



## 钢包包底结构优化对连铸坯洁净度的影响

徐学军<sup>1</sup>, 王 祎<sup>1</sup>, 黄 磊<sup>2</sup>, 梁 庆<sup>2</sup>, 李炳基<sup>2</sup>, 肖 壮<sup>2</sup>, 任 英<sup>1</sup>, 张立峰<sup>3</sup>

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2 广西北港新材料有限公司, 北海 536000;

3 北方工业大学机械与材料工程学院, 北京 100144)

**摘 要:**为探究钢包底部结构优化对钢水洁净度提升的作用机制,本研究以卷渣行为为切入点,采用漩涡临界高度作为衡量卷渣倾向的关键表征指标。通过分析水模型数据,选取台阶体积、通钢量及水口至台阶的距离三个参数,建立了其与漩涡临界高度的经验公式,并进一步拟合了台阶体积对钢包剩余钢水量的公式,为结构优化设计提供理论基础。在此基础上,设计了一种新型斜坡台阶式钢包底部结构,钢包底部优化为倾斜平面,倾斜于钢包出水口,钢包底部斜坡高度为 260~220 mm,斜坡具有 2° 的坡度,坡面总高度为 70 mm,这类钢包底部优化操作主要适用于 150~300 t 的钢包。同时开展工业试验,采用自动扫描电镜对优化前后中间包和连铸坯中夹杂物进行分析。结果表明,结构优化后,中间包钢样中  $w[\text{T. O}]$  由  $40 \times 10^{-6}$  降至  $27 \times 10^{-6}$ ,  $w[\text{T. N}]$  由  $87 \times 10^{-6}$  降至  $61 \times 10^{-6}$ , 大于  $2 \mu\text{m}$  夹杂物数密度由  $28 \text{ 个}/\text{mm}^2$  降至  $5 \text{ 个}/\text{mm}^2$ 。连铸坯中  $10 \sim 14 \mu\text{m}$  夹杂物数量显著减少,最大尺寸由  $53 \mu\text{m}$  降低至  $24 \mu\text{m}$ ,夹杂物面积分数与数密度在厚度中心下降最为明显。钢包底部结构优化可通过控制末期卷渣、抑制夹杂物迁移与富集,有效提升钢水洁净度,具有良好的工程应用价值。

**关键词:**连铸坯; 钢包结构; 漩涡; 剩余钢水量

**DOI:**10. 20057/j. 1003-8620. 2025-00160 **中图分类号:**TF777

## Effect of Ladle Bottom Optimization on the Slab Cleanliness of Continuous Casting Slabs

Xu Xuejun<sup>1</sup>, Wang Yi<sup>1</sup>, Huang Lei<sup>2</sup>, Liang Qing<sup>2</sup>, Li Bingji<sup>2</sup>, Xiao Zhuang<sup>2</sup>,  
Ren Ying<sup>1</sup>, Zhang Lifeng<sup>3</sup>

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2 Guangxi Beigang New Materials Co., Ltd., Beihai 536000, China; 3 School of Mechanical and Material Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

**Abstract:** To investigate the mechanism by which optimizing the ladle bottom structure improves steel cleanliness, this study focuses on slag entrapment behavior and adopts the critical vortex height as the key indicator for evaluating the tendency of slag entrainment. By analyzing the water model data, three parameters including step volume, steel throughput and the distance from the nozzle to the step, were selected to establish empirical formulas correlating them with the critical vortex height. Additionally, a formula was fitted to describe the relationship between step volume and the remaining molten steel volume in the ladle, providing a theoretical basis for structural optimization design. Based on this foundation, a novel sloped step-type ladle bottom structure was designed. The ladle bottom was optimized into an inclined plane sloping toward the nozzle, with the sloped section ranging in height from 260 mm to 220 mm, a gradient of  $2^\circ$ , and a total slope height of 70 mm. This optimized bottom structure is primarily applicable to ladles with capacities between 150 tons and 300 tons. At the same time, industrial trials were conducted to verify the effectiveness of the design. An automatic scanning electron microscope was used to analyze inclusions in both the tundish and slab before and after optimization. The results show that after optimization, the total oxygen content ( $w[\text{T. O}]$ ) in the tundish steel sample decreased from  $40 \times 10^{-6}$  to  $27 \times 10^{-6}$ , and the total nitrogen content ( $w[\text{T. N}]$ ) dropped from  $87 \times 10^{-6}$  to  $61 \times 10^{-6}$ . The number density of inclusions larger than  $2 \mu\text{m}$  decreased from  $28/\text{mm}^2$  to  $5/\text{mm}^2$ . In the slab, the number of  $10 \mu\text{m} \sim 14 \mu\text{m}$  inclusions was significantly reduced, with the maximum size decreasing from  $53 \mu\text{m}$  to  $24 \mu\text{m}$ . The area fraction and number density of inclusions showed the most notable reduction at the slab thickness center. The optimization of the ladle bottom structure can effectively enhance molten steel cleanliness by controlling slag entrapment at the end of casting and suppressing the migration and accumulation of inclusions, demonstrating significant engineering application value.

**Key Words:** Continuous Casting Slab; Ladle Structure; Vortex; Residual Volume of the Molten Steel

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2023YFB3709900); 国家自然科学基金资助项目(U22A20171); 中国宝武低碳冶金创新基金(BWLCF202315)

**作者简介:** 徐学军(2001—),男,硕士; **E-mail:** 1906409119@qq.com; **收稿日期:** 2025-07-02

**通信作者:** 张立峰(1971—),男,博士,教授; **E-mail:** zhanglifeng@ncut.edu.cn;

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

IF 钢(无间隙原子钢)广泛应用于汽车、家电等领域,尤其在汽车轻量化方面有着广泛的需求<sup>[1]</sup>。然而,在 IF 钢浇铸过程中,钢中卷渣类夹杂物的尺寸、形状等对 IF 钢的性能有重大的影响<sup>[2-4]</sup>。卷渣类夹杂物主要在钢包浇铸末期生成<sup>[5]</sup>。在钢包出钢过程中,随着钢液液面的持续下降,其表面逐渐形成凹陷并出现漩涡现象。当液面降至某一临界值(即漩涡临界高度)时,钢渣便容易被卷入钢液之中,严重时甚至会吸入空气。这种漩涡引发的卷渣与吸气现象,不仅会导致钢液受到污染并发生二次氧化,还可能造成夹杂物难以上浮、水口发生堵塞、长水口及中间包内衬被侵蚀等问题<sup>[6-8]</sup>。从而使连铸坯表面和内部出现质量缺陷,进而影响成品的洁净度和性能<sup>[9-10]</sup>。

连铸工艺是炼钢过程中至关重要的环节,其过程中非金属夹杂物的演变对最终产品性能具有直接影响<sup>[11]</sup>。因此,众多学者针对 IF 钢连铸坯中夹杂物的分布规律开展了深入研究。张军国等<sup>[12]</sup>提出在 IF 钢连铸坯表面为 TiN 夹杂物,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>在连铸坯中分布比较均匀。崔衡等<sup>[13]</sup>发现,头坯夹杂物数量远高于正常坯,而且内弧夹杂物数量也高于外弧数量。刘泓<sup>[14]</sup>通过工业试验发现铝脱氧钢中大颗粒夹杂物主要来源于精炼渣及中间包覆盖剂。Zhang 等<sup>[15]</sup>提出,可以通过优化钢包和水口结构来提高连铸坯的洁净度。

很多学者对钢包浇铸时期产生的漩涡进行了研究。屈天鹏等<sup>[16]</sup>通过数值模拟发现,分析了初始液面高度、出水口尺寸与布置位置、出水口结构等因素对漩涡形成规律的影响。王强等<sup>[17]</sup>通过水

模实验,通过改变漩涡形成时的速度场分布形式和速度值的大小来抑制漩涡的出钢末期漩涡的产生。赵贵祥等<sup>[18]</sup>发现当磁场强度增加,漩涡高度显著降低,改变磁场方向,水平方向或竖直的磁场都会对漩涡都有一定抑制作用。以往研究主要是以如何改变水口位置 and 在水口边增加挡板为主,基本都是围绕水口来进行研究,而对钢包自身结构尤其是钢包底部的研究较少。本研究为改变钢包包底结构前后,中间包夹杂物和连铸坯的全断面夹杂物情况,为进一步改善最优钢包结构提供参考。

## 1 钢包底部优化计算

研究表明,漩涡的临界高度是表征钢包浇铸过程中卷渣情况的一个关键因素。在常规钢包中,浇铸末期时会在水口上方形成漩涡,漩涡会使钢液表面的钢渣被卷入水口中<sup>[19-21]</sup>。直到下钢过程中检测到钢液成分达到一定值时,才会终止浇铸<sup>[22-23]</sup>。然而,此时卷渣现象已持续一段时间,严重影响了连铸坯的洁净度。表 1 总结了不同学者关于钢包浇铸时漩涡形成的研究,指出影响漩涡临界高度的因素众多。本研究选取其中影响较显著的三个因素—台阶体积、水口至台阶的距离以及通钢量,对其与漩涡临界高度之间的关系进行拟合分析,以分析各参数对漩涡临界高度的具体影响。

基于其他学者的水模实验数据,收集了不同台阶体积条件下的漩涡临界高度数据,并采用 Origin 软件对其进行了曲线拟合分析,基于常见的工程领域的经验公式形式,采用幂函数进行公式拟合,拟

表 1 钢包浇铸时漩涡文献总结  
Table 1 Summary of vortex literature during ladle casting

作者	年份	研究内容	研究方法	钢包容量/t	是否进行工业试验	是否有公式
王建 <sup>[24]</sup>	2012	不同钢包底部、水口流量	水模实验	120	否	是
Rodolfo <sup>[25]</sup>	2013	通钢量、阀门开度	数值模拟	150	否	否
唐海燕 <sup>[26]</sup>	2016	不同水口直径、水口偏心率、流体初始速度	水模实验 数值模拟	70	否	是
屈天鹏 <sup>[16]</sup>	2016	初始液面高度、水口直径、偏心率、水口形状	水模实验	240	否	否
王强 <sup>[17]</sup>	2018	偏心率、吹气防旋	水模实验 数值模拟	60	否	否
张瑞东 <sup>[27]</sup>	2019	初始液面高度、水口直径、偏心率	水模实验	70	否	是
冯巍 <sup>[28]</sup>	2019	不同水口直径、水口偏心率、顶渣属性、钢包切向流动速度	水模实验	300	否	否
胡群 <sup>[29]</sup>	2021	初始液位高度、静置时间、水口偏心率、阻旋装置	水模实验	150	是	否
Yin <sup>[30]</sup>	2023	浇铸前停留时间、水口流量	水模实验	150	否	否
Wang <sup>[31]</sup>	2024	反向旋转、容器直径、初始切向速度	水模实验	-	否	否
Zhou <sup>[32]</sup>	2024	通钢量、剩余水量、漩涡高度、围堰高度、钢包底部结构	数值模拟 工业试验	300	是	是

合曲线的  $R^2$  均高于 0.99, 说明拟合公式预测精度高。图 1 为台阶体积、水口至台阶的距离以及通钢量分别与漩涡临界高度之间的拟合关系。从拟合结果可得: 式(1)显示, 随着台阶体积的增加, 漩涡临界高度显著降低, 有助于抑制卷渣现象。台阶体积的增大改变了水口附近的流场结构。台阶相当于形成一个流体缓冲区, 钢液流速得到有效降低, 流动更趋于稳定, 流体的动能被部分消散, 减少了局部的旋涡形成条件; 式(2)指出, 水口至台阶的距离越大, 漩涡临界高度越低, 水口至台阶距离的增加为钢液提供了更长的流动调整区域, 使得流体在达到台阶之前能够逐渐减弱其旋转速度和湍流强度, 促使流态从紊流向层流转变, 减小了流体的剪切应力和涡流能量积累。因此, 临界漩涡高度随距离增加而降低, 表现出更有效的漩涡抑制效果; 而式(3)则表明, 通钢量越大, 漩涡临界高度反而呈上升趋势, 不利于漩涡的抑制。随着钢液流量的增加, 流速和动能同步提升, 惯性力增强, 使得流体更易产生强烈的旋转运动, 促进漩涡的形成和稳定发展。结果表现为漩涡临界高度升高, 降低了漩涡抑制的效果。此现象与流体力学中雷诺数增大导致流动由层流向紊流转变的基本规律一致。

$$y = 176.95x_1^{-0.047} \quad (1)$$

$$y = 153.44x_2^{-0.025} \quad (2)$$

$$y = 24.02x_3^{0.705} \quad (3)$$

式中,  $y$  为漩涡临界高度, mm;  $x_1$  为台阶体积, L;  $x_2$  为水口到台阶的距离, mm;  $x_3$  为通钢量, t/min。

由以上拟合分析可以看出, 三个参数对漩涡临界高度均存在不同程度的影响。为进一步研究这

三者对漩涡临界高度的综合作用, 本研究将三个单独拟合公式联合构建综合模型。该模型假设各因素对漩涡临界高度的影响相对独立且存在耦合效应, 通过乘积形式综合体现。利用对数变换, 该模型转化为线性回归问题, 便于参数的稳定估计。此经验模型既符合流体力学中变量间非线性关系的物理特征, 也满足工程应用中多参数耦合影响的描述需求, 因而具备良好的理论和实用依据。得到了漩涡临界高度与台阶体积、水口至台阶距离及通钢量之间的关系式(4)。

$$y = 36.44x_1^{-0.047}x_2^{-0.025}x_3^{0.705} \quad (4)$$

式中,  $y$  为漩涡临界高度, mm;  $x_1$  为台阶体积, L;  $x_2$  为水口到台阶的距离, mm;  $x_3$  为通钢量, t/min。

在实际生产过程中, 当检测到钢渣成分达到设定阈值时, 浇铸操作将被终止, 此时钢包内仍存在一定的残余钢水。该残余钢水量可通过此时钢水体积减去台阶体积来计算。因此, 本研究基于此思路构建了计算剩余钢水量的模型, 如式(5)。

$$m_{residue} = \rho_{steel}(\pi r^2 H_{vortex} - V_{step}) \quad (5)$$

式中,  $m_{residue}$  为剩余钢水量, t;  $\rho_{steel}$  为钢水密度, g/cm<sup>3</sup>;  $H_{vortex}$  为漩涡临界高度, mm;  $V_{step}$  为台阶体积, L。

将拟合得到的剩余钢水量关系式与实际数据进行对比, 具体如图 2 所示, 结果表明: 随着台阶体积的增大, 钢包内的残余钢水量显著减少。这不仅能够提升钢水收得率, 也有助于提高企业经济效益。拟合公式与实际情况高度吻合, 具备良好的工程应用价值, 可用于预测不同台阶体积条件下的剩余钢水量。

前文已完成台阶体积的拟合公式推导, 将该公

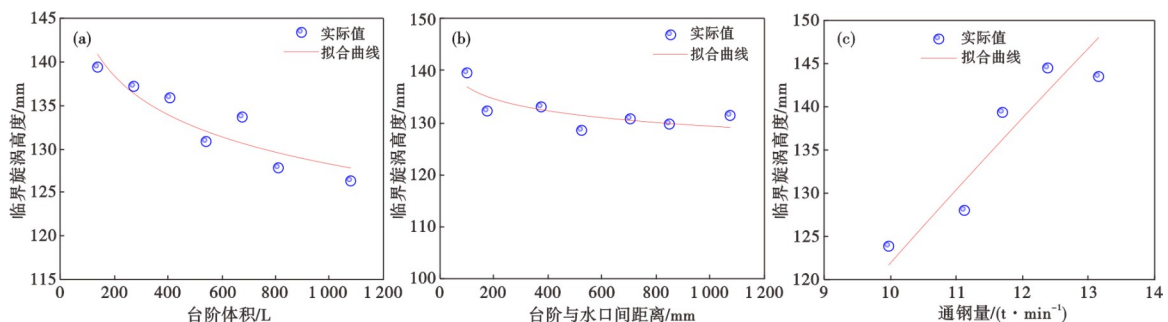


图 1 台阶体积、水口到台阶的距离、通钢量与漩涡临界高度拟合: (a) 台阶体积对漩涡临界高度影响, (b) 水口到台阶距离对漩涡临界高度影响, (c) 通钢量对漩涡临界高度影响

Fig. 1 Fitting analysis of step volume, nozzle to step distance, and steel throughput with critical vortex height: (a) effect of step volume on critical vortex height, (b) effect of distance from nozzle to step on critical vortex height, (c) effect of steel throughput on critical vortex height

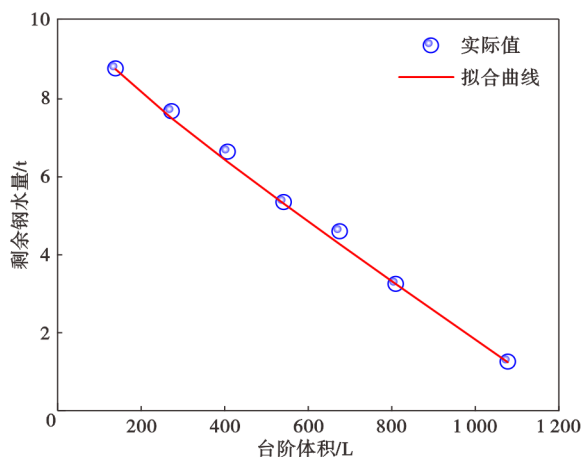


图 2 台阶体积和剩余钢水量关系

Fig. 2 Relationship between step volume and residual molten steel volume

式代入剩余钢水量计算式中,可得出式(6),即剩余钢水量与台阶体积、水口至台阶的距离及通钢量之间的综合关系。此公式可用于预测多因素条件下对剩余钢水量的影响,为优化钢包结构设计提供理论依据。

$$m_{residue} = \rho_{steel} (36.44 \pi r^2 x_1^{-0.047} x_2^{-0.025} x_3^{0.705} - x_1) \quad (6)$$

## 2 工业试验

### 2.1 试验方案

本研究选取国内某钢厂 300 t 的 IF 钢包为研究对象,开展钢包底部结构优化工业试验。IF 钢的冶炼工艺流程为:转炉→LF 精炼→RH 真空处理→连铸→轧制。实验设置对照组与实验组两种钢包,其中,对照组为未优化钢包,实验组则在钢包底部增设斜坡台阶结构。钢包底部优化为倾斜平面,倾斜于钢包出水口,钢包底部斜坡高度为 260~220 mm,斜坡具有 2° 的坡度,坡面总高度为 70 mm,台阶长度占底部直径的 3/4,总长为 2 524 mm。这类钢包底部优化操作主要适用于 150~300 t 的钢包,钢包底部优化示意图如图 3 所示。工业试验中的斜坡台阶和上文公式里面的台阶类似,而增加坡度是为了下渣时,随着钢水液面的下降,炉渣会留在斜面上,并在斜坡台阶开始出现时稳定液面,从而减少卷渣情况。

对优化前后中间包全流程取钢样,分别在浇铸时钢包剩余 220、180、120、60 t 时在中间包出口位置取钢水提桶样。一部分使用 Leco 氧氮分析仪分析钢中的  $w[T.O]$  和  $w[T.N]$ ,另一部分用夹杂物自动

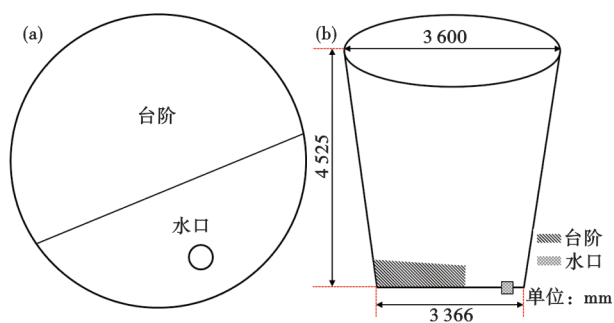


图 3 钢包底部优化方案:(a)钢包底部俯视图,(b)钢包剖面图

Fig. 3 Ladle bottom optimization scheme: (a) plan view of ladle bottom, (b) sectional view of ladle

扫描电镜对夹杂物进行检测。

沿连铸坯拉坯方向进行取样,并从内弧到外弧切割成 15 块等分试样。每块样品尺寸为 15 mm×15 mm×15.3 mm,具体制样方案如图 4 所示。对第一组(未优化)试样编号为 1-1 至 1-15,第二组(优化后)试样编号为 2-1 至 2-15。所有样品经热镶处理后,使用 ASPEX 自动扫描电镜对连铸坯全断面进行扫描,分析夹杂物的成分、数量、类型及尺寸分布。电镜观察面为垂直于拉坯方向的截面。

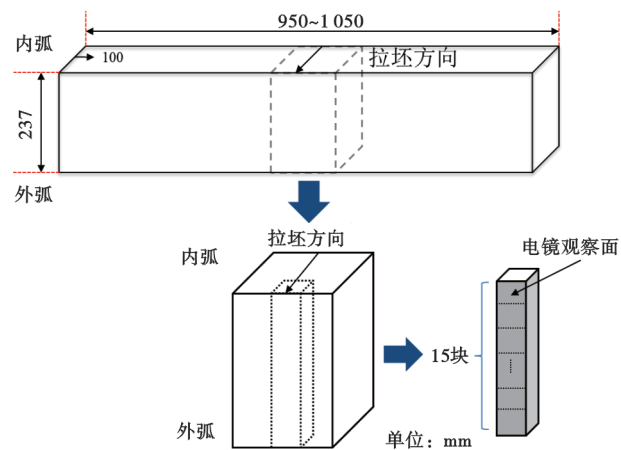


图 4 连铸坯制样及分析方案

Fig. 4 Sampling and analysis scheme of continuous casting billet

### 2.2 中间包过程钢样分析

对中间包过程钢样使用 Leco 氧氮分析仪检测钢水中的总氧 ( $w[T.O]$ ) 和总氮  $w[T.N]$  含量,具体变化趋势如图 5 所示。图 5(a) 显示了  $w[T.O]$  含量随时间的变化,图 5(b) 则为  $w[T.N]$  含量的变化情况。从检测结果可以看出,钢包包底优化后浇铸的 IF 钢中  $w[T.O]$  和  $w[T.N]$  含量整体均低于优化

前,特别是在浇铸前期效果尤为明显。在中间包浇铸7 min时,IF钢的 $w[\text{T.O}]$ 由优化前的约 $40 \times 10^{-6}$ 下降至 $27 \times 10^{-6}$ , $w[\text{T.N}]$ 则由 $87 \times 10^{-6}$ 降至 $61 \times 10^{-6}$ 。随着浇铸时间的推进,两组样品的 $w[\text{T.O}]$ 与 $w[\text{T.N}]$ 含量差异依然存在,表明包底优化措施对钢水洁净度的提升具有持续作用。这一改善主要归因于包底结构优化后,有效降低了钢渣卷入中间包的概率,并且缩短了钢水在包底区域的停留时间,同时包底结构优化导致漩涡的减弱,从而降低了夹杂物的二次形成及聚集,有效防止夹杂物在钢液中重新生成和长大,从而显著提升了钢水的洁净度。

采用自动扫描电镜对优化前后中间包过程钢样 $2 \mu\text{m}$ 以上夹杂物进行检测,每个样品扫描面积为

$16 \text{ mm}^2$ 。优化前后中间包浇铸18 min的钢样夹杂物成分如图6所示,图6中实线为1873 K下的液相线,虚线为1773 K下的液相线,五角星代表夹杂物平均成分。从图6中可以看出,中间包夹杂物主要为 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物,包底优化后夹杂物相较于优化前夹杂物数量有明显下降,从288个夹杂物降低到72个夹杂物。

图7展示了中间包浇铸过程中,大于 $2 \mu\text{m}$ 夹杂物面积分数、数密度、最大尺寸和平均尺寸的演变情况。从图7中可以看出,包底优化后,中间包钢水中夹杂物各项指标均有所改善。其中,夹杂物的数密度下降尤为明显,特别是在中间包浇铸前期,由优化前的约28个/ $\text{mm}^2$ 降低至5个/ $\text{mm}^2$ ,随后保持较低且稳定的水平。面积分数方面,在优化后的浇铸

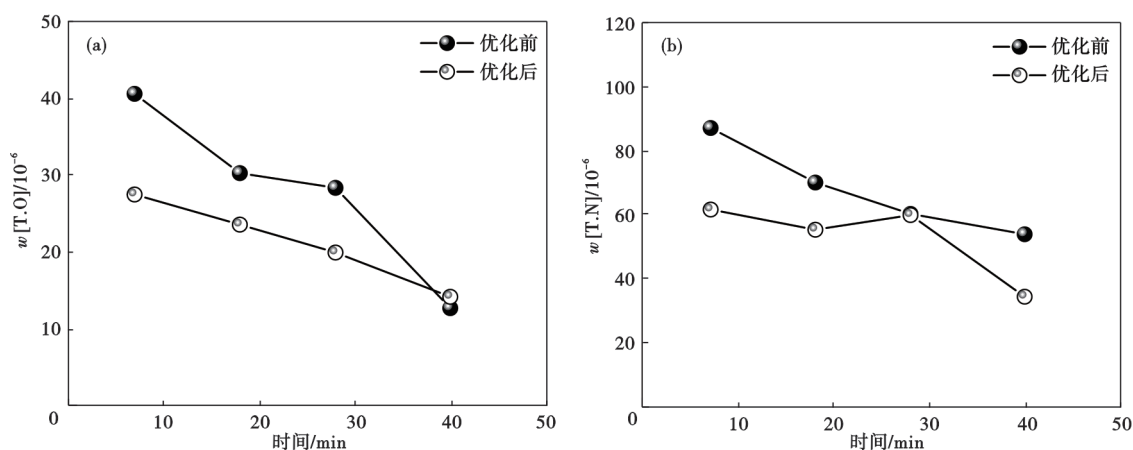


图5 中间包过程中IF钢总氧和总氮含量变化:(a)总氧含量,(b)总氮含量

Fig. 5 Changes of total oxygen and total nitrogen contents in IF steel during tundish process: (a) total oxygen content, (b) total nitrogen content

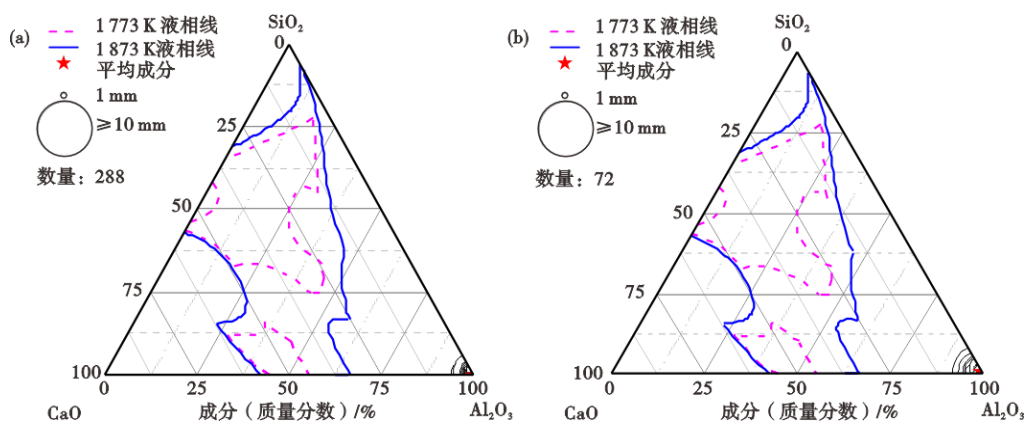


图6 中间包浇铸18 min的钢样夹杂物成分分布:(a)优化前中间包 $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ - $\text{CaO}$ 相图,(b)优化后中间包 $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ - $\text{CaO}$ 相图

Fig. 6 Inclusion composition distribution of steel samples cast for 18 min in tundish: (a)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ - $\text{CaO}$  phase diagram of tundish before optimization, (b)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ - $\text{CaO}$  phase diagram of tundish after optimization

过程中呈现先下降后上升的趋势,整体水平明显低于优化前,约由  $80 \times 10^{-6}$  下降至  $30 \times 10^{-6}$ ,反映出夹杂物总体数量的有效控制。夹杂物最大尺寸在包底优化后也有一定程度的降低,而平均尺寸则变化较小,说明优化主要抑制了较大尺寸夹杂物的生成,对夹杂物尺寸分布的均匀性也有所改善。这是因为优化后的台阶结构通过改变流场和降低剩余钢液量,减少了夹杂物的二次混入和卷入,从而降低了夹杂物的总数量。

### 2.3 典型夹杂物形貌

图 8 为 IF 钢中典型夹杂物形貌,钢包包底结构优化后,夹杂物的形貌基本未发生变化。扫描分析结果显示,IF 钢中的主要夹杂物类型为小型  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物,典型 IF 钢中夹杂物形貌如图 8(a) 所示。连铸坯中的主要夹杂物类型为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物与 Al-Ti-O 复合夹杂物,Ti 元素主要来自加入的合金钛铁 70。图 8(b) 为常见的单体  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物,是 IF 钢中数量最多的一类;图 8(c) 显示为 Al-Ti-O 复合夹杂物,这类夹杂物内部为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  而外层包裹着 TiN;图 8(d) 为团簇状  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物,由多个小颗粒聚集而成,尺寸较大。

### 2.4 连铸坯电镜扫描与分析

对连铸坯样进行夹杂物扫描,扫描夹杂物直径为  $10 \mu\text{m}$  以上的夹杂物,得到具体的连铸坯中夹杂物分布云图如图 9 所示。从图 9(a) 和 (b) 中可以看出,进行钢包底部优化操作后,连铸坯中的大型及中型夹杂物较优化前有所减少,尤其是  $10 \sim 14 \mu\text{m}$  尺寸夹杂物数量显著降低。从图 9(c) 和 (d) 可以得出,在连铸坯整体分布中,优化处理后连铸坯的大颗粒夹杂物显著减少,大于  $10 \mu\text{m}$  的夹杂物主要 278 个减少到 226 个,夹杂物整体尺寸也呈下降趋势,大颗粒夹杂物由最大尺寸由  $53 \mu\text{m}$  降低到  $24 \mu\text{m}$ 。这是因为斜坡台阶结构改变了钢液从液面到底部

水口的最短路径,使钢渣不再能直接沿垂线方向卷入水口,而是被阻隔在斜坡上:钢渣在液面下降过程中,多数会滞留在台阶斜面上,难以形成连通水口的卷渣路径;即使在液面接近台阶顶面后,由于斜坡方向偏离水口直线,卷渣路径被有效打断;夹杂物卷入路径从“直接卷入”变为“绕流偏离”,降低了渣卷入率,从而降低后续连铸坯中的大颗粒夹杂物数量。

图 10 为优化前后钢包所浇铸连铸坯的夹杂物数密度和面积分数分布情况。从图 10 中可以看出,连铸坯中部的夹杂物数密度与面积分数显著高于两侧,而上下部相近。对比发现,钢包底部优化后,连铸坯中夹杂物的面积分数和数密度均低于未优化条件,面积分数降低幅度为  $(5 \sim 19) \times 10^{-6}$ ,在靠近厚度中心处,面积分数由优化前的约  $24 \times 10^{-6}$  降至优化后的约  $15 \times 10^{-6}$ ;最大数密度由优化前的约  $0.38 \text{ 个}/\text{mm}^2$  降至约  $0.38 \text{ 个}/\text{mm}^2$ ,下降幅度接近 42%,显著抑制了夹杂富集现象。这一变化与优化后漩涡临界高度的降低密切相关,从而有效减少了漩涡引起的卷渣现象。

图 11 对比了优化前后钢包浇铸连铸坯的夹杂物平均尺寸与最大尺寸分布。从图 11 中得出,优化前,连铸坯夹杂物平均尺寸在整个厚度范围内大多集中在  $12.5 \sim 14 \mu\text{m}$  之间,部分区域超过  $14 \mu\text{m}$ ;而优化后,大多数点的平均尺寸降低至  $11 \sim 13.5 \mu\text{m}$  之间,且分布更加平稳。在连铸坯坯边部,优化后的夹杂物平均尺寸明显小于优化前,最大差值约为  $2 \mu\text{m}$ 。最大尺寸变化趋势更加明显,优化前在部分截面处出现大于  $30 \mu\text{m}$  的夹杂物,而优化后基本控制在  $25 \mu\text{m}$  以内,优化后最大尺寸减小幅度明显,整体波动性降低,显示出夹杂物控制更为有效和均匀。引入斜坡台阶结构后,钢液在流入水口前需要先跨越或绕流经过台阶区域,该区域起到动能耗散

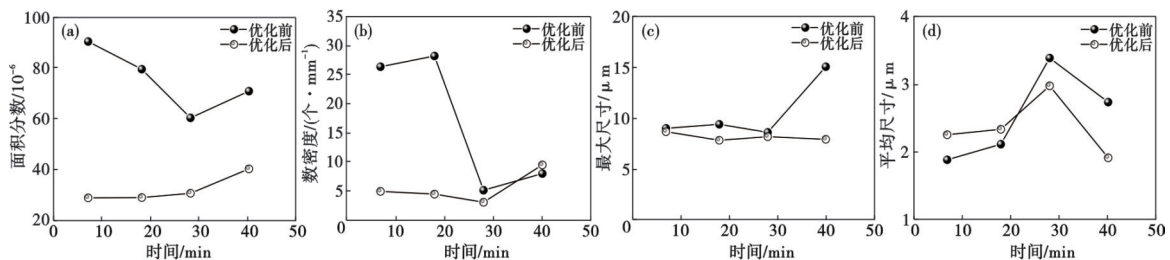


图 7 中间包夹杂物面积分数、数密度、最大尺寸、平均尺寸演变:(a)中间包夹杂物面积分数,(b)中间包夹杂物数密度,(c)中间包夹杂物最大尺寸,(d)中间包夹杂物平均尺寸

Fig. 7 Tundish inclusions area fraction, number density, maximum size, average size change : (a) area fraction of inclusions in tundish, (b) number density of inclusions in tundish, (c) maximum inclusion size in tundish, (d) average inclusion size in tundish

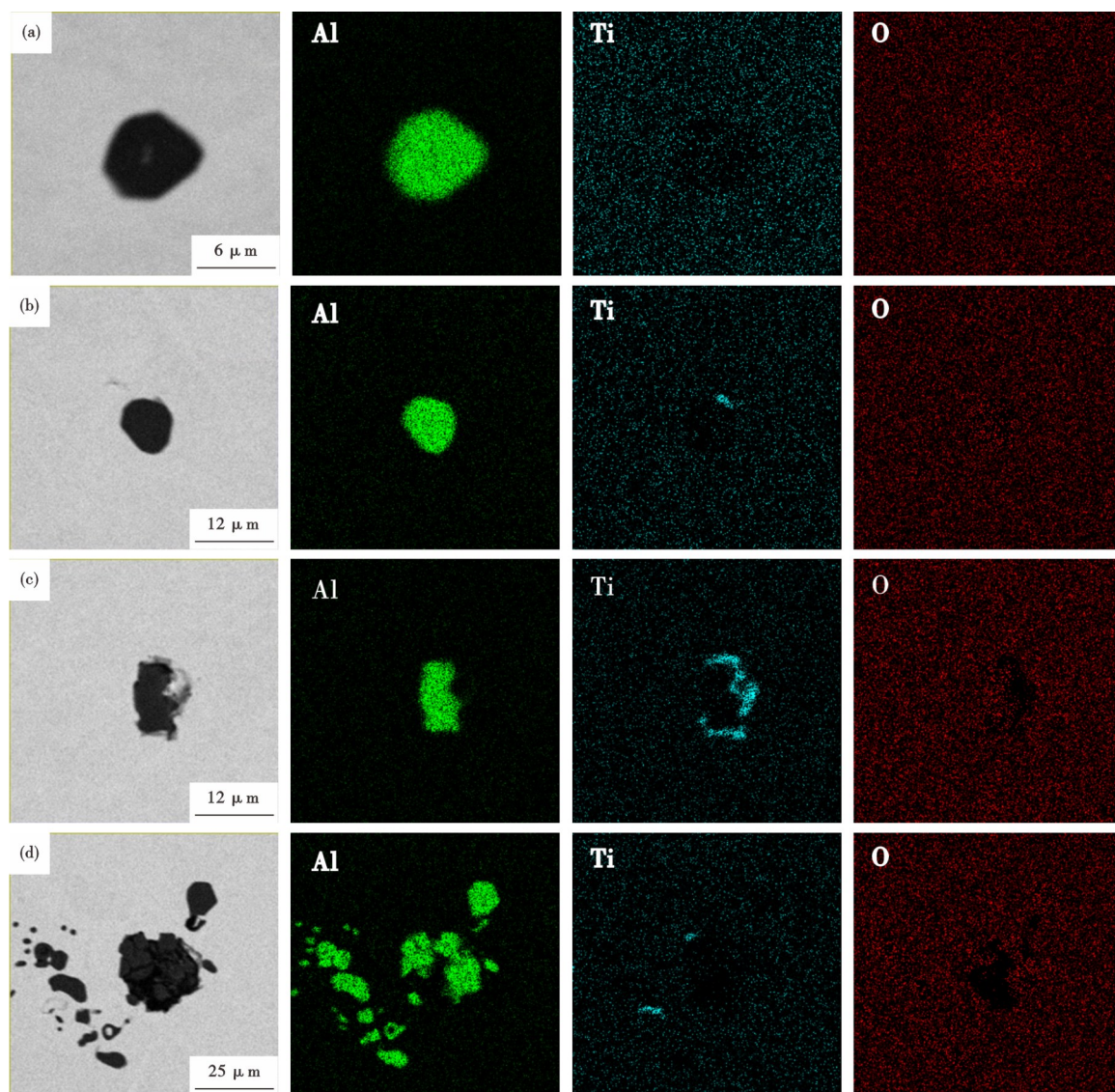


图8 IF钢中典型夹杂物形貌和面扫描:(a)IF钢典型夹杂物,(b)单个 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物,(c)Al-Ti-O复合夹杂物,(d)团簇状 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物

Fig. 8 Typical morphology and elemental mapping of inclusion in IF steel: (a) typical inclusions in IF steel, (b) single  $\text{Al}_2\text{O}_3$  inclusion, (c) Al-Ti-O complex inclusion, (d) clustered  $\text{Al}_2\text{O}_3$  inclusion

的“缓冲区”作用。台阶结构导致局部断面变化,形成低速涡区或回流区,降低主流区的速度梯度;局部 Reynolds 数下降,抑制流动由层流向紊流的转变,钢液在台阶前的流态更加稳定,有效降低了液面扰动和卷渣。

### 3 结论

1)本研究提出一种新型钢包包底结构,通过设立斜坡台阶抑制浇铸末期漩涡卷渣现象。建立了台阶体积、水口至台阶距离、通钢量与漩涡临界高度之间的经验公式,量化了结构参数对卷渣风险的影响规律。结果表明,增加台阶体积可显著降低漩

涡临界高度,并减少剩余钢水量,提高钢水收得率。在此基础上,设计的斜坡台阶包底结构具有良好的流场缓冲与下渣引导作用,为钢水洁净度的提升创造稳定流态条件。

2)钢包底部结构优化显著提升了中间包过程中的钢水洁净度。氧氮分析结果显示, $w[\text{T.O}]$ 和 $w[\text{T.N}]$ 在浇注初期分别由 $40 \times 10^{-6}$ 和 $87 \times 10^{-6}$ 降至 $27 \times 10^{-6}$ 和 $61 \times 10^{-6}$ 。同时,大于 $2 \mu\text{m}$ 夹杂物数密度从 $28 \text{ 个}/\text{mm}^2$ 降至 $5 \text{ 个}/\text{mm}^2$ ,面积分数同步下降。这一改善归因于新型台阶结构在钢液流动过程中起到减缓流速、稳定液面和延迟夹杂物卷入的作用,显著降低了二次氧化的风险。

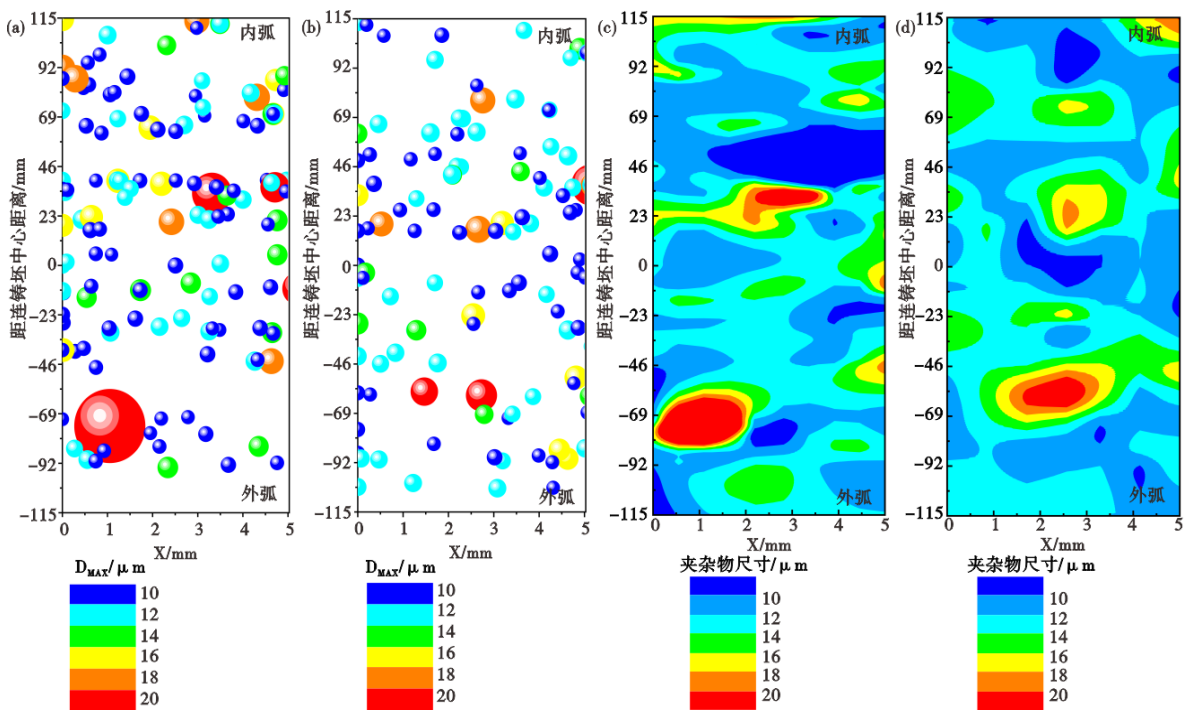


图9 连铸坯中夹杂物尺寸分布:(a)优化前铸坯夹杂物尺寸分布,(b)优化后连铸坯夹杂物尺寸分布,(c)优化前连铸坯夹杂物尺寸分布云图,(d)优化后连铸坯夹杂物尺寸分布云图

Fig. 9 Size distribution of inclusions in continuous casting slabs: (a) inclusion size distribution in cast slab before optimization, (b) inclusion size distribution in continuous casting slab after optimization, (c) inclusion size distribution map of continuous casting slab before optimization, (d) inclusion size distribution map of continuous casting slab after optimization

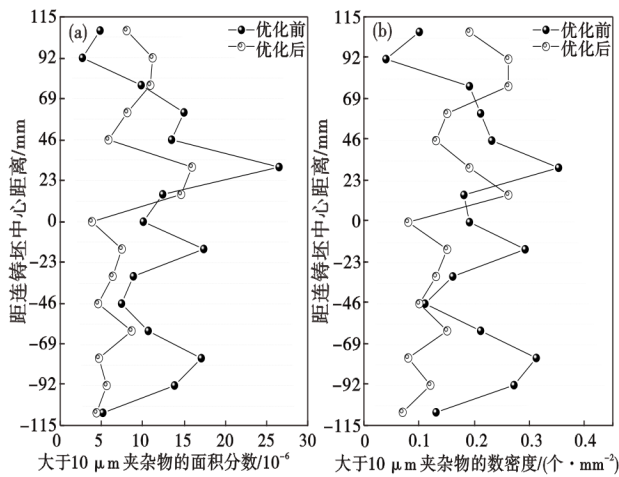


图10 连铸坯中夹杂物面积分数与数密度分布:(a)连铸坯夹杂物面积分数,(b)连铸坯夹杂物数密度

Fig. 10 Area fraction and number density distribution of inclusions in slabs: (a) area fraction of inclusions in continuous casting slab, (b) number density of inclusions in continuous casting slab

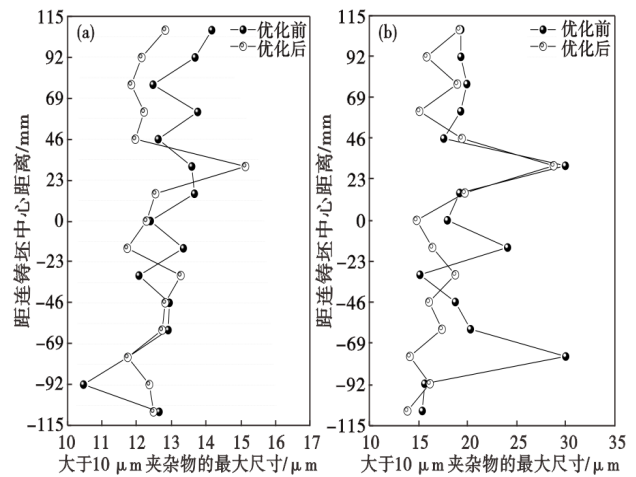


图11 连铸坯中夹杂物平均尺寸与最大尺寸分布:(a)连铸坯夹杂物平均尺寸,(b)连铸坯夹杂物最大尺寸

Fig. 11 Average size and maximum size distribution of inclusions in slabs: (a) average size of inclusions in continuous casting slab, (b) maximum size of inclusions in continuous casting slab

3)连铸坯夹杂物分析结果进一步验证了包底优化结构的有效性。优化后连铸坯中10~14 μm夹杂物数量显著减少,典型大颗粒夹杂最大尺寸由53 μm下降至24 μm,数密度与面积分数在整个厚

度方向均有所下降,且分布更加均匀。主要夹杂物类型仍为Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Al-Ti-O复合夹杂,表明结构优化主要抑制的是末期卷渣与夹杂富集行为,从而提升了连铸坯的洁净度。

## 参考文献

- [1] 高江, 王乐瑶, 杨文, 等. 铝脱氧钙处理结构钢凝固冷却过程夹杂物的转变[J]. 连铸, 2024, 49(1): 26-31.
- [2] Yuan B H, Liu J H, Zeng J H, et al. Evolution of inclusions and cleanliness in Ti-bearing IF steel produced via the BOF-LF-RH-CC process[J]. Metals, 2022, 12(3): 434.
- [3] 蒋香归, 任英, 杨文, 等. 钢轧制过程中非金属夹杂物变形研究进展[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(4): 297-308.
- [4] 黄日康, 姜仁波, 周秋月, 等. 超低碳钢中 Al-Ti-O 夹杂物的形貌演变和生成机理[J]. 工程科学学报, 2023, 45(5): 755-764.
- [5] 张立峰, 任英. 钢液炉外精炼的基础理论与工业实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2023.
- [6] Tian E H, Cui H, Li D X, et al. Source of inclusion in IF steel end slabs [J]. Advanced Materials Research, 2014, 887-888: 266-269.
- [7] Gorkusha D, Karasev A V, Komolova O, et al. Characterization of non-metallic inclusions and clusters during production of low-carbon IF steel[J]. ISIJ International, 2020, 60(12): 2819-2828.
- [8] 李实, 段豪剑, 张立峰. 含 Ti 铁素体不锈钢连铸坯表层 TiN 夹杂物的分布[J]. 钢铁, 2025, 60(1): 100-108.
- [9] 赵如, 龙乾, 王万林. 超低碳 IF 钢夹杂物生成热力学和界面特性[J]. 连铸, 2023, 48(6): 62-69.
- [10] 张月鑫, 张立峰, 王举金, 等. 连铸坯全断面非金属夹杂物成分分布的预报[J]. 钢铁, 2021, 56(10): 74-82.
- [11] 张立峰. 钢中非金属夹杂物: 工业实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2019.
- [12] 张军国, 张贺君, 王彬, 等. 卷渣类夹杂物的来源和示踪[J]. 河北冶金, 2025(5): 37-44+90.
- [13] 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): 38-41.
- [14] 刘泓. 铝脱氧钢中卷渣类大颗粒夹杂物研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- [15] Zhang L F, Thomas B G. State of the art in the control of inclusions during steel ingot casting [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2006, 37(5): 733-761.
- [16] 屈天鹏, 郭瑞琪, 郝月莹, 等. 连铸钢包浇注过程中旋涡的形成机理[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(8): 22-26.
- [17] 王强, 王连钰, 李宏侠, 等. 钢包出钢末期漩涡抑制机理探究及防漩设计[J]. 金属学报, 2018, 54(7): 959-968.
- [18] 赵贵祥. 电磁抑制钢包漩涡的实验及模拟研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2022.
- [19] 周秋月, 任英, 巴钧涛, 等. 钢液钙处理过程有效钙硫比对 303 t 超大钢锭中硫化物形貌的影响[J]. 工程科学学报, 2024, 46(4): 715-722.
- [20] 周孟杰, 乔通, 成国光, 等. NO8810 耐蚀合金冶炼过程中夹杂物形成机理[J]. 钢铁, 2024, 59(12): 58-67.
- [21] 杨文, 王乐瑶, 刘金刚, 等. 拉速对 MCCR 工艺生产低碳铝镇静钢轧板中夹杂物的影响[J]. 钢铁, 2024, 59(8): 50-57+93.
- [22] 王举金, 张立峰, 任英. 炼钢过程反应热力学与动力学及其在数值模拟仿真的应用研究进展[J]. 工程科学学报, 2024, 46(11): 1960-1977.
- [23] 刘洋, 王卫华, 李新, 等. 板坯连铸大辊径铸轧辊不同冷却方式模拟[J]. 钢铁, 2024, 59(7): 75-82.
- [24] 王建, 周少雄, 陈文智, 等. 钢包浇注过程中临界下渣高度的物理模拟研究[J]. 铸造技术, 2012, 33(10): 1194-1196.
- [25] Morales R D, Dávila-Maldonado O, Calderón I, et al. Physical and mathematical models of vortex flows during the last stages of steel draining operations from a ladle [J]. ISIJ International, 2013, 53(5): 782-791.
- [26] 唐海燕, 梁永昌. 钢包浇注末期回流旋涡形成机理及影响因素[J]. 金属学报, 2016, 52(5): 519-528.
- [27] 张瑞东, 艾新港, 李胜利, 等. 70 t 钢包浇注过程中漩涡形成高度与临界高度的水模研究[J]. 辽宁科技大学学报, 2019, 42(2): 91-94.
- [28] 冯巍, 屈天鹏, 王德永. 冶金过程旋涡流动行为模拟研究[J]. 连铸, 2019, 44(5): 1-5.
- [29] 胡群, 唐海燕, 李小松, 等. 钢包浇注过程中旋涡临界高度控制[J]. 钢铁, 2021, 56(6): 35-41.
- [30] Yin Y B, Yang J H, Zhang J M, et al. Physical modeling of slag carryover in the last stage of ladle teeming during continuous casting with dynamic change of slide gate opening [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 1781-1791.
- [31] Wang M, Bao Y P, Xing L D. Characteristic transformation of manganese-containing inclusions during Al-killed process in ultra-low carbon interstitial-free steel [J]. ISIJ International, 2018, 58(5): 886-891.
- [32] Zhou H C, Li H B, Deng X X, et al. Optimization of vortex slag entrainment during ladle teeming process in the continuous casting of automobile outer panel [J]. Steel Research International, 2024, 95(10): 2400322.