

[文章编号] 1004- 0609(2001)01- 0018- 04

# 混合润滑轧制入口膜厚模型<sup>①</sup>

孙建林<sup>1</sup>, 康永林<sup>1</sup>, 张新明<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083; 2. 中南大学 材料科学与工程系, 长沙 410083)

**[摘要]** 运用平均流动模型求解混合润滑轧制变形区入口膜厚问题时, 提出了混合因子  $\phi_m$ , 它综合了流动因子  $\phi_x$  和接触因子  $\phi_c$  对入口膜厚的影响, 简化了轧制润滑模型。计算和实验表明, 在流体润滑条件下, 表面粗糙效应对形膜亦有一定的影响, 也即混合因子  $\phi_m$  还适用于流体润滑轧制, 且修正了未考虑表面粗糙效应而引起的不足。

**[关键词]** 轧制; 混合润滑; 混合因子

**[中图分类号]** TG 331

**[文献标识码]** A

轧制工艺润滑理论一直以 Wilson<sup>[1, 2]</sup> 的流体润滑轧制变形区油膜厚度的计算模型为基础。然而, 实际轧制变形区多处于混合润滑状态, 两接触表面上的微凸体发生部分接触, 变形区内压力一部分由流体承担, 另一部分则由相接触的微凸体承担; 另外, 表面微凸体的大小、方向明显影响润滑剂的流动以及形膜厚度<sup>[3, 4]</sup>。因此, 若仍用原来的雷诺方程求解混合润滑问题显然是不适宜的。

理方向因子。  $\phi_y$  可直接由式(3)求得:

$$\phi_y(H, \gamma) = \phi_x(H, 1/\gamma) \quad (3)$$

有关参数的值见表 1。显然, 当  $\gamma > 1$  时,  $\phi_x > 1$ , 也即纵向粗糙度有利于润滑剂的流动; 当  $\gamma < 1$  时,  $\phi_x < 1$ , 也即横向粗糙度阻碍润滑剂的流动。当膜厚比  $H \rightarrow \infty$  时,  $\phi_x = 1$ , 也即由于油膜较厚, 表面粗糙度对润滑剂的影响可以忽略; 但是当  $H < 3$  时,  $\phi_x$  对粗糙度的大小及纹理方向较为敏感。

表 1 计算参数值<sup>[7]</sup>

Table 1 Value of calculating parameters

$\gamma$	$C$	$r$	$H$
1/9	1.48	0.42	> 1
1/6	1.38	0.42	> 1
1/3	1.18	0.42	> 0.75
1	0.90	0.56	> 0.5
3	0.225	1.5	> 0.5
6	0.53	1.5	> 0.5
9	0.87	1.5	> 0.5

## 1 平均流动方程

Patir 和 Cheng<sup>[5, 6]</sup> 于 1978 年提出了平均流动模型(Average flow model), 用于解决粗糙表面的润滑问题, 并且在理论和实践上都取得了相当满意的结果。含有粗糙度影响的平均流动雷诺方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \phi_x \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \phi_y \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right) = \frac{U_1 + U_2}{2} \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} + \frac{U_1 + U_2}{2} \sigma \frac{\partial \phi_s}{\partial x} + \frac{\partial \bar{h}_T}{\partial t} \quad (1)$$

式中  $\phi_x, \phi_y$  为  $x, y$  方向上的压力流量因子;  $\phi_s$  为剪切流量因子;  $\bar{h}_T$  为平均膜厚;  $\bar{p}$  为平均压力;  $\sigma$  为两表面综合粗糙度。

显然, 平均流动模型通过加权函数的办法解决了两个随机函数  $\bar{h}_T$  和  $\bar{p}$  乘积的均值分解问题, 加权函数  $\phi_x, \phi_y$  及  $\phi_s$  反映了粗糙表面对润滑的影响。 $\phi_x$  的近似计算公式为

$$\phi_x = \begin{cases} 1 - Ce^{-\gamma H}, & \gamma \leq 1 \\ 1 - CH e^{-\gamma}, & \gamma > 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中  $H$  为膜厚比, 即  $H = h/\sigma$ ,  $\gamma$  为轮廓表面纹

在一定的表面粗糙度分布下, 实际平均膜厚  $\bar{h}_T$  仅是  $h$  的函数。例如对于典型的高斯分布则为:

$$\begin{cases} \bar{h}_T = \frac{3\sigma}{256} (35 + 128z + 140z^2 - 70z^4 + 28z^6 - 5z^8) \\ z = \frac{h}{3\sigma} \end{cases} \quad (4)$$

Wu 等人<sup>[8, 9]</sup> 进行了如下变换:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{h}_T}{\partial x} = \frac{\partial \bar{h}_T}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial \bar{h}_T}{\partial t} = \frac{\partial \bar{h}_T}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} \end{cases} \quad (5)$$

① [收稿日期] 1999- 10- 26; [修订日期] 2000- 04- 20

[作者简介] 孙建林(1963- ), 男, 副教授, 博士。

并由此定义了一个无量纲参数, 即接触因子  $\phi_c$ ,

$$\phi_c = \frac{\overline{\partial h_T}}{\partial h} \quad (7)$$

$\phi_c$  反映了润滑表面某处非接触部分所占的比例, 也即表面某一点  $(x, y)$  处非接触的概率, 当  $\phi_c \rightarrow 1$  时, 表示全膜润滑。此外, 还推导出了 4 种常见的接触因子分布, 即高斯分布、线性分布、矩形分布和指数分布。其中, 高斯分布的接触因子为

$$\phi_c = \frac{1}{2} \left| 1 + \exp \left[ -\frac{H}{\sqrt{2}} \right] \right| \quad (7)$$

式(7)不易直接使用, 可用下面的拟合公式代替(最大误差不超过 0.5%), 即

$$\phi_c = \begin{cases} \exp(-0.6912 + 0.732H - 0.304H^2 + 0.0401H^3) & (H > 3) \\ 1 & (H < 3) \end{cases} \quad (8)$$

将接触因子  $\phi_c$  代入式(1), 则平均流动方程变为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \phi_x \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \phi_y \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x} \right) = \frac{U_1 + U_2}{2} \phi_c \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{U_1 + U_2}{2} \sigma \frac{\partial \phi_s}{\partial x} + \frac{\partial \overline{h_T}}{\partial t} \quad (9)$$

## 2 混合因子

就轧制工艺润滑过程而言, 铝板可近似无宽展, 而且油膜厚度亦不随时间变化, 因此下列关系成立:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial y} \left( \phi_y \frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x} \right) = 0 \\ \frac{\partial \overline{h_T}}{\partial t} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

此外, 在冷轧过程中, 轧后铝板表面性能与轧辊表面密切相关, 假定两表面参数相近<sup>[10]</sup>,  $\phi_s \rightarrow 0$ , 加之轧辊与轧件相对滑动量不大<sup>[11]</sup>, 则考虑冷轧过程粘压效应的平均流动方程可表示为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \phi_x \frac{h^3}{12\eta_0 e^{\phi}} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x} \right) = \frac{U_1 + U_2}{2} \phi_c \frac{dh}{dx} \quad (11)$$

式中  $\eta_0$  为润滑剂常压动力粘度,  $\theta$  为压粘系数。

由入口边界条件,

$$\begin{cases} h = h_a \\ \overline{p} = \sigma_0 - \sigma_a \\ \frac{1}{e^{\phi}} \frac{d\overline{p}}{dx} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中  $\sigma_0$  为材料片面变形抗力,  $\sigma_a$  为后张力, 将式(11)积分并确定积分常数, 同时定义新参数  $\phi_m$ ,

称为混合因子, 且有

$$\phi_m = \frac{\phi_c}{\phi_x} \quad (13)$$

得到轧制入口区压力分布和入口膜厚  $h_a$  分别为

$$e^{\overline{\phi}} = 1 + \phi_m \frac{3\eta_0 \theta R (v_a + v_r)}{x_a h_a} \left[ \left| \frac{h_a}{h} \right|^2 - \left| \frac{h_a}{h} \right| \right] \quad (14)$$

$$h_a = \phi_m \frac{3\eta_0 \theta R (v_a + v_r)}{x_a [1 - e^{-\theta(\sigma_b - \sigma_a)}]} \quad (15)$$

从式(13)与式(15)不难看出  $\phi_m$  的含义。在混合润滑轧制过程不考虑因滑动引起的剪切流动情况下,  $\phi_x$  反映了表面粗糙对压力流量的影响, 也即粗糙表面平均压力流量与光滑表面压力流量之比, 但没有包含两表面微凸体接触对压力流量的影响;  $\phi_c$  则只表示了表面某处微凸体非接触的概率; 而  $\phi_m$  为  $\phi_c$  与  $\phi_x$  的比值, 它表示了粗糙表面接触对油膜厚度的影响, 不但与膜厚比、表面粗糙情况有关, 而且还反映了表面接触程度对膜厚的影响。因此,  $\phi_m$  有机地把两者结合在一起, 通过  $\phi_m$  可巧妙地用流体润滑模型求解混合润滑轧制问题。

当接触表面纹理同向 ( $\gamma = 1$ ) 时,  $\phi_x$ ,  $\phi_c$  及  $\phi_m$  随膜厚比  $H$  的变化见图 1。由于  $\phi_c$  与表面纹理方向无关, 无论  $\gamma$  取任何值都相同。

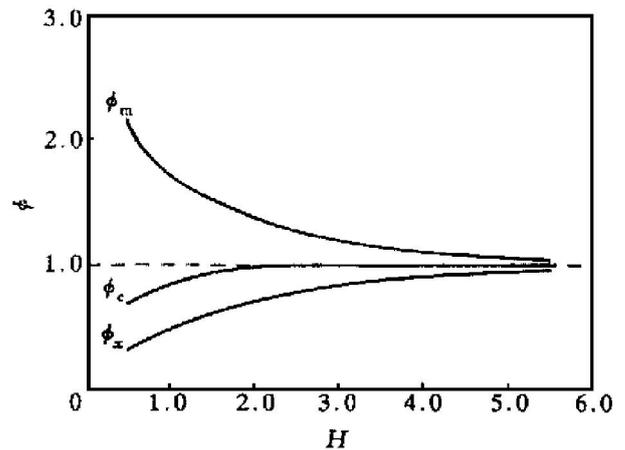


图 1  $\phi_x$ ,  $\phi_c$ ,  $\phi_m$  随膜厚比的变化

Fig. 1 Changes of  $\phi_x$ ,  $\phi_c$  and

$\phi_m$  with film thickness ratio  $H$  ( $\gamma = 1$ )

由图 1 可知, 随膜厚比增加,  $\phi_c$  增大, 表面接触概率减小, 当  $H \gg 3$  时,  $\phi_c = 1$ , 表明两表面不发生接触, 即进入流体润滑状态。 $\phi_x$  则与表面粗糙度有关, 当  $\gamma = 1$  时,  $\phi_x < \phi_c$ , 则有  $\phi_m > 1$ , 即表面纹理同向时, 粗糙表面使得轧制变形区入口膜厚增加, 而且粗糙度越大, 膜厚越大, 但当  $H = 3$  时,  $\phi_m$  仍  $> 1$ , 这说明即使处于流体润滑状态, 表面粗糙对入口形膜也有影响。

方向因子  $\gamma$  与膜厚比  $H$  对混合因子  $\phi_m$  的影响见图 2。

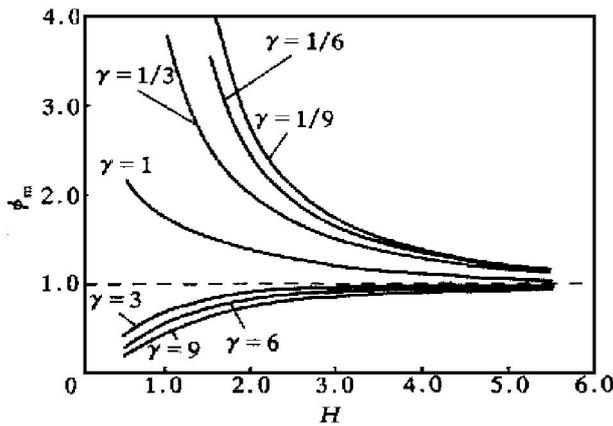


图 2 方向因子与膜厚比对  $\phi_m$  的影响

Fig. 2 Influence of direction factor and film thickness ratio on  $\phi_m$

当  $\gamma \leq 1$  时,  $\phi_m > 1$ ; 当  $\gamma > 1$  时,  $\phi_m < 1$ 。很明显, 表面横向粗糙度导致入口膜厚增大, 而纵向粗糙度导致入口膜厚减小。值得注意的是随膜厚比增加, 无论是具有纵向纹理的表面, 还是具有横向纹理的表面,  $\phi_m$  都趋近于 1。当  $H \geq 3$ , 则开始进入流体润滑状态, 这说明了虽然表面粗糙度, 尤其是横向粗糙度对形膜有影响, 但随  $H$  增大, 这种影响越来越小。因此, 混合因子  $\phi_m$  不仅适用于混合润滑形膜计算, 同样还适用于流体润滑形膜的计算。

### 3 入口膜厚计算与实验结果分析

混合润滑入口膜厚计算公式(15)可改写成

$$h_a = \phi_m h_0 \quad (16)$$

式中  $h_0$  为相应条件下不考虑表面粗糙效应, 按流体动力学形膜公式计算的入口膜厚度:

$$h_0 = \frac{3\eta_0 \theta R (v_a + v_r)}{x_a [1 - e^{-\theta(\sigma_0 - \sigma_a)}]} \quad (17)$$

当  $\gamma = 1$  时, 有

$$\phi_m = \exp(-0.6912 + 0.782H - 0.304H^2 + 0.0401H^3) / [1 - 0.9\exp(-0.56H)] \quad (18)$$

#### 1) 粘度与入口膜厚的关系

取不同粘度的矿物油, 在  $\varepsilon = 20\%$ ,  $\sigma = 0.35 \mu\text{m}$  时测得轧制变形区入口膜厚, 并与混合因子模型膜厚计算值  $h_{ma}$  及流体动力学模型膜厚计算值  $h_{aa}$  进行比较, 结果见图 3。

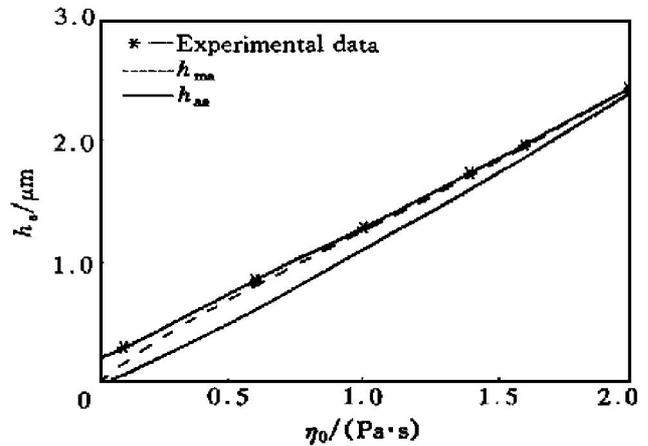


图 3 粘度与入口膜厚关系

Fig. 3 Relationship between viscosity and inlet film thickness

( $R = 65 \text{ mm}$ ;  $v_r = 0.32 \text{ m/s}$ ;  $\varepsilon = 0.2$ )

很明显, 从图 3 中可以看出混合因子模型计算膜厚  $h_{ma}$  与实验值吻合较好, 而由流体动力学模型计算膜厚  $h_{aa}$  则随粘度增加才逐渐接近实验值。经计算, 达到流体润滑的膜厚  $h_a = 1.06 \mu\text{m}$ 。由表 1 可知, 当  $\gamma = 1$  时,  $\phi_m$  的适用条件为  $H \geq 0.5$ , 即入口膜厚度必须大于  $0.5\sigma$ , 所以使用混合因子  $\phi_m$  求解混合润滑问题, 对应图 3 中膜厚小于  $0.175 \mu\text{m}$  计算值出现了一些误差, 这也是模型有待进一步改进的方面。

#### 2) 轧制速度与入口膜厚关系

不同轧制速度的入口膜厚实测值, 混合因子模型计算值  $h_{ma}$  以及流体动力学模型计算值  $h_{aa}$  对比见图 4。

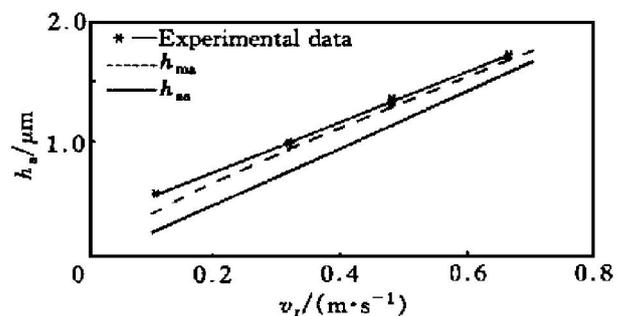


图 4 轧制速度与入口膜厚度关系

Fig. 4 Relationship between rolling speed and inlet film thickness

( $\eta_0 = 0.5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ;  $R = 65 \text{ mm}$ ;  $\varepsilon = 0.1$ )

由于轧制速度所限, 压下率只取 10%。与图 4 结果相似, 混合因子模型计算值  $h_{ma}$  与实测值吻合较好, 而流体动力学模型计算值  $h_{aa}$  随轧制速度增加才逐渐接近实测值。

## 4 结论

1) 在运用“平均流动”模型求解混合润滑轧制变形区入口膜厚问题中, 提出了混合因子  $\phi_m$  的概念, 它综合了流动因子  $\phi_x$  和接触因子  $\phi_c$  的影响, 不仅包括了表面粗糙效应, 而且还涉及到粗糙化方向对入口膜厚的影响。当接触表面存在横向或同向纹理时, 入口膜厚增加; 而表面存在纵向纹理时, 入口膜厚则略为减少。

2) 混合因子  $\phi_m$  的使用简化了轧制润滑模型, 使求解混合润滑轧制问题变得简单易行。含有混合因子  $\phi_m$  的膜厚模型还表明, 在流体润滑条件下, 表面粗糙效应对形膜亦有一定的影响, 也即混合因子  $\phi_m$  还适用流体润滑轧制, 且修正了未考虑表面粗糙效应而引起的不足。

### [ REFERENCES ]

- [1] Wilson W R D and Walowit J. An isothermal hydrodynamic theory for strip rolling with front and back tension [J]. *Inst Mech Eng*, 1971, 184(7): 169– 172.
- [2] Mizuno T J. An experimental research on cold rolling [J]. *Japan Society of Technology Plasticity*, 1966, 7: 383– 389.
- [3] Sargent L B and Taso Y H. Surface roughness considerations in metalworking [J]. *ASLE Trans*, 1980, 23(1): 70– 76.
- [4] Schey J A. Surface roughness effect in metalworking [J]. *Lubr Eng*, 1983(6): 276– 283.
- [5] Prakash J and Czichos H. Influence of surface roughness and its orientation on partial elastohydrodynamic lubrication of rollers [J]. *ASME J of Lubr Eng*, 1983, 105(4): 591– 597.
- [6] Patir N and Cheng H S. An average flow model for determining effects of three dimensional roughness on partial hydrodynamic lubrication [J]. *ASEM J of Lubr Tech*, 1978, 100(1): 12– 17.
- [7] Patir N and Cheng H S. Application of average flow model to lubrication between rough sliding surface [J]. *ASEM J of Lubr Tech*, 1979, 101(4): 220– 230.
- [8] Wu C W and Zheng L Q. An average reynolds equation for partial film lubrication with a contact factor [J]. *ASME J of Tribology*, 1989, 111(1): 188– 191.
- [9] WU Cheng-wei(吴承伟) and ZHENG Lin-qing(郑林庆). 接触因子及其在研究部分流体润滑中的应用 [J]. *Lubricating Engineering(润滑与密封)*, 1989(3): 1– 6.
- [10] Shen S and Wilson W R D. Mixed lubrication of strip rolling [J]. *STLE Trans*, 1994, 37(3): 383– 349.
- [11] SUN Jian-lin(孙建林), ZHANG Xin-ming(张新明), FU Zu-zhu(傅祖铸), et al. 冷轧润滑过程中摩擦的控制 [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*, 1997, 7(3): 104– 107.

## Model for inlet film thickness in mixed-lubrication rolling

SUN Jian-lin<sup>1</sup>, KANG Yong-lin<sup>1</sup>, ZHANG Xin-ming<sup>2</sup>

(1. College of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China;

2. Department of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, P. R. China)

**[ Abstract ]** A mixed factor is developed to determine the inlet film thickness when the average flow model is applied in the mixed-lubrication rolling process. It combines the effects of the flow factor and the contact factor, and simplifies the lubrication model of rolling. The calculated and experimental results show that surface roughness affects the film thickness even in the hydrodynamic lubrication rolling. So the mixed factor is not only applied to the mixed-lubrication rolling but also in the hydrodynamic lubrication rolling.

**[ Key words ]** rolling; mixed lubrication; mixed factor

(编辑 杨 兵)