

210 t BOF-RH-CC 炼钢过程无取向硅钢 XG800WR 洁净度的试验研究

吴绍杰^{1,2} 万 勇¹ 陈伟庆¹ 于彦冲¹

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2 新余钢铁公司技术中心, 新余 338001)

摘 要 两炉次无取向硅钢 XG800WR (/%: 0.003 ~ 0.004C, 0.71 ~ 0.75Si, 0.32 ~ 0.33Mn, 0.004 ~ 0.007S, 0.016P) 的炼钢流程为铁水预处理 (KR)-210 t 顶底复吹转炉-钢包吹氩-RH 脱碳精炼-230 mm × 1 220 mm 板坯连铸。53 t 中间包钢水过热度为 25 ~ 30 °C, 钢包到中间包采用长水口全程吹氩保护浇铸, 中间包至结晶器采用浸入式水口浇铸。结果表明, 在 RH、中间包、结晶器过程中钢中总氧以及夹杂物数量和尺寸均明显降低; 但在钢包到中间包过程 T[O]、[N] 和钢中夹杂物数量增加, 说明长水口浇铸过程存在二次氧化。连铸坯中 T[O]、[N] 平均值分别为 11×10^{-6} 和 30×10^{-6} , 显微夹杂物数量平均为 4 个/mm²。铸坯中的显微夹杂物主要为 3 ~ 5 μm 的 AlN, 同时存在少量的 MnS、Al₂O₃·AlN 和 Al₂O₃·MgO·MnS。

关键词 BOF-RH-CC 无取向硅钢 洁净度 T[O] [N] 夹杂物

Examination and Study on Cleanliness of Non-Oriented Silicon Steel XG800WR in 210 t BOF-RH-CC Steelmaking Process

Wu Shaojie^{1,2}, Wan Yong¹, Chen Weiqing¹ and Yu Yanchong¹

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;

2 Technology Center, Xinyu Iron and Steel Co Ltd, Xinyu 338001)

Abstract The steelmaking flow sheet for two heats non-oriented silicon steel XG800WR (/%: 0.003 ~ 0.004C, 0.71 ~ 0.75Si, 0.32 ~ 0.33Mn, 0.004 ~ 0.007S, 0.016P) is hot metal pretreatment (KR)-210 t top and bottom combined blown converter-ladle argon blowing-RH decarburization refining-230 mm × 1 220 mm slab casting. The superheating extent of liquid in 53 t tundish is 25 ~ 30 °C, whole casting is shielded by blowing argon with long nozzle from ladle to tundish and the submerged nozzle is adopted in casting from tundish to mold. Examination results show that the total oxygen content T[O] in liquid and the amount and size of inclusions in steel obviously decrease during RH, tundish and mold process, but the T[O], [N] and amount of inclusions increase from ladle to tundish process, it indicates that there is secondary oxidation of liquid in casting process with long nozzle. The T[O] and [N] in casting slab are respectively 11×10^{-6} and 30×10^{-6} , the average amount of micro-inclusions is 4 inclusions per square mm. The main micro-inclusions in casting slab are 3 ~ 5 μm AlN with minor MnS, Al₂O₃·AlN and Al₂O₃·MgO·MnS.

Material Index BOF-RH-CC Non-Oriented Silicon Steel, Cleanliness, T[O], [N], Inclusions

对新余钢铁公司的无取向硅钢 XG800WR 生产流程各个阶段的 T[O]、[N]、显微夹杂物的数量、尺寸及类型的演变情况进行了系统研究, 摸清了钢中夹杂物的主要来源、组成及变化规律, 找出了影响钢液及铸坯洁净度的主要因素, 提出了针对性的工艺改进措施。

1 生产工艺和取样分析

新钢二炼钢厂的无取向硅钢生产工艺流程: 铁水预处理 (KR) → 210 t 顶底复吹转炉 → 吹氩站 → RH 精炼 → 连铸 → 精整、辊道热送 → 热轧 → 冷轧。入炉铁水经过铁水预处理后 [S] ≤ 0.01%, 温度 1 250 ~ 1 350 °C。转炉顶底复合吹炼后挡渣出钢, 出钢时加入中锰脱氧合金化及石灰渣洗, 转炉终点控制 [C] 0.03% ~ 0.04%、T[O] (600 ~ 800) × 10⁻⁶, 出钢温度 1 680 ~ 1 695 °C。钢包在吹氩站停

留时间为 5 ~ 10 min, RH 精炼时间为 40 ~ 50 min, 精炼过程采用深脱碳处理, 真空度为 500 ~ 1 000 Pa, 脱碳后加铝脱氧及硅铁、中锰、铝合金化。钢包到中间包采用长水口全程吹氩保护浇铸, 中间包到结晶器采用浸入式水口保护浇铸, 中间包覆盖剂为超低碳覆盖剂, 连铸保护渣为硅钢专用保护渣。中间包容量为 53 t, 过热度为 25 ~ 30 °C, 铸机为 2 流立弯式板坯连铸机, 铸坯拉速为 1 m/min, 二冷比水量为 0.9 L/kg, 浇铸断面为 230 mm × 1 220 mm。

试验选取生产无取向硅钢 XG800WR 时同一浇注的 5143、5145 炉次, 分别在转炉出钢、吹氩进站、RH 进站、RH 出站、中间包稳态浇铸 5 个工序点提取钢样和渣样, 在铸坯宽度 1/4 处距内弧 1/4 处切取钢样, 各工序点的钢样化学成分和炉渣的组成见表 1。钢样经线切割加工成气体样和金相样, 用于分析钢中氧、氮含量和显微夹杂物。钢样的夹杂

表 1 生产过程所取钢样的化学成分和炉渣的组成 / %
Table 1 Chemical composition of steel and ingredient of slag sampling in steelmaking process / %

炉次	取样点	C	Si	Mn	S	P	Als	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	TFe
5143	转炉出钢	0.056	0.008	0.13	0.008	0.020	-	46.21	9.90	10.45	1.26	4.44	18.87
	吹氩进站	0.043	0.003	0.15	0.008	0.012	-	46.06	5.20	4.26	13.8	4.91	16.61
	RH 进站	0.045	0.002	0.14	0.008	0.012	-	41.66	4.63	6.42	18.58	6.64	13.20
	RH 出站	0.003	0.695	0.33	0.007	0.016	0.42	31.32	15.2	7.05	28.72	6.35	6.71
	中间包平均	0.003	0.711	0.33	0.007	0.016	0.42	22.06	33.1	9.09	19.66	1.91	6.59
	铸坯平均	0.003	0.710	0.33	0.007	0.016	0.42	29.37	31.5	6.39	13.57	0.13	1.64
5145	转炉出钢	0.069	0.016	0.18	0.005	0.020	-	45.67	10.8	11.20	2.67	4.82	18.39
	吹氩进站	0.037	0.005	0.16	0.004	0.015	-	38.96	6.58	8.27	15.44	6.43	18.16
	RH 进站	0.031	0.002	0.13	0.005	0.015	-	25.54	5.4	16.25	15.28	7.44	24.40
	RH 出站	0.004	0.765	0.30	0.005	0.016	0.36	30.97	14.6	12.39	22.91	6.09	8.16
	中间包平均	0.004	0.748	0.33	0.004	0.016	0.34	25.17	22.4	4.33	34.61	0.76	2.99
	铸坯平均	0.004	0.746	0.32	0.004	0.016	0.34	29.23	31.8	5.59	10.76	0.13	1.30

物数量、尺寸、形貌及成分分别采用光学显微镜、扫描电镜和电子探针进行观察和分析。

2 试验结果与分析

2.1 钢中T[O]和[N]的变化

从图 1(a)可以看出：

(1)两炉钢的T[O]先增加后减少,吹氩进站处钢中的T[O]最高,分别为 782×10^{-6} 、 $1\,297 \times 10^{-6}$ 。从转炉出钢到吹氩进站,钢液中T[O]显著增加。原因是转炉第 1 次倒炉取样时采用定氧探头测定的钢中溶解氧活度未达到出钢要求 $(600 \sim 800) \times 10^{-6}$,进行了补吹氧后不取样直接出钢,导致吹氩站检测的钢样T[O]显著增加。

(2)从吹氩站到 RH 进站,T[O]明显下降,原因是氩气的搅拌作用下,加速了钢液中氧化物夹杂的上浮排出钢液,另外,转炉出钢时的钢水过氧化,钢中T[O]过高,在吹氩时钢中[O]和 Fe 反应生成了 FeO,进入炉渣,降低了钢中T[O]。

(3)RH 真空脱碳后加铝脱氧及硅、锰合金化,两炉钢 RH 后T[O]分别降到 37×10^{-6} 、 48×10^{-6} 。

(4)从 RH 出站到中间包稳态浇铸,5143 炉钢中T[O]降低了 8×10^{-6} ,5145 炉钢中T[O]增加了 5×10^{-6} ,说明在浇铸过程中钢水可能存在二次氧化现象,因此应该加强保护浇铸。

(5)从中间包到铸坯,两炉钢的T[O]分别降到了 10×10^{-6} 、 12×10^{-6} ,说明在中间包和结晶器内有大量的夹杂物上浮去除,显著提高了铸坯的洁净度。

从图 1(b)可以看出：

(1)两炉钢[N]在吹氩和

真空处理过程有一些波动,但从转炉出钢到 RH 出站,[N]基本不变。

(2)从 RH 出站到中间包稳态浇铸,5143 炉的[N]从 17×10^{-6} 增加到 22×10^{-6} ;5145 炉的[N]从 14×10^{-6} 增加到 34×10^{-6} 。5145 炉的[N]显著增加,相应 5145 炉浇铸过程中总氧含量也增加,说明钢水存在二次氧化,应特别加强长水口的氩封。

(3)从中间包到铸坯,两炉钢的[N]仅有极少增加,说明浸入式水口密封较好。

2.2 RH 真空处理过程钢水总氧含量的预测模型

从钢水中氧的平衡出发,钢液中总氧的去除速

度为^[1]：
$$-\frac{d[O]_t}{dt}=k_1[O]_t-k_2 \tag{1}$$

$$[O]_t=\frac{k_2}{k_1}[1-e^{-k_1t}]+[O]_0e^{-k_1t}$$
$$(t=0,[O]_t=[O]_0;t=t,[O]_t=[O]_t) \tag{2}$$

$$k_1=-\frac{1}{t}\ln\frac{[O]_t-[O]_\infty}{[O]_0-[O]_\infty}$$
$$(t\rightarrow\infty,[O]_t\rightarrow[O]_\infty) \tag{3}$$

$$k_2=\frac{48}{54}\alpha k_3 \tag{4}$$

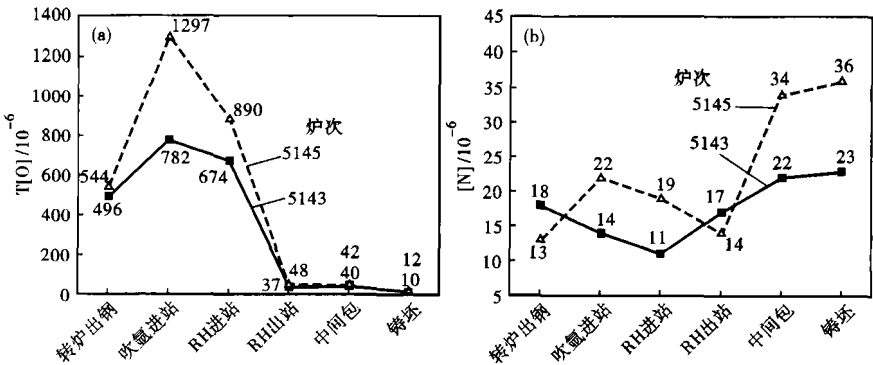


图 1 各工序两炉次钢中T[O](a)和[N](b)的变化
Fig.1 Changes of T[O] (a) and [N] (b) at each procedure stage of two heats steel-making process

$k_3 = a + b \times (\text{FeO} + \text{MnO}) \tag{5}$

$b = \frac{\Delta[\text{Al}]}{t \times (\text{FeO} + \text{MnO})} \tag{6}$

式中： k_1 - 夹杂物上浮去除速度常数，取现场经验值 0.236 min^{-1} ； k_2 - 二次氧化造成的钢水中氧的增加速度； k_3 - 钢液中酸溶铝 $[\text{Al}]$ s 的氧化速度； α - 钢渣界面、钢液与耐火材料界面反应生成的夹杂物在钢水中的残留比例； a - 钢包渣及耐火材料中 SiO_2 对钢液中 $[\text{Al}]$ s 的氧化速度，取现场经验值 $9.475 \times 10^{-6}/\text{min}$ ； b - 钢包渣中 FeO 及 MnO 对钢水中 $[\text{Al}]$ s 的氧化速度常数，取现场经验值为 $0.634 \times 10^{-6}/\text{min}$ 。RH 处理过程钢包钢水中夹杂物存在以下平衡：总的铝损失生成的夹杂物量 $\times (1 - \alpha)$ + 钢水中原来存在的 Al_2O_3 夹杂上浮到渣层的数量 = 渣中吸附的 Al_2O_3 夹杂总量。

两炉钢 RH 精炼过程中酸溶铝总损失平均值为 739×10^{-6} ，则在 210 t 钢包中有 $739 \times 10^{-6} \times 210 \times 10^3 \times 102/54 = 293.1 \text{ kg}$ 的 Al_2O_3 夹杂物生成。由金相观察得知，RH 到站时钢水中 Al_2O_3 夹杂物为 0.068 7%，处理后为 0.024 1%，则 210 t 钢包钢水中自身 Al_2O_3 夹杂物上浮去除的量为 $210 \times 10^3 \times (0.068 7\% - 0.024 1\%) = 93.66 \text{ kg}$ 。由渣样化学分析得知，RH 处理前后渣中平均 Al_2O_3 增加 8.89%。钢包渣层厚度实测平均值为 70 mm，钢包直径为 3 748 mm，渣的密度取 $3 591 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。则 RH 处理前后钢包渣中 Al_2O_3 的增加量为 $8.89\% \times 3.14 \times 3.748^2 \times 0.07 \times 3 591/4 = 246.42 \text{ kg}$ 。则有 $293.1 \times (1 - \alpha) + 93.66 = 246.42$ ，得到 $\alpha \approx 0.479$ 。将上述各常量值代入式(2)、(4)、(5)，整理得到 RH 真空处理过程中钢水中总氧含量的预测公式为：

$$[\text{O}]_t = [17.094 + 1.144(\text{FeO} + \text{MnO})] (1 - e^{-0.236t}) + [\text{O}]_0 e^{-0.236t} \tag{7}$$

由图 2 可见，RH 精炼(45 min)结束时 5143、5145 炉的钢液总氧含量的预测值分别为 39×10^{-6} 、 55×10^{-6} ，与实际生产中 RH 出站时钢液的总氧含量实测值(分别为 37×10^{-6} 、 48×10^{-6})非常接近。

2.3 炉渣碱度和 TFe 含量变化

由图 3 可以看出：

(1) RH 精炼前，两炉钢炉渣碱度很高，为 4.0~9.0。由

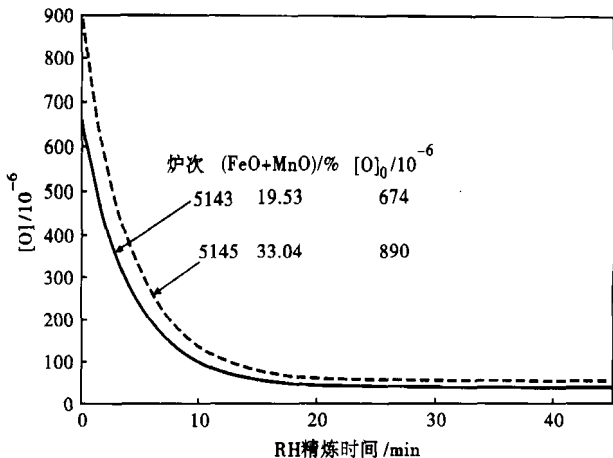


图 2 RH 处理过程两炉次钢水中氧含量的预测曲线
Fig.2 Forecast curves of oxygen content in two heats liquid during RH refining process

于 RH 脱碳后加铝和硅铁脱氧合金化，脱氧产物进入炉渣，RH 出站后，两炉钢的炉渣碱度都降到 2.0 左右。

(2)从转炉出钢到 RH 出站，5143 炉和 5145 炉的 TFe 含量均呈下降趋势，分别从 18.87% 降到 6.71% 和 18.39% 降到 8.16%，但在吹氩进站到 RH 进站，TFe 从 18.16% 增加到 24.40%，这是因为 5145 炉吹氩进站的钢中 T[O] (0.129 7%) 过高，向渣中传递氧，导致 RH 进站时炉渣 TFe 含量明显升高。

2.4 钢中夹杂物数量和尺寸变化

由图 4(a,b)可以看出：

(1)两炉钢的显微夹杂物数量分别从转炉出钢时的 34 个/mm²、32 个/mm² 均降低到铸坯的 4 个/mm²。

(2)5143 炉钢从 RH 出站到中间包，钢中夹杂物数量出现了增加，与该过程 T[O] 的增加相对应。

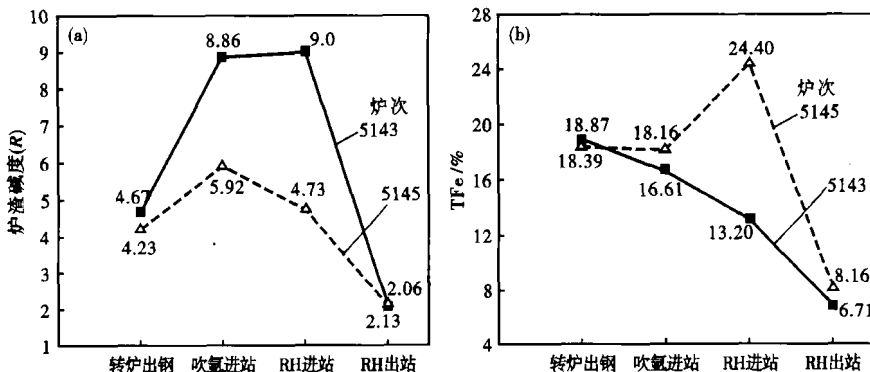


图 3 两炉钢各工序冶炼过程炉渣碱度(R) (a) 和 TFe(b) 的变化
Fig.3 Changes of slag basicity (R) (a) and TFe in slag (b) at each procedure stage of two heats steelmaking process

(3)经吹氩站处理,由于钢中夹杂物聚集长大上浮,到 RH 进站时,两炉钢中夹杂物平均直径增加,分别为 9.56、11.4 μm 。之后的工序,钢中夹杂物上浮排出而不断减少,铸坯的夹杂物平均直径最小,分别只有 4.1、4.2 μm 。

2.5 铸坯中非金属夹杂物的类型和来源

由图 5 可以看出:
(1)铸坯中夹杂物主要为 AlN 和 MnS。单独析出的 AlN 数量较多,尺寸 3 ~ 5 μm ,单独 MnS 数量很少,MnS 主要依附 Al_2O_3 、AlN 上析出。

(2)铸坯存在少量 AlN 和 Al_2O_3 、MnS 和 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 形成的复合夹杂物,未发现单独的 Al_2O_3 。

(3)夹杂物中存在少量的镁铝尖晶石 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ [2]。MnS 和 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 形成的复合夹杂物一般以 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 为核心,周围包裹一层 MnS。AlN 的晶核是依附在 Al_2O_3 夹杂表面上形成的,当形成的晶核大于临界晶核半径后,Al、N 原子就开始不断地向晶核上迁移、聚集,AlN 晶体随之不断地长大,在 AlN 晶体长大完成后,MnS 的晶核又依附在 AlN 晶体表面上形成,但是由于迁移过来的原子较少,所以只在 AlN 表面形成了一小部分 [3]。

3 结论

(1)采用 BOF-RH-CC 工艺生产无取向硅钢,在 RH、中间包、结晶器过程中钢中总氧以及夹杂物数量和尺寸均明显降低,说明在这 3 个工序环节的夹杂物去除效果显著;但在钢包到中间包过程出现总氧和夹杂物数量增加现象,钢中 N 含量的增加也发生在此过程,说明长水口浇铸过程存在二次氧化,应重点加强长水口氩封。

(2)两炉连铸坯中 T[O]、[N] 平均值分别为 11×10^{-6} 和 30×10^{-6} ,显微夹杂物数量平均为

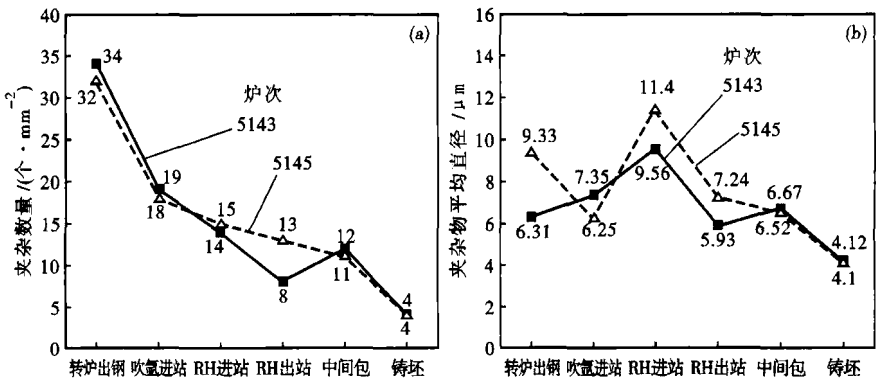


图 4 各工序两炉次钢中显微夹杂物的数量(a)和平均尺寸(b)
Fig. 4 Amount (a) and average size (b) of micro-inclusions in steel at each procedure stage of two heats steelmaking process

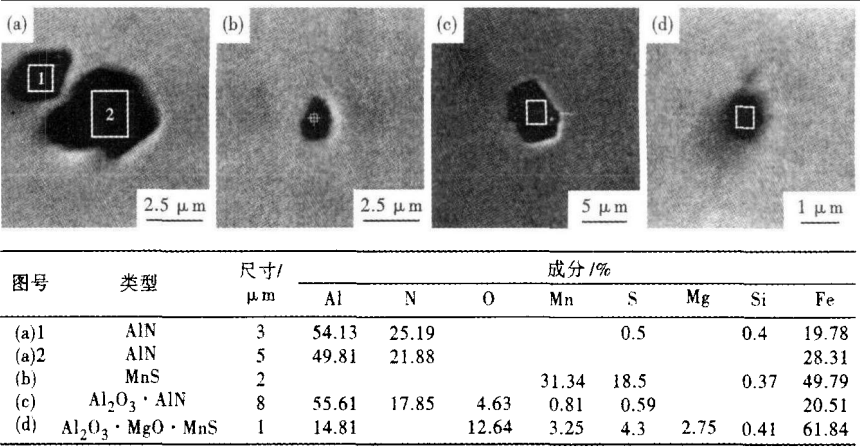


图 5 铸坯中的典型显微夹杂物形貌和 SEM 能谱分析结果
Fig. 5 Morphology and SEM energy spectrum analysis results of typical micro-inclusions in casting slab

4 个/ mm^2 ,洁净度达到较高水平;铸坯中的显微夹杂物主要是在凝固过程中随温度降低析出的 AlN,同时存在少量的 MnS、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{AlN}$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO} \cdot \text{MnS}$ 。

参考文献

1 张立峰. 纯净钢水清洁度的工艺及理论研究:[博士学位论文]. 北京:北京科技大学,1998
2 Mizuno K. Effects of Al and Ca in Ferrosilicon Alloys for Deoxidation on Inclusion Composition in Type 304 Stainless Steel. Iron and Steel-maker, 2001, 28(8): 93
3 攀立峰, 许学勇. 高牌号无取向硅钢铸坯夹杂物浅析. 宽厚板, 2007, 13(4): 21

吴绍杰(1973-),男,博士研究生,硕士,高级工程师,华东冶金学院毕业,钢的质量研究与品种开发。

收稿日期:2011-05-29