

低碳低硅-铝镇静钢 C4C-Q 工艺优化实践

杨建 黄治成

(湖南华菱湘潭钢铁有限公司,湘潭 411101)

摘要 对 120 t BOF-LF-RH-CC 流程生产的低碳低硅-铝镇静钢 C4C-Q (/% :0.02 ~ 0.06C, ≤0.06Si, 0.02 ~ 0.05Al) 冶炼硅含量高,可浇性差的原因进行了分析。通过工艺优化,转炉采用出钢两次挡渣模式和出钢后脱碳工艺,降低出钢氧含量,减少后期脱氧过程中生成 Al₂O₃ 夹杂;通过优化 LF 脱氧模式、结合调节钢包底吹搅拌,可以在保证钢水脱硫的同时,将钢水增硅控制在 0.03% 以内,中间包 [Si] ≤0.045%,LF 精炼渣流动性好,吸附夹杂物能力强。连铸提高开浇时保护浇铸效果,采用高钢水液面开浇,可以促进中间包夹杂物上浮,提高开浇时中间包钢水温度,同时增加钢水静压力,减少开浇时 Al₂O₃ 夹杂在水口内壁结瘤,从而生产出成分为/% :0.04 ~ 0.06C, 0.034 ~ 0.042Si 和 0.028 ~ 0.034Al 可浇性好的 C4C-Q 钢。

关键词 低碳低硅 铝镇静钢 可浇性

Optimization Practice of Process for Low Carbon and Low Silicon-Aluminum Killed Steel C4C-Q

Yang Jian and Huang Zhicheng

(Hunan Hualin Xiangtan Iron and Steel Co Ltd, Xiangtan 411101)

Abstract The causes of the exceeding silicon content and poor pour ability of low carbon and low silicon-aluminum killed steel C4C-Q (/% :0.02 ~ 0.06C, ≤0.06Si, 0.02 ~ 0.05Al) produced by 120 t BOF-LF-RH-CC flow sheet are analyzed. Through process optimization, adopting BOF tapping twice slag blocking mode and decarburizing process after tap, molten steel to decrease tap oxygen content and reduce Al₂O₃ inclusions forming in the later deoxidation process combining optimizing the deoxidation mode of LF furnace and adjusting the ladle bottom blowing stirring, the silicon increase in molten steel can be controlled within 0.03% while the desulfurization is ensured, the [Si] ≤0.045% in the tundish, the LF refining slag has good fluidity and strong ability to absorb inclusions; by casting improving the protective effect during the start casting, adopting high liquid steel level when start casting of first furnace, to promote the inclusion in the tundish to float upwards, improve the molten steel temperature in the tundish, increase the static pressure of the molten steel at the same time, and reduce the Al₂O₃ inclusions nodulation on the inner wall of the nozzle, therefore good pour ability C4C-Q steel composition with/% :0.04 ~ 0.06C, 0.034 ~ 0.042Si and 0.028 ~ 0.034Al is produced.

Material Index Low Carbon and Low Silicon, Aluminum Killed Steel, Pour Ability

钢厂冶炼低碳低硅-铝镇静钢 C4C-Q 采用 BOF-LF-RH-方坯连铸的工艺流程。在冶炼初期,生产过程存在以下问题:(1)钢液 Si 含量超标炉次偏多;(2)钢液可浇性差,尤其体现在浇次首炉,浇注过程中极易发生中间包水口堵塞的现象,水口堵塞后造成连铸结晶器液面波动大,部分甚至超过 ±10 mm,结晶器内的钢水易出现卷渣和二次氧化,导致相应的铸坯降级或判废处理,故一般控制浇次长度 ≤5 炉。国内多个企业、研究机构对低碳低硅铝镇静钢工艺进行了研究^[1-4],本文通过对存在的问题进行分析研究,提出改进措施并在实际生产中应用实施,取得良好效果。

1 成分及工艺设计

C4C-Q 钢为汽车用钢,用于生产汽车安全带构件、汽车底盘件等。用户对产品的化学成分、夹杂物

表 1 C4C-Q 钢的化学成分要求 /%

Table 1 Chemical composition requirements for C4C-Q steel /%

C	Si	Mn	P	S	Al
0.02 ~ 0.06	≤0.06	0.25 ~ 0.35	≤0.020	≤0.010	0.020 ~ 0.050

要求和表面质量要求较高。其成分要求如表 1 所示。对夹杂物要求:A、B、D、Ds 类夹杂 ≤1.5 级,C 类夹杂 ≤1.0 级。

C4C-Q 钢为低碳低硅-铝镇静钢,采用铝系合金对钢水进行脱氧,转炉出钢氧含量高,而铝脱氧产物熔点高,很难去除,操作不当会使大量的 Al₂O₃ 夹杂残留在钢水中,容易造成水口堵塞。用钙处理使钢中高熔点的 Al₂O₃ 夹杂物与 CaO 形成低熔点的铝酸钙来消除水口堵塞是最有效的防止措施。然而,钙处理时钢水中溶解 Ca 与 S、O 含量关系复杂,致使钙处理效果不稳定,控制不好会侵蚀塞棒和水口,导

致控流不稳,结晶器液面波动大,影响铸坯表面质量和夹杂物控制^[5]。

该钢厂炼钢工序有 2 座 120 t 复吹转炉、4 座双工位 LF 精炼炉、1 座双工位 RH 精炼炉、1 座双工位 VD 精炼炉、2 台板坯连铸机、1 台 5 机 5 流矩形坯连铸机。根据用户对产品要求及装备、原料控制,确定炼钢工艺流程为:120 t 转炉-LF-RH-350 mm × 430 mm 矩形坯连铸。

2 存在的问题分析

2.1 Si 含量超标

因 LF 进站[S]在 0.030% 以上,LF 首先需对钢水和炉渣完全脱氧,造强还原性渣脱硫。为保证钢水脱氧、脱硫效果,将钢水前中期[Al]应控制在 0.05% 以上,同时铝丸加入量控制在 1.5 kg/t_钢 左右。如此保证了脱氧效果,但渣中的(SiO₂)几乎完全被 Al 还原进入钢水,导致多炉 Si 含量超标改判。分析渣中(SiO₂)主要来源为:(1)入炉铁水 Si 含量不稳定,部分炉次超过 0.70%;(2)转炉出钢末期下渣量偏大;(3)石灰、预熔渣中含有(SiO₂),预熔渣中(SiO₂)达到 5%。因此,要减少 Si 还原进入钢水的量,改进措施为:(1)降低转炉入炉 Si 含量;(2)改进操作,降低转炉下渣量;(3)采用低硅石灰、预熔渣等原辅料;(4)优化脱氧工艺,降低白渣后(SiO₂)被 Al 还原进入钢水的量。

2.2 可浇性差

主要体现在浇次首炉,开浇后塞棒位置急剧上涨,随着浇注过程的进行,塞棒位置会逐渐降低。实践表明:当塞棒位置上涨达到 45 mm 时,会直接导致结晶器液面续流不上而关流。当塞棒位置最大上涨超过 20 mm 时,后期塞棒降低过程中会伴随着塞棒和结晶器液面的波动,且塞棒位置上涨越高,伴随的液面波动越急剧,塞棒和液面波动一般会伴随 3~5 炉,严重影响铸坯质量。为此,在浇次首炉 0.5、2.5、4.5、20 m 铸坯处(1 炉次铸坯长度约 24 m)近表面处取样进行 Al、O、N 含量分析,其结果见表 2。

表 2 首炉不同铸坯位置 Al、O、N 含量 / %

Table 2 Al、O、N content in each casting blank position of first heat / %

铸坯位置/m	Als	Al _T	T[O]	N
0.5	0.008 8	0.014 7	0.004 2	0.006 9
2.5	0.016 3	0.020 9	0.002 4	0.005 3
4.5	0.020 4	0.023 7	0.002 2	0.004 9
20	0.023 6	0.027 0	0.002 1	0.004 5

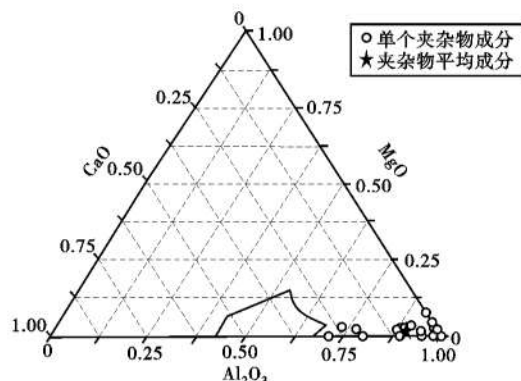


图 1 工艺优化前首炉 0.5 m 铸坯处夹杂物分布

Fig. 1 Distribution of ingredient of inclusions at first heat 0.5 m casting bloom before process improvement

通过不同铸坯位置 Al 含量和气体含量结果:铸坯的 0.5 m 处 T[O] 较正常(20 m 处)高 0.002 1%, [N] 高 0.002 4%, [Al]_s 低 0.014 8%。由此可知,首炉开浇时铝损严重。在浇次首炉 0.5 m 铸坯近表面处取样进行夹杂物分析,其夹杂物分布见图 1。

从图 1 可以看出,首炉开浇后塞棒急剧上涨的主要原因 Al₂O₃ 夹杂物堵塞在水口使得钢水通道变窄导致。结合实际工艺控制,总结其发生的原因主要为:(1)钢水开浇阶段,由于保护浇铸不好,钢水裸露,二次氧化严重,生成 Al₂O₃ 夹杂物聚集在塞棒头、上水口等钢水流经通道,使得钢水通道变窄导致。这是塞棒急剧上涨直接的原因;(2)开浇时中间包温度为 1 000 ℃ 左右,钢水流经长水口和中间包内壁时温度降低较多,使 Al-O 平衡遭到破坏,析出的 [O] 与钢水中的 [Al] 反应^[6],生成 Al₂O₃; (3)在中间包钢水液面高度约 300 mm 时开浇下,钢水静压力不足,无法冲刷附着在塞棒、水口的 Al₂O₃ 夹杂。因此,为了改善钢水可浇性,可以优化转炉工艺、减少转炉出钢 O 含量,优化精炼造渣、钙处理工艺、提高钢水纯净度,改善连铸开浇操作、提高保护浇注效果等,减少开浇时堵塞在塞棒等位置处 Al₂O₃ 夹杂物的数量。

3 优化工艺

3.1 铁水选取

因钢厂采用“一罐到底”模式,铁水未经脱硫处理而直接倒入转炉,故根据铁水实际成分控制及 C4C-Q 钢成分设计要求,制定了铁水成分要求,如表 3 所示。

转炉终渣中(SiO₂)一般在 13% 以上,钢水出尽时会有部分渣进入钢水。在 LF 造渣脱氧、脱硫时,渣中(SiO₂)容易被 Al 还原成 Si 而进入钢水,导致钢

表3 铁水成分要求 / %

Table 3 Molten iron composition requirements / %

Si	P	S
0.20 ~ 0.45	≤ 0.150	≤ 0.050

水增 Si。为此,转炉选用 Si 含量 0.20% ~ 0.45% 的铁水,以减少转炉渣中的 SiO₂ 进入钢水。

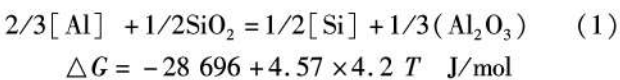
3.2 转炉工艺

冶炼低碳系列钢种,在铁水 [Si] 0.20% ~ 0.45%,转炉终渣中 (SiO₂) 为 15% 左右, (FeO) 为 15% 以上,出钢挡渣不好,会导致 (1) 大量的转炉终渣进入钢包,在 LF 炉钢水脱氧精炼时,渣中的 (SiO₂) 容易被 Al 还原成 Si 而进入钢水,引起钢水增 Si。(2) 渣中 (FeO) 在后续 LF 精炼脱氧过程中的产生大量的 Al₂O₃ 夹杂。为此,转炉采用挡渣球和滑板共同挡渣,利用转炉下渣检测系统判断下渣,挡渣球有效减少末期下渣量。从而减少转炉下渣量,减少转炉渣中 FeO、SiO₂ 进入钢水。

出钢过程中只加入适量石灰,不加入任何脱氧剂。出钢结束后,采用出钢后脱碳工艺,通过钢包底部大氩气搅拌 5 ~ 8 min,让钢水中的 [O]、[C] 进行反应,一方面可以降低钢水 O 含量,另一方面可以通过降低钢水 C 含量来提高转炉出钢 C 含量,实践表明,该工艺平均钢水脱碳率可达 31%。为此,可将转炉出钢 C 含量由 ≤ 0.04% 提高至 ≤ 0.055%。在转炉工况一定的情况下^[7],在冶炼过程中碳氧积变化不大,理论上: $P_{CO} = P^0$, $T = 1600$ °C 时,碳氧积 (m) = 0.0025,可计算出该工艺可以降低出钢定氧 0.016%,而 [O]、[C] 反应还可进一步降低钢水氧含量。而 Al₂O₃ 夹杂主要在转炉脱氧合金化过程中产生,转炉终点 O 含量低,可以减少后期脱氧过程中生成 Al₂O₃ 夹杂量。大氩气搅拌结束后,加入 Al 块等脱氧,出站钢水 Al 含量控制在 0.02% ~ 0.05%。

3.3 LF 工艺

LF 进站 S 含量一般在 0.030% 以上,而通过转炉出钢双挡渣工艺后,仍有少量下渣,加上顶渣石灰、预熔渣中含有一定的 (SiO₂),因此,为减少渣料中的 (SiO₂),应尽可能选择使用 SiO₂ ≤ 2.5% 的石灰和预熔渣。钢水增 Si,发生如下反应^[8]:



在 $T \geq 1550$ °C 时, $\Delta G < 0$ 。因此,为控制钢水增 Si,只能是减弱发生反应的动力学条件,使 SiO₂ 尽可能固化在顶渣中,减少 Si 被 Al 还原进入钢水

中的量。但钢水进行脱硫,又需要钢水与顶渣充分搅拌接触来促进脱硫反应的进行,因此如何减少钢水增硅和脱硫是 LF 工艺的控制难点。

通过理论计算和实践摸索,总结出以下工艺控制要点:LF 进站后将钢水升到 ≥ 1550 °C 以上,前期通过喂铝线将钢水 Al 含量保持在 0.030% ~ 0.060%,同时铝丸加入量控制在 0.2 kg/t_钢 以下,这样既保证了钢水脱氧效果,又减少过多的 Al 与顶渣反应,利用钢包底吹大氩气搅拌脱硫,待钢水 S 含量降低至 ≤ 0.005% 以下。调整氩气流量至弱吹,减弱钢渣搅拌接触的动力学条件,多批次均匀铲入铝丸 0.40 ~ 0.60 kg/t_钢 进行渣面脱氧,要求终渣为浅绿色,此时渣中 TFe < 0.8%,保持时间 ≥ 20 min,钢水出站前 20 min 内不得进行成分调整,出站前喂入纯钙线 0.5 ~ 1.5 m/t_钢,可以将 Al₂O₃ 夹杂进行变性处理后,充分利用 RH 净化钢水能力强的优势,将钢液中大尺寸夹杂物充分去除^[9]。

精炼渣系的组成不同,精炼渣对夹杂物的吸附效果也不同。C4C-Q 钢由于其钢种成分 Si 含量低,故要求将精炼渣中的 (SiO₂) 控制在 5% 以下,导致精炼渣碱度高 (CaO/SiO₂ > 8),炉渣流动性差,炉渣吸附夹杂物的能力不足。为此通过提高炉渣中 Al₂O₃ 的含量来保证炉渣的流动性以提高精炼渣吸附夹杂物的能力,工艺优化前后,LF 精炼终渣平均成分对比见表 4。

表4 工艺优化前后 LF 精炼渣成分 / %

Table 4 Ingredient of LF refining slag before and after process improvement / %

工艺	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TFe	MgO	CaO	MnO
优化前	28.51	1.78	0.52	6.85	58.76	0.04
优化后	36.53	3.77	0.68	5.51	50.39	0.03

工艺优化后,渣中 (Al₂O₃) 提高到 36.53%, (CaO) 降低到 50.39%,调整后炉渣熔点降低,炉渣的吸附夹杂能力好^[10]。渣中的 (SiO₂) 由 1.78% 提高至 3.77%,被 Al 还原进入钢水中的 Si 量减少。保持总渣量 > 15 kg/t_钢,大渣量可以增加 Al₂O₃ 容量和吸附效果。

3.4 RH 工艺

真空度至 67 Pa 以下后,保真空 8 ~ 12 min。部分残留在钢水内部未上浮的小尺寸的 Al₂O₃ 仍然会加大堵水口的发生几率,因此需要进一步喂入钙线进行变性处理,使钢中固态的 Al₂O₃ 夹杂转变为液态的铝酸钙。通过 (1) 将钙处理前钢中的 Al 含量

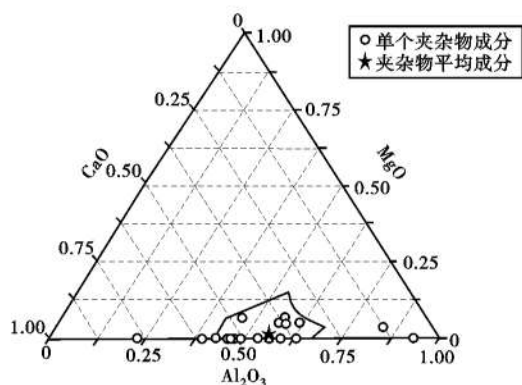


图 2 工艺优化后 RH 出站钢水夹杂物分布

Fig. 2 Distribution of ingredient of inclusions in molten steel at RH end after process improvement

控制在 0.027% ~ 0.035% ; (2) 控制钢水中的 Ca 含量在 $(25 \sim 40) \times 10^{-6}$, 使钢水 $[Ca]/[Al]$ 控制在 0.08 ~ 0.14, 根据 1600 °C 下的 $[Al]-[Ca]$ 平衡图^[11] 可知, 此时 Al_2O_3 夹杂变性为液态^[12]。对出站样取柄样进行夹杂物分析, 其夹杂物控制见图 2。

由图 2 可见, 经过钙处理后, 钢水中 Al_2O_3 夹杂物基本变性为液态铝酸钙夹杂, 不会在水口内壁堆积而堵塞水口。钢中相对过量的 Ca 不仅可以使 Al_2O_3 完全变性, 还可以与开浇时二次氧化生成的 Al_2O_3 反应形成低熔点铝酸钙, 减少在水口内壁堆积而堵塞水口, 同时也可防止钢水 Ca 含量过高而侵蚀塞棒头。钙处理结束后, 软吹 ≥ 20 min 出站, 促进夹杂物充分上浮。非浇次首炉, 取消钙处理工艺。

3.5 连铸工艺

钢水开浇前, 确认中间包吹氩系统良好, 检查中间包内的清洁程度, 发现异物等及时清理。中间包烘烤温度要 > 1200 °C。连铸全程保护浇铸, 钢包-中间包连接采用长水口, 中间包水口为浸入式水口, 均采用氩气密封, 保证浇注系统的正压状态, 避免因吸气造成钢水氧化, 上台钢水温度满足中间包钢水过热度 25 ~ 45 °C。中间包车到位后, 将通有氩气的钢管放入中间包底部进行赶气操作, 时间控制在 2 min 左右, 可以最大程度的赶走中间包内空气, 同时可以保持中间包温度 1100 °C 左右。钢包开浇后, 取出吹氩钢管。在中间包内加入 6 ~ 8 kg 纯钙线, 中间包钢水液面高度达到 300 mm 左右时, 开始向中间包快速加入覆盖剂, 保证钢液面不裸露, 减少钢水二次氧化产生 Al_2O_3 夹杂。中间包钢水液面高度达到 700 mm 后, 组织中间包开浇。高钢水液面开浇, 可以促进中间包夹杂物上浮, 提高开浇时中间包钢水温度, 同时增加钢水静压力, 减少开浇时 Al_2O_3 夹

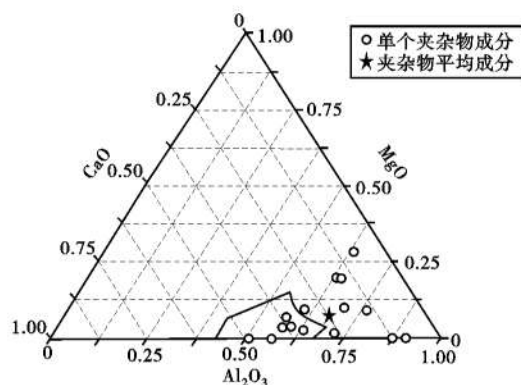


图 3 工艺优化后 0.5 m 铸坯处夹杂物分布

Fig. 3 Distribution of ingredient of inclusions at 0.5 m casting bloom after process improvement

杂在水口内壁结瘤。在浇次首炉 0.5 m 铸坯近表面处取样进行夹杂物分析见图 3。

浇次首炉开浇后, 钢水中固态 Al_2O_3 夹杂大幅减少, 转变为铝酸钙, 钢水可浇性得到提高。由于中间包耐材脱落, 导致钢水中 MgO 夹杂增多。

4 应用效果

4.1 钢水可浇性

工艺优化后, 浇次首炉开浇后, 塞棒上升最高控制在 10 ~ 15 mm, 钢水浇铸过程结晶器液面波动值在 ± 5 mm 以内, 浇铸过程中塞棒行程和液面波动大幅减少。基本解决了浇次首炉堵水口和液面波动问题。连浇炉数有 ≤ 5 炉延长至 ≥ 15 炉, 钢水可浇性和连浇炉数得到大幅提高。

4.2 成分控制

工艺优化后, 炉次中间包钢水成分检测结果见表 5。

可见, 中间包成分 $[Si]$ 均控制在 0.045% 以下, $[S]$ 控制在 0.003% ~ 0.004%, $[Al]$ 控制在 0.027% ~ 0.035%, 满足要求。炼钢过程 $[Si]$ 变化情况见图 4。

从炼钢过程钢水 $[Si]$ 变化情况可以看出, LF 进站后钢水中 $[Si]$ 在 0.001% 以下, 随着精炼的进行, 不断有 Si 还原进入钢水, 但均控制在 0.03% 以内, LF 出站 $[Si]$ 稳定控制在 0.04% 以下, 中间包钢水中

表 5 工艺优化后中间包钢水化学成分 / %

Table 5 Molten steel chemical composition in tundish after process improvement / %

炉号	C	Si	Mn	P	S	Al
1#	0.05	0.034	0.29	0.015	0.004	0.030
2#	0.05	0.034	0.30	0.010	0.003	0.028
3#	0.04	0.038	0.28	0.012	0.003	0.034
4#	0.06	0.042	0.29	0.013	0.004	0.032
5#	0.05	0.037	0.27	0.016	0.003	0.031

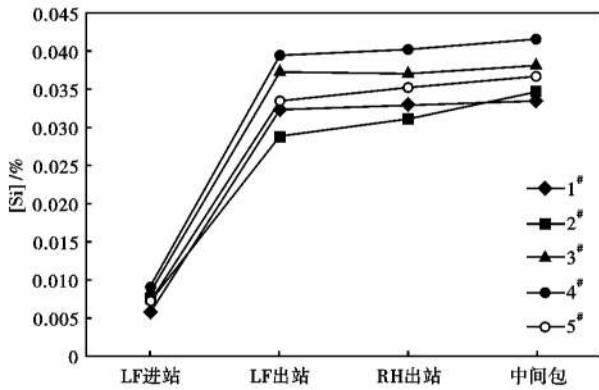


图 4 炼钢过程[Si]的变化

Fig. 4 [Si] change in steelmaking process

表 6 C4C-Q 钢 Φ20 ~ 30 mm 轧材夹杂物评级/级

Table 6 Inclusion rating of Φ20 ~ 30 mm rolled metal of steel C4C-Q/rating

炉号	A类		B类		C类		D类		Ds类
	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	
	≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.5	≤1.0	≤1.0	≤1.5	≤1.5	
1#	0	0	0	0	0	0	0	1	0.5
2#	0	0	0	0.5	0	0	0	1	1
3#	0	0	0.5	1	0	0	0	1	1
4#	0	0	0	1	0	0	0	1	1
5#	0	0	0	0	0	0	0	1	1.5

[Si]控制在 0.05% 以下,总体控制良好,较工艺优化前[Si]平均降低近 0.02%。

4.3 非金属夹杂

铸坯轧制成 Φ20 ~ 30 mm 的线材后,每炉次抽取 3 ~ 6 个 10 mm × 20 mm 的试样,按 GB/T10561-

2005 对夹杂物进行评级,统计试验炉次最大非金属夹杂评级见表 6。

可见轧材夹杂物主要为 0.5 ~ 1.0 级 B 类夹杂、1.0 级 D 类夹杂以及 0.5 ~ 1.5 级 D_s 类夹杂,满足产品要求。对轧材 T[O]进行抽查检测,其控制在 (13 ~ 17) × 10⁻⁶,较工艺优化前[O]平均降低 6 × 10⁻⁶,钢中夹杂物总量也有所降低。

5 结论

(1)通过对 C4C-Q 钢冶炼初期 Si 含量高,可浇性差的原因进行分析,从选取入炉原料、优化转炉、精炼、连铸工艺操作,最终生产出 Si 含量合格,可浇性好、纯净度高的钢水。

(2)转炉采用出钢两次挡渣模式和出钢后脱碳工艺,可以降低出钢[O]0.016%,减少后期脱氧过程中生成 Al₂O₃ 夹杂。

(3)通过优化 LF 脱氧模式、结合调节钢包底吹搅拌,可以在保证钢水脱硫的同时,将钢水增硅控制在 0.03% 以内,中间包[Si] ≤ 0.045%,LF 精炼渣流动性好,吸附夹杂物能力强,夹杂物控制满足要求。

(4)连铸提高开浇时保护浇铸效果,采用高钢水液面开浇,可以促进中间包夹杂物上浮,提高开浇时中间包钢水温度,同时增加钢水静压力,减少开浇时 Al₂O₃ 夹杂在水口内壁结瘤。

参考文献

[1] 宋万平, 贾旭岗, 梁世勇. 100 t BOF-LF-CC 流程冶炼 10B21 钢的工艺优化[J]. 特殊钢, 2015, 36(5): 17-20.

[2] 马晓芬, 周四明, 吴显辉, 等. 低碳低硅 SPHC 钢优化精炼工艺的生产实践[J]. 炼钢, 2013, 29(1): 7-10.

[3] 张海民. 低碳低硅铝镇静钢生产实践[J]. 炼钢, 2015, 31(3): 13-16.

[4] 陈玉鑫, 陈峰, 温瀚, 等. 低硫钢种的低硅精炼技术[J]. 钢铁, 2018, 53(7): 62-67.

[5] 刘学华, 韩传基, 蔡开科, 等. 小方坯连铸低碳低硅铝镇静钢可浇性[J]. 北京科技大学学报, 2015, 27(4): 431-435.

[6] 高洪涛, 毛志勇, 丁勇, 等. 低硅铝钢首罐钢水浸入水口防絮流分析[J]. 鞍钢技术, 2016(3): 50-54.

[7] 刘志龙, 韦乾永, 王冠. 冷镲钢 SWRCH6A 钢水可浇性研究与控制[J]. 南方金属, 2017(4): 1-3.

[8] 周贺贺, 曹余良, 王攀峰, 等. 低硅钢冶炼过程硅质量分数控制[J]. 中国冶金, 2013, 23(5): 41-43.

[9] 黄治成, 杨建, 周凯. 抗酸钢 Q345R 冶炼工艺实践[J]. 特殊钢, 2020, 41(4): 30-23.

[10] 杨俊, 张爱兵, 刘建兵, 等. 精炼炉渣控制方法: 中国, 201210484523.9[P]. 2015-03-04.

[11] 王国承. 钢中夹杂物尺寸控制理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015: 17-19.

[12] 张嘉华, 刘亚雄, 李志成. 低碳低硅钢可浇性生产实践研究[J]. 包钢科技, 2016, 42(6): 24-27.

杨建(1979-),男,硕士(2013年北京科技大学),工程师,2002年武汉科技大学(本科)毕业,炼钢、连铸工艺研究。
E-mail:103103@mail.hnxxg.com.cn

收稿日期:2021-07-26