

基于轮廓向量集和遗传算法的高炉 炉缸内衬侵蚀预测模型

邵磊,余珊,王楠,邹宗树
(东北大学冶金学院,辽宁沈阳 110819)

摘 要 :针对高炉炉缸连续式生产、工况恶劣以及耐火材料内衬实际形貌在生产过程中不断变化的特点,提出了一种利用轮廓向量集表征炉缸内衬热面形状的简易方法,从而将求解未知定温边界几何形状的复杂反问题归结为搜索最佳轮廓向量集的最优化数学问题。结合数值传热学、有限元法以及遗传算法,建立了能够准确预测高炉炉缸内衬轮廓的传热“反问题”数学模型。在陶瓷杯复合炉缸的基础上,制备典型的非均匀“象脚状”异常侵蚀数值样本,对模型的有效性、稳定性以及计算结果的精确度进行了校验。结果表明,上述模型具有广阔的实际应用前景。

关 键 词 :高炉炉缸;内衬侵蚀;轮廓向量集;传热;遗传算法;反问题

中图分类号:TF 572 文献标志码:A 文章编号:1005-3026(2016)06-0790-05

A Mathematical Model for Estimating the Lining Erosion of Blast Furnace Hearth Based on Profile Vectors and Genetic Algorithm

SHAO Lei, YU Shan, WANG Nan, ZOU Zong-shu

(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZOU Zong-shu, E-mail: zouzs@mail.neu.edu.cn)

Abstract : With respect to consecutive drainage, aggressive internal conditions and varying lining profile during production process in blast furnace hearth, a simple method is proposed for representing the lining profile by a set of lining profile vectors. It can convert the solving of a complicated inverse heat transfer problem with unknown geometries at a specified-temperature boundary into searching the optimal set of profile vectors in an optimization problem. Integrating numerical heat transfer theory and finite element method with genetic algorithm, an inverse problem oriented mathematical model has been developed, which can predict the lining profile of blast furnace hearth accurately. A testing example of elephant-foot erosion pattern on the basis of an intact ceramic cup synthetic hearth, is employed to examine the effectiveness, stability and accuracy of the model. The results indicate that the model would have a broad prospect of practical applications.

Key words : blast furnace hearth; lining erosion; profile vectors; heat transfer; genetic algorithm; inverse problem

高炉大型化的综合效益显著,但长寿才是体现高炉大型化优势的根本保障,短寿的大高炉不仅无优势可谈,反而会造成巨大浪费。近些年,通过采用先进的冷却设备和耐火材料,炉腹、炉腰和

炉身下部中修频率高、寿命短的问题已基本解决,但炉缸问题依然突出,使得限制高炉寿命的瓶颈由炉腹、炉腰以及炉身下部区域转向炉缸。炉缸部位砖衬在生产中的侵蚀耗损不可避免,但由于高

炉操作及其工况的特殊性,至今尚未出现可以直接观察和测量炉缸内部状况的热工设备.因此,目前针对高炉炉缸内衬侵蚀状态的研究以采用基于求解传热“正问题”或“反问题”的数值模拟方法为主.

炉缸传热“正问题”的实质是根据预先设定的边界和初始条件、炉缸内衬轮廓及各砌筑材料物性参数等计算炉缸内温度分布,然后根据 $1\,150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 铁水凝固线和 $870\text{ }^{\circ}\text{C}$ 碳砖脆化线等估测内衬侵蚀状态.然而,高炉炉缸内衬轮廓在生产过程中不仅无法直接测量,而且还会因耐火砖衬的逐渐侵蚀和渣铁凝壳的生成与消融不断变化.因此,“正问题”模型适用于建炉之前的炉缸结构设计优化或炉役初期炉缸内衬侵蚀状态的评估^[1-6].求解炉缸传热“反问题”是利用炉缸部分已知边界和初始条件,以炉衬内预埋热电偶处实测温度为“评价条件”,进而推断定温边界未知几何形状的过程.虽然“反问题”模型的建立和求解较“正问题”模型要复杂很多,但其适于在线应用,特别是能够实时监测炉缸内衬侵蚀形貌,进而为采取相应的补救措施和科学安排高炉大修提供依据的优点依然吸引了一些学者的关注^[7-11].

目前国内已出现了应用“反问题”模型进行炉缸侵蚀状态在线监测的成功范例,但总的来说模型的精确度和普及程度仍有提升的空间.另外,已有相关文献报道大都忽略对建模思路和过程的阐述,而侧重于展示模型的计算结果或在线应用效果,这也阻碍了炉缸传热“反问题”模型的进一步推广.鉴于此,本文依据复杂结构传热问题中未知定温边界几何形状的反演推断原理,结合数值传热学、有限元法以及遗传算法,建立能够准确预测高炉炉缸内衬轮廓的“反问题”数学模型.本文重点阐述以上“反问题”模型的构建思路和过程,然后通过应用于实际炉缸结构的算例校验模型的有效性、稳定性以及计算结果的精确度.

1 模型构建

1.1 炉缸内衬轮廓数学表征

由于受到高炉操作条件、炉缸砌筑结构、死料柱结构状态以及冷却制度等的影响,炉缸内衬形貌在实际生产过程中是动态变化的,即使在某一特定时刻,其轮廓线也很难用数学表达式描述.

为此,本文提出一种与边界元法类似,利用一组同起点向量描述炉缸内衬热面轮廓的处理方法.如图 1 所示,在计算区域内,以 $r=0$ 和 $z=H$

(此值可根据计算需要灵活调整)两条直线的交点为公共起点,自下而上沿逆时针方向以相同角度间隔 θ 向炉衬发射 n 条直线,与侵蚀轮廓形成 n 个交点.若假设依次连接这些交点所构成的多段线可以代表实际轮廓线,则由公共起点 P 指向以上各交点的有向线段(即图 1 中 x_1, x_2, \dots, x_n)便是炉缸内衬实际轮廓的决定变量,下文中统称这组有向线段为轮廓向量集.显而易见,轮廓向量集越大,连接各交点构成的多段线就越逼近于实际轮廓线,但同时,后续数学系统所包含的自变量也越多.

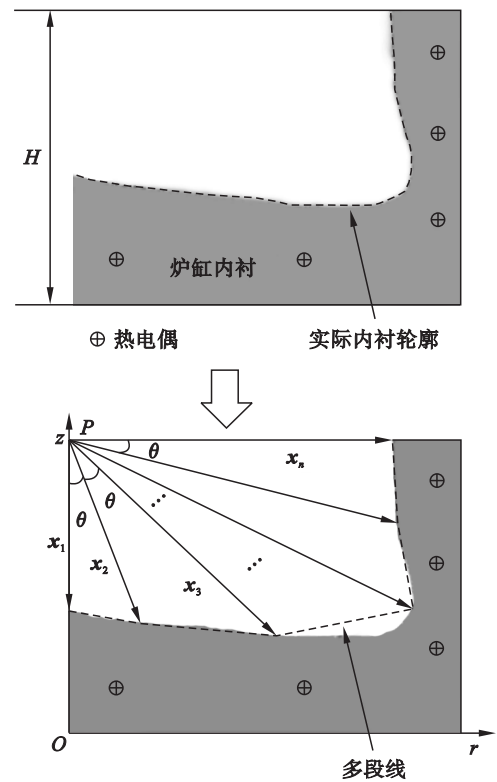


图 1 利用轮廓向量集表征实际炉缸内衬轮廓示意图
Fig. 1 Sketch of representing the actual lining profile of blast furnace hearth with profile vectors

1.2 模型假设与简化

鉴于高炉炉缸内传输现象的复杂性及其影响因素的多样和多变,为建立炉缸内衬轮廓预测模型,进行以下假设与简化:

- 1) 虽然高炉炉缸内衬形貌从一代炉役的时间跨度上看是不断变化的,但具体到每个生产日内,炉缸内衬热电偶示数的平均变化幅度并不显著.因此,本文模型暂不考虑非稳态传热过程.
- 2) 将高炉炉缸视为轴对称几何空间并应用柱坐标体系进行数学建模.与轴向和径向相比,炉缸周向热量传递忽略不计.
- 3) 模型暂不考虑高炉炉缸内化学反应、流体流动、凝壳生成与消融、砌筑区内气隙和不同材料

间接接触热阻对传热计算的影响。

综上所述,模型所涉及的稳态导热方程如式(1)所示,其中 t 为温度, λ 为炉缸各层内衬导热系数, r 和 z 分别为炉缸径向和轴向坐标。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) = 0. \quad (1)$$

求解上述方程的常用数值方法包括有限差分法、有限单元法以及边界元法。有限差分法的最大缺点是对计算边界的要求苛刻,导致其难以处理带有复杂几何边界的计算区域。边界元法适用于求解具有移动或复杂边界的问题,但存在难以处理包含非均匀介质计算区域(如由密度和导热系数各不相同的耐火材料砌筑而成的高炉炉缸)的缺点。因此,本文采用有限单元法进行计算区域的离散及炉缸温度场的解算,其中涉及的网格划分方法、离散化稳态导热方程推导以及数值解法详见文献[10]。

1.3 计算流程

炉缸传热“反问题”模型的求解通常开始于为内衬轮廓假定一个初始形状,使“正问题”的定解要求得到满足,然后计算内衬温度分布。将各热电偶位置处温度计算值与实测值的吻合度作为评价准则,按照一定规则修正轮廓形状,再重新计算内衬温度分布。如此反复,直至温度吻合度达到预先设定的门限。

$$E = \frac{\sum_{j=1}^k (t_{\text{meas } j} - t_{\text{calc } j})^2}{\sum_{j=1}^k t_{\text{meas } j}^2}. \quad (2)$$

式(2)为本文采用的温度吻合度评价函数,其中 k 为炉衬内可提供有效数据的热电偶数量,下标 meas 和 calc 分别代表测量和计算值。由于利用轮廓向量集表征内衬热面轮廓,求解使上述评价函数极小的内衬边界形状等价于搜索最佳轮廓向量集的最优化数学问题。为避免因给定搜索方向或规则而导致搜索结果陷入局部最优,本文采用基于概率化寻优模式的遗传算法进行各轮廓向量的改进。因此,式(2)就相应地称为适应度函数,而遗传算法对内衬轮廓的改进需遵循使适应度函数值变小的原则。事实上,因其适用于解决复杂非线性及多维寻优问题,基于自然界遗传机制和生物进化论的遗传算法已非常广泛地应用于自动控制、计算科学、工程设计、故障诊断、管理科学等领域。然而,运用遗传算法进行高炉炉缸内衬轮廓识别的研究工作鲜有报道。

如前所示,炉缸内衬轮廓向量集为 n 条有向

线段 x_1, x_2, \dots, x_n ,这些有向线段可由对应的径向和轴向坐标(即 r_1, r_2, \dots, r_n 和 z_1, z_2, \dots, z_n)表征。若令各有向线段长度为 s_1, s_2, \dots, s_n ,各线段间夹角 θ 为 $90/(n-1)$ 度,因而可进一步将对应的径向和轴向坐标归结为各线段长度的函数。因此,基于上述讨论,本文模型自变量给定为一组有向线段长度,即 s_1, s_2, \dots, s_n ,用以计算轮廓向量集,进而构造内衬轮廓、求解温度分布,并最终得到适应度函数值。

图2为本文模型的计算流程,其中遗传算法一代种群包含30个个体,而每一个体又对应于一组有向线段长度。在搜索过程中,遗传算法不需要其他外部信息,仅通过适应度函数值评估每一个体的优劣,并以其作为后续交叉和变异操作的依据。需要说明的是,图2中初始内衬轮廓为所计算炉缸的未侵蚀内衬形貌,且其中停机条件设定为连续10代种群内最优个体无差异。

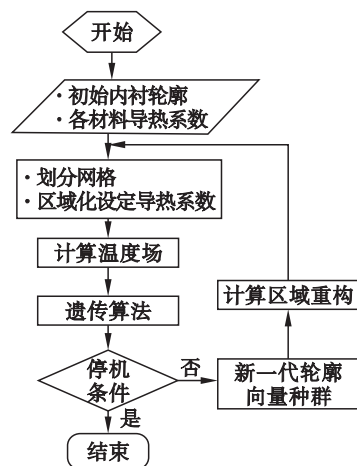


图2 高炉炉缸内衬轮廓预测模型计算流程图

Fig. 2 Flow chart of the mathematical model for estimating the lining profile of blast furnace hearth

1.4 计算参数与边界条件

以典型的“隔热法”,即陶瓷杯结构炉缸为例,运用以上数学模型进行内衬热面轮廓的反演推断。对某“隔热法”炉缸进行合理简化^[12],绘制如图3所示的未侵蚀内衬结构,其中标出了炉衬内各预埋热电偶位置,并给出炉缸各层材料名称及导热系数。

为计算炉缸内衬温度场,设定以下边界条件:

1) 炉缸内衬热面边界温度为定值,即 1150°C 铁水凝固线。

2) 炉壁上上部界面断面和炉底对称轴界面均为绝热边界。

3) 炉壁外围配备冷却壁,将冷却壁中纵向排

布的水管作环向排布等效处理,视其为对流边界,给定冷却水温 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,综合传热系数 $320\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$.

4) 炉底下部铺设风冷管,视其为对流边界,给定平均风温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,综合传热系数 $30\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$.

2 算例分析

2.1 侵蚀样本

为验证模型的有效性并考察其精度,首先制备已知炉缸内衬热面轮廓及各处热电偶示数的侵蚀样本.在完整炉缸结构(见图 3)的基础上构造高炉大修或停炉解剖时常见、同时又是“反问题”模型最难处理的非均匀“象脚状”侵蚀形貌,然后计算内衬温度场,并提取各参考点温度值.

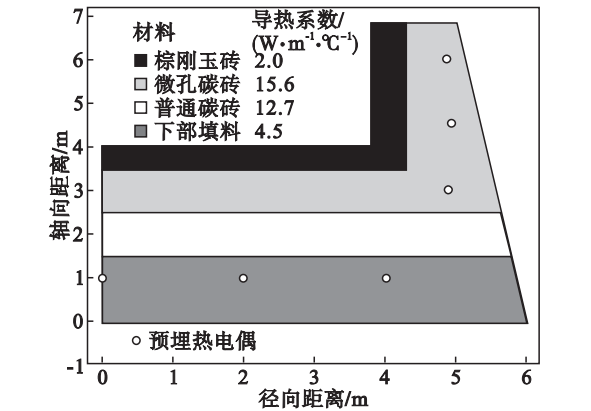


图 3 陶瓷杯复合炉缸结构和热电偶布置
Fig. 3 Structure of the ceramic cup synthetic hearth and thermal couple arrangement

图 4 为所构造的样本侵蚀形貌及对应温度分布云图.可以看到,炉底上部陶瓷杯尚未完全耗

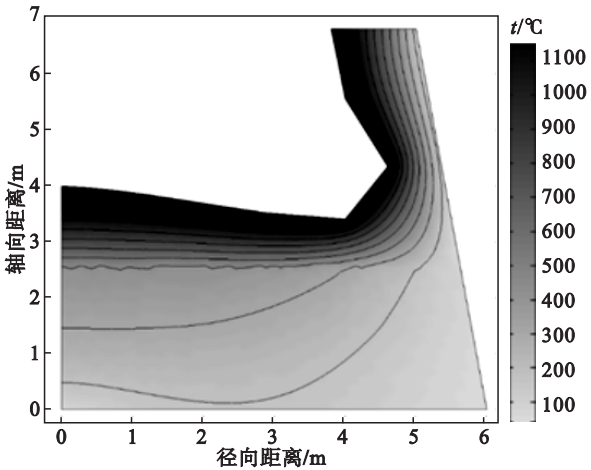


图 4 “象脚状”样本侵蚀形貌及对应温度分布云图
Fig. 4 Erosion sample of elephant-foot pattern and the calculated temperature contours

蚀,其内部温度梯度较大,因而可有效降低炉底中下部碳砖温度.然而,炉壁炉底交接处陶瓷杯已完全耗蚀,导致此处碳砖失去具有较大热阻陶瓷材料的保护,温度升高,因而成为威胁炉缸安全的关键区域.

2.2 计算结果

应用“反问题”模型进行高炉炉缸内衬轮廓反演推断所面临的最大障碍是目标变量(如本文中的轮廓向量)通常多于炉衬内预埋热电偶数量,导致系统具有一定自由度(目标变量数目与热电偶数量差值的绝对值),从而影响的稳定性.为展示遗传算法在处理具有一定自由度“反问题”系统方面的优势,给定不同自由度,依据热电偶数量确定轮廓向量数目,然后将样本热电偶温度输入模型运算,监测 72 h 后发现,自由度从 0 到 6 的增加对计算过程未产生任何影响.图 5 为不同自由度下逆算内衬轮廓与样本轮廓的比较.可以看到,随着系统自由度的增大,逆算轮廓与样本轮廓的重合度提高.然而,当自由度由 4 向 6 继续增加时,逆算轮廓的改进变得不太明显.将不同自由度下热电偶处逆算温度及其与样本值的相对误差(绝对值)列于表 1,各条件下逆算温度的最大相对误差分别为 17.79%, 18.57%, 1.25% 和 0.47%.由以上数据可得出类似结论,即增加自由度可提高温度吻合度,但当其增大到一定值后,改善的程度将大大降低.

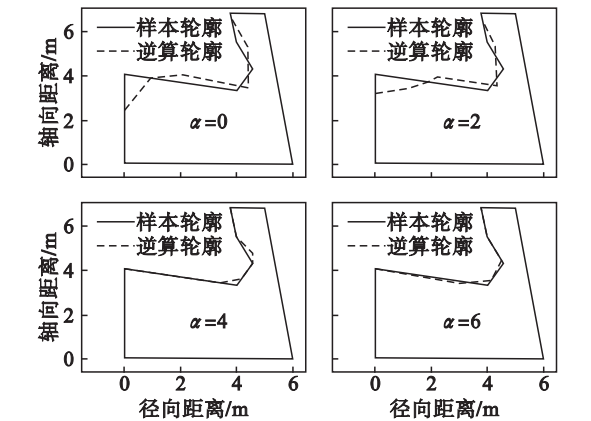


图 5 不同自由度下逆算内衬轮廓与样本轮廓的比较
Fig. 5 Comparison between inversely calculated and sample lining profiles under different freedoms

为进一步揭示上述规律,将不同条件下计算耗时以及参考点处逆算温度的平均相对误差列于表 2.由表中数据可知,随着系统自由度的增加,反演求解所需时间增长,而逆算温度平均相对误差逐渐减小.当自由度为 4 时,逆算温度平均相对误差仅为 0.43%,若此时继续增加自由度,计算

表 1 不同自由度下参考点处逆算温度及其相对误差

Table 1 Inversely calculated temperatures in the reference points and their relative errors under different freedoms

热电偶号	样本值/℃	$\alpha=0$		$\alpha=2$		$\alpha=4$		$\alpha=6$	
		逆算值/℃	相对误差 /%	逆算值/℃	相对误差 /%	逆算值/℃	相对误差 /%	逆算值/℃	相对误差 /%
1	199.5	201.1	0.80	202.6	1.55	199.6	0.05	199.5	0.00
2	200.8	193.5	3.64	196.3	2.24	200.5	0.15	200.9	0.05
3	147.8	141.9	3.99	142.2	3.79	146.4	0.94	147.1	0.47
4	294.7	331.8	12.59	325.0	1.28	294.9	0.07	295.2	0.17
5	606.5	574.8	5.23	574.6	5.26	605.8	0.12	606.3	0.03
6	279.4	329.1	17.79	331.8	18.75	282.9	1.25	279.4	0.00

表 2 不同自由度下计算耗时和平均相对误差
Table 2 Computational time and mean relative errors under different freedoms

评价项	$\alpha=0$	$\alpha=2$	$\alpha=4$	$\alpha=6$
计算耗时/s	175.30	267.50	319.10	543.30
平均相对误差/%	7.34	5.48	0.43	0.12

耗时将增加 70.2 %。因此可以认定,基于轮廓向量和遗传算法的传热“反问题”模型在实际应用于不同高炉炉缸体系时应存在不同最优自由度。在本文所研究参数和条件范围内,既能保证高计算精度同时又不耗费较长计算时间的最优系统自由度为 4。

3 结 论

1) 利用轮廓向量集表征炉缸内衬热面轮廓,将求解未知定温边界几何形状的复杂反问题归结为搜索最佳轮廓向量集合的最优化数学问题的处理方法行之有效。

2) 以遗传算法为核心的计算流程适于处理具有一定自由度的炉缸“反问题”系统。

3) 基于轮廓向量和遗传算法的传热“反问题”模型在实际应用于不同高炉炉缸体系时应存在不同最优自由度。在本文所研究参数和条件范围内,既能保证高计算精度同时又不耗费较长计算时间的最优系统自由度为 4。

参考文献：

[1] Zhao H ,Cheng S ,Zhao M. Analysis of all-carbon brick bottom and ceramic cup synthetic hearth bottom[J]. *Journal of Iron and Steel Research International* ,2007 ,14(2) : 6-12.

[2] Zhang F. Design and operation control for long campaign life of blast furnaces[J]. *Journal of Iron and Steel Research International* 2013 20(9) 53-60.

[3] Zhao H ,Huo S ,Cheng S. Study on the early warning mechanism for the security of blast furnace hearths[J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials* , 2013 20(4) 345-353.

[4] Guo B ,Maldonado D ,Zulli P et al. CFD modelling of liquid metal flow and heat transfer in blast furnace hearth[J]. *ISIJ International* 2008 48(12) :1676-1685.

[5] Zhang Y ,Deshpande R ,Huang D ,et al. Numerical analysis of blast furnace hearth inner profile by using CFD and heat transfer model for different time periods[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2008 51(2) :186-197.

[6] Komiya K ,Guo B ,Zugbi H et al. Improved CFD model to predict flow and temperature distribution in a blast furnace hearth[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B* , 2014 45(5) :1895-1914.

[7] Brännbacka J ,Saxén H. Model for fast computation of blast furnace hearth erosion and buildup profiles[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research* ,2008 ,47(20) :7793-7801.

[8] 陈良玉 李玉 鄢虎林. 二维法在高炉炉缸内衬侵蚀模型中的应用研究[J]. 钢铁 2008 43(8) :12-15.

(Chen Liang-yu ,Li Yu ,Wu Hu-lin. Application of two dimensional method to blast furnace hearth erosion modelling [J]. *Iron and Steel* 2008 43(8) :12-15.)

[9] 陈良玉 李玉 王子金,等. 传热边界逆解在高炉炉缸侵蚀诊断中的应用[J]. 东北大学学报(自然科学版) 2009 30(8) :1135-1138.

(Chen Liang-yu ,Li Yu ,Wang Zi-jin ,et al. Application of inverse solution to boundary of heat transfer in erosion diagnosis of blast furnace hearth[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)* 2009 30(8) :1135-1138.)

[10] 陈佳鑫. 高炉炉缸侵蚀监测模型的研究[D]. 沈阳 :东北大学 2011.

(Chen Jia-xin. Study on monitoring model for hearth wear of blast furnace[D]. Shenyang :Northeastern University 2011.)

[11] Zagaria M ,Dimastromatteo V ,Colla V. Monitoring erosion and skull profile in blast furnace hearth[J]. *Ironmaking and Steelmaking* 2010 37(3) 229-234.

[12] Brännbacka J. Model analysis of dead-man floating state and liquid levels in the blast furnace hearth[D]. Åbo :Åbo Akademi University 2004.