文章编号:1000-8152(2009)10-1093-07

PS转炉造渣过程的动态优化控制

宋海鹰1,2, 桂卫华1, 阳春华1, 王雅琳1

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 广东技术师范学院 自动化学院, 广东 广州 510635)

摘要: 建立了Pierce-Smith(PS)转炉造渣过程的非线性状态空间模型,并提出了基于生产质量指标反馈校正的铜 锍造渣过程的动态优化控制方案. 该方案首先基于最优模型求得最优控制律. 为消除吹炼过程中的扰动以及其他不 确定因素所带来的影响, 再引入基于生产质量指标的反馈调整机制. 其中反馈信息由软测量模型根据进出转炉的物 料计算得到, 智能控制单元根据反馈的质量信息和期望的质量目标间的偏差对最优控制律进行补偿修正. 并在该 动态优化控制方案基础上, 设计并开发了铜锍吹炼过程的优化控制指导决策系统. 实际运行结果表明该系统优化了 产品的质量, 同时也实现了铜锍生产过程的节能.

关键词: PS吹炼; 动态优化; 智能控制 中图分类号: TF355 文献标识码: A

Dynamic optimization control for the slag forming process in a Pierce-Smith converter

SONG Hai-ying^{1,2}, GUI Wei-hua¹, YANG Chun-hua¹, WANG Ya-lin¹

School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;
 Automatization, GuangDong Polytechnic Normal University, Guangzhou Guangdong 510635, China)

Abstract: A nonlinear state space model for the slag forming process in a Pierce-Smith(PS) converter is developed. Based on this model, we propose a dynamic optimization control scheme for the slag forming process, in which the production quality indices are employed for feedback correction. The optimal control laws are derived based on the model, and the production quality index feedback correction is employed for eliminating the disturbances and uncertainties in the process of conversion. The production quality indices are obtained from a soft sensor model in which their values are calculated based on the materials entering and leaving the PS converter. The optimal control laws are also compensated and adjusted by an intelligent control unit according to the differences between the values of the feedback quality indices and the desired quality indices. Finally, an optimization supervising decision system for the PS converting process is developed based on the proposed dynamic optimization control scheme. Practical operation results show that the production quality of the PS converting process is improved, and the energy- saving is achieved by the optimal supervising decision system.

Key words: Pierce-Smith (PS) converter; dynamic optimization; intelligent control

1 引言(Introduction)

PS转炉造渣过程是从含铁、硫等多种杂质的铜 锍中去除铁、硫等杂质的冶金方法.目前,国内外 铜锍造渣过程的操作大都仍由工人依据经验手动进 行,不仅容易造成工艺指标波动较大,而且难以保证 吹炼过程的优化运行.

为提高吹炼产品的质量和产量,国内外学者相继开展了一些优化研究.其中,Nenonen等^[1]依据物质平衡和能量平衡关系,应用共轭梯度法寻找对应于各种富氧程度下的最优熔剂添加率.为减少转炉

生产成本, WING N K等^[2]开发了铜转炉操作费用的计算模型, 用于评价由于操作量变化所带来的经济影响, 该模型使用了基于物质平衡的焓平衡方程. 而桂卫华等^[3]提出了针对转炉吹炼过程的操作模式优化方法, 该方法采用操作模式来描述一组需要在线决策的一组操作参数, 通过寻求最优的操作模式来提供吹炼过程的生产效率. 文献[4]研究了利用Hammerstein-Wiener模型预测吹炼所需总氧量.

由于造渣过程是一个间歇式的高温、多相熔池 反应过程,具有强烈的动态变化特性,因此难以确定

收稿日期: 2005-05-11; 收修改稿日期: 2009-12-12.

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(2002cb312200);国家自然科学基金资助项目(60634020&60574030);国家高技术研究发展计划资助项目(2006AA04Z181).

铜锍吹炼过程的稳态工作点,使得静态优化方法难 以对转炉操作进行有效的优化.另一方面,由于造渣 过程中铜锍组份与温度等关键工艺参数难以实时检 测,使得通常的反馈控制也不再适用.为此,论文将 研究适用于铜锍造渣过程的动态优化控制方法,以 提高生产过程的技术经济指标,并进一步实现铜锍 吹炼过程的节能降耗.

铜锍吹炼的造渣过程(Slag making process of matte converting)

PS转炉铜锍吹炼过程中连续鼓入含氧23%左 右的富氧空气,期间化学反应在激烈搅动着的熔 体中进行,依靠硫化物的氧化放热维持作业温度 在1200℃~1300℃左右.吹炼过程分为两个阶段: 第1阶段脱除铜锍中的铁等杂质,故称为造渣期;第2 阶段使Cu₂S氧化成粗铜,故称为造铜期.造渣期是 决定吹炼质量最重要的生产环节.在造渣过程中, 为了使FeS顺利地形成硅酸铁炉渣,需要加入石英 熔剂(SiO₂).造渣过程中通过空气的搅拌,铜锍中 的FeS首先被氧化.氧化反应和造渣反应产生的热是 造渣期的热量来源.由于造渣过程中产生了大量热 量,为平衡这些剩余热需要不断地加入冷料.

3 造渣过程的动态优化控制(Dynamic optimization control for slag making process) 针对PS转炉铜锍造渣过程的特点,论文提出了 一套动态优化控制方案,如图1所示.

由图1可知,该优化控制方案首先由最优计算模型求得分段恒值型最优控制律.为消除生产过程中的扰动和其他不确定因素所带来的影响,再引入基于生产质量指标的反馈调整机制,其中反馈信息由软测量模型根据进出转炉的物料量计算得到.最后由多变量智能控制单元根据软测量模型计算得到的信息和期望的质量目标间的偏差,对动态优化模型计算出的最优控制律进行补偿修正.最优计算模型中各状态变量的初值、控制变量的边界,以及终端时间均由参数初始化计算模型根据生产数据计算得到.

基于上述优化控制方案建立的造渣过程的动态 优化控制系统组成结构如图2所示.



图 1 造渣过程的动态优化控制方案

Fig. 1 Dynamic optimization control scheme of the slag forming process







该动态优化控制系统主要由动态优化计算模 块和控制模块组成.其中,动态优化计算模块由最 优计算模型和参数初值计算模型组成.参数初值 计算模型主要进行最优计算模型的状态变量(铜 锍组份的浓度和铜锍温度)的初值设置,以及控制 变量(风、熔剂、冷料)调整范围的设置和终端时间 的设置.

最优计算模型将根据设定的优化目标,以非线 性反应动力学模型作为约束条件,利用序贯法离 线计算出各控制变量的最优控制律.而参数初值 计算模型由基于模糊最小二乘支持向量机的吹炼 终点预测模型、基于线性规划的冷料添加量配比 优化模型、基于经验公式的熔剂添加总量计算模 型,以及底渣估算模型和铜锍加入量计算模型所 组成.

由于冶金过程中随机干扰因素很多,计算得到 的最优控制律不直接送过程控制级,而送至控制 模块进行调整.控制模块中由多相多组份平衡计 算软测量模型,采用滚动计算方法算出渣中硅铁 比和铜锍温度信息提供给控制模块中的炉况判断 模型.而炉况判断模型依据此信息计算出生产质 量和最优计算模型算出的期望质量之间的偏差, 当偏差较大时,由智能控制单元根据偏差量对最 优控制律进行调整.

4 最优计算模型(Optimum computing model)4.1 优化目标(Optimization object)

造渣的主要目的是脱除铜锍中的铁等杂质,即 吹炼结束时以2FeO·SiO₂形式入渣的铁元素最多, 并同时尽量减少吹炼过程中消耗的富氧气体,因 此最优计算模型的目标函数设为

max :
$$m_{2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2}(t_{\text{f}}) - \int_0^{t_{\text{f}}} \boldsymbol{m}_{\text{O}_2}(t) \mathrm{d}t.$$
 (1)

公式(1)中: t_f 表示终端时间(即吹炼终点预测模型 预测得到的吹炼终点); $m_{2FeO-SiO_2}$ 表示造渣期结 束时渣中2FeO-SiO₂的质量; m_{O_2} 为吹炼过程中富 氧风的流速(kg/min).

4.2 最优计算模型的约束条件(Constraint conditions of optimal computing model)

4.2.1 状态空间方程(State space equations)

造渣过程中铜锍反应体系的组份、温度的变化,都将由下列4个化学反应共同决定:

- a) FeS_{matte液}+1.5O₂=FeO_{slag液}+SO₂;
- b) 2FeO_{slag液}+SiO₂=2FeO·SiO_{2 slag液};
- c) $6 \text{FeO}_{\text{slag}\tilde{\chi}} + O_2 = 2 \text{Fe}_3 O_4 \text{ slag}\tilde{\chi};$
- d) $\text{FeS}_{\text{matte}\check{\chi}}$ +3Fe₃O_{4 slag $\check{\chi}$}=10FeO_{slag $\check{\chi}$}+SO₂.

实验表明, 吹炼过程中转炉内反应体系的体积 变化量与转炉中物料总体积量相比较小, 因此可 近似认为转炉内物料总体积基本不变, 即反应系 统可近似为恒容系统. 同时, 吹炼过程中鼓入转炉 的大量富氧气体使得转炉内的各相相互混合.

论文基于冶金反应动力学理论建立了铜锍造 渣过程的非线性常微分方程组.其中,铜锍组份和 温度作为控制模型中的状态变量,而控制模型中 的决策变量则包括:鼓风率、熔剂添加率、冷料添 加率,以及排风速率.该方程组说明如下:

1) 直投冷料的熔化速率 \dot{x}_1 (kg/min).

通常从炉口投入的固体冷料将随着入炉铜锍 一起添加进转炉.固体冷料熔化时接受熔化潜热 以及温差造成的传递热.

$$\dot{x}_{1} = -\frac{k_{\text{ther}1}k_{\text{area}1}x_{1}(x_{11}-x_{12})\frac{x_{12}}{x_{11}}}{\lambda_{\bar{1}\bar{1}}\partial_{$$

公式(2)中: $k_{\text{ther1}} = 0.2 \text{ kW}/(\text{K} \cdot \text{m}^{-2})$ 为直投冷 料的平均传热系数, $k_{\text{area1}} = 0.05 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ 为冷料 的平均接触面系数, $C_{\text{p直投冷料}}$ 为直投冷料的特定 热容(kJ·kg⁻¹·K⁻¹), $\lambda_{\text{直投冷料}}$ 为直投冷料的平均潜 热(kJ/kg). (注明: 公式中的符号表示物质消耗, 而 正号表示物质增加.)

2) 连续投放冷料的熔化速率 \dot{x}_2 (kg/min):

$$\dot{x}_{2} = -\frac{k_{\text{ther}2}k_{\text{area}2}x_{2}(x_{11} - T_{\text{cold}})}{\lambda_{\text{fff} \oplus \text{ff}} + C_{\text{p}} \oplus \oplus (x_{11} - T_{\text{cold}})} + u_{4}.$$
 (3)

公式(3)中: $k_{\text{ther2}} = 0.06 \text{ kW}/(\text{K} \cdot \text{m}^{-2})$ 为平均 传热系数, 冷料的平均接触面系数 $k_{\text{area2}} = 0.31 \text{ m}^2/\text{kg}$. $C_{\text{p}锢铍}$ 为锢铍的特定热容(0.574 kJ/(kg·K⁻¹)), $\lambda_{锢铍}$ 为锢铍的平均潜热(kJ/kg), T_{cold} 为冷料入炉温度(273+25 K), u_4 为锢铍的添 加率(kg/min).

3) 硫化亚铜浓度变化率 \dot{x}_3 (kmol/(m³ · min)).

造渣期中铜锍中的硫化亚铜不参加化学反应, 因此冷料熔化是影响转炉中硫化亚铜的原因.

$$\dot{x}_3 = -(X_{1p}\dot{x}_1 + X_{2p}\dot{x}_2)/(1000 \cdot V_m).$$
 (4)

公式(4)中: X_{1p}为直投冷料中平均每100克中所 含Cu₂S的摩尔量, X_{2p}为连续投放的锢铍中平均 每100克所含Cu₂S的摩尔量, V_m为转炉中熔体(包 括铜硫、白铜锍和渣)的总体积(m³).

4) 硫化亚铁的浓度变化率 \dot{x}_4 (kmol/(m³·min)).

影响转炉中硫化亚铁浓度的因素有:冷料熔 化后进入转炉的FeS,硫化亚铁的氧化.根据文 献[5]建立反应动力学方程如下:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{4} &= \\ -1.02 \times 10^{-4} S_{\mathrm{R}} u_{1} \frac{\rho_{\mathrm{flit}}}{100 \cdot M_{\mathrm{FeS}}} x_{4} - \\ \dot{x}_{\mathrm{d}}^{'} \frac{k_{0.\mathrm{rea.d.SO}_{2}.\mathrm{T}}}{M_{\mathrm{SO}_{2}} \cdot V_{\mathrm{m}}} \exp(\frac{-E_{\mathrm{d}}}{R \cdot x_{11}}) x_{4} x_{7}^{2} - \\ (X_{1\mathrm{p}} \dot{x}_{1} + X_{2\mathrm{p}} \dot{x}_{2}) / (1000 \cdot V_{\mathrm{m}}). \end{aligned}$$
(5)

公式(5)中: $S_{\rm R}$ 为单位反应体积的反应表面积; ρ_{infth} 为铜锍密度; $M_{\rm FeS}$ 为FeS的分子量; u_1 为富 氧风的鼓风率(kg/min); $k_{0_rea_d_SO_2_T}$ 为反应d)中与 温度相关的反应速率常数^[6]; $k'_{\rm d}$ 为反应d)的调整系 数; $E_{\rm d}$ 为反应d)的活化能^[6]; R为气体常数.

5) 氧化亚铁的浓度变化率 \dot{x}_5 (kmol/(m³·min).

影响铜锍中氧化亚铁浓度变化的因素有4项 即:硫化亚铁氧化反应、氧化亚铁造渣反应、氧化 生成Fe₃O₄,还有部分Fe₃O₄被FeS还原生成的FeO. 即

$$\dot{x}_{5} = -\dot{x}_{41} - \frac{2k'_{\rm b}k_{0_rea_b_SiO_{2_T}}}{M_{\rm SiO_{2}}\cdot V_{\rm m}} \exp(\frac{-E_{\rm d}}{R\cdot x_{11}})x_{5}x_{10} - \frac{k'_{\rm c}k_{0_rea_c_FeO_T}\cdot\rho_{\rm Hfff}}{100M_{\rm FeO}}\exp(\frac{-E_{\rm c}}{R\cdot x_{11}})x_{5} - \frac{10k'_{\rm d}k_{0_rea_d_SO_{2_T}}}{M_{\rm SO_{2}}\cdot V_{\rm m}}\exp(\frac{-E_{\rm d}}{R\cdot x_{11}})x_{4}x_{7}^{2}.$$
(6)

式(6)中: \dot{x}_{41} 为式(5)方程右边第1项, $k_{0\text{-rea-b-SiO}_2\text{-T}}$ 为反应b)中与温度相关的反应速率常数^[6]; k'_{b} 为反应b)的调整系数; $k_{0\text{-rea.c}_SO_2\text{-T}}$ 为反应c)中与温度相关的反应速率常数^[7]; k'_{c} 为反应c)的调整系数.

6) 渣中2FeO·SiO₂的浓度变化率 \dot{x}_6 (kmol/(m³·min)):

$$\dot{x}_{6} = \frac{k'_{\rm b}k_{0_rea_b_SiO_{2_T}}}{M_{\rm SiO_{2}}\cdot V_{\rm m}} \exp(\frac{-E_{\rm b}}{R\cdot x_{11}})x_{5}x_{10}.$$
 (7)

7) 渣中Fe₃O₄前浓度变化率*x*₇(kmol/(m³ · min)).

$$\dot{x}_{7} = \frac{-\dot{x}_{53}}{3} - \frac{3k'_{\rm d}k_{0_rea_d_SO_2_T}}{M_{\rm SO_2}\cdot V_{\rm m}} \exp(\frac{-E_{\rm d}}{R\cdot x_{11}})x_4x_7^2.$$
(8)

其中·x53为式(6)中方程右边第3项.

8) 炉气中SO₂的质量变化率 \dot{x}_8 (kg/min).

SO₂的变化率受到3个因素影响,即:FeS的氧化反应、Fe₃O₄还原所产生的SO₂,以及排出转炉的炉气中的SO₂.

$$\dot{x}_{8} = \dot{x}_{51} M_{\rm SO_2} V_{\rm m} + k'_{\rm d} k_{0_\rm rea_d_SO_2_T} \cdot \\ \exp(\frac{-E_{\rm d}}{R \cdot x_{11}}) x_4 x_7^2 - u_3(\frac{x_9}{x_8 + x_9}).$$
(9)

公式(9)中u3为炉气排出速率(kg/min).

9) 炉气中 N_2 的质量变化率 \dot{x}_9 (kg/min).

炉气中N₂的变化率由3个因素决定,即:喷入富 氧所带进的N₂、进入转炉的外界空气中的N₂、由 排气系统排出的N₂.

$$\dot{x}_9 = 1.29 \times 0.75 u_1 - M_{\rm N_2} k_{\rm air2} k_{\rm pr} - u_3 (\frac{x_9}{x_8 + x_9}).$$
(10)

式(10)中: k_{air2} 为氮气传递系数(27.4 kmol/kg), k_{pr} 为压力系数(0.5 kg/(min·atm⁻¹))(因非封闭, 转炉中的气压恒为一个大气压1 atm), M_{N_2} 为氮气分子量.

10) 转炉内熔剂的质量变化率 \dot{x}_{10} (kg/min).

$$\dot{x}_{10} = u_2 - \frac{k_{\rm b} k_{0_{\rm rea_b_SiO_2_T}}}{M_{\rm SiO_2} \cdot V_{\rm m}} \exp(\frac{-E_{\rm b}}{R \cdot x_{11}}) x_5 x_{10}.$$
(11)

公式(11)中u2为熔剂添加速率(kg/min).

11) 熔体的温度变化率*i*₁₁(K/min).

影响转炉中铜锍温度变化的因素是吹炼过程 中产生和消耗的总能量qt,可根据反应体系中各物 质的相对生成焓通过化学反应当量关系,依据造 渣期内各化学反应热和热损失计算得到. 假设渣 和铜锍的温度相同,熔体的温度变化速率为

$$\dot{x}_{11} = \frac{r}{[x_3 C_{\rm p(CuS)} + x_4 C_{\rm p(FeO)} + x_5 C_{\rm p(FeO)} + x_6 C_{\rm p(2FeO.SiO_2)} + x_7 C_{\rm p(Fe_3O_4)}] \cdot V_{\rm m}}).$$
(12)

 $q_{\rm t}$

12) 直投冷料的的温度变化率
$$\dot{x}_{12}$$
(K/min).

$$\dot{x}_{12} = \frac{k_{\text{ther}1}k_{\text{areal}}(x_{11} - x_{12})}{C_{\text{p}\bar{\Xi}} t_{\text{p}} k_{\text{p}}}.$$
 (13)

4.2.2 终端约束条件(Terminal constraint conditions)

造渣中会不可避免地生成Fe₃O₄,而过多的 Fe₃O₄会造成炉渣性质变坏,所以必须严格控制渣 中Fe₃O₄的含量.由于Fe₃O₄和FeS之间的还原反应 需要在较高的温度下反应,因此造渣过程必须保持一定温度,特别是造渣末期要保持合适的出渣 温度.建立终端不等式约束条件如下:

$$0 \leqslant P_{\text{Fe}_3\text{O}_4}(t_{\text{f}}) \leqslant 0.18,$$

$$0.2 \leqslant P_{\text{SiO}_2}(t_{\text{f}}) \leqslant 0.23,$$

$$1513 \leqslant T(t_{\text{f}}) \leqslant 1533(K)$$

其中: PFe3O4为吹炼结束时炉渣中Fe3O4的摩尔量

1096

第26卷

1097

比例; $P_{SiO_2}(t_f)$ 为吹炼结束时渣中 SiO_2 质量的百分比; $T(t_f)$ 为吹炼结束时的铜锍温度.

4.2.3 边界条件(Boundary conditions)

最优计算模型的边界条件即控制量的操作范围.造渣期正常操作中鼓入的含氧率23%富氧风流量范围一般为522 Nm³/min~580 Nm³/min; 炉气排出速率为400 kg/min~500 kg/min. 而熔剂和冷料的调整范围, 需先由熔剂总量计算模型和冷料添加总量计算模型确定其添加总量后, 再根据预测得到的吹炼终点时间计算出各操作量的平均值, 从而确定控制量的调节幅度.

5 控制模块(Control module)

吹炼过程会受到各种不确定影响因素的干扰, 这些干扰会使铜锍组份和温度偏离最优计算模型 算得的期望状态,从而导致根据入炉初始状态所 制定的控制律无法正常工作.针对这一问题,论文 提出了基于炉况综合判断模型和软测量模型的智 能补偿方法.

5.1 炉况判断模型(Judging model for running status)

铜锍吹炼过程的炉况判断模型表示如下:

$$S_{\text{slag}} = \alpha_1 (\frac{T_{\text{m}} - T_i}{T_i})^2 + \alpha_2 (\frac{R_{\overline{\text{tet}} \not \in \mathbb{H}} - R_i}{R_i})^2.$$
(14)

公式(14)中: S_{slag} 为综合炉况指数; T_{m} 为软测量 得到的铜锍温度; $R_{\overline{\text{dtgh}}}$ 为炉渣中硅铁比的软 测量值; 而 T_i , R_i 分别表示由最优计算模型算得 的铜锍温度和渣中硅铁比的值; α_i (i = 1, 2)分别 为铜锍温度、渣品质对综合炉况指数的影响因 子($\alpha_1 = 0.4, \alpha_2 = 0.6$).

炉况判断模型根据算得的S值将PS转炉的综 合炉况分为:优(0 ≤ S ≤ 0.05)、一般(0.05 ≤ S ≤ 0.2)、恶劣(S > 0.2) 3个等级.如果炉况非优,则对 最优控制律进行调整;如果炉况为优,则继续使用 计算得到的最优控制律.本文中造渣期最优控制 律的步长设为5 min,而智能控制单元采用软测量 模型的计算时间步长(即2.5 min)作为智能控制单 元的调整步长.

5.2 智能控制单元(Intelligent control unit)

智能控制单元的任务是尽量将炉渣中的硅铁 比(渣中SiO₂与FeO的比例)和铜锍温度保持在正 常范围内. SiO₂的添加速率是影响渣中硅铁比的 主要原因,而冷料投放率则是影响铜锍温度的主 要原因.由于温度是具有较大惯性的变量,因此通 常维持铜锍温度在允许范围内即可.造渣过程的 智能控制单元结构如图3所示.







5.3 熔剂添加率的模糊调整法(Fuzzy adjustment of flux addition rate)

吹炼过程中硅铁比要稳定在0.4~0.7之间,论文 将其乘以比例系数(100)后再作为设定目标.因此, 误差变化范围设为[-15, 15],而误差变化率为[-5, 5],将其分为13个等级组成论域*E*和*EC*,即{-6,-5, -4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6}.控制量的基本论域为 [-2.5,2.5](kg/min),也被分为13个等级组成论域. 划分论域时,均采用平均区间法.而各语言变量在 相应论域上的模糊子集,均通过正态函数构造其 隶属函数.并根据操作人员的经验得出49条模糊 控制规则,如表1所示.

表1 熔剂补偿添加量的模糊控制规则

 Table 1
 Fuzzy control rules of flux compensating addition rate

е	Δe						
	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
PM	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
PS	PB	PB	PM	PS	ZE	NM	NM
ZE	PB	PB	PM	ZE	NM	NB	NB
NS	PM	PM	ZE	NS	NM	NB	NB
NM	ZE	ZE	NS	NM	NM	NB	NB
NB	ZE	ZE	NS	NM	NM	NB	NB

上述模糊控制规则构成了渣中铁硅比的模糊 控制方法.论文采用最小最大法进行模糊推理,而 反模糊化时采用重心法.

5.4 冷料添加的专家调整规则(Expert adjustment rules of cold charge operation)

根据操作经验, 炉温过高时可通过增加冷料来吸热; 反之, 炉温过凉, 则减少冷料投放量甚至不投. 依据现场操作人员的冷料添加方法建立冷料的专家控制规则, 如下:

第26卷

Rule 1:

if $T_{k+1(\text{prediction})} > T_{k+1(\text{high})}$, then

$$f \Delta Q_{k+1(\overline{M} \oplus \overline{\Lambda})} > 0$$
, then

$$U_{k_{\rm cold}}' = U_{k_{\rm cold}} + \Delta;$$

Rule 2:

if $T_{k+1(\text{prediction})} < T_{k+1(\text{low})}$ then if $\Delta Q_{k+1(剩余热)} < 0$, then $U'_{k_{\text{cold}}} = 0$; Rule 3:

if $T_{k+1(\text{prediction})} < T_{k+1(\text{low})}$, then if $\Delta Q_{k+1(剩余热)} > 0$, then $U'_{k_{\text{cold}}} = 0, U'_{k+1_{\text{cold}}} = U_{k+1_{\text{cold}}} + \Delta'.$

上述规则中: k为第k个调整周期, T_{prediction}为 软测量模型算得的温度值, T_{high}表示允许的最高 温度, T_{low}表示允许的最低温度, ΔQ_(剩余热)表示 软测量模型计算出的反应体系剩余热, U'_{cold}表示 调整后的冷料添加率, U_{cold}为最优计算模型计算 的冷料添加率, Δ表示根据温度偏差量计算得到的 低铜冷料(锢铍)或高铜冷料(残极)的投放速率的 补偿量; Δ'表示上一个调整周期内未投入的冷料 量. 由于本文建立的专家系统规则数目较少, 故采 用前向推理来实现专家规则的推理.

6 仿真实验及结果分析(Simulation and results analysis)

论文对4号转炉第33炉次的造渣S1期进行了仿 真实验.根据铜冶炼厂实际生产操作情况,设置 进入转炉的物料添加量如下:底渣量6.2吨,铜品 位60%的铜锍130吨,冷料床下物11.6吨、锢铍3.78 吨,投入转炉的熔剂量8.82吨.并根据模糊最小 二乘支持向量机吹炼终点预测模型设置含氧 率23%的富氧风的连续吹炼鼓风时间57 min.

在对该动态优化控制方法进行计算前,首先 根据转炉内的底渣和入炉物料的重量与组份,计 算出最优模型各状态变量的初始值;再进一步 计算出各操作变量的操作范围和初始值,其中 冷料平均添加速率为66 kg/min,熔剂平均添加速 率为154 kg/min,上述平均速率作为操作变量的 初始值,并进一步设置冷料添加速率的调整范围 为50 kg/min~120 kg/min,而熔剂添加速率的调整 范围为100 kg/min~200 kg/min.算得的各操作变 量的最优控制律分别列于图4~图7.

由图4可见,优化后的富氧鼓风率在吹炼开始 阶段内保持最大,而随着吹炼过程的进行,富氧 鼓风率将减少. 这是因为吹炼开始阶段物料吸热 量较大,并且硫化物氧化释放的热要少于造渣反 应释放的热,因此在吹炼开始的阶段内需加强鼓 风;而吹炼过程接近2/3时,又需要调高鼓风量,以 促进FeS氧化.



Fig. 4 Blowing rate of oxygen enrichment in S1 process

图5可知优化后的连投冷料加入总量(约5.5 吨)多于连投冷料的人工加入总量(约3.6吨).



Fig. 5 Addition rate of cold charge in S1 process

由图6可见,优化后熔剂投放率比人工操作下 的恒值给料方式的多投入2.2吨,从而有利于对增 加的入炉炉料进行脱杂.



Fig. 6 Addition rate of flux in S1 process

由图7可见,优化后吹炼中间阶段的排风速率 较高,有助于降低此时转炉内较高的SO2量.





依据上述各控制变量的最优控制律,计算得 到S1期内各组份和温度的时变信息分别如图8和 图9所示. 通过对造渣过程中各操作变量进行优化,从而进一步优化了炉渣结构. 未优化前渣中Fe₃O₄的摩尔浓度约2.2(kmol/m³),约占总渣量的摩尔量的22.3%,而实际化验渣中Fe₃O₄约占总渣量摩尔量的21.2%,经动态优化后渣中Fe₃O₄的摩尔浓度为1.1 kmol/m³,比优化前减少了50%.







由图9可见,通过对操作变量(特别是冷料)的添加率进行优化,使出渣温度处于理想的1523 K左右,从而有效地促进Fe₃O₄与FeS之间的还原反应,减少了渣中Fe₃O₄的含量.





Fig. 9 Temperature variation of matte in S1 process by optimizing operation

7 结论(Conclusion)

本文提出了针对铜锍吹炼过程的动态优化控制方法,通过综合运用最优化方法和智能控制方法提高了优化控制系统的鲁棒性.基于该优化控制方法所开发的优化控制系统在铜冶炼厂投入运行后,使得每炉富氧平均消耗量降低了9%左右,有效地节约了富氧消耗量.冷料的平均每炉处

理量增加7.8%.另外, 渣中SiO₂的平均含量被稳定 在21%左右, 从而降低了渣中夹带的铜含量, 优化 前渣中平均铜含量为5.3%, 而优化后渣含铜的平 均量为4.5%.

参考文献(References):

- NENONEN L K, PAGUREK B. Conjugate gradient optimization applied to a copper converter moldel[J]. *Automatica*, 1969, 5(6): 801 – 810.
- [2] WING N K, KAPUSTA J P T, RALPH H, et al. Modeling Peirce-Smith converter operating costs[J]. JOM, 2005, 57(7): 52 – 57.
- [3] 胡志坤, 桂卫华, 彭小奇, 等. 铜转炉生产操作模式智能优化[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(2): 243 247.
 (HU Zhikun, GUI Weihua, PENG Xiaoqi, et al. Intelligent optimization of optimal operational pattern in the process of copper converting furnace[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(2): 243 247.)
- [4] 桂卫华, 宋海鹰, 阳春华. Hammerstein-Wiener模型最小二乘向量机辨识及其应用[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(3): 393 397.
 (GUI Weihua, SONG Haiying, YANG Chunhua. Hammerstein-Wiener model identified by least squares support vector machine and its application[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(3): 393 397.)
- [5] 杭家栋, 刘纯鹏. 高品位锍吹炼动力学的研究[J]. 有色金属, 1989, 41(1): 42 48.
 (HANG Jiadong, LIU Chunpeng. An investigation on converting high grade Cu-Fe matte in a molten state[J]. *Nonferrous*, 1989, 41(1): 42 48.)
- [6] 华一新,刘纯鹏. Fe₃O₄-(xFeS yCu₂S)-FeO-SiO₂体系的反应动 力学[J]. 金属学报, 1986, 22(6): A540 – A542.
 (HUA Yixin, LIU Chunpeng. The reduction kinetics of Fe₃O₄-(xFeS • yCu₂S)-FeO-SiO₂ system[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1986, 22(6): A540 – A542.)
- [7] 莫鼎成. 冶金动力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 2004.
 (Mo Dingcheng. *Metallurgical Minetics*[M]. Changsha: Central South Industry University Press, 2004.)

作者简介:

宋海鹰 (1975—), 男, 博士, 讲师, 目前研究方向为复杂工业过

程建模与优化, E-mail: songhaiying1975@163.com;

桂卫华 (1958—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为复杂

工业过程建模与优化、分散鲁棒控制, E-mail: gwh@mail.csu.edu.cn;

阳春华 (1965—), 女, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为复杂 工业过程建模与优化, E-mail: ychh@mail.csu.edu.cn;

王雅琳 (1973—), 女, 教授, 目前研究方向为复杂工业过程建模与优化, E-mail: ylwang@mail.csu.edu.cn.