

RH-MFB 二次精炼过程钢水温度控制的模拟

韩传基¹ 艾立群¹ 朱立新² 蔡开科¹ 王新华¹

(1 北京科技大学冶金研究中心, 北京 100083; 2 宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900)

摘要 研究了 RH-MFB 二次精炼过程钢包钢水传热行为和钢水温度的变化规律, 建立钢水温度预报模型, 编制了计算机软件对实际过程进行模拟。通过对 9 炉 300 t 钢水 RH-MFB 精炼时钢水温度的预测结果表明, 钢水温度的计算值和实测值的误差小于 $\pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ 。按目标温度要求, 进行补偿措施, 有效地控制钢水温度。

关键词 RH-MFB 精炼 钢水温度 控制 模拟

Simulation of Temperature Control of Molten Steel in RH-MFB Secondary Refining Process

Han Chuanji¹, Ai Liqun¹, Zhu Lixin², Cai Kaike¹ and Wang Xinhua¹

(1 Metallurgy Research Center, University of Science and Technology, Beijing 100083;
2 Baoshan Iron and steel Co Ltd, Shanghai 201900)

Abstract The heat transfer behavior and temperature variation rule of molten steel during RH-MFB secondary refining process was analyzed and a model for forecasting temperature of molten steel has been established to simulate the actual process by a programmed software. The forecasting results of temperature of 9 heats molten steel in 300 t ladle RH-MFB refining showed that the error of molten steel temperature calculated and measured was less than $\pm 10\text{ }^\circ\text{C}$. According to requirement of aim temperature to implement compensated measures can effectively control the molten steel temperature.

Material Index RH-MFB Refining, Molten Steel Temperature, Control, Simulation

温度是炼钢过程中需要重点控制的工艺参数之一, 合适的钢水温度是保证连铸坯质量的重要前提。过高的钢水温度不仅易造成拉漏、溢钢等事故, 而且会降低炉龄, 增加钢中夹杂物数量, 易产生铸坯的内裂, 影响铸坯质量; 温度过低的钢水流动性差, 易堵水口, 回炉率高。

为确保炼钢浇注过程中的钢水温度合适, 对过程钢水温度值进行准确预测尤为重要, 建立合理的温度制度是有效地控制钢水温度的基本对策。RH-MFB 是介于炼钢与连铸之间的一个钢水精炼设备, 其作用是提高钢水质量, 可满足大批量生产 IF 钢等高难度、高附加值产品的要求, 其中钢水温度的有效控制是保证连铸工序顺畅的关键因素之一。

1 数学模型的建立

RH 处理过程中, 环流气体氩气的吹入, 使温度为 T_1 的钢水从上升管进入真空室, 进行真空处理, 发生脱碳反应; 同时钢水以辐射和对流方式向真空室壁传热, 通入的氩气与反应产生的气体共同形成真空室废气, 带走了部分钢水热量。脱

氧合金加入, 发生化学反应放出热量, 又加热了钢水, 综合作用的结果使真空室内的钢水温度变为 T_2 , 温度为 T_2 的钢水又经下降管进入钢包, 并在钢包内混匀, 待钢水温度变为 $T_1 + \Delta T$ 后重新流入真空室。周而复始, 使得钢水温度不断变化。RH-MFB 精炼原理图见图 1。为便于研究作如下假设:

(1) 钢包、真空室和上、下浸渍管内衬中的温度分布沿轴向是均匀的, 而沿径向(壁厚方向)是不均匀的;

(2) 钢水流动为稳定流动, 真空室内钢水深度只是真空度的函数;

(3) 钢包内钢水表面通过炉渣向无限大空间辐射。

通过钢包精炼过程钢水热传输、热损失及 RH 处理特征的分析, 建立了 RH-MFB 精炼时真空室钢液和钢包内钢液温度的数学模型。

(1) 真空室钢液温度变化的数学表达式为:

$$\rho V C_p \frac{dT_{2t}}{dt} = -Q C_p (T_{2t} - T_{1t}) - Q_c + q_m(\tau) \cdot A_m +$$

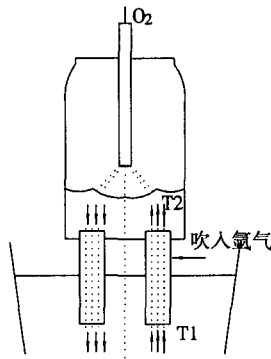


图 1 RH-MFB 精炼原理图

Fig.1 Schematic of principle of RH-MFB refining

$$q_n(\tau) \cdot A_n + q_p(\tau) \cdot A_p + Q_s + Q_{Ar} + Q_{gas} - Q_{alloy} \quad (1)$$

式中: ρ 、 V 、 C_p 、 T_2 分别为真空室内钢水的密度、体积、热容 ($J/kg \cdot ^\circ C$)、温度; Q -钢水循环流量/ $t \cdot min^{-1}$; $Q_c = \Delta H_{CO} \Delta [C] W_1$ -真空室内钢水脱碳产生的化学热/ kJ ; W_1 -真空室内钢水重量/ kg ; $q_m(\tau) \cdot A_m$ -流入 RH 炉壁的热流量(真空室内与钢水接触部分)、面积; $q_n(\tau) \cdot A_n$ -流入 RH 底部的热流量、面积; $q_p(\tau) \cdot A_p$ -流入 RH 浸渍管的热流量、面积; Q_s -真空室内钢水表面的辐射热量; Q_{Ar} -吹入氩气泡带走的热量; Q_{gas} -真空室内炉气带走的热量; Q_{alloy} -合金加入引起的热量变化。

(2) 钢包内钢液温度变化的数学表达式为:

$$\frac{dT_m}{d\tau} = \frac{1}{W_m C_{p(m)}} [q_b(\tau) \cdot A_b + q_w(\tau) \cdot A_w + q_s(\tau) \cdot A_s - QC_{p(m)}(T_{1t} - T_{2t}) + Q_{浸渍管}] \quad (2)$$

流入 RH 炉壁的 $q_m(\tau)$ 热流量的确定。假定真空室耐火材料的温度除厚度方向外,其它方向是均匀的,所以热量仅沿着耐火材料的厚度方向从内向外传热,传热方程为一维不稳态导热:

$$\rho_{w(RH)} \cdot C_{p w(RH)} \cdot \frac{\partial T_{w(RH)}}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \lambda_{w(RH)}(\tau) \cdot \frac{\partial T_{w(RH)}}{\partial r} \right) \quad (3)$$

初始条件:

$$\tau = 0 \quad r_{(RH)} \leq r \leq r_{w(RH)} \\ T_{(RH)}(r, 0) = T_{(RH)}(r, \tau) \quad (4)$$

式中: $r_{(RH)}$ 、 $r_{w(RH)}$ -真空室内径(m)和外径(m)。

边界条件:

$$\tau > 0 \quad r = r_{(RH)} \quad T_{(RH)}(r, \tau) = T_{(RH)}(\tau) \quad (5)$$

$$\tau > 0 \quad r = r_{1(RH)} \quad (\text{复合衬壁处})$$

$$\left(\frac{V}{2} \rho_A \cdot C_{pA} + \frac{V}{2} \rho_B \cdot C_{pB} \right) \frac{\partial T_b}{\partial \tau} \Big|_{r_{1(RH)}} = -s \cdot \lambda_A \cdot \frac{\partial T_b}{\partial r} \Big|_{r - \frac{1}{2} \Delta r} + s \cdot \lambda_B \cdot \frac{\partial T_b}{\partial r} \Big|_{r + \frac{1}{2} \Delta r} \quad (6)$$

$$\tau > 0 \quad r = r_{w(RH)}$$

$$\frac{V}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} \Big|_{x_b} = -s \cdot \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x_b} - h_{m-f} \cdot s \cdot (T_b - T_f) - \epsilon_m \cdot \sigma_0 \cdot s \left[\left(\frac{T_b + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (7)$$

真空室内炉气带走的热量:

$$Q_p = Q_{混合} C_{混合} (T_{混合} - T_{出口}) \quad (8)$$

合金加入引起的热量变化:

$$Q_{alloy} = \sum_i^N W_{alloy} \cdot F_{(i)} [C_{Ps(i)} \cdot (T_{r(i)} - T_f) + Q_{r(i)} + C_{pl(i)} \cdot (T_m - T_{r(i)})] \quad (9)$$

式中: W_{alloy} -合金重量/ kg ; $F_{(i)}$ -合金中 i 元素的含量/ $\%$; $C_{Ps(i)}$ - i 元素固态热容 ($J/kg \cdot ^\circ C$); $C_{pl(i)}$ - i 元素液态热容 ($J/kg \cdot ^\circ C$); $T_{r(i)}$ - i 元素的熔点/ $^\circ C$; $Q_{r(i)}$ - i 元素的熔化潜热/ $J \cdot kg^{-1}$ 。

真空室内钢水辐射传热:

$$J_i = \epsilon_i \sigma T_{is}^4 + (1 - \epsilon_i) \sum_{k=0}^n J_k \varphi_{i,k}, i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

2 软件编制

本软件采用 Delphi6 进行开发,将上述模型转变成计算机程序。模型初始化部分包括:钢包以及 RH-MFB 精炼炉尺寸、耐火材料热物性参数、初始温度、钢水条件等。通过核心程序对 RH 精炼过程中钢水温度进行计算,通过与目标温度比较,计算出向钢水中加入升温所需要的铝量或降温所需的冷却材料,以满足下一道工序对钢水温度的要求。表 1 为模型计算设备参数,模型计算精炼过程钢水温度变化如图 2 所示(计算的钢种为 IF 钢,精炼开始钢水温度 $1617^\circ C$)。

3 模型验证结果

RH 精炼过程中,现场采集其中 9 炉数据与计算值作比较,可以看出,钢水温度的计算值与实测

表 1 宝钢 RH-MFB 精炼设备的主要参数

Table 1 Main parameters of RH-MFB refining unit at Bao Steel

项目	参数
处理量/t	300
极限真空度/Pa	< 25
浸渍管直径/m	0.75
环流量/t·min ⁻¹	210 ~ 250
最大环流气体流量/L·min ⁻¹	4 000
顶枪系统	MFB
最大吹氧流量/m ³ ·h ⁻¹	2 500
平均处理周期/min	32
年处理能力/万 t	200

值的绝对差值最大为 7 °C, 最小为 0 °C, 在 ± 5 °C 以内差值的比例达到 90%。

图 3(a)为 RH 精炼处理结束时现场采集的 9 炉数据与计算值的比较, 同样, 钢水温度的计算值与实测值的绝对差值最大为 7 °C, 最小为 0 °C, 在 ± 5 °C 以内差值的比例达到了 90%。

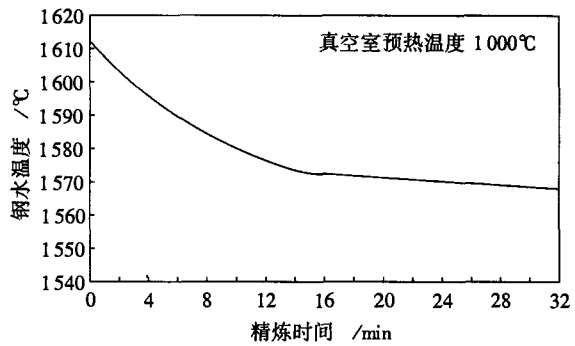
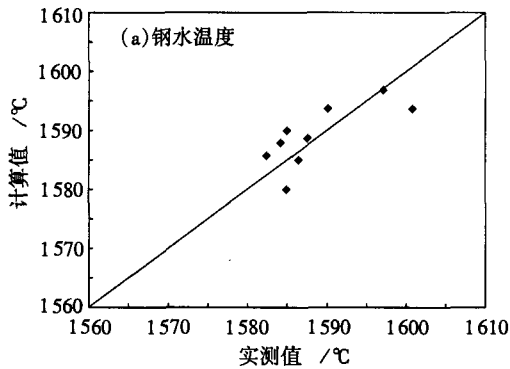


图 2 RH-MFB 精炼过程钢水温度变化

Fig. 2 Change of molten steel temperature during RH-MFB refining

为使钢液温度满足目标温度, 需要加铝对钢水温度进行补偿, 图 3(b)为实际加入的 Al 量与模型计算值的比较, 可以看出计算值与实际加入量比较接近。

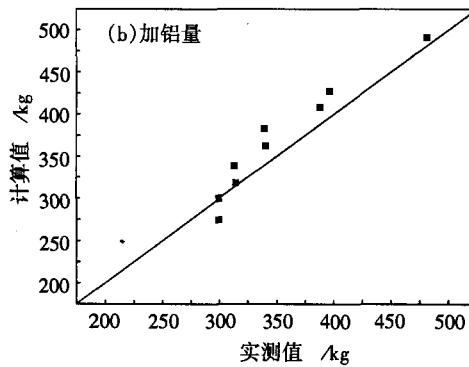


图 3 计算值与实测值比较: (a) RH-MFB 精炼结束时的钢水温度; (b) 加 Al 量

Fig. 3 Comparison between calculated value and actual measured value: (a) molten steel temperature at end of RH-MFB refining; (b) adding Al amount

4 结论

(1) 用本模型编制的计算机软件对 RH-MFB 精炼过程钢水温度进行预测, 计算值与实测值误差在 ± 5 °C 以内达 90% 以上。

(2) RH-MFB 精炼过程加铝对钢水温度进行补偿, 预测加铝量与实际值非常接近。

国家经贸委课题资助项目(01BK-098-02-01)

参考文献

1 张再华, 王志道. 110 t 钢水缶热损失测定与分析. 冶金能源, 1987, 6(1): 43

2 陈家祥. 炼钢常用图表数据手册. 北京: 冶金工业出版社, 1984, 58
 3 张先棹. 冶金传输原理. 北京: 冶金工业出版社, 1988, 436
 4 张春霞, 刘 浏, 杜 挺. RH-KTB 及其 RH 真空精炼方法. 炼钢, 1996, 12(2):
 5 Hinka Joseph, Miller T W. Temperature Lose in Liquid Steel Refractory System. Iron and Steel Engineer, 1970(8): 11
 6 Zoryk A, Reid P M. On Line Liquid Steel Temperature Control. Steel-making Conference Proceedings, 1993, 76: 31

韩传基(1966-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 从事钢铁冶金研究。