

210 t 顶底复吹转炉-RH 流程 IF 钢板坯连铸钢水温降规律的研究

王毓男¹ 包燕平¹ 崔 衡¹ 陈 斌² 季晨曦²

(1 北京科技大学冶金工程研究院,北京 100083; 2 首钢技术研究院,北京 100041)

摘 要 对迁钢 210 t 顶底复吹转炉-RH-板坯连铸工艺条件下的 IF 钢温度状况进行了统计和分析,根据 RH 初始温度和废钢加入量对 RH 处理过程温降的影响,建立 RH 处理过程钢水温度变化的数学模型,得出转炉出钢至开始连铸时的总温降为 162.52 ℃,转炉出钢至 RH 到站平均温降为 79.54 ℃,RH 过程平均温降 39.10 ℃,RH 出站至中间包的温降为 44.58 ℃;利用多元统计回归分析,可较好地预测 RH 过程的温降。

关键词 IF 钢 转炉-RH-连铸流程 钢水温度 数学模型

Study on Regularity of Temperature Reduction of IF Steel Slab Casting Liquid with 210 t Top and Bottom Combined Blown Converter-RH Flow Sheet

Wang Yunan¹, Bao Yanping¹, Cui Heng¹, Chen Bin² and Ji Chenxi²

(1 Metallurgy Engineering Research Institute, University of Science and Technology, Beijing 100083;
2 Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100041)

Abstract The statistics and analysis on temperature condition of IF steel liquid in current 210 t top and bottom combined blown converter-RH-slab casting process condition at Qian An Iron and Steel Co have been carried out, and the math model for change of liquid temperature during RH treatment process is established in accordance with the effect of RH initial temperature of liquid and crape adding amount on temperature reduction of liquid during RH treatment process. It is obtained that the total temperature reduction of liquid from converter tapping to initial casting is 162.52 ℃ including the average temperature reduction 79.54 ℃ from converter tapping to RH station, 39.10 ℃ during RH process, 44.58 ℃ leaving RH station to tundish; and the temperature reduction of liquid during RH process can be predicted reliably by using multiple regression analysis.

Material Index IF Steel, Converter-RH-Casting Flow Sheet, Temperature of Liquid, Math Model

2007 年 5 月,首钢超低碳钢在迁钢研制成功,标志着首钢 IF 钢(Interstitial Free Steel)的试制取得了重大进展。但目前的汽车外面板生产存在问题^[1],汽车外面板成品率不高,其原因主要是由于非稳定态条件下浇铸的铸坯不能用于生产汽车面板。除了开浇、终浇、换包等无法避免的非稳态浇铸条件外,由于中间包过热度波动大而引起的拉速波动也会影响铸坯质量,而此造成的铸坯缺陷是完全可以避免的。因此,研究 IF 钢连铸钢水温降规律,精确控制各工序钢水温度,将其控制在较窄的范围内,可以显著提高拉速、稳定浇铸技术水平,减少 IF 钢出钢后冷却废钢使用量,从而降低能耗、减少生产成本。

1 工艺条件

迁钢一炼钢厂现有 210 t 转炉 3 座,LF 炉 1 座,CAS 精炼 1 座,RH 精炼 2 座,2 台两流板坯连铸机和 1 台六流方坯连铸机。炼钢厂内生产流程设备工艺先进,平面布置紧凑。IF 钢水的生产工艺流程

为:铁水预处理→210 t 顶底复吹转炉→RH 真空精炼→板坯连铸工艺。

2 钢水温度状况分析

2.1 全过程钢水温度状况统计分析

对迁钢一炼钢厂 2009 年 11 月至 2010 年 5 月期间生产的 714 炉次 IF 钢的生产数据进行了整理,各工序钢水温度和波动系数(标准差/平均值×100%)列于表 1。

由表 1 可以看出,IF 钢出钢温度最大值为 1 756 ℃,平均值为 1 723.18 ℃,这说明 IF 钢的出钢温度

表 1 主要工序钢水温度和波动系数

Table 1 Temperature of liquid at main procedure and fluctuation coefficient

项目	温度/℃		波动系数/ %
	范围	平均值	
出钢	1 674 ~ 1 756	1 723.18	0.65
RH 到站	1 567 ~ 1 689	1 643.78	0.75
RH 结束	1 579 ~ 1 626	1 605.23	0.32
中间包平均值	1 546 ~ 1 575	1 562.28	0.20

偏高,出钢温度波动系数较大。出钢至 RH 到站过程,钢水温度波动系数变大,说明此过程钢水温度控制水平较低。RH 到站温度波动系数最大,此时钢水温度状况较差,经 RH 处理过程后钢水温度波动系数明显降低,钢水温度状况良好,说明 RH 处理过程为主要的调温过程,而由 RH 结束至中间包过程,钢水温度波动系数下降,此过程为钢水镇静过程,也起到一定的调温作用。中间包平均温度为 1 562.28 ℃,平均过热度为 27.28 ℃,控制水平良好。

由表 2 可以看出,出钢至 RH 温降是各过程中最大的,平均值为 79.54 ℃,占总温降平均值 162.52 ℃的 48.9%,由表 1 及后面的分析可知,此过程钢水温度控制较低,因此减少和稳定出钢至 RH 到站温降是解决钢水温度问题的关键环节。

表 2 钢水过程温降和波动系数

Table 2 Temperature reduction of liquid during metallurgical process and fluctuation coefficient

项目	温度/℃		波动系数/ %
	范围	平均值	
出钢至 RH 到站	41 ~ 159	79.54	16.23
RH 处理过程	10 ~ 84	39.10	27.47
RH 出站至中间包	20 ~ 70	44.58	16.78
总温降	122 ~ 206	162.52	7.69

由表 3 可以看出,RH 处理过程及 RH 出站至中间包过程是耗时较大的,平均时间分别为 45.88 min 和 46.21 min,但其耗时较稳定,波动系数较小。出完钢至 RH 到站时间是波动系数最大的,其波动范围为 4 ~ 130 min,是造成出钢至 RH 到站温降波动大的主要原因之一。因此,尽可能缩短从转炉出钢至连铸的过程耗时是减少钢水过程温度损失、控制各工序钢水温度的主要措施之一。

2.2 分工序的钢水温降状况

2.2.1 转炉出钢至 RH 到站温降

由于迁钢转炉冶炼 IF 钢开浇炉与连浇炉各工序温度控制范围不同,开浇炉比连浇炉高 10 ℃,因此统计中也将两者区分开来(表 4)。

表 3 出钢至浇铸过程时间统计和波动系数

Table 3 Statistics of time from tapping to casting and fluctuation coefficient

项目	范围/ min	平均值/ min	波动系数/ %
出钢	4 ~ 10	6.87	13.39
出完钢至 RH 到站	4 ~ 130	15.10	71.26
RH 处理过程	30 ~ 88	45.88	14.69
RH 出站至中间包	30 ~ 72	46.21	21.24
总时间	85 ~ 214	114.06	11.74

表 4 出钢至 RH 到站温降统计

Table 4 Statistics of temperature reduction of liquid from tapping to RH station /℃

出钢至 RH 到站温度/ ℃	开浇炉温降分布/ %	连浇炉温降分布/ %
40 ~ 50	0.8	1.0
50 ~ 60	5.3	4.5
60 ~ 70	22.0	16.0
70 ~ 80	26.5	33.9
80 ~ 90	27.3	26.7
90 ~ 100	11.4	12.8
>100	6.8	5.0

表 4 开浇炉统计炉数为 132 炉,连浇炉为 576 炉。从表 4 可以看出,出钢至 RH 到站温降分布不集中且波动较大,此段温降大且波动较大,是出钢温度居高不下的主要原因。

影响出钢至 RH 到站过程钢水温降的因素主要有出钢温度、出钢时间、钢包周转时间、钢包热状态、合金和脱氧剂的加入量及加入时机等^[2]。迁钢现阶段转炉出钢温度的制定主要依靠经验进行,时常出现出钢温度过高或过低的情况(尤其是在新修包的情况下)。迁钢烘烤器没有煤气(空气)计量装置,不利于钢包烘烤的精确控制,建议增加流量计量装置,保证烘烤器烘烤效果的稳定。

出完钢至 RH 到站过程时间波动较大,也对控制出钢至 RH 到站过程钢水温降不利,因此应加强生产管理,尽量减少和稳定出完钢至 RH 到站过程时间。

2.2.2 RH 处理过程温降

表 5 开浇炉统计炉数为 131 炉,连浇炉为 579 炉。如表 5 所示,RH 处理过程温降波动较大,开浇炉与连浇炉 > 50 ℃的炉次比例分别为 19.9%、13.8%,< 30 ℃的炉次比例分别为 17.6%、23.4%。

表 5 RH 过程钢水温降统计

Table 5 Statistics of temperature reduction of liquid during RH process

RH 温降/℃	开浇炉温降分布/%	连浇炉温降分布/%
10 ~ 20	4.6	3.5
20 ~ 30	13.0	19.9
30 ~ 40	37.4	32.6
40 ~ 50	25.2	30.2
50 ~ 60	16.8	11.6
>60	3.1	2.2

迁钢 IF 钢生产工艺中,在钢水到达 RH 精炼工序后,首先对到站钢水进行测温、定氧,并根据炉后碳成分和到站温度判断是否吹氧并计算吹氧量。脱碳结束后,加入冷却废钢、合金调整钢水温度和成

分。整个钢水精炼过程中,可认为钢包内钢水温度是均匀的。RH 处理过程中影响温度变化的因素有很多,如钢水条件、真空室烘烤温度、室温、渣厚、钢水循环量、处理时间、冷却废钢加入量、加 Al 量和吹氧量等。迁钢一炼钢厂钢包公称容量为 210 t,渣厚为 40~100 mm,循环流量为 140 t/min。在这些参数没有变化时,RH 处理钢水时的温度变化影响因素主要有钢水条件、处理时间、冷却废钢加入量、真空室烘烤温度、加 Al 量和吹氧量等。

RH 处理过程温降 ΔT (°C) 与 RH 到站温度 T_1 (°C) 之间的关系为式(1)。

$$\Delta T = 0.838 T_1 - 1339.52 \quad (1)$$

相关系数 $R = 0.892$, 回归方程的显著性检验 $F = 2710.667$ 。

由图 1(a) 及式(1)可知,RH 处理过程温降随 RH 到站温度的增大而增大,如 RH 到站温度降低 10 °C,则可将 RH 处理过程温降减少 8~9 °C。若

将 RH 到站温度控制在 1640 °C 以下,则 RH 处理过程温降可降低至 35 °C 左右。

在 RH 处理过程中加入冷却废钢可显著增大 RH 温降,降低钢水温度是 RH 处理过程温降的主要因素之一,RH 处理过程温降 ΔT (°C) 与冷却废钢加入量 X_1 (kg/t) 之间的关系为式(2)。

$$\Delta T = 1.369 X_1 + 31.486 \quad (2)$$

相关系数 $R = 0.646$, 回归方程的显著性检验 $F = 505.904$ 。

由图 1(b) 及式(2)可知,RH 处理过程温降随着吨钢废钢加入量增大而增大,每加入 3 kg/t 废钢,RH 处理过程温降增加约 4 °C,不加废钢 RH 处理过程温降为 31.5 °C,RH 处理过程冷却废钢加入量较高。

由迁钢 RH 处理工艺可知,IF 钢水 RH 精炼处理分为吹氧和未吹氧两种工艺。吹氧炉次:对影响 RH 处理过程温降的主要因素 RH 到站温度、RH 精炼时间、废钢加入量、加铝量、真空室烘烤温度、吹氧量等进行多元回归处理^[3],得到 RH 处理过程钢水温降随各个因素变化的回归模型为:

$$\begin{aligned} \Delta T = & 0.651 T_1 + 0.440 X_1 + \\ & 0.096 X_2 - 0.019 X_3 - \\ & 0.049 X_4 - 0.029 X_5 - \\ & 1004.41 \quad (3) \end{aligned}$$

式中: ΔT - RH 处理过程温降/°C; T_1 - RH 到站温度/°C; X_1 - 废钢加入量/(kg·t⁻¹); X_2 - RH 精炼时间/min; X_3 - 真空室烘烤温度/°C; X_4 - 加铝量/kg; X_5 - 吹氧量/m³。相关系数 $R = 0.893$, 回归方程的显著性检验 $F = 132.46$ 。

未吹氧炉次:对影响 RH 处理过程温降的主要因素 RH 到站温度、RH 精炼时间、废钢加入量、加铝量、真空室烘烤温度等进行多元回归处理^[3],得到 RH 处理过程钢水温降随各个因素变化的回归模型为:

$$\begin{aligned} \Delta T = & 0.697 T_1 + 0.388 X_1 + \\ & 0.062 X_2 - 0.032 X_3 - \\ & 0.030 X_4 - 1070.23 \quad (4) \end{aligned}$$

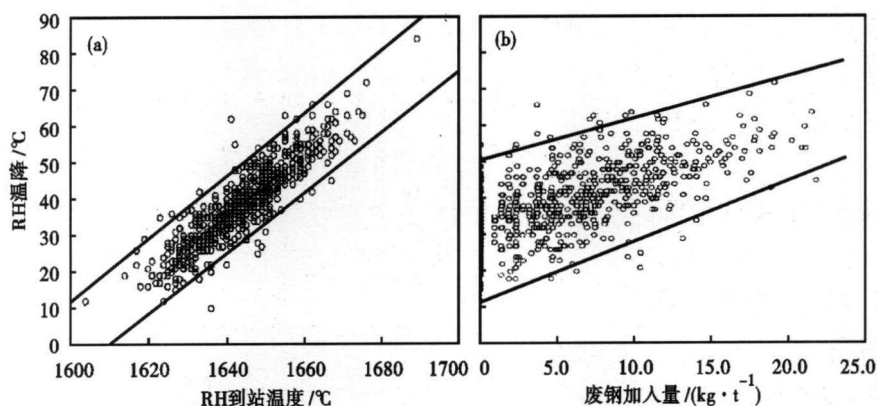


图 1 RH 到站温度(a)和废钢加入量(b)对 RH 处理过程钢水温降的影响
Fig. 1 Effect of initial liquid temperature at RH station (a) and scrap adding amount (b) on temperature reduction of liquid during RH treatment process

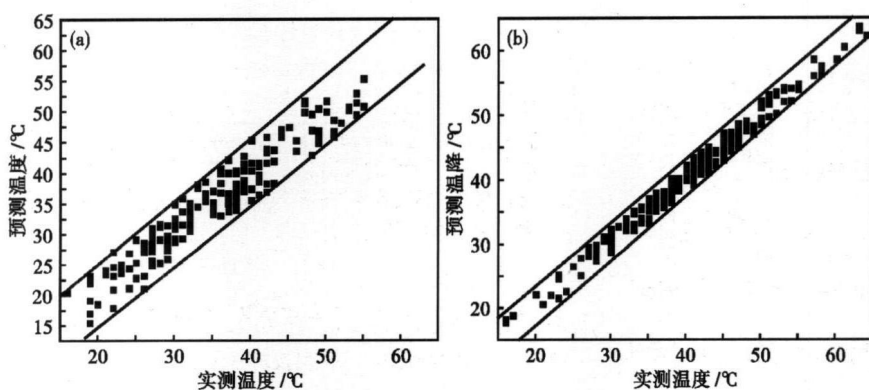


图 2 RH 处理过程实测温降与预测温降对比:(a)吹氧炉次;(b)未吹氧炉次
Fig. 2 Comparison between measured temperature reduction and predicted temperature reduction of liquid during RH treatment process: (a) heats with oxygen blowing; (b) heats without oxygen blowing

式中: ΔT - RH 处理过程温降/ $^{\circ}\text{C}$; T_1 - RH 到站温度/ $^{\circ}\text{C}$; X_1 - 废钢加入量/ $(\text{kg} \cdot \text{t}^{-1})$; X_2 - RH 精炼时间/ min ; X_3 - 真空室烘烤温度/ $^{\circ}\text{C}$; X_4 - 加铝量/ kg 。相关系数 $R = 0.917$, 回归方程的显著性检验 $F = 496.42$ 。

从迁钢一炼钢厂 IF 钢生产实绩数据库中, 分别随机抽取 200 组数据输入吹氧炉次和未吹氧炉次 RH 温降回归模型, 对 RH 处理过程温降进行定量预测, 对预测结果进行统计分析。吹氧炉次, 预测温降与实际温降之间的误差在 $-5 \sim 5^{\circ}\text{C}$ 的命中率为 79%, 预测温降与实际温降的误差绝对值小于 10°C 的命中率为 96%。RH 处理过程温降的预测结果见图 2(a)。未吹氧炉次, 预测温降与实际温降之间的误差在 $-5 \sim 5^{\circ}\text{C}$ 的命中率为 83%, 预测温降与实际温降的误差绝对值小于 10°C 的命中率为 99%。RH 处理过程温降的预测结果见图 2(b)。

预测误差主要来源有^[4-8]:

(1) 由于钢包内钢水温度的不均匀性, 测温枪所能到达的测温点的位置;

(2) 迁钢一炼钢厂 RH 精炼过程加入合金种类较多, 为了简化建立模型的复杂性, 仅考虑对 RH 精炼终点温度影响最大的加铝量作为模型的参数之一, 也会影响模型的精度;

(3) 没有考虑钢包热状态对该阶段钢水温降的影响;

(4) 出钢量上下有浮动, RH 精炼过程钢水量按 210 t 统一考虑也会影响预测精度;

(5) RH 精炼处理结束后第一次测温不成功或其它人为因素的影响。

2.2.3 RH 毕至开浇前钢水温降

如表 6 所示, 开浇炉温降相比连浇炉较高, $> 50^{\circ}\text{C}$ 的炉次比例为 42.1%, 而连浇炉仅为 13.2%。此

表 6 RH 毕至开浇前钢水温降统计

Table 6 Statistics of temperature reduction of liquid from end RH to initial casting

RH 毕至开浇前 钢水温降/ $^{\circ}\text{C}$	开浇炉温降 分布/%	连浇炉温降 分布/%
<30	0	2.2
30~40	8.3	30.1
40~50	49.6	54.5
50~60	33.1	11.8
>60	9.0	1.4

过程为钢水镇静过程, 由表 1 分析可知, 钢水镇静过程也是钢水调温过程。此阶段钢水温降的主要影响因素为包衬和镇静时间^[9]。统计结果表明, 钢包材质的影响较小, 钢水温降速率基本保持在 $0.4^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 此阶段钢水调温主要为通过调控镇静时间, 提高中间包钢水温度命中率。

2.2.4 连铸过程钢水温度

对连铸过程的钢水温度变化主要考察中间包钢水温度的命中情况, 对中间包均值温度进行统计分析可知, IF 钢中间包温度命中率为 88.4%。中间包温度命中率较高, 但还有进一步提高的余地。

3 结语

(1) 出钢至 RH 到站过程平均温降和温降波动均很大, 因此减少和稳定出钢至 RH 到站温降是降低出钢温度, 解决钢水温度问题的关键环节。

(2) 利用多元统计回归, 可较好预测 RH 温降, 并能较好分析主要工艺参数对 RH 温降的影响。

(3) 为了准确控制钢水温度, 有必要加强钢包烘烤的稳定性, 建议增加煤气流量计等计量设备, 进行钢包烘烤和钢包周转的计算机管理, 根据钢包烘烤的周转历史数据, 在线预测钢包包衬温度, 进行钢水温度的准确控制。

“十一五”国家科技计划项目资助(2006BAE03A06)

参考文献

- 崔衡, 岳峰, 包燕平, 等. IF 钢连铸头坯洁净度研究. 钢铁, 2010, 45(3): 38
- 龙和平. 连铸 20 t 转炉出钢过程钢液温降规律的研究. 钢铁研究, 2000, 28(6): 8
- 田建国. CAS 密封吹氩精炼终点钢水温度的预报模型. 特殊钢, 2005, 26(1): 19
- 李亮, 姜周华, 王文忠, 等. VD 炉终点钢液温度预报. 钢铁, 2003, 38(1): 16
- 刘浏, 杨强, 张春霞. RH 精炼钢水温度预报模型. 钢铁研究学报, 2000, 12(2): 15
- 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
- 韩传基, 刘青, 吴凯, 等. RH-MFB 精炼过程中钢水温度预测模型. 北京科技大学学报, 2006, 28(3): 248
- 谢树元, 林云, 杜斌, 等. RH 精炼温度与合金模型的开发与应用. 炼钢, 2006, 22(6): 5
- 徐安军, 田乃媛, 许中波, 等. 宝钢炼钢厂钢水温度状况及相关问题讨论. 炼钢, 1997, 13(6): 34

王毓男(1987-), 男, 博士研究生, 2008 年北京科技大学本科毕业, 钢水温度精确控制技术研究。

收稿日期: 2010-09-17