

铝脱氧钢水钙处理热力学分析与应用

贺道中¹, 苏振江¹, 周志勇²

(1. 湖南工业大学 冶金工程学院, 湖南 株洲 412008; 2. 湘潭钢铁集团公司, 湖南 湘潭 411101)

摘要: 分析了铝脱氧钢水在连铸过程中易引起水口结瘤堵塞的原因。应用热力学平衡模型, 计算了 Fe-Al-Ca-O-S 体系中的各种平衡反应。提出钢水钙处理时钢中 $w(\text{T}(\text{O}))$, $w(\text{Al})_s$, $w(\text{Ca})/w(\text{Al})$, $w(\text{S})$ 等的合理控制范围, 将其成果应用于实际生产中, 取得了良好的效果。

关键词: 铝脱氧; 水口结瘤堵塞; 钙处理; 热力学分析

中图分类号: TF769.3; TF777.7

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2010)03-0005-05

Thermodynamic Analysis and Application of Calcium Treatment on Aluminium-Killed Steel

He Daozhong¹, Su Zhenjiang¹, Zhou Zhiyong²

(1. School of Metallurgical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China;

2. Xiangtan Iron & Steel Group Co. Ltd, Xiangtan Hunan 411101, China)

Abstract: The causes of nozzles (SEs) clogging during the continuous casting process of aluminium-killed steel are investigated. The equilibrium reactions for Fe-Al-Ca-O-S series are calculated according to the thermodynamic equilibrium model. In order to prevent nozzles clogging, the appropriate scope of $w(\text{T}(\text{O}))$, $w(\text{Al})_s$, $w(\text{Ca})/w(\text{Al})$ and $w(\text{S})$ are proposed. The result is applied in production and good effect is obtained.

Keywords: aluminium-killed; nozzle clogging; calcium treatment; thermodynamic analysis

钙处理作为铝脱氧钢水广泛使用的炉外处理手段, 通常是在钢水中加入 Ca-Si (或 Ca-Fe) 线来对 Al_2O_3 进行变性处理。将高熔点 Al_2O_3 夹杂物转化为低熔点的铝酸钙, 防止浇铸时塞棒水口结瘤。但钙处理时需对钙加入量进行准确的控制, 钙加入量不足, 容易生成高熔点的铝酸钙; 钙加入量过多, 则会产生更加难于解决的高熔点 CaS 或 $(\text{Ca}, \text{Mn})\text{S}$ 。实际生产中, 各钢厂钙处理控制工艺参数按各自经验选取, 故存在不同的看法。本研究应用热力学模型, 计算并分析 Fe-Al-Ca-O-S 体系中的各种平衡, 为钢水钙处理时钢中 $w(\text{T}(\text{O}))$, $w(\text{Al})_s$, $w(\text{Ca})/w(\text{Al})$, $w(\text{S})$ 等参数的合理控

制提供理论依据, 对钙处理工艺具有指导作用。

1 钙处理热力学模型与分析

1.1 钙处理过程中的夹杂物和热力学反应式

由 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 二元相图^[1] (如图 1 所示), 铝脱氧钢水钙处理过程中可能形成的夹杂物有 Al_2O_3 , CaO , CaS , $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3 (\text{CA}_6)$, $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 (\text{CA}_2)$, $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 (\text{CA})$, $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 (\text{C}_{12}\text{A}_7)$, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 (\text{C}_3\text{A})$ 等。随着 CaO 含量的增加, 夹杂物逐步发生 $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{CaO} \cdot$

收稿日期: 2010-03-12

通信作者: 贺道中 (1967-), 男, 湖南常德人, 湖南工业大学教授, 硕士, 主要研究方向为洁净钢冶炼技术与工艺,

E-mail: hdzhong1968@163.com

$\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CaO}$ 的转变。各种夹杂物的特性如表 1 所示^[2]。

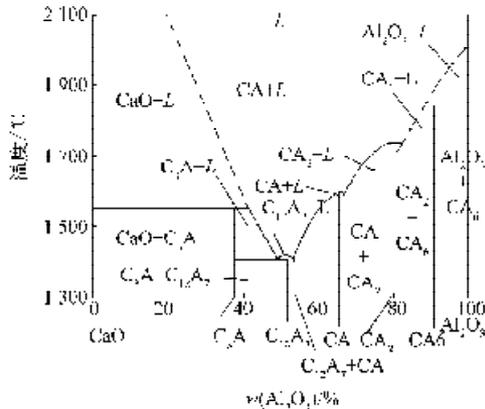


图 1 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 二元相图

Fig. 1 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ binary phase diagram

表 1 钙处理夹杂物特性

Table 1 The properties of Ca treatment inclusion

夹杂物	晶体结构	密度 / $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	熔化温度 / $^{\circ}\text{C}$
Al_2O_3	三角系	3.96	2 052
CA_6	立方系	3.28	1 850
CA_2	单斜晶系	2.91	1 750
CA	单斜晶系	2.98	1 605
C_{12}A_7	立方体	2.83	1 455
C_3A	立方体	3.04	1 535
CaO	立方体	3.34	2 570
CaS	立方体	2.50	2 450

从表 1 可看出, Al_2O_3 , CA_6 , CA_2 的熔点均高于 1 700 $^{\circ}\text{C}$, 而 C_{12}A_7 的熔化温度为 1 455 $^{\circ}\text{C}$, 在钢水中为液态, L/CA 平衡态被认为是形成液态铝酸钙的开始。因此钢液钙处理目标就是尽量把 Al_2O_3 转变为 C_{12}A_7 或 L/CA 态。尽管从理论上说会生成 CaO, 但钢水中生成 CaO (C/L 态时) 所需平衡 Ca 量较大。在实际生产过程中喂入的 Ca 一般不会使钢水中的溶解 Ca 量达到如此高的含量。因此 Ca 处理时, 钢水中一般不会出现 CaO。

1.2 钙处理钢液与夹杂物的热力学平衡模型

热力学平衡模型的基本假设条件为: 1) 夹杂物的主要成分为 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$; 2) 夹杂物和钢水达到平衡。铝脱氧钢液中夹杂物间主要存在着以下的平衡^[3]:



$$\lg K(\text{CaO}) - \lg \frac{a(\text{CaO})}{a(\text{Ca}) \times a(\text{O})} = \frac{25\,655}{T} - 7.65,$$



$$\lg K(\text{Al}_2\text{O}_3) - \lg \frac{a(\text{Al}_2\text{O}_3)}{a^3(\text{Al}) \times a^3(\text{O})} = \frac{61\,304}{T} - 20.37,$$



$$\lg K(\text{CaS}) - \lg \frac{a(\text{CaS})}{a(\text{Ca}) \times a(\text{S})} = \frac{19\,980}{T} - 5.90.$$

根据钢液中 Al, a(O), C, Mn, S, P 等的成分, 通

过氧化物活度计算可以得到夹杂物中的 CaO 和 Al_2O_3 含量^[4]。

计算过程中根据现场钢液成分及相互作用系数, 计算得到溶解铝的活度系数近似为 1, 故假定 $a(\text{Al}) = w(\text{Al})$ 。钙处理后钢中残钙量一般在 0.002 %~0.004 % 范围内, 钢中溶解钙含量不到残钙量的 10 %^[4], 故认为溶解钙与钢液构成极稀溶液, 近似 $a(\text{CaO}) = w(\text{Ca})$, 取其最大值 $w(\text{Ca}) = 0.1w(\text{Ca})_{\text{残}}$ 。钢中氧量极低, 可认为是极稀溶液, 取 $a(\text{O}) = w(\text{O})$; CaS 在 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 熔体中溶解度小易饱和, 故 $a(\text{CaS}) = 1$ 。炼钢温度 1 873 K 下不同铝酸钙中 $a(\text{CaO})$, $a(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 见表 2^[5]。

表 2 1 873 K 不同平衡态铝酸钙的 $a(\text{CaO})$, $a(\text{Al}_2\text{O}_3)$

Table 2 Activities of CaO and Al_2O_3 in different balance relation at 1 873 K

铝酸钙	$a(\text{CaO})$	$a(\text{Al}_2\text{O}_3)$
CaO/L	1.000	0.017
C_{12}A_7	0.340	0.064
L/CA	0.150	0.275
CA/CA ₂	0.100	0.414
CA ₂ /CA ₆	0.043	0.637
CA ₆ /A	0.003	1.000

1.3 热力学计算与分析讨论

1.3.1 Al-O 平衡

铝脱氧钢液钙处理后, 钢中夹杂物主要是铝酸钙夹杂和硫化钙夹杂。炼钢温度 1 873 K 下, $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂为液态, 而 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂在靠近 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 区域为液态, 因此, 通过热力学计算, 结合 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3$ 体系的二元相图, 可以分析出夹杂物的形态。由式 (2) 和表 2 的 $a(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 作出 1 873 K 下不同夹杂物的 Al-O 平衡关系图, 如图 2。

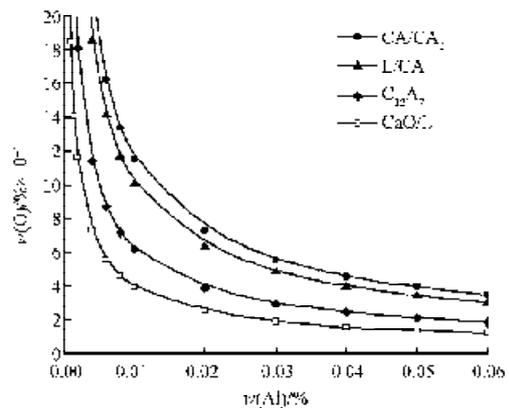


图 2 1 873 K 不同夹杂物的 Al-O 平衡关系

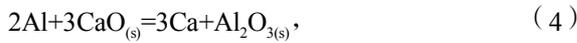
Fig. 2 Al-O balance relation in different inclusion at 1 873 K

从图 2 中可知, 要使得夹杂物为液态, 必须把钢

中 Al 含量和 O 含量控制在 C/L—L/CA 的区域内, 最好位于 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 附近。如在钢中 $w(\text{Al})$ 为 0.02%~0.04% 时, 钢中的 $w(\text{O})$ 需控制在 2.5×10^{-6} ~ 4×10^{-6} 为宜。

1.3.2 Al-Ca 平衡

由式 (2)-式 (1) × 3 得:



$$\lg K(\text{Al-Ca}) - \lg \frac{K(\text{Al}_2\text{O}_3)}{K^3(\text{CaO})} - \frac{61304}{T} - 20.37 - 3 \times \left(\frac{25655}{T} - 7.65 \right) = -\frac{15661}{T} + 2.58 \quad (5)$$

由 $K(\text{Al}_2\text{O}_3) = \frac{a(\text{Al}_2\text{O}_3)}{a^2(\text{Al}) \times a^3(\text{O})}$, 及

$K(\text{CaO}) = \frac{a(\text{CaO})}{a(\text{Ca}) \times a(\text{O})}$, 得

$$\frac{a^3(\text{Ca})}{a^2(\text{Al})} = \frac{K(\text{Al}_2\text{O}_3) \times a^3(\text{CaO})}{K^3(\text{CaO}) \times a(\text{Al}_2\text{O}_3)} \quad (6)$$

根据式 (6) 和表 2, 可作出 1 873 K 下不同组成 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物的 Al-Ca 平衡图, 如图 3。从图中可知, 为使 Al_2O_3 变性为 L/CA, 所需加入钙量是很小的, 且钙的加入量再多, 氧化物夹杂也处于 L/CA—C/L 成分之间, 在钢中酸溶铝一定的情况下, 为使 Al_2O_3 变性为液态, 钢中溶解钙的变化范围较大。钢中 $w(\text{Al}) = 0.03\%$, 夹杂物变性为液态时, 钢中溶解 $w(\text{Ca})$ 的变化范围在 5×10^{-6} ~ 4.5×10^{-5} 之间。钢中的 $w(\text{Ca})/w(\text{Al})$ 在 0.02~0.15 之间。实际生产中一般应将 $w(\text{Ca})/w(\text{Al})$ 控制在 0.09~0.14 之间^[3,6-7]。钢中溶解 $w(\text{Ca})$ 位于 C_{12}A_7 与 L/CA 之间。即在生产实践中, 通常加入相对过量的钙使 Al_2O_3 完全变性, 改善钢水的流动性。

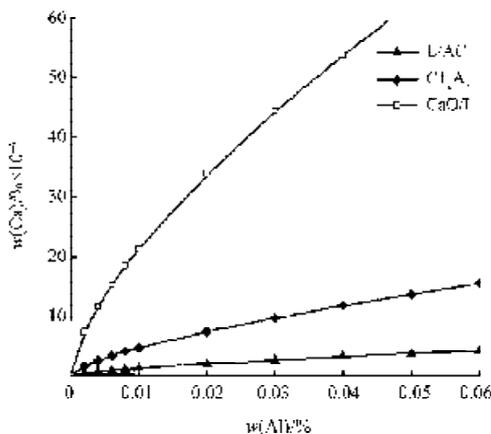


图 3 1 873 K 不同组成的 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物的 Al-Ca 平衡

Fig. 3 Al-Ca balance relation in different $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ inclusion at 1 873 K

1.3.3 Al-S 平衡

由式 (4)+式 (3) × 3 得:



$$K(\text{Al-S}) = \frac{a^3(\text{CaS})a(\text{Al}_2\text{O}_3)}{a^2(\text{Al})a^3(\text{S})a^3(\text{CaO})}$$

$$\lg K(\text{Al-S}) - \lg [K(\text{Al-Ca}) \times K^3(\text{CaS})] = -\frac{15661}{T} - 2.58 - 3 \left(\frac{19980}{T} - 5.90 \right) = \frac{44279}{T} - 15.12,$$

$$a(\text{S}) = \left[\frac{a^3(\text{CaS})a(\text{Al}_2\text{O}_3)}{K(\text{Al-S})a^2(\text{Al})a^3(\text{CaO})} \right]^{1/3} \quad (8)$$

CaS 夹杂也易在水口部位聚集, 导致结瘤或加剧 Al_2O_3 水口结瘤。为保证钙处理的效果, 钙的加入量须满足生成液态铝酸钙夹杂物, 避免 CaS 夹杂析出。利用式 (8) 和表 2 可得到 Al-S 平衡图, 如图 4。从图中可知钢水在一定 Al 含量的情况下, 为避免钙处理时生成高熔点铝酸钙, 钢水中 S 含量要求处于 C/L—L/CA 之间。喂钙线处理时, 如果钢液中的 S_{Al} 含量位于 L/CA 线以上, 则 Ca 先与 S 反应, 直到 S 含量降到 L/CA 平衡曲线下, 剩余的 Ca 才会与 Al_2O_3 反应, 生成液态铝酸钙。因此进行钙处理时, 为了把 Al_2O_3 系夹杂物改质为液态 C_{12}A_7 , 同时又不希望先析出易在水口部位聚集结瘤的 CaS, 必须控制钢水中的 S 含量。要求把钢水中的 Al 及 S 含量降低到与 C_{12}A_7 平衡的值以下进行钙处理。特别是对于 Al 含量高的钢种, 把钙处理前的 S 含量降得低一些更有利。

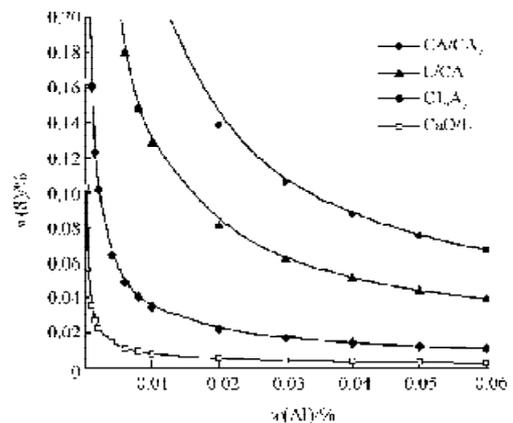


图 4 1 873 K Al-S 平衡图

Fig. 4 Al-S balance relation in different inclusion at 1 873 K

由图 4 可知, 在钢液中生要生成 C_{12}A_7 , 当钢中的 $w(\text{Al}) = 0.02\%$ 时, 钢中 $w(\text{S}) < 0.021\%$; 当钢中的 $w(\text{Al}) = 0.04\%$ 时, 钢中 $w(\text{S}) < 0.013\%$; 当钢中的 $w(\text{Al}) = 0.05\%$ 时, 钢中 $w(\text{S}) < 0.010\%$ 。

2 连铸结晶器浸入式水口(SEN)结瘤物分析

2.1 冶炼工艺

连铸生产钢种 XSWRCH8A 化学成分见表 3, 冶炼过程取样分析结果见表 4。连铸浇铸温度为 1 558 ℃, 拉速为 2.6~3.0 m/min, 浇铸时间为 45 min。生产工艺路线: 颗粒镁铁水预处理→80 t 复吹转炉→2[#]LF 炉(90 t 双工位)→4[#]铸机(150×150 mm CONCAST 连铸机)。

湘潭钢铁集团公司含铝冷镢钢冶炼时采用中碳锰铁和高铝锰铁脱氧, 中碳锰铁用量较少。钢中氧主要由铝脱除。LF 通过加入石灰、萤石、电石和铝粉造白渣脱硫, 出精炼站前喂入适量的 Ca-Fe 线钙处理钢水。

表 3 XSWRCH8A 的化学成分

Table 3 Chemical composition of XSWRCH8A %

成分	控制规格	分析成分	成分	控制规格	分析成分
C	0.05~0.10	0.059	P	≤0.020	0.009
Si	0.04~0.09	0.046	S	≤0.010	0.007
Mn	0.30~0.45	0.350	Al	0.03~0.06	0.044

表 4 XSWRCH8A 冶炼过程取样分析

Table 4 Composition in smelting sample of XSWRCH8A %

试样	成分						
	C	Si	Mn	P	S	Al ₁	Al ₂
终点样	0.032	0.008	0.032	0.007	0.027	0	0
精炼样	0.04	0.012	0.27	0.007	0.026	0.054	0.044
LF 炉 G1	0.042	0.018	0.28	0.008	0.027	0.041	0.038
LF 炉 G2	0.042	0.018	0.28	0.008	0.022	0.107	0.107
LF 炉 G3	0.056	0.016	0.31	0.008	0.014	0.045	0.045
成品样	0.059	0.018	0.31	0.009	0.014	0.058	0.056

2.2 连铸浸入式水口(SEN)结瘤物检测

湘潭钢铁集团公司浇铸铝镇静钢采用 Al-C-Zr 质塞棒、水口, 将结瘤物剖开, 如图 5 即可观察到断面富集着大量的夹杂物, 经分析其组成如表 5, 主要为高熔点难熔氧化物。

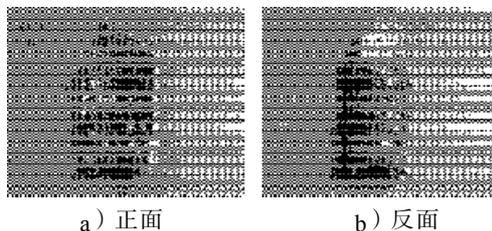


图 5 水口结瘤物实物形貌

Fig. 5 Morphology of nozzles (SEN) clogging

表 5 SEM 水口结瘤物的化学组成

Table 5 Chemical composition of nozzles (SEM) clogging %

成分	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	MnO	TFe
结瘤物	18.23	65.63	2.73	4.25	0.186	4.65

如图 6 所示通过对结瘤物相 X-射线衍射发现: 铝酸钙夹杂以 CaO·2Al₂O₃ 为主, 还混有 MgO·Al₂O₃ 尖晶石, CaO·Al₂O₃ 以及少量的 2CaO·Al₂O₃·SiO₂, 2CaO·SiO₂ 硅酸盐、金属铁颗粒。

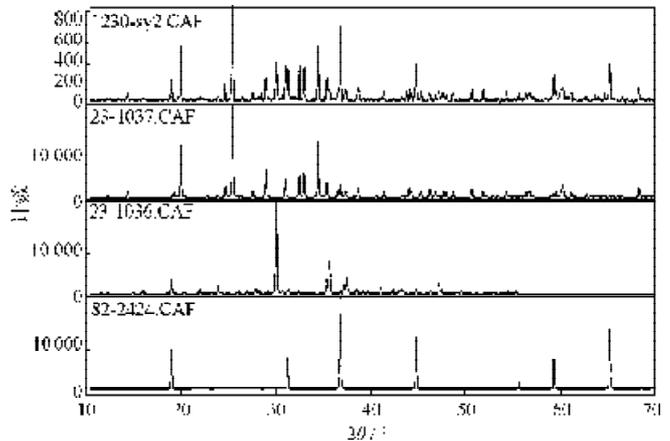


图 6 水口结瘤物物相 X-射线衍射图

Fig. 6 X-ray diffraction about the nozzles (SEN)

3 结瘤物的形成原因分析

钢中 CaO·2Al₂O₃ 系钙铝酸盐和铝镁尖晶石夹杂, 熔点高, 较粘稠, 不能从钢液中很快浮出, 流经塞棒头和 SEN 水口时, 在钢液中形成软化态的细小线条状夹杂旋转聚集, 彼此凝成链条, 粘结在表面粗糙的塞棒头和水口内壁上, 形成结瘤物。湘潭钢铁集团公司含铝冷镢钢连铸水口结瘤物分析表明, 钙处理时生成了熔点同样较高的 CaO·2Al₂O₃ 系钙铝酸盐。

通过调查水口实际夹杂物粘附形态发现, 粒状 CaO·2Al₂O₃ 和熔融 2CaO·2Al₂O₃·SiO₂ 硅铝酸盐混合在一起粘附在水口内壁。氧化铝粘附模型实验中发现, 当 Al₂O₃ 颗粒没有被 CaO 充分改性为液体氧化物时, Al₂O₃ 颗粒之间会形成熔融 2CaO·Al₂O₃·SiO₂ 硅铝酸盐的液体连接桥, 并迅速粘附在水口内。根据上述结果可以推测, 浇铸过程中, 钙处理时生成的 CaO·2Al₂O₃ 等高熔点钙铝酸盐沉积堵塞水口, 这是因为在喂 Fe-Ca 线时, 生成了熔融 2CaO·Al₂O₃·SiO₂ 硅铝酸盐, 起到粘结剂的作用。由于这种液体氧化物的粘结作用, CaO·2Al₂O₃ 会迅速粘附在塞棒头和水口内壁上。浸入式水口内的钢水流速为 2 m/s 的情况下, 该粘附力比作用于夹杂物颗粒的牵引力大, 即使在浸入式水口内钢水流动的情况下, 粘附在水口界面的夹杂物颗粒也不会脱落, 仍保持粘附状态^[7]。

钢水中 MgO 一般较低, 而从水口内结瘤物取样分析发现有 w(MgO) 为 4.25%, 结瘤物中 MgO 的来源应为钢包、中间包及塞棒水口等耐材侵蚀。其与 Al₂O₃ 形成了高熔点的铝镁尖晶石, 加剧了水口结瘤。

4 钢水钙处理工艺参数控制实践

合理控制钢中的酸溶铝 Al_s 是降低夹杂物含量, 避免水口堵塞的关键工艺。湘潭钢铁集团公司含铝冷镢钢生产实践表明, 钢中酸溶铝的 $w((Al)_s)$ 适宜控制范围为 0.02%~0.04%。

湘潭钢铁集团公司 Ca 处理 Al 镇静钢时, 为了通过控制 Ca-Fe 线喂入量, 每吨钢钙加入量应不低于 0.2 kg。将钙加入钢液时, 重要的是钙的释放深度要足以防止钙的自然蒸发。1 600 °C 时钙的蒸汽压约为 182.4 kPa, 与在约 1.6 m 深度的钢水静力相当。由于钙的蒸汽压小, 要想提高钙的收得率, 须将钙喂得深, 主要通过增加喂线速度来增加钙的释放深度, 必须保证较高的喂线速度, 才能使 Ca-Fe 线穿透渣层并达到一定的深度, 增大钢水对钙吸收率, 减少炉渣的氧化, 生产实践表明, 喂线深度一般以距钢包底部 300~400 mm, 喂入速度控制在 2.0~3.0 m/s 比较合适。

实践表明, 控制 $w(Ca)/w(Al) > 0.10$, $w((Al)_s)/w(Al)_t \geq 95\%$, 确保钢水的钙化处理, 并有适量的游离 Ca 存在于钢中, 效果较好。湘潭钢铁集团公司控制钙铝比为 0.10~0.14 的炉次, 钢中 B 类细系夹杂和 B 类粗系夹杂物的级别均低于钙铝比低于 0.10 的炉次。

通过控制钢中 T(O) 含量, 出精炼站定氧 $\leq 1.5 \times 10^{-3}\%$, 钙处理时 CaO 与钢中的 Al_2O_3 充分结合, 易形成低熔点的 $C_{12}A_7$ 。湘潭钢铁集团公司含铝钢生产时, 采用颗粒镁铁水预处理, 结合 LF 精炼脱 S 工艺, 保证钙处理前钢中的 $w(S)$ 一般控制不大于 0.01%, 能有效避免加钙时生成的 CaS 在水口内壁凝聚。

湘潭钢铁集团公司生产实践表明, 通过控制钙处理工艺, 精炼效果明显改善, 品种钢的质量不断提高, 含铝冷镢钢 $w(T(O)) < 4.5 \times 10^{-3}\%$, 钢中 $w(S) < 0.012\%$; 钙收得率稳定在 10% 左右, 连铸水口结瘤问题也基本上得到解决, 平均连浇炉数达到 15 炉。

5 结论

1) 通过平衡模型和热力学计算分析钢液中 Ca-Al-O-S-Fe 平衡得出: 要使 A_2O_3 夹杂物变性为液态, 必须把钢中 $w(Al)$ 和 $w(O)$ 控制在 C/L-L/CA 的区域内, 最好位于 $C_{12}A_7$ 附近。1 873 K 钢液中 $w(Al)$ 为 0.02%~0.04% 时, 钢中 $w(O)$ 控制在 $2.5 \times 10^{-4}\%$ ~ $4 \times 10^{-4}\%$ 为宜。钢中溶解钙 $w(Ca)$ 为 $5 \times 10^{-4}\%$ ~ $4.5 \times 10^{-3}\%$ 。控制钢中的 $w(Ca)/w(Al)$ 为 0.09~0.14。在 1 823 K 时, 钢中的 $w(Al)=0.04\%$ 时, 需控制钢中的 $w(S)$ 在 0.013% 以下, 可以生成液态铝酸钙夹杂物, 同时避免 CaS 夹杂物析出。

2) 实验检测结果分析可知: 高熔点的铝酸钙夹杂在水口沉积是导致铝脱氧钢水口结瘤堵塞的主要原因。迅速粘附塞棒头和浸入式水口内壁的主要是 $CaO \cdot 2Al_2O_3$ 系矿物, 以及少量的 $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$, $2CaO \cdot SiO_2$ 硅酸盐, 其主要来源是存在于钢水中的氧化物。

3) 生产实践表明, 通过控制钢水中酸溶铝的 $w((Al)_s)$ 在 0.02%~0.04% 范围, $w(Ca)/w(Al)$ 在 0.10~0.14 范围, $w(Al)_s/w(Al)_t \geq 95\%$, $w(T(O)) \leq 1.5 \times 10^{-3}\%$, $w(S) < 0.010\%$; 喂线深度距钢包底部 300~400 mm, 喂线速度 2.0~3.0 m/s, 即能达到良好的钙处理效果。

参考文献:

- [1] 黄希祜. 钢铁冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002: 140.
Huang Xihu. Principle of Ferrous Metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical industry Press, 2002: 140.
- [2] Cicutti C E, Madias J, Gonzalez J C. Control of Microinclusions in Calcium Treated Aluminium Killed Steels [J]. Ironmaking and Steelmaking, 1997, 24(2): 155-159.
- [3] 魏 军, 严国安, 田志红, 等. CSP 低碳铝镇静钢钢水可浇性控制[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(6): 666-669.
Wei Jun, Yan Guoan, Tian Zhihong, et al. Improvement of CSP Castability in Low Carbon Al-Killed Steel[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2005, 27(6): 666-669.
- [4] 宋 波, 韩其勇, 王福明, 等. 钢液喂 CaSi 变质 Al_2O_3 夹杂的热力学计算[J]. 特殊钢, 1999, 20(5): 20-22.
Song Bo, Han Qiyong, Wang Fuming, et al. Thermodynamic Calculation on Modification of Al_2O_3 Inclusions by Feeding CaSi Alloy in Liquid Steel[J]. Special Steel, 1999, 20(5): 20-21.
- [5] Blazenko Korousic. Fundamental Thermodynamic Aspect of the CaO- Al_2O_3 - SiO_2 System[J]. Steel Research, 1991(4): 285-288.
- [6] Geldenhuis J M A. Minimisation of Calcium Additions to Low Carbon Steel Grades[J]. Ironmaking Steelmaking, 2000, 27(6): 442.
- [7] 贺道中, 李光强. 含铝冷镢钢连铸塞棒结瘤分析和预防工艺措施[J]. 特殊钢, 2008, 29(3): 47-49.
He Daozhong, Li Guangqiang. Analysis on Stopper Clogging Mechanism and Preventive Measures for Continuous Casting Aluminum Bearing Cold Heading Steel[J]. Special Steel, 2008, 29(3): 47-49.

(责任编辑: 罗立宇)