

# 液态夹杂物在气泡尾流中碰撞行为数值模拟研究

张志霄<sup>1</sup>, 冯巍<sup>2</sup>, 陈刚<sup>3</sup>, 屈天鹏<sup>1</sup>, 田俊<sup>1</sup>, 王德永<sup>1</sup>

1 苏州大学沙钢钢铁学院, 苏州 215137

2 南京钢铁股份有限公司, 南京 210035

3 张家港浦项不锈钢股份有限公司, 张家港 215636

## Numerical Simulation of Collision Behavior of Liquid Inclusions in Bubble

### Wake

Zhang Zhixiao<sup>1</sup>, Feng Wei<sup>2</sup>, Chen Gang<sup>3</sup>, Qu Tianpeng<sup>1</sup>, Tian Jun<sup>1</sup>, Wang Deyong<sup>1</sup>

1 School of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou, 215137, China

2 Nanjing Iron and Steel Co., Ltd., Nanjing, 210035, China

3 Zhangjiagang Pohang Stainless Steel Co., Ltd., Zhangjiagang, 215636, China

## 1. 前言

在炼钢过程中, 会向钢液内引入不同来源、不同尺寸、不同性质的夹杂物, 非金属夹杂物会使钢产品的塑性、韧性、焊接性和抗腐蚀性显著下降<sup>[1]</sup>。此外, 在浇铸时, 钢中非金属夹杂物易导致水口结瘤, 严重时会导致水口的堵塞, 对连铸生产节奏造成极大的影响<sup>[2]</sup>。因此, 在炼钢时, 必须尽快、高效地去除钢液中的非金属夹杂物, 以提高钢水的洁净度, 确保生产过程的顺利进行, 从而提高钢液品质, 并使铸坯质量得到进一步改善。

非金属夹杂物主要是二次精炼过程中的脱氧产物。如果采用铝脱氧方式, 会在钢液内生成  $Al_2O_3$ , 可以采用钙处理的方法, 让  $Al_2O_3$  与钙发生反应, 生成钙铝酸盐类夹杂物, 实现对  $Al_2O_3$  改性的效果<sup>[3]</sup>。钙铝酸盐夹杂物为完全或部分液态, 不易阻塞水口, 同时夹杂物液滴会在钢液内发生碰撞聚并, 相较于固态夹杂物更容易长大和上浮去除。液滴聚并是一个相当复杂的过程, 涉及到体系界面性质、界面迁移以及相间扩散等诸多因素<sup>[4]</sup>。液滴主体和界面特性都会对液滴聚并的时间产生一定影响。

冶金反应器底吹气是目前促使钢中非金属夹杂物上浮去除的有效控制手段<sup>[5]</sup>, 本文以底吹冶金反应器为研究对象, 研究气泡的上浮以及夹杂物在气泡尾流中的碰撞行为, 揭示影响夹杂物聚并的因素, 这对控制钢中夹杂物大小, 改善其洁净度、性能以及最终产品质量起着至关重要的作用。

## 2. 模型建立

### 2.1. 基本假设

在实际生产中, 钢液中液态非金属夹杂物聚并过程十分复杂, 难以建立一个能够涵盖各方面的数学模型来对夹杂物液滴在气泡尾流中的碰撞聚并过程进行描述, 需要对其进行必要而合理的简化。由于实际气泡和夹杂物尺寸差距过大, 本研究使用两个模型分别对气泡上浮过程与夹杂物碰撞聚并过程进行模拟, 并根据前人的研究成果以及冶金生产中的实际情况<sup>[6]</sup>, 对模型提出以下假设:

(1) 计算域包括两相流体, 一是钢液, 二是气泡或夹杂物液滴, 并将气泡、液滴和钢液都视为不可压缩的牛顿流体;

(2) 仅考虑一对夹杂物液滴的碰撞聚并情况, 忽略其他夹杂物的影响;

(3) 两个夹杂物液滴成分一致且形状均为球形。

结合前人文献与实际生产数据，本文对物理参数的设置如表 1 所示<sup>[7]</sup>。

表 1 基本物性参数

Table 1 Material properties and Experimental parameters

参数	单位	值
钢液密度	kg·m <sup>-3</sup>	6860
钢液粘度	Pa·s	0.0064
氩气密度	kg·m <sup>-3</sup>	1.62
氩气粘度	Pa·s	2.13e-5
气泡直径	mm	5
液态夹杂物密度	kg·m <sup>-3</sup>	2690
液态夹杂物直径	μm	30

## 2.2. 控制方程

钢液中气泡上浮过程和液态夹杂物在气泡尾流中的碰撞过程均满足质量守恒与动量守恒，并且在本文研究的工况下，计算域中流动状态为层流，采用 VOF 方法处理钢液-气泡与钢液-夹杂物两相界面处的流动。质量守恒方程为：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial X_i}(\rho u) = 0 \quad (1)$$

式中  $u$  是平均速度， $t$  为时间， $\rho$  为平均密度，其方程为：

$$\rho = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2 \quad (2)$$

$$u = \alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_1 u) = 0 \quad (4)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (5)$$

式中  $\alpha$  是体积分数，下标 1 和 2 分别表示第一相（钢液）和第二相（气泡或夹杂物液滴）。

动量守恒方程可以写成如下：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu(\nabla u + \nabla u^T)] + \rho \vec{g} \quad (6)$$

## 3. 结果与讨论

### 3.1. 气泡上浮过程

气泡从底吹元件逸出后，在浮力作用下开始加速上浮。当浮力、重力、粘滞阻力平衡后会以一定的匀速上浮，气泡尺寸也由球形转变为椭球型。钢液在气泡的推动下，形成了左右对称的循环流场，气泡尾流中流体自两侧向中心线边上浮边靠近，可为液态夹杂物的聚并提供有利条件。

气泡开始运动时，惯性力与粘性力较小，在界面张力作用下呈球形。当气泡速度增大时，惯性力的影响变得显著，受到上游液体的阻力增大，逐渐变为椭球形。为了表征气泡的变形程度，定义变形率  $E$  为气泡横向长度与纵向长度之比，本文选择  $We$  数作为无量纲数来预测气泡变形率，并将数值模拟结果与前人的预测模型进行了比较，模拟结果与前人总结的规律基本吻合，变形率随  $We$  数的增大而增大。基于本文的模拟结果，采用最小二乘法对数据进行拟合，得到：

$$E = 1 + 0.176We^{0.86} \quad (7)$$

通常氩气与钢液的界面张力系数约为 1.8N/m<sup>[8]</sup>，气泡呈椭球型上浮，气泡尺寸、速度越大， $We$  数越大，变形率也会增大，对钢液的回流区域也会产生影响。当  $We$  数较大时，气泡底部会向内凹陷<sup>[9]</sup>，呈球帽

形甚至环形，从而形成更复杂的流场。可以通过优化底吹位置、吹气量、气体流速等方式来影响反应器内的钢液流场，使更多夹杂物进入尾流区，增大夹杂物碰撞聚并及上浮去除的概率。

### 3.2. 夹杂物碰撞聚并过程

基于气泡尾流区域的流场特点，对夹杂物在尾流中的运动过程进行了模拟。自夹杂物开始运动起，每隔 0.1ms 记录其在流场中的位置，如图 1(a)所示。可见夹杂物液滴开始运动后，随着外部流场在 Y 方向向上运动，同时在 X 方向上互相靠近，发生碰撞，直至完成聚并。为了展示夹杂物的聚并过程，自夹杂物开始接触起，记录其在 0 $\mu$ s、5 $\mu$ s、20 $\mu$ s、35 $\mu$ s 时刻的形态，如图 1(b)所示。液滴接触后先在液滴之间形成液膜，液膜随着液滴变形而扩展并变薄，最终液膜破裂液滴联通，完成液滴的聚并过程，之后则会在界面张力的作用下发生两个正交方向上的往复振荡。

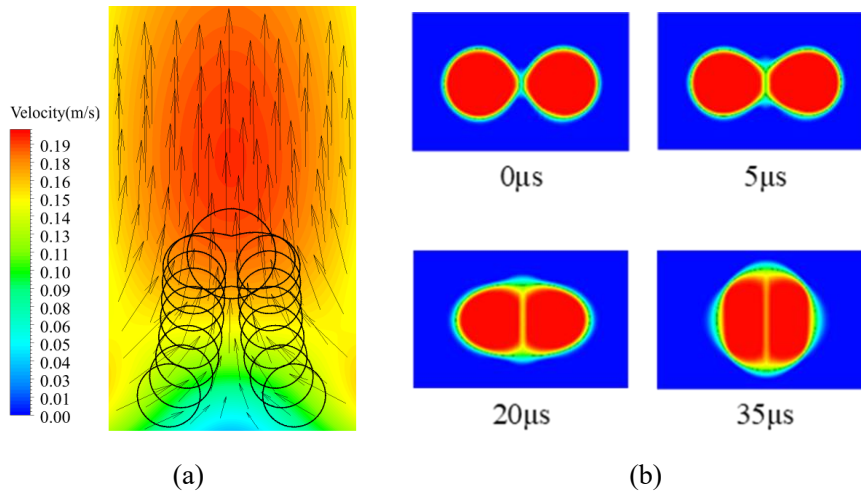


图 1 夹杂物碰撞过程示意图: (a)液滴运动过程; (b)聚并行为

Fig. 1 Schematic diagram of inclusion droplets collision process: (a) Droplets movement; (b) Coalescence

两夹杂物在尾流中的相对运动可等效为对心碰撞或偏心碰撞，其相对运动行为会直接影响其碰撞结果。为探究夹杂物在偏心碰撞中运动行为对碰撞过程的影响，通过改变液滴初始相对位置与速度大小，对不同偏心度及 We 数下的碰撞过程进行了模拟。定义偏心度  $B$  为垂直于移动方向的液滴质心之间的距离与液滴直径之比。在本文研究范围内，液滴的偏心碰撞出现了聚并和滑移两种情况。模拟的工况下 We 数较小，在此范围内增大 We 数有利于液滴聚并。因此可以通过适当提高吹气流速的方式增大夹杂物运动速度，即增大夹杂物 We 数，从而促进夹杂物聚并。

### 3.3. 夹杂物物性参数对聚并时间的影响

为探究夹杂物物性参数对液滴碰撞聚并过程的影响，在对心碰撞的条件下，对不同夹杂物粘度以及不同界面张力系数下的液滴碰撞过程进行了模拟。取液膜破裂后夹杂物在 X 方向上的长度首次等于聚并后液滴稳定半径的时刻作为液滴完成聚并的标志。根据质量守恒，有：

$$\pi \cdot R_l^2 + \pi \cdot R_r^2 = \pi \cdot R^2 \quad (8)$$

其中， $R$  表示完成聚并后液滴的稳定半径， $R_l$  和  $R_r$  分别表示左侧液滴和右侧液滴的半径。

可见夹杂物粘度越大，聚并时间就越长，当粘度从 0.08 Pa·s 增大到 0.5 Pa·s，聚并时间从 8 $\mu$ s 增加到 28.5 $\mu$ s。这是因为粘度越高，液滴内部分子之间发生相对运动时产生摩擦阻力越大，液膜破裂后流动更慢，从而使液滴之间的传质速度降低，聚并完成的时间被延长。同时界面张力系数越小，聚并时间就越长，当界面张力系数从 0.3N/m 增大到 1.6N/m，聚并时间从 50.5 $\mu$ s 减小到 10.5 $\mu$ s。其原因在于，液滴弯曲液面所受附加压力与界面张力系数成正比，界面张力系数越大，指向凹向一侧的附加压力就会升高，夹杂物液滴与钢液界面的收缩就会加速，液滴聚并就会更快地完成。

## 4. 结论

针对连铸过程中的夹杂物去除问题，本文对气泡在钢液中的自由上浮过程及液态非金属夹杂物在气泡尾流中的碰撞聚并过程进行了模拟，得出主要结论如下：

（1）气泡上浮时会推动钢液形成从气泡上表面到下表面的回流，在上浮过程中气泡会随速度的增加而逐渐变形，变形率  $E$  与  $We$  数相关：

$$E = 1 + 0.176We^{0.86}$$

（2）夹杂物液滴在气泡尾流中一边向上运动一边发生对心或偏心碰撞，在本文研究范围内，根据不同偏心度与  $We$  数，液滴碰撞可能会出现聚并与滑移两种结果。

（3）夹杂物液滴聚并时间主要受粘度、界面张力影响，粘度越大、界面张力系数越小，聚并时间越短。

因此，为了促进夹杂物在气泡尾流中的碰撞聚并，实现快速高效地去除夹杂物，可以通过改进吹气量、气体流速的方式，使气泡夹带更多的夹杂物，同时可以通过调整夹杂物的粘度、界面张力系数来促进夹杂物的聚并，进而使夹杂物更容易上浮去除。

## 致谢

感谢国家自然科学基金项目（52174321，52074186）和张家港市产学研基金项目（ZKCXY2133）对本论文研究工作的支持。

## 参考文献

- [1]邵肖静, 季晨曦, 崔阳等. 钢中非金属夹杂物对钢材疲劳性能的影响概述[C]//第十八届（2014年）全国炼钢学术会议论文集——S07: 非金属夹杂物控制.2014:92-99.
- [2]Lifeng Zhang and Brian G. Thomas. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness[J]. ISIJ International, 2003, 43(3): 271-291.
- [3]杨光, 杨文, 张立峰.铝镇静钢中夹杂物钙处理改性及其影响因素[J].钢铁, 2022, 57(12):66-78.
- [4]QIAN J., LAW C. K.. Regimes of coalescence and separation in droplet collision[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 331.
- [5]钱云强, 郑淑国, 朱苗勇.偏心底吹氩钢锭流场及混合特性数值模拟[J].中国冶金, 2022, 32(11):56-64.
- [6]Carlos A. Llanos, Saul Garcia, J. Ángel Ramos-Banderas, Jose de J. Barreto, Gildardo Solorio. Multiphase Modeling of the Fluidynamics of Bottom Argon Bubbling during Ladle Operations[J]. ISIJ International, 2010, 50(3):396-402.
- [7]熊永涛, 姚毓超, 刘中秋, 谢广烁, 李宝宽.吹氩连铸结晶器内渣金界面乳化行为的试验研究[J].炼钢, 2022, 38(06):22-28.
- [8]陈家祥.炼钢常用图表数据手册[M].冶金工业出版社, 北京, 2010, 21-24
- [9]Mitsuhiro Ohta, Tatsuya Imura, Yutaka Yoshida, Mark Sussman. A computational study of the effect of initial bubble conditions on the motion of a gas bubble rising in viscous liquids[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2004, 31(2): 223-237.