

富氧底吹熔炼炉内气液两相流动的数值模拟

张振扬^{1,2}, 陈卓^{1,2}, 闫红杰^{1,2}, 刘方侃^{1,2}, 刘柳^{1,2}, 崔志祥³, 申殿邦³

- (1. 中南大学 能源科学与工程学院, 长沙 410083;
2. 中南大学 流程工业节能湖南省重点实验室, 长沙 410083;
3. 东营方圆有色金属有限公司, 东营 257091)

摘要: 以某公司的富氧底吹熔池熔炼炉为原型, 运用数值模拟的方法对炉内氧气-铜锍两相流动进行三维瞬态模拟, 研究炉内气泡主要参数、气含率分布规律、氧枪出口附近压力变化以及液面波动情况。并借助于高速摄像仪设备, 对水模型实验中气泡形成、合并、变形及破碎过程进行研究, 所得结果与模拟结果进行比较。结果表明: 所建立的数学模型是合理的。氧气-铜锍两相流动模拟结果表明, 炉内气泡形成时间为 0.12~0.25 s, 生成频率为 4~5 Hz, 其短轴大小集中在 3.5 d ~6.5 d (d 为氧枪直径尺寸); 气泡停留时间为 0.2~0.4 s, 其在熔池内的平均上浮速度约为 4 m/s; 7°和 22°氧枪出口气泡后座现象出现的平均频率分别为 5 Hz 和 7 Hz, 作用时间为 0.06 s; 高效反应区存在于熔池上部区域; 气相搅动液相所形成的表面重力波在沉淀区传播的过程中, 波幅衰减很快, 当波传播到出渣口附近时, 液面趋于静止。

关键词: 两相流; 气泡; 数值模拟; 底吹炉

中图分类号: TF811

文献标志码: A

Numerical simulation of gas-liquid multi-phase flows in oxygen enriched bottom-blown furnace

ZHANG Zhen-yang^{1,2}, CHEN Zhuo^{1,2}, YAN Hong-jie^{1,2}, LIU Fang-kan^{1,2}, LIU Liu^{1,2}, CUI Zhi-xiang³, SHEN Dian-bang³

- (1. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Hunan Key Laboratory of Energy Conservation in Process Industry, Central South University, Changsha 410083, China;
3. Dongying Fangyuan Non-ferrous Metal Co., Ltd., Dongying 257091, China)

Abstract: The oxygen-copper matte flow, which covers bubble parameters, gas holdup distribution, inlet pressure variations and the fluid level fluctuation, was investigated by three-dimensional transient simulation in a bottom-blown bath smelting furnace, prototype of which is oxygen enriched bottom-blown furnace from some company. The formation, coalescence, deformation and breakage of bubble were captured using a high speed camera system in a water model, and the overall features of the bubble dynamic simulation were compared well with our experimental observations, as verified the accuracy and availability of this model. The results show that the continuous bubble formation time is 0.12–0.25 s and the bubble formation frequency is 4–5 Hz, the average rising velocity for the bubble is 4 m/s, and the bubble residence time ranges from 0.2 to 0.4 s. The sizes of bubbles forming in melt are about 3.5–6.5 times as that of the size of lance. The average frequency of phenomena of bubble back-attack occurs at 7° and 22°, the lance outlet is 5 Hz and 7 Hz, respectively, and the work time is 0.06 s. The gas phase mainly centers on the upper of the bath, so it is likely that high efficiency reaction core model is on upper of the copper matte. The amplitude which is very small at the slag hole nearby decays rapidly on side of settling zone as a result of the viscous dissipation caused by the high viscosity of smelt.

Key words: two-phase flow; bubble; numerical simulation; bottom-blown furnace

在冶金过程中, 气泡和熔体间的相互作用对冶金过程起着很重要的作用, 特别是在高温熔池熔炼过程中更是如此, 其喷吹气体不仅用于熔体的搅拌, 而且是熔炼过程的反应物。因此, 目前气体喷吹技术已广泛应用于各种冶金化工过程中^[1-2]。

氧气底吹熔池熔炼过程属于典型的多相流流动过程, 其理论研究一直存在很多困难, 但近几十年来气液两相流模拟技术发展迅速, 并已成为当今国际研究的前沿和热点问题。LAPIN^[3]利用瞬态 Euler/Lagrange 方法来阐述气泡在液体中运动过程, 在其建立的数学模型中假设: 气泡呈尺寸不变的小型刚性球体, 忽略气泡间的相互作用以及气泡的破碎或聚合。而其研究表明, 此法仅在层流和较低气体流速的区域内, 模拟结果与实验结果相一致。SOKOLIEHIN 等^[4]则采用瞬态 Euler/Euler 方法来描述气泡在液体中的运动机理, 其基本假设是系统绝热且处于层流状态, 气泡尺寸不变, 忽略气泡的破碎或聚合, 不考虑气泡浮升力和虚拟质量力的影响。其计算结果与 LAPIN 相近, 即观察到与实际相符的循环流场, 但也仅局限于流速较低的层流层。TORVIKR 和 SVENDEN^[5]以及 JAKOBSEN 等^[6]应用稳态 Euler/Euler 方法来描述气泡在液体中的运动, 所提出的模型耦合了曳力、升力和虚拟质量力, 其研究表明曳力对这一过程的影响最为重要, 并分别给出一系列曳力系数表达式。HUGO 等^[7]综合前人的研究后指出, 虽然数值模拟技术有了很大的进步, 但是对气泡在液体中运动的认识仍然较少。而目前较为完善的研究方法是 VOF 方法, 在用于模拟气泡流时, 气泡被认为是可变形的, 甚至可以模拟气泡的自由液面, 大量的数值模拟实践表明^[8-14], VOF 模型对于预测射流破碎、流体中大泡的运动和气液界面的稳态和瞬态处理具有优良的表现。近来, 许多学者致力于冶金过程中气液两相流的研究而且发表了许多相关的论文^[15-22], 并逐渐认识到研究气泡驱动液体流动只有采用瞬态三维模型才能获得准确的结果。

文献有关气液两相流动的研究大多是在低速气流条件下进行的, 且主要集中于中间包, 有关高速气流条件下氧气底吹铜熔池熔炼过程的研究迄今尚未发现相关的理论及数值模拟的研究报告, 有关氧气底吹过程的研究工作不够全面和深入。系统地研究氧气底吹熔池熔炼炉, 对开发氧气底吹熔池熔炼技术, 提高对底吹熔池熔炼炉内流动、传热、传质控制的认识, 对于氧气底吹熔池熔炼炉技术的应用实践, 均有重要的理论和现实意义。本文作者在建立合理的底吹熔炼炉

基本模型的基础上, 应用 CFD 软件中多相流模型对氧气底吹铜熔炼炉内的气液两相流动过程进行仿真, 着重模拟研究氧气底吹熔炼炉内的气泡运动特性参数、气含率分布规律、氧枪出口附近压力变化以及液面波动情况。

1 物理模型

1.1 研究对象及操作参数

以某公司的 1 台 $d 7 \text{ m} \times 15.094 \text{ m}$ 的卧式可回转的底吹铜熔池熔炼炉为研究对象, 炉膛纵截面为半径 3.5 m 的圆。气体入口为反应区喷气侧 9 个交叉布置的氧枪, 其中 5 个 7° 氧枪, 4 个 22° 氧枪。氧枪的布置如图 1 所示。铜熔池熔炼炉内主要是铜锬和渣, 熔体高度为 1.5 m, 其中上部为 0.25 m 渣层, 下部 1.25 m 铜锬, 铜锬的参数如表 1 所列。

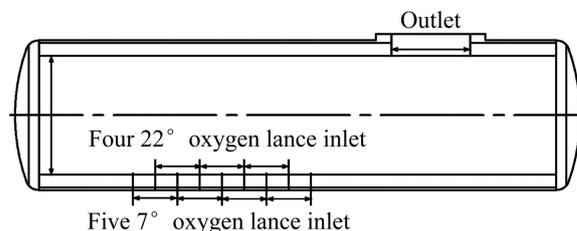


图 1 底吹熔炼炉的结构及其氧枪的布置

Fig. 1 Sketch diagram of bottom-blown furnace and lance

表 1 铜锬的参数

Table 1 Parameters of copper-matte

Density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Specific heat capacity/ ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Viscosity/ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	Surface tension/ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	Thermal conductivity/ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)
4 440	620	0.004	0.33	8.9

1.2 网格划分

网格是数值计算的基础, 网格质量直接影响数值解的计算精度。在多相流模拟过程中, 由于气液界面上存在着很大的密度梯度, 较粗的网格很难捕捉这一密度变化, 导致难以保证气泡质量守恒和光滑气泡表面的求解计算。因此, 在对底吹熔炼炉进行网格划分时, 为了保证计算精度并加快收敛速度, 采用分块网格化和局部加密的手段, 整个熔炼炉体分为 12 块, 分别是 9 支氧枪、烟道、铜锬区域、烟气区域。分别对 9 支氧枪区域(即反应区)进行局部加密, 底吹熔炼炉整体网格总数约为 107 万。

2 数学模型及边界条件

2.1 模型假设

- 1) 气液交界面作自由液面处理。
- 2) 不考虑化学反应, 初始状态熔池内熔体温度均匀分布, 忽略温度对气相的影响。
- 3) 静止熔体初始高度为 1.5 m, 忽略渣的影响, 设熔池内熔体为铜铈。
- 4) 底吹氧枪直径为 60 mm 的圆筒, 气体为可压缩氧气。
- 5) 固体壁面看作无滑移边界, 靠近壁面处的边界层内采用标准的壁函数进行处理。

2.2 数学模型

采用三维非稳态和 Simple 算法进行模拟计算, 压力的离散用 PRESTO 格式, 动量方程用二阶迎风格式。通过对氧枪入口连续吹气, 求解瞬态三维湍流扩散方程, 得出气相在底吹熔炼炉熔体内的分布情况以及自由液面运动特征。描述 VOF 两相流模型的基本控制方程如下:

1) 体积分方程

在 VOF 模型中, 跟踪相与相之间的界面是通过求解一相或多相的体积分数的连续性方程来完成的。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (1)$$

其中: \dot{m}_{pq} 是 p 相到 q 相的质量输送, \dot{m}_{qp} 是 q 相到 p 相的质量输送, kg; α_q 为第 q 相的体积分数; S_{α_q} 为源相, 默认情况下为 0; \mathbf{v}_q 为第 q 相的速度, m/s; ρ_q 为第 q 相的密度, kg/m³。

2) 动量方程

通过求解整个区域内的单一的动量方程, 作为结果的速度场是由各相共享的, 如下式所示, 动量方程取决于通过属性 ρ 和 μ 的所有相的体积分。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

其中: p 为压力, Pa; \mathbf{g} 为重力加速度, m²/s; \mathbf{F} 为作用于控制容积上的体积力, N; \mathbf{v} 为流体速度, m/s; μ 为有效黏度, Pa·s。

由于底吹熔池熔炼过程的高压富氧由氧枪进入熔池时为射流并且在铜铈区域会形成漩涡, 标准 $k-\varepsilon$ 模型不能很好地模拟这类流动, 本文作者采用 RNG $k-\varepsilon$

湍流模型, 它成功地模拟许多复杂的水流问题。对近壁区的流动及低雷诺数的流动, 使用壁面函数法或低雷诺数 $k-\varepsilon$ 模型来模拟。

2.3 边界条件

入口共 9 支氧枪, 其中 5 个 7°氧枪, 4 个 22°氧枪, 入口处设置为质量入口边界条件。由于速度较大 ($M_a > 0.3$), 故入口气体为可压缩气体。单个氧枪入口质量流量为 0.48 kg/s, 湍流强度为 3.2%, 采用无滑移边界条件, 壁面处速度为零。

3 模型验证

利用前面所介绍的数学模型及数值模拟的方法, 对水模型试验装置中水-氮气两相流动过程进行数学建模与数值计算, 并将计算结果与实验结果进行比较分析, 以此来对所用模型进行验证。

水模型试验模型以某公司的富氧底吹熔炼炉为原型, 比例为 1:10, 设计尺寸及实验参数如表 2 所列。

表 2 模型尺寸及实验参数

Table 2 Model dimensions and experimental parameters

Furnace diameter/m	Length/m	Lance diameter/m	Liquid level/m	Inlet velocity/(m·s ⁻¹)
0.35	1	0.06	0.15	2

在流动相对稳定的情况下, 对水模型实验中的气泡形成及其上浮过程应用高速摄像机观察, 实验结果与模拟结果的比较如图 2 所示。

气泡形成过程分为两个阶段: 第一阶段为膨胀阶段, 气泡附着于锐孔上, 直径不断增大; 第二阶段, 随着气泡直径的增大, 受浮力的影响, 气泡开始上浮, 形成缩颈, 气泡向远离锐孔的方向运动, 仅有颈保持其和锐孔的接触。由于气体的连续进入, 气泡不仅长大, 缩颈亦不断伸长, 直至气泡完全脱离。图 2(a)显示单个气泡脱离锐孔的过程, 当气泡脱离气孔时, 气泡近似椭圆形。

如图 2(b₁)、(b'₁)、(b₂)、(b'₂)和(c₁)、(c'₁)、(c₂)、(c'₂)所示, 在气泡的上升过程中, 椭圆型气泡上升一小段距离之后开始变成底部凹进的帽子形状, 并逐步形成蘑菇状, 在此段距离内气泡的上升速度很小, 接近于 0。

气泡上浮过程中的变形及合并必然伴随着破碎。如图 2(b₁)、(b'₁)、(b₂)、(b'₂)所示, 椭圆型气泡上浮变成蘑菇状气泡的过程中, 在尾部分离出小气泡; 如

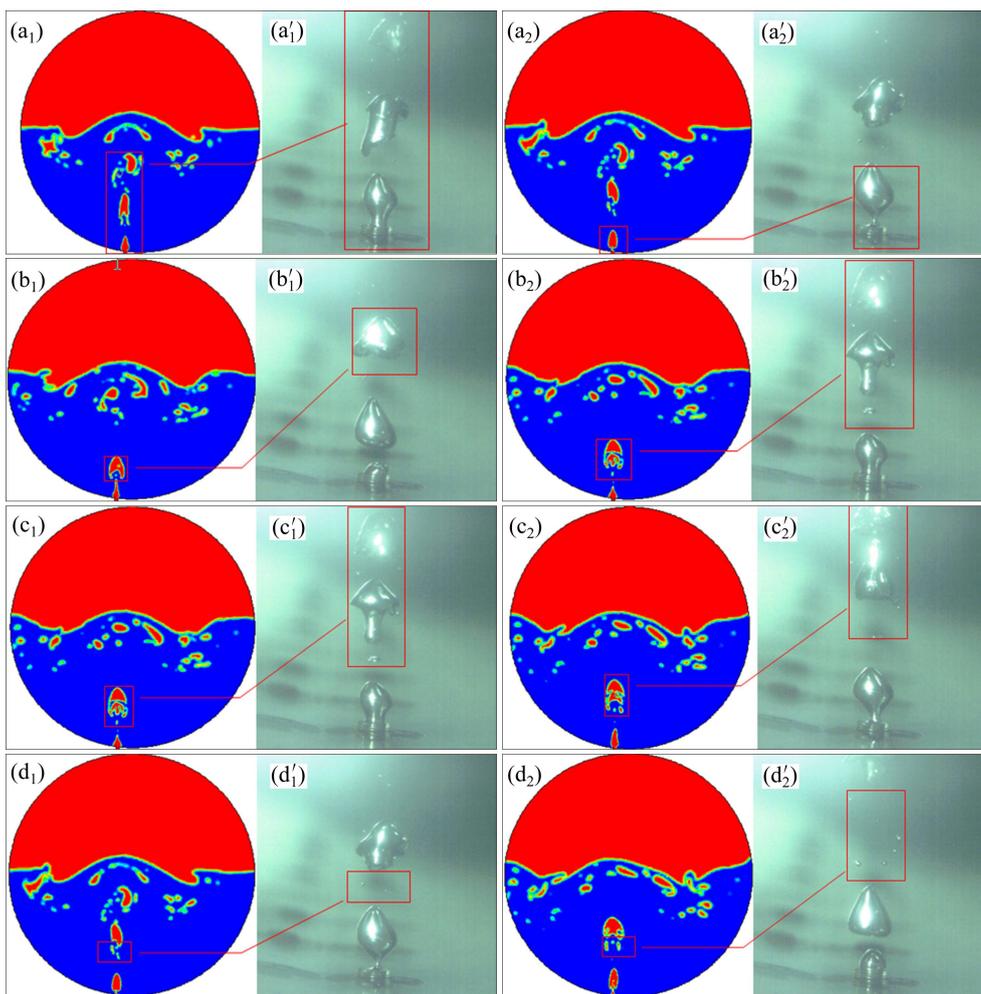


图 2 模拟结果与实验结果比较

Fig. 2 Comparison of simulation results((a₁), (a₂), (b₁), (b₂), (c₁), (c₂), (d₁), (d₂)) with experimental data((a'₁), (a'₂), (b'₁), (b'₂), (c'₁), (c'₂), (d'₁), (d'₂)) after air injection: (a₁), (a'₁), (a₂), (a'₂) Growth and departure of bubble; (b₁), (b'₁), (b₂), (b'₂) Bubble deformation; (c₁), (c'₁), (c₂), (c'₂) Bubble fusion; (d₁), (d'₁), (d₂), (d'₂) Bubble collapse

图 2(d₁)、(d'₁)、(d₂)、(d'₂)，在两气泡的合并过程中，两球帽状气泡合并，气泡的两侧尖端破碎并分离出小气泡。

通过对底吹熔炼炉水模型实验的数值模拟结果与实验结果进行定性比较分析可以看出：实验与数值模拟所得到的气泡运动过程的结果是一致的，因此本论文中所建立的数学模型，采用一系列求解方法用于模拟底吹熔炼炉内的多相流动是可行的，得到的结果比较准确。

4 结果与分析

4.1 氧枪出口气泡尺寸、形成时间及气泡在熔池内停留时间的分析

气泡尺寸、形成时间及其在熔池内的停留时间是

熔池熔炼过程中的重要参数，它们对气相在熔池内的分布和利用情况影响显著。为了深入了解底吹熔炼炉内的气泡形成及运动机理，提取氧枪喷入氧气初始 6 s 内连续气泡的形成时间、气泡脱离氧枪出口时短轴尺寸以及气泡在熔池内的停留时间等参数进行分析。熔池内连续形成的各气泡形成时间、短轴尺寸及停留时间如图 3 所示。

从图 3 中可以得出：从 $t=0$ s 时刻开始，氧枪出口处形成的第一个气泡在熔池内停留时间(脱离喷嘴上浮到液面的时间)较长，接近 1 s，这是由于初始时刻熔炼炉内熔体处于静止状态，气泡上浮过程中受力主要包括表面张力、浮力和黏性力等。而气泡周围的熔体由于气泡的上升带动其运动，气泡上部区域则近于静止，因此氧枪出口形成的第一个气泡的运动过程相当于静止液体中的单气泡上浮过程。随着时间的变化，熔池内的熔体在连续上升气泡或者气团的搅拌作

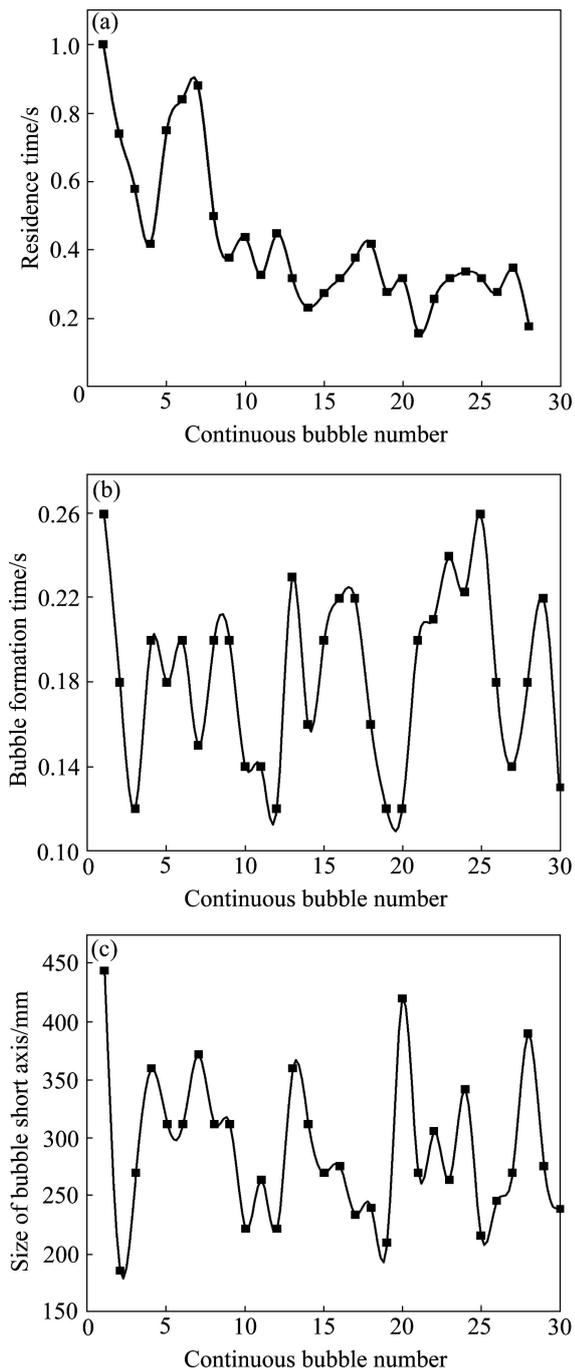


图3 熔炼过程中气泡形成时间、停留时间及其短轴尺寸变化规律

Fig. 3 Variation laws of bubble formation time, bubble residence time and bubble short axis size in smelting process: (a) Residence time; (b) Bubble formation time; (c) Size of bubble short axis

用下, 气泡流两侧产生旋流, 使得其附近形成较强的搅动流场。气泡在上升的过程中不但受到后一气泡对其的推动作用, 还受到周围流动熔体搅动作用的影响, 其上浮时间开始缩短。第1~4个气泡的停留时间逐渐

变小, 其中第4个气泡的上浮时间为0.4 s, 为第1个气泡的2/5, 可见, 周围熔体流场对气泡上浮时间的影响较大。初始时刻, 熔体液面处于静止, 当第一个气泡达到自由液面时, 自由液面产生第一次大的扰动, 使熔池内熔体向两侧波动。由于氧枪是偏心设置, 熔池内熔体会出现左右摆动的现象, 导致气泡在熔池内部的运动轨迹各异, 各自在熔池内的停留时间会发生变化, 如图3(a)中第4~8个气泡停留时间波动情况。当气泡周围熔体被完全搅动起来时, 气泡在熔池内停留时间逐渐达到一个相对稳定的状态, 此时上浮时间波动范围为0.2~0.4 s, 平均停留时间为0.3 s。熔池内连续气泡形成时间的范围为0.12~0.25 s。通入熔池内的气相对熔池的搅动引起熔池内部熔体的流动、自由液面波动和氧枪出口处压力的变化, 使得氧枪出口处各气泡大小随着时间的变化而变化。气泡短轴大小主要集中在210~390 mm, 且大小气泡交替出现, 气泡生成频率约为5 Hz。当氧枪出口出现较大的气泡时, 其脱离氧枪出口时氧枪出口处压力突然变小, 与周围熔体区形成较大压力差, 给熔池产生大的扰动, 使熔体流向与流股界面成垂直的方向流动, 迅速补充到氧枪出口附近, 这种流动现象能够加速新生成的气泡上浮脱离氧枪出口, 使气泡形成时间较短而形成小气泡; 当前一较小气泡脱离氧枪出口时, 对周围熔体产生的扰动较小, 因此熔体对随后产生的气泡的作用力较小, 有利于形成尺寸较大的气泡, 从图中可以看出, 每两个大气泡之间会出现2~3个较小的气泡。

4.2 熔池气含率分布情况分析

熔炼炉内气含率的分布情况是底吹熔池熔炼过程中的又一个重要参数。对其分布情况的掌握, 能够得出熔炼过程中高效反应区的位置。为了深入了解熔炼炉内反应区的气含率分布情况, 提取 $t=20$ s时反应区内不同高度水平截面的气含率进行比较分析, 所得结果如图4(a)所示。

从图4(a)可以看出: 随着反应区水平截面高度的增加, 截面气含率总体呈上升趋势。在熔池下部, 由于气泡主要是处于变形阶段, 上升速度较小, 各气泡之间发生融合以及破碎的概率性极小, 各气泡基本以单独形式存在, 因此, 水平截面气含率总体都比较小, 随着反应区水平截面高度的增加气含率大小变化不明显, 维持在5%~10%左右; 在熔池的上部, 气泡所受压力逐渐变小, 因此气泡的上浮速度逐渐增大, 前后两个气泡融合和破碎的概率较大, 其过程中产生的小气泡分散在周围熔体中, 停留时间较长, 水平截面气含率随着截面高度增加而增大的趋势很明显, 其气含

率从 10% 上升到 39%。

为了进一步了解熔池内气含率的分布情况, 以铜铋区和整个熔池区(即铜铋区+渣区)作为比较对象, 提取熔池内流体运动相对稳定的 19~24 s 时间内数据进行比较, 分析两区域气含率随时间的变化情况, 其分析结果如图 4(b)和(c)所示。

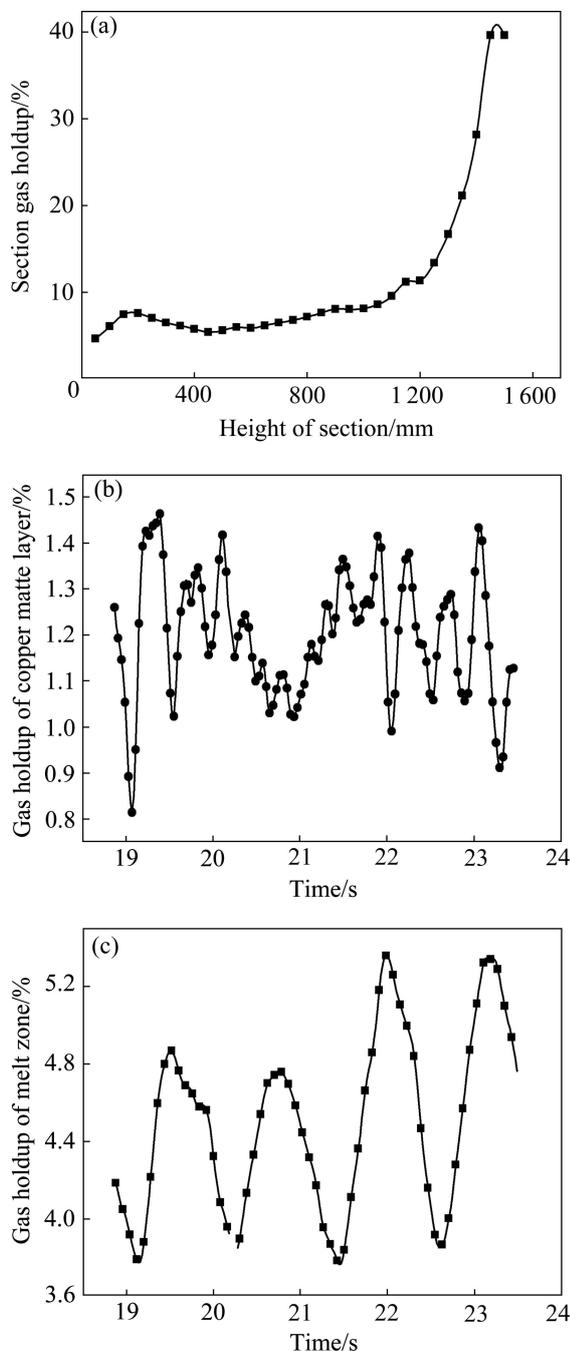


图 4 气含率随高度和时间的变化关系

Fig. 4 Variation of gas holdup with height and time: (a) Average gas holdup of copper matte zone and melt pool; (b) Average gas holdup of copper matte zone; (c) Average gas holdup of melt

分析图 4(b)和(c)可知: 随着时间的变化, 由于熔池内熔体内部的扰动以及自由液面的波动, 铜铋区和整个熔池区气含率大小均呈上下波动, 在一定范围内变化。其中铜铋区气含率在 0.8%~1.3% 内变化, 整个熔池区的气含率在 3.8~5.4% 内波动, 整个熔池区的平均气含率约为铜铋区的 4 倍。

综合图 4(a)、(b)和(c)可知: 不管是从截面气含率分布情况还是区域气含率分布情况来看, 在熔池底部, 各氧枪之间形成的气泡合并和破碎概率很小, 其主要发生在熔池的上部。因此, 在底吹熔池熔炼过程中, 气相主要分布在熔池的上部, 高效反应区存在于熔池上部熔体中。

4.3 氧枪出口压力波动情况分析

气泡后座是喷吹冶金中普遍存在的一种现象, 在底吹熔池熔炼炉内, 氧枪出口处的气泡后座现象是破坏氧枪及其周围炉衬的重要原因, 而氧枪出口附近的压力波动是其一种表现形式。

当气泡后座现象发生时, 氧气底吹熔炼炉的高温氧化反应将靠着或者贴近炉底进行, 使得氧枪周围的炉衬受到 3 种破坏: 高温热冲击、化学腐蚀及后座力场的机械冲刷。这 3 种破坏的强度和范围随着气泡后座的强度和范围的增大而增大。对于氧气底吹熔炼炉而言, 气泡后座对炉底的破坏主要是通过以上 3 种破坏方式造成的。其中后座力场的密度较低, 所以, 气泡后座对底吹炉底的破坏主要是通过将其引向炉底的辅助作用。

气泡在氧枪出口处形成和升起时对炉底(以及后墙)的反冲以及在上一个气泡升起, 下一个气泡未形成前金属向氧枪倒灌和渗透都会引起出口压力的急剧变化, 这都会影响氧枪和炉墙的使用寿命。因此, 为了观察气泡后座现象的发生频率及作用时间, 通过监测 9 个氧枪出口处的压强变化情况, 分析其波形, 进而研究气泡后座现象。

如图 5(a)所示, p_1 、 p_3 、 p_5 、 p_7 和 p_9 为 5 个 7° 氧枪出口处的压力, 在 19.01~19.97 s 内, 5 个 7° 氧枪出口处的压力都间断性地出现压力急剧变大的峰值, 其中 p_1 、 p_3 、 p_5 、 p_7 和 p_9 出现大的压力峰值频率分别为 6、7、5、6 和 8, 各点最大压力峰值分别为 176.073、157.730、167.685、168.921 和 252.889 kPa。从 p_9 第 8 次出现大的压力峰值过程可以清晰地看出气泡后座现象的发生、发展和消失过程, $t=19.83$ s 时, $p_9=54.458$ kPa, 后座现象开始发生, 氧枪出口处压力较小, 但压力呈增大的趋势; $t=19.85$ s, $p_9=252.889$

kPa, 压力突然增大, 大小为 $t=19.83$ s 时的 4.64 倍, 此时氧枪出口处压力达到最大值, 高温氧化性气体被引向炉底, 高温氧化反应区靠着或者贴近炉底进行; $t=19.87$ s, $p_9=103.005$ kPa, 压力急剧减小, 气泡后座现象开始衰减; $t=19.89$ s, $p_9=47.232$ kPa, 此时压力达到最小值, 气泡后座现象消失。由上可知, 气泡后座现象发生、发展及衰减过程总时间为 0.06 s。

如图 5(b)所示, p_2 、 p_4 、 p_6 和 p_8 为 4 个 22°氧枪出口处压力, 从图上可以看出, 在 19.01~19.97 s 内其有类似 7°氧枪出口处的压力波动现象。其中 p_1 、 p_4 、 p_6 和 p_8 出现大的压力峰值的频率分别为 5、5、5 和 4, 其中各点最大压力峰值分别为 109.209、220.715、186.704 和 124.535 kPa。各氧枪出口处气泡后座现象的发生、发展和消失过程与 p_9 时的类似, 整个过程的作用时间约为 0.06 s。

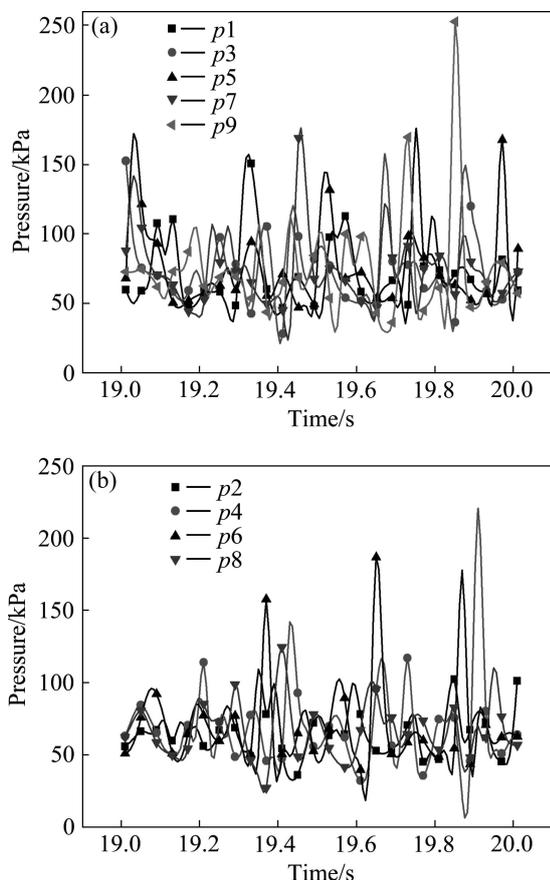


图 5 氧枪出口压力随时间的变化情况

Fig. 5 Variation of pressure with time at lance inlet: (a) Pressure near exit of 7° oxygen lance; (b) Pressure near exit of 22° oxygen lance

从图 5(a)及(b)分析可知: 7°氧枪出口处气泡后座现象发生的频率和最大压力峰值都比 22°氧枪出口处大。这是由于在液面高度一定的条件下, 22°氧枪出口

处所受液体静压比 7°氧枪出口处小, 因此, 在各氧枪入口流量一定的条件下, 22°氧枪出口余压比 7°氧枪的大, 这有利于缓冲后座现象的不利影响。

4.4 沉淀区液面波动情况分析

为了了解自由液面的波动情况, 选取 7°氧枪纵截面熔体液面 10 个点为监测对象。如图 6 所示, 分别提取出各点在 X 、 Y 方向上液相速度大小随时间的变化情况, 分析液面各点在 X 、 Y 方向上液相速度大小随距离的衰减情况, 进而预测液面波动的衰减情况。液面处监测点 1~10 分别对应 $Y=-0.25$ m, X 为 1.437、2.087、7.287、7.937、8.587、8.587、9.887、11.187、12.487、13.787 及 15.087 m 液面处的点。

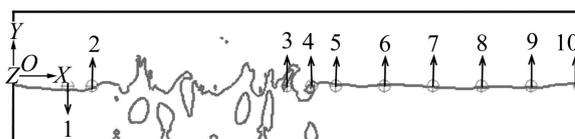


图 6 自由液面监测点示意图

Fig. 6 Schematic of monitoring points on free liquid surface: 1~10—Monitoring point

气-液界面处形成的波在传播过程中, 由于介质粘滞性, 使得波在介质中传播时造成质点间的内摩擦, 从而使一部分动能转换为热能, 通过热传导进行热交换, 导致波能的损耗, 一部分波沿径向扩散。底吹熔炼炉内波在炉内的传播过程中是有阻尼的, 不管是液体内部的粘滞性还是上部烟气的运动, 都会使波动在沉淀区的传播过程产生能量衰减。因此通过监测距离氧枪区不同距离的点在 Y 方向上峰值的大小来研究液体波传播过程中波幅的衰减过程, 其中 X 方向不同距离处 Y 方向速度大小随时间的变化如图 7(a)所示。1/5~1/10 分别为监测点 5~6 处 Y 方向速度大小。

从图 7(a)可以看出: 点 5($X=8.587$ m)距离氧枪区较近, 波幅与波源(氧枪区)相差较小, 其在 Y 方向的速度绝对值最值较大, 最大达 1.13 m/s。随着监测点距离氧枪区距离的增大, Y 方向上速度波动曲线最值逐渐变小, 点 6~10 Y 方向速度最值分别为 0.48、0.279、0.25、0.22、0.035 m/s。液面表面波在传播的过程中, 一方面受到波二维径向扩散作用, 另一方面受分子粘滞力的影响, 大部分动能转化为分子内能。从各点 Y 方向上的速度最值大小来看, 点 5、点 6 和点 7 靠近氧枪侧沉淀区, 处于搅拌区域, 其内端动能耗散率较大, 大部分动能转化为分子内能, 速度最值衰减很明显,

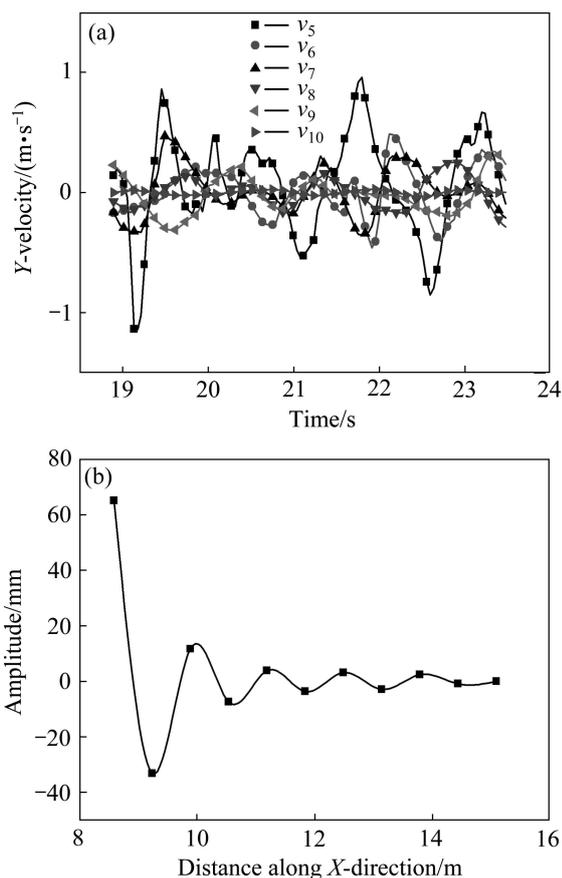


图7 自由液面速度及波幅的变化

Fig. 7 Variation of velocity and amplitude of free liquid surface: (a) Variation of Y-velocity component with time; (b) Attenuation of wave during propagation

从 1.13 m/s 迅速减小到 0.279 m/s。

从点 5~10 Y 方向速度随时间的变化可知, 各点 Y 方向速度大小随时间的变化曲线类似正弦曲线。如图 7(a)所示, $t=19.03$ s, 点 5 处质点波处于波峰, $v_5=0$ m/s; $t=19.09$ s, 质点向负方向运动, 速度逐渐增大, $v_5=-0.5208$ m/s; $t=19.13$ s, 到达平衡位置, 速度达到负向最大值 $v_5=-1.1339$ m/s; $t=19.25$ s, 向负方向运动, 速度逐渐减小, $v_5=-0.5987$ m/s; $t=19.29$ s, 到达波谷, $v_5=0$ m/s; $t=19.37$ s, 向 Y 正方向运动; 速度逐渐增大, $v_5=0.2616$ m/s; $t=19.45$ s, 到达平衡位置, 速度达到正向最大值, $v_5=0.8578$ m/s; $t=19.57$ s, 然后向上部运动, 速度逐渐减小, $v_5=0.4940$ m/s; $t=19.71$ s, 到达波峰 $v_5=0$ m/s。由点 5 处质点速度上下波动情况可知, 波动周期约为 0.7 s, 频率为 1.4 Hz。

机械波传播的实质是能量的传递, 在波的传播过程中, 会引起机械波能量的损耗, 自由表面上部烟气的流动以及双排氧枪的布置方式引起的波的叠加等都会对波幅产生不同的影响。从点 5 处 Y 方向速度随时

间的变化可知, 其正负峰值绝对值并不相等, 点 6~10 Y 方向速度大小随时间的变化曲线类似点 5。

在波传播过程中, 作用于气、液界面波中的回复力主要是重力和表面张力, 当重力作用较为突出时, 形成的波为重力波; 当表面张力作用较突出而形成的波称为毛细波或者表面波。

熔池熔炼炉内, 沉淀区气-液界面波动的传播过程中波幅衰减很快, 大部分区域波的波幅和波速都是较小, 质点上下运动过程中主要受重力作用。由此可知, 在波传播过程中, 各点在 Y 方向的动能主要转化成势能, 因此可以通过各点 Y 方向的速度峰值来预测各点处的波幅。

从图 7(a)上可以看出, 点 6~10 各点 Y 方向速度最大值分别为 0.48、0.279、0.25、0.22 和 0.043 m/s, 若各点处质点在向上运动的过程中动能完全转化为势能, 可以得出其最大上升高度分别为 65.14、11.75、3.97、3.18、2.46 和 0.09 mm, 由此可以看出沉淀区波幅衰减趋势如图 7(b)所示。其中 X 方向的起点为图 6 中坐标轴原点。

从图 7(b)可以看出, 靠近氧枪区一小段距离内, 波幅衰减很快。在点 $X=8.587$ m(点 5)处, 其波幅较大, $H=65.24$ mm; 当 $X=11.187$ m(点 7), $H=3.97$ mm; 两点之间相差 2.6 m, 点 7 处波幅约为点 5 处波幅的 1/16。这是因为点 5~7 处于氧枪侧搅拌半径之内, 其间液相湍动能耗散率较大, 在分子粘性作用下通过内摩擦不断地将湍流动能转化为分子运动的动能, 波传播过程中受到波的二维扩散及分子粘性里的影响, 波幅衰减很快。而点 8~10 距离氧枪区较远, 波传播过程中主要受到波的二维扩散的影响, 因此其波幅衰减比较平缓, 当波源处的波传播到出渣口附近时, 液面趋于静止。

5 结论

1) 实验所得到的结果与数值模拟所得到的结果是一致的, 因此使用 VOF 模型模拟铜硫-氧气两相流动是可行的。

2) 氧枪出口处连续气泡的生成时间为 0.12~0.25 s 之间, 气泡在熔池内的上浮时间为 0.2s~0.4 s 之间, 气泡在熔池内的平均上浮速度为 4 m/s 左右。气泡生成频率约为 5 Hz。

3) 气泡破碎或合并主要发生在熔池上部。气含率在熔池上部较大, 熔炼过程中的高效反应区存在于熔池上部区域。

4) 7°和 22°氧枪出口气泡后座现象出现的平均频率分别约为 5 Hz 和 7 Hz, 作用时间为 0.06 s。

5) 波在传播的过程中, 其波幅衰减得很快, 当波传播到出渣口附近时, 液面趋于静止。

REFERENCES

- [1] PAR G J, LAGE T I J. The use of fundamental process models in studying ladle refining operations[J]. *ISIJ Int*, 2001, 41(11): 1289–1302.
- [2] 詹树华, 赖朝斌, 萧泽强. 侧吹金属熔池内搅动现象[J]. *中南工业大学学报: 自然科学版*, 2003, 34(2): 148–151.
ZHAN Shu-hua, LAI Cao-bing, XIAO Zhe-qiang. CFD analysis of gas stirring behavior in side-blown metallic bath[J]. *Journal of Central South University of Technology: Natural Science*, 2003, 34(2): 148–151.
- [3] LAPIN A. Numerical simulation of the dynamics of two-phase flow in bubble columns[J]. *Chemical Engineering Science*, 1994, 49(21): 3661–3674.
- [4] SOKOLIEHIN A, EIGENBERGER G, LAPIN A. Dynamical numerical simulation of gas-liquid two-phase flows[J]. *Chemical Engineering Science*, 1997, 52(9): 611–626.
- [5] TORVIKR, SVENDSEN H F. Modeling of slurry reactors: A fundamental approach[J]. *Chemical Engineering Science*, 1990, 45(6): 2325–2336.
- [6] JAKOBSEN H A, SVENDSEN H F, HJARBO K W. On the prediction of local flow structures in internal loop and bubble column reactors using a two fluid model[J]. *Chemical Engineering Science*, 1993, 17(5): 5531–5536.
- [7] HUGO A, JAKOBSEN B H, SANNAS S G, HALLVARD F S. Modeling of vertical bubble-driven flows[J]. *Ind Eng Chem Res*, 1997, 36: 4052–4074.
- [8] NABAVI M, SIDDIQUI K, CHISHTY W A. 3-D simulations of the bubble formation from a submerged orifice in liquid cross-flow[C]//2009 ASME Fluids Engineering Division Summer Conference, FEDSM2009. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2009: 863–869.
- [9] FARHANQI M M, PASSANDIDEH-FARD M, BAQHERIAN B. Bubble rise and departure from a viscous liquid free surface[C]//2008 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE 2008. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2009: 1893–1900.
- [10] LIU Hong, XIE Mao-zhao, YIN Hong-chao, WANG De-qing. VOF simulations of gas bubbles motion in a reciprocally stirred flow[C]//2010 International Conference on Frontiers of Manufacturing and Design Science, ICFMD2010. Zurich: Trans Tech Publications, 2010: 2494–2498.
- [11] WANG Xiao-ling, DONG Hai-feng, ZHANG Xiang-ping, YU Liang, ZHANG Suo-jiang, XU Yan. Numerical simulation of single bubble motion in ionic liquids[J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(22): 6036–6047.
- [12] WU Xiao-long, WU En-hua. Bubble creation and multi-fluids simulation[J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics*, 2010, 22(9): 1463–1467.
- [13] WANG Han, ZHANG Zhen-yu, YANG Yong-ming, ZHANG Hui-sheng. Numerical investigation of the interaction mechanism of two bubbles[J]. *International Journal of Modern Physics C*, 2010, 21(1): 33–49.
- [14] 潘良明, 张文志, 陈德奇, 许建辉, 许建军, 黄彦平. 附加惯性力对气泡破裂的影响[J]. *核动力工程*, 2011, 32(4): 37–41.
PAN Liang-ming, ZHANG Wen-zhi, CHEN De-qi, XU Jiang-hui, XU Jian-jun, HUANG Yan-ping. Effects of additional inertia force on bubble breakup[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2011, 32(4): 37–41.
- [15] CHEN Wen-yi, WANG Jing-bo, JIANG Nan, ZHAO Bin, WANG Zhen-dong. Numerical simulation of gas-liquid two-phase jet flow in air-bubble generator[J]. *Central South University of Technology*, 2009, 15(1): 140–144.
- [16] HASSAN N M S, KHAN M M K, RASUL M G, SUBASCHANDAR N. Modeling of air bubble rising in water and polymeric solution[C]//10th Asian International Conference on Fluid Machinery. New York: American Institute of Physics, 2010: 758–768.
- [17] LIANOS C A, GARCIA-HERNANDEZ H S, RAMOS-BANDERAS J A, DE BARRETO J, SOLORIO-DIAZ G. Multiphase modeling of the fluidynamics of bottom argon bubbling during ladle operations[J]. *ISIJ International*, 2010, 50(3): 396–402.
- [18] RABHA S S, BUWA V V. Volume of fluid simulations of rise of single/multiple bubbles in sheared liquids[J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(1): 527–537.
- [19] HASAN N, ZAKARIA Z B. Computational approach for a pair of bubble coalescence process[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2011, 32(3): 755–761.
- [20] XU Ling-jun, CHEN Gang, SHAO Jian-bin, XUE Yang. Numerical simulation of bubble behavior using VOF method[C]//2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering(ICETCE). Piscataway: IEEE, 2011: 2408–2411.
- [21] LIU He-ping, QI Zhen-ya, XU Mian-guang. Numerical simulation of 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.
- [22] WANG Han, ZHANG Zhen-yu, YANG Yong-ming, ZHANG Hui-sheng. Surface tension effects on the behavior of two rising bubbles[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2011, 23(2): 135–144.

(编辑 李艳红)