

· 工艺技术 ·

IF 钢 210 t RH 精炼过程中调钛时机对洁净度的影响

吕国成¹ 包丽明¹ 朱金禄²

(1 吉林电子信息职业技术学院, 吉林 132021; 2 通化钢铁股份公司技术中心, 通化 134003)

摘要 通过在 210 t RH 精炼 IF 钢 3 个浇次的试验, 采用扫描电镜详细研究了 RH 精炼过程中调 Ti 时机对 IF 钢洁净度的影响。结果表明, 加 Al 后 2、4、6 min 调 Ti, RH 结束时钢液中的 N 含量平均分别为 26.7×10^{-6} 、 23.6×10^{-6} 、 27.4×10^{-6} 。当吹氧升温所耗氧气量在 $30 \sim 40 \text{ m}^3$, RH 到站氧平均为 579×10^{-6} 时, RH 结束 T[O] 为 70.3×10^{-6} , 当吹氧升温氧耗量在 $75 \sim 90 \text{ m}^3$, RH 到站氧平均为 669×10^{-6} 时, RH 结束 T[O] 为 109.2×10^{-6} 。随着加 Al 前氧活度增加, RH 结束时 T[O] 总体呈增加趋势。加 Al 后 6 min 调 Ti 钢中 $5 \mu\text{m}$ 当量直径夹杂物数量密度最低为 $9.32 \text{ 个}/\text{mm}^2$, 夹杂物数量密度最低。

关键词 RH 精炼 洁净度 调钛 夹杂物

Effect of Timing of Titanium Adjustment in 210 t RH Refining Process on Cleanliness of IF Steel

Lü Guocheng¹, Bao Liming¹ and Zhu Jinlu²

(1 Jilin Technology College of Electronic Information, Jilin 132021;
2 Technology Center of Tonghua Iron and Steel Co Ltd, Tonghua 134003)

Abstract Through 3 heats IF steel of 210 t RH refining process test, the effect of titanium-adjusted time on cleanliness of IF steel in RH refining process is studied by scanning electron microscopy. The results indicate that titanium adjustment after adding aluminum for 2, 4 and 6 min, the average N content in molten steel at RH end is 26.7×10^{-6} , 23.6×10^{-6} and 27.4×10^{-6} , respectively. When the oxygen blowing amount for heating, the oxygen consumption is $30 \sim 40 \text{ m}^3$ and the average initial oxygen content in liquid of RH is 579×10^{-6} , the T[O] is 70.3×10^{-6} at the RH end; When the oxygen blowing amount for heating, the oxygen consumption is $75 \sim 90 \text{ m}^3$ and the average arrival oxygen of RH is 669×10^{-6} , the T[O] is 109.2×10^{-6} at the RH end. The T[O] at the RH end shows an increase trend with the increase of oxygen activity before adding aluminum. The quantity density of inclusions with $5 \mu\text{m}$ equivalent diameter in steel is $9.32 / \text{mm}^2$ when adjusted Ti alloy after adding aluminum 6 min, it is lowest.

Material Index RH Refining, Cleanness, Titanium Adjustment, Inclusions

钢中的非金属夹杂物按来源可分为两种: 外来夹杂物和内生夹杂物。内生夹杂物主要包括: 加入脱氧剂后生成的脱氧产物、裸露的钢液被大气氧化和被耐火材料氧化生成的二次氧化产物。内生夹杂物一般与钢液成分处于平衡状态, 它们是自然生成的, 因此只能减少而不能被完全去除^[1]。IF 钢 RH 精炼过程中加 Ti-Fe 合金进行合金化操作, 必然会形成内生夹杂物, 会对钢液洁净度造成一定影响。夹杂物是造成冷轧板表面缺陷的主要原因之一^[2]。因此, 不少研究者通过实验研究揭示 IF 钢精炼过程夹杂的产生机理以及对它的控制措施^[3-5]。

关于 Ti 对钢中夹杂物影响的研究较多^[6-9], 但关于 IF 钢 RH 精炼过程加 Ti 时机对夹杂物的影响的研究还很少见。本文基于 210 t RH 精炼工业试验, RH 进站后进行脱碳, 然后加入铝粒脱氧, 加铝脱氧后 2、4、6 min 添加钛铁等进行合金化, RH 纯循环 8 min 后破空, 以及 IF 精炼过程加 Ti 合金时机对

钢液氧含量和夹杂物的影响进行了研究, 从而明确了 RH 精炼加 Ti 时机对夹杂物的影响机理。

1 试验方法

1.1 冶炼过程及取样方法

本研究共进行 3 个浇次的试验, 分别在加 Al 后 2、4、6 min 加 Ti-Fe 合金, 每个浇次取 5 炉进行试验研究, 其中第 3 个浇次 1 炉取样失败, 共计 14 炉数据。在每炉钢 RH 结束时取提桶样, 在每个提桶中取金相、氧氮试样, 对洁净度进行系统分析, 如图 1 所示。其中金相试样尺寸 (mm) $10 \times 10 \times 10$, 氧氮试样尺寸为直径 5 mm, 长度 50 mm, 由于提桶直径较小, 所以取两根小棒进行分析。

应用扫描电镜和能谱仪分析每个试样中夹杂物控制情况。在 500 倍下, 随机观察 100 个视场, 统计不同尺寸夹杂物的分布情况。利用能谱仪观察典型夹杂物的形貌和成分。

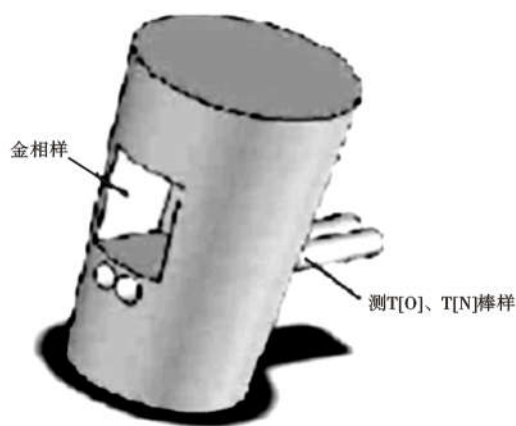


图 1 金相、氧氮取样示意图

Fig.1 Sampling for metallographic and oxygen nitrogen test

1.2 分析方法

(1) T[O]、N 分析。

钢液中的全氧含量 T[O] 即为钢液溶解氧和结合氧之和,IF 钢液在 RH 精炼过程中使用铝脱氧,其中溶解氧的含量很低,O 元素大多以结合氧的形式存在于夹杂物中,因此,可以用 T[O] 表征钢中显微夹杂物的水平。此外,IF 钢作为汽车面板用钢的一种,其中 N 元素是一种有害元素,它会导致钢的冲击韧性和塑性降低,钢中 N 元素还会与 IF 钢中的 Ti、Al 等元素形成氮化物夹杂,因此,在 RH 冶炼过程中要注意防止钢液吸 N,即 [N] 也作为评价 IF 钢质量的一个指标。

依托国家钢铁材料测试中心分析试样中 T[O]、[N],其中 T[O] 采用红外吸收法 (GB/T11261-2006) 检测,[N] 利用热导法 (GB/T20124-2006) 检测。

(2) 金相分析。

取金相样,经过粗磨、细磨、抛光后,应用扫描电

镜分析夹杂物控制水平。观察夹杂物形态,统计夹杂物数量,并可以分析夹杂物成分组成。

(3) 夹杂物数量密度分析。

对统计的夹杂物尺寸及个数应用直线法进行分析,公式如下:

$$I = \frac{\sum d_i \times n_i}{B \times S \times N}$$

式中: I- 单位面积上当量直径为 B 的夹杂物的数量/(个 · mm⁻²); d_i- 不同尺寸范围内夹杂物的平均直径,对 1 ~ 3, 3 ~ 5, 5 ~ 7, 7 ~ 9, 9 ~ 15 μm 和大于 15 μm 各级夹杂物的平均直径分别取 4、6、8、12、25 μm; n_i- 不同尺寸范围内夹杂物的个数; B- 夹杂物的当量直径/μm; S- 视场面积,0.038 4 mm²; N- 视场数,100 个。

本次试验中夹杂物 B 值取 5 μm,研究当量直径为 5 μm (折合后)的夹杂物的分布情况。

2 试验结果

2.1 T[O]、[N] 分析

加 Al 后不同时间条件下调钛试样的 T[O]、[N] 如图 2(a,b,c) 所示。

由图 2(a) 可知,加 Al 后 2min 调钛的试样中,[N] 控制稳定在 24.25 × 10⁻⁶ ~ 31.9 × 10⁻⁶,平均含量在 26.68 × 10⁻⁶ 左右。T[O] 差别较大,其中 2-3 炉次含量最高,达到 87.8 × 10⁻⁶,其到站氧活度较高(624.1 × 10⁻⁶),并且吹氧升温氧耗量达到 120 m³,这可能是导致其 RH 结束试样 T[O] 高的原因。

分析图 2(b) 可知,加 Al 后 4 min 调钛的试样 [N] 平均含量为 23.64 × 10⁻⁶,控制较为稳定,同样 T[O] 差别较大。其中,4-1 炉次中 T[O] 最多,达到 120 × 10⁻⁶,其到站氧活度较高(736 × 10⁻⁶),并且吹

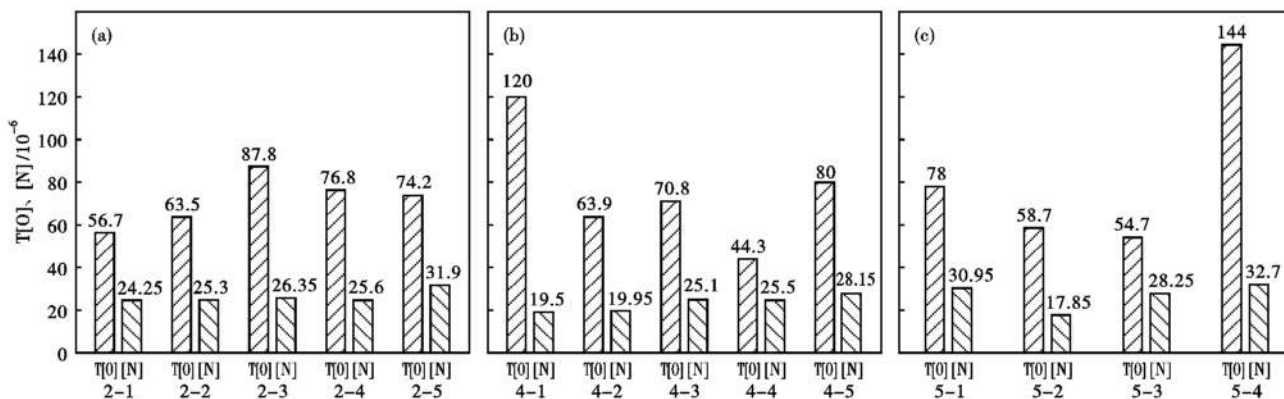


图 2 加 Al 后 2 min(a), 4 min(b) 和 6 min(c) 调钛 RH 结束钢中 T[O]、[N]

Fig.2 T[O] and [N] content in steel of RH end titanium-adjusted after adding aluminum for 2 min (a), 4 min (b) and 6 min (c)

氧升温氧耗量达到 80 m³。

分析图 2(c)可知,加 Al 后 6 min 调钛的试样 [N] 平均为 27.4 × 10⁻⁶, T[O] 基本控制在 50 × 10⁻⁶ ~ 80 × 10⁻⁶, 但 5-4 炉次中 T[O] 达到 144 × 10⁻⁶, 其到站氧活度最高, 达到 789.6 × 10⁻⁶, 并且吹氧升温氧耗量达到 90 m³, 远高于其他炉次。

2.2 到站氧活度的影响

由上述分析可知,不同的调钛时机对 RH 结束时刻钢液中的 T[O] 和 [N] 影响不大, 而到站氧活度和吹氧升温氧耗量对 RH 结束试样中 T[O] 有较大影响。

试验分析到站氧活度和吹氧升温氧耗量对 RH 结束试样中 T[O] 的影响。不同炉次钢水 RH 到站氧活度与 RH 结束时钢液中 T[O] 如表 1、表 2 所示。

分析表 1、表 2 可知,2-2、4-3、4-4、5-1 四炉钢吹氧升温氧耗量都在 30 ~ 40 m³, 2-1、4-1、5-4 三炉钢吹氧升温氧耗量都在 75 ~ 90 m³, 均处于同一水平。由表 1 可知,当吹氧升温氧耗量在同一水平时, RH 结束钢液中 T[O] 与到站氧活度趋势高度吻合, 说明到站氧活度对 RH 结束钢液中 T[O] 有重要影响。

2.3 加 Al 前氧活度的影响

RH 结束时 T[O] 与加 Al 前氧活度的关系如图 3 所示。

分析图 3 可知,大部分炉次 RH 结束时 T[O] 与加 Al 前氧活度相关, 随着加 Al 前氧活度增加, RH

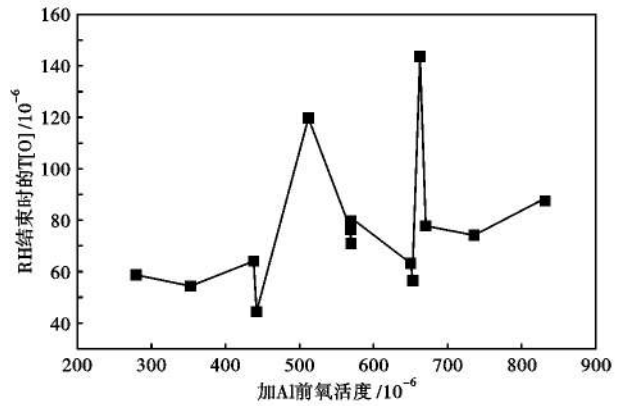


图3 加 Al 前氧活度对 RH 结束时 T[O] 的影响

Fig. 3 Effect of oxygen activity before adding aluminum on T[O] at RH end

结束时 T[O] 总体呈增加趋势。当吹氧升温氧耗量在 30 ~ 40 m³ 时, 加 Al 前氧活度平均为 581 × 10⁻⁶, RH 结束 T[O] 为 64.1 × 10⁻⁶, 当吹氧升温氧耗量在 90 ~ 150 m³ 时, 加 Al 前氧活度平均为 742 × 10⁻⁶, RH 结束 T[O] 为 102.1 × 10⁻⁶。

2.4 夹杂物分析结果

应用扫描电镜观测试样中当量直径大于 1 μm 的夹杂物分布情况, 加铝后不同时间条件下调钛试验 RH 结束时试样中夹杂物分布如图 4 所示。

由图 4 可知,加 Al 后 2 min 调钛试验 RH 结束时钢液中 2-2 和 2-5 炉次的夹杂物含量较多, 达到 33 个/mm² 以上, 其他炉次控制较好。加 Al 后 4 min 调钛试验 RH 结束时钢液中夹杂物全部控制在 30 个/mm² 以下, 4-1 和 4-5 夹杂物含量较多, 分别为 25.57 个/mm², 29.01 个/mm²。加 Al 后 6 min 调钛试验 RH 结束时钢液中 5-2 和 5-4 炉次的夹杂物

表 1 到站氧活度对 RH 结束时钢液 T[O] 的影响 (吹氧升温氧耗量 30 ~ 40 m³)

Table 1 Effect of arrival RH station oxygen activity on T[O] of molten steel at RH end (oxygen consumption 30 ~ 40 m³ for heating)

编号	吹氧升温氧耗量 / m ³	RH 到站氧活度 / 10 ⁻⁶	破空时氧活度 / 10 ⁻⁶
2-2	40	681.3	69.7
4-3	35	689	87.4
4-4	40	431	45.0
5-1	30	516	79.2

表 2 到站氧活度对 RH 结束时钢液 T[O] 的影响 (吹氧升温氧耗量 75 ~ 90 m³)

Table 2 Effect of arrival RH station oxygen activity on T[O] of molten steel at RH end (oxygen consumption 75 ~ 90 m³ for heating)

编号	吹氧升温氧耗量 / m ³	RH 到站氧活度 / 10 ⁻⁶	破空时氧活度 / 10 ⁻⁶
2-1	75	483.5	56.7
4-1	80	736.0	120.0
5-4	90	789.6	149.0

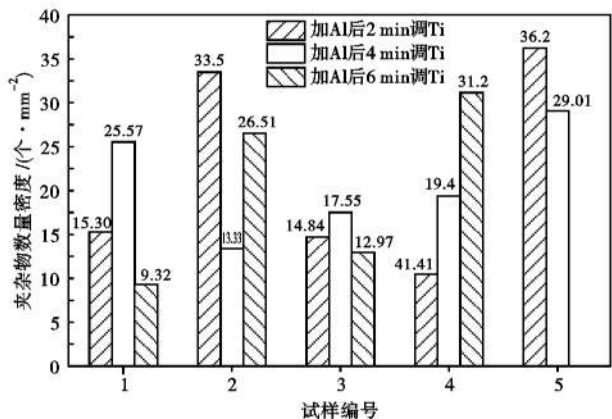


图 4 加 Al 后不同时间条件下调钛试验 RH 结束时钢中夹杂物分布

Fig. 4 Distribution of inclusions in steel at RH end of titanium-adjusted test for different time after adding aluminum

较多,分别为 26.51 个/mm²,31.2 个/mm²。

综合以上分析可见,当加 Al 后 2,4,6 min 调 Ti,吹氧量控制在 30~40 m³ 时,折合成当量直径为 5 μm 夹杂物的数量密度分别为 33.5 个/mm²,19.48 个/mm²,9.32 个/mm²。

3 结论

(1)不同调钛时机加 Al 后 2、4、6 min 时,对应 RH 结束时钢液中的 N 含量平均为 26.7 × 10⁻⁶,23.6 × 10⁻⁶,27.4 × 10⁻⁶,相差不大。

(2)RH 结束钢液中 T[O] 与到站氧活度,加 Al 前氧活度有一定的对应关系,当吹氧升温氧耗量接近时,RH 到站氧活度高,则 RH 结束钢液中 T[O] 也高,当吹氧升温氧耗量在 30~40 m³,RH 到站氧平均为 579 × 10⁻⁶时,RH 结束 T[O] 为 70.3 × 10⁻⁶,当吹氧升温氧耗量在 75~90 m³,RH 到站氧平均为 669 × 10⁻⁶时,RH 结束 T[O] 为 109.2 × 10⁻⁶。

(3)RH 结束时 T[O] 与加 Al 前氧活度有一定关系,随着加 Al 前氧活度增加,RH 结束时 T[O] 总体呈增加趋势。当吹氧升温氧耗量在 30~40 m³ 时,加 Al 前氧活度平均为 581 × 10⁻⁶,RH 结束 T[O] 为 64.1 × 10⁻⁶,当吹氧升温氧耗量在 90~150 m³ 时,加 Al 前氧活度平均为 742 × 10⁻⁶,RH 结束 T[O] 为 102.1 × 10⁻⁶。

(4)当加 Al 后 2,4,6 min 调 Ti 合金,氧耗量控制在 30~40 m³ 时,折合成当量直径为 5 μm 夹杂物

的数量密度分别为 33.5,19.48,9.32 个/mm²,可见加 Al 后 6 min 调 Ti 合金夹杂物数量密度最低。

参考文献

- [1] 潘明,于会香,季晨曦,等. RH 精炼过程中吹氧量对 IF 钢洁净度的影响[J]. 工程科学学报,2020,42(7): 846-853.
- [2] 彭著刚,齐江华,杨成威. 顶渣改质工艺对 IF 钢夹杂物的影响[J]. 工程科学学报,2018,40(增刊1): 174-179.
- [3] 朱坦华,周秋月,任英,等. 二次氧化过程 IF 钢中间包中夹杂物演变行为[J]. 钢铁,2020,55(3):35-39.
- [4] 于会香,潘明,杨德新. 超低碳 IF 钢脱氧合金化过程中夹杂物的行为[J]. 钢铁,2020,55(6):46-53.
- [5] 罗衍昭,田志红,李向奎,等. 超低碳 IF 钢中夹杂物来源的示踪分析[J]. 中国冶金,2019,29(9):56-59.
- [6] Zhang T S,Liu C J and Qiu J Y, et al. Effect of Ti Content on the Characteristics of Inclusions in Al-Ti-Ca Complex Deoxidized Steel[J]. ISIJ International, 2017, 57(2): 314-321.
- [7] Pan C, Hu X J and Lin P. Effects of Ti and Al Addition on the Formation and Evolution of Inclusions in Fe-17Cr-9Ni Austenite Stainless Steel[J]. METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS B, 2020, 51B:3039-3050.
- [8] Wang M, Bao Y P and Wu H J. The Composition and Morphology Evolution of Oxide Inclusions in Ti-Bearing Ultra Low-Carbon Steel Melt Refined in the RH Process[J]. ISIJ International, 2010, 50(11): 1606-1611.
- [9] Matsuura H K, Wang C and Wen G H, et al. The Transient Stages of Inclusion Evolution During Al and/or Ti Additions to Molten Iron[J]. ISIJ International, 2007,47(9):1265-12.

吕国成(1982-),男,硕士(2009 年辽宁科技大学),副教授,2006 年辽宁科技大学(本科)毕业,冶金传输和生产工艺研究。E-mail:83629348@qq.com

收稿日期:2021-04-12

“讲文明树新风”公益广告

绿 色 环 保
爱 我 家 园