

# 顶渣改质工艺对 IF 钢夹杂物的影响

彭著刚<sup>1,2)</sup>✉, 齐江华<sup>2)</sup>, 杨成威<sup>2)</sup>

1) 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083 2) 宝钢股份中央研究院武汉分院, 武汉 430080  
✉通信作者, E-mail: pzhg005@baosteel.com

**摘要** 为研究顶渣改质工艺对无间隙原子钢(IF钢)顶渣氧化性与钢中夹杂物的影响,在不同改质工艺中的多个位置取渣样和钢样进行分析。结果表明:在氩站加入改质剂的改质效果最好。以渣中全铁和氧化锰质量分数  $w(\text{T. Fe} + \text{MnO})$  表示炉渣的氧化性,改质前后炉渣氧化性下降了 8.73%。与真空循环脱气(RH)脱氧合金化后和 RH 精炼结束后加入改质剂改质工艺相比,氩站改质工艺条件下的中包夹杂物数量密度分别下降了 38.5% 和 36.0%。RH 精炼结束后,钢中夹杂物数量较少,但在炉渣氧化性高时,炉渣向钢中传氧,使中包钢中夹杂物上升。

**关键词** 炼钢; 无间隙原子钢; 顶渣改质; 氧化性; 夹杂物

**分类号** TG142.71

## Influence of slag denaturalization on inclusions in IF steel

PENG Zhu-gang<sup>1,2)</sup>✉, QI Jiang-hua<sup>2)</sup>, YANG Cheng-wei<sup>2)</sup>

1) School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China  
2) Wuhan Branch of Baosteel Central Research Institute, Wuhan 430080, China  
✉Corresponding author, E-mail: pzhg005@baosteel.com

**ABSTRACT** To study the influence of slag denaturalization process on the top slag oxidation and inclusions in interstitial free (IF) steel, the slag and steel samples were analyzed and taken from different positions in different slag denaturalization experiments. In the results, the best denaturalization effect is obtained by added the denaturalization agent in argon station, the slag oxidizability, indicated as the content of total Fe and MnO by mass in slag,  $w(\text{T. Fe} + \text{MnO})$ , decreases by 8.73%. Compared with the slag denaturalization process added the denaturalization agent after RH deoxygenation-alloying and RH refining, the number density of inclusions in slag denaturalization process added the denaturalization agent in argon station is decreased by 38.5% and 36.0%, respectively. After RH refining, the number of inclusions in steel is less, but when the slag is in high oxidizability, the oxygen is transferred from slag to steel, which makes the number of inclusions in steel rise.

**KEY WORDS** steelmaking; interstitial free steel; slag denaturalization; oxidizability; inclusions

无间隙原子钢(interstitial free steel, IF 钢) 由于良好的深冲性能被汽车、家电等行业大量采用。随着社会的进步,用户对冷轧板的表面质量要求越来越高,大型夹杂物是造成冷轧板表面缺陷的主要原因之一<sup>[1]</sup>。由于 IF 钢后期深脱碳的要求,转炉炉渣氧化性较高,在出钢过程中渣不可避免地进入钢包中,与出钢过程中加入的石灰等物质形成钢包顶渣。以渣中全铁和氧化锰含量( $w(\text{T. Fe} + \text{MnO})$ ),质量分

数)表示炉渣的氧化性,顶渣氧化性大于 15% 造成真空循环脱气(RH)精炼进站钢水炉渣氧势较高,在后续的工艺过程中,渣中氧会向钢中传递,导致脱氧合金化和二次氧化过程产生大量氧化铝,对钢水洁净度不利。实践表明,通过向顶渣渣面加入改质剂进行炉渣改质处理来降低渣中的氧化性,能够降低轧板缺陷发生率<sup>[2]</sup>。舒宏富等<sup>[3]</sup>研究认为,钢包顶渣改质能有效降低炉渣氧化性,改质能够稳定将

收稿日期: 2018-05-08

渣中全铁含量(  $w(\text{T. Fe})$ , 质量分数) 控制在 7% 以下, 改质后夹杂物尺寸和数量都有下降. 周业连等<sup>[4]</sup> 研究认为, 钢包顶渣改质处理后, 渣中 FeO 含量(  $w(\text{FeO})$ , 质量分数) 下降, 钢液中氧含量( 质量分数) 明显下降, 钢中夹杂物明显降低, 显著改善了钢液的洁净度. 据文献报道, 本钢<sup>[5]</sup>、首钢<sup>[6]</sup>、宝钢<sup>[7]</sup>、鞍钢<sup>[8]</sup>、梅钢<sup>[9]</sup> 等钢厂利用钢包顶渣改质工艺降低顶渣氧化性, 改善钢液夹杂物取得了良好效果.

目前, 顶渣改质工艺大体分为出钢后在氩站加改质剂、RH 精炼过程中加改质剂和 RH 精炼结束后加改质剂等几种工艺路线<sup>[10]</sup>. 本文以 IF 钢为研究对象, 分别在氩站、RH 脱氧合金化后以及 RH 精炼结束后等不同时间节点加入改质剂对炉渣进行改质处理, 研究改质工艺对顶渣的改质效果以及对夹杂物的影响规律, 为 IF 钢的改质工艺提供参考.

## 1 顶渣改质试验

试验钢种为 M 系列 IF 钢, 其生产工艺流程为:

250-t 转炉( 实际出钢量约 275 t) → 氩站 → RH 精炼 → 连铸.

为研究顶渣改质工艺对顶渣氧化性与钢中夹杂物的影响, 进行了 3 组顶渣改质工业试验, 其中改质工艺分为 3 种类型: 方案 A, RH 出站在渣层上表面加入改质剂; 方案 B, RH 脱氧结束后在真空室加入改质剂, 改质剂通过循环上浮至钢渣界面; 方案 C, 出钢结束后在氩站加入改质剂. 试验具体方案如表 1 所示, 试验炉次的转炉出钢都用滑板挡渣控制下渣. 为了保证试验的准确性, 钢包进入氩站后严格测渣厚, 保证试验炉次的渣厚基本一致, 以免钢包内渣量的差异对试验结果产生影响. 改质剂选取含金属 Al 质量分数为 40% 的铝渣球, 渣样和钢样的取样点如表 1 所示. 渣样制样后利用 X 射线荧光光谱仪( X-ray fluorescence spectrometer, XRF) 进行成分分析; 钢样首先进行切割、研磨、抛光处理, 然后利用全自动扫描电镜( scanning electron microscope, SEM) 夹杂物分析仪对约 500 mm<sup>2</sup> 范围内的夹杂物数量、成分、尺寸分布等信息进行分析.

表 1 顶渣改质工艺试验方案

Table 1 Experimental scheme of slag denaturalization process

| 方案 | 改质剂加入时间   | 每炉改质剂加入量/kg | 渣样取样点            | 钢样取样点    |
|----|-----------|-------------|------------------|----------|
| A  | RH 结束     | 300         | RH 进站、RH 结束、连铸平台 | RH 结束、中包 |
| B  | RH 脱氧合金化后 | 300         | RH 进站、RH 结束、连铸平台 | RH 结束、中包 |
| C  | 氩站        | 300         | 氩站进站、RH 进站、RH 结束 | RH 结束、中包 |

## 2 结果与讨论

### 2.1 改质前后炉渣成分的变化

由于改质剂加入时间不同, 不同改质工艺改质效果会有差异, 表 2 为 RH 结束、RH 脱氧合金化后

和氩站 3 种不同改质工艺试验改质前后炉渣成分的变化, 其中, 以渣中全铁和氧化锰含量(  $w(\text{T. Fe} + \text{MnO})$ , 质量分数) 表征炉渣的氧化性, 以渣中 CaO 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量比(  $w(\text{CaO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  ) 表征炉渣对夹杂物的吸附能力,  $\mu(\text{CaO})$  为渣中 CaO 含量( 质量分

表 2 不同改质工艺试验改质前后炉渣成分( 质量分数)

Table 2 Chemical compositions of slags in different slag denaturalization process

| 方案 | 取样点   | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | MnO  | $w(\text{T. Fe})$ | $w(\text{T. Fe} + \text{MnO})$ | $w(\text{CaO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ |
|----|-------|------------------|--------------------------------|-------|------|------|-------------------|--------------------------------|--|
| A  | RH 进站 | 5.55             | 16.38                          | 41.55 | 3.92 | 2.25 | 12.35             | 14.60                          | 2.54                                     |
|    | RH 结束 | 6.86             | 17.41                          | 31.01 | 2.90 | 2.97 | 10.03             | 13.00                          | 1.78                                     |
|    | 连铸平台  | 4.73             | 20.79                          | 25.32 | 2.41 | 1.38 | 8.46              | 9.84                           | 1.21                                     |
| B  | RH 进站 | 4.27             | 14.01                          | 49.46 | 4.55 | 2.30 | 15.28             | 17.58                          | 3.53                                     |
|    | 合金化后  | 2.81             | 14.43                          | 41.81 | 4.34 | 2.07 | 11.06             | 13.13                          | 3.36                                     |
|    | RH 结束 | 4.14             | 20.65                          | 47.15 | 5.32 | 2.22 | 12.02             | 14.24                          | 2.28                                     |
| C  | 连铸平台  | 4.77             | 29.18                          | 42.93 | 4.47 | 2.02 | 8.74              | 10.76                          | 1.47                                     |
|    | 氩站进站  | 3.58             | 15.28                          | 45.08 | 3.80 | 2.12 | 13.73             | 15.85                          | 2.95                                     |
|    | RH 进站 | 6.93             | 23.90                          | 43.06 | 4.66 | 2.05 | 5.07              | 7.12                           | 1.80                                     |
|    | RH 结束 | 6.3              | 26.15                          | 41.86 | 5.6  | 1.74 | 5.89              | 7.63                           | 1.60                                     |

数)  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为渣中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量(质量分数)。

改质剂的主要成分是金属 Al 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ,其主要目的是降低渣中的氧化性并调整炉渣中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量(质量分数) ,以利于吸收钢中夹杂物。图 1 是渣中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量(  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  ,质量分数) 在精炼过程中变化,图中箭头所指方向表示改质前后  $\text{Al}_2\text{O}_3$  质量分数的变化。从图 1 可以看到,精炼过程中渣中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  质量分数在加入改质剂前变化不大,随着改质剂的加入,金属 Al 和渣中 FeO 反应生成  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂,改质剂也含有部分  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ,导致渣中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  质量分数明显增加,可见改质剂对炉渣成分的调整是明显的。B 方案中,从加入改质剂到精炼结束再到连铸平台,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  质量分数都明显增加,说明改质剂中部分金属 Al 先进入钢液中,然后才和炉渣反应进入渣中。另外,脱碳结束后采用 Al 脱氧,生成的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物逐渐上浮到渣里,导致渣中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  质量分数也有所增加。

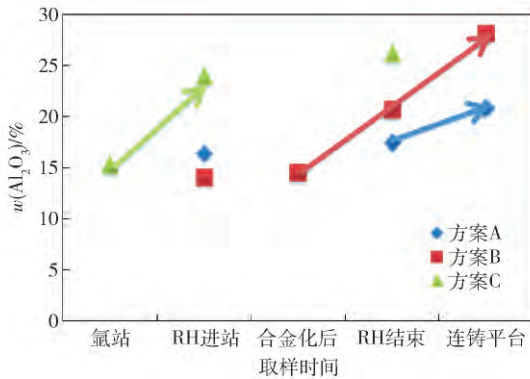


图 1 渣中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量(质量分数)在精炼过程中变化

Fig. 1 Variation of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content by mass in slag during RH refining process

从表 2 可以看出,3 种改质工艺改质前后炉渣氧化性(  $w(\text{T. Fe} + \text{MnO})$  ,质量分数) 分别下降了 3.16%、2.37% 和 8.73%。炉渣氧化性变化如图 2 所示,图中箭头所指方向表示改质前后氧化性的变化。由于 RH 结束和氩站改质工艺是将改质剂直接加在渣面上,改质剂直接与炉渣反应,降低炉渣的氧化性。RH 结束后加入改质剂,由于炉渣结壳等原因,改质效果并不明显,炉渣氧化性只下降了 3.16%。在氩站加入改质剂的效果则好很多,炉渣氧化性下降了 8.73%,这是因为氩站钢水温度比 RH 结束高  $40\text{ }^\circ\text{C}$  左右,加之氩站的氩气搅拌,炉渣改质的热力学和动力学条件好很多,改质效果也较明显。和前两种改质工艺不同的是,在 RH 脱氧合金化后改质工艺中,改质剂是在 RH 真空室加入,改质剂首先与钢液接触,然后通过循环上浮至钢渣界面,

在此过程中,金属 Al 大部分进入钢液中,形成 Al<sub>s</sub>,然后才和炉渣进行反应,从图 2 也可以看出,合金化后和 RH 结束两个时间点的渣样氧化性没有明显变化,而到了连铸平台炉渣的氧化性才下降,而且只下降了 2.37%,说明此改质工艺没有起到明显作用。

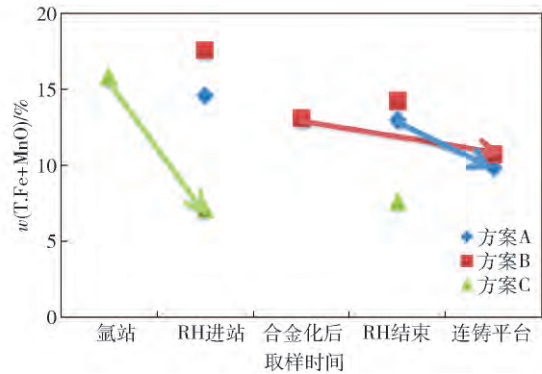


图 2 不同改质工艺改质前后炉渣氧化性变化

Fig. 2 Variation of slag oxidability before and after slag denaturation

对于 IF 钢来说,钢包顶渣改质除了能够降低炉渣的氧化性,还可以对炉渣的碱度和流动性进行调整,增强了对夹杂物的吸收能力<sup>[11]</sup>。有研究指出,在 RH 进站时钢包顶渣中 CaO 与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  质量比(  $w(\text{CaO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  ) 可以表征炉渣对夹杂物的吸附能力<sup>[12]</sup>。李怡宏等<sup>[13]</sup> 认为将炉渣  $w(\text{CaO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  的值控制在 1.5 ~ 1.7 有利于氧化铝夹杂物的高效吸收。有研究指出,将超低碳钢顶渣  $w(\text{CaO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  的值控制在 1.6 ~ 1.8 范围内时,炉渣对钢中夹杂物的吸附能力最强<sup>[11]</sup>。按照这些研究结果,炉渣改质的最佳时机应该是在 RH 进站前进行,改质剂的加入不但能降低炉渣的氧化性,还能将  $w(\text{CaO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  值调整到合适的范围,有利于精炼过程中炉渣对夹杂物的吸附。从表 2 中可以看出,方案 A 和方案 B 的改质工艺在 RH 进站时的炉渣(  $\text{CaO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  值已经超出这个范围,而在方案 C 中,RH 进站前炉渣的  $w(\text{CaO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  值处于比较合适的范围,有利于吸附夹杂物。

### 2.2 不同改质工艺钢中夹杂物的数量及类型

炉渣改质主要是通过降低渣中的氧化性和调整炉渣成分以达到降低钢中夹杂物的目的。在脱氧合金化前,钢中氧含量较高,对钢样夹杂物的分析不具有代表性,本文从 RH 结束开始取样,对不同改质方案的 RH 结束和中包钢样夹杂物进行了分析,其夹杂物种类、数量、尺寸分布、及形貌如表 3 和图 3 所示。

不同改质工艺钢样中不同尺寸夹杂物数量密度

表 3 不同改质工艺钢样夹杂物种类、数量与尺寸分布

Table 3 Type, number density and size distribution of inclusions in steel by different slag denaturalization

| 方案 | 取样点   | 不同尺寸夹杂物数量 /mm <sup>-2</sup> |            |        | 总计   | 不同种类夹杂物数量/mm <sup>-2</sup>     |         |         |
|----|-------|-----------------------------|------------|--------|------|--------------------------------|---------|---------|
|    |       | 5 ~ 10 μm                   | 10 ~ 20 μm | >20 μm |      | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Ca-Al-O | Ti-Al-O |
| A  | RH 结束 | 0.17                        | 0.11       | 0.02   | 0.30 | 0.16                           | 0       | 0.14    |
|    | 中包    | 0.21                        | 0.26       | 0.05   | 0.52 | 0.45                           | 0.02    | 0.05    |
| B  | RH 结束 | 0.10                        | 0.10       | 0.01   | 0.21 | 0.13                           | 0.01    | 0.07    |
|    | 中包    | 0.38                        | 0.11       | 0.01   | 0.50 | 0.48                           | 0.01    | 0.01    |
| C  | RH 结束 | 0.26                        | 0.11       | 0.02   | 0.39 | 0.27                           | 0.01    | 0.11    |
|    | 中包    | 0.19                        | 0.12       | 0.01   | 0.32 | 0.28                           | 0.00    | 0.04    |

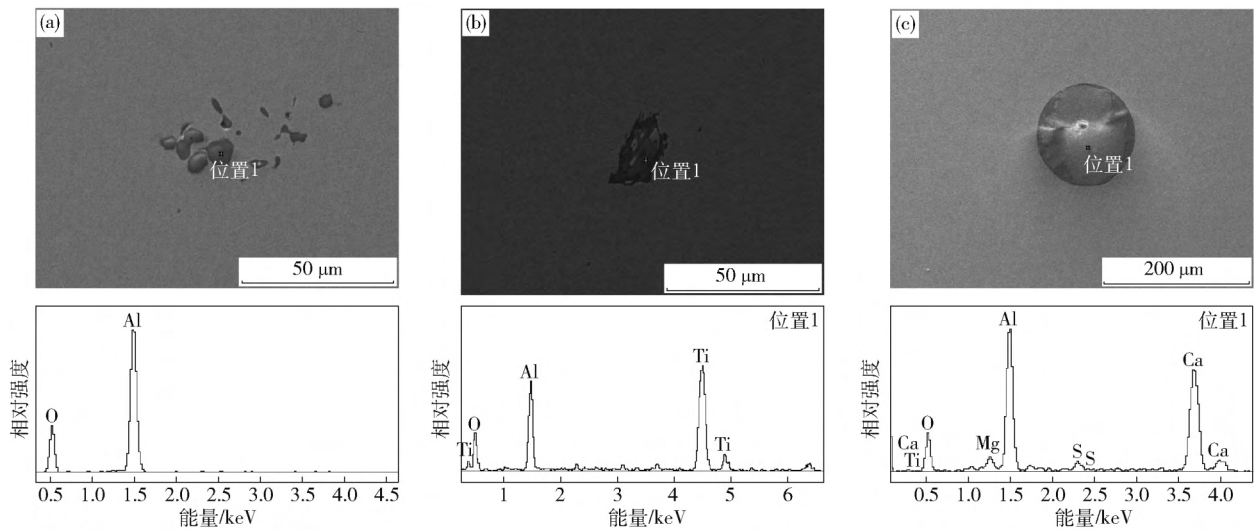


图 3 不同种类夹杂物形貌及对应 X 射线荧光光谱分析. (a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (b) Ti-Al-O; (c) Ca-Al-O

Fig. 3 Morphology and the corresponding XRF analysis of typical inclusions: (a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (b) Ti-Al-O; (c) Ca-Al-O

分布如图 4 所示,不同改质工艺条件下钢中夹杂物尺寸分布趋势基本一致, >20 μm 夹杂物数量都非常少,主要为 5 ~ 10 μm 夹杂物,其次为 10 ~ 20 μm 夹杂物. 与方案 A 和方案 B 改质工艺相比,方案 C 改质工艺条件下的中包夹杂物数量密度分别下降了 38.5% 和 36.0%,下降明显. 在方案 A 和方案 B 改质工艺条件下,RH 结束后到中包的过程夹杂物数量是上升的,而在方案 C 改质工艺中,中包比 RH 结束略有下降. 几种改质工艺在 RH 结束时钢中夹杂物数量都不高,方案 A 和方案 B 改质工艺在中包夹杂物上升是因为炉渣的氧化性高,渣中的氧逐渐在向钢中传递,而方案 C 中炉渣的改质效果较好,很好的控制了炉渣往钢中传氧,中包夹杂物有下降趋势,这也说明了炉渣氧化性对钢中夹杂物的影响是很大的. 图 5 为炉渣氧化性和中包钢中夹杂物数量密度的关系图,由此可见,当炉渣氧化性较高时,钢中夹杂物也较多.

不同改质工艺夹杂物的种类分布情况如图 6 所示. 从图中可以看出,不同改质工艺条件下从 RH

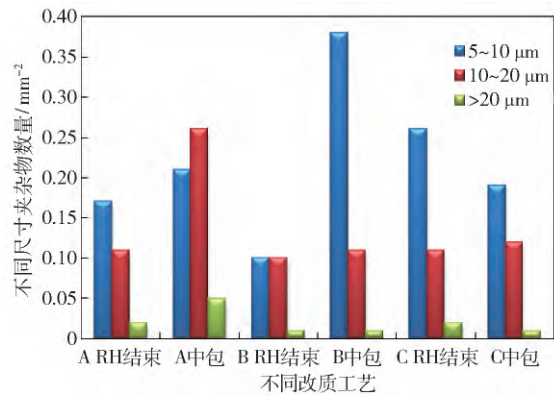


图 4 不同改质工艺钢中不同尺寸夹杂物数量密度分布

Fig. 4 Number density distribution of inclusions with different sizes in steel by different slag denaturalization

结束到中包 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物密度都是增加的,但方案 A 和方案 B 改质工艺条件下 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物的增量远大于方案 C 改质工艺,这主要是由于方案 A 和方案 B 改质工艺条件下改质效果不明显,钢包顶渣的氧化性较高,炉渣向钢中传氧,导致钢水中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物增加,而方案 C 改质工艺的改质效果较好,炉渣的



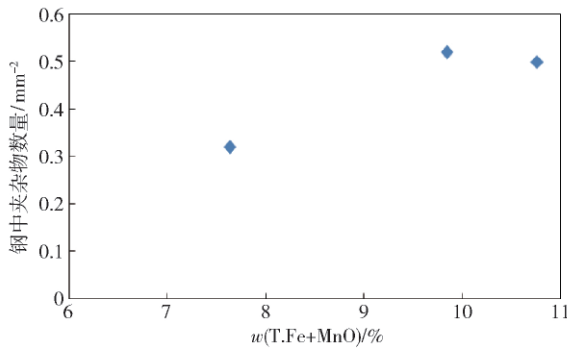


图5 炉渣氧化性和钢中夹杂物的关系

Fig.5 Relationship between the oxidizability of slag and the number density of inclusions in steel

氧化性较低,所以钢水中  $Al_2O_3$  夹杂物没有明显变化.

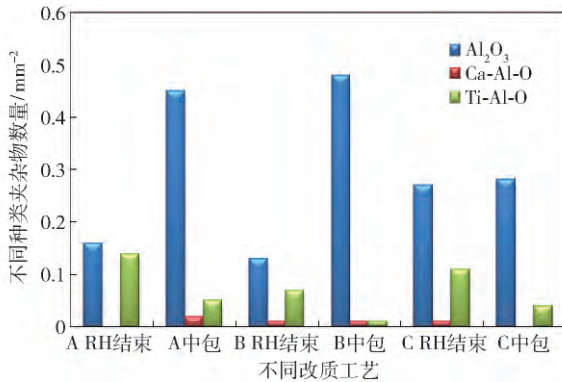


图6 不同改质工艺钢中不同种类夹杂物数量密度分布

Fig.6 Number density distribution of inclusions with different types in steel by different slag denaturalization

从图6也可以看出,不同改质工艺条件下从RH结束到中包Ti-Al-O夹杂物密度都是降低的,这是因为随着钢液温度的降低,钢中的Al和Ti的氧化物发生反应,使夹杂物中Ti-Al-O夹杂物降低<sup>[14]</sup>.钢中夹杂物除了 $Al_2O_3$ 和Ti-Al-O夹杂物以外,还少量的Ca-Al-O夹杂物,Ca-Al-O夹杂物数量分布没有明显规律,属于偶然发生的现象,是炉渣卷渣进入钢液中的.

### 3 结论

以IF钢为研究对象,分别在氩站、RH脱氧合金化后以及RH精炼结束后等不同时间节点加入改质剂对炉渣进行改质处理,结果表明:

(1) 3种改质工艺对降低炉渣的氧化性都有一定效果,改质前后炉渣氧化性( $w(T,Fe+MnO)$ ,质量分数)分别下降了3.16%、2.37%和8.73%,其中在氩站加入改质剂的改质工艺效果最好.

(2) 和其他2种改质工艺相比,氩站改质工艺

条件下的中包夹杂物数量密度分别下降了38.5%和36.0%,效果明显.

(3) RH精炼结束后,钢中夹杂物数量较少,但在炉渣氧化性高时,炉渣向钢中传氧,使中包钢中夹杂物上升,炉渣氧化性对钢中夹杂物数量的影响很大.

### 参 考 文 献

- [1] Wang X H. Non-metallic inclusion control technology for high quality cold rolled steel sheets. *Iron Steel*, 2013, 48(9): 1 (王新华. 高品质冷轧薄板钢中非金属夹杂物控制技术. 钢铁, 2013, 48(9): 1)
- [2] Liu P, Luo G, Ding S Q, et al. Process optimization of ultra-low-carbon steel top slag. *Met Mater Metall Eng*, 2015, 43(3): 27 (刘彭, 罗钢, 丁胜强, 等. 超低碳钢顶渣改质工艺优化. 金属材料与冶金工程, 2015, 43(3): 27)
- [3] Shu H F, Liu L, Liu X H. Influence of slag denaturalization on inclusions in IF steel. *Steelmaking*, 2016, 32(3): 55 (舒宏富, 刘浏, 刘兴华. 钢包顶渣改质对IF钢夹杂物的影响. 炼钢, 2016, 32(3): 55)
- [4] Zhou Y L, He Q, Deng Z Y, et al. Effect of ladle top slag modification treatment on inclusions in ultra-low carbon steel in 210 t BOF-RH-slab CC flowsheet. *Special Steel*, 2015, 36(3): 38 (周业连, 何奇, 邓志银, 等. 210 t BOF-RH-板坯CC流程钢包顶渣改质处理对超低碳钢夹杂物的影响. 特殊钢, 2015, 36(3): 38)
- [5] Wang J G, Jin X G. Application of ladle top slag reforming to auto-steel smelting at converter. *World Iron Steel*, 2010(6): 49 (王甲贵, 金晓光. 钢包顶渣改质在转炉冶炼汽车用钢中的应用. 世界钢铁, 2010(6): 49)
- [6] Suo J L, Wang X H, Li L P, et al. Effect of oxidizing slag on the cleanliness of IF steel. *Steelmaking*, 2016, 32(6): 62 (索金亮, 王新华, 李林平, 等. 氧化性炉渣对IF钢洁净度的影响. 炼钢, 2016, 32(6): 62)
- [7] Cui J, Zheng Y Y, Zhu L X. Progress of production technology of clean steel at Baosteel. *China Metall*, 2004(7): 1 (崔健, 郑贻裕, 朱立新. 宝钢纯净钢生产技术进步. 中国冶金, 2004(7): 1)
- [8] Li W D, Sun Y P, Qi L. Research of top slag modification for ultra-low carbon steel // *Proceedings of China Iron and Steel Annual Meeting*. Beijing, 2013: 1 (李伟东, 孙玉平, 齐磊. 超低碳钢顶渣改制技术研究//第九届中国钢铁年会论文集. 北京, 2013: 1)
- [9] Zhu K. Development and application of ladle slag upgrading process of ultra-low carbon steel at Meigang. *Baosteel Meishan*, 2015(3): 18 (朱坤. 梅钢超低碳钢钢包渣改质工艺开发与应用. 梅山科技, 2015(3): 18)
- [10] Zhao J Q, Zou C D, Geng T, et al. Effect of slag deoxidation modification process optimization on the total oxygen content of aluminium deoxidation silicon steel. *Steelmaking*, 2016, 32(2): 12

- (赵家七, 邹长东, 耿涛, 等. 炉渣脱氧改质工艺对铝镇静硅钢总氧含量的影响. *炼钢*, 2016, 32(2): 12)
- [11] Yuan P, Li H B, Luo R Z, et al. Influence of ladle slag oxidability on the cleanliness of ultra low carbon steel. *Chin J Eng*, 2016, 38(12): 1702
- (苑鹏, 李海波, 罗衍昭, 等. 超低碳钢顶渣氧化性对钢液洁净度的影响. *工程科学学报*, 2016, 38(12): 1702)
- [12] Ehara T, Kurose Y, Fujimura T, et al. Mass production of high quality IF steel at Mizushima Works // *Seventy Ninth Conference of the Steelmaking Division of the Iron and Steel Society*. Pittsburgh, 1996: 485
- [13] Li Y H, Bao Y P, Shen X W, et al. Inclusions control study of DC06 steel in 300 t ladle. *Steelmaking*, 2014, 30(2): 42
- (李怡宏, 包燕平, 申小维, 等. 300 t 钢包内 DC06 钢的夹杂物控制研究. *炼钢*, 2014, 30(2): 42)
- [14] Sui Y F, Sun G D, Zhao Y, et al. Evolution of titaniferous inclusions in IF steelmaking. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2014, 36(9): 1174
- (隋亚飞, 孙国栋, 赵艳, 等. IF 钢中含 Ti 夹杂物的衍变规律. *北京科技大学学报*, 2014, 36(9): 1174)