

斜轧中多余剪应变的测定和 多余度系数的计算

〔英〕Z. Blazynski

1. 多余度系数的概念

金属压力加工成型过程中都包含两类变形。一类是改变金属形状所要求的变形，称为必要应变。必要应变是在外力直接作用下由均匀变形产生，故又叫均匀应变，它仅取决于设备的几何因素（工具形状，机器的调整量），而与加工材料的性能无关。另一类是对形状改变并不必要的变形，称为多余应变。多余应变是由不均匀变形产生。多余应变将导致材料内部产生各种形式的附加应力，从而对工作负荷，力矩大小和变形的剧烈程度产生影响。用解析法计算力能参数时，通常都是根据加工过程中的必要变形进行计算，即只考虑均匀应变，而没有考虑多余应变的影响。因此对多余应变在加工过程中的影响程度，即所谓应变的多余度进行测定和研究很有必要。它对于力能参数大小的估计，成型工具特性的分析，最佳加工方式的选择等都是十分重要的。

显然，需要这样一个参数，该参数能在给定物理条件下，确定出多余度效应的特征及其变化规律。此外还可将这个参数引进加工系统中。为此采用了“多余度系数”这个概念，用它来反映多余度变形的影响程度，并作为衡量变形效率的一个尺度。

多余度系数可以通过两种途径进行研究。一种是使多余度系数和产生的总应变相联系；一种是使多余系数和设备产生的有效工作应力，如拉伸或压缩应力发生联系。因此金属成型过程的力学分析能够以应力和应变两种不同的强度形式进行变换。应力和应变所对应的多余度系数定义为：

$$\sigma = \Phi \sigma_0 \quad (1)$$

$$\varepsilon_T = \phi \varepsilon_H \quad (2)$$

Φ 为应力多余度系数，根据（1）式，它提供了一种间接测定在所研究系统中的有效屈服应力 Y 的方法。 ϕ 为应变多余度系数，由（2）式可以直接测定有效屈服应力 Y 。

在没有多余度效应时，应力 σ 与总应变 ε_T 在数值上应分别与均匀应力 σ_0 和均匀应变 ε_H 相等，这时 $\Phi = \phi = 1$ 。实际上，即使在理想情况下，也不可能存在两个系数相等的情形。在一些文献中把这两个系数分别看成“多余功”和“多余变形系数”，我们可以根据这个概念去进一步理解两个系数的物理意义。

为了便于量度实际的总变形，这里再引入总综合应变这一概念。总综合应变与个别外力及外力的方向无关，其作用效果与实际变形产生的作用效果相同。

在金属成型过程中，当弹性变形小到可以忽略不计时，等效的塑性应变增量都可以用以下张量符号形式的公式表示

$$d\epsilon_T = \sqrt{\frac{2}{3}} (d\epsilon_{11}d\epsilon_{11}) \tag{3}$$

将上式展开为只给出均匀应变的各项

$$d\epsilon_H = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(d\epsilon_x - d\epsilon_y)^2 + (d\epsilon_y - d\epsilon_z)^2 + (d\epsilon_z - d\epsilon_x)^2} \tag{4}$$

在很多的实际加工工序中，应变增量坐标轴产生旋转的情形是不存在的，即使有一点也是极其微小而可以忽略的。如线材与管材的拉拔与挤压，带材的轧制。在这些工序中应变的迹线明显并易于确定。由（4）式直接积分得

$$\epsilon_H = \sqrt{\frac{2}{3}} (\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_z^2) \tag{5}$$

对于上面所提到的那些加工工序和一些轴对称加工形式，总综合应变可由下式确定

$$\epsilon_T = \sqrt{\frac{2}{3} \left[\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 + \epsilon_z^2 + \frac{1}{2} (\epsilon_r^2 + \epsilon_c^2 + \epsilon_t^2) \right]} \tag{6}$$

式中 ϵ_1 、 ϵ_r 和 ϵ_s 分别表示轴向、径向和周向的非均匀多余应变。

（4）、（5）、（6）式可以与（2）式联立求解，计算出应变多余度系数 ϕ 值。或者由已知 ϕ 值求综合应变 ϵ_T 从合理的工具设计观点看，（4）式特别重要。

2. 斜轧时多余剪应变的产生与类型

任何旋转加工过程都存在三种多余剪应变，即1)纵向多余剪应变，2)周向多余剪应变，3)由于扭转而引起的多余剪应变。

纵向剪应变是由于作用在坯料上两个方向相反的力引起。一个是轧辊作用于坯料表面上的力在轧制线方向上的纵向分量。另一个是顶头作用在内孔上的、与轧制方向相反的纵向力。这两个方向相反的纵向力产生的轴向力矩将引起纵向剪切变形。

周向剪应变的原因目前尚无定论。一种解释认为，斜轧时的坯料可看成是由无限多的同心圆柱壳体组成，轧制时每层壳体中产生的周向剪切应力是不均匀的，因此每层壳体之间要相对产生错移，从而产生周向剪切变形，霍姆奎斯特 (Holmgvist) 针对二辊穿孔系统的情况作了另一种解释 (图1)。这个解释也可以推广到三辊系统。

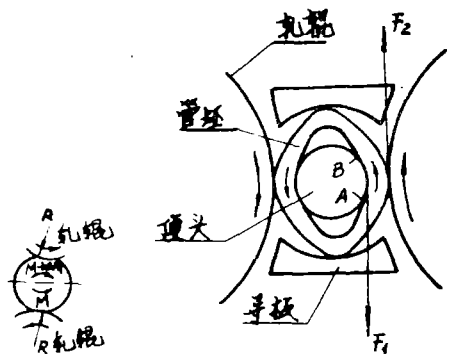


图1 多余剪应变产生的原因

a -- 横断面上的不平衡力矩

b -- 周向剪应变

二辊斜轧时坯料在变形区内形成椭圆,三辊斜轧时则形成三角形,这是由于轧辊与顶头组成的孔型特点所决定。从二辊穿孔变形区横断面图(图1b)可以看出,顶头在AB弧部分形成的是一个“凸起”孔型,上下圆弧与导板则组成了一个“凹槽”,金属在轧辊与顶头的压力下强迫延伸,顶头凸起的AB部分力图阻止金属流动,在内表面产生一个摩擦阻力 F_1 。显然,金属将向阻力较小的凹槽部分胀出,形成椭圆。顶头产生的阻力 F_1 只有靠轧辊与坯料表面产生的摩擦拉力 F_2 来克服。 F_1 与 F_2 形成一个力矩,这个力矩造成了坯料的周向剪切变形。当轧制线与轧机中心线没有准时,不仅能直接影响轧件的咬入,而且会间接对剪切效应的大小产生作用。

坯料的扭转变形主要是由轧辊表面切向速度不一致引起的。穿孔时孔型任一部位所需之能量都是通过轧辊传递给轧件的。轧辊对孔型任一横断面作用之合力严格说来是不稳定的。这些合力将形成轴向力矩(图16)。轴向力矩将随工具直径的变化而变化,同时使轧制的圆周速度变化。由于穿孔顶头的作用,使扭矩急剧增大。为了使坯料既产生变形又产生回转,沿着孔型长度上的每一部分都必须供给钢坯能量。一般情况下顶杆或芯棒是自由转动的,故它对工件作用的力矩为零。

3. 多余剪应变的测定

以 α 、 β 、 γ 分别代表纵向剪切角、周向剪切角和扭转剪切角。三个多余应变可定义为

$$\text{纵向多余应变} \quad \varepsilon = \cot \alpha \quad (7)$$

$$\text{周向多余应变} \quad \varepsilon = \frac{\beta \gamma}{h} \quad (8)$$

$$\text{扭转引起的应变} \quad \varepsilon = \text{tg} \gamma \quad (9)$$

实验坯料可用内部带有坐标网格的铅质管坯或蜡质管坯,也可采用带着色层的蜡质管坯。图2表示的两种蜡质管坯,一种掺有饼状夹层,用来确定纵向剪切应变,另一种掺有纵向条状夹层,用来确定扭转和周向剪切应变。

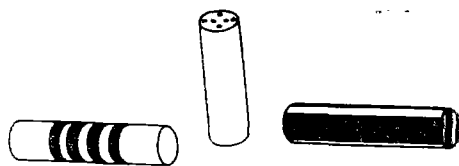


图2 着色夹层管坯

为了测出三个剪应变的数值,在试件尚未全部轧出之前,停止轧制,取出试件,沿着纵向与横向切出纵切片与横切片。通过对切片上面网格或着色层位移的测量,计算出相应的剪切角。

图3所示为实心管坯在穿成荒管过程中,原来垂直横断面上之标记被扭曲的情形。其偏转量表示纵向剪切角。直接量出的这个角度可代入(5)式,得到纵向多余应变的值。

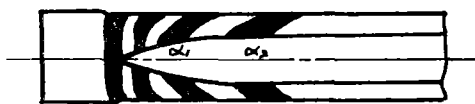


图3 纵向多余应变的测量

均匀应变与多余应变对纵向纤维的形状和位置产生的综合效应表示在图4上。各种

应变影响的顺序是独立进行的。纵向多余剪切应变的作用是使纤维的截面积缩小，同时两相邻纤维之间发生相对的轴向位移。扭转引起的剪应变可以根据横断面上的记号的移动位置来测定，而周向剪应变则要根据这个测定值和纵向应变的值来导出。

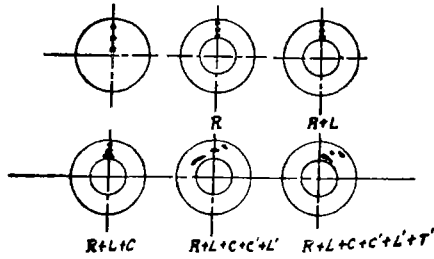


图4 斜轧穿孔时的均匀应变与多余应变

- | | |
|---------------|------------|
| R——径向应变 | L——纵向应变 |
| C——切向应变 | C'——周向多余应变 |
| T'——扭转引起的多余应变 | L'——纵向多余应变 |

由扭转引起的剪应变按图5所示的几何关系确定。

$$\epsilon_t = \text{tgy} = \frac{\gamma \theta}{L} \tag{9, a}$$

根据坯料侧面上轧前所画基准线在轧后的变化测出 γ 角。 θ 值是相距为L的两相邻断

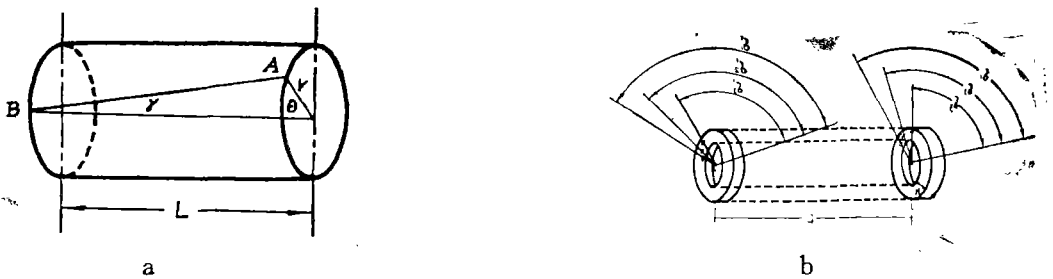


图5 在扭转作用下剪应变的确定

面上同一根纤维扭转前后所对应的中心线夹角，由下式计算

$$\theta = \frac{1}{3} \left[(\delta_1' + \delta_1) + (\delta_2' - \delta_2) + \delta_3' - \delta_3 \right] \tag{10}$$

半径r取这两个相邻断面的半径 r_1 与 r_2 之算术平均值。

可以看出，断面基准线（纤维线）产生的总转角是三个剪应变位移的综合结果。所以周向剪应变可根据扭转剪应变与纵向剪应变之间的关系来确定。

对图6进行研究,当附加扭转变形后,假定没有产生纵向位移,则纤维线的两个端点在相邻二断面上的径向线分别为AB与CD,但实际上存在纵向位移。设外表面上的点相对内表面纵向位移了X,即外纤维扭转后实际位置应在F点。将F点平移到所研究断面的G点上。通过G点的径向线DE和径向线CD之间形成的夹角 Θ ,可以看成是由于扭转剪应变和纵向剪应变的共同作用产生的等效角位移。该角等于单位长度上的扭转角 θ (以弧度表示)与纵向位移量X之乘积

$$\Theta = \frac{\theta X}{L} \quad (11)$$

用 Δh 表示内侧纤维之间的径向距离,则纵向剪切角按(7)式的定义为

$$\text{Cot} \alpha = \frac{X}{\Delta h} \quad (12)$$

这样一来对于任一断面上由于扭转应变和纵向应变共同作用产生的等效角位移 Θ 值都可以确定。从三个剪应变共同作用下所产生的总转角 $\Delta\theta$ 中减去 Θ ,剩下的即为周向剪切角

$$\beta = \Delta\theta - \Theta \quad (13)$$

将 β 值代入(8)式便求出周向多余应变。

4. 多余度系数的计算

由(2)式所确定的总应变多余度系数 ϕ ,适用于任何斜轧工序。该式为

$$\varepsilon_T = \phi \varepsilon_H$$

式中综合应变 ε_T 与均匀应变 ε_H 分别由(6)式和(4)式给定。各个多余剪切应变与均匀应变之间的关系可以很容易地从更一般形式的方程中推导出。实际上常常有可能测定出系统中各个剪切应变对总多余度值的影响,从而可以引出多余系数各分量的重要概念。与三个多余应变相对应的三个多余系数分量为

$$\text{周向多余应变} \quad \varepsilon_H \phi_c = \varepsilon_c \quad (14)$$

$$\text{纵向多余应变} \quad \varepsilon_H \phi_l = \varepsilon_l \quad (15)$$

$$\text{扭转引起的多余应变} \quad \varepsilon_H \phi_r = \varepsilon_r \quad (16)$$

各种多余应变的值由公式(7)、(8)、(9)给出,而所需的均匀应变值应根据具体的工序来确定。

在二辊斜轧穿孔机正常操作条件下,当应变不大时,可以假定穿孔管坯平均直径

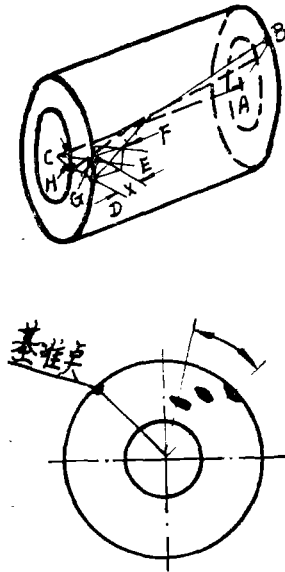


图6 扭转作用下周向剪切角的确定

D 在整个工序中大致不变, 即 $D_0 = D = \text{常数}$ (图7)。

径向应变反映壁厚变化, 其增量为

$$d\varepsilon_r = \frac{dh}{h} \quad (17)$$

纵向应变反映横断面沿孔型长度方向的变化。若设任意横切面中管坯和荒管基本保持圆形, 则在任一瞬间的横断面面积为

$$A = \pi h (D_0 - h), \quad dA = \pi (D_0 - 2h) dh,$$

故纵向应变增量由下式给出

$$d\varepsilon_x = - \frac{dA}{A} = - \frac{D_0 - 2h}{h (D_0 - h)} dh \quad (18)$$

平均周长 $S = 2\pi (D_0 - h)$; $dS = -2\pi dh$, 由此, 周向应变增量

$$d\varepsilon_z = \frac{dS}{S} = - \frac{dh}{D_0 - h} \quad (19)$$

将三个应变增量代入 (4) 式, 可以得到在忽略产生剪切应变条件下的均匀应变增量

$$d\varepsilon_{II} = \frac{2\sqrt{3}}{3} \left[\frac{3h^2 - 3D_0h + D_0^2}{h^2 (D_0 - h)^2} \right]^{\frac{1}{2}} dh \quad (20)$$

壁厚 h 在实心坯的 $D/2$ 和荒管的 h_1 之间变化, 将 (20) 式积分得

$$\varepsilon_{II} = \ln \left[\left(1 - \frac{8BC}{(C-3B)(C-B)} \right) \sqrt{\frac{1}{3}} \left(\frac{D_0}{C - D_0 - \sqrt{3}B} \right) \right]^2 \quad (21)$$

式中 $B = 2h_1 - D_0$; $C = (3h_1^2 - 3D_0h_1 + D_0^2)^{\frac{1}{2}} + D_0$

在容许使用方程 (5) 的条件下, 可将 ε_x 、 ε_r 、 ε_z 代入方程 (5) 中去计算 ε_{II} 、 ε_x 、 ε_r 、 ε_z 值, 由公式 (17)、(18)、(19) 直接积分得到, 即

$$\varepsilon_r = \ln \left(\frac{C_0}{2h_1} \right) \quad (22)$$

$$\varepsilon_x = \ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \quad (23)$$

$$\varepsilon_z = - \ln \left[\frac{2(D_0 - h_1)}{D_0} \right] \quad (24)$$

对于二次穿孔, 由于顶头直径 d 实际上也是变量, 故 D 与 h 之间的关系复杂, 特别

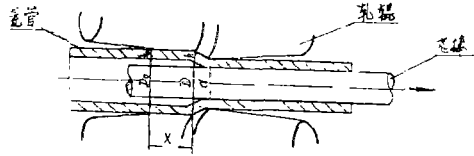


图7 二辊斜轧穿孔时的变形区

是在非穿孔区。为了导出应变公式，可以建立三个应变分量在孔型长度方向与轴向距离 X 之间的关系式。但这样导出的应变公式相当复杂，没有多大实用价值。由于在再穿孔期间荒管的周长几乎保持不变， $d + h = \text{常数}$ ，故假设

$$d\epsilon_x = -\frac{dh}{h} \tag{25}$$

$$d\epsilon_y = \frac{dh}{h} \tag{26}$$

$$d\epsilon_z = 0 \tag{27}$$

所以总均匀应变为

$$\epsilon_H = 2\sqrt{2} \ln\left(\frac{h}{h_1}\right) \tag{28}$$

在阿塞尔三辊延伸工序中，荒管壁厚和外径均发生变化。此时顶头起着圆柱形芯棒的作用，故荒管内径保持不变。由于荒管的外形为圆形，横断面面积 $A = \pi h(D - h)$ ，周长 $S = 2\pi(d - h)$ 。从图8可知，在任一时刻， $D = d + 2h$ ，所以应变变量可以仅通过 h 来表示。

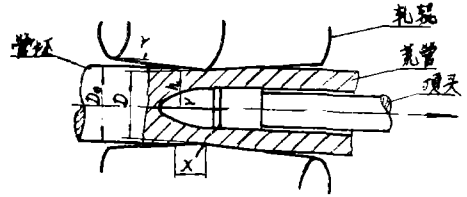


图8 阿塞尔延伸机的变形区

径向应变增量的定义与穿孔工序相同

$$d\epsilon_r = -\frac{dh}{h} \tag{29}$$

纵向应变增量

$$d\epsilon_z = \frac{d + 2h}{(d + h)h} dh \tag{30}$$

周向应变增量

$$d\epsilon_\theta = -\frac{dh}{d + h} \tag{31}$$

代入(4)式，得均匀应变增量

$$d\epsilon_H = \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{3h^2 + 3hd + d^2}{(d + h)^2 h} \right]^{\frac{1}{2}} dh \tag{32}$$

厚度 h 在 h_0 （毛管的）与 h_1 （荒管的）之间变化，代入积分后得

$$\epsilon_H = \ln \left[\frac{(1 + 3B_1)(1 + B_1)(1 - 3B_0)(1 - B_0)}{(1 - 3B_1)(1 + 3B_0)(1 - 3B)(1 + B_0)} \right] \sqrt{\frac{1}{3}} \frac{(1 + E_0)C_1}{(1 + E_1)C_0} \tag{33}$$

J—55 管 坯 的 试 制 *

王 书 智

(鞍钢钢研所)

鞍钢二十多年来一直按部颁标准生产石油管。由于标准的水平低,生产工艺比较落后,产品质量一直较差,满足不了使用要求。为适应石油工业迅速发展的需要,从1981年开始按API标准试生产J—55平式油管。目前,这种油管的生产工艺已基本掌握,产品质量可以达到API标准要求。本文仅对生产J—55平式油管用的管坯试制情况作简要介绍。

一、J—55油管对管坯质量的要求

油管的管体轧制在140自动轧管机组上进行。管坯的穿孔工序由二辊斜轧穿

孔机完成。众所周知,在二辊斜轧穿孔过程中,变形金属处于极其复杂的交变应力状态,在荒管上很容易产生各种缺陷。因此,二辊斜轧穿孔过程对管坯质量要求特别严格。如管坯表面有裂纹、折迭、发纹、结疤等缺陷,则必须用风铲或砂轮清除,然后按标准检查验收。

管坯的内部质量要通过低倍和高倍组织检验。管坯试样横断面经酸浸后的低倍组织上不得有白点、缩孔残余、气泡、分层、翻皮、裂缝和夹杂等缺陷。一般疏松、中心疏松和偏析均不得大于3级。对于高倍组织,则要求氧化物和硫化物夹杂各不得大于3级。此外,管坯的化学成份偏析和机械性能都要在相当于钢锭头部的管坯

* 参加试制工作的有:刘维先、吴振球、洪声超、相国友以及三炼钢厂、二初轧厂、大型厂和质量处等有关同志。

式中

$$B = \frac{2h+d}{2(3h^2+3hd+d^2)^{\frac{1}{2}}} + d \quad (34)$$

$$C = \frac{Ed}{3(2h+d)} \quad (35)$$

$$E = \frac{3(2h+d)}{(3h^2+3hd+d^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (36)$$

也可以用(5)式计算。均匀应变的各分量可由(29)---(31)式分别积分得到,然后将得到的结果代入(5)式。这些分量为

上截取试样进行检验。对管坯的几何尺寸（如直径偏差和弯曲度等）也有严格规定。

二、试制工艺

1. 钢的冶炼和浇注

试制的J—55管坯钢用150吨氧气顶吹转炉冶炼。为了保证钢的质量，对冶炼用的原材料以及各工序的生产技术操作都做了严格的规定。使用的铁水要求含硫量不大于0.030%。为了避免从废钢中带入有害元素，J—55管坯钢冶炼时只使用鞍钢内部废钢（多为轧钢厂的切头切尾），经过挑选后入炉。转炉吹炼时，氧气工作压力为8~9公斤/厘米²。终点时钢中碳控制在0.41~0.47%，钢水温度控制在1620~1640°C范围内。钢的脱氧完全在钢包中进行。钢水出至1/3时开始加入脱氧剂，加入顺序为：铝块—矽锰—矽铁，钢水出至2/3时全部脱氧剂加完。冶炼低磷钢并在包中脱氧和调成分时需要限制钢水和转炉渣接触，以防止钢中回磷。为此，J—55管坯钢在转炉吹炼完毕出钢时，采用了挡渣球挡住熔渣，以减少熔渣流进钢包。挡渣球

的比重为钢水比重一半左右，直径为270毫米，在钢水出至1/3~1/2时对准出钢口加入炉内。初步试用，可以挡住80%左右的熔渣。

为了提高J—55管坯钢的质量，出钢后，用单孔整体打结喷枪，把氩气顶吹入钢包内将钢水进行搅拌。氩气工作压力为3~4公斤/厘米²，消耗量为0.015~0.025米³/吨钢。经对比试验，吹氩后钢中非金属夹杂物总量较吹氩减少了40~60%。

J—55管坯钢采用上大下小的8.3吨钢锭模进行下注。模子的帽部挂绝热板。浇注水口为40毫米。浇注速度：本体为10~16分钟，帽部不大于4分钟。浇注用的保护渣采用吊包法加入，数量为每锭15公斤，如果在浇注过程中暴露钢液时需再补加。浇注完毕盖上保温剂。经1小时45分钟后脱模。

2. 初轧开坯

钢锭脱模后在热状态装入均热炉进行再加热。钢锭加热温度按炉温控制，最高炉温不得超过1380°C。加热时间根据钢锭装炉前的温度而定。例如，装炉前800°C的钢锭，加热时间为3小时25分钟

$$\varepsilon_3 = -\ln \left[\frac{(D - h_0) h_0}{(D_1 - h_1) h_1} \right] \quad (37)$$

$$\varepsilon_1 = \ln \left(\frac{h}{h_1} \right) \quad (38)$$

$$\varepsilon_2 = \ln \left[\frac{(D - h_1)}{(D_0 - h_c)} \right] \quad (39)$$

在联合穿——轧工序中，总的均匀应变可将(21)式与(33)式相加，或者将(25)式或与(37)式，(26)式与(38)式，(27)式与(39)式成对相加，然后将所求得的各项 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 应变分量代入(5)式，最后可求出 $\varepsilon_{\text{总}}$ 。