

· 试验研究 ·

## 高碳钢线材轧后水冷换热过程的有限差分模拟

张云祥<sup>1</sup> 杜涛<sup>1</sup> 叶欢<sup>1</sup> 汤小秒<sup>1</sup> 褚双学<sup>2</sup> 欧阳标<sup>2</sup>

(1 武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081; 2 武钢钢铁(集团)有限公司, 武汉 430083)

**摘要** 根据 82B 和 72A 钢  $\Phi 5.5 \sim 12.5$  mm 高速线材轧后水冷传热特点, 将水冷过程分成 3 个区域, 并在水冷箱区域中根据环形喷嘴的开关状态, 分别采用了水对流换热和水蒸气对流换热两种形式传热模型, 建立了水冷过程按喷嘴个数分段处理的边界条件, 通过有限差分模拟得出轧后水冷系统中线材断面的温度分布。通过实测温度值校正高碳钢线材水冷过程中水的对流换热系数, 模拟结果表明, 精轧机入口和吐丝机的预报和实测线材表面温度均值的绝对误差在  $\pm 20$  °C 以内。

**关键词** 高碳钢 高速轧制 线材 水冷 有限差分模拟

## Finite Difference Simulation on Water Cooling Heat Exchanging Process of High Carbon Steel Wire Rods after Rolling

Zhang Yunxiang<sup>1</sup>, Du Tao<sup>1</sup>, Ye Huan<sup>1</sup>, Tang Xiaomiao<sup>1</sup>, Chu Shuangxue<sup>2</sup> and Ou Yangbiao<sup>2</sup>

(1 College of Materials Science and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Wuhan Iron and Steel (Group) Co, Wuhan 430083)

**Abstract** Based on the characteristics of water cooling heat transfer of steel 82B and 72A  $\Phi 5.5 \sim 12.5$  mm high speed rolled wire rods after rolling, with dividing water cooling process to 3 zones and according to open/close state of circle water nozzles, the boundary conditions according to nozzle number to deal with water cooling process in zones have been established by using two heat transfer models of water forced convection and water vapor convection heat transfer, and the temperature distribution of wire rod cross section after rolling in water cooling system is obtained by finite difference simulation. With real measured temperature value to correct the convection heat-transfer coefficient of water in water cooling process of high carbon steel wire rods, the simulation results show that the absolute error of average value between predicted and measured wire rods surface temperature at inlet of finishing rolling mill and at wire nozzle is within  $\pm 20$  °C.

**Material Index** High Carbon Steel, High Speed Rolling, Wire Rod, Water Cooling, Finite Difference Simulation

高碳钢线材的吐丝温度对线材质量有直接影响<sup>[1,2]</sup>。目前棒线材轧后水冷过程断面温度场计算中, 水冷箱内的强迫对流热交换系数作为边界条件的一个重要参数得到了广泛的研究<sup>[3,4]</sup>, 在穿水冷过程中采用单一的对流热交换边界条件<sup>[5,6]</sup>。本文根据水冷箱中若干个喷嘴的开关状态对水冷过程进行分段处理, 建立起符合生产实际的水冷过程换热边界条件, 并进行有限差分模拟。

### 1 轧后水冷传热特点

82B 线材化学成分 (%) 为: 0.82C、0.21Si、0.74Mn、0.016P、0.003S、0.016Cu、0.174Cr、0.018Ni。方坯断面尺寸 200 mm × 200 mm, 配置 6 机架粗轧机, 平立交替布置。10 个中轧机架, 水平布置。4 个预精轧机架平立交替布置。预精轧后有 2 个水冷箱, 后接 10 个机架精轧机组。精轧机后

配置 5 个水冷箱, 经过恢复段到达吐丝机。对于成品直径为  $\Phi 8$ 、10、12.5 mm 的线材在入精轧机前钢坯直径都为  $\Phi 20$  mm, 而直径为  $\Phi 5.5$  mm 的线材入精轧前钢坯直径为  $\Phi 17$  mm。

在精轧轧后水冷段 42.5 m 的长度范围内设置有 3~7 个水冷箱, 把轧后水冷段分为 3 种基本区段 (图 1)。各区段的传热特点如下:

区 1 从精轧机组的最后一个轧机到第 1 个水冷箱, 长度为 1 100 mm, 其传热机制为线材表面与周围介质的辐射传热。

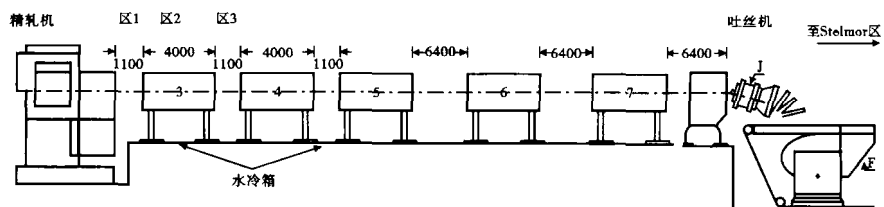


图 1 精轧轧后水冷系统示意图

Fig. 1 Schematics of water cooling system following finishing mill

区 2 为水冷箱(5 个)区域,长 4 000 mm,水冷箱沿轧制线分布 3 个规格一致的环形喷嘴,传热机制为强迫对流和线材表面上的水蒸气膜辐射传热。

区 3 为两个水冷箱之间的区域,长 1 100 mm 或 6 400 mm,主要作用是通过与周围环境的自由辐射,来平衡线材芯部和表面的温度。由于线材速度高,表面有水蒸气膜存在,因其传热机制仍为液气混合物的运动所造成的对流和水蒸气膜的辐射。

线材在水冷阶段横截面是圆形,热传导的基本方程为 Fourier 导热微分方程,对于轴对称无内热源的线材,导热微分方程为式(1),其中  $q_v = 0$ 。中心轴对称的温度计算初始条件为式(2)。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\lambda \partial T}{r \partial r} + q_v \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad r = 0, t = t^* \quad (2)$$

式中:  $T$ - 线材温度/°C;  $C_p$ - 材料的比热容/[J · (kg · °C)<sup>-1</sup>];  $\lambda$ - 材料的导热系数/[W · (m · °C)<sup>-1</sup>];  $r$ - 线材中心到表面的任何位置,  $0 \leq r \leq D/2$ ,  $D$  为线材直径/m;  $t$ - 线材出精轧后运行时间/s。

## 2 轧后水冷边界条件的建立

### 2.1 精轧机出口到水冷箱之间(区 1)

精轧机出口到水冷箱之间主要考虑辐射。非稳态热传导基本方程式(1)中共析钢比热容  $C_p$  和导热系数  $\lambda$  采用与温度相关的计算式<sup>[7]</sup>:  $\lambda = 0.025 T - 26.08$  W/(m · °C);  $C_p = 9.64 T - 9990$  J/(kg · °C)。式(1)结合初始条件式(3)和边界条件式(4)可计算区段 1 任何时刻和位置的线材温度。

$$T = T_s \quad r = r_i, t = 0 \quad (3)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = h_r (T_s - T_a) \quad r = R, t = t^* \quad (4)$$

$$h_r = \sigma \varepsilon \frac{\left(\frac{T_s + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100}\right)^4}{(T_s - T_a)} \quad (5)$$

式中:  $T_s$ - 线材从精轧机出来的温度/°C;  $T_a$ - 空气温度/°C;  $T_s$ - 线材表面温度/°C;  $\sigma$ - 斯蒂芬-波尔茨曼常数,其值为  $5.67 \times 10^{-8}$  W/(m<sup>2</sup> · K<sup>4</sup>);  $\varepsilon$ - 辐射率,取 0.85;  $h_r$ - 辐射换热系数/[W · (m<sup>2</sup> · °C)<sup>-1</sup>]。

### 2.2 在水冷箱中对流换热系数计算(区 2)

线材穿水过程中,因喷嘴开关状态不同,形成了在水中、水蒸气中及空气冷却 3 个不同的过程:

(1) 当水冷箱喷嘴开时,主要是水冷却过程。

式(6)为初始条件,  $t^*$  为线材离开精轧机的时间,用给定区域长度  $L$  和运行速度  $v$  计算,线材进入水冷区域时截面温度来自于前面所算得的结果。

$$T = f(r, t) \quad r = r_i, t = t^* = L/v \quad (6)$$

综合换热系数  $h$  涉及到辐射和强迫对流两种换热机制。计算  $h$  值应考虑区域 2 的喷水情况,此时线材主要和水进行对流和辐射,属于第 3 类边界条件,采用的边界条件见式(7)。

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = h (T_s - T_w) \quad r = R, t = t^* \quad (7)$$

式中:  $h$ - 综合换热系数/[W · (m<sup>2</sup> · °C)<sup>-1</sup>];  $T_w$ - 水温/°C。

综合换热系数  $h$  由式(8)计算,用式(1)、(2)、(6)、(7)可以计算区域 2 的温度分布。

$$h = h_r + h_c \quad (8)$$

式中:  $h_c$ - 对流换热系数/[W · (m<sup>2</sup> · °C)<sup>-1</sup>]。辐射换热系数  $h_r$  为:

$$h_r = \sigma \varepsilon \frac{\left(\frac{T_s + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_w + 273}{100}\right)^4}{(T_s - T_w)} \quad (9)$$

本文采用了实测表面温度反算高碳钢在穿水时对流换热系数<sup>[3]</sup>见式(10)。

$$h_c = 1.35 W^{0.75} (1 - 0.01 T_w) \quad (10)$$

式中:  $W$ - 喷嘴的喷水水量/[L · (m<sup>2</sup> · s)<sup>-1</sup>]。

(2) 当水冷箱的喷嘴关着时,由于线材的表面温度仍然很高,就会在当前的喷嘴区域形成水蒸气,该情况下主要考虑水蒸气的对流和辐射,采用的边界条件见式(11)。

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = h (T_s - T_f) \quad r = R, t = t^* \quad (11)$$

式中:  $T_f$ - 水蒸气薄膜温度/°C;  $T_f = \frac{T_s + T_{sat}}{2}$ 。

综合换热系数  $h$  由水蒸气辐射换热系数  $h_r$  和水蒸气对流换热系数  $h_c$  两个部分组成。

$$h = h_c + h_r \quad (12)$$

$$h_r = \sigma \varepsilon \frac{\left(\frac{T_s + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_f + 273}{100}\right)^4}{(T_s - T_f)} \quad (13)$$

$$h_c = 0.62 \left( \frac{H_{v1} (\rho_l - \rho_v) \lambda_v^3}{(T_s - T_{sat}) U_v D} \right)^{0.25} \quad (14)$$

式中: $H_{v1}$ -有效水蒸气热/( $J \cdot kg^{-1}$ ); $\rho_l$ -液态水密度/( $kg \cdot m^{-3}$ ); $\rho_v$ -水蒸气密度/( $kg \cdot m^{-3}$ ); $\lambda_v$ -水蒸气导热系数/[ $W \cdot (m \cdot ^\circ C)^{-1}$ ]; $T_{sat}$ -水蒸气饱和温度/ $^\circ C$ ; $U_v$ -水蒸气动态粘度/ $Pa \cdot s$ 。

式中有有效水蒸气热  $H_{v1}$  由式(15)计算:

$$H_{v1} = H_v \left[ 1 + \frac{0.4 C_{pv} (T_s - T_{sat})}{H_v} \right]^2 \quad (15)$$

式中: $H_v$ -水的汽化热/( $J \cdot kg^{-1}$ ); $C_{pv}$ -水蒸气比热容/[ $J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}$ ]。

其中:

$$H_v = -2576.57 T_f + 32.11 \times 10^5 \quad (16)$$

$$\lambda_v = C_{pv} U_v \quad (17)$$

$$U_v = 3.5068 \times 10^{-8} T_f - 6.022 \times 10^{-7} \quad (18)$$

$$C_{pv} = 4607 - 102.92 \times 10^3 T_f^{-0.5} + 966.50 \times 10^3 T_f^{-1} \quad (19)$$

### 2.3 在水冷箱之间换热系数计算(区3)

线材在两个水冷箱之间的区段时,其传热机制属于不稳定膜态沸腾区,此时考虑水蒸气的对流和辐射,仍采用式(13)和(14)计算综合换热系数  $h$ 。

### 3 高碳钢线材水冷过程断面温度有限差分模拟

因线材在水冷阶段其截面都是圆型,可以方便用有限差分方法来计算线材的截面温度,将线材横截面沿半径方向等分成10等份。用热平衡法建立圆柱坐标系的差分方程。图2为线材直径断面温度分布图。

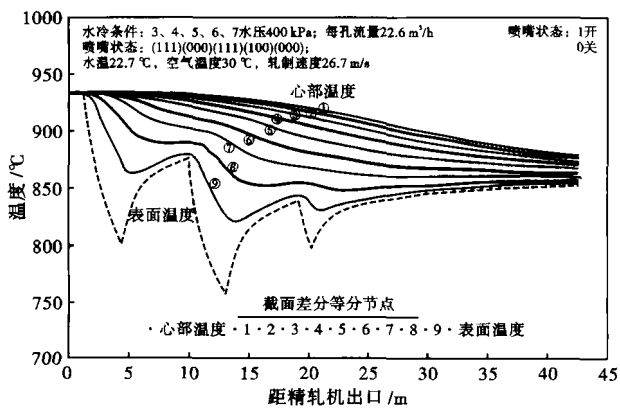


图2 82B钢Φ12.5mm轧后水冷系统中线材断面温度的分布  
Fig.2 Temperature distribution of Φ12.5 mm wire rod cross section of steel 82B after rolling in water cooling system

从图3可见,实际测量的精轧机入口温度和吐丝温度在±20℃以内,考虑到高速线材在不同环境温度和复杂水流时变因素对传热过程的影响,可表

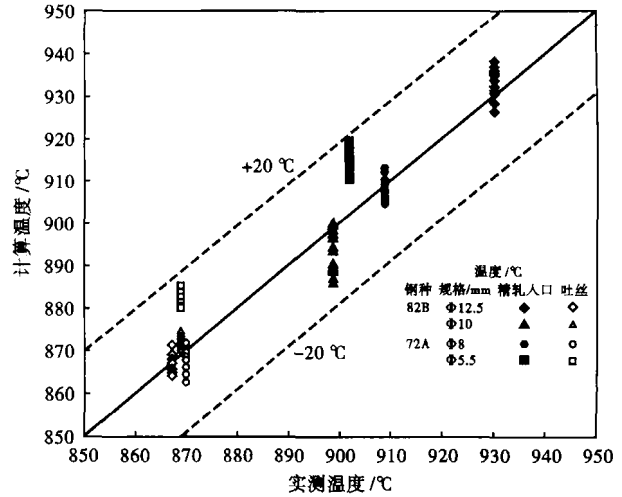


图3 20个批次高碳钢不同直径线材表面的预报温度和实测温度对比

Fig.3 Comparison between predicted temperature and measured temperature of surface of wire rods with different diameters, 20 batches of high carbon steel

明所建立的水冷过程边界条件完全满足生产实际。

### 4 结论

(1)通过分析高速线材水冷过程的特点将穿水过程分成对3种不同边界条件,并根据水冷箱环形喷嘴的开关状态,分别采用了水对流换热和水蒸气对流换热两种形式传热模型,对每个水冷箱中3个喷嘴作分段处理来分析水冷过程。

(2)通过实测温度值校正高碳钢线材水冷过程中水的对流换热系数  $h_c$ ,有限差分模拟结果表明,精轧机入口温度和吐丝机的预报温度与实测温度均值的绝对误差在±20℃以内。

### 参考文献

- 1 曾庆波,余驰斌,陈剑飞,等.高速线材轧后水冷过程温度模拟研究.武汉科技大学学报,2008,31(4):349
- 2 张云祥,张海鸥,王桂兰,等.高碳钢线材轧制组织和性能模拟的应用.特殊钢,2006,27(4):8
- 3 上官腾飞,余伟.有限差分法在钢筋穿水冷时温度场模拟中的应用.河北冶金,2006(3):101
- 4 郑启友,徐立寰,潘时升,等.带肋钢筋穿水冷温度场数值模拟及应用.轧钢,2009,26(1):36
- 5 王海儒,万爱霞,王颖旺.高线穿水冷却过程温度场的数值模拟.燕山大学学报,2005,29(6):446
- 6 林洪顺,朱新才,李长江,等.棒材穿水冷却过程温度场有限元分析.冶金设备,2007(3):39
- 7 Morales R D, Lopez A G, Olivares I M. Heat Transfer Analysis during Water Spray Cooling of Steel Rods. ISIJ Internation, 1990, 30(1):49

张云祥(1970-),男,博士,副教授,1994年西安建筑科技大学毕业,材料成型过程控制及品种开发。