

无芯棒拔管的拔制力和最佳模锥角^{*}

钟锡汉

蒋承纺

(天津大学冶金分校)

(青岛钢厂)

〔提要〕以往文献中介绍的无芯棒拔管的拔制力计算式,均忽略附加剪切变形所消耗的拔制力,计算结果低于实测值,以此估计的极限道次变形量则偏高。本文推导了考虑附加剪切变形的拔制力计算式和与此相应的极限道次变形量和最佳模半锥角估计方法。验证试验的结果表明,本文所提出的算式的计算结果与实际值较吻合。

极限道次变形量估计、最佳模半锥角确定和拔制力计算是拔管车间正确拟订拔制工艺所必需的。本文介绍了无芯棒拔管的试验研究结果。

1. 拔制力计算

1.1 拔制力的组成

如图1, 拔制力 T 为:

$$T = \sigma_d F_1 \quad (1)$$

式中: F_1 ——拔后管子断面积, mm^2 ;

σ_d ——拔制应力, kgf/mm^2 。

按能量法, 拔制力所做的功消耗于纯均匀变形、附加变形、克服外摩擦和后张力等方面。与此相应, 无芯棒拔管时的拔制应力由下述各部分组成:

$$\sigma_d = \sigma_i + \sigma_f + \sigma_{r,d} + \sigma_{o,t} \quad (2)$$

$$\sigma_f = \sigma_{f1} + \sigma_{f2} \quad (3)$$

$$\sigma_{r,d} = \sigma_{r,d1} + \sigma_{r,d2} + \sigma_{r,d3} \quad (4)$$

式中: σ_i ——纯均匀变形消耗的拔制应力, kgf/mm^2 ;

σ_f ——外摩擦消耗的拔制应力, kgf/mm^2 ;

σ_{f1} ——模孔圆锥区外摩擦消耗的拔制应力, kgf/mm^2 ;

$\sigma_{r,d}$ ——附加剪切变形消耗的拔制应力, kgf/mm^2 ;

$\sigma_{r,d1}$ ——变形区入口处管壁纵向弯折附加剪切变形消耗的拔制应力, kgf/mm^2 ;

$\sigma_{r,d2}$ ——变形区出口处管壁纵向弯折附加剪切变形消耗的拔制应力, kgf/mm^2 ;

$\sigma_{r,d3}$ ——管壁垂直弯折附加剪切变形消耗的拔制应力, kgf/mm^2 ;

$\sigma_{o,t}$ ——克服后张力所需的拔制应力, kgf/mm^2 。

1.2 纯均匀变形所需的拔制应力 σ_i

按文献^[1], 根据塑性变形所需的最小能量计算, 单位体积金属所消耗的纯塑性变形功 W 和纯均匀变形消耗拔制应力 σ_i 为:

^{*}本文作者还有郝喜树、朱成序、袁珊图、邓云森

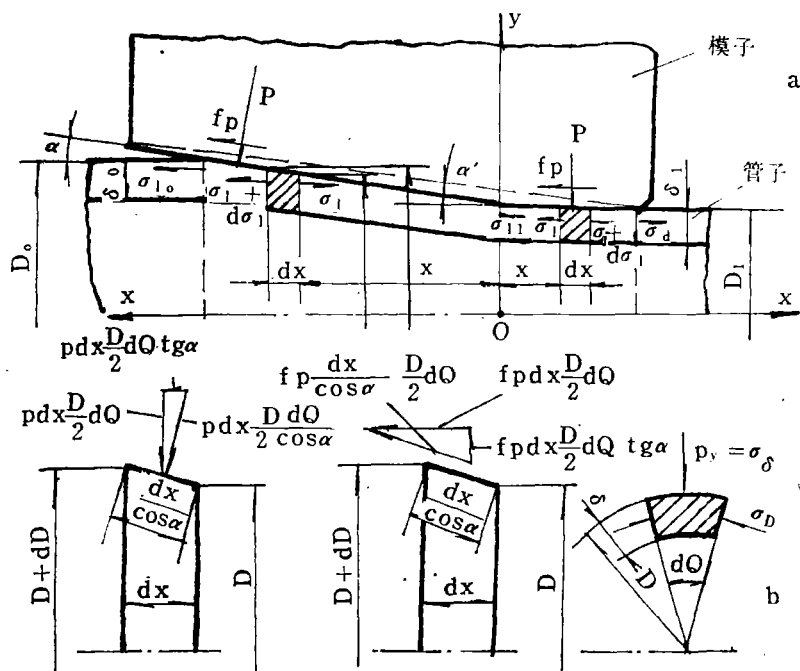


图1 无芯棒拔管变形区及作用力图

a—纵剖面, b—横剖面

$$W = \sigma_1 = \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} = m\sigma_s \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_1 \epsilon_2} \quad (5)$$

式中: $\bar{\sigma}$ ——等效应力, $\bar{\sigma} = m\sigma_s$, kgf/mm²;

$\bar{\epsilon}$ ——等效应变, $\bar{\epsilon} = \sqrt{\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_1 \epsilon_2}$;

σ_s ——工件金属的屈服强度, kgf/mm²;

m ——考虑中间主应力影响的系数:

$$m = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_s} = \frac{2}{\sqrt{3 + \mu_L^2}}$$

$$\mu_L = (2\sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_1) / (\sigma_1 - \sigma_3)$$

μ_L ——Lode应力参数;

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——第一、二、三主应力, kgf/mm²;

ϵ_1, ϵ_2 ——三个对数主应变中的任两个。

通常, $m = 1.0 \sim 1.155$ 。对于无芯棒拔管, $m = 1.08 \sim 1.10$ 。

对于应变硬化材料, 屈服强度 σ_s 取为变形前 (σ_{s0}) 后 (σ_{s1}) 的算术平均值 $\bar{\sigma}_s$, 即:

$$\bar{\sigma}_s = 0.5 (\sigma_{s0} + \sigma_{s1}) \quad (6)$$

无芯棒拔管时, 切向、径向和轴向对数变形分别为:

$$\epsilon_D = \ln \left(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0} \right) \quad (7)$$

$$\varepsilon_0 = lu \frac{\delta_1}{\delta_0} \quad (8)$$

$$\varepsilon_1 = lu \frac{l_1}{l_0} = lu\mu \quad (9)$$

式中 D_0 、 D_1 、 δ_0 、 δ_1 、 l_0 和 l_1 分别为变形前后管子的外径、壁厚和长度。

若将 (1) 式中的 ε_1 取为 ε_D ， ε_2 取为 ε_0 ，则

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{[lu(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0})]^2 + (lu \frac{\delta_1}{\delta_0})^2 + lu(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0}) lu \frac{\delta_1}{\delta_0}} \quad (10)$$

工艺确定后， ε_D 、 ε_0 和 ε_1 已知，故可求得 $\bar{\varepsilon}$ 和 δ_1 。

当减壁量不大时， $\varepsilon_2 = \varepsilon_0 \approx 0$ ，

$$\text{则 } \bar{\varepsilon} = |\varepsilon_D| = lu (\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1}) \quad (11)$$

此时

$$W = \sigma_i = m \bar{\sigma}_s lu (\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1}) = Z_i m \bar{\sigma}_s \quad (12)$$

$$Z_i = \sigma_i / m \bar{\sigma}_s = lu (\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1})$$

实例计算表明（见表1），对于减壁的无芯棒拔管过程， $|\varepsilon_D|$ 值小于 $\bar{\varepsilon}$ ，而 ε_1 大于 $\bar{\varepsilon}$ ，偏差较小。故在工程实际中，为简化计算过程，且使其结果不致偏低，并与实际较接近，对等壁或增壁的拔制过程，可取 $\bar{\varepsilon} = |\varepsilon_D|$ ，即 σ_i 按 (12) 式计算；对于减壁过程，则取 $\bar{\varepsilon} = \varepsilon_1$ ，即

表 1

No	工 艺 线 路	$\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1}$	$ \varepsilon_D $	$\frac{\delta_0}{\delta_1}$	$ \varepsilon_0 $	ε	μ	$\bar{\varepsilon}$
2-1	52.80 × 2.88 → 29.15 × 2.60	1.88020	0.63139	1.10769	0.10228	0.68826	2.08268	0.73365
2-2	52.75 × 2.93 → 28.20 × 2.61	1.94685	0.66621	1.12261	0.11565	0.73093	2.18555	0.78187
2-4	53.00 × 3.06 → 29.25 × 2.70	1.88098	0.63179	1.13333	0.12516	0.70278	2.13777	0.75695
3-1	52.75 × 29.1 → 29.15 × 2.68	1.88298	0.63281	1.08582	0.08234	0.67774	2.04448	0.71514
3-3	52.75 × 2.90 → 29.10 × 2.63	1.88326	0.63301	1.10266	0.09773	0.68711	2.07760	0.73073
4-1	52.90 × 2.98 → 29.40 × 2.84	1.87952	0.63102	1.04930	0.04812	0.65640	1.97218	0.67914
4-2	52.90 × 2.95 → 29.40 × 2.75	1.87430	0.62823	1.07270	0.07020	0.66611	2.01062	0.69844
4-3	52.85 × 2.91 → 29.40 × 2.82	1.87886	0.63066	1.03191	0.03142	0.64693	1.93881	0.66208
4-4	52.75 × 2.85 → 29.35 × 2.76	1.87665	0.62949	1.03261	0.03209	0.64613	1.93785	0.66158
7-1	52.88 × 2.48 → 29.95 × 2.44	1.82915	0.60385	1.01639	0.01626	0.61214	1.85913	0.62011

$$\sigma_i = m\bar{\sigma}, l\mu; Z_i = l\mu \quad (13)$$

1.3 后张力消耗的拔制应力 σ_{OF}

拔制过程中, 对单位体积金属来说, 为克服后张力消耗的功为:

$$W_{of} = \sigma_{x_0} n_0$$

后张力消耗的拔制应力为:

$$\sigma_{of} = (\sigma_{x_0} n_0 F_0) / (n_1 F_1) = \sigma_{x_0} = m\sigma_{s_0} Z_0 \approx m\bar{\sigma}_s Z_0 \quad (15)$$

式中: σ_{x_0} —后张应力, kgf/mm^2 ;

Z_0 —后张应力系数, $Z_0 = \sigma_{x_0} / m\sigma_{s_0} \approx \sigma_{x_0} / m\bar{\sigma}_s$;

F_0 —管子拔前断面积, mm^2 ;

n_0 —变形区入口断面管子的轴向位移 (mm) 或轴向速 (mm/s);

F_1 —管子拔后断面积, mm^2 ;

n_1 —变形区出口断面管子的轴向位移 (mm) 或拔制速度 (mm/s)。

1.4 外摩擦消耗的拔制应力 σ_f

如图1, 外摩擦消耗的功 A_f 为:

$$A_f = \lambda_f p f u d F \quad (16)$$

式中: f —接触面的摩擦系数, 磷化 $f = 0.08 \sim 0.10$; 镀铜 $f = 0.12 \sim 0.15$;

p —模壁正压力, kgf/mm^2 ;

n —变形区任意截面上管子相对模壁的位移, 它等于:

$$n = n_0 \left(\frac{D_0 - \delta_0}{D - \delta} \right) \frac{\delta_0}{\delta} \frac{1}{\cos \alpha}$$

D —变形区内任意断面的管子外径, mm ;

δ —变形区内任意截面的管子壁厚, mm ;

dF —微分单元体界面接触面积, 由图可知:

$$dF = \pi D \frac{dx}{\cos \alpha} = (\pi D dD) / 2 \sin \alpha$$

按材料屈服条件, 变形区任意截面时:

$$\sigma_1 - (-\sigma_D) = m\sigma_s; \sigma_D = m\sigma_s \left(1 - \frac{\sigma_1}{m\sigma_s} \right) \quad (17)$$

而按变形区微分单元体的径向力平衡:

$$p(1 - f \tan \alpha) = \frac{2\delta}{D} \sigma_D = \frac{2}{a} \sigma_D; a = \frac{D}{\delta} \quad (18)$$

由 (17) 和 (18) 式得:

$$p = \frac{2}{a} \frac{m\sigma_s}{(1 - f \tan \alpha)} \left(1 - \frac{\sigma_1}{m\sigma_s} \right) \quad (19)$$

p 为压应力, 即 σ_3 。(19) 式中计算结果是 p 的数值。

按变形区微分单元体的轴向力平衡:

$$\pi [(D + dD) - (\delta + d\delta)] (\delta + d\delta) (\sigma_1 + d\sigma_1)$$

$$-\pi [(D-\delta)\delta] \sigma_1 + \int_0^{2\pi} p \operatorname{tg} \alpha \frac{D}{2} d\theta dx + \int_0^{2\pi} f p \frac{D}{2} d\theta dx = 0 \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} p \operatorname{tg} \alpha \frac{D}{2} d\theta dx &= \int_0^{2\pi} p \frac{D}{2} \frac{dD}{2} d\theta \\ &= \frac{\pi}{2} D p dD \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \int_0^{2\pi} f p \frac{D}{2} d\theta dx &= \int_0^{2\pi} \frac{f p}{4 \operatorname{tg} \alpha} dD d\theta \\ &= \frac{f p}{2 \operatorname{tg} \alpha} \pi D dD \end{aligned} \quad (22)$$

将 (21) 和 (22) 代入 (20) 式, 经变换并忽略二阶小量和含 $d\delta$ 的项后得:

$$\delta(D-\delta)d\sigma_1 + \sigma_1 \delta dD + \frac{1}{2} p D dD + \frac{f p D}{2 \operatorname{tg} \alpha} dD = 0 \quad (23)$$

把 (19) 式的 p 值代入 (23) 式, 并令 $(1+f \operatorname{tg} \alpha)/(1-f \operatorname{tg} \alpha) = B$ 得:

$$(D-\delta)d\sigma_1 + \sigma_1 dD + B(m\sigma_s - \sigma_1)dD = 0$$

即:

$$\frac{d\sigma_1}{(B-1)\sigma_1 - Bm\bar{\sigma}_s} = \frac{dD}{(D-\delta)} \quad (24)$$

对 (24) 式积分, 并按入口截面 $D = D_0$, $\delta = \delta_0$, $\sigma_1 = \sigma_s$ 为边界条件求出积分常数后得:

$$\sigma_1 = \left\{ \left(\frac{B}{B-1} \right) \left[1 - \left(\frac{D-\delta}{D_0-\delta_0} \right)^{(B-1)} \right] + Z_0 \left(\frac{D-\delta}{D_0-\delta_0} \right)^{(B-1)} \right\} m \bar{\sigma}_s \quad (25)$$

$$\begin{aligned} p &= \frac{2\delta_m \bar{\sigma}_s}{D(1-f \operatorname{tg} \alpha)} \left\{ 1 - \left(\frac{B}{B-1} \right) \left[1 - \left(\frac{D-\delta}{D_0-\delta_0} \right)^{(B-1)} \right] \right. \\ &\quad \left. - Z_0 \left(\frac{D-\delta}{D_0-\delta_0} \right)^{(B-1)} \right\} \end{aligned} \quad (26)$$

把 (26) 式的 p 值代入 (16) 式, 得到圆锥区外摩擦消耗的功 Af_1 为:

$$\begin{aligned} Af_1 &= SS_F p f u dF = \int_{D_1}^{D_0} \frac{2\delta_m \bar{\sigma}_s}{D(1-f \operatorname{tg} \alpha)} \left\{ 1 - \left(\frac{B}{B-1} \right) \right. \\ &\quad \times \left[1 - \left(\frac{D-\delta}{D_0-\delta_0} \right)^{(B-1)} \right] - Z_0 \left(\frac{D-\delta}{D_0-\delta_0} \right)^{(B-1)} \left. \right\} \\ &\quad \times f \left[u_0 \frac{(D_0-\delta_0)\delta_0}{(D-\delta)\delta} \right] \left[\frac{\pi D dD}{2 \cos \alpha \sin \alpha} \right] \\ &= \pi m \bar{\sigma}_s u_0 (D_0-\delta_0)\delta_0 \times \left\{ - \int_{D_1}^{D_0} \frac{dD}{D-\delta} \right. \\ &\quad + \frac{B}{(D_0-\delta_0)^{(B-1)}} \int_{D_1}^{D_0} (D-\delta)^{(B-2)} dD \\ &\quad \left. + \frac{(B-1)Z_0}{(D_0-\delta_0)^{(B-1)}} \int_{D_1}^{D_0} (D-\delta)^{(B-2)} dD \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \pi m \bar{\sigma}_s u_0 - (D_0 - \delta_0) \delta_0 \left\{ \ln \left(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0} \right) \right. \\
&\quad \left. + \left[\left(\frac{B}{B-1} \right) - Z_0 \right] \left[1 - \left(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0} \right)^{(B-1)} \right] \right\} \\
\text{因} \quad &1 - \left(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0} \right)^{(B-1)} = - (B-1) \ln \left(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0} \right) \\
&- \frac{(B-1)^2}{2} \left[\ln \left(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0} \right) \right]^2 - \frac{(B-1)^3}{6} \left[\ln \left(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0} \right) \right]^3 \\
\text{故} \quad &Af_1 = \pi m \bar{\sigma}_s u_0 (D_0 - \delta_0) \delta_0 (B-1) \left\{ (1 - Z_0) \ln \left(\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1} \right) \right. \\
&\quad \left. - \frac{1}{2} [B - (B-1)Z_0] \left[\ln \left(\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1} \right) \right]^2 \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{6} [B(B-1) - (B-1)^2 Z_0] \left[\ln \left(\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1} \right) \right]^3 \right\} \quad (27)
\end{aligned}$$

而

$$\begin{aligned}
\sigma_{f1} &= A_{f1}/v = A_{f1}/\pi (D_1 - \delta_1) \delta_1 u_1 \quad (u_1 = u_0 \mu) \\
&= m \bar{\sigma}_s \left\{ \ln \left(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0} \right) + \left[\left(\frac{B}{B-1} \right) - Z_0 \right] \right. \\
&\quad \left. \left[1 - \left(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0} \right)^{(B-1)} \right] \right\} = m \bar{\sigma}_s (B-1) \\
&\quad \left\{ (1 - Z_0) \ln \left(\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1} \right) - \frac{1}{2} [B(B-1)Z_0] \left[\ln \left(\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1} \right) \right]^2 \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{6} [B(B-1) - (B-1)^2 Z_0] \left[\ln \left(\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1} \right) \right]^3 \right\} = Z_{f1} m \sigma_s, \quad (28) \\
Z_{f1} &= (B-1) \left\{ (1 - Z_0) \ln \left(\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1} \right) - \frac{1}{2} [B - (B-1)Z_0] \right. \\
&\quad \left[\ln \left(\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1} \right) \right]^2 + \frac{1}{6} [B(B-1) \\
&\quad \left. - (B-1)^2 Z_0] \left[\ln \left(\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1} \right) \right]^3 \right\}
\end{aligned}$$

圆柱区外摩擦消耗的拔制应力 σ_{f2} 可以忽略不计,也可以把 σ_{f2} 与 σ_{f1} 一起计算,即把圆柱区看成是圆锥区的一部分。当量模半锥角为 α' (见图1),将有关值代入(28)式,即求得 σ_{f0} 。

把(12)、(15)、和(28)式相加,得:

$$\begin{aligned}
\sigma_i + \sigma_{0F} + \sigma_{f1} &= \left\{ \left(\frac{B}{B-1} \right) \left[1 - \left(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0} \right)^{(B-1)} \right] \right. \\
&\quad \left. + Z_0 \left(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0} \right)^{(B-1)} \right\} m \bar{\sigma}_s, \quad (29)
\end{aligned}$$

此结果与(25)式中 $D = D_1$ 、 $\delta = \delta_1$ 时相同。与前述相同,对于减壁过程, $\left(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0} \right)$ 用

$\frac{1}{\mu}$ 代替, 即:

$$\sigma_i + \sigma_{OF} + \sigma_{f1} = \left\{ \left(\frac{B}{B-1} \right) \left[1 - \left(\frac{1}{\mu} \right)^{(B-1)} \right] + Z_0 \left(\frac{1}{\mu} \right)^{(B-1)} \right\} \quad (30)$$

$$\mu = \frac{(D_0 - \delta_0) \delta_0}{(D_1 - \delta_1) \delta_1}$$

1.5 附加剪切消耗的拔制应力 $\sigma_{r,d}$

1.5.1 纵向附加剪切

附加剪切应力是由于管壁单元体弯折引起的。纵向附加剪切如图2, 在变形区入口处, 管壁金属流线弯折一个 α 角; 在变形区出口处也是如此, 由此消耗了无用的剪切功。

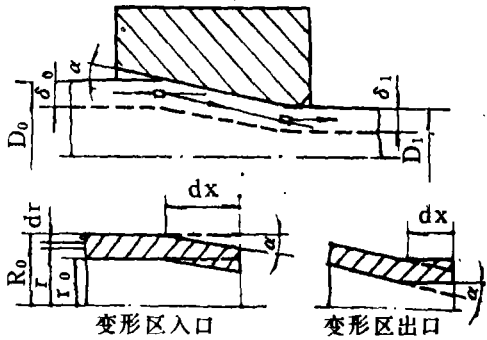


图2 无芯棒拔管时的纵向剪切

要产生塑性弯折, 则要求模型压力 P 到达管子减径塑性变形所需之切向应力 σ_b 值的对应值。对于变形区入口截面:

$$\sigma_{D_0} = m \sigma_{s_0} (1 - Z_0)$$

$$P_0 = \frac{2}{a_0} \sigma_{D_0} = \frac{2}{a_0} (1 - Z_0) m \sigma_s$$

半径为 r , 厚为 dr , 宽为 dx 的管壁金属条, 弯折所需的功为:

$$dA = P_0 dv \tan \alpha = \frac{2}{a_0} (1 - Z_0) m \sigma_{s_0} \times (2\pi r dr dx) \tan \alpha$$

变形区入口处管子金属弯折所需的功:

$$\begin{aligned} A_{f,d1} &= \int_{r_0}^{R_0} dA \\ &= \frac{2}{a_0} (1 - Z_0) m \sigma_{s_0} \times 2\pi dx \tan \alpha \int_{r_0}^{R_0} r dr \\ &= \frac{2}{a_0} (1 - Z_0) m \sigma_{s_0} \tan \alpha \cdot \pi (D_0 - \delta_0) \delta_0 dx \end{aligned}$$

相应所需的拔制应力 $\sigma_{r,d1}$:

$$\begin{aligned} \sigma_{r,d1} &= A_{f,d1} / V \\ &= A_{f,d1} / \pi (D_1 - \delta_1) \delta_1 \mu dx \\ &= \frac{2}{a_0} (1 - Z_0) \tan \alpha \cdot m \sigma_{s_0} \end{aligned}$$

$$= Z_{r, d1} m \sigma_{s0} \quad (31)$$

$$Z_{r, d1} = \frac{2}{a_0} (1 - Z_0) \operatorname{tg} \alpha = \sigma_{r, d1} / m \sigma_{s0} \approx \sigma_{r, d1} / m \bar{\sigma}_s$$

式中, a_0 —拔前管子的径壁比, $a_0 = D_0 / \delta_0$;

Z_0 —后张应力系数;

α —模半锥角;

σ_{s0} —拔前管子金属的屈服强度, 为简化计算, 可近似取为 $\bar{\sigma}_s$ 。

同理, 对于变形区出口截面:

$$dA = P_1 dv \operatorname{tg} \alpha$$

$$A_{r, d2} = \int_{r1}^{R1} dA$$

$$\sigma_{r, d2} = A_{r, d2} / V$$

$$\text{而 } P_1 = \frac{2}{a_1} (m \sigma_{s1} - \sigma_{11})$$

$$\approx \frac{2}{a_1} [(1 - Z_0) - \ln \left(\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1} \right)] m \sigma_{s1}$$

$$\approx \frac{2}{a_1} [(1 - Z_0) - \ln \left(\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1} \right)] m \bar{\sigma}_s$$

其中 $a_1 = D_1 / \delta_1$

$$A_{r, d2} = \frac{2}{a_1} [(1 - Z_0) - \ln \left(\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1} \right)] m \bar{\sigma}_s \operatorname{tg} \alpha \cdot [\pi (D_1 - \delta_1) \delta_1 dx]$$

相应地: $\sigma_{r, d2} = A_{r, d2} / V = A_{r, d2} / \pi (D_1 - \delta_1) \delta_1 dx$

$$= \frac{2}{a_1} [(1 - Z_0) - \ln \left(\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1} \right)] m \bar{\sigma}_s = Z_{r, d2} m \bar{\sigma}_s \quad (32)$$

$$Z_{r, d2} = \frac{2}{a_1} [(1 - Z_0) - \ln \left(\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1} \right)] \operatorname{tg} \alpha$$

1.5.2 垂直附加剪切

垂直弯折附加剪切如图3, 它出现于变形区入口截面, 并由 P_x 作用所引起。

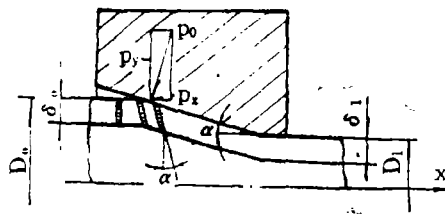


图3 管壁的垂直剪切变形

$$P_x = P_0 \operatorname{tg} \alpha = \frac{2}{a_0} m \sigma_{s0} (1 - Z_0) \operatorname{tg} \alpha$$

$$dA = P_x \operatorname{tg} \alpha dv = \frac{2}{a_0} m \sigma_{s0} (1 - Z_0) \operatorname{tg}^2 \alpha (2\pi r dr dx)$$

$$A_{r, \delta_1} = \int_{r_0}^{R_0} dA = \frac{2}{a_0} m \sigma_{s0} (1 - Z_0) \operatorname{tg}^2 \alpha [\pi (D_0 - \delta_0) \delta_0 dx]$$

相应: $\sigma_{r, \delta_1} = \frac{2}{a_0} m \sigma_{s0} (1 - Z_0) \operatorname{tg}^2 \alpha = Z_{r, \delta_1} m \sigma_{s0}$

$$\approx \frac{2}{a_0} m \bar{\sigma}_s (1 - Z_0) \operatorname{tg}^2 \alpha \approx Z_{r, \delta_1} m \bar{\sigma}_s \quad (33)$$

$$Z_{r, \delta_1} = \sigma_{r, \delta_1} / m \sigma_{s0} \text{ 或 } Z_{r, \delta_1} \approx \sigma_{r, \delta_1} / m \bar{\sigma}_s$$

1.6 拔制力计算式

综合上述, 最终得拔制力计算式为:

$$T = \sigma_d F_1$$

$$\sigma_d = \left\{ \left(\frac{B}{B-1} \right) \left[1 - \left(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0} \right)^{(B-1)} \right] + Z_0 \left(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0} \right)^{(B-1)} + Z_{r, \delta_1} \right\} m \bar{\sigma}_s \quad (34)$$

或 $\sigma_d = (Z_i + Z_0 + Z_{f1} + Z_{r, \delta_1}) m \bar{\sigma}_s$

$$\begin{aligned} Z_{r, \delta_1} &= Z_{r, \delta_1} + Z_{r, \delta_2} + Z_{r, \delta_3} \\ &= \frac{2}{a_0} (1 - Z_0) (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg}^2 \alpha) + \frac{2}{a_1} [(1 - Z_0) \\ &\quad - \ln \left(\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1} \right)] \operatorname{tg} \alpha \end{aligned} \quad (35)$$

式中的 Z_i 、 Z_0 和 Z_{f1} 值分别见 (12) 或 (13)、(15) 和 (28) 式。

通常的无芯棒拔管过程, $Z_0 = 0$, 即无后张力, 此时:

$$\sigma_d = \left\{ \left(\frac{B}{B-1} \right) \left[1 - \left(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0} \right)^{(B-1)} \right] + Z_{r, \delta_1} \right\} m \bar{\sigma}_s \quad (36)$$

$$Z_{r, \delta_1} = \frac{2}{a_0} (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg}^2 \alpha) + \frac{2}{a_1} [1 - \ln \left(\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1} \right)] \operatorname{tg} \alpha \quad (37)$$

对于减壁过程, (34) ~ (37) 式中的 $\left(\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1} \right)$ 用 μ 代替, 而

$$\mu = \frac{(D_0 - \delta_0) \delta_0}{(D_1 - \delta_1) \delta_1}$$

1.7 验证试验的结果

为验证算式的可用性, 在材料万能试验机上进行了拔管试验, 并记录拔制力。试料拔前经退火、磷化和皂化处理, 结果见表2。表2还列入了按本文所提算式的计算结果, 计算中所用到的数据如管子尺寸、模子定径带宽度 b 和模半锥角 α 、管子金属拔制前后之屈服强度 σ_{s0} 及 σ_{s1} 等为实测值, 而 f 和 m 值为根据工艺条件选定的数值。

结果表明, 考虑附加剪切所需拔制应力的拔制力计算式更接近于实际, 误差在工程计算允许范围内, 可以在工程计算中应用。但计算结果多数仍比实际值低, 究其原因可能是:

(1) 工艺操作不稳定, 摩擦系数 f 值易选得偏小;

(2) 钢为非线性硬化材料, 用 $\bar{\sigma}_s = 0.5(\sigma_{s1} + \sigma_{s0})$ 计算, 往往会使 $\bar{\sigma}_s$ 估计得偏小。

2. 极限道次变形量估计

道次最大变形量取决于工件金属的塑性指数、拔管机的能力, 以及防止拔断等条件。

表2
拔制力实测值和计算值对比

No	工艺线 ($D_0 \times \delta_0 \rightarrow D_1 \times \delta_1$) mm	α°	σ_{s0} kgf/mm ²	σ_{s1} kgf/mm ²	b mm	F ₁ mm ²	T' 计算 kgf	T 计算 kgf	T 实际 kgf	$\frac{\Delta T'}{T_{\text{实际}}}$ %		$\frac{\Delta T}{T_{\text{实际}}}$ %	
2-1	$\phi 52.80 \times 2.88 \rightarrow \phi 29.15 \times 2.60$	35	35	81.20	5	216.86	11590	13851	14300	-18.950	-	-3.14	-
2-2	$\phi 52.75 \times 2.98 \rightarrow \phi 28.20 \times 2.61$	35	35	81.20	5	209.83	11860	14025	13600	-12.794	+	+3.125	+
2-4	$\phi 53.00 \times 3.06 \rightarrow \phi 29.25 \times 2.70$	35	35	81.20	5	225.20	12370	14801	14400	-14.097	+	+2.785	+
3-1	$\phi 52.75 \times 2.91 \rightarrow \phi 29.15 \times 2.68$	30	36	75.48	5	222.86	11082	12868	11800	-6.084	+	+9.056	+
3-3	$\phi 52.75 \times 2.90 \rightarrow \phi 29.10 \times 2.63$	30	36	75.48	5	218.70	11100	12820	13000	-14.615	-	-1.385	-
4-1	$\phi 52.90 \times 2.98 \rightarrow \phi 29.40 \times 2.84$	25	33	80.50	6	236.97	11816	13382	14800	-20.162	-	-9.581	-
4-2	$\phi 52.90 \times 2.95 \rightarrow \phi 29.40 \times 2.75$	25	33	80.50	6	230.24	11712	13174	14400	-18.666	-	-8.514	-
4-3	$\phi 52.85 \times 2.91 \rightarrow \phi 29.40 \times 2.82$	25	33	80.50	6	235.48	11488	13038	14300	-19.664	-	-8.825	-
4-4	$\phi 52.75 \times 2.85 \rightarrow \phi 29.35 \times 2.76$	25	33	80.50	6	230.56	11240	12731	13800	-18.550	-	-7.746	-
7-1	$\phi 52.80 \times 2.48 \rightarrow \phi 29.95 \times 2.44$	20	38	74.25	5	210.88	9798	10698	12000	-18.350	-	-10.853	-
7-2	$\phi 52.95 \times 2.96 \rightarrow \phi 29.80 \times 3.00$	20	38	74.25	5	252.58	11793	13111	15200	-22.414	-	-13.740	-
7-3	$\phi 52.85 \times 2.93 \rightarrow \phi 29.90 \times 2.85$	20	38	74.25	5	240.20	11572	12767	13700	-15.532	-	-6.810	-
5-1	$\phi 52.75 \times 3.00 \rightarrow \phi 30.20 \times 2.98$	15	38	75.24	6	254.83	12242	13182	15200	-19.460	-	-13.276	-
5-2	$\phi 52.75 \times 2.98 \rightarrow \phi 30.10 \times 2.90$	15	38	75.24	6	247.83	12255	13140	14500	-15.483	-	-9.379	-
C-5	$\phi 28.10 \times 1.055 \rightarrow \phi 19.40 \times 1.15$	35	34	52.86	4	65.934	1528	1968	2000	-23.60	-	-1.600	-
D-5	$\phi 28.10 \times 1.040 \rightarrow \phi 19.35 \times 1.10$	35	38	56.86	4	63.068	1599	2047	1950	-18.00	+	+4.974	+
D-6	$\phi 27.90 \times 1.03 \rightarrow \phi 19.30 \times 1.15$	40	38	56.86	4	65.573	1850	2447	2300	-19.565	+	+6.391	+
E-6	$\phi 28.05 \times 1.04 \rightarrow \phi 19.25 \times 1.08$	40	35	53.86	4	61.650	1467	1983	2050	-28.349	-	-3.268	-
D-7	$\phi 27.90 \times 1.065 \rightarrow \phi 19.25 \times 1.02$	45	38	56.86	4	58.417	1452	2115	2000	-27.40	+	+5.750	+

注: ①按 $f=0.1$, $m=1.1$; ② $T'_{\text{计算}} = (\sigma_i + \sigma_i) F_1$; $\Delta T' = T'_{\text{计算}} - T_{\text{实际}}$; $T_{\text{计算}} = (\sigma_i + \sigma_i + \sigma_{i,D}) F_1$; $\Delta T = T_{\text{计算}} - T_{\text{实际}}$;

③加工硬化后, $\sigma_s = \sigma_b$, 此处是由拉伸试验得的 σ_s (名义应力) 换算得的真实应力, 即 $\sigma_{s1} = (1 + \delta) \sigma_b$;

④ $Z_t = Z_{t1} + Z_{t2}$; Z_{t1} 按 (28) 式, Z_{t2} 按文献 [4]。对于减壁过程 ($\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0}$) 用 $\frac{1}{\mu}$ 代替。

里只研究由后一条件限定的最大道次变形量。

建立拔制过程的必要条件之一是 $\sigma_d < m\bar{\sigma}_s$ 。(或 $\sigma_d < \sigma_{s1}$) 极限情况下是 $\sigma_d = m\bar{\sigma}_s$, 即: $\sigma_d/m\sigma_s = 1$, 将此代入(34)式得:

$$Z_i + Z_o + Z_{f1} + Z_{r,d} = 1$$

$$\text{而 } Z_i + Z_o + Z_{f1} = \left\{ \left(\frac{B}{B-1} \right) \left[1 - \left(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0} \right)^{(B-1)} \right] + Z_o \left(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0} \right)^{(B-1)} \right\}$$

$$\text{故 } \left\{ \left(\frac{B}{B-1} \right) \left[1 - \left(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0} \right)^{(B-1)} \right] + Z_o \left(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0} \right)^{(B-1)} \right\} = 1 - Z_{r,d}$$

变换后得:

$$\left(\frac{D_1 - \delta_1}{D_0 - \delta_0} \right)_{max} \approx \sqrt[B-1]{\frac{B - (B-1)Z_o}{1 + (B-1)Z_{r,d}}} \quad (38)$$

$$\text{或 } \mu_{max} \approx \sqrt[B-1]{\frac{B - (B-1)Z_o}{1 + (B-1)Z_{r,d}}} \quad (\text{减壁过程}) \quad (39)$$

因为 σ_d 作用于变形区出口处, 此时工件金属的屈服强度已为 σ_{s1} , 而 σ_{s1} 很可能大于 $m\bar{\sigma}_s$, 因此(38)和(39)式只能用于估算。

3. 最佳模半锥角

最佳模半锥角, 是指在一定的断面减缩率和摩擦系数条件下, 拉拔应力为最小的模半锥角, 以 α_{op} 表示。

如前所述, 总拔制应力为纯有效变形、克服后张力、克服外摩擦和附加剪切所消耗的拔制应力的总和。 σ_i 只与材料性质和变形程度有关。 σ_{of} 和 σ_{f2} 与模半锥角 α 关系不大, 而 α 对 σ_{f1} 和 $\sigma_{r,d}$ 影响极大。当 α 小时, $\sigma_{r,d}$ 较小, 但 σ_{f1} 较大。当加大 α 时, 结果相反。因此可把最佳模半锥角看成是在一定的变形程度和摩擦系数条件下, σ_{f1} 和 $\sigma_{r,d}$ 之和为最小的模半锥角。

用电子计算机按上述 σ_d 算式编制的程序, 对在生产中可能用到的 μ 、 f 、 Z_o 和 a_0 的数值范围内, 不同 α 角条件下的 α_d 值进行计算, 即可找到其最佳模半锥角 α_{op} 。图4~6是计算结果举例。其基本规律是:

- (1) 对于各条件下均存在最佳模半锥角 α_{op} ;
- (2) α_{op} 是一个区间, 即 α 在某一范围内(a_0 小时 $\pm 2^\circ$, a_0 大时 $\pm 1^\circ \sim \pm 6^\circ$), 拔制应力均属最小的范围;
- (3) 后张力对 α_{op} 的大小无影响;
- (4) α_{op} 随 μ 或 $\left(\frac{D_0 - \delta_0}{D_1 - \delta_1} \right)$ 加大而增大;
- (5) α_{op} 随 f 值加大而增大;
- (6) 在其他条件相同时, 薄壁管(a_0 值大者)的 α_{op} 值大于厚壁管(a_0 较小者)的 α_{op} 值。

图7是20钢 $\phi 53 \times 3 \rightarrow \phi 30 \times 2.6 \sim 3 \text{ mm}$ 工艺的最佳模半锥角实验结果和计算结果对比。它表明, 两者规律有类似之处, 但计算值偏低些, 这可能是多种工艺因素及测量误差所致。

对于产品品种规格多的生产车间来说, 模具要考虑通用性, 因而模具设计难以优化。但对品种规格少的专业厂或对产量很大的某些规格, 可以在设计模具时利用上述方法估选最佳模半锥角。

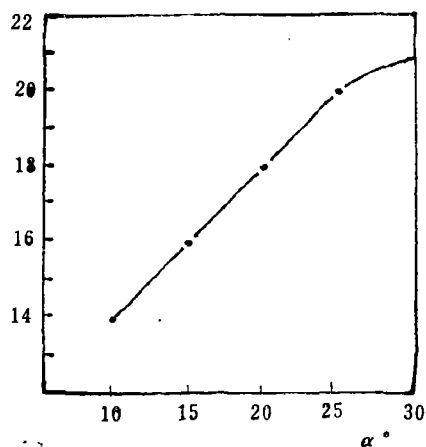


图4 a_0 对 α_{opt} 的影响 ($f=0.12$; $\mu=1.42857$)

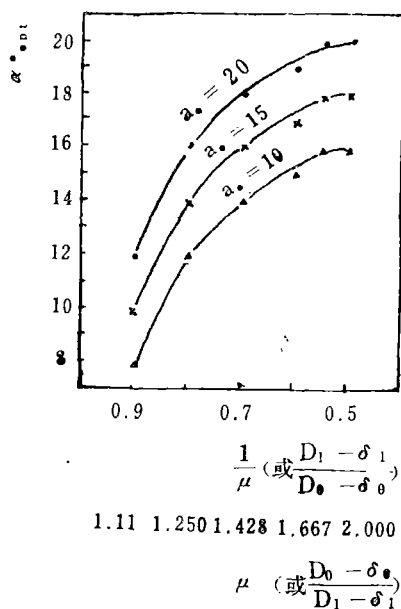


图5 μ 对 α_{opt} 的影响 ($Z_0=0$; $f=0.12$)

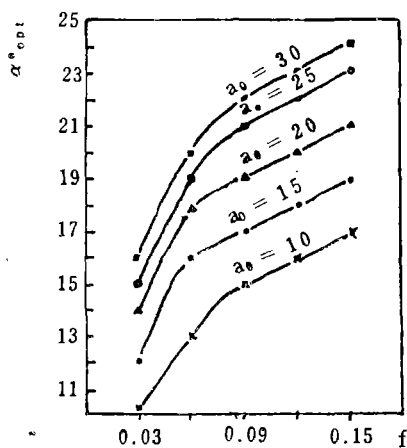


图6 f 对 α_{opt} 的影响 ($Z_0=0$; $\mu=2.0$)

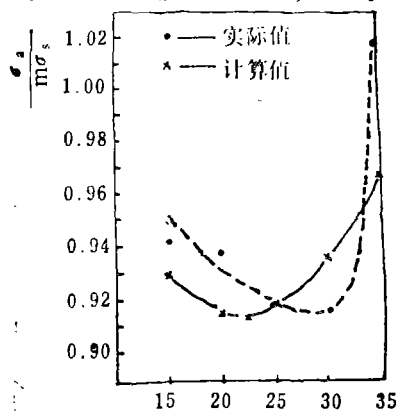


图7 20钢 $\phi 53 \times 3.0 \phi \rightarrow 30 \times 2.6 \sim 3.0$ 工艺条件下 α 与 σ_d / σ_s 的关系 ($\mu=2.0$, $f=0.1$, $b=5\text{mm}$, $Z_0=0$)

参考文献

- [1] R.A.C. 斯莱特著, 王仲仁等译: 工程塑性理论及其在金属成型中的应用, 机械工业出版社, 1983
- [2] O. 霍夫曼等著, 乔端等译: 工程塑性理论基础, 中国工业出版社, 1964
- [3] 重庆钢铁设计研究院: 钢管冷拔车间工艺设计参考资料 (内部资料)
- [4] 赵德祥: 钢管拔制力计算 (内部资料), 1980