初级工程力学

〔英〕G. W. Taylor 著

刘国锡 译

曹少方 校

電子工業出版社

内 容 简 介

本书包括材料力学、运动学和动力学、流体动力学的基础知识，内容深入浅出，容易学习，并有供掌握基本概念的习题与答案可供自学者作为入门读物，并可供学习理论力学及材料力学的技工学校、中等专业学校学生和教师参考。

Mechanical Science

G. W. Taylor

Stanley Thornes (Publishers) Ltd

初级工程力学

〔英〕G. W. Taylor 著

刘国锡 译

曹少方 校

责任编辑：孙延真

※

电子工业出版社出版（北京市万寿路）

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京密云卫新综合印刷厂印刷

※

开本：787×1092 1/16 印张：11.375 字数：263千字

1986年1月第1版 1987年2月第1次印刷

印数：3.250 册 定价：2.50元

统一书号：17290·227

译 后 记

本书根据G. W. Taylor著“力学”（Mechanical Science）译出。没有复杂的数学推导，但又讲清了基本原理，因此使力学变得比较简单易学了；例题、练习题的安排，为读者考虑得较周到；联系实际，使能学以致用；文字精简，读起来费时较少，这些都是原作的优点。

本书的体系、内容和阐述问题的方法，和我国现在流行的同类书籍有较大差异，具有明显特点，这就是把它推荐给读者的另一个原因。如果它能以其简单易学的特点，满足一部分读者的需要，就达到了译者的目的。

除少数段落为适应我国情况作了一些变动外，译文和版面都力求保持原作风格，但由于译者水平低，虽经努力，仍不理想，错误和缺点，恐难避免，请读者指正。

译者　1984・12

目　　录

第一章 应力、应变和弹性

学完这章后，你能够：

1）解决杆及组合杆在温度不变时的轴向拉伸或压缩问题；

2）解决杆及组合杆在温度变化时的轴向拉伸或压缩问题；

3）阐明正应变的总量是由轴向载荷和温度变化引起的应变的和；

4）解释切应力、切应变和剪切弹性模量，并解决与其有关的问题；

5）解释泊松比；

6）在拉力——应变关系中，应用泊松比去解决两维情况的有关问题（不包含切应力作用）。

应　力

材料在载荷作用下，其内部抵抗外部载荷的力，称为内力。内力的集度，称为应力，当内力的分布是均匀的时候，应力是单位面积上的内力。应力依载荷形成不同有正应力和切应力两种基本形态。

正应力

在拉伸和压缩时，横截面上存在着正应力。图1．1表示杆受到拉力或压力作用，并在AA截面被分割开，这样可以显示作用在横截面面积上的应力。由图可见正应力垂直于横截面。正应力的大小由下式决定：

$$\boxed{（\text{正应力}）=\frac{（\text{载荷}）}{（\text{横截面面积}）}}$$

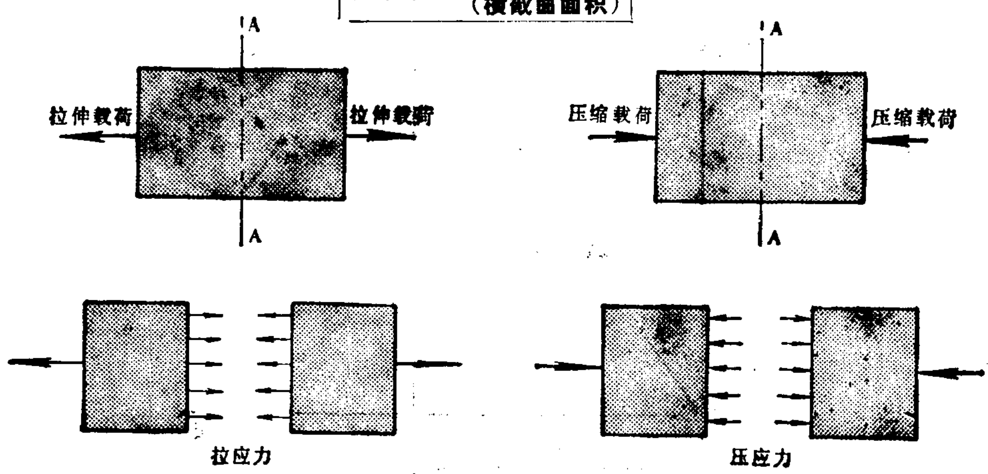

图1.1

正 应 变

应变是表示应力状态下材料的相对变形，它亦有类似应力的两种基本形态。与正应力相应的正应变是材料每单位长度的伸长或缩短，在图1．2中正应变发生在所示载荷的方向。

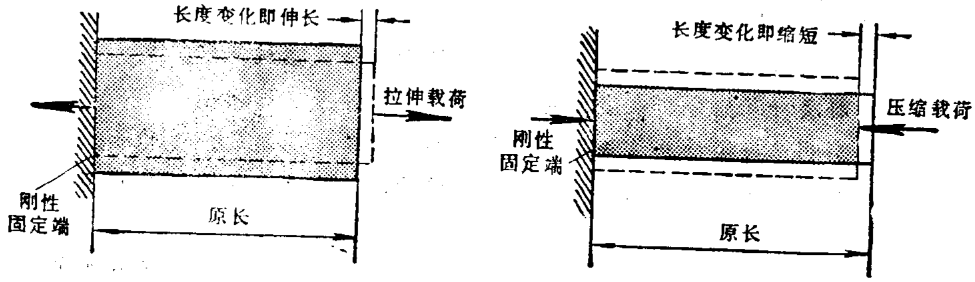

图1.2

正应变由下式决定：

$$\boxed{(\text{正应变})=\frac{(\text{长度的变化})}{(\text{原来长度})}}$$

从图1．2还可以看到，杆在拉伸和压缩时，除了发生伸长和缩短的变形外，受拉时还会变细，受压时还会变粗，这点将在本章的后面进行较详细地讨论。

弹　　性

材料在载荷作用下变形后，当去掉载荷时，能回复到原来形状的材料，称为弹性材料。图1．3是典型工程材料的应力——应变曲线图的一部分。几乎全部的工程结构，都不能允许产生永久变形，因此总是将应变保持在弹性范围内。在这个范围内，直到“比例极限”，该图线是一条直线。我们的计算总是根据直线部分，借助于虎克定律来进行的。

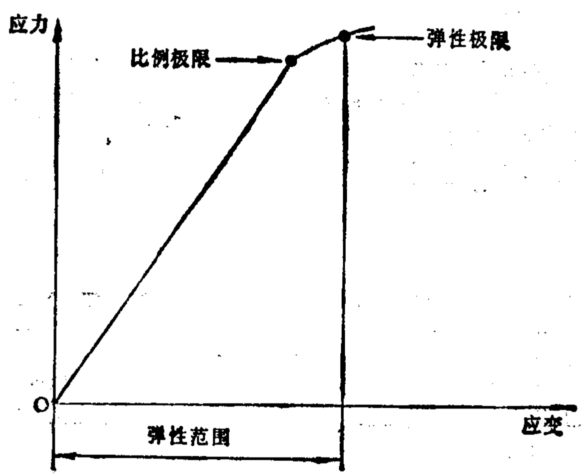

图1.3

虎克定律和弹性模量（E）

虎克定律是由材料试验得到的，内容如下：

对于弹性材料，当应力小于、等于比例极限时，应力与应变成正比。

用方程式可以表示成：

$$\text{应力} \propto \text{应变}$$

或

$$(\text{应力}) = (\text{常数}) \times (\text{应变})$$

因此

$$\frac{(\text{应力})}{(\text{应变})} = (\text{常数})$$

对于正应力和正应变，这个方程式变成：

$$\boxed{\frac{(\text{正应力})}{(\text{正应变})} = E}$$

上式中的常数E称为“弹性模量”或“杨氏模量”，是材料的一种物理性质。

符号和单位

应力

名　　称	符　　号	单　　位
轴向载荷（或力）	F	N
横截面面积	A	m^2
正应力	σ	N/m^2

（σ是希腊字母，读‘*sigma*’）

前面讲过：

$$(\text{正应力}) = \frac{(\text{载荷})}{(\text{横截面面积})}$$

因此

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

在国际单位制中，力的主单位是牛顿（N），面积的主单位是牛顿每平方米（N/m^2）。这个单位亦称为帕斯卡（Pa）。从实用的观点看，应力的这个主单位是太小了，因此必须用其倍数。国际单位制的标准倍数是千牛顿每平方米（kN/m^2）、兆牛顿每平方米（MN/m^2）和吉牛顿每平方米（GN/m^2）。当解决工程问题时，我们通常推荐使用国际单位制的主单位，然而当长度用毫米能使应力的计算变得容易时，应力的单位是牛顿每平方毫米（N/mm^2）。由于应力的数据常用MN/m^2给出，因此我们必须将其变换成N/mm^2。

$$1\ MN/m^2 = \frac{1 \times 10^6}{1 \times 10^6}\ N/mm^2$$

故 $1\ MN/m^2 = 1\ N/mm^2$，这意味着MN/m^2和N/mm^2这两个单位是相等的，例如

85MN/m² 等于 85N/mm²。

应变

名　　称	符　　号	单　　位
原来长度	l	m
伸长或缩短	X	m
正应变	ε	

（ε是希腊字母，读 ‘*epsilon*’ ）

前面讲过：

$$(\text{正应变}) = \frac{(\text{长度的变化})}{(\text{原来长度})}$$

因此

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

因为应变是两个长度之比，即$\frac{\text{m}}{\text{m}}$，所以它没有单位。

弹性模量（E）

$$(E\text{的 单位}) = \frac{(\text{应力的单位})}{(\text{应变的单位})}$$

因为应变有单位，这样弹性模量的单位同应力的单位一样。E的值经常用GN/m^2的单位给出，因此我们必须知道：

$$1\ GN/m^2 = 10^3 MN/m^2 = 10\ N^3/mm^2$$

例 1.1

一根16mm×10mm的矩形截面钢杆，长度为200mm，在20kN的拉力作用下，伸长了0.12mm，求：

(*a*) 应力；

(*b*) 应变；

(*c*) 钢杆的弹性模量。

解：

(*a*) 求拉应力：

$$(\text{拉应力}) = \frac{(\text{拉力})}{(\text{横截面面积})}$$

已知：（拉力）$= 20kN = 20 \times 10^3 N$，（横截面面积）$= 16 \times 10 = 160mm^2$，代入上式得

$$(\text{拉应力}) = \frac{20 \times 10^3}{160}$$

$$= 125\ N/mm^2$$

$$= 125\ MN/m^2$$

(*b*) 求应变：

$$（应变）=\frac{（伸长）}{（原长）}$$

已知：（伸长）=0.12mm，（原长）=200mm，代入上式得：

$$（应变）=\frac{0.12}{200}$$

$$=0.0006$$

（c）求弹性模量：

$$E=\frac{（应力）}{（应变）}$$

代入（应力）=125N/mm²和（应变）=0.0006，

$$E=\frac{125}{0.0006}$$

$$=208\times10^{3}\ \mathrm{N/mm^{2}}$$

$$=208\mathrm{G}\ \mathrm{N/m^{2}}$$

安全系数

如图1.4所示，极限应力是断裂前材料内存在的名义最大应力，称为强度极限。

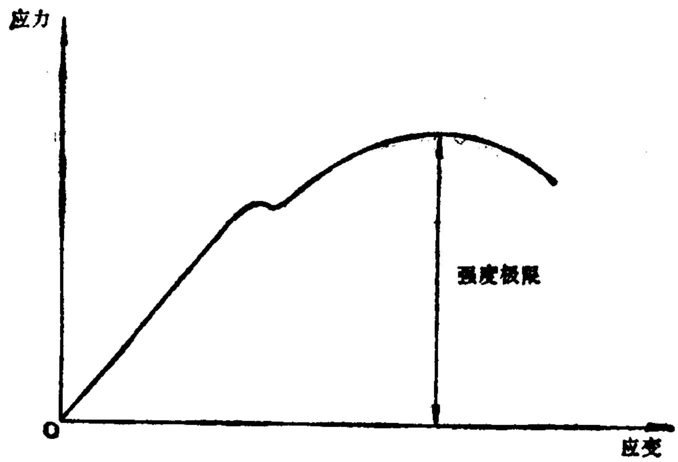

图1.4

当我们设计工程结构和部件时，我们允许的最大应力，称为许用应力，它比强度极限低得多。我们用安全系数表示强度极限和许用应力的比值。即

$$（安全系数）=\frac{（强度极限）}{（许用应力）}$$

或

$$（许用应力）=\frac{（强度极限）}{（安全系数）}$$

对于某一个具体的应用，安全系数的值可以是不同的，这是因为对制定系数时考虑的

因素不能知道得很精确，这些因素包括载荷的类型（例如：不变的或波动的）、尺寸的意外变化，材料组织内的未知缺陷和制成后的部件使用不当等。

制定安全系数的另外一种方法，是把许用应力保持在弹性范围内，于是它决定于弹性极限应力与许用应力之比。因此这就会得到一个不同数值的安全系数。

采用上面两种方法确定许用应力时，载荷都必须是纯粹的静载荷，如果结构或部件的应力是不断变化的，这两种方法都不适用。

例 1．2

一个铜圆柱体长度是122mm，直径是30mm，如果铜的压缩强度极限是300MN/m²，求当安全系数是6时，这个圆柱体能支承的最大载荷。如果铜的弹性模量$E_c = 96GN/m^2$，再求这圆柱体的缩短。

解：

首先求许用应力

$$（许用应力）=\frac{（强度极限）}{（安全系数）}$$

已知：（强度极限）= 300MN/m²，（安全系数）= 6，代入上式得

$$（许用应力）=\frac{300}{6}$$

$$= 50\ MN/m^2$$

$$= 50\ N/mm^2$$

再求能支承的载荷：

$$（载荷）=（横截面面积）\times（许用应力）$$

上式中的（横截面面积）$=\frac{\pi}{4}\times 30^2 = 707mm^2$、（许用应力）= 50N/mm²，代入这些值得

$$（载荷）= 707\times 50$$

$$= 35400\ N$$

$$= 35.4\ kN$$

然后求应变：

$$（应变）=\frac{（应力）}{E}$$

代入（应力）= 50N/mm²和$E_c = 96GN/m^2 = 96\times 10^3N/mm^2$，得

$$（应变）=\frac{50}{96\times 10^3}$$

$$= 0.000521$$

最后求缩短：

$$（缩短）=（原长）\times（应变）$$

代入（原长）= 122mm和（应变）= 0.000521，得

$$（缩短）= 122\times 0.000521$$

$$= 0.0636\ mm$$

练习1.1

1）一钢杆承受着100kN的轴向载荷，若许用的拉应力是$75MN/m^2$，求此杆的最小直径。

2）一铝杆直径是10mm，长度是4 m，受0.9kN的轴向拉力。铝的弹性模量$E_a=80GN/m^2$，求：

(a) 应力；

(b) 伸长。

3）(a) 一根直径为2 mm的钢丝，其拉伸强度极限为$500MN/m^2$，取安全系数为5，求此钢丝能承担的最大拉力。

(b) 如果这根钢丝长7 m，有3.33mm的伸长，求弹性模量E_s的值。

4）一根高度是40mm，宽度是20mm，长度是6 m的矩形杆，如果伸长是2 mm，求杆受到的轴向载荷。材料的弹性模量$E=100GN/m^2$。

5）一金属杆的直径是25mm，长度是200mm，在80kN的轴向载荷作用下伸长了0.15mm。求：

(a) 金属的弹性模量E；

(b) 当载荷是100kN时的伸长。

6）一根长度是0.175m的钢杆，直径是20mm，当受到35kN的压力作用后，缩短了0.075mm。求：

(a) 钢的弹性模量E_s的值；

(b) 在20kN的拉力作用下的伸长。

7）一个铜圆筒，外径是30mm，内径是18mm，支承着50kN的轴向压缩载荷，圆筒的轴向缩短是0.21mm，铜的弹性模量$E_c=95GN/m^2$。求：

(a) 圆筒的应力；

(b) 圆筒的原来长度。

8）图1.5为某液压机的活塞和活塞杆，数据如图。求活塞杆的应力和缩短量。材料的弹性模量$E=200GN/m^2$。

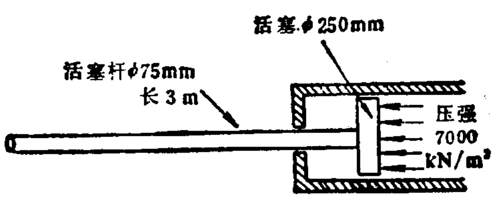

图1.5

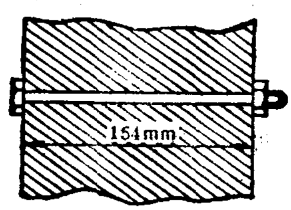

图1.6

9）图1.6所示的螺栓，直径是8 mm，螺距是1 mm，如果螺母原来是紧的，并且忽略螺栓所穿过材料的压缩量，求把螺母转动了1/8圈而拉紧螺栓产生的应力增量。螺栓的弹性模量$E=200GN/m^2$。

10）如图1.7所示的杆，中间一段的应力是$100MN/m^2$，求直径d是多少毫米。如果这杆的弹性模量是$210GN/m^2$，求杆的总伸长。

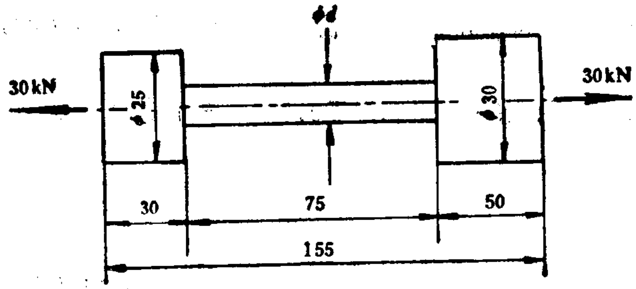

图1.7

组合杆

两个或更多的平行杆，把它们的两端牢固地连接在一起，称为组合杆。

我们只讨论有对称横截面的组合杆，如果横截面不对称，杆会弯曲而产生附加应力，问题比较复杂，超出了这个阶段我们学习的范围。

受轴向载荷的组合杆

解决组合杆受轴向载荷的问题，必须画一个简图，然后再建立已知条件和未知量之间的关系，并且把这些关系用方程式的形式表示出来。由图1.8中两个平行杆的例子，我们可以建立起下面的等式：

(端点载荷) = (A杆的载荷) + (B杆的载荷)

(A杆的缩短) = (B杆的缩短)

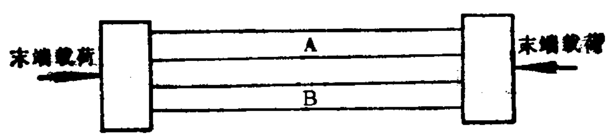

图1.8

对每一根杆，将上述两个等式和

$$E=\frac{(\text{应力})}{(\text{应变})}$$

一起应用，就可以解决这个问题。

例1.3

一根短的组合杆，由一根铜杆和两块加强钢板组成，如图1.9所示。求承受50kN的轴向载荷时，钢板和铜杆里的应力。铜的弹性模量$E_c=96\text{GN/m}^2$，钢的弹性模量$E_s=207\text{GN/m}^2$。

解：

首先考虑铜杆和钢板的应变：

$$(\text{应变})=\frac{(\text{缩短})}{(\text{原长})}$$

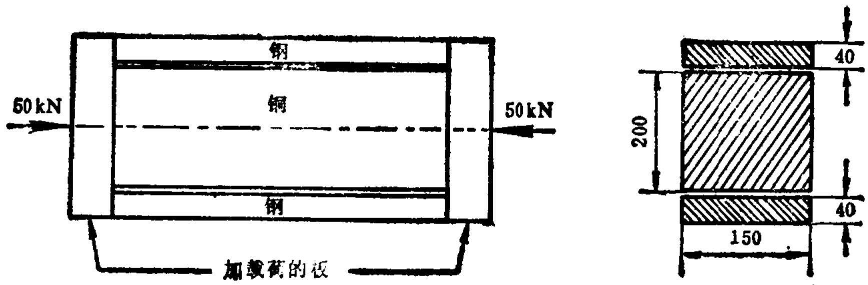

图1.9

因此对于铜杆：

$$\varepsilon_c = \frac{x_c}{l_c}$$

对于钢板：

$$\varepsilon_s = \frac{x_s}{l_s}$$

但是铜杆和钢板原来的长度是一样的，因此$l_c = l_s$，而且缩短也是一样的，所以$x_c = x_s$，于是

$$\varepsilon_c = \varepsilon_s \qquad [1.1]$$

再考虑铜杆和钢板的应力，根据虎克定律：

$$(\text{应变}) = \frac{(\text{应力})}{E}$$

因此对于铜杆

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_c}$$

对于钢板

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s}$$

将ε_c和ε_s的表达式代入式〔1.1〕，可得到

$$\frac{\sigma_c}{E_c} = \frac{\sigma_s}{E_s} \qquad [1.2]$$

我们已知：$E_c = 96\text{GN/m}^2 = 96 \times 10^3\text{N/mm}^2$

$$E_s = 207\text{GN/m}^2 = 207 \times 10^3\text{N/mm}^2$$

将这些值代入式〔1.2〕，得：

$$\frac{\sigma_c}{96 \times 10^3} = \frac{\sigma_s}{207 \times 10^3}$$

由上式得：

$$\sigma_s = 2.16\sigma_c \qquad [1.3]$$

然后分析作用在铜杆和钢板上的载荷与总载荷的关系：

（铜杆的载荷）＋（钢板的载荷）＝（总载荷）

我们已知（总载荷）＝50kN＝50×10^3N，因此

$$F_c + F_s = 50 \times 10^3 \text{ N} \qquad [1.4]$$

最后计算铜杆和钢板的应力，因为

(载荷) = (横截面面积) × (应力)

因此对于铜杆 $F_c = A_c\sigma_c$

代入$A_c = 200\times150 = 30\times10^3\text{mm}^2$，得

$$F_c = (30\times10^3)\ \sigma_c$$

对于钢板也是一样 $F_s = A_s\sigma_s$

求两块钢板的横截面面积 $A_s = 2\times40\times150 = 12\times10^3\ \text{mm}^2$

将A_s的值代入得

$$F_s = (12\times10^3)\ \sigma_s$$

现在将$F_c = (30\times10^3)\ \sigma_c$和$F_s = (12\times10^3)\ \sigma_s$代入式〔1.4〕，得到

$$(30\times10^3)\ \sigma_c + (12\times10^3)\ \sigma_s = 50\times10^3$$

因为式〔1.3〕给出了$\sigma_s = 2.16\sigma_c$，故得

$$(30\times10^3)\ \sigma_c + (12\times10^3)\ \times2.16\sigma_c = 50\times10^3$$

由上式解得：

$$\sigma_c = 0.894\text{N/mm}^2 = 0.894\text{MN/m}^2$$

由图1.9可知铜板受压，上面求得的应力是压应力。再将σ_c的值代入式〔1.3〕，得到钢板的应力

$$\sigma_s = 2.16\times0.894$$
$$= 1.93\ \text{MN/m}^2$$

由图1.9可知，钢板也受压，上面这个应力也是压应力。

例1.4

一根钢螺栓安装在长度为400mm的铝管里，如图1.10所示。用手调节螺母直到拧紧螺栓，螺栓上螺纹的螺距是1.5mm，如果现在再用工具把螺母旋紧半圈，求拉紧钢螺栓产生的应力和铝管长度的变化。设钢的弹性模量 $E_s = 207\text{GN/m}^2$，铝的弹性模量 $E_a = 75\text{GN/m}^2$。

解：

图1.10表示了组合杆变形前和变形后的状况，中间那个图形的状况完全是设想的，但它可以帮助你对变形的理解，把全部变化看作由两个阶段完成。因为

(长度的变化) = (应变) × (原长)

因此对于钢螺栓 $x_s = \varepsilon_s l_s$

而对于铝管 $x_a = \varepsilon_a l_a$

另外由图1.10可见

$$\begin{pmatrix}\text{钢螺栓}\\ \text{的伸长}\end{pmatrix} + \begin{pmatrix}\text{铝管的}\\ \text{缩\quad 短}\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}\text{螺母转半圈时}\\ \text{的轴向移动量}\end{pmatrix}$$

即 $x_s + x_a =$ (半个螺距)

将已经得到的x_s和x_a的表达式及半个螺距的值一起代入上式，我们得

$$\varepsilon_s l_s + \varepsilon_a l_a = 0.75\ \text{mm}$$

现在我们假定允许有很小的误差，认为钢螺栓和铝管的原长是相等的，因此$l_s = l_a =$

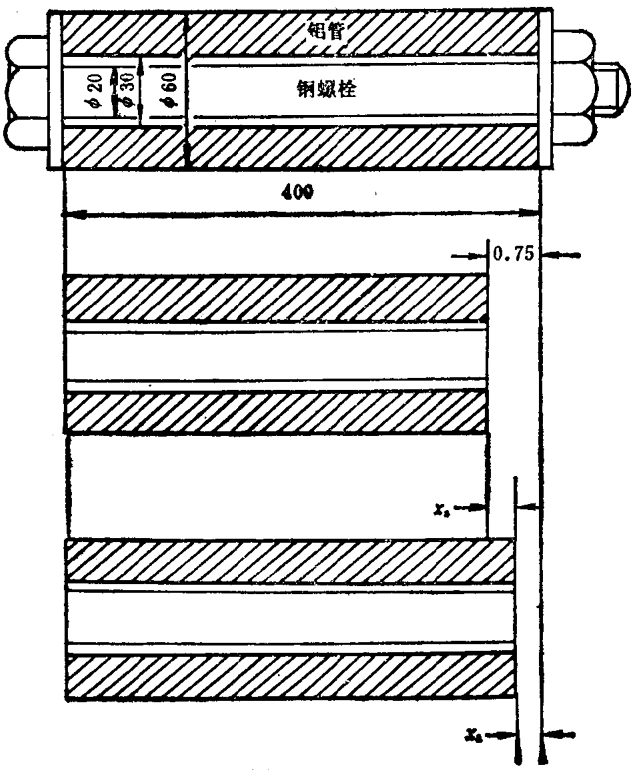

图1.10

= 400mm，代入上式得

$$400\varepsilon_s + 400\varepsilon_a = 0.75 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s + \varepsilon_a = 0.00188 \qquad [1.5]$$

根据虎克定律

$$(\text{应变}) = \frac{(\text{应力})}{E}$$

于是对于钢螺栓

$$\varepsilon_s = \frac{\sigma_s}{E_s}$$

对于铝管

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_a}{E_a}$$

将ε_s和ε_a的表达式代入式〔1.5〕，得

$$\frac{\sigma_s}{E_s} + \frac{\sigma_a}{E_a} = 0.00188 \qquad [1.6]$$

我们已知弹性模量

$$E_s = 207\text{GN/m}^2 = 207 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$$

$$E_a = 75\text{GN/m}^2 = 75 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$$

将这些值代入式〔1.6〕，得

$$\frac{\sigma_s}{207\times10^3}+\frac{\sigma_a}{75\times10^3}=0.00188$$

$$\frac{\sigma_s}{207}+\frac{\sigma_a}{75}=1.88 \qquad 〔1.7〕$$

另外，当螺母旋紧后

（钢螺栓的载荷）＝（铝管的载荷）

即 $$F_s=F_a \qquad 〔1.8〕$$

因为 （载荷）＝（横截面面积）×（应力）

因此对于钢螺栓 $F_s=A_s\sigma_s$

钢螺栓的横截面面积

$$A_s=\frac{\pi}{4}\times20^2=314\ \text{mm}^2$$

代入上式得 $F_s=314\sigma_s$

对于铝管 $F_a=A_a\sigma_a$

铝管的横截面面积

$$A_a=\frac{\pi}{4}\times60^2-\frac{\pi}{4}\times30^2=2120\ \text{mm}^2$$

因此铝管的载荷 $F_a=2120\sigma_s$

现在将F_s和F_a的表达式代入式〔1.8〕，得

$$314\sigma_s=2120\sigma_a$$

$$\sigma_s=6.75\sigma_a \qquad 〔1.9〕$$

将式〔1.9〕代入式〔1.7〕，我们有

$$\frac{6.75\sigma_a}{207}+\frac{\sigma_a}{75}=1.88$$

由上式 $\sigma_a=41\ \text{N/mm}^2$

由图1.10可知铝管受压，上面求得的$\sigma_a=41\text{MN/m}^2$是压应力。将σ_a的值代入式〔1.9〕，得

$$\sigma_s=6.75\times41=277\ \text{MN/m}^2$$

由图1.10可知钢螺栓受拉，上面求得的σ_s是拉应力。

最后求铝管的长度变化，根据虎克定律我们有

$$\varepsilon_a=\frac{\sigma_a}{E_a}$$

代入$\sigma_a=41\text{N/mm}^2$和$E_a=75\times10^3\text{N/mm}^2$，得

$$\varepsilon_a=\frac{41}{75\times10^3}$$

$$=0.547\times10^{-3}$$

我们还知道 $x_a=\varepsilon_a l_a$

代入 $\varepsilon_a=0.547\times10^{-3}$和$l_a=400$ mm，得

$$x_a=0.547\times10^3\times400$$

$$=0.219\ \text{mm}$$