

# 连铸结晶器内气泡运动行为及影响因素

张涛, 聂海棋, 罗志国, 邹宗树

(东北大学冶金学院, 辽宁沈阳 110819)

**摘 要:** 为了研究连铸结晶器内气泡的运动行为及影响因素, 采用了改进的数学模型对气泡在钢液内的运动行为进行了模拟. 数学模型考虑气泡的弹开、聚合以及破碎行为, 分析了不同拉速和浸入深度对气泡分布范围、含气率以及气泡平均直径的影响. 研究表明: 初始直径较小的氩气泡在水口内的运动过程中会发生碰撞聚合, 生成大气泡. 相同拉速下, 气泡的分布范围和含气率随着水口浸入深度的增加而增大, 气泡平均直径随浸入深度的增大而减小. 相同浸入深度下, 气泡的分布范围和含气率随着拉速的增加而增大, 气泡平均直径随拉速的增大而减小. 拉速对气泡直径的影响大于浸入深度的影响.

**关 键 词:** 连铸; 气泡; 聚合; 破碎; 拉速; 水口浸入深度

中图分类号: TF 777

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2018)01-0061-05

## Analysis of Bubbles Motion Behavior and Influence Factors in Continuous Casting Mold

ZHANG Tao, NIE Hai-qi, LUO Zhi-guo, ZOU Zong-shu

(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LUO Zhi-guo, E-mail: luozg@smm.neu.edu.cn)

**Abstract:** An original mathematical model was developed to study the behavior of bubbles and influence factors in continuous casting mold. The interactions between bubbles were considered in the model, including bounce off, coalescence and breakup. The effects of casting speed and nozzle immersion depth on bubbles behavior were investigated, including region of bubble dispersion, gas volume fraction and bubble mean diameter. The results showed that the initial bubbles can merge into a large bubble in the nozzle. With increasing the nozzle immersion depth, the region of bubble dispersion and gas volume fraction increase, but the average diameter of bubbles decreases under the same casting speed. With increasing casting speed, the law is same under the same nozzle immersion depth. Casting speed has greater influence than nozzle immersion depth on bubble diameter.

**Key words:** continuous casting; bubble; coalescence; breakup; casting speed; nozzle immersion depth

连铸是现代钢铁生产流程中的重要环节. 在连铸生产中, 钢液内的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{CaS}$  等夹杂物在水口聚集形成壁面结瘤, 严重时导致水口堵塞. 为了解决上述问题, 水口内吹氩气的技术应运而生. 该工艺可以防止水口堵塞, 均匀钢液成分和温度, 降低钢液二次氧化的风险, 促进夹杂物上浮. 但是, 如果操作条件控制不当, 吹氩技术也会带来负面影响. 例如, 小气泡被铸坯捕获后会形成缺陷,

或者吹气量过大导致卷渣行为等. 为了能够获得优化结晶器的工艺操作条件, 提高铸坯质量, 多年来很多学者对气泡在结晶器内的运动进行了深入的研究<sup>[1-5]</sup>.

但是, 目前对气泡在结晶器内的运动行为的数学模拟基本没有考虑气泡间的相互作用. 本文通过引入气泡间相互作用模型改进了传统结晶器气液两相流的数学模型, 更加真实地模拟出不同

的操作条件对气泡运动的影响。

## 1 数学模型的建立

模型采用欧拉-拉格朗日方法进行建模,主要包括三部分:①钢液的控制方程;②气泡的运动模型;③气泡之间相互作用模型。

### 1.1 钢液的运动模型

钢液的控制方程为质量和动量守恒方程<sup>[6]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \mathbf{v}_l) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_l \rho_l \mathbf{v}_l) + \mathbf{v}_l \cdot \nabla (\alpha_l \rho_l \mathbf{v}_l) = -\alpha_l \nabla p + \nabla [\alpha_l (\mu_l + \mu_t)] \nabla \mathbf{v}_l + \mathbf{F}. \quad (2)$$

式中: $\alpha_l$  是钢液的体积分数; $\rho_l$  是钢液的密度; $\mathbf{v}_l$  是钢液的平均速度; $p$  是压力; $\mu_l$  是钢液的动力黏度; $\mu_t$  是钢液的湍流黏度; $\mathbf{F}$  是气泡对钢液的作用力。

### 1.2 气泡的运动模型

气泡作为离散相处理,运动方程由牛顿第二定律得到:

$$m_d \frac{d\mathbf{v}_d}{dt} = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_p + \mathbf{F}_{vm} + \mathbf{F}_b + \mathbf{F}_L. \quad (3)$$

式中: $m_d$  和  $\mathbf{v}_d$  分别是离散相的质量和速度; $\mathbf{F}_D$ ,  $\mathbf{F}_p$ ,  $\mathbf{F}_{vm}$ ,  $\mathbf{F}_b$  和  $\mathbf{F}_L$  分别表示气泡受到的曳力、压力梯度力、虚假质量力、净重力和升力,其表达式分别如下:

$$\mathbf{F}_D = C_D \frac{\rho_f |\mathbf{v} - \mathbf{v}_d| (\mathbf{v} - \mathbf{v}_d)}{2} \frac{\pi d_d^2}{4}, \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_p = \frac{1}{6} \pi d_d^3 \rho_l \frac{d\mathbf{v}}{dt}, \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_{vm} = \frac{1}{6} \pi d_d^3 C_{vm} \rho_f \frac{d}{dt} (\mathbf{v} - \mathbf{v}_d), \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_b = -\frac{1}{6} \pi d_d^3 (\rho_l - \rho_g) \cdot \mathbf{g}, \quad (7)$$

$$\mathbf{F}_L = -\frac{1}{6} \pi d_d^3 C_L \rho_l (\mathbf{v}_d - \mathbf{v}) (\nabla \times \mathbf{v}). \quad (8)$$

### 1.3 气泡之间相互作用模型

#### 1.3.1 气泡碰撞模型

当两个气泡靠近时,气泡间的液膜抵制这一相对运动。为了更好地描述这一现象,研究者们引进了气泡相对韦伯数。当两气泡相对韦伯数大于临界值时,两气泡弹开;否则,发生聚合。

$$We = \frac{d_d v_d'^2 \rho_l}{\sigma}. \quad (9)$$

式中: $d_d$  是气泡的平均直径; $v_d'$  是气泡的相对速度; $\rho_l$  是液体的密度; $\sigma$  是液体的表面张力。

Tsao 等<sup>[7]</sup>提出运动的气泡与静止的气泡聚合时的相对临界韦伯数为 1.6. Duineveld<sup>[8]</sup>使用气泡临界相对韦伯数为 0.18,模拟两气泡运动过程中的聚合. Zhang 等<sup>[9]</sup>运用韦伯数为 0.14 进行数值模拟,模拟过程中气泡也存在相对运动. 本文模拟的气泡运动情况与后两者类似,且后两者的数值也比较相近,本文选取后两者数值的平均值 0.16 作为气泡临界相对韦伯数。

1) 弹开后的速度计算. 当 a 和 b 两气泡的球心距离小于两个气泡的半径之和,并且气泡的相对韦伯数大于气泡的临界相对韦伯数时,两气泡发生完全弹性碰撞(图 1). 两气泡沿两球心连线方向的速度由式(10)和式(11)得到:

$$v_{ra}' = 2 \frac{m_a v_{ra} + m_b v_{rb}}{m_a + m_b} - v_{ra}. \quad (10)$$

$$v_{rb}' = 2 \frac{m_a v_{ra} + m_b v_{rb}}{m_a + m_b} - v_{rb}. \quad (11)$$

式中: $v_{ra}'$  和  $v_{rb}'$  表示碰撞后两气泡沿球心连线方向的速度; $m_a$  和  $m_b$  分别表示两个气泡的质量。

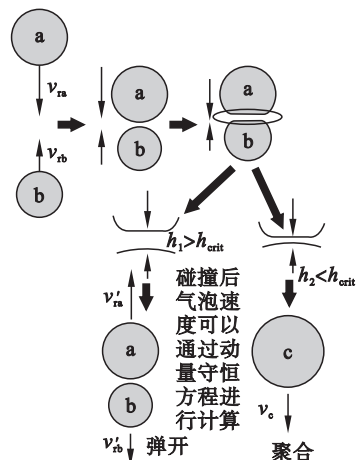


图 1 两个气泡碰撞示意图

Fig. 1 Collision schematics of two bubbles

2) 聚合后的速度计算. 当 a, b 两气泡的球心距离小于等于两个气泡的半径之和并且气泡的相对韦伯数小于气泡的临界相对韦伯数时,两气泡发生聚合,如图 1 所示. 聚合后新的气泡 c 的速度  $v_c$  由式(12)得到:

$$v_c = \frac{m_a v_a + m_b v_b}{m_a + m_b}. \quad (12)$$

#### 1.3.2 气泡破碎模型

当气泡处于湍流区域时,气泡上方具有较大的速度梯度,产生的剪切力将大气泡击碎成小气泡,如图 2 所示. 流体湍流强度的大小可用湍流动能耗散率  $\varepsilon$  表示. 气泡在给定湍流强度的流体中具有的最大尺寸定义为最大稳定尺寸  $d_{Bmax}$ <sup>[10]</sup>.

$$d_{\text{Bmax}} = \left( \frac{We_{\text{crit}} \sigma}{2} \right)^{\frac{3}{5}} \rho_1^{-\frac{1}{5}} \varepsilon^{-\frac{2}{5}}. \tag{13}$$

式中： $d_{\text{Bmax}}$ 为最大稳定尺寸； $\varepsilon$ 为湍动能耗散率； $\sigma$ 为表面张力； $\rho_1$ 为流体密度； $We_{\text{crit}}$ 为临界破碎韦伯数,对于氩气-钢液体系取 0.53.

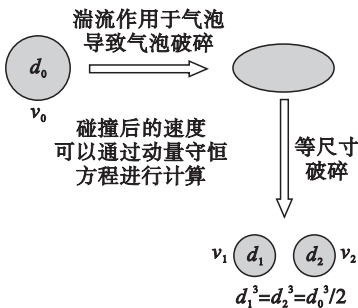


图 2 气泡破碎示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a bubble breakup

2 数值模拟参数及边界条件

以某厂板坯连铸结晶器为原型建立数学模型,对模型进行网格划分.图 3 为结晶器示意图及计算区域网格划分的示意图.

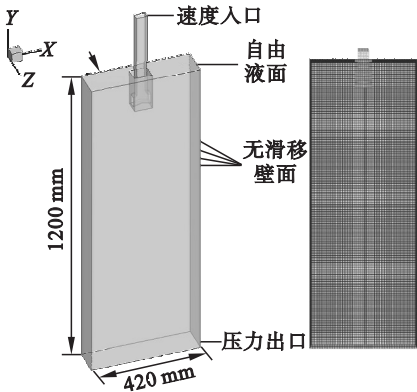


图 3 结晶器示意图及网格划分

Fig. 3 Schematic diagram of the mold and grid of numerical model

液体边界条件:入口设为速度入口,出口设为压力出口,出口边界的静压设为 0,液面设为自由面,壁面设为无滑移表面.气泡边界条件:气泡在透气砖附近生成,水口壁面,结晶器壁面和结晶器液面都定义为捕获边界条件,出口处定义为逃离边界条件.每次生成的气泡尺寸和数量根据气量和气泡初始直径分布换算得出,气泡初始速度设为 0. 本模型工艺参数:结晶器长、宽、厚分别为 1 200,420,108 mm;水口浸入深度分别为 78,96,108 mm;拉速为 1.5,1.9,2.1 m/min;钢液和气泡的密度为 7 020,0.291 kg/m<sup>3</sup>;钢液黏度为 0.005 6 Pa·s;吹气量为 0.037 m<sup>3</sup>/h;水口倾角为

-15°;气泡的初始直径为 1 mm.

3 结果及讨论

3.1 模型的验证

为了验证模型的适用性,采用该模型对文献[1]的结晶器内两相流动进行了模拟,并与文献[1]的实验结果进行对比验证,如图 4 所示.测量的数据为水口出口处垂线上的速度分布,可以看出模型预测值吻合较好,并且气泡的浮力抬升了射流,同时减弱了射流的速度.

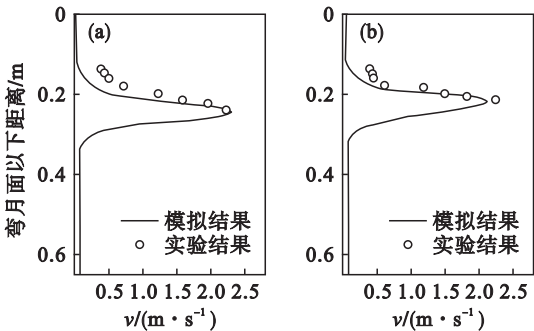


图 4 模型模拟值与实验测量值对比

Fig. 4 Comparison between calculated and measured velocity profiles

(a) —未吹气; (b) —吹气后.

3.2 气泡的运动行为及整体分布

图 5 是在吹气量为 0.037 m<sup>3</sup>/h,拉速为 1.9 m/min,浸入深度为 96 mm 时,不同时刻气泡在结晶器内运动分布.

初始直径较小的氩气泡(图 5a)在水口内运动,会发生气泡之间的聚合行为,生成大气泡,因此水口内存在尺寸不同的气泡.从图 5b 可以看出,大气泡在较大的浮力作用下,在水口附近发生上浮,而尺寸较小的气泡会随着钢液继续向结晶器的窄面运动.从图 5c 可以看出,部分气泡随着钢液进入到上循环流区,上浮至表面,一些更小的气泡则在冲击流的作用下,会进入到下循环流区内,运动至结晶器的下部.当结晶器的操作条件控制不当,部分小气泡会直接运动到窄面被凝固坯壳捕获,造成质量缺陷.图 5d 是气泡在钢液内运动时的整体分布.以下讨论均在流场运动达到稳态时进行.

3.3 水口浸入深度的影响

在结晶器拉速为 1.5 m·min<sup>-1</sup>时,分别对水口浸入深度为 78,96,108 mm 时结晶器内气泡的整体分布和含气率进行了模拟,如图 6 和图 7 所示.

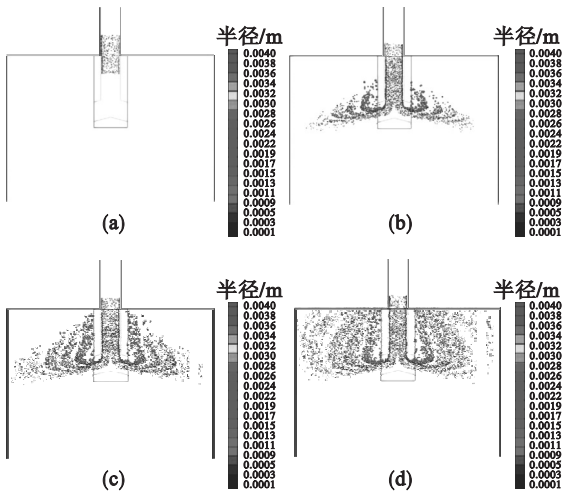


图5 气泡的运动行为及整体分布

Fig. 5 Evolution of bubbles distribution

(a)— $t=0.5\text{ s}$ ; (b)— $t=2.0\text{ s}$ ; (c)— $t=3.5\text{ s}$ ; (d)  $t=5.0\text{ s}$

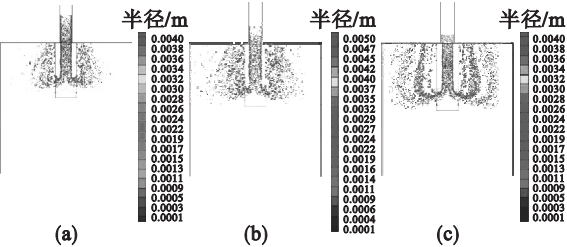


图6 不同水口浸入深度下的气泡分布

Fig. 6 Bubbles distribution under different nozzle immersion depths

(a)—78 mm; (b)—96 mm; (c)—108 mm.

从图6中可以明显看出,大气泡都是在水口附近上浮,小气泡会随着钢液向窄面运动.但是随着浸入深度的增加,气泡的分布范围更加广泛.当浸入深度达到108 mm时,会有一些小气泡进入下回流区.这是因为随着浸入深度的增加,水口出口处的湍流强度增加,导致更多的气泡破碎生成小气泡.这些小气泡的跟随性较好,会随着钢液运动至较远的地方.

图7为 $t=5\text{ s}$ 时不同水口浸入深度下的含气率.从图中可以看出,相同拉速下,随着浸入深度增加,含气率也会随之增大.这是因为气泡从水口出口运动出来后,上浮时间增大,小气泡之间碰撞聚合的可能性增加,会生成较大的气泡.

图8为气泡平均直径随浸入深度的变化情况.可以看出,当浸入深度从78 mm增加到108 mm,拉速为 $1.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,气泡的平均直径从2.16 mm减小至1.56 mm;当拉速为 $1.9\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,气泡的平均直径从1.41 mm减小至1.38 mm,当拉速为 $2.1\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,气泡的平均直径从1.28 mm减小至1.21 mm.

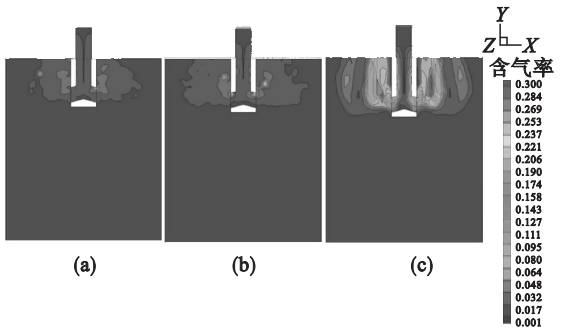


图7 不同水口浸入深度下的含气率

Fig. 7 Gas volume fraction under different nozzle immersion depths

(a)—78 mm; (b)—96 mm; (c)—108 mm.

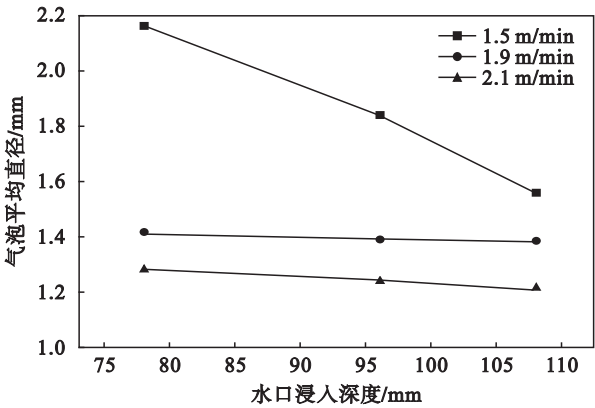


图8 水口浸入深度与气泡平均直径之间的关系

Fig. 8 Relationship between bubble diameter and nozzle immersion depths

### 3.4 拉速的影响

在水口浸入深度为78 mm时,分别对拉速为 $1.5, 1.9, 2.1\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时结晶器内气泡的整体分布和含气率进行了模拟,图9为 $t=5\text{ s}$ 时的模拟结果.

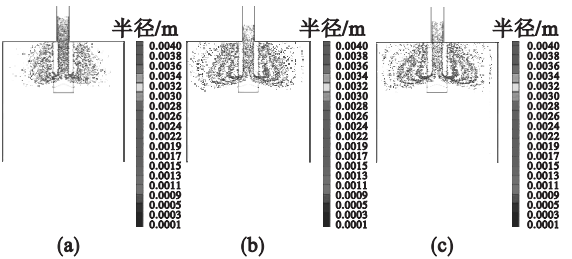


图9 不同拉速下的气泡分布

Fig. 1 Bubbles distribution with different casting speeds

(a)— $1.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (b)— $1.9\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  
(c)— $2.1\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

从图中可以看出,随着拉速的增加,气泡的分布范围更加广泛.

图10为 $t=5\text{ s}$ 时不同拉速下的含气率,从图中可以看出,随着拉速的增加,含气率也呈现增加的趋势.同时可以看到当拉速为1.9和 $2.1\text{ m}/\text{min}$



时,气泡的分布范围已经比较广泛,小气泡已经可以到达边壁,因此随着拉速的增加,增大了气泡被带入下回流区的可能,更容易造成铸坯缺陷.

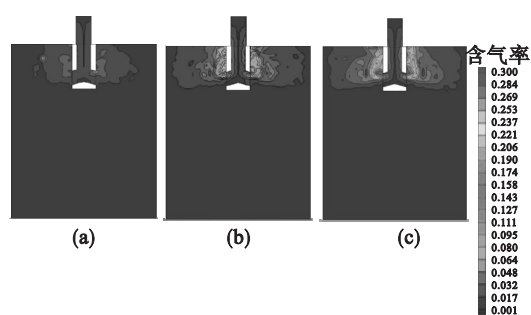


图 10 不同拉速下的含气率

Fig. 10 Gas volume fraction under different casting speeds

(a)— $1.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ; (b)— $1.9\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ;  
(c)— $2.1\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ .

图 11 为气泡平均直径随拉速的变化情况. 从图中可以看到,拉速从  $1.5\text{ m}/\text{min}$  增加到  $2.1\text{ m}/\text{min}$ ,浸入深度为  $78\text{ mm}$  时,气泡的平均直径从  $2.16\text{ mm}$  减小至  $1.28\text{ mm}$ ;浸入深度为  $96\text{ mm}$  时,气泡的平均直径从  $1.84\text{ mm}$  减小至  $1.24\text{ mm}$ ;浸入深度为  $108\text{ mm}$  时,气泡的平均直径从  $1.56\text{ mm}$  减小至  $1.21\text{ mm}$ .

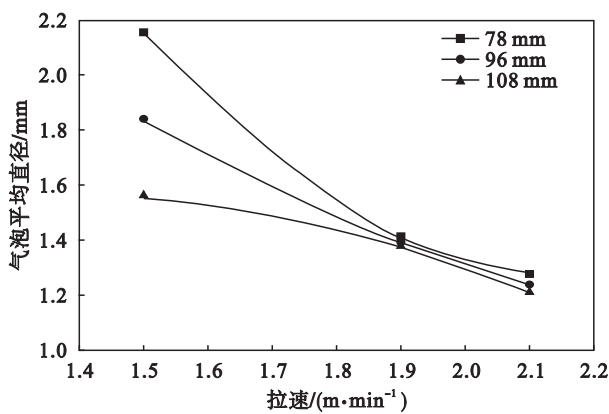


图 11 拉速与气泡平均直径之间的关系

Fig. 11 Relationship between bubble diameter and casting speed

对比图 7 和图 10 可以看出,拉速对于气泡尺寸的影响要大于浸入深度的影响. 这是因为气泡在流体内的最大稳定尺寸与湍流强度有关,当拉速增大后,水口出口处的湍流强度会增加,可以将气泡击碎成小气泡,导致气泡平均尺寸的减小. 同时,小气泡的跟随性好,因此气泡的分布范围也会更加广泛.

## 4 结 论

1) 气泡流在水口内运动时,会发生气泡之间

的碰撞生成大气泡. 大气泡由于浮力的作用在水口附近上浮,小气泡会随着钢液运动至窄面附近. 一些较小的气泡会运动至窄面,可能造成铸坯缺陷,部分很小的气泡会进入下回流区,到达结晶器深处.

2) 随着水口浸入深度的增加,气泡的分布范围更加广泛,含气率随着浸入深度的增加而提高. 当拉速为  $1.5\text{ m}/\text{min}$  时,浸入深度对气泡直径的影响较大,气泡平均直径从  $2.16\text{ mm}$  减小至  $1.56\text{ mm}$ ;当拉速增大至  $1.9$  和  $2.1\text{ m}/\text{min}$  时,浸入深度对气泡的直径影响较小,气泡平均直径分别从  $1.41, 1.28\text{ mm}$  减小至  $1.38, 1.21\text{ mm}$ .

3) 随着拉速的增加,气泡的分布范围更加广泛,含气率随着拉速的增加而提高. 浸入深度从  $78\text{ mm}$  增加到  $108\text{ mm}$  时,气泡的平均直径分别从  $2.16, 1.84, 1.56\text{ mm}$  减小至  $1.28, 1.24, 1.21\text{ mm}$ ,拉速对气泡直径的影响要大于浸入深度的影响.

## 参考文献:

[1] Thomas B G, Huang G X, Sussman R C, et al. Simulation of argon gas flow effects in a continuous slab caster [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1994, 25B (4): 527 – 547.

[2] Kubo N, Ishii T, Kubota J, et al. Two-phase flow numerical simulation of molten steel and argon gas in a continuous casting mold [J]. *ISIJ International*, 2002, 42 (11): 1251 – 1258.

[3] Pfeiler C, Wu M, Ludwig A. Influence of argon gas bubbles and non-metallic inclusions on the flow behavior in steel continuous casting [J]. *Material Science and Engineering: A*, 2005, 413/414 (15): 115 – 120.

[4] Lee G G, Thomas B G, Kim S H. Effect of refractory properties on initial bubble formation in continuous-casting nozzles [J]. *Metals and Materials International*, 2010, 16 (3): 501 – 506.

[5] Lei S W, Zhang J M. Numerical simulation of molten steel flow and inclusions motion behavior in the solidification processes for continuous casting slab [J]. *ISIJ International*, 2014, 54 (1): 94 – 102.

[6] Tsuji Y, Tanaka T, Yonemura S. Cluster patterns in circulating fluidized beds predicted by numerical simulation (discrete particle model versus two-fluid model) [J]. *Powder Technology*, 1998, 95 (3): 254 – 264.

[7] Tsao H K, Koch D L. Observations of high Reynolds number bubbles interacting with a rigid wall [J]. *Physics of Fluids*, 1997, 9 (1): 44 – 56.

[8] Duineveld P C. Bouncing and coalescence of two bubbles in water [D]. Enschede: Twente University, 1994.

[9] Zhang X Y, Ahmadi G. Eulerian-Lagrangian simulations of liquid-gas-solid flows in three-phase slurry reactors [J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, 60 (18): 5089 – 5104.

[10] Sevik M, Park S H. The splitting of drops by turbulent fluid flow [J]. *Journal of Fluid Engineering*, 1973, 95 (1): 53 – 60.