

## 九辊矫直机钢板矫直工艺的有限元模拟研究

张焕军<sup>1</sup> 程晓茹<sup>1</sup> 任勇<sup>1</sup> 王振国<sup>1</sup> 詹胜利<sup>2</sup> 黄大军<sup>2</sup>

(1 武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081; 2 武汉钢铁集团公司热轧总厂, 武汉 430083)

**摘要** 通过建立的有限元模型,研究了22 mm Q345 钢板( $\% : \leq 0.20C, \leq 0.55Si, \leq 1.70Mn, 0.02 \sim 0.15V, 0.015 \sim 0.060Nb, 0.02 \sim 0.20Ti$ )在9 辊矫直机矫直时首辊与尾辊的位置对钢板平直度和表面残余应力的影响,得到钢板不平的位置集中在尾部。1<sup>#</sup>辊和9<sup>#</sup>辊在高度上的自由调节,可以保证钢板出矫直机时不会出现上弯或下弯。钢板的上表面残余应力比下表面低,沿钢板长度方向,钢板表面残余应力呈现尾部高、头部低的状态。

**关键词** 9 辊矫直机 Q345 钢 22 mm 板 有限元模拟 平直度 残余应力

### A Study on Finite Element Simulation for Leveling Process of Steel Plate by Straightener with Nine-Roll

Zhang Huanjun<sup>1</sup>, Cheng Xiaoru<sup>1</sup>, Ren Yong<sup>1</sup>, Wang Zhenguo<sup>1</sup>, Zhan Shenli<sup>2</sup> and Huang Dajun<sup>2</sup>

(1 College of Materials Science and Metallurgical Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Hot Rolling General Plant, Wuhan Iron and Steel Group Corp, Wuhan 430083)

**Abstract** The effect of first roll and last roll position on plate flatness and surface residual stress of 22 mm Q345 steel plate ( $\% : \leq 0.20C, \leq 0.55Si, \leq 1.70Mn, 0.02 \sim 0.15V, 0.015 \sim 0.060Nb, 0.02 \sim 0.20Ti$ ) during leveling process by a 9-roll straightener has been studied by established finite element model to get the position of un-flatness is mainly at tail of plate. With free adjustment of height of No1 (first) roll and No9 (last) roll the plate is ensured no-bending up and down as the plate is out of straightener. The residual stress at upper surface of plate is lower than that at bottom surface, and along the length direction of plate, the residual stress at head of plate is lower than that at end of plate.

**Material Index** 9 Roll Straightener, Steel Q345, 22 mm Plate, Finite Element Simulation, Flatness, Residual Stress

辊式矫正的特点是轧件需经多辊反复弯曲,逐渐消除原始曲率的不均匀性同时将轧件矫直<sup>[1]</sup>。钢厂的矫直机入口和出口的矫直辊安装在下辊系中,通过液压马达的驱动蜗轮蜗杆垂直调节机构实现它们的调节,安装在矫直机底座里,入、出口各1套。

采用有限元软件 ABAQUS/Explicit<sup>[2]</sup> 对中厚板在9 辊矫直机中的矫直过程进行模拟,在现场工艺较优的上排辊压下量的情况下,进一步研究下排首尾辊位置调节量对钢板平直度、残余应力的影响。

#### 1 有限元模型的建立

矫直钢板为 Q345 钢(化学成分 $\% : \leq 0.20C, \leq 0.55Si, \leq 1.70Mn, \leq 0.040P, \leq 0.040S, 0.02 \sim 0.15V, 0.015 \sim 0.060Nb, 0.020 \sim 0.20Ti$ ), 矫直过程中考虑到矫直辊的磨损和变形较小,将其设置为刚体,为了减少计算时间和计算量,模型在宽

度方向采取1/2模型。采用 C3D8RT(热力耦合)单元为钢板划分网格,矫直辊为解析刚体不对其划分网格。有限元矫直模型见图1,辊系上排从左到右依次为2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、8<sup>#</sup>辊,下排依次为1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、7<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>辊,矫直机的基本参数如表1,钢板几何尺寸和材料属性如表2。

#### 2 模拟结果及分析

根据现场的条件1<sup>#</sup>辊(首辊)和9<sup>#</sup>辊(尾辊)的调节精度为0.15 mm,本文1<sup>#</sup>辊的调节量分别为0、0.15、0.3、-0.15、-0.3 mm,9<sup>#</sup>辊亦如此,上调为正,下调为负,排列组合共建立25组模型,分别计算

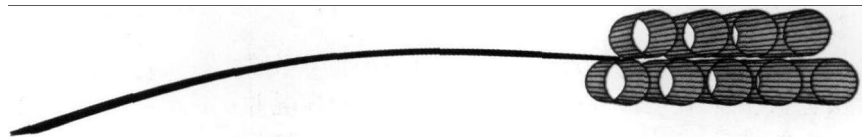


图1 钢板有限元矫直模型  
Fig. 1 Finite element model for plate leveling

表 1 矫直机模拟参数

Table 1 Simulation parameters of straightener

名称	参数
辊径/mm	360
辊间距	下排前两辊心间距 425 mm, 后两辊心间距 380 mm, 上排各辊在下排相邻两辊中间正上方
辊身长度/mm	3 200
矫直速度/ ( $r \cdot s^{-1}$ )	2.78
辊缝值	2 <sup>#</sup> 、4 <sup>#</sup> 辊辊缝值 20.3 mm, 6 <sup>#</sup> 、8 <sup>#</sup> 辊辊缝值 21.9 mm

表 2 模拟钢板尺寸及基本属性

Table 2 Size and basic properties of simulated plate

名称	参数
板厚/mm	22
板长/mm	5 000
板宽/mm	2 200
矫直温度	钢板矫直前 530 °C, 环境温度 30 °C
弹性模量	500 ~ 700 °C, 50 300 ~ 54 300 MPa
泊松比	0.28

出各个模型中钢板的不平度和残余应力。

### 2.1 平直度分析

以 1 m 长的钢板最大波动不超过 15 mm 为平直度判断依据, 将矫直后的钢板头部、中部和尾部在模型中的坐标点取出, 通过坐标转换公式<sup>[3]</sup>:

$$x = x_1 \cos\theta + y_1 \sin\theta \quad (1)$$

$$y = -x_1 \sin\theta + y_1 \cos\theta \quad (2)$$

式中:  $x$ 、 $y$ - 转换后坐标;  $x_1$ 、 $y_1$ - 原始坐标;  $\theta$ - 原始坐标系转动角度。这样就便于计算出 1 m 长钢板的波动值的最大值即不平度。

图 2 给出了当 9<sup>#</sup> 辊的调节量为 0.15 mm 时, 变动 1<sup>#</sup> 辊的调节量, 钢板头部、尾部、中部的不平度变化趋势。从图 2 中可见, 钢板尾部的不平度较大, 中

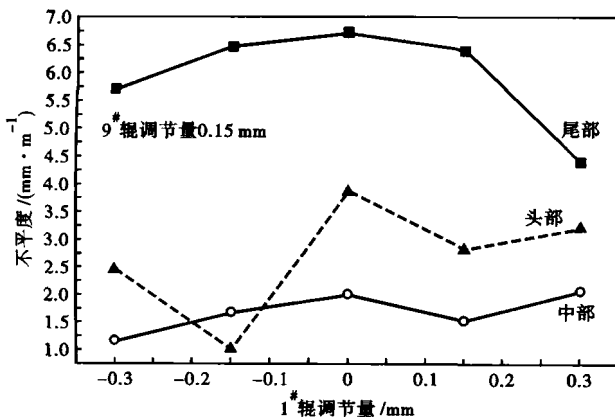


图 2 9<sup>#</sup> 辊的调节量为 0.15 mm, 1<sup>#</sup> 辊调节量对平直度的影响  
Fig. 2 Effect of No1 (first) roll adjustment on flatness of plate with No9 roll adjustment- 0.15 mm

部和头部较小。其它模型均有类似的情况发生, 如表 3 所示, 表 3 中调节量符号“~”, 左边是 1<sup>#</sup> 辊的调节量, 右边为 9<sup>#</sup> 辊的调节量。25 个模型中钢板不平的位置集中在尾部。

1<sup>#</sup> 辊和 9<sup>#</sup> 辊在高度上的自由调节, 可以保证钢板出矫直机时不会出现上弯或下弯。表 3 中序号 1~5 显示了单独调节 1<sup>#</sup> 辊对钢板平直度的影响。由表 3 可以看出, 钢板中部和头部的不平度, 随着 1<sup>#</sup> 辊由下至上的调节, 钢板的不平度迅速降到一个最小值, 接着呈波浪型变化, 钢板的尾部也呈上升下降交替的波浪型变化。因随着 1<sup>#</sup> 辊由下至上调节, 入口矫直辊的压弯量逐渐增大, 板材的弹塑性弯曲次数相应增加, 最终残余曲率的大小和方向则根据最终弹塑性弯曲位置发生改变, 当其它矫直辊位置不变时, 从开始的反弯曲率小于弹复曲率, 到二者相等再到反弯曲率大于弹复曲率, 残余曲率因此呈波动状态, 不平度也就相应呈波动状态。

表 3 1<sup>#</sup> 辊与 9<sup>#</sup> 辊调节量对钢板平直度的影响

Table 3 Effect of adjustment of No1 roll and No9 roll on flatness of plate

序号	调节量/ mm	不平度/( $mm \cdot m^{-1}$ )		
		尾部	中部	头部
1	0	6.10	3.21	2.89
2	0.15 ~ 0	5.48	2.25	2.77
3	0.3 ~ 0	5.95	2.90	1.02
4	-0.15 ~ 0	5.26	1.68	0.62
5	-0.3 ~ 0	4.39	3.10	4.24
6	0 ~ -0.15	6.70	2.00	3.86
7	0.15 ~ -0.15	6.40	1.51	2.83
8	0.3 ~ -0.15	4.39	2.06	3.20
9	-0.15 ~ -0.15	6.46	1.67	1.00
10	-0.3 ~ -0.15	5.70	1.15	2.46
11	0 ~ -0.3	5.40	1.36	3.46
12	0.15 ~ -0.3	6.67	1.28	0.53
13	0.3 ~ -0.3	3.51	2.32	2.60
14	-0.15 ~ -0.3	5.57	2.98	1.79
15	-0.3 ~ -0.3	5.44	1.03	5.96
16	0 ~ -0.15	7.14	2.36	3.21
17	0.15 ~ -0.15	6.83	1.59	0.34
18	0.3 ~ -0.15	6.25	2.73	2.07
19	-0.15 ~ -0.15	6.18	1.28	1.69
20	-0.3 ~ -0.15	5.09	1.14	5.30
21	0 ~ -0.3	3.79	1.05	2.05
22	0.15 ~ -0.3	7.62	1.03	2.74
23	0.3 ~ -0.3	7.52	3.50	2.54
24	-0.15 ~ -0.3	5.11	1.13	1.26
25	-0.3 ~ -0.3	3.43	1.40	3.76

单独调节 9<sup>#</sup> 辊时, 取钢板中部 1 m 长分析了钢板的板型弯曲时的波动值, 图 3 所示。9<sup>#</sup> 辊调节量为 0 时, 钢板中部往下弯曲, 9<sup>#</sup> 辊继续往上调时, 由于出口压弯量的增加, 9<sup>#</sup> 辊给钢板向上接触力, 导致

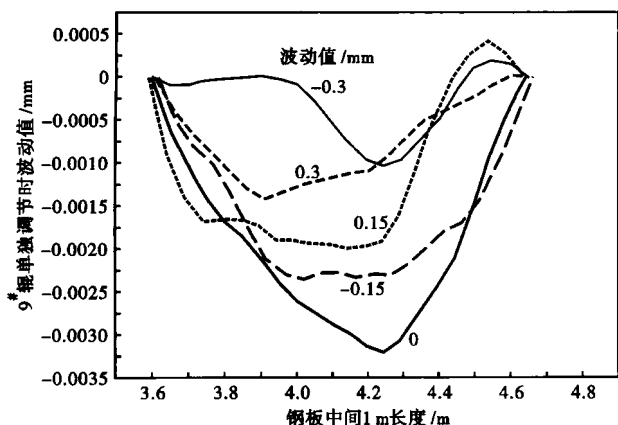


图 3 钢板中部 1 m 长度的板型弯曲波动值

Fig.3 Fluctuation value of profile bending at 1 m length in middle of plate

钢板向下弯曲趋于缓和,不平度减小;9# 辊继续往下调节时,由于7# 辊未动,使7# 辊和9# 辊之间形成一个台阶状,钢板受到7# 辊的向上的接触力变大,导致钢板向下弯曲趋于缓和,甚至有上弯的趋势。

### 2.2 残余应力分析

残余应力的最大值越大,说明钢板在出矫直辊后再度发生弯曲的可能性越大。试验通过对钢板矫直后残余应力的分析,得出钢板残余应力最大最小的模型为1# 辊调节量 0.3 mm,9# 辊调节量 0,其值为 102 MPa,相比1# 辊调节量 0,9# 辊调节 0 的残余应力最大值 122 MPa,减小了 20 MPa。

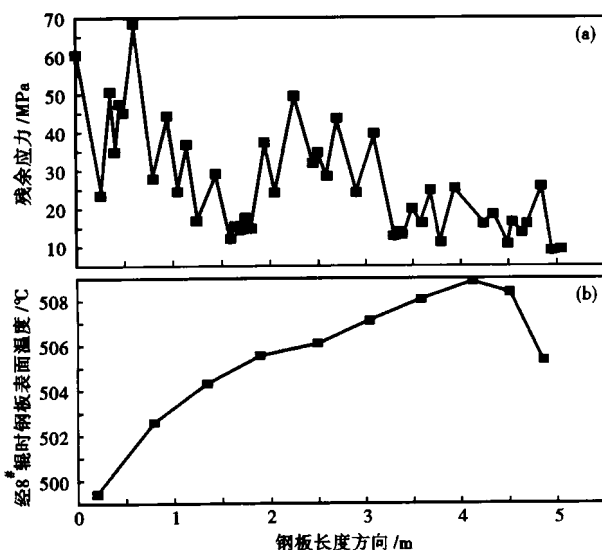


图 4 (a) 延长度方向钢板表面残余应力;(b) 经过 8# 辊时钢板延长度方向的变形温度

Fig.4 (a) Surface residual stress of plate along longitudinal direction; (b) Deformation temperature of plate along longitudinal direction as plate passing No8 roll

金属纵向纤维的弯曲变形在矫直过程中起决定作用<sup>[4]</sup>,所以针对1# 辊调节量 0.3 mm,9# 辊调节量 0 的模型,研究钢板纵向残余应力分布。本文分析了矫直后钢板上下表面的中部和边部残余应力沿着板长的分布,其分布状态整体上均如图 4(a) 所示,沿着板长的方向从尾部到头部残余应力分布不均匀呈现整体下降的趋势,尾部偏高,头部偏低。下表面平均残余应力较上表面大 1.5 ~ 3.5 MPa。这是由于下表面与下排 5 个矫直辊都有接触,受到的拉伸较多和下表面温度较上表面低所致。

钢板矫直变形过程中温度分布不均会导致残余应力的分布不均匀,由图 4(a) 可见,钢板在距离尾部大约 500 mm 处表面残余应力最大,呈现尾部大和头部小的状态。所以针对这种情况,本文分析了钢板在矫直变形的过程中,头部和尾部依次经过 8# 辊的温度值,并从模型中取出做下记录,由图 4(b) 所示。

钢板在经过 8# 辊时延长度方向从尾部到头部变形温度由低到高,在头部方向出现一个下滑。由变形抗力模型  $\sigma_s = f(\sigma_0, \beta, \dot{\epsilon}, T)$ <sup>[5]</sup> 可知,温度  $T$  增加,应力  $\sigma$  减小。这正好解释了钢板长度方向表面残余应力尾部偏大头部偏小的原因。

### 3 结论

(1) 22 mm Q345 钢板不平的位置集中在钢板尾部。

(2) 钢板残余应力上表面比下表面低,延钢板长度方向表面残余应力呈现尾部高、头部低。

(3) 1# 和 9# 辊高度的自由调节,可保证钢板矫直时不会出现上弯和下弯。

### 参考文献

- 1 崔 甫. 矫直原理与矫直机械. 北京:冶金工业出版社,2005
- 2 石亦平,周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解. 北京:机械工业出版社,2006
- 3 张春林. 中厚板矫直模拟以及工艺优化:[硕士学位论文]. 武汉:武汉科技大学,2005
- 4 周存龙,徐 静,王国栋,等. 中厚板在矫直后的残余应力分布分析. 重型机械,2005(2):21
- 5 张春林,程晓茹,董述峰,等. 低碳结构钢中厚板 MAS 轧制过程有限元模拟. 特殊钢,2011,32(1):9

张焕军 (1986-), 男, 硕士研究生, 轧制过程计算机控制研究。

收稿日期:2011-08-30