

高速线材轧制全程温度曲线有限元模拟

邱全康^{1,2)}✉, 王福明¹⁾, 王晓晨²⁾, 杨子森²⁾, 邓素怀²⁾, 郑福印²⁾

1) 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083 2) 首钢技术研究院, 北京 100043
✉ 通信作者, E-mail: diquankang@shougang.com.cn

摘要 采用 Deform 模拟计算加热炉铸坯温度分布, 并通过“黑匣子”试验验证, 当加热时间为 70 min 时, 铸坯心部与表面温差约 66 °C, 80 min 时降到 15 °C。模拟计算轧制和水冷过程心部和表面温度曲线, 并通过测温仪验证, 得出准确的摩擦热、塑性变形热以及水冷换热系数模型。采用 Fluent 模拟计算风机的风场, 使用手持测风仪验证, 再建立盘条搭接点温度模型, 计算出风冷线上强迫对流换热、自然换热和辐射换热系数以及相变潜热, 使用热成像仪测温验证。模拟与试验结果十分吻合。

关键词 线材; 轧制; 温度; 数值模拟; 有限元法
分类号 TG335.6

Finite element simulation of the temperature curve of wire rods during the whole process of rolling

DI Quan-kang^{1,2)}✉, WANG Fu-min¹⁾, WANG Xiao-chen²⁾, YANG Zi-sen²⁾, DENG Su-huai²⁾, ZHENG Fu-yin²⁾

1) School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2) Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100043, China
✉ Corresponding author, E-mail: diquankang@shougang.com.cn

ABSTRACT The temperature distribution of billets in a heating furnace is simulated by Deform software and is verified by the “black box”. When the heating time is 70 min the temperature difference between surface and center is about 66 °C, but it reduces to 15 °C after 80 min. The core and surface temperatures of wire rods in rolling and cooling are calculated and testified by thermometric indicator, and afterwards, the accurate friction heat, plastic deformation heat and heat transfer coefficient of water cooling are obtained. The wind field of fans is computed by Fluent software and is confirmed by anemometer. A temperature model of the lapping point is built and used to calculate the forced convection, natural and radiation heat transfer coefficients and the latent heat of phase transformation on the air-cooling line, which are validated by thermal imager. All the numerical simulation results agree well with the test data.

KEY WORDS wire rods; rolling; temperature; numerical simulation; finite element method

对于高速线材轧制过程的局部温度场模型已有相关研究, 但缺乏系统性、整体性与准确性^[1-4]。本文通过 Deform、Fluent 等有限元软件模拟计算了 $\phi 5.5$ mm 高碳硬线钢在加热、变形、水冷和风冷全程的心部和表面温度曲线, 并进行了现场的试验校正。模拟计算与试验结果十分吻合。本研究可为优化线材轧制工艺参数、开发在线温度闭环控制系统、开发在线组织性能预

报系统以及新产线布局设计等提供重要的技术依据。

1 各阶段温度场有限元模型的建立

本文研究依托首钢某高速线材轧线, 其布局如图 1 所示。轧制流程为 160 mm × 160 mm 方坯 → 步进式加热炉 → 高压水除鳞 → 6 架粗轧机组 → 8 架中轧机组 → 4 架预精轧机组 → 两段水冷 → 10 架精轧机组 → 五段水

冷→吐丝→风冷线. 本文分别建立各阶段的温度场有限元模型.

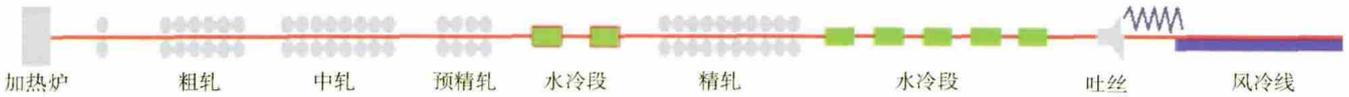


图1 高速线材产线布局

Fig.1 Layout of the high speed wire rod production line

1.1 加热阶段传热边界条件

基本传热方程^[5]:

$$\rho \cdot c_p \frac{\partial}{\partial t} [T(x, y, t)] = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \frac{\partial T(x, y, t)}{\partial y} \right]. \quad (1)$$

式中 ρ 为钢坯密度, c_p 为钢坯的比热, k 为热传导系数, x 为方坯长度, y 为方坯宽度, $T(x, y, t)$ 为钢坯 (x, y) 点在 t 时刻的温度.

方坯上表面:

$$k \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = \varepsilon \sigma [T_a^4 - T^4(0, t)] + H_a [T_a - T(0, t)]. \quad (2)$$

式中 k 为热传导系数, ε 为材料的辐射系数, σ 为波尔兹曼常数, T_a 为空气介质温度, H_a 为空气焓值.

方坯下表面分散着与步进支撑梁接触, 考虑钢坯对支撑梁的传热.

1.2 轧制和水冷阶段边界条件

1.2.1 轧制温升模型

轧件在变性区中塑性变形热和轧辊与坯料间摩擦发热都会导致轧制温升, 塑性功热流强度由下式确定:

$$q = \frac{K_m II \ln \frac{\bar{l}_1}{\bar{l}_0} \times 10^6}{427 \bar{W}_1} \cdot \eta. \quad (3)$$

式中 K_m 为金属变形抗力, \bar{W} 和 \bar{l}_1 分别为轧件变形前宽度和高度, \bar{l}_0 为轧件变形后高度, II 为轧件横截面面积, η 为功热转换系数(本文取 0.8).

轧辊和坯料之间有摩擦生热和接触换热, 其边界条件可表示为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h_{com} (T_s - T_r) - \tau A_c |\Delta v| \delta t. \quad (4)$$

式中 h_{com} 为轧件与轧辊接触换热系数, T_s 为轧件表面温度, T_r 为轧辊表面温度, τ 为摩擦应力, A_c 为接触面积, Δv 为相对滑速, n 为差分计算步数, δt 为接触时间.

1.2.2 空冷换热系数

轧件在辊道或机架间运行, 发生辐射和对流热交换. 根据大量数据回归, 得出综合热交换系数:

$$h_a = 2.25 (T_s - T_a)^{0.25} + \frac{\sigma \varepsilon (T_s^4 - T_a^4)}{T_s - T_a}. \quad (5)$$

式中: T_s 为轧件表面温度; T_a 为空气温度; σ 为波尔兹曼常数; ε 为材料的辐射系数, 取 0.7.

1.2.3 水冷换热系数

在冷却器穿水过程中, 形成两种不同的对流换热情形, 即在水中和水蒸气中冷却, 属于第三类边界条件. 水冷综合换热系数 h_w 由辐射换热系数 h_r 和对流换热系数 h_c 两个部分组成:

$$h_w = h_r + h_c = \delta \varepsilon \frac{\left(\frac{T_s + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100}\right)^4}{T_s - T_a} + 0.62 \left[\frac{H_{v1} (\rho_l - \rho_v) \lambda_v^3}{(t_s - t_{sat}) U_v D} \right]^{0.25}, \quad (6)$$

$$H_{v1} = (-2576.57 t_f + 32.11 \times 10^5) \cdot \left[1 + \frac{0.4 a c_{pv} (T_s - T_{sat})}{H_v} \right]^2. \quad (7)$$

式中 H_{v1} 为有效水蒸气热, ρ_l 为水密度, ρ_v 为水蒸气密度, λ_v 为水蒸气导热系数, T_{sat} 为水蒸气饱和温度, U_v 为水蒸气黏度, D 为线材直径, H_v 为水汽化热, c_{pv} 为水蒸气比热容, t_s 为冷却水的起始时间, t_{sat} 为水蒸气起始时间, t_f 为冷却水的终了时间.

1.3 风冷阶段数学模型及边界条件

1.3.1 风冷线上盘条堆积几何模型

盘条在风冷线上堆积几何模型如图 2 所示, 其堆积疏密程度取决于规格和辊速. 设 x 为辊道前进方向, y 为垂直于辊道向上方向, z 为平行于传送辊方向. 于是 $x-y$ 面为沿辊速方向穿过风冷线中心的纵截面, $y-z$ 面为垂直于辊速方向的横截面^[6-8].

盘条每圈间距:

$$\Delta x = \frac{\pi d_1 u}{V}. \quad (8)$$

堆叠高度:

$$l = \frac{d_1 d_w}{\Delta x} = \frac{d_w V}{\pi u}. \quad (9)$$

每圈垂直距离:

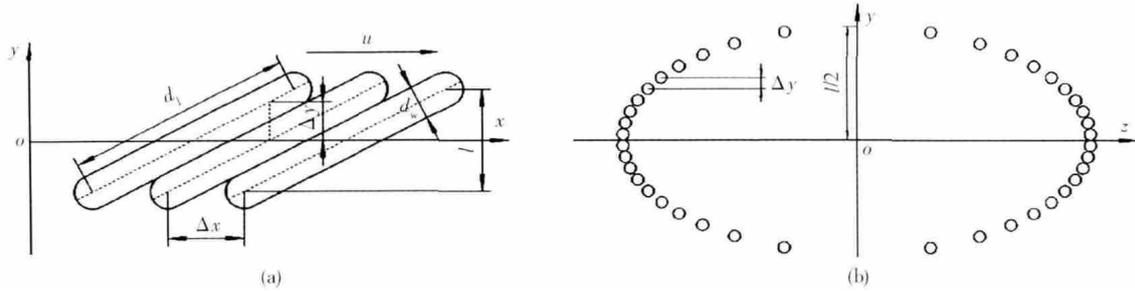
$$\Delta y = \left[\frac{1}{(d_w)^2} - \frac{1}{(\Delta x)^2} \right]^{-0.5}. \quad (10)$$

1.3.2 风冷换热系数

风冷线上包含三种传热, 即强迫对流换热、自然换热和辐射换热. 强迫对流换热系数 h_{fe} 计算公式为

$$h_{fe} = \frac{\lambda_a Nu_{fe}}{0.5 \pi d_w} = \frac{\lambda_a [0.3 + (Nu_{lam}^2 + Nu_{turb}^2)^{0.5}]}{0.5 \pi d_w}, \quad (11)$$

$$Nu_{lam} = 0.664 Re^{0.5} Pr^{0.33} = 0.664 \left(\frac{0.5 u \pi d_w}{\psi v} \right)^{0.5} \left(\frac{v}{\alpha} \right)^{0.33}, \quad (12)$$



d_1 —一圈直径 d_w —盘条直径 μ —转速 Δx —每圈间距 l —堆叠高度 Δy —每圈竖直距离 V —立方体体积

图 2 盘条堆积模型. (a) $x-y$ 面; (b) $y-z$ 面

Fig. 2 Wire rod packing model: (a) $x-y$; (b) $y-z$

$$Nu_{turb} = \frac{0.037Re^{0.8}Pr}{1 + 2.443Re^{-0.1}(Pr^{0.67} - 1)} = \frac{0.037 \left(\frac{0.5u\pi d_w}{\psi v} \right)^{0.8} \frac{v}{\alpha}}{1 + 2.443 \left(\frac{0.5u\pi d_w}{\psi v} \right)^{-0.1} \left[\left(\frac{v}{\alpha} \right)^{0.67} - 1 \right]} \quad (13)$$

式中: Nu_{ic} 为强迫对流换热努赛尔数; λ_a 为空气导热系数; v 为运动黏度; α 为热扩散系数; Nu_{lam} 和 Nu_{turb} 分别为层流和湍流换热努赛尔数; Re 为雷诺数; Pr 普朗特数; u 为风速; ψ 为几何特征参数, 将每圈盘条视作很短的圆柱体; V_{free} 为立方体阴影部分的体积; V 为立方体体积.

$$\psi = \frac{V_{free}}{V} = 1 - \frac{\pi d_w}{4 \Delta z} \left(1 + \frac{\Delta y}{d_w} \right)^{-1} \quad (14)$$

自然换热的努赛尔数由下式计算:

$$Nu_{nc} = 1.18(0.71Gr)^{0.125} = 1.18 \left(0.71 \frac{a_v \Delta T_c^3}{v^2} \right)^{0.125} \quad (15)$$

式中 Gr 为格拉晓夫数 a_v 为体积变化系数 l_c 为特征尺寸 $l_c = 2.636 \times 10^{-3} \Delta x^{-0.791}$.

辐射换热系数采用黑体辐射公式计算:

$$h_r = \frac{\varepsilon \sigma \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right]}{T_w - T_0} \quad (16)$$

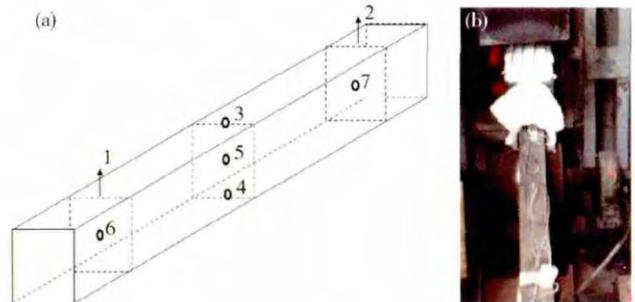
式中 h_r 为辐射换热系数 ε 为辐射系数 σ 为波尔兹曼常数 T_w 为某平面温度 T_0 为初始温度.

2 试验验证方法

采用“黑匣子”试验验证加热阶段模拟结果并修正.“黑匣子”型号为 SMT-7-32-1250-K, 分辨率 0.5°C , 测量精度 0.5% , 通道数 7, 采样周期每 8 秒 1 次.“黑匣子”热电偶测试点位置及入炉照片如图 3 所示.

通过手持测温仪测定不同轧制道次间、水冷前后轧件的表面温度验证模拟计算结果, 修正摩擦热、塑性变形热以及水冷换热系数模型.

通过手持测风仪验证风冷线上盘条搭接点和非搭接点的风场模型模拟结果并修正, 再通过红外热成像



1—炉气头部 2—炉气尾部 3—钢坯中部上表面 4—钢坯中部下表面 5—钢坯中部中心 6—钢坯头部中心 7—钢坯尾部中心

图 3 “黑匣子”试验. (a) 钢坯测试位置; (b) “黑匣子”入加热炉

Fig. 3 “Black box” experiment: (a) testing positions; (b) “black box” into the heating furnace

仪测定风冷线上盘条搭接点的温度曲线, 与模拟计算结果对比并修正.

3 模拟结果与验证分析

3.1 加热阶段模拟结果与验证

加热炉里钢坯上、下表面和心部温度场及曲线模拟结果如图 4 所示, 由于钢坯的下表面与步进支撑梁分散接触, 存在传热, 其温度显著低于上表面, 与中心温度基本一致.

从图 5 “黑匣子”热电偶传感器采集的温度数据可以看出: 加热炉头、尾两侧炉气的温度显著高于铸坯的温度; 钢坯上表面比中心温度高, 下表面温度较低; 钢坯头、中、尾部的中心温度基本一致; 心部和表面最大温差出现在入炉 7~8 min 处, 约 260°C , 70 min 时温差约 66°C , 80 min 时降到 15°C . 制定加热时间为 80 min 是最佳的, 既可以保证心部和表面温度均匀又减少燃烧损耗. 模拟结果与黑匣子验证试验结果基本一致.

3.2 轧制和水冷阶段模拟结果与验证

结合轧机和水冷段实际布置间距, 分别对建模时所采集的轧件同一横截面上的 3 个不同位置点进行温度轨迹跟踪, 3 个位置分别为表面、1/4 处以及中心位置, 最后将获得的温度轨迹汇总后绘制成为连续曲线,

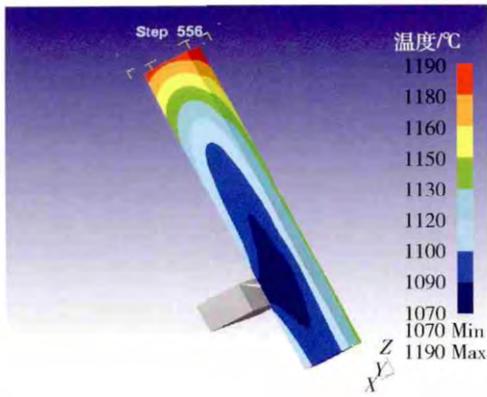


图4 模拟计算加热炉中铸坯的心部和表面温度曲线

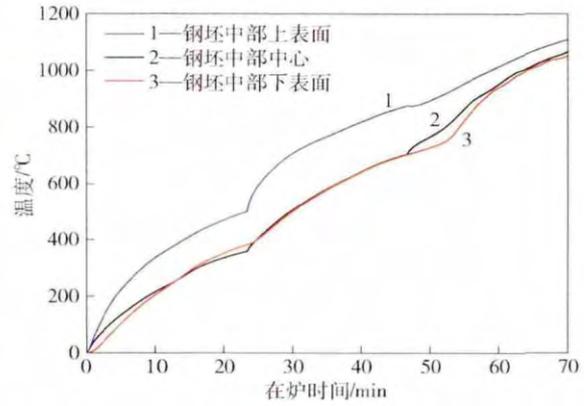


Fig. 4 Surface and center temperature curves of the billet in the heating furnace by simulation

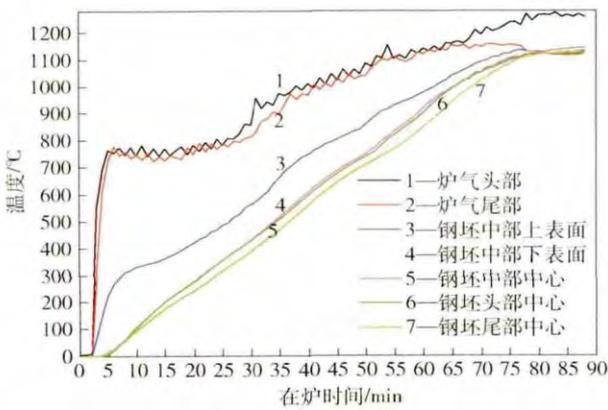


图5 黑匣子测试的铸坯心部和表面温度曲线

Fig. 5 Surface and center temperature curves of the billet in the heating furnace by "Black box" measurements

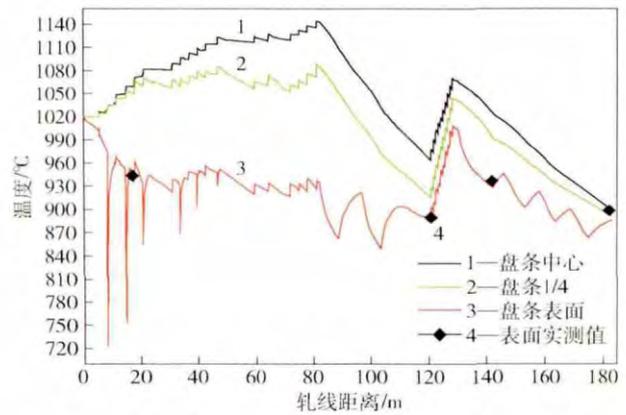


图6 盘条轧制和水冷过程心部和表面温度曲线

Fig. 6 Surface and center temperature curves of the wire rod in rolling and cooling

如图6所示。

采用手持测温仪测定中轧入口前、2段预水冷后、精轧后第1段水冷后和吐丝的轧件表面温度,以此校正模拟计算结果。经过多次修正,模拟计算结果能够很好地吻合实际情况。可以看出,6道次粗轧心部累计温升约50℃,8道次中轧心部累计温升约50℃,4道次预精轧心部累计温升约20℃,2段预水冷使得心部降温约160℃,10道次精轧心部累计温升约100℃,5段水冷使得心部降温约180℃。预精轧结束时心部和表面温差最大,为186℃。吐丝时,心部和表面温差约

10℃。

3.3 风冷阶段模拟结果与验证

该风机总宽度是4.5m,含22个出风口,该风机在最大功率下的风量为154000 m³·h⁻¹,通过调节风机功率的大小,可以产生不同的风量。图7(a)为以风机功率为50%、风门开度100%、佳灵角度10°时Fluent软件模拟的风场云图,风速曲线如图7(b)所示。风速呈中间高、两边低分布,中间最高冷速为24 m·s⁻¹,两边最低为11 m·s⁻¹。

采用手持测风仪现场测定校正仿真结果。图8

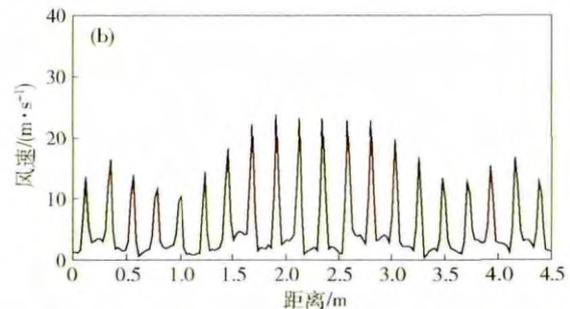
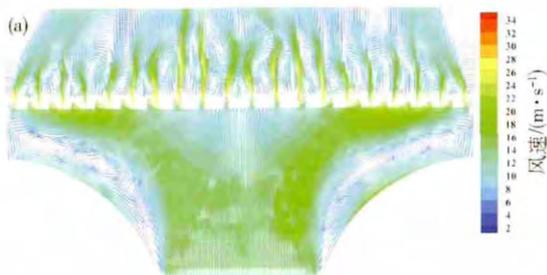


图7 风量50%、风门开度100%时的风场云图和风速曲线。(a)风场云图;(b)风速曲线

Fig. 7 Wind field nephogram and speed at a 50% air volume and a 100% damper degree: (a) wind field nephogram; (b) wind speed curve

设定风门开度为 100% 不变, 调节变频风机的功率到 50%、80% 和 100%, 测定 3# 风机 22 个出风口的冷速, 风量 80% 和 100% 时冷速大约是风量 50% 时的 1.6 倍和 2 倍, 冷速和风量近乎线性关系, 且 22 个风口从左至右排列呈现出中间高、两边低分布, 当风量为 50% 时, 中间最高冷速为 $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 两边最低冷速为 $11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 这与图 7 中 Fluent 模拟计算结果完全一致。

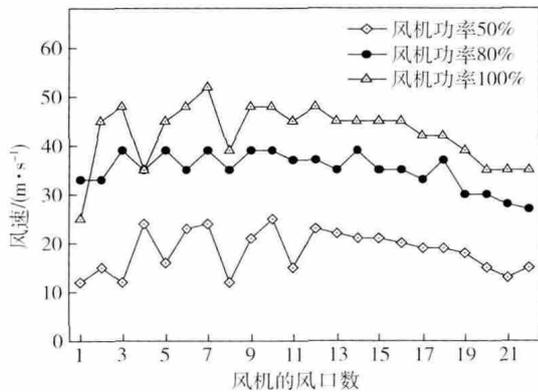


图 8 测风仪测定风速与风量的关系

Fig. 8 Relationship between wind speed and volume measured by anemometer

将风冷线上的盘条堆积模型放入风场模型, 便可求出每个搭接点周围的风场, 如图 9 所示. 盘条搭接点的疏密程度由辊道速度决定, 辊道速度越快, 盘条间距越大, 风速越高. 辊道速度 $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时搭接点风速为 $5.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 辊道速度 $1.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时搭接点风速为 $25.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

结合盘条堆积模型和盘条搭接点风场模型, 求出不同辊道速度下搭接点的换热系数, 如表 1 所示.

此外, 在风冷线上, 线材发生相变, 释放热量, 必须考虑相变潜热, 相变潜热 Q_c 可以下式计算^[9]:

$$Q_c = \Delta H \frac{f_{t+1} - f_t}{\Delta t} = \Delta H \Delta f \quad (17)$$

式中: f_t 为 t 时刻奥氏体转变为珠光体的体积分数; f_{t+1} 为 $t+1$ 时刻奥氏体转变为珠光体的而体积分数; Δt 为时间增量 s ; ΔH 为奥氏体转变为各组织时的热焓值, $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$.

按照 Scheil 等温孕育期可叠加原理^[10-11] 编程计算相变开始温度, 相变开始条件是:

$$\sum \frac{\Delta t_i}{t_i} = 1. \quad (18)$$

式中: Δt_i 为计算中的时间间隔 s ; t_i 为不同温度时的相

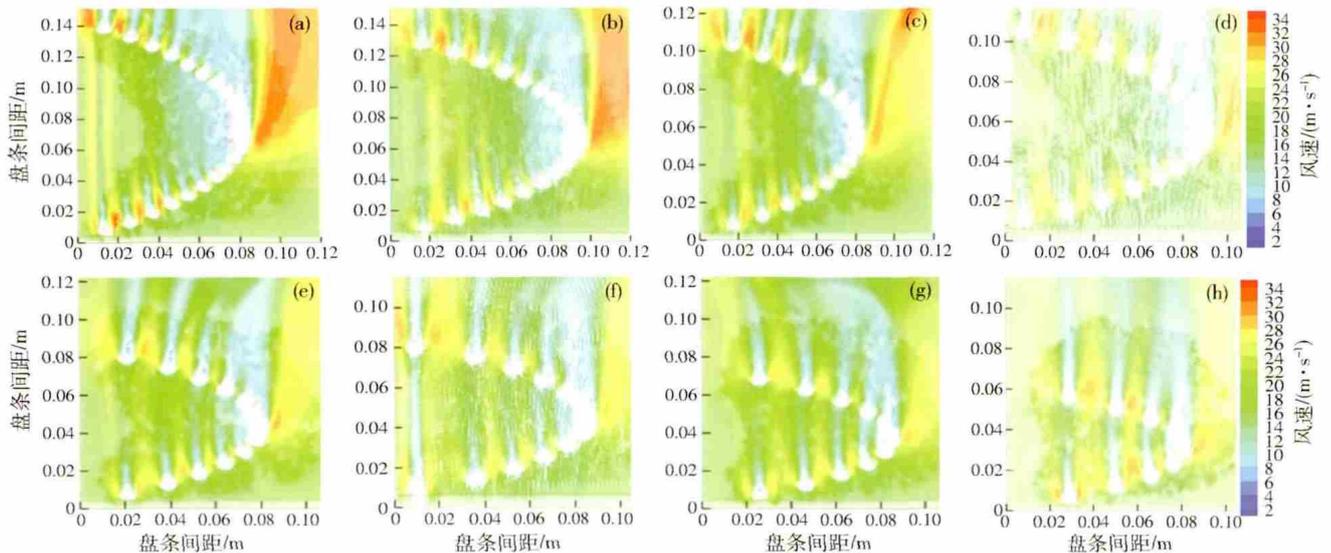


图 9 不同辊道速度下盘条搭接点风场. (a) $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $0.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $0.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (e) $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (f) $1.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (g) $1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (h) $1.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 9 Wind field of the lap point: (a) $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $0.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $0.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (e) $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (f) $1.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (g) $1.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (h) $1.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

表 1 不同辊道速度下搭接点的换热系数计算结果

Table 1 Calculation results of the heat transfer coefficient of the wire lap point at different roller speeds

辊道速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	搭接点风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	ψ	Re	Nu_{urb}	Nu_{fc}	Gr	Nu_{nc}	$a_{\text{com}}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{C}^{-1})$
0.6	5.8	0.42	7523	41.7	66.5	18153532	9.1	227.8
0.8	12.4	0.72	9472	49.9	76.6	18153532	9.1	255.8
1.0	16.9	0.82	11280	57.1	85.3	9172369	8.4	280.5
1.2	23.5	0.87	14754	70.3	100.9	5401496	7.8	326.4
1.4	25.6	0.90	15644	73.6	104.8	2430817	7.1	336.9

变孕育期 s 。

模拟计算可得, 线材可获得能够提高约 127 °C 的相变潜热。相变潜热是在相变过程中逐渐释放的, 相变开始温度约 630 °C, 相变开始到结束时间约 6.75 s, 相变潜热导致盘条平均升温速度约 15.2 °C · s⁻¹。

图 10(a) 中模拟计算的搭接点温度曲线与手持测温仪(1#~6# 风机尾部测温) 吻合较好; 图 10(b) 和(c) 采用热成像仪测定风冷线上搭接点的相变过程温度曲线, 相变前最低温度为 609 °C, 最高点温度为 645 °C, 模拟计算的搭接点温度曲线与之基本吻合。

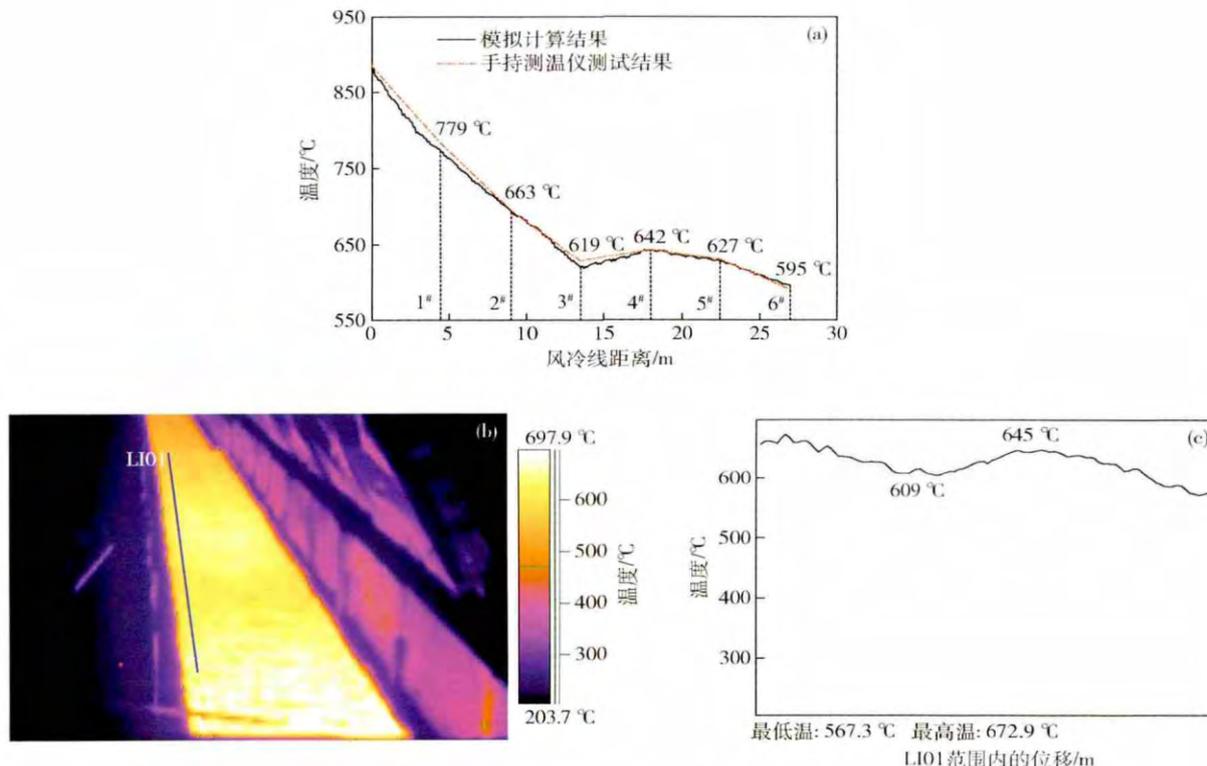


图 10 搭接点风冷及相变曲线。(a) 模拟和测温仪测验结果; (b) 热成像仪测试; (c) 热成像仪测试相变过程温度曲线
 Fig. 10 Temperature curves of the lap joint: (a) result by simulation and instrument; (b) imaging test; (c) temperature by imaging instrument

4 结论

(1) 通过仿真模拟建立了线材加热、轧制、水冷和风冷全程温度曲线, 并完成现场试验验证与修正, 得出准确的换热系数与温度曲线模型。

(2) 钢坯加热过程中, 上表面比中心温度高, 下表面与中心温度基本一致; 钢坯头、中、尾部的中心温度基本一致; 心部和表面最大温差出现在入炉 7~8 min 处, 约 260 °C, 70 min 时温差约 66 °C, 80 min 时降到 15 °C, 制定此加热炉加热时间为 80 min 是最佳的。

(3) 在轧制过程中, 6 道次粗轧心部累计温升约 50 °C, 8 道次中轧心部累计温升约 50 °C, 4 道次预精轧心部累计温升约 20 °C, 精轧前 2 段预水冷使得心部降温约 160 °C, 10 道次精轧心部累计温升约 100 °C, 吐丝前 4 段水冷心部降温约 180 °C, 预精轧结束时心部和表面温差最大, 为 186 °C, 吐丝时, 心部和表面温差约 10 °C。

(4) 风冷线上, 风量 80% 和 100% 时的风速大约是风量 50% 的 1.6 倍和 2 倍, 冷速和风量近乎线性关

系。相变开始温度约为 630 °C, 相变开始于 4# 风机头部, 整个相变时间约 6.75 s, 相变潜热平均升温速度约 15.2 °C · s⁻¹。

参 考 文 献

[1] Yu W H, Du Y B, Qin J F, et al. Development of a thermal and phase transformation coupled model for the fan cooling stage of the Stelmor rod production line. *Trans Mater Heat Treat*, 2007, 28(2): 20
 (余万华, 杜雁冰, 卿俊峰, 等. 高速线材风冷段温度及相变耦合模型开发. *材料热处理学报*, 2007, 28(2): 20)

[2] Zhang Y X, Zhang H O, Wang G L, et al. Prediction for microstructure and mechanical properties of hot rolled high carbon steel wire. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2009, 31(3): 312
 (张云祥, 张海鸥, 王桂兰, 等. 热轧高碳钢线材组织性能预报系统. *北京科技大学学报*, 2009, 31(3): 312)

[3] Lindemann A, Schmidt J. Numerical simulation and infrared-thermographic measurement of the cooling of wire rod. *Heat Transfer*, 2002, 4: 735

[4] Han S H, Chang D, Kim C Y. A numerical analysis of slab heating characteristics in a walking beam type reheating furnace. *Int J*

- Heat Mass Transfer*, 2010, 53(19): 32
- [5] Serajzadeh S. Modelling of temperature history and phase transformations during cooling of steel. *J Mater Process Technol*, 2004, 146(3): 311
- [6] Shujia S Z, Yilbas B S, Khan S A. Flow emerging from annular conical nozzle combinations and impinging onto a cylindrical cavity. *Int J Thermal Sci*, 2006, 48(5): 158
- [7] Lindemann A, Schmidt J. ACMOD-2D-A heat transfer model for the simulation of the cooling of wire rod. *J Mater Process Technol*, 2005, 169(3): 466
- [8] Nallathambi A K, Specht E. Estimation of heat flux in array of jets quenching using experimental and inverse finite element method. *J Mater Process Technol*, 2009, 209(12-13): 5325
- [9] Serajzadeh S. A study on kinetics of static and metadynamic recrystallization during hot rolling. *Mater Sci Eng A*, 2007, 448(1-2): 146
- [10] Kim H K, Oh S I. Evaluation of heat transfer coefficient during heat treatment by inverse analysis. *J Mater Process Technol*, 2001, 112(2-3): 157
- [11] Karimi H J, Saidi M H. Heat transfer and energy analysis of a pusher type reheating furnace using oxygen enhanced air for combustion. *J Iron Steel Res Int*, 2010, 17(4): 12