

热连轧粗轧区 FES宽展模型及其优化

王爱丽 杨 荃 何安瑞 刘华强

北京科技大学冶金工程研究院, 北京 100083

摘 要 为了满足某厂 1580 热连轧机宽度控制精度需求, 提高宽展模型的广泛适用性, 利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件, 对热轧粗轧区立轧-平轧过程进行了模拟. 根据模拟数据, 系统地分析了轧件宽度、厚度、轧辊直径、立辊侧压量和厚度压下量对“狗骨”宽展、自然宽展和绝对宽展的影响规律. 利用模拟数据并结合现场数据构造了 FES(finite element simulation)“狗骨”宽展模型和自然宽展模型, 并建立了 PSO-BP 神经网络(粒子群 BP 神经网络). 最后, FES 宽展模型与 PSO-BP 神经网络相结合预报第 1、3 和 5 道次的宽展, 其预报值与实测值误差在 1 mm 以内的均达到了 99% 以上, 达到了宽度控制的精度要求.

关键词 热连轧机; 宽度控制; 宽展模型; 神经网络

分类号 TG 335.11

FES width spread model and its optimization for a rough rolling mill

WANG Ai-li YANG Quan HE An-rui LIU Hua-qiang

Engineering Research Institute University of Science and Technology Beijing Beijing 100083, China

ABSTRACT In order to meet the need of width control precision for a 1580 hot strip mill and to improve the applicability of width spread models, the process of edge rolling-horizontal rolling in the rough rolling area was simulated by the finite element software ANSYS/LS-DYNA. The effects of width, thickness, roll diameter, reduction in width and reduction in thickness on ‘dog-bone’ width spread, natural width spread and absolute width spread were studied. The FES models of ‘dog-bone’ width spread and natural width spread were established with simulating data and field data, and the PSO-BP neural network was founded. At last, the FES width spread models were combined with the PSO-BP neural network to predict the width spread of the first, third and fifth pass. The percentage of the case that the error between predicted data and the measured values is less than 1 mm was more than 99%, and the width control precision was satisfied.

KEY WORDS hot strip mill; width control; width spread model; neural network

随着市场对宽度精度要求的不断提高, 对宽展模型的要求更高. 现有的宽展模型^[1]在力平衡、变形功相同、体积不变定律和最小阻力定律等基础上, 经过简化和假设得出理论及半理论宽展公式, 或者是在实验数据和生产数据的基础上, 选择各影响因素, 得到适用于特定条件的经验宽展公式. 上述这些公式在定性上有的相同, 有的甚至相反^[2-3], 它们的绝对宽展值在定量上更是有一定的差距.

国内熊尚武和李学通对粗轧区宽展模型的研究较多. 熊尚武采用铅作为实验材料, 对平辊立轧-平轧^[4-5]过程进行了实验研究, 建立了宽展模型. 李学通

利用刚塑性有限元法对宝钢 2050 粗轧带钢宽展规律^[6]进行了分析, 建立了适合该轧机的宽展公式^[7]. 由于影响宽展的因素较多, 轧制过程金属变形复杂, 上述宽展模型的公式只适用于被测轧机. 宽展模型的广泛适用性有待进一步的研究和开发.

本文利用大型商业有限元软件 ANSYS/LS-DYNA, 通过对大量工况的模拟计算回归出 FES 宽展模型, 建立了 PSO-BP 神经网络; 然后 FES 宽展模型与 PSO-BP 神经网络相结合, 预测不同道次、不同层别和不同轧制规程的带钢的宽展. 此项工作为宽展模型的广泛适用性提供了基础.

收稿日期: 2009-03-03

基金项目: 国家支撑计划资助项目 (No. 2006BAE03A06)

作者简介: 王爱丽 (1978-), 女, 博士研究生; 杨 荃 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: yangquan@nercar.ustb.edu.cn

1 宽展模拟

1.1 粗轧区宽展的定义

为方便使用及理论研究的需要,根据立轧-平轧轧制变形的特点,通常认为轧件的宽展有以下三部分组成,目前对于这种提法还没有人提出异议. (1)立轧后的宽度 W_e ; (2)水平辊轧制后的“狗骨”形回展 ΔW_b ; (3)水平辊轧制正常宽展 (不存在“狗骨”头时轧制产生的宽展),即自然宽展 ΔW_s . 宽展组成示意图如图 1 所示. 因此,轧后的宽度可表示为:

$$W_f=W_e+\Delta W_b+\Delta W_s \tag{1}$$

本文定义绝对宽展为:

$$\Delta W_{abs}=W_f-W_0 \tag{2}$$

式中, W_0 是轧件的原始宽度.

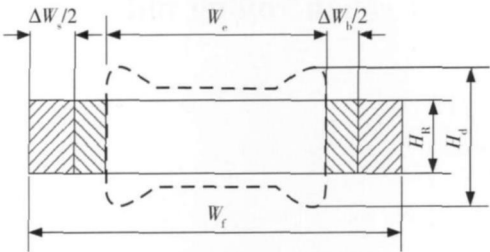


图 1 宽展的组成
Fig 1 Components of width spread

如果轧件轧后断面是矩形,容易测出其宽展. 但是,在粗轧区,立轧-平轧后,轧件的横断面形状并非是矩形. 图 2 是在带钢的全长方向上,轧件横断面侧表面各层的节点,其宽展沿轧件横断面的高度分布. 从图 2 可以看出,轧件的侧表面呈“双鼓形”.

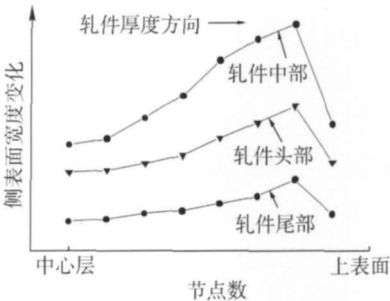


图 2 宽展沿轧件横断面高度分布

Fig 2 Width spread distribution in height along the cross-section of a slab

对轧件断面为“双鼓形”的宽展,根据有限元模拟的稳定轧制阶段第 1 道次宽展数据及现场第 1 道次实测宽展数据的对比,模拟的宽展量取最大宽展的 90%作为其轧后的宽展.

1.2 宽展模拟规律

据现场轧制工况,选取表 1 轧制工艺参数模拟带钢宽展变化,并分析了宽展变化规律. 图 3~图 5 是“狗骨”宽展、自然宽展和绝对宽展随轧件尺寸、轧辊尺寸、立辊侧压量和厚度压下量的变化规律.

表 1 轧制工艺参数
Table 1 Rolling processing parameter

物理量	数值
立辊直径, D_e /mm	1 150, 900
水平辊直径, D_h /mm	1 200, 1 000
轧件厚度, H_0 /mm	160, 210
轧件宽度, W_0 /mm	790, 1 100, 1 400
立辊侧压量, ΔE /mm	10, 40, 60
厚度压下量, ΔH /mm	10, 30, 40
模拟工况	$2\times 2\times 2\times 3\times 3\times 3=216$

图 3(a)轧件厚度 160 mm,立辊直径 1 150 mm,水平辊直径 1 000 mm. 从图中可以看出,“狗骨”宽展随立辊侧压量、轧件宽度的增大而增大. 其原因是立辊侧压量增大或者轧件的宽度增大,“狗骨”的高度都随之增大,随后平轧消除“狗骨”时,压下的金属体积也较大,所以宽展量增大. 图 3(b)所示,轧件的宽度 1 400 mm,立辊侧压量 40 mm,厚度压下量 10 mm. 图中表明,水平辊直径对“狗骨”宽展影响不明显,“狗骨”宽展随立辊直径的增大而减小,随轧件厚度的增加而减小. 其原因为:虽然轧件厚度增加,“狗骨”峰处的厚度增加,但是“狗骨”影响区的长度和“狗骨”峰的位置也随之增大;同时,随着立辊直径的增大,“狗骨”峰处的厚度减小,“狗骨”影响区的长度和“狗骨”峰的位置增大. 因此,“狗骨”影响区的长度和“狗骨”峰的位置对“狗骨”宽展的影响较大,而“狗骨”影响区的长度和“狗骨”峰的位置的增大不利于宽展,所以“狗骨”宽展减小.

图 4(a)所示,立辊直径 1 150 mm,水平辊直径 1 000 mm,立辊侧压量 40 mm. 显然,随着厚度压下量的增大,自然宽展增大;厚度相同时,随着轧件宽度的增大,自然宽展减小. 其原因为:当厚度压下量增大时,变形区接触弧的长度增大,因而使纵向塑性流动阻力增大,纵向压缩主应力值加大,根据最小阻力定律,金属易于沿横向流动;再者,压下率 $(\Delta H/H)$ 增大,高度方向压下来的金属体积也增大,两者综合作用,使宽展增大. 从图 4(a)还可以看出,当轧件的宽度为 790 mm,自然宽展随轧件厚度的增大呈减小的趋势;当轧件的宽度为 1 100 mm 和 1 400 mm 时,自然宽展随轧件厚度的增大而增大.

进一步分析图 4(a)可知,在相同的立辊侧压量和厚度压下量下,自然宽展随宽厚比 (W_0/H_0) 的减小而增大. 图 4(b)轧件宽 1100mm, 立辊侧压量 10mm, 厚度压下量 40mm. 由图 4(b)可以看出:自然宽展

与立辊直径的关系不明显,随水平辊直径的增大而增大. 其原因是,当水平辊的直径增大时,变形区接触弧长增加,金属纵向塑性流动阻力增大,根据最小阻力定律,金属易于沿横向流动,宽展增大.

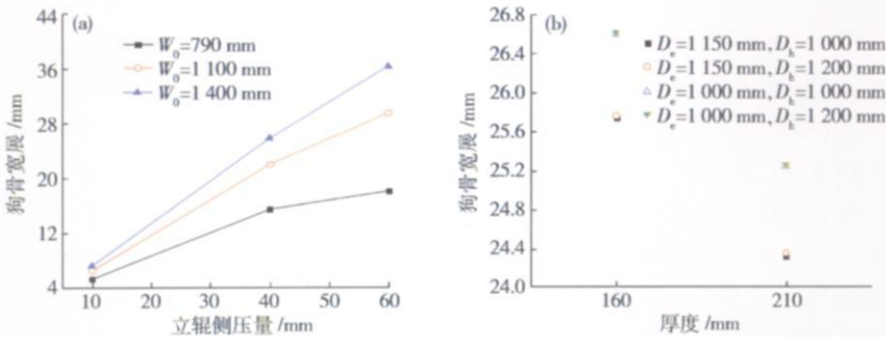


图 3 “狗骨”宽展变化. (a) “狗骨”宽展随立辊侧压量和轧件宽度的变化; (b) “狗骨”宽展随轧件厚度和轧辊直径的变化
Fig. 3 Changes of ‘dog-bone’ width spread: (a) changes of ‘dog-bone’ width spread with reduction in width and strip width; (b) changes of ‘dog-bone’ width spread with strip thickness and roll diameter

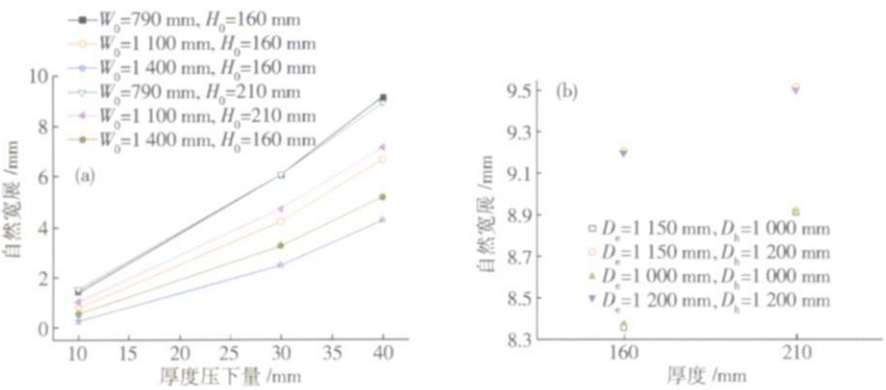


图 4 自然宽展的变化. (a) 自然宽展随轧件宽度、厚度及厚度压下量的变化; (b) 自然宽展随轧件厚度和轧辊直径的变化
Fig. 4 Changes of natural width spread: (a) changes of natural width spread with strip width, strip thickness and reduction in thickness; (b) changes of natural width spread with strip thickness and roll diameter

图 5(a)中轧件宽 1100mm, 立辊直径 1150mm, 水平辊直径 1200mm. 从图 5(a)可以看出:随立辊侧压量的增大,绝对宽展量减小;随厚度压下量的增

大,绝对宽展量增大;当轧件的宽度为 790mm, 轧件厚度对绝对宽展的影响不太明显;当轧件的宽度为 1100mm 和 1400mm 时,绝对宽展随轧件厚度的增

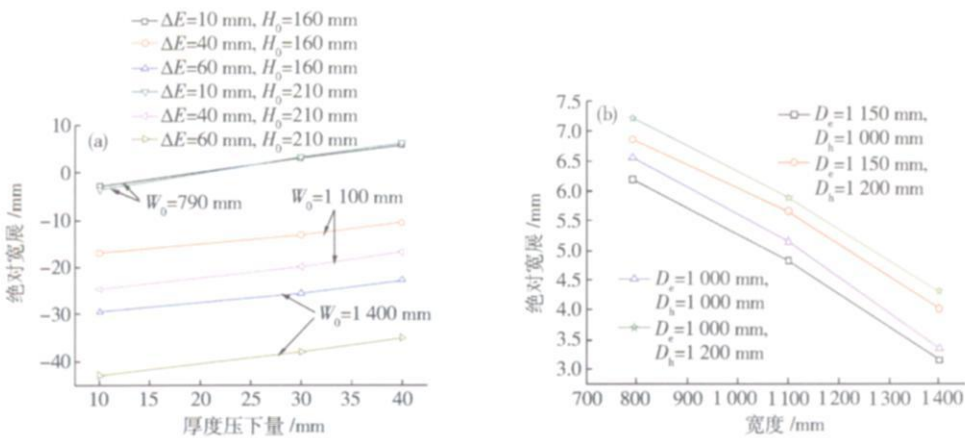


图 5 绝对宽展的变化. (a) 绝对宽展随立辊侧压量、厚度压下量、轧件厚度和宽度的变化; (b) 绝对宽展随轧辊直径的变化
Fig. 5 Changes of absolute width spread: (a) changes of absolute width spread with reduction in width, reduction in thickness, strip thickness and strip width; (b) changes of absolute width spread with roll diameter

大而减小,这是受“狗骨”宽展影响的原因.图 5(b)轧件厚 160 mm,立辊侧压量 10 mm,厚度压下量 40 mm.由图 5(b)可知:随立辊直径的增大,绝对宽展量减小;随着水平辊直径的增大,绝对宽展量增大.

2 宽展 FES模型

宽度尺寸精度是粗轧控制过程中最重要的生产技术指标,粗轧出口宽度尺寸控制的精确与否直接决定了成品的宽度精度,而其出口宽度控制设定的精确性主要取决于粗轧宽展模型的计算精度和粗轧宽展的自学习精度.在学习功能失效的情况下,主要靠模型来保证宽度尺寸的精度.因此,开发合理有效的宽展模型是必要的.

本文根据轧制模拟工况的数据和规律、现有公式的大量计算结果与现场轧制数据的对比分析,综合考虑各因素对宽展的影响机理,最后选用芝原(Shibahara)的公式^[3]形式,利用最小二乘法回归出了粗轧第一道次自然宽展 FES模型和“狗骨”宽展 FES模型的系数,使修正后的公式的使用范围扩大.其他各道次的宽展以第 1 道次的宽展为基础,通过在线学习得到.芝原的宽展模型形式如下式所示:

$$\Delta W_{sFES} = W_e [(H_0/h_f)^a - 1] \tag{3}$$

$$\Delta W_{bFES} = b \Delta E [1 + (\Delta W_{sFES}/W_e)] \tag{4}$$

$$a = \exp \left[-a_1 m^{a_2} \left(\frac{W_e}{L} \right)^{a_{3m}} \left(\frac{H_0}{R_h} \right)^{a_{4m}} \right] \tag{5}$$

式中, a、b 是几何参数; h_f 是水平辊轧制后的厚度; a₁ ~ a₄, b₁ ~ b₅ 是常数; L 是水平轧制时的轧辊接触弧长; R_h 是水平辊的工作半径; R_e 是立辊的工作半径; m = W_e/H₀.

$$b = \exp \left[-b_1 \left(\frac{\Delta E}{W_0} \right)^{b_2} \left(\frac{H_0}{R_e} \right)^{b_3} \left(\frac{R_e}{W_0} \right)^{b_4} \left(\frac{W_0}{W_e} \right)^{b_5} \right] \tag{6}$$

经过两次取对数,最后求得的 a 和 b 的模型为:

$$a = \exp \left[-1.573 m^{0.4549} \left(\frac{W_e}{L} \right)^{0.0161m} \left(\frac{H_0}{R_h} \right)^{0.0145m} \right] \tag{7}$$

$$b = \exp \left[-1.265 \left(\frac{\Delta E}{W_0} \right)^{0.058} \left(\frac{H_0}{R_e} \right)^{0.4335} \cdot \left(\frac{R_e}{W_0} \right)^{0.9721} \left(\frac{W_0}{W_e} \right)^{7.6144} \right] \tag{8}$$

为了验证模型的合理性及精度,本文对以上公式进行了复相关系数检验及剩余标准差计算.式(7)剩余标准差为 2.7%,相关系数 98.4%.式(8)剩余标准差为 6.8%,相关系数为 99.99%.可以看出,两个回归模型均达到了精度要求,说明模

型的形式是合理的,模拟得到的数据也具有一定的参考价值,从而也验证了所建有限元模型的有效性.

3 宽展 FES模型与 PSO-BP网络相结合预测宽展

影响宽展的因素较多,同时由于润滑方式的变化使摩擦系数设置与实际状况不一致,轧辊的磨损与摩擦膨胀,新钢种的出现等各种原因,在模拟过程中很难把所有因素都考虑进去,因此现场轧制条件复杂多变使回归出的宽展模型的宽展预报值与现场实测值存在差距.为提高模型的计算精度,对模型中的参数进行优化^[8-9],扩大模型的使用范围,为现场生产提供更有价值的参考是很有必要的.

本文采用 PSO-BP 神经网络与 FES 宽展模型相结合计算粗轧各道次宽展设定值,其结合的方式如图 6 所示.这种结合方式是典型的静态模型加上自适应学习,组成了一个动态的宽展设定模型.此结合方式的特征是在不破坏 FES 宽展模型的自学习过程的前提下,直接将 FES 宽展的预报值作为神经网络的一个输入项.

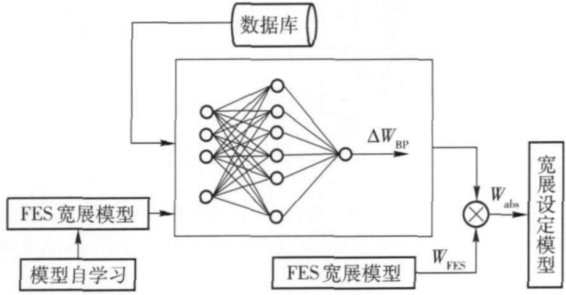


图 6 PSO-BP神经网络与 FES宽展模型的结合方式
Fig 6 Method of PSO-BP neural network combined with FES width spread models

由于目前条件的限制,模型自学习还不能实现.本文只做除模型自学习外的 PSO-BP 神经网络设计部分.对于 BP 网络,一般认为,对于任何在闭区间内的一个连续函数都可以用单隐层的 BP 网络逼近,因而一个三层 BP 网络就可以完成任意的 n 维到 m 维的映射.本神经网络选用含一个隐含层的网络结构.通过对隐含层含有不同神经元个数的网络进行训练,最后确定隐含层的个数为 5 个,得到的 PSO-BP 神经元网络的结构如图 7 所示.输入的神经元数是 11 个,输出的神经元个数为 1 个.

本文选取某热轧厂 1580 轧机某个轧制时间段,同一批次经同一加热炉的相同材质的坯料,对其各道次的宽展进行仿真计算.取出 50 个点,其第 1、3

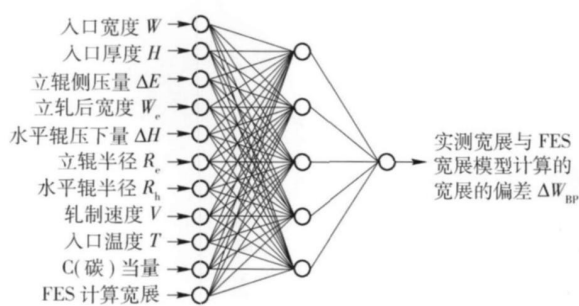


图 7 用神经网络预测宽展

Fig 7 Width spread predicted by neural network

和 5 道次的仿真结果见图 8~10 所示。从图中可以看出，其 PSO-BP 神经网络的训练结果和实测结果吻合较好，两者的误差在 1 mm 以内的均达到了 99% 以上，达到了宽度控制的精度要求。

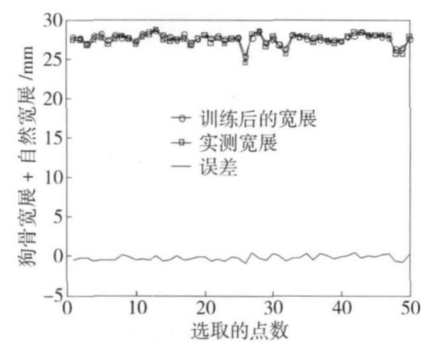


图 8 第 1 道次训练结果

Fig 8 Training results of the first pass

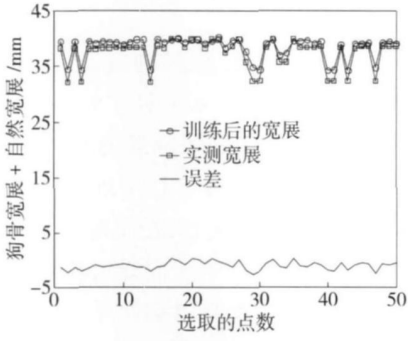


图 9 第 3 道次训练结果

Fig 9 Training results of the third pass

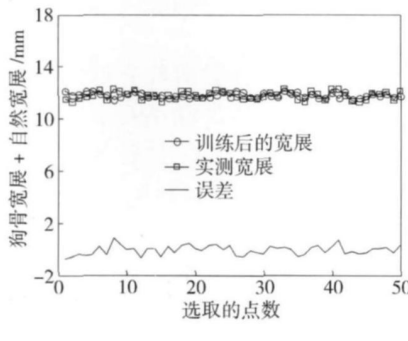


图 10 第 5 道次训练结果

Fig 10 Training results of the fifth pass

4 结论

(1) 根据大量工况的模拟数据得出：“狗骨”的宽展量随立辊侧压量和轧件宽度的增大而增大，随轧件厚度的增加而减小，随立辊直径的增大而减小，与水平辊直径变化关系不明显。在相同的立辊侧压量和厚度压下量下，自然宽展随宽厚比 (W_0/H_0) 的减小而增大，随水平辊直径的增大而增大，与立辊直径的关系不明显。绝对宽展受“狗骨”宽展的影响，随轧件厚度的增加而减小，随立辊直径的增大而减小，随着水平辊直径的增大而增大。

(2) FES 宽展模型 PSO-BP 神经网络相结合预测各道次的宽展，其宽展预报值与实测值误差在 1 mm 以内的均达到了 99% 以上，达到了宽度控制的精度要求。此方法有效地提高了宽展模型的精度，并且为宽展模型的广泛适用性提供了基础。

参 考 文 献

[1] Liu X H, Hu X L, Du L X, et al. Rolling Parameters Model and Its Application. Beijing: Chemical Industry Press, 2007; 158 (刘相华, 胡贤磊, 杜林秀, 等. 轧制参数计算模型及其应用. 北京: 化学工业出版社, 2007; 158)

[2] Helmi A, Alexander J M. Geometric factors affecting spread in hot flat rolling of steel. J Iron Steel Inst, 1968, 206: 1110

[3] Shibahara T, Misaka Y, Kono T, et al. Edger setup model at roughing train in hot strip mill. J Iron Steel Inst Jpn, 1981, 67 (15): 2509

[4] Xiong S W, Zhu X L, Liu X H, et al. Mathematical model of width reduction process of roughing trains of hot strip mills. Shanghai Met, 1997, 19(1): 39 (熊尚武, 朱祥霖, 刘相华, 等. 热带粗轧机组调宽工艺中数学模型的建立. 上海金属, 1997, 19(1): 39)

[5] Xiong S W, Zhu X L, Liu X H, et al. Experiments on the deformation behavior of slab width in roughing trains of hot strip mills. Hot Work Technol, 1996(1): 12 (熊尚武, 朱祥霖, 刘相华, 等. 热带粗轧机组宽度变化规律的实验研究. 热加工工艺, 1996(1): 12)

[6] Li X T, Du F S, Wu J F. Simulation study of strip spreading on 2050 mm roughing trains of Bao Steel Heavy Mach. 2004(1): 24 (李学通, 杜凤山, 吴建峰. 宝钢 2050 粗轧带钢宽展规律仿真研究. 重型机械, 2004(1): 24)

[7] Li X T, Du F S, Sun D Y, et al. Study on spread model of hot strip on roughing trains. Iron Steel, 2005, 40(6): 44 (李学通, 杜凤山, 孙登月, 等. 热轧带钢粗轧区轧制宽展模型的研究. 钢铁, 2005, 40(6): 44)

[8] Huang Z Y, Zhu T, Zhang G M. Study on parameters optimization of rough rolling spread model for 1780 hot strip. China Metall, 2008, 18(5): 24 (黄贞益, 朱涛, 张国民. 1780 mm 热连轧粗轧宽展模型参数优化研究. 中国冶金, 2008, 18(5): 24)

[9] Meng L Q, Meng M. Width variation model for 4200 mill based on GRNN artificial neural network. J Iron Steel Res, 2008, 20(3): 23 (孟令启, 孟梦. 基于 GRNN 神经网络的 4200 轧机宽展模型. 钢铁研究学报, 2008, 20(3): 23)