

45钢中厚板矫直过程温度场有限元模拟及残余应力分析

刘炼 任勇 程晓茹 李春光 尹皓 詹三林

(武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081)

摘要 运用有限元软件 ABAQUS 建立了中厚板矫直过程三维热力耦合温度模型, 通过对 45 钢中厚板的模拟仿真计算和分析, 得出初始温度 520 °C 的 20 mm 板和初始温度 605 °C 的 55 mm 板矫直过程纵向、横向和厚度方向的温度分布和变化, 并分析了 20 mm 板初始温度 420 ~ 620 °C、55 mm 板初始温度 505 ~ 705 °C 原始曲率 0.07 ~ 0.20 时钢板矫直初始温度和原始曲率对矫直后钢板残余应力的影响。计算结果表明, 矫直前温度越低, 原始曲率越大矫直后残余应力越大; 520 °C 20 mm 板矫直后温度为 505.4 °C, 矫直力为 2 161.69 kN, 605 °C 55 mm 板矫直后温度 589.3 °C, 矫直力 4 565.49 kN, 其实测值分别为 507 °C, 2 272.93 kN 和 591 °C, 4 397.94 kN。说明计算值误差较小。

关键词 45 钢 中厚板 矫直过程 有限元模拟 温度场 残余应力

Finite Element Simulation on Temperature Field of 0.45C Steel Medium and Heavy Plate during Straightening Process and Residual Stress Analysis

Liu Lian, Ren Yong, Cheng Xiaoru, Li Chunguang, Yin Hao and Zhan Sanlin

(College of Science and Metallurgical Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract The three dimensional thermo-mechanical coupling model of temperature field for medium and heavy plate during straightening process is established by finite element software ABAQUS. The temperature distribution and change of temperature of 20 mm plate with initial temperature 520 °C and 55 mm plate with initial temperature 605 °C along plate longitudinal, transverse and thickness direction during straightening process are obtained by simulated calculation and analysis on 0.45C steel medium and heavy plate, and the effect of plate straightening initial temperature (20 mm plate 420 ~ 620 °C and 55 mm plate 505 ~ 705 °C) and initial curvature (0.07 ~ 0.20) on residual stress in straightened plate is analyzed. Calculated results show that the lower temperature before straightening, the larger residual stress after straightening; for 520 °C 20 mm plate, the temperature of plate after straightening is 505.4 °C and the straightening force is 2 161.69 kN, for 605 °C 55 mm plate the temperature of plate after straightening is 589.3 °C and the straightening force is 4 565.49 kN, their measured values are respectively 507 °C, 2 272.93 kN and 591 °C, 4 397.94 kN. It indicated that the error of calculated value is minor.

Material Index 0.45C Steel, Medium and Heavy Plate, Straightening Process, Finite Element Simulation, Temperature Field, Residual Stress

在中厚板生产中,低合金高强度品种的级别不断提高,甚至出现超高强度产品,这一类钢种一般都要应用 TMCP(Thermo Mechanical Control Process)热机轧制技术。经过层流冷却强冷后,板型一般要通过强力矫正甚至热处理工艺,才能获得用户满意的实物质量。

然而中厚板矫直后板型有时会重新出现缺陷,这一般都是轧件温度不均所致,由于轧件各部温度不均导致钢板各部热胀冷缩不同,从而使钢板存在残余应力,导致在随后的自然冷却中钢板会出现波浪、瓢曲等缺陷。

本研究采用大型有限元软件 ABAQUS,建立中厚板矫直过程三维热力耦合有限元模型,并对模型进行模拟仿真计算,分析钢板纵向、横向温度分布以及轧件厚度方向的热传导过程的温度变化,讨论了不同矫直前初始温度和不同原始曲率对残余应力分布的影响以及改善板型的途径。

1 有限元模型的建立

1.1 矫直机基本参数

中厚板钢厂热轧 9 辊强力矫直机矫直辊布置图如图 1(a)所示。其中,矫直辊辊径为 360 mm,辊身长为 3 200 mm,矫直速度为 2.78 rad/s。以 45 钢为

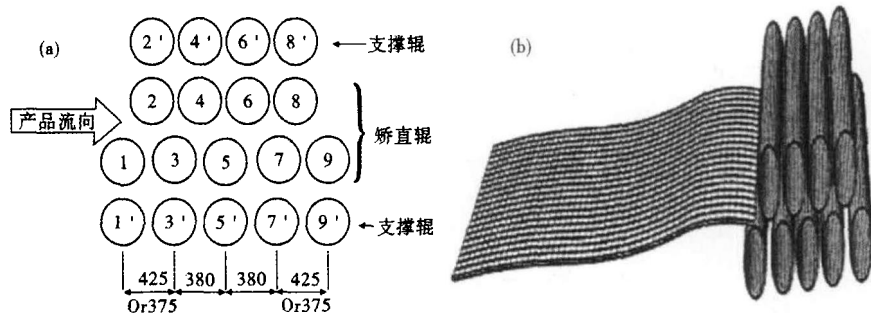


图 1 热轧中厚板矫直辊布置图(a)及有限元模型(b)

Fig. 1 Straightening-roller layout for plate in hot rolling (a) and finite element model (b)

研究钢种 ($\%$: 0.46C、0.24Si、0.46Mn、0.012P、0.028S), 选取两种规格 (mm) 为 $5\,000 \times 2\,000 \times 20$ 和 $5\,000 \times 2\,000 \times 55$ 进行对比研究, 其中 2、4 号辊两辊辊缝相同, 6、8 号辊辊缝相同, 两种规格钢板对应的前后辊缝分别为 19、19.5 mm 和 55、55.5 mm。根据现场实测数据设定两种规格的钢板矫直前初始温度分别为 $520\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $605\text{ }^{\circ}\text{C}$, 假定钢板矫直前初始温度均匀分布, 采用 C3D8RT (热力耦合) 单元对模拟钢板划分网格。根据矫直工艺建立的有限元矫直模型如图 1(b) 所示。

1.2 热边界条件

(1) 根据 Stefan-Boltzmann 定律和牛顿冷却定律, 辐射换热系数为:

$$h_r = \varepsilon(\tau)\sigma(T + T_{\infty})(T^2 + T_{\infty}^2) \quad (1)$$

式中: σ - 波尔兹曼系数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T - 轧件温度/ K ; T_{∞} - 环境温度。 $\varepsilon(\tau)$ 设为 0.8^[1]。

(2) 钢板与空气的对流, 一般情况下视为紊流状态, 每个面不同, 具体的对流系数计算公式为^[2]:

$$h_1 = 1.70 \times (T - T_{\infty})^{1/3} \quad (2)$$

$$h_2 = 1.13 \times (T - T_{\infty})^{1/3} \quad (3)$$

$$h_3 = 0.59 \times \left(\frac{T - T_{\infty}}{12H} \right)^{1/5} \quad (4)$$

式中: h_1 、 h_2 、 h_3 - 分别为上表面、侧面、下表面的对流换热系数; H - 轧件厚度^[2]。

(3) 轧件在矫直时向矫直辊传热, 由于工作辊工作环境恶劣, 其传热过程非常复杂。轧辊表面和钢板之间接触传热系数的代表性取值范围是: $2 \sim 20$ 、 $18 \sim 38$ 、 $5 \sim 50$ 、 $23 \sim 81 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ^[3]。实际接触换热关系并没有精确算法, 为此, 设置不同的接触传热系数值经过多次有限元模拟, 并与现场实际对比, 得到适合实际的接触换热系数。

(4) 矫直过程塑性变形热及摩擦热, 轧件在矫直机中反复弯曲, 会产生塑性变形, 从而产生塑性变形热, 同时钢板与矫直辊之间由于摩擦会产生摩擦热。设塑性变形热转化系数为 0.9, 摩擦热转化系数为 0.9^[2]。

2 模拟结果及分析

2.1 矫直后钢板温度场分析

现场实测数据, 矫直后温度下降 $6 \sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。为研究矫直后钢板各向温度分布状况, 选取如图 2 所示 6 条路径: (1) 中部纵向路径 AA; (2) 距离边部 1/4 板宽处纵向路径 BB; (3) 边部纵向路径 CC; (4) 头部横向路径 DD; (5) 中部横向路径 EE; (6) 尾部横向路径 FF。

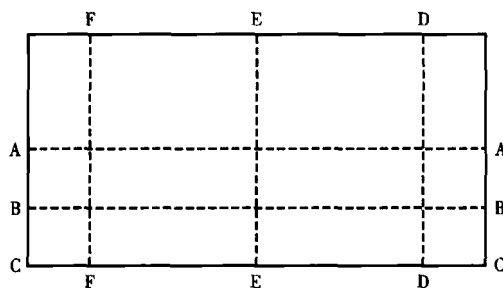


图 2 钢板表面选取的路径位置

Fig. 2 Selected position of paths on plate surface

2.1.1 矫直后钢板纵向温度分布

如图 3(a₁, b₁) 所示, 长度为 0 和 5 m 的地方分别对应矫直完成后轧件的尾部及头部。从图 3(a₁, b₁) 看出, 矫直完成后, 沿钢板板长各路径, 温度呈现增加的趋势, 而在头尾部温度存在起伏。这是因为钢板尾部刚与矫直辊脱离接触, 芯部温度向表面传递时间很短, 温度较低, 而中部及头部出矫直辊的时间相对较早, 芯部向表面传热时间更长, 温度较高, 因此温度呈现增加趋势。而且在轧件头尾部处于轧件边缘, 由于边部换热方式较中部与空气的接触面大, 且尾部刚出矫直辊, 各项因素综合作用, 导致温度分布会表现出一定的波动。

由图 3(a₁, b₁) 还可以看出, 纵向边部路径 CC 温度最低。这是因为边部与环境对流面大, 换热强, 热量散失快, 所以温度相对较低。

2.1.2 矫直后钢板横向温度分布

图 3(a₂, b₂) 为两种厚度的钢板宽度方向上头

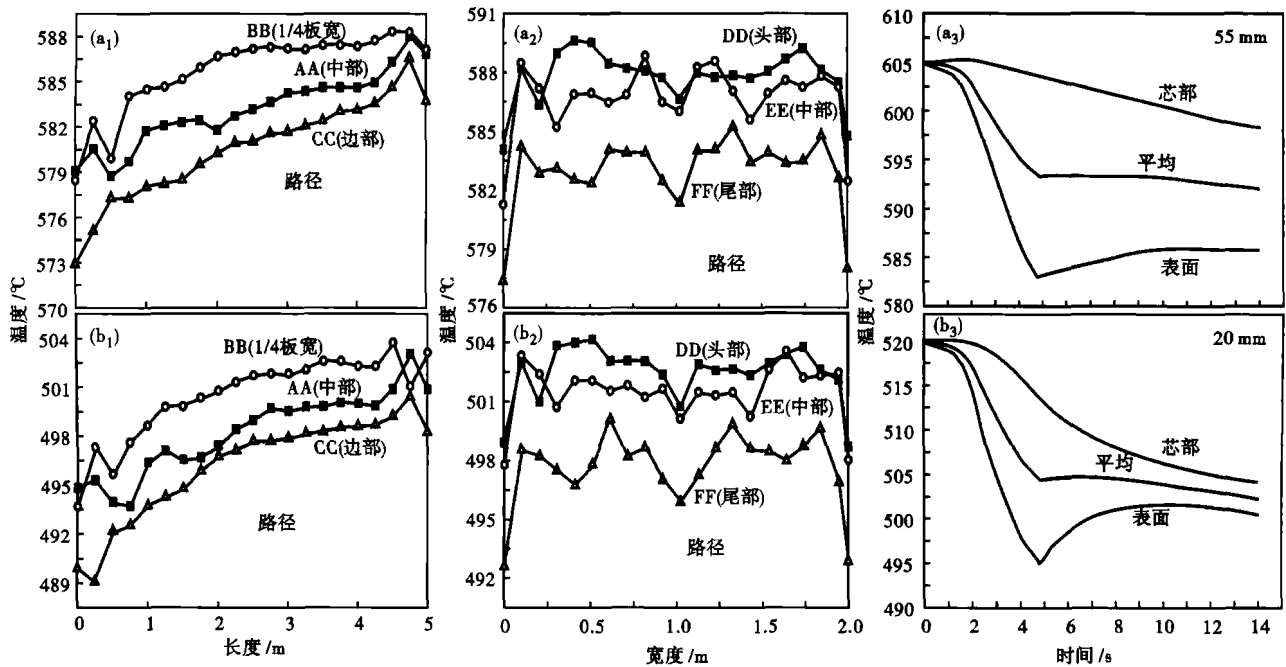


图3 矫直后钢板纵向(a₁, b₁)、横向(a₂, b₂)及表面和芯部(a₃, b₃)温度分布:(a₁, a₂, a₃)55 mm板;(b₁, b₂, b₃)20 mm板
 Fig.3 Distribution of temperature of plate after straightening along longitudinal direction (a₁, b₁), transverse direction (a₂, b₂), and of center and surface of plate (a₃, b₃): (a₁, a₂, a₃) 55 mm plate; (b₁, b₂, b₃) 20 mm plate

部路径DD、中部路径EE及尾部路径FF的温度分布图。

轧件横向温度分布沿板纵向中线呈对称分布,基本呈马鞍型,钢板边部会出现一定程度的温降。从整体上看,两块钢板边部会出现4~7℃的温降,其中,尾部的边部温降在6~7℃,头部的边部温降在4℃左右,可见尾部的边部温降更大,且厚度55 mm的钢板下降4.25~7.3℃,厚度20 mm的钢板下降4.05~5.96℃,可见随着板厚的增加,钢板横向边部温降变大。

可见,钢板矫直过程中,边部温度波动相对较大,容易产生附加的热应力,从而使钢板出现板形缺陷。且厚板温度波动相对更大,造成的热应力也可能更大。

2.1.3 钢板芯部至表面温度梯度

对于热轧钢板来说,由于芯部与表面传热方式的不同导致芯部与表面存在温度梯度,如果矫直后温度梯度仍然较大,会导致厚度方向残余应力过大,重新出现板型缺陷。

选取路径AA与DD的交点为研究对象,研究其表面及芯部温度变化过程。从图3(a₃, b₃)中可以看出,钢板表面温度变化主要经历了3个过程:(1)温度缓慢下降过程;此段参考点未与矫直辊系接触。(2)温度迅速下降过程;此段参考点进入矫直辊系中进行矫直。(3)温度回升过程;此段参考

点离开矫直辊系。而钢板芯部基本呈现一直下降的趋势,且下降趋势比表面慢。

当钢板进入矫直辊系后,虽然发生塑性变形发热和摩擦热会导致温升,但是钢板与矫直辊之间的接触热传导占主导作用,钢板表面温度迅速下降。当钢板出矫直辊系时,钢板表面热量以辐射和传导形式散失。但是由于矫直时钢板表面与矫直辊和空气等外部介质直接接触,热量传递较快,而芯部温度只能通过钢板内部热传导发生变化。所以单位时间钢板表面温降大于钢板芯部温降,使芯部温度高于表面温度。当钢板出矫直辊后,由于芯部向表面传热,致使芯部温度继续下降而表面温度出现回升。

由图3(a₃, b₃)还可以看出,钢板厚度越大,芯部温度下降越慢,芯部与表面温差越大。

2.2 矫直温度场对矫直后残余应力的影响

轧件由于各部塑性变形及温度分布的不均,进而产生压应力或拉应力场即为内应力场,而矫直后轧件仍然存在的内应力即为残余应力。由于轧件本身具有一定的刚性,残余应力的存在并不会立即使带钢发生弯曲,只有当残余应力值超过某一临界值时带钢才会失稳,产生弯曲。

轧件矫直过程沿长度方向的应力值最大,宽度和厚度方向上的应力相对较小,说明矫直过程沿矫直方向的纵向应力占主导地位,应重点考虑^[4-5]。

2.2.1 矫直温度对残余应力的影响

钢板矫直温度对轧件残余应力有潜在影响,从而产生各种板形缺陷。为观察矫直前初始温度的不同对矫直后残余应力的影响,对钢板设定不同的初始温度并通过有限元计算并记录残余应力值(表 1)。

表 1 初始温度对钢板中部纵向平均残余应力的影响
Table 1 Effect of initial straightening temperature of plate on average residual longitudinal-stress in middle of plate

20 mm 板		55 mm 板	
温度/℃	残余应力/MPa	温度/℃	残余应力/MPa
420	16.46	505	54.83
520	16.37	605	38.09
620	10.97	705	33.74

两种厚度的钢板均呈现出以下规律:初始矫直温度越高,纵向平均残余应力值相对较小,而低温矫直时平均残余应力较大。这是因为随着温度增加,材料的变形抗力逐渐减小,轧件变形更加容易,轧件内部应力的不均匀性减小,故残余应力降低^[6]。

2.2.2 原始曲率对残余应力的影响

中厚板轧后的原始曲率一般是控冷后的钢板各部分的温度不均造成的,不同的原始曲率,说明了矫直前钢板各部存在着不同的温度场。钢板原始曲率越大,钢板弯曲程度越大。原始曲率的不同将直接影响矫直过程塑性变形程度,从而影响轧件矫直后残余应力的大小。

为观察不同原始曲率度对矫直后残余应力的影响,对钢板设定不同的原始曲率,通过有限元计算并记录残余应力值,其矫直后不同原始曲率下的纵向平均残余应力值如表 2 所示。

表 2 原始曲率对钢板纵向平均残余应力的影响 /MPa
Table 2 Effect of initial curvature of plate on average residual longitudinal-stress in plate /MPa

原始曲率	20 mm 板	55 mm 板
0.067	16.37	30.58
0.1	18.98	32.93
0.2	23.95	37.87

两种厚度的钢板均随着原始曲率的增大,纵向平均残余应力值呈现增加的趋势。这是因为原始曲率越大,钢板弯曲程度越大,矫直时需要更大的反弯曲率将钢板矫直,钢板反复弯曲程度变大,会导致弯曲力矩越大,进而使塑性变形层深度增加,即塑性变形程度增大,从而导致矫直后残余应力增大。

由表 2 还可以看出,对于厚板,轧件残余应力值更大,这可能是由于随着轧件厚度的增加,矫直力增

大,导致矫直完成后残余应力值增大。可以通过适当提高矫直温度以及轧制时采用板形控制技术减小原始曲率等方法来减小矫直后残余应力,减少矫直后发生二次弯曲的几率,从而达到改善板形的目的。

2.3 温度场模拟计算值与现场实测值的对比验证

由表 3 可见,有限元模拟值与现场实测值较为接近,说明所建立的矫直过程有限元模型能够较为准确的反映现场实际矫直过程温度场分布。

表 3 钢板矫直温度和矫直力实测值与模拟值对比
Table 3 Comparison of straightening temperature of plate and straightening force between simulated and measured value

厚度/mm	矫直前实测/℃	矫直后/℃		上排辊整体矫直力/kN		误差/%
		实测	有限元模拟	实测	有限元模拟	
20	520	507	505.4	2 272.93	2 161.69	4.89
55	605	591	589.3	4 397.94	4 565.49	3.81

3 结论

(1)在给定的工艺条件下,矫直后钢板自尾向头纵向温度有个升高过程,钢板横截面温度边部下降较快,钢板芯部至表面存在不同扩散速率,温度场的不均匀性厚规格较薄规格要明显,这些现象势必会影响到钢板矫直后的板型。

(2)随着钢板矫直前初始温度的降低以及原始曲率的增大,矫直后纵向残余应力呈现增加趋势,其中,厚规格的残余应力值更大。

(3)建立的有限元模型能较为准确的反映中厚板矫直过程温度场分布。

参考文献

- [1] 叶立勇. 超低碳钢热轧变形规律有限元模拟[D]. 武汉:武汉科技大学,2009.
- [2] 张春林. 中厚板矫直模拟以及工艺优化[D]. 武汉:武汉大学,2011.
- [3] 叶宁夫. 中厚板矫直及矫直辊热力耦合数值模拟研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2011.
- [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[J]. 重型机械,2005(2):21-24.
- [5] 龚本月,王志刚,李友荣,等. 中厚板矫直残余应力仿真[J]. 塑性工程学报,2010,17(6):117-120.
- [6] 李连进,王惠斌. 无缝钢管的矫直残余应力与压下量和温度的关系研究[J]. 钢管,2009,38(4):18-21.

刘 炼(1987-),男,硕士研究生,塑性成形工艺优化和计算机模拟。

收稿日期:2012-09-25