力强度计算	99
6.6	提高弯曲强度的一些措施	100
6.6.1	合理安排梁的受力情况	100
6.6.2	改善梁的截面	101
6.6.3	等强度梁的概念	102
	习题	102
第7章	梁的变形和刚度计算	107
7.1	弯曲变形实例	107
7.2	挠曲线方程	107
7.2.1	挠度和转角	107
7.2.2	挠曲线方程	107
7.3	用积分法计算梁的变形	108
7.3.1	挠曲线微分方程	108
7.3.2	用积分法求梁的变形	109
7.4	用叠加法求弯曲变形	111
7.4.1	叠加法求弯曲变形	111
7.4.2	梁的刚度计算	113
7.5	简单静不定梁	114
7.6	提高梁弯曲强度与刚度的措施	116
7.6.1	增大梁的抗弯刚度	116
7.6.2	增加约束和减小跨度	116
	习题	117
第8章	应力和应变分析与强度理论	121
8.1	应力状态概述与实例	121
8.2	平面应力状态分析——解析法	122
8.3	二向应力状态分析——图解法	125
8.3.1	应力圆	125
8.3.2	应力圆的绘制	125
8.3.3	应力圆的应用	127
8.4	三向应力状态的最大应力	129
8.5	广义胡克定律	130
8.6	复杂应力状态的应变能密度	132
8.7	4种常用强度理论	133
8.7.1	强度理论的概念	133
8.7.2	最大拉应力理论(第一强度理论)	134
8.7.3	最大伸长线应变理论(第二强度理论)	134

8.7.4	最大切应力理论(第三强度理论)	135
8.7.5	畸变能密度理论(第四强度理论)	135
8.7.6	4种强度理论的适用范围	135
	习题	138
第9章	组合变形	143
9.1	组合变形和叠加原理	143
9.2	拉伸或压缩与弯曲的组合变形	144
9.3	斜弯曲	147
9.4	弯曲和扭转的组合变形	151
9.5	拉伸、扭转与弯曲的组合变形	154
	习题	155
第10章	压杆稳定	161
10.1	压杆稳定的概念	161
10.2	临界载荷的欧拉公式	163
10.2.1	两端铰支细长压杆的临界载荷	163
10.2.2	其他细长压杆的临界载荷	164
10.3	欧拉公式的适用范围与经验公式	167
10.3.1	临界应力与柔度	167
10.3.2	欧拉公式的适用范围	169
10.3.3	经验公式	169
10.4	压杆的稳定校核	171
10.5	提高压杆稳定性的一些措施	172
	习题	174
第11章	疲劳强度问题	177
11.1	交变应力与疲劳失效	177
11.1.1	交变应力	177
11.1.2	疲劳失效的概念及其特点	178
11.1.3	疲劳失效的断口特征及成因	178
11.2	交变应力及其类型	179
11.3	持久极限	180
11.4	影响持久极限的因素	181
11.4.1	构件外形的影响(应力集中的问题)	181
11.4.2	构件尺寸的影响	183
11.4.3	表面加工质量的影响	184
11.5	构件的疲劳强度计算	185
11.5.1	对称循环交变应力下构件的强度条件	185
11.5.2	非对称循环交变应力下构件的强度条件	186
11.5.3	弯扭组合交变应力下构件的强度条件	188
11.6	提高构件疲劳强度的一些措施	189

习题.....	191
第 12 章 能量法	193
12.1 外力功和应变能的计算.....	193
12.1.1 基本变形应变能及外力功的计算	193
12.1.2 弹性体组合变形时的应变能	195
12.2 单位载荷法.....	197
12.2.1 变形体的虚功原理	197
12.2.2 单位载荷法	198
12.3 单位载荷法在求解超静定问题中的应用.....	200
习题.....	202
附表 A 型钢表	204
附表 B 非圆截面杆扭转	217
习题答案	219

第 1 章 绪 论

1.1 材料力学的任务

在工程实际中,结构或机械的各组成部分称为构件,如房屋的梁、柱,齿轮轴等。在结构和机械工作时,构件受到外力作用。外力处于一定范围内时,构件对外力有抵抗破坏的能力,同时,构件的尺寸和形状会发生变化,这种变化称为变形。

为了保证工程结构或机械的正常工作,构件必须具有足够的承载能力,表现如下。

- (1) 强度要求 在规定载荷作用下,构件应具有足够的抵抗破坏的能力。
- (2) 刚度要求 在规定载荷作用下,构件应具有足够的抵抗变形的能力。
- (3) 稳定性要求 有些受压力作用的细长直杆,如活塞杆等,应具有维持其原有的直线平衡状态的能力。

以上 3 项是构件保证安全工作的基本要求。在满足基本要求的情况下,怎样合理地选择构件的材料、构件的形状及构件的尺寸,是构件设计中一个十分重要的问题。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。

1.2 材料力学的基本假设

在研究构件的强度、刚度和稳定性时为了抽象力学模型,把握问题的主要属性,略去一些次要因素,对构件应做下列假设。

(1) 连续性假设 在构件的整个体积内部毫无空隙地充满了物质。实际上,在构件的内部存在着空隙,并不是连续的,但这种空隙的大小与构件的尺寸相比极其微小,可以忽略不计,而认为材料是密实的。这样构件的一些力学变量就可以表示成坐标的连续函数,可以用坐标增量为无限小的极限分析方法进行处理。

(2) 均匀性假设 在构件的任何位置上的力学性能都是相同的。实际上,组成构件的材料中每个晶粒的力学性能都是不同的,由于晶粒非常多,且无规则排列,构件的力学性能是各晶粒力学性能的统计平均值,因此可以认为构件各部分的力学性能是均匀的。这样构件中任何部分的力学性能都可以代表构件的力学性能。

(3) 各向同性假设 在构件上沿任何方向力学性能相同。就金属的单一晶粒而言,沿不同的方向,力学性能是不同的。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。具有这样属性的材料称为各向同性材料,如钢、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、胶合板及某些人工合成的材料等。

在材料力学中,实际材料一般都被看做是连续的、均匀的和各向同性的可变形的固体。实际表明,在此基础上所建立起来的理论及有关计算结论是符合工程实际要求的。

1.3 内力、截面法和应力的概念

1.3.1 外力

来自构件外部的作用力称为外力。按外力的作用方式,把外力分为表面力和体积力。表面力是作用于构件表面的力,又可分为集中力和分布力。当外力的作用范围远小于物体表面尺寸时,这样的外力称为集中力,如齿轮的啮合力,车轮对桥面的压力等。当外力连续作用于物体表面,其作用范围不可忽略的时候,这样的力称为分布力,如轧制的钢板对轧辊轴的作用力等。体积力是连续作用于物体内部各点的力,如物体的自重和惯性力等。工程中习惯将外力称为载荷。

按载荷随时间的变化情况,又可分成静载荷和动载荷。若载荷缓慢由零增加到某一数值,以后保持不变,或者变化也不明显,这样的载荷称为静载荷。如将重物缓慢地放于基础上,重物的重量对基础的作用力就是静载荷。若载荷随时间变化,这样的载荷称为动载荷。如运转的齿轮轴受到的啮合力,就是随时间变化的动载荷。冲击载荷是物体在瞬间受到突然的动载荷的作用。如急刹车时飞轮的轮轴、锻造时气锤的锤杆及工件都受到冲击载荷的作用。

材料在静载荷和动载荷的作用下的力学性能有很大的差异,分析研究方法也不相同,但静载荷是动载荷研究的基础,静载荷的问题也相对简单,所以这里以讨论静载荷的问题作为主要内容。

1.3.2 内力、截面法

构件在外力作用下,其内部原有作用力的改变量称为构件的内力。这部分内力随外力的变化而变化,当外力增加时,内力也随着增加,当到达某一极限值的时候就会引起构件的破坏、失稳等问题的出现,因此,这部分内力与构件的强度、刚度和稳定性有着密切的关系,也是我们通常所研究的内力。

为了显示在外力作用下,构件内部 $m-m$ 截面上的内力,我们用一个假想的平面切开构件,将构件分成 I、II 两部分,如图 1-1(a) 所示。以部分 II 作为研究对象来讨论。部分 II 上受到 F_3 和 F_4 的作用,欲使 II 保持平衡,部分 I 必然给部分 II 在 $m-m$ 截面上有作用力,以与 II 上的外力平衡,如图 1-1(b) 所示。同时,部分 II 也必然给部分 I 在 $m-m$ 截面上有等值的反作用力。上述在部分 I 与部分 II 之间的作用力就是构件在 $m-m$ 截面上的内力。在 $m-m$ 截面上材料是连续的,内力也是连续作用的,这就构成了一个分布力系。这个分布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。

上述内力可以由平衡方程计算得到。

上述用截面假想地把构件分成两部分,以表示作用力的方法称为截面法。可将其归纳成以下 3 点。

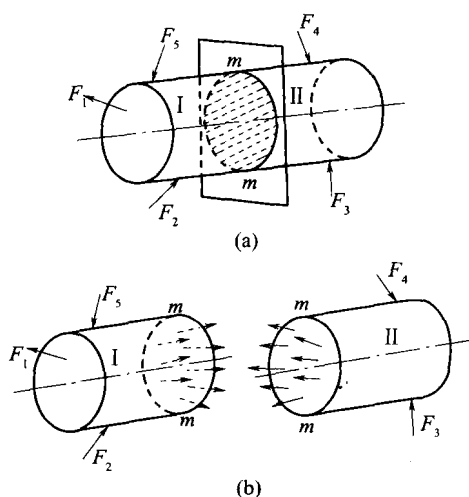


图 1-1

(1) 用一假想的截面,在构件欲求内力的位置处,把构件切成两部分,并只取其中的一部分作为研究对象。

(2) 用作用于截面上的内力代替弃去部分对取出部分的作用。

(3) 建立取出部分的平衡方程,并计算未知的内力。

例 1-1 钻床如图 1.2(a) 所示,在载荷 F 作用下,试确定 $m-m$ 截面上的内力。

解:沿 $m-m$ 截面假想地把钻床分成两部分,取上部分讨论,以截面形心为坐标原点建立坐标系,如图 1-2(b) 所示。

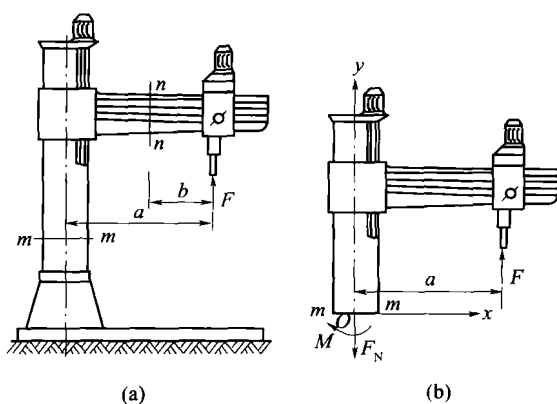


图 1-2

建立平衡方程

$$\sum F_y = 0, F - F_N = 0$$

$$\sum M_O = 0, aF - M = 0$$

得到内力为

$$F = F_N, M = Fa$$

1.3.3 应力

内力反应了截面上受力的情况,但不能说明内力系在某点上的强弱程度。截面内某点的应力 p 是分布内力系的集度。

在图 1-1 所示受力构件的 $m-m$ 截面上的 c 点截取微小面积 ΔA ,如图 1-3(a) 所示,设 ΔA 上分布的内力的合力为 ΔF 。 ΔF 的大小和方向与 c 点位置和 ΔA 的大小有关。 ΔF 与 ΔA 的比值

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

p_m 是一个矢量,代表了在 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 的逐渐减小, 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一定的极限。即有

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

p 称为 c 点的应力。 P 是一个矢量,一般来说,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 ,如图 1-3(b) 所示。 σ 称为正应力, τ 称为切应力。

应力的单位符号是 Pa(帕),称为帕[斯卡], $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$ 。Pa 这个单位太小,通常使用 MPa 和 GPa,其之间的换算为 $1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$, $1\text{GPa} = 10^9\text{Pa}$ 。

1.4 变形与应变、杆件变形的形式

1.4.1 变形与应变

构件在外力作用下所产生的变形与内力的分布有关,也有不同的表现形式。如图 1-3(a) 中所示的单元体(构件中的某一微小六面体),在外力的作用下发生变形,如图 1-3(b) 中虚线所示。单元体的变形由两部分组成,长度的变化及角度的变化。

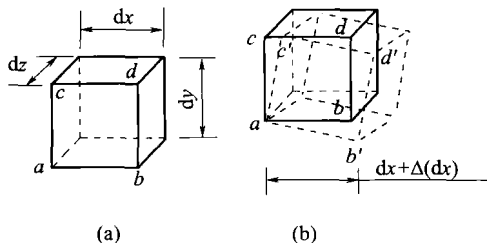


图 1-3

其中单元体长度的变化,比如水平方向的长度由 dx 变化成 $dx + \Delta(dx)$,长度有了改变量 $\Delta(dx)$ 。比值

$$\varepsilon = \frac{\Delta(dx)}{dx} \quad (1-2)$$

ε 称为微体沿 x 方向的线应变,简称应变。同样也可以得到沿 y 和 z 方向的应变。

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \angle c'ab' \quad (1-3)$$

称为微体的切应变或角应变。

实际构件的变形是极其微小的,要用精密的仪器才可测定。材料力学所研究的问题都限于小变形的情况。

1.4.2 杆件变形的基本形式

横向尺寸远小于纵向尺寸的构件称为杆件,(如图 1-4 所示的杆件)是材料力学的主要研究对象。

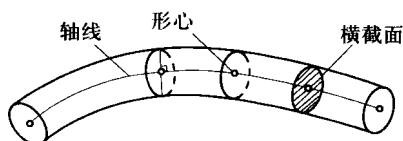


图 1-4

杆件的形状和尺寸由其轴线(横截面形心的连线)和横截面确定,横截面与轴线是垂直的。轴线为直线的杆件称为直杆,轴线为曲线的杆件称为曲杆;横截面相等的杆件称为等截面杆,横截面不相等的杆件称为变截面杆。

在不同外力的作用下,杆件的变形形式也不相同。杆件变形的基本形式有以下 4 种。

(1) 拉伸或压缩 如图 1-5(a)所示结构,在载荷 F 的作用下 BC 杆受拉伸,如图 1-5(b)所示; AB 杆受压缩,如图 1-5(c)所示。这类变形形式是由沿杆件轴线作用的载荷引起的,表现为杆件沿长度方向的伸长或缩短。

(2) 剪切 如图 1-6(a)所示为一铆钉连接,在力 F 的作用下,铆钉受到剪切,如图 1-6(b)所示。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。

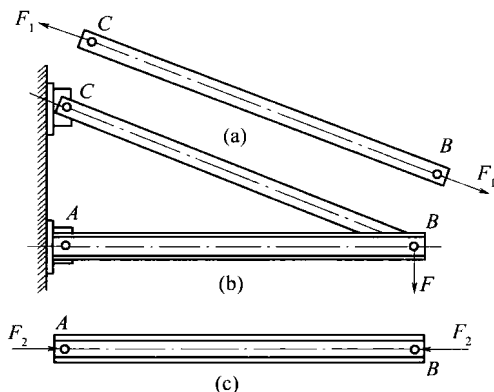


图 1-5

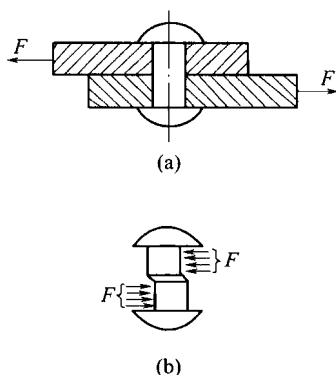


图 1-6

(3) 扭转 如图 1-7(a)所示的汽车转向轴 AB ,在工作时发生扭转变形。这类变形形式是由作用面垂直于杆轴向的一对或多个力偶引起,如图 1-7(b)所示。