

· 试验研究 ·

## 热轧钢板头部弯曲行为的人工神经网络预报模型

程晓茹<sup>1</sup> 任 勇<sup>1</sup> 胡衍生<sup>1</sup> 江定辉<sup>2</sup> 刘建斌<sup>2</sup>

(1 武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081; 2 韶关钢铁集团有限公司, 韶关 512123)

**摘 要** 根据单机架 2500 四辊可逆式轧机钢板轧制的实测数据, 采用人工神经网络方法建立了钢板头部弯曲行为预报模型。结果表明, 轧制过程钢板头部弯曲的人工神经网络计算值与实测值符合; 当轧件上下表面温度相差较大时, 上下表面温差、变形区形状特征和变形程度是影响轧件头部弯曲的主要因素。对于厚的成品板, 减小道次压下量可减小弯曲; 对薄成品板, 增加道次压下量可减小弯曲。

**关键词** 热轧工艺 钢板头部弯曲 人工神经网络

## Artificial Neural Network Prediction Model for Front End Bending Behavior of Hot Rolled Steel Plate

Cheng Xiaoru<sup>1</sup>, Ren Yong<sup>1</sup>, Hu Yansheng<sup>1</sup>, Jiang Dinghui<sup>2</sup> and Liu Jianbin<sup>2</sup>

(1 School of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Shaoguan Iron and Steel Group Co Ltd, Shaoguan 512123)

**Abstract** Based on measured data of steel plate rolled by single stand 2500 four high reversing mill, the prediction model for front end bending behavior has been established by artificial neural network method. Results showed that artificial neural network calculated value of plate front end bending during rolling conformed to measured value; as temperature difference between top and bottom surface of rolling work piece was higher, the temperature difference, deformation zone shape characteristic and deformation extent were main factors to effect rolling work piece front end bending. For heavy plate products, decreasing pass reduction could decrease bending, and for thin plate, increasing pass reduction could decrease bending.

**Material Index** Hot Rolling Process, Front End Bending of Plate, Artificial Neural Network

在热轧钢板生产中, 由于轧制条件沿轧制线上下不对称, 会引起轧制过程中轧件头部出轧机后向上或向下弯曲<sup>[1]</sup>。如轧件内部温度沿板厚方向不对称分布、上下轧辊直径不相等、上下轧辊线速度不相等、上下接触表面摩擦条件不相同和上下咬入角不相等等, 都会引起轧件头部弯曲。当这种弯曲严重时, 不仅会损害钢板质量, 而且还会撞击设备, 造成生产故障<sup>[2]</sup>。因此, 对钢板轧制中头部弯曲行为进行研究, 分析生产中轧制工艺制度对钢板头部弯曲行为的影响, 以达到有效控制的目的。

### 1 现场生产数据采集及人工神经网络建模

轧机为单机架 2500 四辊可逆式轧机, 上下工作辊分别由 2 台直流电机单独驱动, 投产以后存在着较严重的轧件头部弯曲现象, 影响生产顺利进行。为对其进行研究, 在现场实测和收集了各种钢种和规格的生产数据 10 000 多组, 内容主要包括: (1) 材质、坯料规格和成品规格; (2) 上轧辊直径、下轧辊直径和下轧辊标高; (3) 均热上温度、均热下温度、二加热上温度、二加热下温度、一加热上温度和一加

热下温度; (4) 轧制道次、入口厚度、出口厚度、轧制温度、轧制压力和轧件头部弯曲量。轧件头部弯曲量是以轧件头部弯曲高度表示的, 向上弯曲为正, 向下弯曲为负。

在上下轧辊直径相等、转速相等、下轧辊标高一定和咬入瞬间电机特性一定的条件下, 轧制过程中轧件头部的弯曲行为, 主要受轧件内部厚度方向的温度分布、道次变形量和轧件厚度的影响。而轧件内部的温度场除了决定于加热过程外, 还决定于轧制过程中的温降。轧件厚度方向的温度分布上下不对称, 主要是由加热不均匀和轧制过程温降不均匀所致。因而, 在任何轧制道次轧件内部的温度场很难确定, 而温度场条件与塑性变形量等条件的交互作用, 使翘曲行为更加复杂和难以掌握。因此, 采用人工神经网络方法来建立钢板弯曲模型<sup>[3]</sup>, 以克服温度场难以确定的困难, 获得生产过程各影响因素对钢板弯曲行为的影响规律, 为实际生产提供钢板弯曲行为的预测和分析工具。

在现场设备条件和机架冷却水条件既定的情况下, 选择人工神经网络的输入变量有: 坯料的三维尺

寸、成品厚度和宽度、材质、加热炉各段上下温度、轧制道次、入口厚度和出口厚度等 15 个变量。输出变量为钢板头部弯曲高度。采用三层 B-P 网络,隐层神经元数经试验后确定为 21 个。隐层神经元的转换函数为双曲正切 S 型函数<sup>[4]</sup>:

$$f_j(v_j) = \frac{1 - \exp(-bv_j)}{1 + \exp(bv_j)} \quad (1)$$

$$v_j = \sum w_{ji}x_i - Q_j \quad (2)$$

式中:  $b$ - 常数;  $v_j$ - 神经元  $j$  的输入;  $w_{ji}$ - 从神经元  $i$  到神经元  $j$  的权值;  $x_i$ - 神经元  $i$  的输出;  $Q_j$ - 神经元  $j$  的阈值。

输出层神经元的转换函数为线性函数:

$$f_k = \sum w_{kj}x_j - Q_k \quad (3)$$

采用 4000 组数据对神经网络进行训练,训练精度达到均方根误差  $MSE = 0.0058$ , 满足应用要求。图 1 表示轧件在轧制过程中板头弯曲的实测值与人工神经网络计算值,可见,在轧制过程中随着轧制道次的变化板头弯曲高度变化很大,人工神经网络计算值与实测值吻合。

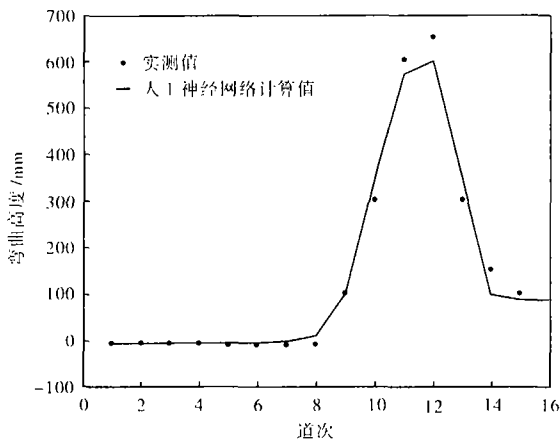


图 1 热轧过程钢板头部弯曲实测值与人工神经网络计算值比较(钢 Q235, 坯料断面 200 mm × 1 200 mm, 成品厚度 12 mm, 总道次数 16)

Fig. 1 Comparison between artificial neural network calculated value and measured value of front end bending of plate during hot rolling, steel Q235, slab section 200 mm × 1 200 mm, finished plate thickness 12 mm, total pass 16

## 2 轧制工艺对钢板头部弯曲行为的影响

### 2.1 弯曲随轧制道次的变化

图 2 为钢种、坯料尺寸、加热制度和轧制总道次数相同条件下,按照现场压下规程,用人工神经网络模型计算的不同成品规格的 3 种钢板在轧制过程中

弯曲高度随轧制道次的变化曲线。由图 2 可知,在前 5 ~ 7 个道次轧件头部略微向下弯曲(10 ~ 30 mm),从 6 ~ 8 道次开始轧件头部变为向上弯曲,并且弯曲高度随轧制道次的增加先是增加,达到最大值 600 ~ 800 mm 后又减小。由此说明,轧件在前 5 ~ 7 个道次的变形是上部延伸大于下部延伸,使得轧件向下弯曲;在 6 ~ 8 道次后是下部延伸大于上部延伸,使得轧件向上弯曲。

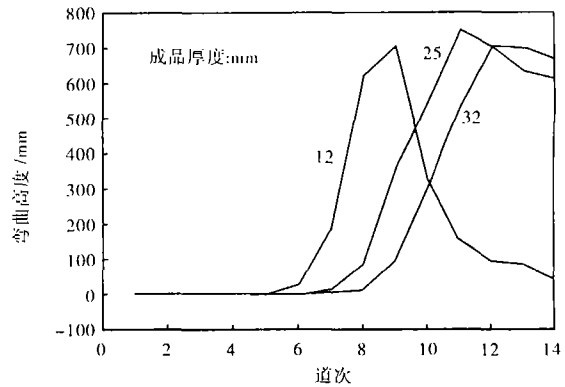


图 2 人工神经网络模型计算的不同规格钢板头部弯曲高度随轧制道次的变化(钢 Q235, 坯料断面 200 mm × 1 200 mm, 总道次数 14)

Fig. 2 Change curves of front end bending height of different thickness plate with rolling pass calculated by artificial neural network model, steel Q235, slab section 200 mm × 1 200 mm, total pass 14

板坯在轧制过程中存在的上下不对称因素主要是轧件内部的温度分布。对出炉钢坯上下表面温度进行实测得到,钢坯上表面温度比下表面温度高 100 ~ 150 °C。在轧制过程中,由于机架冷却水自上而下地浇到轧件上表面,使轧件上部温降大于下部温降。因此,轧件内部温度分布随着轧制道次的增加,由轧件上部温度大于下部温度变化为下部温度大于上部温度。继而随着轧制道次的进一步增加,上下不均匀温降的作用,使轧件下部温度大于上部温度更多,而同时轧件厚度在不断减小,其作用又使上下部温差减小。这两方面作用的综合结果,使轧件上下部温差增大到一极限值后又减小。这种轧件上下部温差随轧制道次的变化,就引起了轧件上下部延伸差随轧制道次的变化。

因轧件向上弯曲高度很大(图 2),为了防止轧件撞击机架冷却水管及其它部件,在加热过程中使轧件上部温度大于下部温度是有益的。为此,还建议在辊道上设置下喷水冷却水管,在上弯道次让冷却水喷射到钢板下表面,加大轧件下部温降,可减小

轧件上弯。

## 2.2 变形程度对弯曲高度的影响

轧制变形可分为3种典型情况:厚件、薄件和中等件。厚件变形特征是变形不深透,上下表层变形大于中间层;薄件变形特征与厚件相反,变形深透,中间层变形大于上下表层;中等件变形特征是上下表层与中间层均匀变形<sup>[5]</sup>。当轧件上下表面产生温差时,上述3种典型轧制表现出来的轧件弯曲高度是不同的。

当轧辊直径和轧坯厚度一定时,变形程度的大小可以反映变形区形状特征即变形深透情况。如图3所示,对于轧坯厚度在20~45 mm范围,当变形程度 $\geq 0.2$ 时,变形区形状参数 $\geq 1.5$ (轧辊直径为776 mm),此区域为薄件区;当变形程度 $\leq 0.2$ 时,变形区形状参数 $\leq 1.5$ ,此区域为中等件和厚件区。当轧件下表层温度高于上表层时,在中等件和厚件区,随着变形程度的增加,轧件弯曲高度增加;在薄件区,随着变形程度的增加,轧件弯曲高度减小。分析可知,厚件变形主要发生在上下表层,正是温差大的局部,加大了温差的作用,因此变形程度越大,轧件弯曲高度越大。而薄件变形主要发生在中间层,减小了上下表层温差引起的上下不均匀延伸,也就减小了轧件弯曲高度,并且变形程度越大这种作用越显著,因此变形程度越大,轧件弯曲高度越小。中等件变形情况是厚件变形情况向薄件变形情况的过渡。如图3所示,变形程度从0.05增加到0.30,轧件弯曲高度先是增加,增加到一极限值后又减小。根据此规律,当变形程度小于极限值点对应的值时,可采取减小变形程度来减小弯曲,当变形程度大于极值

点对应的值时,可采取增大变形程度来减小弯曲。在图3条件下,极值点对应的变形程度约为0.2。

## 2.3 成品厚度对弯曲高度的影响

对于不同规格产品的轧制,如果轧制总道次相同,则开始上弯和最大上弯的道次是不同的。如图2所示,几种不同规格产品的轧制都采用14道次。成品厚度为12 mm的钢板,开始上弯和最大上弯分别发生在第6和第9道次;成品厚度为25 mm的钢板,开始上弯和最大上弯分别发生在第7和第11道次;成品厚度为32 mm的钢板,开始上弯和最大上弯则分别发生在第8和第12道次。

从大量实测数据和人工神经网络模型计算可得,轧件开始上弯发生在轧出厚度为60~80 mm的范围内,上弯最大值发生在轧出厚度为30~50 mm的范围内。成品厚度对弯曲高度的影响,实际上反映了轧制过程中轧件温度场变化、轧出厚度变化和变形程度变化的综合影响。

## 3 结论

(1)用人工神经网络方法建立的钢板弯曲模型,可对实际生产中钢板弯曲行为进行预测和分析。

(2)由于机架冷却水自上而下地浇到轧件上表面,使轧件上部温降大于下部温降。当轧件上下表面存在较大的温差时,上下表面温差、变形区形状特征和变形程度是影响轧件弯曲的主要因素。

(3)当轧件上下表面存在较大的温差时,对于厚件,减小道次压下量可减小弯曲;对于薄件,增加道次压下量可减小弯曲。

(4)该厂轧件上弯较严重,轧件开始上弯发生在轧出厚度为60~80 mm的范围内,上弯最严重发生在轧出厚度为30~50 mm的范围内。

## 参考文献

- 1 Markowski J, Dyja H, Knapinski M, 等. 在连铸坯的轧制过程中变形区的金属流动的分析. 钢铁, 1999(增刊): 702
- 2 江定辉. 采用“差动咬入法”控制中厚板轧制板头弯曲. 武汉科技大学学报, 2002, 25(3): 237
- 3 Corni A A. The Application of Neural Networks in the Modeling of Plate Rolling Processes. JOM-e, 1997, 49(4): 1
- 4 韩力群. 人工神经网络理论、设计及应用. 北京: 化学工业出版社, 2002
- 5 赵志业. 金属塑性变形与轧制理论. 北京: 冶金工业出版社, 1980

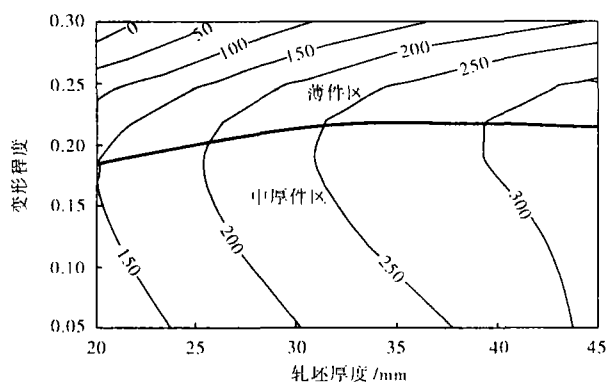


图3 人工神经网络模型计算的钢板弯曲高度(mm)等高线图(钢Q235,成品厚度16 mm,第10道次)

Fig. 3 Contour map of plate front end bending calculated by artificial neural network model (mm), steel Q235, finished plate thickness 16 mm, at 10 pass

程晓茹(1958-),女,教授,1982年武汉大学金属压力加工专业毕业,从事轧制工程研究。