

中厚板轧制过程中高精度的轧制力预测模型

邱红雷, 胡贤磊, 矫志杰, 赵 忠, 田 勇, 王国栋

(轧制技术及连轧自动化国家重点实验室(东北大学), 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 结合首钢 3500 mm 轧机改造项目, 根据中厚板轧制工艺的特点, 对影响轧制力的因素进行了详细的解析, 包括变形区影响函数、变形率函数和变形速率影响函数等, 给出了中厚板轧制过程中高精度的轧制力计算数学模型。分析了残余应变对轧制力计算的影响, 得到了不同钢种的残余应变计算模型和轧制力在线计算时的修正策略。现场在线应用结果表明: 给出的轧制力模型具有良好的预测精度, 预测误差可以控制在 5% 以内。

关键词: 中厚板; 轧制; 数学模型; 轧制力

中图分类号: TG335.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0449-749X(2005)05-0049-05

High Precision Rolling Force Prediction Model for Plate Rolling

QIU Hong-lei, HU Xian-lei, JIAO Zhi-jie, ZHAO Zhong,

TIAN Yong, WANG Guo-dong

(The State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shengyang 110004, China)

Abstract: Based on the Shougang revamping project and plate rolling process, a plate rolling force model of high precision was developed considering the influence functions of deformation area, deformation rate and deformation velocity. Bases on the analysis of influence of residue strain, the residue strain model and dynamic correction of rolling force for different steel grades were obtained. The result of on-line application indicated that rolling force model has good precision of prediction with an error less than 5%.

Key words: plate; rolling; mathematic model; rolling force

轧制力是中厚板轧制过程中一个极其重要的轧制参数, 它广泛应用于轧机设备的强度设计与校核, 同时又是制定工艺制度、调整轧机, 以及强化轧制以扩大产品范围和充分合理地挖掘设备潜力的重要原始参数。在现代计算机控制技术中, 轧制规程的制定、压下量的调整、辊缝的设定、板形的控制、厚调系统的增益系数的确定、厚度精度的调整, 都取决于中厚板轧制过程中轧制力模型的预报精度^[1~3], 因此必须分析中厚板轧制力的各种影响因素, 努力提高中厚板轧制力模型的预报精度。本文结合首钢中板厂 3500 mm 四辊轧机液压 AGC 及控轧、控冷自动化改造项目, 针对中厚板轧制过程的特点, 详细分析了轧制力的各种影响因素, 并给出了在线应用模型。

式中 W_{av} ——轧件轧制前后平均宽度, mm;
 R' ——轧辊的弹性压扁半径, mm;
 Δh ——道次压下量, mm;
 Q_p ——轧制力状态影响函数;
 K_t ——轧制材料的变形抗力, N/mm²。

1.2 轧辊的弹性压扁半径

由于轧辊表面受到轧制力的作用而产生压扁, 使得接触弧长度加大, 导致轧制力的增加。根据计算其变化量一般在 2%~3%, 如果轧件温度偏低, 而且压下量小, 则轧辊压扁对轧制力造成的影响会达到 25%, 所以在计算轧制力时必须能够准确计算轧辊压扁的影响。计算轧辊弹性压扁时, 现场一般采用 Hitchcock 公式的简化形式^[2]:

$$R' = R_0 \times \left(1 + \frac{C \times F}{\Delta h \times W}\right) \quad (2)$$
$$C = \frac{16 \times (1 - \nu^2)}{\pi \times E}$$

式中 R' ——轧辊弹性压扁半径, mm;

1 轧制力数学模型

1.1 传统数学模型

传统中厚板轧机轧制力计算公式:

$$F = W_{av} \times \sqrt{R' \times \Delta h} \times Q_p \times K_t \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50104004), 国家重大设备国产化项目(ZZ0113A040201)

作者简介: 邱红雷(1979-), 男, 博士; **E-mail:** hlei_qiu@21cn.com; **修订日期:** 2004-07-23

R_0 ——轧辊初始半径, mm;

F ——轧制力, kN;

Δh ——压下量, mm;

W ——轧件宽度, mm;

ν ——轧辊的泊松比;

E ——轧辊弹性模量, N/mm²。

但是在计算轧辊弹性压扁半径时, 需要知道实际轧制力的大小, 而实际轧制力正是需要最终计算的结果, 在线中厚板轧制时主要通过迭代算法来提高轧制力计算精度, 一般迭代 5~8 次就可以满足最终的收敛精度要求。

1.3 轧制力变形区状态影响函数

轧制力变形区影响函数的解析解比较繁杂, 不便于计算机在线控制, 因此习惯上采用其简化回归公式。变形区状态影响函数的回归公式如下:

$$Q_p = 0.85 + 0.15 \times r_i + 1.68 \times e^{-4.7 \times (r_i - 0.25)}$$

$$r_i = \frac{3 \times l_d}{H + 2h}, l_d = \sqrt{R' \times \Delta h}$$

(3)

式中 H ——轧件的入口厚度, mm;

h ——轧件的出口厚度, mm;

l_d ——计算轧制力时的接触弧长, mm。

一般来说, 在同一厚度同压下率情况下, 轧辊压扁和变形区各种形状影响函数对轧制力方程的计算精度影响不大, 其偏差可以通过在线动态修正调整, 控制到 3% 以内, 轧制力模型的预报精度主要取决于变形抗力模型的预报精度。

1.4 变形抗力影响

影响轧件变形抗力模型的因素较多, 从微观分析, 加热制度造成的奥氏体晶粒的原始尺寸、开轧温度的大小、再结晶区的变形制度、部分再结晶区的变形制度、未再结晶区的变形制度、化学成分造成的强化效果都会影响变形抗力。从宏观看, 某一钢种的温度制度和变形制度应该都是比较固定的工艺, 但是化学成分是一个波动量, 而且加热温度和开轧温度会根据现场情况允许波动。文献[3]、[8]、[9]通过研究和分析提出了一些变形抗力模型, 但是一个合理的变形抗力模型应该考虑以下因素: 各种化学成分强化作用的补偿效果; 未再结晶区变形时的残余应变的影响; 模型结构不能太复杂, 便于自学习过程的调整和模型参数的回归; 化学元素 Cu 的存在能导致流动应力增大 15%~20%。

综合考虑以上要求后提出的变形抗力模型的结构形式为:

$$K_f = k_e \cdot e^{\sqrt{A_{13} \cdot \theta + A_{14}}} \cdot f(\epsilon) \cdot g(\dot{\epsilon}) \quad (4)$$

$$k_e = 1 + c_1 \cdot \text{Si} + c_2 \cdot \text{Mn} + c_3 \cdot \text{S} + c_4 \cdot \text{P} +$$

$$c_5 \cdot \text{Nb} + c_6 \cdot \text{Ti} + c_7 \cdot \text{V} + c_8 \cdot \text{Al} + c_9 \cdot \text{Cu}$$

式中 $c_1 \sim c_9$ ——通过组织性能预报的回归系数;

θ ——计算轧制力时的轧件道次平均温度, °C;

$f(\epsilon)$ ——变形率影响函数;

$g(\dot{\epsilon})$ ——变形速率影响函数;

ϵ ——轧件的变形率;

$\dot{\epsilon}$ ——轧件的变形速率;

A_{13} 、 A_{14} ——与轧件钢种有关的系数。

1.4.1 变形率影响函数项

变形率函数可以写成下面的形式:

$$f(\epsilon) = 1.08 \cdot (1 - e^{-7.5 \cdot (1.15 \cdot \epsilon + 0.05)}) \quad (5)$$

其中, $\epsilon = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln\left(\frac{H}{h}\right)$ 。

中厚板轧制过程中, 轧件的道次变形率的大小在 0.10~0.35 之间变化, 在该变形率条件下, 必须考虑道次间残余应变的影响, 否则将导致轧制力计算的偏差较大。

1.4.2 残余应变的影响

在轧制力计算过程中, 要考虑到道次间残余应变的影响, 定义 c_r 为残余应变与上一道次应变的比值, 即 $c_r = \Delta\epsilon/\epsilon_1$, 该参数是静态回复动力学的重要参数。文献[8]给出了 c_r 的计算公式:

$$c_r = \epsilon \cdot e^{-\frac{\Delta\epsilon}{\tau}} \quad (6)$$

式中 Δt ——道次间歇时间, s;

τ ——与轧件温度有关的系数。

τ 的计算采用以下方法, 如果轧件的变形温度超过重要关键温度 θ_c 或控温时间超过一定值 t_c 时, 计算轧制力忽略累计应变的影响, 否则需要考虑上一道次的残余应变对本道次变形抗力的影响。从金属热力学角度分析, 可以得到中厚板在线轧制时 τ 的计算方法:

(1) C-Mn 钢: $\theta_c = 900$ °C, $t_c = 5$ s, 通过热力学理论可以回归出 τ 计算公式为 $\tau = -0.012 \times \theta + 15.8$ 。当 $\theta > 1150$ °C, $\tau = 2$; 当 $\theta < 900$ °C, $\tau = 5$ 。

(2) 微合金钢: $\theta_c = 900$ °C, $t_c = 50$ s, 其 τ 计算公式为 $\tau = 0.77333 \times 10^{-3} \times \theta^2 - 1.76933 \times \theta + 1016.0$ 。当 $\theta > 1150$ °C, $\tau = 4$; 当 $\theta < 900$ °C, $\tau = 50$ 。

假设控温前每个道次的压下率为 25%, 道次间隙时间为 4 s, 控温前一共轧制 8 个道次。轧制温度为 950~1150 °C, 对于普碳钢, 每个道次的残余应变和轧制力变化值见表 1。对于微合金钢, 每个道

次的残余应变和轧制力变化值见表 2。

从表 1、2 中可以看出,残余应变模型中的 τ 计算误差造成轧制力模型的计算误差在 3% 以内。但是如果不考虑残余应变,则累计残余应变带来的计算误差为 15%~40%。

根据上述计算结果,可以看出对于普碳钢,由于不需要进行控制轧制,在不考虑残余应变的情况下,其轧制力变化波动不超过 8%。对于含铌钢,如果不考虑残余应变的影响,控温前轧制力变化波动为 6%~15%;控温后轧制力变化波动为 15%~40%。由此可见对于需要控温轧制的微合金钢,必须考虑残余应变的影响。

微合金含铌钢在 950 ℃ 以上或待温时间超过 60 s 时,不用考虑残余应变的影响。Si-Mn 钢在 900 ℃ 以上或待温时间超过 30 s 时,不用考虑残余应变的影响。

1.4.3 变形速率函数影响项

中厚板的变形速率函数影响项采用下述公式:

$$g(\dot{\epsilon}) = \frac{\dot{\epsilon}^{0.1+0.08 \times (1-\exp(-0.25 \times \dot{\epsilon}))}}{4}$$
 (7)

由变形速率公式 $\dot{\epsilon} = \epsilon/\Delta t$ 和 $\Delta t = \frac{\epsilon}{l_d/v}$, $l_d = \sqrt{R' \times \Delta h}$, $v = w \times R_0$ 可以推导出变形速率公式的现场在线使用公式:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\omega \times l_d \times \ln(H/h)}{H-h}$$
 (8)

其中, ω 为轧辊角速度, rad/s。

1.4.4 温度函数影响项

在变形抗力计算公式中,将式(9)称为温度函数影响项(又称轧件的硬度项):

$$h_a(\theta) = e^{A_{13} \times \theta + A_{14}}$$
 (9)

对于某一钢种,道次的实际温度对变形率影响函数和变形速率影响函数的影响很小,所以轧制力过程模型参数的在线动态调整主要集中在温度影响函数上。将温度影响项进行展开:

$$h_a(\theta) = e^{A_{13} \times \theta + A_{14}} = e^{A_{13} \times \theta} \times e^{A_{14}} = e^{A_{13} \times \theta} \times k$$
 (10)

从展开公式中可以看出,对于模型参数 A_{14} 的调整相当于在轧制力模型前面乘以一个比例系数项,在文献[2]中有比较详细的分析,它属于一种比较成熟的方法,是对参数 A_{13} 的调整涉及温度模型的计算。下面分析如何调整 A_{13} 和 A_{14} 来消除轧制力模型的误差,提高轧制力模型设定精度^[5]。

由公式(10)和实际测量数据可以计算出当前道次的温度影响函数的自然对数值:

$$A'_{13}\theta'_1 + A'_{14} = \ln \frac{P'}{k_{1e} \cdot W \cdot \sqrt{R'} \cdot \Delta h' \cdot Q'_p \cdot f(\epsilon') \cdot g(\dot{\epsilon}')} \quad (11)$$

式中 P' ——当前道次实测轧制力, kN;

$\Delta h'$ ——实际压下量, mm;

Q'_p ——变形区形状影响函数的实际值;

θ'_1 ——当前道次实际温度, ℃;

ϵ' ——实际变形率;

$\dot{\epsilon}'$ ——实际变形速率。

初始温度影响函数的自然对数值为 $A_{13} \cdot \theta_1 + A_{14}$, 令:

$$A'_{13} \cdot \theta'_1 + A'_{14} = A_{13} \cdot \theta_1 + A_{14} + \Delta \quad (12)$$

假定下一道次实际温度为 θ'_2 , 实际道次温度降为 $d\theta'_1$, 而根据 θ_1 和温降模型计算出来的下一道次温度为 θ_2 , 其温度降为 $d\theta_1$, 如果在下一个道次中将修正值 Δ 考虑进去, 则有如下推导^[5]:

表 1 普碳钢道次残余应变与轧制力的变化

Table 1 Residual strain of passes and change of rolling force for straight carbon steel

项目	道次							
	1	2	3	4	5	6	7	8
残余应变	0	0.2	0.24	0.25	0.37	0.41	0.42	0.43
轧制力变化	0	0.039	0.046	0.048	0.068	0.076	0.076	0.078

表 2 微合金钢道次残余应变与轧制力的变化

Table 2 Residual strain of passes and change of rolling force for microalloyed steel

项目	道次							
	1	2	3	4	5	6	7	8
残余应变	0	0.35	0.47	0.59	0.80	0.90	0.95	0.97
轧制力变化	0	0.065	0.084	0.102	0.131	0.144	0.151	0.153

$$\begin{aligned} A'_{13} \cdot \theta'_2 + A'_{14} - (A_{13} \cdot \theta_2 + A_{14} + \Delta) = \\ A'_{13} \cdot (\theta'_1 - d\theta'_1) + A'_{14} - \\ [A_{13} \cdot (\theta_1 - d\theta_1) + A_{14} + \Delta] = \\ A'_{13} \cdot \theta'_1 + A'_{14} - (A_{13} \cdot \theta_1 + A_{14} + \Delta) + \\ A_{13} \cdot d\theta_1 - A'_{13} \cdot d\theta'_1 = \\ A_{13} \cdot d\theta_1 - A'_{13} \cdot d\theta'_1 \end{aligned}$$

在前面论述中提到,对参数 A_{14} 的调整相当于在轧制力方程前面乘以一个比例因子,这种方法已经有成功应用的基础。为此在模型参数修正过程中假定 $A_{13} = A'_{13}$,则公式(12)可以表达为^[5]:

$$\begin{aligned} A'_{13} \cdot \theta'_2 + A'_{14} - (A_{13} \cdot \theta_2 + A_{14} + \Delta) = \\ A_{13} \cdot (d\theta_1 - d\theta'_1) \end{aligned} \tag{13}$$

从式(13)可知,如果能将当前道次与下一道次的温度预测比较准,则下一个道次的模型计算误差也就接近与 0,这正是期望达到的目标。即使温度预测存在一定的偏差,其温度偏差造成的影响也能根据下一个道次的实际轧制数据加以消除,而不至于产生累计误差。中厚板轧制过程道次之间的间隔时间一般在 1 s 以上,利用这个间隔时间进行模型修正计算完全可以满足实时控制的要求。

由于中厚板轧制过程为多道次可逆轧制,每个道次都需要进行修正计算。上面介绍了某一个道次的修正计算方法,但是如何将前面所有道次的计算结果进行综合还需要分析。一般来说,如果当前道次数为 n ,则 $n-1$ 道次的修正结果对 n 道次影响最大,而前面道次的修正结果对 n 道次影响较小,所以需要 对 $1 \sim (n-1)$ 道次的结果进行加权处理。

$$\bar{\Delta} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (2^{-(n-i)} \times \Delta_i)}{\sum_{i=1}^{n-1} 2^{-(n-i)}} \tag{14}$$

式中 Δ_i ——第 i 道次的修正结果;

$\bar{\Delta}$ ——本道次的修正结果。

在用实测轧制力来反算 Δ_i 时,该道次的其他参数的计算不能用预计算数值,因为这时的轧制条件发生了变化,轧件塑性系数也随之发生变化,造成出口厚度发生变化,如果道次修正计算采用原先设定的出口厚度就会发生计算误差,如图 1 所示。

如果 Δ_i 的修正值波动偏大,说明模型参数 A_{13} 和 A_{14} 都需要修正。由于中厚板轧制温度范围比较宽,一般为 800~1200 ℃,而且轧件钢种类型较多,完全依靠预计算来精确计算变形抗力模型难度很大,所以在线控制时必须结合变形抗力模型的自学习来不断修正模型系数,从而提高轧制力模型的计

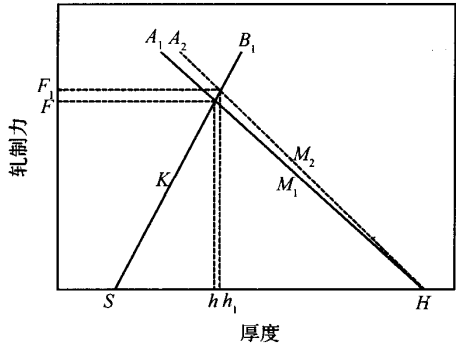


图 1 入口厚度波动对出口厚度的影响

Fig. 1 Influence of entry gauge deviation on exit gauge

算精度。

2 轧制力模型的在线应用结果

上述分析后的轧制力模型通过 VC6.0++ 编程实现,为了验证该算法的在线轧制力动态修正后的预测精度,现以首钢中板厂现场实际生产的 Q235 钢(220 mm×1400 mm×2550 mm),成品尺寸为 16 mm×2350 mm 和 16MnR 钢(220 mm×1600 mm×2900 mm),成品尺寸为 30 mm×2350 mm 的板坯为例,钢板的轧制过程采用红外线辐射式测温仪进行了温度实测。为便于与实测值比较,模型的开轧温度取为实测开轧温度,道次的间隔时间采用实测值,通过在线轧制力控制以后,将实测轧制力和模型预报的轧制力列与表 3 和表 4。

表 3 Q235 的轧制力实测值与模型计算值

Table 3 Measured and calculated rolling force for Q235

轧制道次数	道次实测轧制力/kN	预测轧制力/kN
$n-5$	19089.1	18923.1
$n-4$	26844.5	26720.3
$n-3$	24098	24280.8
$n-2$	19761.5	19527.2
$n-1$	16650.3	16620.4
n	14023.4	14014.5

表 4 16MnR 的轧制力实测值与模型计算值

Table 4 Measured and calculated rolling force for 16MnR

轧制道次数	道次实测轧制力/kN	预测轧制力/kN
$n-5$	26964.0	27744.1
$n-4$	27613.6	28436.6
$n-3$	38337.9	37402.5
$n-2$	39568.7	38752.3
$n-1$	37266.7	3658.9
n	20952.7	20783.1

本文分析的中厚板在线轧制力模型目前已经应用于改造后的首钢中厚板实际轧制生产中。现场大量实际应用结果表明,使用本文分析的轧制力模型,在线预测轧制力与实测轧制力的最终偏差可以控制在5%以内,完全可以满足现场实际生产的要求,而且该算法运行稳定,受外界环境影响很小。

3 结论

(1) 轧制力的计算精度主要取决于变形抗力模型的计算精度,变形抗力的精确计算要考虑轧件化学成分的变化和道次残余应变的影响。

(2) 由于现场轧制条件的不稳定性,为了提高轧制力的预测精度,必须要在实测轧制力基础上进行道次间动态修正。

(3) 进行在线道次轧制力动态修正时,由实测轧制力来反算该道次修正系数时,其他参数均采用实测值,否则会造成后续道次出口厚度的较大设定偏差。

参考文献:

[1] 日本钢铁协会. 板带轧制理论与实践[M]. 王国栋译. 北京: 中

(上接第 44 页)

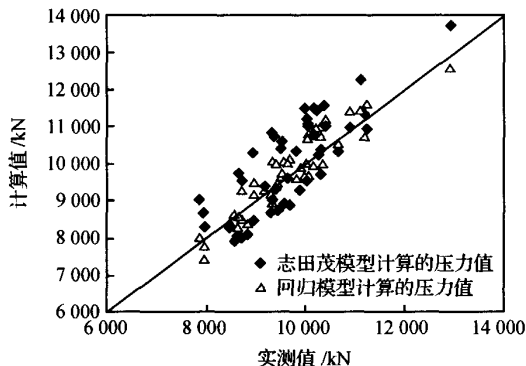


图3 两种模型计算的7机架轧制力与实测压力比值对比

Fig. 3 Comparison between predicted by two models and measured rolling load on No. 7 stand of finish train

4 结语

利用现场生产的历史数据,在统计分析的基础上,得到一个可将轧机的特殊性考虑进去的流动应力统计回归模型式(7),用该模型与式(3)、(4)连用

国铁道出版社,1990.1-3.

- [2] 孙一康. 带钢热连轧数学模型基础[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1997. 136-146.
- [3] 孙本荣, 赵佩祥, 朱荣林, 等. 控制轧制中板变形抗力的研究[J]. 钢铁, 1986, 21(4): 30-33.
- [4] 田村今男. 高强度低合金钢的控制轧制与控制冷却[M]. 王国栋译. 北京: 冶金工业出版社, 1992. 153-165.
- [5] 胡贤磊, 吴光蜀, 赵胜国, 等. 中厚板轧制过程厚度偏差在线修正方法[J]. 轧钢, 2003, 20(3): 7-9. (HU Xian-lei, WU Guang-shu, ZHAO Sheng-guo, *et al.*. On-line Correction Method of Gauge Deviation for Plate Rolling Process [J]. Steel Rolling, 2003, 20(3): 7-9.)
- [6] Tarokh M, Seredynkin H. Roll-force Estimation in Plate Rolling [J]. Journal of the Iron and Steel Institute, 1970, 208(7): 695-698.
- [7] 吉田博, 邦夫, 广濑勇次ほか. ホットストリツペルにおける圧延荷重予測モデル[J]. 塑性と加工, 1982, 23(1): 63-68.
- [8] Saito Y, Enami T, Tanka T. The Mathematical Model of Hot Deformation Resistance with Reference to Microstructural Changes during Rolling in Plate Mill [J]. Transactions ISIJ, 1985, 25(11): 1146-1150.
- [9] Juvinall R C. Stress, Strain, and Strength [M]. New York: McGraw Hill, 1967.

可提高轧制力预报精度。该方法为利用生产厂的信息资源(生产统计数据)来改进轧制力预报精度提供了一条途径。

此模型可适用于在线调整流动应力模型系数值,并可推广到各种不同的钢种。

参考文献:

- [1] Sellars C.M. Modeling—An Interdisciplinary Activity[A]. Proceedings of the International Symposium on Mathematical Modeling of Hot Rolling of Steel[C]. S. Yue—Quebec, The Canadian Institute of Mining and Metallurgy, 1990.
- [2] V. B. 金兹伯格. 板带轧制工艺学[M]. 马东清译. 北京: 冶金工业出版社, 1998. 409. (Ginzburg V B. Steel-rolling Technology: Theory and Practice[M]. MA Dong-qing. Beijing: The Metallurgical Industry Press, 1998. 409.)
- [3] 五弓勇雄. 金属塑性加工技术[M]. 陈天忠译. 北京: 冶金工业出版社, 1987.
- [4] 杨 节. 轧制过程数学模型[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985. (YANG Jie. Mathematical Model during the Rolling Process [M]. Beijing: The Metallurgical Industry Press, 1985.)
- [5] 张云祥. 轧制过程分析工具—热连轧轧制模型校正软件[J]. 钢铁研究, 2002, (4): 42-44. (ZHANG Yun-xiang. An Analytic Tool for Correcting the Rolling Load in Hot Continuous Rolling Process[J]. Research on Iron and Steel, 2002, (4): 42-44.)