

超低碳钢顶渣氧化性对钢液洁净度的影响

苑 鹏¹⁾✉, 李海波¹⁾, 罗衍昭¹⁾, 刘道正²⁾, 陈建光²⁾, 王强强³⁾, 宋丽娜⁴⁾

1) 首钢集团总公司技术研究院薄板研究所, 北京 100043 2) 首钢股份公司迁安钢铁公司, 迁安 064404

3) 河南济源钢铁(集团)有限公司, 济源 454650 4) 钢铁研究总院科技信息与战略研究所, 北京 100081

✉ 通信作者, E-mail: shandongyuanpeng@163.com

摘 要 为探究降低顶渣氧化性对改善超低碳钢钢液洁净度的影响,在转炉终点至中间包过程中,在多个位置取炉渣和钢水试样,分别进行炉渣氧化性、钢液成分和夹杂物分析. 实验结果表明: 转炉出钢后通过对顶渣改质,渣中 T. Fe 由转炉终点的 19.18% 降至 RH 进站时的 4.68%,顶渣氧化性降低明显. 渣中 T. Fe 降低导致钢中 [O] 的降低, T. Fe 较低的炉次平均吹氧量较大,使得铝脱氧前钢中 [O] 较高. RH 结束渣 T. Fe 与夹杂物数量呈线性关系, T. Fe 越低夹杂物数量越少,同时 RH 结束后夹杂物数量与铝脱氧前钢中 [O] 无必然关系. 顶渣(CaO) / (Al₂O₃) 会影响其吸收 Al₂O₃ 夹杂物的能力, (CaO) / (Al₂O₃) 控制不合理的炉次,其夹杂物数量也较多. 通过降低顶渣氧化性,热轧板卷缺陷率得到明显降低.

关键词 炼钢; 低碳钢; 渣; 氧化性; 夹杂物; 洁净度; 表面缺陷

分类号 TF769.4

Influence of ladle slag oxidability on the cleanliness of ultra low carbon steel

YUAN Peng¹⁾✉, LI Hai-bo¹⁾, LUO Yan-zhao¹⁾, LIU Dao-zheng²⁾, CHEN Jian-guang²⁾, WANG Qiang-qiang³⁾, SONG Li-na⁴⁾

1) Sheet Metal Research Institute, Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100043, China

2) Shougang Qian'an Steel Company, Qian'an 064404, China

3) Henan Jiyuan Iron & Steel (Group) Co. Ltd., Jiyuan 454650, China

4) Institute for Science and Technology Information and Strategy, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China

✉ Corresponding author, E-mail: shandongyuanpeng@163.com

ABSTRACT Slag oxidability, steel composition and inclusions were analyzed by slag sampling and steel sampling from the BOF endpoint to the tundish for studying the influence of ladle slag oxidability on the cleanliness of ultra low carbon steel. The results show that by ladle slag treatment after BOF tapping, T. Fe content in top slag decreases from 19.18% to 4.68% when getting in RH, indicating that the reduction of slag oxidability is obvious. The reduction of T. Fe content in slag leads to the reduction of [O] content in steel. For some heats with low T. Fe content, the average oxygen-blowing amount is large, and then the [O] content before Al deoxidization is relatively high. The relationship between the T. Fe content of RH end slag and the number of inclusions is linear, but meanwhile there is no obvious relationship between the number of inclusions after RH and the [O] content before Al deoxidization. The (CaO) / (Al₂O₃) ratio of ladle slag influences the Al₂O₃ absorption ability. The number of inclusions will be large if the (CaO) / (Al₂O₃) ratio of the slag is not reasonable. The defects of hot rolled sheets significantly decline with the reduction of slag oxidability.

KEY WORDS steelmaking; low carbon steel; slag; oxidability; inclusions; cleanliness; surface defects

超低碳 IF 钢广泛用于汽车面板的生产,为达到卓越的表面质量,对其钢中洁净度的要求较高^[1]. 保护渣夹杂物和内生大尺寸簇群状氧化铝夹杂物是造成此类深冲冷轧薄板表面缺陷的主要原因,其中保护渣

夹杂物尺寸较大,因此危害也较大^[2-3]. 保护渣夹杂物源自结晶器中保护渣的卷入,通过对结晶器流场进行优化可有效降低保护渣卷入的概率. 国内外学者对结晶器内流场优化进行了大量研究,现阶段通过优化连

铸参数^[5-6]、浸入式水口设计^[7-8]、电磁制动或电磁搅拌参数^[9-10]等可得到不同条件下的理论最优流场,然而受浸入式水口堵塞影响,生产中实际流场与理想流场有很大差距。改善钢液洁净度是减少水口堵塞的有效途径,因此无论是从保护渣卷入角度还是从大尺寸簇群状氧化铝夹杂物生成角度,都应对钢液洁净度进行有效控制。

近年来,随着国内生产高品质汽车板炼钢工艺的日渐成熟,改善钢液洁净度的主要工作由 RH 脱碳速率的优化^[11]、RH 纯循环时吹氩流量及处理时间的优化^[12-13]、镇静时间的优化^[14]和中间包流场的优化^[15]转向转炉终点碳氧积控制、顶渣氧化性控制和全保护浇注三个方面,其中顶渣氧化性控制已经成为进一步改善超低碳钢洁净度的主要思路。基于此,国内某钢厂在转炉出钢后对顶渣进行改质,以探究顶渣氧化性变化情况,并分析不同阶段顶渣氧化性对钢液活度氧和夹杂物的影响,为进一步改善钢液洁净度提供理论基础。

1 实验及研究方法

某钢厂生产超低碳 IF 钢的工艺流程为: 顶底复吹转炉—RH 精炼—镇静—板坯连铸。选取 3 个浇次中 20 炉进行降低顶渣氧化性工业实验,在转炉出钢后根据终点氧的不同向钢包顶渣加入具有脱氧作用的改质剂,以降低渣中(FeO),同时调整顶渣成分。进行实验的 20 炉为 3 个浇次的中间炉次,以排除首尾炉的影响。实验炉次中间包钢水的平均化学成分如表 1 所示。

表 1 实验炉次中间包钢水化学成分(质量分数)

Table 1 Composition of test steel in the tundish							%
C	Si	Mn	P	S	Al _T	Al _S	Ti
0.0016	0.0055	0.12	0.01	0.0057	0.0338	0.0318	0.056

炉渣试样和钢水试样的取样位置和取样时间如表 2 所示,其中在 RH 真空处理结束 8 min 所取钢水提桶样用于夹杂物分析,试样加工成 $\phi 30\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 的圆

柱状,进行磨抛后使用 Aspex 自动扫描电镜进行夹杂物的检测,每一试样的检测面积约为 90 mm^2 ,设置检测的最小尺寸为 $5\text{ }\mu\text{m}$,之后进行自动扫描,对自动检测到的夹杂物的形貌、成分、尺寸和数量进行记录,自动扫描结束后使用“再定位”功能对大尺寸夹杂物进行尺寸的重新复检,同时结合夹杂物的形貌和成分对夹杂物进行筛选,排除并非夹杂物的外来物质。

表 2 取样位置和时间

Table 2 Sampling position and time

取样位置	取样时间	
	炉渣样	钢水样
BOF	转炉终点	转炉终点
RH 精炼	RH 进站	RH 进站
	RH 结束	RH 结束
中间包	—	大包浇注 100 t 时

2 实验结果与讨论

2.1 顶渣氧化性与轧板缺陷率的关系

保护渣夹杂物和大尺寸的簇群状氧化铝夹杂物是造成冷轧薄板表面缺陷的主要原因^[16-18]。图 1 是超低碳 IF 钢热轧板中所发现的一处明显的表面缺陷,图 2 是该缺陷在扫描电镜下的形貌,图 3 为此缺陷的能谱面扫描图。由图可以看出,缺陷处有 Ca、Si 和 Na 元素,此缺陷应该为保护渣卷入造成。此缺陷尺寸较大,若不及时处理,在后续冷轧中会造成十分严重的表面

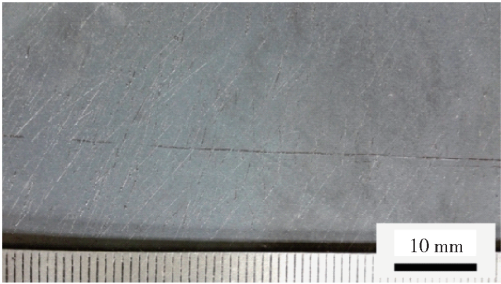


图 1 IF 钢热轧板表面缺陷的宏观形貌

Fig. 1 Photograph of surface defects on IF steel hot rolled sheet

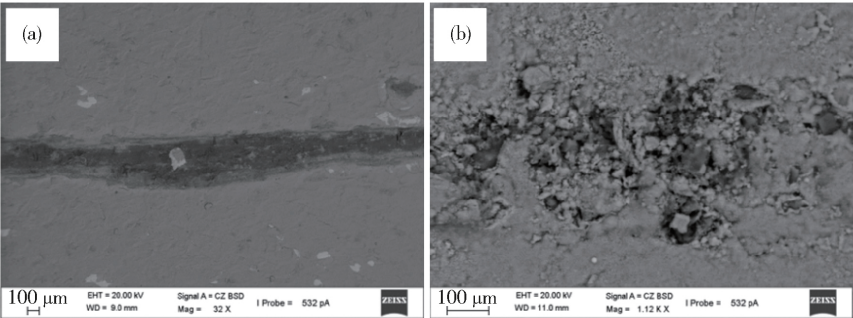


图 2 热轧板表面缺陷在扫描电镜下的图像

Fig. 2 SEM images of the surface defects of hot rolled steel sheets

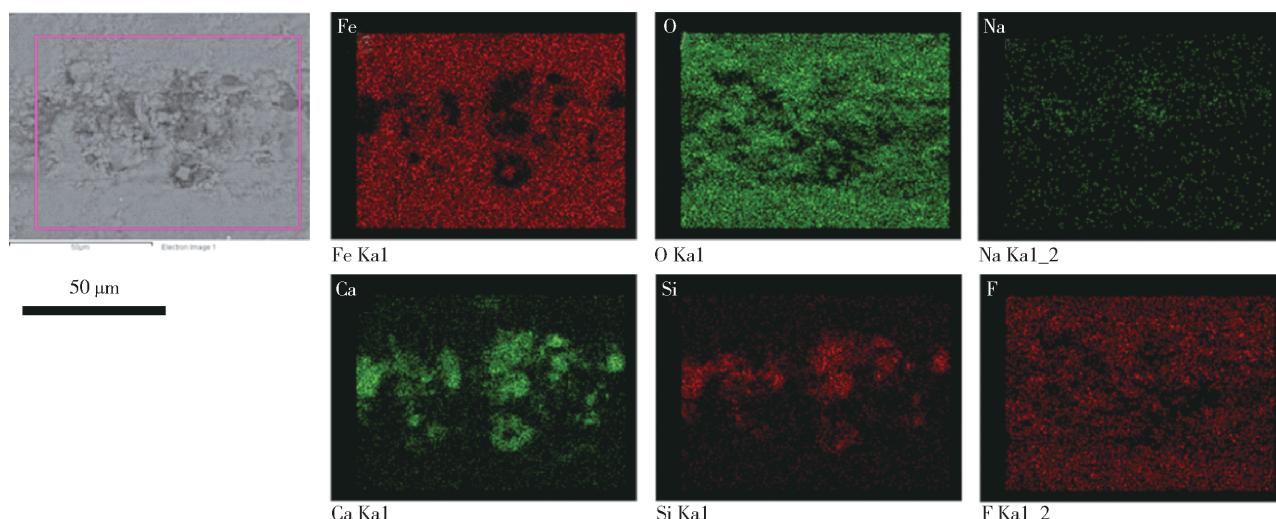
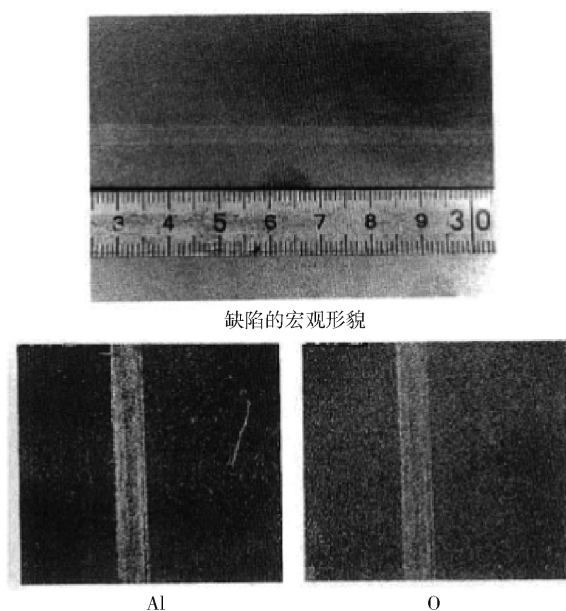


图 3 表面缺陷的能谱面扫描图

Fig. 3 Elemental mapping of surface defects

缺陷. 图 4 是文献报道的由簇群状氧化铝夹杂物造成的冷轧板表面缺陷^[19].

图 4 冷轧板中由 Al_2O_3 夹杂造成的表面缺陷^[19]Fig. 4 Sliver defects caused by Al_2O_3 inclusions in cold rolled steel sheets^[19]

一般来说,渣中 T. Fe 含量可完全表征渣的氧化性^[20-21]. 图 5 是渣中 T. Fe 为 3% ~ 6% 和 6% ~ 9% 时对应的 IF 钢热轧板卷的缺陷率. 可见随着顶渣氧化性降低,对应的热轧板卷缺陷率明显降低.

对于超低碳钢而言,钢中夹杂物绝大多数为簇群状的氧化铝,此类夹杂物熔点较高,很容易造成水口堵塞. 图 6 分别是 RH 结束渣 T. Fe 为 4.68% 和 7.50% (某两个浇次的平均值) 时所对应的水口出口的形貌. 当浸入式水口的过钢量为 670 t 时,对这两个浇次同时

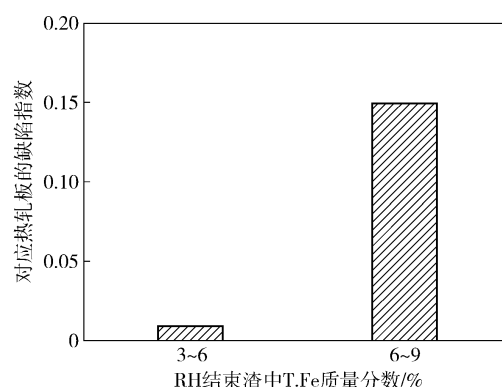


图 5 不同 RH 结束渣 T. Fe 对应的 IF 钢热轧板卷的缺陷率

Fig. 5 Relationship between the T. Fe content in slag after RH treatment and the number of defects in IF steel hot rolled sheets

进行换水口,将下水口的剩余面积进行准确测量,结果如图 7 所示. 可见图 6 (b) 水口出口的堵塞程度更为严重,剩余面积仅为原来的 37%. 一般来说,钢液中夹杂物越多,大尺寸簇群状氧化铝夹杂的数量也就越多,由此导致浸入式水口的堵塞程度也越严重,浸入式水口堵塞会直接影响到结晶器中稳定对称的流场,同时造成液面波动过大,这使得保护渣卷入的概率大大增加. 因此,钢液洁净度控制水平直接影响到铸坯中大尺寸簇群状氧化铝夹杂和保护渣夹杂的数量,而顶渣氧化性则是影响钢液洁净度的重要原因.

2.2 顶渣氧化性对钢中活度氧的影响

转炉出钢后向钢包顶渣加入一定量的具有脱氧作用的改质剂以降低钢包顶渣氧化性. 图 8 是转炉出钢对顶渣进行改质后渣中 T. Fe 含量的变化情况. 通过对顶渣改质, T. Fe 由转炉终点的 19.18% 降低至 RH 进站时的 4.68%, RH 结束时渣中 T. Fe 略上升至 6.42%,上升的原因是由于 RH 深脱碳阶段钢液向渣

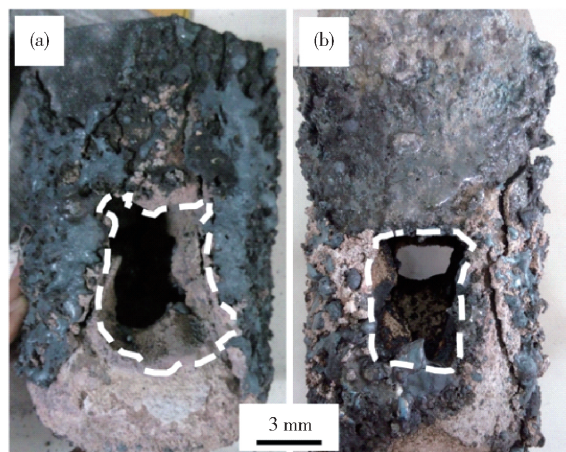


图6 不同炉渣平均 T. Fe 浇注结束时浸入式水口出口形貌对比. (a) 4.68%; (b) 7.50%

Fig. 6 Comparison between the outlet features of submerged entry nozzles after casting for different average T. Fe contents: (a) 4.68%; (b) 7.50%

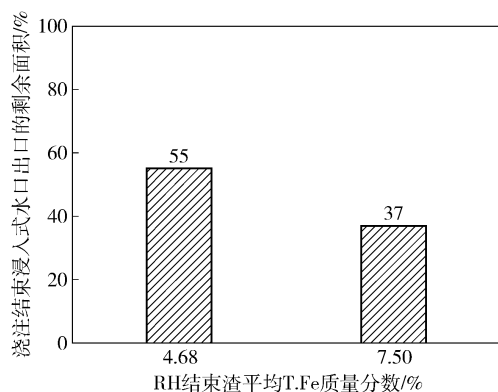


图7 RH 结束渣 T. Fe 含量对浸入式水口出口堵塞的影响

Fig. 7 Influence of T. Fe content in slag after RH treatment on the outlet clogging of submerged entry nozzles

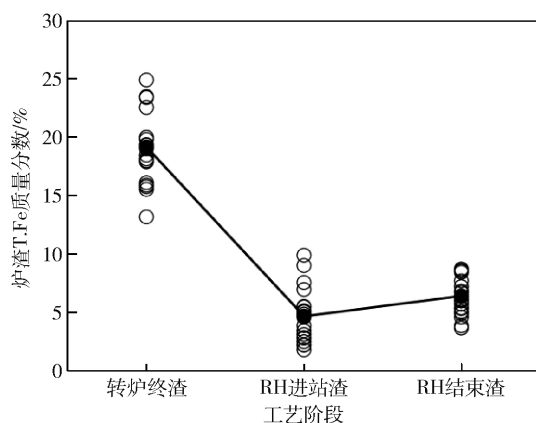


图8 钢包顶渣 T. Fe 变化

Fig. 8 Changes of T. Fe content in ladle slag

中传氧以及整个 RH 处理过程空气对顶渣氧化造成的。

图9 为实验炉次 RH 进站渣 T. Fe 含量和钢中

[O] 含量的关系。可见随渣中 T. Fe 含量的降低, 钢液中活度氧的变化趋势并不十分明显。但从整体看, 当渣中 T. Fe 质量分数为 1% ~ 5% 时, 对应钢中 [O] 质量分数的平均值为 487×10^{-6} , 当渣中 T. Fe 质量分数为 5% ~ 10% 时, 对应钢中 [O] 质量分数的平均值为 539×10^{-6} , 说明 RH 进站时钢中 [O] 与渣中 T. Fe 具有一定关系, 只是关系并不十分明显。这是因为 RH 进站时钢中 [O] 受三方面的影响: 一是转炉终点 [O]。对转炉出钢不改质的炉次, 终点 [O] 将决定 RH 进站 [O]。二是转炉终渣 T. Fe 和 RH 进站渣 T. Fe。这决定了从转炉终点到 RH 进站钢中 [O] 含量的变化; 三是钢中碳含量。由于实验炉次的对应的转炉终点 [O] 变化较大, 同时受改质效果的影响, 每一炉 $\Delta T. Fe$ (转炉终渣 T. Fe 与 RH 进站渣 T. Fe 的差) 相差较大, 因此 RH 进站时渣中 T. Fe 与钢中 [O] 虽有规律但并非特别明显。

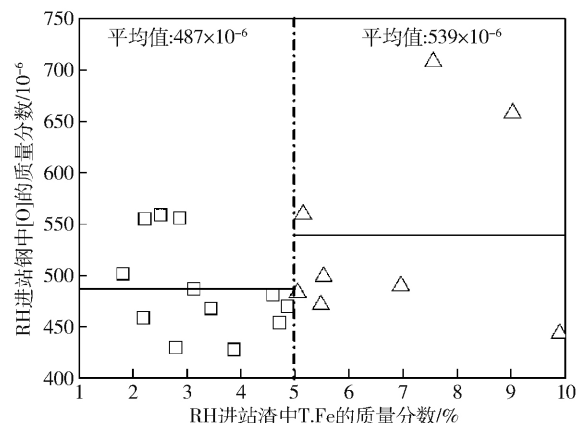


图9 RH 进站渣 T. Fe 与钢中 [O] 的关系

Fig. 9 Relationship between T. Fe content in ladle slag and [O] content in molten steel before RH treatment

图10 是转炉终点至 RH 进站顶渣 T. Fe 减少量与对应的钢中 [O] 的变化。由图可知, 渣中 T. Fe 降低明显的炉次其钢中 [O] 降低也较为明显。同时发现, 改质效果好、T. Fe 降低明显的炉次, 其进站 [O] 未必很低, 这主要是转炉终点 [O] 有所不同造成。超低碳钢顶渣氧化性控制的思路是降低顶渣氧化性的基础上保证钢中活度氧, 因为 RH 深脱碳过程需要通过这部分氧以达到超低碳的目的, 当钢中活度氧不能满足脱碳要求时, 则需要吹氧强制脱碳以完成超低碳目标。

图11 是 RH 进站渣 T. Fe 不同时对应的平均吹氧量以及吹氧炉次所占比例。由图可知, 当进站渣 T. Fe 较低时, 平均吹氧量较大, 同时强制脱碳炉次占实验总炉次的比例也较大, 这与图9 所述钢中 [O] 的情况相吻合。

图12 是 RH 进站渣 T. Fe 与铝脱氧前钢中 [O] 的对应关系。从整体看, 随着进站渣 T. Fe 降低, 铝脱氧前钢中 [O] 呈现增加趋势。这和 RH 进站 [O] 的分布

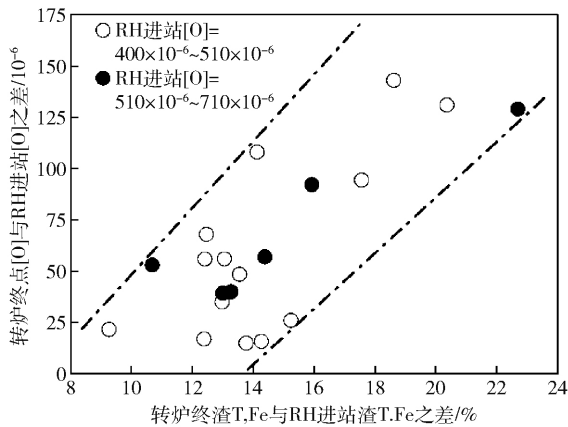


图 10 顶渣 T. Fe 变化与钢液 [O] 变化的关系

Fig. 10 Relationship between the change of T. Fe content in ladle slag and the change of [O] content in molten steel

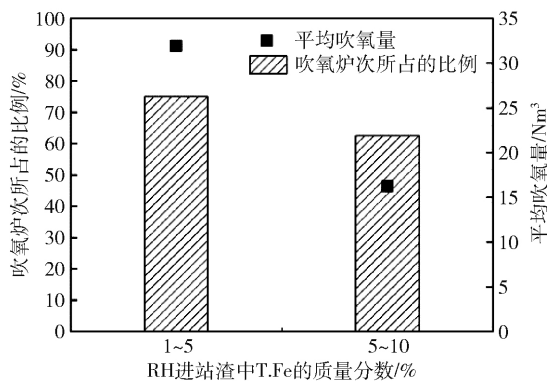


图 11 平均吹氧量和吹氧炉次比例

Fig. 11 Average oxygen blowing amount and the ratio of oxygen blowing heats

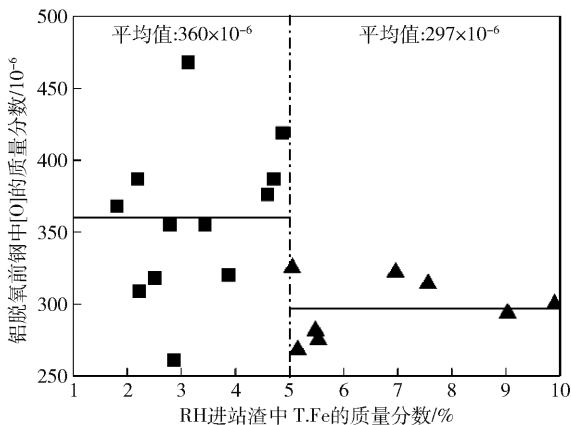


图 12 RH 进站渣 T. Fe 与铝脱氧前钢中 [O] 的关系

Fig. 12 Relationship between T. Fe in ladle slag before RH treatment and [O] in molten steel before Al deoxidation

情况密切相关, 根据前文可知, 当渣中 T. Fe 较低时, 进站时钢中 [O] 也相应较低, 因此需要吹氧强制脱碳的炉次和平均吹氧量也就越大, 由此导致铝脱氧前 (深脱碳后) 钢液中的 [O] 也就越大。图 13 是吹氧量和钢中 [O] 变化的关系。可见吹氧量越小, RH 进站至铝脱

氧前 [O] 的降低越明显, 不吹氧时 (吹氧量为零), RH 进站至铝脱氧前 [O] 的降低最多。由此图同样可以发现, 吹氧量越大, 铝脱氧前 [O] 的值也越大。

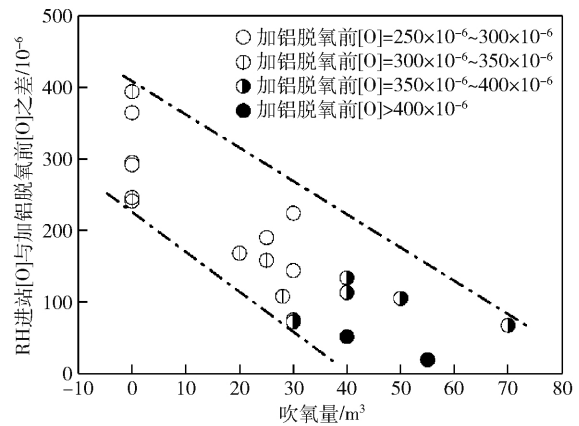


图 13 吹氧量和钢中 [O] 变化的关系

Fig. 13 Relationship between oxygen blowing amount and change in [O] content in molten steel

2.3 顶渣氧化性对钢中夹杂物的影响

根据夹杂物成分和形貌的不同, 夹杂物大致分为以下四类: 块状 Al_2O_3 夹杂物; 簇群状 Al_2O_3 夹杂物; $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Ti}_x\text{O}$ 夹杂物; $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Ti}_x\text{O}$ 夹杂物。图 14 是这四类夹杂物的典型形貌。图 15 ~ 图 17 分别是簇群状 Al_2O_3 夹杂物、 $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Ti}_x\text{O}$ 夹杂物和 $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Ti}_x\text{O}$ 夹杂物的能谱面扫描图。

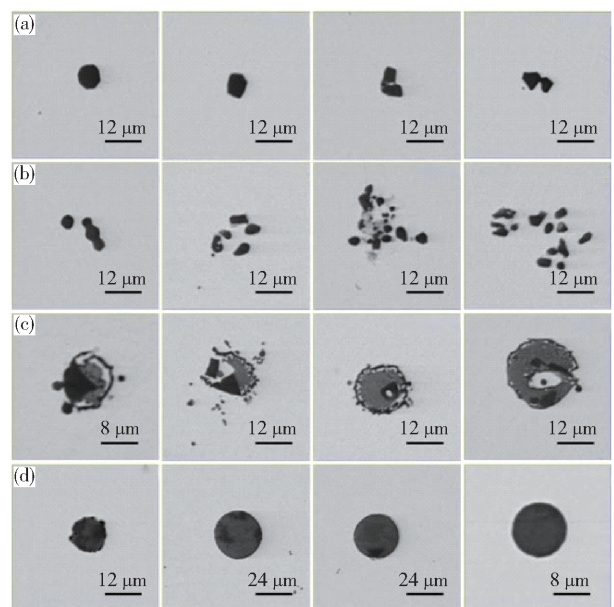


图 14 RH 真空处理结束钢中夹杂物的典型形貌: (a) 块状 Al_2O_3 夹杂物; (b) 簇群状 Al_2O_3 夹杂物; (c) $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Ti}_x\text{O}$ 夹杂物; (d) $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Ti}_x\text{O}$ 夹杂物

Fig. 14 Typical morphologies of inclusions after RH treatment: (a) Al_2O_3 block inclusions; (b) Al_2O_3 cluster inclusions; (c) $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Ti}_x\text{O}$ inclusions; (d) $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Ti}_x\text{O}$ inclusions

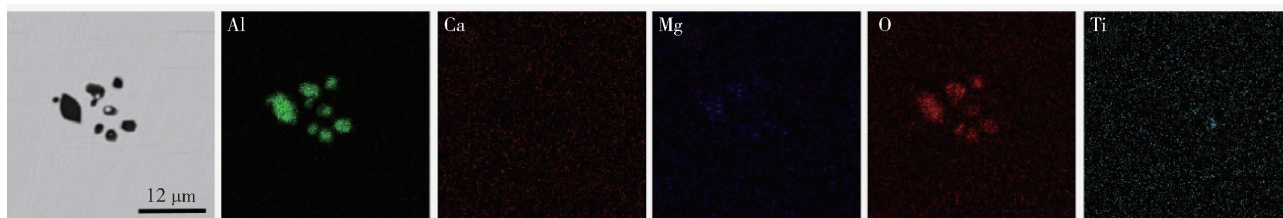
图 15 簇群状 Al_2O_3 夹杂物的能谱面扫描图

Fig. 15 Elemental mapping of a cluster alumina inclusion

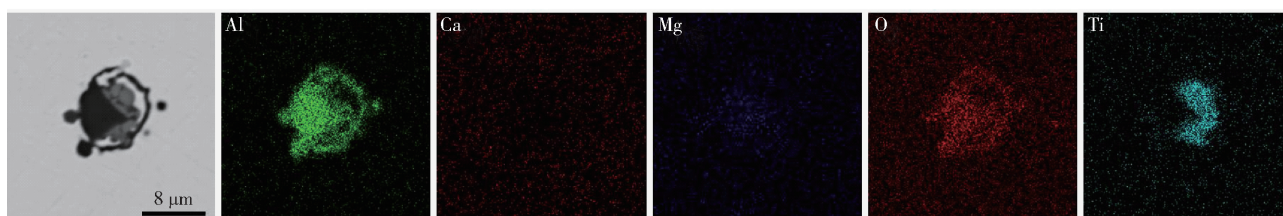
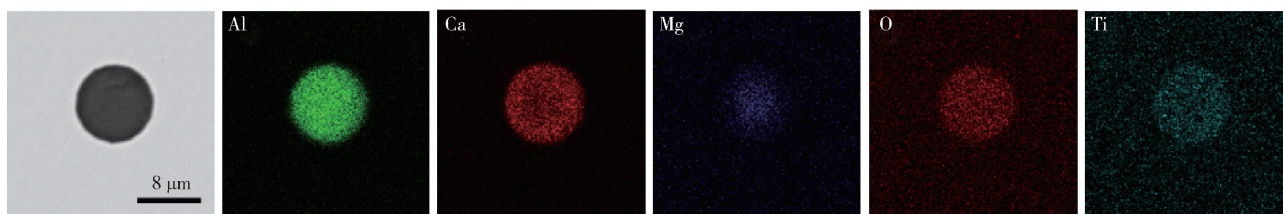
图 16 Al_2O_3 - Ti_xO 夹杂物的能谱面扫描图Fig. 16 Elemental mapping of an Al_2O_3 - Ti_xO inclusion图 17 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ - Ti_xO 夹杂物的能谱面扫描图Fig. 17 Elemental mapping of a $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ - Ti_xO inclusion

图 18 是 RH 结束渣 T. Fe 与 RH 结束 8 min 时钢中夹杂物数量的关系。如图所示,随着渣中 T. Fe 降低,钢中夹杂物的数量密度呈减少趋势。图 19 是这些炉次对应的铝脱氧前钢中 $[\text{O}]$ 含量。由图可知,夹杂物的数量受渣中 T. Fe 影响十分明显,而与脱氧前钢中 $[\text{O}]$ 无明显关系。这是因为该钢厂 RH 去除夹杂物的

能力较强,脱氧直接生成的夹杂物已不是限制环节,随着夹杂物的去除,氧由渣中不断向钢液传递而造成氧化铝夹杂源源不断地形成,成为影响 RH 结束后夹杂物数量的关键。

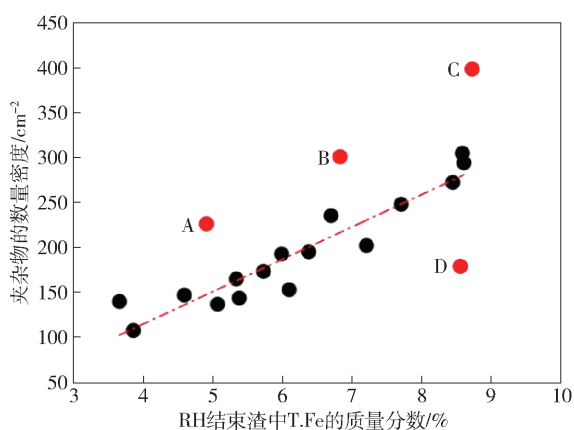
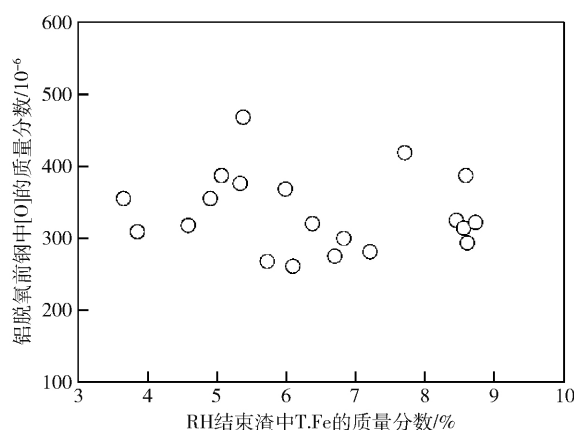


图 18 RH 结束渣 T. Fe 与钢中夹杂物的数量关系

Fig. 18 Relationship between the number of inclusions and the T. Fe content in slag after RH treatment

图 19 RH 结束渣 T. Fe 与对应的铝脱氧前钢中 $[\text{O}]$ 的关系Fig. 19 Relationship between T. Fe content in slag after RH treatment and $[\text{O}]$ content in molten steel before Al deoxidation

超低碳钢渣改质的目的除了降低顶渣氧化性外,还要求对顶渣的碱度和流动性进行调整,以增强炉渣

吸收夹杂物的能力. 文献报道, RH 进站时钢包顶渣的 $(\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 质量比可以表征炉渣吸收 Al_2O_3 夹杂物的能力^[2]. 根据日本川崎制铁(现为日本 JFE 钢铁公司)报道, 超低碳钢顶渣 $(\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 控制在 1.6 ~ 1.8 范围内时, 炉渣吸收 Al_2O_3 夹杂物的能力最强^[2]. 根据图 18 可知, A、B 和 C 三点对应的夹杂物数量密度明显高于趋势线, 而 D 点对应的夹杂物数量密度明显低于趋势线, 因此除了分析渣中 T. Fe 对夹杂物的影响外, 还应该对不同炉次的 $(\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 进行讨论. 表 3 为 A、B、C 和 D 四个炉次的钙铝比以及其余炉次的平均钙铝比. 由表可知, A、B 和 C 三炉距理想的钙铝比控制范围相差很大, D 铝的钙铝比控制在最优范围, 其余炉次的平均钙铝比略小于最优范围, 仍有进一步调整的空间.

表 3 RH 进站时渣中 $\text{CaO}/(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 质量比
Table 3 $(\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3)$ mass ratio in slag before RH treatment

A 炉	B 炉	C 炉	D 炉	其余炉次(平均值)
1.14	2.21	1.40	1.78	1.53

造成以上 A、B、C 三炉钙铝比控制不合理的原因是: 对于某些改质明显的炉次, 改质剂中铝与渣中氧化铁反应强烈, 渣中氧化铝含量升高明显, 如果此时改质剂中有效进入炉渣的 (CaO) 的量不能有效控制, 将导致 $(\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 偏高或偏低. 相应地, 顶渣对钢中 Al_2O_3 夹杂物的吸收能力也将大为下降. 为了使顶渣氧化性降低对改善钢液洁净度的作用更为明显, 需要保证顶渣对 Al_2O_3 夹杂的吸收能力.

图 20 是 RH 结束渣 T. Fe 与不同尺寸夹杂物数量的关系. 图 21 是 RH 结束渣 T. Fe 与 $(\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 的关系. 两图是多炉次的统计结果, 据图可知, 当 $(\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 1.4 ~ 1.8 时, T. Fe 降低对减少钢中夹杂物作用明显, 此时的限制因素是渣中 T. Fe; 当 $(\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 小于 1.4 时, 渣中 $(\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 成为影响夹杂物数量的主要因素.

同时发现, 当 $(\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 控制合理时, 小于 $10\ \mu\text{m}$ 的夹杂物数量减小趋势最为明显, 大于 $10\ \mu\text{m}$ 的夹杂物数量较少且与渣中 T. Fe 的变化规律无对应关系. 因此降低顶渣氧化性对降低 RH 结束后小尺寸夹杂物的作用最为明显, 这些小于 $10\ \mu\text{m}$ 的夹杂物在随后的镇静过程中不容易上浮去除, 却容易随着浇注的进行不断聚集长大, 成为大尺寸簇群状氧化铝夹杂物的来源.

2.4 镇静和浇注过程中氧化性顶渣的持续危害

定义 RH 真空处理结束到中间包过程钢液中酸溶铝的减少量为酸溶铝损失值, 记为 $\Delta[\text{Al}_s]$; 定义 RH 真空处理结束到中间包过程钢液中溶解钛的减少量为钛损失值, 记为 $\Delta[\text{Ti}]$. 图 22 是 RH 结束时渣中 T. Fe

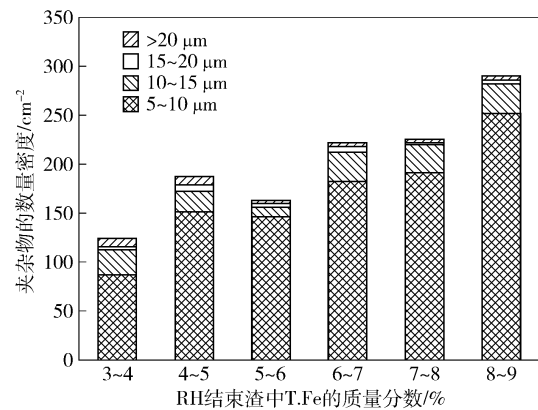


图 20 RH 结束渣 T. Fe 与不同尺寸夹杂物数量的关系

Fig. 20 Relationship between T. Fe in slag after RH treatment and the number of different size inclusions

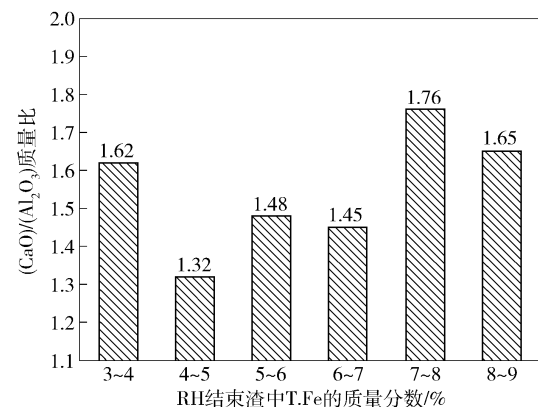


图 21 RH 结束渣 T. Fe 与进站渣 $(\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 质量比的关系

Fig. 21 Relationship between T. Fe content in slag after RH treatment and $(\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3)$ mass ratio in slag after RH treatment

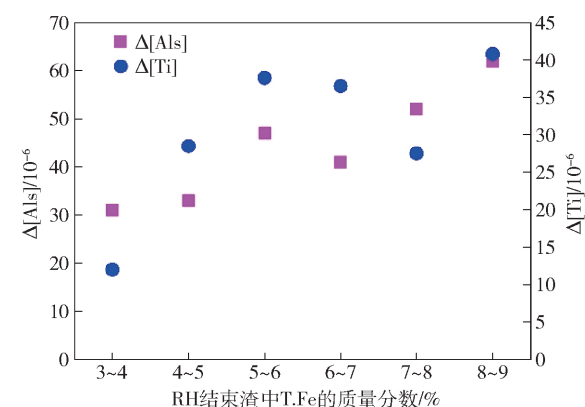
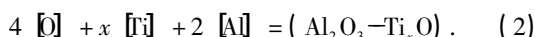


图 22 RH 结束渣 T. Fe 与 $\Delta[\text{Al}_s]$ 、 $\Delta[\text{Ti}]$ 的关系

Fig. 22 Relations of $\Delta[\text{Al}_s]$ and $\Delta[\text{Ti}]$ with T. Fe content in slag after RH treatment

与 $\Delta[\text{Al}_s]$ 和 $\Delta[\text{Ti}]$ 的关系. 由图可知, 随渣中 T. Fe 增加, 钢中 $\Delta[\text{Al}_s]$ 和 $\Delta[\text{Ti}]$ 呈增加趋势. 这是因为在镇静及后续的浇注过程中, 钢包顶渣的氧化性依然较高, 顶渣会持续地向钢液中传氧, 造成二次氧化, 如式(1) ~ 式(2)所示, 这部分 $[\text{O}]$ 与钢液中 $[\text{Al}_s]$ 和 $[\text{Ti}]$ 反应, 造

成 $[\text{Al}_2\text{O}_3]$ 和 $[\text{Ti}]$ 的损失值增大,由此生成较多的 Al_2O_3 夹杂物和 $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Ti}_x\text{O}$ 夹杂物,因此氧化性顶渣对洁净度的危害会持续至浇注结束。根据图 22 所示结果,应进一步采取措施,继续降低 RH 结束渣 T. Fe 含量。



3 结论

(1) 通过对顶渣改质,顶渣中 T. Fe 的质量分数由转炉终点的 19.18% 降至 RH 进站时的 4.68%,顶渣氧化性降低明显。

(2) 转炉出钢至 RH 进站过程,钢中 $[\text{O}]$ 的降低与顶渣 T. Fe 降低呈线性关系。RH 进站渣 T. Fe 较低的炉次,对应钢中 $[\text{O}]$ 较低,吹氧炉次和 RH 深脱碳过程的平均吹氧量均较多,导致这些炉次铝脱氧前的 $[\text{O}]$ 较高。

(3) 除少数炉次外,RH 真空处理结束后钢中夹杂物的数量与结束渣 T. Fe 呈线性关系,铝脱氧前钢中 $[\text{O}]$ 与 RH 结束后钢中夹杂物的数量无明显关系。

(4) RH 进站渣 $(\text{CaO})/(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 质量比过高或过低都会影响 Al_2O_3 夹杂物被顶渣的吸收,导致这些炉次夹杂物数量较多。

(5) 镇静和浇注过程氧化性顶渣会持续危害钢液洁净度,导致钢液 $[\text{Al}_2\text{O}_3]$ 和 $[\text{Ti}]$ 的损失值增大。

(6) 顶渣氧化性影响钢液洁净度,进而影响浸入式水口出口的堵塞。因此,顶渣氧化性较低的炉次,对应的热轧板卷缺陷率较低。

参 考 文 献

- [1] Hanao M, Kawamoto M. Influence of mold flux basicity on surface quality of ultra-low carbon steel slabs. *ISIJ Int*, 2008, 48(9): 1210
- [2] Li M Y, Zhang H B, Yang J, et al. Analysis and control of hot-rolled coil surface inclusions of low carbon low silicon aluminium killed steel. *Steelmaking*, 2014, 30(6): 28
(李梦英, 张洪波, 杨杰, 等. 低碳铝镇静钢热轧板表面夹渣的原因分析与控制. 炼钢, 2014, 30(6): 28)
- [3] 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)
- [4] Chen D F, Zhang X G, Zhang L F, et al. Simulation on the behavior of argon bubbles in slab continuous casting mold. *Iron Steel*, 2010, 45(4): 20
(陈登福, 张献光, 张立峰, 等. 板坯连铸结晶器内氩气泡行为的模拟研究. 钢铁, 2010, 45(4): 20)
- [5] Liu Z Q, Qi F S, Li B K, et al. Vortex flow pattern in a slab continuous casting mold with argon gas injection. *J Iron Steel Res Int*, 2014, 21(12): 1081
- [6] Zhang D J, Chen D F, Wang C N, et al. A study on water model and numerical simulation of flow field in slab casting mold with different width. *Spec Steel*, 2010, 31(1): 14
(张大江, 陈登福, 王翠娜, 等. 不同宽度板坯结晶器内流场的水模型和数值模拟研究. 特殊钢, 2010, 31(1): 14)
- [7] Ramos I C, Morales R D, Garcia-Hernandez S, et al. Effects of immersion depth on flow turbulence of liquid steel in a slab mold using a nozzle with upward angle rectangular ports. *ISIJ Int*, 2014, 54(8): 1797
- [8] Wu D F, Cheng S S. Effect of Sen design on surface fluctuation and solidifying shell in slab mold and its optimization. *Acta Metall Sin Engl Lett*, 2008, 21(5): 341
- [9] Furumai K, Matsui Y, Murai T, et al. Evaluation of defect distribution in continuously-cast slabs by using ultrasonic defect detection system and effect of electromagnetic brake on decreasing unbalanced flow in mold. *ISIJ Int*, 2015, 55(10): 2135
- [10] Kittaka S, Watanabe K, Kanki T, et al. Nippon steel in-mold electro-magnetic stirrer "M-EMS" for slab caster. *Nippon Steel Tech Rep*, 2002, 86: 68
- [11] Yue F, Cui H, Li P H, et al. Study on the optimum process of refining ULC steel by RH degasser. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2009, 30(Suppl 1): 53
(岳峰, 崔衡, 李朋欢, 等. RH 冶炼超低碳钢的最优工艺研究. 北京科技大学学报, 2009, 31(增刊 1): 53)
- [12] Ou H L, Bao Y P, Yue F, et al. A study of water modeling on circulation flow rate in RH vacuum refining process. *Spec Steel*, 2011, 32(3): 9
(欧洪林, 包燕平, 岳峰, 等. RH 真空精炼过程循环流量的水模型研究. 特殊钢, 2011, 32(3): 9)
- [13] Cui H, Chen B, Wang M, et al. Cleanliness control of IF steel during the RH refining process. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2011, 32(Suppl 1): 147
(崔衡, 陈斌, 王敏, 等. RH 精炼过程中 IF 钢洁净度控制. 北京科技大学学报, 2011, 33(增刊 1): 147)
- [14] Cui H, Tian E H, Chen B, et al. Cleanliness study of IF steel by holding in ladles after RH vacuum process. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2014, 35(Suppl 1): 32
(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. 北京科技大学学报, 2014, 36(增刊 1): 32)
- [15] Zhang J J, Gao W F, Cao T Y, et al. Research on optimization of flow field in WISCO 60 t two-strand tundish. *Steelmaking*, 2013, 29(5): 61
(张剑君, 高文芳, 曹同友, 等. 武钢 60t 双流连铸中间包流场优化试验研究. 炼钢, 2013, 29(5): 61)
- [16] Yuan P, Deng X X, Jiang M, et al. Investigation of subsurface hooks in continuous cast low carbon aluminum-killed steel slab. *Iron Steel*, 2015, 50(8): 24
(苑鹏, 邓小旋, 姜敏, 等. 低碳铝镇静钢铸坯皮下钩状坯壳. 钢铁, 2015, 50(8): 24)
- [17] Yuan P, Wang X H, Jiang M, et al. Inclusions in low carbon aluminum killed steel slabs at high casting speed. *Chin J Eng*, 2016, 38(3): 342
(苑鹏, 王新华, 姜敏, 等. 高拉速连铸低碳铝镇静钢铸坯中夹杂物. 工程科学学报, 2016, 38(3): 342)
- [18] Tsukaguchi Y, Hayashi H, Kurimoto H, et al. Development of

- swirling-flow submerged entry nozzles for slab casting. *ISIJ Int*, 2010, 50(5): 721
- [19] Yasunaka H, Yamanaka R, Inoue T, et al. Pinhole and inclusion defects formed at the subsurface in ultra low carbon steel. *Tetsu-to-Hagane*, 1995, 81(5): 529
- [20] Espejo V, Iwase M. A thermodynamic study of the system $\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_x\text{O}$ at 1673 K. *Metall Mater Trans B*, 1995, 26(2): 257
- [21] Taniguchi Y, Morita K, Sano N. Activities of FeO in $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{FeO}$ and $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaF}_2-\text{FeO}$ slags. *ISIJ Int*, 1997, 37(10): 956
- [22] 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
- [23] Suda M, Suitou M, Hasunuma J. The advanced mass production system of ultra low carbon steel at KSC' s Mizushima Work // *Steelmaking Conference Proceedings*. Toronto, 1992, 75: 229