

基于模拟退火算法的中厚板精轧机 工作辊热膨胀模型

孙林^{1,2)} 张清东¹⁾ 陈先霖¹⁾ 戴江波¹⁾ 俞智华²⁾ 周光武²⁾

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

摘要 应用模拟退火算法和有限差分法,建立起适用于武钢 2800 mm 四辊轧机的工作辊热膨胀计算模型.此模型是一个半经验的工程运用公式,其参数的估计采用传统的优化方法难以解决,而用模拟退火算法却能得到有效地解决.应用此模型来预报工作辊的一个轧制单位全过程的热凸度变化值,其精度较高.生产使用后表明,此模型具有较高的工程实用性,可以应用于其他各类轧机的轧辊热辊形预测.

关键词 热辊形;模拟退火法;有限差分法;中厚板;板形

分类号 TG 335.12

板形精度正在成为中厚板的一项重要质量指标和决定其市场竞争力的重要因素.中厚板轧制中,工作辊热辊形尺寸的随时变动是钢板板形的主要干扰因素之一.无论进行辊形设计还是兼顾板形的压下负荷分配,都需要精确地预测工作辊在工作中的热膨胀量.完善的轧机板形控制系统更必须具备一个精确的工作辊热膨胀量计算预报模型^[1-4].

轧制过程中轧辊的热行为的研究主要集中在温度分布、热应力分布和热辊形 3 个方面,其中轧辊的温度分布决定着后两者,是研究中的重点和难点.迄今为止,轧辊温度分布的研究主要在精确理论计算方法研究和在线工程应用模型的研究.

本文的研究着重建立一种可投入实时工业控制的中厚板精轧机的工作辊温度场的计算模型,为此将模拟退火算法与有限差分法相结合,建立了一个二维的半经验的工作辊热辊形计算模型.

1 工作辊热辊形的有限差分模型

实测表明,中厚板轧制中因工作辊热膨胀引起的辊形变化可以达到 0.1~0.3 mm,这对轧机承载辊缝形状有显著的影响.求解轧辊热辊形

首先运用热传导方程求解轧辊的温度场分布规律,然后根据温度场计算结果确定轧辊的热膨胀系数.

1.1 工作辊热传导与热交换

应用有限差分法计算轧辊温度场,关键在于确定轧辊的初始条件和边界条件.工作辊在轧制过程中与其他介质的热交换非常复杂.

工作辊热量传入主要有:(1)高温轧件与工作辊接触过程中的接触传热和辐射传热 Q_1 ;(2)轧件与工作辊之间的摩擦生热 Q_2 ;(3)轧制时由于变形功所转化的热量 Q_3 ;(4)工作辊与支持辊间摩擦生热 Q_4 ;(5)工作辊轴承热量向轧辊传导 Q_5 .

工作辊热量传出主要有:①工作辊的冷却液与轧辊之间的对流换热 q_1 ;②工作辊与支持辊间的接触热传导 q_2 ;③工作辊辊面与空气间的对流换热 q_3 .

以上几种形式的热交换涉及的因素很多,精确定量地描述十分困难,但它们的最终结果都表现为使轧辊温度场发生改变.在保证计算最终的等效结果具有一定精度的前提下,合理地简化计算过程,符合实际生产的需要.

1.2 温度场模型简化

工作辊温度场在轧制过程中,主要经历 2 个周期性变化:(1)工作辊的整体加热和冷却过程.当轧钢时,工作辊的整体温度升高;当待钢时,工作辊的整体温度下降;当轧钢时间内或待

钢时间内,工作辊的热量传入与传出大体相等,即工作辊的整体温度场达到动态平衡。(2)轧制时工作辊在转动1周的过程中,辊面温度变化过程。首先与高温轧件接触,辊面温度迅速上升,然后经过2次喷淋冷却至一定温度,如此周而复始的变化。

由于以上2个周期性变化过程均涉及到工作辊的径向、轴向和周向传热,因此,严格地讲,求解工作辊的温度场应该从分析轧辊的三维温度变化出发。但对于工程实际应用来讲,这会大大增加求解的复杂性和计算量,是不现实的,也是难以实现的。另一方面,大量的研究和试验表明,由于轧制时工作辊高速转动,温度场的波动仅发生在轧辊极薄的表层上,而在任一截面的圆周方向几乎无温度波动。同时,工程实际应用中,主要关心工作辊热凸度的大小和分布,由于轧辊表面的温度分布可以通过实测得到,因此,建立起实测表面温度与工作辊热辊形的关系是十分重要。

基于以上原因,本文忽略轧辊圆周方向温度场的变化,将工作辊温度场视为温度沿轴对称分布的圆柱体问题求解,从而建立工作辊的温度场模型。这样轧辊的温度场可用z轴为对称轴的圆柱坐标系,建立二维动态导热方程^[4]:

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

式中, T 为工作辊热力学温度, K; t 为时间坐标, s; r 为工作辊径向坐标, m; z 为工作辊轴向坐标, m; c 为轧辊的比热容, $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$; λ 为轧辊的导热系数, $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$; ρ 为轧辊的密度, $kg \cdot m^{-3}$ 。

由于实际轧辊边界条件相当复杂,要想用解析方法求解精确解往往是不可能的,为了满足工程实际需要,本文应用有限差分法进行数值近似求解计算^[5]。根据向后差分导热微分方程和能量守恒建立起来的一维显式差分格式为:

$$c \cdot m \cdot \frac{T(k,n+1) - T(k,n)}{\Delta t} = \alpha \cdot \Delta l \cdot l_{arc} \cdot \zeta (T_p - T(k,n)) + \beta \cdot 2\pi r \cdot \Delta l \cdot \xi \cdot (T_w - T(k,n)) + \gamma \cdot 2\pi r \cdot \Delta l \cdot \eta \cdot (T_A - T(k,n)) + \frac{\lambda \cdot \pi r^2}{\Delta l} (T(k+1,n) + T(k-1,n) - 2T(k,n)) \quad (2)$$

$$T(k,n+1) = T(k,n) + \frac{\alpha \cdot \text{arc} \cdot \zeta}{\rho \cdot c \cdot \pi r^2} \cdot (T_p - T(k,n)) \cdot \Delta t + \frac{2\beta \cdot \xi}{\rho \cdot c \cdot r} \cdot (T_w - T(k,n)) \cdot \Delta t + \frac{2\gamma \cdot \eta}{\rho \cdot c \cdot r} \cdot (T_A - T(k,n)) \cdot \Delta t + \frac{\lambda}{\rho \cdot c \cdot \Delta l^2} \cdot (T(k+1,n) + T(k-1,n) - 2T(k,n)) \cdot \Delta t \quad (3)$$

式中, Δt 为计算的时间间隔, s; $T(k,n+1)$ 为第 k 片在 $(n+1) \cdot \Delta t$ 时刻的温度, K; $T(k,n)$ 为第 k 片在 $n \cdot \Delta t$ 时刻的温度, K; $T(k-1,n)$ 为第 $k-1$ 片在 $n \cdot \Delta t$ 时刻

的温度, K; $T(k+1,n)$ 为第 $k+1$ 片在 $n \cdot \Delta t$ 时刻的温度, K; T_p 为轧件的温度, K; T_w 为冷却水的温度, K; T_A 为空气的温度, K; l_{arc} 为轧制接触弧长, m; r 为轧辊的半径, m; Δl 为所划网格单元的长度, m; m 为所划网格单元的质量, kg; ζ 为高温钢板接触轧辊圆周的比例, %; ξ 为水接触轧辊圆周的比例, %; η 为空气接触轧辊圆周的比例, %; α 为咬钢区内, 高温钢板与轧辊的换热系数, $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$, 与氧化铁皮厚度、润滑条件、钢板温度等因素有关; β 为冷却水与轧辊的换热系数, $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$, 与喷嘴的安装位置、喷射角度、水流密度、水压、轧辊表面温度等有关; γ 为空气与轧辊的换热系数, $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$, 与厂房布局、轧机结构、环境温度、时令季节等有关; λ 为轧辊的导热系数, $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$, 与轧辊材质、温度、结构等有关^[5,6]。

上述各参数中,只有 $\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \zeta, \xi, \eta$ 等参数与轧机的某些实际因素有关,很难精确表达,通过查阅文献确定显然是不现实的。所以需建立一种简化的、半经验的计算模型,应用模拟退火算法,结合大量实际测量数据进行各参数估计,求出符合武钢 2800mm 四辊轧机的相关数值,从而达到理想的效率和精度。简化式(3),令

$$K_1 = \frac{\alpha \zeta}{\rho \cdot c \cdot \pi r^2}, K_2 = \frac{2\beta \cdot \xi}{\rho \cdot c \cdot r}, K_3 = \frac{2\gamma \cdot \eta}{\rho \cdot c \cdot r}, K_4 = \frac{\lambda}{\rho \cdot c \cdot \Delta l^2} \quad (4)$$

代入(3)得:

$$T(k,n+1) = T(k,n) + K_1 \cdot l_{arc} \cdot (T_p - T(k,n)) \cdot \Delta t + K_2 \cdot (T_w - T(k,n)) \cdot \Delta t + K_3 \cdot (T_A - T(k,n)) \cdot \Delta t + K_4 \cdot (T(k+1,n) + T(k-1,n) - 2T(k,n)) \cdot \Delta t \quad (5)$$

式中, K_1 为咬钢区内, 高温钢板与轧辊之间的等效传热参数, $(m \cdot s)^{-1}$; K_2 冷却水与轧辊之间的等效传热参数, s^{-1} ; K_3 为空气与轧辊之间的等效传热参数, s^{-1} ; K_4 为轧辊的等效导热参数, s^{-1} 。以上 K_1, K_2, K_3, K_4 各参数由模拟退火算法确定。

2 工作辊热辊形的计算模型

2.1 工作辊温度场计算

根据上述理论,计算工作辊温度场。首先假定某个工作辊轧制单位中,第 i 块钢第 j 道次的轧制时间为 $t_{r(i,j)}$, 返钢时间为 t_v , 第 i 块钢等第 $i+1$ 块钢的待钢时间为 t_b 。如果停轧时间 $t_b > 1$ h 时,并且冷却水打开,模型认为各片温度相等。如果停轧时间 $t_b \leq 1$ h, 则以 Δt 为梯级进行下一步。其次对工作辊分片进行计算(如图1所示),每片为 Δl 。辊身长 L , 分了 $L/\Delta l$ 片; 辊颈长 L_N , 分了 $L_N/\Delta l$ 片。计算各片温度时主要考虑了辊片与相应的

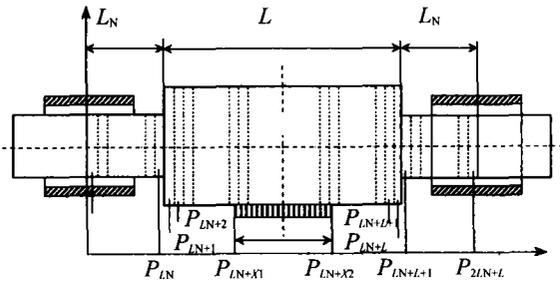


图1 工作辊的温度场模型

Fig.1 Temperature field model of work roll

高温钢板之间的热交换、轧辊与空气之间的热交换、轧辊与冷却水之间的热交换以及轧辊各片之间的热交换。记当前片号为 k 。然后,根据现场实测数据,确定计算过程中各边界条件。为此作如下假设和取值:①工作辊的材质均匀,且无内热源;辊身的初始温度沿辊身长度均匀分布,与环境温度相同。②环境温度(即空气的温度)与季节有关,12~2月取为 10°C ,3~6月取为 18°C ;7~9月取为 25°C ,10~11月取为 18°C 。③冷却水为非循环用水,5~10月取为 20°C ,11~4月取为 10°C 。④辊颈轴承处温度取为 40°C 。⑤钢板与工作辊的热交换以对流形式体现,忽略其对轧辊的辐射传热;钢板温度沿宽度方向均匀,温度值取现场温度探测仪记录的实测值。

最后,按以下步骤迭代求解。

(1)当 $k=1$ 或 $k=P_{2L_n+1}$ (下式中相应的 $J=1$ 或 $J=-1$)时:

$$T(k,n+1)=T(k,n)+W_{10n}\cdot K_2\cdot(T_w-T(k,n))\cdot\Delta t+(1-W_{10n})\cdot K_3\cdot(T_A-T(k,n))\cdot\Delta t+K_4\cdot(T(k+J,n)+T(k-J,n)-2T(k,n))\cdot\Delta t \quad (6)$$

(2)当 $k=P_{L_n}$ 或 $k=P_{L_n+L}$ (下式中相应的 $J=1$ 或 $J=-1$)时:

$$T(k,n+1)=T(k,n)+K_2\cdot(T_w-T(k,n))\cdot\Delta t+K_3\cdot(T_A-T(k,n))\cdot\Delta t+K_4\cdot[T(k-J,n)-T(k,n)+K_5\cdot(T(k+J,n)-T(k,n))]\cdot\Delta t \quad (7)$$

(3)当 $k=P_{L_n+1}$ 或 $k=P_{L_n+L}$ (下式中相应的 $J=1$ 或 $J=-1$)时:

$$T(k,n+1)=T(k,n)+K_2\cdot(T_w-T(k,n))\cdot\Delta t+K_3\cdot(T_A-T(k,n))\cdot\Delta t+K_4\cdot[T(k+J,n)-T(k,n)+K_5\cdot(T(k-J,n)-T(k,n))]\cdot\Delta t \quad (8)$$

(4)当 k 在其他区间时:

①当 $k\in[2,P_{L_n-1}]\cap[P_{L_n+2},P_{L_n+1-2}]$ 或 $k\in[P_{L_n+2+2},P_{L_n+L-1}]\cap[P_{L_n+L+2},P_{2L_n+L-1}]$

$$T(k,n+1)=T(k,n)+K_2\cdot(T_w-T(k,n))\cdot\Delta t+K_3\cdot(T_A-T(k,n))\cdot\Delta t+K_4\cdot[T(k+1,n)+T(k-1,n)-2T(k,n)]\cdot\Delta t \quad (9)$$

②当 $k=P_{L_n+1-1}$ 或 $k=P_{L_n+2+1}$ 时,

令 $f=\lfloor\frac{B}{2\cdot\Delta t}-\text{INT}(\frac{B}{2\cdot\Delta t})\rfloor$;当 $k\in[P_{L_n+1},P_{L_n+2}]$,

令 $f=1$ 。则有:

$$T(k,n+1)=T(k,n)+f\cdot K_1\cdot\text{arc}\cdot(T_p-T(k,n))\cdot\Delta t+W_{20n}\cdot K_2\cdot(T_w-T(k,n))\cdot\Delta t+(1-W_{20n})\cdot K_3\cdot(T_A-T(k,n))\cdot\Delta t+K_4\cdot(T(k+1,n)+T(k-1,n)-2T(k,n))\cdot\Delta t \quad (10)$$

式中, T_B 为辊颈轴承处温度, K ; W_{10n} 为轴承座冷却开关,打开时 $W_{10n}=1$,关闭时 $W_{10n}=0$; W_{20n} 为轧辊冷却水开关,打开时 $W_{20n}=1$,关闭时 $W_{20n}=0$; K_5 为辊颈与辊身结合处热传导折合系数; B 为所轧钢板的宽度, m 。

2.2 工作辊热辊形计算

求得温度场后,轧辊热辊形计算采用适合工程计算的半经验近似方法,即由上述计算得到各单元温度值(即轧辊表面温度值),然后根据各单元与端点单元的温差来计算。工作辊第 k 片在 $t=n\cdot\Delta$ 时刻的热凸度^[11,12]:

$$C_w(k,t)=D_w\cdot\beta_i\cdot[T(k,n)-T(P_{L_n+1},n)] \quad (11)$$

式中, $k\in[P_{L_n+1},P_{L_n+L}]$, β_i 为热膨胀系数, K^{-1} ; D_w 为工作辊直径, m 。

3 模拟退火算法原理

模拟退火算法(Simulated Annealing Algorithm,简称SAA)源于对固体退火过程的模拟,采用Metropolis接受准则,并用一组称为冷却进度表的参数控制算法进程,使算法在多项式时间里给出一个近似最优解。它是局部搜索算法的扩展,理论上是一个全局最优算法。它是一个解决大规模组合优化问题的有效算法,能够帮助解决许多复杂的实际优化问题,比如超大规模集成电路(VLSI)设计、图像处理、神经网络计算等等^[7-10]。

设优化问题的一个解 i 及其目标函数 $f(i)$ 分别与固体的一个微观状态 i 及其能量函数 E 等价,固体退火过程中温度 T 的角色由算法进程中递减其值的控制参数 $t\in R^+$ 担当,并由与Metropolis准则对应的转移概率 P_i

$$P_i(i\rightarrow j)=\begin{cases} 1 & f(j)\leq f(i) \\ \exp[-f(i)-f(j)]/t & f(j)>f(i) \end{cases} \quad (12)$$

确定是否接受从当前解 i 到新解 j 的转移。开始让 t 取较大的值(与固体的熔解温度相对应),在进行足够多的转移后,缓慢减小 t 的值(与“徐徐”降温相对应),当控制参数 t 趋于零时,满足某个停止准则时算法终止,最终求得优化问题的全局最优解^[10]。控制参数 t 的取值定义为:

$$t = \alpha^n \cdot T_0 \tag{13}$$

式中, α 为衰减系数, $0 < \alpha < 1$; n 为迭代次数; T_0 为初始温度, 对应固体溶解温度.

停止准则: 当迭代次数 $n \rightarrow n_{max}$ 时, 即达到设定的最大迭代次数时, 计算程序运行停止. 由于无法保证算法所得最后一组解一定是最优的, 本文因此采用具有记忆的模拟退火算法, 使之保存住搜索过程中遇到过的最优结果.

4 基于模拟退火法的工作辊热辊形模型参数估计与验证

4.1 目标函数确定

工作辊热辊形模型中 $\alpha, \beta, \gamma, \lambda, \xi, \eta$ 等参数影响因素较多, 需要根据轧机的实际情况进行估计. 本文采用记忆的模拟退火算法, 对式(5)中 K_1, K_2, K_3, K_4 4个等效参数进行估计. 建立目标函数:

$$\min F = \sum_{i=1}^e (C_w(x_i) - C_0(x_i))^2 \tag{14}$$

式中, $C_w(x_i), C_0(x_i)$ 为沿工作辊辊身坐标 x_i 处的预报和实测的热辊形值, m ; e 为工作辊的热辊形实测的总点数.

4.2 模型验证

为了验证计算模型, 可以通过用现场实际生产结果进行比较和参数估计. 对于某对工作辊, 在轧完最后一块钢板下机时, 立即用 80T-150 热敏点温仪 (接触式) 和红外热像仪 THV550 测量工作辊表面温度场, 并记录各块钢的相关工艺参数, 然后代入热辊形模型中进行模拟计算.

最终计算所得的模型参数估计值: $K_1=4.535 \times 10^{-6} (m \cdot s)^{-1}$; $K_2=2.466 \times 10^{-3} s^{-1}$; $K_3=5.695 \times 10^{-5} s^{-1}$; $K_4=0.448 s^{-1}$; $\lambda=40.472 W \cdot (m \cdot K)^{-1}$; $\beta_i=12.029 K^{-1}$; $\min F=4570$. 图2为工作辊温度场计算值与实测

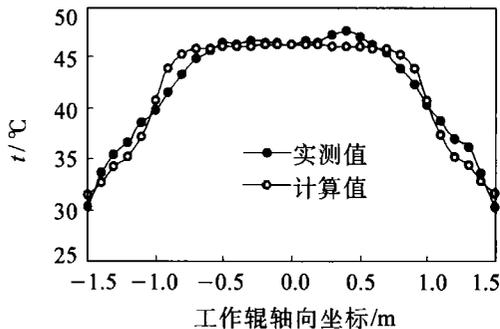


图2 工作辊温度场计算值与实测值比较

Fig.2 Calculated and measured values of temperature field for work roll

值的比较图, 图3为工作辊热辊形计算值与实测值的比较图, 可见计算模型能达到较高的精度. 图4为计算得到的某个轧制单位轧制过程中工作辊的热凸度变化情况. 计算结果与实测结果比较表明, 此模型建立思想和方法具有工程实用性, 可以运用到实际生产中.

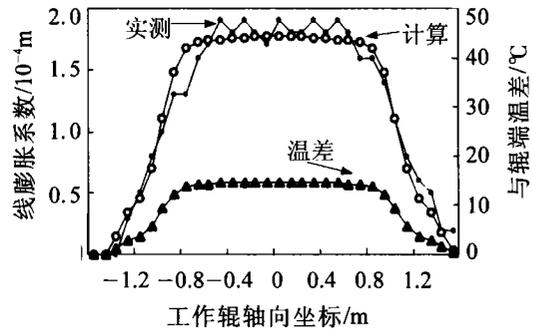


图3 热辊形计算值与实测值比较

Fig.3 Calculated and measured values of thermal contour for work roll

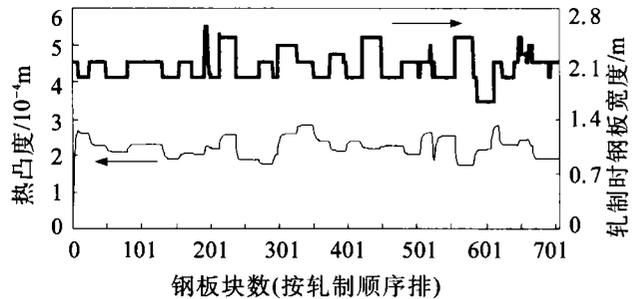


图4 轧制单位过程中热凸度变化的计算值

Fig.4 Calculated values of work roll thermal crown in a rolling unit

5 结语

(1) 中厚板轧制中, 工作辊因轴向不均匀热膨胀引起的辊形变化明显, 并在轧制过程中随时间而变化时, 它是钢板板形的主要干扰因素, 也是辊形设计和压下负荷分配要考虑的基础条件.

(2) 应用模拟退火算法, 以实测数据优化并确定各参数, 中厚板精轧机实时试验证明, 这种方法为解决预测模型误差大的问题提供了一条新的思路.

(3) 针对中厚板精轧机工作辊热辊形, 用模拟退火算法结合有限差分法来建模的方法, 也适用于其他各类轧机的轧辊热辊形预测. 同时应用模拟退火算法优化估计模型参数的方法也是适用于其他类似复杂问题的研究.

参 考 文 献

- 1 Ginzburg V B. High-Quality Steel Rolling Theory and Practice[M]. New York: Marcel Dekker, 1993
- 2 孙林, 张清东, 陈先霖, 等. 中板轧机板形控制性能的研究[J]. 钢铁, 2002, 37(1): 34
- 3 Ginzburg V B, Bakhtar F A, Lssa R J. Application of Cool-flex Model for Analysis of Work Roll Thermal Conditions in Hot Strip Mills[J]. Iron and Steel Engineer, 1997, 32 (11): 38
- 4 王国栋. 板形控制和板形理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986. 380
- 5 吴庆海. 热轧宽带钢板形控制模型及策略的研究[D]: [学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2001
- 6 谭真, 郭广文. 工程合金热处理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994. 137
- 7 康立山, 谢云, 尤矢勇, 等. 非线性并行算法—模拟退火算法[M]. 北京: 科学出版社, 1997
- 8 Ibrahim O H. Heuristics for the Generalized Assignment Problem: Simulated Annealing and Tabu Search Approaches[J]. OR Spektrum, 1995, 17: 211
- 9 Kirkpatrick S. Optimization by Simulated Annealing: Quantitative Studies[J]. J of Statis Phy, 1996, 34: 975
- 10 Aarts E H L, Van Laarhoven P J M. Simulation Annealing Theory and Application[M]. Dordrecht: D Reidel Publishing Company, 1987. 17

Thermal Contour Model of Work Roll in Plate Mills by Simulated Annealing Algorithm

SUN Lin^{1,2}, ZHANG Qingdong¹, CHEN Xianlin¹, DAI Jiangbo¹, YU Zhihua², ZHOU Guanwu²

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

2) Wuhan Iron and Steel (Group) Co, Wuhan 430083, China

ABSTRACT Employing Simulated Annealing Algorithm(SAA) and Finite Difference Method, a calculation model of work roll thermal contour was built in a 2800 mm 4-high mill of Wuhan Iron and Steel (Group) Co.. The model was a semi-theory practical formula. Its pattern and magnitude were still hardly defined with classical optimization methods. But the problem could be resolved by SAA. It was pretty high precision to predict the values of work roll thermal crown in a rolling unit. After one year application, the results show that the model is feasible in engineering, and it could be applied to predict the roll thermal contour of other mills.

KEY WORDS thermal contour; simulated annealing algorithm; finite difference method; plate; shape