

## 双层卷焊管定径辊减壁区轧制压力及 芯棒轴向力的研究(续)

于恩林 吴 坚 赖明道  
(燕山大学)

用解析法求出了锥-柱形芯棒定径辊减壁区轧制压力、总轧制力及芯棒轴向力的计算公式。将计算结果与腰鼓形芯棒相应的结果进行了对比,从而发现了锥-柱形芯棒的优点,提出了提高锥-柱形芯棒使用稳定性的措施。

**关键词** 双层卷焊管 减壁区 芯棒

### ANALYSIS OF ROLLING PRESSURE IN WALL-THICKNESS REDUCTION ZONE OF SIZING-ROLL AND OF MANDREL AXIAL FORCE WITH RESPECT TO DOUBLE-COIL-WELDED TUBES ( II )

Yu Enlin Wu Jian Lai Mingdao  
(Yanshan University)

The calculation formulas are derived with analytical method for rolling pressure, total rolling force and mandrel axial force in wall thinning zone of sizing rolls and a conic-cylindrical mandrel. The calculation result is compared with that relate to the crowned mandrel, which results in the discovery of the advantages of the conic-cylindrical mandrel and the measures proposed to steadily apply conic-cylindrical mandrel.

**Key words** double-coil-welded tube wall thinning zone mandrel

#### 1 前言

双层卷焊管使用的芯棒主要有两种形式,一种是腰鼓形芯棒,另一种是锥-柱形芯棒。前者的主要优点是易于调整,即稳定性好,但加工困难;而后者的优点是加工容易,但由于圆柱段长度不能太大,故调整困难,即使用稳定性差。我们在前一篇文章中曾对腰鼓形芯棒进行了理论分析。本文仍用解析法,并将减壁区的管筒处理为单层管,对锥-柱形芯棒进行理论分析,揭示其特点。

#### 2 锥-柱形芯棒减壁区单位轧制压力分布的确定

锥-柱形芯棒定径时变形区如图1所示。

$R_1$ ——轧辊孔型最小半径

$q_k$ 、 $q_0$ ——前、后张应力

$Q_1$ ——芯棒的轴向力

从减壁区取出一微单元如图2所示。

$P_1$ ——轧辊对轧件作用力

$P_2$ ——芯棒对轧件作用力

$\mu$ ——轧辊与轧件间摩擦系数

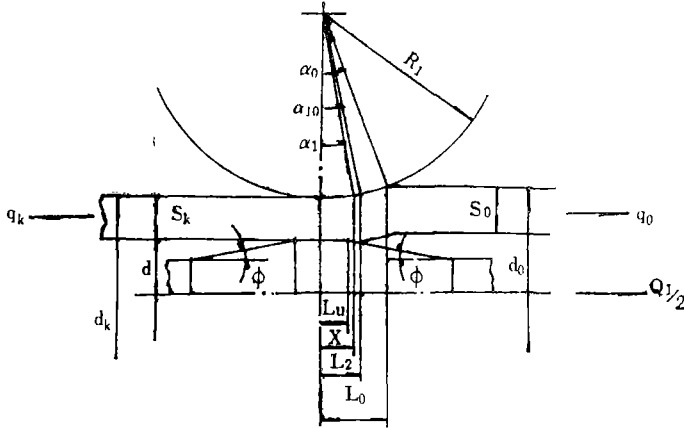


图1 锥-柱形芯棒定径图示

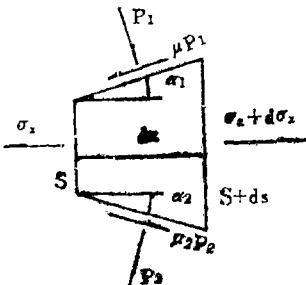


图2 微单元受力分析图示

$\mu_2$ ——芯棒与轧件间摩擦系数

按单元体的水平及铅直方向的平衡条件, 可得

$$d(S\sigma_x) + [tg\alpha_1 \mp \mu + (tg\alpha_2 + \mu_2)(1 \pm \mu tg\alpha_1)]P_1 dx = 0 \quad (1)$$

$$P_2 = \frac{1 \pm \mu tg\alpha_1}{1 - \mu_2 tg\alpha_2} P_1 \quad (2)$$

以上两式中, 后滑区取上边的符号, 前滑区取下边的符号。下面分别对锥形区和圆柱形区进行讨论。

### 2.1 锥形区

由图1的几何关系, 并注意  $\alpha_1$  很小, 可得

$$S = S_k + \frac{R_1}{2} \alpha_1^2 + R_1 tg\phi \alpha_1 - Lutg\phi \quad (3)$$

$$tg\alpha_2 = tg\phi \quad (4)$$

利用塑性条件(压应力为正)

$$\sigma_x = 2k - P_1 \quad (5)$$

将以上各式代入式(1), 并假设材料的强化与壁厚变化成反比, 则有

$$\frac{d\left(\frac{P_1}{2k}\right)}{\frac{P_1}{2k}} = R_1 d\alpha_1$$

$$\frac{(1 \pm \mu \mu_2 \pm \mu tg\phi)\alpha_1 + (\mu_2 \mp \mu + tg\phi)}{\frac{R_1}{2} \alpha_1^2 + R_1 tg\phi \alpha_1 + S_k - Lutg\phi}$$

$$(6)$$

$$\text{令 } a = 1 \pm \mu \mu_2 \pm \mu tg\phi$$

$$b = 2\frac{S_k}{R_1} - tg^2\phi - 2\frac{Lu}{R_1} tg\phi$$

$$c = 2(\mu_2 + tg\phi - atg\phi \mp \mu)$$

故有

$$\ln \frac{P_1}{2k} = a \ln [(\alpha_1 + tg\phi)^2 + b] + c \int$$

$$\frac{d\alpha_1}{(\alpha_1 + tg\phi)^2 + b} \quad (7)$$

b为不同值时, 上式的解也不同。

(1) 当  $b > 0$  时

对式(7)求解, 并利用边界条件及连续性条件可得

$$P_1 = (2k_0 - q_0) \left[ \frac{R_1}{2} \cdot \frac{(\alpha_1 + tg\phi)^2 + b}{S_0} \right]^{a-1}$$

$$e^{\frac{c}{\sqrt{b}} \left( \operatorname{arctg} \frac{(\alpha_1 + \operatorname{tg} \phi)}{\sqrt{b}} - \operatorname{arctg} \frac{\alpha_{10} + \operatorname{tg} \phi}{\sqrt{b}} \right)} \quad (2) \text{ 当 } b=0 \text{ 时}$$

$$( \text{后滑区} ) \quad (8)$$

$$P_1 = 2(k_0 - q_0) \left[ \frac{R_1}{2S_0} \cdot (\alpha_1 + \operatorname{tg} \phi)^2 \right]^{n-1} \cdot e^{c \cdot \left( \frac{1}{\alpha_{10} + \operatorname{tg} \phi} - \frac{1}{\alpha_1 + \operatorname{tg} \phi} \right)} \quad ( \text{后滑区} )$$

$$(10)$$

$$P_1 = P_y \left[ \frac{R_1}{2} \cdot \frac{(\alpha_1 + \operatorname{tg} \phi)^2 + b}{S_y} \right]^{n-1} \cdot e^{\frac{c}{\sqrt{b}} \left( \operatorname{arctg} \frac{\alpha_1 + \operatorname{tg} \phi}{\sqrt{b}} - \operatorname{arctg} \frac{\gamma + \operatorname{tg} \phi}{\sqrt{b}} \right)} \quad ( \text{前滑区} )$$

$$(9)$$

$$P_1 = P_y \left[ \frac{R_1}{2} \cdot \frac{(\alpha_1 + \operatorname{tg} \phi)^2}{S_y} \right]^{n-1} \cdot e^{c \cdot \left( \frac{1}{\gamma + \operatorname{tg} \phi} - \frac{1}{\alpha_1 + \operatorname{tg} \phi} \right)} \quad ( \text{前滑区} )$$

$$(11)$$

式中  $P_y$  可由式(8)当  $\alpha_1 = \gamma$  时求得,  $S_y$  为中性角处的壁厚。

式中  $P_y$  可由式(10)当  $\alpha_1 = \gamma$  时求得。

(3) 当  $b < 0$  时

$$P_1 = (2k_0 - q_0) \times \left[ \frac{R_1}{2} \cdot \frac{(\alpha_1 + \operatorname{tg} \phi)^2 + b}{S_0} \right]^{n-1} \cdot \left[ \frac{(\alpha_1 + \operatorname{tg} \phi - \sqrt{-b})(\alpha_{10} + \operatorname{tg} \phi + \sqrt{-b})}{(\alpha_1 + \operatorname{tg} \phi + \sqrt{-b})(\alpha_{10} + \operatorname{tg} \phi - \sqrt{-b})} \right]^{\frac{c}{2\sqrt{-b}}} \quad ( \text{后滑区} )$$

$$(12)$$

$$P_1 = P_y \times \left[ \frac{R_1}{2} \cdot \frac{(\alpha_1 + \operatorname{tg} \phi)^2 + b}{S_y} \right]^{n-1} \cdot \left[ \frac{(\alpha_1 + \operatorname{tg} \phi - \sqrt{-b})(\gamma + \operatorname{tg} \phi + \sqrt{-b})}{(\alpha_1 + \operatorname{tg} \phi + \sqrt{-b})(\gamma + \operatorname{tg} \phi - \sqrt{-b})} \right]^{\frac{c}{2\sqrt{-b}}} \quad ( \text{前滑区} )$$

$$(13)$$

式中  $P_y$  可由式(12)当  $\alpha_1 = \gamma$  时求得。

以上各式的中性角  $\gamma$ , 可在前后滑区的轧制压力在中性角处相等的条件下求出。

### 2.2 圆柱区

在圆柱区, 有

$$S = S_K + \frac{R_1}{2} \alpha_1^2 \quad (14)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = 0 \quad (15)$$

故得

$$P_1 = (2k_K - q_K) \left( \frac{R_1}{2} \alpha_1^2 + S_K \right)^{\beta_6 - 1} \cdot e^{\beta_6 \operatorname{arctg} \frac{\alpha_1}{\beta_7}} \quad ( \text{前滑区} ) \quad (16)$$

$$P_1 = P_y \left( \frac{R_1}{2} \alpha_1^2 + S_K \right)^{\beta_6 - 1} \cdot e^{\beta_6 \left( \operatorname{arctg} \frac{\alpha_1}{\beta_7} - \operatorname{arctg} \frac{\gamma}{\beta_7} \right)} \quad ( \text{后滑区} ) \quad (17)$$

式中  $P_y$  可由式(16)当  $\alpha_1 = \gamma$  时求得, 其

中  $\beta_6 = 1 \pm \mu \mu_2$

$$\beta_6 = (\mu_2 \mp \mu) \sqrt{\frac{2R_1}{S_K}}$$

$$\beta_7 = \sqrt{\frac{2S_K}{R_1}}$$

以上诸式符号选取原则同前。

### 3 锥-柱形芯棒减壁区总轧制力的确定

设减壁区平均单位轧制压力为  $\bar{P}_1$ ，减壁区轧件与轧辊的接触面积的水平投影为  $F_1$ ，则总轧制力为

$$P_1 = F_1 \bar{P}_1 \quad (18)$$

式中

$$\bar{P}_1 = \frac{1}{\alpha_{10}} \left[ \int_0^\gamma P_{1前} d\alpha_1 + \int_\gamma^{\alpha_{10}} P_{1后} d\alpha_1 \right]$$

由图1的几何关系，可得

$$\alpha_{10} = \arcsin \frac{L_2}{R_1} \quad (19)$$

式中  $L_2 = \cos \phi$

$$\sqrt{(R_1 + S_0)^2 - (R_1 + S_K - L_u \operatorname{tg} \phi)^2} \cos^2 \phi - 0.5(R_1 + S_K - L_u \operatorname{tg} \phi) \sin 2\phi$$

$F_1$ 的表达式与前一篇文章相同。

### 4 锥-柱形芯棒轴向拉力的确定

芯棒受力情况示于图3。芯棒径向压力由式(2)确定。锥形区芯棒的轴向拉力  $Q'_1$ 。则由(20)式确定

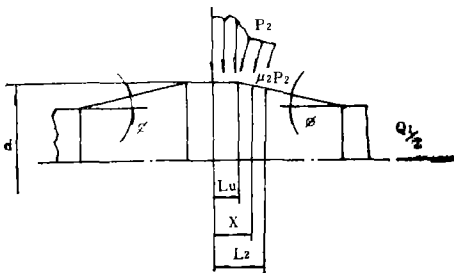


图3 锥-柱形芯棒受力图示

$$Q'_1 = 2\pi(\operatorname{tg} \phi + \mu_2) R_1 \int_{L_u/R_1}^{L_2/R_1} \left[ \frac{d}{2} - (R_1 \alpha_1 - L_u) \operatorname{tg} \phi \right] P_2 d\alpha_1 \quad (20)$$

圆柱形区芯棒轴向拉力  $Q''_1$  由(21)式确定。

$$Q''_1 = \pi \mu_2 R_1 d \int_0^{L_u/R_1} P_2 d\alpha_1 \quad (21)$$

芯棒的总轴向拉力  $Q_1$  为

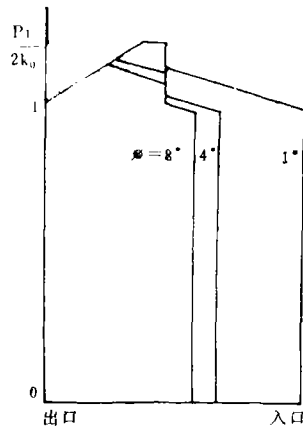
$$Q = Q'_1 + Q''_1 \quad (22)$$

实际计算时，要注意式中  $P_2$  所处的区域，即注意符号的选取。

### 5 理论结果的对比及分析

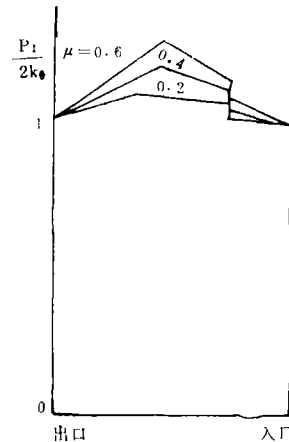
图4~图8示出了各参数对轧制压力分布的影响。

由于轧件与芯棒间的摩擦系数对轧制压力分布的影响非常小，所以图中未画出。由



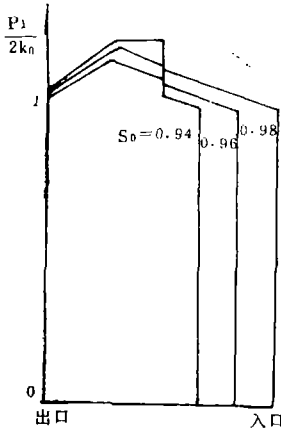
$R_1 = 61 \quad L_u = 0.5 \quad q_0 = q_k = 0 \quad \mu = 0.33 \quad \mu_2 = 0.1$   
 $S_0 = 0.94 \quad S_K = 0.92 \quad \sigma_s = 240 \text{MPa}$

图4  $\phi$ 对轧制压力的影响



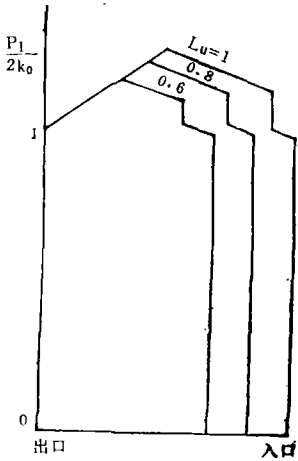
$R_1 = 61 \quad L_u = 0.5 \quad \phi = 6^\circ \quad q_0 = q_k = 0 \quad \mu_2 = 0.1$   
 $S_0 = 0.94 \quad \sigma_s = 240 \text{MPa} \quad S_K = 0.92$

图5  $\mu$ 对轧制压力的影响



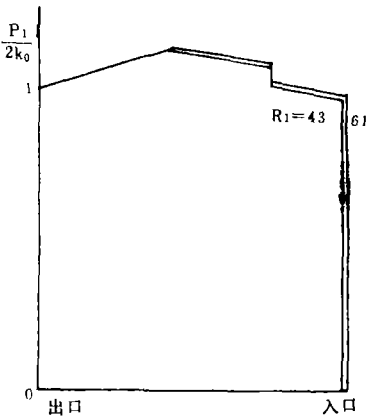
$R_1 = 61$   $L_n = 0.5$   $\mu = 0.33$   $\mu_2 = 0.1$   $S_k = 0.92$   
 $\phi = 6^\circ$   $q_0 = q_k = 0$   $\sigma_s = 240 \text{MPa}$

图6  $S_k$ 对轧制压力的影响



$R_1 = 61$   $S_k = 0.92$   $S_0 = 0.94$   $\mu = 0.33$   $\mu_2 = 0.1$   
 $\phi = 6^\circ$   $q_0 = q_k = 0$   $\sigma_s = 240 \text{MPa}$

图7  $L_n$ 对轧制压力的影响



$L_n = 0.5$   $\phi = 6^\circ$   $q_0 = q_k = 0$   $S_0 = 0.94$   
 $S_k = 0.92$   $\mu_2 = 0.1$   $\mu = 0.33$   $\sigma_s = 240 \text{MPa}$

图8  $R_1$ 对轧制压力的影响

图可见，在锥形与柱形的相交处，轧制压力有个突变值，这将导致芯棒在此部位的压力及摩擦力急剧增加，使芯棒的磨损加剧。

图9~图12示出了腰鼓形芯棒和锥-柱形芯棒计算结果的比较。

图中z代表锥-柱形芯棒，y代表腰鼓形芯棒。图中的基本参数为

$R_1 = 61$   $R_2 = 240$   $\mu = 0.33$   $\mu_2 = 0.1$   
 $S_k = 0.92$   $S_0 = 0.94$   $L_n = 0.5$   $\phi = 6^\circ$   
 $q_0 = q_k = 0$   $\sigma_s = 240 \text{MPa}$

由图可见，就所采用的原始数据而言，

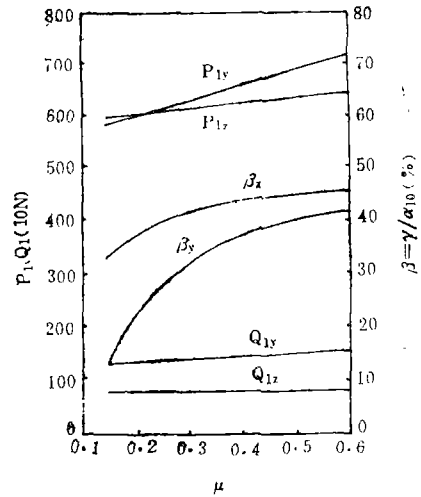


图9  $\mu$ 对两种芯棒影响的对比

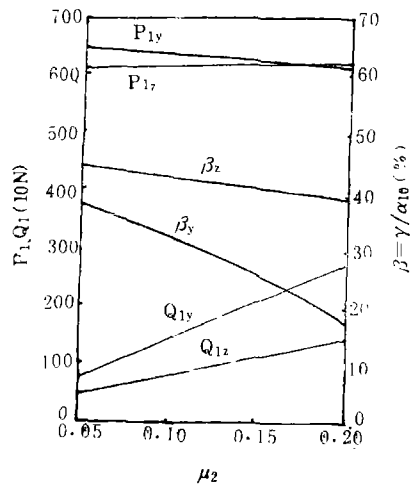


图10  $\mu_2$ 对两种芯棒影响的对比

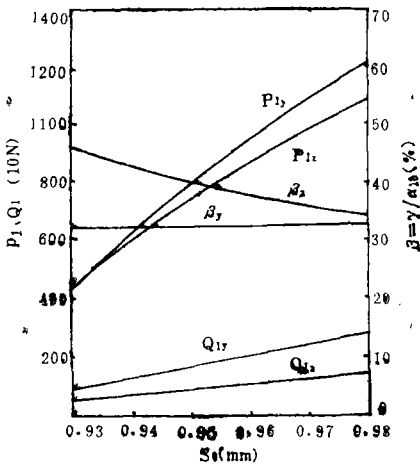


图11  $S_0$ 对两种芯棒影响的对比

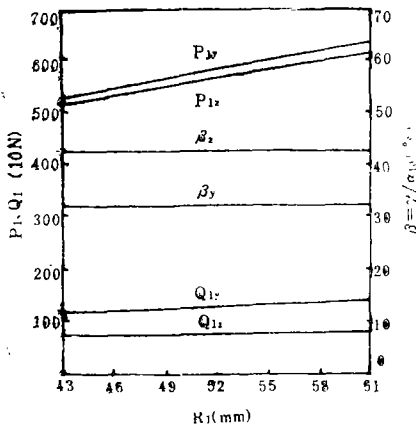
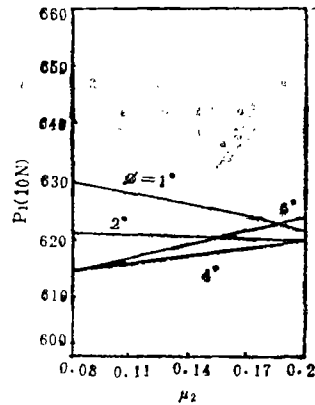


图12  $R_1$ 对两种芯棒影响的对比

腰鼓形芯棒的总轧制力和芯棒轴向拉力都比锥-柱形芯棒的大，而比值 $\beta$ 却比锥-柱形芯棒的小。由此看来，使用锥-柱形芯棒比

使用腰鼓形芯棒优越一些。但是，锥-柱形芯棒有两个缺点，一是其在锥-柱相交处磨损快；再是轴向定位困难。改善的办法，一是加大柱段长度，即增大 $L_u$ ，但随着 $L_u$ 的增大总轧制力及芯棒轴向拉力急剧增大，甚至于比腰鼓形芯棒变得更恶劣，得不偿失；二是减少锥形倾角 $\phi$ 。过去 $\phi$ 一般取值为 $10^\circ$ 。倾角对总轧制力的影响情况见图13。从图13



$L_u = 0.5$   $q_0 = q_k = 0$   $R_1 = 61$   $S_0 = 0.94$   
 $S_k = 0.92$   $\mu = 0.33$   $\sigma_s = 240\text{MPa}$

图13  $\mu_2 \phi$ 对轧制力的影响

可以看出，倾角对总轧制力的影响很小，并可选取一个最佳的倾角（图13中为 $2^\circ$ ），这样可以提高定位的稳定性，同时再合理地处理锥-柱形过渡区，即可减轻此部位的磨损，从而提高锥-柱形芯棒的使用寿命。

（收稿日期：1991—03—10）