

## 铝板热轧工作辊温度场分析

高山凤, 郝安民, 刘鸿飞, 王超  
(北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 为使计算结果接近实际轧制中工作辊的热行为, 根据工作辊旋转一周依次经历不同的换热条件, 将工作辊圆周方向的坐标转换为时间坐标, 施加相应的边界条件. 通过对工作辊温度场的分析, 得出距工作辊表面 10 ~ 19 mm 的区域, 温度缓慢增加, 大于 19 mm 的区域温度几乎不变; 深度在 2 ~ 10 mm 之间的区域, 温度接近轴对称分布; 只有 1% 左右的区域即距表面小于 2 mm 的区域, 温度变化剧烈, 并且很快达到动态稳定. 轧制速度对距工作辊表面深度大于 2 mm 区域的温度影响很小; 在轧制节奏小于 0.5 时, 继续减小轧制节奏对工作辊温度的影响较小.

**关 键 词:** 工作辊; 温度; 轧制速度; 轧制节奏; 有限元

中图分类号: TG 333.7      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2015)10-1496-05

## Temperature Field of Hot Rolling Work-Roll for Aluminum Sheet

GAO Shan-feng, XI An-min, LIU Hong-fei, WANG Chao

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China.

Corresponding author: GAO Shan-feng, E-mail: shanfengcg@163.com)

**Abstract:** Upon the different heat transfer conditions experienced in a revolution, the coordinates of the circumferential direction of work-roll were converted to time coordinate, and the corresponding boundary conditions were added. These methods can make the results close to the thermal behavior of actual rolling. After analyzing the temperature field of work-roll, it shows that the temperature in the depth of 10 ~ 19 mm increases slowly, while keeps constant in the depth over 19 mm, as well as nearly axial symmetrical distribution in the depth of 2 ~ 10 mm. It can quickly reach dynamic stability after drastically changing in less than 2 mm depth namely about 1% area. Rolling speed of the work-roll has little effect on the temperature in the depth of greater than 2 mm. When the rolling rhythm is less than 0.5, reducing it will have little influence on the temperature of the work-roll.

**Key words:** work-roll; temperature; rolling speed; rolling rhythm; finite element

热轧铝板工作辊的温度受多种因素影响, 并且边界条件复杂, 是板形研究中的热点问题. 精确分析轧制过程中温度的变化规律是研究轧制过程中力能参数、组织变化的前提<sup>[1]</sup>. 因此, 轧制过程中有效控制工作辊温度, 对提高铝板质量有着重要作用.

目前对温度场变化规律研究的主要方法为有限元法和有限差分法, 有限差分法虽然有计算方

便、方程简单等优点, 但是仅适用于简单边界条件的求解. 有限元法能够更全面、方便地考虑工作辊轧制过程中的边界条件, 得到较精确的节点温度. 文献[2-7]分别采用有限差分法和有限元法对工作辊的温度分布规律及热凸度的变化情况进行分析. 文献[8-9]采用数值方法和有限元方法研究工作辊和轧件的温度分布和热应力. 本文考虑工作辊与铝板瞬态接触与瞬态换热条件, 将工作

收稿日期: 2014-04-11

基金项目: 内蒙古自治区战略性新兴产业专项资金项目(2012).

作者简介: 高山凤(1983-), 女, 天津人, 北京科技大学博士研究生; 郝安民(1957-), 男, 山西运城人, 北京科技大学教授, 博士生导师.

辊轴向坐标转换为时间坐标,根据实际轧制情况依次施加不同的换热条件,使模拟结果更接近实际,深入研究工作辊径向和轴向温度变化情况,以及轧制速度和轧制节奏对工作辊温度的影响。

## 1 工作辊的有限元模型

工作辊轴长 900 mm,直径 680 mm,建立工作辊 1/2 轴长的三维有限元模型,如图 1 所示。由现有研究成果知,距工作辊表面越近的区域,温度梯度越大<sup>[10]</sup>。为了提高运算速度又不影响结果的精度,采用六面体单元网格划分,将距表面深度小于 6% 半径区域内的网格细化。

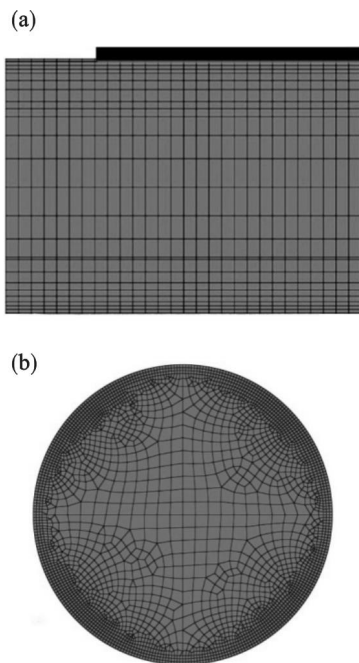


图 1 工作辊有限元模型

Fig. 1 Finite element model of work-roll

(a)—轴向; (b)—圆周方向。

## 2 工作辊的换热条件

热连轧生产过程中,由于工作辊温度分布不均匀,会引起工作辊不同的热凸度,导致工作辊辊形发生变化,进而影响板形质量,降低工作辊的使用寿命。轧制温度计算的关键问题在于边界条件的处理,包括工作辊转动中传热、冷却区域的划分、边界条件及相关参数的选择和确定、边界条件的处理模式及等效方式的确定等<sup>[11]</sup>。

由于工作辊旋转过程中换热边界条件复杂,需要将一些热交换形式简化,如图 2 所示。将工作辊换热边界条件简化为 5 种情况:①a ~ b 区域,工作辊与铝板接触传热是工作辊温度升高的主要

热量来源;②e ~ f 区域,空气自然冷却;③c ~ d 和 g ~ h 区域,挡水板间的积水与工作辊之间的强制对流换热;④d ~ e 和 f ~ g 区域,冷却水直接冷却,是工作辊的主要冷却途径;⑤b ~ c 和 h ~ a 区域为辐射换热区域。

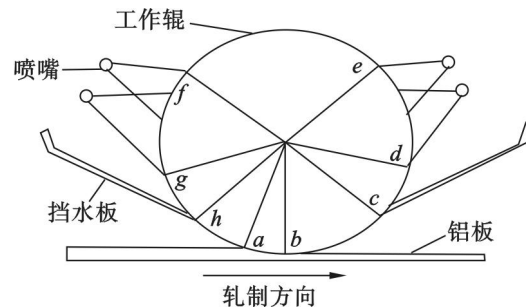


图 2 工作辊圆周方向换热边界条件

Fig. 2 Heat transfer boundary condition of circumferential direction for work-roll

## 3 工作辊温度场模拟中关键系数的确定

### 3.1 与铝板的接触换热系数

工作辊与铝板的接触传热是工作辊传热过程中最复杂的,这是因为,在接触区内存在氧化铁皮、冷却水、润滑油等介质,同时由于实际的接触面积很小而且是非光滑接触。由文献[4,12]并根据本文研究的实际情况,采用的换热边界条件由以下公式计算得出:

$$q = h_s(t_s + \Delta t_{\text{def}} - t_w) + \frac{2}{3}q_{\text{fr}} = -K_w \frac{\partial t_w}{\partial r} \bigg|_{r=R_w} \quad (1)$$

式中: $h_s$ ,  $t_s$ ,  $\Delta t_{\text{def}}$ ,  $t_w$ ,  $q_{\text{fr}}$ ,  $K_w$  分别为铝板与工作辊之间的换热系数、铝板温度、铝板变形温升、工作辊温度、摩擦热流密度及工作辊的导热系数。

$$\Delta t_{\text{def}} = \frac{1}{\rho_s c_s} \sigma_{\text{def}} \ln \left( \frac{H_i}{H_o} \right), \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{def}} = 1.644 \exp \left[ \frac{8.53 \times 10^3}{491 + 1.8 t_s} \right] + 17.927 \ln \varepsilon \quad (3)$$

式中: $\rho_s$ ,  $c_s$ ,  $H_i$ ,  $H_o$ ,  $\varepsilon$ ,  $t_s$  分别为铝板密度、铝板比热容、铝板进口厚度、铝板出口厚度、铝板辐射系数及铝板温度。

$$q_{\text{fr}} = V_{\text{rel}} \mu P, \quad (4)$$

$$V_{\text{rel}} = \frac{1}{2} V_w (S_f + S_b \cos \Phi), \quad (5)$$

$$\mu = 4.86 \times 10^{-4} t_s - 0.0714 \quad (6)$$

式中: $V_{\text{rel}}$ ,  $P$ ,  $V_w$ ,  $S_f$ ,  $S_b$ ,  $\Phi$  分别是工作辊与铝板的相对速度、轧制压力、工作辊的速度、前滑移系数、后滑移系数及咬入角。

### 3.2 与冷却水的热交换系数

工作辊的热量主要通过冷却水带走,对流换

热系数  $h_c$  与冷却水的喷射压力、温度、密度及喷嘴与工作辊表面的距离等因素有关。在考虑影响因素的基础上,工作辊与冷却水的对流换热系数的计算式如下<sup>[11]</sup>。

1) 当工作辊表面温度  $u_w < 100$  °C 时,

$$h_{c1} = 6870 \times Q^{0.19} P_{sp}^{0.27} \times \gamma. \quad (7)$$

2) 当工作辊表面温度  $u_w > 200$  °C 时,

$$h_{c2} = 2.90 \times 10^6 \times Q^{0.08} P_{sp}^{0.05} \frac{B}{200 - u_{cw}} \times \gamma. \quad (8)$$

3) 当工作辊表面温度  $100$  °C  $\leq u_w \leq 200$  °C 时,

$$h_{c3} = \frac{200 - u_w}{100} \times h_{c1} + \frac{u_w - 100}{100} \times \frac{200 - u_{cw}}{u_w - u_{cw}} h_{c2}. \quad (9)$$

式中:  $u_{cw}$  为冷却水温度;  $Q$  为冷却水密度,  $Q = V_{sp}/A_{sp}$ ,  $V_{sp}$  为冷却水量,  $A_{sp}$  为喷射面积;  $P_{sp}$  为喷射压力。当  $Q < 10 \times 10^4 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^{-2})$  时,  $B = (u_{cw}/16)^{-0.17}$ ; 当  $Q \geq 10 \times 10^4 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^{-2})$  时,  $B = 1$ , 根据实际喷射情况, 令  $\gamma = 1.01$ 。

### 3.3 挡水板积水与工作辊的对流换热

在轧件上方沿工作辊轴向设有挡水板, 如图 2 所示。使冷却液从工作辊两侧流出, 不仅能够提高对工作辊的冷却作用, 同时避免冷却液喷射到轧件表面。挡水板上存在的积水与工作辊之间的换热系数  $h_{ww}$  的计算式为<sup>[11]</sup>

$$h_{ww} = 0.023 \cdot Re^{0.8} P_{rcw}^{0.4} \frac{\lambda_w}{l_{ww}}, \quad (10)$$

$$Re = \frac{V_r l_{ww}}{v_{cw}}, \quad (11)$$

$$P_{rcw} = \frac{\rho_w c_w v_{cw}}{\lambda_w}. \quad (12)$$

式中:  $Re$  为雷诺数;  $P_{rcw}$  为挡水板积水的 Prandtl 常数;  $l_{ww}$  为挡水板积水与工作辊接触弧长;  $\lambda_w$  为水的导热系数;  $c_w$  为冷却液的比热容;  $v_{cw}$  为冷却液流动黏度;  $\rho_w$  为冷却液的密度。

### 3.4 辐射换热

在轧制过程中, 轧件入口处与工作辊  $b \sim c$  区域及轧件出口处与工作辊  $h \sim a$  区域分别形成辐射换热区域。轧件温度  $t_s = 530$  °C, 周围环境温度  $t_a = 30$  °C。辐射传热及对流换热系数的计算式为

$$q = \sigma \varepsilon [(t_s/100)^4 - (t_a/100)^4] \times 1.163, \quad (13)$$

$$h_r = [q/(t_s - t_a)] \times 1.163. \quad (14)$$

式中:  $\sigma$  为辐射系数;  $\varepsilon$  为辐射率。

## 4 工作辊温度场分析

对图 2 所示分区的边界进行逐一处理, 模拟

热轧铝板两道次的连续轧制, 工作辊初始温度为 50 °C, 比热容为 450 J/(kg · K), 密度为 7 800 kg/m<sup>3</sup>, 弹性模量和泊松比分别为 2.06 GPa 和 0.3; 轧制某同等宽度的铝板, 其宽度为 680 mm; 铝板初始温度为 530 °C, 轧制速度为 2.5 m/s, 轧制时间与间歇时间均为 30 s。

### 4.1 工作辊径向温度分析

轧制过程分为轧制期和轧制间歇期, 两个阶段中工作辊的换热边界条件不同, 温度变化也不同。工作辊中心横截面处距表面不同深度的节点, 即 0 (工作辊表面), 2, 4, 6, 8, 10, 16 及 19 mm 等处温度随时间的变化曲线, 如图 3 所示。由图 3 可知: ①工作辊表面温度波动最大, 随着深度增加, 温度波动幅度越来越小, 原因是工作辊表面直接与铝板和冷却液、空气接触, 温度变化快; 而热量的传递过程需要一定的时间, 导致内部温度变化缓慢。②轧制期内, 据工作辊表面不同深度区域之间的平均温差随着深度的增加而减小, 工作辊表面与深度为 2 mm 处的平均温差为 37.2 °C, 距工作辊表面深度 4 mm 处与深度为 2 mm 处的平均温差为 15.5 °C, 而深度为 10 mm 处与深度为 8 mm 处的平均温差仅为 2.4 °C。③在模拟的时间范围内, 深度大于 10 mm 的区域温度在轧制期和轧制间歇期循环过程中, 一直是缓慢上升, 温度很难达到稳定。

### 4.2 工作辊轴向温度分布

图 4 为不同时间工作辊表面轴向温度变化曲线。由图 4 可知: ①工作辊与铝板接触边界附近温度变化速度快, 即图中横坐标 300 ~ 340 mm 的区域内; ②工作辊循环经历轧制期和间歇期, 第一个轧制期结束时 (30 s), 工作辊表面温度达到最大值 165 °C, 经过间歇期后温度会降到 60 °C 左右; ③随着时间的增加, 工作辊轴向温度将达到稳定的状态, 此时可以得到轴向稳定温度曲线, 工作辊中部温度在 130 °C 左右。

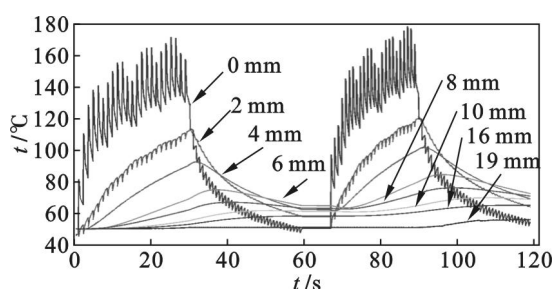


图 3 工作辊内部不同深度节点温度

Fig. 3 Temperature of work-roll with different depths



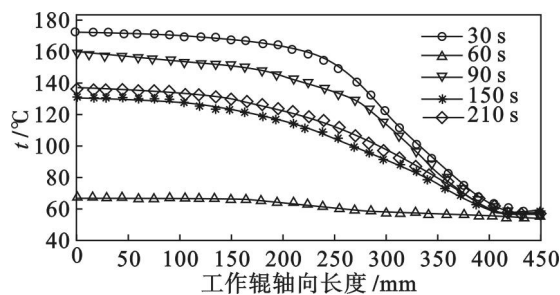


图 4 工作辊轴向温度

Fig. 4 Axial temperature of work-roll

## 5 不同因素对工作辊温度的影响

轧制过程中工作辊温度受多种因素的影响,对影响因素的研究,可进一步提高工作辊温度控制的准确性,提高预测精度。

### 5.1 轧制速度的影响

在其他轧制条件相同的情况下,图 5 为距工作辊表面不同深度处节点温度随轧制速度的变化曲线。由图 5 可知:①轧制速度越慢,工作辊温度越高,原因是轧制速度越慢,工作辊与轧件接触的时间越长,工作辊吸收的热量越多;②随着轧制速度的增大,工作辊表面温度达到动态平衡的时间

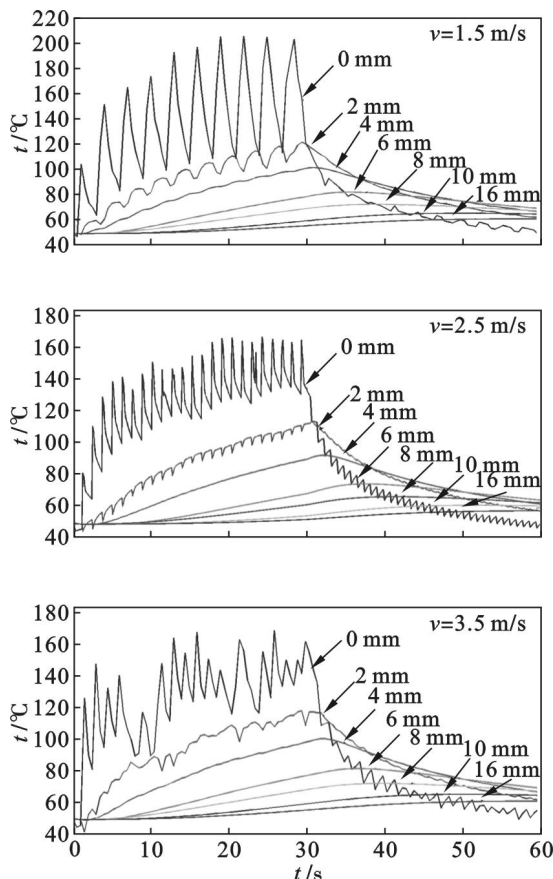


图 5 不同轧制速度的工作辊温度

Fig. 5 Temperature of work-roll with different rolling speeds

越长,速度为 3.5 m/s 时,温度在 30 s 的轧制期内,表面温度没有达到动态平衡,而轧制速度为 1.5 和 2.5 m/s 时,表面温度达到动态稳定的时间分别为 14 和 18 s 左右;③距表面越深的区域,温度变化规律受轧制速度的影响越小,在距表面 2 mm 内的区域,受轧制速度影响大;对距表面深度大于 2 mm 处的区域,影响较小,轧制速度的影响具有“浅层效应”。图 6 为工作辊轴向温度随轧制速度的变化曲线,随着轧制速度的增加,工作辊轴向温度变化趋势相同,即工作辊两边温度低,且从工作辊与铝板接触区域附近 ( $x = 350$  mm) 到  $x = 200$  mm 左右的区域内为温度上升区,中间区域温度高且平稳。

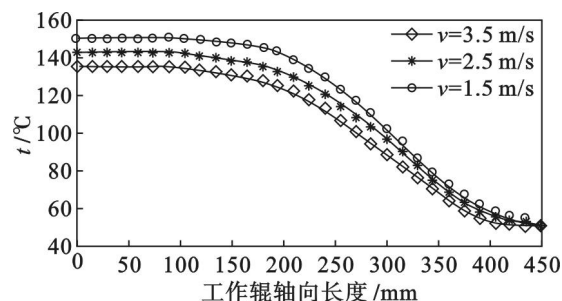


图 6 不同轧制速度时工作辊轴向温度曲线

Fig. 6 Axial direction temperature of work-roll with different rolling speeds

### 5.2 轧制节奏的影响

模拟轧制时间为 30 s,轧制间歇时间为 10, 30, 40 和 50 s,即轧制节奏  $K$  分别为 0.75, 0.5, 0.43, 0.375。图 7 为连续经历两个轧制期和一个间歇期,工作辊温度随轧制节奏的变化曲线。由图 7 可知:轧制节奏越小,工作辊与铝板接触区域温度波动范围越大,中部最高温度越低,为了使接触区域温度波动范围小且工作辊温度低,轧制节奏选取在 0.43 ~ 0.5 范围内较好。图 8 为不同轧制节奏,工作辊内部距表面不同深度区域的温度。轧制节奏为 0.75,轧制间歇期结束时,工作辊温度大于初始温度,导致进入下一个轧制期时,温度高于前一个轧制期的温度;轧制节奏为 0.5 时,即轧制间歇时间为 30 s 时,工作辊表面温度可降低至初始温度,并且工作辊表面温度达到动态稳定的时间也较短;轧制节奏为 0.43 时,工作辊温度低于初始温度,与轧制节奏为 0.5 时相比,工作辊温度降低幅值很小;说明继续减小轧制节奏,对工作辊的温度影响较小,在实际轧制过程中,为提高轧制效率轧制间歇时间可控制在 30 s 内。

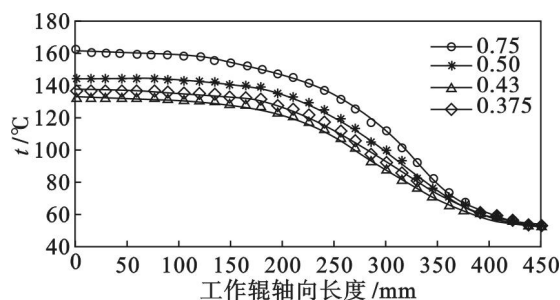


图 7 不同轧制节奏时工作辊轴向温度

Fig. 7 Axial direction temperature of work-roll at different rolling rhythms

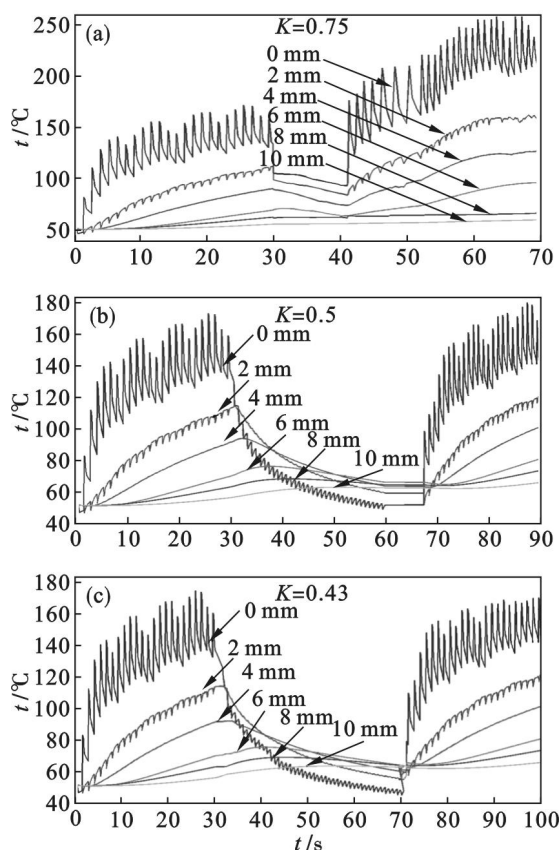


图 8 不同轧制节奏时工作辊温度

Fig. 8 Temperature of work-roll at different rolling rhythms

## 6 结 论

1) 工作辊表面温度波动大,最高温度达到 165℃左右,并且达到动态稳定的时间为 18 s 左右;距表面深度 10~19 mm 内的区域温度始终是缓慢上升的,很难达到稳定状态,在连续轧制 120 s 内,最高温度为 64℃。

2) 随着深度的增加,工作辊径向温差减小,工作辊表面与深度为 2 mm 处的平均温差为 37.2℃,而深度为 10 mm 处与深度为 8 mm 处的平均温差仅为 2.4℃。

3) 随着轧制速度的增加,工作辊表面温度达

到动态稳定的时间增加,且距表面深度大于 2 mm 的区域,温度受轧制速度的影响很小。

4) 综合考虑轧制节奏对工作辊温度和轧制效率的影响,在满足现场轧制条件的情况下,轧制间歇时间在 30 s 左右较好。

### 参考文献:

- [1] Hashimoto M, Oda T, Hokimoto K, et al. Development and application of high-speed tool steel rolls in hot strip rolling [J]. *Nippon Steel Technical Report*, 1995, 66: 82-90.
- [2] Park C M, Kim W S, Park G J. Thermal analysis of the roll in the strip casting process [J]. *Mechanics Research Communications*, 2003, 30(4): 297-310.
- [3] Wang S R, Tseng A A. Macro- and micro-modeling of hot rolling of steel coupled by a micro-constitutive relationship [J]. *Iron and Steelmaker*, 1996, 32(9): 49-61.
- [4] Abbaspour M, Saboonchi A. Work roll thermal expansion control in hot strip mill [J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2008, 32(12): 2652-2699.
- [5] Serajzadeh S, Mucciardi F. Modeling the work-roll temperature variation at unsteady condition [J]. *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2003, 11(2): 179-194.
- [6] 汪涓,曹燕,郝振宇,等. 热轧工作辊温度场有限元分析 [J]. *热加工工艺*, 2013, 42(3): 102-104.  
(Wang Juan, Cao Yan, Hao Zhen-yu, et al. Finite element analysis on temperature field of work roll in hot rolling strip mill [J]. *Hot Working Technology*, 2013, 42(3): 102-104.)
- [7] 孔祥伟,李壬龙,王秉新,等. 轧辊温度场及轴向热凸度有限元计算 [J]. *钢铁研究学报*, 2000, 12(sup1): 51-54.  
(Kong Xiang-wei, Li Ren-long, Wang Bing-xin, et al. FEM calculation of temperature field and axial thermal crown for work roller [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2000, 12(sup1): 51-54.)
- [8] Sonboli A, Serajzadeh S. A model for evaluating thermo-mechanical stresses within work-rolls in hot-strip rolling [J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 2012, 72(1): 73-85.
- [9] Sonboli A, Serajzadeh S. Prediction of thermal stresses and temperature field in work rolls during hot strip rolling process [J]. *Materials Science and Technology*, 2010, 26(3): 343-351.
- [10] Benasciutti D, Brusa E, Bazzro G. Finite elements prediction of thermal stresses in work roll of hot rolling mills [J]. *Procedia Engineering*, 2010, 2(1): 707-716.
- [11] 李维刚,刘相华,郭朝晖. 带钢热连轧工作辊温度场与热凸度的数值模拟 [J]. *中国有色金属学报*, 2012, 22(11): 3176-3185.  
(Li Wei-gang, Liu Xiang-hua, Guo Zhao-hui. Numerical simulation of temperature field and thermal crown of work roll during hot strip rolling [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(11): 3176-3185.)