

较大底吹流量下顶底复吹转炉气液两相流数学模拟

张靖实, 娄文涛*, 朱苗勇*

东北大学冶金学院, 沈阳 110819

Mathematical Simulation of Larger Bottom blowing Flow Rate in Top-bottom Blown Converter

Zhang Jingshi, Lou Wentao*, Zhu Miaoyong*

School of Metallurgy, Northeastern University, Shengyang, 110819, China

1. 前言

顶底复合吹炼是转炉炼钢主要手段, 通常从底部吹入氩气, 来有效地搅拌钢液、均匀组成元素, 并显著提高反应效率。有必要研究影响凹坑形状和气液流动行为, 以实现顶底吹转炉的高效生产。在数值模拟方面, 学者们主要采用 VOF(volume of fluid)-DPM(discrete phase model)来研究顶底复合吹炼炉中的气液流动^[1-3]。用 VOF-DPM 来描述顶底吹转炉的多相流时, 仍然存在一些矛盾的问题。实际转炉冶炼过程中, 氩气一般是由直径较大的底吹管吹入熔池, 形成较大的气泡尺寸。而 DPM 模型的前提条件是要求气泡尺寸小于单个计算网格尺寸, 在描述转炉中大气泡的行为时, 会造成某些数值偏差, 限制了其描述转炉内较大底吹流量条件或更复杂的气泡运动行为的能力。为了更好地描述气液流动的影响凹坑形状和搅拌行为, 结合欧拉-多流体 VOF 模型的优势^[4], 本工作采用了欧拉-多流体 VOF 模型模拟气液两相流行为, 并与 VOF-DPM 进行对比, 探究不同数学模型的适用性。

2. 数学模型和网格边界

2.1. 数学模型

在多流体 VOF 多相流模型中, 各相的体积分数在计算域中被追踪。质量方程和动量守恒方程分别用以下公式表示。

$$\frac{\partial(\rho_k \alpha_k)}{\partial t} + \nabla(\alpha_k \rho_k \bar{u}_k) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k \bar{u}_k)}{\partial t} + \nabla(\alpha_k \rho_k \bar{u}_k \bar{u}_k) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu_{\text{eff}}(\nabla \bar{u}_k + (\nabla \bar{u}_k)^T) + \alpha_k \rho_k \bar{g} + \bar{M}_k \quad (2)$$

$$\sum \alpha_k = 1 \quad (3)$$

其中 ρ_k 和 α_k 分别代表 k 相的密度(kg/m^3)和体积分数(-)。 \bar{u}_k 是速度矢量(m/s), p 是压力(Pa), \bar{g} 是重力加速度(m/s^2), μ_{eff} 是有效黏度(Pa s), \bar{M}_k 代表气体和液体的界面动量交换项(N/m^3)。

2.2. 网格边界

对 120 吨顶底复吹转炉的 1:7 比例的水模型进行了模拟。使用用户定义函数 (UDF) 和 Ansys Fluent 2021 R1 软件来模拟气-液两相流。图 1 显示了数学模型的网格和边界条件。倾斜角度为 12° 的四孔拉瓦尔喷嘴被用作顶部吹气枪。底吹直径为 4 mm。质量流入口被用于顶枪和底部喷嘴的气体吹入。压力出口被用于气体。侧壁和底壁采用了无滑移固体壁面和标准粗糙度模型。时间步长为 1×10^{-3} 秒的瞬态模拟。每个工作条件的计算时间为 10 秒。

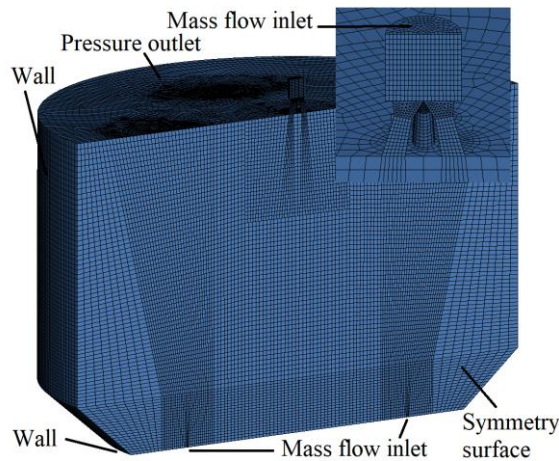
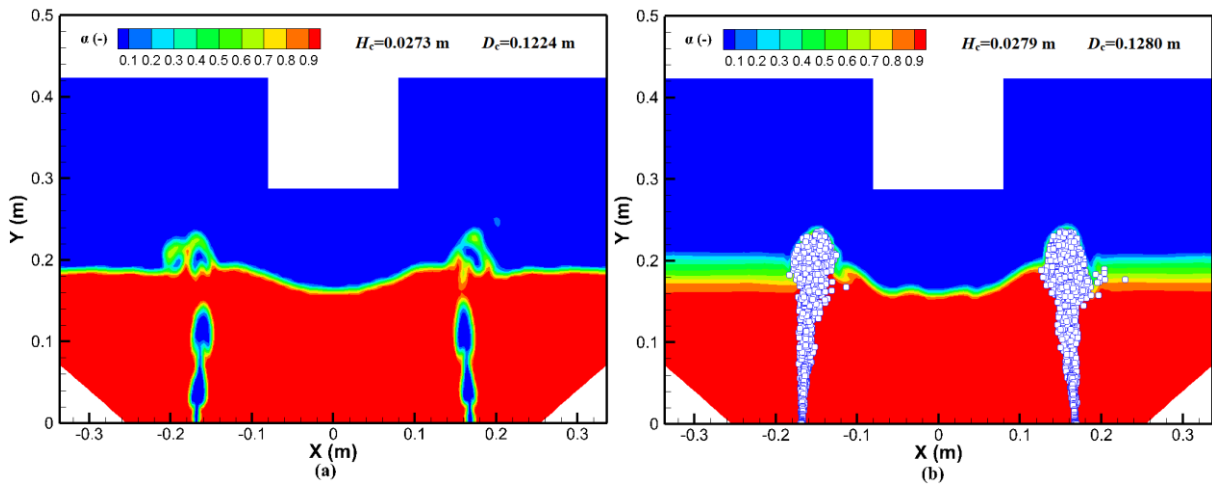


图 1 网格和边界条件

Fig. 1 Mesh and boundary conditions

3. 结果与分析

图 2 显示了数学模型对液体体积分数的影响。从图 2 可以看出，两个模型对熔池表面的气液两相界面的预测结果大致相同。然而，在底吹气流的模拟中存在很大的差异。在 VOF-DPM 中，底吹气流是以弥散和细小气泡的形式分布的。主要原因是底吹气泡是以离散相的形式进入熔池的流场中，只占质量，不占体积，因此不能描述长气泡的底吹行为。表 1 给出了数学模型对凹坑形状的影响。从表 1 可以看出，欧拉-多流体 VOF 对凹坑形状的预测比 VOF-DPM 与实验测量结果更相关。结合体积分数分析的结果，欧拉-多流体 VOF 在预测凹坑形状方面比 VOF-DPM 表现得更好。



(a) Eulerian-multifluid VOF model; (b) VOF-DPM model

图 2 数学模型对液体体积分数的影响

Fig. 2 Effect of mathematical models on liquid volume fraction

图 3 显示了数学模型对沿炉底中心线的液体轴向速度的影响。熔池底部附近的液体轴向速度在 VOF-DPM 中比欧拉-多流体 VOF 中的速度大。VOF-DPM 加剧了实验数据和模拟的液体速度之间的差异。这是

因为底吹气泡是作为质量点注入熔池的，不占体积，导致了对液流速度的过度预测。此外，可以清楚地得到欧拉-多流体 VOF 在预测液速方面具有更大的优势。

表 1 数学模型对凹坑形状的影响

Table 1 Effect of Mathematical Model on Cavity Shape

数学模型	欧拉-多流体 VOF	VOF-DPM	实测数据
H_c (m)	0.0273	0.0279	0.0280
D_c (m)	0.1224	0.1280	0.1230

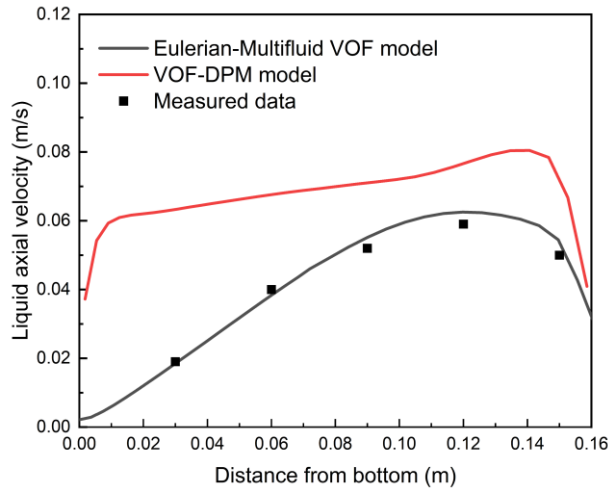


图 3 数学模型对液体轴向速度的影响

Fig. 3 Effect of mathematical models on liquid axial velocity

4. 结论

(1) 欧拉-多流体 VOF 模型被证明在模拟顶底复吹转炉中顶枪射流对熔池表面的冲击和熔池搅拌行为方面是有效的。预测结果与实验测量结果有很好的一致性。

(2) 在描述较大底吹流量时，欧拉-多流体 VOF 模型展现了良好的优越性。

致谢

感谢国家自然科学基金项目（项目号：U20A20272）和中央高校基本科研业务费（N2025017）的支持。

参考文献

- [1] Li Q, Li, M, Kuang S, Zou, et al. Numerical Simulation of the Interaction Between Supersonic Oxygen Jets and Molten Slag–Metal Bath in Steelmaking BOF Process [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, 46(3): 1494-1509.
- [2] Olivares O, Elias A, Sanchez R, et al. Physical and mathematical models of gas-liquid fluid dynamics in LD converters [J]. Steel Research International, 2002, 73(2): 44-51.
- [3] Sun J, Zhang J, Lin W, et al. Effect of Impact Cavity Shape Induced by Supersonic Oxygen Jet on the Dynamic Characteristics of Molten Bath in Converter [J]. Steel Research International, 2021, 92(9): 2100179-2100178.
- [4] Zhang J, Lou W, Shao P, et al. Mathematical Simulation of Impact Cavity and Gas–Liquid Two-Phase Flow in Top–Bottom Blown Converter with Eulerian-Multifluid VOF Model [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2022, 53(6): 3585-3601.