

喷吹方式对大型铜熔炼底吹炉流动特性影响研究^①

姜保成, 郭学益, 王亲猛

(中南大学 冶金与环境学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 基于计算流体力学方法, 采用 VOF 多相流模型和 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型, 对不同喷吹方式的大型底吹炉流动特性进行模拟, 分析了预稳过程、喷吹气体运动特征、气-钎-渣相互作用特征以及熔池混合效果。结果表明, 大型底吹炉的双枪喷吹由枪座上的两支氧枪共同形成一个叠加的气动搅拌区, 其内部存在显著的气-钎-渣相互作用, 为大型底吹炉提供良好动力学条件。9° 双枪喷吹混合效果较佳, 熔池气含率达到 2.70%, 平均速度为 0.20 m/s, 平均湍动能为 0.059 m²/s², 熔池内部扰动剧烈并且熔体喷溅较少, 有利于提高熔炼效率。

关键词: 底吹炉; 多相流; VOF 模型; 流动特性; 氧枪; 铜熔炼

中图分类号: TF811

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.04.021

文章编号: 0253-6099(2023)04-0092-07

Effect of Blowing Modes on Flow Characteristics of Large Bottom-Blown Furnace for Copper Smelting

JIANG Baocheng, GUO Xueyi, WANG Qinmeng

(School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: Based on computational fluid dynamics (CFD) method, a multiphase VOF model and Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model were used to simulate flow characteristics of a large bottom-blown furnace with different blowing modes, and analyze a pre-stabilization process, motion characteristics of blown gas, gas-matte-slag interaction characteristics and mixing effect in molten pool. The results show that the large bottom-blown furnace has two oxygen lances for blowing, which can altogether generate an enhanced pneumatic agitation zone, resulting in a remarkable gas-matte-slag interaction in the furnace, thus providing good dynamic condition for the large bottom-blown furnace. The furnace with double lances blowing at an angle of 9° can bring a better agitation effect, leading to the gas content at a rate of 2.70%, average speed of 0.20 m/s and average turbulence energy of 0.059 m²/s² in the molten pool. There is severe internal disturbance and less splashing of melt in the molten pool, which is beneficial to improving smelting efficiency.

Key words: bottom-blown furnace; multiphase flow; VOF model; flow characteristics; oxygen lance; copper smelting

氧气底吹熔炼炉已发展为铜熔炼的重要炉型之一, 具有原料适应性强、富氧熔炼强度高、技术兼容性好等优势^[1-3]。近年来, 氧气底吹炉呈现出大型化发展趋势, 炉体规格和处理能力大幅增长^[4]。底吹炉内气动搅拌与熔炼反应的高效进行密切相关, 早前的研究主要围绕中小型底吹炉的单枪喷吹方式进行, 文献[5]对氧气底吹熔池熔炼过程中气泡的生长行为进行了研究, 文献[6]用田口方法对底吹熔池熔炼炉进行了氧

枪结构多目标优化研究, 文献[7]利用 Fluent 软件研究了不同流量下的熔体流动规律。目前, 大型底吹炉氧枪数量已超过 20 支^[8-9], 设置为单座双枪的双枪喷吹模式, 相比中小型底吹炉有较大改变。

国内外对底吹炉不同喷吹方式引起的流动变化研究较少, 本文使用 ANSYS Fluent 系列软件对不同喷吹方式的大型底吹炉流动特性进行数值模拟, 为大型底吹炉设计优化及生产实践提供指导。

① 收稿日期: 2023-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(U20A20273); 湖南省杰出青年科学基金(2022JJ10078); 湖湘青年英才项目(2021RC3005)

作者简介: 姜保成(1995—), 男, 云南玉溪人, 博士研究生, 主要从事有色金属冶金数值模拟与过程强化研究。

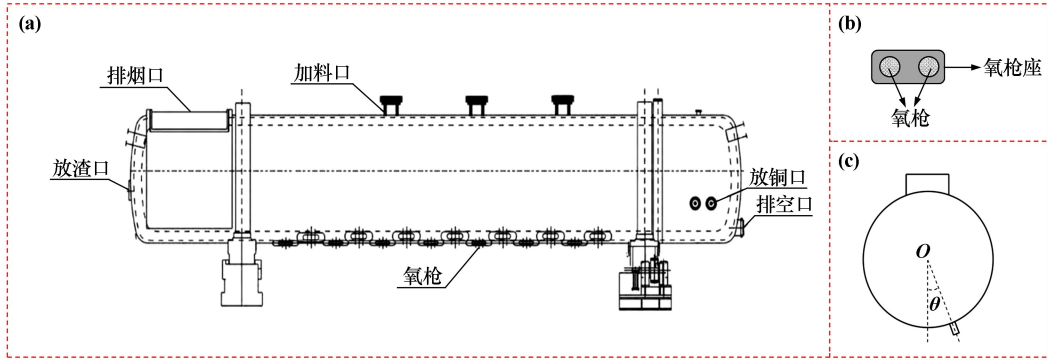
通信作者: 王亲猛(1986—), 男, 山东济宁人, 教授, 主要从事有色金属清洁冶金、冶金过程计算机模拟与强化研究。

1 模型构建

1.1 物理模型

以国内某冶炼厂的大型氧气底吹炉为研究对象,其炉体规格为 $\Phi 5.8 \text{ m} \times 30 \text{ m}$, 结构如图 1(a) 所示^[8]。

在有限的炉身长度上,该大型底吹炉配置的氧枪数量为 28 支,氧枪两两成对固定在一个枪座上,与底吹炉轴向中心线分别呈 9° 、 24° 的角度交错排布。氧枪单座双枪布置情况如图 1(b) 所示。氧枪角度是指氧枪中心线与竖直方向的夹角,如图 1(c) 所示。



(a) 炉体结构; (b) 氧枪布置; (c) 氧枪角度
图 1 大型铜熔炼底吹炉示意图

根据上述大型铜冶炼底吹炉氧枪分布规律做出适当简化,以一个枪座上两支氧枪的附近区域构建计算域,炉体顶端设一个烟气出口,其具体结构与尺寸如图 2(a) 所示。不考虑氧枪内部结构,以一个入口面代替,氧枪直径 60 mm,两枪的间距为 380 mm。使用 Fluent-Meshing 进行网格划分,并鉴于氧枪出口和气液交汇面附近气体流速快、流动相对复杂的特点,对相应区域进行局部加密处理。最终网格数量为 2.89×10^6 , 网格最大扭曲率为 0.35, 经无关性验证能够较好地满足计算要求,网格情况如图 2(b)、(c) 所示。

在同一模型中分别设置 4 种氧枪组合,如图 3 所示。 9° 单枪、 24° 单枪代表中小型底吹炉的喷吹情况(即单枪喷吹模式); 9° 双枪、 24° 双枪代表大型底吹炉的喷吹情况(即双枪喷吹模式)。 9° 和 24° 代表两排氧枪交错排布形成“一大一小”的角度特征。

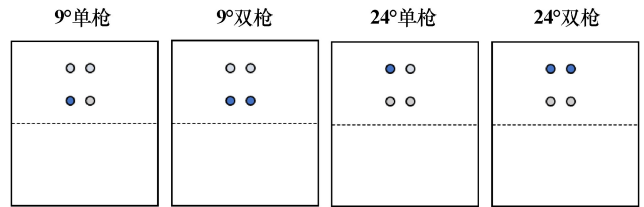
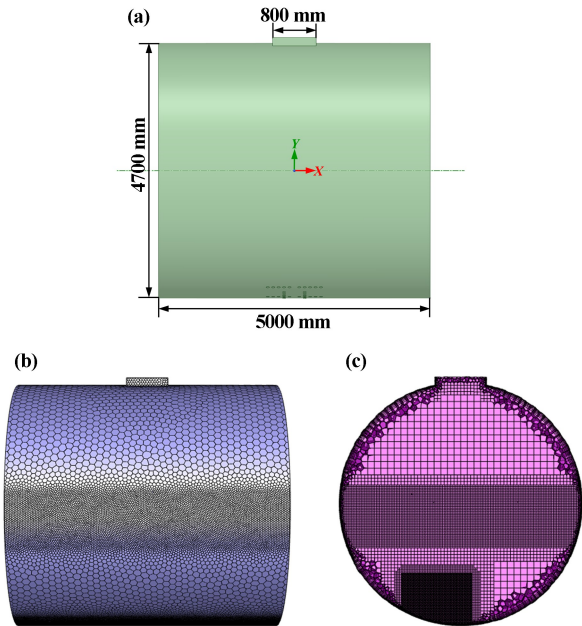


图 3 氧枪组合示意图(炉底视图)



(a) 几何模型; (b) 表面网格; (c) 内部网格
图 2 数值模拟物理模型与网格划分

1.2 数学模型

氧气底吹炉内发生着流动、传热、传质等复杂过程,在进行多物理场耦合模拟研究时,重点关注炉内流体流动状态,因此做出如下假设:① 重点研究大型底吹炉内气-铜-渣的相互作用,忽略加料、放渣和放铜等过程;② 忽略入炉矿料的物相状态,设置空气、铜钎、熔渣 3 个流体相;③ 忽略熔炼过程发生的复杂化学反应,以及反应热带来的影响。

根据相关研究基础,选取 VOF 多相流模型和 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型开展数值模拟,主要控制方程^[10-13]如下:

1) 连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_i \alpha_i) + \nabla \cdot (\rho_i \alpha_i \vec{v}_i) = 0 \quad (1)$$

式中 ρ_i 为第 i 相的密度, kg/m^3 ; α_i 为第 i 相的体积分
数; \vec{v}_i 为第 i 相速度矢量, m/s ; t 为时间, s 。

2) 动量方程:

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

式中 ρ 为混合相密度, kg/m^3 ; p 为压力, Pa ; μ 为黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; \vec{v} 为相速度矢量, m/s ; \vec{g} 为重力加速度, m/s^2 ; \vec{f} 为界面力源项, N 。

3) 能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [v(\rho E + p)] = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \Delta T) + S_h \quad (3)$$

式中 E 为能量, J ; p 为压力, Pa ; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; k_{eff} 为有效导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; S_h 为能量方程源项, W/m^3 。

4) Realizable k - ε 湍流模型控制方程组:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho v_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho v_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (5)$$

式中 k 为湍流脉动动能的平均值, m^2/s^2 ; ε 为湍流耗散率, $\%$; G_k 为平均速度梯度产生的湍动能, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$; Y_M 为浮力影响产生的湍动能, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$; G_b 为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$; μ_t 为湍流黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。湍流模型中的常数 $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$, S_ε 、 $C_{3\varepsilon}$ 为默认值。

此外, 本文采用非稳态计算方式, 以 PISO 格式作为压强-速度关联形式, 选择二阶迎风格式作为离散格式, 亚松弛因子保持默认值。时间步长为 0.001 s , 求解时间步数为 5000 步, 即瞬态求解 5 s 。

1.3 边界条件与物性参数

计算域入口设置为质量流量入口, 入口介质为空气, 每个入口流量为 $0.65 \text{ kg}/\text{s}$ 。出口设置为压力出口, 出口为微负压状态 (-20 Pa)。壁面则设置为标准壁面函数。初始化时用标准初始化方式, 并以入口作为起始位置完成计算域初始化, 再用 patch 功能对熔体区域进行局部初始化, 完成炉内铜铈、铜渣和空气的设置。根据生产实际情况, 铜铈厚度为 1300 mm 、渣层厚度为 800 mm 。

数值模拟的气相、铜铈和铜渣相的物性参数^[14-15]如表 1 所列。

表 1 气相、铜铈相和铜渣相的物性参数

流体相	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏度/ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	比热容/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	导热系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	初始 温度/K
气相	理想气体	1.7×10^{-5}	1006.43	0.024	298.15
渣相	3500	0.15	1260	1.2	1503.15
铜铈相	5000	0.03	600	3	1473.15

2 结果与讨论

2.1 预稳过程

为了更好地判断熔池所处状态, 在 9° 单枪喷吹工况时, 在底吹炉内熔体表面 (即气体与熔体交界面) 设置了 1 个监测面和 5 个监测点, 来监测面平均速度和点速度随时间的变化情况, 监测点分布如图 4 所示, 速度监测结果见图 5。

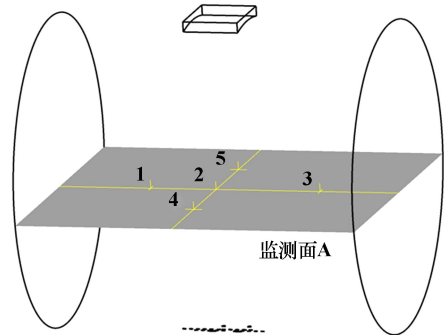


图 4 熔体表面监测面和监测点分布情况

由图 5 可知, 监测面 A 的平均速度随着时间增加先增大后处于波动平衡; 在 2 s 前, 底吹气体渐渐地搅动熔池, 将动能传递给熔体, 监测面 A 的平均速度逐渐增大; 2 s 之后, 监测面 A 的平均速度在 $0.45 \text{ m}/\text{s}$ 上下波动, 先大幅波动然后波动减弱, 达到“准稳态”。监测点 4 距离搅拌中心最近, 获得的搅拌最为剧烈, 其速度峰值最大, 为 $9.7 \text{ m}/\text{s}$ 。监测点 1 和 2 获得了较好的搅拌, 速度峰值约 $2.8 \text{ m}/\text{s}$ 。监测点 3 和 5 获得的搅拌效果较差, 速度峰值仅 $0.6 \text{ m}/\text{s}$ 左右。总体而言, 各监测点的速度随着时间增加先增大后处于波动平衡的趋势。部分监测点出现尖锐的速度峰, 是气泡在熔池表面破裂或飞溅的熔体回落到熔池时造成的局部速度陡增。综合监测面 A 和各监测点结果来看, 认为 4 s 后熔池达到“准稳态”, 形成了一个相对稳定的气动搅拌环境, 此变化趋势与其他研究结果一致^[16]。因此, 后续主要针对 4 s 后“准稳态”的熔池进行讨论。

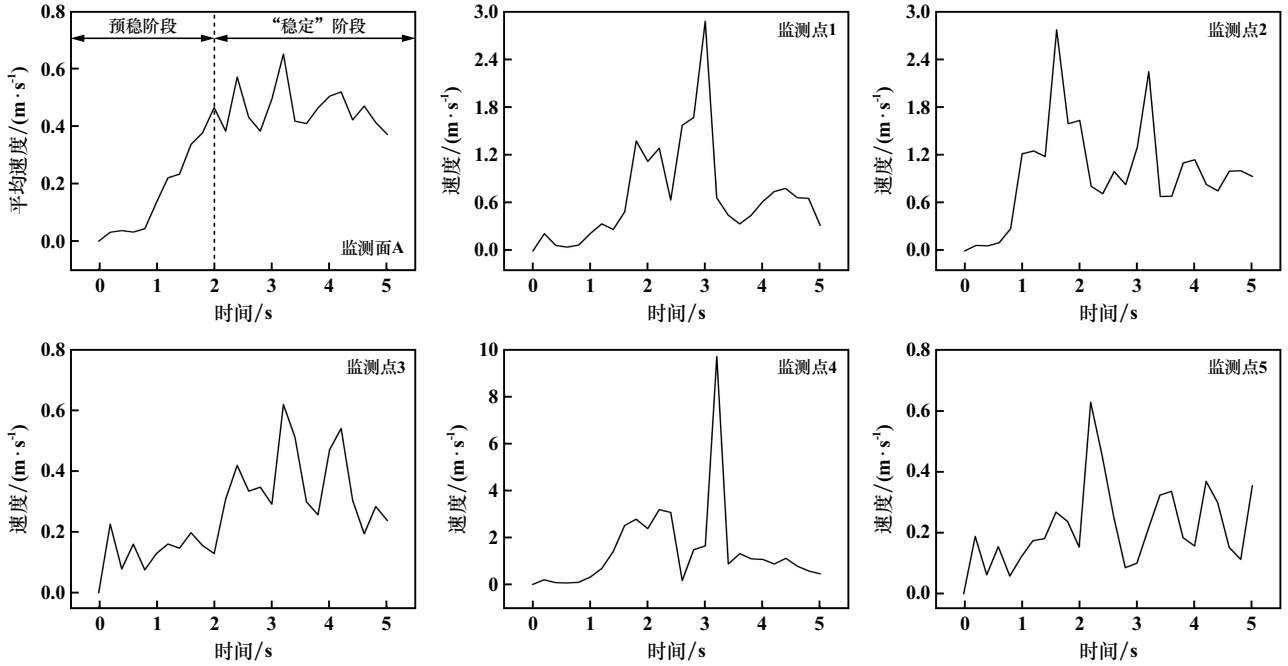
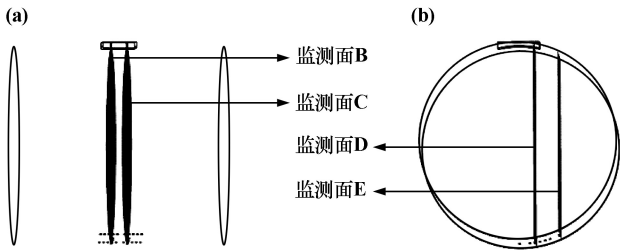


图 5 监测面 A 和各监测点的监测结果

2.2 喷吹气体运动特征

大型底吹炉通过多支氧枪从炉体底部喷入富氧空气,气体上升过程中对熔体产生搅拌作用,是重要的冶金过程强化措施之一。为分析不同喷吹方式对气体运动特征的影响,在炉内设置了 B、C、D、E 4 个监测面,如图 6 所示。监测面 B 是 $X=-0.19\text{ m}$ 的 YZ 平面,是炉径方向截面,位于左起第一支氧枪中心上方。监测面 C 是 $X=0.19\text{ m}$ 的 YZ 平面,是炉径方向截面,位于左起第二支氧枪中心上方。监测面 D 是 $Z=0.37\text{ m}$ 的 XY 平面,是炉长方向截面,位于 9° 氧枪中心上方。监测面 E 是 $Z=0.96\text{ m}$ 的 XY 平面,是炉长方向截面,位于 24° 氧枪中心上方。通过上述平面共同监测炉内流体在炉长和炉径方向的流动变化情况。



(a) 炉长方向视图; (b) 炉径方向视图

图 6 炉内监测面布置情况

大型底吹炉内烟气、铜钼、铜渣由于密度不同而表现出明显差异性,通过各监测面的密度分布情况可直观地观测到喷吹气体的运动情况,如图 7 所示。

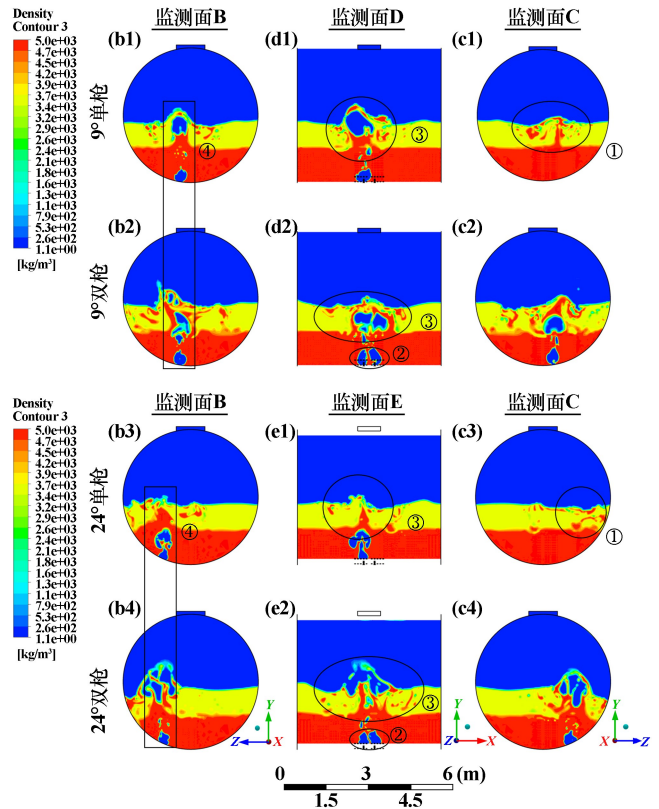


图 7 炉内各监测面密度分布情况 ($t=4.6\text{ s}$)

从图 7 中(b1)、(b3)的单枪喷吹情况可看出, 9° 氧枪和 24° 氧枪单枪喷吹时,气泡推动底层铜钼上升,使一部分铜钼进入到渣层中,在渣层内不断混合,形成一个气动搅拌区。另外,从图中(b1)、(c1)以及(b3)、

(c3)可以看出,在单枪喷吹情况下,气泡运动较为独立,但其搅拌范围已覆盖第二支氧枪上方对应的渣层位置,说明双枪喷吹的核心搅拌区必然存在一定程度的重叠,如图中标注①。从图中(d2)、(e2)的双枪喷吹情况可看出,双枪喷吹产生的气泡呈现出相互吸引的趋势,以及上浮过程中有碰撞或合并的趋势,主要是两端熔体对气泡挤压造成的,如图中标注②、③。同时,从图中(d1)、(d2)以及(e1)、(e2)可看出,双枪喷吹两支氧枪产生的2个气泡同时在熔体内部运动,共同对熔池产生搅拌,形成一个范围更大的气动搅拌区,如图中标注③。从图中(b1)~(b4)可看出,24°氧枪相比9°氧枪作用范围整体向炉壁一侧偏移,如图中标注④,这主要是氧枪角度设置导致气泡运动路径改变造成的,与漩涡中心因氧枪角度增大而偏移^[17]的研究结果一致。大角度氧枪会导致搅拌中心发生偏移,熔池另一侧的熔体搅拌程度被削弱,容易导致反应不充分。

2.3 气-钎-渣相互作用特征

为进一步分析底吹气体对熔体的搅拌和喷溅情况,提取出炉内不同相体积分等值面,如图8所示。

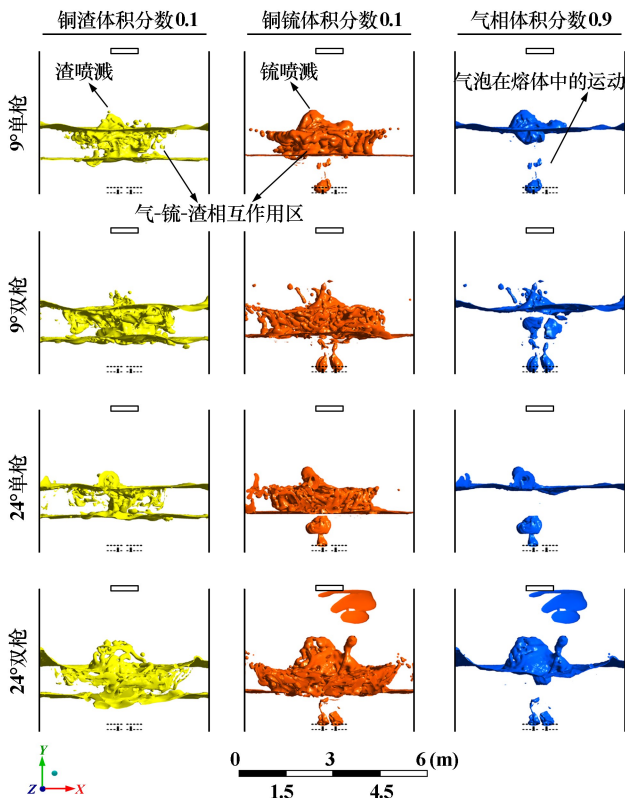


图8 炉内不同相体积分等值面分布情况($t=4.6\text{ s}$)

由图8可知,在铜钎层区域内,底吹气体在喷枪根部形成初始气泡,气泡受浮力作用缓慢上升,铜钎的挤压导致气泡发生一定程度形变。在渣层区域内,气-

钎-渣相互作用非常显著,一方面受渣和钎的共同挤压,气泡再次发生形变;另一方面则是有大量铜钎进入到渣层区域,并且分布范围较广,在一定空间范围内渣和钎之间相互换热、传质、反应。在烟气层区域内,存在铜钎和铜渣的喷溅现象,喷溅物主要是上浮气泡顶部的熔体,因气泡破裂而形成喷溅,而其中大部分来源于铜钎层,因此喷溅物以铜钎为主。单枪喷吹模式下,气-钎-渣在渣层区域内相互作用较弱,作用范围较小。双枪喷吹模式下,气-钎-渣在渣层区域内相互作用显著,作用范围有较大幅度扩增,熔池的气动搅拌作用更为剧烈,因此双枪喷吹熔体喷溅比单枪喷吹更强烈。其中,9°双枪喷吹呈现出熔体小液滴四处飞溅的喷溅形态,而24°双枪喷吹熔体以较大液滴飞溅,喷溅更严重。值得注意的是,24°双枪喷吹使炉壁已经挂上喷溅的熔体,对炉衬寿命产生危害。

为进一步探明炉内喷溅情况,在熔体上方设置15个XZ监测平面,如图9所示。从各截面分别提取铜钎和铜渣的体积分数据绘制于图10中。

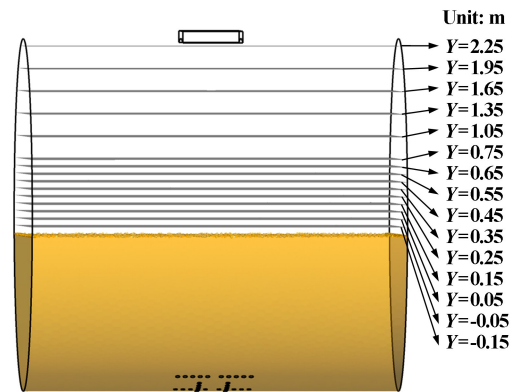


图9 炉内不同高度的监测表面

从图10可知,各类喷吹条件下,喷溅物体积分数随高度上升呈现出先急剧下降后趋于0的趋势,在熔体液面上方1 m(即 $Y=-0.25 \sim 0.75\text{ m}$)的空间内是喷溅物的主要停留空间,当高度超过1 m时喷溅物受重力作用回落至熔池内。但24°双枪喷吹时有喷溅物黏附在炉壁上(见图8),导致在 $Y=1.65 \sim 2.25\text{ m}$ 范围内都有铜钎存在。同时,研究发现,24°双枪喷吹的铜钎喷溅更剧烈,各监测面上喷溅物体积分数均高于其他喷吹条件。从实际生产角度来看,要控制喷溅物的产生,尤其是炉顶喷溅物的产生,否则会出现堵塞下料口、冲刷炉衬等生产问题。24°双枪喷吹产生了恶性喷溅,不利于生产过程稳定运行。

2.4 熔池混合效果

熔池混合效果与熔炼反应效率有密切关系。为进一步分析不同喷吹条件下熔池的混合效果,本文以熔池

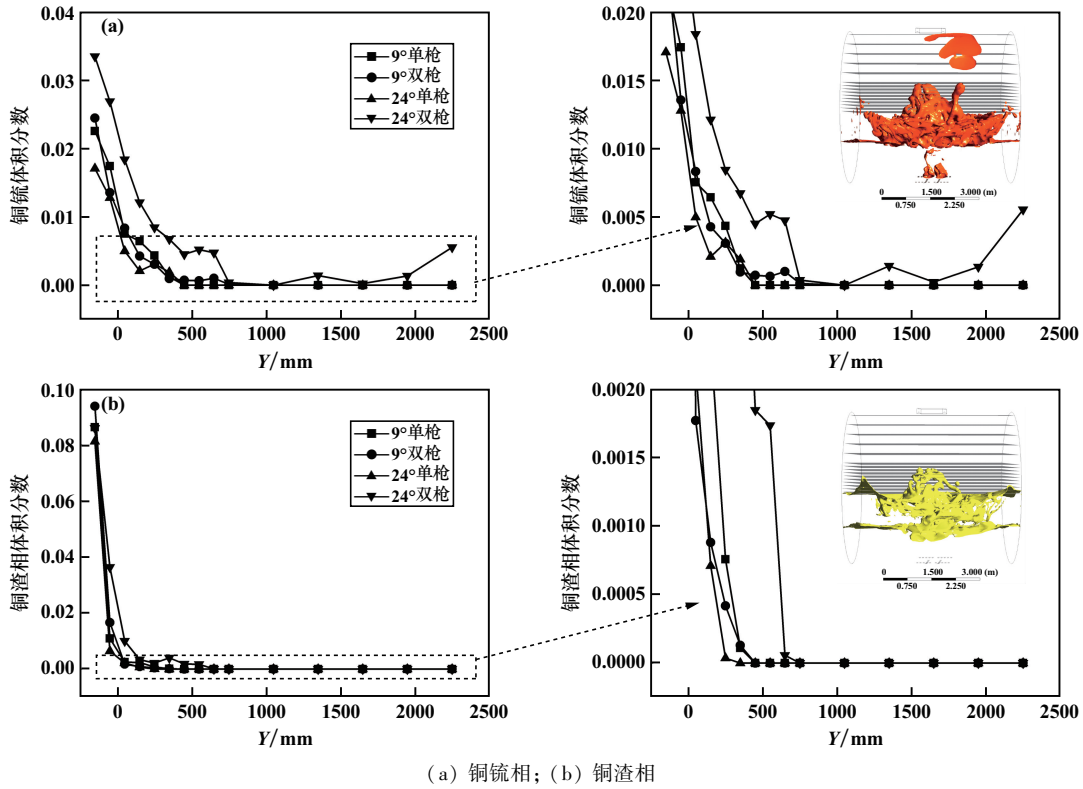


图 10 炉内不同高度监测面上的物相体积分数 ($t=4.6\text{ s}$)

气含率、平均速度、平均湍动能为评价指标, 三项指标定义如下:

1) 熔池气含率, 即熔池内部气相的体积占熔池气相和液相总体积的百分比, %。比较熔池气含率的大小, 可以推测熔池内气液的混合程度。

$$\frac{1}{V} \int \alpha dV = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n \alpha_i |V_i| \times 100\% \quad (6)$$

2) 熔池平均速度, 即熔池内部熔体流动平均速度值, m/s。该数值能够直接反映出熔体的流动性。

$$\frac{\int v \rho dV}{\int \rho dV} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i \rho_i |V_i|}{\sum_{i=1}^n \rho_i |V_i|} \quad (7)$$

3) 熔池平均湍动能, 即湍流脉动动能的平均值, m^2/s^2 。其值越大, 说明熔池中存在较多的漩涡, 动量、热量、质量的传递效率高。

$$k = \frac{1}{2} \bar{v}_i^2 \quad (8)$$

式(6)~(8)中, V 为熔池气相和液相总体积, m^3 ; α_i 为第 i 相的体积分数, %; V_i 为第 i 相的体积, m^3 ; \bar{v}_i 为第 i 相的平均速度, m/s ; ρ_i 为第 i 相的密度, kg/m^3 。

将“准稳态”时熔池 6 个时刻(4 s、4.2 s、4.4 s、4.6 s、4.8 s、5 s)相关数据平均值绘制于图 11。

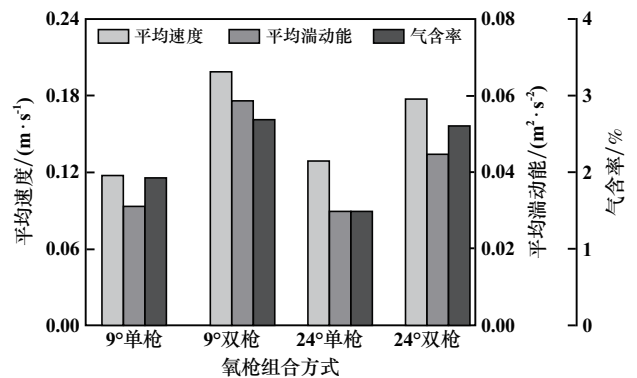


图 11 不同氧枪组合方式下的熔池气含率、平均速度、平均湍动能

由图 11 可知, 熔池混合最为剧烈的为 9° 双枪喷吹, 熔池气含率达到 2.70%, 平均速度为 0.20 m/s, 平均湍动能为 $0.059\text{ m}^2/\text{s}^2$ 。9° 双枪喷吹三项指标都高于 24° 双枪喷吹, 9° 双枪喷吹平均湍动能和气含率高于 24° 双枪喷吹, 主要是角度设置改变了气泡的上升路径长短, 9° 氧枪气泡运动路径更长, 气-渣相互作用更充分。从整体上来看, 当前大型铜冶炼底吹炉采用的双枪喷吹在混合效果上并不是简单在中小型底吹炉单枪喷吹基础上的数值叠加, 三项指标都达不到单枪喷吹的 2 倍。综合本文研究结果来看, 这主要是双枪喷吹的两支氧枪之间搅拌范围存在一定程度的重

叠,在大型铜冶炼底吹炉熔池中气-铋-渣之间相互联结,损失了一部分气泡扰动能力和穿透能力,导致熔炼过程反应不充分、不彻底,体现在生产上则是熔炼渣中铜含量偏高等问题。说明目前大型底吹炉双枪喷吹模式的扰动能力没有完全发挥,枪座上氧枪的设置(角度、间距等)还有一定优化空间。针对现运行的大型底吹炉,建议将氧枪设置为 9° 双枪喷吹模式,来获取更为强烈的熔池搅拌效果,为冶炼过程提供最佳的流体力学基础,进一步强化冶炼过程。

3 结 论

采用VOF多相流模型和Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型对大型底吹炉内多相流动过程进行模拟,通过对比喷吹方式对大型底吹炉流动特性影响,得出如下结论:

1) 单枪、双枪喷吹都只形成一个气动搅拌区,但双枪喷吹由两支氧枪共同形成,气-铋-渣在此空间范围内相互作用显著,气动搅拌区范围广、熔池搅拌程度强,提供了良好流体力学条件。

2) 24° 氧枪相比 9° 氧枪作用范围整体向炉壁一侧偏移,使熔炼中心发生偏移,一定程度上削弱了气-铋-渣之间相互作用。

3) 双枪喷吹熔池内三项指标都达不到单枪喷吹的2倍,双枪喷吹模式扰动能力没有完全发挥,还有一定优化空间。

4) 针对目前运行的大型底吹炉, 9° 双枪喷吹混合效果比 24° 双枪喷吹效果更佳,熔池气含率达到2.70%,平均速度为0.20 m/s,平均湍动能为 $0.059 \text{ m}^2/\text{s}^2$,熔池内部扰动剧烈并且熔体喷溅较少,有利于提高熔炼效率。

参考文献:

[1] Schlesinger M E, Sole K C, Davenport W G, et al. Extractive Metal-

lurgy of Copper (Sixth Edition) [M]. Elsevier, 2022.

- [2] 贾文清. 铜火法冶炼熔池熔炼工艺比较[J]. 山西冶金, 2020,43(3): 82-83.
- [3] 王雷,张松楠,李成林. 富氧底吹熔炼处理复杂金铜精矿系统扩能改造技术优化[J]. 有色冶金节能, 2022,38(3):25-28.
- [4] 刘恺,李兵. 氧气底吹熔炼技术大型化研究[C]//全国底吹冶炼技术、装备创新与发展研讨会论文集, 2016:16-23.
- [5] 郭学益,王双,王亲猛,等. 氧气底吹熔池熔炼过程气泡生长行为仿真研究[J]. 中国有色金属学报, 2018,28(6):1204-1215.
- [6] 张振扬,闫红杰,刘方侃,等. 富氧底吹熔炼炉内氧枪结构参数的优化分析[J]. 中国有色金属学报, 2013,23(5):1471-1478.
- [7] 余跃. 气体流量对底吹炼铜炉吹炼过程的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(8):1-8.
- [8] 梁高喜,任飞飞,王伯义,等. 富氧底吹造铋捕金工艺处理复杂精矿的生产实践[J]. 黄金, 2017,38(11):61-63.
- [9] 崔志祥,王智. 方圆两步炼铜工艺与生产实践[J]. 中国有色金属, 2018(S1):320-322.
- [10] 潘雨萍,王强,贺铸. 实用多相流数值模拟[M]. 北京:科学出版社, 2020.
- [11] 闫红杰,刘方侃,张振扬,等. 氧枪布置方式对底吹熔池熔炼过程的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012,22(8):2393-2400.
- [12] 王波,沈诗怡,阮琰炜,等. 冶金过程中的气液两相流模拟[J]. 金属学报, 2020,56(4):619-632.
- [13] 李钟,金伟,王予琪,等. 基于CFD-DEM方法的矿浆泵磨损特性研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(1):6-20.
- [14] 朱祖泽,贺家齐. 现代铜冶金学[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [15] 彭军,陈卓,刘思璇,等. 铜顶吹炉内多相流数值模拟与单因素影响分析[J]. 过程工程学报, 2017,17(5):926-935.
- [16] TANG G W, Silaen A K, YAN H J, et al. CFD Study of Gas-Liquid Phase Interaction Inside a Submerged Lance Smelting Furnace for Copper Smelting[C]//8th international Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing, 2017:101-111.
- [17] 袁启盛,张斌,戴志海,等. 底吹炼铜喷口区多相流动特性数值模拟研究[J]. 世界有色金属, 2021(2):6-10.

引用本文:姜保成,郭学益,王亲猛. 喷吹方式对大型铜熔池底吹炉流动特性影响研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):92-98.