

韶钢 120 t LF 钢水温度预报模型的开发

肖超平¹ 包燕平² 元鹏飞² 刘志明^{1,3} 程晓文³ 丘文生³

(北京科技大学 1 冶金与生态工程学院, 2 冶金工程研究院, 北京 100083; 3 韶关钢铁集团有限公司, 韶关 512123)

摘要 以钢厂 120 t LF 精炼过程钢水、炉渣和合金为研究体系, 以能量平衡机理模型为基础, 建立精炼钢水温度预报模型。根据钢种、钢水质量和温度、目标出钢温度及处理时间、渣料和合金加入量及各种热损失所需投入的电能, 确定精炼过程合理的供电曲线。并根据现场供电和工艺参数, 预报钢水温度。20 炉 50RH1 钢 (% : 0.48 ~ 0.50C, 0.22 ~ 0.30Si, 0.60 ~ 0.70Mn) 测试结果表明, 模型预报与实测钢水温度误差为 ± 5 °C。

关键词 LF 精炼 钢水温度 预报模型

Development of Prediction Model for Temperature of Liquid Steel in 120 t LF at Shaosteel

Xiao Chaoping¹, Bao Yanping², Yuan Pengfei², Liu Zhiming^{1,3}, Cheng Xiaowen³ and Qiu Wensheng³

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, 2 Research Institute of Metallurgical Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 3 Shaoguan Iron and Steel Group Co Ltd, Shaoguan 512123)

Abstract According to the studied system of liquid steel, refining slag and alloy in 120 t LF refining process, based on energy-balance principle model the prediction model for temperature of refining liquid steel has been established. According to steel grade, liquid weight and temperature, aim tapping temperature and treated time, adding amount of refining slag material and alloys as well as various heat loss to get required input electric energy, the reasonable electric supply curves during refining are determined. And the temperature of liquid is predicted according to parameters of electric supply and process at worksite. Examination results on 20 heats steel 50RH1 (% : 0.48C ~ 0.50C, 0.22 ~ 0.30Si, 0.60 ~ 0.70Mn) show that the error of temperature of liquid between model predicted value and measured value are ± 5 °C.

Material Index LF Refining, Temperature of Liquid, Prediction Model

1 温度模型理论基础和建立

由钢厂 120 t LF 统计数据, 并根据热平衡机理分析模型和统计模型的特点。以钢水、炉渣和合金为研究体系, 以机理模型为基础, 在一定经验公式的指导下, 确定温度模型的关键参数。

1.1 LF 的总能量平衡

从能量平衡的角度出发, 将整个钢包体系作为一个系统, 则 LF 精炼过程中应遵循能量守恒原理^[1], 即:

系统能量的增量 = 输入能量的总量 - 系统能量的损失

LF 精炼过程中能量平衡关系如图 1 所示, 能量输入主要包括电弧加热的能量 Q_{ab} 和合金反应的化学热 Q_o 、 Q_f 。

进入熔池的热量又可以分为 4 个方面。(1) 出钢过程中钢流通过对流和辐射向外散失的热量 Q_r ; (2) 用于钢液升温所

需热量 Q_{st} 以及渣料和合金的升温熔化所需的热量 Q_m 、 Q_s , 两者之和为加热熔池的热量; (3) 通过包衬损失的热量, 其中分为两部分, 一部分热量成为包衬耐火材料的蓄热 Q_{in} 而使包衬温度升高, 另一部分是由包壳与周围大气的热交换而损失的热量 Q_{sa} ; (4)

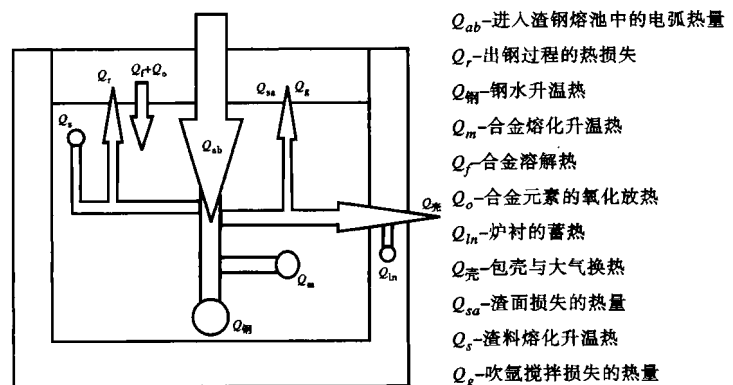


图 1 LF 能量平衡示意图
Fig. 1 Schematics of energy-balance in LF

通过渣面损失的热量,包括由渣面的辐射和对流传热的热损失 Q_{sa} 以及由熔池内产生的高温气体通过渣面带走的热量 Q_g 。

任一时间段 LF 能量输入、输出及分配关系为:

$$Q_{ab} + Q_o + Q_f = Q_{\text{钢}} + Q_r + Q_m + Q_s + Q_{ln} + Q_{壳} + Q_{sa} + Q_g \quad (1)$$

1.2 输入体系的电能

LF 采用三相电弧加热方式,变压器二次侧输出电能,一部分为线路损失的功率,另一部分为电弧功率。电弧产生的热能一部分传给炉渣与钢水,一部分损失传给包衬和水冷盖。其中,传给熔池的电能用于钢水、炉渣的加热升温 and 炉渣、合金的熔化升温。

设供电系统三相电路功率平衡,且各相电压、电流值均相等,则电弧加热进入熔池的热量 Q_{ab} 为:

$$Q_{ab} = 3 \cdot C_{\text{arc}} \cdot U_{\text{arc}} \cdot I \quad (2)$$

式中: I - 每项的电极电流/A; U_{arc} - 电弧电压/V; C_{arc} - 电能利用系数。

在钢厂现场收集 30 炉数据,经计算,确定电能利用效率:(1)4 档时, $C_{\text{arc}} = 0.36$;(2)5 档时, $C_{\text{arc}} = 0.35$;(3)6 档时, $C_{\text{arc}} = 0.35$;(4)7 档时, $C_{\text{arc}} = 0.328$;(5)8 档时, $C_{\text{arc}} = 0.316$ 。

1.3 加入合金的热效应

合金在钢水中经历合金加热(物理吸热过程)、合金熔化(化学过程)和合金溶于钢水 3 个阶段^[2]。现场所加的合金为硅铁、高碳锰铁、低碳锰铁、铝线、增碳剂。计算时可看成是合金的每一单质元素的变化,所以先求出每一个单质元素的物理学和化学热,然后按合金成分折合成合金的热效应。

$$M_j = \sum_{i=1}^{N_m} c_{ij} m_i^m \quad (j=1, 2, \dots, N_m) \quad (3)$$

式中: M_m - 合金数目; N_m - 合金中元素个数; m_i^m - 合金 i 的加入量/kg; c_{ij} - 合金 i 中元素 j 的含量/%。

根据各元素的比热容、相变热,固体合金中元素 j 的熔化热 Q_{mj} 为:

$$Q_{mj} = [c_{sj}(T_{fj} - T_{oj}) + \Delta H_{mj} + c_{lj}(T_{\text{钢}} - T_{fj})] \cdot M_j \quad (4)$$

式中: T_{oj} 、 T_{fj} 、 $T_{\text{钢}}$ - 合金元素的入炉温度、液相线温度和钢液温度/°C; c_{sj} 、 c_{lj} - 合金元素 j 的固相、液相比热容/[J·(kg·°C)⁻¹]; ΔH_{mj} - 合金元素 j 的熔化潜热/(J·kg⁻¹)。

合金元素的氧化放热以 Q_{oj} 表示:

$$Q_{oj} = \frac{\Delta H_{oj} M_j (1 - f_j)}{M_j^m} \quad (5)$$

式中: ΔH_{oj} - 合金元素氧化反应热/(J·mol⁻¹); f_j - 合金元素的收得率/%。

合金元素的熔解热以 Q_{fj} 表示:

$$Q_{fj} = \frac{\Delta H_{fj} M_j}{M_j^m} \quad (6)$$

式中: ΔH_{fj} - 合金元素 j 的熔解热/(J·mol⁻¹); M_j^m - 合金元素 j 的摩尔量/(kg·mol⁻¹)。

加入合金的总热效应为:

$$\sum Q_m = \sum_{j=1}^{N_m} [Q_{mj} - (Q_{fj} + Q_{oj})] \quad (7)$$

由现场合金对 LF(120 t) 中的钢液温降进行统计计算,得到表 1 数据。

表 1 现场实际统计合金的温降系数(°C/100 kg)
Table 1 Coefficient of temperature fall of liquid by adding alloy measured at worksite (°C/100 kg)

合金种类	温降系数	合金种类	温降系数
高碳铬铁	-2.3	低碳铬铁	-1.5
高碳锰铁	-2.2	低碳锰铁	-1.8
Al	5	硅铁	2.2
CaSi	-2.5	碳粉	-5

合金从加入到钢液中并达到熔池温度的时间在本模型中选取 150 s。

1.4 加入渣料的热效应

在 LF 精炼过程中,会加入一定的渣料,加渣料的热效应也可改进合金热效应的方法计算,使问题简化,采用简化算法为:

$$\sum Q_s = \sum_{i=1}^{N_{\text{渣}}} m_i^{\text{渣}} [c_{si}^{\text{渣}} (T_{fi}^{\text{渣}} - T_{oi}^{\text{渣}}) + \Delta H_{si} + c_{li}^{\text{渣}} (T_{\text{钢}} - T_{fi}^{\text{渣}})] \quad (8)$$

式中: $N_{\text{渣}}$ - 渣料数量; $m_i^{\text{渣}}$ - 渣料 i 的质量/kg; $T_{oi}^{\text{渣}}$ 、 $T_{fi}^{\text{渣}}$ 、 $T_{\text{钢}}$ - 渣料的入炉温度、液相线温度和钢液温度/°C; $c_{si}^{\text{渣}}$ 、 $c_{li}^{\text{渣}}$ - 渣料的固相、液相比热容/[kJ·(kg·K)⁻¹]; ΔH_{si} - 渣料的熔化潜热/(J·kg⁻¹)。

实际炉渣的成分比较复杂,是在一定范围内变化的,熔点也是变化的,钢水冶炼过程中炉渣的温度一般比钢水温度高 40~80 °C,热能都是从炉渣向钢液传递的。但是用任何方法,炉渣的熔点都是低于钢液的熔点,这样才能保证炉渣都是液态的,其间反应速度也会加快。

本模型选取炉渣熔点为 1 600 °C。炉渣固相、液

相比热容分别为 0.736、0.92 kJ/(kg·K), 炉渣的熔化潜热为 1418.86 kJ/kg。

炉料从加入到钢液中并达到熔池温度的时间在本模型中选取 150 s。根据现场数据统计可以得出石灰温降 -2.5 °C/100 kg, 萤石温降 -3.5 °C/100 kg。

1.5 炉衬散热损失

从传热的角度上看, 钢包传热为非稳定态的复杂传热过程, 同时钢包结构比较复杂。为了计算炉衬的散热损失, 对钢包炉衬散热进行简化, 分为钢包包壁热量损失和包底热量损失^[3]。

(1) 钢包包壁热损: 假设为圆柱坐标下一维非稳态导热, 导热微分方程为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (9)$$

边界条件: $r = r_1, T = T_{st}$

$$R = r_2, -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{r=r_1} = \alpha(T - T_a)$$

初始条件($\tau = 0$)为:

$$\frac{T - T_{st,0}}{T_{st,0} - T_{ls,0}} = -\frac{\ln \frac{r_2}{r}}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

(2) 包底热损: 假设为无限大平板一维非稳态导热, 导热微分方程为:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \quad (10)$$

边界条件: $Z = 0, T = T_{st}$

$$Z = z_1, -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial Z} \right|_{Z=z_1} = \alpha(T - T_a)$$

初始条件($\tau = 0$)为:

$$T = T_{st,0} - \frac{Z}{z_1} T_{st,0} - T_{ls,0}$$

以上式中: a, α, λ - 分别为热扩散系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)、对流换热系数/[$\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$]、导热系数/[$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]; T_{st}, T_{ls}, T_a - 钢水温度、钢包外壁温度、大气温度/°C; $T_{st,0}, T_{ls,0}$ - 达到 LF 精炼工位($\tau = 0$)时钢水温度和包壁温度/°C; r, Z - 钢包尺寸; r_1, r_2, z_1 - 钢包内径、外径和包底厚度/m; τ - 时间/s。

利用显性差分法求解包壁热量损失和包底热量损失的传热方程, 可以得到包壁的温度分布。由此可以计算出各时间段内钢液通过炉衬的散热量:

$$Q_{壳} + Q_{ln} = \frac{2G\lambda_1(T_1^{s1} - T_2^{s1})\Delta t}{\rho_{钢} R_1 \Delta r_1} + \frac{\pi R_1^2 \lambda_1 (T_1^{b1} - T_2^{b1}) \Delta t}{\Delta z_1} \quad (11)$$

式中: Q_{ln} - 炉衬的蓄热; $Q_{壳}$ - 包壳与大气换热; T_1^{s1}, T_2^{s1} - 包衬在第 1 个节点与第 2 个节点 $s1$ 时刻温度/°C; T_1^{b1}, T_2^{b1} - 包底在第 1 个节点与第 2 个节点 $s1$ 时刻温度/°C。

利用现场的统计数据算出 120 t LF 钢包散热热量损失在 0.2 ~ 0.3 °C/min。

1.6 渣面热量损失

渣面散热主要包括对流散热和辐射散热^[4,5], 由于渣面温度较高, 辐射传热占主导作用, 对流传热可以忽略。

$$Q_{sa} = C_{sa} \cdot \varepsilon_s \cdot \sigma_b (T_{钢} + 273)^4 \cdot A \quad (12)$$

式中: C_{sa} - 熔池表面热量损失系数; σ_b - 玻兹曼常数, $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; A - 渣面面积/ m^2 ; $T_{钢}$ - 用钢水温度代替渣面温度/°C。

根据现场数据确定, 包盖开启时, $C_{sa} = 0.75$; 包盖闭合时 $C_{sa} = 0.4$ 。

1.7 吹氩造成的热量损失

假定吹入钢液的氩气排除时温度与钢液温度相同, 则氩气吸热的理论计算公式为:

$$Q_{Ar} = 1.784c_p \cdot V_{Ar} \cdot (T_{钢} - T_{Ar}) \quad (13)$$

式中: c_p - 氩气的比热容 520.7 J/(kg·K); V_{Ar} - 吹 Ar 量/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$); $T_{钢}$ 和 T_{Ar} - 钢液温度及吹入氩气温度/°C。

在本模型中, 设钢液温度为 1600 °C, 氩气初始温度为 25 °C, 氩气的比热为 520.7 J/(kg·K)。

同时在 LF 处理过程中, 一直都在进行吹氩搅拌, 当吹氩强度过大时, 会将钢液表面的渣层吹开而使部分钢液裸露在大气中。吹氩强度越大, 钢包上部裸露的面积越大, 钢液直接向大气中对流和辐射的热量损失就越大。

对钢液裸露面的散热, 根据全浮力模型计算, 并通过实际生产数据校准全浮力模型经验参数, 如图 2 所示。

裸露面的热量损失 Q_{rd} 为:

$$Q_{rd} = 60 \cdot \varepsilon \cdot \sigma [(T_{钢} + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \cdot \pi \cdot [(H + Z_0)^2 \cdot \tan^2 \frac{\theta}{2} + h^2] \quad (14)$$

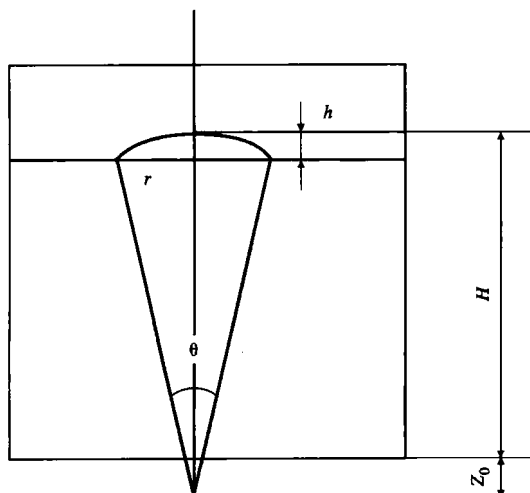


图 2 全浮力模型示意图

Fig.2 Schematics of buoyant force model

式中: $\tan \frac{\theta}{2}$ - 经验系数; Z_0 - 经验系数, 取 0.8 m; σ_b - 玻兹曼常数, $\sigma_b = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; A - 渣面面积/ m^2 ; $T_{\text{钢}}$ - 用钢水温度代替渣面温度/ $^{\circ}\text{C}$ 。

根据生产数据可知, 吹氩量为 12 ~ 30 m^3/h 时, $\tan \frac{\theta}{2} = 0.18$; 吹氩量为 30 ~ 60 m^3/h 时, $\tan \frac{\theta}{2} = 0.2$; 吹氩量为 60 ~ 100 m^3/h 时, $\tan \frac{\theta}{2} = 0.25$ 。

由此, 吹氩产生的热量损失为:

$$Q_g = Q_{Ar} + Q_{rd} \quad (15)$$

1.8 烟气造成的热量损失

烟气带走热量:

$$Q_{\text{烟}} = G_g \cdot C_g (T_g - T_a) + G_d \cdot C_d (T_d - T_a) \quad (16)$$

式中: C_g, C_d - 烟气与烟尘比热容/ $[\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}]$; G_g, G_d - 烟气与烟尘排出速率/ $(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$; T_g, T_d, T_a - 烟气、烟尘排出与环境温度/ $^{\circ}\text{C}$ 。

烟尘、烟气排出温度为 500 $^{\circ}\text{C}$, 环境温度取 25 $^{\circ}\text{C}$, 烟尘、烟气排出速率分别为 1.278、0.698 kg/s , 比热容分别为 0.28、0.72 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

1.9 温度模型

应用 VB6.0 程序设计语言, 将上述精炼过程中温度预报模型编制成计算机程序。根据钢种、钢水重量、钢水温度、目标出钢温度及处理时间、渣料和合金加入量及各种热损失计算确定所需投入的电能, 确定精炼全过程合理的供电曲线。根据现场供电参数及工艺参数, 预报钢水温度。将温度预报及控制模型编制成有友好界面的工程软件, 预报及控

制精度要求达到 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

2 温度模型的验证

根据实际生产过程中现场冶炼操作记录和工艺参数, 抽取 20 炉次, 钢种为 50RH1, 成分 (%) 为: 0.48 ~ 0.50C、0.22 ~ 0.30Si、0.60 ~ 0.70Mn、 $\leq 0.025\text{P}$ 、 $\leq 0.020\text{S}$ 、0.01Als。

用该模型进行数值模拟计算, 预报结果与实测结果对比如表 2 所示。可以看出, 精炼过程钢水温度的预报值与实测值吻合的比较好, 预报及控制精度全部达到 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

表 2 精炼结束时钢水实测与计算温度的对比/ $^{\circ}\text{C}$ Table 2 Comparison between predicted and measured temperature of liquid at end of refining/ $^{\circ}\text{C}$

炉号	实测值	预报值	误差	炉号	实测值	预报值	误差
102942	1 587	1 585	-2	104543	1 573	1 570	-3
102943	1 576	1 580	4	104544	1 578	1 580	2
102945	1 590	1 587	-3	104545	1 574	1 580	4
104780	1 577	1 581	4	104546	1 572	1 570	-2
104781	1 579	1 574	-5	104547	1 581	1 576	-5
104933	1 587	1 590	3	104963	1 589	1 509	1
104934	1 590	1 594	4	104964	1 584	1 589	5
104935	1 593	1 591	-2	104965	1 585	1 583	-2
104936	1 588	1 589	1	104966	1 583	1 580	-3
104937	1 585	1 587	2	104967	1 585	1 584	-1

根据一个多月的跟踪调试, 本系统运行稳定。检测温度和预报温度的差值基本控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$, 温度趋势线能够很好的反映电极、加料、吹氩对温度的影响, 可以对生产起一定的指导作用。

3 结论

用本模型编制的 LF 温度预报程序对现场 LF 精炼过程中温度进行模拟验证, 结果预报及控制精度全部达到 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 。证明该模型计算速度快, 完全可以满足钢厂 LF 生产过程中钢水温度在线预报的要求。

参考文献

- 张慧书, 战东平, 姜周华. LF 精炼过程的钢水温度控制. 工业加热, 2005, 34(2): 64
- 李晶, 傅杰, 王平, 等. 钢包精炼过程中钢水成分微调及温度预报. 钢铁研究学报, 1999, 11(2): 6
- 武拥军, 姜周华, 姜茂发, 等. LF 炉精炼过程钢水温度预报模型. 钢铁研究学报, 2002, 14(2): 9
- 刘丹妹, 邱成国. LF 炉温度预报模型的研究与开发. 2008 年全国炼钢-连铸生产学术会议论文集, 2008: 306
- 陈跃峰. LF 炉精炼过程钢水温度预测模型; [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2007

肖超平(1987-), 男, 硕士研究生, 钢铁冶金研究。

收稿日期: 2010-11-19