

热轧工作辊变行程窜辊策略

邵 健¹⁾✉ 何安瑞¹⁾ 杨 荃¹⁾ 郭宏伟²⁾

1) 北京科技大学高效轧制国家工程研究中心, 北京 100083 2) 济南钢铁集团公司热轧厂, 济南 250101

✉ 通信作者, E-mail: ushsj@163.com

摘 要 推导出工作辊磨损特征参数与窜辊策略参数的定量关系表达式, 从理论上研究各种窜辊策略参数对工作辊磨损特征参数的影响, 并分析工作辊不同磨损量时窜辊对承载辊缝的影响. 在此基础上, 制定窜辊策略参数的选取原则, 并提出了热轧常规曲线工作辊变行程窜辊策略, 此策略在国内多个热连轧生产线上得到运用.

关键词 热轧; 轧辊; 磨损; 板形控制

分类号 TG335.1

Varying shifting stroke strategy of work rolls in hot rolling

SHAO Jian¹⁾✉, HE Anrui¹⁾, YANG Quan¹⁾, GUO Hongwei²⁾

1) National Engineering Research Center for Advanced Rolling Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Hot Strip Mill Plant, Jinan Iron and Steel Company, Jinan 250201, China

✉ Corresponding author, E-mail: ushsj@163.com

ABSTRACT The expression of quantitative relationships between characteristic parameters of work roll wear and roll shifting strategy parameters was derived. The effect of various roll shifting strategy parameters on characteristic parameters of work roll wear was studied theoretically, and the effect of roll shifting on padding gap under different work roll wears was analyzed. On this basis, the principle of selecting roll shifting parameters was established, and a varying shifting stroke strategy of conventional work rolls in hot rolling was proposed. The strategy was applied in many production lines of hot strip mills in China.

KEY WORDS hot rolling; rolls; wear; shape control

根据曲线形式的不同, 热轧工作辊窜辊技术可分为常规曲线辊形(如抛物线、正弦曲线)和高次曲线辊形(如 CVC、LVC)轴向窜动两种^[1-2]. 高次曲线辊形通过窜辊提供强大的可变凸度调节能力, 满足不同规格带钢对板形控制的需求; 而常规曲线辊形通过轴向周期性窜动均匀化工作辊磨损, 对延长轧制公里数、消除带钢横断面局部高洼点以及实施有条件自由规程轧制等均具有积极意义^[3-4]. 高次曲线辊形各机架窜辊量一般按板形控制目标需求确定, 与各机架弯辊力设定计算过程类似^[5], 而常规曲线辊形窜辊策略的制定目前缺乏实用的理论依据, 大多还处于经验给定参数阶段.

常规曲线工作辊窜辊策略主要包含窜辊步长

k 、窜辊行程 k 和窜辊频率 f 三个参数, t 指每次的窜辊量, k 指往操作侧或传动侧窜辊的最大值, f 指相邻几块带钢进行窜辊设定计算. 定义工作辊轧制周期为工作辊磨削后上机轧制到下机的过程, 按窜辊策略参数在轧制周期内是否变化可分为等参数窜辊策略和变参数窜辊策略. 文献 [6] 采用穷举法, 并以工作辊下机磨损的均匀性作为依据进行等参数窜辊策略最佳组合选择, 由于磨损受轧制计划排列、工艺参数和设备状态等方面因素影响较大, 因此研究结果通用性不强; 文献 [7] 则提出了一种周期性变步长窜辊策略, 但是寻优目标精度和承载辊缝凸度计算模型、热凸度计算模型和磨损计算模型的误差范围同属一个数量级, 因而难以实现在线有效控制.

收稿日期: 2010-01-06

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目 (No. 2009AA04Z163)

1 工作辊磨损特征参数和窜辊策略的定量关系

常规曲线工作辊窜辊目的是均匀化轧辊磨损,为描述方便,引入两个特征参数,猫耳高度 H_c 和辊面磨损宽度 B_w . 以轧辊下机磨损实测曲线为对象,定义 H_c 为工作辊轴向磨损最大值与中点磨损量之差,定义 B_w 为工作辊轴向磨损不为零的宽度,如图 1 所示.

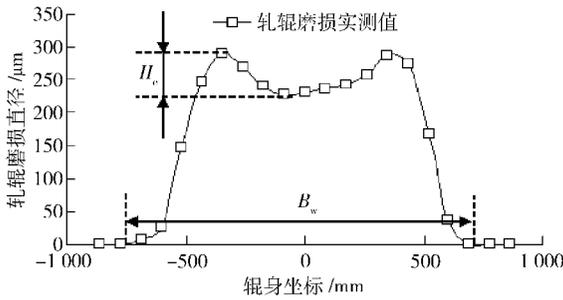


图 1 工作辊磨损特征参数
Fig 1 Characteristic parameters of work roll wear

求解一个轧制周期内 H_c 和 B_w 值需先求解工作辊沿轴向的磨损量. 每轧制一块带钢后,工作辊“箱型孔”的磨损特征明显^[8],可由图 2 表示,图中 L_w 为工作辊辊身长度, S 为工作辊轴向窜辊量, Z 为带钢走偏量, $L_r \sim L_r$ 为工作辊轴向磨损的分段长度.

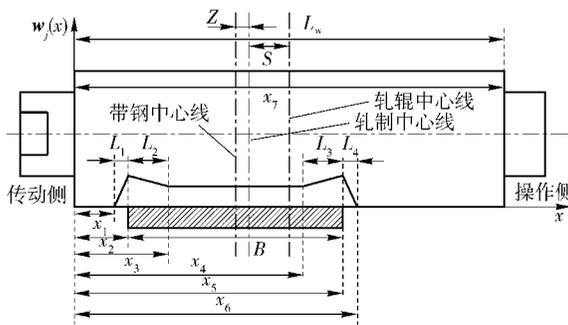


图 2 轧完一块钢后工作辊的磨损示意图
Fig 2 Sketch map of work roll wear after one strip rolling

工作辊磨损计算采用切片法^[9],将工作辊沿轴向均匀切成 m 个小单元,每个单元的宽度设为 Δx 则一个轧制周期内,轧制第 i 块钢工作辊第 j 单元的磨损量 w_{ij} 可表示为

$$w_{ij} = k \left[\frac{P_i}{B_i \Delta x} \right]^{k_2} \frac{L_{rj}}{\pi D} \left(w_{b,i} \frac{\alpha_i K_i}{V} \right)^{S_{k_1} k_3} \delta \quad (1)$$

δ 为描述工作辊横向磨损不均匀程度的函数,可表示如下:

$$\delta = \begin{cases} 0 & \alpha \leq \alpha_0 \leq \alpha \\ \frac{(\alpha - \alpha_0) Q}{L_r} & \alpha_0 < \alpha < \alpha \\ 1 + \frac{(\alpha - \alpha_0)(Q - 1)}{L_r} & \alpha_0 < \alpha < \alpha \\ 1 & \alpha_0 < \alpha < \alpha \\ 1 + \frac{(\alpha - \alpha_0)(Q - 1)}{L_r} & \alpha_0 < \alpha < \alpha \\ \frac{(\alpha - \alpha_0) Q}{L_r} & \alpha_0 < \alpha < \alpha \\ 0 & \alpha_0 < \alpha < \alpha \end{cases} \quad (2)$$

式中, P_i 为轧制压力, B_i 为带钢宽度, l 为压扁接触弧长, L_r 为带钢的轧制公里数, D 为工作辊直径, α_i 为咬入角, K_i 为带钢变形抗力, w_b 为润滑油浓度, V 为轧制速度, k_1 为模型系数(与工作辊材质、氧化铁皮和机架间冷却等状况有关), k_2 为负荷影响系数, k_3 为润滑影响系数, S_k 为润滑标识, Q, Q_0 为边部磨损比率. 从式 (1) 和式 (2) 可以看出, w_{ij} 大小和单元的轴向位置有关,而单元的轴向位置和窜辊位置 S 密切相关,从几何关系可以得出第 i 块带钢 α_i 的求解表达式(如下式所示), $\alpha_0 \sim \alpha$ 的值可与 α_i 的相对位置关系求出.

$$\alpha_i = L_w / 2 - S - B_i / 2 - L_r - Z_i \quad (3)$$

若采用等参数窜辊策略时, S_i 可表示为

$$S_i = \begin{cases} 0 & \alpha_i \leq n_0 \\ S_{i-1} & \alpha_i > n_0 \text{ 且 不能被 } D \text{ 整除} \\ S_{i-1} + D \uparrow & \alpha_i > n_0 \text{ 且 被 } D \text{ 整除} \end{cases} \quad (4)$$

式中: n_0 为起始窜辊带钢,一般取值为 $1 \sim 3$. D 为初始窜辊方向,一般初始取值为 ± 1 . 第 i 块带钢窜辊计算结果 S_i 和窜辊行程 k 进行比较,若下式成立,则 D_i 乘以 -1 进行正负转换,用于下一次 S_i 的计算:

$$S_i = \begin{cases} k & S_i > k \\ -k & S_i < -k \end{cases} \quad (5)$$

一个换辊周期结束后,工作辊轴向各单元的累加磨损量 w_j 为

$$w_j = \sum_{i=1}^n w_{ij} \quad (6)$$

式中, n 为一个轧制周期内轧制带钢总块数. 磨损特征参数 H_c 和 B_w 可表示为

$$H_c = \max(w_0, w_1, \dots, w_n) - w_{n/2} \quad (7)$$

$$B_w = X(j - j) \quad (8)$$

式中, j_1, j_2 为轧辊轴向分块单元,满足以下条件:

$$w_{j_1} = 0, w_{j_1+1} > 0, w_{j_2} = 0, w_{j_2-1} > 0 \quad (9)$$

工作辊周期性窜辊使 H 变小, B_w 增大, 磨损凹槽底部和陡边变的平缓, 有利于带钢横断面控制、浪形控制以及轧制稳定性. 因此, 仅从磨损角度考虑, H 值越小越好, B_w 值越大越好.

2 窜辊策略对工作辊磨损特征参数的影响

通过上节建立的数学表达式, 仿真分析工作辊磨损特征参数与窜辊策略参数之间的关系, 为窜辊策略的建立提供理论依据. 仿真计算中用到的设备参数、力能参数等均以济钢 1 700 mm 热连轧某个轧制周期第 5 机架为例, 此周期中, 带钢宽度均为 1 250 mm, 属同宽轧制.

2.1 窜辊行程对磨损特征参数的影响

取窜辊行程分别为 0、20、40、60、80 和 100 mm, 窜辊频率取 1, 窜辊步长取 10 mm, 计算结果如图 3 所示. 磨损特征参数受窜辊行程的影响显著, 随着窜辊行程的加大, B_w 从 1 400.2 mm 增加到 1 572.1 mm, 近似与窜辊行程成比例加大, 猫耳高度 H_c 随着窜辊行程的增加则变小, H_c 从 16.5 μm 减小到 8.1 μm , 减小了 50% 左右, 且窜辊行程达到 40 mm 以后减少幅度变缓. 因此, 较大的窜辊行程可获得理想的磨损特征参数.

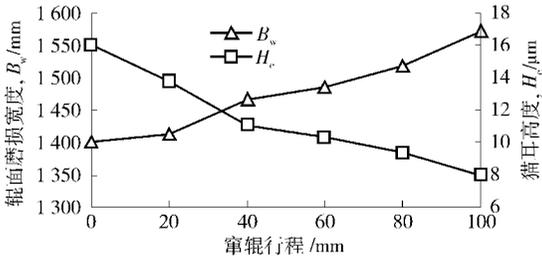


图 3 不同窜辊行程对工作辊磨损特征参数的影响

Fig 3 Effects of different shifting strokes on characteristic parameters of work roll wear

2.2 窜辊步长对磨损特征参数的影响

取窜辊步长分别为 5、10、15、20、25 和 30 mm, 窜辊行程为 100 mm, 窜辊频率为 1, 计算结果如图 4 所示. 加大窜辊步长可以使得带钢与工作辊边部同一位置的接触机会增加, 从而使得 B_w 增大, H_c 减小, 窜辊步长从 5 mm 加大到 30 mm, B_w 从 1 566.1 mm 增加到 1 601.7 mm, H_c 从 8.8 μm 减小到 7.6 μm , 与变化窜辊行程相比, 窜辊步长对轧辊磨损特征参数的影响非常小. 因此, 窜辊步长的确定可以以窜辊设备的能力为约束条件, 同时为建立均匀的热辊形及保证轧制稳定性, 窜辊步长不宜过大.

2.3 窜辊频率对磨损特征参数的影响

取窜辊频率分别为 1、2、3、4、5 和 6 窜辊行程

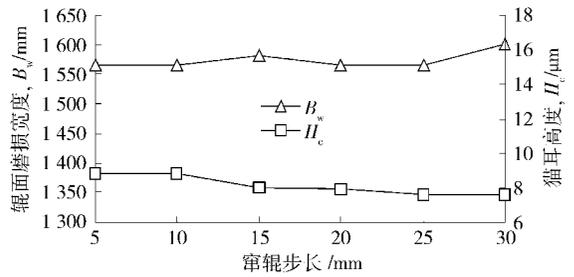


图 4 不同窜辊步长对工作辊磨损特征参数的影响

Fig 4 Effects of different shifting steps on characteristic parameters of work roll wear

为 100 mm, 窜辊步长为 10 mm, 计算结果如图 5 所示. 由于大的窜辊频率使得带钢与工作辊边部同一位置接触机会减小, 从而使得 B_w 减小, H_c 增大; 同样, 窜辊频率对磨损特征参数的影响小于窜辊行程, 且在小的窜辊频率中, 窜辊频率对猫耳的改善程度要大于辊面磨损宽度. 因此, 现场窜辊频率的制定可以以小为原则.

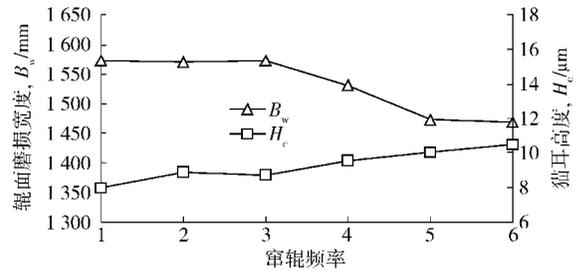


图 5 不同窜辊频率对工作辊磨损特征参数的影响

Fig 5 Effects of different shifting frequencies on characteristic parameters of work roll wear

3 工作辊磨损后窜辊量对承载辊缝四次凸度的影响

如果忽略带钢轧后的弹性恢复, 承载辊缝形状可看作是出口带钢的轮廓形状. 轧制过程中, 板形的控制实际上是对辊缝形状的控制, 一般情况下, 承载辊缝可用四次多项式来表示 (考虑对称形状)^[10]:

$$g(x) = a_2 x^2 + a_4 x^4, \quad x \in \left[-\frac{B}{2}, \frac{B}{2} \right] \quad (10)$$

定义承载辊缝的二次凸度 G_w 和四次凸度 C_Q 表达式如下:

$$G_w = \frac{a_2}{4} B^2, \quad C_Q = \frac{3 a_4}{256} B^4 \quad (11)$$

承载辊缝的二次凸度与带钢二次浪形 (中浪、边浪) 的生成和控制有关, 四次凸度与四次浪形 (1/4 浪、边中复合浪) 的生成和控制有关. 由于热轧中常用的板形控制手段 (辊缝单侧调平、工作辊弯辊和可变凸度窜辊技术) 针对一次浪形和二次浪形, 对

四次浪形没有解决能力,随着辊缝四次凸度的增加,板形将会有恶化的趋势,因此热轧中希望辊缝凸度四次分量越小越好。

承载辊缝形状采用二维变厚度有限元模型计算^[11],建模中辊系尺寸、工艺参数均从现场收集,为统一比较,采用相同的轧制工艺参数,包括单位宽度轧制力、轧制力分布系数、工作辊原始凸度、工作辊弯辊力和工作辊直径等,轧制计划考虑 1 250 mm 同宽轧制,在工作辊半径方向分别叠加 15、45、75 和 90 μm 的磨损量,用以模拟不同辊期,同时根据辊期不同叠加一定的热辊形,计算承载辊缝凸度随工作辊磨损和窜辊的变化趋势,首先用式(10)对有限元计算的承载辊缝结果进行回归,得到系数 a_2 、 a_3 ,然后按照式(11)计算 C_w 和 C_Q 四次凸度的计算结果如表 1 所示。从表中可以看出:随着磨损量的增加,窜辊量越大,辊缝四次凸度也越大;窜辊量为零时,即使工作辊磨损量不同,承载辊缝凸度的四次分量也基本相等。因此,随着工作辊磨损的增加,采用等参数周期窜辊策略会由于窜辊位置过大而引起四次浪形恶化,导致轧制稳定性,此计算结论和生产过程中工作辊后期由于窜辊而出现板形问题吻合。

表 1 承载辊缝四次凸度随工作辊磨损和窜辊的变化
Table 1 Changes of quartic bearing gap profiles with work roll wear and shifting

带钢宽度, B/mm	工作辊中点磨损, $w_c/\mu\text{m}$	窜辊量, S/mm	四次凸度, $C_Q/\mu\text{m}$
1 250	15	0	4.46
1 250	15	150	10.11
1 250	45	0	4.35
1 250	45	150	21.49
1 250	75	0	4.24
1 250	75	150	32.87
1 250	90	0	4.19
1 250	90	150	38.56

4 变行程窜辊策略的制定

基于以上分析,本文提出了一种适合常规曲线工作辊的窜辊策略。在轧辊磨损量小的时候,尽量保证窜辊行程能等于机械设备窜辊的最大行程,追求大的磨损宽度 B_w 和工作辊边部磨损均匀化,减小磨损猫耳 H 高度。随着轧制过程中工作辊的磨损量增大变化窜辊行程,减少工作辊磨损以后窜辊对承载辊缝的影响,减少不可控的四次板形。变行程窜辊策略算法如下。

(1) 当 $L_i \leq L_c$ 时, L_i 为工作辊换辊后轧制块带钢时精轧末机架的轧制公里数, L_c 为窜辊行程开始变化的工作辊轧制公里数的临界值。当 L_i 没有到达临界公里数时,第 k 块带钢窜辊量 S 的计算过程与等参数周期性窜辊一致,参考式(4)和式(5)。

(2) 当 $L_i > L_c$ 时,当 L_i 达到临界公里数时,首先计算第 k 块带钢允许的窜辊行程 k_2

$$\Delta k = k_1 - k_2 \tag{12}$$

$$k = \frac{\Delta k}{L_m} \tag{13}$$

$$k_2 = k_1 - k(L_i - L_c) \tag{14}$$

上述各式中, k_1 为预设定的初始窜辊行程, k_2 为预设定的轧制周期结束时窜辊行程, Δk 为预设定的起始与轧制周期结束时窜辊行程的差值; k 为窜辊行程变化系数; L_m 为窜辊行程变化到 k_2 时的轧制公里数;计算完 k_2 后,再按式(4)计算 S 。若下式成立,则 D_i 乘以 -1 进行正负转换,用于下一次 S 的计算。

$$S = \begin{cases} k_2 & S > k_2 \\ -k_2 & S < -k_2 \end{cases} \tag{15}$$

5 变行程窜辊策略在现场的运用效果

变行程窜辊策略 2006 年起在济钢 1 700 mm 武钢 1 700 mm 鞍钢 2 150 mm 和柳钢 1 450 mm 等国内多个热轧厂下游机架进行使用,使用中操作人员通过 HM 窜辊设定画面选择预先设定好的窜辊模式,板形 I2 设定计算模型通过 HM 画面变量进行识别,并由触发信号进行窜辊设定计算,保证整个轧制周期内窜辊起到有效的作用,同时不影响工作辊磨损严重后因窜辊导致的轧制稳定性。

以济钢 1 700 mm 热轧线为例,如图 6 和图 7 所示为某轧制周期 F5、F6 运用本文提出的窜辊策略,在一个工作辊换辊周期内的窜辊实际值和平坦度实测值。从图中可以看出,使用此窜辊策略后,整个周期平坦度值均在 $0 \pm 45 U$ ($1 U = 1 \text{ mm}/100 \text{ m} = 10^{-5}$,用来表示带钢的平坦度)以内,轧制末期带钢

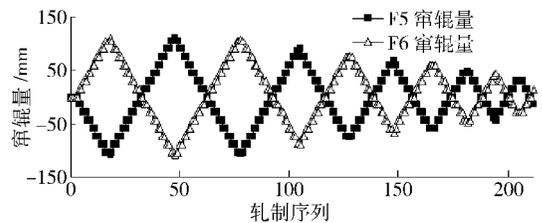


图 6 变行程窜辊策略一个工作辊周期内窜辊实际值
Fig 6 Actual shifting position in one work roll cycle for the varying shifting stroke strategy

平坦度同样保持良好, 延长了轧制公里数. 结合支持辊和工作辊辊形的配置, I_2 和 I_1 板形控制功能的完善, 目前济钢 1 700 mm 热轧带钢凸度命中率稳定在 96.3% 以上, 平坦度命中率稳定在 98.5% 以上.

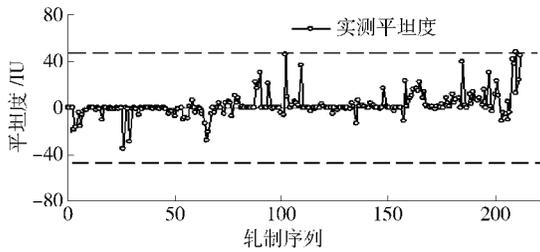


图 7 变行程窜辊策略一个工作辊周期内平坦度实测值

Figure 7 Measured values of flatness in one work roll cycle for the varying shifting stroke strategy

6 结论

(1) 目前对常规曲线工作辊窜辊策略的理论研究较少, 现有的研究大多基于经验和统计学方法, 其结果具有局限性.

(2) 窜辊策略参数中, 窜辊行程对工作辊磨损特征参数的影响最为明显, 因此, 窜辊策略的制定可先以设备状况和均匀化工作辊热凸度为目标确定窜辊步长, 采用较小的窜辊频率, 再通过优化窜辊行程为主要目标进行设定计算.

(3) 变行程窜辊策略很好地兼顾了板形质量、带钢断面形状和轧制稳定性, 国内多条热连轧的使用结果也验证了此种窜辊策略的有效性.

参 考 文 献

[1] He A R, Yang Q, Chen X L, et al. Application of LVC work roll in ultra wide hot strip mills. *China Mech Eng* 2008, 19(7): 864 (何安瑞, 杨荃, 陈先霖, 等. LVC 工作辊在超宽带钢热轧机的应用. *中国机械工程*, 2008, 19(7): 864)

[2] Wang R Z, He A R, Yang Q. Research on the strip shape control capability of LVC work roll contour. *Iron Steel* 2006, 41(5): 41 (王仁忠, 何安瑞, 杨荃. LVC 工作辊辊型的板形控制性能研

究. *钢铁*, 2006, 41(5): 41)

- [3] Zhang Q D, He A R, Huang L W, et al. Shape control in schedule free hot strip rolling. *Iron Steel* 2001, 36(2): 72 (张清东, 何安瑞, 黄纶伟, 等. 板形控制与热轧带钢自由程轧制. *钢铁*, 2001, 36(2): 72)
- [4] Kitahama M. Profile control of hot rolled strip by working roll shifting (KWRS) mill. *Iron Steel Eng* 1987, 64(11): 34
- [5] Shao J, He A R, Yang Q, et al. Simulation and application of shape setup control system in hot strip mill. *J Iron Steel Res* 2008, 20(6): 53 (邵健, 何安瑞, 杨荃, 等. 热连轧机板形设定控制系统仿真及应用. *钢铁研究学报*, 2008, 20(6): 53)
- [6] He A R. Study on Roll Contour in Finishing Stand of Wide Hot Strip Mills. Dissertation, Beijing University of Science and Technology Beijing, 2000, 80 (何安瑞. 宽带钢热轧精轧机组辊形的研究[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2000, 80)
- [7] Kong X W, Xu J Z, Wang G D, et al. Optimum shift scheme of SFR realized by adopting flat roll. *J Northeast Univ Nat Sci* 2002, 23(12): 1166 (孔祥伟, 徐建忠, 王国栋, 等. 采用平辊实现自由程序轧制最优横移方案新方法. *东北大学学报: 自然科学版*, 2002, 23(12): 1166)
- [8] He A R, Zhang Q D, Xu J W, et al. Genetic algorithms of work roll wear model for hot rolling. *Iron Steel* 2000, 35(2): 56 (何安瑞, 张清东, 徐金梧, 等. 热轧工作辊磨损模型的遗传算法. *钢铁*, 2000, 35(2): 56)
- [9] Shao J, Yang Q, He A R, et al. Research on work roll wear prediction model taking in account lubrication in hot rolling. *China Mech Eng* 2009, 20(3): 361 (邵健, 杨荃, 何安瑞, 等. 兼顾热轧工艺润滑的工作辊磨损预报模型研究. *中国机械工程*, 2009, 20(3): 361)
- [10] Chen X L. Flatness control in new generation high-tech mills for wide strip rolling. *J Univ Sci Technol Beijing* 1997, 19(Suppl): 1 (陈先霖. 新一代高技术宽带钢轧机的板形控制. *北京科技大学学报*, 1997, 19(增刊): 1)
- [11] Chen X L, Zou J X. A specialized finite element model for investigating controlling factors affecting behavior of rolls and strip flatness// 4th International Steel Rolling Conference, Dearville, 1987, 1