

SCHAUM'S
ouTlines

全美经典 学习指导系列

材料力学

(第四版)

[美] W. A. 纳什 著

赵志岗 译

包括各种难度的题

完全解答了618题

更适合于工程师和自学者



科学出版社

麦格劳-希尔教育出版集团

内 容 简 介

本书是一本材料力学的学习指导书。本书内容丰富、深入浅出、对材料力学的知识要点作了系统、全面的总结,并附有大量的例题与习题。

本书的内容有:轴向拉伸与压缩、薄壁压力容器、圆轴的扭转、梁的弯曲及特殊问题、截面的几何性质、超静定杆系及超静定梁、柱的稳定问题、应力状态及失效理论、组合应力、能量方法等,本书还用较多的篇幅讲解了奇异函数及其在求解梁(含超静定梁)弯曲问题中的应用。

此外对含冗长、繁琐计算的典型问题给出了14个计算机程序及相应的例题与习题。本书例题涉及广泛的工程背景,对提高学习者的素质、创新能力、扩大学习者的知识面大有裨益。

本书可供高等院校师生及工程技术人员学习与参考。

William Nash: Schaum's Outlines of Theory and Problems of Strength of Materials, Fourth Edition

ISBN: 0-07-046617-3

Copyright © 1998 by the McGraw-Hill Companies, Inc.

Authorized translation from the English language edition published by McGraw-Hill, Inc.

All rights reserved.

本书中文简体字版由科学出版社和美国麦格劳-希尔国际公司合作出版。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司防伪标签,无标签者不得销售

图字:01-2001-1508 字

图书在版编目(CIP)数据

材料力学/[美]W. A. 纳什(Nash)编著;赵志岗译.-北京:科学出版社,2002.

(全美经典学习指导系列)

ISBN 7-03-009608-8

I. 材… II. ①纳… ②赵… III. 材料力学-高等学校-教学参考资料 IV. TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 045754 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年1月第一版 开本:A4(890×1240)

2002年1月第一次印刷 印张:22 3/4

印数:1-4 000 字数:648 000

定价:38.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

序

《材料力学》第四版延续该书第三版的基本计划,与之相比第四版有以下特色:

1. 习题的解答用了两种单位制,即 SI(国际)单位制和 USCS(美国)单位制。
2. 对于那些含冗长、繁琐计算的典型问题,用 FORTRAN 语言或 BASIC 语言编写了 14 个计算机程序,例如对梁的应力和挠度,用上述程序很快就会给出解答。所有这些程序只需对输入格式作某些适当的修改,即可适用于大多数 PC 系统。
3. 本书的内容深入浅出,由简单到复杂,涉及承受多种载荷与支承实际条件的结构元素。对具有更普遍意义的方法,如弹性能法和塑性分析与设计,也都作了广泛而详细地讲述。

作者衷心感谢 K. 戴尔文对本书的贡献,他为本书编写了大多数计算机程序,并仔细地校验了一些新的习题。

W. A. 纳什

目 录

第 1 章 拉伸与压缩	(1)
1.1 力的内部效应	(1)
1.1.1 轴向受载杆件	(1)
1.1.2 法应力	(1)
1.1.3 试件	(1)
1.1.4 法应变	(2)
1.1.5 应力-应变曲线	(2)
1.1.6 韧性材料和脆性材料	(3)
1.1.7 胡克定律	(3)
1.1.8 弹性模量	(3)
1.2 材料的力学性质	(4)
1.2.1 比例极限	(4)
1.2.2 弹性极限	(4)
1.2.3 弹性区和塑性区	(4)
1.2.4 屈服点	(4)
1.2.5 极限强度或拉伸强度	(4)
1.2.6 断裂强度	(4)
1.2.7 回弹模量	(4)
1.2.8 韧性模量	(4)
1.2.9 断面收缩率	(4)
1.2.10 延伸率	(4)
1.2.11 工作应力	(5)
1.2.12 应变强化	(5)
1.2.13 屈服强度	(5)
1.2.14 切线模量	(5)
1.2.15 线膨胀系数	(5)
1.2.16 泊松比	(5)
1.2.17 胡克定律的一般形式	(5)
1.2.18 比强度	(6)
1.2.19 比模量	(6)
1.3 动力效应	(6)
1.4 材料的分类	(6)
1.5 弹塑性分析	(7)
1.6 例题	(7)
1.7 习题	(22)
第 2 章 超静定力系——拉伸与压缩	(27)
2.1 静定力系的定义	(27)
2.2 超静定力系的定义	(27)
2.3 弹性分析方法	(28)
2.4 极限强度分析(极限设计)	(28)
2.5 例题	(28)
2.5.1 弹性分析	(28)

2.5.2 极限强度(极限设计)	(38)
2.6 习题	(41)
第3章 薄壁压力容器	(45)
3.1 应力特点	(45)
3.2 限制条件	(45)
3.3 应用	(46)
3.4 例题	(46)
3.5 习题	(58)
第4章 剪切	(59)
4.1 剪切力的定义	(59)
4.2 剪应力的定义	(59)
4.3 剪应力和法应力的比较	(59)
4.4 假设	(59)
4.5 应用	(59)
4.6 剪应力引起的形变	(60)
4.7 剪应变	(60)
4.8 剪切模量	(60)
4.9 焊接连接	(60)
4.9.1 电子束焊接	(60)
4.9.2 激光束焊接	(61)
4.10 例题	(61)
4.11 习题	(67)
第5章 扭转	(70)
5.1 扭转的定义	(70)
5.2 扭矩	(70)
5.3 极惯性矩	(70)
5.4 扭转剪应力	(70)
5.5 剪应变	(71)
5.6 剪切模量	(71)
5.7 扭转角	(71)
5.8 计算机解法	(71)
5.9 动力传动	(72)
5.10 圆轴的塑性扭转	(72)
5.11 例题	(72)
5.12 习题	(87)
第6章 剪力和弯矩	(90)
6.1 梁的定义	(90)
6.2 悬臂梁	(90)
6.3 简支梁	(90)
6.4 外伸梁	(91)
6.5 静定梁	(91)
6.6 超静定梁	(91)
6.7 载荷的类型	(91)
6.8 梁的内力和内力矩	(92)
6.9 抗力矩	(92)

6.10	抗剪力	(92)
6.11	弯矩	(92)
6.12	剪力	(93)
6.13	符号规则	(93)
6.14	剪力和弯矩方程	(93)
6.15	剪力和弯矩图	(93)
6.16	载荷集度、剪力和弯矩之间的关系	(93)
6.17	奇异函数	(94)
6.18	计算机应用	(94)
6.19	例题	(94)
6.19.1	奇异函数	(100)
6.19.2	计算机应用	(106)
6.20	习题	(109)
第 7 章	平面面积的形心、惯性矩和惯性积	(117)
7.1	单元体面积的一次矩	(117)
7.2	有限面积的一次矩	(117)
7.3	平面的形心	(117)
7.4	单元体面积的二次矩或惯性矩	(118)
7.5	有限面积的二次矩或惯性矩	(118)
7.6	单位	(118)
7.7	有限面积惯性矩的平行轴定理	(118)
7.8	回转半径	(119)
7.9	单元体面积的惯性积	(119)
7.10	有限面积的惯性积	(119)
7.11	有限面积惯性积的平行轴定理	(120)
7.12	主惯性矩	(120)
7.13	主轴	(120)
7.14	静力学资料	(120)
7.15	例题	(121)
7.16	习题	(131)
第 8 章	梁中的应力	(134)
8.1	作用在梁上的载荷类型	(134)
8.2	载荷的效应	(134)
8.3	弯曲的类型	(134)
8.4	梁作用的特点	(134)
8.5	中性层	(134)
8.6	中性轴	(135)
8.7	弯矩	(135)
8.8	梁的弹性弯曲	(135)
8.8.1	梁中的法应力	(135)
8.8.2	中性轴的位置	(135)
8.8.3	截面模量	(135)
8.8.4	假设	(136)
8.8.5	剪力	(136)
8.8.6	梁中的剪应力	(136)

8.9 梁的塑性弯曲	(136)
8.9.1 弹塑性作用	(137)
8.9.2 完全塑性作用	(137)
8.9.3 中性轴的位置	(137)
8.9.4 完全塑性弯矩	(137)
8.10 例题	(137)
8.10.1 梁的弹性弯曲	(137)
8.10.2 梁的塑性弯曲	(154)
8.11 习题	(160)
第9章 梁的弹性挠度:双积分法	(166)
9.1 引言	(166)
9.2 梁挠度的定义	(166)
9.3 梁挠度的重要性	(166)
9.4 计算梁挠度的方法	(166)
9.5 双积分法	(166)
9.6 积分过程	(167)
9.7 符号规则	(167)
9.8 假设与限制	(167)
9.9 例题	(167)
9.10 习题	(191)
第10章 梁的弹性挠度:奇异函数法	(195)
10.1 例题	(195)
10.1.1 静定梁——计算机解法	(206)
10.2 习题	(214)
第11章 超静定弹性梁	(217)
11.1 静定梁	(217)
11.2 超静定梁	(217)
11.3 超静定梁的分类	(217)
11.4 例题	(218)
11.5 习题	(229)
第12章 弹性梁理论的特殊问题	(233)
12.1 剪切中心	(233)
12.2 非对称弯曲	(233)
12.3 曲梁	(233)
12.4 例题	(234)
12.4.1 剪切中心	(234)
12.4.2 非对称弯曲	(239)
12.4.3 曲梁	(245)
12.5 习题	(252)
第13章 梁的塑性形变	(254)
13.1 序言	(254)
13.2 塑性铰	(254)
13.3 完全塑性矩	(254)
13.4 塑性铰的位置	(254)
13.5 坍塌机构	(254)

13.6 极限载荷	(254)
13.7 例题	(255)
13.8 习题	(264)
第 14 章 柱	(267)
14.1 柱的定义	(267)
14.2 柱的失效形式	(267)
14.3 柱的临界载荷的定义	(267)
14.4 柱的长细比	(267)
14.5 细长柱的临界载荷	(267)
14.6 端部条件的影响——有效长度	(268)
14.7 偏心加载柱的设计	(268)
14.8 非弹性柱的屈曲	(268)
14.9 中、小长细比柱的设计公式	(268)
14.10 计算机应用	(269)
14.11 梁柱	(269)
14.12 弹簧支承刚性梁的屈曲	(269)
14.13 例题	(269)
14.14 习题	(291)
第 15 章 应变能法	(294)
15.1 内部应变能	(294)
15.2 符号规则	(294)
15.3 卡斯提良诺定理	(294)
15.4 应变能法应用于静定问题	(295)
15.5 应变能法应用于超静定问题	(295)
15.6 假设与限制	(295)
15.7 例题	(295)
15.8 习题	(309)
第 16 章 组合应力	(314)
16.1 序言	(314)
16.2 两向应力的一般情况	(314)
16.3 符号规则	(314)
16.4 斜截面上的应力	(314)
16.5 主应力	(315)
16.6 主应力和方向 主平面	(315)
16.7 计算机应用	(315)
16.8 主平面上的剪应力	(315)
16.9 最大剪应力	(315)
16.10 最大剪应力的方向	(316)
16.11 最大剪应力平面上的法应力	(316)
16.12 莫尔圆	(316)
16.13 用于莫尔圆的符号法则	(317)
16.14 主应力的莫尔圆解法	(317)
16.15 任意斜截面上应力的莫尔圆解法	(317)
16.16 例题	(318)
16.17 习题	(340)

第 17 章 组合载荷构件;失效理论	(342)
17.1 轴向偏心受载构件	(342)
17.2 承受内压及轴向拉伸组合作用的圆柱壳	(342)
17.3 扭转与轴向拉伸(或压缩)组合作用的圆柱壳	(342)
17.4 承受轴向拉伸与扭转的圆轴	(342)
17.5 弯扭组合作用的圆轴	(343)
17.6 组合加载构件的设计	(343)
17.7 最大法应力理论	(343)
17.8 最大剪应力理论	(343)
17.9 哈贝尔-冯·密塞斯-亨奇理论(最大畸变能理论)	(343)
17.10 例题	(343)
17.11 习题	(351)

第 1 章 拉伸与压缩

1.1 力的内部效应

在本书中,我们将介绍作用在物体上的力的内部效应。为此,物体不再是完全刚性的(如同静力学中假设的),受力物体的形变计算将是材料力学的基本研究课题之一。

1.1.1 轴向受载杆件

首先,我们研究最简单情况:一等截面金属直杆在其两端承受一对共线、反向力的作用。这两个力的作用线与各截面形心组成的纵向轴线重合,为了满足静力学平衡条件,这两个力的数值必须相等。如果这两个力的方向是离开此杆的,杆将承受拉伸;如果这两个力是指向此杆的,杆将承受压缩,如图 1-1 所示。

在这样两个力的作用之下,杆的内部将产生抗力。我们可以用位于杆轴某处、且与杆轴垂直的假想截面来研究杆的内部抗力,这样的截面如图 1-2(a)中的 $a-a$ 所示。为了分析计算,可考虑将此截面右侧的杆段除去,如图 1-2(b)所示。因而,必须补充右侧杆段对左侧杆段的作用。用此处引入的截面法,初始的内力便成为保留杆段的外力。为使左侧杆段平衡,这种效应在数值上等于水平力 P 。然而,沿截面 $a-a$ 法向作用的力 P 实际上是截面上法向分布力合成的结果。

为此,就必须对这些分布力的分布方式作某些假设。通常,通过形心作用的力是假设均匀分布在横截面上的。

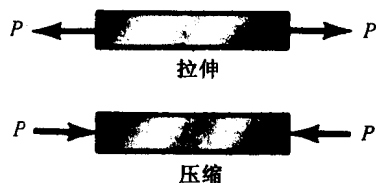


图 1-1

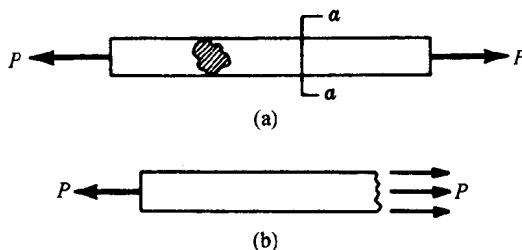


图 1-2

1.1.2 法应力

替代讨论作用在某处小面积上内力,最好转为处理单位面积上法向力。单位面积上法向力的强度称为法应力,它是用单位面积上的作用力单位表示的,亦即 lbf/in^2 * 或 N/m^2 。如果杆端的力使杆拉伸,杆内就产生拉应力,如果杆是受压缩的,杆内产生压应力。施加在杆端的力作用线必须通过每一个截面的形心。

1.1.3 试件

图 1-2(a)所示的轴向载荷经常出现在结构和机械设计中,为了在实验室中模拟这种轴向载荷,试件应夹持在电子或液压万能试验机的夹头中。这两种试验机通常在材料实验室用做

* $1 \text{ lbf}/\text{in}^2 = 6.895 \times 10^3 \text{ Pa}$

施加轴向拉伸载荷。

在材料试验技术规范标准中,美国材料试验协会颁布了详细的使用说明。此处只讲其中两种试件。一种厚度超过 3/16 in*(4.76 mm)的金属板试件如图 1-3 所示,另外一种直径为 1.5 in(38 mm)的金属圆棒状试件如图 1-4 所示,正如图中所看到的,试件的中部区域尺寸略小于两端尺寸。因而,破坏不会发生在两端的夹持段,过渡圆角保证试件两种尺寸的过渡部位不会发生应力集中。供测量伸长的标距长度为 8in(203 mm,图 1-3 试件)和 2in(51 mm,图 1-4 试件)。

试件的伸长既可以使用机械的、光学的引伸计,也可以使用粘贴在试件表面的电阻应变片来测量,这种电阻应变片由若干个沿试件轴向的、很细的电阻丝组成。当试件伸长时,电阻丝的电阻就会发生改变,电阻的改变由惠斯通电桥测量并转换为伸长。

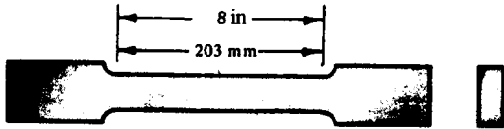


图 1-3

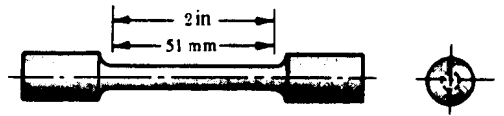


图 1-4

1.1.4 法应变

假设一支试件已经装卡在拉伸-压缩试验机上,并且拉力逐渐地施加在试件的两端。对于每一个事先指定的轴向载荷增量都要测量相应的标距的伸长。由这些数值得到单位长度的伸长,并将之定义为法应变,用 ϵ 来表示,可以用标距长度 L 去除总伸长 Δ 来得到法应变,即 $\epsilon = \Delta/L$ 。法应变通常用“in/in”或“m/m”的单位来表示,因此是无量纲量。

1.1.5 应力-应变曲线

当轴向载荷以某种增量逐渐增长时,对于每一个载荷增量都要测量标距长度的总伸长,直至试件断裂。已知试件的初始截面积,对轴向载荷的任意值,由下式可以得到用 σ 表示的法应力:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

此处, P 是使用“lbf”或“N”表示的轴向载荷, A 是初始截面积。于是,可以得到由法应力 σ 和法应变 ϵ 组成的很多数据对,然后分别以法应力为纵轴、法应变为横轴,用上述实验数据对

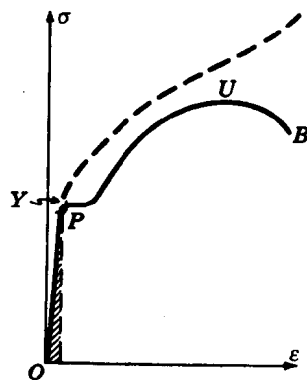


图 1-5

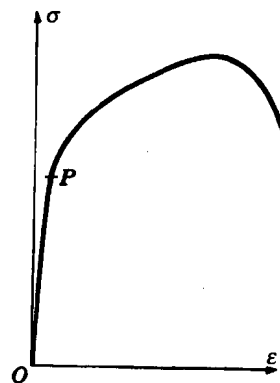


图 1-6

* 1 in = 2.54 cm.

** 1 lbf = 4.44822 N.

作图,这就是材料的应力-应变曲线或拉伸图。对于不同的材料,应力-应变图有很多不同的形式。图 1-5 是碳素结构钢的应力-应变图,图 1-6 是合金钢的应力-应变图,图 1-7 是硬质钢或某些有色金属合金的应力-应变图,有色金属合金或铸铁的应力应变图如图 1-8 所示,而对于橡胶,图 1-9 是典型的应力-应变图。

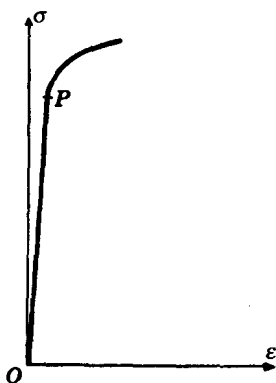


图 1-7

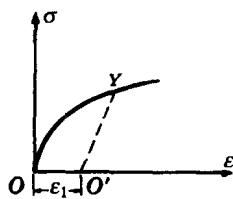


图 1-8

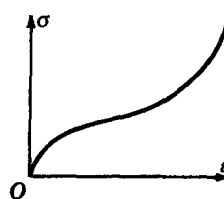


图 1-9

1.1.6 韧性材料和脆性材料

金属工程材料通常区分为韧性材料和脆性材料,在试件断裂之前,韧性材料具有较大的拉伸应变(如结构钢和铝),脆性材料具有较小的拉伸应变。法应变 0.05in/in(或 mm/mm)经常被取做这两类材料的分界线,铸铁和混凝土是典型的脆性材料。

1.1.7 胡克定律

对应力-应变曲线如图 1-5、图 1-6 或图 1-7 所示的任何一种材料,当应变相当小时,其应力、应变关系是线性的。轴向力和由它引起的伸长之间的线性关系(因为这些量各自和应力、应变只相差一个常数因子)是罗伯特·胡克(R. Hooke)首先于 1678 年发现的,称为胡克定律。为了描述材料行为的初始线性区,我们可以将之写作

$$\sigma = E\varepsilon$$

其中 E 表示图 1-5、图 1-6、图 1-7 所示每一曲线的直线段 OP 的斜率。

1.1.8 弹性模量

E (亦即单位应力和单位应变之比)是材料拉伸时的弹性模量,经常又叫做杨氏模量*。各种工程材料的 E 的数值被制成表格、编入手册中,常用材料的表格在本章结尾处。因为应变的单位是纯数(两个长度之比),因而 E 的单位与应力的相同(lbf/in² 或 N/m² 等)。很多常用工程材料压缩时的弹性模量和拉伸时弹性模量几乎相同。特别指出:本书中讨论的材料在载荷下的行为限于应力-应变曲线的线性阶段(除非另外指出)。

1.2 材料的力学性质

图 1-5 所示的应力-应变曲线可以用来表示材料的几个强度指标,它们是:

* 托马斯·杨(T. Young),英国杰出的物理学家,诞生于 1773 年。他的研究工作涉及力学、光学和热学等多个领域。在他之前,历史学家还不能解释史前数千年古埃及人使用的石版图案或彩色符号(象形文字)。他同时还是一位通晓 11 种文字的语言大师,他依据对 1799 年发现的著名 Rossua 石头的研究,首次解释了这些符号。他及其后的治普里昂(Champollion, 法国)的工作,使破译远古语言成为可能。

1.2.1 比例极限

P 点的纵坐标,亦即单向拉伸实验时应力是应变线性函数的最大应力,叫做比例极限。与应力-应变曲线图 1-8 所对应的材料没有比例极限。

1.2.2 弹性极限

几乎与 P 点重合的点的纵坐标,亦即单向拉伸试验时载荷全部取消后没有永久或残余形变的最大应力,叫做弹性极限。很多材料的比例极限和弹性极限的数值几乎相等,并且有时这两个名词当作同义词使用。对于两种极限数值有明显差别的那些情况,弹性极限总是大于比例极限。

1.2.3 弹性区和塑性区

应力-应变曲线由原点至比例极限的范围叫做弹性区,由比例极限至断裂点的范围叫做塑性区。

1.2.4 屈服点

图 1-5 中 Y 点的纵坐标叫做材料的屈服点,记作 σ_{yp} 。由该处开始,应变增长而应力不再增长,载荷增长到 Y 点后材料发生屈服。某些材料的应力-应变曲线上存在两个应变增长而应力不增长的点,这些点分别叫做上屈服点和下屈服点。

1.2.5 极限强度或拉伸强度

图 1-5 中 U 点的纵坐标,亦即曲线的最大纵坐标,既可以称为材料的极限强度,也可称为材料的拉伸强度。

1.2.6 断裂强度

图 1-5 中 B 点的纵坐标叫做材料的断裂强度。

1.2.7 回弹模量

单向拉伸力逐渐地由零增长到比例极限对应的数值,材料单位体积内所做的功被定义为回弹模量。此功可以用应力-应变曲线下由原点到比例极限的面积、亦即图 1-5 中阴影区的面积来计算,这个量的单位是 $\text{lb}\cdot\text{in}/\text{in}^3$ 或在 SI 系统中是 $\text{N}\cdot\text{m}/\text{m}^3$,因而,材料的回弹模量是材料在弹性区吸收能量的能力。

1.2.8 韧性模量

单向拉伸力逐渐地由零增长到引起断裂的数值,材料单位体积内所做的功被定义为韧性模量。这个量可以用应力-应变曲线下由原点到断裂的面积来计算。材料的韧性模量是材料在塑性区吸收能量的能力。

1.2.9 断面收缩率

由原始面积到断裂横截面积的减少量除以原始面积、再乘以 100% 得到的量叫做断面收缩率。此处要指出,当拉伸力作用在杆上时,杆的横截面在减少。但是,法应力的计算仍使用原始面积,这就是图 1-5 所示的情况。因为应变越来越大,考虑横截面的瞬时值(它在减少)就更为重要,由此才能得到真应力-应变曲线,这样的曲线如图 1-5 中虚线所示。

1.2.10 延伸率

试件断裂后标距长度的增加量除以初始长度、再乘 100% 得到的量叫做延伸率。断面收

缩率和延伸率都是材料韧性的度量。

1.2.11 工作应力

上面提到的强度指标可以用来选择工作应力(许可应力-译者注)。工作应力经常被选作屈服应力或极限应力除以某个安全因数,安全因数的选择要依赖于设计者的识别力和经验。安全因数的规范刊登在设计标准规范中。

1.2.12 应变强化

如果韧性材料能够加载到超过屈服点而不失效,就说材料已被应变强化。很多结构钢都发生这种情况。

如图 1-8 所示,脆性材料的非线性应力-应变曲线表征了另外两个强度指标,如果应力-应变曲线有线性阶段,则不能引入这些指标。它们是

1.2.13 屈服强度

当载荷加到某一数值后卸载,如果材料残留事先指定的永久形变,应力-应变曲线上与之对应的纵坐标叫做材料的屈服强度(国内称为名义屈服极限-译者注)。这个事先指定的永久形变通常选为 0.002 或 0.0035in/in 或 mm/mm。在图 1-8 中,事先指定的应变 ϵ_1 表示在应变轴上,并且直线 $O'Y$ 和应力-应变曲线的初始切线平行, Y 的纵坐标表示材料的屈服强度,有时也叫实用弹性极限应力。

1.2.14 切线模量

应力相对于应变的变化率叫作材料的切线模量。这是由 $\epsilon_t = d\sigma/d\epsilon$ 给出的瞬时模量。

1.2.15 线膨胀系数

线膨胀系数定义为,温度变化一度时,直杆单位长度的变化,它通常用 α 表示。线膨胀系数的值与长度的单位无关,但是与温度的标准有关。例如由本章结尾处的表 1-1 可以知道,钢的线膨胀系数为 $6.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{F}$ 或 $12 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。温度变化,如同加载一样,也会在结构内部产生应力。

1.2.16 泊松比

当杆承受单向拉伸时,杆将沿载荷的作用方向产生伸长,但是,垂直于载荷的横向尺寸要产生缩短。横向应变与轴向应变之比叫做泊松比。在本书中通常用希腊字母 μ 表示。对于大多数材料, μ 位于 0.25~0.35 的范围。

1.2.17 胡克定律的一般形式

对于轴向拉伸问题,亦即载荷完全沿杆件轴向作用的情况,已经给出了胡克定律的最简单形式。此时只考虑沿载荷方向的形变,且可由下式给出:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E}$$

更一般情形,材料单元体承受三个相互垂直方向的法应力 σ_x 、 σ_y 、 σ_z 作用,它们分别伴生应变 ϵ_x 、 ϵ_y 、 ϵ_z 。因为泊松效应将由横向应力产生的应变和正向应变叠加在一起,我们得到胡克定律的一般形式:

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)], & \epsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)], \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{aligned}$$

见题 1.20 和题 1.23。

1.2.18 比强度

这个量被定义为极限(或拉伸)强度与比重(单位体积内的重量)的比值。因而在 USCS 系统中,有

$$\frac{\text{lb}_f/\text{in}^2}{\text{lb}_f/\text{in}^3} = \text{in}$$

并且,在 SI 系统中,有

$$\frac{\text{N}/\text{m}^2}{\text{N}/\text{m}^3} = \text{m}$$

亦即,无论在何种系统中,比强度都有长度的单位。对于比较材料的效率性能,这个量是有用的。见题 1.25。

1.2.19 比模量

这个量被定义为杨氏模量与比重(单位体积内的重量)的比值。将有关的单位代入,可以发现,在 USCS 和 SI 系统中,比模量均具有长度的物理单位。见题 1.25。

1.3 动力效应

为了用拉伸或压缩试验测定材料的力学性能,加载速率有时会对测试结果有显著的影响。一般说来,韧性金属对加载速率的变化最敏感,而加载速率对脆性材料(如铸铁)的影响则可忽略。例如,特别快速施加轴向力时,低碳钢的屈服点可提高 170% 之多。然而有意思的是,在这种情况下总形变与低速加载相比保持不变。

1.4 材料的分类

迄今,以上所有的讨论都是基于如下两个普遍采用的、关于材料特征的假设:

1. 均匀假设,亦即物体内所有点都具有相同的弹性性质(E, μ);
2. 各向同性假设,亦即物体内任一点的所有方向上都具有相同的弹性性质。

并非所有的材料都是各向同性的,如果材料不具有任何弹性对称性,称之为各向异性的,有时也称为偏等性的(aeolotropic)。这类材料与各向同性材料不同,具有 21 个独立的弹性常数,而不是 2 个独立的弹性常数。如果材料具有三个相互垂直的弹性对称平面,则称其为正交各向异性材料。这种情况下,独立的弹性常数有 9 个。如图 1-10 所示,纤维增强复合材料是

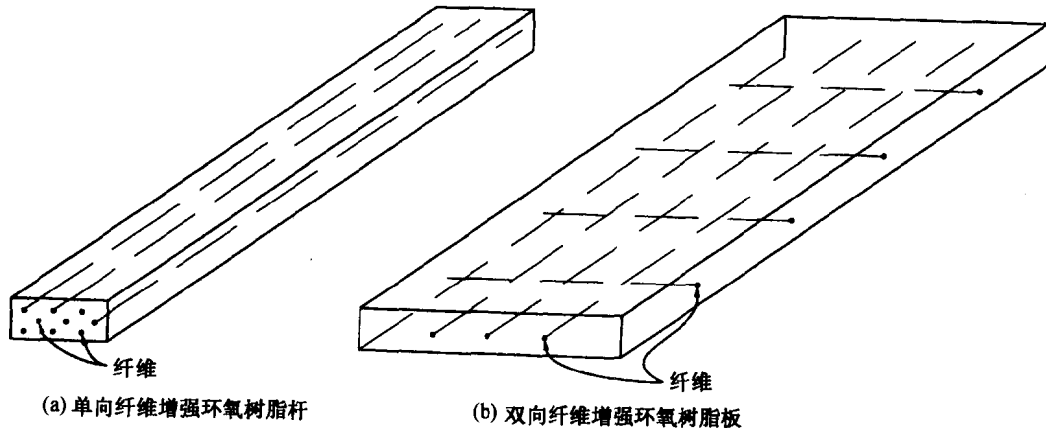


图 1-10

典型的各向异性材料。

1.5 弹塑性分析

在某些结构中,经常允许材料的应力和形变处于塑性范围,例如某些建筑规范允许个别构件发生塑性形变,此外飞行器和火箭结构的某些构件故意设计为在塑性区工作,以减少重量。此外,很多金属加工过程,本身就包括材料的塑性形变。对于如图 1-11 所示的、低碳或中碳钢塑性小应变问题,应力-应变曲线通常理想化为两条直线,其中一条的斜率为 E ,表示弹性区;另一条的斜率为零,表示塑性区。图 1-11 表示的材料称为理想弹塑性材料。这个图没有考虑发生在应变强化区内的、更大的塑性应变,亦即图 1-5 所示应力-应变曲线的右侧部分。见题 1.26。

如果产生了与图 1-11 中点 B 对应的应变,然后卸载,卸载过程沿直线 BC 进行。于是,完全卸载后,产生与应变 OC 对应的残留的永久形变。

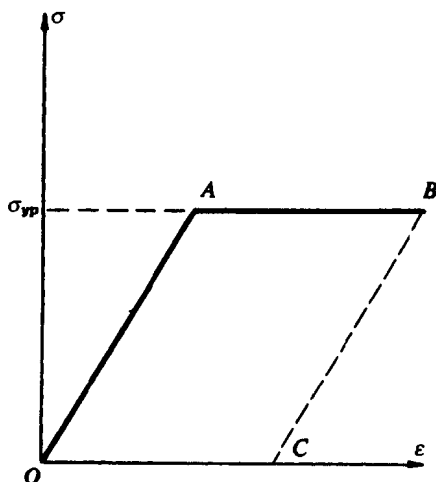


图 1-11

1.6 例 题

题 1.1 长度为 L , 截面积为 A 的直杆, 如图 1-12 所示。若弹性模量为 E , 在其两端承受力 P 作用, 试求其伸长。

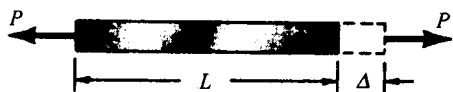


图 1-12

解 力 P 方向的应力等于载荷除以截面积 A , 亦即 $\sigma = P/A$ 。应变 ϵ 等于总伸长除以初始长度, 亦即 $\epsilon = \Delta/L$ 。根据弹性模量的定义, E 是 σ 和 ϵ 的比, 亦即

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{P/A}{\Delta/L} = \frac{PL}{A\Delta} \quad \text{或} \quad \Delta = \frac{PL}{AE}$$

指出, Δ 具有长度的单位, 或是 in, 或是 m。

题 1.2 截面积为 $A = 500 \text{ mm}^2$ 的钢杆受到几个力的作用, 如图 1-13(a) 所示。试求该杆的总伸长。钢的弹性模量 $E = 200 \text{ GPa}$ 。

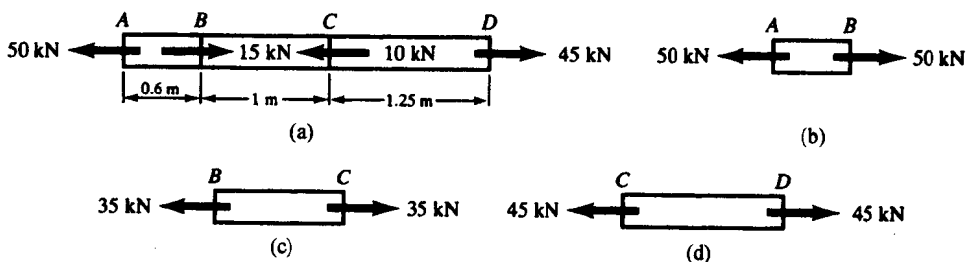


图 1-13

解 因为该杆是平衡的, 因此杆的各区段都是平衡的, 作用在 AB 区段内各截面的合力为 50 kN , 长度为 0.6 m 的分离体图如图 1-13(b) 所示。为保持与 A 端载荷平衡, 此区段右端的力必然等于 50 kN 。由例题 1.1 可知 AB 段的伸长为

$$\Delta_1 = \frac{(50000\text{N})(0.6\text{m})}{(500 \times 10^{-6}\text{m}^2)(200 \times 10^9\text{N/m}^2)} = 0.0003 \text{ m}$$

作用在 BC 区段的力, 可以由作用在段内任意截面左侧的力的代数和确定, 作用在左侧的合力是 35 kN, 于是拉力也是 35 kN, BC 区段的分离体图如 1-13(c) 所示。它的伸长为

$$\Delta_2 = \frac{(35000\text{N})(1\text{m})}{(500 \times 10^{-6}\text{m}^2)(200 \times 10^9\text{N/m}^2)} = 0.00035 \text{ m}$$

类似地, 作用在 CD 区段任意截面内的力必须是 45 kN, 以保持和 D 端载荷的平衡。该区段的伸长为

$$\Delta_3 = \frac{(45000\text{N})(1.25\text{m})}{(500 \times 10^{-6}\text{m}^2)(200 \times 10^9\text{N/m}^2)} = 0.00056 \text{ m}$$

总的伸长为

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 = 0.00121 \text{ m} \quad \text{或} \quad 1.21 \text{ mm}$$

题 1.3 承受载荷 P 和 $2P$ 的桁架如图 1-14(a) 所示。各杆具有相同的横截面积 A_1 , 求杆 AB 和杆 AF 的应力。

解 约束反力用 C_x, C_y 和 A_x 表示, 由静力学, 可有

$$\sum M_c = -(2PL) - P(2L) + A_x(3L) = 0, \quad A_x = 4P/3$$

结点 A 的分离体图如图 1-14(b) 所示。由静力学, 有

$$\sum F_x = \frac{4P}{3} + \frac{1}{\sqrt{5}}(AF) = 0, \quad AF = -\frac{4P\sqrt{5}}{3}$$

$$\sum F_y = (AB) + \frac{2}{\sqrt{5}}(AF) = 0, \quad AB = -\frac{8}{3}P$$

杆的应力是

$$\sigma_{AF} = -\frac{4\sqrt{5}P}{3A_1}, \quad \sigma_{AB} = -\frac{8P}{3A_1}$$

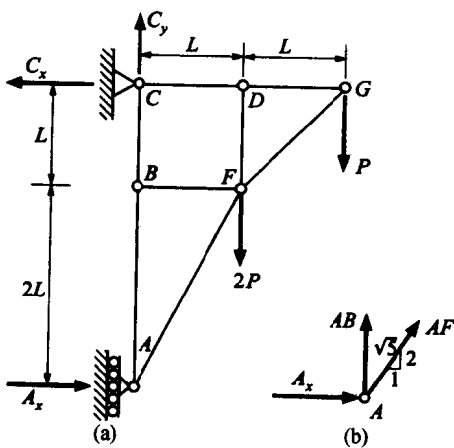


图 1-14

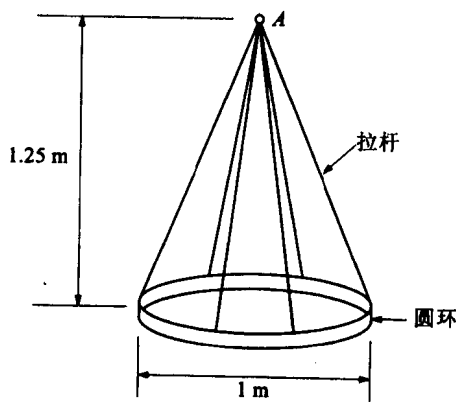


图 1-15

题 1.4 如图 1-15 所示, 发电机的部件由圆环和沿环均匀分布的六根拉杆组成。拉杆的悬挂点 A 在圆环中心的正上方 1.25 m 处。已知圆环的平均半径为 0.5 m, 圆环每米长度的重量为 2000 N。各拉杆的截面积均为 25 mm^2 。试确定圆环由于自身重量引起的铅直位移。

解 圆环的分离体图如图 1-16 所示, 其中 T 表示各杆中的拉力。铅直方向的合力为

$$6T(1.25/1.34) - (2000\text{N/m})2\pi(0.5\text{m}) = 0$$

$$T = 1120 \text{ N}$$

解出

我们考察一个典型杆(如 AB 杆)的形变, 图 1-17 说明杆 AB 的伸长 BB' 可由下式给出:

$$\Delta = BB' = \frac{TL}{AE}$$