

同 济 大 学 工 程 力 学 系 列 教 材

材料力学

同济大学航空航天与力学学院
基础力学教学研究部 编



同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

同济大学工程力学系列教材

材料力学

同济大学航空航天与力学学院
基础力学教学研究部 编

 同济大学出版社
TONGJI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书根据国家教育委员会高等学校基础力学教学指导委员会关于少学时材料力学课程的基本要求编写。

全书包括 11 章基本内容及 3 个附录。基本内容有:轴向拉伸与压缩、剪切、扭转、弯曲内力、弯曲应力、弯曲变形、平面应力状态分析、强度理论、组合变形、压杆稳定、动载荷。附录中介绍了截面图形的几何性质、弯曲强度问题的计算机方法及国标型钢规格。每章末附有思考题、习题和习题答案。

本书简明扼要,层次清楚,详略得当,图表制作精细而形象,可作为建筑材料、给水排水、采暖通风、动力机械、工程管理、环境保护等土建和机械类本科专业的材料力学课程的教材,同时也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/同济大学航空航天与力学学院基础力学教学
研究部编。—上海:同济大学出版社,2008.8
(同济大学工程力学系列教材)

ISBN 978-7-5608-3934-9

I. 材… II. 同… 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(2008)第 094065 号

同济大学工程力学系列教材

材料力学

同济大学航空航天与力学学院基础力学教学研究部 编

责任编辑 解明芳 责任校对 封云 封面设计 潘向秦

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn

(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)

经 销 全国各地新华书店

印 刷 同济大学印刷厂

开 本 787mm×960mm 1/16

印 张 17.25

印 数 1—4100

字 数 345 000

版 次 2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5608-3934-9/TB·56

定 价 29.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换 版权所有 侵权必究

前 言

本书根据国家教育委员会高等学校基础力学教学指导委员会关于材料力学(少学时)课程的基本要求编写而成。

本书着重阐述材料力学的基本概念、基本理论和基本方法,力求简明扼要、层次清楚、详略得当。在此基础上,对部分内容作了改革与探索。

(1) 介绍了采用计算机程序设计的方法分析材料力学问题。

(2) 提高了插图的表现力,使其能生动、形象、直观地表述理论知识。

(3) 作为本教材的配套,我们还编写了《材料力学练习册》,在练习册中,既有教材中的习题,还补充了部分典型习题,以方便学生的学习。

本书由同济大学航空航天与力学学院徐烈烜和聂国隽编写。徐烈烜编写第1章、第2章、第3章、第4章、第8章、第9章、第10章、第11章及附录A,聂国隽编写第5章、第6章、第7章及附录B。全书由徐烈烜负责统稿。

全书由同济大学航空航天与力学学院李尧臣教授审阅,他提出了许多宝贵意见。在此对李尧臣教授表示衷心的感谢!

在编写本书的过程中,还得到了仲政教授及其他学院领导的热情帮助,在此表示感谢!

由于编者水平有限,书中错误或不当之处在所难免,敬请广大教师和读者批评指正。

编者

2008年2月

目 录

前 言

1 基本概念	1
1.1 材料力学的任务	1
1.2 材料力学的基本假设	2
1.3 内力及截面法	3
1.4 内力的集度——应力	4
1.5 杆件变形的基本形式	5
2 轴向拉伸与压缩	7
2.1 轴向拉伸与压缩时横截面上的内力	7
2.2 轴向拉伸与压缩时的应力及强度条件	9
2.3 轴向拉伸与压缩时的变形及刚度条件	14
2.4 材料的力学性能 安全系数和许用应力	19
2.5 简单拉压超静定问题	29
思考题	35
习 题	36
习题答案	41
3 剪 切	43
3.1 剪切变形的概念及工程实例	43
3.2 切应力的一些常用性质	44
3.3 剪切与挤压的实用计算	46
思考题	51
习 题	51
习题答案	53
4 扭 转	54
4.1 扭转的概念	54
4.2 杆受扭时的内力计算	55
4.3 圆轴扭转时横截面上的应力及强度计算	57
4.4 圆轴扭转时的变形及刚度计算	62

4.5	圆轴受扭破坏分析	66
4.6	矩形截面杆的自由扭转	67
	思考题	68
	习 题	69
	习题答案	72
5	弯曲内力	73
5.1	平面弯曲的概念	73
5.2	剪力方程和弯矩方程 剪力图和弯矩图	74
5.3	分布载荷、剪力及弯矩间的关系	79
5.4	按叠加原理作弯矩图	84
	思考题	86
	习 题	88
	习题答案	91
6	弯曲应力	92
6.1	弯曲正应力及强度条件	92
6.2	弯曲切应力及强度条件	100
6.3	弯曲中心 平面弯曲的充要条件	107
6.4	提高弯曲强度的措施	109
	思考题	112
	习 题	114
	习题答案	117
7	弯曲变形	119
7.1	挠度和转角	119
7.2	用积分法计算梁的变形	120
7.3	用叠加法计算梁的变形 梁的刚度条件	125
7.4	简单超静定梁	133
	思考题	137
	习 题	138
	习题答案	141
8	平面应力状态分析 强度理论	142
8.1	应力状态的概念	142
8.2	平面应力状态分析的数解法	145

8.3	平面应力状态分析的图解法	149
8.4	三向应力状态 广义胡克定律	154
8.5	强度理论	161
	思考题	165
	习 题	166
	习题答案	169
9	组合变形	171
9.1	组合变形的概念	171
9.2	斜弯曲	172
9.3	拉伸(压缩)与弯曲组合	178
9.4	偏心压缩(拉伸)	180
9.5	扭转与弯曲组合	184
	思考题	188
	习 题	190
	习题答案	193
10	压杆稳定	194
10.1	压杆稳定的概念	194
10.2	细长压杆的临界力	195
10.3	压杆的临界应力总图	198
10.4	压杆的稳定计算	203
10.5	提高压杆稳定性的措施	210
	思考题	213
	习 题	214
	习题答案	217
11	动载荷	219
11.1	等加速运动构件的应力和变形计算	219
11.2	杆件受到冲击载荷作用时的应力和变形计算	223
11.3	提高构件抗冲击能力的措施	232
11.4	冲击韧度	233
	思考题	234
	习 题	235
	习题答案	237

附录 A 截面图形的几何性质	238
A1 定义	238
A2 平行移轴公式	242
A3 转轴公式	244
习 题	245
习题答案	247
附录 B 弯曲强度问题的计算机方法	248
思考题	254
附录 C 型钢规格表	255
表 C1 热轧等边角钢规格及截面特性	255
表 C2 热轧不等边角钢规格及截面特性	260
表 C3 热轧普通工字钢规格及截面特性	264
表 C4 热轧普通槽钢规格及截面特性	266
参考文献	268

1 基本概念

理论力学主要研究物体在外力作用下的平衡与运动问题。由于工程结构在外力作用下的变形一般都较小,对于物体的受力分析影响甚微,故可忽略不计。这是解决工程实际问题所允许的,也是我们认识力学规律所必需的。

材料力学则主要研究物体在外力作用下变形和破坏的规律,变形成为主要研究内容。因此,在材料力学中必须如实地将物体视为**变形体**,而不能像理论力学中将物体视为**刚体**。

1.1 材料力学的任务

材料力学课程是一门基础技术课,是基础课与专业课之间的桥梁,通过学习并掌握该课程的基础理论及基本方法,可为后续专业课程的学习打下基础。

1.1.1 研究对象和研究内容

材料力学是以工程构件或零件为主要研究对象,任何结构物或机械都是由某些**构件**(member)或零部件组成,要使结构物能正常地工作,就必须要求组成它的每个构件在载荷作用下都能正常地工作。为此,工程中所设计的构件应满足以下三方面的要求:

1. 强度要求

强度(strength)是指构件抵抗塑性变形和断裂的能力。为了保证构件的正常工作,首先要求构件具有足够的强度,能在载荷作用下不发生塑性变形和断裂。

2. 刚度要求

刚度(rigidity)是指构件抵抗弹性变形的能力。工程中根据不同的工作情况,要求构件的弹性变形满足一定的限制条件,使其在载荷作用下产生的弹性变形不超过给定的范围,即要求构件具有足够的刚度。

3. 稳定性要求

稳定性(stability)是指构件承受载荷作用时保持其原有平衡形态的能力。对于受压杆件要求它在压力作用下原有的直线形状应该是稳定的。

1.1.2 研究方法

材料力学中,理论分析和实验手段是紧密相结合的,材料力学中有关材料的力学性质——材料在外力作用下的变形规律,需通过实验的手段获得,材料力学的一些有

关理论是以实验结果得出的某些假设为前提。随着电子计算机技术的发展,材料力学问题还可采用计算机程序设计的方法进行分析。

1.1.3 材料力学的任务

在设计构件时,既要保证构件能正常地工作,也要考虑尽可能地降低成本,节约资金。这就要求我们必须掌握一定的材料力学知识,设计时运用材料力学的理论和方法,在保证构件既安全又经济的前提下,为构件的设计提供必要的理论依据。

1.2 材料力学的基本假设

1.2.1 变形固体

在材料力学中必须如实地将物体视为变形体,而不能像理论力学中将物体视为刚体。在外力作用下可发生变形的物体称为变形固体。

1.2.2 变形固体的基本假设

变形固体的性质是错综复杂的,为了研究的方便,必须忽略与研究问题无关的或次要的因素,才能达到研究的目的,材料力学对变形固体作了三个基本假设:

1. 连续性假设

连续性(continuous)假设认为组成物体的物质毫无空隙地充满了整个物体的几何容积。根据这个假设就可以把物体内的一些物理量看成是连续的,用坐标的连续函数来表示它们的变化规律。

2. 均匀性假设

均匀性(homogeneous)假设认为在物体内部,各处的力学性质(mechanical property)完全相同。根据这个假设,可以先取出物体的任意一小部分来分析研究,然后把分析的结果用于整个物体。

3. 各向同性假设

各向同性(isotropic)假设认为材料在各个不同方向都具有相同的力学性质。根据这个假设,在研究了材料任一方向的力学性质后,就可以将其结论用于其他任何方向。

假设1、2的作用是保证在几何方面和力学方面描述物体的物理量是坐标的函数,且连续可导;假设2、3表示材料力学性能是与坐标、方向无关的物理量。

1.2.3 研究材料力学的前提条件——小变形假设

1. 弹性变形和塑性变形

实验证明,当外力不超过某一极限时,绝大多数材料制成的物体在外力消除后能恢复原有的形状尺寸,物体具有这种性质称为弹性(elasticity),随外力解除而消除掉的变

形称弹性变形(elastic deformation)。当外力过大时,外力消除后,物体只能部分复原,残留下一部分变形,这部分不能恢复的变形称为塑性变形(plastic deformation)。

在结构或机械正常工作的情况下,一般要求构件只发生弹性变形,而不允许出现塑性变形。

1.2 小变形假设

材料力学研究的变形通常局限于小变形范围——小变形前提。所谓小变形,是指构件在外力作用下发生的变形量远小于构件的尺寸。小变形前提允许以变形前的受力分析代替变形后的受力分析。

综上所述,在材料力学中,构件被看作是连续、均匀、各向同性的变形固体,并且只限于研究弹性范围内的小变形情况。

1.3 内力及截面法

1.3.1 内力

物体的内力(internal force)一般是指物体内部各质点之间的相互作用力。在没有外力作用的情况下,其内部各质点之间均处于平衡状态,各质点之间保持一定的相对位置,从而使物体维持一定的几何形状。由此可见,一个完全不受外力作用的物体也是具有内力的。

当物体受外力作用而变形时,内部质点间的相对距离发生了改变,从而引起内力的改变,即产生了“附加内力”。材料力学中研究的内力,就是这种物体内部各部分之间由于外力作用而引起的附加内力,简称内力。这种内力随外力的增加而增加,达到某一极限值时,构件就会产生破坏。

内力的分析与计算是材料力学解决杆件的强度、刚度、稳定性等问题的基础,所以必须予以重视。

1.3.2 截面法求内力

为了显示受力杆件中的内力并确定其大小,可以采用截面法。构件内部之间的相互作用力总是成对存在的,为了显示和计算构件的内力,先可假想地用一平面将构件在需求内力的截面处“切开”,将构件分成两部分,这样就可以把构件的这两部分在“切开”处互相作用的内力以外力的形式显示出来,然后用静力平衡条件求出“切开”处截面上的内力。这种方法称为截面法(method of section)。

如图 1-1a)所示的杆件在外力作用下处于平

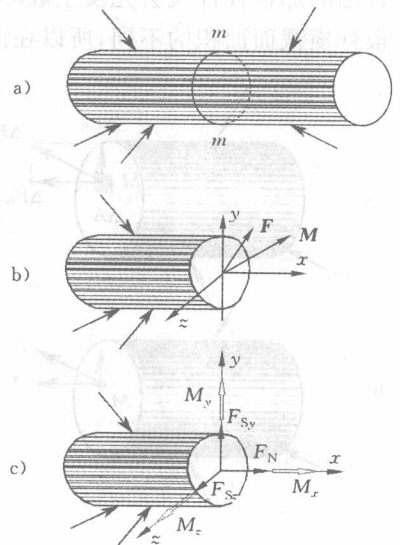


图 1-1 截面法求内力

衡,为了求出任一横截面 $m-m$ 上的内力,可在 $m-m$ 处用一个假想的截面把杆件截开,分为左、右两个部分,任取一部分作为脱离体。例如,取左边部分为脱离体,并将右边部分对左边部分的作用以截面上的内力来代替,由于杆件在外力作用下处于平衡,从中截取的任一部分在外力和内力的作用下,也必然处于平衡状态。分布内力可以简化为主矢和主矩,用 F 和 M 表示,如图 1-1b)所示。工程计算中有意义的是内力的主矢和主矩在确定坐标系上的六个分量——内力分量(图 1-1c)),分别为 F_N 、 F_{S_y} 、 F_{S_z} 、 M_x 、 M_y 、 M_z , F_N 称为轴力, F_{S_y} 、 F_{S_z} 称为剪力, M_x 称为扭矩, M_y 、 M_z 称为弯矩。

考虑左边部分脱离体的平衡,列出静力平衡方程,即可求出截面 $m-m$ 上的内力。若取右边部分为脱离体,同样,可用静力平衡条件求出截面 $m-m$ 上的内力。步骤如下:

- (1) 截开——在需求内力的截面处,假想用一平面将杆件切成两部分;
- (2) 脱离——留下一部分,弃去另一部分,并以内力代替弃去部分对留下部分的作用;
- (3) 平衡——对保留部分建立静力平衡方程,从而确定内力的大小和方向。

截面法是材料力学中求内力的一个基本方法,在讨论杆件的其他变形形式时也经常使用。

1.4 内力的集度——应力

两根材料相同而粗细不同的杆件,在承受相等的载荷时,随着载荷的逐渐增加,较细的那根杆件就会先发生破坏。这就是说,虽然两根杆中的内力相同,但是由于两根杆横截面面积的不同,所以在两杆横截面上内力的分布集度也不同,内力的分布集度称为应力(stress)。

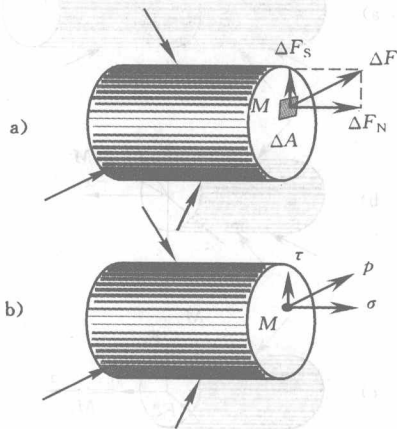


图 1-2 某一点的应力

图 1-2 表示受力构件内某截面 $m-m$ 上 M 点处的应力,围绕 M 点取出微小面积 ΔA 进行研究。设 ΔF 是作用在这一微小面积 ΔA 的内力,可将 ΔF 分解为垂直于截面的内力 ΔF_N 和平行于截面的内力 ΔF_S (图 1-2a))。

ΔF 在微小面积 ΔA 上的平均应力为 $p_m = \frac{\Delta F}{\Delta A}$,当 ΔA 趋于零时, p_m 的极限值 p 就是 M 点的内力分布集度,称为总应力(total stress)。总应力 p 可用下式表示:

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA}$$

同样,内力 ΔF_N 和 ΔF_S 在 M 点上引起的应力称为正应力(normal stress)和切应力(shearing stress),分别以 σ 和 τ 表示(图 1-2b))。正应力 σ 和切应力 τ 分别用下式表示:

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_N}{\Delta A} = \frac{dF_N}{dA}$$

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_S}{\Delta A} = \frac{dF_S}{dA}$$

p, σ, τ 三者之间的关系为 $p^2 = \sigma^2 + \tau^2$ 。

1.5 杆件变形的基本形式

材料力学研究的构件大多为杆件,杆件在不同形式的荷载作用下的变形形式是不同的,可以将实际杆件的变形归结为四种基本变形形式中的一种,或其中某几种变形的组合。四种基本变形形式为:

1. 轴向拉伸和压缩(axial tension and compression)

外力特点:作用线与杆轴重合的外力(图 1-3a、b))。

变形特点:杆件的长度发生伸长或缩短。

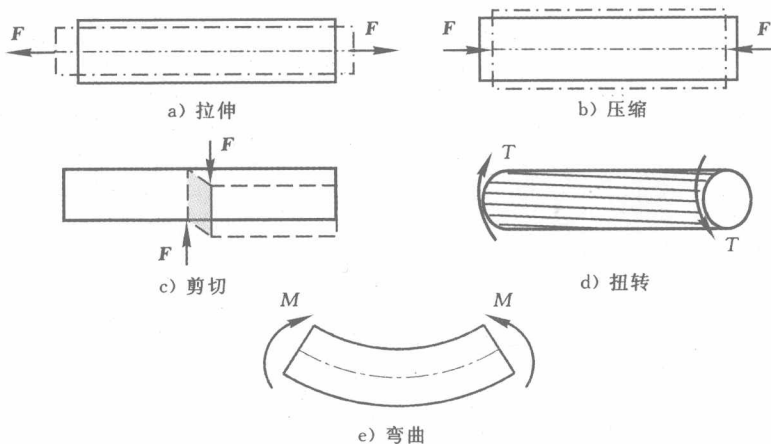


图 1-3 杆件变形的基本形式

2. 剪切(shear)

外力特点:一对大小相等、方向相反、作用线垂直于杆轴并相距很近的外力(图 1-3c))。

变形特点:受剪杆件的两部分沿外力作用方向发生相对错动。

图 1-3d) 外力特点: 一对大小相等、转向相反、作用面垂直于杆轴的一对力偶(图 1-3d))。

变形特点: 杆件任意两个横截面发生绕杆件轴线的相对转动。

4. 弯曲(bending)

外力特点: 垂直于杆件轴线的横向力, 或作用于杆轴平面内的外力偶(图 1-3e))。

变形特点: 杆件的轴线由直线变为曲线。

在以后各章节中, 将依次研究杆件在四种基本变形下的强度和刚度的计算, 再研究杆件在组合变形下的强度与刚度的计算。

九 组合变形下的材料力学

在工程实际中, 杆件往往同时承受多种外力作用, 产生多种基本变形的组合。例如, 一根梁在自重和荷载作用下, 既发生弯曲变形, 又发生扭转变形。这种同时发生两种或两种以上基本变形的情况, 称为组合变形。组合变形的研究, 是材料力学的一个重要组成部分。

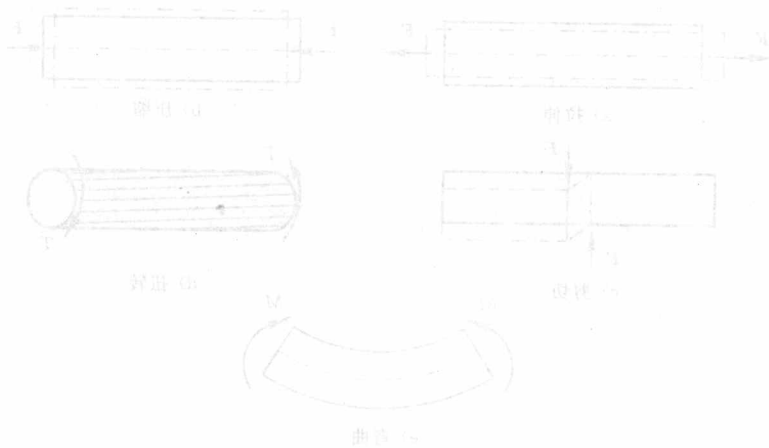


图 1-3 杆件的基本变形

图 1-3 杆件的基本变形: (a) 拉伸; (b) 压缩; (c) 扭转; (d) 弯曲。

在组合变形下, 杆件的强度和刚度计算, 通常采用叠加原理。

2 轴向拉伸与压缩

2.1 轴向拉伸与压缩时横截面上的内力

在工程实际中,由于外力作用而产生拉伸或压缩变形的杆件是很常见的。如果杆件在其两端受到一对沿着杆件轴线、大小相等、方向相反的外力作用,则杆件将发生轴向拉伸或压缩变形。当外力是拉力时,产生拉伸变形(图 2-1a)),当外力是压力时,产生压缩变形(图 2-1b))。

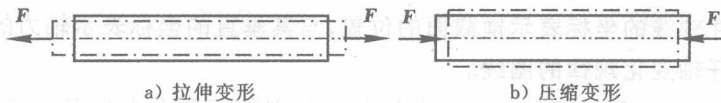


图 2-1 轴向拉伸与压缩变形

轴向拉伸与压缩是直杆变形的基本形式,例如,起重机的吊缆、房屋中的某些柱子、桁架结构中的一些杆件,在受到载荷作用时,都会产生拉伸或压缩变形。

下面以轴向拉伸为例,具体说明如何用截面法求构件内力的问题。

2.1.1 截面法求横截面上的内力——轴力

为了求得轴向拉杆(图 2-2a))中任意横截面 $m-m$ 上的内力,可在此截面处假想地用一平面将杆切成左右两部分(图 2-2b),c)),若移去右边部分,而留下左边部分加以研究,则移去部分对保留部分的作用可以用内力 F_N 来代替, F_N 就是 $m-m$ 截面上的内力。由于杆件原来处于平衡状态,因此,切开后各部分仍应保持平衡。

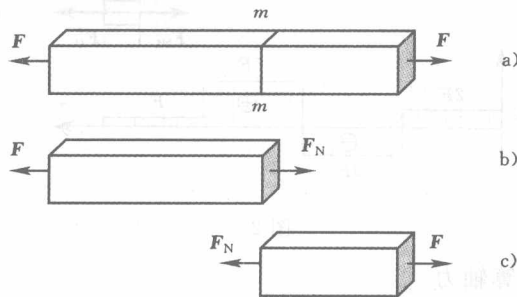


图 2-2 截面法求杆件内力

对保留部分建立平衡方程:

$$\sum F_x = 0, \quad F_N - F = 0, \quad F_N = F$$

由于外力 F 的作用线与杆的轴线重合,故内力 F_N 的作用线也与杆轴线重合,称为轴向内力,简称为轴力(axial force)。在轴向拉伸时,轴力的指向离开截面;而在轴向压缩时,轴力的方向指向截面。通常把拉伸时的轴力规定为正,压缩时的轴力规定为负。

计算中可假定轴力 F_N 为拉力,由平衡条件求出轴力,根据轴力的正负号,就可得知该截面及其邻近一段杆件是受拉还是受压了。

2.1.2 轴力图

当杆件受到多个轴向外力作用时,在杆件的不同段内将有不同的轴力。为了表明杆内的轴力随截面位置的改变而变化的情况,常以轴力图来表示。所谓轴力图,就是用平行杆件轴线的坐标表示横截面的位置,与其垂直的坐标表示轴力的大小,绘出表示轴力沿杆轴变化规律的图线。

例 2-1 图 2-3 所示杆的 A、B、C、D 截面分别作用着大小为 $F_A = 5F, F_B = 8F, F_C = 4F, F_D = F$ 的力,方向如图示,试求各段内力并画出杆的轴力图。

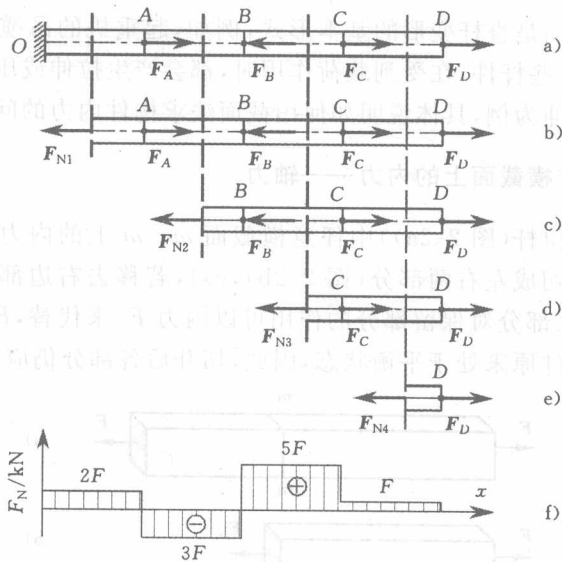


图 2-3

解 (1) 分段计算轴力

用截面法,分段作四个截面,取出三个脱离体(取右段为脱离体)如图 2-3b)、c)、d)、e)所示,逐段计算轴力。设各段的轴力 F_N 都为拉力(截面的外法线方向),分别为 F_{N1} 、 F_{N2} 、 F_{N3} 、 F_{N4} ,则由平衡条件可得

$$\begin{aligned} \sum F_x = 0, \quad F_D + F_C - F_B + F_A - F_{N1} &= 0 \\ F + 4F - 8F + 5F - F_{N1} &= 0, \quad F_{N1} = 2F \\ \sum F_x = 0, \quad F_{N2} + F_B - F_C - F_D &= 0, \quad F_{N2} = -3F \\ \sum F_x = 0, \quad F_{N3} - F_C - F_D &= 0, \quad F_{N3} = 5F \\ \sum F_x = 0, \quad F_{N4} - F_D &= 0, \quad F_{N4} = F \end{aligned}$$

其中, F_{N2} 为负值, 说明 F_{N2} 的作用方向与所设的方向相反, 应为压力。

(2) 作轴力图

用平行杆轴的横坐标表示截面的位置, 以垂直于杆轴的纵坐标按一定的比例表示对应截面上的轴力, 绘出全杆的轴力图如图 2-3f) 所示。

2.2 轴向拉伸与压缩时的应力及强度条件

2.2.1 轴向拉(压)杆横截面上的应力

为了解决强度问题, 不但要知道杆件可能沿着哪一个截面破坏, 而且还要知道截面上哪些点最危险。可见, 如果仅仅知道截面上的内力是不够的, 还必须知道截面上内力的分布情况, 即内力的分布集度。

实践告诉我们, 如果材料相同而粗细不同的两根杆件, 在承受相等的轴向拉力时, 随着拉力的逐渐增加, 较细的那根杆件就会先发生破坏。这就是说, 虽然两根杆件中的内力相同, 但是由于两根杆横截面面积的大小不同, 所以, 在两杆横截面上内力的分布集度也不同。为此, 必须知道内力在横截面上的分布规律, 而内力的分布又与变形有关, 因而应从研究杆件的变形入手。

为了便于观察拉(压)杆的变形现象, 可在受力前的一等直杆的表面画上垂直于杆轴线的横向线(图 2-4a)。在杆端作用一对轴向拉力 F 后(图 2-4b), 可以看到: 横向线分别平移到新的位置, 且仍保持为直线, 并仍垂直于杆的轴线。根据这一表面变形现象, 可以作出一个重要假设, 即认为变形前原为平面的横截面, 变形后仍然为平面且仍垂直于杆轴线。这个假设称为平面假设。

根据平面假设可以推断: 任意两个横截面之间所有纵向线段的伸长都相等, 又因假设材料是连续均匀的, 所以, 内力在横截面上是均匀分布的, 且垂直于横截面, 即横截面上只有正应力(法向应力), 且是均匀分布的(图 2-4c)。因轴力 F_N 是横截面上分布内力系的合力, 而横截面上各点处分布内力集度即正应力 σ 均相等, 故有

$$F_N = \int_A \sigma dA = \sigma \int_A dA = \sigma A$$