

研究 与 讨论

平均单位轧制压力 \bar{p} 的分析

魏 春 雨

(鞍山钢铁学院)

在设计新轧钢机或挖掘轧钢机生产能力时,需要精确确定轧制压力、轧制力矩及主电机功率这三个力能参数。文章从理论上介绍了这三个主要参数的获得方法,为进一步具体实践打下了良好的理论基础。

关键词 轧钢机 力能参数 分析

1 引 言

轧制压力、轧制力矩和主电机功率这三个力能参数是标志轧钢机负荷的主要参数。在设计新轧钢机时,为了计算零部件强度必须知道这些参数。在合理安排工艺、安全使用设备以及充分发挥设备能力,满足扩大品种和强化轧制过程时,也要正确确定各种具体生产条件下的轧制压力、轧制力矩和主电机功率。因此,对于设计新轧钢机或在生产中充分发挥轧钢机潜力,精确确定这些参数是十分必要的,对于降低辊耗也是十分必要的。降低辊耗,可以带来巨大的经济效益。

轧制时, σ_3 为垂直方向的主应力,可以近似地看作为轧件与轧辊接触弧上的单位压力 p ; σ_1 为水平方向的主应力,其大小决定接触弧上的摩擦力和前后张力; σ_2 为轧件宽展方向的主应力。由于各点的 σ_2, σ_1 值不同,接触弧上单位压力 σ_3 的分布也不均匀。为了便于计算,一般以接触弧上单位压力的平均值(即平均单位压力 \bar{p})来计算轧制力: $P = \bar{p}F$ (P 为轧制力, F 为接触面积的水平投影), \bar{p}

决定于被轧制金属的变形抗力 σ_s 和变形区的应力状态。

平均单位压力 \bar{p} 的一般表达式为:

$$\bar{p} = mn_s \sigma_s \quad (1)$$

式中: m ——考虑中间主应力的影响系数,在 1~1.15 范围内变化,若忽略宽展,认为轧件产生平面变形,则,

$$m = 1.15;$$

n_s ——应力状态系数;

σ_s ——被轧制金属的变形抗力。

$$n_s = n_s' n_s'' n_s''' \quad (2)$$

式中: n_s' ——考虑外摩擦影响的系数;

n_s'' ——考虑外端影响的系数;

n_s''' ——考虑张力影响的系数。

2 应力状态影响的系数

大量试验表明,影响轧件应力状态的主要参数是变形区形状系数 l/\bar{h} , 即变形区长度 l 与轧件的平均厚度 \bar{h} 之比, $\bar{h} = \frac{1}{2}(H+h)$, H, h 分别为轧制前、后轧件的厚度。 l/\bar{h} 与 p 的应力状态影响系数 n_s' 和 n_s'' 的关系如

图1所示。

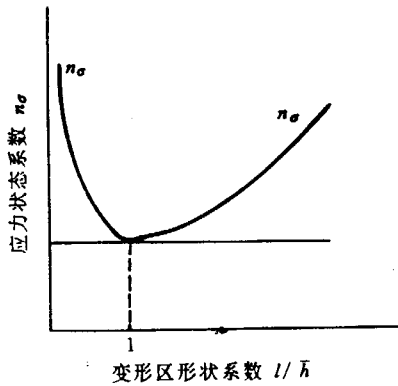


图1 变形区形状系数 l/h 与 n_s' 和 n_s'' 的关系曲线

(1) 外摩擦对应力状态的影响系数 n_s'

外摩擦对单位压力 p 的影响是通过水平应力起作用的, 其影响因素有: 轧件与轧辊间的摩擦系数 f 、轧件高度 H 和轧辊直径 D 。在大多数的情况下, 当 $l/h > 1$ 时 (如轧薄板), 外摩擦对应力状态的影响是主要的, \bar{p} 公式主要是计算 n_s' , 见式 14, 15, 16。当 $l/h < 1$ 时 (如初轧开坯), 外区对应力状态的影响是主要的, \bar{p} 公式主要是计算 n_s'' 。按采利柯夫经验公式计算 n_s'' :

$$n_s'' = \left(\frac{l}{h}\right)^{-0.4} \quad (3)$$

(2) 张力对应力状态的影响系数 n_s''

用张力轧制时, 变形区金属在轧制方向产生附加应力, 使三向压力状态的水平方向的主应力 (即 σ_1) 减小, 这就降低了平均单位压力 σ_3 。

$$\because (-\sigma_1) - (-\sigma_3) = m\sigma_s$$

$$\therefore \sigma_3 = \sigma_1 + m\sigma_s$$

而前、后张力都使 σ_1 减小, $\therefore \sigma_3$ 减小, 即 P 也减小。

张力对应力状态的影响系数 n_s'' , 按柯洛辽夫公式计算:

$$n_s'' = 1 - \frac{\bar{q}}{K} \quad (4)$$

$$\bar{q} = \frac{1}{2} (q_h + q_H)$$

$$K = 1.15\sigma_s$$

式中: \bar{q} —— 平均张应力;

q_h, q_H —— 单位前、后张应力;

K —— 轧件的平面变形抗力。

(3) 轧制时金属的变形抗力 σ_s

它是指在单向应力状态下金属材料产生塑性变形时所需的单位面积上的力, 它与变形程度 ϵ 、变形速度 $\dot{\epsilon}$ 、变形温度 t 和钢种有关。

当 $l/h \geq 2$ 时, 在变形区中轧件和轧辊之间存在着相对滑动, 在滑动条件下, 变形速度的平均值 $\dot{\epsilon}$ 为:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{l} \times \frac{\Delta h}{H} \quad (5)$$

当 $l/h < 2$ 时, 变形区中轧件与轧辊之间没有相对滑动, 出现所谓粘着现象, 这时 $\dot{\epsilon}$ 的公式如下:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{l} \ln \frac{H}{h} \quad (6)$$

① 用系数法确定变形抗力 σ_s

安德留克变形抗力 σ_s 的经验公式为:

$$\sigma_s = \sigma_j(\epsilon)^a \times (10\epsilon)^b \times \left(\frac{t}{1000}\right)^{-c} \quad (7)$$

式中 σ_j 为基准变形抗力, 它是温度 t 为 1000℃、变形速度为 $1s^{-1}$, 变形程度 ϵ 为 0.1 时的变形抗力。

某些钢的 σ_j, a, b, c 数值如表 1 所示。

下面举例说明:

例如, 轧制前轧件厚度 $H=100mm$, 轧

表1 某些钢的 σ_j, a, b, c 值

钢号	σ_j, MPa	a	b	c
A3F	69	0.135	0.164	2.80
A3	87	0.121	0.167	2.54
A5	82	0.111	0.208	3.35
15Mn	86.7	0.126	0.188	2.74
30CrMnSiA	92	0.131	0.250	3.34
45	87.4	0.143	0.173	3.05
40Cr	85.5	0.130	0.170	3.62
65Mn	73.2	0.166	0.222	3.02

后厚度 $h=50\text{mm}$, 轧件出口速度为 $v=5\text{m/s}$, 轧辊半径 $R_k=325\text{mm}$, 求金属的变形抗力 σ_s ($t=1250^\circ\text{C}$, 轧制 A3F)。

变形速度

$$\bar{\epsilon} = \frac{v}{l} \times \frac{\Delta h}{H} = \frac{5 \times 10^3}{\sqrt{325 \times 25}} \times \frac{50}{100} = 19.6\text{s}^{-1}$$

变形程度

$$\epsilon = \frac{H-h}{H} = \frac{100-50}{100} = 50\%$$

变形抗力

$$\begin{aligned} \sigma_s &= \sigma_1(u)^a (10\epsilon)^b \left(\frac{t}{1000}\right)^{-c} \\ &= 69 \times (19.6)^{0.135} \times (10 \times 0.5)^{0.164} \\ &\quad \times \left(\frac{1250}{1000}\right)^{-2.0} = 71.85\text{MPa} \end{aligned}$$

北京科技大学试验厂的 σ_s 公式为:

$$\sigma_s = \sigma_1 K_1 K_2 K_3 \quad (8)$$

式中: σ_1 ——基准变形抗力, 它是变形温度为 1000°C , 变形速度为 10s^{-1} , 变形程度为 0.4 时的变形抗力;

K_1 ——变形温度影响系数,

$$K_1 = \exp(A+B);$$

K_2 ——变形速度影响系数,

$$K_2 = \bar{\epsilon}^{(C+1/T)};$$

K_3 ——变形程度影响系数,

$$K_3 = E \left(\frac{\epsilon}{0.4}\right)^N - (E-1) \frac{\epsilon}{0.4};$$

$$T \text{——相对变形温度, } T = \frac{t+273}{1000}.$$

表 2 某些钢的变形抗力 σ_s 数值

钢种	A	B	C	D	E	N	σ_1 MPa
08F	4.312	-3.387	-0.532	0.513	1.879	0.569	138.9
A3	3.445	-2.706	-0.355	0.374	1.424	0.393	151.2
20	3.321	-2.609	-0.133	0.210	1.454	0.390	155.8
45	3.539	-2.780	-0.157	0.226	1.379	0.342	162.1
09Mn2	3.449	-2.710	-0.173	0.225	1.678	0.494	165.4
16Mn	3.466	-2.723	-0.220	0.225	1.566	0.466	159.9
16MnNb	3.367	-2.645	-0.129	0.181	1.467	0.402	167.4
1Cr18Ni9Ti	2.874	-2.258	-0.374	0.352	1.277	0.323	229.2

注: 表中数据为北京科技大学试验厂的。

②查表法、经验公式法、诺模图法略。

3 平均单位压力 \bar{p} 计算公式

(1) 初轧、开坯轧机 \bar{p} 的计算公式

初轧、开坯轧机的轧制特点是: ① 因为轧件厚度大, 所以 l/\bar{h} 较小; ② 初轧、开坯时无张力; ③ 初轧、开坯时轧件宽度较小, 宽展显著, 轧制时轧件不是平面变形, 是三向变形, 故计算 \bar{p} 时, 要考虑宽展 ΔB 的影响。

当 $l/\bar{h} < 1$ 时, 外区的影响是主要的:

$$\therefore n_s' = 1$$

$$\text{故 } n_s'' = \left(\frac{l}{\bar{h}}\right)^{-0.4} \quad (9)$$

当 $\bar{B}/l \leq 1$ 时, $n_B = 0.87$; n_B 为宽展对应力状态的影响系数。

当 $1 < \frac{\bar{B}}{l} \leq 5$ 时, $0.87 < n_B \leq 1$;

当 $\bar{B}/l > 5$ 时, 可以不考虑宽展的影响, 即 $n_B \approx 1$ 。

$$\bar{p} = n_s'' n_B K \quad (10)$$

$$K = 1.15\sigma_s$$

(2) 热轧钢板轧机 \bar{p} 的计算公式

① 中厚板轧机

1) 中厚板轧机头几道次与初轧、开坯近似, 所以外端的影响是主要的, 但是轧件宽度大, 故可认为是平面变形, 不计 ΔB 的影响。

$$\bar{p} = n_s'' K \quad (11)$$

2) 当轧制中厚板 $l/\bar{h} > 1$ 时, \bar{p} 按薄板的 \bar{p} 计算。

② 薄板轧机

薄板一般厚度 (部分较薄的中板) 为 1.2 ~ 16.0mm, 其 $l/\bar{h} > 1$, 一般为 1.5 ~ 7.0, 外端的影响不是主要的, $\therefore n_s'' = 1$, 外摩擦对应力状态的影响是主要的。

$$\bar{p} = n_s' K \quad (12)$$

$$K = 1.5\sigma_s$$

$$\text{有张力时, } \bar{p} = n_s' n_s'' K \quad (13)$$

n_s' 一般用西姆斯公式或简化式,适用热轧。西姆斯简化公式主要有三种:

1) 美坂佳助 (日本)

$$n_s' = \frac{\pi}{4} + 0.25 \frac{l}{h} \quad (14)$$

2) 克林特里 (前苏联)

$$n_s' = 0.75 + 0.27 \frac{l}{h} \quad (15)$$

3) 北京科技大学 (中国)

$$n_s' = 0.72 + 0.28 \frac{l}{h} \quad (16)$$

(3) 冷轧带钢轧机 \bar{p} 的计算公式

冷轧带钢轧机的轧制特点是: ① 轧件宽度 B 与厚度 H 之比很大, 故认为是平面变形; ② 用张力轧制。

$$\bar{p} = n_s' n_s'' K \quad (17)$$

冷轧时还必须考虑以下三个问题:

① 轧辊弹性压扁的影响

$\bar{p}_{\text{冷轧}} \gg \bar{p}_{\text{热轧}}$; 一般 $\bar{p}_{\text{冷轧}} > 500\text{MPa}$, 使轧辊产生较大的压扁。

② 轧件产生加工硬化, 而变形抗力 $\sigma_s = f(\epsilon)$, 即只与加工硬化或变形程度 ϵ 有关, 所以冷轧时各道次的变形抗力的计算, 不仅与本道次的变形程度有关, 而且与退火后在轧制该道次前的各道次的总的变形程度有关。对本道次来说, 轧件轧前和轧后的变形抗力也不一样, 一般取轧前和轧后变形抗力的平均值 $\bar{\sigma}_s$ 来计算, 即

$$\bar{\sigma}_s = \frac{1}{2} (\sigma_0 + \sigma_1) \quad (18)$$

式中 σ_0, σ_1 为考虑加工硬化后轧前、轧后轧件的变形抗力。

③ 冷轧时一般使用润滑剂, 目的是降低轧辊与轧件间的摩擦, 减少轧辊磨损, 降低外摩擦对应力状态的影响, 可以降低轧制压力。

冷轧时主要用斯通公式和勃兰特-福特公式计算 \bar{p} 和轧制力 P 。

用斯通公式计算 \bar{p} 和 P , 查表法很方便, 一般步骤是:

1) 变形区长度 $l = \sqrt{R\Delta h}$;

2) 轧件平均厚度 $\bar{h} = \frac{1}{2} (H+h)$;

3) 系数 $Z = fl/\bar{h}$, 算出 Z^2 ;

4) $Y = 2CR \frac{f}{h} (K - \bar{q})$; 由陆济民编写的《轧制原理》一书第 109 页图 6-6 的 Z^2 及 Y , 可查出 X , 当 X 已知, $\therefore X = fl'/\bar{h}$; 压扁后的变形区长 l' 可求出;

5) 根据 X , 由第 110 页表 6-1 可查出 n_s' ;

6) 平均单位压力 $\bar{p} = (K - \bar{q}) n_s'$ (19)

7) 轧制力 $P = \bar{p} B l'$ (20)

勃兰特-福特公式较繁琐, 希尔将其简化, 误差小于 2%, 计算准确, 步骤是:

1) $\bar{q} = \frac{1}{2} (q_h + q_H)$;

$$n_s'' = 1 - \frac{\bar{q}}{K};$$

2) ZWX

$$= C_0 K n_s'' (1.08 - 1.02\epsilon) / \sqrt{\Delta h};$$

3) ZWY

$$= 1.79 C_0 K n_s'' f \epsilon \sqrt{1 - \epsilon} / \sqrt{h\Delta h};$$

4) R'

$$= \left[\frac{ZWX + \sqrt{(ZWX)^2 + 4 \left(\frac{1}{R} - ZWY \right)}}{2 \left(\frac{1}{R} - ZWY \right)} \right]^2 \quad (21)$$

5) $n_s' = 1.08 + 1.79 \epsilon f \sqrt{\frac{R'}{H}} - 1.02 \epsilon$

(22)

6) $P_B = K \sqrt{R' \Delta h} n_s' n_s''$

(23)

7) 校核 R'

$$R' = R \left(1 + \frac{C_0 P_B}{\Delta h} \right)$$

8) $P = P_B B$

(24)

(4) 型钢和线材轧机 \bar{p} 的计算公式

一般用爱克隆德半经验公式计算 \bar{p} :

$$\bar{p} = (1+m)(K + \eta \epsilon) \quad (25)$$

$$m = \frac{1.6 \sqrt{R\Delta h} - 1.2\Delta h}{H+h}$$

$$K=9.8(14-0.01t)(1.4+C \\ +Mn+0.3Cr)$$

$$\eta=0.1(14-0.01t)C'$$

$$f=a(1.05-0.0005t)$$

式中: m ——外摩擦对单位压力的影响系数;

C' ——速度修正系数。

速度修正系数与轧制速度关系见表3。

表3 轧制速度与修正系数值

轧制速度, m/s	修正系数
<6	1.0
6~10	0.80
10~15	0.55
15~20	0.60

(5) 立辊轧机 \bar{p}_m 的计算公式

$$\bar{p}_m = n_{\sigma} Q_p \sigma_s \quad (26)$$

$$Q_p = \pi \sqrt{\frac{B_h}{4(B_H - B_h)}} \arctan \sqrt{\frac{B_H - B_h}{B_h}} \frac{\pi}{4} \quad (27)$$

式中: Q_p ——影响系数;

n_{σ} ——应力状态影响系数。

立辊轧机的轧制力 P 为:

$$P = \bar{p}_m H l_0 \quad (28)$$

$$l_0 = \sqrt{R \Delta b}$$

式中: Δb ——轧制前后板坯宽度差,

$$\Delta b = B_H - B_h;$$

l_0 ——接触弧长的水平投影;

H ——板坯厚度。

立辊轧机应力状态影响系数 n_{σ} 曲线见

图2。

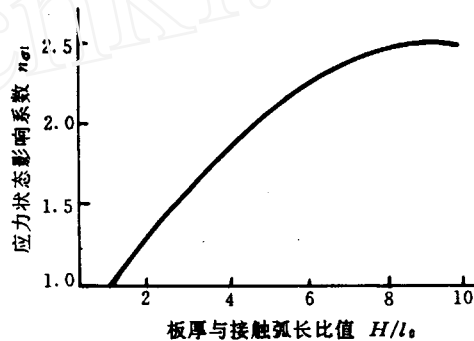


图2 立辊轧机应力状态影响系数曲线

(编辑 母晓东)

(上接6页)

万t。螺旋焊法月产量为0.9~2.5万t。

(2) U成型机和O成型机生产能力大,能生产高强度(X70级以上)、厚壁(壁厚大于25mm)的输送管线钢管。螺旋焊法尚不能生产壁厚大于25mm的输送管线管。

(3) 因焊接后经冷扩管,可提高性能和尺寸精度。

(4) 比螺旋焊法易于生产,且产品合格率达95%~97%。

(5) 产品规格有局限性,最适于大批量单一规格生产。O成型压力机多采用组合冲

头,一套组合冲头只能完成某一范围内管径的成型。

(6) 对原料要求较高,以厚板为原料,要与厚板轧机配套,并对厚板质量要求较高。

(7) 设备较多,设备总重达15000~25000t,机组本身总投资高于螺旋焊管机组。据美国PRD公司最近提供的资料介绍,目前,在美国建设一套Φ1200mm的UOE焊管机组,大约投资1.4亿美元。

(待续)

(编辑 钟成芬)