

# 基于多目标遗传算法的工作辊温度场计算与分析

居龙<sup>1)</sup>, 李洪波<sup>1)✉</sup>, 张杰<sup>1)</sup>, 胡超<sup>2)</sup>, 张超<sup>2)</sup>, 陈良<sup>2)</sup>

1) 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083 2) 武汉钢铁(集团)公司, 武汉 430083

✉ 通信作者, E-mail: lihongbo@ustb.edu.cn

**摘要** 等效换热系数是热连轧机工作辊温度场仿真模型的核心输入参数,多采用遗传算法优化得到,某1800 mm热连轧机存在品种、规格交替轧制,等效换热系数的准确计算比较困难.选取多组典型工艺条件下的工作辊下机后表面温度作为优化目标,采用多目标遗传算法进行优化,并通过改变遗传算子有效避免了算法早熟及局部收敛等问题,获取了具有较强适应性的等效换热系数.仿真和实测数据的对比结果证明了优化模型的可靠性.利用仿真模型分析了主要工艺参数对工作辊热凸度的影响,并提出同宽交替时,工作辊热凸度随轧制进程呈指数变化,而在品种、规格交替编排轧制工艺下相邻带钢轧制时工作辊热凸度存在6~21.8 μm的波动,且随轧制进程趋于稳定.

**关键词** 热轧机; 轧辊; 温度场; 换热系数; 遗传算法; 多目标优化

**分类号** TG 333.17

## Work roll temperature field calculation and analysis based on multi-objective genetic algorithm

JU Long<sup>1)</sup>, LI Hong-bo<sup>1)✉</sup>, ZHANG Jie<sup>1)</sup>, HU Chao<sup>2)</sup>, ZHANG Chao<sup>2)</sup>, CHEN Liang<sup>2)</sup>

1) School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Wuhan Iron & Steel (Group) Corp., Wuhan 430083, China

✉ Corresponding author, E-mail: lihongbo@ustb.edu.cn

**ABSTRACT** Equivalent heat transfer coefficients are key input factors for work roll temperature field analysis models in hot strip rolling, and the coefficients are usually calculated with genetic algorithms, but the rolling process of alternating material and width in a work roll service period for a 1800 mm hot strip rolling mill makes the coefficients difficult to be calculated accurately. The surface temperature distributions of a serviced work roll under multiple rolling schedules were taken as the optimization goals, and the equivalent heat transfer coefficients with a higher adaptability were obtained by using a multi-objective genetic algorithm. The optimizing process was improved by changing the genetic operators, which avoided the disadvantages of premature convergence and local convergence. The optimization model was proved effectively by comparing the simulation results with measured data. The effects of rolling parameters on the thermal crown were analyzed with the optimization model. It is predicted that under alternating width rolling, the thermal crown exponentially increases; but under alternating material and width rolling schedules, the thermal crown has a fluctuation of 6 to 21.8 μm between the continuous two strips, and towards stability gradually.

**KEY WORDS** hot rolling mills; rolls; temperature field; heat transfer coefficient; genetic algorithms; multi-objective optimization

在板带热连轧生产中,工作辊的热变形是影响带钢板形控制的重要因素之一.工作辊温度场影响因素众多,边界条件复杂而难以精确计算,工作辊温度场模型中的关键参数——等效换热系数,对模型预报的能力及精度有较大影响.以往的研究主要采

用一维或二维有限差分法建立单一工艺条件下预报模型,并通过遗传算法对换热系数进行优化<sup>[1-3]</sup>.但随着轧制品种、规格的变化,轧制工艺亦趋于复杂,使用单一工艺条件下的遗传优化算法所得出的换热参数无法满足对多变工况下热辊形的预报.在

收稿日期: 2013-09-08

基金项目: 北京科技大学冶金研究基金资助项目(YJ2010-010)

DOI:10.13374/j.issn1001-053x.2014.09.018; http://journals.ustb.edu.cn

某 1800 mm 热连轧生产中,品种、规格交替编排轧制是其生产中的典型工艺,工作辊热凸度的精确预报对辊缝凸度调节及带钢断面质量控制具有重要的意义. 因此,本文通过选取多样化工艺条件轧制下工作辊的下机温度作为优化目标,对边界换热系数采用多目标遗传算法进行优化,以分析多规格交替编排轧制下工作辊温度场的特性.

## 1 工作辊温度场数学模型描述

### 1.1 边界条件

由于影响热轧工作辊温度场的因素较多且异常复杂,很难准确描述,但几何形状对称,热边界的变化具有较严格的周期性,因此可在工程计算中对实际边界进行适当简化. 本文研究的是由温度引起的热变形问题,对发生在轧辊表层上的周向温度波动进行简化,忽略温度场沿周向的变化,将工作辊的温度场按二维问题求解,因此工作辊的热传导方程简化为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (1)$$

式中,  $\rho$ 、 $c$  和  $k$  分别为材料密度、比热容和导热系数,  $r$  和  $z$  分别为轧辊轴向和径向坐标,  $t$  为换热时间,  $T$  为工作辊温度.

如图 1 所示,对工作辊沿圆周方向的热交换状态进行简化,可以等效为 5 类情况、10 个区域,分别

为与轧件热交换(A-B)、热辐射(B-C, J-A)、空气冷却(C-D, E-F, G-H, I-J)、与支持辊热交换(F-G)以及水冷却(D-E, H-I)<sup>[4]</sup>.

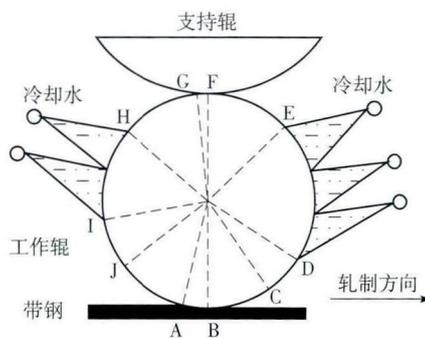


图 1 工作辊边界条件示意图<sup>[4-5]</sup>

Fig. 1 Schematic of work roll boundary conditions<sup>[4-5]</sup>

### 1.2 输入参数

工作辊温度场模型的输入参数可以分为两类: 第一类参数为已知参数,可以直接获取或者通过一定的公式计算求得,其中随着轧制工况不同,又可分为可变输入参数和不变输入参数,主要参数如表 1 所示,不变参数主要指工作辊几何、物理参数等;第二类参数为待定参数,主要有工作辊与带钢的等效换热系数  $h_s$ 、与冷却水的等效换热系数  $h_w$  以及与空气的等效换热系数  $h_a$ ,以上系数可根据实际生产中采集的工艺数据及工作辊实测温度,利用数学模型进行计算得出.

表 1 模型主要输入参数

Table 1 Main input parameters in modeling

不变参数						可变参数					
轧辊长度/mm	轧辊直径/mm	横向单元数	纵向单元数	线膨胀系数/ $^{\circ}\text{C}^{-1}$	比热容/ $(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1})$	轧制时间/s	间歇时间/s	带钢宽度/mm	带钢温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷却水温度/ $^{\circ}\text{C}$	下机冷却时间/min
2000	600	100	20	$1.1 \times 10^{-5}$	$0.54 \times 10^3$	80 ~ 120	$\geq 80$	1000 ~ 1500	850 ~ 1050	15 ~ 40	10 ~ 30

## 2 换热系数多目标优化设计

### 2.1 数学描述

多目标优化问题包括了目标函数、待求变量和约束条件,一般的数学表达形式如式(2)所示,其中  $X$  为决策向量,  $f(x)$  为目标向量<sup>[5]</sup>:

$$\begin{cases} \min f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_i(x)]^T, \\ \text{s. t. } x \in X, \\ X \subset \mathbb{R}^m. \end{cases} \quad (2)$$

解决多目标优化问题关键是在约束范围内寻求各个目标之间的合理协调,根据一定的规则找到全局意义上的最优点.

### 2.2 算法设计

遗传算法是一种模拟自然进化过程的随机优化

方法,该算法作为模仿自然选择、优胜劣汰生物进化过程的方法,由于其鲁棒性、全局收敛等优越特征,为多目标优化问题提供了一种有效的求解途径.

#### 2.2.1 目标工艺的确定

在温度场换热系数优化过程中,选择不同工艺参数轧制下得到的下机工作辊实测温度作为优化参考,使计算辊面温度与实测辊面温度差最小,从而得到准确且适应性强的换热系数.

本文采集了某 1800 mm 热连轧机组五种不同轧制条件下(如表 2 所示,依次标记为 1# ~ 5#), F6 机架工作辊下机 15 min 后的温度测量值(如图 2 所示)作为优化目标. 由图 2 可以看出,在不同的轧制条件下,工作辊下机温度的分布形态呈现了一定的多样性,包含了典型的“钟型”与“箱型”<sup>[6]</sup>.

表 2 实际轧制工艺选取  
Table 2 Selection of rolling processes

工艺	轧制类型	宽度/mm	厚度/mm	温度/℃	速度/(m·s <sup>-1</sup> )
1#	宽厚板	1537	8.75	882	2.87
2#	中宽板	1276	1.66	903	7.35
3#	窄薄板	1059	3.7	911	7.23
4#	同宽交替	1305	3.31	910	5.39
		1306	3.82	913	6.41
5#	宽窄交替	1310	3.19	914	5.97
		1535	8.76	907	2.75

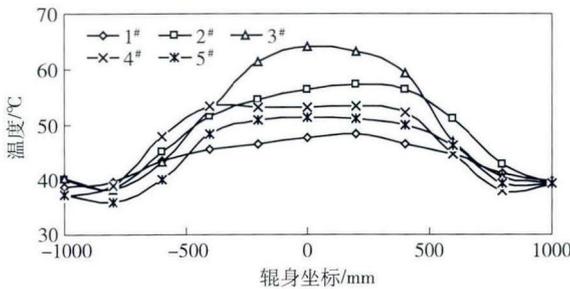


图 2 目标工艺条件下工作辊下机温度分布

Fig. 2 Temperature distributions of the work roll for selected rolling processes

2.2.2 适应度函数标定

适应度函数的设计依赖优化问题的目标函数，并且直接影响到遗传算法的性能。在多目标遗传算法中，确定了适应度函数如下式：

$$f = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \left[ w_j \times \sum_{i=1}^n (\Delta T_i^j)^2 \right] + 0.01} \quad (3)$$

式中： $m$  为参与多目标优化的工艺条件数量； $n$  为轧辊温度的测试点个数； $\Delta T_i^j$  为第  $j$  类工艺条件下，第  $i$  个测试点温度计算值与测量值之差； $w_j$  为权重系数，

$$\sum_{j=1}^m w_j = 1.$$

2.2.3 遗传算法参数控制

通常，对于复杂问题，简单遗传算法易过早地收敛于局部最优解。出现此类问题的关键在于算法在进行到一定的代数时，在种群中出现某个个体适应度值远远大于其他个体，霸占了整个解空间。

交叉概率( $p_c$ )决定了新个体产生的快慢程度：交叉率大，父代旧个体模式易破坏，产生新个体的速率高；而交叉率小，则会延缓新个体的产生，导致算法停滞不前。变异概率( $p_m$ )是决定算法不陷入局部解的一个重要操作，通过变异操作，可生成新的个体模式；变异率偏小，则难以生成新个体模式；变异率过大，将使得搜索随机性增大<sup>[7]</sup>。能够判断进化程

度的重要指标是个体适应度与最大适应度、平均适应度之间的关系。因此，根据文献[5]，引入式(4)和式(5)所示的交叉率和变异率的自适应调整算法，使其随着个体适应度的变化进行调整，从而在提高群体多样性的同时，保证算法的收敛性。

$$\begin{cases} P_c = k_1, & f' < f_{avg}; \\ P_c = k_1 - \frac{(k_1 - k_3)(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f' \geq f_{avg}. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} P_m = k_2, & f' < f_{avg}; \\ P_m = k_2 - \frac{(k_2 - k_4)(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f' \geq f_{avg}. \end{cases} \quad (5)$$

式中， $0 \leq k_1, k_2, k_3, k_4 \leq 1$ ，为交叉率和变异率的预设参数， $f$  为需变异个体的适应度值， $f'$  为需交叉个体的适应度值， $f_{max}$  为群体中最大适应度值， $f_{avg}$  为平均适应度值。选取  $k_1 = 0.9, k_2 = 0.1, k_3 = 0.6, k_4 = 0.001$ 。

3 模型优化结果与分析

3.1 模型验证

遗传算法模型设定初始种群大小 45，运算 100 代，适应度终止极值为  $10^{-6}$ ，并使用以上讨论的遗传操作及适应度函数，最终优化得到换热系数个体。为了验证换热系数及温度场仿真模型的准确性及适用性，对表 2 所选取的目标工艺条件下工作辊下机温度实测值与计算值进行对比(如图 3 所示)。可以看出，温度场模型计算得到的工作辊表面温度值与实测值吻合较好，误差在  $\pm 5$  °C 以内(如图 4 所示)，并且分布形态能够反映带钢轧制过程中的工艺特性，如带钢宽度和工作辊窜辊情况。

3.2 可变输入参数对温度场的影响

热辊形仿真问题具有一定的不确定性，主要包含了输入参数和设计变量的变化，以及模型本身假设条件的有效性，可变参数的变化情况对热辊形的计算结果具有十分重要的影响<sup>[8-9]</sup>。为了衡量和对比分析可变参数对热辊形的影响，使用本文所建立的温度场模型，分别计算了轧制时间(分别取 80、90、100、110 和 120 s，间歇时间取 80 s，带钢温度取 950 °C，带钢宽度取 1300 mm)、间歇时间(分别取 80、100、120、140 和 160 s，轧制时间取 100 s，带钢温度取 950 °C，带钢宽度取 1300 mm)、带钢温度(分别取 850、900、950、1000 和 1050 °C，轧制时间取 100 s，间歇时间取 80 s，带钢宽度取 1300 mm)和带钢宽度(分别取 1000、1100、1200、1300、1400 和 1500 mm，轧制时间取 100 s，间歇时间取 80 s，带钢温度取 950 °C)对工作辊热凸度的影响程度，计算结果如图 5 所示。

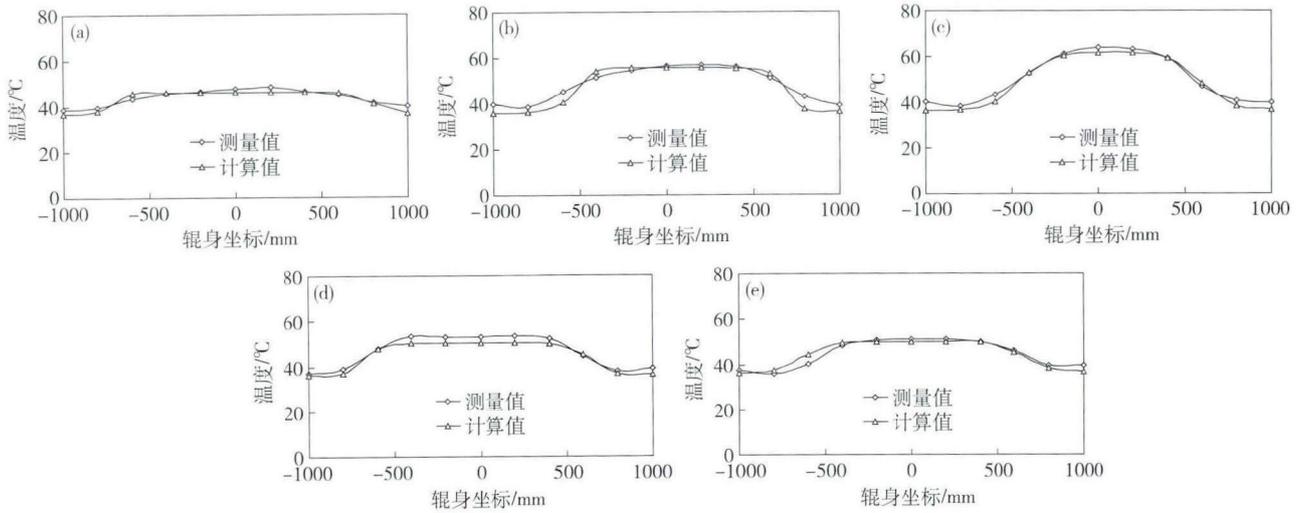


图3 工作辊表面温度计算值与实测值对比. (a) 1#; (b) 2#; (c) 3#; (d) 4#; (e) 5#

Fig. 3 Contrast between computed values and measured data for work roll surface temperature: (a) 1#; (b) 2#; (c) 3#; (d) 4#; (e) 5#

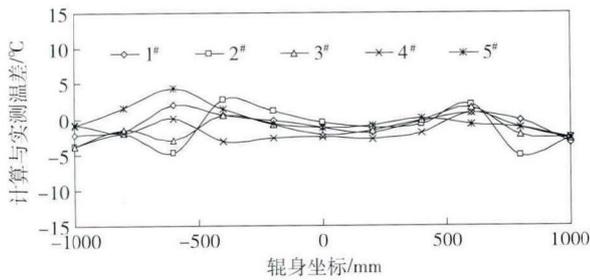


图4 工作辊表面温度计算误差

Fig. 4 Computation error of work roll surface temperature

从图 5(a) 和 5(b) 可知, 轧制节奏直接反映了工作辊在线进行热交换的时间, 对工作辊热凸度的影响最为明显; 图 5(c) 为工作辊热凸度随带钢温度的

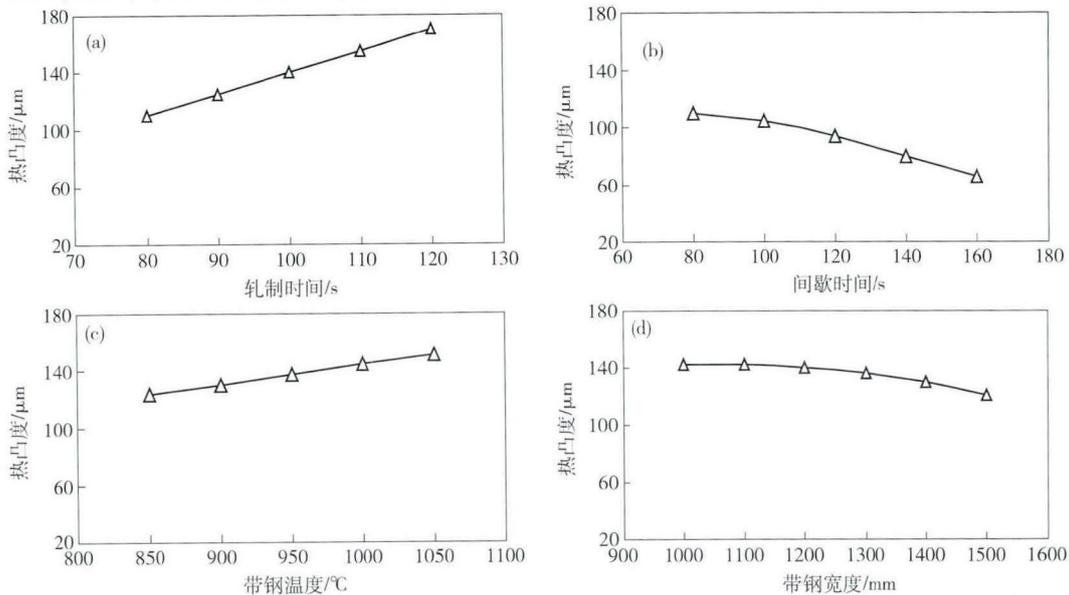


图5 可变输入参数对热凸度的影响. (a) 轧制时间; (b) 间歇时间; (c) 带钢温度; (d) 带钢宽度

Fig. 5 Influence of variable input parameters on the thermal crown: (a) rolling time; (b) interval time; (c) strip temperature; (d) strip width

的变化趋势, 可以看出带钢温度对热凸度也具有较大的影响, 在实际轧制工艺中, 从 F1 机架到 F7 机架带钢轧制温度下降可达 150 °C, 而在轧制单位内, 不同规格带钢轧制温差可达 20 °C; 图 5(d) 表明随着带钢宽度增加, 工作辊中部热凸度呈现下降趋势, 在所轧制品种宽度范围内, 工作辊中部热凸度变化可达 30 μm.

### 3.3 交替编排轧制过程热凸度分析

在某 1800 mm 热连轧生产中, 同宽轧制情况较为普遍, 但也常出现不同钢种及规格的产品交替编排轧制. 在轧制过程中, 过程控制系统对两炉板坯分别计算得到过程控制参数, 如轧制力和轧制速度; 但由于不同带钢宽度、温度、工作辊窜辊位置、轧制

节奏等因素综合影响下,工作辊温度场及热凸度的变化变得更为复杂.以表3常用两类交替编排轧制工况为例,计算了工作辊中点热凸度变化.

表3 交替编排轧制参数

Table 3 Parameters of multiple strip rolling

轧制工况	宽度/mm	厚度/mm	带钢温度/℃	轧制速度/(m·s <sup>-1</sup> )
同宽交替	1306	3.82	911	6.33
	1305	3.19	913	6.04
宽窄交替	1535	6.37	908	3.68
	1310	3.19	914	5.97

在轧制过程中,工作辊中点热凸度变化大致呈指数规律,并随着轧制过程的进行趋于稳定<sup>[10]</sup>.图6为不同类型交替轧制工作辊热凸度变化趋势.从同宽交替下热凸度变化规律可见:虽带钢品种不同,但轧制宽度、厚度和温度均接近,因此该交替方式对热凸度影响较小;在以宽窄交替轧制时,宽度、带钢温度及其他因素的综合影响下,工作辊中点热凸度呈现较强的波动,初始轧制时凸度波动值达21.8 μm,而在轧制中后期,波动值稳定在6 μm左右.

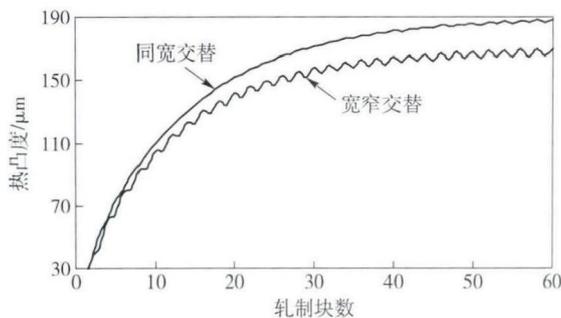


图6 交替轧制工作辊热凸度对比

Fig. 6 Thermal crown of work rolls for alternating rolling of strip material and width

## 4 结论

(1) 针对某1800 mm热连轧机品种和规格交替编排的复杂轧制工艺,选取多组典型工艺条件下的工作辊下机温度作为优化目标,采用多目标遗传算法进行优化,并针对多目标下遗传算法收敛速度下降、易于陷入局部解等问题,通过改变遗传算子提高了多目标遗传算法优化的计算效率,获取了具有较强适应性的等效换热系数.通过实测数据与计算值对比,验证了模型的可靠性.

(2) 分析了工艺参数如轧制节奏、轧制规格等工作辊温度场的影响,其中轧制时间与间歇时间对工作辊热凸度影响最为明显,应在轧制过程中保持轧制节奏的稳定性.

(3) 针对某1800 mm热连轧机交替轧制进行了分析,计算了两种典型交替轧制时的工作辊热凸度变化,工作辊热凸度随轧制进程呈现指数变化趋势,在品种和规格交替编排轧制中,相邻带钢轧制时工作辊热凸度存在6~21.8 μm波动,并随轧制进程趋于稳定.

## 参 考 文 献

- [1] Wang R Z, He A R, Yang Q, et al. Thermal contour model of work rolls in hot wide strip mills. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2004, 26(6): 654  
(王仁忠, 何安瑞, 杨荃, 等. 宽带钢热连轧工作辊热辊形模型. 北京科技大学学报, 2004, 26(6): 654)
- [2] Li X D, Yang L P, Liu H M. Optimization model of genetic algorithm about heat exchange parameters of hot rolling work rolls. *J Iron Steel Res*, 2007, 19(10): 25  
(李兴东, 杨利坡, 刘宏民. 热轧工作辊换热系数的遗传算法优化模型. 钢铁研究学报, 2007, 19(10): 25)
- [3] Zhang X L, Zhang J, Wei G C, et al. Emulational study on work roll thermal profile in hot strip mills. *Heavy Mech*, 2003(1): 15  
(张绚丽, 张杰, 魏钢城, 等. 热连轧机工作辊热辊形仿真研究. 重型机械, 2003(1): 15)
- [4] Zhang Y M. *Study on Temperature Field and Thermal Crown of Work Roll in 1450 Hot Rolling Mill* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2010: 12  
(张咏梅. 1450热连轧机工作辊温度场及热辊形研究[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2010: 12)
- [5] Wang X P, Cao L M. *Genetic Algorithms: Theory Application and Software*. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002  
(王小平, 曹立明. 遗传算法: 理论、应用与软件实现. 西安: 西安交通大学出版社, 2002)
- [6] Wang L S, Yang Q, He A R, et al. Thermal deformation of HVC work roll in hot strip rolling. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2010, 32(7): 019  
(王连生, 杨荃, 何安瑞, 等. 热轧HVC工作辊热变形. 北京科技大学学报, 2010, 32(7): 019)
- [7] Srinivas M, Patnaik L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms. *IEEE Trans Syst Man Cybern*, 1994, 24(4): 656
- [8] Azene Y T, Roy R, Farrugia D, et al. Work Roll Cooling System Design Optimisation in Presence of Uncertainty // *Proceedings of the 19th CIRP Design Conference—Competitive Design*. Bedford: Cranfield University Press, 2009: 57
- [9] Guo Z F, Xu J Z, Li C S, et al. Temperature field and thermal crown of work rolls on 1700 hot strip mill. *J Northeast Univ Nat Sci*, 2008, 29(4): 517  
(郭忠峰, 徐建忠, 李长生, 等. 1700热连轧机轧辊温度场及热凸度研究. 东北大学学报: 自然科学版, 2008, 29(4): 517)
- [10] Guo Z F, Li C S, Xu J Z, et al. Analysis of roll temperature field and thermal crown in TSCR // *Proceedings of International Symposium of Thin Slab Casting and Rolling*. Guangzhou, 2006  
(郭忠峰, 李长生, 徐建忠, 等. 薄板坯连铸连轧过程轧辊温度场及热凸度的研究 // 2006年薄板坯连铸连轧国际研讨会论文集. 广州: 2006)