

连铸开浇首炉二次氧化程度对比与分析

张新文,施嘉凯,汪德伟,轩康乐,刘永,孟祥岩
(江苏永钢集团有限公司特钢公司,苏州 215628)

摘要:对比了两种不同中间包氩气置换方式的效果,方案一采用氩气杆的方式置换中间包内腔的空气,方案二采用中间包盖氩气管和氩气杆的共同作用的方式置换中间包内的空气。选择相同的钢种、规格、置换时间及管道压力,开展工艺试验。通过比较得出:(1)方案二更能有效地置换中间包内腔的空气,减少二次氧化的概率;(2)方案二的氧含量、氮含量、Als/Alt、钢中夹杂物等指标均优于方案一,说明方案二的保护浇注效果更好;(3)方案二可有效预防10 μm以下夹杂物的产生,尤其是 $2\ \mu\text{m} \leq X < 5\ \mu\text{m}$ 的小颗粒夹杂物。

关键词:首炉;二次氧化;洁净度;夹杂物

Comparison and Analysis of Secondary Oxidation Degree in the First Heat of Continuous Casting

Zhang Xinwen, Shi Jiakai, Wang Dewei, Xuan Kangle, Liu Yong, Meng Xiangyan
(Special Steel Company, Jiangsu Yonggang Group Co., Ltd., Suzhou 215628)

Abstract: Compares the effects of two different tundish argon replacement methods, scheme I uses the argon rod to replace the air in the inner cavity of the tundish, and scheme II uses the joint action of argon gas pipe and argon rod on the tundish cover to replace the air in the tundish. Select the same steel grade, specification, replacement time and pipeline pressure to carry out the process test. Through comparison: (1) scheme II can more effectively replace the air in the inner cavity of the tundish and reduce the probability of secondary oxidation; (2) The oxygen content, nitrogen content, Als/Alt, inclusions in steel and other indicators of scheme II is better than those of scheme I, indicating that the protective casting effect of scheme II is better; (3) Scheme II can effectively prevent the formation of inclusions below 10 μm, especially small particle inclusions in the range of $2\ \mu\text{m} \leq X < 5\ \mu\text{m}$.

Key Words: First Heat; Secondary Oxidation; Cleanliness; Inclusion

钢的洁净度对产品质量有较大影响,经过初炼、精炼、真空脱气等工序后形成洁净度较高的钢水,进入连铸工序后,首炉总会有一段时间的敞开浇注,使钢水受到污染。钢水污染后 T.[O]、[N]含量会有不同程度增加,形成的非金属夹杂物影响钢材的疲劳寿命。车载气瓶用 4130X 钢主要盛装 H₂、CNG 等气体,使用频率达 1.5 万次,对钢材的疲劳寿命有较高的要求。冶金工作者对连铸首炉非金属夹杂物分布、氧含量、氮含量等进行了不同程度的研究。孙彦辉等^[1]认为开浇阶段中间包内腔空气对钢水二次氧化是主要原因。杨文等^[2]认为开浇阶段钢水的二次氧化很大程度是由中间包耐火材料及覆盖渣等因素造成,也有研究发现开浇阶段中间包内腔空气和耐火材料都会引起钢水的二次氧化^[3]。杨克枝等^[4]研究了开浇前中间包充氩对氧、氮、夹杂物密度及尺寸的影响,但对于充氩效果及改进方法缺乏系

统性研究。本文通过比较不同的充氩方案,系统性研究开浇前不同氩气吹扫方式对铸坯质量的影响。

1 研究方法

1.1 工艺路线与试验方案

以 Φ500 mm 规格车载气瓶用 4130X 钢连铸圆坯首炉为研究对象,生产工艺流程为:高炉铁水+废钢→100 t 电弧炉冶炼→LF 精炼→VD 真空精炼→R17m 弧形连铸(4 机 4 流)。

开浇前,采用两种方案向中间包内腔中充氩气吹扫以降低钢水二次氧化程度,见表 1 所示。试验炉次的熔炼成分见表 2 所示。具体操作为:中间包烘烤结束后,立即开通氩气,氩气压力调整至最大 1.2 MPa。方案一,采用三支氩气杆插入烘烤孔进行充氩,直至中间包钢液平稳,覆盖剂加入后停止吹氩。方案二,为改善首炉保护效果,设计了一种带氩

气管路的中间包盖板,并结合氩气杆,在开浇前向中间包内腔充氩,如图 1 所示。带氩气管路的中间包盖有 6 个氩气接入孔,共连接 40 个出气孔。

为比较两种方案实施效果,分别从距离勾头不同位置处取样,如图 2 所示。取样厚度为 100 mm,分别命名为 1[#] ~ 4[#] 样。从试样 1/2 半径处取 150 mm × 150 mm,锻造为 60 mm × 60 mm。从锻棒

一端切除长度 100 mm 的热影响区后,再从锻棒中心取样检测氧、氮、Als、Alt、洁净度等指标。

表 1 两种吹氩方案
Table 1 Two argon blowing schemes

吹氩方案	吹氩方式
方案一	三支氩气杆排空
方案二	三支氩气杆排空 + 中间包氩气管排空

表 2 4130X 钢熔炼成分/%
Table 2 4130X steel melting composition/%

方案	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Al
一	0.29	0.24	0.83	0.008	0.004	0.99	0.02	0.02	0.21	0.003	0.027
二	0.30	0.25	0.81	0.007	0.004	0.99	0.02	0.02	0.21	0.004	0.027

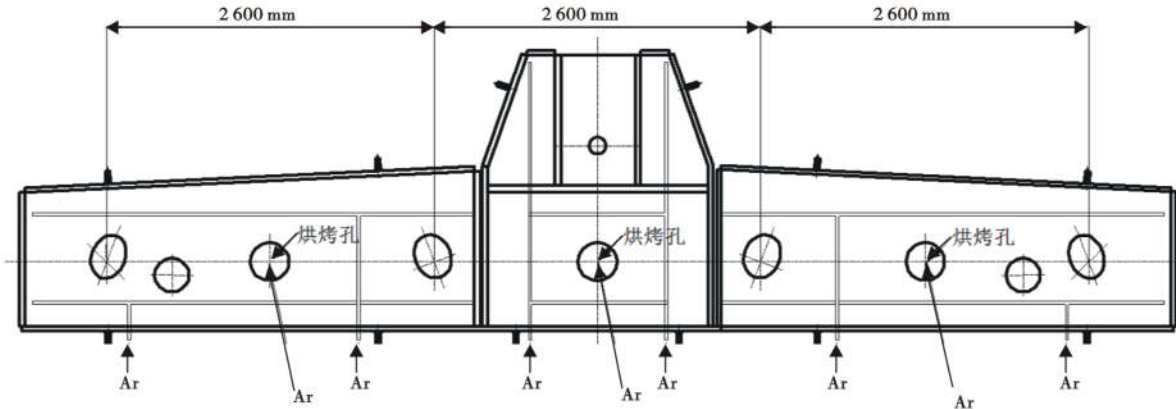


图 1 中间包盖氩气吹入位置
Fig. 1 Argon blowing position of tundish cover

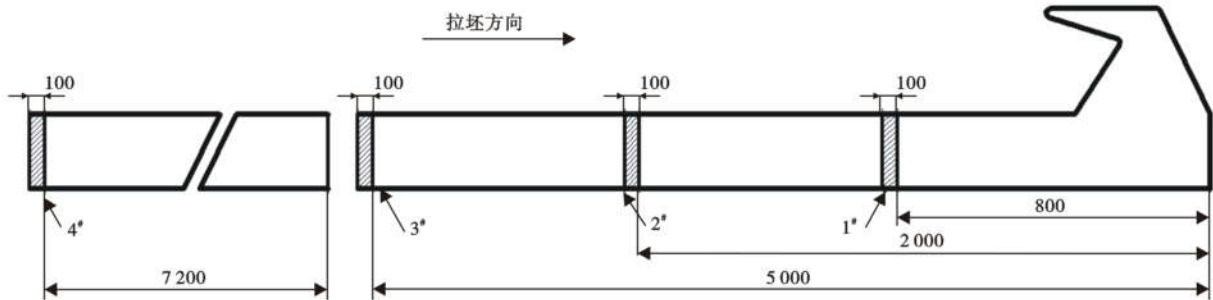


图 2 距勾头取样位置/mm
Fig. 2 Sampling position from hook head/mm

1.2 检测分析方法

在本研究中,使用以下仪器对试样进行分析:

(1)采用日本堀场氧氮氢分析仪 EMGA-930 检测钢中的氧氮含量;

(2)采用美国赛默飞世尔 ARL4460 直读光谱仪分析钢的化学成分;

(3)采用美国赛摩飞科技公司 Explorer4 型夹杂物自动分析仪扫描钢中的夹杂物颗粒数及分析典型

夹杂物的化学成分。

2 结果分析与讨论

2.1 两种吹氩方式下铸坯氧氮含量对比

文献[5-8]指出,钢中全氧含量是评价钢洁净度水平和夹杂物水平的指标之一,氮含量可反映钢液吸入空气的程度。在 1[#] ~ 4[#] 锻棒上取样,按照 GB/T 11261-2006、GB/T 20124-2006 标准检测氧和

氮含量,即 T[O]和 T[N],检测结果如图 3 所示。可以看出:(1)按照距钩头的顺序,两种方案的 1[#]~4[#]样氧、氮含量均依次降低,说明越靠近钩头部位,钢液吸

人的空气越多;(2)比较两种方案,钩头部分氧氮含量降低幅度最大,与方案一相比,方案二氧含量降低了 $(9 \sim 10) \times 10^{-6}$,氮含量降低了 $(4 \sim 5) \times 10^{-6}$ 。

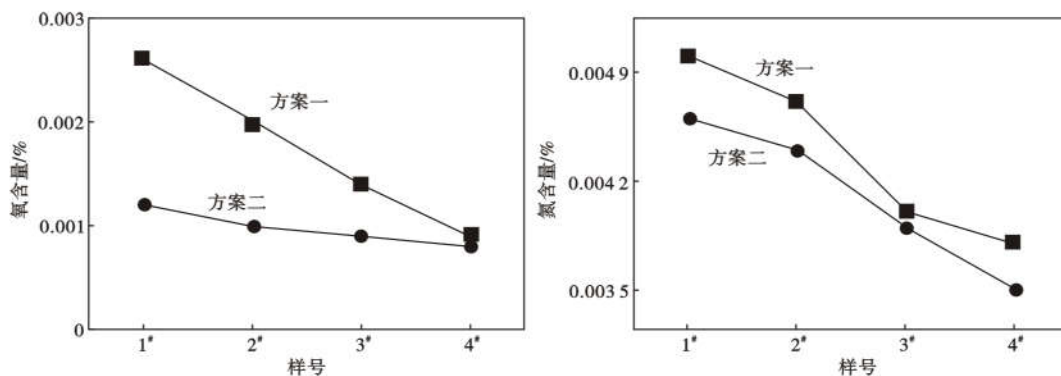


图 3 两种方案氧氮含量检测结果
Fig. 3 Oxygen and nitrogen content test results of two schemes

2.2 Als/Alt 的比较

采用溶解铝 (Als) 和全铝 (溶解铝 + 氧化铝) 的比值来衡量二次氧化的效果。在 1[#]~4[#]样锻棒中心位置取样,按照 GB/T 4336-2016 标准检测 Al 和 Als,并通过 Als/Alt 的比值来衡量铝损情况,如图 4 所示。可以看出,(1)两种方案下,1[#]~4[#]样 Als/Alt 均呈现逐渐增加的趋势,其中 1[#]的 Als/Alt 最低,即铝损越大,说明开浇时部分铝被氧化;(2)对于相同部位的试样,方案二的 Als/Alt 均比方案一的大,说明前者的保护浇注效果较好。

2.3 洁净度的比较

2.3.1 富 Al 夹杂物的分布密度

当夹杂物尺寸较小时,由于难以分辨钢中的含 Al 夹杂物是来自精炼的脱氧产物还是开浇时的二次氧化产物,本文就以富铝夹杂物 ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$) 为研究对象,视场面积为 70mm^2 ,检测夹杂物颗粒数量及密度,如图 5 所

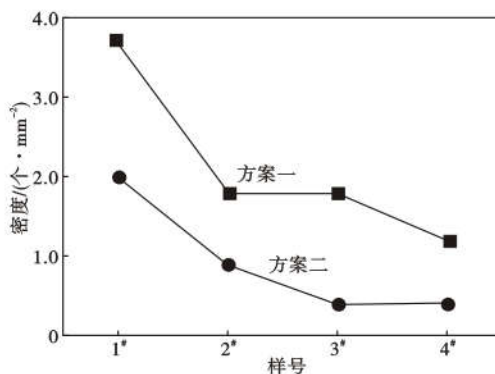


图 5 两种方案富 Al 夹杂物分布密度
Fig. 5 Distribution density of Al rich inclusions in two schemes

示。可以看出:(1)两种方案的富铝夹杂物在 1[#]~4[#]样上均呈下降趋势,其中越靠近钩头部位,夹杂物密度越高;(2)方案二中富铝夹杂物分布密度明显低于方案一。

2.3.2 富 Al 夹杂物颗粒数量统计

朱正海等^[9]研究了中间包内不同挡墙和挡坝对夹杂物去除的效果,结果表明中间包挡墙和挡坝对 $10 \mu\text{m}$ 以下夹杂物颗粒的去除力度较小。在相同部位上取样,检测富铝夹杂物尺寸的大小,如图 6 所示。可以看出:(1)方案一 1[#]~4[#]样中,富 Al 夹杂物颗粒均比方案二多,说明方案一钢水的二次氧化更为严重;(2)两种方案中 85% 以上的富 Al 颗粒尺寸都在 $10 \mu\text{m}$ 以下,与文献[9]观点较为吻合;(3)与方案一相比,方案二中尺寸在 $10 \mu\text{m}$ 以下的颗粒数量降幅比较明显,尤其是颗粒尺寸 $2 \mu\text{m} \leq X < 5 \mu\text{m}$ 的夹杂物,

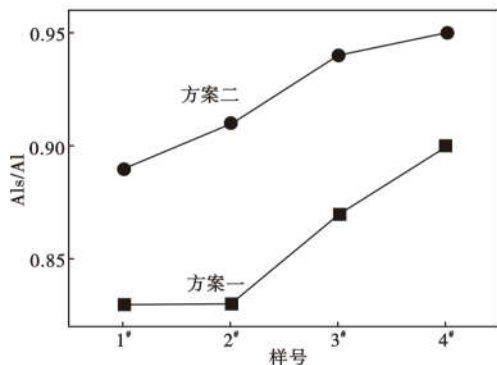


图 4 两种方案 Als 和 Alt 的比值
Fig. 4 Ratio of Als and Alt in two schemes

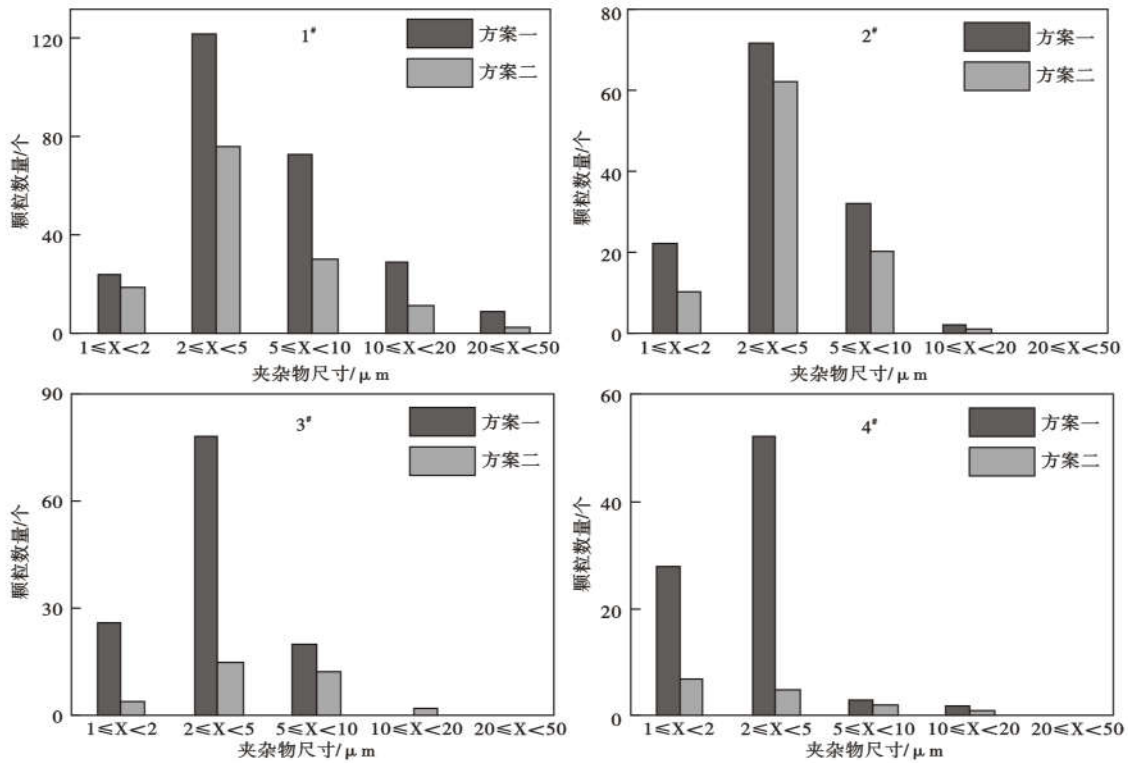


图 6 两种方案不同取样位置的夹杂物数量

Fig. 6 Number of inclusions at different sampling positions in the two schemes

1# ~ 4# 样的降幅分别为 38%、14%、81%、90%，说明方案二可有效预防 10 μm 以下夹杂物的产生。

2.3.3 夹杂物形貌

肖鸿光在研究 25Mn 钢 B 类夹杂物时发现,当 B 类夹杂物大于 15 μm 时,油缸内壁高速刮滚时是致命的缺陷,容易出现烂斑、白点缺陷^[10]。两种方

案 1# 样的典型夹杂物形貌如图 7 所示,横坐标表示能量,单位为 keV,纵坐标表示计数率。可以看出:(1)方案一的夹杂物呈断续状,经 X 射线能谱分析为主要为 Al₂O₃、MgO 及少量的 Na、Ca、Cr 等复合型夹杂物,方案二的夹杂物主要 Al₂O₃、CaS、MgO 及少量的 Ca、Mn、Cr 等复合型夹杂物。(2)方案一的夹杂

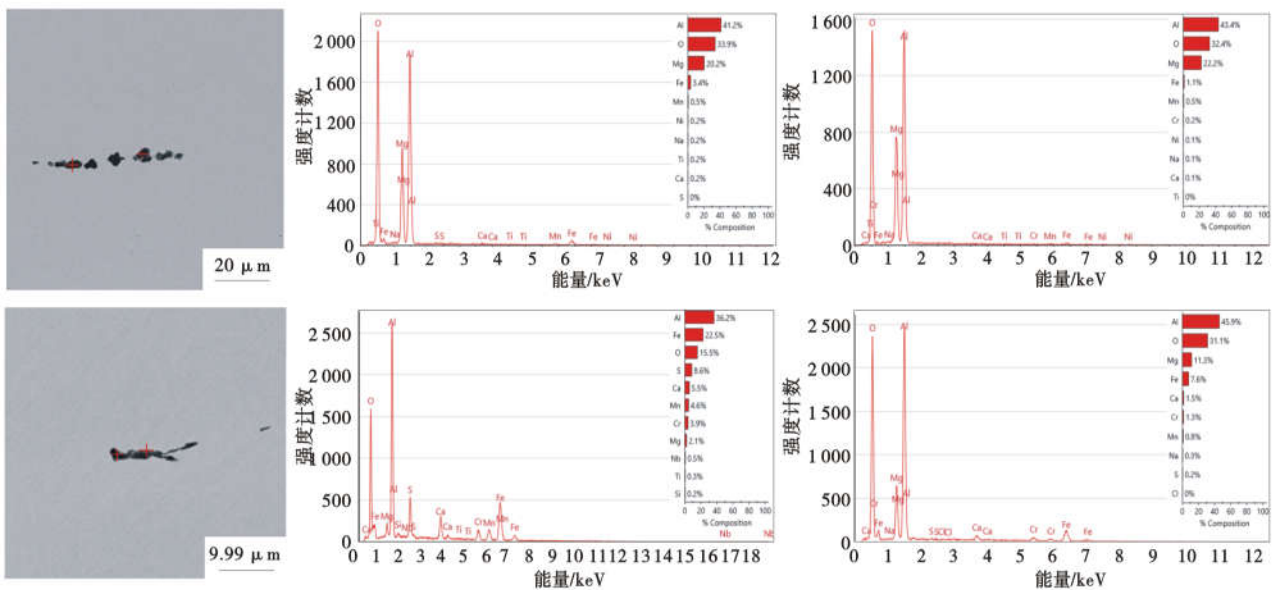


图 7 两种方案夹杂物形貌及 X 射线扫描结果:(a) 方案一, (a) 方案二

Fig. 7 Inclusion morphology and X - ray scanning results of the two schemes: (a) scheme I, (b) scheme II

物长度较大,对后续产品加工及质量的影响较大,而方案二的夹杂物长度较小,对后续产品加工及质量的影响较小。

3 中间包氩气置换理论分析

两种方案在实施过程中,充氩时间和管道压力均未调整,但方案二的吹氩孔数量增多,方案一只有 3 支吹氩杆。方案二在方案一的基础上增加了 40 个出气孔,即方案二共有 43 个氩气孔。中间包充氩置换属于完全混合置换^[4],置换量符合式(1):

$$V_t = V_R \ln \frac{C_1 - C_0}{C_2 - C_0} \quad (1)$$

式中:其中 C_1 -容器中最初氧气体积分数,取值 21%; C_2 -容器中最终氧气体积分数,% ; C_0 -惰性气体中氧气体积分数,% ; V_R -中间包容量, m^3 ; V_t -置换所需的惰性气体体积, m^3 。

容器中最终氧气体积分数可按照溶解在钢中的氧含量 10×10^{-6} 计算,充氩结束时中间包钢液 20 t,假设此时溶解氧与空气氧的分压相等,可计算出空气中的氧体积分数为 0.489%。高纯氩气中的氧气体积分数趋于 0,中间包容量为 $5.73 m^3$,置换中间包的氧气所需的氩气为 $21.55 m^3$,充氩时间为 7.5 min。由于氩气杆和每根氩管均接入总管路,每个充氩孔的压力和流量均相同,方案二由 43 个出气孔组成,可计算出每个孔的流量为 66.8 NL/min,而实际的流量为 70~75 NL/min。方案一中三个出气孔在 7.5 min 的氩气量为 $1.69 m^3$ 。可以看出,方案二在开浇阶段充氩量可以完全置换中间包内腔的空

气。

当钢中[Al]含量 >0.01% 时,钢中溶解[O]很低,此时钢中[O]全部与 Al 结合生成 Al_2O_3 ,而没有与 Si、Mn 反应,故夹杂物全部为 Al_2O_3 ^[11]。中间包停止烘烤后,在打开排氩气管之前,大量的空气进入中间包。钢包开浇后,空气中的氧气与 Al 结合生成 Al_2O_3 ,由于钢液面更新较快,还未来得及与 Si、Mn 反应,钢液面已经更新,又开始了新的氧气和 Al 的反应,因此,夹杂物检测结果绝大部分为 Al_2O_3 。当中间包内充入大量的氩气时,其密度是空气的 1.4 倍,可以隔绝钢液与空气接触,从而防止了钢液的二次氧化。在固定的时间内,方案二充入的氩气量是方案一的 12.7 倍,可以有效起到保护浇注的效果。

4 结论

采用两种方案向中间包内腔充氩置换空气,方案一采用三支氩气杆吹扫,方案二采用三支氩气杆+中间包氩气管方式吹扫。通过试验、数据分析与比较,得出以下结论:

(1)在充氩时间和管道压力相同的情况下,方案二的充氩置换方式较方案一更能有效地置换中间包内腔的空气,减少二次氧化的概率;

(2)两种方案相比,方案二的氧含量、氮含量、Als/Alt、钢中夹杂物等指标均优于方案一,说明方案二的保护浇注效果更好;

(3)方案二可有效预防 $10 \mu m$ 以下夹杂物的产生,尤其是 $2 \mu m \leq X < 5 \mu m$ 的小颗粒夹杂物。

参考文献

- [1]孙彦辉,蔡开科,赵长亮.非稳态浇注操作对连铸坯洁净度影响[J].钢铁,2008,43(1):22-25.
- [2]杨文,薛勇强,曹晶,等.低碳铝镇静钢头坯洁净度研究[J].钢铁,2011,46(9):34-39.
- [3]杨叠,邓小旋,王新华,等.二次氧化对低碳铝镇静钢中间包钢水洁净度的影响[J].钢铁,2013,48(1):37-41.
- [4]杨克枝,常正昇,郭俊波.开浇前中间包充氩对中碳铝镇静钢钢水洁净度的影响研究[J].河南冶金,2021,29(3):12.
- [5]张立峰,王新华.连铸钢种的夹杂物[J].山东冶金,2005,27(2):1-5.
- [6]徐匡迪.关于洁净度的若干基本问题[J].金属学报,2009,45(3):257-269.
- [7]崔衡,岳峰,包燕平,等. IF 钢连铸头坯洁净度研究[J].钢铁,2010,45(3):39.
- [8]孙丽媛,李京社,王林珠,等. 12Cr1MoVG 钢精炼过程中夹杂物的演变规律[C]//第十七届全国冶金反映工程学学术会议.太原,2013:234-239.
- [9]朱正海,徐其言,周俐,等. CSP 中间包内腔优化的数值模拟[J].安徽工业大学学报,自然科学版,2014,31(1):15-19.
- [10]肖鸿光.油缸用 25Mn 钢 100 t EAF-LF-VD-软吹氩-CC 流程 B 类夹杂物的控制[J].特殊钢,2021,42(4):54.
- [11]蔡开科,程士富.连续铸钢原理与工艺[M].北京:冶金工业出版社,2008.2:193-195.