

基于有限元数值模拟的宽厚板热轧过程宽度控制 ANN 模型

阮金华¹, 张立文^{*1}, 顾森东¹, 何文斌², 陈少慧²

(1. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 江苏沙钢集团有限公司, 江苏 张家港 215625)

摘要: 利用商业有限元分析软件 DEFORM-3D, 建立宽厚板热轧过程中立辊侧压和随后平轧过程的三维热力耦合刚塑性有限元模型. 模拟了不同板坯厚度、板坯宽度、立辊压下量和平辊压下率条件下 320 种立辊侧压和随后平轧过程, 探讨了不同工艺参数对调宽效率的影响规律. 模拟结果表明, 调宽效率随着板坯宽度和立辊压下量的增加而升高, 随着板坯厚度和平辊压下率的增加而降低. 基于上述有限元数值模拟结果, 借助 BP 人工神经网络, 建立了热轧宽厚板立轧-平轧宽度控制模型, 经测试, 模型预测的调控效率与有限元数值模拟结果符合很好. 将宽度控制模型用于宽厚板实际热轧过程的有限元数值模拟, 模拟轧件宽度与实测宽度吻合很好.

关键词: 热轧宽厚板; 立轧-平轧; 宽度控制; 有限元数值模拟; 人工神经网络

中图分类号: TG335.5 **文献标志码:** A

0 引言

宽厚板热轧过程中的宽展不仅使边部区域金属沿轧制方向延伸小于中部平面变形区域金属沿轧制方向的延伸, 形成切头切尾损失, 同时给轧件宽度控制带来挑战, 导致较大宽度余量切损^[1]. 据统计, 边部切损和头尾切损占整个宽厚板成材率损失的 85% 以上^[2]. 可见, 阻止宽厚板热轧过程中的宽展对提高宽厚板成材率至关重要.

立辊侧压和随后平辊轧制(以后简称立轧-平轧)被认为是板带热轧过程中轧件宽度控制的有效技术.

早期对立辊侧压过程的研究主要致力于实验室模拟, 20 世纪 80 年代, Inoue 等^[2]通过在实验室轧铅件的方法模拟立轧-平轧过程, 总结了其变形基本特点和轧件宽度、厚度和立辊压下量对调宽效率的影响规律. 冈户克等采用多元非线性回归法, 建立了“狗骨”形状公式和平轧后“狗骨”回展与自然宽展公式^[3]. 20 世纪 90 年代, 付江等^[4]采用轧塑性泥的方法, 定量模拟研究大侧压调宽变形. 孙本荣等^[5]采用纯铅板坯作为模拟材料, 模拟宝钢 2 050 mm 热带连轧粗轧机组调宽轧制工

艺, 得到主要参数对调宽效率的影响. 熊尚武等^[6-7]按 1:10 的模拟比在实验轧机上轧铅, 研究立轧和随后平轧时材料变形行为与板坯厚度、板坯宽度、辊径、侧压量及厚度压下量等影响因素的关系, 建立了各主要参数的预测模型, 并在本钢 1 700 mm 热带连轧粗轧机组进行了现场实验, 进一步修正了立轧-平轧预测模型. 然而, 小尺寸的实验室模拟无法完全再现实际热轧过程, 特别是无法考虑温度这个关键的影响因素. 随着计算机速度和有限元理论的发展, 有限元法(FEM)作为强有力的工具被广泛地用于研究立轧-平轧宽度控制过程. Xiong 等^[8-11]采用全三维刚塑性有限元法解析了热带粗轧过程中立轧-平轧稳态和非稳态过程, 并将模拟结果与实验结果做了比较, 证实了有限元数值分析法的有效性. 李学通等^[12-13]针对宝钢 2 050 mm 热带粗轧过程, 采用有限元数值模拟的方法建立了宽展模型和头尾短行程控制模型. 王爱丽等^[14]则针对某厂 1 580 mm 热带连轧机, 采用有限元数值模拟与人工神经网络相结合的方法, 建立了宽展模型. 可见, 前面对立轧-平轧宽度控制过程的研究, 无论是通过实验室模拟轧

制,还是有限元数值模拟分析,主要针对热带粗轧过程,所建立的宽度控制模型并不能直接适用于热轧宽厚板的生产过程.

为此,本研究基于沙钢 5 m 宽厚板轧机的实际生产参数,建立三维热力耦合刚塑性有限元模型,模拟不同板坯宽度、板坯厚度、立辊压下量和平辊压下率参数条件下立轧-平轧稳态轧制过程,分析主要因素对调宽效率的影响.并基于大量有限元数值模拟结果,借助 BP 人工神经网络模型,建立热轧宽厚板立轧-平轧稳态宽度控制模型.

1 有限元模型的建立

如图 1 所示,立辊沿轧件宽度方向上压下,边部被压金属向轧件中心方向和厚度方向同时流动,导致轧件横截面形成“狗骨”;随后平辊轧制消除“狗骨”并在轧件厚度方向上自然压下,产生“狗骨”回展和自然压下宽展,降低了立辊的调宽效率,并给轧件宽度的准确控制带来挑战,可见立轧-平轧技术应用的关键就是对立轧-平轧调宽效率的预测.

如图 2 所示,利用立轧-平轧过程的对称性,取 1/4 轧件作为研究对象.模拟采用刚塑性有限元法,设轧件为变形体,采用四面体实体单元划分

网格,轧件边部和头尾部分设置较密网格.轧辊简化为有一定厚度的辊环用以建立几何模型,设为刚体,温度恒为 60 ℃.轧辊与轧件间的接触摩擦采用剪切摩擦模型.

模拟开始时,轧辊以恒定线速度绕其轴心线转动,轧件以相近的水平初速度向轧辊辊缝运动,轧件靠微小的体积力和轧辊与轧件间的接触摩擦力咬入辊缝,形成稳定轧制;进入辊缝后,轧辊与轧件之间的摩擦力推动轧件向前运动,完成一个道次的立辊轧制过程;立辊轧制完成后立即进行平辊轧制,但不形成连轧.设板坯出炉时温度为 1 200 ℃且分布均匀,经过高压水除鳞后进行轧制,轧制过程中考虑了轧件表面热辐射、与空气和高压除鳞水换热、与轧辊接触换热以及塑性变形功和摩擦给轧件温度场带来的影响.

5 m 宽厚板轧机机组参数为立辊辊身长 600 mm,辊径 900~1 000 mm,最大轧制速度 7.3 m/s,最大轧制力 4.9×10^6 N;平辊辊身长 5 m,辊径 1 110~1 210 mm,轧制速度 1.0~7.3 m/s,最大轧制力 9.8×10^7 N.按照轧机实际尺寸建立有限元模型,前期的研究工作证实了该有限元模型的有效性^[15].

2 有限元模拟工艺条件

在分析前人工作^[4-7]基础上,结合沙钢 5 m 宽厚板厂主轧机、立辊轧机的具体条件和实际生产情况,选取表 1 所示轧制工艺参数进行有限元数值模拟研究,板坯宽厚比(板坯宽度/板坯厚度) 10.42~75.00,板坯材质为普碳钢 Q345,总共模拟了 320 个立轧-平轧过程.

表 1 立轧-平轧工艺参数

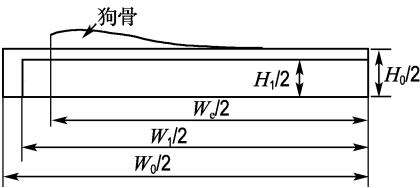
Tab. 1 Vertical-horizontal rolling parameters

板坯厚度/mm	板坯宽度/m	立辊压下量/mm	平辊压下率/%
60,80,100,120,	2.5,	25,45,	0,10,
140,160,180,	3.5,	65,85,	20,30,
200,220,240	4.5	105,125	40

3 模拟结果分析与讨论

为了理论研究的需要,本文定义调宽效率 η 来定量研究立轧-平轧过程给轧件宽度带来的影响:

$$\eta = \frac{W_0 - W_1}{W_0 - W_e} \times 100\% = \frac{\Delta W}{\Delta E} \times 100\% \quad (1)$$



W_0 立轧前宽度; W_e 立轧后宽度; W_1 立轧-平轧后宽度; H_0 立轧前厚度; H_1 立轧-平轧后厚度

图 1 立轧-平轧过程示意图

Fig. 1 Schematic illustration of vertical-horizontal rolling process

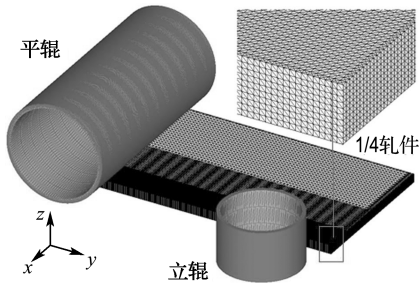


图 2 立轧-平轧过程有限元模型

Fig. 2 FE model for vertical-horizontal rolling process

式中: ΔW 是绝对减宽量, ΔE 是立辊压下量.

利用上述有限元模型,模拟表 1 所示的不同板坯厚度(H_0)、板坯宽度(W_0)、立辊压下量(ΔE)和平辊压下率(ΔH)条件下宽厚板立轧-平轧宽度控制过程.测量立轧-平轧完成后轧件中部稳定变形区域宽度,按式(1)计算出不同轧制工艺参数条件下立轧-平轧调宽效率,探讨板坯厚度、板坯宽度、立辊压下量和平辊压下率对调宽效率的影响规律.

3.1 板坯厚度对调宽效率的影响

宽厚板产品厚度尺寸多,热轧过程中立辊在很大的板坯厚度范围内灵活使用,因此,有必要探讨不同板坯厚度对立轧-平轧调宽效率的影响.图 3 给出了板坯宽度 3.5 m,平辊压下率 0(仅消除“狗骨”轧制)和给定立辊压下量条件下,板坯厚度对立轧-平轧调宽效率的影响.总体上看,调宽效率随着板坯厚度的增加而下降.板坯厚度较小时,调宽效率下降的速度较快,随着板坯厚度增大,调宽效率下降速率明显减小,这一变化趋势随着立辊压下量的减小而更明显.其主要原因是,随着板坯厚度增加,立辊侧压过程中被压下金属体积增加,立轧形成的“狗骨”高度增加,在随后平轧过程中,“狗骨”回展量增加;另一方面平辊轧制时,宽厚比随板坯厚度的增加而减小,导致平轧过程中“狗骨”回展量增加,故调宽效率随板坯厚度的增加而下降.

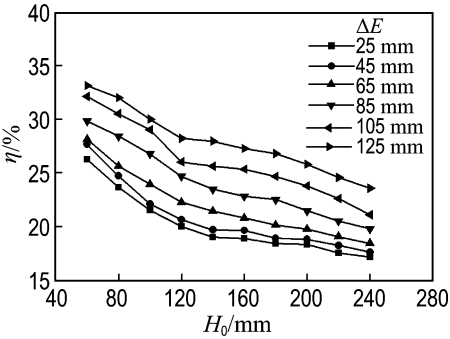


图 3 板坯厚度对调宽效率的影响($W_0=3.5\text{ m}$, $\Delta H=0$)

Fig. 3 Influence of slab thickness on the edging efficiency ($W_0=3.5\text{ m}$, $\Delta H=0$)

3.2 板坯宽度对调宽效率的影响

与热带粗轧过程显著不同,热轧宽厚板板坯宽度变化范围较大,5 m 宽厚板轧机最宽能生产

宽 4.9 m 左右的产品.图 4 所示为板坯厚度 100 mm,立辊压下量 85 mm 和平辊压下率确定条件下,板坯宽度对立轧-平轧调宽效率的影响.可见,调宽效率随板坯宽度的增加而升高,但升高幅度不大.这是因为板坯宽度对立轧形成的“狗骨”形状几乎没有影响,但平辊轧制时板坯宽厚比随板坯宽度的增加而加大,“狗骨”回展量和自然宽展量都随着板坯宽厚比的增加而减少,故调宽效率随板坯宽度的增加而升高.

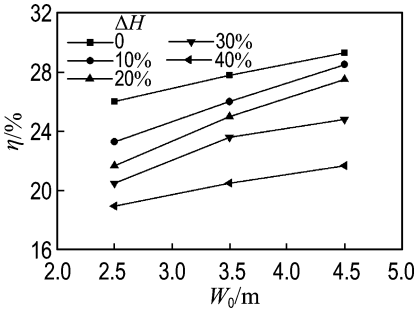


图 4 板坯宽度对调宽效率的影响($H_0=100\text{ mm}$, $\Delta E=85\text{ mm}$)

Fig. 4 Influence of slab width on the edging efficiency ($H_0=100\text{ mm}$, $\Delta E=85\text{ mm}$)

3.3 立辊压下量对调宽效率的影响

立辊压下量是宽厚板立轧-平轧宽度控制过程中最活跃的影响因素.图 5 展示了板坯厚度 100 mm,平辊压下率 20%和板坯宽度确定的情况下,立辊压下量对立轧-平轧调宽效率的影响.调宽效率随立辊压下量的增加而升高,且升高幅度较大.立辊侧压过程中,随着立辊压下量的增加,被压下金属体积增加,形成“狗骨”高度增加的

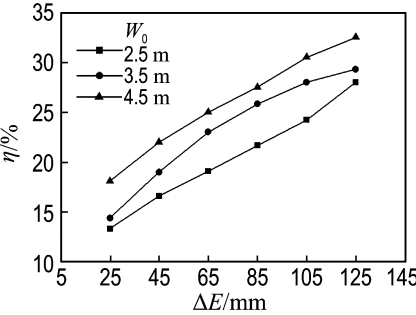


图 5 立辊压下量对调宽效率的影响($H_0=100\text{ mm}$, $\Delta H=20\%$)

Fig. 5 Influence of edging reduction on the edging efficiency ($H_0=100\text{ mm}$, $\Delta H=20\%$)

同时,“狗骨”影响区长度和“狗骨”峰值位置也增大,“狗骨”变形向板坯中心方向移动,平辊轧制时“狗骨”回展量减小,故立轧-平轧调宽效率随立辊压下量的增加而升高。

3.4 平辊压下率对调宽效率的影响

图 6 给出了板坯宽度 2.5 m,立辊压下量 85 mm 和不同板坯厚度条件下,平辊压下率对立轧-平轧调宽效率的影响。调宽效率随平辊压下率的增加而降低。平辊压下产生的宽展包括“狗骨”回展和自然压下宽展。随着平辊压下率增加,自然宽展量增加,平轧产生总的宽展量增加,故立轧-平轧调宽效率随平辊压下率的增加而下降。

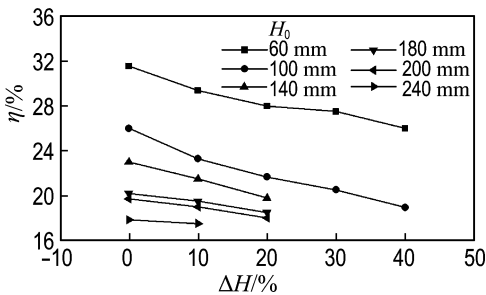


图 6 平辊压下率对调宽效率的影响 ($W_0 = 2.5\text{ m}$, $\Delta E = 85\text{ mm}$)

Fig.6 Influence of thickness reduction ratio on the edging efficiency ($W_0 = 2.5\text{ m}$, $\Delta E = 85\text{ mm}$)

4 立轧-平轧宽度控制人工神经网络模型的建立

立轧-平轧宽度控制过程包括了立辊侧压过程和随后平辊轧制过程。有限元数值模拟结果表明,轧制工艺参数与立轧-平轧调宽效率之间的关系复杂,很难通过传统的数理方程建立数学模型。而人工神经网络在从样本数据中通过自学习自动获取数学模型方面具有独特的优越性,不需要事先给定公式形式,以样本数据为基础,经过有限次的迭代计算,便可以获得反映样本数据内在规律的数学模型,尤其适用于处理规律不明显、工艺参数多的非线性问题。已有研究者将人工神经网络应用到热带连轧过程中立轧-平轧工艺参数的预测和优化^[14,16]。为了方便工业应用,本文基于宽厚板热轧过程中立轧-平轧宽度控制过程的有限元数值模拟数据,针对立轧-平轧调宽效率,借助 BP 人工神经网络的高度非线性映射能力,建立宽厚板热

轧过程中立轧-平轧宽度控制人工神经网络模型。

4.1 人工神经网络模型构建

图 7 所示为三层典型 BP(back propagation)人工神经网络(ANN)模型,其由输入层、隐层和输出层组成。BP 算法是在“导师指导”下适用于多层神经网络的一种学习,其学习过程由正向传播和反向传播两部分组成。在正向传播过程中,每层神经元状态只影响下一层神经元状态,如果实际输出与期望输出之间误差大于设定值,则转入误差反向传播过程,将误差信号沿原来的连接通路返回,通过修改各层神经元的权值,逐次向输入层进行计算,接着再进行正向传播过程。这两个过程交替应用,使误差信号减小,当误差小于设定值时,网络的学习过程结束。

影响热轧宽厚板立轧-平轧宽度控制精度的因素很多,理论上各个因素都应该作为神经网络输入层的一个节点,但是过多的影响因素会使得神经网络过于庞大和复杂,反而不利于准确预测调宽结果,所以只需选取主要影响因素作为输入层节点。有限元模拟结果分析表明,板坯厚度和宽度影响立轧-平轧过程中金属的流动,而立辊压下量和平辊压下率则与被压下金属的体积直接相关,所以板坯厚度(H_0)、板坯宽度(W_0)、立辊压下量(ΔE)和平辊压下率(ΔH)是立轧-平轧过程的主要影响因素,将这 4 个量作为输入层神经元。输出层是系统的预测结果,对于立轧-平轧宽度控制过程而言,调宽效率(η)能比较全面地反映立轧-平轧宽度的控制效果,故以此作为输出层的神经元。隐层神经元数目的增加可以提高神经网络的处理能力,但使网络训练复杂化从而增加网络的训练时间,本文以使网络训练次数最少且具有最广泛的泛化能力为最优目标,采用“试错法”确定隐层最优神经元数目为 15 个。

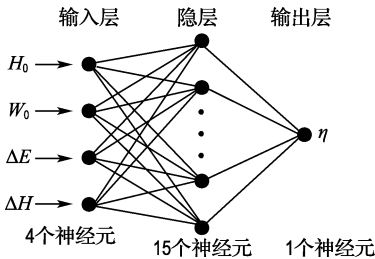


图 7 三层 BP 网络结构示意图

Fig. 7 The schematic structure of BP network with three layers

4.2 人工神经网络训练

以热轧宽厚板立轧-平轧宽度控制过程有限元数值模拟结果为训练样本,对网络进行训练.为了尽可能全面反映立轧-平轧宽度控制过程的工作范围和参数特性,在 320 组有限元模拟数据中,选取其中 287 组作为训练样本,样本中各工艺参数范围分别为板坯厚度 60~240 mm,板坯宽度 2.5~4.5 m,立辊压下量 25~125 mm,平辊压下率 0~40%,并使样板的输入变量尽量均匀分布在上述范围内.设定网络学习率 0.05,惯性系数 0.15,网络训练精度 0.000 075.图 8 所示为训练误差收敛曲线,经过 125 723 016 次循环学习后,训练误差收敛于 $7.499\ 990\ 9\times 10^{-5}$,可见神经网络的训练达到了很好的收敛效果.在这 287 组训练样本中,网络输出的调宽效率与有限元模拟结果最大相差 1.44%.至此,建立了宽厚板立轧-平轧工艺参数($H_0,W_0,\Delta E,\Delta H$)到调宽效率(η)的映射关系 F_1 :

$$\eta = F_1(W_0,H_0,\Delta E,\Delta H)$$

(2)

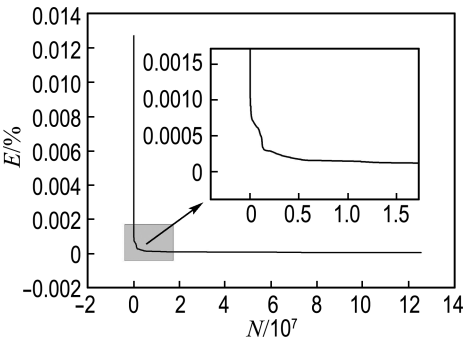


图 8 训练过程中误差收敛曲线

Fig. 8 Convergence error evolution during the training process

4.3 人工神经网络泛化能力测试

热轧宽厚板立轧-平轧调宽效率人工神经网络预测模型在使用前,必须对其泛化能力进行测试,以验证神经网络在整个定义域内的预测情况.测试样本的选择方式与训练样本的选择方式相同,在工艺参数的取值范围内,测试样本应该均匀分布,但不能再选用训练样本中的数据.33 组立轧-平轧工艺参数和对应的调宽效率被选作测试样本,用以测试立轧-平轧宽度控制人工神经网络的泛化能力.图 9 比较了人工神经网络的预测结果和有限元数值模拟结果.可见,人工神经网络的

预测值能够反映有限元数值模拟值的变化规律,该人工神经网络模型可以用于预测立轧-平轧过程的调宽效率.

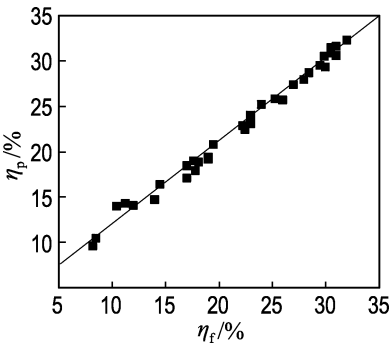


图 9 调宽效率有限元数值模拟值(η_i)与人工神经网络预测值(η_p)比较

Fig. 9 Comparison of edging efficiency predicted by the ANN model (η_p) and the FE numerical simulation (η_i)

4.4 模型有效性验证

采用本文所建立的有限元模型,模拟沙钢 5 m 宽厚板轧机的实际生产过程(大板编号:0118002).表 2 列出了该板的轧制规程,通过 7 个道次往复轧制,该板厚度从 256.00 mm 被轧至 81.39 mm,其中在第 4 道次和第 6 道次分别进行立辊侧压以控制轧件宽度.

表 2 轧件宽度的有限元模拟值与实测值比较

Tab. 2 Comparison of the FE simulated widths and the measured ones

道次	板厚/mm	轧件宽度/mm	
		沙钢值	模拟值
0	256.00	2 050	2 050
1	217.22	2 058	2 057
2	178.44	2 066	2 064
3	145.06	2 073	2 070
4	121.62	2 054	2 052
5	104.09	2 057	2 056
6	91.14	2 038	2 039
7	81.39	2 039	2 040

采用上述立轧-平轧宽度控制人工神经网络模型预测第 4 道次和第 6 道次工艺参数条件下的调宽效率,进而计算第 4 道次和第 6 道次立辊压下量 ΔE 分别为 89.70 mm 和 84.90 mm.表 2 比较了该板各道次轧制完成后轧件宽度的沙钢值和

有限元模拟值,前后符合得较好,两者宽度最大相差 3 mm,满足宽厚板热轧过程中宽度控制精度的要求。

5 结 语

基于 5 m 宽厚板轧机实际生产参数,建立了三维热力耦合刚塑性有限元模型,模拟了 320 种不同工艺参数条件下宽厚板立轧-平轧宽度控制过程,分析了板坯厚度、板坯宽度、立辊压下量和平辊压下率对调宽效率的影响。结果表明,调宽效率随轧制工艺参数变化的规律复杂,但总体表现为随板坯厚度和平辊压下率的增加而降低,随着立辊压下量和板坯宽度的增加而升高。

针对宽厚板立轧-平轧宽度控制过程,建立了 BP 人工神经网络模型,以有限元数值模拟结果为样本,对模型进行训练,并对训练后的模型泛化能力做了验证,模型预测调控效率与有限元数值模拟结果符合很好。

将立轧-平轧宽度控制人工神经网络模型用于实际生产过程的有限元数值模拟,模拟结果表明该模型能有效控制轧件宽度。

参考文献:

[1] 何文斌,阮金华,张立文,等. 提高宽厚板成材率方法的理论探讨[J]. 宽厚板, 2012, **18**(5):30-34.
HE Wen-bin, RUAN Jin-hua, ZHANG Li-wen, *et al.* Theoretical study on methods to improve the yield rate of wide and heavy plate [J]. **Wide and Heavy Plate**, 2012, **18**(5):30-34. (in Chinese)

[2] Inoue M, Nishida S I, Omori K, *et al.* Manufacture of trimming-free plates [J]. **Kawasaki Steel Technical Report**, 1989(20):71-77.

[3] 刘相华,胡贤磊,杜林秀,等. 轧制参数计算模型及其应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2007.
LIU Xiang-hua, HU Xian-lei, DU Lin-xiu, *et al.* **Rolling Parameters Computation Model and Application** [M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2007. (in Chinese)

[4] 付江,赵以相,贺毓辛. 板坯大侧压调宽工艺[J]. 轧钢, 1994(3):18-22,45.
FU Jiang, ZHAO Yi-xiang, HE Yu-xin. Slab

width regulation technology by using edge rolling [J]. **Steel Rolling**, 1994(3):18-22,45. (in Chinese)

- [5] 孙本荣,率民,杨新法,等. 热宽带钢连轧机调宽轧制工艺参数研究[J]. 钢铁, 1995, **30**(10):37-41.
SUN Ben-rong, SHUAI Min, YANG Xin-fa, *et al.* Investigation on basic technological parameter of edging rolling on hot wide strip mill [J]. **Iron and Steel**, 1995, **30**(10):37-41. (in Chinese)
- [6] 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[J]. 上海金属, 1997, **19**(1):39-43.
XIONG Shang-wu, ZHU Xiang-lin, LIU Xiang-hua, *et al.* Mathematical model of width reduction process of roughing trains of hot strip mills [J]. **Shanghai Metals**, 1997, **19**(1):39-43. (in Chinese)
- [7] 熊尚武,姜正义,刘相华,等. 粗轧机组板坯调宽预测模型的实验验证与应用[J]. 钢铁, 1999, **34**(8):41-44.
XIONG Shang-wu, JIANG Zheng-yi, LIU Xiang-hua, *et al.* Experiment and application of slab width reduction prediction model on roughing stands of hot strip mill [J]. **Iron and Steel**, 1999, **34**(8):41-44. (in Chinese)
- [8] XIONG Shang-wu, LIU Xiang-hua, WANG Guo-dong, *et al.* A three-dimensional finite element simulation of the vertical-horizontal rolling process in the width reduction of slab [J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2000, **101**(1-3):146-151.
- [9] XIONG Shang-wu, LIU Xiang-hua, WANG Guo-dong, *et al.* Three-dimensional thermo-mechanical finite element simulation of the vertical-horizontal rolling process [J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2001, **110**(1):89-97.
- [10] XIONG Shang-wu, ZHENG Gui-fang, LIU Xiang-hua, *et al.* Analysis of the non-steady state vertical-horizontal rolling process in roughing trains by the three-dimensional finite element method [J]. **Journal of Materials Processing Technology**, 2002, **120**(1-3):53-61.
- [11] XIONG Shang-wu, Rodrigues J M C, Martins P A

F. Three-dimensional modelling of the vertical-horizontal rolling process [J]. **Finite Elements in Analysis and Design**, 2003, **39**(11):1023-1037.

[12] 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[J]. 钢铁, 2005, **40**(6):44-47.

LI Xue-tong, DU Feng-shan, SUN Deng-yue, *et al.* Study on spread model of hot strip on roughing trains [J]. **Iron and Steel**, 2005, **40**(6): 44-47. (in Chinese)

[13] 李学通,杜凤山,孙登月,等. 热轧带钢头尾形状短行程控制研究[J]. 钢铁, 2005, **40**(2):51-54.

LI Xue-tong, DU Feng-shan, SUN Deng-yue, *et al.* Study of SSC for strip head and tail shape on hot strip mill [J]. **Iron and Steel**, 2005, **40**(2):51-54. (in Chinese)

[14] 王爱丽,杨 荃,何安瑞,等. 热连轧粗轧区 FES 宽展模型及其优化[J]. 北京科技大学学报, 2010, **32**(4):515-519.

WANG Ai-li, YANG Quan, HE An-rui, *et al.* FES width spread model and its optimization for a rough rolling mill [J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2010, **32**(4):515-519. (in Chinese)

[15] RUAN Jin-hua, ZHANG Li-wen, YUE Chong-xiang, *et al.* 3-D finite element simulation of the vertical-horizontal rolling process [J]. **Advanced Materials Research**, 2011, **145**:187-192.

[16] Lee D Y, Cho H S, Cho D Y. A neural network model to determine the plate width set-up value in a hot plate mill [J]. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 2000, **11**(6):547-557.

FE numerical simulation-based ANN model for heavy plate width control during hot rolling process

RUAN Jin-hua¹, ZHANG Li-wen^{*1}, GU Sen-dong¹, HE Wen-bin², CHEN Shao-hui²

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Jiangsu Shagang Group Co., Ltd., Zhangjiagang 215625, China)

Abstract: Using commercial FE software DEFORM-3D, a 3D thermo-mechanical rigid-plastic FE model was developed to simulate a vertical-horizontal hot rolling process for heavy plate. The 3D FE model was used to simulate 320 kinds of different vertical-horizontal rolling processes under different rolling parameters, such as slab thickness, slab width, edging reduction and thickness reduction ratio, and the influences of different process parameters on edging efficiency were discussed. Simulation results show that edging efficiency increases with increment of edging reduction and slab width, while decreases with increment of slab thickness and thickness reduction ratio. Based on the FE numerical simulation results, a heavy plate width control model for vertical-horizontal hot rolling process was established with the aid of a BP artificial neural network (ANN). Edging efficiencies predicted by the model are in good agreement with the FE numerical simulation results. The heavy plate width control model was employed in an FE numerical simulation of a real heavy plate rolling process to control the plate width, the simulated plate width is in good agreement with the measured one.

Key words: hot rolling heavy plate; vertical-horizontal rolling; width control; FE numerical simulation; artificial neural network (ANN)