

E355S 含硫钢水口堵塞分析和工艺改善

陈 懿¹ 彭其春¹ 李建立¹ 刘合萍² 彭自胜² 肖鸿光²

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081;

2 衡阳华菱钢管有限公司技术中心, 衡阳 421001)

摘 要 针对钢厂生产含硫钢(0.10%~0.21% C, 0.010%~0.050% S)出现的水口堵塞问题,利用 SEM 和 EDS 对各关键工艺流程钢样和水口堵塞样进行全面分析,结果表明:各流程钢样中粒径小于 10 μm 的夹杂物均占 94% 以上,单位面积夹杂物个数随工艺流程的进行呈先降低后增加的趋势。夹杂物类型主要有 CaS、CaO-MgO、MnS、MgO-Al₂O₃、Al₂O₃、CaO-Al₂O₃、CaO、CaO-MgO-Al₂O₃ 复合夹杂物等;水口堵塞物主要由 FeO、Al₂O₃、MgO·Al₂O₃、CaO·Al₂O₃、CaO·2Al₂O₃ 组成。通过电弧炉出钢前向钢液喷吹一定量的焦炭粉,控制精炼渣中(FeO)≤1.50%、碱度 2.0~4.0 以及采取合适的钙处理和分阶段吹氩操作,需控制喂硫线速度在 50~150 m/min;清扫中间包以及使用含硫钢专用保护渣等措施,减少了水口堵塞,控制硫化物级别≤3,减少钢液二次氧化和避免连铸事故。

关键词 SEM EDS 水口堵塞 改善措施

Analysis of Nozzle Plugging of E355S Sulfur Bearing Steel and Process Improvement

Chen Yi¹, Peng Qichun¹, Li Jianli¹, Liu Heping², Peng Zisheng² and Xiao Hongguang²

(1 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Technology Center, Hengyang Hualing Steel Tube (Group) Co Ltd, Hengyang 421001)

Abstract For the problem of nozzle blockage in the production of sulfur-containing steel (0.10%~0.21% C, 0.010%~0.050% S) in a steel plant, a comprehensive analysis of the steel samples and nozzle plugging samples of each key process has been carried out by SEM and EDS. The results show that the inclusions with particle size less than 10 μm in each process steel are more than 94%, the number of inclusions per unit area decreases first and then increases with the process flow. The types of inclusions are mainly CaS, CaO-MgO, MnS, MgO-Al₂O₃, Al₂O₃, CaO-Al₂O₃, CaO, CaO-MgO-Al₂O₃ composite inclusions; the nozzle plug is mainly composed of FeO, Al₂O₃, MgO·Al₂O₃, CaO·Al₂O₃, CaO·2Al₂O₃. With blowing a certain amount of coke powder to the molten steel before EAF the tapping; controlling the refined slag (FeO)≤1.50%, basicity 2.0~4.0 and taking appropriate calcium treatment and staged argon blowing operation; to control the feeding speed of the sulphur wire in the range of 50~150 m/min; and cleaning the tundish and using special slag for sulfur-containing steel etc process measures, the nozzle blockage decreases, the sulfide rating is ≤3, the secondary oxidation of liquid reduces, and the casting accident is avoided.

Material Index SEM, EDS, Nozzle Clogging, Improvement Measures

在实际生产过程中,含硫钢因其独特的生产工艺和化学成分,易出现水口堵塞、多炉连浇不顺畅乃至断浇等问题;此外,堵塞物还会在钢液的持续冲刷下脱落并混入结晶器,进而在铸坯中形成夹杂物,对连铸坯质量产生不利影响^[1-2]。未经钙处理的水口堵塞物成分主要由 Al₂O₃、TiO₂-Al₂O₃ 等复合夹杂物组成,而经过钙处理的水口堵塞物成分主要是高熔点的固态铝酸钙、CaS 或镁铝尖晶石等^[3]。

钢厂在试生产 E355S 含硫钢初期,含硫钢启铸炉号存在不同程度的水口结瘤现象,最多只能连浇 3 炉。通过分析全工艺流程钢样夹杂物和水口结瘤物,从而得出水口堵塞的原因并提出改进措施。

1 试验方法

钢厂生产 E355S 含硫钢的工艺路线是 90 t EAF → LF → VD → 四机四流弧形连铸 → 入缓冷坑 → 轧制。钢液经电弧炉脱磷、脱碳、去气、去夹杂等操作后,在出钢过程中向钢包加入合金料进行预脱氧。钢液在 LF 钢包炉进行加热,且全程进行吹氩气搅拌,前期喂铝线对钢液进行强脱氧;根据全过程取样的分析结果进行元素成分调整,VD 前喂入实芯纯钙包芯线,经 VD 炉真空处理,启铸炉 VD 后一次性喂入硫线将钢中硫含量调整到标准规格。通过此工艺生产的 E355S 含硫钢的主要化学成分如表 1 所示。

表 1 E355S 钢的化学成分/%
Table 1 Chemical composition of E355S steel /%

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	Al
0.10 ~ 0.21	0.15 ~ 0.50	1.20 ~ 1.60	≤ 0.025	0.010 ~ 0.050	≤ 0.5	≤ 0.50	≤ 0.50	≤ 0.30	0.005 ~ 0.050	0.005 ~ 0.050

工序取样点分别是 LF 终点 (VD 抽真空前)、VD 破空后 (喂铝线、钙线前)、喂硫线前 (喂钙线软吹后) 和吊包前 (喂硫线软吹后)。利用 EVO-MA10 蔡司扫描电子显微镜 (SEM) 观察水口堵塞样和各钢样的夹杂物二维形态和分布,并用自带的 Oxford 能谱仪 (EDS) 分析各钢样的单位面积夹杂物个数、成分、形貌和水口堵塞样的形貌、成分。

2 试验结果及分析

2.1 各工序样品夹杂物分析

利用 Oxford 能谱仪 (EDS) 对每个样品的扫描面积为 80 mm², 获取夹杂物总数为 1 603 个, 表 2 是每个工序样品中夹杂物分析结果。

由表 2 可以看出, LF 终点 → VD 破空 → 钙后软吹这 3 道工序的夹杂物粒径变化很大, 而后 2 道工

序的夹杂物粒径变化并不明显; E355S 含硫钢单位面积显微夹杂物个数明显因所处工序不同而差别很大, 在前 3 道工序中, 单位面积夹杂物个数呈递减趋势, 而最后 1 道工序的单位面积夹杂物猛增至 10.82 个/mm²; 各工序样品中粒径在 10 μm 以下的夹杂物占比均在 94% 以上, 特别是硫线软吹 3min 后所取样品中的夹杂物粒径小于 10 μm 的比例达到 97.67%, 这将会增加其在水口处聚集的几率。

此外, 对各工序样品的夹杂物类型进行统计, 如表 3 所示。VD 破空样品中单位面积上 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 系夹杂物个数显著降低; 经钙后软吹这道工序后, 虽然增加了钢中 CaS 的单位面积个数, 但也明显减少了 CaO-MgO-Al₂O₃ 系夹杂物单位面积个数; 而硫线软吹这道工序能使钢中各类夹杂物均有不同程度的增加, 尤以 MnS 夹杂物数量增加最多。

使用 Origin 软件绘制 CaO-MgO-Al₂O₃ 三元相图, 如图 1 所示。图 1 中阴影区域为 1 600 °C 时 CaO-MgO-Al₂O₃ 三元相图的液相区域, 由 Factsage 计算得到。LF 终点样品钢中的夹杂物以铝酸钙、镁铝尖晶石和 CaO-MgO-Al₂O₃ 系复合夹杂为主, 复合夹杂物中 Al₂O₃ 组分偏高, 此外还发现少量 CaO-MgO、Al₂O₃ 和低熔点夹杂物, 如图 1(a); 经 VD 破空后, CaO-MgO、铝酸钙和镁铝尖晶石等夹杂物向 CaO-MgO-Al₂O₃ 系复合夹杂物转变, 复合夹杂物中 Al₂O₃ 组分增高、MgO 组分偏低, 而液相区低熔点夹杂物明显增多, 这对减少水口堵塞有利, 此外还发现纯 CaO, 如图 1(b); 钙线软吹后, 没有镁铝尖晶石, 这是因为通过钙处理可使镁铝尖晶石转换为液态铝酸钙^[4], 但低熔点夹杂物明显减少, CaO-MgO 夹杂

表 2 E355S 钢的夹杂物分析
Table 2 Inclusions Analysis of E355S steel

试样 工序	显微夹杂物粒径分布比例/%					单位面积夹 杂物个数/ (个·mm ⁻²)
	0 ~ 5 μm	5 ~ 10 μm	10 ~ 15 μm	15 ~ 20 μm	> 20 μm	
LF 终点	60.22	34.41	4.30	0	1.07	4.7
VD 破空	88.79	8.89	0	1.40	0.92	2.79
钙后软吹	76.09	19.27	2.47	0	2.17	1.73
硫线软吹	74.64	23.03	1.46	0.87	0	10.82

表 3 E355S 钢的夹杂物类型和数量/(个·mm⁻²)
Table 3 Inclusion type and number in E355S steel / (No·mm⁻²)

试样工序	CaO-MgO-Al ₂ O ₃	CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃	MnS	CaS
LF 终点	2.6	2	0.35	0.45
VD 破空	2.54	0.25	0.11	0.11
钙后软吹	1.48	0.24	0.09	1.57
硫线软吹	3.48	1.04	9.77	1.58

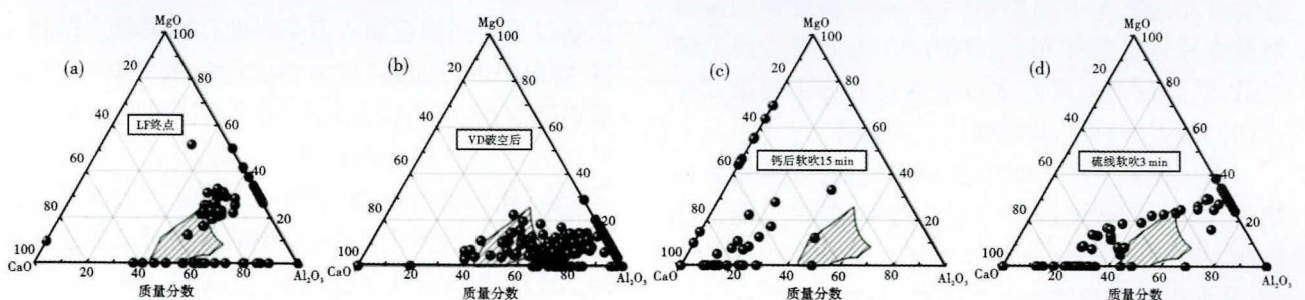


图 1 夹杂物组成分布变化: (a) LF 终点; (b) VD 后; (c) 加钙后软吹 15 min; (d) 喂硫线后软吹 3 min

Fig. 1 Change of distribution of inclusions ingredient: (a) LF end; (b) after VD; (c) after adding calcium, soft argon blowing for 15 min, and (d) after feeding sulfur wire, soft argon blowing for 3 min

物增多,部分 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物中 CaO 组分很高,这很可能说明钙处理过量,如图 1(c);经硫线软吹后,镁铝尖晶石类夹杂重新出现, $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 系复合夹杂物中 CaO 组分的所占比例降低、 Al_2O_3 组分的比例升高,这可能是加硫线后钢中增加的[S]抑制了 Al_2O_3 的变性,使高 CaO 组分的复合夹杂物向高 Al_2O_3 组分的复合夹杂物进行逆向转变^[5],但加硫线的命中率不高,使逆向变性生成的低熔点复合夹杂物很少,如图 1(d)。此种含硫钢通过钙处理后得到的夹杂物多数是高熔点夹杂物,其可能在水口壁聚集成大型聚合物,从而引起水口堵塞。

2.2 水口堵塞样的检测

依次从堵塞水口外层(靠近耐火材料)向水口内层(靠近钢液)进行扫描电镜观察,发现有明显分层现象。各观察点的电镜图和各样点原子百分比和化合物百分比见表 4 所示。

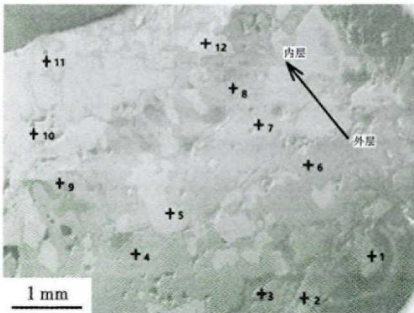
结合表 4 中图和数据可知,水口外层(耐火材

料层)主要物质为氧化铝(观察点 1 和 2 区域),来源于钢液中的 Al_2O_3 或水口材料中的二氧化硅、氧化钾和氧化钠等杂质在浇铸温度下与钢液中的溶解铝发生氧化还原反应的生成物,此外,还发现少量冷钢,原因可能是水口烘烤温度不够;次外层主要物质是铝酸钙类夹杂物(观察点 3、4、6 和 7 区域),其中还发现有少量铁的氧化物(观察点 5 区域),铝酸钙是在水口耐火材料表面沉积的 Al_2O_3 与钙处理后钢液中溶解的钙的反应产物,因其 $(\text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{CaO})$ 在 1~3,所以观察的铝酸钙主要为 $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$;紧邻次外层的是次内层,其主要物质是 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 系复合夹杂物(观察点 8 区域)和 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 系夹杂物(观察点 9 区域),镁铝尖晶石类夹杂物是钢中 MgO 以冷钢为骨架粘附在致密的氧化铝层上形成的;水口内层(凝钢层)主要物质为金属铁及其氧化物(观察点 10、11 和 12 区域),来源于浇铸结束时的低温钢水。对水口堵塞样的检测中没有发现硫化钙夹杂。通过以上分析可知,该水

表 4 水口堵塞样各点原子、化合物百分含量

Table 4 Atoms percent and ingredient at each point in nozzle blockage sample

观察点 区域	原子百分含量/%					化合物百分含量/%			
	Fe	Mg	Al	Ca	O	FeO	CaO	Al_2O_3	MgO
1	-	-	40.00	-	60.00	-	-	100	-
2	-	-	40.00	-	60.00	-	-	100	-
3	-	-	34.79	6.51	58.70	-	17.07	82.93	-
4	-	-	33.94	7.58	58.48	-	19.72	80.28	-
5	50.00	-	-	-	50.00	100	-	-	-
6	-	-	33.97	7.54	58.49	-	19.63	80.37	-
7	-	-	28.24	14.70	57.06	-	36.4	63.6	-
8	-	7.71	28.20	7.04	57.05	-	18.43	67.07	14.5
9	-	13.65	29.08	-	57.27	-	-	72.94	27.06
10	50.00	-	-	-	50.00	100	-	-	-
11	50.00	-	-	-	50.00	100	-	-	-
12	50.00	-	-	-	50.00	100	-	-	-



口堵塞物不全是钢中夹杂物在水口处的富集,而是一系列复杂反应的结果,主要由 FeO 、 Al_2O_3 、 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 组成。

3 热力学分析

由文献[4,6]表明,随着钙线的加入,钢中溶解的钙含量不断递增,虽然理论上会有 CaO 生成,但生成 CaO 所需的平衡 Ca 含量很大,实际生产中加入的钙线在钢液中的溶解钙含量达不到此要求,所以钢液中一般不会有 CaO 的产生; Al_2O_3 与 Ca 反应生成的夹杂物依次为 $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow$

$\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$;当钢中 Al_2O_3 经钙处理变性为低熔点的 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ (熔点为 $1455\text{ }^\circ\text{C}$) 时,对钢液的流动性和可浇性有较好的改善作用;控制 $[\text{Ca}]/[\text{Al}_s]$ 在合理范围内,可显著改善水口堵塞问题,塞棒腐蚀也不严重。

钢液进行钙处理时,会发生下列反应^[6]:



$$\lg K = \lg \frac{a_{(\text{CaO})}^3 \cdot a_{[\text{Al}]}^2}{a_{(\text{Al}_2\text{O}_3)} \cdot a_{[\text{Ca}]}^3} = \frac{15\ 661}{T} - 2.58$$

随钢液的 $a_{[\text{Ca}]} / a_{[\text{Al}]}$ 不同,夹杂物可为纯 CaO

或纯 Al_2O_3 或中间产物(铝酸钙)。由 $CaO-Al_2O_3$ 系二元相图^[7]可知,1873 K 时 $L/CaO \cdot Al_2O_3$ 平衡态可以认为是形成液态铝酸钙的开始, L/C 平衡态可以认为是形成液态铝酸钙的终了, $L/CaO \cdot Al_2O_3$ 平衡态与 L/C 平衡态之间是液态铝酸钙^[8]。1873 K 时各平衡态下 CaO 、 Al_2O_3 的活度参照文献[6,9-10],由式(1)可作出1873 K、不同平衡态下生成液态铝酸钙时的 $Ca-Al$ 活度曲线,如图2所示。

由图2可知,当钢液中 $[Al]$ 活度在 0.024% ~ 0.053% 时, $L/CaO \cdot Al_2O_3$ 平衡态上开始生成液态铝酸钙时对应的 $[Ca]$ 为 0.00017% ~ 0.00029%, L/C 平衡态上形成终了液态铝酸钙时对应的 $[Ca]$ 为 0.0038% ~ 0.0065%,结合图2来看,控制钢液中溶解钙的活度在 $2.9 \times 10^{-6} \sim 38 \times 10^{-6}$,形成的夹杂物为液态铝酸钙夹杂,其流动性较好,不会堵塞水口;但实际生产表明,控制 $[Ca]/[Al]$ 在 0.10 ~ 0.15 时可显著降低水口堵塞^[4],对应的溶解钙含量为 $24 \times 10^{-6} \sim 79.5 \times 10^{-6}$ 。所以钢中最佳的溶解钙含量在 $24 \times 10^{-6} \sim 38 \times 10^{-6}$ 。此外,还需配合使用氩气进行搅拌,以促进溶解钙在钢中均匀分布,使夹杂物变性均匀、彻底。

含硫钢在进行钙处理时除考虑钢中 Ca 、 Al 组分外,还应考虑 S 含量的影响,当钢中硫含量较高时,会发生如下反应并生成高熔点硫化钙夹杂^[11]:



$$\lg K_{(CaS)} = \lg \frac{a_{(CaS)}}{a_{[Ca]} \cdot a_{[S]}} = \frac{28\,300}{T} - 10.11$$

根据文献[6,9-10]和式(2)可作出1873 K 下生成硫化钙时的 $Ca-S$ 活度曲线,见图3,钙处理过量将 Al_2O_3 变性为铝酸钙外,钢中多余的钙会与硫结合成硫化钙夹杂,这便是表3中 CaS 夹杂在单位

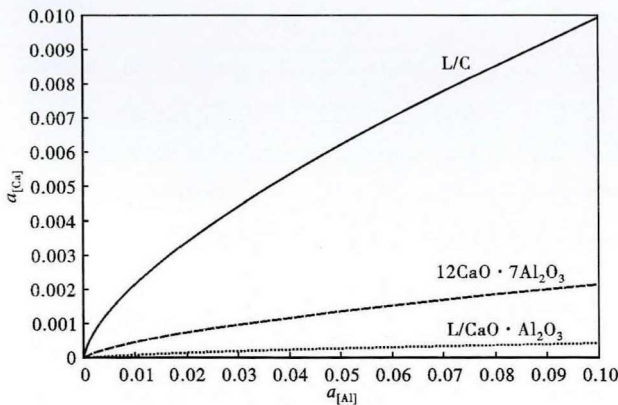


图2 钢中 $Al-Ca$ 活度平衡关系,1873 K

Fig. 2 Activities equilibrium diagram of $Al-Ca$ in liquid at 1873 K

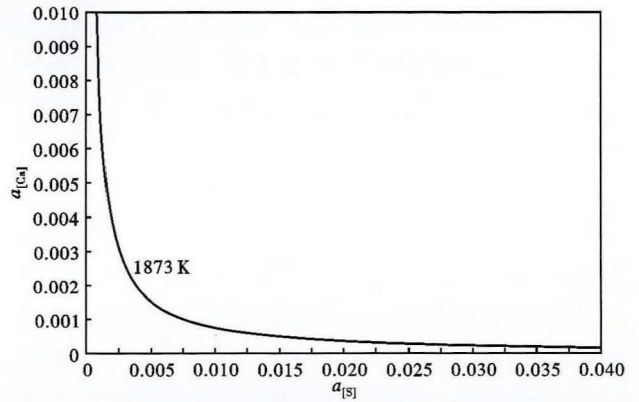


图3 钢中 $Ca-S$ 活度平衡关系,1873 K

Fig.3 Activities equilibrium diagram of $Ca-S$ in liquid at 1873 K

面积上从 0.11 个增至 1.57 个的原因所在。含硫钢一般还会进行喂硫线操作,极易与 Ca 、 Mn 等生成 CaS 、 MnS 等杂质。硫线的加入不仅会促使硫继续与钢中多余的钙反应,还会与钢中其他元素如 Mn 等反应,这就是表3中单位面积上 CaS 夹杂略有增加而 MnS 夹杂从 0.09 个猛增至 9.77 个的原因。

4 工艺改进措施及应用效果

4.1 电弧炉工序

含硫钢属于低碳钢,钢液经电弧炉冶炼后,钢中碳含量较低、氧含量较高,易增加精炼工艺的脱氧负担。为此采取的措施是:在电弧炉配料时铁水占比大于 50%、其余使用优质废钢,但不配渣钢、地皮料和大块冷钢等;出钢前向钢液喷吹一定量的焦炭粉^[12],这样既可防止钢液回磷,又能满足 $[C] \geq 0.008\%$ 、 $[P] \leq 0.012\%$ 、 $T \geq 1620\text{ }^\circ\text{C}$ 的出钢要求;出钢过程采用偏心炉底出钢以及留钢操作,严禁下渣。电弧炉工艺控制情况见表5。

由表5可知,对各炉号的铁水量,电弧炉终点 C 、 P 含量和出钢温度 T 均达到工艺目标要求。

4.2 优化二次精炼工艺

(1)在精炼初期需合理调整除尘开度,保证精炼过程炉内气氛微正压操作;根据渣况使用萤石调整炉渣流动性;精炼过程中为尽快形成白渣,需使用

表5 电弧炉过程数据
Table 5 Electric arc furnace process data

炉号	铁水量 /t	电弧炉终点控制情况		
		C /%	P /%	T / $^\circ\text{C}$
1734197VL	61	0.110	0.010	1 643
1734198VL	61	0.100	0.010	1 623
1734199VL	60	0.143	0.009	1 636
1734200VL	60	0.140	0.008	1 630
1734201VL	60	0.080	0.007	1 640
1734202VL	80	0.109	0.012	1 635

碳化硅、碳粉和碳化钙进行调查;当白渣形成后,多批次均匀加入碳粉:碳化硅(2:1),以保持良好的还原氛围;根据定氧情况加入铝粒进行脱氧,为增强对脱氧产物的吸附能力,需确保 LF 吊包转 VD 前渣中 $(\text{FeO}) \leq 1.50\%$,二元碱度 2.0~4.0。

(2) VD 前喂入实芯纯钙包芯线 0.2~3.0 m/t 进行钙处理,在真空度 60~70 Pa 下保持 10 min 以上,启铸炉 VD 后喂入实芯纯钙包芯线 1.0~3.0 m/t,其它炉次不喂入钙线,以确保钢中溶解钙含量在 $24 \times 10^{-6} \sim 38 \times 10^{-6}$;数分钟后进行喂硫线操作,为防止硫线中断需用专用喂丝机以 50~150 m/min 的速度^[13]进行,喂硫线后考虑钢水会有小幅温降,所以过热度控制目标为 20~50 °C;硫线的加入还会促使形成硫化物夹杂,这类夹杂物对 Al_2O_3 的变性、铸坯质量和钢液的可浇性不利,为使硫化物夹杂级别的合格率达到 100%,应适当控制精炼终点硫含量。

(3) 采用全程分阶段吹氩精炼工艺,具体操作步骤为:控制前期氩气压力 0.3~0.4 MPa,其目的是促进化渣;控制中期氩气压力 0.4~0.5 MPa 可促进脱硫去夹杂;控制后期氩气压力 0.2~0.3 MPa 可促进小型夹杂物上浮;这样既能有效控制钢液不裸露、防止其二次氧化,又能促使夹杂物进行均匀变性,对提高钢液纯净度有显著效果^[14]。

4.3 优化弧形连铸工序

对上线前的中间包进行清理,除包内无杂物,还

必须确保有足够的烘烤温度和烘烤时间;在采取长水口吹氩保护浇铸时,长水口密封垫圈必须完好无损;针对生产过程中出现的铸坯卷渣问题,可通过使用含硫钢专用保护渣来解决^[15];铸坯拉速则根据过热度进行在线实时调整^[16]。

采取上述改进措施后,钢厂在生产计划浇次内没有发生因结瘤导致的停浇、断浇或回炉等事故。

5 结论

(1) 各工序流程样中粒径小于 10 μm 的夹杂物占比均在 94% 以上,单位面积夹杂物个数随工序呈先降低后增加的趋势,夹杂物类型主要有 CaS 、 MnS 、 Al_2O_3 、 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 系复合夹杂物等;水口堵塞物由 FeO 、 Al_2O_3 、 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 组成。

(2) 提出的改善措施是:在电弧炉出钢前喷吹一定量焦炭粉可使 C、P 含量和温度达到出钢要求;控制 $(\text{FeO}) \leq 1.50\%$ 、碱度在 2.0~4.0 可使渣对脱氧产物进行更好的吸附;对钢液进行合适的钙处理,确保溶解钙的活度在 $24 \times 10^{-6} \sim 38 \times 10^{-6}$ 可减少水口堵塞现象;以 50~150 m/min 进行喂硫线操作可更好的控制精炼终点硫含量,以便使硫化物夹杂级别 ≤ 3.0 级的合格率达到 100%;采用分阶段吹氩操作可显著提高钢液纯净度;对中间包进行清扫、进行全流程保护浇铸和使用含硫钢专用保护渣可针对性的减少钢液二次氧化和铸坯卷渣现象。

参考文献

- [1] 夏速萍. 易切削钢的新技术与发展方向[J]. 南钢科技, 2003(1): 68-68.
- [2] 陈 伟, 苏鹤洲, 张卫强. ML35 钢浇铸过程水口结瘤原因分析及控制[J]. 炼钢, 2009, 25(2): 19-21.
- [3] 单庆林, 王保生, 单 伟, 等. 中碳低硅铝镇静钢连铸浸入式水口堵塞的原因分析及解决措施[J]. 连铸, 2016, 41(3): 14-18.
- [4] 段永卿, 陈晓辉, 王月聪. 冶炼含铝钢中包水口堵塞原因分析及改进[J]. 钢铁钒钛, 2015, 36(6): 123-127.
- [5] 孙 彪. 圆坯含硫钢结瘤原因分析及预防措施[J]. 安徽冶金, 2018(2): 24-28.
- [6] 龚 坚, 王庆祥. 钢液钙处理的热力学分析[J]. 炼钢, 2003, 19(3): 56-59.
- [7] 朱万军, 王光进, 田 青, 等. 钙处理钢水浸入式水口堵塞成因分析[J]. 武汉科技大学学报, 2009, 32(5): 471-475.
- [8] 姜玉龙, 郑 万, 齐盼盼, 等. 150 t LF 精炼喂钙线处理钢中夹杂物的演变[J]. 特殊钢, 2016, 37(3): 8-12.
- [9] Blazenko Korousic. Fundamental Thermodynamic Aspect of the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ System. Steel Research, 1991, 62(7): 285-288.
- [10] Lu D Z. Calculation of CaS and MnS Activities and Their Application to Calcium Treatment of Steel[J]. Ironmaking and Steelmaking, 1991, 18(5): 342-346.
- [11] 魏 军, 严国安, 田志红, 等. CSP 低碳铝镇静钢水可浇性控制[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(6): 666-670.
- [12] 李润霞. 含硫齿轮钢夹杂物控制[A]. 中国金属学会. 2012 年全国炼钢-连铸生产技术论文集(上)[C]. 中国金属学会, 2012: 7.
- [13] 邓志银, 成 刘, 迟云广, 等. 一种用于生产含硫易切削钢的精炼渣及循环利用方法. 中国, CN107419063A[P]. 2017-12-01.
- [14] 赵冠夫. 含铝含硫钢水可浇性控制研究[N]. 世界金属导报, 2018-08-14(B03).
- [15] 韩伦杰, 王忠英, 陈子坤, 等. 低碳低氧含硫钢的工艺优化[J]. 现代冶金, 2017, 45(6): 11-14.
- [16] 石可伟, 卢洪星, 张洪才, 等. 含硫钢 8620RH 夹杂物控制技术工艺实践[J]. 连铸, 2016, 41(1): 18-21.

陈 德(1995-), 男, 武汉科技大学硕士生, 2018 年华北理工大学(本科)毕业, 新钢种研发。

E-mail: 1947629986@qq.com

收稿日期: 2019-08-08