

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

周业连¹ 何奇¹ 邓志银¹ 周剑丰² 朱苗勇¹

(1 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110819; 2 湖南华菱涟源钢铁集团有限公司技术中心, 娄底 417009)

摘要 检测分析了加改质剂(/% : 38 ~ 43Al, 20 ~ 30Al₂O₃, 27 ~ 31CaO, ≤6SiO₂, ≤6MgO) 改质 210 t 钢包顶渣前后超低碳钢(≤0. 01% C) 连铸坯中的夹杂物数量和尺寸分布, 通过热力学分析, 研究了改质剂对钢渣间氧平衡以及连铸坯中夹杂物的影响。结果表明, 钢包顶渣改质前的精炼渣样成分为(/%) 25. 55 ~ 39. 68CaO, 8. 51 ~ 15. 14SiO₂, 6. 34 ~ 27. 09MgO, 5. 92 ~ 6. 54Al₂O₃, 17. 32 ~ 22. 24FeO, 3. 86 ~ 7. 35MnO, 改质后渣样成分为(/%) 34. 36 ~ 40. 43CaO, 7. 69 ~ 11. 47SiO₂, 6. 42 ~ 7. 31MgO, 8. 31 ~ 25. 54Al₂O₃, 11. 94 ~ 20. 78FeO, 2. 17 ~ 2. 63MnO; 采用钢包顶渣改质处理, 实际渣中 $a_{(FeO)}$ 小于与钢液中氧相平衡的 $a_{(FeO)}$, 引起了钢液中的氧通过渣金界面向渣中扩散, 从而降低了钢液中氧活度, 显著改善钢液的洁净度和降低连铸坯中的夹杂物数量和尺寸, 水口结瘤得到明显改善; 同时, 虽然渣中的 $a_{(FeO)}$ 下降较小, 但钢液中氧活度得到了明显降低。

关键词 顶渣改质 杂物 超低碳钢 氧活度 水口堵塞

Effect of Ladle Top Slag Modification Treatment on Inclusions in Ultra-Low Carbon Steel in 210 t BOF-RH-Slab CC Flowsheet

Zhou Yelian¹, He Qi¹, Deng Zhiyin¹, Zhou Jianfeng² and Zhu Miaoyong¹

(1 School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819;
2 Technology Center, Hunan Hualing Lianyuan Iron and Steel Group Co Ltd, Loudi 417009)

Abstract The amount and distribution of inclusions in casting slab of ultra-low carbon steel (≤0. 01% C) processing in 210 t ladle with and without adding modifying agent (/% : 38 ~ 43Al, 20 ~ 30Al₂O₃, 27 ~ 31CaO, ≤6SiO₂, ≤6MgO) to ladle top slag have been examined and analyzed, and the effect of modifying agent on oxygen equilibrium between steel and slag and inclusions in casting slab is studied by thermodynamic analysis. Results show that the ingredient of refining slag sample for ladle top slag without adding modifying agent is (/%) 25. 55 ~ 39. 68CaO, 8. 51 ~ 15. 14SiO₂, 6. 34 ~ 27. 09MgO, 5. 92 ~ 6. 54Al₂O₃, 17. 32 ~ 22. 24FeO, 3. 86 ~ 7. 35MnO, and ingredient of refining slag sample for ladle top slag with adding modifying agent is (/%) 34. 36 ~ 40. 43CaO, 7. 69 ~ 11. 47SiO₂, 6. 42 ~ 7. 31MgO, 8. 31 ~ 25. 54Al₂O₃, 11. 94 ~ 20. 78FeO, 2. 17 ~ 2. 63MnO; with using ladle top slag modification treatment, the actual activity coefficient $a_{(FeO)}$ in slag is less than that in equilibrium with dissolved oxygen $a_{(FeO)}$ in steel led to oxygen diffusion from steel to slag through the interface of metal-slag, thus to lower the activity of oxygen in liquid, obviously improve the cleanliness of liquid and decrease the amount and size of inclusions in casting slab, and markedly reduce the nozzle clogging occurrence. Besides, although the decrease of $a_{(FeO)}$ in slag is small, whereas the activity of oxygen in liquid decreases significantly.

Material Index Top Slag Modification, Inclusion, Ultra-Low Carbon Steel, Oxygen Activity, Nozzle Clogging

超低碳钢具有无时效性、良好的深冲性能及较高的冷轧压下率等特点, 已被广泛应用于汽车、电工、家电等行业中。由于非金属夹杂物对钢的性能和产品质量存在不利影响, 因而, 超低碳钢对其的控制要求极其严格。

Suda 等^[1]和 Bommaraju 等^[2]研究表明, 高氧化性渣在超低碳钢冶炼过程中将严重恶化钢水洁净度和铸坯表面质量; Tanaka 等^[3]指出, 渣中 FeO 质量分数超过 12% 将会氧化溶解在钢液中 Al 和 Ti 等合金元素, 形成二次氧化夹杂, 易造成水口结瘤。而顶渣改质作为降低精炼渣氧化性的有效手段已得到了广泛认可^[4-5]。LF 处理工艺中, 进行顶渣改质可快

速造还原性渣, 缩短处理时间。而冶炼超低碳钢工艺过程中, 由于脱碳的需求, 钢液中的氧含量必须保持较高水平。若处理前期加入过量的改质剂, 易造成钢液中氧含量过低, 影响脱碳过程; 若处理前期加入少量的改质剂或处理后期加入改质剂, 将得不到较理想的改质效果。因此, 对改质剂加入 RH 顶渣表面后渣的氧化性以及钢液中氧含量的变化进行研究, 对准确理解改质处理十分重要。

本文结合超低碳钢 RH 精炼工艺过程, 对渣中 $a_{(FeO)}$ 和钢液中的 $a_{[O]}$ 的变化规律进行探究, 并通过热力学分析提出了引起渣中 $a_{(FeO)}$ 和钢液中的 $a_{[O]}$ 的变化机理, 合理解释了顶渣改质处理改善钢液洁

表1 顶渣改质剂主要成分 / %

Table 1 Main ingredient of top slag modifying agent / %				
SiO ₂	Al	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
≤6	38 ~ 43	20 ~ 30	27 ~ 31	≤6

表2 试验超低碳钢的主要化学成分 / %

Table 2 Main chemical composition of test ultra-low carbon steels / %						
牌号	C	Si	Mn	P	S	Alt
SPHD	≤0.01	≤0.05	≤0.50	≤0.035	≤0.035	≤0.02
SPHE	≤0.01	≤0.05	≤0.50	≤0.030	≤0.035	≤0.02

净度的效果,为现场生产操作提供理论依据和指导。

1 顶渣改质试验

试验钢厂生产超低碳钢(主要为 SPHD 和 SPHE)的工艺流程:顶底复吹转炉→RH 精炼→板坯连铸。改质试验时采用向吹氩站的钢包顶渣上均匀抛洒 120 kg 改质剂。钢包钢水量为 210 t,渣量为 1.5 t。改质剂和试验钢种的主要成分分别见表 1 和表 2。

未进行改质时,分别在进 RH 站,出 RH 站处取渣样,共取 2 炉,分别记为 SG1 和 SG2;钢包浇注到一半时,在靠近内弧 1/4 处,取 1 块铸坯样,如图 1 所示,共取 1 炉次,记为 SB1。进行改质试验时,在相同位置处取渣样,共取 3 炉,分别记为 SG3、SG4 和 SG5;铸坯样取样方式与未处理的相同,共取 2 炉次,记为 SB2 和 SB3。

对所取渣样的成分采用 X 射线荧光光谱分析法进行检测;对铸坯样首先切割成 (mm) 15 × 15 × 30 大小的样,随后进行打磨抛光,采用 Zeiss Axio Imager M2m 金相显微镜观察统计夹杂物的形状与尺寸分布。

2 改质试验结果与分析

2.1 顶渣改质前后铸坯中的夹杂物

图 2 是采用金相显微镜对所取铸坯样中夹杂物的尺寸统计结果。从图 2 中可以看出,试样中的夹杂物个数从未改质试验前的 3.62 个/mm² 分别降至改质试验后的 3.04 个/mm² 和 2.80 个/mm²,其中大于 3 μm 的夹杂物从 3.59 个/mm² 分别降至 1.25 个/mm² 和 0.73 个/mm²。由此可见,采用钢包顶渣改质处理,铸坯中夹杂物的数量和尺寸得到明显地降低,特别是 ≥3 μm 的夹杂物数量得到了显著地降低。

由于生产超低碳钢采用了 Al 脱氧,且不向钢液中添加其他合金元素,因此不难推断夹杂物类型为

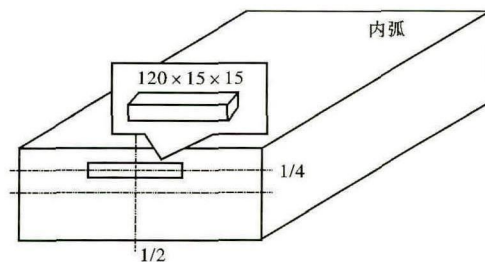


图1 取样位置示意图

Fig. 1 Schematics of sampling location at casting slab

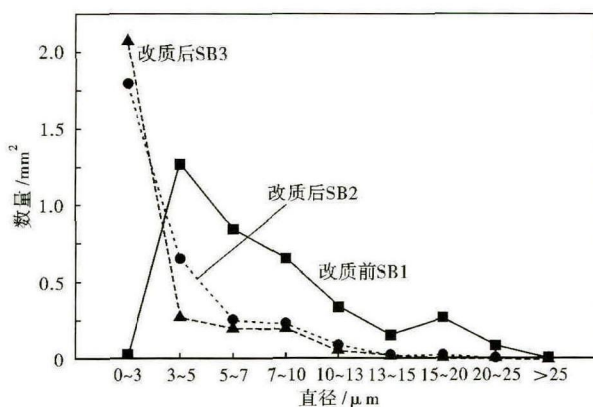


图2 钢包顶渣改质前(SB1)和改质后(SB2和SB3)铸坯夹杂物尺寸分布

Fig. 2 Distribution of inclusions size in casting slab without adding (SB1) and with adding (SB2 and SB3) ladle top slag modifying agent

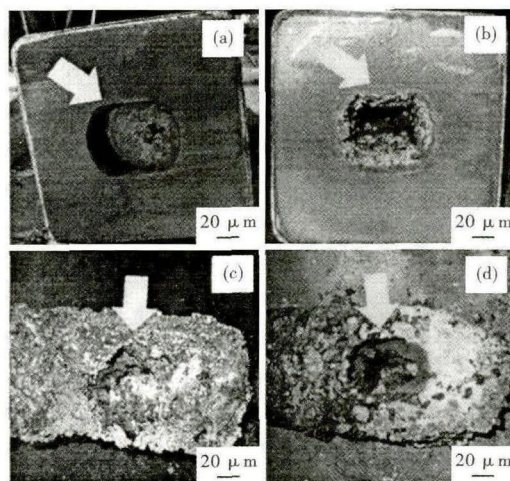


图3 改质试验前后浸入式水口堵塞情况:(a)改质前上水口;(b)改质后上水口;(c)改质前下水口;(d)改质后下水口

Fig. 3 Clogging status of submerged nozzle before and after top slag modifying test: (a) upper nozzle without adding modifying agent; (b) upper nozzle with adding modifying agent; (c) lower nozzle without adding modifying agent; (d) lower nozzle with adding modifying agent

氧化铝。钢液中的 Al₂O₃ 含量高,易导致水口结瘤,造成水口堵塞,影响生产效率。水口的堵塞情况也可从侧面反映钢液中 Al₂O₃ 夹杂物水平。图 3 是改

质试验前后,浇注相同炉次后浸入式水口照片。可以发现,改质后,浸入式水口的堵塞问题得到明显改善,从中也说明了改质后钢液中的夹杂物含量得到显著降低。

2.2 顶渣改质前后精炼渣成分

渣的成分对 Al_2O_3 夹杂吸附去除有重要影响^[6],为此对改质试验前后钢包顶渣的成分进行了检测分析,表 3 是主要成分的检测结果。其中 1 表示进 RH 站取得渣样,2 表示出 RH 站取得渣样。从中可以看出,改质后,渣中 Al_2O_3 的含量显著增加,而 FeO 和 MnO 的含量略有降低。

表 3 顶渣改质前后 RH 精炼渣样的成分 / %
Table 3 Ingredient of RH refining slag samples before and after adding modifying agent / %

项目	取样阶段	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	MnO
改质前	SG1 1	33.39	10.63	15.09	6.54	22.24	4.61
	SG1 2	25.55	8.51	27.09	5.92	20.03	7.35
	SG2 1	39.68	15.14	6.34	6.36	17.32	2.79
	SG2 2	35.30	13.85	13.22	6.52	18.21	3.86
改质后	SG3 1	38.22	9.45	6.62	15.16	18.29	2.63
	SG3 2	34.36	7.67	7.31	20.00	15.75	2.63
	SG4 1	40.43	9.74	7.45	14.18	14.97	2.17
	SG4 2	36.76	8.38	6.42	25.54	11.94	2.22
SG5	1	37.46	11.47	7.87	8.31	20.78	2.30
	2	34.70	10.72	6.86	15.67	19.13	2.32

Al_2O_3 夹杂在渣中溶解吸收的控制环节是其在渣中的质量传输^[7-9],而有关渣对 Al_2O_3 夹杂吸附去除速率与精炼渣的物理性质之间关系的研究则较少,仍有待进一步研究。由于在超低碳钢冶炼过程中 RH 处理时间长,精炼渣的整体成分变化相对较小,因此,可以忽略因精炼渣成分变化而带来的对夹杂物吸附去除的影响。

2.3 顶渣改质前后各阶段钢液中氧活度

王军、林丹的研究^[10]表明,脱碳终点钢液中氧活度低,可有效地降低铸坯中夹杂物的数量。为了进一步理解顶渣改质显著降低钢液中夹杂物这一现象,对改质前后的吹氩站、进 RH 站和脱碳结束后的钢液中氧活度进行分析,结果如图 4。从图 4 的对比可知,改质前,从氩站到进 RH 站过程中,平均氧活度下降了 108×10^{-6} ,而改质后,这一过程的平均氧活度下降了 172×10^{-6} 。可见,钢液中的氧活度有明显地下降。

根据图 4(c)和(f)可知,采用改质处理,脱碳结束后的钢液中平均氧活度明显低于未改质处理的钢液中平均氧活度。这将减少用于脱氧的铝合金量,继而降低脱氧产物 Al_2O_3 夹杂数量,从而提高了钢液的洁净度。

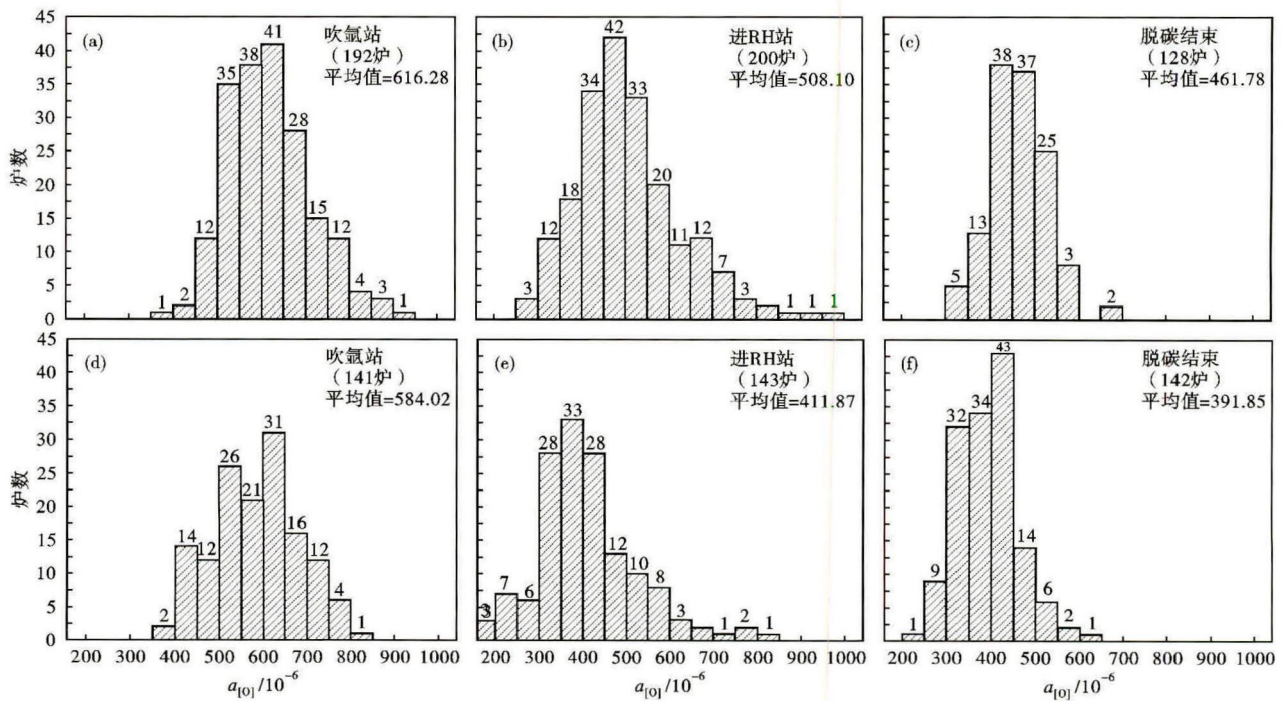


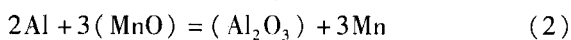
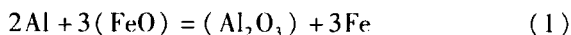
图 4 吹氩站(a)(d),RH 处理前(b)(e)和 RH 脱碳结束(c)(f)超低碳钢氧活度分布:(a)、(b)和(c)改质前;(d)、(e)和(f)改质后

Fig. 4 Distribution of activity of oxygen in ultra-low carbon steel at argon blowing station (a) (d), before RH process (b) (e) and end RH decarburization (c) (f): (a), (b) and (c) without adding modifying agent; (d), (e) and (f) with adding modifying agent

综上所述,采用改质处理后,渣中的 FeO 和 MnO 含量略有下降,而钢液中的氧含量明显地降低。对于此现象,在随后的热力学分析部分进行详细地解释。

3 顶渣改质的热力学分析

从上述分析结果可知,钢包顶渣改质处理后,钢液的洁净度得到了显著地改善,钢液中氧活度明显降低,而渣中 FeO 含量略有降低。改质剂加入到顶渣表面后,改质剂中的金属 Al 与渣中可被还原 FeO、MnO 发生如下反应:



以上反应将直接导致渣的氧化性降低, $a_{(\text{FeO})}$ 减小。而渣中 $a_{(\text{FeO})}$ 与钢液中的 $a_{[\text{O}]}$ 之间存在平衡关系,当渣中实际 $a_{(\text{FeO})}$ 小于与钢液中氧平衡的 $a_{(\text{FeO})}$ 时,钢液中的氧将向渣中扩散,引起钢液中氧活度的降低。而渣中的 $a_{(\text{FeO})}$ 与钢液中氧存在如下平衡关系^[11]:

$$\lg K = \lg \frac{a_{(\text{FeO})}}{a_{[\text{O}]}} = \frac{6320}{T} - 2.734 \quad (3)$$

式中: K -平衡常数; T -温度/K。

在超低碳钢的冶炼过程中,吹氩站、进 RH 站、RH 脱碳结束和出 RH 站的平均温度分别为 1 889、1 856、1 860、1 869 K,结合式(3),可得如图 5 所示的不同温度下钢液中氧活度与渣中 $a_{(\text{FeO})}$ 的平衡关系。从图 5 可以看出,渣中 $a_{(\text{FeO})}$ 和钢液中氧活度呈线性关系,从 1 853 K 到 1 893 K 温度下,反应平衡常数 K 分别是 4.023、4.191、4.368、4.554、4.750,即钢液中的氧活度每下降 100×10^{-6} ,渣中的 $a_{(\text{FeO})}$ 下

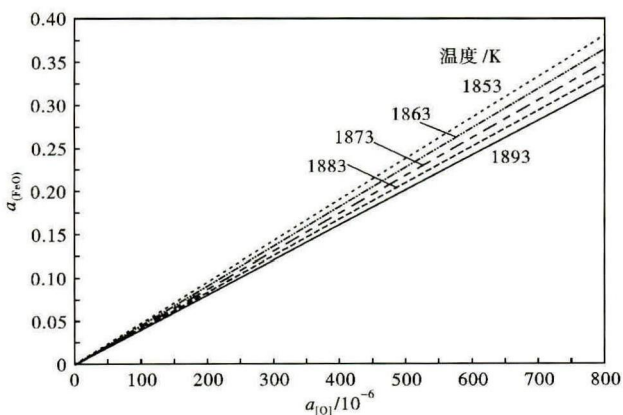


图5 1 853 ~ 1 893 K 时钢液中 $a_{[\text{O}]}$ 与渣中 $a_{(\text{FeO})}$ 的平衡关系
Fig. 5 Equilibrium relationship between liquid $a_{[\text{O}]}$ and slag $a_{(\text{FeO})}$ at 1 853 ~ 1 893 K

降不到 0.05。由此可以合理解释试验结果中钢液中的氧活度明显降低,而渣中 FeO 含量略有降低这一现象。

据各阶段钢液中氧活度的统计结果可知,改质处理时,吹氩站、RH 处理前和 RH 脱碳结束等阶段的平均氧活度分别为 584.02×10^{-6} 、 411.87×10^{-6} 和 391.85×10^{-6} 。结合 RH 处理过程中钢液的实际温度,与此钢液相平衡的渣中 $a_{(\text{FeO})}$ 应在 0.233 ~ 0.285,此渣中 $a_{(\text{FeO})}$ 数值很大。从热力学角度可知,当渣中实际 $a_{(\text{FeO})}$ 小于此平衡值,钢液中的氧将自发地向渣中扩散。因此,有必要给出实际渣中 $a_{(\text{FeO})}$ 值。

由于本研究的精炼渣碱度高、组分高,且温度高,不存在相近渣系,为本研究提供合理的 γ_{FeO} 。而假设熔渣完全由离子构成,离子熔渣中的分布完全是统计无序状态的完全离子溶液模型^[11]和以离子分子共存理论为基础 IMCT- N_i 模型^[12]可用于熔渣中各成分的活度计算。本文采用完全离子模型和 IMCT- N_i 模型分别计算 SG3、SG4 和 SG5 精炼渣样的 $a_{(\text{FeO})}$ 。

对完全离子模型,模型和计算过程见文献[11]。对 IMCT- N_i 模型,假设精炼渣中存在 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 、 O^{2-} 简单阳离子和阴离子, SiO_2 和 Al_2O_3 简单化合物以及 $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{FeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $2\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{MnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 $3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ 等复杂化合物。计算模型^[13]如文献中所述,得到一组非线性方程组,通过 MATLAB 求解,得出 $a_{(\text{FeO})}$,结果见表 4。

从表 3 中可知,实际渣中 $a_{(\text{FeO})}$ 小于平衡的 $a_{(\text{FeO})}$,钢液中的氧自发地向渣中扩散。且在氩站处的实际 $a_{(\text{FeO})}$ 和平衡 $a_{(\text{FeO})}$ 的差值更大,钢液中的氧

表 4 改质后平衡 $a_{(\text{FeO})}$ 与实际渣中 $a_{(\text{FeO})}$ 的对比

Table 4 Comparison between equilibrium slag $a_{(\text{FeO})}$ and actual slag $a_{(\text{FeO})}$ with adding modifying agent

试样编号	取样阶段	完全离子溶液模型	离子与分子共存理论模型	与钢液中氧平衡的 $a_{(\text{FeO})}$
SG3	1	0.151	0.162	0.236
	2	0.125	0.175	0.172
SG4	1	0.124	0.184	0.214
	2	0.079	0.173	0.191
SG5	1	0.176	0.187	0.293
	2	0.141	0.174	0.192

向渣中扩散的趋势更明显。

通过上述热力学分析结果可知,改质剂加入到顶渣表面后,钢液中的氧向渣中传递。由于冶炼超低碳钢,在 RH 脱碳前,钢液中氧活度非常高,与之平衡的渣中 $a_{(FeO)}$ 也大。改质剂抛洒到精炼渣表面后,改质剂中的 Al 和钢液中的 FeO 发生化学反应,导致渣中实际 $a_{(FeO)}$ 低于与钢液中氧平衡的 $a_{(FeO)}$,引起钢液中的氧通过平静的渣金界面向渣中扩散,使得钢液中氧活度明显降低。且通过钢渣间化学反应平衡常数可知,渣中的 $a_{(FeO)}$ 较小的降低,将引起钢液中氧活度的明显下降。同时,改质剂加入到顶渣表面后,钢液中的氧是通过渣金界面进入到渣中,不在钢液中产生的脱氧产物,因此可以显著提高钢液的洁净度。

综上所述,采用顶渣处理后,由于渣中 $a_{(FeO)}$ 与钢液中的 $a_{[O]}$ 之间平衡关系的存在和超低碳钢特殊的冶炼工艺要求,产生了虽然渣中 FeO 含量下降较

少,但钢液中氧含量降低的现象。因此,在 RH 处理前向顶渣表面加入一定量的改质剂,既可明显改善钢液的洁净度,又不影响后续脱碳过程。

4 结论

(1) 在改质剂 RH 顶渣表面加入 ($\%$) 38 ~ 43Al, 20 ~ 30Al₂O₃, 27 ~ 31CaO, $\leq 6SiO_2$, $\leq 6MgO$ 后,由于渣中 $a_{(FeO)}$ 与钢液中的 $a_{[O]}$ 之间平衡关系的存在和超低碳钢特殊的冶炼工艺要求,使得渣中 FeO 含量下降较少,而钢液中氧含量明显降低。

(2) 采用钢包顶渣改质处理,实际渣中 $a_{(FeO)}$ 小于与钢液中氧相平衡的 $a_{(FeO)}$,引起了钢液中的氧通过渣金界面向渣中扩散,从而降低了钢液中氧活度,钢中 $\geq 3 \mu m$ 夹杂物明显降低,因此显著改善了钢液的洁净度。

(3) 采用钢包顶渣改质处理,水口结瘤问题得到了明显地改善。

参考文献

[1] Suda M, Suitou M, Hasunuma J, et al. The Advanced Mass Production System of Ultra-low Carbon Steel at KSC's Mizushima Works [A]. Steelmaking Conference Proceedings, 1992, 75: 229-232.

[2] Bommaraju R, Trump D, Chaubal P, et al. Ladle Slag Treatment for Production of Ultra-low Carbon Steels [A]. 76th Steelmaking Conference, 1993: 457-464.

[3] Tanaka H, Nishihara R, Miura R, et al. Technology for Cleaning of Molten Steel in Tundish [J]. ISIJ International, 1994, 34(11): 868-875.

[4] 李伟东, 孙群, 齐磊. 超低碳钢顶渣改质技术研究 [A]. 成都: 第九届中国钢铁年会论文集 [C]. 2007: 1-4.

[5] 崔衡, 陈斌, 王敏, 等. RH 精炼过程中 IF 钢洁净度控制 [J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(S1): 1-4.

[6] Shannon G N, Sridhar S. Modeling Al₂O₃ Inclusion Separation Across Steel-Slag Interfaces [J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 2005, 34(6): 353-362.

[7] Taira S, Nakashima K, Mori K. Kinetic Behavior of Dissolution of Sintered Alumina into CaO-SiO₂-Al₂O₃ Slags [J]. ISIJ International, 1993, 33(1): 116-123.

[8] Yu X, Pomfret R J, Coley K S. Dissolution of Alumina in Mold Fluxes [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1997, 28(2): 275-279.

[9] Choi J Y, Lee H G, Kim J S. Dissolution Rate of Al₂O₃ into Molten CaO-SiO₂-Al₂O₃ Slags [J]. ISIJ International, 2002, 42(8): 852-860.

[10] 王军, 林丹. 浅析转炉终点控制对夹杂物的影响 [J]. 金属材料与冶金工程, 2012, 40(6): 20-22.

[11] 黄希祜. 钢铁冶金原理 (第 3 版) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.

[12] Yang X, Shi C, Zhang, et al. A Thermodynamic Model for Prediction of Iron Oxide Activity in Some FeO-Containing Slag Systems [J]. Steel Research International, 2012, 83(3): 244-258.

[13] 高艳宏. 含硼高炉钛渣粘性特征与结构的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.

周业连(1987-),男,博士生(东北大学),2010年安徽工业大学(本科)毕业,精炼过程夹杂物去除研究。
E-mail: zhyelian880130@163.com

收稿日期: 2014-12-20

邮发代号: 38-183

欢迎订阅 2015 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号: 38-183

定价: 16.00 元/期 96.00 元/年

邮编: 435001

地址: 湖北省黄石市黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社