

RH-MFB 精炼时钢水温度预报模型的开发

吴 扬¹ 倪红卫¹ 张 华¹ 吴建荣²

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081;

2 武汉钢铁股份有限公司炼钢总厂, 武汉 430083)

摘 要 分析研究了 RH-MFB 精炼时脱碳过程、脱氧、合金化、吹氧加铝、非操作因素对钢水温度的影响, 并建立了精炼钢水温度预报模型。通过对连续精炼的 10 炉 270 t 超低碳钢水(0.001% ~ 0.002 5% C) 温度的验证结果表明, 模型计算温度和实测温度的误差不大于 ± 5 °C。

关键词 RH-MFB 精炼 钢水温度 热平衡 预报模型

Development of Liquid Temperature Prediction Model in RH-MFB Refining Process

Wu Yang¹, Ni Hongwei¹, Zhang Hua¹ and Wu Jianrong²

(1 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 General Steelmaking Plant, WISCO, Wuhan 430083)

Abstract The effect of decarburization process, deoxidizing, alloying, blowing oxygen and adding aluminium and non-operating factors on liquid temperature during RH-MFB refining process is analyzed and studied, and a prediction model for refining liquid is established. Verifying results by continuous-refining 10 heats 270 t ultra-low carbon liquid (0.001% ~ 0.002 5% C) temperature show that the error of liquid temperature calculated by model and measured is no more than ± 5 °C.

Material Index RH-MFB Refining, Liquid Temperature, Thermal Equilibrium, Prediction Model

目前, RH 精炼技术经过多年发展, 已成为生产高品质钢种必不可少的精炼工序, 在生产超低碳钢方面表现出了显著的优越性^[1]。

钢水温度是炼钢过程中需要重点控制的工艺参数之一^[2], 而 RH 精炼终点钢水温度对生产节奏、连铸机浇铸速度、铸坯质量均有重要影响, 因此, 准确控制真空精炼结束温度就显得尤为重要。但由于 RH 精炼中高温冶金反应发生在密闭的真空室内, 过程相当复杂, 涉及流动、传热等复杂反应过程, 精炼过程中影响钢液温度的因素很多, 操作人员对终点温度预测相当困难。为了保证 RH 精炼终点温度的准确性和稳定性, 现场工人需要多次测温取样, 既浪费时间, 又增加了成本。为此, 冶金工作者建立了一些温度预报和控制模型^[3-4], 希望能够准确地对钢水温度进行预报, 让操作人员根据预报温度有效地对处理过程进行控制, 提高终点温度命中率, 提高生产效率, 降低消耗。但这些模型计算精度还有待提高, 主要是因为计算过程中大量假设与真实情况相差较大。

本文以武汉钢铁股份有限公司炼钢总厂三分厂(以下简称三分厂)真空 RH-MFB(装备了多功能氧

枪装置的 RH 装备)为研究对象, 根据冶金机理及热平衡, 结合现场经验对三分厂 RH-MFB 处理过程中的钢水温度变化进行研究, 分析了吹氧脱碳、铝脱氧、合金化、钢包蓄热及真空室预热等对精炼钢水温度的影响, 建立了一个温度预报模型。

三分厂真空 RH 装置从西班牙引进, 其主要工艺参数: 钢包容量 270 t, 吹氧方式 MFB, 真空泵模式 5 级蒸汽喷嘴泵, 真空抽气能力 67 kPa 时 1 200 kg/h, 浸入管内径 750 mm, 提升气体流量 130 ~ 190 m³。RH-MFB 的工艺流程: 钢包到达精炼处理位→提升至工作位, 检测渣厚、测温定氧取样→脱碳处理→铝脱氧→合金化→处理结束。本文主要研究处理超低碳钢(碳含量在 0.001% ~ 0.002 5%)过程中的温度变化, 此类钢处理终点温度一般控制在 1 588 ~ 1 605 °C。

1 模型的建立

整个 RH 处理过程中, 认为钢水温度在钢包内是均匀分布的。钢水在 RH 处理过程中发生了一系列物理和化学变化, 这些反应将会影响钢水的温度, 所以预测精炼过程中的钢水温度需要将诸多因素统筹考虑。分析发现影响钢水温度的因素可分为操作

因素和非操作因素。操作因素指精炼流程需要采取的工艺操作^[5],包括脱碳、吹氧升温(或加废钢)、脱氧、合金化和提升气体流量等。非操作因素是指真空室和浸入管状况、钢包状况和真空室内钢液传导和辐射散热等人工不可控因素。

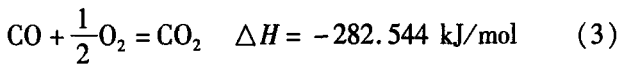
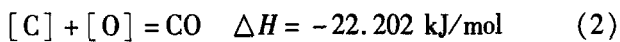
综合以上影响因素,预报温度表达式为:

$$T_{\text{预报}} = T_0 + T_{\text{脱碳}} + T_{\text{脱氧}} + T_{\text{合金}} + T_{\text{吹氧}} + T_{\text{加铝}} + T_{\text{钢包}} + T_{\text{真空室}} \quad (1)$$

式中: T_0 -到站钢液温度/°C; $T_{\text{脱碳}}$ -氧脱碳造成温度变化/°C; $T_{\text{脱氧}}$ -铝脱氧造成的温升/°C; $T_{\text{合金}}$ -加入合金温降/°C; $T_{\text{吹氧}}$ -喷吹氧气造成钢水的温度变化/°C; $T_{\text{加铝}}$ -加铝造成的温度变化/°C; $T_{\text{真空室}}$ -真空室状态造成温降/°C; $T_{\text{钢包}}$ -钢包自然温降/°C。

1.1 脱碳过程对钢水温度的影响

RH脱碳一般分为两种:强制脱碳和自然脱碳。强制脱碳是当钢水初始氧含量在规定时间内不足以把钢水碳降到目标浓度时进行吹氧脱碳,吹氧量有脱碳模型计算。无论是否吹氧,钢水中脱碳反应的热效应一样。脱碳反应主要从三方面影响钢水温度:(1)钢水中游离氧与碳反应生成CO放出热量;(2)生成的CO有部分继续反应生成CO₂放热;(3)反应产生的废气带走大量热。脱碳过程中主要反应如下:



因为脱碳量可以计算出来,因此脱碳反应热效应由以上两式可以计算出来 $Q_{\text{反应}}$ 。废气带走的热量由公式(3)可以计算得到。

$$Q_{\text{废气}} = W \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (4)$$

式中: $Q_{\text{反应}}$ -脱碳反应产生的热量/kJ; $Q_{\text{废气}}$ -废气带走的热量/kJ; W -物质的摩尔量/kg; C_p -物质比热容/[kJ·(mol·K)⁻¹]; ΔT -废气初始温度与抽走时温度差/K。

上述总的热效应能使钢液升温 $T_{\text{脱碳}}$,则可以表述为

$$T_{\text{脱碳}} = \frac{Q_{\text{反应}} + Q_{\text{废气}}}{W_{\text{钢液}} \cdot C_{p\text{钢液}}}$$

根据现场工艺条件计算发现氩气带走的热仅能使270 t钢水降低0.5 °C,可以忽略。为了更直观的表现出脱碳过程对钢水温度的影响,将上式简化为:

$$T_{\text{脱碳}} = \Delta[C] \times k_{\text{CO}} \quad (5)$$

式中: $\Delta[C]$ -脱碳量; k_{CO} -脱碳造成的温度变

表1 物质的比热容和密度

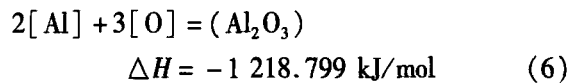
Table 1 Heat capacity and density of materials

物质	密度/(kg·m ⁻³)	比热容/[kJ·(kg·K) ⁻¹]
一氧化碳	1.25	0.30
二氧化碳	1.96	0.87
氩气	1.78	0.52
钢液	7 000	0.88

化/°C。物质的比热容和密度见表1^[6]。

1.2 脱氧对钢水温度的影响

真空脱碳结束后,钢液中还残留一部分游离氧需要脱除。三分厂现采用铝脱氧,脱氧会产生大量热提高钢水温度。铝脱氧反应式如下:



则脱氧升温可以表示为:

$$T_{\text{脱氧}} = \frac{Q_{\text{脱氧}}}{W_{\text{钢液}} \cdot C_{p\text{钢液}}} = \frac{m_{\text{氧}} \Delta H}{W_{\text{钢液}} \cdot C_{p\text{钢液}}} = \frac{W_{\text{钢液}} \cdot [O]_{\text{终点}} \cdot \Delta H}{3 \times 160 \times W_{\text{钢液}} \cdot C_{p\text{钢液}}}$$

$$\text{简化上式 } T_{\text{脱氧}} = [O]_{\text{终点}} \times q_{\text{Al-O}}/100 \quad (7)$$

式中:[O]_{终点}-脱碳结束时钢液游离氧含量; $q_{\text{Al-O}}$ -脱氧造成的温度变化/°C。

1.3 合金化对钢水温度的影响

RH处理过程中为使钢水成分达标在脱碳脱氧结束后须进行合金化。因为一些合金仅用来调节钢液成分,不参与脱氧,主要包括废钢、钛铁、硅铁、锰铁等,为便于计算,将此类合金被视为冷材加入,在钢水中吸热、熔化和溶解,它们造成的温度变化与加入合金量成正比。但铝既是脱氧剂又是成分元素,计算合金化温降时将用于脱氧的铝另做计算,不考虑进来。合金加入温降表达式为:

$$T_{\text{合金}} = \Sigma(W_i \times K_i)/1 000 \quad (8)$$

式中: W_i -合金的加入量/kg; K_i -合金温降系数/(°C·t⁻¹)。表2是根据现场经验总结的合金温降系数表。

1.4 吹氧加铝升温

表2 部分合金温降系数

Table 2 Coefficient of temperature fall of some alloys

合金种类	温降系数/(°C·t ⁻¹)
洁净废钢	10
增碳剂	9
低碳硅铁	-1
金属锰	9

RH-MFB 精炼吹氧用于两个目的:强制脱碳和升温。当模型预报的终点温度低于钢种目标温度时需要采取化学加热调整钢水温度,吹入氧气溶解于钢液放出大量热,并且和铝反应放热使钢水升温。由公式(6)、(9)计算吹氧加铝所释放的热量。实际上吹入氧气并不是全部参与反应,有部分随废气排出,这就要考虑吹氧效率,三分厂现场实践表明吹氧效率为 70%。

$$\frac{1}{2}O_2 = [O] \quad \Delta H = -90.22 \text{ kJ/mol} \quad (9)$$

由以上分析可以得出,吹氧加铝对钢水温度的影响为:

$$T_{\text{吹氧}} = 6.4 V_{O_2} / W_{\text{钢液}} \quad (10)$$

$$T_{\text{加铝}} = 33 W_{\text{铝}} / W_{\text{钢液}} \quad (11)$$

式中: V_{O_2} -吹氧量/ m^3 ; $W_{\text{铝}}$ -加入铝的重量/kg。

1.5 非操作因素对钢水温度的影响

真空室温降是真空生产中最难预报和计算的,因为在真空生产过程中,在真空室壁上会不断有钢水粘附,形成结瘤而且真空室耐火材料蓄热和钢水辐射放热是个非稳态过程计算复杂。在实际生产中 RH-MFB 不处理时用烘烤枪燃烧来保温,会去除部分残瘤减少真空室造成的温降。本文统计分析现场数据发现真空室造成的温降主要与上一次使用情况有关。当真空处理连续作业或间隔时间超过 35 min 时,温降一般在 6~7℃。

钢包对钢水温度的影响主要是钢包蓄热和处理过程中钢包散热。根据生产标准,三分厂钢包由于烘烤和使用状况的不同,造成的温降也不同,因此对钢包分级使用。采用 A、B、C 标志不同钢包,对应有不同的温降,而且钢包散热量与处理时间成正比,处理时间越长温降越大。所以钢包温降表达式为:

$$T_{\text{钢包}} = K_{\text{钢包}} \times t_{\text{处理时间}} \quad (12)$$

式中: $K_{\text{钢包}}$ -钢包温降系数/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$); $t_{\text{处理时间}}$ -RH 处理时间/min。钢包温降系数见表 3。

2 模型验证

由于 RH 精炼过程影响温度因素较复杂,而且模型中系数因子,首先取三分厂一个月的真空生产数据对模型进行修正,以提高模型精度。然后对真空处理某天连续 10 炉进行离线验证,验证结果如表 4。结果表明,预报模型的计算值与实测值误差在 5℃ 以内,说明所建立的模型准确可行。

表 3 钢包温降系数

Table 3 Coefficient of temperature fall of ladle in different conditions

钢包	温降系数/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$)
A	1.6
B	1.7
C	1.8

表 4 RH-MFB 精炼钢水温度模型预报值与实测值对比 / $^{\circ}\text{C}$
Table 4 Comparison between model predicted value and measured value of RH-MFB refining liquid temperature / $^{\circ}\text{C}$

炉次	预报值	实测值	误差
37194	1 601	1 604	-3
37195	1 599	1 594	5
27192	1 594	1 596	-2
27193	1 603	1 603	0
27194	1 600	1 602	-2
16870	1 601	1 601	0
16870	1 608	1 608	0
37200	1 594	1 593	1
27197	1 595	1 598	-3
27198	1 596	1 599	-3

3 结论

(1)对影响钢水温度的因素进行了分析,发现 RH 精炼过程中影响模型精度的主要因素是真空室和钢包状况,其他因素都相对稳定容易预报。

(2)基于冶金机理和热平衡,结合现场经验建立了 RH-MFB 温度预报模型,预报模型在离线计算中取得了较高的精度,计算值与实测值误差在 5℃ 以内。

参考文献

- [1] 徐国群. RH 精炼技术的应用与发展[J]. 炼钢,2006,22(1):12-15.
- [2] 韩传基,艾立群,朱立新. RH-MFB 二次精炼过程钢水温度控制的模拟[J]. 特殊钢,2006,27(1):18-20.
- [3] 王毓男,包燕平,崔衡. RH-TOP 精炼终点钢水温度的预报模型[J]. 炼钢,2011,27(5):53-55.
- [4] 刘浏,杨强,张春霞. RH 精炼钢水温度预报模型[J]. 钢铁研究学报,2000,12(2):15-20.
- [5] 谢树元,杜斌,林云,等. RH 精炼温度与合金模型的开发与应用[J]. 炼钢,2006,22(6):4-7.
- [6] 陈家祥. 炼钢常用图表数据手册[M]. 北京:冶金工业出版社,1984.

吴扬(1989-),男,硕士研究生(武汉大学),2011年武汉大学(本科)毕业,精炼、连铸技术研究。

E-mail:345422407@qq.com

倪红卫(1967-),教授,武汉大学材料冶金学院。

E-mail:nihongwei320@sohu.com

收稿日期:2013-12-16