



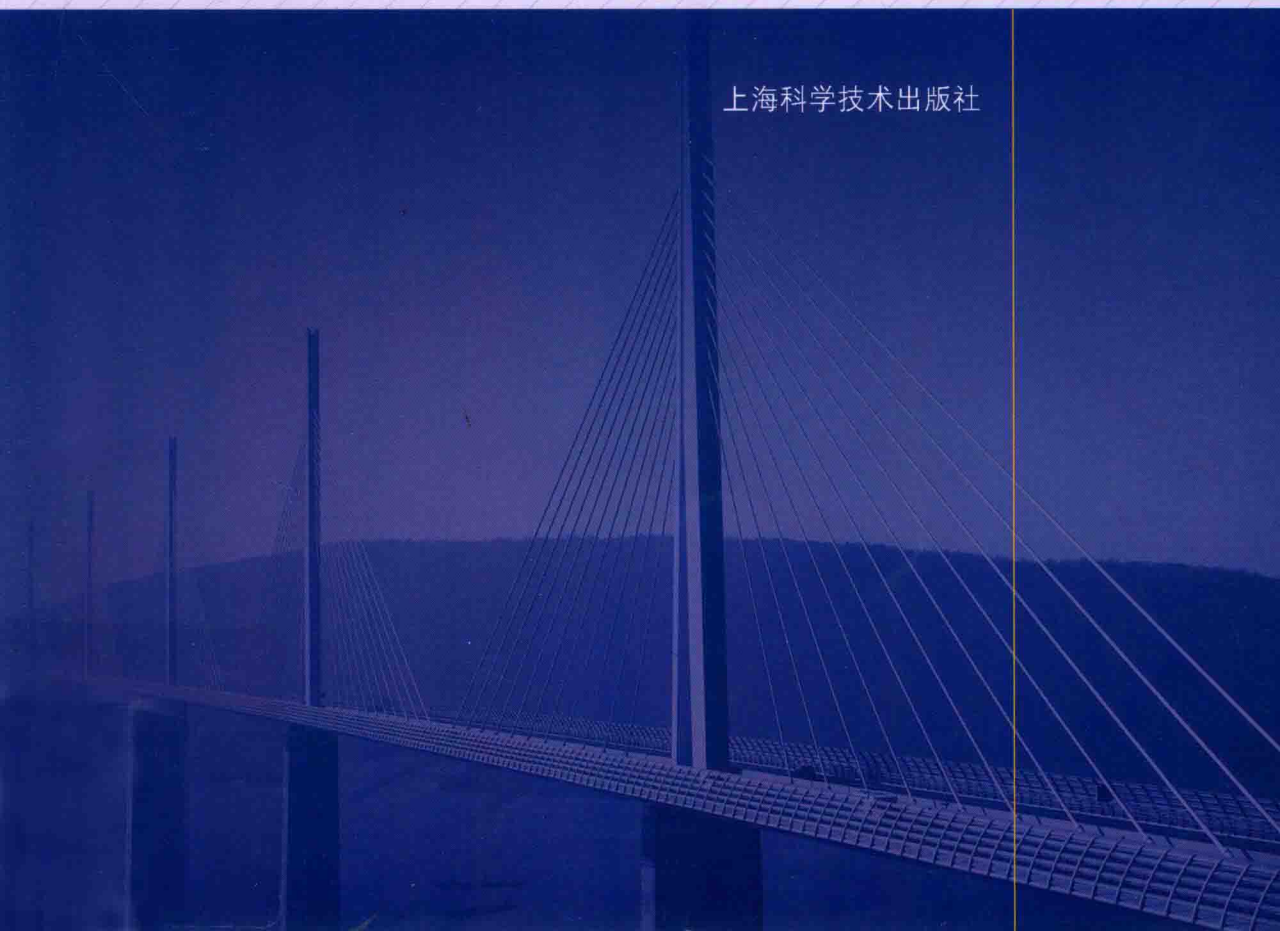
高等工科院校卓越工程师教育教材

张丽芳 翁国华 主编

材料力学

CAILIAO LIXUE

上海科学技术出版社



高等工科院校卓越工程师教育教材

材 料 力 学

张丽芳 翁国华 主编

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书是根据教育部高等院校力学课程教学指导委员会制定的“材料力学”课程的教学基本要求,结合机械设计制造、土木建筑、动力机械等专业“卓越工程师”教育培养计划实施要求编写而成。全书精选了材料力学的基本内容,包括绪论、轴向拉伸、压缩与剪切、圆轴的扭转、梁的弯曲内力、弯曲应力、弯曲变形、应力状态分析与强度理论、组合变形、能量方法与静不定结构、压杆稳定、动载荷。同时增加了第12章工程应用,其中对动载荷与交变应力进行了适当的编排。本书在保证教学基本要求的前提下,在内容表述上简明清晰,重点突出,更多地结合了工程实例,可以进一步提高学生理论联系实际的能力。

本书是卓越工程师教材,可作为工科高等院校的材料力学教材。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学/张丽芳,翁国华主编. —上海:上海科学技术出版社,2015. 2

高等工科院校卓越工程师教育教材

ISBN 978-7-5478-2490-0

I. ①材… II. ①张…②翁… 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 284225 号

材料力学

张丽芳 翁国华 主编

上海世纪出版股份有限公司 出版
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

上海世纪出版股份有限公司发行中心发行

200001 上海福建中路 193 号 www.ewen.co

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 17

字数: 400 千字

2015 年 2 月第 1 版 2015 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-2490-0/TB·6

定价: 37.00 元

前 言

材料力学研究构件在外力作用下的受力、变形和破坏规律,为合理设计工程构件提供有关强度、刚度和稳定性分析的基本理论和方法,是一门重要的技术基础课。近年来强劲推出的“卓越工程师”教育培养计划,其“面向工程、面向企业、面向世界”的特点给材料力学教学提出了更新更高的要求。

本书根据教育部高等院校力学课程教学指导委员会制定的“材料力学”课程教学基本要求,结合机械设计制造、土木建筑、动力机械等专业“卓越工程师”教育培养计划实施要求编写而成,可满足不同工科类专业材料力学课程的教学要求(48~64学时)。实验部分单独设课(6学时)。考虑到学时较少的实际情况,在保证基础的前提下,编者力图在内容表述上做到循序渐进、简明清晰,在结构安排上做到合理紧凑。

为了突出“卓越工程师”的培养目标,也为了更好地培养学生的工程应用能力,本书在介绍材料力学课程的基本内容以外,还增加了第12章工程应用。另外,在每章描述问题的过程中,更多地结合了工程实例,可以进一步提高学生理论联系实际的能力。

为了便于学习,在每章后均附有思考题和练习题,并在附录中给出了参考答案。

参加本书编写的人员有张丽芳、翁国华、叶大庆、陈艳丽、张志忠、余慧杰、胡育佳。其中张丽芳、翁国华任主编,林建中担任审稿工作。第1、2章由翁国华编写,第3章由张志忠编写,第4、5、8章由陈艳丽编写,第6、10、12章由叶大庆编写,第7章由余慧杰编写,第9章由张丽芳编写,第11章由胡育佳编写。

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 材料力学的任务	1
1.1.1 工程中的三类问题	1
1.1.2 工程问题的二重性	1
1.1.3 任务	2
1.1.4 研究方法	2
1.2 材料力学的基本假设	2
1.2.1 连续性假设	2
1.2.2 均匀性假设	2
1.2.3 各向同性假设	2
1.2.4 小变形假设	3
1.3 弹性杆件的外力和内力	3
1.3.1 外力	3
1.3.2 内力	3
1.3.3 求解内力的截面法	3
1.4 正应力与切应力	5
1.5 正应变与切应变	6
1.6 杆件受力与变形的基本形式	6
第 2 章 轴向拉伸、压缩与剪切	10
2.1 工程中的轴向拉伸或压缩问题	10
2.2 轴力与轴力图	11
2.2.1 截面法求轴力	11
2.2.2 轴力图	11
2.3 直杆轴向拉伸或压缩时的应力	12
2.3.1 横截面上的应力	12

2 材料力学

2.3.2 斜截面上的应力	13
2.3.3 圣维南原理	14
2.4 材料在拉伸与压缩时的力学性能	15
2.4.1 拉伸压缩试验	15
2.4.2 低碳钢在拉伸时的力学性能	15
2.4.3 其他材料在拉伸时的力学性能	18
2.4.4 铸铁拉伸时的力学性能	19
2.4.5 材料在压缩时的力学性能	20
2.5 拉压杆的强度计算	21
2.5.1 失效与许用应力	21
2.5.2 轴向拉伸与压缩时的强度设计	22
2.6 轴向拉伸与压缩时的变形计算	24
2.6.1 轴向变形与虎克定律	24
2.6.2 横向变形与泊松比	25
2.7 简单拉压静不定问题	27
2.8 连接部分的强度计算	32
2.8.1 剪切的实用计算	32
2.8.2 挤压的实用计算	33

第3章 圆轴的扭转

3.1 工程中的扭转问题	41
3.2 外力偶矩、扭矩与扭矩图	42
3.2.1 外力偶矩	42
3.2.2 扭矩	42
3.2.3 扭矩图	43
3.3 圆轴的扭转变形	44
3.3.1 纯扭转	44
3.3.2 切应变	45
3.3.3 纯剪切	45
3.4 圆轴扭转时横截面上的切应力	46
3.4.1 剪切胡克定律	46
3.4.2 扭转的切应力公式	47
3.4.3 极惯性矩和抗扭截面系数的计算	48
3.5 圆轴扭转时的强度条件和刚度条件	49
3.5.1 圆轴的扭转失效	49
3.5.2 强度条件	50

3.5.3 刚度条件	51
3.6 非圆截面轴扭转简介	54
第4章 梁的弯曲内力	59
4.1 工程中的弯曲问题	59
4.2 梁的计算简图	60
4.2.1 载荷的简化	60
4.2.2 实际约束的简化	60
4.2.3 静定梁的类型	60
4.3 剪力与弯矩	61
4.4 剪力方程与弯矩方程、剪力图与弯矩图	62
4.5 载荷集度、剪力、弯矩之间的微分关系	65
4.5.1 剪力、弯矩与载荷集度间的微分关系	65
4.5.2 F_s 、 M 、 q 间微分关系在绘制剪力、弯矩图中的应用	66
第5章 弯曲应力	74
5.1 对称弯曲正应力	74
5.1.1 纯弯梁横截面上的正应力	74
5.1.2 常见截面的惯性矩、抗弯截面系数及组合截面的惯性矩	77
5.1.3 横力弯曲时梁横截面上的正应力计算	80
5.2 对称弯曲梁横截面上的切应力简介	82
5.3 梁的强度条件与强度设计	83
5.3.1 强度条件	83
5.3.2 强度设计	84
5.4 提高梁强度的主要措施	86
第6章 弯曲变形	94
6.1 工程中的弯曲变形问题	94
6.2 挠曲线的近似微分方程	95
6.3 计算梁弯曲变形的两种方法	95
6.3.1 积分法	95
6.3.2 叠加法	99
6.4 梁的刚度条件与刚度设计	104
6.4.1 刚度条件	104
6.4.2 刚度设计	104
6.5 提高梁弯曲刚度的措施	105

6.6 简单静不定梁	105
第7章 应力状态分析与强度理论	116
7.1 点的应力状态	116
7.2 平面应力状态——解析法	117
7.2.1 平面应力状态斜截面上的应力	117
7.2.2 主平面、主应力、最大正应力、最大切应力	118
7.3 平面应力状态——几何法	122
7.4 三向应力状态简介与最大切应力	125
7.4.1 三向应力状态	125
7.4.2 最大切应力	127
7.5 广义虎克定律	128
7.6 复杂应力状态的应变比能	131
7.7 断裂失效与屈服失效	133
7.8 四种常用的强度理论	135
7.8.1 最大拉应力理论(第一强度理论)	135
7.8.2 最大伸长线应变理论(第二强度理论)	135
7.8.3 最大剪应力理论(第三强度理论)	136
7.8.4 形状改变比能理论(第四强度理论)	137
第8章 组合变形	147
8.1 工程中的组合变形问题	147
8.2 拉伸(压缩)与弯曲组合变形的强度计算	147
8.3 斜弯曲	150
8.4 弯曲与扭转组合变形的强度计算	153
第9章 能量法	161
9.1 概述	161
9.2 线弹性杆件的变形能计算	161
9.2.1 轴向拉伸或压缩	161
9.2.2 扭转	162
9.2.3 弯曲	163
9.2.4 组合变形杆件	163
9.3 卡氏定理	165
9.4 莫尔定理	167
9.5 功的互等定理和位移互等定理	170

9.6 用能量法求解静不定问题	171
第 10 章 压杆稳定	181
10.1 工程中的压杆稳定问题	181
10.2 两端铰支细长压杆的临界压力	182
10.3 其他约束条件下的细长压杆临界压力	183
10.4 临界压力和临界应力的欧拉公式	184
10.5 中、小柔度杆的临界应力	187
10.5.1 中柔度杆临界应力的经验公式	187
10.5.2 小柔度杆的临界应力	188
10.5.3 临界应力总图	188
10.6 压杆的稳定计算与合理设计	189
10.6.1 压杆的稳定条件	189
10.6.2 压杆的合理设计	190
10.6.3 提高压杆稳定性的措施	191
第 11 章 动载荷	199
11.1 概述	199
11.2 动静法	199
11.2.1 构件作匀加速直线运动的应力	199
11.2.2 构件作匀速转动运动的应力与变形	201
11.3 构件受冲击时的近似计算	202
11.4 交变应力的概念	205
11.5 金属疲劳破坏的概念	207
11.6 材料的疲劳极限与 S-N 曲线	208
11.7 影响构件疲劳极限的因素	209
11.7.1 构件外形的影响	210
11.7.2 构件尺寸的影响	211
11.7.3 表面状态的影响	211
11.8 构件疲劳极限	212
11.9 对称循环下的疲劳强度计算与合理设计	213
第 12 章 工程应用	222
12.1 ANSYS 简介	222
12.1.1 有限元分析的基本概念	222
12.1.2 ANSYS 12.0 的启动	223

12.1.3	ANSYS 12.0 的退出	224
12.1.4	ANSYS 12.0 的界面	224
12.1.5	命令流	227
12.2	工程中的桁架结构的计算	227
12.2.1	问题描述	227
12.2.2	ANSYS 的启动	227
12.2.3	设置分析模块	227
12.2.4	定义单元类型、实常数和材料	228
12.2.5	建立模型(有限元模型)	229
12.2.6	加载与求解	230
12.2.7	查看结果	232
12.2.8	退出系统	233
12.3	工程中的梁的内力、应力和变形的计算	233
12.3.1	问题描述与分析	233
12.3.2	计算命令流	234
12.4	工程中的组合变形杆件的内力、变形的计算	235
12.4.1	问题描述与分析	235
12.4.2	计算命令流	236
12.5	工程中的压杆稳定的计算	238
12.5.1	问题描述与分析	238
12.5.2	计算命令流	238
附录 I 平面图形的几何性质		242
附录 II 参考答案		254

第 1 章 绪 论

1.1 材料力学的任务

1.1.1 工程中的三类问题

工程中常见的机器和结构,例如机床、内燃机、起重机等,都是由构件组成的。为了保证机器和结构在载荷作用下能正常工作,必须要求这些构件具有足够的承受载荷的能力(简称承载能力)。构件的承载能力主要从以下三方面来衡量:

1. 强度

构件在工作时首先要保证不破坏。例如,起重用的钢丝绳,在起吊额定重量时不能被拉断,传动轴在正常工作时不能被扭断等。可见,所谓的强度是指构件抵抗破坏的能力。构件能正常工作必须具有足够的强度。

2. 刚度

在某些场合,构件受载后虽不会断裂,但由于变形过大,也会影响机器或结构的正常工作。例如传动中的齿轮轴,如果变形过大,会使齿轮啮合不良,引起振动和噪声,影响传动的精确性。所谓的刚度是指构件抵抗变形的能力。构件能正常工作必须具有足够的刚度。

3. 稳定性

工程中,某些受轴向压缩的细长杆,如千斤顶中的螺杆,当压力较小时,螺杆保持直线的平衡形式。当压力达到某一数值时,螺杆就会由直线的平衡形式突然弯曲。这种突然改变原有平衡形式的现象,称为丧失稳定(简称失稳)。可见稳定性是指构件保持其原有平衡形式的能力。这类杆件能正常工作,必须具有足够的稳定性。

综上所述,为了保证构件能安全、正常地工作,构件必须具有足够的强度、刚度和稳定性。

但是,如果只强调安全,构件尺寸可能选得过大或不恰当地选用了材料(如过分要求优质等),这将使构件的承载能力得不到充分发挥,结构笨重,成本增加,造成浪费。材料力学的任务就是在保证构件既安全又经济的前提下,为构件选用合适的材料,确定合理的截面形状和尺寸,提供必要的理论基础和计算方法。

1.1.2 工程问题的二重性

工程中除了常有的机器、结构设计中要求构件不破坏、限制变形和保持平衡状态等问题,有时也有要求构件破坏、产生较大变形和失去原有平衡状态的问题。

例如,工程实际中在生产预应力构件时,为了让构件具有更大的承载能力,在制造时预

先使其发生形变;冲床在冲压工件时,为了使工件冲压成型,要求工件在受力后产生较大的塑性形变,甚至要求断裂。

1.1.3 任务

由于工程设计中对构件的计算要求具有二重性,所以材料力学必须研究工程构件在外力作用下,发生变形和破坏的规律,为构件的合理设计(包括构件选用的材料、构件的截面形状和尺寸以及构件或由构件组成的结构所能承受的许可载荷)提供必要的理论基础和计算方法。

1.1.4 研究方法

材料力学的研究包括理论和实验两种方法。

材料力学的理论方法是根据工程实际中呈现的构件及材料承载后的各种现象,提出一系列假设,再进行理论分析,得出分析结果或计算公式,最后用实验加以验证,是一个从现象→假设→理论分析→结论→验证的过程。

材料力学的实验方法包括机械测试、电子测试和光学测试等。

1.2 材料力学的基本假设

材料力学研究的对象均为变形固体,它们在载荷作用下要发生变形。变形固体的变形分为弹性变形和塑性变形。载荷卸除后能消失的变形称为弹性变形;载荷卸除后不能消失的变形称为塑性变形。为便于材料力学问题的理论分析,对变形固体作如下假设。

1.2.1 连续性假设

即假设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,在对某些力学量进行数学分析时,就可将其用连续性函数表示,并可进行坐标增量为无限小的极限分析。

1.2.2 均匀性假设

即假设固体内到处具有相同的力学性能。就如金属来说,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为数极多的晶粒,而且无规则地排列,固体的力学性能是各晶粒的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。

1.2.3 各向同性假设

即假设无论沿任何方向,固体的力学性能都是相同的。就如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,如铸钢、铸铜、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。

1.2.4 小变形假设

在工程实际中,构件受力后的变形一般都很小,材料力学只研究这种小变形问题。小变形是指构件的变形量远小于其原始尺寸的变形。由于变形小,故在分析构件受力的平衡关系时,变形的影响可以忽略不计,仍按构件原有尺寸进行计算,如图 1-1 所示。

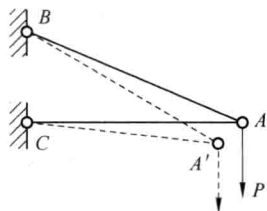


图 1-1 小变形假设

1.3 弹性杆件的外力和内力

1.3.1 外力

当研究其一构件时,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。我们在静力学的受力分析中讨论的所有主动力和约束力都属于构件的外力。

1.3.2 内力

为了维持构件各部分之间的联系,保持构件的形状和尺寸,构件内部各部分之间必定存在着相互作用的力,该力称为内力。在外部载荷作用下,构件内部各部分之间相互作用的内力也随之改变,这个因外部载荷作用而引起的构件内力的改变量,称为附加内力。在材料力学中,附加内力简称内力。它的大小及其在构件内部的分布规律随外部载荷的改变而变化,并与构件的强度、刚度和稳定性等问题密切相关。若内力的大小超过一定的限度,则构件将不能正常工作。内力分析是材料力学的基础。

1.3.3 求解内力的截面法

为了揭示在外力作用下构件所产生的内力,确定内力的大小和方向,通常采用截面法。截面法可以用以下四个步骤来概括。

1. 截

在构件上任意截面 $m-m$ 处假想地截开构件,将构件分成两个部分(图 1-2a)。所取截面与构件的轴线垂直称为横截面,而构成任意夹角的称为斜截面。

2. 取

任意取其中的一部分,注意在取的时候除了要取出这一部分的结构,还要同时加上这一部分所受的全部外力,包括主动力和约束力。

3. 代

在所取部分的截面上加上内力(图 1-2b)。必须注意的是:首先,由于所取部分实际处

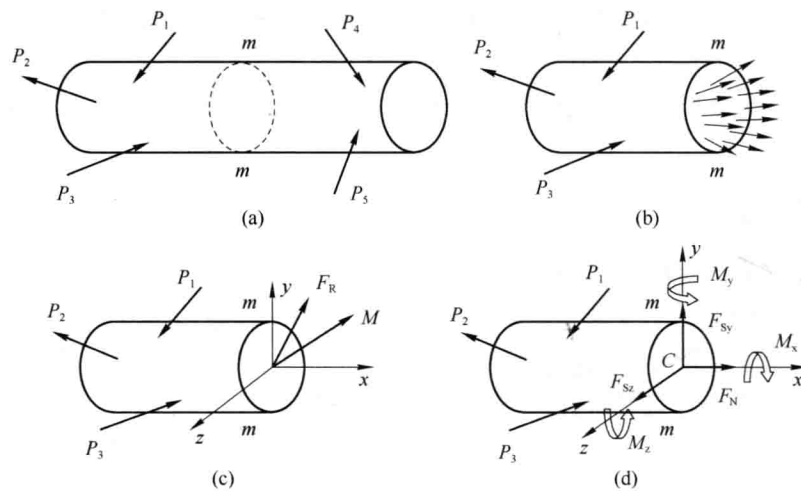


图 1-2 截面法

(a) 构件一分二; (b) 截面加内力; (c) 简化的合力形式; (d) 内力合力沿各坐标方向

于平衡状态, 因此所加内力必须与其上所受的外力构成一个平衡力系; 其次, 内力实际上是分布于整个截面上的, 因此所加内力是将这些分布内力向截面形心简化的合力形式, 如图 1-2c 所示。

一般情况下, 所加的内力合力须沿各坐标方向, 如图 1-2d 所示。把沿构件轴线方向, 与截面垂直的内力称为轴力(F_N), 与截面平行的内力称为剪力(F_{Sx} 和 F_{Sy}), 与截面垂直的内力矩矢称为扭矩(M_x), 与截面平行的内力矩矢称为弯矩(M_y 和 M_z), 这些内力在以后的各章中将会详细分析。

4. 平

根据所取结构部分由外力和内力构成的力系的实际情况, 选用适当的静力平衡方程求出所加内力。

例 1-1

如图 1-3 所示, 求等截面直杆的横截面 $m-m$ 上和斜截面 $n-n$ 上的内力。

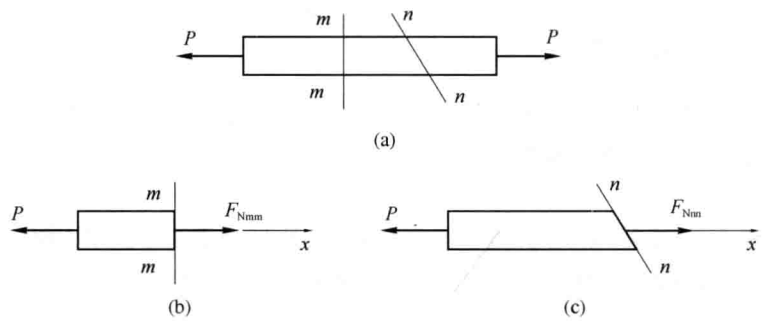


图 1-3 例 1-1 图

(a) 等截面直杆; (b) 横截面 $m-m$ 的内力; (c) 斜截面 $n-n$ 上的内力

解: 使用截面法求内力。

(1) 求横截面 $m-m$ 上的内力。用横截面 $m-m$ 把等截面直杆截成两部分, 取左边部分

作为研究对象,加上主动力 P 和横截面上的内力 F_{Nmm} ,然后使用平衡方程:

$$\sum F_x = 0 \quad F_{Nmm} - P = 0$$

$$F_{Nmm} = P$$

(2) 斜截面 $n-n$ 上的内力。用斜截面 $n-n$ 把等截面直杆截成两部分,取左边部分作为研究对象,加上主动力 P 和斜截面上的内力 F_{Nnn} ,然后使用平衡方程:

$$\sum F_x = 0 \quad F_{Nnn} - P = 0$$

$$F_{Nnn} = P$$

题解注释:

(1) 本题中,横截面的面积与斜截面的面积不相等,但是两个截面上的内力相等。

(2) 如果取右边部分作为研究对象,所求出的内力大小和符号与上面的结果是相同的。

1.4 正应力与切应力

由于截面上的内力是分布在整個截面上的,上述用截面法求出的截面上的内力只是其合力形式。要描述截面上内力的分布情况,在这里必须引入应力的概念。所谓应力,即是截面上的分布内力在一点的集度,也就是截面某单位面积上内力的大小。

如图 1-4a 所示,在截面上任意一点 M 处取一微小面积 ΔA ,设作用在该面积上的内力为 ΔF ,则 ΔF 和 ΔA 的比值,称为这块面积上的平均应力,用 p_m 表示(式 1-1)。

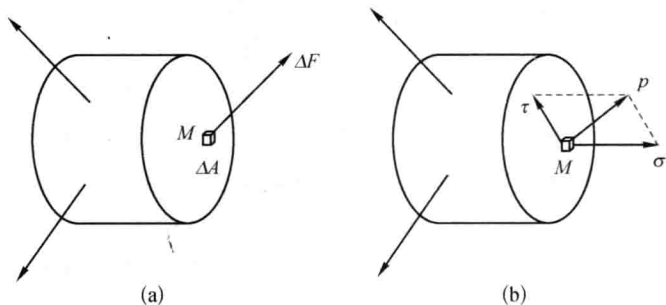


图 1-4 应力

(a) 平均应力; (b) 全应力

$$p_m = \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1-1)$$

当 ΔA 趋于零,平均应力有极值,此极值即为 M 点的应力,也称为全应力,用 p 表示。

p 是一个矢量,如图 1-4b 所示,一般情形下, p 总可以分解为两个作用线垂直于截面的和作用线位于横截面内的分量。把作用线垂直于截面的应力称为正应力,用 σ 表示;作用线

位于截面内的应力称为切应力或剪应力,用 τ 表示。正应力以拉为正,压为负。切应力以对研究杆段内任一点取矩顺时针转为正,反之为负。

在国际制单位中,应力的单位为 $\text{Pa}(\text{N}/\text{m}^2)$,工程中常用的还有 $\text{MPa}(\text{N}/\text{mm}^2)$ 和 GPa ,其中 $1\text{ MPa} = 10^6\text{ Pa}$, $1\text{ GPa} = 10^9\text{ Pa}$ 。

1.5 正应变与切应变

如果将弹性体看作由许多微小的单元体所组成,弹性体整体的变形则是所有单元体变形累加的结果。而单元体的变形则与作用在其上的应力有关。

围绕受力弹性体中的一点截取单元体(通常为正六面体)。一般情形下单元体的各个面上均有应力作用。下面考察两种最简单的情形,分别如图1-5所示。

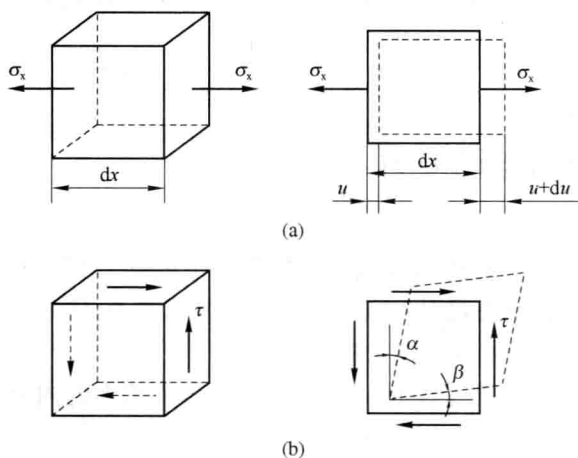


图 1-5 应变

(a) 正应力、正应变; (b) 切应力、切应变

对于正应力作用下的单元体(图1-5a),沿着正应力方向和垂直于正应力方向产生的伸长和缩短,这种变形称为线变形。描写弹性体在各点处线变形程度的量,称为正应变或线应变。用 ϵ 表示。根据单元体变形前后 x 方向长度 dx 的相对改变量,有式(1-2):

$$\epsilon_x = \frac{du}{dx} \quad (1-2)$$

式中, dx 为变形前单元体在正应力作用方向的长度; du 为微元体变形后相距 dx 的两截面沿正应力方向的相对位移; ϵ_x 的下标 x 表示应变方向。

切应力作用下的单元体将发生剪切变形,剪切变形程度用单元体直角的改变量度量。此单元体直角改变量称为切应变或剪应变,用 γ 表示。在图1-5b中, $\gamma = 90^\circ - \alpha - \beta$, γ 的单位为 rad 。

关于正应变的正负号,一般约定:拉应变为正,压应变为负。

关于切应变的正负号,一般约定:当 x 及 y 方向微线段之间的夹角减小时,切应变为正,反之为负。

1.6 杆件受力与变形的形式

在机器或结构中,构件的形式是多种多样的,但最常见最基本的形式是杆件。所谓杆件,就是纵向(长度方向)尺寸远大于横向(垂直于长度方向)尺寸的构件。杆件的轴线是杆件各横截面形心的连线。轴线为直线的杆称为直杆。横截面大小和形状不变的直杆称为等

直杆,轴线为曲线的杆称为曲杆。工程上常见的如悬臂吊中的拉杆和横梁,机器中的传动轴,联接件中的销钉等都是较典型的杆件。杆件是材料力学研究的主要对象。杆件的问题解决了,不仅解决了工程中大部分构件的问题,也为解决其他形式构件的问题提供了基础。例如,起重用的钢丝绳、桥式吊车的大梁、齿轮上的轮齿,以及轧钢机机架等构件和设备,都可以将其简化为一根杆件或杆件的组合物来处理。

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,有以下几种基本形式。

1. 拉伸或压缩

当杆件两端受到一对沿杆的轴线方向的拉力或压力载荷时,杆件将产生轴向伸长或压缩变形,如图 1-6 所示。图中实线为变形前的位置,虚线为变形后的位置。

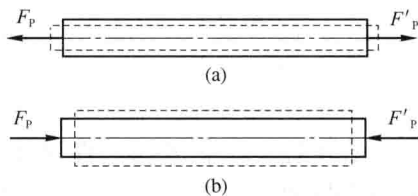


图 1-6 伸长或压缩

(a) 轴向拉伸; (b) 轴向压缩

2. 剪切

如图 1-7 所示,连接两个构件的螺栓,其两个半柱侧面所受到的力构成了一对大小相等,方向相反,且作用线相距很近的平行力,当这对力相互错动并保持两者之间的纵向距离不变时,杆件将在这两力的交界面上($m-n$ 面)发生剪切变形。

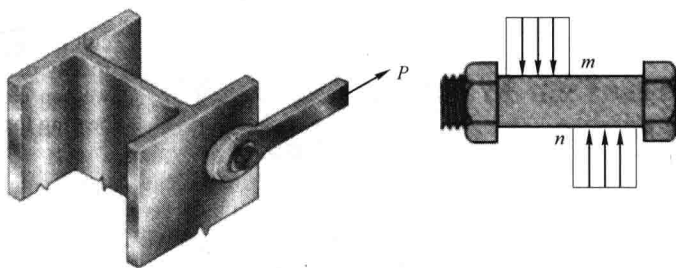


图 1-7 剪切变形

3. 扭转

如图 1-8 所示,当用螺钉旋具拧螺钉时,手在螺钉旋具的一端作用了一个力偶,而螺钉也在螺钉旋具的另一端作用了一个反力偶,如果将螺钉旋具简化成一等直杆,则作用在杆件上的一对力偶大小相等,转向相反,且作用在垂直于杆轴的平面内,此时,杆件的横截面绕其轴相互转动,杆件将产生扭转变形。

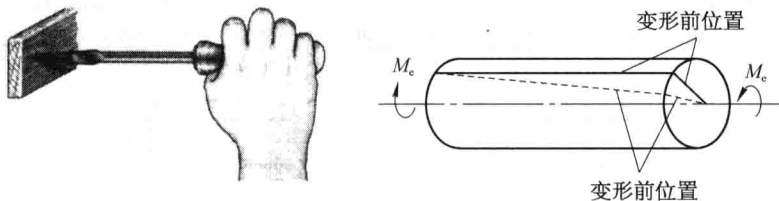


图 1-8 扭转变形

4. 弯曲

如图 1-9 所示,当横梁上所受到的外力与横梁的轴线垂直时,横梁发生了弯曲,即其轴