

## Influence of heat transfer coefficient of laminar cooling on metal materials temperature field

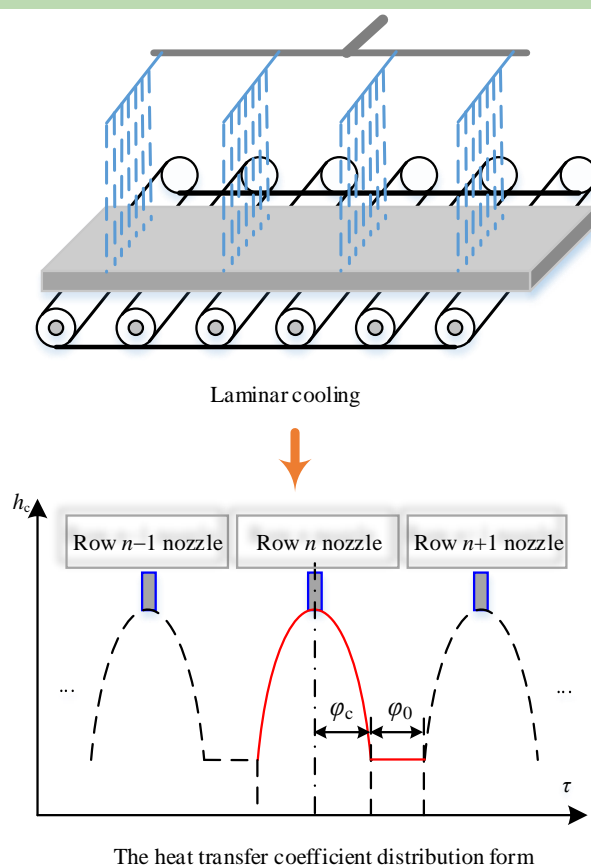
Demin CHEN<sup>1</sup>, Yinghui LIU<sup>1</sup>, Biao LU<sup>1\*</sup>, Kai TANG<sup>1</sup>, Suojun WANG<sup>1</sup>, Guang CHEN<sup>2</sup>

1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China

2. School of Energy and Environment, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243002, China

**Abstract:** The cooling intensity of laminar cooling determines the microstructure of metal materials, thus affecting the performance of the product, while the heat transfer coefficient directly affects the cooling intensity. In this work, a method for obtaining the heat transfer coefficient of laminar cooling is presented. Through the process analysis, the distribution form of the heat transfer coefficient was a piecewise function which was composed of half wave sine and straight line with the nozzle as the center. The characteristic parameters of the piecewise function can be achieved by some calculations, which involved the structural parameters, operational parameters and experimental data. The experimental bench verified the accuracy of this method. The calculation results showed that when the amplitude is increased by  $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , the relative decline of the metal material surface temperature reached maximum in the final area, which was  $-0.36 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^2/\text{W}$ , and the maximum relative change of section temperature difference was  $0.07 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^2/\text{W}$ . When the period decreased by 1 s, the relative increment of surface temperature of metal materials reached the maximum value of  $13.24 \text{ K/s}$  in the last region, and the section temperature difference showed periodic changes with a range of  $-2.5 \sim 0 \text{ K/s}$ .

**Key words:** laminar cooling; heat transfer coefficient; sine function; characteristic parameters; temperature field



收稿: 2020-08-05, 修回: 2020-10-22, 网络发表: 2020-11-20; Received: 2020-08-05, Revised: 2020-10-22, Published online: 2020-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51804002); 国家重点研发计划(编号: 2020YFB1711101)

作者简介: 陈德敏(1978-), 女, 辽宁省喀左县人, 博士, 副教授, 冶金热能工程专业, E-mail: chendemin@ahut.edu.cn; 陆彪, 通讯联系人, E-mail: road\_lu12@163.com.

**引用格式:** 陈德敏, 刘莹惠, 陆彪, 等. 层流冷却传热系数对金属物料温度场的影响. 过程工程学报, 2021, 21(9): 1033-1041.

Chen D M, Liu Y H, Lu B, et al. Influence of heat transfer coefficient of laminar cooling on metal materials temperature field (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2021, 21(9): 1033-1041, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.220250.

# 层流冷却传热系数对金属物料温度场的影响

陈德敏<sup>1</sup>, 刘莹惠<sup>1</sup>, 陆彪<sup>1\*</sup>, 汤凯<sup>1</sup>, 王索军<sup>1</sup>, 陈光<sup>2</sup>

1. 安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243002

2. 安徽工业大学能源与环境学院, 安徽 马鞍山 243002

**摘要:** 层流冷却的冷却强度决定着金属物料微观组织结构, 从而影响产品的性能, 而传热系数直接影响着冷却强度的大小。本工作提出了一种获得层流冷却传热系数的方法, 通过工艺分析得到其分布形式为以喷头为中心由半波正弦和直线构成的分段函数, 给出了通过结构参数、运行参数和实验数据获得函数特征参数的方法。以实验台验证了该方法的准确性, 同时分析了特征参数变化对金属物料温度场的影响规律。结果表明, 振幅增加  $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 金属物料表面温度相对下降量在最后一个区域达到最大值, 为  $-0.36 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^2/\text{W}$ , 断面温差最大相对变化量为  $0.07 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^2/\text{W}$ ; 周期减小  $1 \text{ s}$ , 金属物料表面温度相对增加量在最后一个区域达到最大值, 为  $13.24 \text{ K/s}$ , 断面温差呈现周期性变化, 变化范围为  $-2.5 \sim 0 \text{ K/s}$ 。

**关键词:** 层流冷却; 传热系数; 正弦函数; 特征参数; 温度场

中图分类号: P747; TQ021.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2021)09-1033-09

## 1 前言

钢铁工业是重要的国民经济基础性产业<sup>[1-3]</sup>, 在钢铁生产过程中会消耗大量的资源<sup>[4-6]</sup>, 产生大量的污染物<sup>[7-9]</sup>及温室效应气体<sup>[10,11]</sup>。目前, 降低污染物排放和实现经济社会可持续发展已成为全球关注的重要课题<sup>[12-14]</sup>, 钢铁企业的发展受到了很大的制约。因此, 钢铁企业为了寻求发展空间, 必须开发高附加值、高性能产品。

层流冷却单元的作用是在热输出辊道上迅速把金属物料的温度从终轧温度(一般为  $820 \sim 900^\circ\text{C}$ )降到规定的卷取温度( $500 \sim 700^\circ\text{C}$ ), 从而得到力学性能良好的金属物料<sup>[15-17]</sup>。这一过程中, 奥氏体相变不断发生, 而奥氏体分解和析出所形成的金属微观结构与温度的分布、水平和梯度密切相关, 传热边界条件直接影响着、决定着温度的分布规律。因此, 研究层流冷却传热系数对金属物料温度场的影响规律具有重要意义。

层流冷却传热过程机理复杂, 很难通过简单的计算获得金属物料表面的传热系数<sup>[18,19]</sup>。目前国内外学者主要通过两种方式获得这一系数, 一是经验公式法, 二是数学测算法, 其中经验公式法使用最为普遍。

经验公式法在使用时往往与数值模拟结合, 预测金属物料的温度场、卷曲温度等<sup>[20,21]</sup>。程杰锋等<sup>[22]</sup>利用经验公式法, 通过自行开发的以物理冶金模型为基础的热连轧组织性能预报系统软件分析了冷却水温度、水流量、喷嘴直径、轧向喷嘴间距等因素对冷却能力的影响。文献[23,24]把传热模型与相变模型有效结合, 计算出在

层流冷却过程中有相变潜热存在时的金属物料温度, 从而提高了温度预测的准确性。

数学测算法获得传热系数有两种方式。第一种是通过实验采用传热学反算法<sup>[25,26]</sup>, 并利用实验考察各参数变化对冷却过程的影响。第二种是通过历史数据采用回归法<sup>[27]</sup>, 利用现场生产数据, 分别采用BP神经网络法和多元回归法预测热连轧层流水冷区热流密度, 并把结果带入卷曲温度预测模型, 结果表明用BP神经网络法预测的热流密度精度比多元回归法高。

经验公式和现场数据回归法只适用于某一种生产条件, 当条件改变时, 计算的准确性受到影响; 传热反问题求解方法得到了传热系数随时间变化的分布, 但是这种分布是在特定生产条件下获得, 如果想获得传热系数与温度场之间的影响规律, 需要进行大量实验。

本工作在上述研究基础上通过结构参数、运行参数以及实验数据获得了层流冷却传热系数函数关系的特征参数, 分析了特征参数变化对金属物料温度场的影响规律。特征参数是生产操作控制结果的数学表征, 特征参数的变化反映了操作控制过程的变化, 因此对指导生产有一定的意义。

## 2 基础理论

### 2.1 金属物料传热模型建立

建立控制方程时的假设条件如下: (1) 假设金属物料沿长度方向温度分布均匀, 将微分方程简化为二维非稳态导热; (2) 金属物料运行行为匀速运动; (3) 金属物料

尺寸及初始温度已知;(4) 金属物料表面为均匀的灰体表面;(5) 物性参数仅是温度的函数,其中导热系数和热容物性随温度发生变化,密度视为常数;(6) 金属物料宽、高比较大,因此,仅考虑外界环境与上、下两个表面的传热,侧面为绝热面。

在以上假设条件下建立金属物料内部导热微分方程,如式(1)所示:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S_T \quad (1)$$

式中,  $x, y$  为金属物料宽度、厚度方向坐标(m),  $\rho$  为金属物料密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $\lambda$  为金属物料导热系数[ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ],  $c_p$  为金属物料的比热容[ $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ],  $S_T$  为内热源。金属物料导热系数和比热容与温度有关<sup>[28]</sup>。

初始条件:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_0, \\ T(x, y) &= T_0 \quad (0 < x < b; 0 < y < H) \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $\tau_0$  为层流冷却初始时间(s),  $T_0$  为初始温度(K),  $b$  为宽度(m),  $H$  为厚度(m)。

边界条件:

$$-\lambda \frac{\partial T(y, \tau)}{\partial y} \bigg|_y = h \cdot (T_{w, \tau} - T_a) \quad (3)$$

式中,  $h$  为传热系数[ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ],  $T_{w, \tau}$  为金属物料表面温度(K),  $T_a$  在空冷段为空气温度(K), 在水冷段为冷却水温度(K)。

模型求解过程中, 导热微分方程采用有限容积法进行离散, 并且采用附加源项法对边界进行处理, 在此基础上采用交替方向隐式迭代法进行离散方程求解<sup>[29]</sup>。

## 2.2 层流冷却传热系数分布函数

在层流冷却区域内, 根据每排喷嘴的布置位置把整个区域划分成多个区间, 沿着金属物料运行方向, 层流冷却传热系数分布形式如图1所示<sup>[30]</sup>。

在每排喷嘴喷射区间内的传热系数为正弦函数分布; 在两个相邻正弦函数之间为空冷, 传热系数为近似直线分布。沿着金属物料冷却方向传热系数分布形式为由正弦曲线和直线构成的分段函数。

正弦函数形式的传热系数如式(4)所示(以第  $n$  区域为例):

$$h_{s, n} = A \cdot \sin \left\{ \omega \left\{ \tau - \left[ (2n-3)\varphi_c + (n-1)\varphi_0 \right] \right\} \right\} \quad (4)$$

式中,  $h_{s, n}$  为第  $n$  区间对流传热系数[ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ],  $A$  为正弦函数的幅值[ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ],  $\omega$  为正弦函数的角频率(rad/s), 周期(s)为  $T_c = 2\pi/\omega$ ,  $\varphi_c$  为与正弦函数周期相关的时间(s),  $\varphi_0$  为两个相邻正弦函数之间的时间间隔(s)。

直线形式的传热系数分布如式(5)~(7)所示:

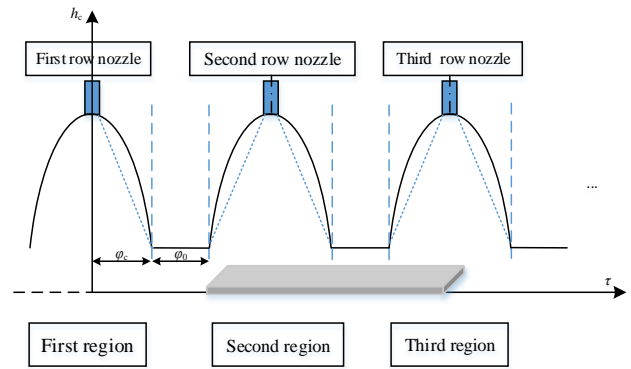


图1 层流冷却传热系数分布形式

Fig.1 The heat transfer coefficient distribution form in laminar cooling

$$h_{a, n} = 2.15(T_{w, \tau} - T_a)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

$$h_{r, n} = \sigma \varepsilon (T_{w, \tau} + T_a)(T_{w, \tau}^2 + T_a^2) \quad (6)$$

$$h_{l, n} = h_{a, n} + h_{r, n} \quad (7)$$

式中,  $h_{a, n}$  为第  $n$  个相邻区域空冷对流传热系数[ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ],  $h_{r, n}$  为第  $n$  个相邻区域辐射传热系数[ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ],  $h_{l, n}$  为第  $n$  个相邻区域直线形式的综合传热系数[ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ],  $T_a$  为环境温度(K),  $\varepsilon$  为金属物料表面发射率,  $\sigma$  为黑体辐射常数, 为  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

根据上述分析, 传热系数的形式如式(8)所示。

$$h_{s, n} = \begin{cases} A \cdot \sin \left\{ \omega \left\{ \tau - \left[ (2n-3)\varphi_c + (n-1)\varphi_0 \right] \right\} \right\} & 0 \leq \tau < \varphi_c \quad (n=1) \\ \left[ (n-1)\varphi_0 + (2n-3)\varphi_c \right] \leq \tau < \left[ (n-1)\varphi_0 + (2n-1)\varphi_c \right] & (n=2, 3, \dots, n-1) \\ \left[ (n-1)\varphi_0 + (2n-3)\varphi_c \right] \leq \tau \leq \frac{L}{v} & (n=n) \\ 2.15(T_{w, \tau} - T_a)^{\frac{1}{4}} + \sigma \varepsilon (T_{w, \tau} + T_a)(T_{w, \tau}^2 + T_a^2) & \left[ (n-1)\varphi_0 + (2n-1)\varphi_c \right] \leq \tau \leq \left[ n\varphi_0 + (2n-1)\varphi_c \right] \quad (n=1, 2, \dots, n-1) \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $L$  为层冷段长度(m),  $v$  为金属物料运行速度(m/s)。

传热系数为正弦函数形式分布的区间是金属物料冷却的关键区域。正弦函数的振幅、角频率(周期)及初相反映了函数分布的特点, 在层流冷却中, 振幅反映了喷嘴冷却的强弱, 角频率反映了喷嘴冷却时间的长短, 初相反映了喷嘴水冷的起始位置, 这三个参数称为特征参数。

正弦函数的角频率可以根据结构参数及运行参数计算, 如式(9)所示:

$$\omega = \frac{2\pi v}{4(H_0 - H_b)\tan\beta} \quad (9)$$

式中,  $H_0$ 为喷嘴安装高度(m),  $H_b$ 为金属物料厚度(m),  $\beta$ 为喷射角(rad)。

初相的大小与  $\varphi_c$  和  $\varphi_0$  有关, 由图1可看出  $\varphi_c$  为正弦函数周期的四分之一, 根据式(9), 可得其计算如式(10)所示:

$$\varphi_c = \frac{(H_0 - H_b)\tan\beta}{v} \quad (10)$$

而  $\varphi_0$  的大小同时受到  $\varphi_c$ 、结构参数、运行参数的影响, 如式(11)所示:

$$\varphi_0 = \frac{B - 2(H_0 - H_b)\tan\beta}{v} = 2\left(\frac{B}{2v} - \varphi_c\right) \quad (11)$$

式中,  $B$  为两喷嘴之间的距离(m)。

振幅  $A$  同时受到喷水流量、压力、喷射高度等多因素影响, 不能直接给出其计算关系, 利用实验数据通过优化算法得到其值, 优化过程的目标函数如式(12)所示:

$$A = \min \sum_{i=1}^n (x_i - x'_i)^2 \quad (12)$$

式中,  $n$  为实际检测数据的点数,  $x_i$  为传热模型计算的第  $i$  时刻温度(K),  $x'_i$  为检测第  $i$  时刻温度(K)。

### 3 案例计算

#### 3.1 层流冷却传热系数分布函数

根据提出的获得层流冷却传热系数的方法, 以所搭建的实验台为研究对象(图2), 分析特征参数对温度场的影响。

实验中, 喷嘴距离金属物料垂直距离为 465 mm, 金属物料运行速度为 2 m/min, 两相邻喷嘴距离为 240 mm, 金属物料材料为 Q230 方坯, 尺寸为 300 mm×300 mm×24 mm。实验过程中, 金属物料表面温度和中心温度分别在从底部打孔至距离表面 1 和 13 mm 处焊接热电偶, 用耐火泥填充后进行测量。表面温度测量选取 3 个点, 中心温度测量选取 2 个点, 分别取其平均温度与模型计算值进行对比。具体测点位置如图3和4所示。

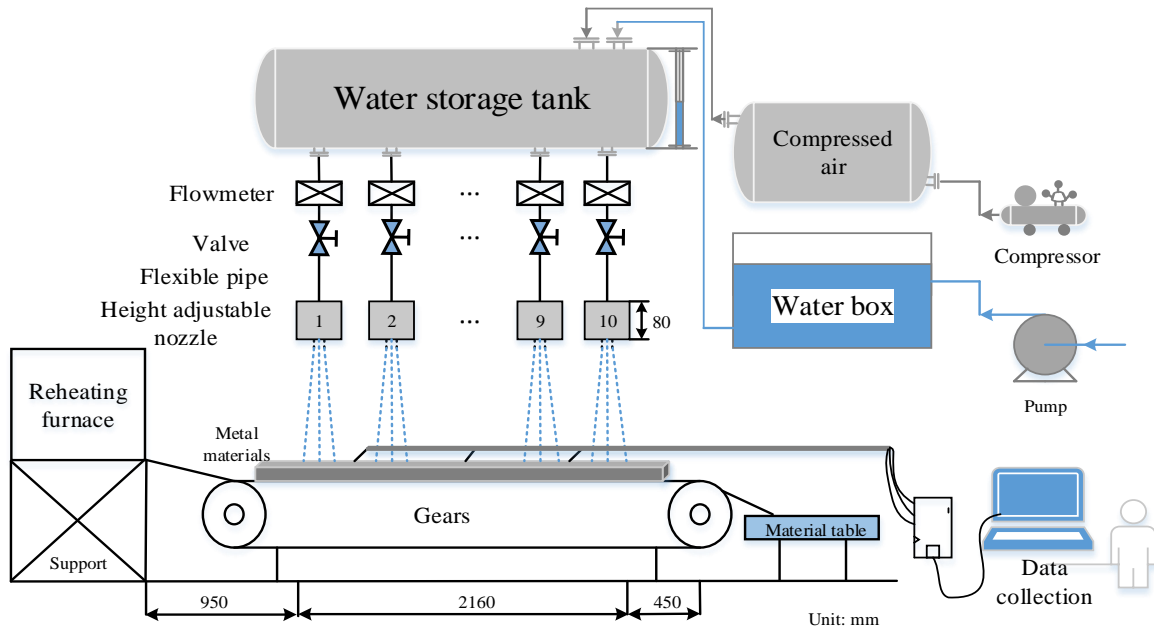


图2 层流冷却实验台

Fig.2 The laminar cooling experiment platform

经过计算传热系数的分布如图5所示, 且冷态实验得到喷射角度  $\beta$  为  $\pi/12$ 。

第一区域传热系数分布函数为  $h_{s,1} = 678.48 \cdot \sin[0.44 \cdot (\tau + 3.6)]$ , 第二区域传热系数分布函数为  $h_{s,2} = 678.48 \cdot \sin[0.44 \cdot (\tau - 3.6)]$ , ..., 第十区域传热系数分布函数为  $h_{s,10} = 678.48 \cdot \sin[0.44 \cdot (\tau - 61)]$ 。

#### 3.2 模型验证

把获得的传热系数带入模型计算金属物料表面和

中心温度分布, 并与实验测试结果进行对比, 结果如图6所示。由图可看出, 金属物料的上表面温度从喷嘴下经过而逐渐降低, 且每经过一排喷嘴表面温度均会有波动。金属物料中心温度从喷嘴下经过也会逐渐降低, 但降低的幅度没有表面温度明显, 且由于传热系数变化所带来的温度波动没有表面温度明显。被冷却金属物料各时刻测试温度与模型计算温度相对误差的计算结果如图7所示, 模型计算的表面温度与实验测试表面温度最大相对误差为 -1.98%, 中心温度相对误差最大为



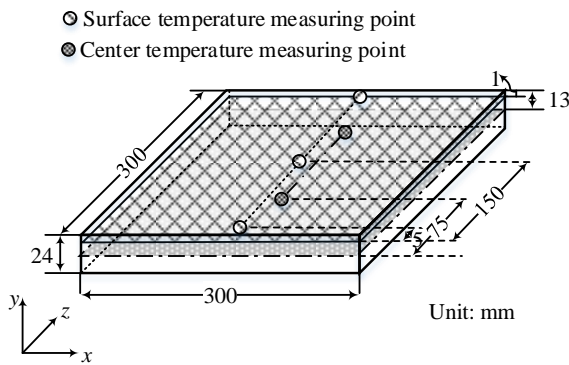


图3 实验测点图

Fig.3 Experimental measuring points distribution

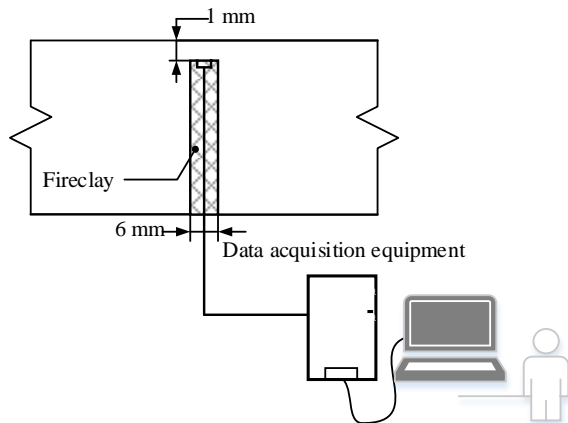


图4 实验开孔图

Fig.4 Experimental hole drawing

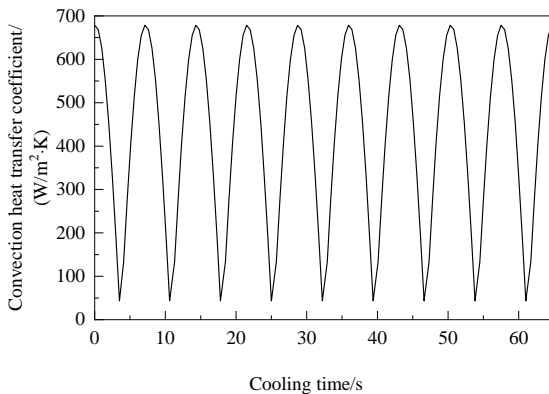


图5 层流冷却对流换热系数

Fig.5 The convective heat transfer coefficient of laminar cooling

-0.58%。在表面温度最大相对误差处,绝对温差为-18.23 K,在中间区域的绝对温差在-5 K~+5 K之间变化,误差较小,模型可靠。

### 3.3 传热系数特征参数变化对金属物料温度场的影响

传热系数的特征参数包括振幅、周期和初相,其中振幅是温度场的独立影响因素,周期和初相是两个相关

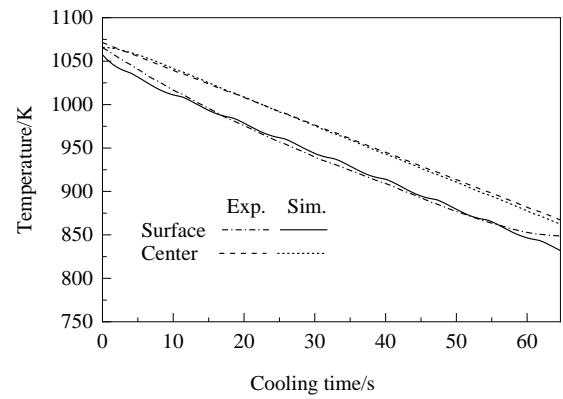


图6 模型计算和实验测试温度的对比

Fig.6 Comparison of temperature calculated by model with temperature measured by experiment

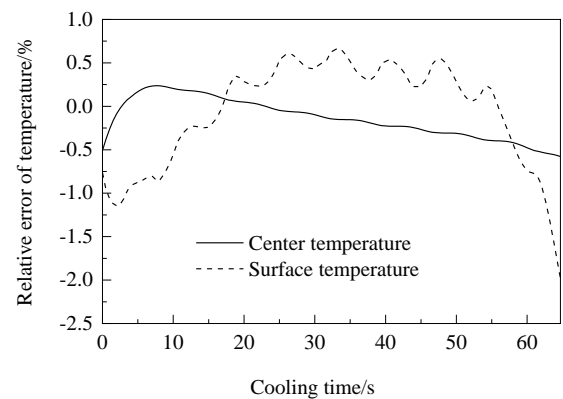


图7 各时刻测试温度与模型计算温度相对误差

Fig.7 The relative error between the measured temperature and the calculated temperature of the model

因素,这主要是因为层流冷却过程中,传热过程的边界形式受结构参数的限制。本工作主要分析振幅、周期变化对金属物料温度场的影响。

为找到单一特征参数变化对温度场的影响规律,定义了温度相对变化,如式(13)和(14)所示。

$$\Delta t_b(\tau) = \frac{T_{b,x+1}(\tau) - T_{b,x}(\tau)}{\Delta T_c} \quad (13)$$

$$\Delta t_c(\tau) = \frac{T_{c,x+1}(\tau) - T_{c,x}(\tau)}{\Delta T_c} \quad (14)$$

式中, $\Delta t_b(\tau)$ 和 $\Delta t_c(\tau)$ 分别为 $\tau$ 时刻金属物料表面温度、断面温差的相对变化,振幅变化时单位为 $\text{m}^2 \cdot \text{K}^2/\text{W}$ ,周期变化时单位为 $\text{K/s}$ 。 $T_{b,x}(\tau)$ 和 $T_{b,x+1}(\tau)$ 分别为特征参数变化前、后 $\tau$ 时刻的金属物料表面温度(K)。 $T_{c,x}(\tau)$ 和 $T_{c,x+1}(\tau)$ 分别为特征参数变化前、后 $\tau$ 时刻的金属物料断面温差(K), $\Delta T_c$ 为边界变化引起的变化量,当振幅变化时单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,周期变化时单位为s。

温度的相对变化反映了边界条件改变时,沿着金属物料运动方向的各区域温度场变化规律。为说明不同

温度水平下、特征参数变化量相同时对于温度场的影响规律,采用特征参数连续变化进行分析。

### 3.3.1 振幅变化对金属物料温度场的影响

在原振幅基础上每次以 1% 为步长依次递增(第一次变化为原振幅的 1.01 倍),共计算 20 次递增的表面温度和断面温差,选取其中 2 次计算结果分析变化规律。

层流冷却过程中,振幅变化时金属物料表面温度相对变化情况如图 8 所示。

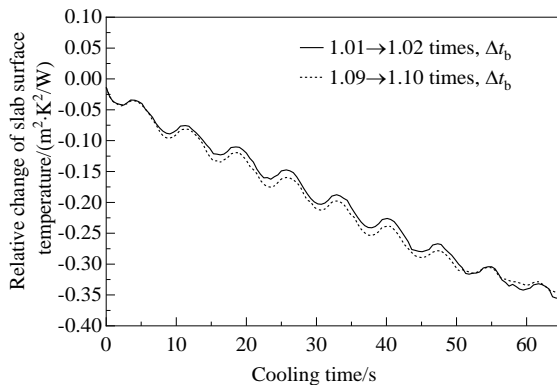


图 8 振幅增加时金属物料表面温度相对变化  
Fig.8 Relative change of metal samples surface temperature with the increase of sine amplitude

金属物料表面温度在经过各个喷嘴时都会有所波动,受传热系数影响呈曲线形式分布。振幅增加冷却强度增大,表面温度下降,由式(13)可以得出,在同一时刻振幅增加前、后的表面温度相对变化为负值。沿着金属物料运行方向,表面温度相对变化量在累积效应作用下逐渐增加,在第 10 区域达到最大值  $-0.36 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^2/\text{W}$ 。此外,在连续变化过程中,随着振幅的逐渐增加,同一时刻表面温度相对变化量呈现先增加趋势,如图 8 中第 20 s,振幅从原始振幅的 1.01 倍增加至 1.02 倍时  $\Delta t_b = -0.12 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^2/\text{W}$ ,振幅从原始振幅的 1.09 倍增加至 1.10 倍时  $\Delta t_b = -0.13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^2/\text{W}$ 。但 54.5 s 以后,随振幅逐渐增加,相同时刻表面温度相对变化量呈现减小趋势,如图 8 中第 60 s,振幅从原始振幅的 1.01 倍增加至 1.02 倍时  $\Delta t_b = -0.34 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^2/\text{W}$ ,振幅从原始振幅的 1.09 倍增加至 1.10 倍时  $\Delta t_b = -0.33 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^2/\text{W}$ 。造成该现象的主要原因是金属物料表面温度除了受传热系数影响外,还与其与冷却水的温差有关,振幅增加,金属物料与冷却水的温差逐渐下降,因此金属物料表面温度相对变化量下降趋势逐渐减缓。

振幅增加时,金属物料断面温差的相对变化情况如图 9 所示。断面温差同时受到表面温度和中心温度变化的影响,在每个喷射区域,振幅增大,传热系数增大,冷却强度变大,金属物料表面温度变化非常明显,但是中

心温度受其本身热传导性能影响,变化相对滞后,且变化量也相对较小。因此,沿着金属物料运动方向,断面温差相对变化呈曲线形式分布。随振幅逐渐增加,相同时刻断面温差相对变化量呈现增加趋势,如图 9 中第 20 s,振幅从原始振幅的 1.01 倍增加至 1.02 倍时  $\Delta t_c = 0.036 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^2/\text{W}$ ,振幅从原始振幅的 1.09 倍增加至 1.10 倍时  $\Delta t_c = 0.042 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^2/\text{W}$ 。但 43.1 s 以后,随振幅逐渐增加,相同时刻断面温差相对变化量呈现减小趋势,如图 9 中第 60 s,振幅从原始振幅的 1.01 倍增加至 1.02 倍时  $\Delta t_c = 0.031 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^2/\text{W}$ ,振幅从原始振幅的 1.09 倍增加至 1.10 倍时  $\Delta t_c = 0.013 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^2/\text{W}$ 。产生该现象的主要原因是随振幅不断增大,金属物料降温幅度逐渐增大,在累积效应作用下,断面温差相对变化增量逐渐减小。总体上断面温差的相对波动非常小,最大值仅为  $0.07 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^2/\text{W}$ 。

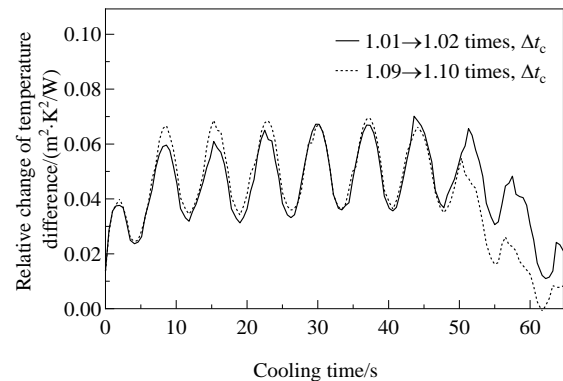


图 9 振幅增加时金属物料断面温差相对变化  
Fig.9 Relative change of metal samples temperature difference with the increase of sine amplitude

### 3.3.2 周期变化对金属物料温度场的影响

以原始周期为基准,每次以 1% 的步长依次递减(第一次变化为原周期的 0.99 倍),连续计算 20 次,使得周期最终减小到原始周期的 20%,选取其中 2 次计算结果分析变化规律,如图 10 所示。

周期减小,正弦函数形式的传热系数覆盖区域减小(水冷区域减小),且在任意一个半波正弦函数分布内的同一时刻传热系数减小,使得金属物料冷却速度减小,表面温度逐渐上升。由式(13)可得到,表面温度相对变化量逐渐增加,且在最后一个区域达到最大值  $13.24 \text{ K/s}$ 。由图 10 可看出,在任意两个喷射区域的相邻区间内表面温度相对变化会出现周期性的下降区域(图 10 中虚线圆标出区域),这主要是因为在这个区域内,随着周期减小,空冷区域面积逐渐增大,而空冷区域传热系数主要受金属物料表面温度影响,虽然有所变化,但这种变化与水冷区域相比要小很多。此外,周期连续减少时,各时刻的金属物料表面温度相对变化量的平均增量[式

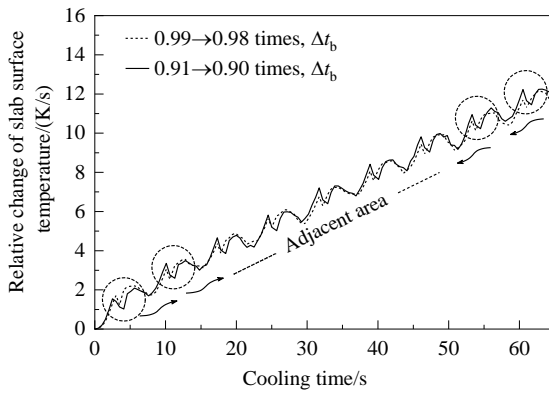


图10 周期减小时金属物料表面温度相对变化  
Fig.10 Relative change of metal samples surface temperature with the decrease of sine period

(15)]也呈现波动性变化,如图11所示。由图可看出, $\Delta\eta_b$ 变化率范围为 $-0.05\sim 0.08$  K/s,且在各个区域仍然有很明显的周期特征,但增量值非常小,这说明当周期连续减小时,在任意时刻温度相对变化量几乎为定值。

$$\Delta\eta_b = \frac{\Delta t_{b,N}(\tau) - \Delta t_{b,1}(\tau)}{N} \quad (15)$$

式中, $\Delta t_{b,N}(\tau)$ ,  $\Delta t_{b,1}(\tau)$ 分别为第 $N$ 次和第1次表面温度相对变化( $^{\circ}\text{C}$ ),变化次数 $N=20$ 。

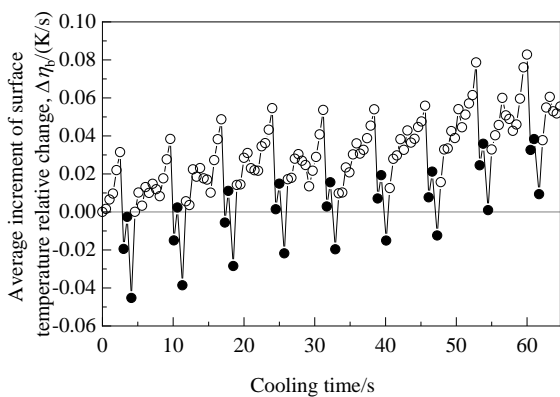


图11 周期减小时表面温度相对变化的平均增量  
Fig.11 Average increment of surface temperature relative change with the decrease of sine period

周期变化时断面温差相对变化,如图12所示。断面温差同时受到表面温度和中心温度变化的影响,在每个喷射区域,周期减小,传热系数减小,冷却强度减弱,金属物料表面温度变化非常明显,但中心温度受其本身热传导性能影响,变化相对滞后,并且变化量也相对较小。因此,沿着金属物料运动方向,断面温差相对变化呈曲线形式分布。随着周期逐渐减小,两个相邻喷射区域之间的空冷区间逐渐增加,因此金属物料断面温差相对变化量会出现一个峰值(图12中的节点),这个峰值的位置

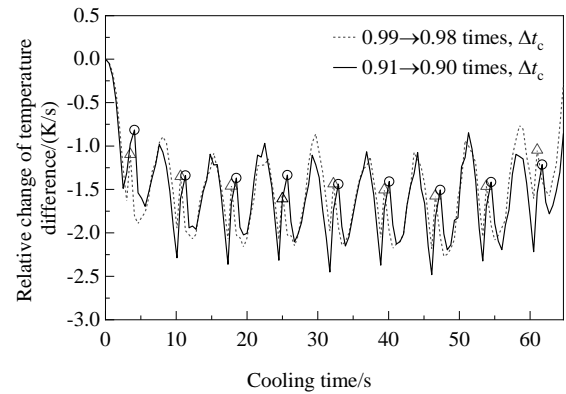


图12 周期减小时金属物料断面温差相对变化  
Fig.12 Relative change of metal samples temperature difference with the decrease of sine period

与周期的减少量有关,在图12中,当周期从原始周期的0.99倍减至0.98倍时这个峰值出现在3.67 s,而当周期从原始周期的0.91倍减至0.90倍时这个峰值出现在4.32 s。总体上断面温差的相对波动范围为 $-2.5\sim 0$  K/s。

在任一个时刻,周期连续变化时,断面温差相对变化的平均增量,定义式如式(16)所示。

$$\Delta\eta_c = \frac{\Delta t_{c,N}(\tau) - \Delta t_{c,1}(\tau)}{N} \quad (16)$$

式中, $\Delta t_{c,N}(\tau)$ 和 $\Delta t_{c,1}(\tau)$ 分别为第 $N$ 次和第1次金属物料断面温差相对变化( $^{\circ}\text{C}$ ),变化次数 $N=20$ 。

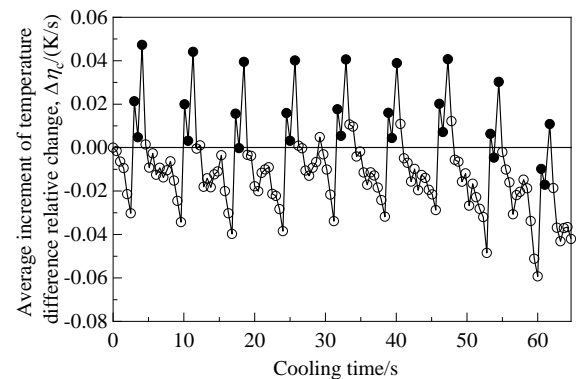


图13 周期减小时断面温差相对变化的平均增量  
Fig.13 Average increment of temperature difference relative change with decrease of period

由图13可以看出,周期连续减小时,断面温差相对变化的平均增量分布具有周期特性,变化的范围为 $-0.06\sim 0.06$  K/s,其中波动比较大的区域均处于相邻区域,在周期减小过程中,由水冷变为空冷的区域。从图13可看出 $\Delta\eta_c$ 的值非常小,这说明当周期连续减小时,在任意时刻断面温差相对变化量几乎为定值。

## 4 结论

本工作提出了一种利用结构参数、运行参数和实验数据获取金属物料层流冷却传热系数特征参数的方法,并分析了特征参数变化对温度场的影响规律,得到如下结论:

(1) 层流冷却单元的传热边界函数形式为以喷头为中心由正弦函数和直线构成的分段函数,特征参数包括振幅、周期和初相。

(2) 振幅增加时,沿着金属物料运动方向,其表面温度呈曲线形分布,并且逐渐减小,表面温度相对变化量在最后一个区域达到最大值为 $-0.36 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^2/\text{W}$ 。断面温差相对变化也呈曲线形变化,总体呈先增加后减小的趋势,最大变化值为 $0.07 \text{ m}^2 \cdot \text{K}^2/\text{W}$ ;

(3) 周期减小时,沿着金属物料运动方向,其表面温度呈曲线形分布,且逐渐增加,表面温度相对变化量在最后一个区域达到最大值为 $13.24 \text{ K/s}$ 。断面温差相对变化也呈曲线形分布,但相对波动较小,最大值为 $-2.5 \text{ K/s}$ 左右。

## 参考文献

- [1] Lin B Q, Wu R X. Designing energy policy based on dynamic change in energy and carbon dioxide emission performance of China's iron and steel industry [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120412.
- [2] 杨波. 基于PSA-SVRM模型的钢铁企业副产煤气消耗量预测[J]. *过程工程学报*, 2014, 14(3): 462-468.  
Yang B. Consumption prediction of by-product gas in iron and steel enterprises based on PSA-SVRM model [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2014, 14(3): 462-468.
- [3] Wang Y H, Wen Z G, Cao X, et al. Environmental efficiency evaluation of China's iron and steel industry: a process-level data envelopment analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 707: 135903.
- [4] 李克江, 张建良, 张亚鹏, 等. 基于节能减排思想分析炼铁工艺的发展[J]. *过程工程学报*, 2014, 14(1): 162-172.  
Li K J, Zhang J L, Zhang Y P, et al. Analysis on development of iron-making process based on the principle of energy-saving and emission reduction [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2014, 14(1): 162-172.
- [5] Chen D M, Lu B, Dai F Q, et al. Bottleneck of slab thermal efficiency in reheating furnace based on energy apportionment model [J]. *Energy*, 2018, 150: 1058-1069.
- [6] Lu B, Tang K, Chen D M, et al. A novel approach for lean energy operation based on energy apportionment model in reheating furnace [J]. *Energy*, 2019, 182: 1239-1249.
- [7] Wang X Y, Lei Y, Yan L, et al. A unit-based emission inventory of  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  and PM for the Chinese iron and steel industry from 2010 to 2015 [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 676: 18-30.
- [8] Zhu X H, Li H L, Chen J Y, et al. Pollution control efficiency of China's iron and steel industry: evidence from different manufacturing processes [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 240: 118184.
- [9] Mayer J, Bachner G, Steininger K. Macroeconomic implications of switching to process-emission-free iron and steel production in Europe [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 210: 1517-1533.
- [10] Ahlström J, Zetterholm J, Pettersson K, et al. Economic potential for substitution of fossil fuels with liquefied biomethane in Swedish iron and steel industry—synergy and competition with other sectors [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 209: 112641.
- [11] Bachner G, Mayer J, Steininger K W, et al. Uncertainties in macroeconomic assessments of low-carbon transition pathways—the case of the European iron and steel industry [J]. *Ecological Economics*, 2020, 172: 106631.
- [12] Gao C K, Na H M, Song K H, et al. Technologies-based potential analysis on saving energy and water of China's iron and steel industry [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 699: 134225.
- [13] Zhang S H, Yi B W, Worrell E, et al. Integrated assessment of resource-energy-environment nexus in China's iron and steel industry [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 232: 235-249.
- [14] Rodrigues da Silva R, Roberto de Carvalho Mathias F, Valdir Bajay S. Potential energy efficiency improvements for the Brazilian iron and steel industry: fuel and electricity conservation supply curves for integrated steel mills [J]. *Energy*, 2018, 153: 816-824.
- [15] Peng L G, Liu X H, Zhao X M, et al. Mathematic modeling on flexible cooling system in hot strip mill [J]. *Journal of Central South University*, 2014, 21(1): 43-49.
- [16] Pian J X, Zhu Y L. A hybrid soft sensor for measuring hot-rolled strip temperature in the laminar cooling process [J]. *Neurocomputing*, 2015, 169: 457-465.
- [17] Zheng Y, Li S Y, Wang X B. Distributed model predictive control for plant-wide hot-rolled strip laminar cooling process [J]. *Journal of Process Control*, 2009, 19: 1427-1437.
- [18] Zhang D H, Wang B X, Zhou N, et al. Cooling efficiency of laminar cooling system for plate mill [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2008, 15(5): 24-28.
- [19] Liu E Y, Zhang D H, Sun J, et al. Algorithm design and application of laminar cooling feedback control in hot strip mill [J]. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2012, 19(4): 39-42.
- [20] 谢海波, 徐旭东, 刘相华, 等. 层流冷却过程中带钢温度场数值模拟[J]. *钢铁研究学报*, 2005, 17(4): 33-35.  
Xie H B, Xu X D, Liu X H, et al. Numerical simulation on hot strip temperature field in laminar cooling process [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2005, 17(4): 33-35.
- [21] 谭文, 许云波, 刘振宇, 等. 层流冷却方式对中厚板温度场影响的数值模拟[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2006, 27(8): 887-890.  
Tan W, Xu Y B, Liu Z Y, et al. Numerical simulation of effect of laminar cooling patterns on plate temperature field [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science Edition)*, 2006, 27(8): 887-890.
- [22] 程杰锋, 刘正东, 唐广波. 层流冷却过程带钢温度场影响因素模拟分析[J]. *材料热处理技术*, 2011, 40(20): 188-190, 193.  
Cheng J F, Liu Z D, Tang G B. Analysis on factors affecting thermal evolution of strip during runout table cooling [J]. *Material & Heat Treatment*, 2011, 40(20): 188-190, 193.
- [23] Nobari A H, Serajzadeh S. Modeling of heat transfer during controlled cooling in hot rod rolling of carbon steels [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(4): 487-492.



- [24] Edalatpour S, Saboonchi A, Hassanpour S. Effect of phase transformation latent heat on prediction accuracy of strip laminar cooling [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211 (11): 1776–1782.
- [25] Singh M K, Yadav D, Arpit S, et al. Effect of nanofluid concentration and composition on laminar jet impinged cooling of heated steel plate [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 100: 237–246.
- [26] 刘亦鹏. 移动高温钢板层流冷却实验和基于导热反问题的计算研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009: 11–26.  
Liu Y P. Laminar cooling experiment of moving plate at high temperature and study on calculation based on inverse heat conduction problem [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009: 11–26.
- [27] 韩斌, 彭良桂, 王国栋, 等. 基于神经网络的热带层流基本热流密度的计算 [J]. *钢铁*, 2004, 39(3): 29–33, 42.  
Han B, Peng L G, Wang G D, et al. Calculation of basic heat-flux density for hot strip laminar-cooling system using artificial neural networks [J]. *Iron and Steel*, 2004, 39(3): 29–33, 42.
- [28] 李浩. 基于段法模型的步进式轧钢加热炉结构参数研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018: 37.  
Li H. Study on structural parameters of walking-beam reheating furnace based on zonal method [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2018: 37.
- [29] 刘伟涛, 曾大新, 苏俊义. 用交替方向隐式迭代法计算铸件凝固过程的温度场 [J]. *西安交通大学学报*, 2000, 34(7): 68–72.  
Liu W T, Zeng D X, Su J Y. Alternative direction implicit iteration applied to calculate temperature field for casting in solidification process [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2000, 34(7): 68–72.
- [30] 韩斌. 热轧带钢层流冷却过程的建模与控制研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2005: 11, 19.  
Han B. Research on modeling and control for laminar cooling in hot strip mill [D]. Shenyang: Northeastern University, 2005: 11, 19.