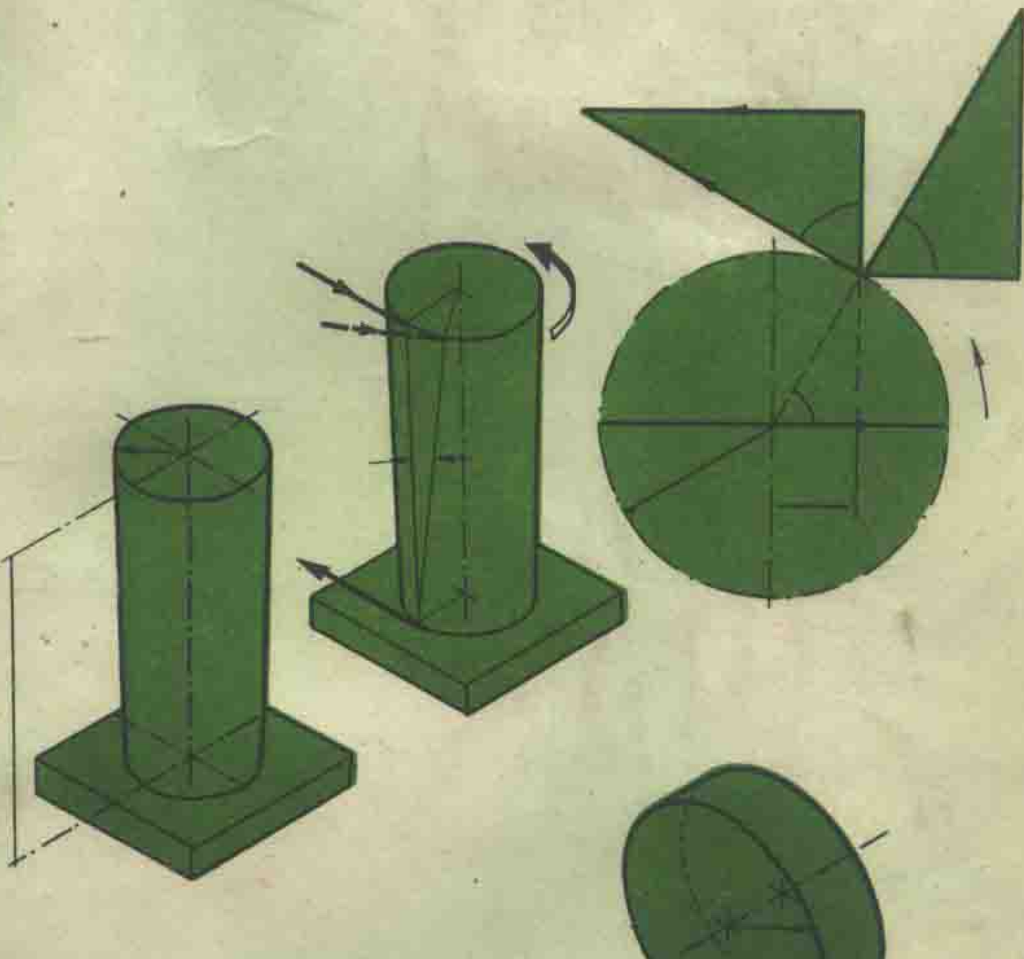
用机械学

实用机械学

〔英〕Ian McDonagh 著

张德智 译



兵器工业出版社

实用机械学

[英]Ian McDonagh 著

张德智 译

兵器工業出版社

内 容 简 介

本书内容丰富、实用，涉及材料力学、理论力学、机械设计和流体运动诸方面的基本理论和工程应用。全书分为一、二两篇，共 17 章，各章自成一体。该书的特点是实例较多，140 多个例子都是从工程实践中提炼出来的典型问题；全书把基本理论的叙述与实例分析和解答都有机地结合在一起了，而且不少解题技巧如材料力学中求剪力、弯矩、斜率、挠度的麦考莱法，理论力学中求固有频率的雷利法、敦克利法，机械原理中回转质量动平衡的 mrx 图解法等都是我国教科书中较少见到的。

书中各章章未均附有习题及答案。

该书可作为成人教育用教材和高等院校师生的参考书，也是工程技术人员的一本好工具书。

实用机械学

[英] Ian McDonagh 著

张德智 译

*

兵器工业出版社 出版发行

(北京市海淀区车道沟 10 号)

各地新华书店经销

研究院印刷厂印装

*

开本：787×1092 1/16 印张： 16.375 字数：402.48 千字

1990 年 12 月第 1 版 1990 年 12 月第 1 次印刷

印数：1～3000 定价：11.60 元

ISBN 7-80038-244-3/TH·11

译 者 的 话

伊恩·麦克多纳(Ian·McDonagh)是英国威勒尔都会学院(Wirral Metropoli tan College)工程学高级讲师．他著的“技术人员用机械学”(Mechanical science for technicians)第一卷于1979年出版、1982年重印．1984年再版．本书即是根据其第一卷的第二版和第二卷的1984年版译出的．

书中丰富实用的内容、以例带叙的阐述体系和简捷新颖的解题方法都深深地吸引着我，简直使我爱不释手；我想，何不把我的这种享受奉献给我国更多的机械学同行和学者呢，于是便有了译书之举．

书中印刷上的错误遗漏或笔误及个别不易理解的地方已改正或在页末作了呼应注．

我要特别感谢北京理工大学马宝华教授欣然为本书作序；沈阳工业学院的商国云、王雨时、曹纯柱等同志对本书的出版积极支持并作了大量的工作；书中的全部插图由张合清同志完成，在此特表示衷心的感谢!

我的本意是要忠实于原著，但由于水平有限，书中错误一定不少，恳请读者指正．

张德智

1989年3月

序

《实用机械学》原名 Mechanical sciencefor technicians(技术人员用机械学)，英国 Ian McDonagh 著。这是一本颇具特色的技术教材和参考书。其主要特点有二，一是篇幅虽不长但内容丰富，涉及材料力学、理论力学、机械设计及流体运动诸方面的基本理论与工程应用；二是将基本理论叙述与例题分析有机结合，全书仅以百分之四十的篇幅讲解基本概念，对于基本概念的深化与扩展则溶合于例题的分析讨论之中，作者精心设计与选择了近140个例题，占全书篇幅的百分之六十。通过例题的分析，结合从工程设计中提炼出的典型问题，对基本概念、基本理论做了进一步的推导、展开和讨论。

例如第四章向心加速度、向心力与离心力两节，作者在原书中只用了3页的篇幅对基本概念做了交待，接着用9页的篇幅精心设计了8个例题，分别讨论了车削偏心零件时车床主轴受力、汽车在水平及倾斜弯道上拐弯时的最大安全速度、不同轮距及重心高度对最大安全速度的影响、摩托车拐弯时人及车体的倾斜角度、质量非均匀分布的零件平衡等问题。这些问题均来自于实际，同时又在理论上具有典型性，使读者学习起来既感到亲切，又能加深自己对基本理论的理解，同时还能从中学到解决实际问题的方法。有的例题还列出了多种解题方法，有些方法简单而新颖。这种体系与风格，形成了有别于国内同类教科书的特色。该书很适合作成人教育教材和高等学校学生的参考书，对于教师及工程技术人员也颇具借鉴和参考价值。

现由沈阳工业学院张德智副教授按该书第二版译出，并由兵器工业出版社出版。译文表达准确，文笔流畅，对若干细节做了必要的译注。在阅读原书及译稿后，确感值得向读者推荐此书，并以此为序。

马宝华
1989年3月20日
于北京理工大学

原书前言

为满足新“企业和技术教育委员会”机械学Ⅲ组(U82／040)的需要，本书第一篇第二版的内容已作了修订；其目的是为了增进读者对机械工程的了解，拓宽解决材料变形，动力学和流体运动等问题的分析方法。书中增添了剪力和弯矩的内容；形心、面积的一次矩、二次矩❶、弯曲理论中的假设、扭转、静平衡及锐孔喷射等章节也作了补充或修改。

本书第二篇是为满足“企业和技术教育委员会”机械学Ⅳ组（U82／041）的需要而写成的。它的宗旨是：(a)为读者介绍应力-应变分析原理;(b)提高读者解决梁的变形问题的能力；(c)增进读者对动力学和振动的理解。

全书使用了国际标准单位制，所推荐使用的倍数和约数如下：

字头	符号	所乘系数
giga	G	$10^9=1000000000$
mega	M	$10^6=1000000$
kilo	k	$10^3=1000$
milli	m	$10^{-3}=0.001$
micro	μ	

Ian McDonagh

❶截面的一次矩即我国通称的静面矩或静矩；截面的二次矩即我国通称的惯性矩。——译者

目　录

第一篇

第二篇

第一篇

第一章　应力、应变和弹性变形

§1.1　力的分类

作用在物体上的力有三类:

i)　拉力，如图 1.1(a);

ii)　压力，如图 1.1(b);

iii)　剪力，如图 1.1(c).

拉力和压力都是**正向力**. 由于正向力中方向相反的二力是沿着同一条直线作用的，所以正向力也叫**轴向力**; 正向力在物体中产生**正应力**（见§1.2 节). 剪力是**非正向力**，因为其二力的作用线必须象图 1.1(c)所示的那样被错开，这样才能产生剪切. 剪力在物体中产生**剪应力**（见§1.8 节).

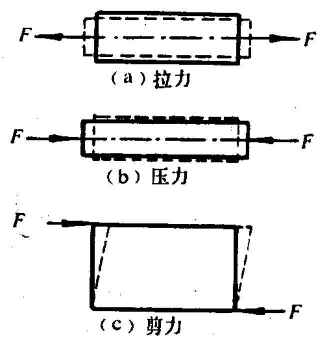


图 1.1 力的分类

§1.2　正应力

单位受力截面A上所施加的力F称为正应力，即

$$正应力=\frac{施加的力}{受力横截面积}$$

正应力可以是拉伸应力，也可以是压缩应力，如图 1.2 所示.

正应力用符号 σ 表示，于是:

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

该式应当记住.

应力的基本单位是牛顿每平方米(N/m^2); 因为这个单位很小，所以常用兆牛顿每平方米(MN/m^2)表示，也可以用牛顿每平方毫米(N/mm^2)和帕斯卡(Pa)表示.

$$1N/mm^2=1MN/m^2$$

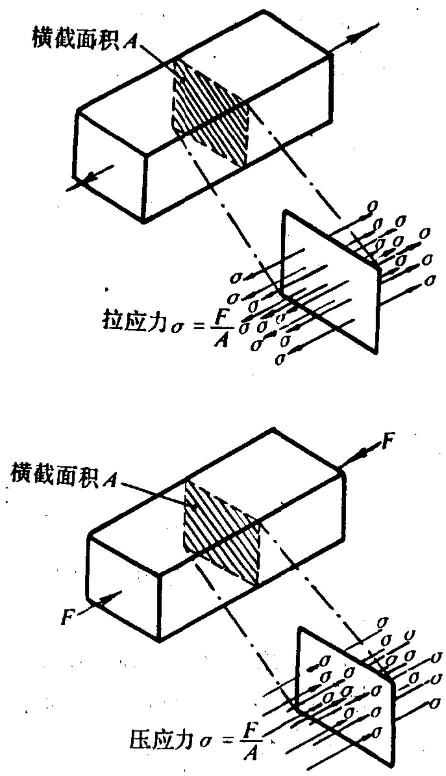


图 1.2 拉应力和压应力

$$1Pa = 1N / m^2$$

记住这两个换算公式是有用的。

§1.3 应　变

每单位原长度(l)的变化量(x)称为应变，

即 $$\text{应变} = \frac{\text{变化量}}{\text{原来长度}}$$

应变可以是拉伸应变，也可以是压缩应变或剪切应变。当原长度增加时则为拉伸应变，减小时则为压缩应变。剪切应变在§1.9中讨论。

拉伸应变或压缩应变的符号用ε(读艾普西隆)表示，所以

$$\varepsilon = \frac{x}{l}$$

应记住该式。

因为应变是相同量的比值，所以它无单位。

§1.4 弹性模量

当有应力存在时，所有的固体材料都将发生轻微的变形。当撤去应力时，如果该材料恢复到施加应力前的形状和尺寸，则它是**弹性材料**。大多数固体材料在一定的应力极限（称为**弹性极限**）之内都是弹性材料；而室温下的铅则例外。图1.3的弹性材料应力–应变曲线表明，在弹性极限处或在弹性极限之内的各点，其图象是一条直线，即在图1.3中的**比例极限**点A之下，应力与应变成正比，即

$\sigma \propto \varepsilon$

所以，$\dfrac{\sigma}{\varepsilon} = \text{常数}$

该常数称为材料的**弹性模量**或**杨氏模量**E，即

$$\text{弹性模量} = \frac{\text{应力}}{\text{应变}}$$

或 $$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

该式应当记住。

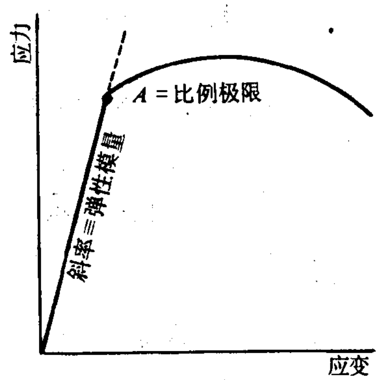


图1.3　材料的应力–应变图

E的基本单位与应力的相同，即牛顿每平方米（N / m^2）；不过常用千兆牛顿每平方米(GN / m^2）表示。

表1.1　列出了几种材料的弹性模量典型值。

例：在对钢试件的拉伸试验中，当所加的负荷为60kN时，应变计的读数为0.117mm(伸长量)。试件的直径和原测长度分别为15.96mm和80mm，计算钢的弹性模量。

$$E=\sigma/\varepsilon$$

而 $$\sigma=F/A,\quad \varepsilon=x/l$$

∴ $$E=\frac{Fl}{Ax}$$

记住该式是有用的。

这里， $F=60\text{kN}=60\times10^3\text{N}$;

$l=80\text{mm}$; $x=0.117\text{mm}$;

$A=(\pi/4)\times(15.96\times 10^{-3}\text{m})^2=200\times10^{-6}\text{m}^2$

$$\therefore\quad E=\frac{60\times10^3\text{N}\times80\text{mm}}{200\times10^{-6}\text{m}^2\times0.117\text{mm}}$$

$$=205.1\times10^9\text{N}/\text{m}^2$$

即钢的弹性模量为 205.1GN／m²。

表 1.1 弹性模量的典型值

(注：碳素钢的弹性模量随含碳量的多少而稍有改变)

材 料	弹性模量(N/m^2)
碳素钢	210×10^9
紫 铜	120×10^9
铸 铁	100×10^9
黄 铜	90×10^9
铝合金	90×10^9

§1.5 组合杆中的应力和应变

考虑如图 1.4(a)所示的一根组合杆，它由钢管及其内部所充满的橡胶填料组成。如果组合杆受到由钢管两端的平板所作用的压力F，见图1.4(b)，则整个结构的长度将减少x；该减少量受较强材料即钢管刚度的限制。另外，压力F由钢管和橡胶填料分担；对于刚度较大的钢管，它承受大部分的力。因此，解决与这类组合杆有关的问题应记住：

1) 管长减少量＝橡胶填料长减少量

即 管的压应变＝橡胶填料的压应变

2) 总力＝管上的力+橡胶填料上的力

用下标 a 表示管，b 表示橡胶填料，则：

$\varepsilon_a=\varepsilon_b$ 及 $F=F_a+F_b$

但 应变 $\varepsilon=\sigma/E$， 力 $F=\sigma A$

$$\therefore\quad \sigma_a/E_a=\sigma_b/E_b \qquad \text{(i)}$$

$$F=\sigma_aA_a+\sigma_bA_b \qquad \text{(ii)}$$

记住这一结论是有用的。

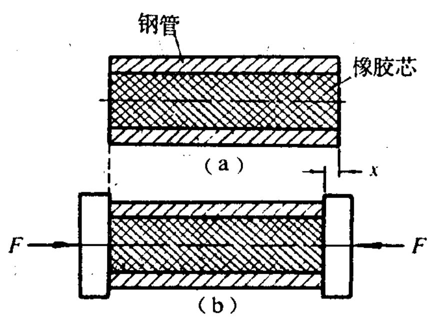


图 1.4 组合杆

例 1 图 1.4 所示钢管的内径和外径分别为 24mm 和 30mm，求当压力为 3kN 时，橡胶填料和钢管的压应力。对于钢，$E=200\text{GN}/\text{m}^2$，橡胶填充料，$E=2.5\text{GN}/\text{m}^2$。

用下标 a 表示钢管，b 表示橡胶，

$$\sigma_a/E_a=\sigma_b/E_b$$

$$\sigma_a=\sigma_b(E_a/E_b)$$

本例 $E_a=200\text{GN}/\text{m}^2$， $E_b=2.5\text{GN}/\text{m}^2$

$\therefore \quad \sigma_a=\sigma_b\times\dfrac{200\text{GN}/\text{m}^2}{2.5\text{GN}/\text{m}^2}=80\sigma_b$

另外 $\quad F=\sigma_a A_a+\sigma_b A_b=80\sigma_b A_a+\sigma_b A_b$

本例 $\quad F=3\text{KN}=3\times10^3\text{N}$

$A_a=(\pi/4)\times(30^2-24^2)\text{mm}^2=254.5\text{mm}^2$

$A_b=(\pi/4)\times(24\text{mm})^2 452.4\text{mm}^2$

$\therefore \quad 3\times10^3\text{N}=80\sigma_b\times254.5\text{mm}^2+\sigma_b\times452.4\text{mm}^2$

$=2.081\times10^4\sigma_b\text{mm}^2$

$\therefore \quad \sigma_b=\dfrac{3\times10^3\text{N}}{2.081\times10^4\text{mm}^2}$

$=0.144\text{N}/\text{mm}^2$ 即 $0.144\text{MN}/\text{m}^2$

$\sigma_a=80\sigma_b$

$\therefore \quad \sigma_a=80\times0.144\text{MN}/\text{m}^2$

$=11.52\text{MN}/\text{m}^2$

即橡胶和钢管的压应力分别是 $0.144\text{MN}/\text{m}^2$ 和 $11.52\text{MN}/\text{m}^2$。

例 2 一根 3m 长的铸铁管，内部充满混凝土用作立柱。管外径为 450mm，壁厚 35mm。如果混凝土的应力不超过 $2\text{N}/\text{mm}^2$，求该立柱能承受的最大压载。在此载荷下，组合立柱将缩短多少？铸铁的弹性模量 $E=100\text{GN}/\text{m}^2$，混凝土，$E=10\text{GN}/\text{M}^2$。

用下标a表示铸铁，b表示混凝土，则：

铸铁应变=混凝土应变

即 $\quad \sigma_a/E_a=\sigma_b/E_b$

$\therefore \quad \sigma_a=\sigma_b(E_a/E_b)$

本例 $\sigma_b=2\text{N}/\text{mm}^2$， $\quad E_a=100\text{GN}/\text{m}^2$，

$E_b=10\text{GN}/\text{m}^2$

$\therefore \quad \sigma_a=2\text{N}/\text{mm}^2\times\dfrac{100\text{GN}/\text{m}^2}{10\text{GN}/\text{m}^2}$

$=20\text{N}/\text{mm}^2$

另外 总力=对铸铁的力+对混凝土的力

即 $\quad F=\sigma_a A_a+\sigma_b A_b$

本例， $A_a=(\pi/4)\times(450^2-380^2)\text{mm}^2=45.6\times10^3\text{mm}^2$

$A_b=(\pi/4)\times(380\text{mm})^2=113.4\times10^3\text{mm}^2$

$\therefore \quad F=(20\text{N}/\text{mm}^2\times45.6\times10^3\text{mm}^2)+(2\text{N}/\text{mm}^2\times113.4\times10^3\text{mm}^2)$

$=1.14\times10^6\text{N}$ 即 11.4MN

即，组合立柱所能承受的最大压力为 11.4MN。

应变 $\varepsilon=x/l=\sigma/E$

$\therefore \quad x=l(\sigma/\text{E})$

本例$l=3\text{m}$；对混凝土，$\sigma=2\text{N}/\text{mm}^2=2\times10^6\text{N}/\text{m}^2$；$E=10\times10^9\text{N}/\text{m}^2$

$$\therefore \quad x = 3\text{m} \times \frac{2\times10^6\text{N}/\text{m}^2}{10\times10^9\text{N}/\text{m}^2}$$

$$= 6\times10^4\text{m} \quad 即 \quad 0.6\text{mm}$$

即，组合立柱压缩量为 0．6mm。

例 3　一正方形截面为 250mm × 250mm 的混凝土立柱,要求其承受 875KN 的轴向力。若使混凝土中的应力减小至 $8\text{N}/\text{mm}^2$，求最少需加入直径为 6mm 的钢筋多少根？钢的弹性模量 $E = 200\text{GN}/\text{m}^2$，混凝土 $E = 12\text{GN}/\text{m}^2$。

用下标 a 表示钢，下标 b 表示混凝土，n 表示需加入的钢筋数。

钢的应变 = 混凝土的应变

即 $\sigma_a / E_a = \sigma_b / E_b$

$\therefore \quad \sigma_a = \sigma_b(E_a / E_b)$

本例　$\sigma_b = 8\text{N}/\text{mm}^2$，$E_a = 200\text{GN}/\text{m}^2$，

$E_b = 12\text{GN}/\text{m}^2$，

$$\therefore \quad \sigma_a = 8\text{N}/\text{mm}^2 \times \frac{200\text{G N}/\text{m}^2}{12\text{G N}/\text{m}^2}$$

$$= 133.3\text{N}/\text{mm}^2$$

总力 = 钢上的力 + 混凝土上的力

即　$F = \sigma_a A_a + \sigma_b A_b$

本例　$F = 875\text{KN} = 875\times10^3\text{N}$

$$A_a = (\pi/4)\times(6\text{mm})^2 n = (28.27n)\text{mm}^2$$

$$A_b = (250\text{mm})^2 - A_a$$

$$= (62.5\times10^3 - 28.27n)\text{mm}^2$$

$$\therefore \quad 875\times10^3\text{N} = 133.3\text{N}/\text{mm}^2\times(28.27n)\text{mm}^2 + 8\text{N}/\text{mm}^2\times(62.5\times10^3 - 28.27n)\text{mm}^2$$

$$\therefore \quad 875\times10^3 = 3768.4n + 500\times10^3 - 226.2n$$

由此可得　$n = 105.9$

即，　最少需加入 106 根钢筋。

§ 1.6　变温应力

温度升高，固体材料膨胀；温度下降，固体材料收缩。胀缩尺寸 x 随温度而变化的关系式如下：

$$x = l\alpha\Delta\theta$$

式中　l——原始尺寸

α——线膨胀系数

$\Delta\theta$——温度变化量

如果固体材料温度升高 $\Delta\theta$，而引起的膨胀完全（或部分地）受到限制，材料中便会产生压应力；同样地，如果温度下降，所引起的收缩受到限制，则产生拉应力。

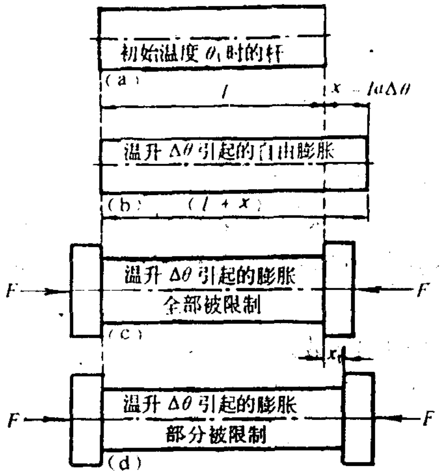


图 1.5 温度应力

图 1.5(a) 表示一原始长度为 l 的杆。若杆温由 θ_1 升至 θ_2，杆长变为 $l+x$，如图 1.5 (b) 所示，则杆内没有应力。如果膨胀受到限制如图 1.5(c) 所示，则杆内将产生压应力 σ 及其相应的应变，即由于膨胀受到限制，温度的变化将使应力由图 1.5(a) 的零变为图 1.5(c) 的 σ。

图1.5(c)中，膨胀完全被限制。

压应变 $\varepsilon=\dfrac{x}{l+x}=\dfrac{\sigma}{E}$

$$\therefore\quad \sigma=\frac{Ex}{l+x}$$

但 $x=l\alpha(\theta_2-\theta_1)=l\alpha\Delta\theta$

$$\therefore\quad \sigma=\frac{El\alpha\Delta\theta}{l+l\alpha\Delta\theta}=\frac{E\alpha\Delta\theta}{1+\alpha\Delta\theta}$$

因为α非常小(一般为 0.00001)，$\alpha\Delta\theta$ 项与 1 相比可以忽略。于是 $1+\alpha\Delta\theta\approx1$，即如果膨胀被完全限制了，温升 $\Delta\theta$ 引起的应力变化量为:

$\sigma=E\alpha\Delta\theta$

此式应记住。

由温度变化而引起的应力变化称为**变温应力(或温度应力)**。

注意到，$\alpha\Delta\theta=\sigma/E$

即 $\alpha\Delta\theta=$温度应变

记住此式是有用的。

如果膨胀量被限制为x，如图 1.5(d)所示，则:

$$\text{总的正向应变}=\frac{x-x_1}{l+x}=\frac{l\alpha\Delta\theta-x_1}{l+l\alpha\Delta\theta}=\frac{l[\alpha\Delta\theta-(x_1/l)]}{l(1+\alpha\Delta\theta)}$$

由前可知 $(1+\alpha\Delta\theta)\approx1$

$$\therefore\quad \text{总的正向应变}=\alpha\Delta\theta-\frac{x_1}{l}$$

$$=\text{温度应变}-\text{应力应变}$$

但 应变$=\sigma/E$

所以，如果是部分限制的膨胀，则温度变化$\Delta\theta$产生的应力变化为:

$$\sigma=E\left(a\Delta\theta-\frac{x_1}{l}\right)$$