

# 冷轧润滑过程中摩擦的控制<sup>①</sup>

孙建林 张新明 傅祖铸 李 季

(中南工业大学材料科学与工程系, 长沙 410083)

**摘 要** 通过比较流体润滑状态下冷轧变形区摩擦系数与轧机允许最小摩擦系数得出轧制稳定因子  $K_S$ , 用于判断其轧制过程是否稳定。计算与实验结果表明:  $K_S$  值随压下率减小而降低, 且当  $K_S < 1$  时出现负前滑及摩擦力反向, 同时轧后板面质量变差。因此, 只有当压下率达到一定值后,  $K_S > 1$ , 才能实现稳定轧制并获得优异的轧后板面质量。

**关键词** 冷轧 润滑 摩擦

摩擦是保证轧制过程顺利进行的必要条件, 但同时又给轧制过程带来诸如力能消耗增加、轧辊磨损以及工件变形不均等不利影响。对于后者已受到了足够的重视, 而对于前者尽管也建立了较多的润滑模型<sup>[1, 2]</sup>, 且有 Robert W L<sup>[3]</sup>对钢铁轧制进行了一些分析、计算; 但是, 对于有色金属轧制, 尤其是对轧后板材表面质量的影响研究报道较少。随着近年来轧制工艺润滑技术的广泛应用和对表面质量的要求不断提高, 摩擦对轧制过程的影响将越来越会受到人们的重视。

## 1 轧制过程摩擦分析

### 1.1 允许最小摩擦系数

在轧制过程中把既不发生打滑, 又不产生前滑时的摩擦系数称之为最小摩擦系数  $\mu_{\min}$ 。根据轧制理论有

$$\mu_{\min} = \sqrt{\frac{H\varepsilon}{2D}} \quad (1)$$

式中  $H$  为轧件入口厚度, mm;  $D$  为轧辊直径, mm;  $\varepsilon$  为道次压下率, %。

实际轧制过程中, 轧辊压扁后的辊径  $D'$  可按 Hitchcock J H 公式计算。对于实际应用和采用工艺润滑时, 冷轧的  $D'$  可近似为原辊

径的二倍, 即  $D' = 2D^{[5]}$ 。因而

$$\mu_{\min} = \sqrt{\frac{H\varepsilon}{2D'}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{H\varepsilon}{D}} \quad (2)$$

由上式可知, 在轧机一定的条件下, 最小摩擦系数与轧件原始厚度和压下率有关。一般情况下冷轧时变形区摩擦系数均高于  $\mu_{\min}$ , 然而, 随着轧制速度的提高, 或者采用高粘度轧制油轧制有色金属时, 变形区常处于流体润滑状态, 此时摩擦系数很低, 接近  $\mu_{\min}$ , 导致轧制过程出现不稳定。

### 1.2 流体润滑状态下摩擦系数

由雷诺 (Reynolds) 流体动力学方程可导出流体润滑条件下轧制变形区油膜厚度方程<sup>[4]</sup>:

$$\xi = \frac{3\eta_0\theta(V_R + V)}{\alpha(1 - e^{-\theta(\sigma'_0 - \sigma'_{xa})})} \quad (3)$$

式中  $\eta_0$  为润滑剂动力粘度, Pa·s;  $\theta$  为润滑剂压粘系数, Pa<sup>-1</sup>;  $V_R$  为轧辊速度, m/s;  $\alpha$  为咬入角,  $\alpha = (2H\varepsilon/D)^{-2}$ , 弧度;  $\sigma'_0$  为轧件平面变形抗力,  $\sigma'_0 = 1.155\sigma_0$ , MPa;  $\sigma'_{xa}$  为前张力, MPa。

轧制润滑剂为牛顿流体, 工件表面剪切力, 也即摩擦力  $\tau$  为

$$\tau = \frac{\eta_0 e^{\theta p}(V_R - V)}{\xi} \quad (4)$$

在无前滑无张力的条件下, 轧件入口速度

$V_a$  为

$$V_a = \frac{h}{H} V_R \quad (5)$$

式中  $h$  为轧后厚度, mm。这样可由式(3)求得变形区入口处的油膜厚度  $\xi_a$ 。

根据流体动力学形膜机制, 只有当变形区入口处压力达到材料变形抗力时才能进入变形区形膜, 即有  $P_a = \sigma_0^1$ 。因此由公式(3)、(4)可求得流体润滑条件下轧制变形区入口处摩擦系数  $\mu_a$ :

$$\mu_a = \frac{2\varepsilon(e^{\theta\sigma_0^1} - 1)}{3\theta\sigma_0^1(2 - \varepsilon)} \cdot \frac{1}{2} \sqrt{\frac{H\varepsilon}{D}} \quad (6)$$

因没有前滑, 变形区出口处摩擦系数为零, 所以变形区内摩擦系数可近似为

$$\mu = \frac{\varepsilon(e^{\theta\sigma_0^1} - 1)}{3\theta\sigma_0^1(2 - \varepsilon)} \cdot \frac{1}{2} \sqrt{\frac{H\varepsilon}{D}} \quad (7)$$

## 2 流体润滑轧制稳定因子

由公式(7)和公式(2)可看出

$$\mu = \frac{\varepsilon(e^{\theta\sigma_0^1} - 1)}{3\theta\sigma_0^1(2 - \varepsilon)} \cdot \mu_{\min} \quad (8)$$

令

$$K_S = \frac{\varepsilon(e^{\theta\sigma_0^1} - 1)}{3\theta\sigma_0^1(2 - \varepsilon)} \quad (9)$$

则有

$$\mu = K_S \mu_{\min} \quad (10)$$

由公式(10)可知: 若  $K_S > 1$ , 则  $\mu > \mu_{\min}$ , 也即在流体润滑条件下能实现稳定轧制。不妨把  $K_S$  称为流体润滑轧制稳定因子。

当  $\theta = 3.7 \times 10^8 \text{ Pa}^{-1}$  时, 对于不同  $\sigma_0$  取值, 压下率与轧制稳定因子  $K_S$  的关系见图1。

在图1中随压下率增加,  $K_S$  值变大, 这意味着流体润滑轧制稳定性增加。当  $K_S = 1$  时所对应的压下率可称为稳定轧制所需最小压下率。如变形抗力  $\sigma_0 = 120 \text{ MPa}$  时, 对应的  $\varepsilon_{\min} = 16.7\%$ 。

只有当压下率大于  $\varepsilon_{\min}$  时, 流体润滑轧制才能稳定进行。此外, 图中  $\sigma_0$  不同, 其对应的  $\varepsilon_{\min}$  也就不同, 其中随  $\sigma_0$  增加,  $\varepsilon_{\min}$  减小。这主

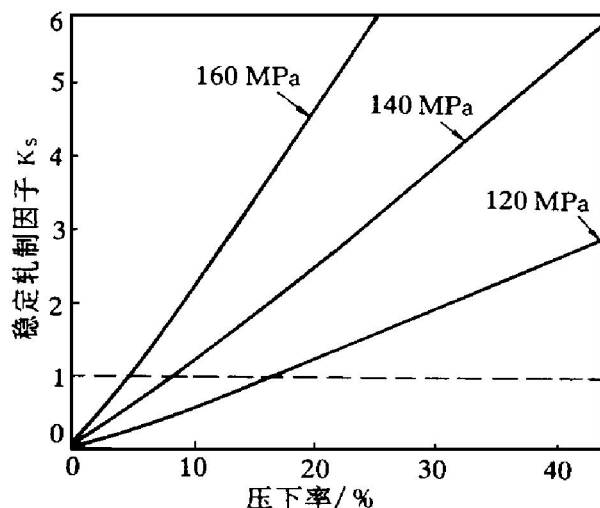


图1 流体润滑轧制稳定因子  $K_S$  随压下

率的变化 ( $\theta = 3.7 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$ )

要是因为材料变形抗力较高时, 轧制变形区流体膜较薄, 摩擦较大, 所以对应的  $\varepsilon_{\min}$  也较低。

## 3 实验及结果分析

为了进一步考证摩擦对轧制过程的影响, 在  $d 130 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$  二辊轧机上采用粘度分别为  $0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  (A 油) 和  $1.6 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  (B 油) 进行轧制实验。辊面粗糙度  $0.25 \mu\text{m}$ , 辊速  $0.32 \text{ m/s}$ 。轧件为硬铝,  $\sigma_0 = 120 \text{ MPa}$ 。尺寸为  $1.0 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 。油膜厚度由称重法测定, 摩擦系数由前滑法计算, 轧后板面光亮度由表面光亮仪测定并在 SEM 观察其表面形貌。

图2为 A、B 油在不同压下率下变形区入口处油膜厚度。同时测得使用 A、B 油轧后表面粗糙度  $R_s$  分别为  $0.38 \mu\text{m}$  和  $0.51 \mu\text{m}$ 。根据流体润滑判别方法,  $\xi \geq 3R$ ,  $R = \sqrt{R_r^2 R_s^2}$  可以判断<sup>[6]</sup>: A 油轧制为混合润滑, B 油为流体润滑。它们的前滑、摩擦系数及轧后板面光亮度见图3。

图3表示使用 B 油轧制, 由于它处于流体润滑状态, 故表现出较低的前滑值和摩擦系数, 且当  $\varepsilon < 16\%$  时出现了负前滑和摩擦力反向(摩擦系数仍为正)。但  $\varepsilon > 16\%$  后, 前滑为

正, 摩擦系数增大, 轧制稳定性增强。对比图 1 中  $\sigma_0 = 120 \text{ MPa}$  曲线( $B$  油的  $\theta = 3.7 \times 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$ ),  $K_S = 1$  时,  $\varepsilon_{\min} = 16.7\%$ 。这说明使用流体润滑轧制稳定因子  $K_S$  判别其轧制过程是否稳定进行与轧制实验较为吻合。相反,  $A$  油由于处于混合润滑状态, 其前滑值为正, 摩擦力不变向, 轧制过程稳定。

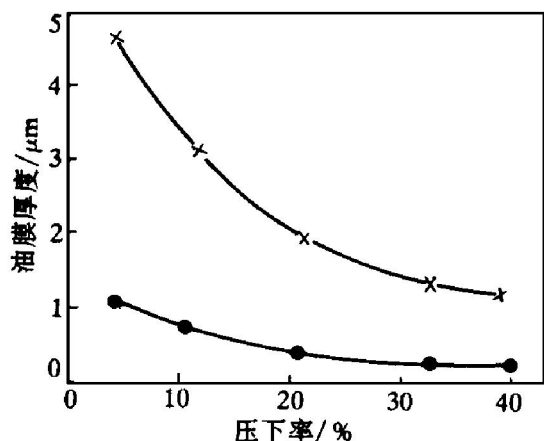


图2 油膜厚度随压下率的变化

●—A 油; ×—B 油

由于  $B$  油轧制摩擦系数较低, 前滑值较小, 至使轧制变形区中性面向出口方向移动, 轧辊对轧件“研磨”或“抛光”作用减弱<sup>[3]</sup>, 特别是出现负前滑时, 中性面已移出出口平面, 上述作用消失, 导致轧后板面光亮度下降。相反,  $A$  油的摩擦系数和前滑值都高于  $B$  油, 中性面向入口方向移动, 轧辊“研磨”作用增强, 轧后板面光亮度较高。上述实验结果可从轧后表面 SEM 照片中得到进一步证实。图 4 (a)、(b) 为  $\varepsilon = 11.4\%$  时  $A$  油和  $B$  油轧后表面显微形貌。图 4(a) 中轧制痕整齐、表面平整, 而图 4(b) 中轧制痕较为混乱、出现了横向油纹及油窝、表面质量较差。

## 4 结论

通过对流体润滑条件下轧制稳定性的分析计算以及轧制实验研究摩擦对轧制过程及轧后

板面质量的影响, 可以得到以下结论。

(1) 流体润滑条件下摩擦对轧制过程稳定性的影响可以用轧制稳定因子  $K_S$  表示。不考虑咬入情况,  $K_S > 1$  即可实现稳定轧制。

(2) 稳定轧制因子  $K_S = \frac{\varepsilon(e^{\theta\sigma_0^1} - 1)}{3\theta\sigma_0^1(2 - \varepsilon)}$ , 表明轧制油压粘系数  $\theta$  和被轧材质  $\sigma_0$  对  $K_S$  有较大影响, 但上述二因素一定时  $K_S$  随道次压下率增加而变大, 也即随压下率增加轧制稳定性增强。

(3) 轧制过程中变形区适当的摩擦对轧后板面质量有利。在实验条件下轧后板面光亮度随摩擦系数增加而升高。但需指出的是, 并非

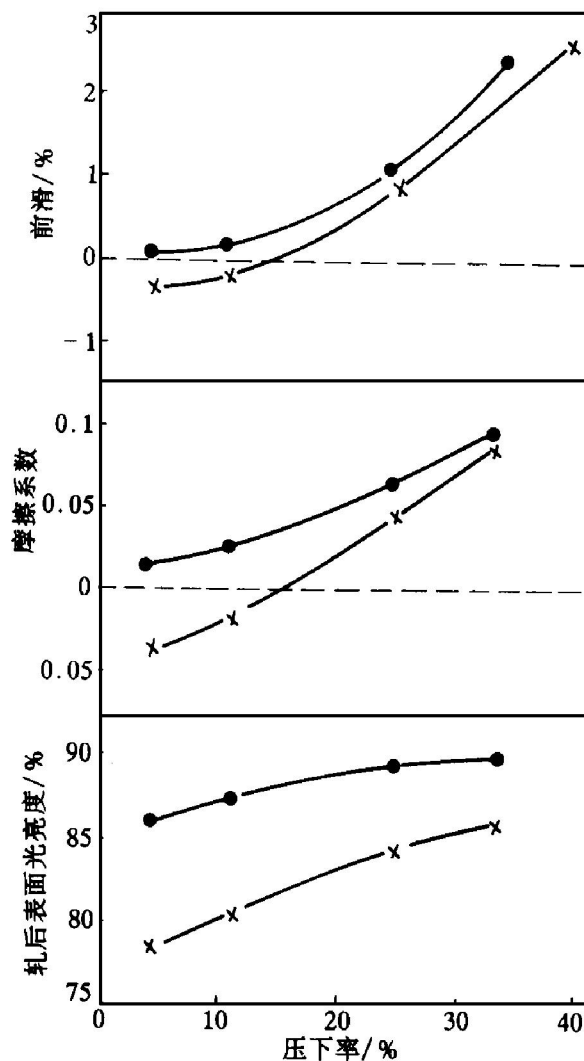


图3 前滑、摩擦系数和轧后板面光亮度随压下率的变化。

●—A 油; ×—B 油

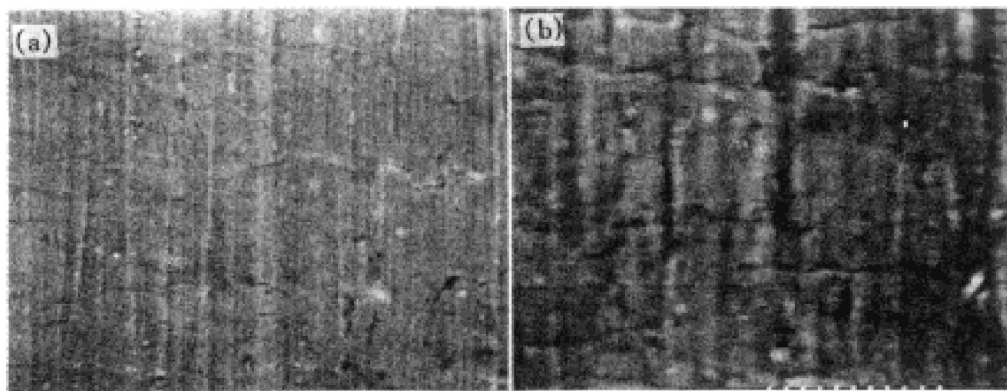


图4 A油 and B油轧后板面显微形貌(SEM,  $\times 500$ )

摩擦越大对轧制过程和轧后表面质量越有利, 所以要对轧制过程中的摩擦进行控制。

#### 参考文献

- 1 Chung Y S, Wilson R D. ASME Journal of Tribology, 1994, 116(7): 569–575.
- 2 Wilson R D. Journal of Application Metalworking, 1979, (1): 1–19.
- 3 Roberts W L. 冷轧带钢生产. 北京: 冶金工业出版社, 1985.
- 4 孙大成(美). 润滑力学讲义. 北京: 友谊出版公司, 1991.
- 5 李虎兴. 压力加工过程的摩擦与润滑. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 48–49.
- 6 Nadir Patir, Cheng H S. ASME Trans, 1979, 101(4): 22–230.

## CONTROL OF FRICTION IN COLD ROLLING PROCESS

Sun Jianlin, Zhang Xinming, Fu Zuzhu, Li Ji

*Department of Materials Science and Engineering,  
Central South University of Technology, Changsha 410083*

**ABSTRACT** The stable rolling factor  $K_S$  was developed to decide the stability of rolling process by comparing the friction coefficient in hydrodynamic lubrication rolling with allowed minimum friction coefficient in rolling. The results in calculations and experiments showed that  $K_S$  value reduced with decreasing reduction rate, which caused the negative forward slip and a change of friction direction and a poor rolled surface when  $K_S < 1$ . Only reduction rate reached a certain value and  $K_S > 1$  can rolling be stable process and good rolled surface quality be obtained.

**Key words** cold rolling lubrication friction

(编辑 朱忠国)