

[文章编号] 1004- 0609(2001)04- 0716- 05

闪速炉反应塔炉膛内形的数值模拟与在线显示^①

梅 焱¹, 陈 卓¹, 任鸿九¹, 张卫华², 吴 军²

(1. 中南大学 物热系热工设备仿真与优化研究所, 长沙 410083; 2. 贵溪冶炼厂, 贵溪 335424)

[摘 要] 采用传热数值计算的方法对闪速炉反应塔塔壁进行了模拟, 获得了反应塔壁面温度分布及其内壁挂渣层厚度的仿真计算结果, 首次实现了反应塔炉膛内形的在线显示。用于工业生产后, 经现场检验, 软件仿真计算结果与实际数值接近, 其中炉膛温度相差不足 40 ℃, 挂渣层厚度平均误差 < 3%, 可完全满足生产要求。该软件的研制为实践中实现反应塔炉膛内形实时监控创造了条件, 并成为闪速炉生产操作优化的理论依据。同时通过仿真研究发现, 冷却水套对反应塔炉膛内形影响显著, 加强冷却系统的强度将有利于保护炉衬, 延长炉体寿命。

[关键词] 闪速炉; 炉膛内形; 数值仿真

[中图分类号] TF 806. 25

[文献标识码] A

闪速炉自问世以来, 随着其结构和操作的不断发展完善, 逐渐成为铜冶炼生产的主要设备之一。作为闪速炉的一个重要组成部分, 反应塔是闪速熔炼进行的主要场所, 其内部壁面温度直接影响炉膛内形的变化, 即挂渣的形成与稳定, 进而影响闪速炉生产的正常进行以及反应塔内衬寿命, 因此反应塔炉壁状况一直是现场进行闪速炉生产调控的重要参数之一。但由于反应塔结构的密闭性以及其内部高温的特性, 一直无法实现对其炉膛内形参数的直接监控, 而仅能根据外部壁面的温度结合实践经验来判断系统运行状况。本文作者研究的反应塔炉膛内形在线显示软件, 利用计算机在线获取各时刻闪速炉的生产参数(闪速炉处理量、目标铜钨品位、工艺风富氧率等)以及相应时刻闪速炉外部钢板与内部炉衬交界处预埋热电偶的温度数据作为输入条件, 采用数值模拟的方法对反应塔炉膛内形进行了二维建模计算, 能够及时再现反应塔塔壁温度场分布与挂渣状况, 为实时监测反应塔内衬温度场和塔壁挂渣厚度提供了手段, 是闪速炉生产操作优化的理论依据。

1 模型概述

为了对反应塔炉膛内形进行模拟与仿真研究, 我们以反应塔的某一轴向截面上的壁面形状为研究对象, 以反应塔壁面的温度场计算为基础, 根据壁面热传递状况来模拟内部壁面挂渣的形成与融化现

象, 实时显示反应塔壁面形状的变化。

由于配置了中央扩散型精矿喷嘴的反应塔为一圆柱结构, 其截面具有良好的轴对称性, 当外部条件及炉内温度均一时, 其轴截面上各条件也将关于中心轴完全对称, 因此在建模中我们可以大大减少计算量, 而只取定轴截面的一半作为计算区域, 然后对称映射而得到整个截面的二维仿真结果。另外, 由于反应塔塔壁厚度相对于半径来说很小, 因而可近似地视为平壁二维导热问题。计算中取定的范围具体界定如下: 上部(下文中称上边界)以塔壁与塔顶的交界面为界; 下部(下文中称下边界)以反应塔与沉淀池连接处为界; 外部(下文中称左边界)以钢板为边界; 内部(下文中称右边界)以塔壁挂渣为边界(初始时假定挂渣充满整个炉膛); 初始计算范围为反应塔轴向截面的一半, 共包含有 4 种不同材质的传热介质: 钢板, 铜水套, 炉体砌砖(炉衬)及内壁挂渣, 按介质划分计算区域如图 1 所示。

1.1 反应塔塔壁内温度场模型

反应塔塔壁内的传热形式, 以各种炉衬耐火材料、水套及凝固渣层内部以及相互之间的传导传热为主, 边界部分则还包括外围钢板与空气之间的对流传热以及内壁挂渣与炉内烟气之间的辐射与对流传热等形式, 传热现象复杂。根据能量守恒定律, 其二维稳态传热微分方程式表示为:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + S = 0 \quad (1)$$

① [收稿日期] 2000- 09- 21; [修订日期] 2001- 01- 05

[作者简介] 梅 焱(1935-), 男, 教授, 博士生导师。

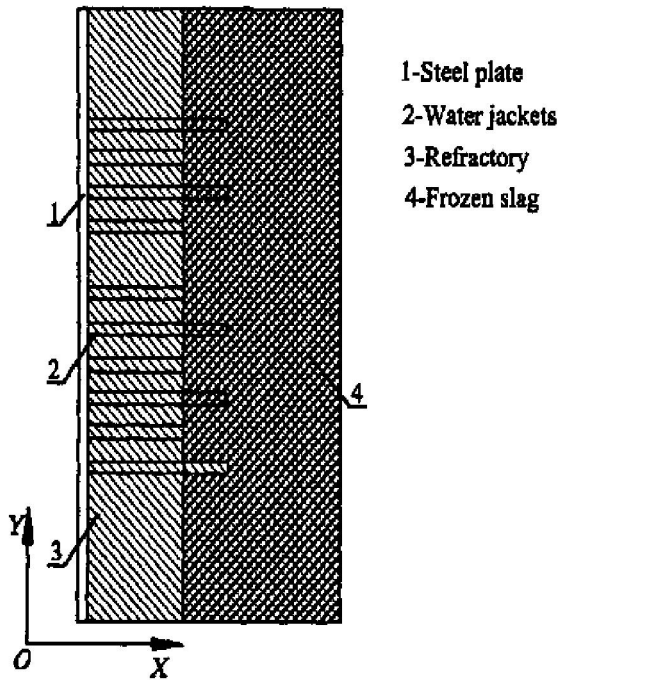


图 1 反应塔壁面计算区域划分

Fig. 1 Sketch of reaction shaft wall in computational area

边界条件为

上、下边界: $dq_s = 0$

左、右边界: $-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_s dA_s =$

$\alpha_c (T_f - T_s) dA_{sc} + \alpha_r (T_s - T_f) dA_{sr}$

式中 ρ —物质密度, λ —传导传热系数, S —源项, q —节点热流; A —传热面积; α_c —对流传热系数, α_r —辐射传热系数。

内节点传热微分方程离散化后得:

$$\left(\frac{k_{i-1,j} \Delta y}{\Delta x} + \frac{k_{i+1,j} \Delta y}{\Delta x} + \frac{k_{i,j-1} \Delta x}{\Delta y} + \frac{k_{i,j+1} \Delta x}{\Delta y} - S_p \Delta x \Delta y \right) T_{i,j} = \frac{k_{i-1,j} \Delta y}{\Delta x} T_{i-1,j} + \frac{k_{i+1,j} \Delta y}{\Delta x} T_{i+1,j} + \frac{k_{i,j-1} \Delta x}{\Delta y} T_{i,j-1} + \frac{k_{i,j+1} \Delta x}{\Delta y} T_{i,j+1} + S_c \Delta x \Delta y \quad (2)$$

式中 $\Delta x, \Delta y$ —网格 x, y 方向边长; k —综合传热系数; S —源项; $T_{i,j}$ —节点 (i, j) 温度。

计算中网格均匀划分, 采用超松弛迭代法求解温度场分布。

1.2 炉膛内移动边界的计算模块

反应塔炉壁内层是壁面挂渣。在生产进行的过程中, 挂渣不断随着壁面温度和炉内热量等因素的变化而消长, 这使得反应塔炉膛内形的内边界实际是一个可移动变化的区域, 它的模拟必须与炉膛温度与传热紧密联系。在移动边界的计算中, 对于边

界上的节点, 在满足传热方程的基础上, 若同时满足以下温度与热量的双重限制条件时, 该节点代表的单元体挂渣熔化(消亡); 反之, 则节点处挂渣凝固或稳定不变。

$$\begin{cases} T_{i,j} \geq T_{\text{melt}} \\ Q_{i,j} \geq Q_{\text{melt}} + c_p m (T_{\text{melt}} - T_{i,j}) \end{cases}$$

式中 $T_{i,j}$ —节点温度; T_{melt} —挂渣熔化温度; $Q_{i,j}$ —节点热量; Q_{melt} —节点挂渣熔化潜热; c_p —挂渣定压比热容。

移动边界计算流程图如图 2 所示。

2 边界条件有关参数的确定

计算反应塔塔壁内温度, 除上下连接部位边界为第二类边界条件外, 其余边界均采用第三类边界条件, 内部熔体边界取定为壁面挂渣熔化温度 1080°C , 外部环境温度取定为 30°C 。初始温度场则利用在线采集到的预埋在钢板与耐火炉衬之间的 12 支热电偶的温度读数作为该表面的温度条件。当闪速炉正常运行生产, 因为产量波动小, 可以将壁面温度场视为稳态传热状态, 并假定各部分介质的物性参数不变。计算中涉及的参数及取值如表 1 所示。

3 炉膛内形计算

反应塔炉膛内形仿真计算包括两大部分: 反应塔塔壁内温度场计算与反应塔内壁挂渣移动边界计算。仿真计算的主要步骤为: 1) 对计算区域进行网格划分(初次计算共有 230×30 个网格)并初始化各节点温度; 2) 求解节点温度; 3) 移动边界计算; 4) 收敛判断, 当不满足收敛判据时重复 2)~4)。

温度场计算结果以同一节点前后两次计算温度差为收敛判据: $|T_{i,j}^{k+1} - T_{i,j}^k| \leq 2$, 即当温度场所有节点均满足此条件时即终止温度场计算; 移动边界计算以修改的边界节点数收敛判据为 $J_{\text{change}} < 10$, 即当计算中因挂渣熔化或凝固而修正其边界的节点数小于 10 个时即终止计算。

经现场对反应塔塔壁内温度及挂渣厚度进行测试并与模拟计算值进行比较, 发现两者吻合良好: 炉内温度相差不足 40°C , 挂渣层厚度平均误差 $< 3\%$, 因此该模型可满足对反应塔塔壁内温度分布的实时监控的需要。

作者模拟计算了当混合精矿铜硫比为 0.29, 闪速炉炉渣铁硅比为 1.27 时, 不同操作条件下反应塔壁不同的温度分布与炉膛内形。图 3 所示为反应

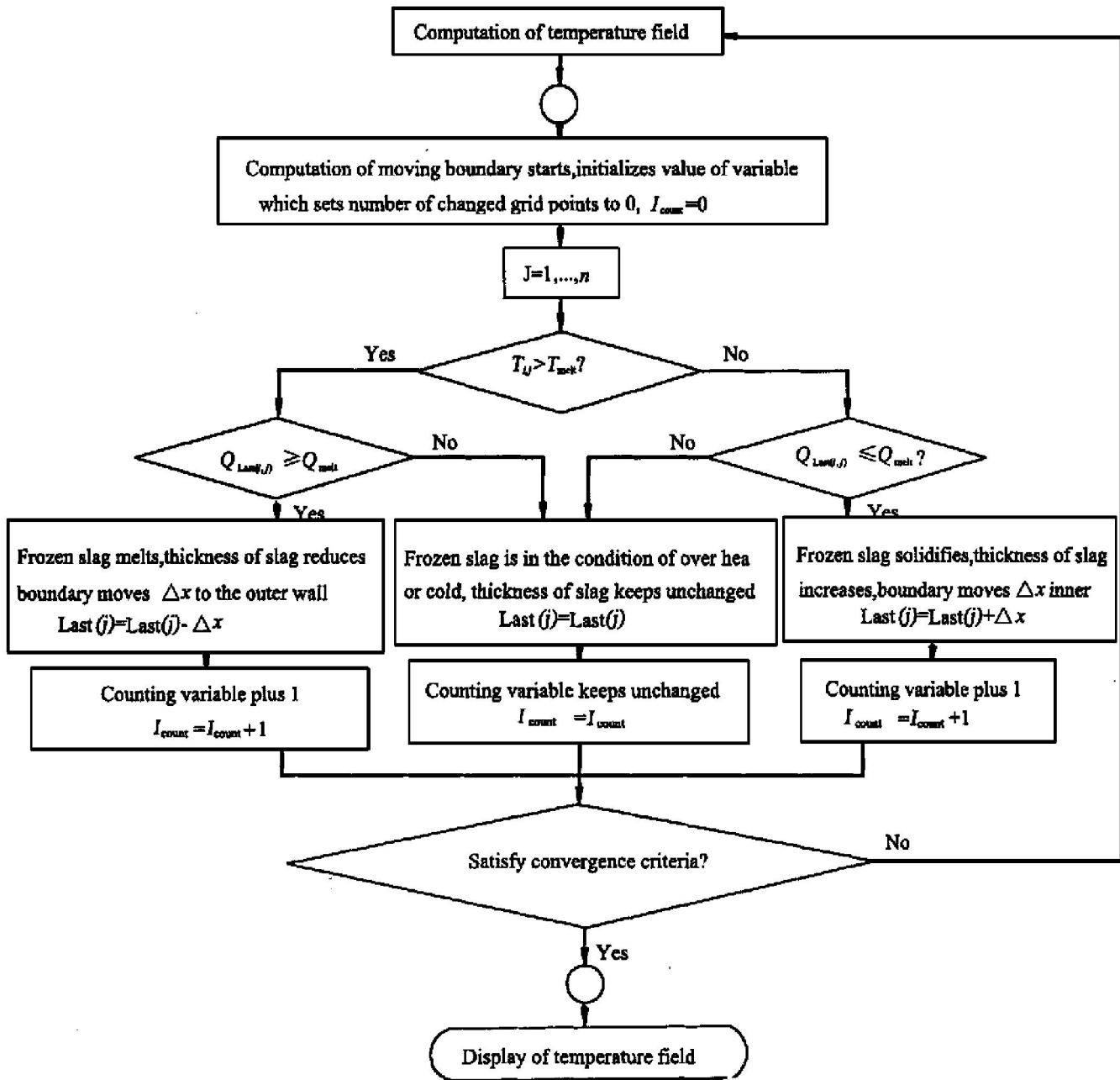


图2 炉膛内移动边界计算流程

Fig. 2 Flow diagram of moving boundary computation

表1 计算用导热系数表

Table 1 Heat transfer coefficients

Coefficient	Value of coefficient
Conductivity of steel, $\lambda_1 / (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	51.08
Conductivity of refractory, $\lambda_2 / (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$1.1 \times (1 + 0.9 \times 10^{-3} T)$
Conductivity of water jacket, $\lambda_3 / (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	117.24
Conductivity of frozen slag, $\lambda_4 / (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	1.19
Convection coefficient on left bound, $\alpha_1 / (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	$109.49 \lambda_a$
Convection coefficient on right bound, $\alpha_2 / (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	$0.307 \times \lambda_g \times Pr_g^{1/3} / \nu_g^{1/2}$
Radiation coefficient on right bound, $\alpha_r / (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	$\frac{5.675 \cdot [(\frac{T_1}{100})^4 - (\frac{T_2}{100})^4]}{\frac{1}{\epsilon_2} + \frac{1}{A_1} - 1} / (T_1 - T_2)$

Note: λ_a —Thermal conductivity of air; λ_g —Thermal conductivity of gas; Pr_g —Prantle number of gas; ν_g —Viscosity of gas; A_1 —Absorptance of gas; ϵ_2 —Emissivity of inner bounds

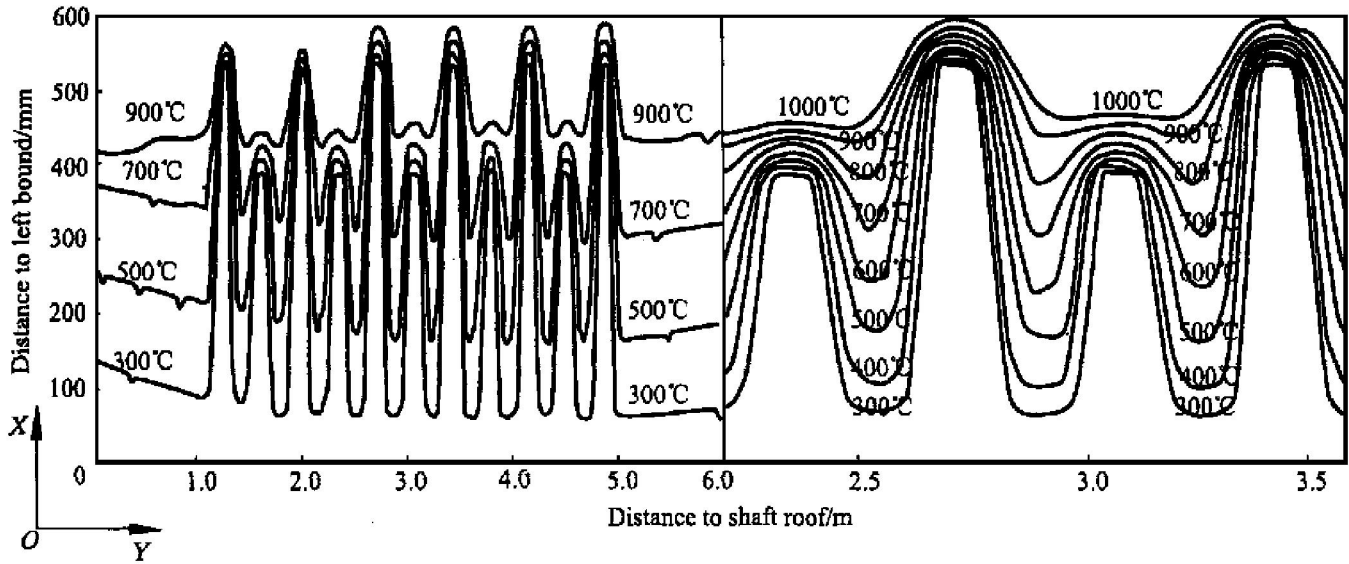


图 3 铜钼品位 60%，富氧率 60%，处理能力 110 t/h 时反应塔塔壁内温度分布

Fig. 3 Distribution of temperature field in shaft wall at condition of matte grade 60%, rich oxygen rate 60%, and concentrate productivity of 110 t/h
(a) —Whole temperature field of wall; (b) —Local amplification of cooling jackets

塔壁的温度场全图及水套区域的温度分布局部放大显示，其对应的生产条件为：混合精矿处理量为 110 t/h，铜钼品位为 60%，工艺风富氧率为 60%。根据大量计算结果所得的反应塔塔壁挂渣厚度与炉膛温度变化之间的关系如图 4 所示。

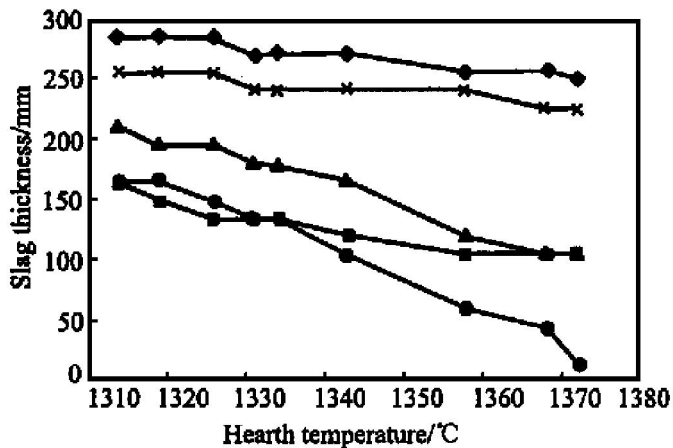


图 4 反应塔内壁挂渣厚度随炉膛温度变化关系

Fig. 4 Changes of slag thickness with hearth temperature of wall of reaction shaft

◆—4.8 m from shaft roof; ×—1.2 m from shaft roof;
▲—3.6 m from shaft roof; ■—2.4 m from shaft roof;
●—0.6 m from shaft roof

4 结论

1) 反应塔塔壁内温度受水套影响显著，其温度曲线外型与水套形状基本一致，在水套区域周围存在局部低温，温度梯度大，水套设置对壁面冷却作用明显。

2) 反应塔内壁挂渣厚度随炉内温度升高而减小，其中水套区域周围挂渣变化较为平缓，水套区域以外及两层水套之间的部位变化显著，因此在高处理量、高品位生产时必须加强反应塔顶及水套之间的塔壁等部位的冷却。

3) 增强现有水套的冷却能力，或适当改进水套结构的设置，有效地扩大水套周围的局部低温区域，促使内部生成稳定挂渣并且分布均匀，将有利于保护反应塔塔壁内炉衬，延长反应塔寿命。

[REFERENCES]

[1] YAO Jur-feng (姚俊峰), MEI Chi (梅 焱), REN Hong-jiu (任鸿九), et al. 卧式转炉炉衬温度场的数值模拟 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 2000, 10(4): 546- 550.

[2] YANG Wei-hong (杨卫宏), LAI Ya-xin (赖亚欣), XI-AO Ze-qiang (萧泽强), et al. 余热锅炉流场温度场数值计算 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 2000, 10(2): 278- 281.

[3] MEI Chi (梅 焱), YOU Wang (游 旺). 铝电解槽槽膛内形在线显示仿真软件的研究与开发 [J]. The Journal of Central South University of Technology (中南工业大学学报), 1997, 28(2): 138- 141.

[4] LI Xiao-ming (李晓明). 铜闪速炉和转炉冶金计算的 CUFC 软件开发 [J]. Chemical Metallurgy (化工冶金), 1997(3): 177- 281.

[5] YOU Wang (游 旺). 大型预焙铝电解槽槽膛内形在线动态仿真研究 [D]. Changsha: Central South Uni

- versity of Technology, 1997.
- [6] MEI Chi(梅 焱). Principle of Transport Process in Metallurgy(冶金传递过程原理) [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1987.
- [7] Patankar S V. Computation of Conduction and Duct Flow Heat Transfer [M]. Maple Grove: Innovation Research Inc, 1991.
- [8] Nicholas J H. Transport and Chemical Rate Phenomena [M]. USA: Gordon and Breach Science Publisher SA, 1995.
- [9] Beijing Nonferrous Metallurgy Design & Research Institute(北京有色冶金设计研究总院). Handbook of Design for Heavy Nonferrous Metals Smelting: Volume of Copper and Nickel (重有色金属冶炼设计手册: 铜镍卷) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996. 146- 177.
- [10] CHA Jin-rong(查金荣), CHEN Jia-yong(陈家镛). Principle and Application of Transport Process(传递过程原理及应用) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997.
- [11] REN Ze-ping(任泽平). Heat Transfer by Convection (对流传热) [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998.

Numerical simulation and on-line display of freeze profile of reaction shaft in flash smelting furnace

MEI Chi¹, CHEN Zhuo¹, REN Hong-jiu¹, ZHANG Wei-hua², WU Jun²

- (1. Institute of Simulation and Optimization of Pyro-installation,
Central South University, Changsha 410083, P. R. China;
2. Guixi Smelter, Guixi 335424, P. R. China)

[Abstract] Based on the principal of heat transfer, a mathematical model of the wall of reaction shaft in a flash smelting furnace was developed, and the simulation results of the distribution of temperature field and the slag thickness of the wall in the shaft were obtained. It is the first time to realize the on-line display of the freeze profile of reaction shaft. Compared with the practical data, the computational results are satisfactory. The error of the hearth temperature is less than 40 °C, and the average error of the slag thickness is less than 3%. The software provides not only a way to monitor the reaction shaft in practice, but also a theoretical base for optimization of flash smelting furnace. At the same time, great influences of the cooling jackets on the temperature of the hearth are also found. It is concluded that a strengthened cooling system will effectively prolong the life of the refractory.

[Key words] flash smelting furnace; freeze profile; numerical simulation

(编辑 龙怀中)