

## SWRCH22A 冷镦钢 100 t LF 精炼造渣制度的分析和工艺优化

高长益<sup>1</sup> 张毅<sup>2</sup> 谢祥<sup>2</sup> 王琳松<sup>3</sup> 郑家良<sup>1</sup> 王谦<sup>4</sup>

(水城钢铁集团公司 1 技术中心; 2 炼钢厂, 六盘水 553028; 3 水城钢铁集团公司, 六盘水 553028;

4 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

**摘要** 为减少钢中夹杂物和对夹杂物变性处理, 防止连铸水口结瘤, 对 100 t LF 5 炉 SWRCH22A 冷镦钢 ( $\% : 0.18 \sim 0.20\text{C}, 0.44 \sim 0.62\text{Si}, 0.85 \sim 0.89\text{Mn}, 0.012 \sim 0.015\text{P}, 0.006 \sim 0.009\text{S}, 0 \sim 0.004\text{Ca}, 0.0007 \sim 0.0010\text{B}, 0.011 \sim 0.088\text{Als}$ ) 夹杂物钙处理进行了 Ca-Al, Al-O, Al-S, Ca-S 平衡热力学计算和氧氮分析。得出 1 873 K [Ca]-[Al],  $a_{\text{[O]}}$ -[Al] 和 [S]-[Al] 平衡曲线, 1 823 ~ 1 923 K [Ca]-[S] 平衡曲线, 和 5 炉钢对应的实测值。通过分析, 得出优化 LF 精炼工艺: (1) 精炼终渣  $\text{MgO} = 6\%$ 、 $\text{SiO}_2 < 6\%$ 、 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.6 \sim 1.8$ ; (2) 转炉下渣量 700 kg 左右, 精炼终渣量 2 000 kg 左右; (3) 根据精炼终渣  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.6 \sim 1.8$  的目标来决定造渣料的加入量; (4) 避免喂钙线时钢水剧烈翻腾, 并防止精炼结束到中间包过程钢水的氧化。

**关键词** 冷镦钢 SWRCH22A 100 t LF 精炼 造渣制度 水口结瘤 工艺优化

### Analysis on Slagging Schedule in 100 t LF Refining of Cold Heading Steel SWRCH22A and Process Optimization

Gao Changyi<sup>1</sup>, Zhang Yi<sup>2</sup>, Xie Xiang<sup>2</sup>, Wang Linsong<sup>3</sup>, Zheng Jialiang<sup>1</sup> and Wang Qian<sup>4</sup>

(1 Technology Center, 2 Steelmaking Plant, Shuicheng Iron and Steel Group Corp, Liupanshui 553028;

3 Shuicheng Iron and Steel Group Corp, Liupanshui 553028;

4 College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

**Abstract** In order to reduce inclusions in steel and modify inclusions to prevent nozzle clogging during casting process, the equilibrium thermodynamic calculations of Ca-Al, Al-O, Al-S and Ca-S, and the analysis of oxygen and nitrogen of 5 heats 100 t LF of cold heading steel SWRCH22A ( $\% : 0.18 \sim 0.20\text{C}, 0.44 \sim 0.62\text{Si}, 0.85 \sim 0.89\text{Mn}, 0.012 \sim 0.015\text{P}, 0.006 \sim 0.009\text{S}, 0 \sim 0.004\text{Ca}, 0.0007 \sim 0.0010\text{B}, 0.011 \sim 0.088\text{Als}$ ) by calcium treatment on inclusions in steel have been carried out. The equilibrium curves of [Ca]-[Al],  $a_{\text{[O]}}$ -[Al] and [S]-[Al] at 1 873 K and [Ca]-[S] at 1 823 ~ 1 923 K are obtained and compared to corresponding measured data of 5 heats. By analysis the optimized LF refining process: (1) end refining slag-  $\text{MgO} = 6\%$ ,  $\text{SiO}_2 < 6\%$  and  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.6 \sim 1.8$ ; (2) amount of BOF tapping slagging being about 700kg, amount of end refining slag being about 2 000 kg; (3) according to the aim end refining slag with  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3 = 1.6 \sim 1.8$  to define the amount of charging slag materials; and (4) avoiding the boiling of liquid steel during feeding calcium wire process and the oxidation of liquid during process of end refining to tundish.

**Material Index** Cold Heading Steel SWRCH22A, 100 t LF Refining, Slagging Schedule, Nozzle Clogging, Process Optimization

水城钢铁集团公司(水钢)采用“100 t 顶底复吹转炉-LF 精炼-150 mm × 150 mm 方坯连铸-铸坯加热-高速线材轧制”工艺生产的  $\Phi 5.5$  mm SWRCH22A 冷镦钢用于制作螺钉、销钉等标准件。由于采用冷镦制作标准件时变形速度快、变形量大、变形很不均匀,对冷镦用钢的质量要求很高,对钢中夹杂物控制很严格,特别要求高熔点  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物要少<sup>[1]</sup>。在冶炼过程中,冷镦钢相对于高碳钢而言,钢中硫的活度系数低,不利于脱硫。因此对 LF 精炼渣来说,一方面要保证较好的脱硫效果满足成品钢硫含量要求,其次具有合适的熔点和粘度以利于对上浮夹杂物的同化和吸收<sup>[2-4]</sup>,精炼渣宜采用  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$  基渣系以满足脱硫和夹杂物控制要求<sup>[5]</sup>。

此外,由于钢采用铝脱氧,为防止水口的结瘤,需要钙处理以改变  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂的存在形态,同时在连铸过程要防止钢水二次氧化<sup>[6]</sup>。钙处理反应产物应按  $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  方向进行<sup>[7-9]</sup>。为确保夹杂物变性处理,必须控制加入钢水的钙含量,如 Ca 不足,则  $\text{Al}_2\text{O}_3$  无法转变为液态铝酸钙;Ca 加入量过大,有可能生成 CaS 造成水口堵塞或导致洗水口,以及塞棒控流失效。

#### 1 钢中夹杂物钙处理的相关热力学计算

##### 1.1 [Ca]-[Al]平衡

表 1 为所选取的 5 炉 SWRCH22A 钢种的 LF 精炼终点成分。

图 1 为计算的 1 873 K 时 [Ca] 与 [Al] 的平衡关系曲线及实测的 5 炉钢中的 [Ca]-[Al] 值。

从图 1 可以看出:

(1) 所选取的 5 炉钢实测的 LF 精炼终点的 [Ca]-[Al] 值均在  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  平衡态附近, 这说明钢中形成的钙铝酸盐夹杂大部分都是低熔点物质, 即钢液的钙处理效果较好;

(2) 要生成  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  低熔点夹杂, 则随着 [Al] 的增加, [Ca]/[Al] 比值逐渐减小, 所以实际生产中不能在钙处理时将 [Ca]/[Al] 确定为一个定值作为评价钙处理效果的指标, 要根据 [Al] 变化确定最佳比值。

实际精炼时要生成  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  低熔点夹杂, 不仅钢液要满足 [Ca]-[Al] 平衡, 同时要满足 [Al]-[O] 以及 [Al]-[S] 等的平衡。

### 1.2 [Al]-[O] 平衡

由图 2 可以看出, 所选取的 5 炉钢在精炼结束时 有 3 炉氧活度远在  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  平衡态之上, 造成钢水中铝的严重二次氧化, 生成高熔点  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 导致水口堵塞。而实际生产中氧活度较高的这 3 炉在浇铸的时候出现了堵水口。这种 LF 精炼结束时氧活度过高是喂钙线时钢水沸腾剧烈的结果。

### 1.3 [Al]-[S] 平衡

从图 3 可以看出, 所选取的 5 炉钢的 [S]-[Al] 值主要在  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  低熔点物质对应的 [S]-[Al] 值之间, 更接近  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 。

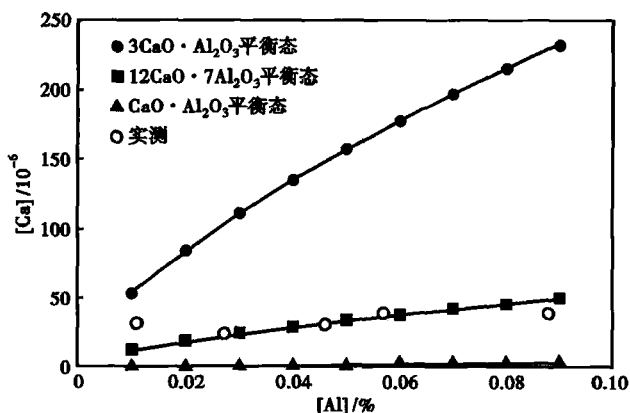


图 1 1 873 K 时 [Ca] 与 [Al] 的平衡关系曲线及实测的 5 炉钢的 [Ca]-[Al] 值

Fig. 1 Curves of equilibrium relation between [Ca] and [Al] at 1 873 K and measuring values of [Ca]-[Al] of 5 heats

表 1 5 炉 SWRCH22A 冷镦钢的 LF 精炼终点成分和氧活度  
Table 1 LF refining end analysis and activity of oxygen of cold heading steel SWRCH22A, 5 heats

炉号	成分 / %										氧活度 $a_{[O]}$ / $10^{-6}$
	C	Si	Mn	P	S	Ca	B	Als	Alt		
291-09194	0.18	0.055	0.85	0.014	0.006	-	0.001 0	0.036	0.037	-	
292-08862	0.19	0.044	0.89	0.013	0.008	-	0.001 0	0.061	0.067	2.0	
292-08863	0.19	0.058	0.85	0.012	0.009	0.004 0	0.001 0	0.088	0.096	2.5	
292-08864	0.19	0.062	0.85	0.014	0.006	0.004 0	0.001 0	0.057	0.063	3.5	
211-02006	0.20	0.058	0.85	0.015	0.007	0.003 2	0.000 7	0.011	0.012	19.0	
平均值	0.19	0.055 4	0.858	0.013 6	0.007 2	0.003 7	0.000 9	0.050 6	0.055	6.75	

注: 其中 Als 代表酸溶铝含量, Alt 代表全铝含量。

说明在精炼结束 [S]-[Al] 值基本满足生成  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  低熔点夹杂。

### 1.4 [Ca]-[S] 平衡

从图 4 可以看出, 所选取的 5 炉钢的 [Ca]-[S] 值基本都在 1 873 K 平衡态之下, 钙含量较低, 钢液中不易生成 CaS 夹杂物。

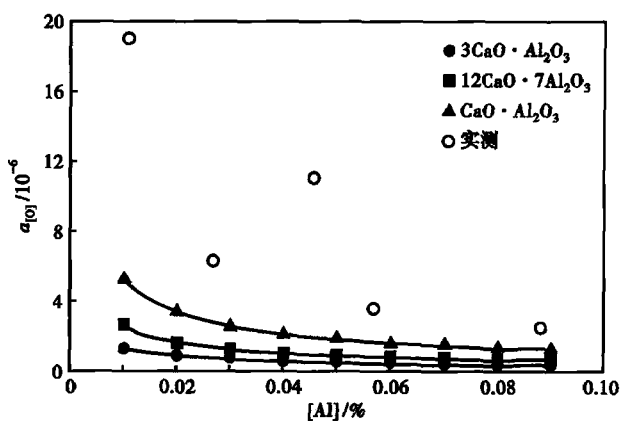


图 2 1 873 K 时  $a_{[O]}$  与 [Al] 的平衡关系曲线及实测的 5 炉钢的  $a_{[O]}$ -[Al] 值

Fig. 2 Curves of equilibrium relation between  $a_{[O]}$  and [Al] at 1 873 K and measuring values of  $a_{[O]}$ -[Al] of 5 heats

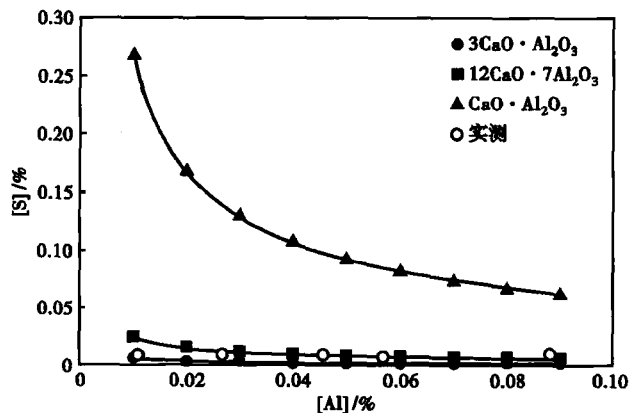


图 3 1 873 K 时 [S]-[Al] 平衡关系曲线及实测的 5 炉钢的 [S]-[Al] 值

Fig. 3 Curves of equilibrium relation between [S] and [Al] at 1 873 K and measuring values of [S]-[Al] of 5 heats

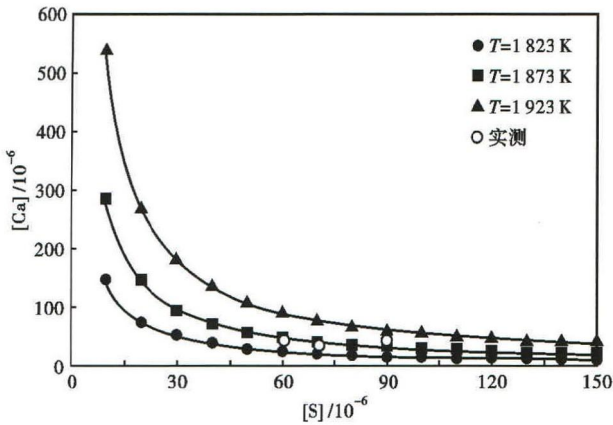


图4 1 823 ~ 1 923 K [Ca]-[S]的平衡关系曲线及实测的5炉钢的[Ca]-[S]值

Fig. 4 Curves of equilibrium relation between [Ca] and [S] at 1 823 ~ 1 923 K and measuring values of [Ca]-[S] of 5 heats

表2 SWRCH22A 钢不同工位点的氧氮含量

Table 2 Oxygen and nitrogen content in liquid steel SWRCH22A at deferent working points

炉号	氧氮含量/ 10 <sup>-6</sup>	工位点		
		吹氩 平台	软吹 3 min	连铸中间包 10 min
212-03333	T[O]	16.25	14.99	64.17
	[N]	13.61	33.30	50.56
213-01007	T[O]	43.99	24.83	16.66
	[N]	16.31	27.96	33.67

为了保证钙处理效果,从热力学上需要同时满足[Ca]-[Al]、[O]-[Al]、[S]-[Al]、[Ca]-[S]要求的指标,不能单纯从[Ca]/[Al]比来判断夹杂物是否处于低熔点铝酸钙区域。

### 1.5 氧氮分析

从表2可以看出:

(1)两炉钢在LF精炼过程氧含量逐渐降低,精炼结束全氧含量都在  $20 \times 10^{-6}$  以下,说明LF精炼过程夹杂总量控制得都比较理想。但从前面热力学分析讨论可知,钢中  $Al_2O_3$  夹杂控制不理想。

(2)整个LF精炼过程氮含量都逐渐升高,说明精炼过程气氛保护不好,不断吸氮<sup>[10-14]</sup>。

(3)从表2可见212-03333炉软吹3min到连铸中间包10min工位之间,氧氮含量大幅增加,说明钢液在该过程二次氧化较为严重。

## 2 造渣制度的优化

### 2.1 精炼终渣成分的确定

冷镢钢对钢中夹杂物控制比较严格,特别要求高熔点  $Al_2O_3$  夹杂物要少,以防止冷镢过程的开裂;对精炼渣来说,一方面要保证较好的脱硫效果满足成品钢硫含量要求,其次具有合适的熔点和粘度以

利于对上浮夹杂物的同化和吸收。由于钢水采用铝脱氧,炉渣中  $Al_2O_3$  含量较高,精炼终渣成分实际上是  $CaO-Al_2O_3$  基渣系,渣中较高的  $Al_2O_3$  和较低的  $SiO_2$  对防止钢水再氧化和增硅是必要的。根据  $CaO-Al_2O_3$  相图,对中高碳钢,可以将  $CaO/Al_2O_3$  控制在 1.3 ~ 1.6,炉渣在较宽的范围内具有较低的熔点,有利于平衡的夹杂物球化。对于低碳钢,由于硫的活度系数较低,相对中高碳钢脱硫困难,因此可以将  $CaO/Al_2O_3$  控制在 1.5 ~ 1.9<sup>[7,15-17]</sup>,这时炉渣熔点较高,可以加入少量萤石使其进入熔化区域。通过热力学计算和分析,最终取  $MgO$  为 6%,  $SiO_2 < 6%$ ,  $CaO/Al_2O_3$  控制在 1.6 ~ 1.8,如图5所示。

### 2.2 转炉下渣量和精炼终渣量的确定

为将目标精炼渣  $CaO/Al_2O_3$  控制在 1.6 ~ 1.8,需对造渣制度进行优化调整。由渣料带入的  $CaO$  基本不会和钢中成分反应,而合金料带入的  $Ca$  元素相当少,也就是合金料氧化生成的  $CaO$  少,处理时忽略不计;渣料带入的  $Al_2O_3$  量和金属铝氧化为  $Al_2O_3$  后进入渣中的量可计算得到。基于  $CaO$  和  $Al_2O_3$  物料平衡可计算出下渣量和精炼终渣量。方程组如下:

$$\text{渣料带入的 } CaO = \text{精炼终渣的 } CaO$$

$$\text{渣料带入的 } Al_2O_3 + \text{金属 } Al \text{ 氧化进渣的 } Al_2O_3 = \text{精炼终渣 } Al_2O_3$$

以SWRCH22A的292-08862炉为例,加入渣料成分和量如表3。出钢下渣成分、精炼终渣成分如表4。精炼终点钢水中全铝  $Alt = 0.07\%$ ,钢水量为 93 t。加入含铝合金如表5。

设下渣  $x$  kg,精炼终渣  $y$  kg,根据上述方程组,

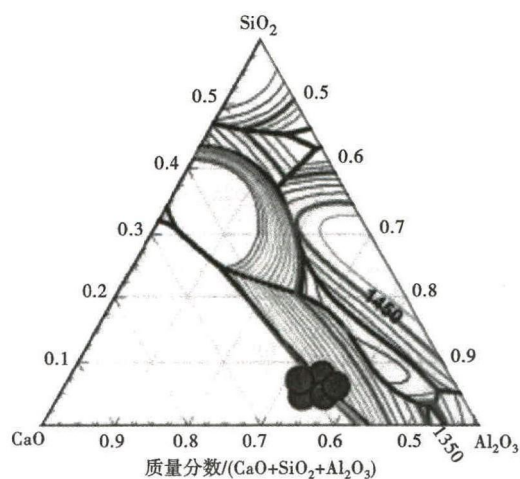


图5 5炉精炼终渣在  $CaO-Al_2O_3-SiO_2-6\% MgO$  相图的位置  
Fig. 5 Location of end refining slag of 5 heats at phase diagram of  $CaO-Al_2O_3-SiO_2-6\% MgO$

表 3 LF 精炼过程渣料加入量及其成分

Table 3 Ingredient and amount of adding slag materials during LF refining process

渣料	加入量/ kg	渣料成分 / %			
		CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO
精炼渣	500	51.07	40.87	3.11	
石灰	700	83.00	0	0.89	1.42
铝矾土	80	0	80		
电石	50	85.00	0		
总计	1 330				

注:其中 CaO 为 874 kg, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 268 kg。

表 4 转炉出钢下渣和精炼终渣成分 / %

Table 4 Ingredient of BOF tapping slag and end refining slag / %

项目	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO
出钢下渣	48.55	1.06	12.05	3.86
精炼终渣	58.59	30.81	5.29	3.52

表 5 LF 精炼过程加入的含铝合金量

Table 5 Adding amounts of aluminium-bearing alloys during LF refining process

项目	铝锰铁	铝线	铝粒
加入量	380 kg	300 m	80 kg
铝含量	20%	100%	100%
纯铝量	380 kg × 20% = 76 kg	300 m × 0.2 kg/m = 60 kg	80 kg × 100% = 80 kg

$$x \times 48.55\% + 874 = y \times 58.59\%$$

$$x \times 1.06\% + 268 + (216 - 0.07\% \times 93\ 000) \times 10/54 = y \times 30.8$$

得出下渣量为 640 kg, 精炼终渣量为 2 021 kg。同理可求出其他炉次的下渣量和精炼终渣量, 可知 SWRCH22A 钢的下渣量基本稳定在 700 kg 左右, 精

### 参考文献

- [1] 陈建东, 梁素英, 苏德利, 等. SWRCH135K 冷镦钢 120 t BOF-吹氩-LF-CC 流程的冶炼工艺和质量控制[J]. 特殊钢, 2015, 36(2): 40-43.
- [2] 郑一见, 梁新亮, 尹振芝, 等. BOF-LF-CSP 与 BOF-渣洗-CSP 工艺生产 Q235B 钢中夹杂物对比分析[J]. 武汉科技大学学报, 2013, 36(6): 416-419.
- [3] 王新志, 王三忠, 宋素格, 等. LF 快速造白渣工艺分析[J]. 炼钢, 2010, 26(3): 26-29.
- [4] 邹长东, 赵家七, 周彦召, 等. X70 管线钢 180 t LF 深脱硫精炼工艺的优化[J]. 特殊钢, 2013, 34(5): 47-50.
- [5] 李强, 王新华, 黄福祥, 等. X80 管线钢 LF-RH 二次精炼过程夹杂物行为及控制[J]. 特殊钢, 2011, 32(4): 26-30.
- [6] 李文英, 吴志敏. 含钛低碳钢 LF 精炼渣的优化[J]. 特殊钢, 2013, 34(5): 38-40.
- [7] 王谦, 何生平. 低碳含铝钢 LF 炉精炼工艺及精炼渣的优化[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(增刊 1): 14-16.
- [8] 范新智. 90 t LF 精炼 0Cr18Ni9 不锈钢的夹杂物控制工艺实践[J]. 特殊钢, 2010, 31(3): 33-34.
- [9] 石枚梅. 120 t 转炉出钢利用 LF 固态精炼渣进行渣洗的工艺实践[J]. 特殊钢, 2014, 35(2): 24-26.
- [10] 郭志强, 颜学勇, 胡守才. 70 t BOF-LF-VD-CC 流程转炉钢氮含量控制的工艺实践[J]. 特殊钢, 2013, 34(6): 26-29.
- [11] 陆锦祥, 王忠英, 陈水盛, 等. 100 t BOF-LF-RH-CC 工艺冶炼结构钢时钢中氮的行为及控制[J]. 特殊钢, 2009, 30(6): 26-28.
- [12] 杜和平, 杨志才. 150 t 钢包炉(LF)精炼过程控制钢水增氮的工艺实践[J]. 特殊钢, 2015, 36(1): 25-27.
- [13] 刘立, 赵俊学, 李凯, 等. EAF→LF(VD)→CC 流程生产 GCr15 轴承钢氮含量分析[J]. 特殊钢, 2010, 26(1): 32-35.
- [14] 王社教, 王伟, 颜慧成, 等. GCr15 钢 LF 增氮因素分析及措施[J]. 工业加热, 2014, 43(3): 30-31.
- [15] 吴健鹏, 王金平, 王春锋, 等. 低碳铝镇静钢 LF 精炼工艺的优化[J]. 中国冶金, 2012, 22(增刊 1): 116-119.
- [16] 国富兴, 张迪凡, 韩春良, 等. 含铝钢 LF 精炼渣成分优化及造渣制度改进[J]. 河北冶金, 2011(10): 36-38.
- [17] 杨利彬, 焦兴利, 贺庆, 等. 300 t BOF-LF-RH 冶炼过程 X80 管线钢氧含量控制[J]. 特殊钢, 2011, 32(6): 40-42.

炼终渣量稳定在 2000 kg 左右。

### 2.3 造渣制度的确定

加入的合金铝被氧化进入熔渣相的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量大致稳定, 平均约为 360 kg。

用精炼终渣 CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 评判造渣料加入量是否合适。将下渣量定为 700 kg, 改变精炼渣和石灰的用量, 调整精炼终渣 CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 以达到设计目标。

计算的造渣材料加入量为精炼渣 550 kg, 石灰 650 kg。此计算较粗糙, 且下渣控制不稳定, 加入渣量随下渣量变化影响很大, 因此仅提供理论上的参考, 在生产现场需根据现场实时渣成分进行相应的调整。此外, 为了保证尽快成渣, 发挥精炼渣在脱硫特别是吸收和同化夹杂物方面的重要作用, 需进行转炉出钢加入石灰和萤石进行渣洗操作, 并根据终渣 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的要求在精炼炉补加石灰或精炼渣调渣。

### 3 结论

(1) 为防止水口堵塞, 在精炼过程应尽量控制喂钙线时钢水剧烈翻腾, 同时注意精炼结束到连铸中间包过程钢水的保护, 防止二次氧化。

(2) 当精炼终渣成分中 MgO 为 6%, SiO<sub>2</sub> < 6%, 并将 CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 控制在 1.6 ~ 1.8, 能避免钢渣反应, 减少钢中高熔点的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂, 并具有较强的脱硫能力。

(3) 为达到所需的精炼终渣的成分, 一般加入精炼渣 550 kg, 活性石灰 650 kg, 同时在生产现场须根据实时渣成分进行相应的调整。

高长益(1964-), 男, 硕士(1990年武汉钢铁学院), 高级工程师, 1984年昆明工学院(本科)毕业, 钢铁冶金研究。

E-mail: 1036017942@qq.com

收稿日期: 2015-12-28