



石油套管用 37Mn5 钢全流程洁净度分析及工艺改进

宋景凌, 周旋, 李恒华
(衡阳华菱钢管有限公司, 衡阳, 421001)

摘要:为探究某钢厂当前冶炼 37Mn5 钢过程中所存在的问题,对生产中连续两个炉次进行全流程取样分析,包括金相样、氧氮棒以及精炼渣样,经优化改进,最终得到的结论如下:(1)在 LF 精炼阶段以及 VD 钙处理阶段有不同程度的二次氧化现象产生,尤其喂钙线阶段反应较为剧烈,容易引起钢液二次氧化,导致 Ds 类夹杂物增加,通过优化精炼脱氧操作,钙线喂入量由 1.4~1.7 m/t 降低至 0.95 m/t,各类夹杂物均 ≤ 1.5 级,合格率 100%;(2)精炼渣的成分分析得出,三元相图中渣成分点都在液相区以外,导致精炼渣熔化性能不好,流动性较差,通过提高渣中 SiO₂ 至 9%~12%, Al₂O₃ 至 25%~30%,将二元碱度控制在 5~8,可提高渣的熔化性、流动性,渣的覆盖能力加强,有效防止二次氧化;(3)中间包浇注阶段相比于 VD 阶段,氧氮含量基本稳定,但夹杂物数量有一定的提升,夹杂物增长速率远超夹杂物内生速率,因此,其来源为卷渣,应保持中间包平稳浇注,同时避免钢包下渣现象发生。

关键词:37Mn5 钢; 全流程分析; 石油套管钢; 工艺优化; 渣系优化

DOI:10.20057/j.1003-8620.2022-00216 **中图分类号:**TF741

Whole Process Cleanliness Analysis and Process Improvement of Petroleum Casing Steel 37Mn5

Song Jingling, Zhou Xuan, Li Henghua
(Hengyang Valin Steel Tube Co., Ltd., Hengyang 421001, China)

Abstract: In order to explore the problems and improvement methods of the current production process of 37Mn5 steel for oil casing smelting in a steel mill, in this paper the whole process sampling analysis of two consecutive heats in the industrial production of the steel plant, including metallographic specimen, oxygen and nitrogen rod and refined slag sample, was conducted. After optimization and improvement, the final conclusions are as follows: (1) secondary oxidation occurs in different degrees in the LF refining and VD calcium treatment stage, specially feeding calcium line stage reaction is more violent, which is easy to cause the secondary oxidation of the liquid steel and increasing of Ds inclusions. By optimizing the refining deoxygenation, the amount of calcium line feeding is reduced from 1.4-1.7 m/t to 0.95 m/t, and all kinds of inclusions are grade ≤ 1.5 , and the qualified rate is 100%; (2) the composition analysis of refining slag shows that the residue components in the ternary phase diagram are all outside the liquid phase region, which results in poor melting performance and poor liquidity of the refining slag. By increasing SiO₂ in the slag from 9%-12%, Al₂O₃ to 25%-30%, and controlling the binary alkalinity at 5-8, it can improve the melting and fluidity of the slag, strengthen the coverage capacity of the slag, and effectively prevent secondary oxidation; (3) compared to the VD stage, the oxygen and nitrogen content in the tundish casting stage is basically stable, but the number of inclusions has been increased to a certain extent, and the growth rate of the inclusions is far higher than the endogenous rate of the inclusion, therefore, the source is from slag rolling, the smooth casting of the tundish shall be kept, at the same time to avoid the occurrence of dropping off slag phenomenon of the ladle.

Key Words: 37Mn5 Steel; Whole Process Analysis; Petroleum Casing Steel; Process Optimization; Slag System Optimization

随着石油工业的发展,油井管及其管坯钢用量越来越大,石油套管是组成油井井身的主要结构,由于在恶劣环境中使用,因此,对钢材性能要求较高。37Mn5 钢^[1-2]作为一种常用合金结构钢,是生产 J55 级石油套管的专用钢种^[3]。国内普遍采用“转炉或电弧炉冶炼→LF 精炼→吹氩→连铸”工艺^[4-5]生产 37Mn5 钢,一些钢厂根据产品质量要求,在 LF 精炼后利用 VD 或 RH 对钢水进一步精炼处理。脱氧

剂采用 Al-Si、Al-Mn、Al-Si-Ba、Al-Si-Ca-Ba 等。LF 精炼^[6]过程一般都是采用钙线或硅钙线进行钢液钙处理^[7]来改性夹杂物。受脱氧剂、合金、钢液钙处理和操作控制等影响,精炼过程夹杂物转变直接影响钢中夹杂物的成分、大小、数量和分布^[8],从而影响钢的性能。本文以 37Mn5 钢冶炼过程夹杂物、精炼渣^[9]的改变为研究对象,通过对工业实际生产中,各个工位点样品进行取样分析,旨在探寻夹杂物来

源,明确夹杂物改性原因,解释夹杂物转变机理,为冶炼过程控制钢中夹杂物提供依据。

1 试验材料及方法

37Mn5 钢的冶炼工艺为:电弧炉→LF 精炼→VD→连铸。其中,电弧炉的容量为 110 t,连铸坯规格为直径 330 mm 的圆坯。电弧炉出钢过程中往钢包内加入铝锰铁、硅锰合金以及高碳锰铁进行成分调整;LF 精炼过程中使用硅锰合金^[10-11]、低碳锰铁以及硅铁进行合金成分微调^[12],故钢液内夹杂物多以镁铝尖晶石为形核中心,并逐渐长大;VD 破空后喂钙线进行夹杂物变性处理;随后进行四流连铸,马艳杰等人^[13]认为在稳态浇注下可以保证钢液有更高的洁净度。全流程取样方案见表 1,针对该钢种共取两个炉次样品,分别为连浇炉次的第三、四炉。

对所取样品进行加工处理,加工方式如图 1 所示。切割制作金相试样用于电镜观察分析以及成分检测,金相样进行打磨及抛光,为后续夹杂物自

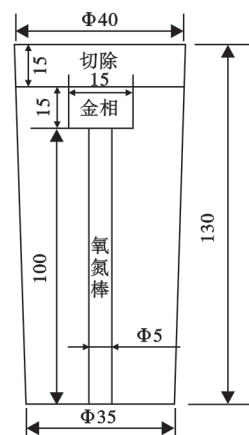


图 1 吊桶样加工示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bucket sample processing

动分析^[14]做准备。其中,每个金相样的扫描面积为 5 mm×5 mm,加速电压选用 20 kV,扫描最小夹杂物的尺寸≥1 μm。另外,从吊桶样中切割出氧氮棒用于氧氮分析仪检测氧、氮成分。通过荧光光谱分析仪对取到的精炼渣进行成分分析检测,并利用 Fact-Sage 软件对渣系的熔点、粘度进行热力学计算。

2 试验结果与讨论

2.1 钢中氧氮分析

钢中夹杂物成分主要为氧化物夹杂,在一定程度上,全氧含量能反映钢中非金属夹杂物的数量,钢中氮元素主要来源于空气,即氮元素含量一定程度上能反映钢液二次氧化的情况。因此,钢中氧氮含量是评定钢液洁净度的重要指标。连浇炉次第三、四炉钢中全氧、氮含量变化如图 2 所示。其中,第三炉冶炼过程中,LF 进站到精炼渣成分调整以后,钢液中全氧含量基本稳定在 15×10⁻⁶,无明显变化,而钢液中氮含量从 55×10⁻⁶上升到 61×10⁻⁶,波动较大,该阶段处于 LF 电极放电状态,容易受到电弧

表 1 全流程取样方案

Table 1 Sampling scheme of whole process

取样工位	取样点	样品
	进站	
LF	成分调整完毕	
	吊包前	
VD	破空	
	钙处理后	吊桶样及渣样
	吊包前	
连铸	浇注前期	
	浇注中期	
	浇注后期	

注:钢包容量为 100 t,中间包容量 28 t,连铸取样点为中间包内,浇注前期为浇注 28 t 左右,浇注中期为浇注 50 t 左右,浇注后期为钢包余钢量 5 t 时。

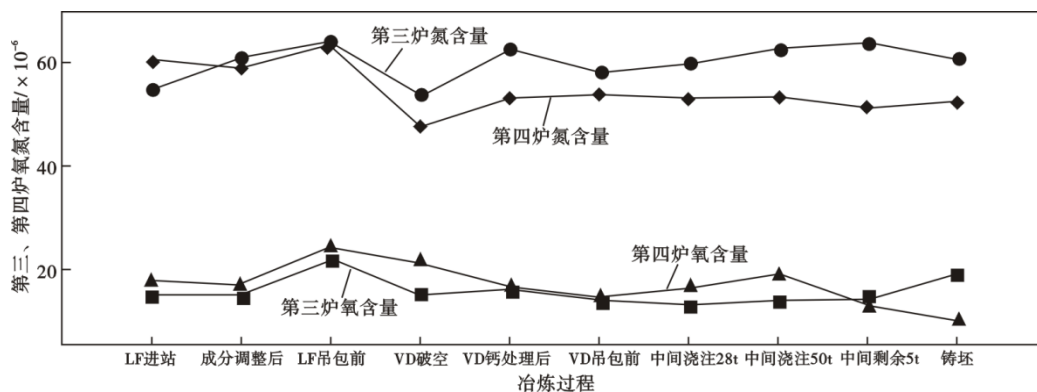


图 2 37Mn5 钢冶炼过程钢中氧氮含量变化

Fig. 2 Changes in oxygen and nitrogen content in steel during 37Mn5 steel smelting process

增氮的影响;在 LF 吊包前,钢液中全氧含量以及氮含量均有所上升,因此,可以认定在该过程中,钢包内存在二次氧化的现象,若要在该阶段控制钢液洁净度,应避免钢包内钢液与空气接触;VD 破空后,钢液内全氧含量以及氮含量有所下降,其中氧含量降为 15×10^{-6} 、氮含量降为 54×10^{-6} ;喂钙线后,钢液中氮含量波动幅度较大,从 VD 破空后的 54×10^{-6} 激增到 63×10^{-6} ,由于钢液中氮元素主要来源于空气,因此认定该阶段在喂钙线过程中,钢液与空气接触较多,造成钢液洁净度下降;稳态浇注过程中,钢液内氧氮含量基本稳定。第四炉中,钢液氧氮含量变化整体与第三炉保持一致,在 LF 吊包前,钢液有二次氧化现象发生,VD 钙处理后,钢液中氮含量依然激增,说明在此阶段,喂钙线过程反应激烈,造成部分钢液与空气直接接触,发生二次氧化。上连铸后,钢液内氮含量保持不变,氧含量有所提升,排除钢液二次氧化的原因,故判断为在浇注过程中发生卷渣,通过中间包示踪剂试验可以进一步判断出卷渣来源。

2.2 钢中非金属夹杂物分析

各工位的夹杂物数密度如图 3 所示,各工位扫描面积一致,均为 19.3 mm^2 。钢液钙处理后钢液中 CaO 和 MgO 的数量均呈上升的趋势,含 CaO 夹杂物数量从 87 个上升到 120 个、含 MgO 夹杂物数量从 41 个上升到 48 个,吊包前随着夹杂物的上浮去除,含 CaO、MgO 夹杂物数量分别降低至 92 个和 26 个。在浇注过程中,CaO 的含量逐步降低,含钙夹杂物在中间包内随着钢液流动上浮去除。从 LF 精炼到 VD 精炼,夹杂物数量降低,尺寸增加,软吹阶段夹杂物上浮时间较短,形成较大尺寸夹杂物。从 VD 吊包到浇注满包,钢液中夹杂物数量增加,同时伴随有卷渣现象。

各工位的夹杂物尺寸分布如图 4 所示,从 LF 进站到 VD 破空,夹杂物尺寸逐渐增加, $3 \sim 8 \mu\text{m}$ 的夹杂物占比提高了 15%。钢液钙处理后夹杂物尺寸进一步增加, $3 \sim 8 \mu\text{m}$ 夹杂物占比高达 22%。中间包浇注过程中,夹杂物尺寸逐渐降低,在浇注末期,夹杂物尺寸在 $3 \sim 8 \mu\text{m}$ 的夹杂物占比降低了一半。

王祎等人^[1]认为冶炼过程中钢液夹杂物演变规

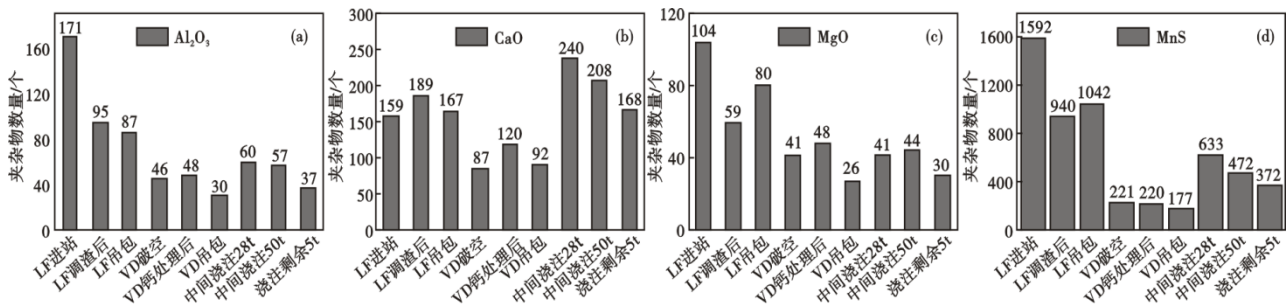


图 3 37Mn5 钢冶炼过程夹杂物数密度变化

Fig. 3 Change of number density of inclusions in the 37Mn5 steel smelting process

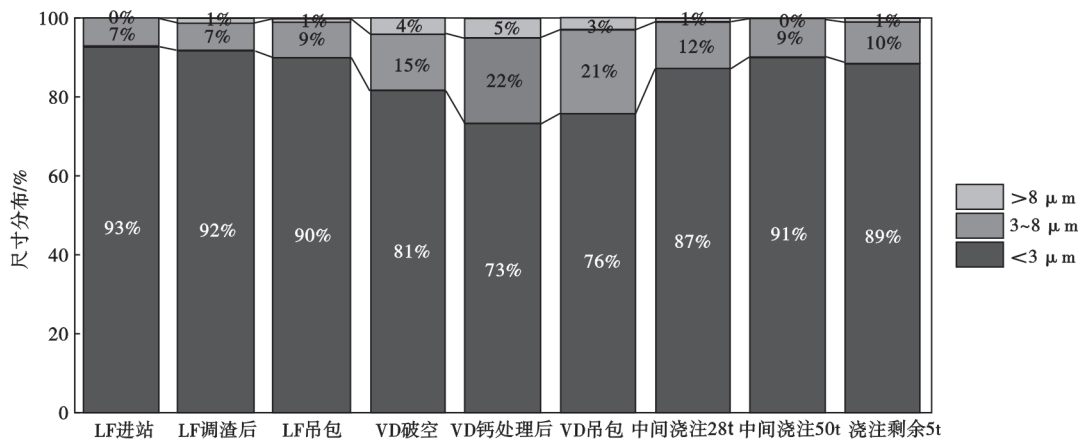


图 4 37Mn5 钢冶炼过程夹杂物尺寸分布

Fig. 4 Size distribution of inclusions in 37Mn5 steel smelting process

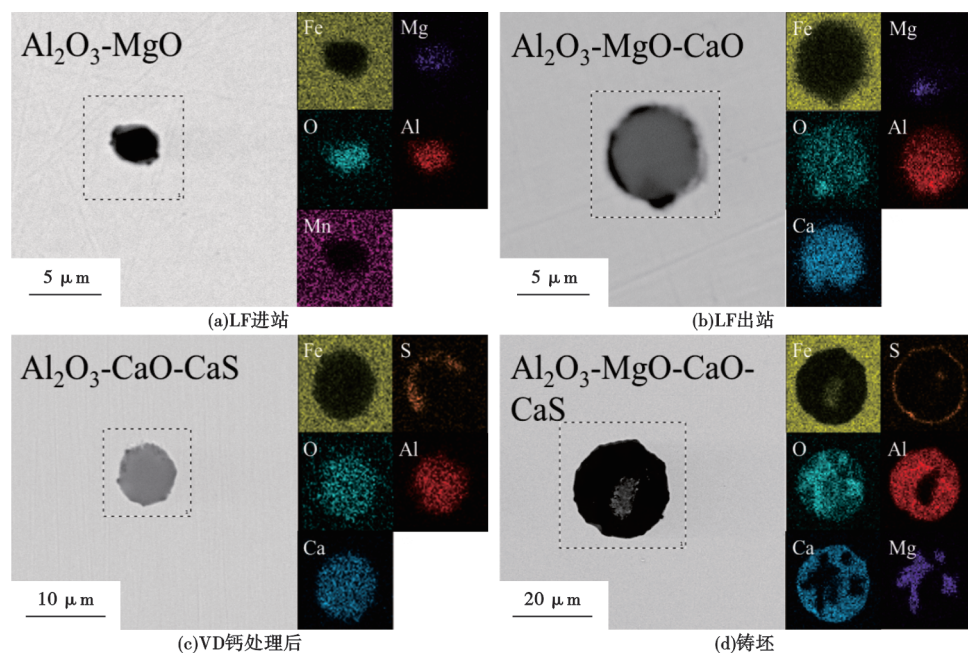


图5 37Mn5钢冶炼过程夹杂物形貌以及能谱图:(a)LF进站,(b)LF出站,(c)VD钙处理后,(d)铸坯

Fig. 5 The morphology and energy spectrum of the inclusions SED-EDS in 37Mn5 steel smelting process : (a) LF in station, (b) LF out station, (c) VD calcium treated, (d) casting billet

律为:以氧化铝为形核中心,随着反应的进行逐步增大,最终形成球类夹杂物颗粒。为研究其机理,对各个阶段钢液内夹杂物能谱进行分析,结果如图5所示,钢液最初夹杂物为镁铝尖晶石,形成原因主要是,炉后铝脱氧生成氧化铝夹杂、钢包耐材侵蚀使得氧化镁进入到钢液中,之后在钢包内发生一系列化学反应生成镁铝尖晶石。随后受热力学因素影响,渣中氧化钙部分进入到钢液中,并与镁铝尖晶石夹杂进行结合,形成钙镁铝酸盐。钢液钙处理后,钢液中夹杂物钙含量提高,夹杂物主要成分变为硫化钙包裹的钙铝酸盐。经过软吹后,钢液中镁铝尖晶石与钙铝酸盐结合,同时硫化钙包裹在该复合夹杂物周围,形成球类夹杂物颗粒。

为了更清楚的了解夹杂物形成机理,对精炼过程的六个取样点试样进行夹杂物自动分析,得到的结果如图6所示,圆球直径代表夹杂物尺寸的大小,四角形为夹杂物平均尺寸坐标。由图6可以看出:(1)LF出站钢液中夹杂物尺寸开始增大(存在大尺寸的镁铝尖晶石),原因可能是此阶段精炼渣熔化性能不好,出站前补加物料,同时底吹气量较大,导致渣层结壳,钢液裸露;(2)VD破空时钢液中的夹杂物尺寸减小,成分分布基本没有变化;(3)VD钙处理后,生成大量含钙夹杂物,硫化锰的数量进一步降低;(4)VD出站夹杂物平均尺寸下降,大尺寸

夹杂物消失,该阶段夹杂物上浮去除率较高,钢液洁净度较好。

2.3 精炼渣对冶炼工艺的影响

某钢厂冶炼37Mn5钢连浇第三、四炉次炉渣成分检测结果见表2、表3,表中氧化性指的是精炼渣中氧化亚铁及氧化锰的质量百分数之和,由于萤石为助熔剂,故不对其成分进行统计。精炼渣氧化性影响精炼时的脱氧和脱硫效果,随渣中氧化亚铁含量的增加,精炼渣系的泡沫化指数是持续降低的,并当氧化亚铁含量 $>1.5\%$ 后,炉渣泡沫化指数迅速降低,当氧化亚铁含量 $\leq 0.5\%$ 时,精炼渣系脱硫能力迅速上升。在实际生产过程中,连浇第三、四炉次精炼渣碱度基本都保持在6.0以上,对于去除球类夹杂物颗粒来说,随着氧化钙含量的增加,精炼渣脱硫容量越大,脱硫能力越强,因此,该碱度下有益于精炼渣吸附大尺寸夹杂。另外,通过对精炼渣系的曼内斯曼指数的计算,发现该渣系的曼内斯曼指数水平较高,对于精炼渣系来说,其曼内斯曼指数保持 ≤ 0.15 最佳,该指数越高代表渣系流动性越差,在实际冶炼过程中,曼内斯曼指数偏高容易导致钢包精炼渣结瘤、结壳现象发生,严重时会造成钢液裸露,从而引起二次氧化。从表2、表3看出,从LF进站到VD吊包过程中,精炼渣中氧化钙含量略有下降,氧化铝含量升高,从侧面印证此过程二次氧化

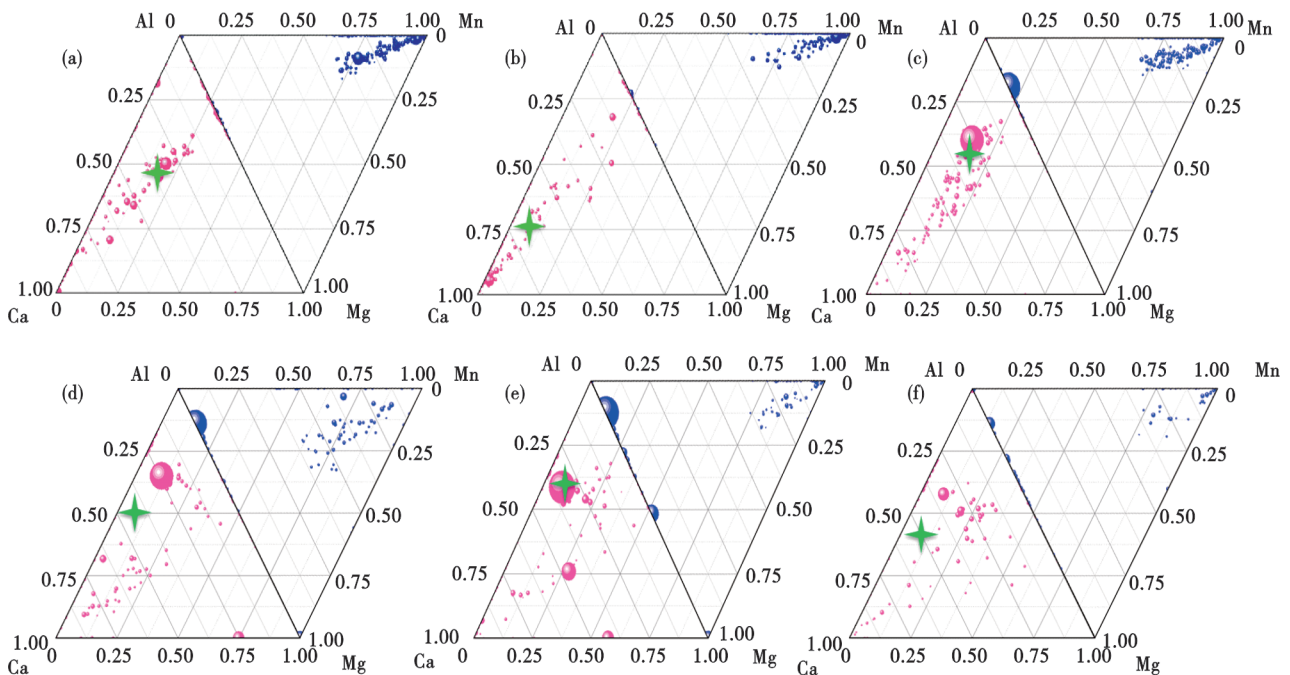


图6 37Mn5 钢冶炼过程中夹杂物成分分布:(a)LF 出站 ,(b)LF 调查后 ,(c)LF 出站 ,(d)VD 破空后 ,(e)VD 钙处理后 ,(f) VD 出站

Fig. 6 Distribution of inclusions components during 37Mn5 steel smelting process : (a) LF departure , (b) LF slag removal , (c) LF departure , (d) VD clearance , (e) VD calcium treatment , (f) VD departure

的存在,若要提高钢液洁净度,在此阶段应做好钢液保护,可通过降低精炼渣粘度、曼内斯曼指数等措施解决。从图 7 可以看出,精炼渣氧化性在冶炼过程中虽有波动,但是最终成分稳定在 0.5% 以内。

表 2 37Mn5 钢第三炉次的渣样成分(质量分数)及 R、MI
Table 2 37Mn5 steel slag sample composition and R MI of the third heat

取样工位	渣成分/%						R	MI	氧化性
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	FeO			
LF 进站	60.8	9.89	22.0	3.73	0.10	0.12	6.1	0.28	0.23
LF 吊包	58.9	8.61	23.7	3.86	0.17	0.33	6.8	0.29	0.50
VD 破空	58.5	8.17	24.1	3.95	0.15	0.48	7.2	0.30	0.62
VD 钙处理后	57.5	9.68	23.5	3.99	0.15	0.50	5.9	0.25	0.64
VD 吊包	58.6	8.60	23.9	3.93	0.11	0.28	6.8	0.29	0.40
浇注 28 t	33.9	29.70	19.0	8.38	1.44	1.30	1.1	0.06	2.75
浇注 50 t	36.4	28.60	19.5	8.58	1.48	0.82	1.3	0.07	2.30
浇注剩余 5 t	33.5	33.20	18.0	8.28	1.37	0.68	1.0	0.06	2.00

FactSage 计算出来的两个炉次炉渣的开始熔化温度和粘度见表 4,将两个炉次精炼渣成分投射到 1 600 °C 下 (MgO)=4% 条件下 Al₂O₃-CaO-SiO₂ 三元渣系相图如图 8 所示。第三炉次精炼终渣熔点为 1 379.60 °C,第四炉次精炼终渣熔点为 1 311.52 °C,精炼终渣熔点均在 1 300 °C 以上。第三炉次精炼渣

表 3 37Mn5 第四炉次的渣样成分(质量分数)及 R、MI
Table 3 37Mn5 slag sample composition and R MI of the fourth heat

取样工位	渣成分/%						R	MI	氧化性
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	MnO	FeO			
LF 进站	58.9	11.2	22.5	3.92	0.115	0.21	5.3	0.23	0.33
LF 吊包	59.8	10.3	22.3	3.64	0.107	0.33	5.8	0.26	0.44
VD 破空	58.6	9.62	23.9	3.63	0.147	0.33	6.1	0.25	0.48
VD 钙处理后	57.4	8.87	24.9	4.04	0.126	0.17	6.5	0.26	0.30
VD 吊包	55.5	12.1	23.6	3.87	0.116	0.23	4.6	0.19	0.35
浇注 28 t	53.9	14.6	22.9	3.71	0.121	0.21	3.7	0.16	0.33
浇注 50 t	30.6	36.6	17.3	8.08	1.450	0.91	0.8	0.048	2.40
浇注剩余 5 t	31.4	37.8	16.3	7.63	1.470	0.85	0.8	0.051	2.30

注:MI = CaO/(Al₂O₃·SiO₂),为曼内斯曼指数;R = CaO/(SiO₂),为精炼渣二元碱度

成分点全部落在了液相区以外,第四炉次精炼渣仅在精炼终点的时候进入到液相区,表明该工艺条件下,精炼渣熔化性能较差,从而导致精炼渣不易熔化,粘度较高,其对应的曼内斯曼指数就略高。同时,FactSage 计算出来粘度变化相对稳定,基本上在 0.066 ~ 0.073 Pa·s 内波动,该粘度相对较高,不利于覆盖钢液表面,防止二次氧化。通过精炼渣中氧化铝成分增加可以印证,钢液存在二次氧化现象,原因主要是精炼渣流动性不好,覆盖性差,从而造成钢液裸露,进而导致钢液洁净度下降。

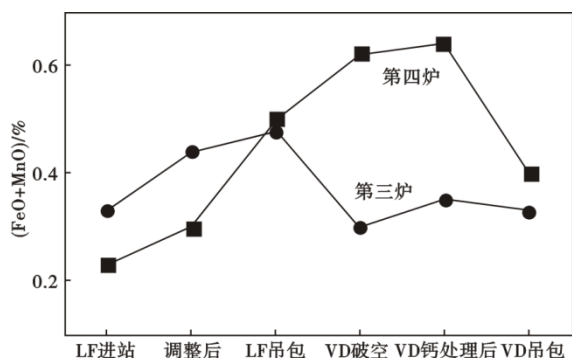


图 7 连浇第三、四炉次精炼渣氧化性

Fig. 7 Oxidizing property of refine slag for that third and fourth heats in a continuous casting row

表 4 两个炉次炉渣的开始熔化温度和粘度

Table 4 Starting melting temperature and viscosity of two heats slag

炉次	取样工位	开始熔化温度/°C	粘度/(Pa·s)
第三炉	LF 进站	1 380.99	0.066
	LF 吊包	1 377.54	0.068
	VD 破空	1 378.21	0.068
	VD 钙处理	1 375.87	0.071
	VD 吊包	1 379.60	0.069
	第四炉	LF 进站	1 377.92
LF 吊包		1 379.89	0.068
VD 破空		1 376.10	0.071
VD 钙处理		1 376.13	0.073
VD 吊包		1 311.52	0.079

2.4 工业试验

2.4.1 钙处理工艺优化

(1)原工艺喂钙线 1.4 ~ 1.7 m/t;

钢中平均钙含量为 0.001 8%(斜向喂线),夹杂物评级 ≤ 1.5 级,合格率 94.6%;

(2)试验工艺喂钙线 0.95 m/t;

第一轮试验 14 炉,平均 Ca 含量 0.014 1%(垂直喂线),斜向喂线平均 Ca 含量 0.001 06%,共取样 24 个,其中有两个样 B 类夹杂物 2.0 级(均为 VD 2# 位斜向喂线),夹杂物评级 ≤ 1.5 级,合格率 91.7%。

第二轮 15 炉钢中平均 Ca 含量 0.014 2%(垂直喂线),Ca 收得率提高了约 30%。共取样 28 个,其中有 1 个样 B 类夹杂物不合格,夹杂物评级 ≤ 1.5 级,合格率 96.42%。

(3)后续跟踪炉号喂钙线 0.95 m/t;

跟踪 11 炉,钢中平均 Ca 含量 0.001 1%(垂直喂线),取样 22 个,各类夹杂物均 ≤ 1.5 级,合格率 100%。

2.4.2 渣系优化

通过在精炼造渣环节减少石灰加入量、增加精炼渣加入量,精炼渣中 Al₂O₃ 成分增加至 25% ~ 30%,SiO₂ 含量提高至 9% ~ 12%,二元碱度控制在 5 ~ 8,提高了渣系熔化性能,渣的流动性和覆盖性得以改善,减少了二次氧化的机率。

2.4.3 氧氮含量

为研究优化前后效果,对该钢种工艺优化前后生产的铸坯进行取样,取样位置、时机一致,各自编号 1 ~ 10 号,氧氮含量如图 9 所示,优化后,钢液中氧、氮气体含量总体较低,且波动较小,总氧含量一定程度上反映了钢液内夹杂物总量较少。

3 结论

经过对该钢厂冶炼 37Mn5 钢中工艺进行分析及改进验证得出以下结论:

(1)在 LF 精炼阶段以及 VD 钙处理阶段有不同程度的二次氧化现象产生,尤其喂钙线阶段反应较

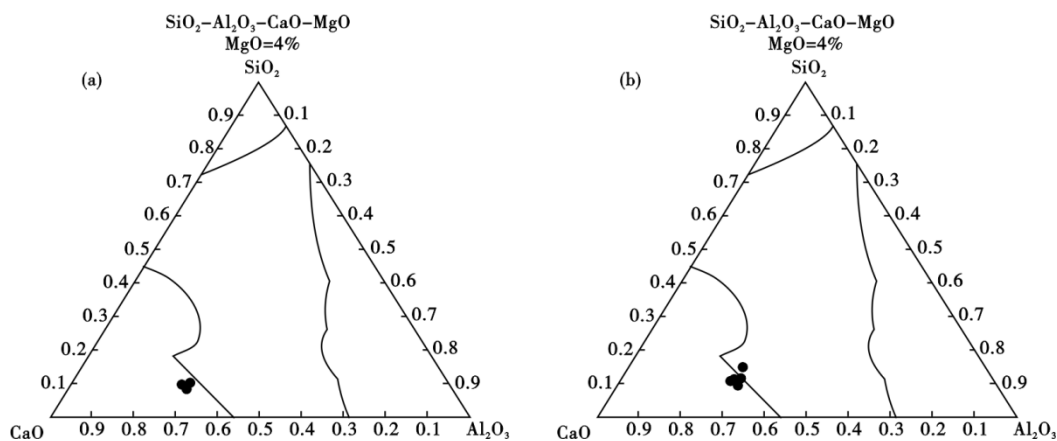


图 8 三元渣系相图:(a)第三炉次,(b)第四炉次

Fig. 8 Ternary slag phase diagram: (a) third furnace, (b) fourth furnace

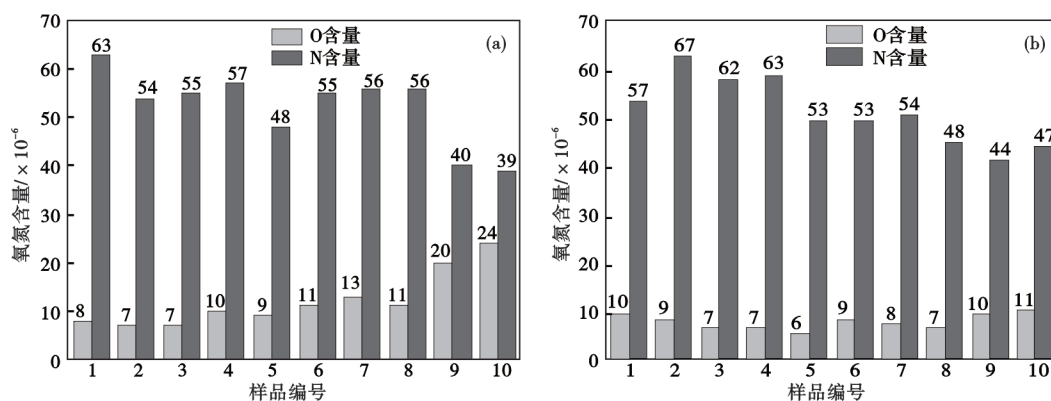


图9 优化前后样品中气体含量:(a)优化前,(b)优化后

Fig. 9 Gas content in samples before and after optimization: (a) Before optimization, (b) After optimization

为剧烈,容易引起钢液二次氧化,导致Ds类夹杂物增加,通过强化精炼脱氧操作优化后,钙线喂入量由1.4~1.7 m/t降低至0.95 m/t,经工业验证,各类夹杂物均 ≤ 1.5 级,合格率100%;

(2)从精炼渣的成分分析可以看出,三元相图中渣成分点都在液相区以外,导致精炼渣熔化性能不好,流动性较差,通过提高渣中 SiO_2 至9%~12%,

Al_2O_3 至25%~30%,将二元碱度控制在5~8,可提高渣的熔化性、流动性,渣的覆盖能力加强,有效防止二次氧化;

(3)中间包浇注阶段相比于VD阶段,氧氮含量基本稳定,但夹杂物数量有所增加,夹杂物增长速率远超夹杂物内生速率,因此,其来源为卷渣,应保持中间包平稳浇注,同时避免钢包下渣现象发生。

参考文献

- [1] 王 祎, 张立峰, 任 英, 等. 37Mn5 钢精炼过程夹杂物转变机理[J]. 钢铁, 2020, 55(5): 39-44.
- [2] 孙立根, 任英强, 刘 阳, 等. 37Mn5 钢中的显微夹杂物研究[J]. 铸造技术, 2015, 36(10): 2423-2426.
- [3] 徐景峰. 37Mn5 油井管钢的生产试验研究[J]. 湖南冶金, 1999, 15(1): 1-5+9.
- [4] 王 峰. 37Mn5 油井管用钢的冶炼工艺技术研究[J]. 黑龙江冶金, 2016, 36(5): 20-1+4.
- [5] 白瑞娟, 刘成松, 谭雷红, 等. F45MnVS 非调质钢中硫化锰夹杂物特性控制的研究[J]. 特殊钢, 2022, 43(5): 7-13.
- [6] 赵东伟, 李海波, 高 攀, 等. 非钙处理铝脱氧车轮钢夹杂物形成及变形行为[J]. 钢铁, 2016, 51(1): 25-32.
- [7] 高胜亚, 姜 敏, 侯泽旺, 等. 钙处理对高碳铝镇静钢中夹杂物的影响[J]. 钢铁, 2017, 52(4): 25-30.
- [8] 赵子荣, 郝晓帅, 白雪峰, 等. 电弧炉短流程冶炼石油套管钢中夹杂物的演变规律[J]. 中国冶金, 2022, 32(8): 49-55.
- [9] 马若凡, 李广军. 造渣制度对石油套管钢37Mn5脱硫率的影响[J]. 天津冶金, 2017, 36(S1): 17-20.
- [10] 曾溢彬, 包燕平, 赵家七, 等. 硅锰脱氧55SiCr弹簧钢中镁铝尖晶石的形成及演变[J]. 钢铁, 2022, 57(8): 69-77.
- [11] 杨治争, 严 翔, 熊玉彰, 等. 夹杂物特性对10CrNi3MoV钢冲击韧性的影响[J]. 特殊钢, 2022, 43(5): 33-38.
- [12] 刘 威, 杨树峰, 李京社, 等. 钙镁复合处理20CrMnTi钢中硫化物夹杂[J]. 钢铁, 2017, 52(12): 21-7.
- [13] 马艳杰, 李庆效, 王硕明, 等. 非稳态浇注对37Mn5钢中夹杂物的影响[J]. 铸造技术, 2014, 35(5): 995-7.
- [14] 马艳杰, 彭海涛, 戴 静, 等. 37Mn5钢中显微夹杂物的特征研究[J]. 铸造技术, 2016, 37(1): 18-20.