

材 料 力 学

(法定计量单位制版)

[美] S. 铁摩辛柯 著
J. 盖 尔

韩耀新 译

王寿梅 校

科 学 出 版 社

1 9 9 0

内 容 简 介

本书是材料力学大师 S. 铁摩辛柯的一本名著,自 1976 年本社出版中译本以来,得到了广大读者的欢迎。此次重译出版,采用了我国法定计量单位,在译文的质量上也有较大提高。

本书内容丰富,论述系统,深入浅出,且有大量的例题和习题,是有关理工科专业师生的一部极好的参考书。

本书内容包括受轴向力、扭转与弯曲作用时结构元件的分析,以及材料力学中所有的基本概念,诸如应变能、应力转换与应变转换、非弹性状态等等。也包括使工程技术人员感兴趣的专门论题,如热效应、非棱柱形梁、梁的大挠度、梁的非对称弯曲、剪力及许多其他论题。在最后一章介绍了结构分析与能量法,包括单位载荷法、互等定理、柔度法与刚度法、瑞利-里兹法及余能原理,可作力读者学习现代结构理论之基础。

本书可供高等理工科院校有关专业师生和广大工程技术人员参考。

S. Timoshenko and J. Gere

Mechanics of Materials

Van Nostrand Reinhold Company, 1972

材 料 力 学

(法定计量单位制版)

[美] S. 铁摩辛柯 著
J. 盖 尔

韩耀新 译

王寿梅 校

责任编辑 张鸿林 韩安平

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1990 年 12 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1990 年 12 月第一次印刷 印张: 17 5/8

印数: 0001—2 200 字数: 460 000

ISBN 7-03-001530-4/O·309

定价: 18.40 元

译者的话

本书根据 Stephen P. Timoshenko 和 James M. Gere 所著“Mechanics of Materials” (Van Nostrand Reinhold Company, 1972) 一书译出。但根据我国国家标准的规定, 将原书中的英制单位改为法定计量单位。

在进行单位换算时, 同时对数据进行了圆整化处理, 力求与原数据接近。但其中涉及标准型钢的数据则有所更动。由于本书附录 C 摘引了美国结构学会认可的改编后的型钢表的一部分, 与原书所摘引的部分有些差别, 所以个别题目型钢尺寸的数据有些出入。

正文例题中换算过的数据, 与 1973 年再版的、由 A. R. 卡森斯(Cusens)和 R. A. 埃斯塔尼罗(Estanero)换算过单位的版本对比, 本书更接近于原著的数据。

习题部分基本沿用《材料力学习题解答》(丘益元, 周次青解題, 韩耀新等审校, 科学出版社, 1983) 中的数据, 但也对其中个别不妥之处做了订正。

原著自 1930 年问世以来, 在力学界和工程界久享盛誉, 是公认的经典著作之一。就译者所知, 已再版过不下五次, 重印过不下十五次, 远远超过许多其他同类教本, 堪称久经考验的杰作。我们希望这个译本能继续对广大读者有所裨益。

本书在翻译过程中, 得到许多同志和朋友的大力支持。程本蕃教授对序言和第一章的初稿提出了宝贵的意见; 杨元杰、韩扬分别对全部习题和前四章的译文进行了细致的校对; 杨元杰、周宝山、周潮等为整理手稿付出了大量劳动。译者谨在此向他们表示衷心的感谢。

译者

1988 年 2 月

前 言

我们理应能够写出这样一本材料力学课本来，它既适合于初学本课程的大学生用作教材，又可作为工程技术人员可靠的参考材料。本书作者的目标就是同时满足这两方面的要求。我们试图用一种易教易学的方式，通过充分的讨论与范例来阐述理论和方法，从而使大学生们能容易地掌握本课程的基础知识。然而，本书的内容又常超越初等阶段，以致能把更深入的和更专门的论题包括在内。这样，大学毕业后的工程技术人员，不论他是从事设计或研究，还是他主动要扩大学识，均会发现本书中有不少使他感兴趣的补充材料。

浏览一遍本书的目录，就会了解本书所包含的论题。这些论题，包括受轴向力、扭转与弯曲作用时结构元件的分析，以及材料力学中所有的基本概念，诸如应变能、应力转换与应变转换、非弹性状态等等。使工程技术人员感兴趣的专门论题则包括热效应、非棱柱形梁、梁的大挠度、梁的非对称弯曲、剪心及许多其他论题。最后一章介绍结构分析与能量法，包括单位载荷法、互等定理、柔度法与刚度法、瑞利-里兹法及余能原理。它可以作为读者学习现代结构理论的基础。

本书中显然含有比本科生典型教程更多的资料，因此，每位教师就有可能从中选择他认为是最基本的和最重要的材料。教师们也会重视本书中的几百道新的练习题（总计超过 600 个），这些题目可用作课下作业或课堂讨论题。

读者很快就会发现，本书末尾收集了广泛的参考文献。这些文献给出了本学科的历史发展和初始渊源。另外，由于人们对发展本学科的开拓者们有很大兴趣，所以我们也参考文献栏目中的许多地方列入了人物传记提要。

本书对材料力学的崭新描述，包括了当代人们所感兴趣的课

题,从这种意义上讲,它是一本“新的”书,但从另一种意义上讲,它又是一本“老的”书,因为它是从铁摩辛柯教授所著的《材料强度学》两卷集演变而来的。《材料强度学》在1955和1956年作了最后修订,出版了第三版。第二版在1940和1941年出版,而第一版在1930年出版。而且,第一版实际上是根据俄国出版的几种早期的版本(可逆溯至1908年)写成的,这些早期俄文版本的清单可在铁摩辛柯的参考文献目录中查到,该目录见之于他的自传《就我所忆》(D. Van Nostrand Co., Inc., 1968)。作者希望,本书连同即将出版的《高等材料力学》一书,会使这一系列教本赶上时代。

(致谢词从略)

S. P. 铁摩辛柯

J. M. 盖 尔

于加利弗尼亚州斯坦福大学 1971年7月

目 录

第一章 拉伸、压缩和剪切	1
1.1 引言	1
1.2 应力和应变	2
1.3 拉伸试验	3
1.4 线性弹性和虎克定律	7
1.5 轴向承载杆的变位	10
1.6 静不定结构	13
1.7 热效应和预应变效应	21
1.8 非线性性态	24
1.9 剪应力和剪应变	28
1.10 应变能	30
习题	37
第二章 应力和应变分析	47
2.1 斜面上的应力	47
2.2 双轴应力	51
2.3 纯剪	55
2.4 双轴应力的莫尔圆	57
2.5 平面应力	60
2.6 平面应力的莫尔圆	64
2.7 三轴应力	67
2.8 平面应变	70
习题	75
第三章 扭转	80
3.1 圆杆的扭转	80
3.2 空心圆杆的扭转	85
3.3 扭转应变能	87
3.4 薄壁管	89
3.5 圆杆的非弹性扭转	93
习题	97

第四章 剪力和弯矩	101
4.1 梁的类型	101
4.2 梁中的应力合力	103
4.3 载荷、剪力和弯矩之间的关系	106
4.4 剪力图和弯矩图	108
习题	114
第五章 梁中的应力	120
5.1 梁中的正应力	120
5.2 梁的设计	126
5.3 梁中的剪应力	130
5.4 圆形横截面梁中的剪应力	137
5.5 组合梁	139
5.6 梁中的主应力	141
5.7 非棱柱形梁中的应力(近似理论)	145
5.8 复合梁	152
5.9 弯曲与扭转的组合	158
5.10 弯曲与轴向载荷的组合	161
习题	165
第六章 梁的挠度	177
6.1 挠曲线的微分方程	177
6.2 简支梁	180
6.3 悬臂梁	185
6.4 力矩-面积法	186
6.5 叠加法	191
6.6 非棱柱形梁	195
6.7 有限差分法	198
6.8 弯曲应变能	202
6.9 与挠度成比例的载荷	205
6.10 热效应	209
6.11 剪切变形的效应	210
6.12 梁的大挠度	217
习题	221
第七章 静不定梁	229
7.1 静不定梁	229

7.2	挠曲线的微分方程	231
7.3	叠加法	234
7.4	力矩-面积法	241
7.5	有限差分法	243
7.6	连续梁	245
7.7	热效应	252
7.8	梁端的水平位移	253
	习题	255
第八章	非对称弯曲	263
8.1	承受斜向载荷的对称梁	263
8.2	非对称梁的纯弯曲	265
8.3	非对称梁由于横向载荷产生的弯曲	270
8.4	薄壁开口截面梁的剪应力	273
8.5	薄壁开口截面的剪心	279
8.6	梁关于非主轴弯曲时的剪应力	284
	习题	291
第九章	非弹性弯曲	296
9.1	引言	296
9.2	非弹性弯曲方程	296
9.3	塑性弯曲	298
9.4	塑性铰	304
9.5	梁的塑性分析	306
9.6	挠度	314
9.7	非弹性弯曲	317
9.8	残余应力	323
	习题	325
第十章	柱	331
10.1	承受偏心轴向载荷的柱	331
10.2	柱的临界载荷	335
10.3	柱中的应力	341
10.4	柱的正割公式	344
10.5	柱的缺陷	346
10.6	柱的设计公式	349
	习题	352

第十一章 结构分析和能量法	357
11.1 引言	357
11.2 虚功原理	358
11.3 用以计算位移的单位载荷法	363
11.4 梁的剪切挠度	377
11.5 互等定理	382
11.6 柔度法	389
11.7 刚度法	401
11.8 应变能和余能	415
11.9 应变能法	423
11.10 势能法	432
11.11 瑞利-里兹法	435
11.12 余能原理	446
11.13 力法	453
11.14 卡斯提利阿诺第二定理	456
11.15 应变能与柔度法	458
11.16 结构分析的其他方法	460
习题	461
参考文献和历史注释	475
附录 A 平面面积的性质	492
A.1 面积的形心	492
A.2 组合面积的形心	494
A.3 面积的惯性矩	495
A.4 极惯性矩	497
A.5 平行轴定理	498
A.6 惯性积	500
A.7 轴的旋转	501
A.8 主轴	503
习题	505
附录 B 平面面积的性质	509
附录 C 型钢表	512
附录 D 梁的挠度和斜率	522
习题答案	527

第一章 拉伸、压缩和剪切

1.1 引言

材料力学是应用力学的一个分支，它论述固体在承受各类载荷时的性态。这个研究领域具有人们熟悉的各种名称，其中包括“材料强度”和“可变形体力学”。本书中所研究的固体包括轴向受载的杆、轴、梁和柱，以及由这些元件装配而成的结构。通常我们分析的目的是确定由载荷而产生的应力、应变和变形。如果对于直到破坏载荷前的所有载荷值下的这些量都能求得，那么我们就得到该物体力学性态的全貌。

理论分析和实验结果在材料力学的研究中具有同等重要的作用。在许多情况下，我们将采用逻辑推导以便得到预示力学性态的公式和方程，但同时我们也必须认识到，除非已知材料的某些性质，否则这些公式就不能实际应用。这些性质只有在实验室里作了适当的实验之后才能用于实际。另外，工程中的许多重要问题不能凭借理论手段予以有效地处理，而实验测量就成为一种实际需要。材料力学的历史发展正是理论与实验两者饶有趣味的融合，即对某些情形，用实验指出获知有用结果的方法，而对另一些情形，则理论发挥这样的作用。著名人物如 L. 达·芬奇 (da Vinci, 1452—1519) 和 G. 伽利略 (Galilei, 1564—1642) 都曾用实验确定了金属丝、杆和梁的强度，尽管他们没有提出任何充分的理论(按当代的标准)来解释其试验结果。反之，著名数学家 L. 欧拉 (Euler, 1707—1783) 远在有实验证明他的结果的重要意义之前，于 1744 年提出了柱的数学理论并计算了柱的临界载荷。然而，欧拉的理论成果有许多年没有被应用，尽管它们在今天已成为柱的理论基础。*

* 从达·芬奇和伽利略时代开始的材料力学史，见参考文献 1-1, 1-2 和 1-3。

随着我们学习本学科的进程，理论推导与实验所确定的材料性质相结合的重要性将日趋明显。在本章中，我们将从讨论某些基本概念着手，例如应力和应变，然后我们将研究承受拉伸、压缩和剪切的简单结构元件的性态。

1.2 应力和应变

应力和应变的概念可通过研究一根棱柱形杆的拉伸(见图 1-1a)这一基本方法予以说明。棱柱形杆就是沿其整个长度具有不变的横截面和直轴线的杆件。在此阐述中，假设杆的两端受到使杆产生均匀伸长或拉伸的轴向力 P 。作一个与杆轴线相垂直的人为切面(截面 mm)，我们就可以分离出杆的一部分作为自由体(图 1-1b)。在其右端作用着拉力 P ，而在另一端存在着代表杆件被移去部分对保留部分作用的诸力。这些力沿横截面连续分布，就象液体静压力在淹没面上连续分布一样。该力的集度，亦即单位面积上的力，称为应力，并且通常用希腊字母 σ 来表示。假设应力在整个横截面上均匀分布(见图 1-1b)，我们就不难看出，其合力等于集度 σ 乘以杆的横截面面积 A 。此外，根据图 1-1b 所示物体的平衡，我们还能看出，这一合力必定与力 P 大小相等而方向相反。因此，我们得到

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1-1)$$

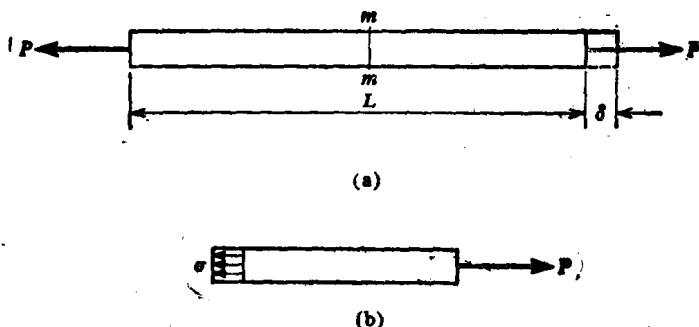


图 1-1. 棱柱形杆受拉。

此为棱柱形杆中均匀应力的方程。这一方程表明应力具有力除以面积的单位——例如牛顿/平方毫米(N/mm^2)^{*}或磅力/平方英寸(psi)。如图所示,当杆被力 P 拉伸时,所产生的应力为拉应力;如果将力反向而使杆件受到压缩,则称它们为压应力。

方程(1-1)成立的一个必要条件是应力 σ 在杆的横截面上必须是均匀的。如果轴向力 P 通过横截面的形心而作用,那么这一条件就得以实现,这点可借静力学来证明(见习题 1.2-1)。当载荷 P 不作用于形心时,杆将产生弯曲,需要作更复杂的分析(见第 5.10 节)。但是,除非特别指明,在本书中始终假设所有轴向力均作用于横截面的形心处。同样,除非另有说明,一般均假设物体自身的重量略而不计,如在讨论图 1-1 中的杆件时所作的那样。

承受轴向力的杆件的总伸长量将用希腊字母 δ 来表示(见图 1-1a),而单位长度的伸长量,亦即应变,用下式来确定:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (1-2)$$

这里 L 为杆的总长度。注意应变 ϵ 为一无量纲的量。只要应变沿整个杆长是均匀的,就可以按公式(1-2)精确求得。如果杆件受拉,此应变为拉应变,它代表材料伸长或拉伸;如果杆件受压,其应变为压应变,这意味着杆件相邻的横截面彼此移近。

1.3 拉伸试验

特定材料的应力与应变的关系是用拉伸试验来确定的。材料的试件通常采用圆形杆件,它被置于拉伸机上以承受拉力。杆上所受的力和杆的伸长量都随着载荷的递增而予以量测。杆中的应力是用杆的截面面积除其所受的力求得,而应变则由发生伸长的长度除其伸长量求得。以此方式即得材料完整的应力-应变图。

结构钢应力-应变图的典型形状示于图 1-2a 中,图中轴向应变标在水平轴上,而相应的应力由曲线 $OABCDE$ 的纵坐标给出。从 O 到 A ,应力与应变之间成正比,其图形为线性的。过 A 点后

^{*} $1\text{N}/\text{mm}^2 = 1\text{MN}/\text{m}^2 = 1\text{MPa}$ (兆帕), ——译者注

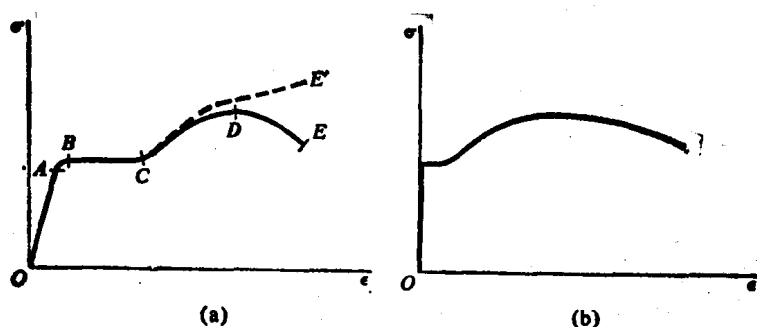


图 1-2. 结构钢的典型应力-应变曲线:
(a) 示意图(未按比例); (b) 按比例。

应力与应变之间不再存在线性关系,因而 A 点处的应力称为比例极限。对于低碳(结构)钢,此极限通常在 200 N/mm^2 至 250 N/mm^2 之间,但对于高强度钢,它可能比此值大得多。随着载荷的增加,应变比应力增加得迅速,直到 B 点,开始出现相当大的伸长,而拉力并无明显增加。这种现象称为材料的屈服,B 点的应力称为屈服点或屈服应力。在 BC 区段我们说材料已成为塑性,而杆件实际上可以塑性地伸长,其伸长量为在比例极限时所产生的伸长量的 10 或 15 倍。材料在 C 点处开始应变硬化,并对载荷的增加提供出附加的抗力。这样,应力将随着杆件的进一步伸长而增大,并在 D 点达到最大值,或者说达到极限应力。超过此点后,载荷随着杆件进一步伸长而减小,试件的断裂最终在图上的 E 点处发生。

杆件伸长的同时,发生横向收缩,其结果使杆件的横截面面积减小。这一现象大约直到 C 点为止对应力-应变图并无影响,但是超过该点,面积的减小对应力的计算值将有显著的影响,杆件发生了明显的颈缩(见图 1-3),如果用颈缩处狭窄部分的实际横截面面积计算 σ ,就会得出真应力-应变曲线,它遵循虚线 OE'。然而,在到达极限应力之后(DE 线),杆件所能承受的总载荷确实减小了,这一减小是由于面积的收缩而不是由于材料自身强度的削



图 1-3. 杆件受拉时的颈缩。

弱。直到破坏为止，材料在实际上都经得住应力的增加。然而，在大多数实用场合，根据试件原横截面面积所得的常规应力-应变曲线 $OABCDE$ 对设计应用来说提供了满意的数据。

图 1-2a 中的图线用来表明钢的应力-应变曲线的一般特征，但其比例不是真实的，因为正如已经指出的那样，从 B 到 C 发生的应变可能大到从 O 至 A 所发生应变的 15 倍。另外，从 C 到 E 的应变甚至比从 B 到 C 的应变更大。用适当的比例所绘制的图形示于图 1-2b 中。在该图中从 O 到 A 的应变与从 A 到 E 的应变相比小得无从看出，而图中的线性部分呈现为一条竖直线。

在明显的屈服点之后，随之有很大的塑性应变，这种现象在某种程度上是钢所独有的，而钢是现代使用的最普通的结构金属。铝合金在从线性到非线性区之间展现出一种更为渐进的过渡，如图 1-4 中的应力-应变图所示。钢和许多铝合金在破坏之前都将经历很大的应变，所以被划归为延性材料。与之相反，脆性材料在较低的应变值时就破坏（见图 1-5）。这种例子包括陶土、铸铁、混凝土、某些金属合金和玻璃。

对各种受压材料，亦可获得类似于拉伸时的图线，而且诸如比

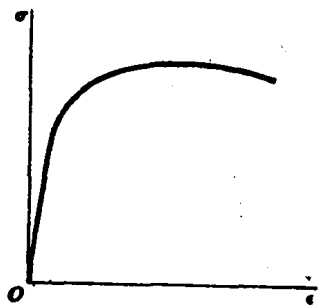


图 1-4. 结构铝合金的典型应力-应变曲线。

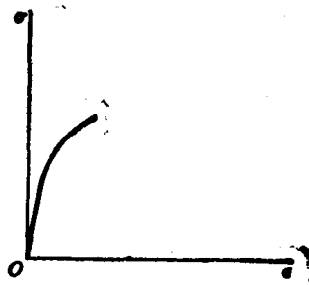


图 1-5. 脆性材料的典型应力-应变曲线。

例极限、屈服点和极限应力等特征应力也可予以确定。对钢来说，已发现其比例极限和屈服应力在受拉和受压时大致相等。当然，对于许多脆性材料，受压时的特征应力要比受拉时大得多*。

弹性 示于图 1-2, 1-4 和 1-5 中的应力-应变图说明了各种材料受拉时的性态。当材料的试件卸载时，亦即载荷逐渐减小到零时，加载期间所产生的伸长会部分地或全部地消失。卸载过程中趋向于恢复其原来形状的这种材料性质称为弹性。如果杆件完全恢复其原状，称它是完全弹性的；如果仅部分回复其原状，它就是部分弹性的。在后一种情况中，当载荷移去后残留在杆中的伸长称为永久变形。

当进行材料的拉伸试验时，载荷可以加到某个(小的)选定值而后把它移去。如果没有永久变形，亦即杆中的应变回到零，则材料直到该选定载荷值所代表的应力之前都是弹性的。这种加载和卸载的过程可对逐次增高的载荷值反复地进行。最后，应力总会达到某个数值，使卸载过程中并非全部应变都得以恢复。用这一方法可以确定弹性范围内的上限应力，这一应力称为弹性极限。对于钢以及许多其它金属，其弹性极限和比例极限几乎重合。然而，对于橡胶之类的材料，弹性性质可以延续到远远超过其比例极限。

容许应力 在设计结构时，需要保证结构在工作条件下，充分发挥它在建造时预期的作用。从结构承载能力这一观点出发，结构中的最大应力通常应保持在低于其比例极限，因为只有这样，当施加载荷而后移去时才不会有永久变形。估计到结构有偶然的超载以及制造中有可能不准确和结构分析中可能的未知变量，通常用选择低于比例极限的容许应力(或资用应力)以提供安全系数。例如，在结构钢设计中，对屈服点为 250 N/mm^2 的钢通常采用拉伸容许应力为 165 N/mm^2 。因此，抵抗屈服的安全系数为 1.52。也有其他一些情况，其中资用应力是用对极限应力取适当的

* 应力-应变图为雅各布·伯努利(Jacob Bernoulli, 1654—1705)和 J. V. 蓬斯莱(Poncelet, 1788—1867)所创始，见参考文献 1-4。

安全系数来确定。这种作法通常用于混凝土和木材之类的脆性材料。一般来说,当根据容许应力进行设计时,可采用下列两式之一得到其资用应力 σ_w :

$$\sigma_w = \frac{\sigma_y}{n_1} \quad \text{或} \quad \sigma_w = \frac{\sigma_u}{n_2} \quad (1-3)$$

其中 σ_y 和 σ_u 分别表示屈服点和极限应力,而 n_1 和 n_2 为安全系数。适当的安全系数的确定是一件复杂的事情,因为它取决于所用材料的类型和结构的工作条件。当载荷是动态时(或突然作用或大小变化),象出现在机器零件、飞机、桥梁等的载荷,由于疲劳破坏的可能性,就需要一个比同一结构承受静载荷时更大的安全系数。

代替使用容许应力的另一种方法是采用一个抵抗结构完全毁坏的安全系数来设计结构。引起结构毁坏的载荷(或诸载荷)必须首先予以确定,然后容许载荷(或资用载荷)由极限载荷除以适当选择的载荷系数来确定。这种设计方法称为极限载荷设计,可以看出,在此情况下,结构中实际应力的大小在确定其资用载荷时没有起直接的作用。在设计金属结构时,资用应力法和极限载荷法都是常用的。对于某些简单结构,其极限载荷的确定将在后面第 1.8 节和 9.5 节中加以讨论。

1.4 线性弹性和虎克定律

大多数结构材料在其应力-应变曲线上具有一个初始区段,在此区段内材料呈现出既是弹性的又是线性的性态。在钢的应力-应变图上从 O 到 A 这一区段(参看图 1-2a)就是一例。其他各例如图 1-4 和 1-5 中的各曲线在比例极限以下的区段。当材料表现为弹性并且在应力和应变之间展现线性关系时,该材料就称为线性弹性的。这是许多固体材料包括大多数金属、塑料、木材、混凝土和陶土等的极为重要的性质。

杆件受拉时,应力和应变之间的线性关系可用简单的方程来表达: