

铜精炼过程重油消耗泛函混沌优化器设计

鄂加强¹, 王耀南², 梅 焱³, 龚金科¹

(1. 湖南大学 机械与汽车工程学院, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

3. 中南大学 能源科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 基于铜精炼过程中保温阶段与氧化阶段的热工机理建立了铜精炼过程重油消耗真实目标泛函, 采用泛函分析与混沌优化算法等理论相结合对其进行融合处理, 得出了能计算铜精炼过程中铜液最优升温曲线、最优升温速度曲线以及能实现全局优化的重油消耗泛函混沌优化器。重油消耗泛函混沌优化器应用结果表明, 重油耗量/阳极铜降低了9.20%, 铜精炼炉烟囱排烟林格曼黑度由3降低为1。

关键词: 铜精炼炉; 混沌理论; 泛函混沌优化器; 重油消耗

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Design on functional chaos optimizer about heavy oil consumption in copper refining process

E Jia-qiang¹, WANG Yao-nan², MEI Chi³, GONG Jin-ke¹

(1. College of mechanical and automotive Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China;

2. College of Electrical and Informational Engineering, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China;

3. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: A real objective functional about the least consumption of heavy oil in the copper refining process is established based on heat transfer mechanism in heat preservation phase and oxidation phase in copper refining process. After processing the objective functional by fusing functional analysis and chaos optimization algorithm, a functional chaos optimizer about heavy oil consumption is obtained, from which the optimal heavy oil consumption, optimal rising temperature and optimal velocity of rising temperature about crude copper liquid can be decided in copper refining process. The results of its application reveal that heavy oil consumption per ton of anode copper has been reduced by 9.20% and Ringelman concentration of fume from chimney of copper refining rotary anode furnace has also been changed from 3 to 1.

Key words: copper refining rotary anode furnace; chaos theory; functional chaos optimizer; heavy oil consumption

1 引言(Introduction)

对于铜的火法精炼过程信息化研究, 多年来一直是国内外炼铜工作者探讨的重要课题之一^[1~12], 为了强化铜精炼过程生产、发挥铜精炼炉的使用效率, 提高阳极铜产量和质量、节能降耗以及提高整个精炼过程的操作水平和经济效益, 利用泛函分析原理对重油流量优化所具有的很好能控性、铜液温度所具有的很好可观性与混沌优化算法寻优过程中所具有的准确性和快速性的特性, 针对铜精炼过程重油消耗问题研究开发铜精炼过程重油消耗泛函混沌优化器, 不但为铜精炼炉操作优化与智能控制策略奠定了坚实的理论基础, 同时也具有重大的应用

价值与广阔的应用前景^[13]。

为了便于研究铜精炼过程重油消耗泛函混沌优化器的开发, 作如下假设:

- 1) 视铜精炼炉炉膛内火焰和各受热面的受热情况在空间是均匀分布的;
- 2) 火焰以辐射及对流方式向铜精炼炉内铜液以及炉体进行热量传递;
- 3) 考虑到炉膛内高温烟气密度 ρ_y 很小, 忽略其重量变化, 即认为 $\rho_y = \text{const}$;
- 4) 铜精炼炉漏风排烟热损失变化量以及向周围环境的散热损失保持恒定。

2 重油消耗泛函混沌优化器(Functional chaos optimizer of heavy oil consumption)

2.1 保温阶段重油消耗最优化模型(Optimal model of heavy oil consuming in heat preservation phase)

根据铜精炼保温阶段炉膛内过程机理, 得出重油燃烧产物热平衡方程为

$$G(n, \eta)q_1 - Q_r - G_f c_f \theta_g - G(n, \eta)q_{s1} = 0. \quad (1)$$

式中: $G(n, \eta)$ 为铜精炼保温阶段重油质量流量, kg/s; q_1 为燃烧1 kg重油时铜精炼炉炉膛内有效发热量, kJ/kg; Q_r 为铜精炼炉炉膛内铜液所接受的辐射热量, kW; G_f 为铜精炼炉炉膛内燃烧产物的质量流量, kg/s, 且 $G_f = G(n, \eta)(1 - q_4)V_f(n)\rho_f$, 其中 q_4 为机械不完全燃烧热损失, %; $V_f(n)$ 为1 kg重油燃烧产物的容积, Nm³/kg, $V_f(n) = V_{f0} + (n - 1)V_{f0}$, 其中 n 为重油燃烧时空气消耗系数, V_{f0} 为空气消耗系数 $n=1.0$ 重油燃烧产物生成量, Nm³/kg; V_{f0} 为1 kg重油完全燃烧时的理论空气需要量, Nm³/kg; ρ_f 为重油燃烧产物的密度, kg/m³; c_f 为铜精炼炉炉膛内燃烧产物的比热容, kJ/(kg·°C); q_{s1} 为燃烧1 kg重油时铜精炼炉炉膛上部向环境的散热量, kJ/kg; θ_g 为炉膛内烟气温度, °C.

铜精炼炉炉膛内燃烧1 kg重油时铜精炼炉炉膛内有效发热量是由重油的燃烧、助燃空气、预热的重油以及重油雾化剂等携带的热量组成

$$q_1 = Q_L(1 - q_4)(1 - q_3) + (Q_G + Q_W) + (1 - q_4)V_i \rho_i c_i \theta_i. \quad (2)$$

式中: Q_L 为重油的低位发热值, kJ/kg; Q_G 为重油带入的物理热, Q_W 为机械内混式烧嘴雾化重油的水蒸汽所带入的热量, kJ/kg; q_3 为重油化学不完全燃烧热损失, %; V_i 为燃烧1 kg重油所需的助燃空气体积, Nm³/kg; ρ_i 为助燃空气的密度, kg/Nm³; c_i 为助燃空气的比热容, kJ/(kg·°C); θ_i 为进入铜精炼炉炉膛内助燃空气的温度, °C.

基于以上假设, 根据铜精炼保温阶段炉膛内过程机理, 铜精炼炉炉膛内铜液表面所吸收的高温烟气的辐射热量可由下式确定^[13]:

$$Q_r = C_0 \sigma_0 \varepsilon_{\text{gwm}} F_m [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_c + 273)^4]. \quad (3)$$

式中: C_0 为考虑烟气对流作用的补正系数, $C_0 = 1.03 \sim 1.08$; σ_0 为Stefen-Boltzmann常数, kW/(m²K⁴); θ_g 为高温烟气的温度, °C; θ_c 为铜液表面的温度, °C; ε_{gwm} 为高温烟气与炉膛内壁对铜液表面的综合辐射系数, ε_{gwm} 由下式确定^[13]:

$$\varepsilon_{\text{gwm}} = \frac{\varepsilon_g \varepsilon_m [1 + \Phi(1 - \varepsilon_g)]}{\varepsilon_g + \Phi(1 - \varepsilon_g)[\varepsilon_m + \varepsilon_g(1 - \varepsilon_m)]}. \quad (4)$$

式中: ε_g 与 ε_m 分别为高温烟气及铜液表面的黑度;

Φ 为炉膛内壁对铜液表面的角系数, $\Phi = F_m / F_w$, F_m 为铜液表面表面积, F_w 为炉膛内壁有效辐射面积, m².

铜精炼炉中铜液的热平衡方程为:

$$Q_r = \eta D_c c_{pc} \theta'_{ce}. \quad (5)$$

式中: η 为铜精炼保温阶段中铜液升温综合系数, $\eta = 1/(1 - \eta_s)$, 其中 η_s 为由于铜液浸没炉体向环境的散热量所带来的热量损失系数, $\eta_s = \alpha F_B (\theta_B - \theta_f) / Q_r$, θ_B 铜精炼炉外壁平均温度, θ_f 为环境温度, F_B 为铜精炼炉内铜液浸没炉体的外表面积, m²; α 为铜精炼炉外壁与环境之间的换热系数, kW; D_c 为铜精炼炉炉膛内铜液的质量, kg; c_{pc} 为铜精炼炉炉膛内铜液的比热容, kJ/(kg·°C); θ'_{ce} 为铜液的平均温度变化率, °C/s, 且 $\theta_{ce} = \theta_c - \Delta\theta_{c0}$, $\Delta\theta_{c0}$ 为铜液表面的平均温度与铜液的平均温度之差, 并认为 $\Delta\theta_{c0}$ 为恒定值, 则 $\theta'_{ce} = \theta'_c$, θ'_c 为铜液表面平均温度变化率, °C/s.

联立式(1)(2)(3)(4), 可以得到:

$$G(n, \eta) \left[\frac{q_1 - q_{s1}}{(1 - q_4)V_f(n)\rho_f c_f} - \theta_g \right] = [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_c + 273)^4] \frac{4C_0 \sigma_0 \varepsilon_{\text{gwm}} F_m}{(1 - q_4)V_f(n)\rho_f c_f}. \quad (6)$$

为了铜精炼保温阶段重油消耗量最优化模型具有一般意义, 令 $\theta_L = (q_1 - q_{s1}) / [(1 - q_4)V_f(n)\rho_f c_f]$, 并且考虑到实际情况中, 铜精炼保温阶段铜液温度范围为: 1120~1150°C, 在满足保温时间内燃料消耗量最优的前提下, 由热平衡计算可知高温烟气温度最多不会比铜液温度高300°C, 因此, 对式(6)进行变形可得:

$$G(n, \eta) [\theta_L - \theta_g] = \frac{1}{A_0(n)} \left[\left(1 + \frac{\theta_g - \theta_K}{\theta_K + 273}\right)^4 - \left(1 + \frac{\theta_c - \theta_K}{\theta_K + 273}\right)^4 \right]. \quad (7)$$

式中: $A_0(n) = (1 - q_4)V_f(n)\rho_f c_f / [4C_0 \sigma_0 \varepsilon_{\text{gwm}} F_m (\theta_K + 273)^4]$, s/(kg·°C), θ_K 可在 $(\theta_c + \theta_g)/2$ 附近取值, 取 $\theta_K = 1270^\circ\text{C}$.

由于

$$|(\theta_g - \theta_K) / (\theta_K + 273)| < 1, |(\theta_c - \theta_K) / (\theta_K + 273)| < 1,$$

故可按二项式的幂级数公式对式(7)进行展开, 由于偶次项能正负抵消, 真正起作用的只是奇次项, 且 $(\theta_c - \theta_K) / (\theta_K + 273)$ 和 $(\theta_g - \theta_K) / (\theta_K + 273)$ 的数量级均为 10^{-2} , 故可以忽略高次项, 并整理可有:

$$G(n, \eta)(\theta_L - \theta_g) = \frac{4}{A_0(n)}(\theta_g - \theta_c). \quad (8)$$

令无因次烟气温度 $\beta_g = (\theta_g + 273) / (\theta_L + 273)$, 无因次铜液温度 $\beta_c = (\theta_c + 273) / (\theta_L + 273)$, 对式(8)进行无因次化, 可得:

$$G(n, \eta)A_1(n)(1 - \beta_g) = \beta_g - \beta_c. \quad (9)$$

式中

$$A_1(n) = (1 - q_4)V_f(n)\rho_f c_f / [4C_0\sigma_0\varepsilon_{\text{gwm}}F_m(\theta_K + 273)^3].$$

同理可得保温过程铜液的无因次热平衡方程:

$$\beta_g - \beta_c = A_2(\eta)\beta'_c. \quad (10)$$

式中

$$A_2(\eta) = (D_c c_{pc}) / [4C_0\sigma_0\varepsilon_{\text{gwm}}F_m\eta(\theta_K + 273)^3], \text{ s}.$$

由式(9)(10)可以得到保温阶段重油流量与无因次铜液温度 β_c 以及无因次铜液升温速度 β'_c 之间的函数关系如下:

$$G(n, \eta) = \frac{A_3(n, \eta)\beta'_c}{1 - \beta_c - A_2(\eta)\beta'_c}. \quad (11)$$

铜精炼保温阶段中炉内换热包括炉膛辐射换热和粗铜铜液内部导热升温两个部分, 这两个部分是互相耦合、互为边界条件的, 因此, 在保温时间 $0 \sim \tau_1$ 内对铜精炼保温阶段进行最优控制时, 铜精炼炉所需重油消耗真实目标应该满足:

$$J(\beta_c) = \int_0^{\tau_1} \frac{A_3(n, \eta)\beta'_c}{1 - \beta_c - A_2(\eta)\beta'_c}. \quad (12)$$

目标泛函的边界条件为: $\beta_c(0) = \beta_{c0} = (\theta_{c0} + 273) / (\theta_L + 273)$, $\beta_c(\tau_1) = \beta_{c1} = (\theta_{c1} + 273) / (\theta_L + 273)$.

式(12)是以 $\beta_c(\tau)$ 为宗量的泛函, 保温阶段中重油消耗最优函数所对应的铜液表面的最优升温轨线 $\beta_c(\tau)$ 应在满足目标泛函的边界条件的集合中选取.

由简单泛函求极的Euler方程的简化形式, 得到求解保温阶段中重油流量的最优控制表达式:

$$G(n, \eta) - \beta'_c \frac{\partial(n, \eta)}{\partial \beta'_c} = C_1. \quad (13)$$

式中 C_1 为常数.

对式(13)进行整理, 可得:

$$\frac{-A_2(\eta)A_3(n, \eta)\beta'^2_c}{[1 - \beta_c - A_2(\eta)\beta'_c]^2} = C_1. \quad (14)$$

由式(14)求得保温阶段中铜液表面最优升温轨线和相应的最优升温速度轨线分别如下所示:

$$\beta_c(\tau) = 1 - [1 - \beta_c(0)]e^{-A\tau}. \quad (15)$$

$$\beta'_c(\tau) = A[1 - \beta_c(0)]e^{-A\tau}. \quad (16)$$

式中 $A = -(1/\tau_1) \ln[(1 - \beta_{c1}) / (1 - \beta_{c0})]$, 考虑到 $0 < (1 - \beta_{c1}) / (1 - \beta_{c0}) < 1$, 故 $A > 0$.

保温时间 τ_1 为优化过程中反映铜精炼炉综合精炼能力的一个参数, 与粗铜质量、粗铜成分等因素有关, 由式(15)(16)可知, 在重油成分、空燃比一定

的情况下, 保温阶段中铜液最优升温轨线和相应的最优升温速度轨线只与铜液加入的初始温度、终点温度以及保温时间 τ_1 有关.

则保温阶段中重油流量最优控制为:

$$G(n, \eta) = \frac{AA_2(\eta)}{A_1(n)[1 - AA_2(\eta)]}. \quad (17)$$

求在不同的保温时间 τ_1 下所有铜精炼保温阶段重油消耗最优模型 J 的最小值 $J_{\min}$:

$$J_{\min} = \min\left\{\frac{\tau_1 AA_2(\eta)}{A_1(n)[1 - AA_2(\eta)]}\right\}. \quad (18)$$

则在保温时间 τ_1 内, 重油流量最优控制为保温阶段中重油流量控制的优化参数.

此外, 由式(9)(15)(17)可以求得保温阶段中炉膛高温烟气无因次温度最优升温轨线如下所示:

$$\beta_g(n, \eta) = \frac{G(n, \eta)A_1(n) + \beta_c}{1 + G(n, \eta)A_1(n)}. \quad (19)$$

2.2 氧化阶段重油消耗最优模型(Optimal model of heavy oil consuming in oxidation phase)

根据铜精炼氧化阶段炉膛内过程机理, 可以得出重油燃烧产物热平衡方程:

$$\begin{aligned} G(n, \eta)q_1 - Q_r - G_f c_f \theta_g - G(n, \eta)q_{s1} - \\ G_{fy} c_{fy} (\theta_g - \theta_z) = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

式中: $G(n, \eta)$ 为铜精炼炉氧化阶段重油质量流量, kg/s, q_1 为铜精炼炉炉膛内燃烧1kg重油时有效发热量, kJ/kg; Q_r 为铜精炼炉炉膛内铜液表面浮渣所接受烟气的综合换热量, kW; G_f 为铜精炼炉炉膛内燃烧产物的质量流量, kg/s, 且 $G_f = G(n, \eta)(1 - q_4)V_f(n)\rho_f$, 其中 q_4 为机械不完全燃烧热损失, %; $V_f(n)$ 为1kg重油燃烧产物的容积, Nm^3/kg , $V_f(n) = V_{f0} + (n - 1)V_{i0}$, 其中 n 为重油燃烧时空气消耗系数, V_{f0} 为空气消耗系数 $n=1.0$ 重油燃烧产物生成量, Nm^3/kg , V_{i0} 为1 kg重油完全燃烧时的理论空气需要量, Nm^3/kg ; ρ_f 为重油燃烧产物的密度, kg/m^3 ; c_f 为铜精炼炉炉膛内燃烧产物的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; q_{s1} 为燃烧1 kg重油时铜精炼炉炉膛上部向环境的散热量和漏风排烟热损失, kJ/kg ; θ_g 为炉膛内烟气温度, $^\circ\text{C}$; G_{fy} 为铜精炼氧化阶段熔池内冒出烟气的质量流量, kg/s ; c_{fy} 为铜精炼氧化阶段熔池内产生烟气的平均比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; θ_z 为铜液表面浮渣的平均温度, $^\circ\text{C}$.

铜精炼炉炉膛内燃烧1 kg重油时铜精炼炉炉膛内有效发热量是由重油的燃烧、助燃空气、预热的重油以及重油雾化剂等携带的热量组成:

$$q_1 = Q_L(1 - q_4)(1 - q_3) + (Q_G + Q_W) + (1 - q_4)V_i \rho_i c_i. \quad (21)$$

式中: Q_L 为重油的低位发热值, kJ/kg; Q_G 为重油带入的物理热, Q_W 为机械内混式烧嘴雾化重油的水蒸汽所带入得热量, kJ/kg; q_3 为重油化学不完全燃烧热损失, %; V_t 为燃烧1 kg重油所需的助燃空气体积, Nm^3/kg ; ρ_t 为助燃空气的密度, kg/m^3 ; c_t 为助燃空气的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; θ_t 为进入铜精炼炉炉膛内助燃空气的温度, $^\circ\text{C}$.

基于以上假设, 根据铜精炼炉氧化阶段炉膛内过程机理, 铜精炼炉炉膛内铜液表面浮渣所吸收的高温烟气的辐射热量可由下式确定:

$$Q_r = C_0 \sigma_0 \varepsilon_{\text{gwm}} F_m [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_z + 273)^4]. \quad (22)$$

式中: C_0 为考虑烟气对流作用的修正系数, $C_0 = 1.03 \sim 1.08$; σ_0 为Stefen-Boltzmann常数, $\text{kW}/(\text{m}^2\text{K}^4)$; θ_g 为高温烟气的温度, $^\circ\text{C}$; θ_z 为铜液表面浮渣的平均温度, $^\circ\text{C}$; ε_{gwm} 高温烟气与炉膛内壁对铜液表面浮渣的综合辐射系数, ε_{gwm} 由下式确定^[13]:

$$\varepsilon_{\text{gwm}} = \frac{\varepsilon_g \varepsilon_m [1 + \Phi(1 - \varepsilon_g)]}{\varepsilon_g + \Phi(1 - \varepsilon_g)[\varepsilon_m + \varepsilon_g(1 - \varepsilon_m)]}. \quad (23)$$

式中: ε_g 与 ε_m 分别为氧化阶段高温烟气及铜液表面浮渣的黑度; Φ 为炉膛内壁对铜液表面浮渣的角系数, $\Phi = F_m/F_w$, F_m 为铜液表面浮渣表面积, F_w 为炉膛内壁有效辐射面积, m^2 .

铜液表面浮渣层的热平衡方程由下式确定:

$$Q_r = Q. \quad (24)$$

式中 Q 为经铜液表面浮渣层传给铜液的热量, kW.

铜液表面浮渣层传给铜液的热量 Q 可由下式确定:

$$Q = (\theta_z - \theta_c) F_m / R. \quad (25)$$

式中: R 为铜液表面浮渣层热阻折合系数, $\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}/(\text{kW})$, $R = \delta/\lambda$, δ 为铜液表面浮渣层厚度, $\delta = D_z/(\rho_z F_m)$, $D_z = D_c(1 - \Psi)$, D_c 为铜液质量, kg, Ψ 为粗铜的品位, ρ_z 为铜液表面浮渣密度, kg/m^3 , λ 为铜液表面浮渣层导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$.

铜精炼炉铜液的热平衡方程为:

$$Q = \eta D_c c_{pc} \theta'_c. \quad (26)$$

式中 η 为铜精炼炉氧化阶段中铜液升温综合系数, 主要与铜液氧化阶段中氧化放热、铜液浸没炉体向环境的散热以及产生烟气带走热量有关, 根据氧化阶段热平衡计算可知, 铜液氧化阶段中氧化放热、产生烟气带走热量以及铜液浸没炉体向环境的散热之和占铜液升温所吸收热量的5%~10%, $\eta = 0.90 \sim 0.95$; D_c 为铜精炼炉炉膛内铜液的质量, kg, c_{pc} 为铜精炼炉炉膛内铜液的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$,

θ_c 为铜液的平均温度, $^\circ\text{C}$; θ'_c 为铜液的平均温度变化率, $^\circ\text{C}/\text{s}$.

此外, 铜精炼氧化阶段中熔池冒出烟气的质量流量 G_{fy} 可由下式确定:

$$G_{fy} = b G_{ty}. \quad (27)$$

式中: $b = \alpha(P_1 + P_2 + x) + (1 - \alpha)$, α 为铜精炼氧化阶段中氧化空气的利用率, %; P_1 , P_2 分别为氧化空气中 N_2 , H_2O 的质量流量的百分数, $P_1 = 0.78$, $P_2 = 0.00124gP_1\mu_2/\mu_1$, μ_1, μ_2 分别为 N_2 , H_2O 的摩尔质量; g 为氧化空气含水量, g/m^3 ; x 为铜液氧化阶段中参与生成 SO_2 的氧化空气质量流量的百分数, %.

联立式(20)(21)(22)(23), 可得:

$$G(n, \eta)(\theta_L - \theta_c) = \frac{G_{fy} c_{fy} (\theta_g - \theta_z)}{1 - q_4 V_f(n) \rho_f c_f} + \frac{4C_0 \sigma_0 \varepsilon_{\text{gwm}} F_m [(\theta_g + 273)^4 - (\theta_z + 273)^4]}{1 - q_4 V_f(n) \rho_f c_f}. \quad (28)$$

式中: $\theta_L = (q_1 - q_{s1}) / [(1 - q_4) V_f(n) \rho_f c_f]$.

考虑到实际情况中, 铜精炼氧化阶段铜液温度范围为: $1150 \sim 1170^\circ\text{C}$, 在满足氧化时间内燃料消耗量最优的前提下, 由热平衡计算可知高温烟气温度最多不会比铜液温度高 300°C , 因此, 同理可以对式(28)进行推导, 可得到求解氧化阶段中重油流量最优控制的表达式:

$$G(n, \eta) - \beta'_c \frac{\partial(n, \eta)}{\partial \beta'_c} = C_2. \quad (29)$$

式中 C_2 为常数.

对式(29)进行整理, 可求得氧化阶段中铜液最优升温轨线和相应的最优升温速度轨线分别如下所示:

$$\beta_c(\tau) = 1 - [1 - \beta_c(0)] e^{-B\tau}. \quad (30)$$

$$\beta'_c(\tau) = A[1 - \beta_c(0)] e^{-B\tau}. \quad (31)$$

式中 $B = -(1/\tau_2) \ln[(1 - \beta_{c1})/(1 - \beta_{c0})]$, 考虑到 $0 < (1 - \beta_{c1})/(1 - \beta_{c0}) < 1$, 故 $A > 0$.

氧化时间 τ_2 为优化过程中反映铜精炼炉综合精炼能力的一个参数, 与粗铜质量、粗铜成分等因素有关, 由式(30)(31)可知, 在重油成分以及空燃比一定的情况下, 氧化阶段中铜液最优升温轨线和相应的最优升温速度轨线只与粗铜氧化的初始温度、终点温度以及氧化时间 τ_2 有关.

则氧化阶段中重油流量最优控制为:

$$G(n, \eta) = \frac{K(n, \eta) B}{1 - A(\eta) B}. \quad (32)$$

式中:

$$K(n, \eta) = A_2/[A_1(n)A_3(\eta)]; A = (A_2 + 1)/A_3(\eta);$$

$$A_1(n) = (1 - q_4)V_f(n)\rho_f c_f/[4\varepsilon_{\text{gwm}}F_m(\theta_L + 273)^3],$$

$$A_2 = 1/[4\varepsilon_{\text{gwm}}R(\theta_L + 273)^3], A_3(\eta) = F_m/(\eta RD_c c_{pc}).$$

求在不同的氧化时间 τ_2 下所有铜精炼氧化阶段重油消耗最优优化模型 J 的最小值 $J_{\min}$:

$$J_{\min} = \min\left\{\frac{\tau_2 K(n, \eta) B}{1 - A(\eta) B}\right\}. \quad (33)$$

则在氧化时间 τ_2 内, 重油流量最优控制为氧化阶段中重油流量控制的优化参数。

此外, 同理可以求得氧化阶段中炉膛高温烟气无因次温度最优升温轨线如下所示:

$$\beta_g(n, \eta) = \frac{G(n, \eta)A_1(n) + A_2\beta_c/(1 + A_2)}{1 + G(n, \eta)A_1(n) - 1/(1 + A_2)}. \quad (34)$$

2.3 重油消耗泛函混沌优化器设计(Design of functional chaos optimizer of heavy oil consumption)

当加入的当前炉次粗铜的质量以及粗铜成分知道以后, 铜精炼过程中单位时间内重油消耗泛函混沌优化问题为连续对象的全局最小值优化问题:

$$\begin{cases} \min f(n, \eta), \\ a_1 \leq \eta \leq b_1, a_2 \leq n \leq b_2, \sum Q_{\text{in}} = \sum Q_{\text{out}}, \end{cases} \quad (35)$$

式中: η 表示铜精炼过程中的铜液升温综合系数, n 表示铜精炼过程中的助燃空气的消耗系数, Q_{in} 为铜精炼过程中炉膛所收入的热量, Q_{out} 为铜精炼过程中炉膛所支出的热量。

铜精炼过程重油消耗泛函混沌优化器的结构如图1所示。

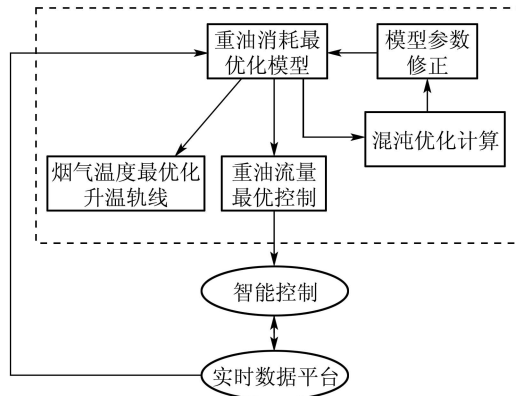


图1 重油消耗泛函混沌优化器的结构

Fig. 1 Configuration of functional chaos optimizer about heavy oil consumption

在根据铜精炼工艺以及当前炉次精炼需要而过程时间 $\tau_1(\tau_2)$ 以后, 可在给定参数 η 与 n 的取值范围内, 利用自适应尺度混沌优化算法通过对(35)所示的混沌优化问题求解, 求解得到的重油消耗量最优值

即为重油流量最优控制值。一般而言, 在重油消耗在线优化器在线优化过程中, 重油消耗在线优化器中参数 η 与 n 的初值的选取可为约束条件中的任意值。

2.3.1 自适应尺度混沌优化算法(Self-adaptive mutative scale chaos optimization algorithm)

选择折叠次数无限一维自映射:

$$\begin{cases} x_{n+1} = \sin(2/x_n), & 0, 1, 2, \dots, n, \\ -1 \leq x_n \leq 1, & x_n \neq 0. \end{cases} \quad (36)$$

作为产生搜索迭代用的混沌变量的混沌模型, 用 K_1, K_2 分别表示粗、细迭代次数。混沌优化算法的基本步骤如下: 混沌优化算法的基本步骤如下:

Step 1 算法初始化。

置 $K_1=1, K_2=1$, 并给定两个较大的正整数 N_1, N_2 , 用随机数产生 x_0 , 代入式(36)所示的混沌模型, 产生 i 个混沌变量 $x_{i,n+1}(i=1, \dots, n)$ 作为产生搜索迭代用的混沌变量;

Step 2 混沌变量在设计变量区间上的粗略转化。

利用式(37)将以上产生的第 i 个混沌变量由取值范围 $[-1, 1]$ 变换到优化设计变量 η 与 n 的区间 $[a_i, b_i]$ 上的混沌变量。

$$x'_{i,n+1} = a_i + (b_i - a_i)x_{i,n+1}. \quad (37)$$

Step 3 用混沌变量进行粗迭代搜索。

令 $x_i(K_1) = x'_{i,n+1}$, 计算优化解 $f_i(K_1)$, 令 $x_i^* = x_i(0), f_i^* = f_i(0)$, 则:

- 1) 如果 $f_i(K_1) \leq f_i^*$, 则 $f_i^* = f_i(K_1), x_i^* = x_i(K-1)$;
- 2) 如果 $f_i(K_1) > f_i^*$, 则放弃 $x_i(K_1)$ 。当 $K_1 \leq N_1$ 时, 进入下一次迭代, $K_1 := K_1 + 1$, 当 $K_1 > N_1$ 时, 结束粗迭代。

Step 4 混沌变量搜索区间的缩小。

$$\begin{cases} a'_i = x_i^* - \varphi(b_i - a_i), \\ b'_i = x_i^* + \varphi(b_i - a_i), \end{cases} \quad (38)$$

式中 φ 为收缩因子, $\varphi \in (0, 0.5)$ 。

为了保证新范围不至于越界, 作如下处理: 若 $a'_i < a_i$, 则 $a'_i = a_i$; 若 $b'_i > b_i$, $b'_i = b_i$ 。

因此, x_i^* 在新区间 $[a'_i, b'_i]$ 上作还原处理后的向量 y_i^* 由下式确定:

$$y_i^* = \frac{x_i^* - a'_i}{b'_i - a'_i}. \quad (39)$$

Step 5 混沌变量在设计变量区间上的细转化。

如果经过Step3的若干搜索, f_i^* 都保持不变, 则利用式(40)把 y_i^* 与 $x_{i,n+1}$ 的线性组合作为新的混沌变量, 用此混沌变量进行搜索。

$$x_{i,n+1}^* = (1 - \beta_i)y_i^* + \beta_i x_{i,n+1}. \quad (40)$$

式中: β_i 为自适应调节系数, $0 < \beta_i < 1$.

自适应调节系数 β_i 采用如下方法进行确定:

$$\beta_i = 1 - \left(\frac{K_2 - 1}{K_2}\right)^m. \quad (41)$$

式中 m 为一整数, 根据优化目标函数而定, 本文中取 $m = 2$.

这是因为在下面要进行细迭代搜索初期, 由于 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 变动较大, 需要较大的 β_i , 随着搜索的进行, 逐渐接近最优点, 故需要选用较小的 β_i , 以便于在 $(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ 所在的较小范围内进行搜索.

Step 6 用混沌变量进行细迭代搜索令 $x_i(K_2) = x_{i,n+1}^*$, 计算优化解 $f_i(K_2)$, 则:

- 1) 如果 $f_i(K_2) \leq f_i^*$, 则 $f_i^* = f_i(K_2)$, $x_i^* = x_i(K_2)$;
- 2) 如果 $f_i(K_2) > f_i^*$, 则放弃 $x_i(K_2)$. 当 $K_2 \leq N_2$ 时, 进入下一次迭代, $K_2 := K_2 + 1$, 当 $K_2 > N_2$ 时, 结束细迭代.

2.3.2 仿真研究(Simulation study)

江西铜业股份公司贵溪冶炼厂350 t铜精炼炉保温以及氧化阶段的主要操作参数如下:

转炉吹炼完毕的粗铜熔液的品位为98.5%, 保温阶段的重油流量为400~600 l/h, 保温阶段结束时粗铜温度为1120°C, 氧化阶段结束时粗铜温度为1150°C, 保温时间以及氧化时间随炼铜转炉供给的粗铜质量与温度不同而变化; 铜精炼炉保温、氧化阶段中燃料采用200 重油, 预热到144 °C后, 采用0.8~1.0 MPa的水蒸汽雾化, 且每雾化1 kg重油需要水蒸汽0.5 kg; 助燃空气消耗系数 $n=1.1\sim 1.2$, 出口烟气温度高达1350 °C.

- 1) 保温阶段重油消耗泛函混沌优化器仿真.
- a) 烟气最优升温速度曲线.

由图2可知, 曲线1, 2及3分别表示当粗铜熔液以温度1100°C, 1095°C及1090°C加入铜精炼炉后烟气的最优升温速度曲线 β'_c 和无因次时间 τ/τ_1 的函数关系, 呈且均线性变化. 当加入铜精炼炉的粗铜熔液温度较高时, 烟气最优升温速度曲线数值较小, 但随着铜精炼炉中加入粗铜熔液温度的降低, 烟气最优升温速度曲线数值越来越大, 且呈倍数增加.

- b) 重油消耗最优极值.

随着铜精炼炉中加入粗铜熔液温度的不同, 铜精炼炉保温阶段最优重油流量 G 的变化如图3所示. 当加入炉内的粗铜熔液温度由1100 °C降低到1085 °C时, 对应的重油流量却增加了0.8倍, 这主要是由于粗铜熔液质量以及比热较大, 加上铜精炼炉的热效率不高所致.

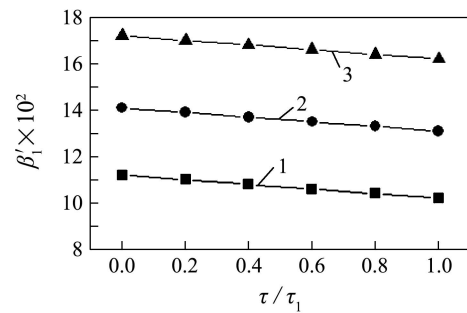


图2 保温阶段烟气最优升温速度曲线
Fig. 2 Curve of optimal rising temperature velocity about the fume in heat preservation phase

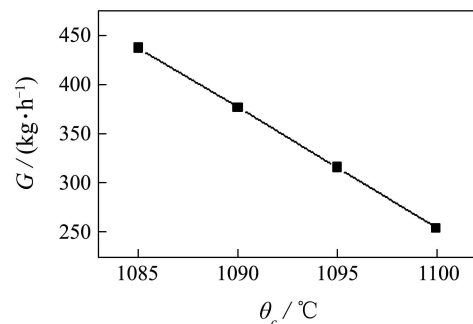


图3 不同初始温度下最优重油流量变化
Fig. 3 Change of optimal heavy oil flux due to different temperature of imported crude copper liquid

以上分析表明, 转炉出来的粗铜熔液温度对铜精炼炉保温阶段中所需重油量影响很大. 当炼铜转炉吹炼过程过吹1 min时, 由于吹炼过程所鼓入大量室温空气的冷却作用, 导致粗铜熔液出炉温度较低, 而铜精炼炉却需要大约1 h来加热升温, 才能满足氧化阶段所必需的氧化条件.

- 2) 氧化阶段重油消耗泛函混沌优化器仿真.
- a) 烟气最优升温速度曲线.

由图4可知, 曲线1, 2及3分别表示铜精炼炉氧化阶段中当粗铜熔液以氧化时间 $\tau_1 = 2$ h, $\tau_1 = 1.9$ h及 $\tau_1 = 1.8$ h时烟气最优升温速度曲线 β'_c 和无因次时间 τ/τ_1 的函数关系呈线性变化; 当铜精炼炉的粗铜熔液氧化时间较长时, 烟气最优升温速度曲线数值较小, 但随着铜精炼炉中粗铜熔液氧化时间的减小, 烟气最优升温速度曲线数值越来越大, 且呈整体上移趋势.

- b) 重油消耗最优极值.

随着铜精炼炉粗铜熔液氧化时间的不同, 铜精炼炉氧化阶段最优重油流量 G 变化如图5所示. 当氧化时间由2.0 h减小为1.7 h时, 对应的重油消耗量却增加了0.2倍, 这主要是由于粗铜熔液质量以及比热较大, 加上铜精炼炉的热效率不高所综合作用的结果.

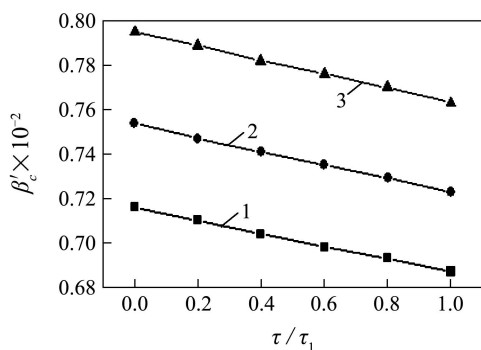


图4 氧化阶段烟气最优升温速度曲线

Fig. 4 Curve of optimal rising temperature velocity about the fume in oxidation phase

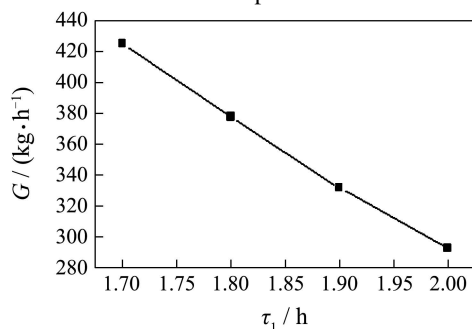


图5 粗铜熔液不同氧化时间下最优重油流量变化

Fig. 5 Change of optimal heavy oil flux due to different oxidation time of crude copper liquid

3 重油泛函混沌优化器应用(Application of functional chaos optimizer about heavy oil consumption)

铜精炼过程重油消耗泛函混沌优化器自2003年10月在贵溪冶炼厂铜精炼炉上试运行1年多以来, 能根据生产现场的实际情况实现控制参数的优化, 有效地避免因经验而手动调节控制参数的误差, 有效地提高了生产技术经济指标。

3.1 节能效果(Effect of saving energy)

在试运行重油消耗泛函混沌优化器以前, 铜精炼炉保温以及氧化阶段的重油流量操作范围为400~600 L/h, 助燃空气消耗系数 $n=1.1\sim 1.4$, 保温或者氧化时间随炼铜转炉供给的粗铜质量、成分以及温度不同而变化, 以上操作参数均通过手动调节控制, 且操作人员为了保险起见, 操作参数设定值基本上接近上限。在不影响保温或者氧化时间的前提下, 通过对重油消耗目标泛函的优化, 重油流量操作范围为300~450 kg/h, 助燃空气消耗系数 $n=1.05\sim 1.15$ 。

根据现场生产数据统计资料, 重油消耗泛函混沌优化器试运行前后重油单耗对比如图6所示。在试运行前, 重油单耗 G_m 均在32.6 kg/t阳极铜以上, 而在试运行后的22个月(2003年12月~2004年1月以及2005年1月~2005年2月为铜精炼炉大修)内, 重

油单耗 G_m 均在29.6 kg/t阳极铜以下, 重油单耗降低9.20%。每年按生产阳极铜30万吨计算, 则可以节省重油900 t, 按重油计划价1450 RMB/t预测, 则每年可降低成本130万元。

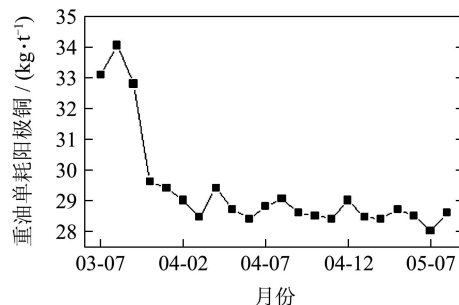


图6 泛函混沌优化器试运行前后重油单耗对比

Fig. 6 Heavy oil consumption per ton of anode copper after trying running functional chaos optimizer in comparison with previous heavy oil consumption per ton anode copper

3.2 环保效果(Effect of saving energy)

在铜精炼炉排烟口进行烟气取样, 并通过烟气分析仪的在线检测可知, 在泛函混沌优化器试运行前, 铜精炼过程中均同时存在 O_2 与 CO 过剩的现象, 部分检测数据如表1所示。这主要是由于雾化后的重油与助燃空气不匹配及其混合不均匀, 加上铜精炼炉烟囱的抽力, 从而导致未燃烧的可燃物 CO 和助燃物 O_2 被快速通过铜精炼炉排烟口进入二次燃烧室, 然后通过烟囱直接排往大气, 从而铜精炼炉保温、氧化阶段的冒黑烟现象。此外, 由于氧化阶段炉尾需要保持 $-60\sim -20$ Pa的负压, 因此, 这必然导致铜精炼炉炉膛内将存在严重的漏风现象, 从而导致 O_2 过剩现象发生。

表1 泛函混沌优化器试运行前 O_2 与 CO 含量Table 1 Contents of O_2 and CO before trying running functional chaos optimizer about heavy oil consumption

项目	1	2	3	4	5	6
$O_2/\%$	6.2	5.8	6.5	6.3	5.6	6.0
$CO/\%$	1.5	1.8	2.0	1.4	1.9	2.2

采用泛函混沌优化器后, 铜精炼炉燃烧产物中未见可燃物 CO , 但仍然存在 O_2 , 因此, 应该控制好炉膛内的压力, 减少炉膛内漏风量。

此外, 在泛函混沌优化器试运行后, 曾经存在冒黑烟的铜精炼过程的烟囱口排烟林格曼黑度较采用泛函混沌优化器前有了一定程度的下降, 如表2所示。从表2可知, 铜精炼过程烟囱排烟林格曼黑度下降到了1级, 不存在冒黑烟现象。

表2 烟囱排烟林格曼黑度

Table 2 Ringelman concentration of fume from chimney

—	测定日期	测定点	林格曼黑度
试运行前	03/07/10	烟囱口	3
	03/07/11	烟囱口	3
	03/10/10	烟囱口	3
	03/10/11	烟囱口	1
	03/10/12	烟囱口	1
试运行后	04/07/23	烟囱口	1
	04/12/08	烟囱口	1
	05/04/09	烟囱口	1

4 结论(Conclusion)

1) 利用泛函分析原理与混沌优化算法等理论针对铜精炼过程重油消耗问题进行融合处理, 并研究开发了既能体现重油消耗最优化真实目标函数又能实现全局优化的重油消耗泛函混沌优化器;

2) 应用结果表明, 在试运行重油消耗泛函混沌优化器后, 重油单耗由过去的32.6 kg/t阳极铜以上降低到29.6 kg/t阳极铜以下, 重油单耗降低9.20%; 此外, 铜精炼炉燃烧产物中未见可燃物CO, 铜精炼过程烟囱排烟林格曼黑度下降到了1级, 不存在冒黑烟现象。

3) 重油消耗泛函混沌优化器的成功设计, 有利于强化铜精炼过程的生产、进一步发挥铜精炼炉的使用效率, 提高阳极铜产量和质量、节能降耗以及提高整个精炼过程的操作水平和经济效益, 尽量减少人为的不确定因素的影响, 最终使铜精炼炉操作由人工经验转为科学化、程序化的操作管理, 达到稳定、高产、高效、高寿命以及低能耗与低污染排放的目的。

参考文献(References):

- [1] 鄂加强, 梅炽, 时章明, 等. 基于泛函分析下铜精炼炉氧化阶段重油消耗最优控制[J]. 矿冶, 2003, 12(4): 44 – 47, 39.
(E Jiaqiang, MEI Chi, SHI Zhangming, et al. Optimal control of heavy oil consuming in oxidation phase in the copper refining rotary anode furnace based on functional theory[J]. *Mining & Metallurgy*, 2003, 12(4): 44 – 47, 39.)
- [2] 鄂加强, 梅炽, 刘春洋, 等. 铜精炼炉氧化阶段炉膛烟气温度动态模型[J]. 矿冶, 2004, 13(4): 60 – 64.
(E Jiaqiang, MEI Chi, LIU Chunyang, et al. Dynamic model of fume temperature in the hearth of copper refining rotary anode furnace in the oxygenation phase[J]. *Mining & Metallurgy*, 2004, 13(4): 60 – 64.)
- [3] 鄂加强, 梅炽, 时章明, 等. 基于泛函理论下铜精炼炉保温阶段重油消耗最优控制[J]. 冶金自动化, 2004, 28(1): 47 – 50, 61.
(E Jiaqiang, MEI Chi, SHI Zhangming, et al. Optimal control of heavy oil consumption in heat preservation phase in the copper refining rotary anode furnace based on functional theory[J]. *Metallurgical Industry Automation*, 2004, 28(1): 47 – 50, 61.)
- [4] VILLARROEL D. Design of a furnace for refining copper prior to fusion[J]. *Minerals Engineering*, 2000, 13(1): 95 – 104.
- [5] JIAO Q, CARISSIMI E, POGGI D. Removal of antimony from copper by soda ash injection during anode refining[C] // *Pyrometallurgy of Copper(Proc of the Copper 91-Cobre 91)*. Ottawa: Pergamon Press, 1991: 341 – 356.
- [6] MECHEV V V. On status and trends of copper industry development[C] // *Pyrometallurgy of Copper(Proc of the Copper 91-Cobre 91)*. Ottawa: Pergamon Press, 1991: 91 – 105.
- [7] Solari J A, Lagos G E. Strategy for the reduction of pollutant emissions from Chilean copper smelters[C] // *Pyrometallurgy of Copper(Proc of the Copper 91-Cobre 91)*. Ottawa: Pergamon Press, 1991: 295 – 309.
- [8] 鄂加强, 王耀南, 梅炽, 等. 基于铜精炼过程液化气消耗泛函混沌优化器的设计[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(2): 370 – 376.
(E Jiaqiang, WANG Yaonan, MEI Chi, et al. Design on functional chaos optimizer about consumption of liquefied petroleum gas in copper refining process[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(2): 370 – 376.)
- [9] 鄂加强, 王耀南, 梅炽. 铜精炼过程铜液温度软测量模型及应用[J]. 化工学报, 2006, 57(1): 203 – 209.
(E Jiaqiang, WANG Yaonan, MEI Chi. Soft-sensing model of copper liquid temperature in copper refining process and its application[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2006, 57(1): 203 – 209.)
- [10] 鄂加强, 梅炽, 刘春洋, 等. 炼铜转炉粗铜成分时间序列的混沌分形[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(2): 238 – 242.
(E Jiaqiang, MEI Chi, LIU Chunyang, et al. Chaos and fractal of crude copper composition time series from copper convertor[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2005, 36(2): 238 – 242.)
- [11] 鄂加强, 王耀南, 龚金科, 等. 炼铜转炉粗铜成分混沌时间序列的软测量模型及应用[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 52 – 56.
(E Jiaqiang, WANG Yaonan, GONG Jinke, et al. Soft-sensing model of chaos time series of crude copper composition in copper convertor and its application[J]. *Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2006, 34(1): 52 – 56.)
- [12] E J Q, WANG Y N, MEI C, et al. Chaotic behavior of crude copper composition time series in the process of matte converting and its predictable time scale[J]. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 2006, 7(4): 651 – 661.
- [13] 鄂加强. 铜精炼炉操作优化与智能控制应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004.
(E Jiaqiang. *Application and study on operation optimum and intelligent control of the copper refining anode furnace*[D]. Changsha: Central South University, 2004.)

作者简介:

鄂加强 (1972—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为智能信息融合处理方法及其应用研究, E-mail: ejiaqiang@126.com;

王耀南 (1958—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 控制科学与工程博士后, 主要研究方向为智能信息融合处理方法及其应用研究;

梅炽 (1934—), 男, 教授, 1956年毕业于中南矿冶学院, 博士生导师, 主要研究方向为热工过程信息处理研究;

龚金科 (1954—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为智热工过程信息处理研究。