

响, 热轧是为模拟实际生产条件。

3. 测试装置

芯棒的单位压力测试采用探针法, 结构如图2所示。在测压柱上贴有电阻应变片, 应变片的导线穿过芯棒中心孔从芯棒尾端引出和示波器连接, 单位压力曲线由示波器自动

拍摄。同时还测试了上轧辊的轧制总压力(测压头置于上轧辊压下螺丝的下面, 每边一个), 以及芯棒的前进速度(采用 SZGB-11型光电传感器测量, 芯棒尾部表面刻有刻痕)。

4. 试验结果与数据整理

a. 冷轧时沿孔型周边不同角度的变形区,

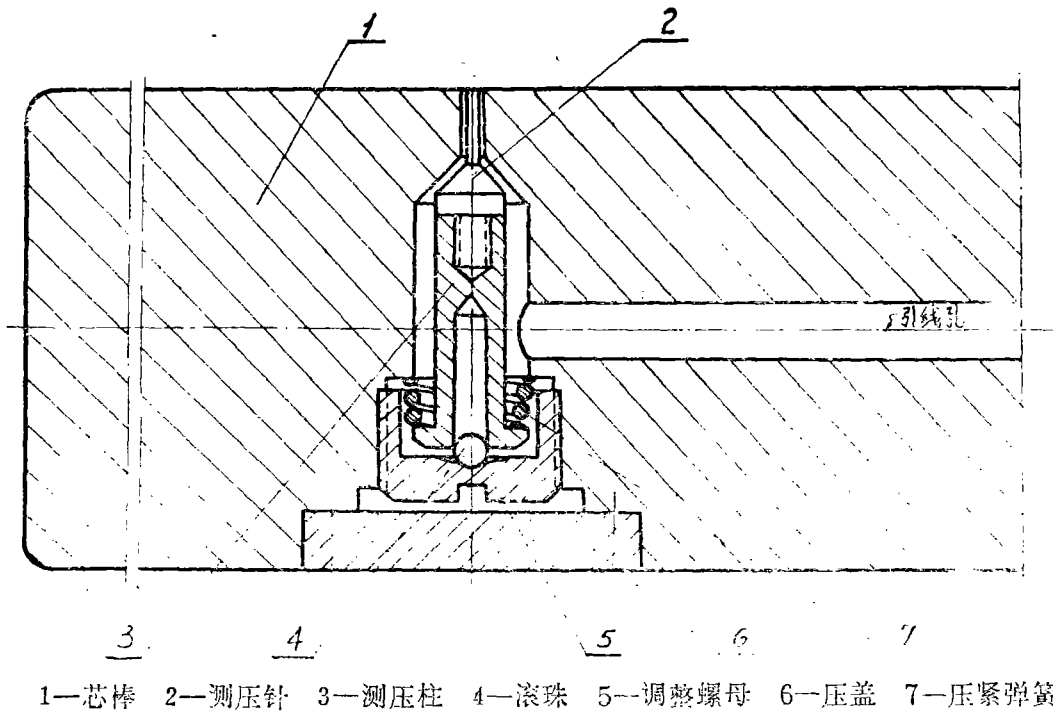


图2 芯棒测力机构

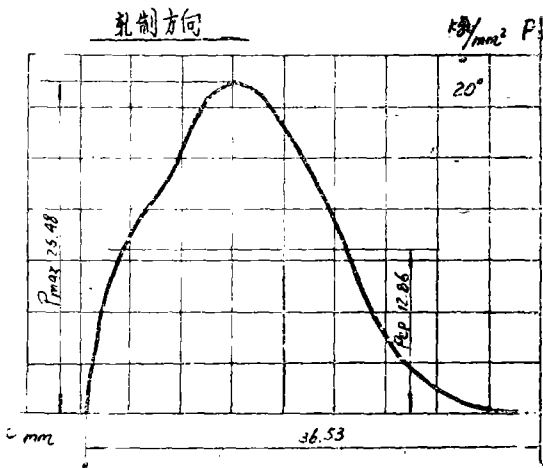


图3 实测的芯棒单位压力曲线(20°)

内芯棒上单位压力分布的实测值如表1所示。图3是实测的芯棒20°位置上的单位压力曲线(孔型顶部为0°)。沿孔型周边各不同角度上的芯棒单位压力曲线的峰值点基本上位于芯棒的同一截面上(参见下面的图11), 在该截面上芯棒单位压力 P_{max} 及 P_{c1} 的分布如图4所示。图5是 P_{max} 及 P_{c1} 与变形区长度的关系(冷轧铝管 $\phi 59 \times 7 \times 150\text{mm}$)。

b. 不同减壁量情况下芯棒上单位压力分布的实测曲线如图6所示, 实测值如表2所示, 图7所示为 P_{max} 、 P_{c1} 与减壁量 ΔS 的关系。

c. 芯棒速度变化时, 芯棒单位压力的实

实测的不同角度上的芯棒单位压力曲线特征值（0°为孔型顶部）

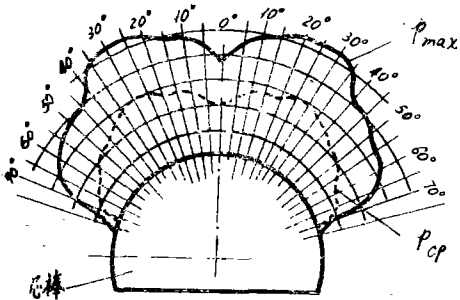
表1

序号	角度	峰值 kg/mm ²	平均值 kg/mm ²	折点到变形区 出口的距离 mm	峰值点到变形区 出口的距离 mm	变形区 长度 mm	波形	芯棒 速度 mm/s	备注
1	0°	17.83	9.40	26.22	22.23	29.93		57.00	
2	5°	21.02	10.28	26.28	21.14	30.28		57.14	
3	10°	22.93	12.35	26.92	22.91	32.41		57.27	
4	15°	23.57	12.83	26.34	22.24	33.08		58.54	
5	20°	25.48	12.86	30.20	24.05	36.53		56.65	
6	25°	26.11	14.18	30.00	22.80	36.60		60.00	
7	30°	25.48	13.72	27.25	21.10	36.23		56.79	
8	35°	24.84	13.04	25.40	21.45	36.13		56.45	
9	40°	20.38	11.42	25.42	21.89	35.31		56.50	
10	45°	18.47	9.81	15.79	25.26	30.79		63.15	
11	50°	17.83	8.78	15.86	24.36	27.76		56.65	
12	55°								*
13	60°	15.29	6.22		15.28	22.36		56.60	
14	65°	14.01	5.30		14.23	20.67		56.93	
15	70°	1.91	0.98		3.92	19.60		56.00	
16	75°	0	0		0	0			

不同减壁量时的芯棒单位压力 表2

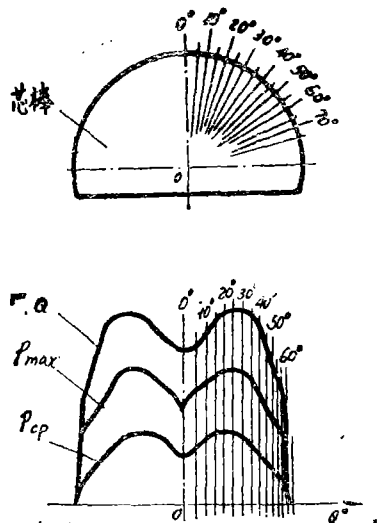
*仪表故障未测到

序号	减壁量 ΔS mm	峰值 P _{max} kg/mm ²	平均值 P _{cp} kg/mm ²	变形区 长度 mm	备注
1	2.5	20.38	10.55	32.64	
2	2.0	18.47	9.65	29.93	
3	1.5	13.45	6.74	30.09	
4	1.0	8.56	4.57	30.19	
5	0.5	4.48	2.57	29.81	



实线—芯棒单位压力P_{max}
虚线—芯棒单位压力P_{cp}

图4 芯棒横断面上单位压力的分布



a — 芯棒和金属接触面水平投影的轮廓线
 P_{max} — 芯棒单位压力峰值点
 P_{cp} — 芯棒单位压力平均值

图5 芯棒单位压力 P_{max} 及 P_{cp} 变形区接触弧长的关系

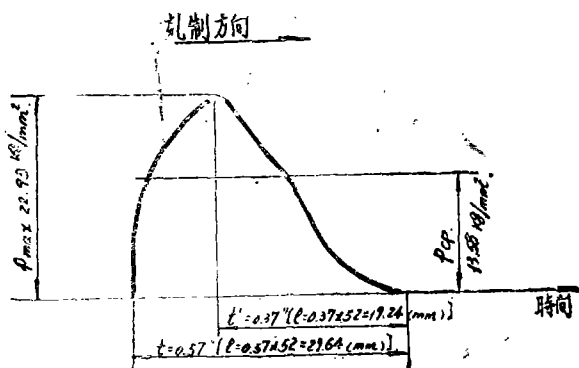


图6 不同减壁情况下实测的芯棒单位压力曲线

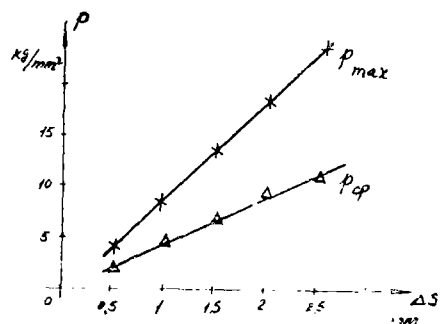
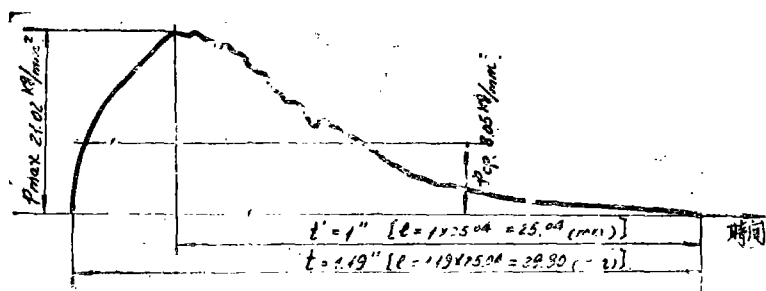


图7 芯棒单位压力 P_{max} 及 P_{cp} 与减壁量 ΔS 的关系



芯棒速度25.04mm/S

图8 芯棒速度变化时实测的芯棒压力曲线

测曲线如图 8 所示。

d. 热轧钢管时，示波器拍下的芯棒单位压力曲线照片从略。

e. 轧辊中性面 X_c 和芯棒中性面 X_d 在芯棒接触面上的投影位置如图 9 所示。 X_c 、 X_d 位置的确定方法如下：（1）计算变形区中轧辊表面各点的线速度 V_i ；（2）横向切取轧卡试样，测量变形区中钢管不同截面的截面积 F_i ；（3）在轧辊表面打眼，测量轧件的前滑值 S ，由此计算轧件出口速度 W_h ；（4）根据 W_h 、 F_i 计算变形区中钢管各断面的前进速度 W_i ；（5）根据 V_i 、 W_i 及 V_d （芯棒速度，

实测）计算轧辊接触面和芯棒接触面上各点的金属滑移系数 μ_i 、 μ_i' ，计算结果如表(3)所示。 μ_i 及 μ_i' 等于 1 的点连线即为轧辊中性面 X_c 和芯棒中性面 X_d 。

5. 试验小结

根据如上试验数据可以看出：

1. 芯棒单位压力在整个接触面上的分布是极不均匀的，沿孔型周边不同角度变形区的 P_{max} 及 P_{cp} 的大小与相应的变形区接触长度成正比（图 5）。芯棒横断面上最大压力点不

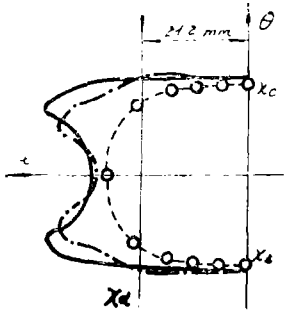


图 9 X_c 和 X_d 在芯棒接触面水平投影上的位置

实线—根据轧卡试样测到的芯棒接触面轮廓线

点划线—根据实测的芯棒单位压力曲线起始点作出的芯棒接触面轮廓线

虚线—轧辊中性面 X_c

直线—芯棒中性面 X_d

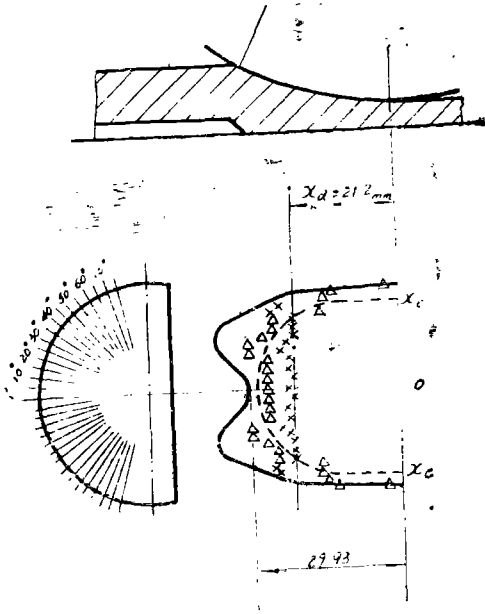


图 11 自由轧制时的芯棒接触面

X —各角度的单位压力曲线峰点的位置

Δ —各角度的单位压力曲线折点的位置

直线 X_c —根据芯棒摩擦力的平衡条件确定的芯棒中性面

虚线—轧辊接触面的中性面

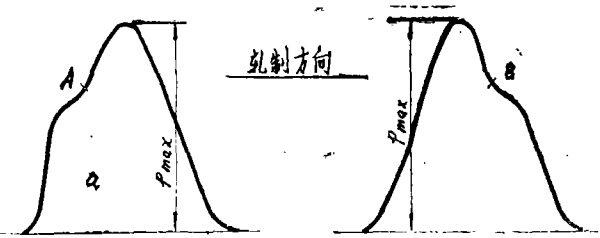


图 10 两种类型的芯棒单位压力曲线

变形区中轧辊接触面、芯棒接触面上金属滑移系数 μ_i 、 μ_i' 的分布

← 变形区长度、轧制方向

表3

变形区宽度 ↓	轧辊 μ_i	l_0	l_5	l_{10}	l_{15}	l_{20}	l_{25}	l_{30}
	D底	1.10	1.10	1.09	1.09	1.05	1.03	0.94
	D5°	1.10	1.10	1.09	1.09	1.05	1.03	0.94
	D10°	1.10	1.10	1.09	1.08	1.05	1.03	0.94
	D15°	1.09	1.10	1.08	1.08	1.04	1.02	0.94
	D20°	1.09	1.09	1.08	1.07	1.04	1.02	0.93
	D25°	1.03	1.03	1.07	1.06	1.03	1.009	0.92
	D30°	1.07	1.07	1.06	1.06	1.02	1.0004	0.92
	D35°	1.06	1.06	1.05	1.05	1.01	0.99	0.91
	D40°	1.05	1.05	1.04	1.03	1.0003	0.98	0.90
	D45°	1.04	1.04	1.03	1.02	0.988	0.97	0.89
	D50°	1.02	1.02	1.02	1.009	0.98	0.96	0.87
	D55°	1.01	1.01	1.002	0.996	0.96	0.94	0.86
	D60°	0.99	0.99	0.989	0.98	0.95	0.93	0.85
	芯棒 μ_i'	1.07	1.07	1.06	1.05	1.008	0.93	0.89

注：表中粗实线表示 $\mu_i' = 1$ ，的位置。

在孔型顶部，而在金属与芯棒最先接触的两个角度上（图4、图5）；

2. 芯棒不同角度上的单位压力曲线基本上可分为a、b两种类型，如图(10)所示（参见表1中的数值及波形）。第一种(a)曲线在单位压力的上升过程中经过一折点A，而下

降过程平稳；第二种(b)曲线单位压力上升过程平稳，而在下降过程中经过一折点B。芯棒单位压力曲线从0°（孔型顶部）转向辊缝方向时，曲线形状从a型变为b型，如表1中所示的波形变化。

3. 把各角度上的芯棒单位压力曲线的峰

点及折点位置,以及 X_c 和 X_d 的位置画在芯棒接触面上,如(11)图所示,可以看出:芯棒单位压力曲线的峰点与芯棒中性面 X 基本吻合,芯棒单位压力曲线的折点与轧辊中性面 X_c 基本吻合。

4. 芯棒单位压力 P_{max} 及 P_c ,与减壁量 ΔS 成正比, ΔS 增大, P_{max} 及 P_c 增大(图6、图7)。

5. 可控芯棒轧制时,芯棒速度降低,芯棒单位压力也降低,同时峰值点的位置移向变形区入口端(图8)。

6. 热轧钢管时芯棒单位压力要比冷轧铝管时大,但压力曲线的形状与基本特点仍与冷轧铝管时相似,因此对冷轧铝管变形区的分析仍适用于热轧钢管的情况。

三. 分析与讨论

Семенов, Чекмарев⁽⁵⁾从理论上指出,自由轧制时芯棒接触面被轧辊中性面 X_c 和芯棒中性面 X_d 划分为四个区,本文的试验证明了这一点,如图(9)所示。因此,如果沿芯棒接触面宽度方向取出不同角度的变形区进行研究,如图(12)所示,可以看出变形区分为三类: X_d 和 X_c 重合(1-1), X 超前 X_c (0-0), X_d 落后 X_c (2-2, 3-3)。 X_d 和 X_c 之间的区域内两摩擦力方向相反,我们称为“异向区”,根据异向区两摩擦力旋转方向的不同,分顺时针旋转异向区和逆时针旋转异向区两种(图13)。 X_c 和 X_d 两侧的前、后滑区我们统称为同向区。同向区和异向区中的微分单元体的受力图示是不相同的,如图(14)所示。

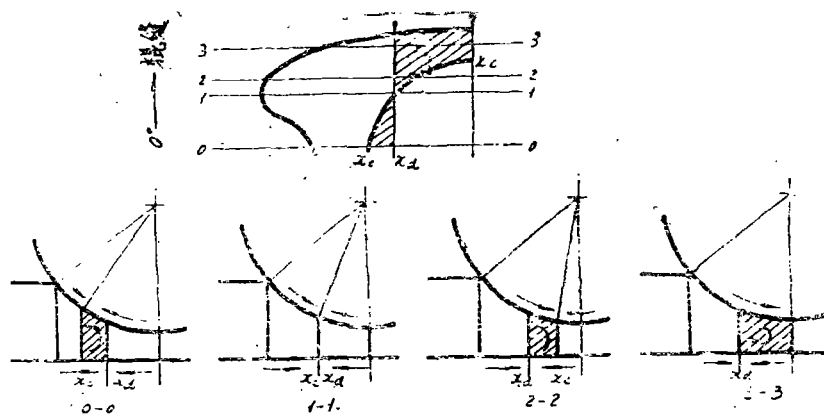


图12 自由轧制时,沿孔周边不同角度上的变形区(阴影面为异向区)我们称为同向区。同向区和异向区中的微分单元体的受力图示是不相同的,如图14所示。

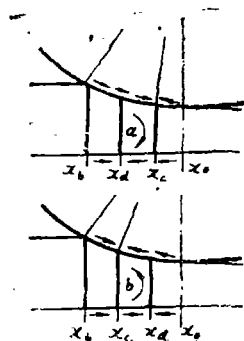


图13 顺时针旋转异向区(a)和逆时针旋转异向区(b)

在Hoffman、Sachs⁽¹⁾的理论中假定 $P_1 = P_2 = P$, 则前、后滑区及异向区的单位压力公式为:

前滑区

$$\frac{P}{\sigma_0'} = e^{AW} \left(1 + \frac{2}{A^2} \right) - \frac{2}{A^2} (1 + AW) \quad (1)$$

后滑区

$$\frac{P}{\sigma_0'} = e^{A(Wb-A)} \left[1 + \frac{2}{A^2} (1 - AW_b) \right] - \frac{2}{A^2} (1 - AW) \quad (2)$$

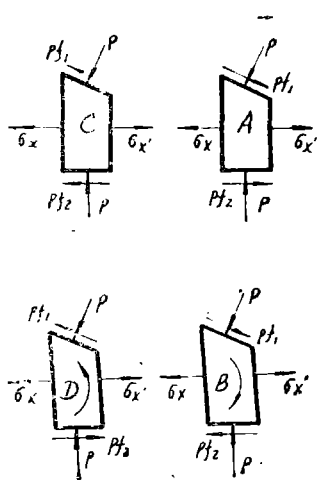


图14 同向区(前滑区(C)、后滑区(A))及异向区(D、B)中微分单元体受力图

式中: $A = 2f \sqrt{\frac{R}{h_2}}$, $\lg W = \sqrt{\frac{R}{h_2}} \lg \alpha$

$$W_b = \arctg \sqrt{\frac{h_b}{h_2}} - 1, R = 2R_1$$

$f = \frac{f_1 + f_2}{2}$, $\lg \alpha = \frac{X}{R} = \frac{X}{2R_1}$. f_1, f_2 为轧辊、芯棒表面的摩擦系数, h_b, h_2 为轧制前、后轧件的厚度, R_1 为轧辊半径。

关于异向区, 在Hoffman、Sachs理论中假定两摩擦系数相等, $f_1 = f_2$, 因此两摩擦力作用抵消。得: 异向区

$$\frac{P}{\sigma_0'} = \frac{P_0}{\sigma_0'} + \ln \frac{h}{h_2} \quad (3)$$

但对于芯棒轧管, 实际上 $f_1 \neq f_2$, 且 $f_1 > f_2$, 一般 f_1 约为 f_2 的 2.5-4 倍⁽⁸⁾, 因此异向区的单位压力公式应当重新加以考虑: $f_1 > f_2$ 时, 异向区的Karman方程为:

$h d\sigma_x + \sigma_x dh + P dx [2 \lg \alpha \pm (f_1 - f_2)] = 0$
 式中正、负号分别对应反时针旋转异向区和顺时针旋转异向区, 令 $f' = \frac{f_1 - f_2}{2}$, 上式的解为:

顺时针旋转异向区:

$$\frac{P}{\sigma_0'} = e^{A(Wb-A)} \left[1 + \frac{2}{A^2} (1 - AW_b) \right] - \frac{2}{A^2} (1 - AW) \quad (4)$$

反时针旋转异向区:

$$\frac{P}{\sigma_0'} = e^{AW} \left(1 + \frac{2}{A^2} \right) - \frac{2}{A^2} (1 + AW) \quad (5)$$

根据(1)、(2)和(4)、(5)式作出各区的单位压力曲线如图(15)所示。

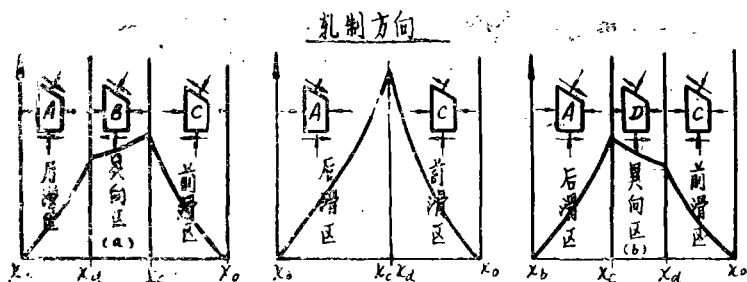


图15 沿孔型周边不同角度上变形区的单位压力理论曲线

由图(15)可以看出,当异向区为零时,整个变形区的单位压力曲线只由后滑区的上升曲线和前滑区的下降曲线组成,符合一般平板轧制的单位压力分布规律;而异向区的出现,削去了单位压力曲线的尖峰,从而单位压力曲线出现一个峰点和一个折点。

这里必须强调的是,上述Hoffman、Sachs理论解得的单位压力 P ,实际上是等效转换后所对应的简单对称轧制情况下的 P ,它既不是 P_1 也不是 P_2 ,分析 P_1 、 P_2 之间的关系是相当复杂的,这必须要做更深入细致的研

究,但是 P 和 P_1 、 P_2 有内在联系,从 P 的变化规律可以分析出 P_1 、 P_2 的变化规律,即:芯棒中性面 X_d 和轧辊中性面 X_c 对应的两点必是 P_1 曲线和 P_2 曲线的两个特征点。

P_2 是芯棒表面的单位压力,因此对 P_2 来说,芯棒表面的摩擦系数 f_2 对 P_2 直接产生影响,所以 P_2 曲线的峰点位置应在芯棒表面摩擦力方向发生变化的地方,即在芯棒中性面 X_d 处,同理, P_1 曲线的峰点位置应在轧辊中性面 X_c 处。如果简化认为 P_1 、 P_2 的平均值是 P ,则 P_1 、 P_2 曲线的形状如图(16)所示。

根据如上的分析,自由轧制时芯棒接触面上不同角度的单位压力曲线形状应当如图(17)所示。从孔型顶部(0°)转向辊缝方向,芯棒单位压力曲线的形状将发生变化,折点的位置从峰点的一侧变化到另一侧。

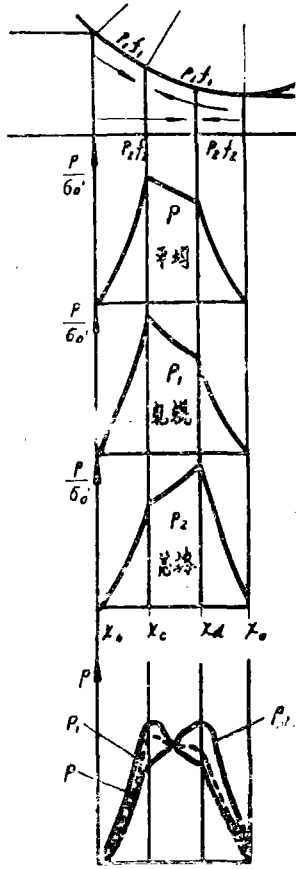


图16 P 、 P_1 、 P_2 之间的关系

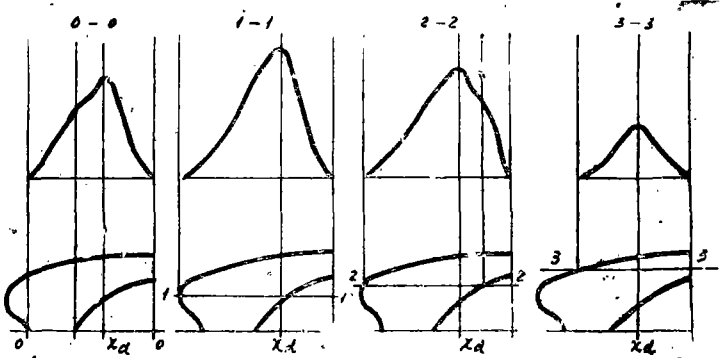


图17 不同角度上的芯棒单位压力曲线

上面的理论分析结果与实验结果完全吻合:从图(11)可见,芯棒单位压力曲线的峰点对应芯棒中性面 X_d 、折点对应轧辊中性面 X_c 。从孔型顶部转向辊缝,实测的芯棒单位压力曲线形状从a型变为b型(图10)。

芯棒速度降低时, X 和 X 之间的距离扩大,扩大了异向区,芯棒单位压力曲线的峰尖被削去的更多。同时芯棒速度降低, X 位置移向变形区入口端,甚至移到变形区出口以外,从而使芯棒单位压力曲线的峰点位置偏向变形区入口端,这与试验结果相符(图8)。

在一般概念中⁽⁷⁾⁽⁸⁾,认为孔型中间部份($\frac{\pi}{4} \leq \alpha \leq \frac{3}{4}\pi$)由于减壁量均匀分布,因而单位压力也是均匀分布的,这实际上是忽略了变形区接触弧长度 l_i 对单位压力的影响,孔型中间部份尽管减壁量均匀分布,但各角度上的接触弧长并不相同。从实测曲线可见(图5), P_{max} 与 l_i 成正比变化。在园进椭圆情况下, l_i 的最大值位于金属与芯棒最先接触的两个角度上,因而这两个角度上的芯棒单位压力的峰值 P_{max} 在横断面上最大。

四. 结 论

1. 连轧管变形区由摩擦力同向区和异向区两部份组成,异向区削去了芯棒单位压力曲线的峰尖,降低了芯棒单位压力曲线的最大值 P_{max} 。

2. 芯棒单位压力曲线有两个特征点:峰点和折点。峰点位置对应于芯棒中性面 X_d ,折点位置对应于轧辊中性面 X_c 。

3. 自由轧制时芯棒接触面被 X_d 和 X_c 划分为四个区,因而在芯棒接触面上,从孔型顶部(0°)到辊缝方向芯棒单位压力曲线的形状发生规律性变化。

4. 芯棒单位压力曲线的最大值 P_{max} 与相应的变形区接触弧长成正比。在园进椭圆情况下,芯棒横断面上单位压力的最大点位于金属和芯棒最先接触的两个角度上。

5. 芯棒单位压力的最大值 P_{max} 及平均值 P_c 随减壁量 ΔS 的增大而增大。

6. 可控芯棒轧制时,芯棒速度降低,则芯棒单位压力曲线的峰点位置移向变形区入口端,且 P_{max} 及 P_c 减小。

参考文献

[1] O. Hoffman, G. Sachs: 工程塑性理论基础, 中国工业出版社, 1964年

[2] В.М. Бурчин: Определение действующих усилий при холодной непрерывной прокатке тонкостенных труб "Теория прокатки" Металлургиздат 1962.

[3] А.П. Чекарев, Я.Л. Ваткин: Основы прокатки труб в круглых, Металлургиздат, 1962.

[4] 阎蜀琴: 连轧管芯棒上单位压力分布研究 北京钢铁学院研究生毕业论文(导师: 卢于逮) 1981.

[5] А.Я. Семенюта, И.А. Чекарев: Определение вертикального давления при оправочной прокатке труб калибрах "Металлургия и коксохимия", вып 50 "Техника", 1976

[6] Gerd Pfeiffer: Verformungstechnologische Erkenntnisse beim Betreiben eines Kontinuierlichen Rohrwalzwerkes "Stahl und Eisen" 1970. №8

[7] 岡本丰彦、林千博: 连续轧制的塑性理论 "住友金属" Vol 23 №4 Jan 1971.