

DOI: 10.3901/JME.2013.04.070

铝热连轧分段冷却系统建模与仿真^{*}

郭新宇¹ 何安瑞¹ 邵健¹ 周滨² 李全梁²

(1. 北京科技大学高效轧制国家工程研究中心 北京 100083;

2. 广西柳州银海铝业股份有限公司 柳州 545006)

摘要: 为研究工作辊分段冷却系统对铝带断面形状的影响, 建立冷却水影响下的工作辊温度场及热膨胀模型并使用交替差分法对模型进行求解。利用该模型, 研究不同冷却水分布模式下工作辊热辊形的形态、冷却水量与工作辊热膨胀的定量关系以及改变冷却水量后热辊形的形成规律。仿真结果表明分段冷却系统具有较强的局部辊缝形状控制能力, 辊缝三次凸度和四次凸度的控制能力分别为 $30.8\ \mu\text{m}$ 和 $22.8\ \mu\text{m}$; 边部控制能力在冷却水量为 $0\sim 50\%$ 区间内达到最大为 $16.6\ \mu\text{m}$; 冷却水量与局部冷却段热膨胀呈现良好的二次关系; 改变冷却水量后, 工作辊热膨胀的相对变化速度与水量无关, 为系统固有特性; 根据冷却水与工作辊热凸度的定量关系和热膨胀变化速度可以实现对工作辊局部热膨胀的精确控制, 从而有效控制铝带断面形状。

关键词: 铝 热轧 分段冷却 板形控制 差分法

中图分类号: TG333

Modeling and Simulation of Subsectional Cooling System during Hot Aluminum Rolling

GUO Xinyu¹ HE Anrui¹ SHAO Jian¹ ZHOU Bin² LI Quanliang²

(1. National Engineering Research Center for Advanced Rolling,

University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083;

2. Guangxi Liuzhou Yin Hai Aluminum Co., Ltd., Liuzhou 545006)

Abstract: In order to study the relationship between the subsectional cooling system and section shape of aluminum strip, a temperature field model has been built based on the alternating finite difference method. With the model, issues such as work roll thermal contour under different cooling water distributions, quantitative relationship between cooling water and thermal crown, and the evolution of thermal crown when changing cooling water have been researched. The results shows that subsectional cooling system has a strong control ability of local thermal expansion; when the width of aluminum strip is $1\ 500\ \text{mm}$, the relation between cooling water and thermal crown is quadratic; and the changing rate of thermal crown is independent with the amount of cooling water. Based on the conclusions above, work roll thermal expansion can be controlled quantitatively by the cooling water, accordingly providing an effective way of controlling section shape of aluminum strip.

Key words: Aluminum Hot rolling Subsectional cooling Shape control Finite-difference method

0 前言

在铝热连轧生产中, 板形控制的主要手段包括压下倾斜、弯辊、窜辊和工作辊分段冷却, 其中最复杂的是分段冷却控制^[1]。分段冷却的实质是通过改变冷却水的横向分布, 来控制工作辊各冷却区段的热膨胀, 从而控制轧后带材的断面厚度分布。目

前, 针对铝热连轧分段冷却系统的研究尚不充分, 主要体现在以下几个方面。

(1) 以往分段冷却的控制目标为轧件的平坦度。根据平坦度仪测得的浪形特征进行简单的局部冷却控制, 而没有从产生浪形的根本原因即轧件的断面形状加以控制, 仅为对产品质量的补救, 未参与到浪形的形成过程中。

(2) 针对工作辊热辊形的研究, 前人多采用有限差分法, TSENG 等^[2-3]在此方面进行了大量的研究, 但研究内容主要局限于冷却水对工作辊二次热凸度的影响, 并且沿工作辊辊身方向的冷却水为均

^{*} 新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0223)、中央高校基本科研业务费专项资金(FRF-TP-11-003A)和国家科技支撑计划课题(2012BAF09B04)资助项目。20120830 收到初稿, 20130104 收到修改稿

匀分布, 针对分段冷却系统各冷却区段冷却水量单独可调的特点研究尚不充分, 无法为实际生产提供切实有效指导。

(3) 热辊形作为工作辊辊缝形状的重要组成部分, 对其的研究目前只局限在稳态层面上, 前人的研究没有给出冷却水与工作辊热膨胀的定量关系, 也没有从动态的角度分析冷却水量改变后, 工作辊热膨胀随时间的变化历程。

针对以上问题, 本文就某厂铝热连轧机精轧机组工作辊分段冷却系统展开研究, 研究结果对于建立铝热轧机的板形控制模型及提出针对性的板形控制策略有重要意义。

1 分段冷却设备

在轧机入口、出口侧各安装有两排喷射梁。入口侧每个喷射梁安装 3 排喷嘴, 出口侧每个喷射梁安装 2 排喷嘴。每排喷嘴均为 32 个, 间距为 60 mm, 单个喷嘴在 600 kPa 压力下流量为 17.3 L/min。辊缝基本润滑上下各一排喷射梁, 在铝带范围内喷嘴常开, 总流量为 1 088 L/min。喷射调节方式为占空比调节, 共分 10 级, 0 级表示 2 s 内完全关闭该喷嘴, 1 级表示 2 s 内喷嘴开 0.2 s, 以此类推。

为保证铝带的表面质量, 入口侧喷嘴喷射等级不得小于 3 级, 喷射级别由二级计算机控制, 喷射模式为平均分布, 主要用于工作辊的基础冷却。出口侧喷嘴喷射级别可在 0~10 级范围内调节, 喷射模式为二次抛物线、三次和四次多项式分布, 如图 1 和图 2 所示。各喷嘴流量由一级机和二级机共同控制, 用于分段冷却的预设定和反馈控制。根据入、出口喷射梁喷嘴的数量及单个喷嘴的流量可知, 入口侧可调水量为总水量 35%, 可调节等级为 7 级, 出口侧可调水量为总水量的 30%。

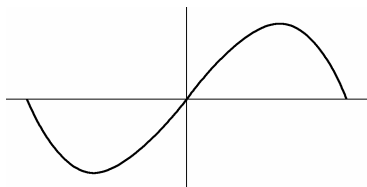


图 1 冷却水三次分布示意图

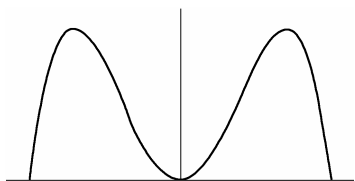


图 2 冷却水四次分布示意图

2 工作辊温度场及热凸度模型

2.1 工作辊温度场模型

工作辊传热问题属于三向传热的三维问题, 考虑时间因素亦可看成是一个四维问题, 求解过程复杂。由文献[4]可知, 在轧辊表层 2~3 mm 的深度, 温度呈周期变化且剧烈, 而在轧辊 99% 以上的部分, 温度分布呈轴对称形式且波动很小, 所以研究轧辊温度场是可忽略周向传热, 将三维问题转化为二维问题。二维传热的导热微分方程为

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

式中, θ 为轧辊内部各点温度; x 为轴向坐标; r 为径向坐标; t 为时间; α 为热扩散率, $\alpha = \kappa / (c\rho)$; κ 为热导率; c 为比热容; ρ 为密度。

当采用差分法求解微分方程时, 时间被离散化, 在一个时间步长中每个单元温度为常数, 即

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} = 0 \quad (2)$$

差分法网格划分方法如图 3 所示。为保证计算精度, 径向步长靠近铝带方向以 10% 递减, 辊身范围内轴向步长设置为 60 mm 与喷嘴间距相适应, 辊颈范围内轴向步长为 120 mm 以减少节点数量, 缩短计算时间。工作辊辊面单元与冷却水的传热系数可单独调节以体现分段冷却系统独立控制各冷却段冷却水量的特点。

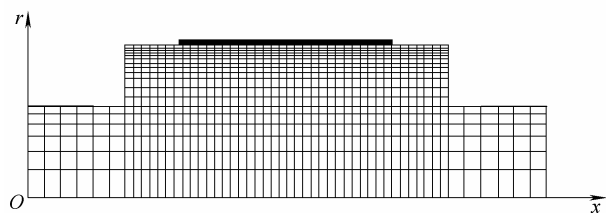


图 3 工作辊温度场差分模型

差分格式选取交替差分格式, 该格式相比显式差分格式具有绝对稳定性, 不受空间、时间步长的影响; 相比隐式差分计算量小, 求解速度快。具体实现过程以内部节点为例说明。如图 4 所示, 对内部节点按照能量守恒定律列方程, 有

$$\Delta U = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (3)$$

式中, ΔU 为单元吸收的总能量, Q_1 为左侧节点传入热量, Q_2 为右侧节点传入热量, Q_3 为下方节点传入热量, Q_4 为上方节点传入热量。

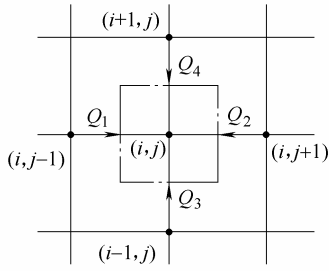


图4 内部节点传热示意图

内部节点 (i, j) 从 n 时刻到 $n+\Delta t$ 时刻,温度 θ 从 $\theta_{i,j}^n$ 变化到 $\theta_{i,j}^{n+1}$ 。在前 $\Delta t/2$ 时间步长内,轴向方向采用隐式差分,径向方向采用显式差分,则式(3)中 ΔU 、 Q_1 分别为

$$\Delta U = 2\pi r \rho c \Delta r \Delta x (\theta_{i,j}^{n+1/2} - \theta_{i,j}^n) \quad (4)$$

$$Q_1 = k \left(\frac{\theta_{i,j-1}^{n+1/2} - \theta_{i,j}^n}{\Delta x} \right) 2\pi r \Delta r \frac{1}{2} \Delta t \quad (5)$$

式中, Δx 为轴向空间步长; Δr 为径向空间步长; Δt 为时间步长; $\theta_{i,j}^{n+1/2}$ 为 $\Delta t/2$ 时间后单元温度。

Q_2 、 Q_3 、 Q_4 以此类推。将 ΔU 、 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 代入式(3)便可得到

$$-f_x \theta_{i,j-1}^{n+1/2} + (1+2f_x) \theta_{i,j}^{n+1/2} - f_x \theta_{i,j+1}^{n+1/2} = f_r \left(1 - \frac{\Delta r}{2r} \right) \theta_{i-1,j}^n + (1-2f_r) \theta_{i,j}^n + f_r \left(1 + \frac{\Delta r}{2r} \right) \theta_{i+1,j}^n \quad (6)$$

在后 $\Delta t/2$ 时间步长内,轴向方向采用显式差分,径向方向采用隐式差分,同理可得

$$-f_r \left(1 - \frac{\Delta r}{2r} \right) \theta_{i-1,j}^{n+1} + (1+2f_r) \theta_{i,j}^{n+1} - f_r \left(1 + \frac{\Delta r}{2r} \right) \theta_{i+1,j}^{n+1} = f_x \theta_{i,j-1}^{n+1/2} + (1-2f_x) \theta_{i,j}^{n+1/2} + f_x \theta_{i,j+1}^{n+1/2} \quad (7)$$

$$f_x = \frac{\frac{1}{2} k \Delta t}{\rho c \Delta x^2} \quad f_r = \frac{\frac{1}{2} k \Delta t}{\rho c \Delta r^2}$$

按此思路对工作辊各节点列方程,轴向或径向同一层或列格点方程可以组建为三对角方程组,轴向从芯部层到辊面层,径向从左边列到右边列,通过追赶法对方程组进行快速求解。随时间变化,轧辊任一格点温度 $\theta(x, r, t)$ 的值可求解方程组得到,整个轧辊温度场分布可知。

2.2 边界条件的确定

工作辊边界换热条件非常复杂,包括工作辊与轴承换热、工作辊与空气换热、工作辊与冷却水换热、工作辊与铝带换热。当换热发生在轧辊边界时,外界传给单元的热量^[5]

$$Q_{out} = -h_0 S_0 (\theta_0 - \theta_{side}) \quad (8)$$

式中, h_0 代表 h_w 、 h_s 、 h_a ,分别为工作辊与冷却水、

轧件、空气的传热系数, θ_0 代表 θ_w 、 θ_s 、 θ_a ,分别为冷却水、轧件、空气的温度, θ_{side} 为单元边界温度, S_0 为单元侧表面积。 h_w 与 h_s 的取值参考文献[6-7],二者根据大量试验得出了冷却水、铝带与工作辊的传热系数关系,仿真试验中冷却水量的变化通过 h_w 变化得以体现。

$$h_a = 110 \frac{\kappa_a}{D} [(0.5 Re_w^2 + Gr_D) Pr]^{0.35} \quad (9)$$

式中, κ_a 为空气热导率,一般取 $0.02 \sim 0.03 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$; Re_w 为雷诺数, $Re_w = 0.2 \times 10^6 \sim 2.7 \times 10^6$; Gr_D 为格拉晓夫数, $Gr_D = 0 \sim 5.4 \times 10^{10}$; Pr 为普朗特数, $Pr = 0.9$ 。

2.3 工作辊热凸度模型

由于工作辊内部不均匀温度场,使辊身轴向产生不均匀热膨胀。轧制过程中工作辊表面热变形为

$$u(x, t) = \frac{4(1+\nu)\beta}{R} \int_0^R (\theta(x, r, t) - \theta') r dr \quad (10)$$

式中, $u(x, t)$ 为热胀量; ν 为泊松比; β 为材料线性热膨胀系数; R 为轧辊半径; $\theta(x, r, t)$ 为轧辊轴向距芯部 x 处,径向距芯部 r 处单元计算温度值; θ' 为轧辊初始温度。

3 板形控制性能仿真

为更加准确地描述工作辊热凸度对出口带材的影响,本文仅研究铝带覆盖范围内的工作辊热凸度变化规律,文献[8]将这部分热凸度定义为轧辊部分热凸度。根据现场工艺参数及辊缝凸度评价标准^[9],设计仿真计算工况具体如下。

(1) 铝带宽度为1 500 mm。

(2) 入口侧冷却水均匀分布等级分别为4级、6级、8级、10级。

(3) 出口侧冷却水分别呈二次抛物线分布、三次分布和四次分布。

(4) 出口侧水量分为25%、50%、75%、100%。

(5) 热凸度建立后,改变冷却水总流量5%、10%、25%、50%。

3.1 辊缝热凸度调节域

辊缝热凸度调节域反映了分段冷却系统对于工作辊热凸度的调节能力,包括二次热凸度、三次凸度和四次热凸度,反映在铝带上即为对中浪、边浪、单边浪、复合浪和1/4浪的调节能力。

当冷却水在极限工况下按平均和抛物线分布时,所得辊缝热凸度调节域如图5所示。可以看出,

使用最大冷却能力时, 冷却水二次分布时产生的热凸度小于各喷嘴水量全开所产生的热凸度, 取得了更好的冷却效果。这是因为轧制过程中工作辊中部散热效果最差, 温度较高; 边部散热效果好, 温度较低。若能按此规律调节冷却水的分布, 可以使轧辊在带材范围内膨胀更加均匀, 产生较小的部分热凸度。在冷却水的作用下, 工作辊部分热凸度最大为 $67.3 \mu\text{m}$, 最小为 $28.5 \mu\text{m}$ 。

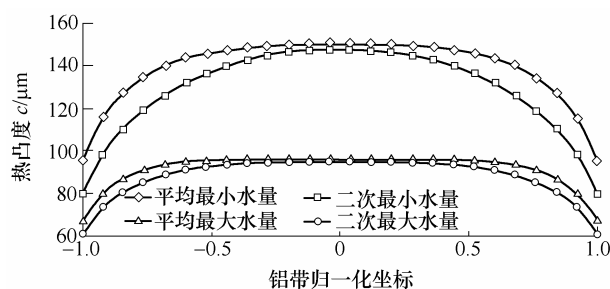


图5 热辊形二次凸度调节域

当冷却水按三次、四次极限工况分布时, 可以得到分段冷却系统对辊缝三次凸度和四次凸度的调节范围。如图 6 所示。三次凸度最大值为 $15.4 \mu\text{m}$, 由对称性可知, 三次凸度的最小值为 $-15.4 \mu\text{m}$ 。四次凸度最大值为 $23.5 \mu\text{m}$, 最小值为 $0.75 \mu\text{m}$ 。相比于弯辊控制技术, 分段冷却对于二次凸度的控制能力比较小, 而对三次凸度和四次凸度的控制能力较强, 故在进行断面厚度控制时, 分段冷却的主要控制目标应为高次厚度偏差。

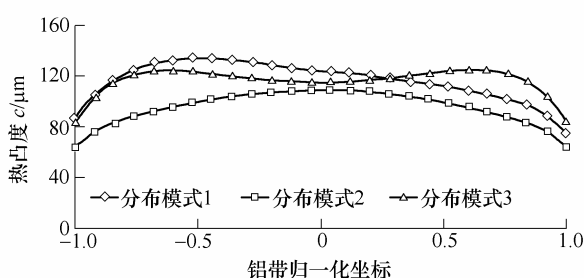


图6 热辊形三次、四次凸度调节域

3.2 边部控制能力

边降可定义为在轧制过程中板带边部在厚度上的减少量, 它是由圆柱形轧辊在轧制过程中产生的轧制载荷由加载区至无载区逐渐过渡而造成的结果。当入口侧喷射等级为 6 级时, 改变出口侧边部两个喷嘴水量分别为 0、50% 和 100% 得到工作辊热辊形曲线如图 7 所示。当水量从 0 调节到 50% 时, 边部热凸度变化量为 $16.6 \mu\text{m}$, 当水量从 50% 调节到 100% 时, 边部热凸度变化量为 $6.0 \mu\text{m}$, 随着冷却水量的增加, 边部厚度的变化总量为 $22.6 \mu\text{m}$ 。

分段冷却系统对铝带的边部控制能力在 0~50% 的水量区间内比较强, 在进行初始水量设定时, 应给边部控制留有裕量, 因此出口侧水量采用抛物线分布更为合理。

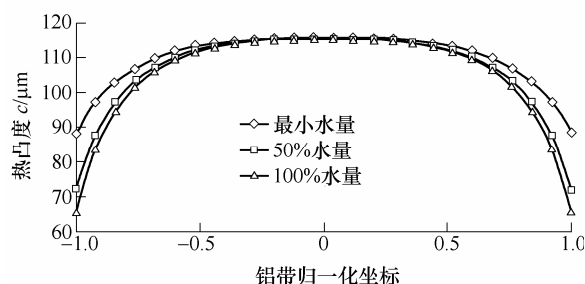


图7 边部控制能力研究

3.3 冷却水流量与热凸度的关系

从离散的角度讲, 工作辊热膨胀过程可以看成是各冷却段在相应冷却水的作用下产生热变形再与相邻冷却段互相叠加的过程。在可调冷却水量的范围内各冷却段之间的影响因数随轴向距离的增加呈 β 的指数级递减, β 与系统特性有关, 文献[10]将 β 取值为 0.21。这样, 只需要求出孤立冷却段冷却水量与热凸度的关系, 即可根据目标热凸度计算出各冷却段所需冷却水量。在轴向 6 级冷却水量平均分布的基础上, 分别改变工作辊铝带范围内边部、中部和 1/4 处的冷却水量, 等到冷却水对孤立冷却区段的影响如图 8 所示。

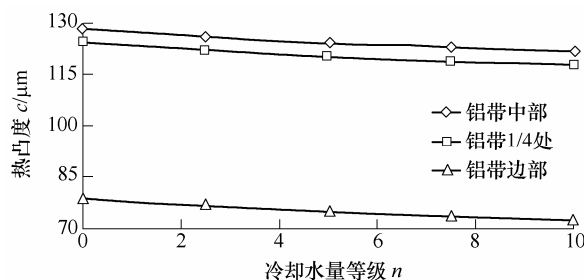


图8 冷却水量与热凸度关系

可以看出, 冷却水量对孤立区段热辊形的影响与其轴向坐标无关。即对于轧辊的各冷却段, 改变相同冷却水量引起的热凸度的变化量是一样的。随着冷却水的增加, 孤立区段的热凸度逐渐减小, 经数据拟合, 冷却水量与热凸度呈现良好的二次关系。

3.4 改变喷射等级后热凸度建立时间

当工作辊热凸度建立后, 分别将冷却水横向流量均匀增加 5%、10%、25%、50%, 得到工作辊热凸度变化图 9 所示。根据实际情况, 轧制一卷铝需要 280 s, 间歇时间为 140 s。改变冷却水量后, 前 5 卷铝带热凸度变化较大, 占总热凸度改变量的 40.8%~43.4%, 随后热凸度呈现缓慢变化的趋势。

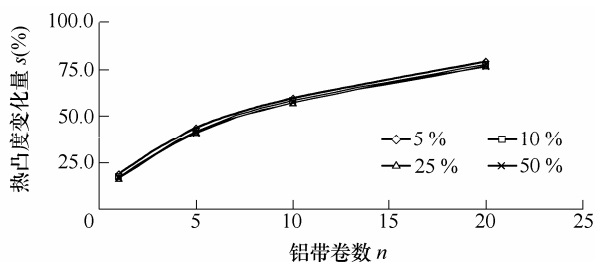


图9 不同冷却水量下热凸度变化历程

总体来说,在总的可调冷却水量的范围内,工作辊热凸度的变化是一个十分缓慢的过程,但是工作辊从一个稳态热凸度变化到另一个稳态热凸度所需时间及历程是类似的,即改变不同的冷却水量后热凸度的相对变化速度是相似的,仅随冷却水量的增加而略有下降。

通过图8可以得到不同冷却水量对应的最终稳态热凸度,由图9可以确定工作辊热凸度随时间的变化历程。这样就可以实现了分段冷却对于热辊形精确控制:在产生凸度偏差时,可以通过加大冷却水的改变量来加速获得所需要的局部或整体热凸度,在可预知的时间内,热凸度达到期望值,再根据图8中冷却水量与热凸度的对应关系重新设定冷却水量以保持所需热凸度。

4 结论

(1) 根据分段冷却设备的结构特点,建立了各冷却段水量单独可调的分段冷却系统数学模型,采用交替差分法求解传热微分方程,实现了冷却水不同流量不同分布下工作辊温度场及热膨胀的求解。

(2) 通过大量的模拟仿真,确定了分段冷却系统对工作辊二次凸度、三次凸度和四次凸度的调节能力分别为 $38.8\ \mu\text{m}$ 、 $30.8\ \mu\text{m}$ 和 $22.75\ \mu\text{m}$;确定边部控制能力在出口测冷却水量为 $0\sim 50\%$ 时达到最大。

(3) 通过仿真结果可以看出冷却水对工作辊热膨胀的控制能力与冷却段轴向位置无关;确定了冷却水量和热凸度之间的二次关系以及改变冷却水后工作辊热凸度变化规律,可实现分段冷却对于热辊形的精确控制。

参 考 文 献

- [1] 王国栋. 板形控制和板形理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986.
WANG Guodong. Shape control and shape theory[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1986.

- [2] TSENG A A, TONG S X. Thermal behavior of aluminum rolling[J]. Journal of Heat Transfer, 1990, 112(2): 301-308.
- [3] ATTACK P A, ROBINSON I S. An investigation into the control of thermal camber by spray cooling when hot rolling aluminum[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1994, 45(1): 125-130.
- [4] GINZBUIG V B. Application of cool flex model for analysis of work roll thermal conditions in hot strip mills[J]. Iron and Steel Engineer, 1997, 83(11): 38-42.
- [5] 杜凤山, 周维海, 臧新良. 板带热轧过程计算机仿真[J]. 机械工程学报, 2001, 37(12): 67-69.
DU Fengshan, ZHOU Weihai, ZANG Xinliang. Computer simulation of the hot continuous rolling of strip[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(12): 67-69.
- [6] OHNISHI A, TAKASHIMA H, HARAKI M. Characteristics of heat transfer of multi water spray nozzle[J]. The Iron and Steel Institute of Japan, 1987, 42(8): 296-299.
- [7] KANG Yuhua, LIU Yilun, HE Yuhui. An experimental and numerical study of heat transfer coefficient in deformation zone during hot rolling of aluminum alloy[C]//Mechanic Automation and Control Engineering International Conference, 2010: 5789-5791.
- [8] SUMI H. A numerical model and control of plate crown in the hot strip or plate rolling[J]. Advanced Technology of Plasticity, 1984(2): 1360-1365.
- [9] 何安瑞, 杨荃, 陈先霖, 等. 热带刚轧机线性变凸度工作辊的研制及应用[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11): 255-259.
HE Anrui, YANG Quan, CHEN Xianlin, et al. Development and application of linearly variable crown work roll in hot strip rolls[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(11): 255-259.
- [10] 乔俊飞, 郭戈, 柴天佑, 等. 轧辊局部冷却控制系统建模[J]. 钢铁研究学报, 1998, 10(3): 25-28.
QIAO Junfei, GUO Ge, CHAI Tianyou, et al. Modeling for partial cooling control system of rolls[J]. Journal of Iron and Steel Research, 1998, 10(3): 25-28.

作者简介: 郭新宇, 男, 1987 年出生。主要研究方向为轧机工作辊热行为。

E-mail: ustbguo@gmail.com

何安瑞(通信作者), 男, 1972 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为大型工业机械力学行为仿真及控制、板带轧制质量控制及自动化。

E-mail: harui@ustb.edu.cn