

宽带钢热连轧工作辊热辊形模型

王仁忠¹⁾ 何安瑞¹⁾ 杨荃¹⁾ 赵林²⁾ 吴胜田²⁾ 李庆贤²⁾

1)北京科技大学高效轧制国家工程研究中心,北京 100083 2)鞍山钢铁集团公司,鞍山 114021

摘要 实现工作辊热辊形的在线预报是板形控制的难题之一.采用一维有限差分方法建立了工作辊热辊形在线计算模型,并利用该模型计算了热轧过程中和下机后任意时刻工作辊温度场及其热辊形.仿真和在线应用结果表明,此在线模型计算速度快,精度高,能满足板形在线过程控制的需要.

关键词 热轧;有限差分;工作辊;热辊形;板形
分类号 TG 333.1

在宽带钢热连轧机组中,准确预报轧制过程中工作辊热辊形的变化对于板形控制具有重要意义.工作辊热辊形计算的基础是轧辊温度场的计算,对于轧辊温度场的计算可分为两种方法,即有限元法^[1-4]和有限差分法^[5-7].有限元法由于其计算量大,运算时间长,不适宜热轧过程中的在线应用.有限差分法具有方程简单、计算方便且能满足精度要求的特点,常被应用在热轧过程中的在线应用.

1 轧辊温度场在线计算模型

工作辊在轧制过程中的热交换行为是相当复杂的,要精确定量地描述每一种热交换是不可能的.所以在实际计算中需要忽略那些对工作辊温度场影响不大的热交换过程,这样既能够保证一定的精度,又大大简化了模型的计算^[8].经过大量的研究和实验表明,在轧制时由于轧辊高速转动,使得轧辊温度场的波动仅限在轧辊极薄的表层内,而在任一截面的圆周方向几乎无温度波动.因此可忽略轧辊周向温度场的变化,将工作辊温度场简化为温度沿轴对称分布的圆柱体问题求解.这样轧辊温度场的圆柱坐标系的二维动态轴对称导热方程为:

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

在满足精度的情况下,实际生产对计算轧辊

温度场的速度要求较高,需达到在线应用的程度.因此本文根据有限差分基本原理,采用一维有限差分法计算轧辊温度场,忽略了周向和径向方面的传热,这样计算速度较快,并且满足了精度的要求.

建立工作辊温度场的划分模型,如图1所示.设工作辊辊身为 L ,每端辊颈为 L_n ,沿工作辊轴向方向将工作辊划分成多个片单元.经过大量实测工作辊下机辊温发现,工作辊与带钢能接触到的部位温度变化大,而在辊身两边变化平缓.因此可以将与带钢能接触到的辊身片单元划分密一些,而两端包括辊颈部分划分疏一些.计算各片温度时考虑的热交换有:带钢与轧辊之间,轧辊与空气之间,轧辊与冷却水之间,以及轧辊各片之间.

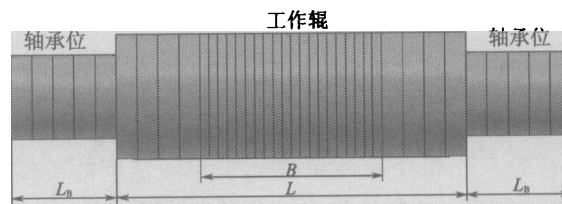


图1 工作辊温度场模型划分

Fig.1 Dividing up the temperature field model of work roll

由此轧辊温度场的计算重点在数值解析上,根据向后差分导热微分方程和能量守恒建立起一维显式差分格式为:

$$T_{(i)}^{n+1} = T_{(i)}^n + k_4(T_s - T_{(i)}^n) + k_3(T_w - T_{(i)}^n) + k_2(T_{i-1} - T_{(i)}^n) + k_1(T_{(i+1)}^n - 2T_{(i)}^n + T_{(i-1)}^n) \quad (2)$$

式中, $k_4 = \frac{l}{M_s} dt$, $k_3 = \frac{1}{M_w} dt$, $k_2 = \frac{1}{M_A} dt$, $k_1 = \frac{1}{M_R} dt$. 其中, M_s 为带钢与辊间传热等效系数; M_A 为空气等效冷却系数; M_w 为轧辊水冷等效系数; M_R 为辊间热传导等效系数; l 为轧制接触弧长; $T_{(k)}$ 为第 k 片在 ndt 时刻的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_s 为带钢的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_w 为冷却液的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_A 为空气的温度, $^{\circ}\text{C}$. 另外, 在计算过程中考虑到工作辊的窜动, 需引入带钢与工作辊接触率系数 α_k , α_k 与带钢的宽度和工作辊窜辊量有关. 同时还应考虑的是带钢的轧制节奏 R_k , 这里的轧制节奏定义为:

$$R_k = \frac{t_{\text{roll}}}{t_{\text{roll}} + t_{\text{min}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, t_{roll} 为每块钢的轧制时间, s ; t_{min} 为连续两块钢的间隙时间, s .

若 $t_{\text{min}} > 3600 \text{ s}$ 时, 则认为各片单元温度相等; 反之, 则以 dt 为梯级进行计算. 实际所取的各边界条件考虑了地理位置和四个季节变化对温度的影响.

用 Visual Fortran 5.0 开发出此温度场的计算模型, 代入一定的工况条件和各已知参数计算, 可仿真出下机后的工作辊温度场.

用温度场模型求出各片单元温度值后, 根据各片单元温差计算得到某机架工作辊的热辊形:

$$C_{(k)} = D_w \beta (T_{(k)} - T_c) \quad (4)$$

式中, $C_{(k)}$ 为第 k 片单元相对中点的热胀量; D_w 为工作辊直径, mm ; β 为热胀系数; T_c 为辊身中点温度, $^{\circ}\text{C}$; $T_{(k)}$ 为第 k 片单元的温度, $^{\circ}\text{C}$.

此式计算了工作辊热变形后沿辊身不同位置的热辊形, 若用辊身中点的热胀量减去辊身两边热胀量的平均值则得到辊身中点的热凸度 C_R .

2 计算模型验证

以某钢铁厂热连轧生产线为研究对象, 采集现场数据并将其中的三个轧制单位代入模型中进行验证. 每个轧制单位轧了相同宽度的带钢 150 块左右, 轧制过程中其平均轧制节奏为 50 s/70 s (轧制时间/间隙冷却时间), 三个轧制单位则分别轧了三种宽度的带钢, 分别为 1535, 1282 和 1078 mm. 当工作辊下机 30 min 后, 先用 JM 系列便携式数字温度计测量辊身的温度, 沿工作辊辊身长度方向 (传动侧—操作侧) 每 200 mm 取一个测温点, 测量温度并记录; 之后将此轧制过程的工艺参数代入工作辊温度场计算模型仿真工作辊的下机温度. 图 2 为 F4 机架在三个轧制单位中

下机 30 min 实测温度与仿真温度比较, 其中 B1, B2 和 B3 表示了上述三种板宽, C 表计算值, M 表测量值.

从图 2 中可以看出, 仿真温度与实测温度基本吻合, 能够反应轧辊在下机后温度的分布情况. 轧辊下机后辊身温度分布情况是: (1) 轧制中与带钢接触的部分温度较高; (2) 轧较窄的带钢时辊身中部与边部温差较大; (3) 温度分布由箱形向二次曲线变化.

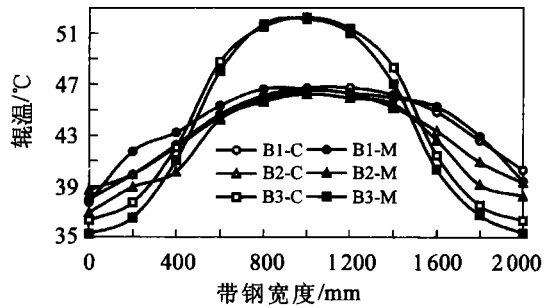


图 2 工作辊下机温度

Fig.2 Comparison of work roll temperature after rolling

由于轧制中和下机后的热辊形都是随温度不断变化的, 根据式 (4) 用此模型可以仿真出它们的变化情况, 如图 3 所示. 图 3 为轧板宽为 1535 mm 的某轧制单位的过程中 (RTC) 和下机后 (CTC) 热辊形随时间的变化情况. 在轧制过程中辊身的热辊形较平坦, 此平坦区域小于所轧带钢的宽度; 在辊身中部向边部过渡时, 热辊形变化较大. 在整个轧制和下机冷却过程中, 热辊形先增大后减小. 下机 60 min 后热辊形值较小且变化减小, 这时经过空冷后轧辊的温差减小.

图 4 为用工作辊热辊形计算模型仿真的在三种轧制单位情况下, 工作辊轧 150 块钢过程中的热凸度 C_R 变化情况. 从图中可知: 在轧制约 50 块钢后热凸度变化不大, 而之前热凸度上升特别

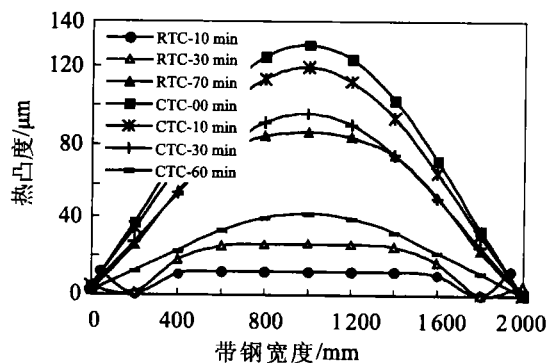


图 3 工作辊热辊形随时间变化情况

Fig.3 Variation of work roll thermal contour with time

快; 在 50~80 块带钢间轧辊热凸度出现最大值, 此后热凸度呈平缓下降趋势。

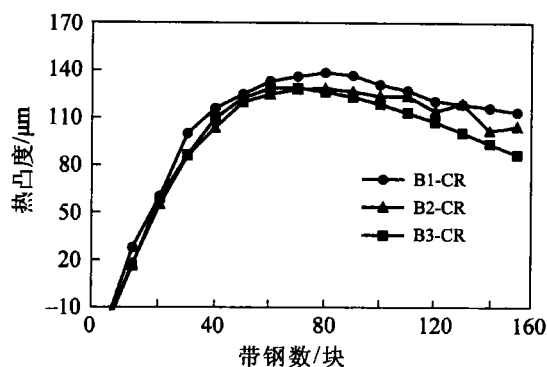


图 4 轧制过程中的热凸度变化

Fig.4 Changes of thermal crown during rolling

3 结束语

本文采用一维有限差分法建立了求解工辊热辊形的在线模型, 并投入到实际生产中。此在线模型计算速度快, 精度高, 能满足板形在线过程控制的需要, 解决了工作辊热辊形难以在线预报这一难题。

参 考 文 献

- 1 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(增): 51
- 2 钟掘, 杨平, 刘晓波. 轧辊温度场与热变形的有限单元法分析 [J]. 中南工业大学学报, 1995, 26(5): 53
- 3 Pallone Gary T. Transient temperature distribution in work rolls during hot rolling of sheet strip [J]. Iron Steel Eng, 1983(12): 21
- 4 Yuen W Y D. Research on the steady-state temperature distribution in a rotating cylinder subject to heating and cooling over its surface [J]. Trans ASME, 1984, 106(8): 578
- 5 何安瑞, 杨荃, 张清东, 等. 热带钢轧机工作辊热磨制度 [J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(3): 306
- 6 郭剑波, 连家创, 涂月红. 热带钢连轧机工作辊温度场和热凸度计算 [J]. 燕山大学学报, 1998, 22(3): 255
- 7 吴庆海. 热轧宽带钢板形控制模型及策略的研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2001
- 8 何安瑞. 宽带钢热轧精轧机组辊形的研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2000

Thermal Contour Model of Work Rolls in Hot Wide Strip Mills

WANG Renzhong¹⁾, HE Anrui¹⁾, YANG Quan¹⁾, ZHAO Lin²⁾, WU Shengtian²⁾, LI Qingxian²⁾

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

2) Anshan Iron and Steel Company, Anshan 114021, China

ABSTRACT The thermal contour on-line prediction of work rolls is one of the difficult problems in strip shape control. A theoretical model was built to calculate the on-line work roll's thermal contour by using the one-dimension finite difference method and used to calculate the temperature field and thermal contour at any time in rolling and after rolling. The result indicates that the computation of this model is rapid and accurate in simulation and on-line application. This model suits to be used in the process of strip shape on-line control.

KEY WORDS hot rolling; finite difference; work roll; thermal contour; strip shape