

210 t RH 精炼参数对 IF 钢洁净度的影响和工艺优化

邓必荣¹ 张波² 周剑丰¹ 刘浪² 李春晓²

(1 湖南华菱集团涟源钢铁有限公司一炼轧厂,娄底 417009;2 湖南工业大学冶金与材料工程学院,株洲 412007)

摘要 基于 IF 钢($C: \leq 0.0025\%$, $Si: \leq 0.005\%$, $Mn: 0.01 \sim 0.12\%$, $P: \leq 0.020\%$, $S: \leq 0.010\%$, $Al: 0.02 \sim 0.04\%$, $Ti: 0.03 \sim 0.05\%$)冶炼过程工艺数据的统计,分析了 Ar 站钢水氧含量和 RH 脱碳期加铝量对钢中 T[O] 的影响,以及合金加入时机,顶渣改质处理和连铸保护浇铸对钢水洁净度的影响。研究表明,适当提高转炉终点氧含量和温度、延长加铝和钛铁之间的时间间隔、顶渣改质处理、连铸保护浇铸等方法可有效提高钢水洁净度。生产结果得出,通过 RH 进站钢水温度平均提高 2.4 °C,通过控制转炉下渣量,使顶渣厚度由 ≥ 80 mm 降至 60 ~ 75 mm,使 RH 脱碳过程加铝炉次由原 36% 降至 3%,通过顶渣改质,使 (FeO + MnO) 由原 22% 降至 17%,连浇炉数由 8 炉提高到 10 炉,连铸中间包 T[O] 由 37.4×10^{-6} 降低至 21.6×10^{-6} ,钢水洁净度得到了显著提高。

关键词 洁净度 210 t RH 精炼 IF 钢 工艺优化

Effect of 210 t RH Refining Parameters on Cleanliness of Steelmaking-Rolling IF Steel and Process Optimization

Deng Birong¹, Zhang Bo², Zhou Jianfeng¹, Liu Lang² and Li Chunxiao²

(1 No1 Rolling-Steelmaking Works, Lianyuan Iron and Steel Co Ltd, Hunan Valin Group, Loudi 417009; 2 School of Metallurgy and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007)

Abstract Based on statistics of process data of IF steel ($C: \leq 0.0025\%$, $Si: \leq 0.005\%$, $Mn: 0.01 \sim 0.12\%$, $P: \leq 0.020\%$, $S: \leq 0.010\%$, $Al: 0.02 \sim 0.04\%$, $Ti: 0.03 \sim 0.05\%$) in steelmaking process, the effect of oxygen content in liquid at Ar station and amount of adding aluminium in RH decarburization period on T[O], and the effect of alloys adding procedure, top slag modified treatment and shielding casting process on cleanliness of liquid are analyzed. Research results show that the measures including proper increasing the BOF end oxygen content in liquid and temperature of liquid, extending the interval time between Al and Fe-Ti addition, top slag modifying treating and shielding casting process are available to increase the cleanliness of liquid. It is obtained by commercial production that with the average temperature of liquid at initial RH refining increasing by 2.4 °C, controlling BOF tapping slag amount to decrease the thickness of top slag layer from original ≥ 80 mm to 60 ~ 75 mm as a result during RH decarburization process the adding aluminium heats decreasing by original 36% to 3%, and with top slag modification to decrease the (FeO + MnO) from original 22% to 17% and increase the continuous-continuous casting heats from 8 heats to 10 heats, the T[O] in liquid in tundish decreases form 37.4×10^{-6} to 21.6×10^{-6} to obviously increase the cleanliness of liquid.

Material Index Cleanliness, 210 t RH Refining, IF Steel, Process Optimization

IF 钢(Interstitial-Free Steel)对钢水洁净度有十分严格的要求,非金属夹杂物容易引起 IF 钢的冲压性能、表面质量及涂镀质量等技术指标的恶化^[1-3]。当结晶器钢水中 T[O] 低于 0.002% 时,冷轧钢板表面缺陷(主要为线形缺陷和鼓包缺陷)数量明显减少^[4-5]。而随着钢水中 T[O] 的增加,大尺寸夹杂物的数量随之显著增加^[5],严重时会造成连铸结晶器液面波动,甚至出现水口结瘤,影响钢水的可浇性。

华菱涟钢 210 t 转炉厂在生产 IF 钢过程中,存在钢水洁净度差、浇铸时出现水口结瘤现象、板坯夹杂物含量偏高等问题。为此,本文以 210 t 转炉厂

IF 钢冶炼过程为研究对象,重点分析冶炼过程中钢水 T[O] 影响因素。

1 工艺流程及生产现状

210 t 转炉厂冶炼 IF 钢化学成分如表 1 所示,其工艺流程为 KR → BOF → Ar 站 → RH → CC。转炉

表 1 IF 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of IF steel /%

C	Si	Mn	P	S	Als	Ti
≤ 0.0025	≤ 0.005	0.01 ~ 0.12	≤ 0.020	≤ 0.010	0.02 ~ 0.04	0.03 ~ 0.05

通讯作者:张波,博士,讲师,湖南工业大学冶金与材料工程学院,株洲 412007

E-mail: tale-2002@163.com

表 2 RH 精炼渣主要化学成分/%

SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	FeO
10	45	6	17	4	15

出钢时温度要求为 1 660 ~ 1 685 ℃。钢水出 Ar 站温度要求为 1 610 ~ 1 635 ℃, 氧含量 0.040% ~ 0.085%, 碳含量 0.03% ~ 0.06%。RH 脱碳终点氧含量要求 0.035% ~ 0.055%, 在吹氧结束后加铝循环, 循环 3 min 后加入钛铁进行合金化, RH 处理结束后调运至板坯连铸机进行浇铸, RH 精炼过程中炉渣平均成分如表 2 所示。210 t 转炉厂 RH 精炼设备于 2009 年 11 月投入试生产, 其主要技术参数见表 3。

RH 进站时加入 200 ~ 400 kg 顶渣改质剂, 吹氧脱碳时氧流量为 2 000 ~ 2 400 m³/h, 吹氧时间通常为 0 ~ 4 min。按该工艺路线生产 IF 钢, 生产过程中存在连铸结晶器液面波动大, 塞棒上涨、水口结瘤严重等问题。对连铸中间包取样分析, 钢水中 T[O] 平均高达 37.4 × 10⁻⁶, 严重影响产品质量和效益。对水口结瘤物进行分析, 其主要成分为含少量 Na、K、Ti 的 Al₂O₃ 复合夹杂物, 这是由钢中夹杂物附着于浸入式水口碗部而形成。相关研究表明^[4,6-7], 提高 IF 钢洁净度的方法主要有: 最大程度地去除脱氧产物、减少二次氧化产物的生成以及提高顶渣对夹杂物的去除效率等。

2 钢水洁净度主要影响因素分析

2.1 转炉终点控制

较多炉次在出 Ar 站时钢水中氧含量较低, 在 RH 精炼脱碳时需要吹入大量氧气, 从而使得在 RH 脱碳终点钢水氧含量升高, 在加铝脱氧时候生成大量的 Al₂O₃ 夹杂。对 210 t 转炉厂冶炼 IF 钢时, Ar 站氧含量和 RH 出站 T[O] 的关系进行统计分析, 结果如图 1。

随着 Ar 站钢水 T[O] 升高, RH 处理过程需吹氧

表 3 RH 精炼主要工艺参数

项目	参数
公称容量/t	210
布置型式	单工位
真空泵抽气能力/(kg·h ⁻¹)	≥1 000
真空泵工作真空度/Pa	67
真空室内径/mm	2 300
插入管内径/mm	680
循环流量/(t·min ⁻¹)	208
氧流量/(m ³ ·h ⁻¹)	2 400

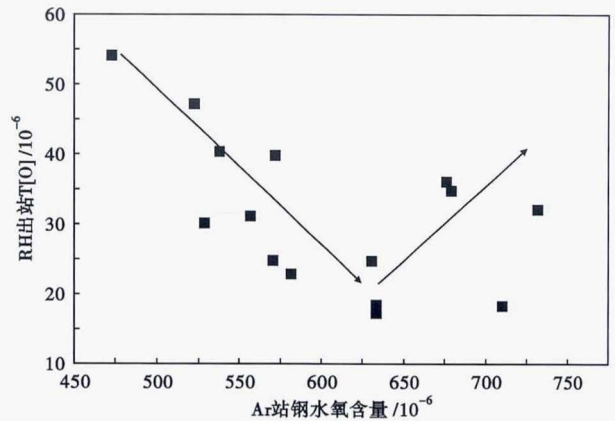


图 1 氩站钢水氧含量对 RH 出站 T[O] 的影响

Fig. 1 Effect of oxygen content in liquid at argon station on T[O] at end of RH refining

量减少, RH 出站时 T[O] 呈下降趋势。而当 Ar 站 T[O] 大于 640 × 10⁻⁶ 时, RH 出站 T[O] 随 Ar 站氧含量升高而增加。RH 脱碳终点 T[O] 越高, 则加铝脱氧生成的 Al₂O₃ 夹杂越多。

2.2 RH 精炼时脱氧方式

在 RH 脱碳处理后会通常采用加铝脱氧, 在实际操作过程中加铝脱氧的时机有所不同, 主要有 2 种方式: (1) 针对于出 Ar 站时氧含量 > 750 × 10⁻⁶ 炉次, 采用脱碳过程中加铝脱氧, 降低 RH 终点氧含量; (2) 在 RH 脱碳终点一次性加铝脱氧。

从图 2 中可以看出, 随着脱碳期加铝量升高, RH 出站和中间包 T[O] 均呈现明显的增加趋势。IF 钢在 RH 脱碳时开极限真空 (真空度 ≤ 100 Pa) 进行处理, 此时进行加铝进行预脱氧时, 对减缓钢水的脱碳速率, 同时由于钢水的强搅拌, 可能导致脱氧生成的 Al₂O₃ 夹杂难以形成簇状, 从而使得大量微小的 Al₂O₃ 夹杂残留在钢中, 使 RH 出站和中间包 T[O]

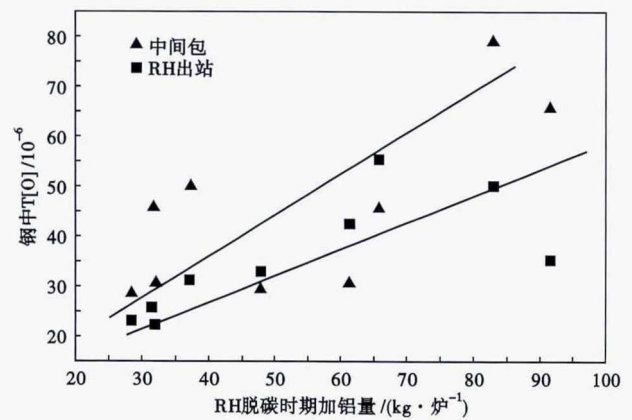


图 2 RH 脱碳期加铝量对 RH 出站 T[O] 的影响

Fig. 2 Effect of adding Aluminium amount in RH decarburization period on T[O] at end of RH refining

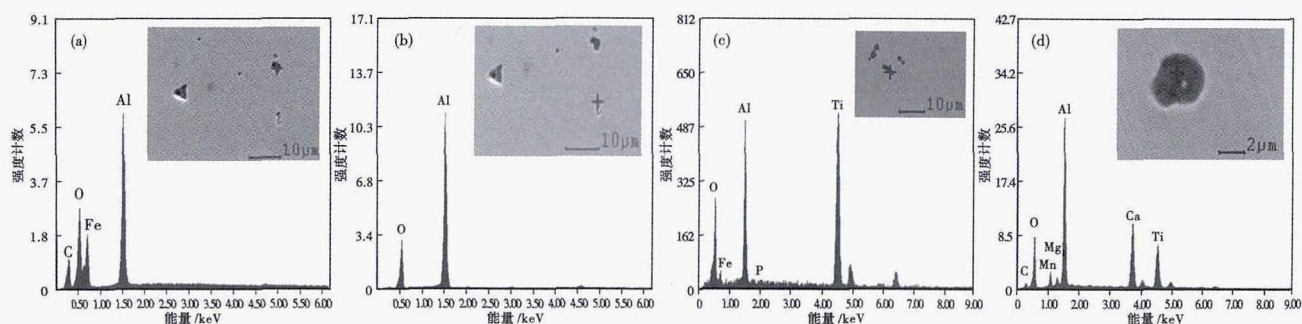


图3 RH加钛铁前(a)(b)和加钛铁后(c)(d)钢中夹杂物形貌与成分

Fig. 3 Morphology and composition of inclusions in steel before [(a) and (b)] and after [(c) and (d)] RH adding titanium ferrotitanium

较高。

2.3 合金加入时机

在RH脱碳结束时加铝脱氧,脱氧结束后3 min时加入钛铁进行合金化。分别加钛铁合金化前后的钢水取样分析,其中夹杂物的形貌分别如图3所示。

在加钛铁合金化前,钢水中夹杂物主要为 Al_2O_3 ,为脱氧产物。在加钛铁合金化后,钢水中出现了大量的 Al_2O_3 - TiO_2 夹杂,以及少量的 CaO - MgO - Al_2O_3 - TiO_2 夹杂。在加铝脱氧后,钢水中未上浮去除的 Al_2O_3 夹杂除了参与生成复合夹杂物外,也可作为新生夹杂物的形核质点,通过降低形核功而促进复合夹杂物的生成。因此,增加加铝脱氧与加钛铁合金化之间的间隔时间,可减少复合夹杂物的生成。

2.4 顶渣改质分析

炉渣中 $(FeO + MnO)$ 和 $(CaO)/(Al_2O_3)$ 如图4所示。由于RH脱碳过程中需要吹氧脱碳,使得炉渣 $(FeO + MnO)$ 明显升高,炉渣氧化性过高,从而容易造成钢水的二次污染。而在RH精炼时,炉渣 $(CaO)/(Al_2O_3)$ 逐渐降低,在RH结束至连铸过程中, $(CaO)/(Al_2O_3)$ 平均值低于1.0,文献研究表明^[8-9],当 $(CaO)/(Al_2O_3)$ 为1.2~1.8时,其吸附去除夹杂物的能力最佳。将RH结束后钢水放置镇静25~35 min,并对镇静前后钢水取样,发现钢中夹杂物未能明显降低,炉渣吸附夹杂物能力较差^[7]。

2.5 连铸保护浇铸分析

对RH出站至中间包过程中钢水 $[N]$ 、 $T[O]$ 变化情况进行统计分析,结果如图5所示。连铸中间包65%炉次相比RH出站 $T[O]$ 升高,在“RH出站-中间包”增 $[N]$ 量与 $T[O]$ 增加量呈现正相关关系。增 $[N]$ 量可以作为浇铸过程是否吸入空气的参考指标,统计结果显示较多炉次增 $[N]$ 严重,且铝损偏

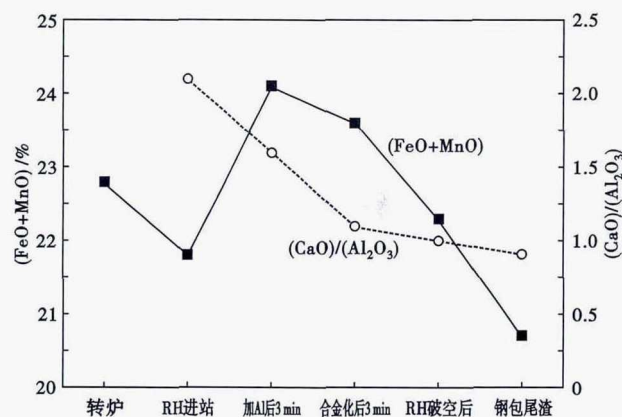
图4 冶炼过程炉渣中 $(FeO + MnO)$ 和 $(CaO)/(Al_2O_3)$ 变化情况

Fig. 4 Variation of $(FeO + MnO)$ and $(CaO)/(Al_2O_3)$ in slag during steelmaking process

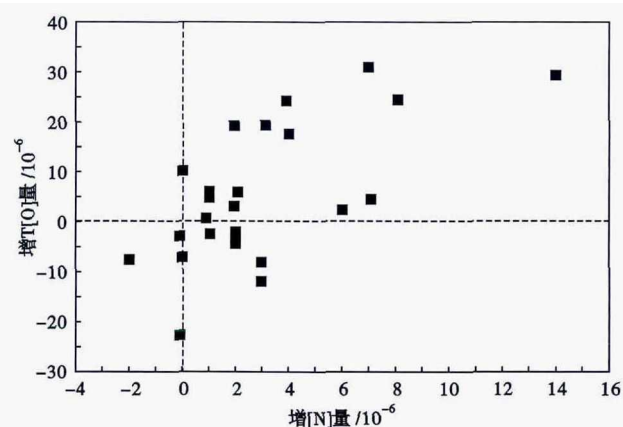
图5 RH出站至中间包增 $[N]$ 量与增 $T[O]$ 量关系

Fig. 5 Relationship between $[N]$ pick-up and $T[O]$ pick-up at end of RH refining to tundish

大,表明浇铸过程存在吸入空气的情况,连铸保护浇铸不理想。

3 工艺优化措施

(1)适当提高转炉出钢温度,加强在线钢包烘

烤运行管理,减少钢包周转数量,降低钢包温降;

(2) 避免脱碳过程多次加铝,尽可能在 RH 脱碳终点一次性加铝脱氧;

(3) 增加加钛铁与加铝之间的时间间隔,由原工艺的 3 min 提高至 4~5 min,使 Al_2O_3 夹杂能够充分上浮,减少钛铁与 Al_2O_3 结合机会和生成量;

(4) 转炉出钢结束后加入顶渣改质剂,降低渣的氧化性,提高渣对夹杂物的吸附能力。采用滑板挡渣减少转炉下渣量,降低精炼过程中顶渣渣厚;

(5) 增加保护套管插入中间包液面的深度,减少钢水注流对中间包钢水的冲击和钢水翻腾,避免二次氧化。实现塞棒、上水口氩气自动控制,减少人为干扰,避免因吹氩量大导致的结晶器卷渣。

4 优化后效果分析

自从 2016 年 7 月开始逐步实施优化措施,至 2017 年 5 月,与原工艺相比,单浇次连浇炉数、RH 出站 $T[O]$ 、连铸中间包 $T[O]$ 、夹杂物情况均有明显改善。

通过对工艺优化后近 3 个月内,IF 钢冶炼过程数据统计分析,结果表明:(1) RH 进站温度提高了约 2.4℃,减少了 RH 处理过程温度补偿量。平均加铝量降低约 10.56%,减少了 Al_2O_3 夹杂物的生成量,也有效的降低了合金成本;(2) 通过控制转炉下渣量,精炼过程中顶渣渣厚由原来 > 80 mm 降低至 60~75 mm。优化后脱碳过程加铝炉次由优化前 36% 降低至 3%,未加铝炉次在 RH 出站时 $T[O]$ 降低了约 4.36×10^{-6} ,中间包 $T[O]$ 降低约 11.7×10^{-6} ;(3) 通过顶渣改质处理后,炉渣中 ($FeO + MnO$) 含量由 22% 降低至 17%,RH 精炼过程中 (CaO)/(Al_2O_3) 平均约为 1.2。连浇炉数由原来的

8 炉提高到 10 炉,连铸运行顺行,未出现水口堵塞现象,连铸坯质量得到有效改善。

图 6 为工艺优化前后钢中 $T[O]$ 、 $[N]$ 变化情况,相比优化前钢水 RH 出站 $T[O]$ 由平均 32.32×10^{-6} 降低至 22.14×10^{-6} ,连铸中间包 $T[O]$ 由平均 37.4×10^{-6} 降低至 21.62×10^{-6} 。“RH 出站-中间包”增 $[N]$ 量由优化前的 2.54×10^{-6} 降低至 0.74×10^{-6} ,中包增 $T[O]$ 量由优化前的 5.08×10^{-6} 降低至 0.52×10^{-6} 。

与原工艺相比,优化后的 RH 出站夹杂物平均尺寸有明显降低,夹杂物数量显著减少。连铸中间包大尺寸夹杂物明显减少,铝损也有了明显降低,有效的提高了钢水的洁净度。

5 结论

(1) 提高出钢及氩站温度,控制转炉终点氧含量,减少 RH 脱碳期加铝量,延长加钛铁与加铝时间,进行顶渣改质,强化连铸保护浇铸,能有效提高钢水洁净度。

(2) 优化工艺后对钢水洁净度有明显的提高,连铸中间包 $T[O]$ 由 37.4×10^{-6} 降低至 21.6×10^{-6} ,夹杂物数尺寸和数量有明显下降。

武汉科技大学省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室开放基金项目资助(G201603)

参考文献

- [1] Matsuura H, Wang C and Wen G H. The Transient Stages of Inclusion Evolution during Al and/or Ti Additions to Molten Iron[J]. ISIJ International, 2007, 47(9): 1265-1274.
- [2] Vanende M A, Guo M X and Dekkers R, et al. Formation and Evolution of Al-Ti Oxide Inclusions during Secondary Steel Refining[J]. ISIJ International, 2009, 49(8): 1133-1140.
- [3] 张维维, 李晓伟, 吕春风. IF 钢冷轧板表面条状缺陷[J]. 钢铁研究学报, 2009, 21(7): 59-61.
- [4] 崔衡, 陈斌, 王敏. RH 精炼过程中 IF 钢洁净度的控制[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(s1): 147-151.
- [5] Huang Z Z, Zheng Y Y and Jiang X F. Overview: Development of Clean Steel Production at Baosteel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2011, 18(s2): 36-41.
- [6] 黄健, 闵义, 姜茂发. IF 钢生产过程非金属夹杂物的演变行为[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(3): 369-372.
- [7] 崔衡, 田恩华, 陈斌, 等. RH 真空精炼后 IF 钢镇静工艺的洁净度研究[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(s1): 32-35.
- [8] 孙群, 林洋, 李伟东. RH 精炼脱碳与夹杂物控制[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(s1): 143-147.
- [9] 于华财, 宋满堂, 林东. RH-TB 精炼工艺优化[J]. 炼钢, 2005, 21(4): 1-4.

邓必荣(1982-),男,工程师,2001 年江西理工大学(本科)毕业,炼钢及连铸技术研究。E-mail: tale-2002@163.com

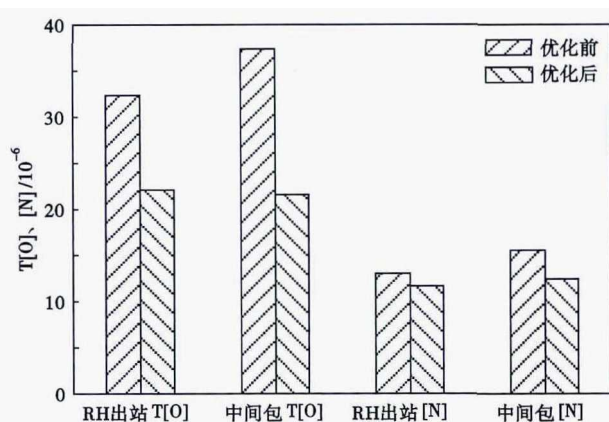


图 6 工艺优化前后 RH 出站和中间包 $T[O]$ 和 $[N]$

Fig. 6 $T[O]$ and $[N]$ in liquid at end RH refining and in tundish before and after process optimization

收稿日期: 2017-12-20