

钢包出钢阶段吹氩搅拌去除夹杂物的模拟研究

李 阳¹, 吴晨辉¹, 邓安元², 曾建华¹, 张 敏¹, 杨晓东³

(1. 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000; 2. 东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110004; 3. 攀钢集团西昌钢铁有限公司, 四川 西昌 615000)

摘 要: 针对钢包出钢过程建立了钢液-渣相-气相-氩气泡-夹杂物的五相数学模型, 探索了钢包出钢过程中吹氩搅拌去除夹杂物的可行性, 以及吹氩流量对流场、渣眼、夹杂物去除效率的影响规律。结果表明: 吹氩搅拌可强化浇钢过程中钢液的流动行为, 显著提升夹杂物的去除率。相较于未采用吹氩搅拌, 当吹氩流量为 100 L/min、出钢 750 s 时, 夹杂物的去除率由 80.74% 提升至 96.69%, 流入中间包夹杂物的数量减少 67.4%; 随吹氩流量增加, 渣眼尺寸增大, 夹杂物去除速率增加, 但去除效率变化不大, 推荐吹氩流量为 100 L/min。

关键词: 钢包; 吹氩搅拌; 数值仿真; 多相流; 夹杂物; 去除率

中图分类号: TF769.2

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2023)01-0142-09

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2023.01.023

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Simulation research of inclusive removal by argon blowing stirring during ladle tapping process

Li Yang¹, Wu Chenhui¹, Deng Anyuan², Zeng Jianhua¹, Zhang Min¹, Yang Xiaodong³

(1. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Panzhihua 617000, Sichuan, China; 2. Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004, Liaoning, China; 3. Steelmaking Plant, Pangang Group Xichang Steel and Vanadium Co. Ltd., Xichang 615000, Sichuan, China)

Abstract: Based on the process of ladle tapping, a five-phase numerical model including molten steel, molten slag, gas phase, argon bubble and inclusion had been established and used to investigate the feasibility of improving inclusions removal by argon blowing stirring during the tapping process, and the effect of argon blowing rate on flow field, slag-eye, and the removal efficiency of inclusions. The results show that the argon blowing stirring process can strengthen the flow of molten steel and promote the removal of inclusions. Compared with no argon blowing stirring, the removal efficiency of inclusions increases from 80.74% to 96.69% whilst the argon blowing rate is 100 L/min at 750 s, and the number of inclusions flowed into tundish is reduced by 67.4%. The size of slag-eye and the removal rate of inclusions increase with the increase of argon blowing rate, but argon blowing rate has a little effect on the removal efficiency of inclusions. The recommended argon blowing rate is 100 L/min.

Key words: ladle, argon blowing stirring, numerical simulation, multi-phase flow, inclusions, inclusions removal rate

收稿日期: 2022-03-30

作者简介: 李阳, 1990 年出生, 男, 河南新乡人, 博士, 工程师, 主要研究方向: 连铸工艺控制、钛及钛合金熔炼, E-mail: leeyang0325@163.com。

0 引言

随着经济和科技的发展,用户对钢产品的综合性能,如深冲性、拉拔性、低温韧性、抗疲劳性等提出了越来越严格的要求。然而,钢中非金属夹杂物极易恶化上述钢材性能。尽可能去除钢液中的非金属夹杂物,提高钢液纯净度已成为各冶金企业不断追求的目标。钢液中非金属夹杂物的去除属于动力学过程,其去除机制主要是斯托克斯上浮去除机制^[1]。夹杂物上浮的可能性及上浮速度受夹杂物形态、密度、尺寸、润湿性、钢液黏度等多种因素的影响。工艺生产实践结果表明,加强钢液内部搅拌有助于去除非金属夹杂物。部分学者研究^[2-3]表明,与未经搅拌相比,施加搅拌后,钢液中非金属夹杂物的上浮去除时间可大幅降低。钢包中夹杂物的去除方式主要有三种,即被渣层捕获、粘附于钢包壁面以及被气泡粘附上浮去除,Cao^[4]对比研究了以上方式的去除效率,其结果表明渣层捕获为夹杂物去除的主要方式。然而,钢包内夹杂物尺寸分布较广,尺寸较大的夹杂物浮力较大,可依靠自身浮力快速上浮至渣层去除,而尺寸较小的夹杂物,浮力较小,难以快速、高效地上浮去除。而吹氩法可以利用氩气泡上浮带动钢液形成循环流动,促进夹杂物的上浮去除,加之该法设备简单、投资少,因而在工业上得到广泛应用。

现阶段,吹氩法主要应用于钢包精炼和中间包气幕挡墙,但由于连铸生产节奏紧凑,无法保证钢液具有充分的吹氩搅拌时间。然而,连铸过程中,钢包从开浇至浇铸结束通常需约 30 min 时间,若在此期间连续向钢包内通入氩气进行搅拌,可在不增加全流程物流时间的前提下进一步提升钢水纯净度。尽管很多学者针对钢包吹氩搅拌^[5-11]以及中间包气幕挡墙^[12-17]工艺中的流场和夹杂物行为进行了详尽的模拟和试验研究,但尚未有针对钢包出钢过程吹氩搅拌的相关报道。

鉴于此,为探索钢包出钢过程中吹氩搅拌去除夹杂物的可行性以及评估夹杂物的去除效率,笔者以西昌钢钒的双流板坯 120 t 钢包为研究对象,采用 Fluent 商业软件建立钢液-渣相-气相-氩气泡-夹杂物的五相非稳态数学模型,探索出钢过程中钢包吹氩搅拌去除夹杂物的可行性以及吹氩流量对夹杂物去除率、流场以及渣眼行为的影响规律,为工业应用提供理论指导。

1 数学模型

笔者采用 VOF (Volume of fraction) 方法追踪钢液-渣层-气相间界面,通过欧拉-拉格朗日方法追踪钢液中氩气泡和夹杂物,为了简化计算,对数学模型做如下假设:

- 1) 钢液、渣相、气相均为粘性不可压缩的牛顿流体;
- 2) 仅考虑液态渣层的影响,忽略粉状层和烧结层;
- 3) 整个过程视为等温过程,仅考虑钢液静压对氩气泡体积的影响;
- 4) 忽略氩气泡及夹杂物之间的碰撞聚合;
- 5) 只考虑渣层捕获去除夹杂物,假设氩气泡运动至气相便溶于空气,夹杂物运动至渣层即被捕获吸收,溶于气相的氩气泡和被捕获的夹杂物不再追踪。

具体的控制方程可以表述为:

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_1 u_1) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial (\rho_1 u_1)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_1 u_1 u_1) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_e (\nabla u_1 + \nabla u_1^T)] + \rho_1 g + f_\sigma + F_b \quad (2)$$

$$\mu_e = \mu_1 + \mu_t = \mu_1 + \rho_1 C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

$$\rho_1 = \rho_a \alpha_a + \rho_m \alpha_m + \rho_s \alpha_s \quad (4)$$

$$\mu_1 = \mu_a \alpha_a + \mu_m \alpha_m + \mu_s \alpha_s \quad (5)$$

湍流模型: 采用 Launder 和 Spalding^[18]提出的标准 $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型模拟钢包液相湍流行为,其控制方程可表示为:

$$\frac{\partial (\rho_1 k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_1 k u_1) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_1 + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho_1 \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial (\rho_1 \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_1 \varepsilon u_1) = \nabla \cdot \left[\left(\mu_1 + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho_1 \varepsilon) \quad (7)$$

式中, ρ_1 为液相混合密度, kg/m^3 ; 下标 a、m、s 分别表示气相、钢液和渣相; u_1 为液相速度, m/s ; t 为时间, s ; p 为压力, Pa ; μ_1 为液相混合分子黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_t 为湍流黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; g 为重力加速度, m/s^2 ; f_σ 为表面张力产生的动量源项, N/m^3 ; F_b 气泡与液相间的相互

作用力, N/m^3 ; C_1 、 C_2 、 C_μ 、 σ_k 、 σ_ϵ 为经验常数, 其值分别为 1.44、1.92、0.09、1.0、1.3; G_k 为平均速度梯度产生的湍动能^[19]。

采用 VOF (Volume of Fluid) 模型追踪钢液-渣相-气相三相界面的变形和波动行为, 采用 Continuum Surface Force (CSF) 模型^[20] 考虑界面张力对动量的影响。在 VOF 模型中, 通过求解标量相体积分数输运方程追踪相间界面。对于第 q 相, 其体积分数方程可表示为:

$$\frac{\partial(\rho_1 \alpha_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_1 \alpha_q \mathbf{u}_1) = 0 \quad (8)$$

在控制体单元中, 各相体积分数满足:

$$\alpha_a + \alpha_m + \alpha_s = 1 \quad (9)$$

采用 Euler 框架下的 Lagrange 方法追踪钢液中氩气泡和夹杂物的运动行为, 其控制方程根据牛顿第二定律可表示为:

$$m_b \frac{du_b}{dt} = F_{bg} + F_d + F_{vm} + F_p + F_l \quad (10)$$

$$\frac{dx_b}{dt} = u_b \quad (11)$$

式中, m_b 为氩气泡质量, kg ; u_b 为氩气泡的速度, m/s ; 公式 (10) 右边的 F_{bg} 、 F_d 、 F_{vm} 、 F_p 、 F_l 依次为净重力、曳力、虚拟质量力、压力梯度力以及升力, 各项具体表达式可参考文献 [21]。计算过程中, 将夹杂物视为球形颗粒, 采用 Moris 和 Alexander^[22] 曳力模型描述夹杂物与液相间的曳力行为, 采用考虑气泡形状的 Kuo 和 Wallis^[23] 曳力模型描述气泡与液相间的行为。

在浇铸过程中, 钢包底部的静压约为大气压的

3 倍, 氩气泡在上浮过程中, 静压减小, 气泡不断膨胀。为了准确描述氩气泡的上浮运动行为, 依据理想气体状态方程考虑钢液静压对气泡体积的影响, 具体可表示为:

$$d_{b1} = \left(d_{b0} \frac{p_{b0}}{p_{b1}} \right)^{1/3} \quad (12)$$

$$\rho_{b1} = \rho_{b0} \frac{p_{b1}}{p_{b0}} \quad (13)$$

$$p_{\text{bottom}} = p_0 + (\rho_m H + \rho_s h) g \quad (14)$$

$$\rho_{b, \text{bottom}} = \rho_s \frac{P_{\text{bottom}}}{P_s} \frac{T_s}{T_{\text{bottom}}} \quad (15)$$

式中, 下标 b_0 为气泡上一时间步所处位置, b_1 为气泡当前时间步所处位置, s 为标准状态; H 和 h 分别为钢液和渣层初始深度, m 。

Xie 和 Orsten^[24] 试验测量了钢包吹氩搅拌过程中, 钢包内气泡的粒径分布服从对数正态分布, 具体可表示为:

$$P = P_m \exp \left(\frac{-[\ln(d_b) - \ln(d_b^m)]^2}{2[\ln(s)]^2} \right) \quad (16)$$

$$d_b^m = 0.04 \left(\frac{Q_b^2}{g} \right)^{0.2} + 0.0007 \quad (17)$$

式中, P_m 为最大相对概率; d_b^m 为最大分布概率的氩气泡直径; s 为标准偏差, 取值 0.026 m ; Q_b 为吹氩流量, m^3/s 。最大氩气泡粒径^[25]可表示为:

$$d_b^N = 0.69 \left(\frac{Q_b^2}{g} \right)^{0.2} \quad (18)$$

图 1 为 100 ~ 400 L/min 氩气流量条件下, 不同气泡粒径所对应的概率密度分布及夹杂物粒径。

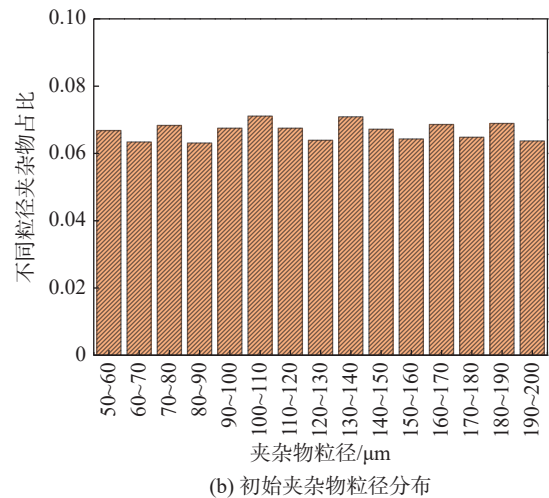
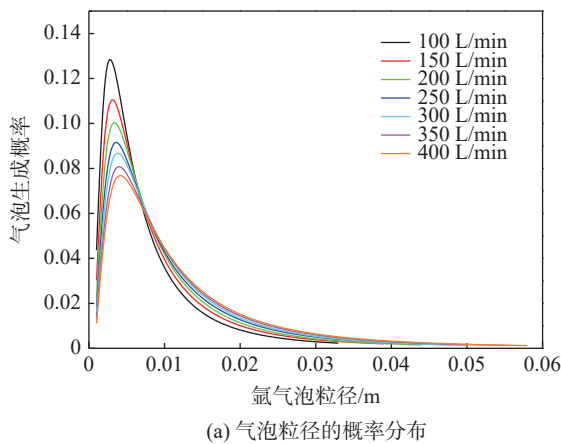


图 1 气泡粒径的概率分布和初始夹杂物粒径分布

Fig. 1 Probability distribution of bubble diameter and inclusion diameter distribution

根据图 1, 结合式 (18) 计算结果可知, 随着吹氩流量增加, 气泡的最大粒径也随之增加, 吹氩流量为 100 L/min 时, 最大气泡粒径为 0.033 m, 当吹氩流量增加至 400 L/min 时, 则最大气泡粒径为 0.058 m。为了模拟钢包内多尺度夹杂物的行为, 计算初始时, 假设钢包内包含总数为 10 000 个粒径介于 50 ~ 200 μm 的夹杂物, 夹杂物在钢液中随机分布, 不同粒径夹杂物的数量占比如图 1(b) 所示。

2 几何模型及计算条件

钢包底部具有两个吹氩孔, 均位于底面 $0.627R$ 位置, 夹角 120° , 吹氩孔直径为 0.098 m。长水口位置位于底面 $0.786R$, 直径为 0.085 m。钢包顶面和底面直径分别为 1.817 m 和 1.595 m。钢包高 3.4 m, 钢包总网格数量为 480 838。氩气孔及长水口位置及网格示意如图 2 所示。

计算过程中, 钢包底面和侧面视为无滑移壁面边界条件; 顶面视为压力出口边界条件, 相对静压为 0 Pa; 钢液出口视为速度出口, 速度根据拉坯流量

换算求得。初始条件时, 钢液深度为 3 m, 液态渣层厚度为 0.15 m, 计算采用非稳态方式计算, 时间步长为 0.05 s, 为确保每一时间步达到充分收敛, 最大迭代次数设置为 50。计算过程中统计长水口流出夹杂物的尺寸、时间和数量。钢液静压对气泡体积的影响、气泡粒径分布规律、升力模型以及氩气泡所受 Kuo 和 Wallis 曳力模型, 均通过 UDF 编程实现。采用 SIMPLEC 算法求解, 当计算残差均达到 10^{-4} 时判定为收敛。材料物性参数及计算方案如表 1 所示。

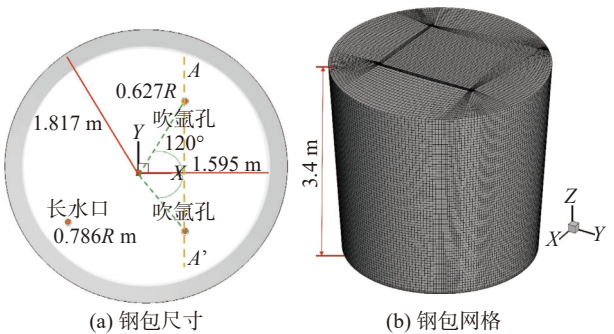


图 2 钢包结构及网格示意
Fig. 2 Geometry and mesh of ladle

表 1 物性参数及计算参数
Table 1 Physical property and calculation conditions

密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)					黏度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)			表面张力/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)			拉速/($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	吹氩流量/($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	结晶器尺寸/m
空气	氩气	钢液	渣相	夹杂物	空气	钢液	渣相	钢/渣	钢/气	渣/气			
1.225	1.622 8	7 020	3 500	3 500	1.79×10^{-5}	0.005 5	0.1	1.15	1.82	0.58	1.0	0, 100, 200, 350, 500	0.23×1.6

3 结果与分析

3.1 模型验证

为了验证本模型的可靠性, 以 Sheng^[26] 的钢包水模型试验装置建立相应的数学模型, 在 Sheng 的试验中, 其详细测量了不同吹气流量下钢包内的含气率分布、液体速度和湍动能, 具体试验条件及参数详见文献。笔者选取吹气流量为 50 mL/s 下, 钢包中心流股的轴向速度和距离底面 0.21 m 的径向速度为对象, 其试验结果和计算结果如图 3 所示, 本模型与文献中测量值吻合较好。此外, Krishnapisharody 和 Irons^[27] 通过分析大量的试验数据提出了估算渣眼尺寸的数学模型, 即无量纲渣眼尺寸 (A_e^*/A_p^*) 与 $(1-\rho^*)^{-1/2}Q^{*1/3}(H/h)^{1/2}$ 成线性关系。本数学模型计算的无量纲渣眼尺寸与 Krishnapisharody 试验得到的结果如图 4 所示, 计算结果与试验拟合结果吻合较好。

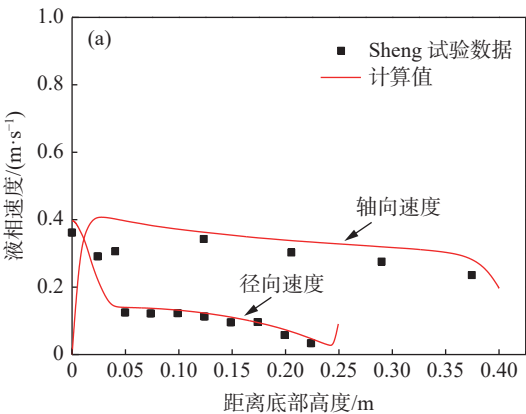


图 3 数学模型预测值与 Sheng^[26] 试验测得值的对比
Fig. 3 Comparison between the predicted value and the measured value in Sheng's work experiment

3.2 钢包内的流场行为

图 5 为开浇 300 s, 吹氩流量分别为 0 L/min 和 350 L/min 时钢包内的流线示意。由图 5 可知, 当吹氩流量为 0 L/min 时, 钢包内钢液的流动非常弱, 近

乎处于静止状态,存在较多的短路流,仅在长水口处存在较为明显的流动。这种条件下,夹杂物只能依靠自身浮力上浮去除。当吹氩流量为 350 L/min 时,由氩气泡上浮带动钢液形成两个明显的流股,钢液循环流动充分,有利于携带夹杂物至渣层去除。

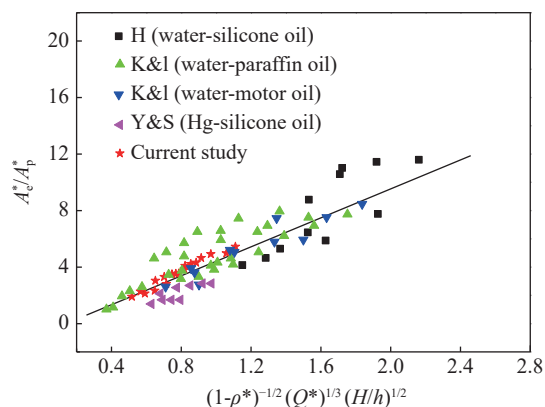


图4 模型预测的无量纲渣眼尺寸与文献^[27]试验数据对比
Fig. 4 Comparison between the predicted non-dimensional slag-eye and the experimental data reported in literature^[27]

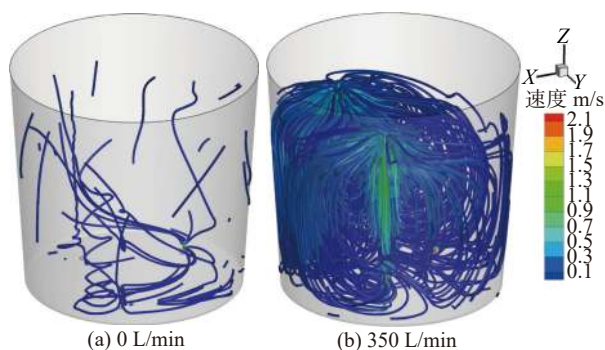


图5 开浇 300 s 时钢包内的流线分布
Fig. 5 Streamline distribution at 300 s after start casting

图6为开浇 300 s 时不同吹氩流量条件下,沿图2(a)所示 A-A' 方向($z = 1.5$ m)的钢液速度分布。

由图6可知,当吹氩流量为 0 L/min 时,钢液的最大速度为 0.012 m/s,钢液流动微弱,近乎处于静止状态。当采用水口吹氩工艺时,钢液速度显著增加,当吹氩流量为 100 L/min 时,钢液流股的最大速度为 0.959 m/s,当吹氩流量增加至 350 L/min 时,流股的速度增加至 1.471 m/s。

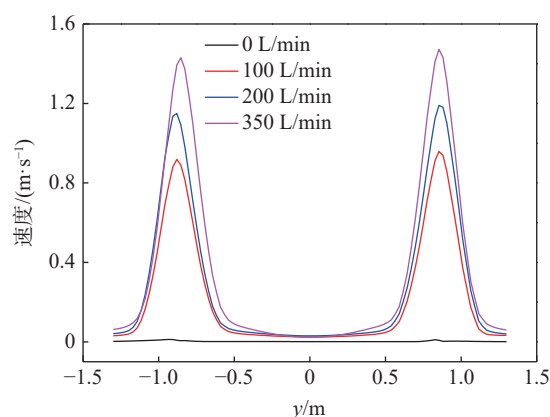


图6 开浇 300 s 时沿 A-A' 方向($z = 1.5$ m)钢液速度分布
Fig. 6 Velocity distribution along A-A' direction at 300 s after start casting

图7为开浇 300 s 时不同吹氩流量下,气泡分布及渣眼尺寸示意。由图7可知,当吹氩流量为 100 L/min 时,渣层表面形成两个尺寸相近的渣眼。由于氩气泡尺寸较小,形成的羽流对渣层的冲击较弱,形成的渣眼直径为 60.7 cm。随着吹氩流量增加,氩气泡尺寸逐渐增大,当吹氩流量为 350 L/min 时,在渣层附近存在粒径约为 70 mm 的大气泡,气泡上浮形成的钢液流股对渣层的冲击较强,形成的渣眼直径为 84.4 cm。为避免渣眼尺寸过大而引起钢液的卷渣和二次氧化,应避免采用过大的吹氩流量。

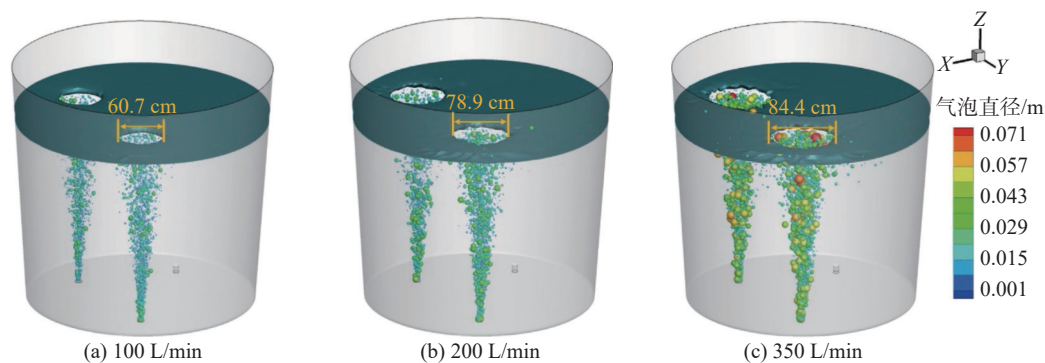


图7 吹氩流量对气泡及渣眼行为的影响
Fig. 7 Effect of argon blowing rate on bubble distribution and slag behavior

3.3 吹氩搅拌对夹杂去除效果的影响

图 8 为吹氩流量分别为 0、100 L/min 和

350 L/min 下, 开浇 0、150、300 s 和 600 s 时的夹杂物分布。

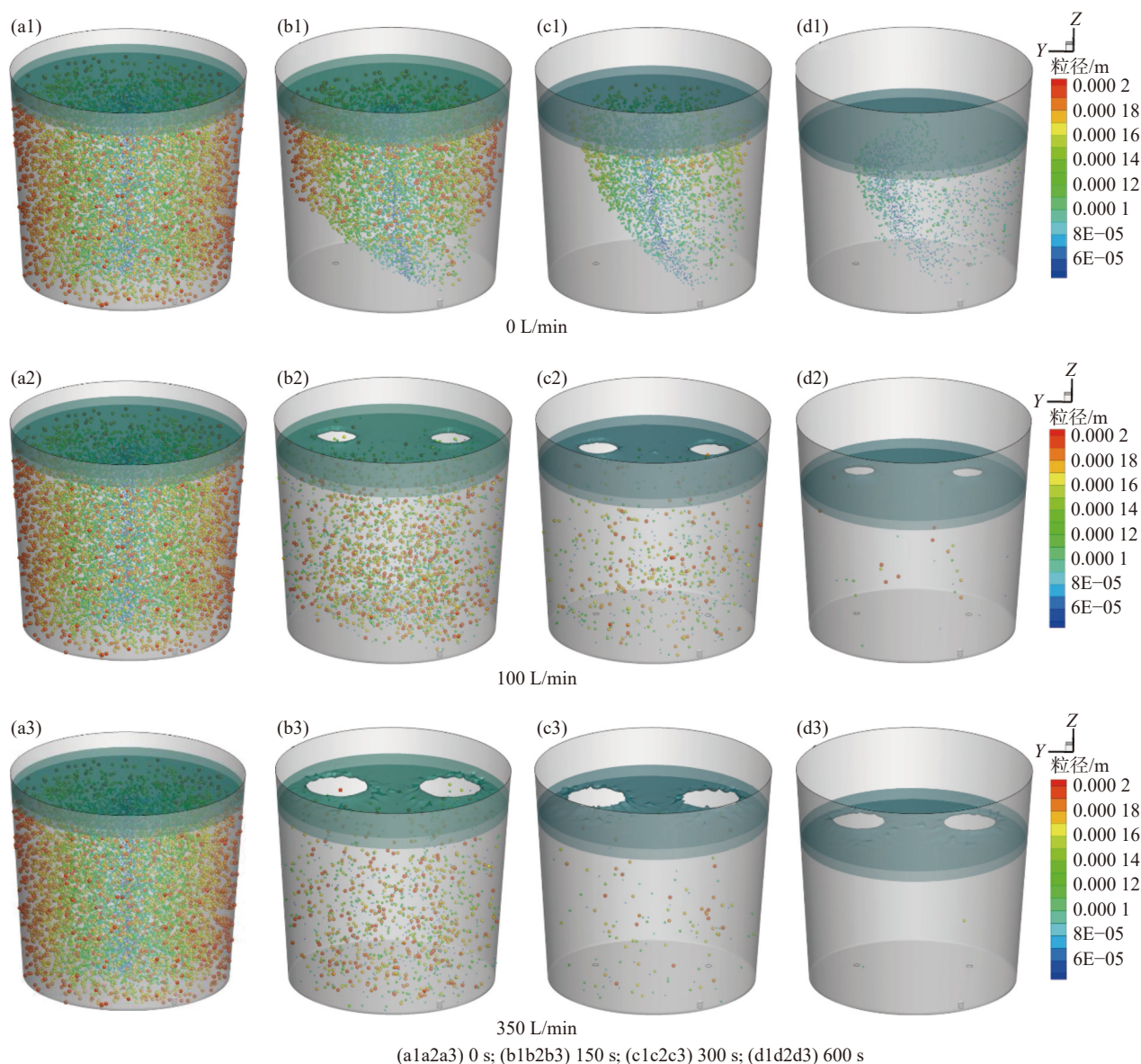


图 8 吹氩流量对钢包内夹杂物分布的影响

Fig. 8 Effect of argon blowing rate on inclusion distribution with various time after start casting

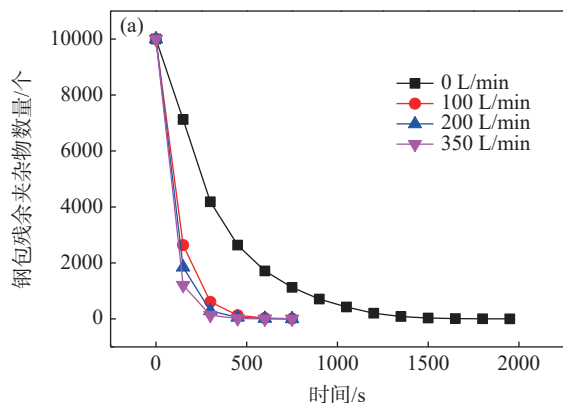
由图 8 可知, 在开浇初期, 粒径介于 $50 \sim 200 \mu\text{m}$ 的夹杂物随机分布于钢包内。当吹氩流量为 0 L/min, 开浇 150 s 时, 大粒径的夹杂物上浮较为明显, 钢包底部的大尺寸夹杂物明显减少。当开浇 300 s 时, 钢包内大粒径夹杂物几乎全部上浮去除。当开浇 600 s 时, 钢液内仍存在大量尺寸介于 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 的夹杂物。此外, 在浇铸过程中, 长水口附近的夹杂物分布较多, 这是因为在未进行吹氩搅拌时, 钢液整体趋于静止, 仅在长水口附近存在涡

流, 在涡流的卷吸下, 小粒径夹杂物难以依靠自身浮力上浮去除。当采用水口吹氩工艺时, 氩气泡上浮带动钢液形成两个明显的上升流股, 并在钢包内形成循环流动, 如图 5(b) 所示, 该流股可携带夹杂物上浮至渣层^[4], 促进夹杂物的去除, 同时扰乱长水口附近的涡流, 减少长水口附近夹杂物被卷吸的概率。当吹氩流量为 100 L/min, 开浇 150 s 时, 由于钢包内存在明显的上升流股和循环流动, 夹杂物随钢液流动遍布于钢包各个部位, 且数量明显小于未进行

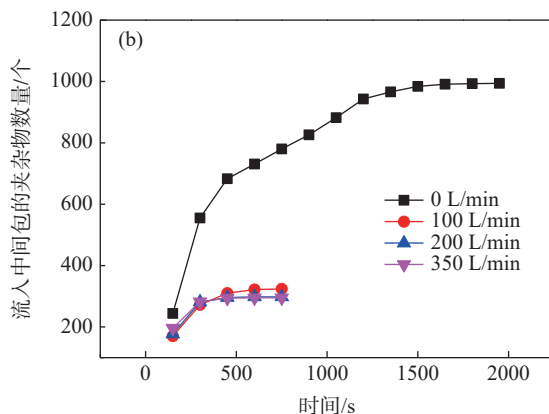
吹氩的情况。当开浇至 600 s 时,钢液内夹杂物的数量显著减少,但仍存在少许粒径为 190 μm 的大尺寸夹杂物,这是由于受钢液循环流动的影响,大尺寸夹杂物在曳力的作用下跟随钢液流股运动,无法依靠自浮力直接上浮去除。当吹氩流量增加至 350 L/min,夹杂物的去除率明显提高,当开浇至 600 s 时,钢包内的夹杂物几乎被完全去除。

图 9(a)为钢包内夹杂物的数量随时间的变化规律。由图 9 可知,当吹氩流量为 0 L/min 时,钢包内夹杂物的去除速率较慢,需要 1950 s 才可将钢包内的夹杂物去除完毕,此时钢包内残余夹杂物数量为 2 个。当采用吹氩搅拌时,钢包内夹杂物的去除速率显著提高,且在吹氩前 300 s 内,去除速率随着吹氩流量的增加而增大。当开浇至 750 s,且吹氩流

量分别为 100、200 L/min 和 350 L/min 时,钢包内残余夹杂物的数量分别为 7 个、2 个和 1 个,相较于未采用吹氩搅拌时的 1 126 个,去除率分别提高了 99.38%、99.82% 和 99.91%。图 9(b)为流入中间包内夹杂物的数量随时间的变化规律。由图可知,未进行吹氩时,流入中间包夹杂物的数量随着浇铸时间的延长而逐渐增加,最终流入中间包的夹杂物个数为 994 个。采用吹氩搅拌时,流入中间包夹杂物的个数显著减少,当吹氩流量分别为 100、200 L/min 和 350 L/min 时,最终流入中间包夹杂物的个数分别为 324 个、298 个和 295 个,相较于未进行吹氩搅拌时,流入中间包夹杂物的数量可分别减少 67.4%、70.0% 和 70.3%。



(a) 钢包内残余夹杂物数量的变化规律



(b) 流入中包内夹杂物数量的变化规律

图 9 夹杂物数量随时间的变化规律

Fig. 9 Tendency of inclusion number varying with time

为了便于分析夹杂物的去除效果,定义夹杂物的去除率为被液态渣层捕获去除的夹杂物数量与总夹杂物数量的比值。图 10 为吹氩流量对夹杂物去除率的影响。由图 10 可知,在未进行吹氩搅拌时,夹杂物的去除率较低,当开浇 750 s 时,夹杂物去除率为 80.94%,开浇 1950 s 时,去除率增加至 90.04%。当进行水口吹氩时,夹杂物的去除率明显提高,所需时间也显著减少。开浇 150 s 时,吹氩流量分别为 100、200 L/min 和 350 L/min 的夹杂物去除效率分别为 71.94%、79.79% 和 85.99%,远高于未采用吹氩搅拌时的 26.33%。当开浇 750 s 时,夹杂物的去除率分别为 96.69%、97% 和 97.05%。由以上分析可知,采用吹氩搅拌时,可显著提升夹杂物的去除率,缩短夹杂物去除所用时间,减少流入中间包的夹杂物数量,但夹杂物去除效率对吹氩流量不敏感。由

于吹氩流量增加会引起渣眼尺寸增大,以及钢渣界面波动加剧,进而易导致钢液的二次氧化和卷渣。因此,推荐的吹氩流量为 100 L/min。

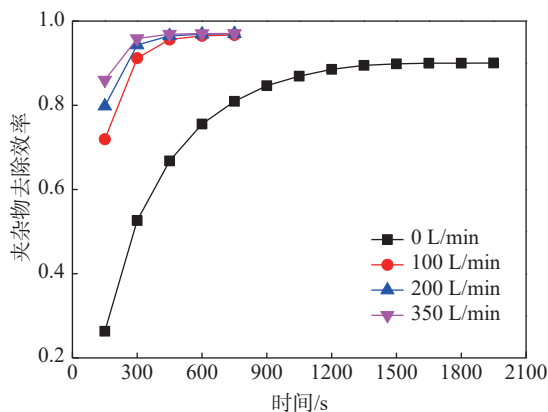


图 10 吹氩流量对夹杂物去除率的影响

Fig. 10 Effect of argon blowing rate on inclusions removal rate

图 11 为流入中间包夹杂物尺寸的分布。由图 11 可知, 当未采用吹氩搅拌时, 流入中间包的主要为粒径介于 50 ~ 100 μm 的夹杂物, 占比为 82.19%, 而粒径介于 150 ~ 200 μm 的大粒径夹杂物较少, 占比为 6.74%, 且不同尺寸夹杂物的占比随夹杂物尺寸的增加而逐渐减少。

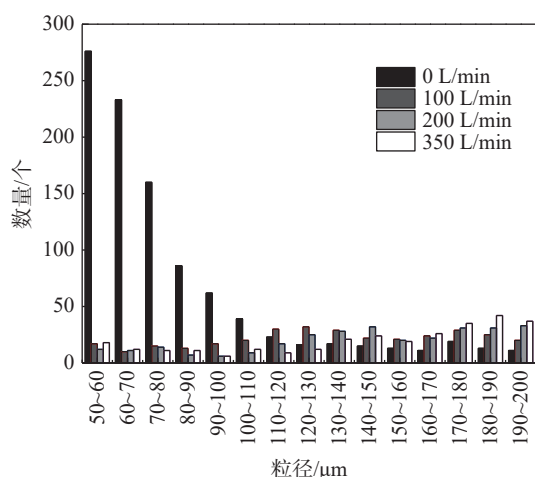


图 11 流入中间包夹杂物的尺寸统计分析

Fig. 11 Statistic of inclusions size flowing into tundish

采用吹氩搅拌工艺之后, 进入中间包内粒径介于 50 ~ 100 μm 的夹杂物显著减少, 而粒径介于 150 ~ 200 μm 夹杂物的数量有所增加。当吹氩流量分别为 100、200 L/min 和 350 L/min 时, 粒径介于 50 ~ 100 μm 夹杂物的数量较未施加吹氩搅拌分别

减少 73.9%、81.9% 和 79.0%, 而粒径介于 150 ~ 200 μm 的大粒径夹杂物数量相较于未施加吹氩搅拌时分别增加 77.6%、104.4% 和 137.3%。这是由于采用吹氩搅拌时, 长水口区域处的大粒径夹杂物受到钢液循环流动的影响, 难以直接上浮去除, 被涡流捕获的概率增大, 流入中间包内的数量增多。因此, 为避免大粒径夹杂物过多进入中间包内, 应避免采用较大的吹氩流量。

4 结论

1) 钢包浇钢过程中, 采取吹氩搅拌去除夹杂物是可行的。吹氩搅拌可强化浇钢过程中钢液的流动行为, 显著提升夹杂物的去除率, 当吹氩流量为 100 L/min、浇钢 750 s 时, 相较于未采用吹氩搅拌, 夹杂物的去除率由 80.74% 提升至 96.69%。

2) 吹氩流量增加, 夹杂物去除速率增加, 但去除效率变化不明显。渣眼尺寸随着吹氩流量的增加而增大, 当吹氩流量由 100 L/min 增加至 350 L/min 时, 渣眼直径由 60.7 cm 增加至 84.4 cm。

3) 采用吹氩搅拌工艺可显著减少流入中间包内的夹杂物数量, 吹氩量为 100 L/min 时, 粒径介于 50 ~ 100 μm 的夹杂物数量减少 73.9%, 但粒径介于 150 ~ 200 μm 的夹杂物数量增加 77.6%。

4) 综上, 推荐吹氩流量为 100 L/min。

参考文献

- [1] Zhang Dingrui. Numerical simulation on inclusion removal behaviors during ladle teeming with the new process of argon blowing around the tapping hole[D]. Shenyang: Northeastern University, 2016.
(张鼎瑞. 浇注钢包环出钢口吹氩新工艺去夹杂行为数学模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.)
- [2] Yang Hulin, He Ping, Zai Yucun. Hydraulic model experiment on removing inclusions from molten steel by bottom blowing in ladle[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2015, 27(2): 20–23.
(杨虎林, 何平, 翟玉春. 钢包底吹去除夹杂物的水力学模型[J]. 钢铁研究学报, 2015, 27(2): 20–23.)
- [3] Zheng Shuguo, Zhu Miaoyong. Physical modeling of inclusion behavior in ladle with eccentric bottom blowing argon[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2008, 20(6): 18–22.
(郑淑国, 朱苗勇. 偏心底吹氩钢包内夹杂物行为的物理模拟[J]. 钢铁研究学报, 2008, 20(6): 18–22.)
- [4] Cao Qing, Nastac Laurentiu. Numerical modelling of the transport and removal of inclusions in an industrial gas-stirred ladle[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2018, 45(10): 984–991.
- [5] Liu Yu, Ersson Mikael, Liu Heping, et al. A review of physical and numerical approaches for the study of gas stirring in ladle metallurgy[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2019, 50(1): 555–577.
- [6] Yang Yadi, Zhao Jing, Cui Jianzheng. Numerical simulation on interfacial behavior and mixing phenomena in three-phase argon-stirred ladles[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2021, 42(5): 138–148.
(杨亚迪, 赵晶, 崔剑征. 三相氩气搅拌钢包内界面行为及混合现象的数值模拟[J]. 钢铁钒钛, 2021, 42(5): 138–148.)
- [7] Yang Zhaojun, Zeng Yanan, Li Junguo. Numerical simulation on optimization design of constructional and technical

- parameters of 65 t ladle[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2016, 37(2): 112–117.
(杨赵军, 曾亚南, 李俊国. 65 t钢包精炼工艺参数优化数值模拟[J]. *钢铁钒钛*, 2016, 37(2): 112–117.)
- [8] Arcosgutierrez Hugo, Barretosandoval Jose, Garcia Saul, *et al.* Mathematical analysis of inclusion removal from liquid steel by gas bubbling in a casting tundish[J]. *Journal of Applied Mathematics*, 2012, (1110-757X): 3800–3844.
- [9] Liu Heping, Qi Zhenya, Xu Mianguang. Numerical simulation of fluid flow and interfacial behavior in three-phase argon-stirred ladles with one plug and dual plugs[J]. *Steel Research International*, 2011, 82(4): 440–458.
- [10] Liu Yu, Ersson Mikael, Liu Heping, *et al.* Comparison of Euler-Euler approach and Euler-Lagrange approach to model gas injection in a ladle[J]. *Steel Research International*, 2019, 90(5): 41.
- [11] Tang Haiyan, Guo Xiaochen, Wu Guanghui, *et al.* Effect of gas blown modes on mixing phenomena in a bottom stirring ladle with dual plugs[J]. *ISIJ International*, 2016, 12(12): 123.
- [12] Qin Xufeng, Cheng Changgui, Li Yang, *et al.* Effect of annular argon blowing at upper nozzle on formation of slag eye in tundish[J]. *Iron and Steel*, 2019, 54(8): 107–115, 123.
(秦绪锋, 程常桂, 李阳, 等. 上水口环形吹氩对中间包内渣眼形成的影响[J]. *钢铁*, 2019, 54(8): 107–115, 123.)
- [13] Wu Guangjun. Development and application of argon blowing technology of the porous pocket block in continuous casting tundish[J]. *Continuous Casting*, 2018, 43(2): 12–15.
(武光君. 连铸中间包透气水口座砖吹氩冶金技术开发与应用[J]. *连铸*, 2018, 43(2): 12–15.)
- [14] Lu Haibiao, Cheng Changgui, Zhang Feng, *et al.* Simulation study on process optimization of bottom argon blowing in tundish[J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2018, 41(1): 1–7.
(卢海彪, 程常桂, 张丰, 等. 中间包底吹氩工艺优化的模拟研究[J]. *武汉科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 41(1): 1–7.)
- [15] Zhang Meijiang, Wang Houzhi, Huang Ao, *et al.* Mathematical simulation of inclusion movement with gas blowing at tundish bottom[J]. *Continuous Casting*, 2006, (6): 19–21.
(张美杰, 汪厚植, 黄奥, 等. 底吹氩中间罐夹杂物运动行为的数模研究[J]. *连铸*, 2006, (6): 19–21.)
- [16] Wu Yonglai, Wang Ying, Zhu Miaoyong, *et al.* Phenomenon of entrainment at interface between slag and metal in tundish with gas curtain[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2007, 19(11): 21–23.
(吴永来, 王颖, 朱苗勇, 等. 气幕挡墙中间包内渣钢界面卷混现象[J]. *钢铁研究学报*, 2007, 19(11): 21–23.)
- [17] Cheng Nailiang, Leng Xiangui, Yang Zhiwei, *et al.* Water model study on characteristics of fluid flow in continuous casting tundish with argon bubbling[J]. *Journal of Materials and Metallurgy*, 2006, 5(4): 258–262.
(程乃良, 冷祥贵, 杨智伟, 等. 吹氩连铸中间包内钢液流动特性的水模型实验研究[J]. *材料与冶金学报*, 2006, 5(4): 258–262.)
- [18] Launder Brian, Spalding D Brian. The numerical computation of turbulent flows[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 1974, 3(2): 269–289.
- [19] Li Yang, Deng Anyuan, Yang Bin, *et al.* Inhibiting bulging deformation of liquid metal free surface by magnetic pressure[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2020, 28(7): 818–829.
- [20] Li Yang, Deng Anyuan, Zhang Lintao, *et al.* A new type of magnetic field arrangement to suppress meniscus fluctuation in slab casting: numerical simulation and experiment[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 298: 117278.
- [21] Duan Haojian, Zhang Lifeng, Thomas Brian G, *et al.* Fluid flow, dissolution, and mixing phenomena in argon-stirred steel ladles[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2018, 49(5): 2722–2743.
- [22] Moris S A, Alexander A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems[J]. *J Fluid Mech*, 1972, 55(2): 193–208.
- [23] Kuo J T, Wallis G B. Flow of bubbles through nozzles[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1988, 14(5): 547–564.
- [24] Xie Yongkun, Orsten Stefan, Oeters Franz. Behaviour of bubbles at gas blowing into liquid wood's metal[J]. *ISIJ International*, 1992, 32(1): 66–75.
- [25] Davidson J F. Bubble formation at an orifice in an inviscid liquid[J]. *Trans. Inst. Chem. Eng*, 1960, 38: 335–342.
- [26] Sheng Y Y, Irons G A. Measurement and modeling of turbulence in the gas/liquid two-phase zone during gas injection[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1993, 24(4): 695–705.
- [27] Krishnapisharody K, Irons G A. An extended model for slag eye size in ladle metallurgy[J]. *ISIJ International*, 2008, 48(12): 1807–1809.