



## 150 mm×150 mm小方坯超低碳钢H1T生产实践

陈 军, 彭光健, 林 丹, 黄振华  
(湖南华菱湘潭钢铁有限公司, 湘潭 410111)

**摘 要:**针对超低碳钢H1T传统的预处理-转炉-RH-大方坯连铸/模铸-开坯工艺生产成本低,以及连铸浇注过程中容易发生堵塞水口导致生产中断的问题,开发了150 mm×150 mm方坯连铸生产工艺,重点针对连铸水口结瘤堵塞进行工艺控制,并对生产过程中化学成分、渣系、夹杂物变化进行分析。工业生产表明,采用转炉出钢加铝脱氧、LF渣碱度 $>10$ ,顶渣( $\text{FeO} + \text{MnO}$ ) $\leq 2\%$ ,搅拌氩气流量 $>600$  L/min确保脱硫、RH工序在65 Pa以下吹氧深脱碳、钢水钙处理等工艺优化,成功生产出超低碳钢H1T产品,并且连浇炉数达到10炉次。

**关键词:**超低碳钢; 炉外精炼; 顶渣改质; 钙处理; 方坯

**DOI:**10.20057/j.1003-8620.2024-00035 **中图分类号:**TF769.2

## Production Practice of Ultra-Low Carbon Steel H1T in 150 mm×150 mm Small Billet

Chen Jun, Peng Guangjian, Lin Dan, Huang Zhenhua  
(Hunan Valin Xiangtan Iron and Steel Co., Ltd., Xiangtan, 410111, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of high blooming cost of the traditional process route for ultra-low carbon steel H1T, including preprocessing, converter, RH, bloom/ingot continuous casting, and blooming, and the frequent blockage of nozzle in the process of continuous casting which leads to production interruption, a 150 mm×150 mm billet continuous casting production process has been developed. The process control has been focused on the blockage of continuous casting nozzle, and the changes of composition, slag system, and inclusions during the production process have been analyzed. The industrial production practice shows that the product of ultra-low carbon steel H1T has been successfully produced by adopting the process of adding aluminum for deoxidation in converter tapping, LF slag basicity  $> 10$ , top slag ( $\text{FeO} + \text{MnO}$ )  $\leq 2\%$ , stirring argon flow  $> 600$  L/min to ensure desulfurization, RH process with oxygen blowing for deep decarburization under 65 Pa, and calcium treatment of molten steel. And the number of continuous heats has reached 10 heats.

**Key Words:** Ultra-low Carbon Steel; Secondary Refining; Top Slag Modification; Calcium Treatment; Billet

超低碳钢H1T具有塑性好、强度低和变形量大等性能优点,广泛应用于加工铆钉、电磁阀门垫片等对变形量要求较高的产品,一直是钢铁企业的重点开发产品。在实际生产中,新日铁和宝钢分别采用350 mm×560 mm和320 mm×425 mm大方坯连铸或者模铸生产超低碳钢,邢钢采用280 mm×325 mm大方坯连铸生产工艺<sup>[1]</sup>。实现超低碳钢H1T稳定生产需要解决的最大难题是如何有效避免水口产生结瘤。研究人员针对不同钢种进行了研究<sup>[2-4]</sup>,结果表明,不同钢种在浇铸时引起水口结瘤的夹杂物种类与钢种成分有直接联系,并提出可根据实际工艺情况调整钙处理工艺、进行顶渣改质等方法提高可浇性。

为降低开坯成本并解决连铸过程水口堵塞问题,湘钢在没有KR脱S的情况下,对超低碳钢H1T的生产工艺进行了探索与实践。本文研究的新型

超低碳钢H1T生产工艺采用LF替代KR脱硫工艺,同时,对RH工艺进行优化,成功实现了150 mm×150 mm方坯连续10炉次的连铸浇注,形成了独特的新型超低碳钢H1T生产工艺。

### 1 小方坯连铸生产超低碳钢H1T的工艺

大方坯生产超低碳钢H1T过程中存在水口结瘤堵塞导致生产中断的问题,小方坯生产时,因水口内径更小更容易堵水口。为解决小方坯生产连铸水口结瘤堵塞的问题,在采用新工艺进行超低碳钢H1T生产时需要重点分析其技术难点,解决水口结瘤堵塞的问题。

#### 1.1 超低碳钢H1T工艺特点

超低碳钢H1T主要化学成分见表1。由表1可知,超低碳钢H1T特点除碳含量非常低 $w[\text{C}] \leq 0.01\%$ 外,

对 Si、Al 以及 Ti 的要求也非常严格,其中要求  $w[\text{Si}]$  低于 0.05%、 $w[\text{Al}]$  高于 0.02%、 $w[\text{Ti}]$  处于 0.05% 至 0.12% 范围内,属于超低碳低硅铝镇静钢<sup>[5]</sup>。

表 1 超低碳钢 H1T 化学成份(质量分数)

Table 1 Chemical composition of ultra-low carbon steel H1T						
%						
C	Si	Mn	P	S	Al	Ti
≤0.01	≤0.05	≤0.25	≤0.025	≤0.010	≥0.02	0.05~0.12

## 1.2 连铸生产超低碳钢 H1T 的难点

在超低碳钢炼钢过程中,转炉终点存在“碳低氧高”的特征。转炉出钢过程采用铝铁脱氧,LF 精炼造白渣过程中分别用铝线铝屑进行脱氧与脱硫处理,RH 精炼时则会在吹氧脱除铝和碳后再采用铝丸脱氧进行合金化。由此可知,在超低碳钢的整个冶炼过程反复采用铝脱氧,会产生大量的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物。此外,由于 RH 真空处理后钢包顶渣氧化性较强,渣中的氧也会向钢水中扩散,与钢中 Al 反应再次生成  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物,进一步导致钢水可浇性降低,容易引发连铸发生堵塞水口现象<sup>[6-7]</sup>。

为明确结瘤物的形貌和成分,通过现场取样获取结瘤后的中间包塞棒和水口样品,并对其上产生的结瘤物形貌和成分进行分析。中间包结瘤物的形貌如图 1 所示,由图 1 可知,结瘤物在塞棒和水口内部均有分布,且水口内部结瘤严重,会显著影响钢液的流动,甚至导致生产中断。

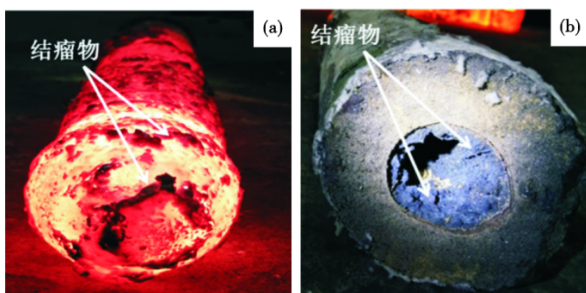


图 1 超低碳钢 H1T 中间包结瘤物形貌:(a)塞棒表面结瘤物,(b)水口内部结瘤物

Fig. 1 Morphology of nodules in tundish of ultra-low carbon steel H1T: (a) nodules on the surface of stopper, (b) nodules inside nozzle

对塞棒和水口结瘤物进行电镜观察和能谱检测,结果如图 2 和表 2 所示。结果表明,塞棒与水口处的结瘤物成分主要为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  系夹杂物。

因此,采用 150 mm×150 mm 小方坯连铸生产超低碳钢 H1T,关键是要针对生产技术难点,从脱氧手

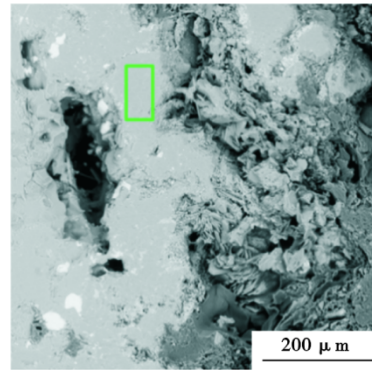


图 2 超低碳钢 H1T 中间包结瘤物微观形貌电镜图  
Fig. 2 SEM image of the microscopic morphology of nodule formation in the tundish of ultra-low carbon steel H1T

表 2 超低碳钢 H1T 结瘤物化学成分(质量分数)

Table 2 Chemical composition of nodules of ultra-low carbon steel H1T		
%		
化学元素	重量比	原子比
O	44.18	57.34
Al	54.64	42.05
Ca	1.18	0.61
总量	100.00	100.00

段和顶渣氧化性等方面控制,减少  $\text{Al}_2\text{O}_3$  系夹杂物的生成,解决钢水可浇性较差的问题<sup>[8]</sup>。

## 2 连铸生产超低碳钢 H1T 的工艺实践

采用新工艺生产小方坯超低碳钢 H1T 时,主要针对转炉、LF、RH 等工序进行工艺调整。其中,转炉工序用于脱碳、脱氧,LF 工序升温脱硫,RH 工序则主要从真空吹氧脱碳、脱氧合金化、顶渣改质和钙处理等方面进行。具体工艺要求如下:

(1) 出钢脱氧:转炉脱碳后,在出钢时加入 100 kg 铝铁进行脱氧,从而将钢水氧含量控制在较低水平;

(2) LF 脱硫:采用喂铝线直接脱氧与抛洒铝屑扩散脱氧结合的方式来降低钢水和精炼渣的氧化性,为精炼渣脱硫提供良好的热力学条件。同时,将还原渣碱度控制在 10 以上,保证顶渣中  $(\text{FeO} + \text{MnO}) \leq 2\%$ ,并采用大于 600 L/min 的氩气流量进行搅拌,提升脱硫效果,确保进入 RH 的硫含量小于 0.005%;

(3) RH 真空吹氧脱碳<sup>[9-11]</sup>:根据碳、铝和硅与氧平衡原理精确计算吹入需要的氧气量,在高真空 (65 Pa 以下) 条件下进行脱碳;

(4) RH 钢包脱氧合金化及顶渣改质<sup>[12-13]</sup>:真空脱碳后,首先向钢水中加入适量的铝丸对钢水进行脱氧,同时为避免精炼渣中的  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{FeO}$ 、 $\text{MnO}$  等向钢中传氧,向钢包顶渣抛洒 20~40 kg 铝屑脱氧,降

低渣的氧化性,确保顶渣( $\text{FeO}+\text{MnO}$ ) $\leq 2\%$ 。

(5)RH钢水钙处理:RH破空后,根据钢水铝含量向钢中喂入150~300 m的钙线,确保钢中的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物得到有效改性,钙处理后软吹时间 $\geq 10$  min,严禁钢水裸露,促进钢水中夹杂物的去除。

通过工艺优化后,精炼渣系、化学成分、夹杂物及气体含量等都得到了较好的控制。

## 2.1 小方坯连铸生产超低碳钢H1T精炼过程化学成分变化

超低碳钢H1T精炼钢水成分变化见表3。经过LF高碱度还原渣精炼,钢水中的硫含量从LF进站时的0.020 1%降低到LF出站时的0.004 2%。在RH精炼过程中,采用吹氧工艺会使精炼渣的氧化性升高,导致RH真空过程中出现返硫现象,但顶渣改质和钙处理工艺的应用能够降低精炼渣的氧化性,促进脱硫反应的进行。因此,在RH出站时,钢水中的硫含量能够控制在0.005 5%。由于顶渣改质降低了精炼渣的氧化性,在RH破空后,向钢包中加入150~300 m钙线,RH出站时钢水中Ca含量为0.003 3%,

根据宋波等提出的理论<sup>[14]</sup>,当 $[\% \text{Al}]^2/[\% \text{Ca}]^3$ 控制在 $< 1.98 \times 10^5$ 时,可以获得理想的 $\text{C}_{12}\text{A}_7$ 变质产物时。生产超低碳钢H1T时,RH钙处理后的 $[\% \text{Al}]^2/[\% \text{Ca}]^3 \approx 0.47 \times 10^5 < 1.98 \times 10^5$ ,使脱氧产物变性为液态的钙铝酸盐,促进了钢水中的夹杂物上浮,杜绝水口堵塞的情况。

## 2.2 小方坯连铸生产超低碳钢H1T精炼过程渣系变化

优化后精炼过程中精炼渣成分见表4。由于LF的脱硫任务,转炉出钢过程中采用高碱度渣对钢水进行渣洗,LF进站时精炼渣碱度为9.65;在LF精炼过程中持续向钢包中加入石灰,LF出站时,精炼渣碱度升高, $\text{SiO}_2$ 含量相对降低。由于RH真空脱碳过程中会向钢水吹氧,导致钢水中的Si元素被氧化进入精炼渣中,从而导致精炼渣中 $\text{SiO}_2$ 含量上升,精炼渣的碱度下降;在RH破空后,由于采用顶渣改质工艺,精炼渣中的 $\text{SiO}_2$ 被改质剂中的Al还原进入钢液,导致精炼渣中 $\text{SiO}_2$ 含量下降, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量上升。

顶渣氧化性越高,其对钢水的污染越严重,越容易堵塞水口。转炉出钢过程加入高碱度渣对钢水进行渣洗,将进入LF的顶渣氧化性( $\text{FeO}+\text{MnO}$ )控制在2%左右;LF精炼过程造高碱度流动性良好的白渣,将( $\text{FeO}+\text{MnO}$ )控制至小于2%;RH吹氧脱碳后,钢水中的氧向渣中传输,导致顶渣( $\text{FeO}+\text{MnO}$ )升高至2.5%左右;顶渣改质后( $\text{FeO}+\text{MnO}$ )降低至2%以下;采用钢包炉脱S工艺,整个冶炼过程顶渣( $\text{FeO}+\text{MnO}$ )保持在2%左右,远低于传统工艺的改质顶渣( $\text{FeO}+\text{MnO}$ )的8%<sup>[14]</sup>,有效减少了炉渣向钢水传氧,从而提高了钢水洁净度,减少了水口堵塞现象。

## 2.3 小方坯连铸生产超低碳钢H1T中夹杂物演变

如图3所示,LF进站典型夹杂物种类包括

表3 超低碳钢H1T冶炼过程钢水成分变化(质量分数)

工序	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ti	Ca
LF进站	0.042 8	0.013 0	0.106 5	0.006 6	0.020 1	0.120 8	0.018 1	0.002 3	0.000 2
LF出站	0.060 6	0.029 5	0.169 8	0.006 8	0.004 2	0.005 4	0.019 9	0.001 1	0.000 3
RH破空	0.003 7	0.002 1	0.155 5	0.006 7	0.007 4	0.038 1	0.019 5	0.096 4	0.000 1
RH出站	0.003 5	0.015 0	0.163 9	0.006 7	0.005 5	0.041 2	0.020 1	0.093 5	0.003 3

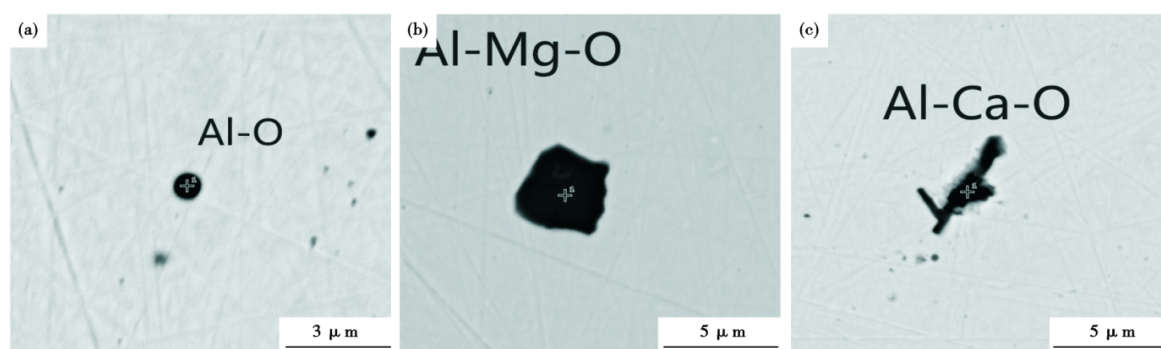


图3 LF进站时超低碳钢H1T钢中典型夹杂物照片:(a)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , (b)  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ , (c)  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$

Fig. 3 Photos of typical inclusions in ultra-low carbon steel H1T into LF station : (a)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , (b)  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO}$ , (c)  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$

表 4 超低碳钢 H1T 冶炼过程炉渣成份变化(质量分数)  
Table 4 Changes in slag ingredients during the smelting process of ultra-low carbon steel H1T %

工序	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SiO <sub>2</sub>	FeO	TiO <sub>2</sub>	MnO	S
LF 进站	55.199	29.217	6.100	5.719	1.768	1.427	0.570	0.167
LF 出站	60.150	29.808	6.007	2.683	0.452	0.748	0.152	0.532
RH 破空	52.276	30.474	8.692	5.327	1.97	1.387	0.675	0.323
RH 出站	51.727	31.252	9.305	4.568	1.084	0.734	0.430	0.112

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·MgO 及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaO 等,其中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·MgO 夹杂物比例占比较大。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·MgO 型夹杂物形状不规则,熔点较高,炼钢条件下为固态夹杂;LF 进站钢液成分在 Mg/(Al+O+Mg+Fe)(g/g)=0.000 005,经热力学计算,在 1 650 °C 和 101 kPa 下钢液中稳定存在的物相为(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·MgO)镁铝尖晶石和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物,如图 4 所示。

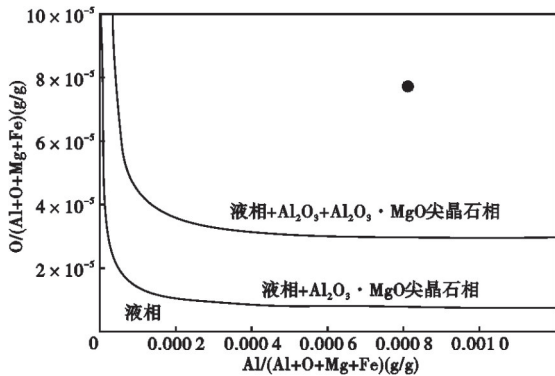


图 4 LF 进站时超低碳钢 H1T 钢中夹杂物生成热力学计算  
Fig. 4 Thermodynamic calculation of inclusion formation in ultra-low carbon steel H1T into LF station

如图 5 所示,LF 出站时的典型夹杂物种类包括 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·MgO。LF 出站钢液成分在 Mg/(Al+O+Mg+Fe)(g/g)=0.000 001,经热力学计算,在 1 650 °C 和 101 kPa 下钢液中稳定存在物相为(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)尖晶石和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,如图 6 所示。与 LF 进站相比,LF 出站钢液 Mg 含量由 5×10<sup>-6</sup>减少至 1×10<sup>-6</sup>,钢液中 Mg 与钢中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

型夹杂物发生反应生成 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·MgO 型夹杂物,(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·MgO)尖晶石和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的热力学稳定区扩大。

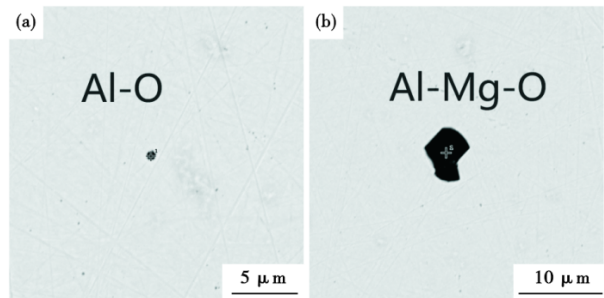


图 5 LF 出站超低碳钢 H1T 典型夹杂物照片:(a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·MgO  
Fig. 5 Photos of typical inclusions in ultra-low carbon steel H1T off LF station : (a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·MgO

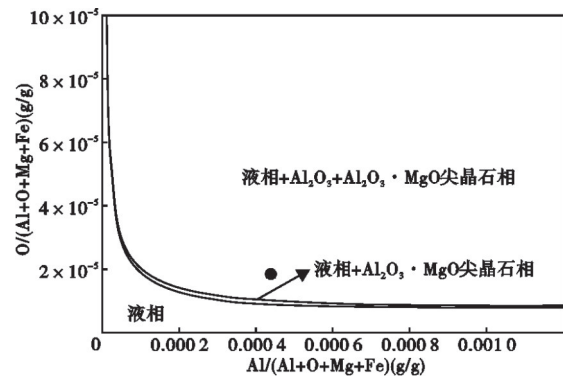


图 6 LF 出站超低碳钢 H1T 钢中夹杂物生成热力学计算  
Fig. 6 Thermodynamic calculation of inclusions in ultra-low carbon steel H1T off LF station

如图 7 所示,RH 破空(加 Al、Ti)后,钢中典型夹杂物类型有 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al-O-Ti(Ti 在外侧)、Al-O-Ti-S、TiO<sub>x</sub>、Ti-Fe、Al-Mg-O-Ti(Ti 在外侧)、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·MgO。Ti 元素主要分布在 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·MgO 型夹杂物外侧,这是由于 Ti 加入钢液后与钢中原有的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 以及 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·MgO 夹杂物发生反应,在其外侧形成了钛氧化物 TiO<sub>x</sub>。

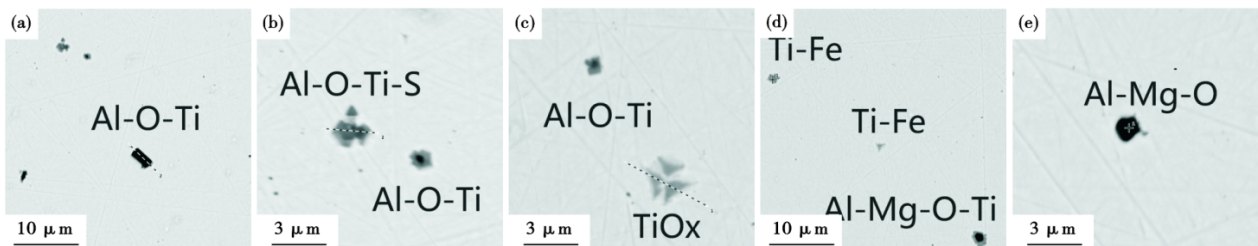


图 7 RH 破空时超低碳钢 H1T 钢中典型夹杂物照片:(a)Al-O-Ti, (b)Al-O-Ti-S 和 Al-O-Ti, (c)Al-O-Ti 和 TiO<sub>x</sub>, (d)Ti-Fe 和 Al-Mg-O-Ti, (e)Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·MgO  
Fig. 7 Photos of typical inclusions in ultra-low carbon steel H1T after RH vacuum treatment : (a)Al-O-Ti, (b)Al-O-Ti-S and Al-O-Ti, (c)Al-O-Ti and TiO<sub>x</sub>, (d)Ti-Fe and Al-Mg-O-Ti, (e)Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·MgO

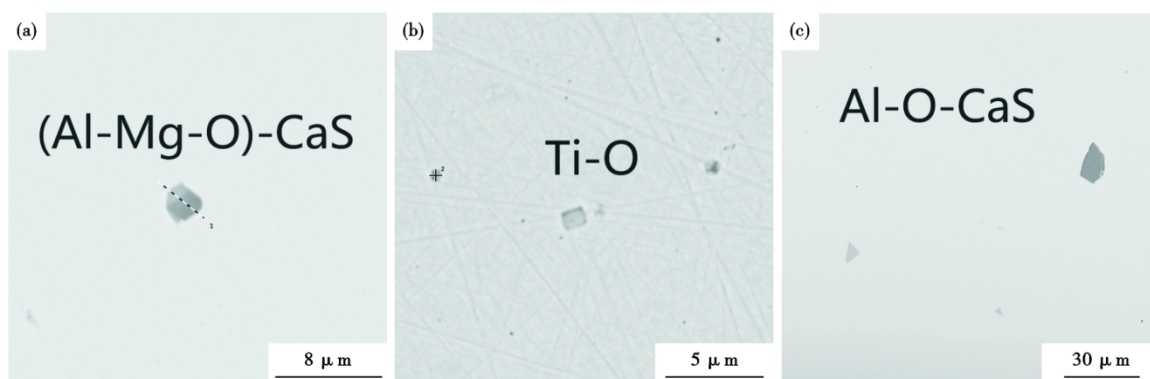


图8 RH出站时超低碳钢H1T钢中典型夹杂物照片:(a) Al-Mg-O-CaS, (b) Ti-O, (c) Al-O-CaS

Fig. 8 Photos of typical inclusions in ultra-low carbon steel H1T after RH calcium treatment: (a) Al-Mg-O-CaS, (b) Ti-O, (c) Al-O-CaS

如图8所示,经顶渣改质和Ca处理后RH出站时钢种的典型夹杂物类别有Ti-O、Al-Mg-O-CaS及Al-O-CaS型夹杂物等。热力学计算结果表明,CaS的生成量随着钢水中Ca元素含量的增加而增加,如图9所示。

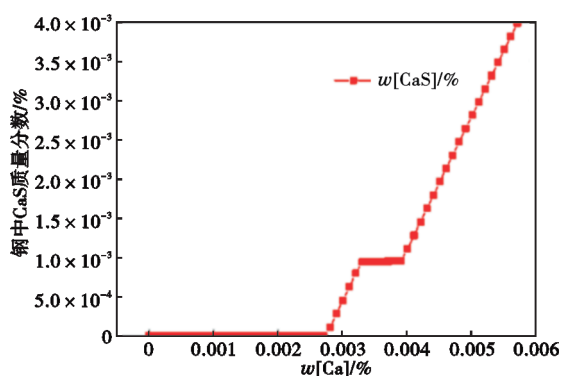


图9 超低碳钢H1T钢中CaS生成量热力学计算

Fig. 9 Thermodynamic calculation of CaS production in ultra-low carbon steel H1T

#### 2.4 小方坯连铸生产超低碳钢H1T精炼过程钢中气体含量

超低碳钢H1T精炼过程中钢中气体含量变化如图10所示。一般情况下,钢中的氧含量代表钢水的纯净度,纯净度越高的钢水在浇注过程越不容易堵塞水口。冶炼超低碳钢H1T时,RH破空后,采用抛洒铝粒改质,铝粒与顶渣和钢水中的氧结合,降低了顶渣和钢水中的氧含量;再进行钙处理,能有效的对 $Al_2O_3$ 进行变性处理,促进钢水中夹杂物的去除,大大降低了浇注过程堵塞水口的情况发生,但同时钙处理增加了钢水与空气接触,导致钢水的氮含量增加;由图10可知,在RH破空时钢中全氧含量

为0.0028%,氮含量为0.0037%,RH出站时钢中全氧含量为0.0024%,氮含量为0.0041%,钢中全氧含量呈现下降趋势,而氮含量反而呈现增加趋势。

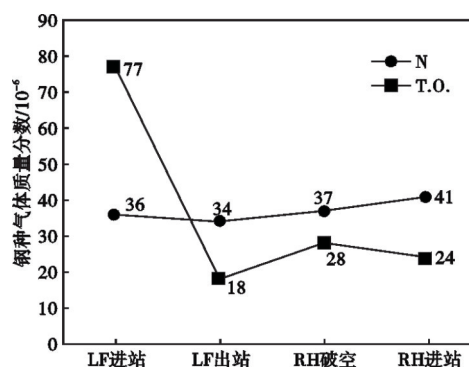


图10 超低碳钢H1T精炼过程中钢中气体含量变化

Fig. 10 Variation of gas content in steel during refining of ultra-low carbon steel H1T

### 3 结论

为降低超低碳钢H1T开坯成本并解决水口结瘤堵塞的问题,在没有铁水预处理脱硫的情况下成功开发了基于BOF→LF→RH→150 mm×150 mm小方坯连铸的超低碳钢H1T生产工艺,减少了预处理和大方坯开坯工序,提高了连铸可浇性。经过工业试验,获得了以下结论:

(1)通过在LF造高碱度还原渣,碱度控制 $>10$ ,顶渣中 $(FeO+MnO) \leq 2\%$ ,同时配合大流量氩气搅拌可以对钢水进行有效脱硫;

(2)通过改进脱氧工艺,在RH工序进行强制脱碳,确保碳成分满足要求, $w[C] \leq 50 \times 10^{-6}$ ;

(3)在RH工序对钢包顶渣改质并进行钢水钙处理,顶渣中 $(FeO+MnO) \leq 2\%$ ,有效控制钢中氧含量,提高钢水可浇性。

参考文献

[1] 马富平,包燕平. 超低碳钢方坯连铸生产工艺研究[J]. 炼钢, 2014, 30(2): 49-52.

[2] 周 健,李 强,赵家七,等. 含钛焊丝钢水口结瘤原因分析及改进[J]. 特殊钢, 2024, 45(1): 48-53.

[3] 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] 杨克枝,张乔英,常正昇. 含Ti 铝镇静超低碳钢连铸过程水口堵塞控制实践[J]. 特殊钢, 2020, 41(6): 36-40.

[5] 马富平,包燕平,王毓男,等. 超低碳铝镇静钢方坯连铸工艺[J]. 北京科技大学学报,2011,31(增刊1):42-45.

[6] 马富平,包燕平,董志强. 防止超低碳铝镇静钢大方坯连铸水口堵塞的工艺实践[J]. 特殊钢, 2014, 35(1): 23-25.

[7] Zhao G L. Effects of sintering conditions on microstructure and mechanical properties of reactive hot pressed  $tib_2$ -sic ceramic composites[J]. Ceramics - Silikaty, 2016: 226-233.

[8] 谢世春,姚云苗. 低碳低硅铝镇静钢结水口的防治[J]. 昆钢科技,2007(2):4-8.

[9] 田志国. 工业纯铁 M6 的 RH 真空脱碳工艺[J]. 四川冶金, 2022, 44(1): 30-33.

[10] 王子铮. 超低碳钢RH脱碳工艺优化. 本钢技术,2012(2):13-15.

[11] 周剑丰,罗 钢. 超低碳钢 210 t RH 脱碳精炼工艺的优化[J]. 特殊钢, 2015, 36(6): 33-35.

[12] 刘 彭,罗 钢,丁胜强,等. 超低碳钢顶渣改质工艺优化[J]. 金属材料与冶金工程, 2015, 43(3): 27-31.

[13] 李朋欢. 超低碳钢的顶渣改质工艺研究[J]. 浙江冶金, 2016 (1): 32-33+46.

[14] 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.

=====

下 期 要 目

钛微合金钢中TiN生成与控制的研究进展 ..... 杨 睿等

热处理工艺对 H13ESR 大型模具钢锻圆组织性能的影响 ..... 李 进等

渐进式固溶处理对 316H 不锈钢组织及性能的影响 ..... 荆 雪等

拆模控制冷却对 14t 扁锭中心疏松和热裂纹形成的模拟 ..... 吴 刚等

高氮奥氏体不锈钢的研究进展及展望 ..... 焦晓飞等

高强度低合金耐磨钢的热处理组织与力学性能 ..... 吴圳楠等

核电用钢 316H 电渣重熔氢含量分析与工艺优化 ..... 李德军等

N08120 镍基耐蚀合金 20t 扁锭初锻开裂原因分析和工艺改进 ..... 刘 煜等

铝含量对 Fe-1.4C-1.5Cr-Al<sub>x</sub> 钢组织及性能的影响 ..... 时大方等

第三代 FC 结晶器控流装置的电磁参数优化 ..... 段富春等

9Ni 钢夹杂物演变及钙处理工艺优化 ..... 陈登国等