

总括热吸收率的基本辨识

伊 智, 张卫军, 陈海耿

(东北大学 材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 加热炉二级控制系统通常采用总括热吸收率法作为核心模型, 而总括热吸收率既是结构参数的函数, 也是操作参数的函数, 因此其辨识较为困难. 以宝钢 2050 热轧厂 3 号加热炉进行的拖偶实验为例, 详细阐述了基本辨识的过程. 对实验数据进行整理, 并采用表面温度梯度法反演 ϕ_{CF} . 推导了 ϕ_{CF} 基本辨识体系的完整表达式, 同时对辨识结果进行必要的分析. 反演过程中发现, 当采样点较多时, 反演的钢坯表面热流呈振荡趋势, 这是采样周期与测量系统的分辨率不匹配所导致的. 由基本辨识的 ϕ_{sCF} 曲线可知, 当钢坯静止时, 在同一位置处 ϕ_{CF} 值是变化的, 这证实了 ϕ_{CF} 动态补偿的必要性.

关 键 词: 总括热吸收率; 拖偶实验; 表面温度梯度法; 基本辨识; 历经炉温

中图分类号: TK 124 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2014)06-0827-04

Basic Identification for the Total Heat Exchange Factor

YI Zhi, ZHANG Wei-jun, CHEN Hai-geng

(School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: YI Zhi, E-mail: yiz@smm.neu.edu.cn)

Abstract: The total heat exchange factor method is used as core model for L2 control system of reheating furnace. Total heat exchange factor is not only a function of structure parameters, but also a function of operating parameters, thus the identification for it is hard. Based on the drag thermocouple experiment of No. 3 reheating furnace in 2050 hot rolling mill in BaoSteel, basic identification was researched. The experiment data were arranged. Meanwhile, ϕ_{CF} was identified by surface temperature gradient method. Finally, complete expression of the identification system was derived, and the result of basic recognition was analyzed. In the process of identification with a large number of sampling points, the surface heat flux curves appeared oscillating. It was caused by the mismatching between sampling period and system resolution. The ϕ_{CF} curves show that the values of ϕ_{CF} at the same site are different when the slab is still. So the compensation for ϕ_{CF} is necessary.

Key words: total heat exchange factor; drag thermocouple experiment; surface temperature gradient method; basic identification; experience furnace temperature

基于实时性的要求, 轧钢连续加热炉 L2 级控制系统^[1]通常以总括热吸收率法^[2]作为核心模型. 该方法将炉膛对钢坯传热的所有影响因素考虑为一组沿炉长方向分布的系数, 该系数即为总括热吸收率 ϕ_{CF} . 影响 ϕ_{CF} 的主要因素有炉子结构、供热制度、出钢节奏和燃烧产物的成分等. 可见 ϕ_{CF} 不仅是结构参数的函数, 而且是操作参数的函数, 因此 ϕ_{CF} 的辨识较为复杂和困难. 基本辨

识解决 ϕ_{CF} 在稳态工况下的取值问题, 具有典型意义. 本文针对宝钢 2050 热轧厂 3 号加热炉, 基于其拖偶实验(也称“黑匣子”实验), 采用表面温度梯度法反向辨识 ϕ_{CF} .

1 拖偶实验

拖偶实验的基本原理是在实验钢坯的各个典

收稿日期: 2013-08-12

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2011AA060104); 中央高校基本科研业务费青年教师科研创新基金项目(N120302003).

作者简介: 伊 智(1982-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学博士后研究人员; 张卫军(1957-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授; 陈海耿(1944-), 男, 福建龙海人, 东北大学教授, 博士生导师.

型位置上嵌入热电偶,热电偶冷端、A/D 装置和记录仪都置于“黑匣子”之中,外部是隔热材料和水冷套。黑匣子可实时记录所连接热电偶的温度。通过拖偶实验可以得到实验工况下的钢坯温度分布,进而结合对应的炉温反演 ϕ_{CF} 值。实验坯通常选用具有代表性的标准坯。本文对宝钢 2050 热轧厂 3 号加热炉所做的拖偶实验进行研究,该实验选取的是 40 号钢,规格为 240 mm × 1 320 mm × 11 200 mm。实验坯上共设置 15 个测温点。以坯长方向为参照,分别布置在中部、板坯库侧、轧机侧,还有非水印处、水印处和移动水印处,另有 12 支热电偶作为移动的炉膛热电偶,悬挂于钢坯表面上方。埋偶过程是在实验坯上钻孔,并将热电偶热端固定在孔内。孔的大小,以及热电偶与钢坯的接触程度会导致热电偶与钢坯接触热阻的变化,因此,钻孔安装热电偶的操作会直接影响测量结果。

2 数据整理

实验过程中取得大量有价值的数据。以下将着重整理与本研究密切相关的数据,以供 ϕ_{CF} 的基本辨识使用。本次实验过程约为 250 min,钢坯温度每隔 6 s 记录一次。本文假设钢坯沿其长度方向的温度均匀,因此仅对钢坯中部的温度场进行研究,其温度分布如图 1 所示。反演 ϕ_{CF} 还必须得到与钢坯升温过程对应的炉温制度。实验中,移动的炉膛热电偶所测得的温度并非真实意义下的炉温,因此应以实际的炉膛热电偶所测的温度为准,移动炉膛热电偶所测温度仅为参考值或修正值。炉内共有 33 个热电偶,上炉膛 11 个,下炉膛 11 对,各热电偶位置及实验坯到达各热电偶位置的时间示于表 1。由表可知,预热段位置处仅有一组热电偶。因此,在计算时应应对炉温进行插值,插

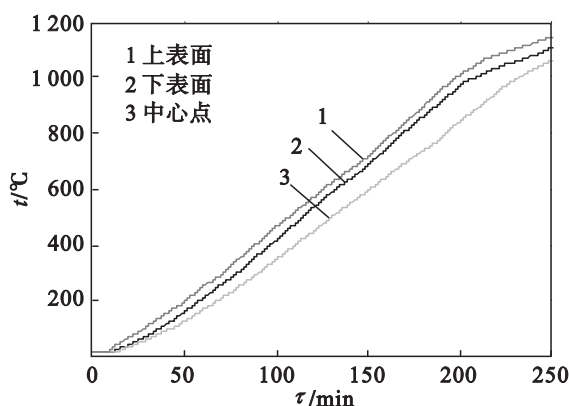


图 1 拖偶实验测量的钢坯升温曲线
Fig. 1 Heating curves of slab by black box experiment measurement

表 1 炉膛热电偶位置
Table 1 Site of hearth thermocouple

上炉膛			下炉膛		
炉顶热电偶编号	与钢坯入口处距离/mm	实验坯经过时刻	侧墙热电偶编号	与钢坯入口处距离/mm	实验坯经过时刻
U1	1245	13:15	B1A B1B	1245	13:15
U2	24 740	15:29	B2A B2B	22 805	15:23
U3	27 560	15:41	B3A B3B	28 445	15:44
U4	30 380	15:53	B4A B4B	31 265	15:56
U5	33 200	16:03	B5A B5B	34 085	16:08
U6	36 020	16:15	B6A B6B	36 905	16:17
U7	38 840	16:26	B7A B7B	39 725	16:25
U8	41 660	16:37	B8A B8B	42 545	16:42
U9	44 480	16:49	B9A B9B	45 365	16:55
U10	47 300	17:02	B10A B10B	48 185	17:11
U11	49 000	17:25	B11A B11B	49 000	17:25

值规律可参考实验时移动的炉膛热电偶所测的温度曲线(如图 2 所示)。

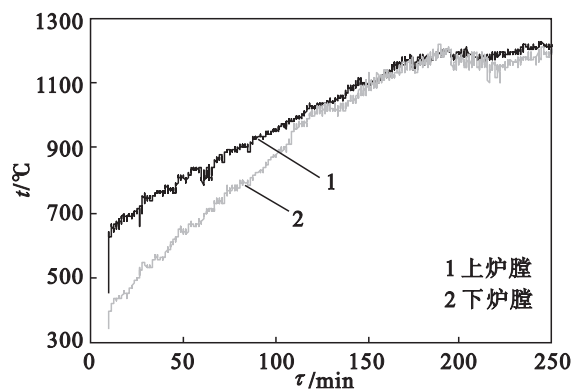


图 2 移动的炉膛热电偶温度曲线
Fig. 2 Temperature curves of mobile hearth thermocouple

炉膛热电偶所测的炉温示于图 3 和图 4。为使实验具有典型性,在实验期间应尽量保证炉温波动较小,即处于准稳态工况。但由于工业实验通常以生产为主,由图 3 可知,实验过程中上炉膛炉温在回收区波动较大,U1 热电偶测温波动最大达到 150 °C,均热段炉温波动也在 20 °C 以上,由图 4 可知,下炉膛同一位置 A、B 两侧炉温差距也都很大,平均在 20 °C 以上,并且大部分时间 A 侧的温度一直低于 B 侧的温度。而在实验后期,各段炉温都明显升高,A、B 两侧炉温也逐渐接近,可见,实验过程的炉况并不稳定,这对实验有较大影响。

从所有热电偶温度场中整理出与实验坯密切相关炉温,称为实验坯的历经炉温。上、下炉膛

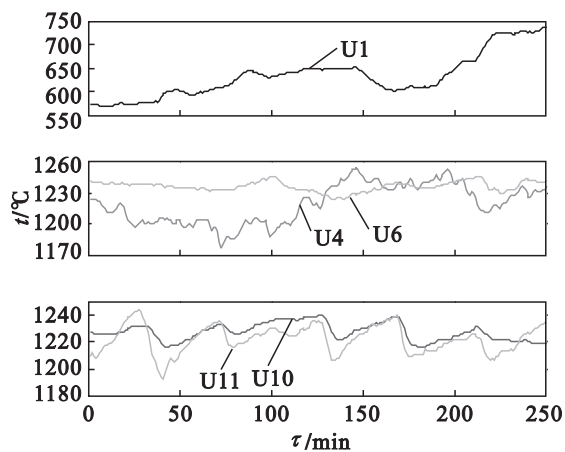


图3 实验期间上炉膛温度场

Fig. 3 Temperature fields of up hearth during experiment process

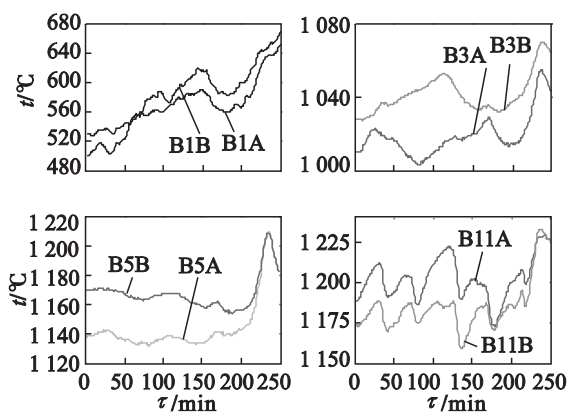


图4 实验期间下炉膛温度场

Fig. 4 Temperature fields of bottom hearth during experiment process

各有一条历经炉温曲线,使用时与钢坯上、下表面温度曲线相对应。整理的关键是找出位于实验坯前方和后方离之最近的两个炉膛热电偶,以这两点炉温作为插值端点。整理过程为程序化,可提高计算效率,同时避免人为错误。整理结果如图5所示。

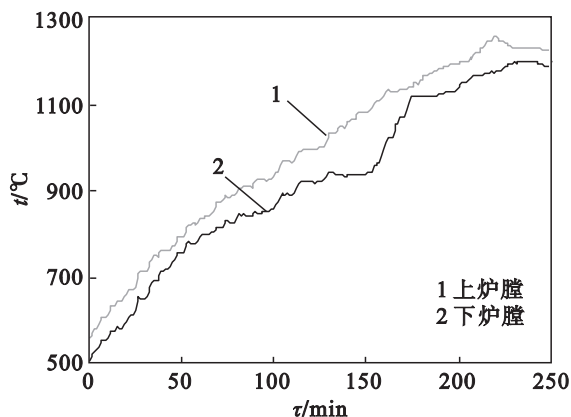


图5 历经炉温

Fig. 5 Experience furnace temperatures

3 反向辨识

基本辨识是指由拖偶实验数据来确定总括热吸收率 ϕ_{CF} 。基本辨识通常有三种方法:表面温度梯度法、平均焓增法和断面温差法。其中,表面温度梯度法最为严谨,其结果也最准确。因此,本文采用该方法反演 ϕ_{CF} 的值,其计算式为

$$\phi_{CF} = -\frac{\lambda \frac{\partial T_s}{\partial x}}{\sigma(T_f^4 - T_s^4)} \quad (1)$$

式中: T_f 为炉温, K; T_s 为钢坯表面温度, K; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数 $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$; λ 为钢坯导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; y 方向为钢坯厚度方向。实验测得钢坯的多点升温曲线,计算时只需其中的上、下表面点的升温曲线。如果想将其他点的测量结果也用上,可引入 Kalman 滤波^[3-4]等方法,这对实验测量的精度会有更高的要求。

由于表面温度已由实验测得,因此可将表面热流作为待求量,而热传导方程仍是封闭的,这就构成反问题^[5-7]。正问题是给出热流求解温度,反问题则是给出温度求解热流。内部点是正问题和反问题的共同部分,表面点是正问题和反问题的不同部分。

式(2)为 ϕ_{CF} 基本辨识所要求解的方程组,由于钢坯划分的网格较多,因此差分方程采用隐格式^[8]计算。计算时,先求解方程 $i = 2 \sim n-1$ 所组成的方程组,求出 $t_2 \sim t_{n-1}$,剩下的方程1和方程 n 的求解为移项和整理的简单运算。

$$\left. \begin{aligned} (1 + 2Fo_{1+\frac{1}{2}})t_1^1 - 2Fo_{1+\frac{1}{2}}t_2^1 &= t_1^0 + \frac{2\Delta\tau}{\rho c_1 \Delta x} q_1 \quad i=1; \\ -Fo_{i-\frac{1}{2}}t_{i-1}^1 + (1 + Fo_{i-\frac{1}{2}} + Fo_{i+\frac{1}{2}})t_i^1 - Fo_{i+\frac{1}{2}}t_{i+1}^1 &= t_i^0 \quad i=2 \sim n-1; \\ -2Fo_{n-\frac{1}{2}}t_{n-1}^1 + (1 + 2Fo_{n-\frac{1}{2}})t_n^1 &= t_n^0 + \frac{2\Delta t}{\rho c_n \Delta x} q_n \quad i=n. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: Fo 为傅里叶数, $Fo = \lambda \Delta\tau / (\rho c \Delta x^2)$; λ 为钢坯导热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; $\Delta\tau$ 为时间步长, s; Δx 为空间步长, m; ρ 为钢坯密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; c 为钢的比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; t 为钢坯温度, °C; q 为钢坯表面热流, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; 下标表示节点位置, 1 为上表面点, n 为下表面点; 上标表示时间, 1 为下一时刻, 0 为本时刻。

实验过程中,黑匣子记录仪每6s记录一次,钢坯表面热流的求解结果如图6a所示。由图可知,反演所得到的钢坯表面热流是振荡的,基本呈等幅振荡,振幅约为 $5 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$,个别处有更大幅

度的孤立振荡.这是采样周期与测量系统的分辨率不匹配所造成的.由于测量系统一次元件的灵敏度问题,或者由于数字记录系统的字长问题,无法描述在如此短时间内温度的变化.但辨识系统是基于微分方程的,尽管离散成差分方程,也严格遵守能量平衡,表面温度梯度的存在决定表面要向内部传导热量,当表面点出现异常的温度,必定会导致热流反演结果的异常.此振荡在物理上是不真实的.为消除振荡,辨识对实验数据采取去其9留其1的处理,即每1 min记录一次,这样绘制的热流曲线就较平滑,如图6b所示.因此,拖偶实验不必追求过高的记录频率.

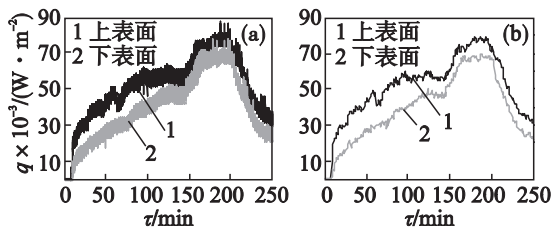


图6 钢坯表面热流
Fig. 6 Heat flow of slab surface
(a) —实际值; (b) —平滑后值.

根据钢坯表面热流和历经炉温可以反算出本次实验的 ϕ_{CF} 值,如图7所示. ϕ_{CF} 辨识结果为时间的函数,应用时需将前者转化为沿炉长方向分布的空间函数,如图8所示.由图可知, ϕ_{CF} 在同一位置处可能有不同的取值,即在钢坯静止时, ϕ_{CF} 也会变化.这从侧面反映出 ϕ_{CF} 并非是单纯的结构参数的函数,所以,基于数学模型的 ϕ_{CF} 补偿辨识是很有意义的.

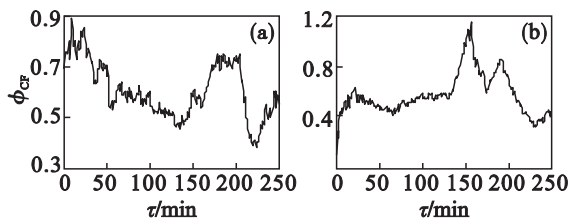


图7 ϕ_{CF} 分布
Fig. 7 Distribution of ϕ_{CF}
(a) —上炉膛; (b) —下炉膛.

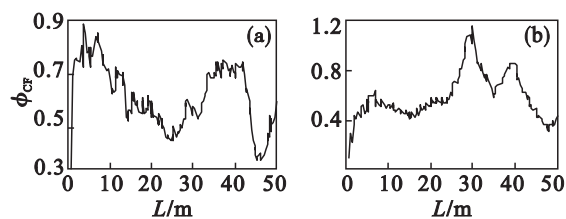


图8 ϕ_{CF} 沿炉长方向的分布
Fig. 8 Distribution of ϕ_{CF} along the furnace length direction
(a) —上炉膛; (b) —下炉膛.

4 结 论

1) 本文以宝钢2050热轧厂3号加热炉为研究对象,以拖偶实验数据为基础,根据实验测得钢坯表面温度曲线,采用表面温度梯度法反演出钢坯表面热流.同时,通过钢坯行进曲线,从拖偶实验同步记录的炉温曲线中找出实验坯的历经炉温曲线,进而结合钢坯表面热流曲线反演出 ϕ_{CF} 的值.表面温度梯度法算法严谨,反演的钢坯表面热流较为准确.

2) 在反演过程中发现,当采样点较多时,反演的钢坯表面热流曲线呈振荡趋势,这是采样周期与测量系统的分辨率不匹配所导致的.因此,在满足精度要求的前提下,不必过分追求缩短采样周期的时间间隔.

3) 由基本辨识的 ϕ_{CF} 曲线可以看出,当钢坯静止时,在同一位置处 ϕ_{CF} 值是变化的,这直观地证实了 ϕ_{CF} 动态补偿的必要性.

参考文献:

- [1] Steinboeck A, Graichen K, Wild D, et al. Model-based trajectory planning, optimization, and open-loop control of a continuous slab reheating furnace [J]. *Journal of Process Control* 2011 21: 279–292.
- [2] Wong W S, Brockett R W. System with finite communication bandwidth constraints – part II: stabilization with limited information feedback [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control* 1999 44(5): 1049–1053.
- [3] LeBreux M, Desilets M, Lacroix M. An unscented Kalman filter inverse heat transfer method for the prediction of the ledge thickness inside high-temperature metallurgical reactors [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2013 57(1): 265–273.
- [4] Kose N, Salor O, Leblebicioglu K. Kalman filtering based approach for light flicker evaluation of power systems [J]. *IET Generation Transmission & Distribution* 2011 5(1): 57–69.
- [5] Bialobrzewski I. Determination of the heat transfer coefficient by inverse problem formulation during celery root drying [J]. *Journal of Food Engineering* 2006 74(3): 383–391.
- [6] Berdnik V V, Mukhamedyarov R D. Application of the method of neural networks to solution of the inverse problem of heat transfer [J]. *High Temperature* 2003 41(6): 839–843.
- [7] Vakili S, Gadala M S. Low cost surrogate model based evolutionary optimization solvers for inverse heat conduction problem [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2013 56(1/2): 263–273.
- [8] Kamont Z, Kropielnicka K. Implicit difference methods for evolution functional differential equations [J]. *Numerical Analysis and Applications* 2011 4(4): 294–308.