



含钛焊丝钢水口结瘤原因分析及改进

周 健, 李 强, 赵家七, 张康晖
(江苏省沙钢钢铁研究院有限公司, 张家港 215625)

摘 要:针对含钛焊丝钢 SJ-60 连铸过程中水口结瘤问题,通过 XRF、XRD 和 SEM 等手段,分析水口结瘤物的元素含量、物相组成及界面反应。结果发现,水口内壁因脱碳反应而变得粗糙多孔,导致高熔点物相易于侵入;此外,精炼过程喂钙处理和耐材侵蚀,会使钢液生成大量 CaTiO_3 和 MgAl_2O_4 ,二者在水口内壁沉积是导致水口结瘤的主要原因。实践表明,采用低钛低铝硅铁替代普通硅铁,将钢中 $w[\text{Al}]$ 由 0.008 0%~0.009 5% 降低至 0.005 0%~0.006 5%,有利于减少钢中 Al_2O_3 夹杂物含量;取消精炼钙处理,将钢中 $w[\text{Ca}]$ 由 $>0.001 4\%$ 降低至 $<0.000 5\%$,有利于减少钢中 CaTiO_3 夹杂物含量;将萤石用量由 0.8~1.0 kg/t 降低至 0.3~0.5 kg/t,减轻耐材侵蚀,渣中 $w(\text{MgO})$ 由 $>10\%$ 降低至 $<5\%$,有利于减少钢中 MgAl_2O_4 夹杂物含量。通过以上措施,有效解决了 CaTiO_3 和 MgAl_2O_4 引起的水口结瘤问题,连浇炉数由 4~5 炉提高至 12 炉以上。

关键词:含钛焊丝钢;水口结瘤; CaTiO_3 ; MgAl_2O_4 ;TiN

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00194 **中图分类号:**TF777.7

Analysis and Improvement of Nozzle Clogging of Ti-bearing Welding Wire Steel

Zhou Jian, Li Qiang, Zhao Jiaqi, Zhang Kanghui
(Institute of Research of Iron and Steel, Jiangsu Shasteel, Zhangjiagang 215625, China)

Abstract: The element content, phase composition and interface reaction of nozzle clogging for titanium-bearing welding wire steel SJ-60 during continuous casting were analyzed by means of XRF, XRD and SEM. It is found that the interface of the nozzle is rough and porous due to decarburization reaction, which causes nozzle to be easily invaded by high melting point phases. In addition, the calcium treatment and erosion of refractory during the refining process will produce a large amount of CaTiO_3 and MgAl_2O_4 in the molten steel, and the deposition of both at the interface of the nozzle is the main cause of nozzle clogging. The practice has shown that replacing ordinary ferrosilicon with low titanium and low aluminum ferrosilicon can reduce the aluminum content in steel from 0.008 0%~0.009 5% to 0.005 0%~0.006 5%, which is beneficial for reducing the content of Al_2O_3 inclusions in steel. Cancelling the refining calcium treatment can reduce the calcium content in steel from more than 0.001 4% to less than 0.000 5%, which is beneficial for reducing the content of CaTiO_3 inclusions in steel. Reducing the amount of fluorite from 0.8~1.0 kg/t to 0.3~0.5 kg/t can reduce the erosion of refractory, and the magnesium oxide content in slag is decreased from more than 10% to less than 5%, which is beneficial for reducing the content of MgAl_2O_4 inclusions in steel. Through the above measures, the problem of nozzle clogging caused by CaTiO_3 and MgAl_2O_4 has been effectively solved, and the number of continuous casting heats is increased from 4-5 heats to more than 12 heats.

Key Words: Titanium-bearing Welding Wire Steel; Nozzle Clogging; Calcium Titanate; Spinel; Titanium Nitride

含 Ti 焊丝钢在焊接过程中可形成 TiO_x 和 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$,抑制奥氏体晶粒粗化,从而保证焊接性能^[1]。此外,与利用镍、钼等元素合金化的同级产品相比,含钛焊丝钢具有明显的成本优势,使其在气体保护焊领域得到广泛的应用与推广^[2-4]。但在连铸过程中,含钛焊丝钢容易生成钛酸钙、氧化铝和氧化钛,导致浸入式水口结瘤,从而影响连铸顺利进行。同时,钢液中钛含量较高,钢液凝固过程中易生成硬而脆的氮化钛夹杂,严重影响焊丝钢性能^[5-8]。钢液氮化

钛析出和浸入式水口结瘤一直是冶金工作者研究的热点。

针对冶炼含钛焊丝钢水口结瘤问题,冶金工作者做了大量研究工作。杨咏阶等^[9]认为含钛焊丝钢水口结瘤物主要由 TiO_2 组成,应该控制钢水洁净度,提高浇注温度,减少钢水二次氧化,避免镁铝尖晶石和氮化钛析出,从而保证连铸顺利进行。邓叙燕等^[10]利用热力学计算,得出 Al 和 Ti 竞争氧化的临界值,并通过调整冶炼过程参数,降低钢液氧化钛含

作者简介:周 健(1993—),男,硕士,工程师;
通信作者:李 强(1988—),男,硕士,工程师;

E-mail:zhoujian-iris@shasteel.cn;
E-mail:liqiang-iris@shasteel.cn

收稿日期:2023-09-05

量,改善钢液可浇性。常金宝等^[11]通过控制钢液中 Al 含量和软吹工艺,使 Al_2O_3 夹杂向 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_x$ 和 TiO_x 转变,提高了含钛焊丝钢的连浇炉数。但是有关钛酸钙和镁铝尖晶石导致水口结瘤,且结瘤物伴有氮化钛析出的相关报道较少。

本文通过热力学计算和生产实践相结合的方法,分析了含钛焊丝钢 SJ-60 水口结瘤原因并提出了相应的改进措施,为含钛焊丝钢连铸生产提供理论指导。

1 水口结瘤原因分析

1.1 生产概况

含钛焊丝钢 SJ-60 生产工艺流程为:KR(Kambara Reactor)法铁水预脱硫→135 t 顶底复吹转炉→135 t 双工位精炼炉→300 mm×390 mm 五机五流大方坯连铸机,化学成分见表 1。由于 Ti 含量较高,浇注过程中容易造成水口结瘤,连浇炉数仅为 4~5 炉。图 1 为生产 SJ-60 钢过程中浸入式水口结瘤宏观形貌,水口内壁挂满冷钢,表面有大量金黄色颗粒状物质析出。

表 1 SJ-60 钢化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of SJ-60 steel %							
C	Si	Mn	S	P	N	Ti	O
0.07	0.64	1.626	0.007 9	0.014 8	0.005 3	0.097 4	0.002

1.2 金黄色结瘤物电镜分析

选取 SJ-60 钢结瘤严重的浸入式水口留样,将金黄色结瘤物剥离,使用 XQ-2B 金相镶嵌机进行热镶嵌,并使用 MP-2B 双盘金相试样磨抛机进行磨平抛光,制备电镜观察样品。利用 EVO18 扫描电镜对

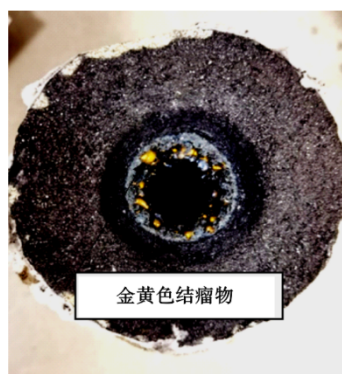


图 1 水口结瘤形貌

Fig. 1 Photograph of nozzle clogging morphology

金黄色结瘤物进行元素扫描分析。由图 2 可知,金黄色结瘤物内部为冷钢, Mg、Al、Si 和 Mn 等合金元素均匀分布在冷钢中,最外侧包裹一层 TiN 薄膜, TiN 的析出可能是造成水口结瘤的主要原因。因此,接下来通过热力学计算分析 TiN 析出对水口结瘤的影响。

1.3 氮化钛析出热力学计算

考虑钢水中各元素的相互作用, Ti 和 N 的活度系数 f_{Ti} 和 f_{N} 可根据式(1)求得:

$$\lg f_{i(1873\text{K})} = \sum (e_i^j j) \quad (1)$$

式中, i 为 Ti 或 N; j 为钢中溶质元素; e 为相互作用系数; f_{Ti} 和 f_{N} 分别为 Ti 和 N 的活度系数。

将 SJ-60 钢的化学成分(见表 1)和 1 873 K 时钢水中元素相互作用系数(见表 2)^[12],代入式(1)计算得出式(2)和式(3)

$$\lg f_{\text{Ti}(1873\text{K})} = -0.127 \quad f_{\text{Ti}(1873\text{K})} = 0.747 \quad (2)$$

式中, f_{Ti} 为 Ti 元素的活度系数。

$$\lg f_{\text{N}(1873\text{K})} = -0.034 \quad f_{\text{N}(1873\text{K})} = 0.926 \quad (3)$$

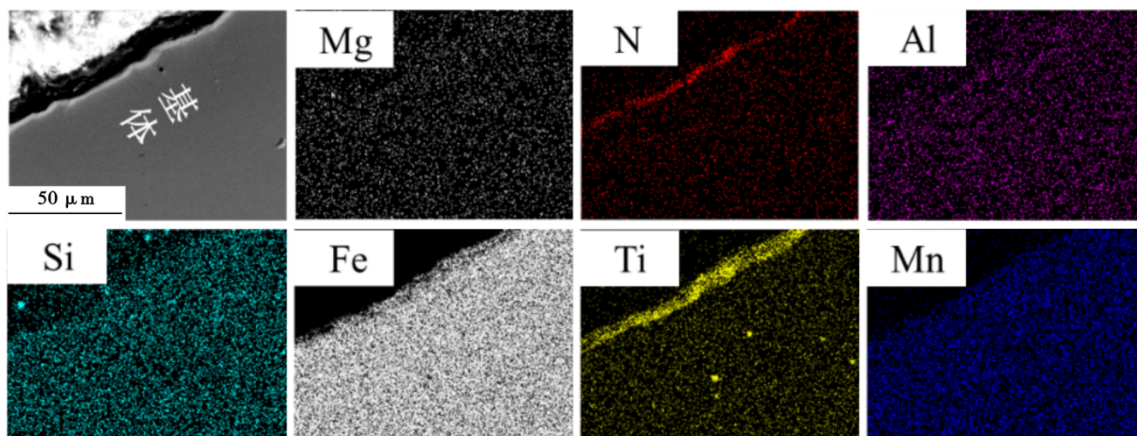


图 2 水口结瘤物电镜面扫结果

Fig. 2 Electron microscopic scanning results of nozzle clogging

式中, f_N 为 N 元素的活度系数。

表 2 钢液中元素相互作用系数

元素	C	Si	Mn	S	P	N	Ti	O
N	0.13	0.047	-0.036	0.007	0.045	0	-0.153	0.05
Ti	-0.19	-0.050	-0.043	-0.270	-0.064	-1.8	0.013	-1.80

SJ-60 钢化学成分见表 1, 理论液相线和固相线温度计算见式(4)^[13]。

$$t = 1536 - \sum \Delta t \times \omega[i] \quad (4)$$

式中, t 为钢水温度, K; Δt 为钢水中元素对液相线温度和固相线温度的影响系数; $\omega[i]$ 为元素 i 在钢水中的含量, %。

根据表 1 中 SJ-60 钢的化学成分和表 3 中钢液各元素对液相线温度和固相线温度的影响系数, 计算得到 SJ-60 钢的液相线温度为 1516 °C, 固相线温度为 1478 °C。

表 3 钢液中元素对液相线和固相线的影响系数

Table 3 Influence coefficient of element in molten steel on liquid phase line and solid phase line

相线	C	Si	Mn	S	P	Ti
液相线	86	8	5.0	25	30	2
固相线	184	40	8.6	77	77	40

在冶炼过程中, 钢液中钛元素和氮元素结合形成氮化钛夹杂物的反应方程式为:



式中, $[\text{Ti}]$ 、 $[\text{N}]$ 和 $\text{TiN}(\text{s})$ 分别为钢液中的钛、钢液中的氮和夹杂物氮化钛。

$$\Delta G^\theta = -291\,000 + 107.97T \quad (6)$$

式中, ΔG^θ 为标准吉布斯自由能, J/mol; T 为标准温度, K。

对于 SJ-60 钢中 TiN 的生成反应, 其吉布斯自由能变化为 $\Delta G = \Delta G^\theta + RT \ln J$, 其中 $J = \alpha_{\text{TiN}} / (\alpha_{\text{Ti}} \alpha_{\text{N}})$ 。由于 TiN 熔点高, 不容易与其它物质共溶, $\alpha_{\text{TiN}} = 1$, 故有:

$$\Delta G = \Delta G^\theta + RT \ln \frac{\alpha_{\text{TiN}}}{\alpha_{\text{Ti}} \times \alpha_{\text{N}}} = \Delta G^\theta + RT \ln \frac{1}{f_{\text{Ti}} \times \omega[\text{Ti}] \times f_{\text{N}} \times \omega[\text{N}]} \quad (7)$$

式中, R 为气体反应常数, J/(K·mol); T 为标准温度, K; ΔG^θ 为标准吉布斯自由能, J/mol; ΔG 为 TiN 生成吉布斯自由能, J/mol; α_{TiN} 、 α_{Ti} 和 α_{N} 分别为 TiN、Ti 和 N 的活度; $\omega[\text{Ti}]$ 和 $\omega[\text{N}]$ 分别为 Ti 和 N 在钢水中的

含量, %; f_{Ti} 和 f_{N} 分别为 Ti 和 N 的活度系数^[14]。

当式(7)反应达到平衡时,

$$\Delta G^\theta = RT \ln f_{\text{Ti}} \times \omega[\text{Ti}] \times f_{\text{N}} \times \omega[\text{N}] = -291\,000 + 107.97T \quad (8)$$

整理得式(9)^[14]:

$$\lg f_{\text{Ti}} \times \omega[\text{Ti}] + \lg f_{\text{N}} \times \omega[\text{N}] = -15\,198.2/T + 5.64 \quad (9)$$

代入表 1 中钢液钛和氮的含量以及式(2)和式(3)中的 f_{Ti} 和 f_{N} 值, 求得 SJ-60 钢液析出 TiN 温度为 1400 °C, 低于液相线温度 1516 °C 和固相线温度 1478 °C。

由氮化钛热力学计算可知, 在连铸浇注过程中不会形成 TiN, 金黄色颗粒表面的 TiN 可能是停浇之后, 水口内壁冷钢在缓慢冷却过程中, 与空气中 N_2 反应生成。为了进一步探究 SJ-60 钢水口结瘤的原因, 对水口耐材本体和结瘤物进行成分、物相和电镜分析。

2 水口耐材本体和结瘤物分析

2.1 水口内壁成分及物相分析

对 SJ-60 钢新、旧水口内壁进行取样, 利用 ZXS Primus II 型号的 XRF (X-Ray Fluorescence Spectrometer) 分析其化学成分, 结果见表 4。可以看出, 新水口内壁本体为 MgO-SiO₂-C 材质。SJ-60 钢精炼过程有钙处理, 使用后水口内壁 CaO 含量较高。由于内壁与钢液直接接触, 钢液中的 Al₂O₃ 和 TiO₂ 等大量沉积在水口内壁, 因此, 二者含量均有所升高。水口内壁本体在高温氧化条件下, SiO₂ 和 C 发生脱碳反应^[15], 因此, 二者含量均有所降低。

表 4 水口内壁 XRF 结果(质量分数)

	%						
水口	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TiO ₂	C	其他
新	56.64	4.19	26.59	-	-	9.05	3.53
旧	24.90	23.55	4.02	17.66	23.27	-	6.60

为进一步分析 SJ-60 钢水口结瘤原因, 利用 D/max-2500/PC 型号的 XRD (X-ray diffraction) 分析新、旧水口物相组成, 结果如图 3 和图 4 所示。可以看出, 新水口内壁主要物相为 MgO-SiO₂-C, 使用后水口物相为 CaTiO₃-MgO-MgAl₂O₄-Mg₂SiO₄, 剥离耐材本体主要物相为 CaTiO₃-MgO-MgAl₂O₄。水口使用后, 内壁沉积大量 CaTiO₃ 和 MgAl₂O₄ 等高熔点物相, 可能是导致水口结瘤的主要原因, XRD 结果与 XRF 结果基本一致。

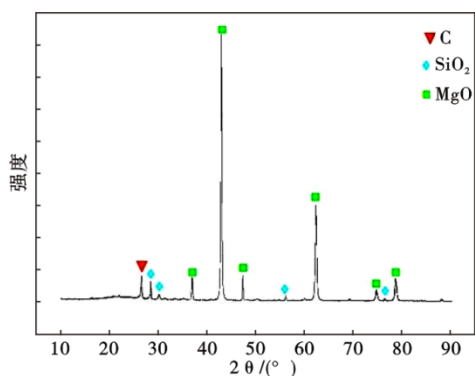


图 3 新水口内壁 XRD 结果

Fig. 3 XRD analysis of the inner wall on the new nozzle

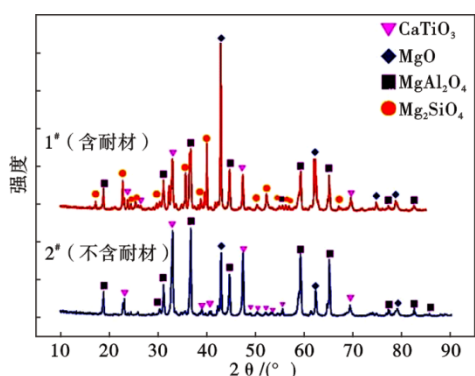


图 4 旧水口内壁 XRD 结果

Fig. 4 XRD analysis of the inner wall on the old nozzle

通过对水口进行 XRD 和 XRF 分析,可以确定 SJ-60 钢水口结瘤物的元素含量和物相组成,但是结瘤物的形成过程、元素分布以及与水口耐材的界面反应尚不明确。因此,利用 EVO18 扫描电镜对水口内壁进行元素面扫分析,进一步探究 SJ-60 钢水口结瘤原因。

2.2 水口内壁和结瘤物电镜分析

对使用前、后水口内壁反应界面进行电镜分析,图 5 和图 6 分别为新、旧水口内壁面扫结果。新

水口耐材本体主要元素组成为 Mg-Si-O-C,以 Mg 和 Si 元素为主,其他元素较少,分布较为均匀。使用后水口内壁反应层完全脱碳,反应层富集了 Fe、Ca、Ti 和 Al 等元素。结合 XRD 和 XRF 结果分析可知,水口内壁本体在高温氧化条件下首先发生脱碳反应,导致表面粗糙多孔,为钢液高熔点物相沉积创造了有利的界面条件^[16]。图 7 和表 6 为水口结瘤物元素点扫结果,图 7 中白色物相为 MgAl₂O₄,深灰色物相为 CaTiO₃,浅灰色物相为冷钢,结果表明,结瘤物主要由 MgAl₂O₄ 和 CaTiO₃ 组成。SJ-60 钢精炼出站和连铸中间包的钢液成分见表 5,从精炼到连铸,钢液中 Ti 和 Al 元素明显降低,表明钢液被二次氧化,Al 和 Ti 大量损失,而 [Al]/[Ti]<0.15^[10],并未达到 Al 氧化的热力学条件,因此,钢液中 Ti 并不完全是以单质形式存在,可能部分以 TiO_x 和 CaTiO₃ 形式存在。随着浇注的进行,钢液中高熔点物相 CaTiO₃ 不断沉积在水口内壁,钢液中 Al₂O₃ 与耐材中 MgO 反应生成 MgAl₂O₄,最终导致水口结瘤,此结果与郑宏光等^[17-18]的研究结果基本一致。

通过对 SJ-60 钢水口进行 XRF、XRD 和 SEM 分析,得知 SJ-60 钢水口结瘤的主要步骤为:①钢液二次氧化,生成大量 Al₂O₃ 和 TiO_x,钙处理之后生成大量高熔点物相 CaTiO₃;②耐材侵蚀,钢液中 MgO 含量增加,Al₂O₃ 与 MgO 反应生成 MgAl₂O₄;③高温氧化条件下,水口内壁脱碳,表面粗糙多孔,有利于 CaTiO₃ 和 MgAl₂O₄ 等高熔点物相沉积,最终导致水口结瘤。

3 改进措施及应用效果

3.1 钙处理工艺优化

为避免 Al₂O₃ 型水口结瘤,通常在精炼过程喂 80~150 m 硅钙线,使钢液中高熔点物相 Al₂O₃ 转变为低熔点物相钙铝酸盐,以改善钢水浇注性能^[19-20]。但是 SJ-60 钢的钛含量较高,钙处理则会导致

表 5 不同工位的钢液成分(质量分数)

Table 5 Molten steel element content at different working stations

工位	C	Si	Mn	P	S	Al	Ca	Ti
精炼出站	0.07	0.64	1.617	0.013 7	0.005 7	0.007 8	0.001 4	0.106 0
连铸中间包	0.07	0.64	1.626	0.014 8	0.007 9	0.006 7	0.001 1	0.097 4

表 6 图 7 中水口结瘤物元素组成(质量分数)

Table 6 Fig 7 elemental composition of nozzle clogging

项目	C	O	Mg	Al	Si	Ca	Ti	Mn	Fe	Zr	物相
谱图 1	0.40	54.99	10.37	18.92	-	7.50	7.82	-	-	-	MgAl ₂ O ₄
谱图 2	0.84	-	-	-	0.70	-	-	1.83	96.63	-	Fe
谱图 3	2.26	48.56	3.4	5.44	-	17.92	19.45	-	-	2.98	CaTiO ₃

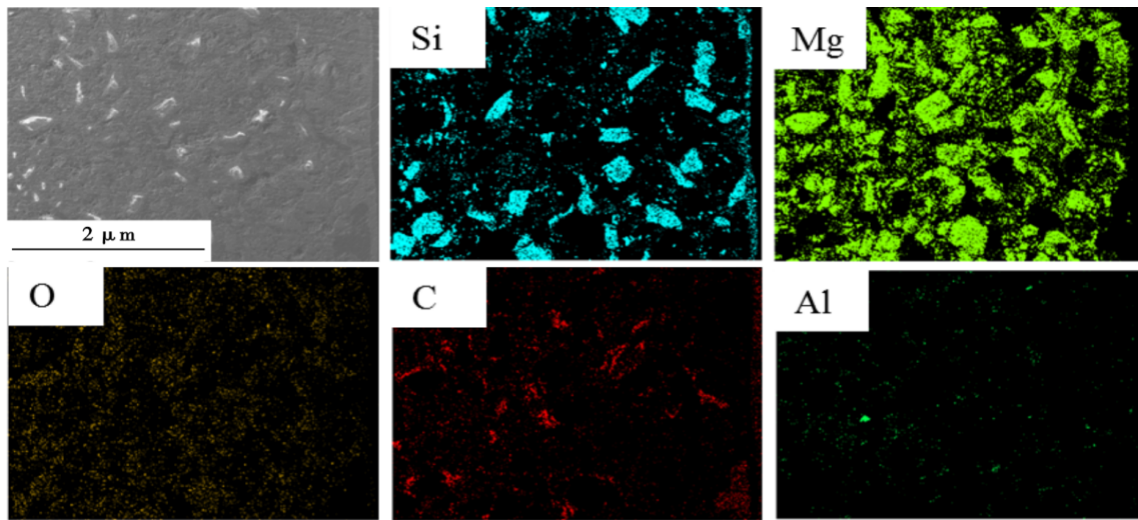


图5 新水口内壁电镜面扫结果
Fig. 5 EM scanning results of the inner wall on the new nozzle

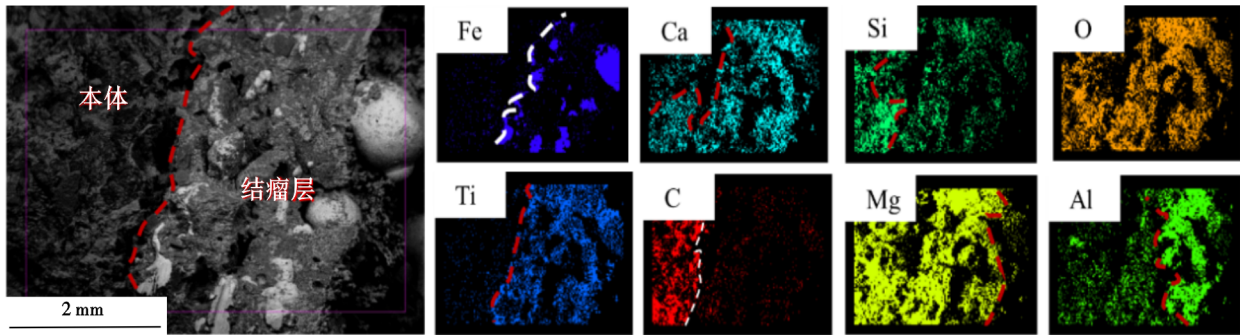


图6 旧水口内壁电镜面扫结果
Fig. 6 EM scanning results of the inner wall on the old nozzle

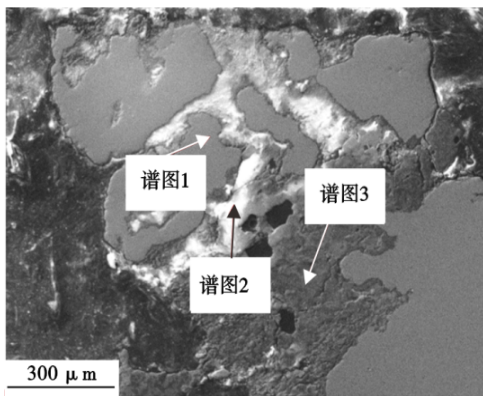


图7 水口结瘤物点扫结果
Fig. 7 Point scanning analysis of nozzle clogging

CaTiO₃结瘤。因此,在设计含钛焊丝钢生产工艺时,需要控制钢液Ca含量,精炼过程取消钙处理。

3.2 脱氧造渣工艺优化

原工艺为了提高精炼脱硫效率和减少Al₂O₃结瘤,大量使用萤石和硅钙线,因此不可避免导致耐

材侵蚀加剧,钢液中MgAl₂O₄和CaTiO₃含量增加。为此,对脱氧造渣工艺进行优化,采用低钛低铝硅铁替代普通硅铁进行脱氧,减少合金带入Al,降低钢液Al含量,减少钢液中Al₂O₃和MgAl₂O₄夹杂物含量;精炼取消钙处理操作,降低钢液钙含量,减少钢液CaTiO₃夹杂物含量,工艺优化前后的钢液成分变化见表7,钢中w[Al]由0.008 0%~0.009 5%降低至0.005 0%~0.006 5%,钢中w[Ca]由>0.001 4%降低至<0.000 5%。在保证脱硫效果的前提下,将萤石使用量由0.8~1.0 kg/t降低至0.3~0.5 kg/t,减缓耐材侵蚀,降低钢液MgAl₂O₄夹杂物含量,工艺优化前后的炉渣成分变化见表8,渣中w(MgO)由>10%降低至<5%。

3.3 应用效果

通过对SJ-60钢水口结瘤原因进行分析,提出降低合金带入铝、取消精炼钙处理和减少精炼萤石使用量等措施,将钢中w[Al]由0.008 0%~0.009 5%

表 7 工艺优化前后钢液成分(质量分数)
Table 7 Molten steel composition before and after process optimization

工艺	C	Si	Mn	P	S	Al	Ca	Ti
优化前	0.06~0.08	0.6~0.65	1.58~1.63	<0.015	0.007 5~0.008 5	0.008 0~0.009 5	>0.001 4	0.085~0.15
优化后	0.06~0.08	0.6~0.65	1.58~1.63	<0.015	0.005 5~0.006 5	0.005 0~0.006 5	<0.000 5	0.085~0.15

表 8 工艺优化前后炉渣成分(质量分数)

Table 8 Slag ingredient before and after process optimization

工艺	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TFe+MnO	CaF ₂
优化前	15~20	7~10	50~60	>10	<1	5~8
优化后	15~20	7~10	60~70	<5	<1	<3

降低至 0.005 0%~0.006 5%, 钢中 $w[\text{Ca}]$ 由 >0.001 4% 降低至 <0.000 5%, 渣中 $w(\text{MgO})$ 由 >10% 降低至 <5%, 有效解决了 SJ-60 钢水口结瘤问题。SJ-60 钢连浇炉数由 4~5 炉提高至 12 炉以上。

参考文献

- [1] 吴建永. ER70S-6 焊丝钢的小方坯连铸生产技术分析[J]. 冶金与材料, 2020, 40(6): 81-82+90.
- [2] 常金宝, 马德刚, 李双武, 等. 含钛焊丝钢小方坯连铸水口的结瘤机制[J]. 钢铁, 2013, 48(7): 27-31.
- [3] Zorc B, Imamović M, Nagode A, et al. Effect of nonmetallic inclusions on steel welds metal hot cracking[J]. Metalurgija, 2014, 53(2): 171-174.
- [4] Wakoh M, Sawai T, Mizoguchi S. Effect of S content on the MnS precipitation in steel with oxide nuclei [J]. ISIJ International, 1996, 36(8): 1014-1021.
- [5] 杨咏阶. 控制 ER70S-G 含钛焊丝钢 TiN 析出和防止水口结瘤的工艺实践[J]. 特殊钢, 2015, 36(6): 13-15.
- [6] 王时松, 张旭彬, 王云波, 等. 高钛焊丝钢保护渣吸收 TiN 的研究[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 46-52.
- [7] 齐 广, 王福明, 沈 伟. 低飞溅气保焊丝钢 ER70S-6 夹杂物的塑性化控制[J]. 炼钢, 2020, 36(3): 62-67.
- [8] 梁 雪, 杨树峰, 李京社, 等. 高品质含钛焊丝钢生产过程中夹杂物的行为演变[J]. 中国冶金, 2020, 30(2): 19-25.
- [9] 杨咏阶, 刘玉爱, 张向勇. 防止含钛焊丝钢 GF50-G 水口结瘤的生产实践[J]. 特殊钢, 2018, 39(3): 9-12.
- [10] 邓叙燕, 马建超, 赵伟杰. 高钛焊丝用钢的钢液可浇性改善[J]. 钢铁, 2015, 50(2): 32-37.
- [11] 常金宝, 马德刚, 李双武, 等. 含钛焊丝钢铝钛氧化物夹杂形成的热力学分析及应用[J]. 炼钢, 2013, 29(4): 62-66.
- [12] 葛允宗, 王建军, 颜慧成, 等. 含 Ti 齿轮钢中 TiN 夹杂析出热力学及其控制[J]. 钢铁钒钛, 2012, 33(5): 50-54.
- [13] 吴石新, 陈登福, 汪勤政, 等. 钛微合金钢连铸中 TiN 与 TiC 析出热力学研究[J]. 连铸, 2019, 44(1): 28-34.
- [14] 李广帮, 魏崇一, 常桂华. 焊丝钢中氮化钛的形成及控制[J]. 鞍钢技术, 2021(3): 14-17.
- [15] 赵家七, 麻 晗, 马建超, 等. 低碳低合金钢塞棒侵蚀机理研究及改进[J]. 炼钢, 2022, 38(4): 71-77+88.
- [16] Ma Z T, Janke D. Characteristics of oxide precipitation and growth during solidification of deoxidized steel [J]. ISIJ International, 1998, 38(1): 46-52.
- [17] 郑宏光, 陈伟庆. 连铸含钛不锈钢浸入式水口结瘤的形成机理[J]. 炼钢, 2006, 22(3): 35-38.
- [18] 郑宏光, 陆 斌, 李 实, 等. 409L 不锈钢连铸浸入式水口结瘤分析和改进措施[J]. 特殊钢, 2006, 27(6): 50-51.
- [19] 郎炜昀, 翟 俊, 赵鑫森, 等. 典型含钛超纯铁素体不锈钢冶炼-连铸过程夹杂物衍变研究[J]. 特殊钢, 2021, 42(1): 16-19.
- [20] 王 郢, 徐建飞, 何 西, 等. 38CrMoAl 钢浇铸过程水口结瘤原因分析及工艺改进[J]. 特殊钢, 2021, 42(2): 38-41.

4 结论

(1) SJ-60 钢 TiN 析出温度为 1 400 °C, 远低于其固相线温度 1 478 °C 和液相线温度 1 516 °C, 在正常浇注过程中不会形成 TiN。

(2) 钢液中 MgAl₂O₄ 和 CaTiO₃ 等高熔点物相是导致水口结瘤的主要原因。

(3) 通过更换合金种类控制钢中 Al 含量, 取消精炼钙处理及控制精炼萤石使用量等措施, SJ-60 钢浇注过程中水口内壁干净无结瘤, 连浇炉数由 4~5 炉提高至 12 炉以上。