

# 多枪顶吹连续吹炼炉氧枪参数优化数值模拟研究

于海波<sup>1,2</sup> 罗劲松<sup>1,2</sup> 邓戈<sup>1,2</sup> 朱鹏春<sup>1</sup> 胡一平<sup>1,2</sup>

黄浩宸<sup>1</sup> 李文杰<sup>2,3</sup> 王仕博<sup>2</sup> 胡建杭<sup>2</sup>

(1. 云南铜业股份有限公司西南分公司, 云南 昆明 650101;

2. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093; 3. 中铜东南铜业有限公司, 福建 宁德 352106)

**[摘要]** 随着铜冶炼技术的快速发展,多枪顶吹连续吹炼技术被应用和逐渐推广。采用计算流体力学方法对吹炼炉内气-渣-粗铜三相混合特性进行了数值模拟,研究了炉型、喷枪数量、枪位、氧枪直径和喷枪间距对炉内搅拌强度和搅拌死区的影响。研究表明,椭圆形炉体熔池流动死区和相对静态区域相较于圆形炉体分别缩小了17.1%和27.8%;喷枪数量由6支增加至8支时,炉内搅拌死区由90.6%降低至63.7%;枪位由0.3 m降低至0.2 m时,搅拌死区占比由63.7%降低至34.7%;氧枪直径76 mm/氧枪间距600 mm工况条件下,顶吹炉具有较好的搅动能力和较低的喷溅强度,过大的氧枪直径和氧枪间距会提升熔渣的喷溅强度,不利于工业实际生产。

**[关键词]** 铜冶炼;多枪顶吹连续吹炼;氧枪;火法冶炼;CFD

**[中图分类号]** TF8 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2024)05-0045-08

**DOI:**10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.05.007

## 0 前言

铜(Cu)作为一种重要的有色金属,因其优良的导热和导电、高延展、耐腐蚀以及易回收利用等特性而在电力、电信、能源、石化、建筑和汽车等行业有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。近几十年来,随着铜需求的持续增长,全球铜消费量和生产量显著增加。

铜冶炼方法主要包括火法冶炼和湿法冶炼<sup>[2-3]</sup>。相比于湿法冶炼,火法冶炼原料适应性强、产能大,且稀贵金属回收效率高。目前全球80%以上铜精矿采用火法冶炼,尤其是硫化矿,其比例高达85%~90%<sup>[4]</sup>。为降低能耗和减少火法冶炼过程中的环境污染,有色金属冶炼技术不断改进和

发展。火法炼铜主要包括以下几个步骤<sup>[5]</sup>:①将铜精矿通过造锍熔炼工艺炼制成铜锍;②将铜锍经过吹炼工艺形成粗铜;③采用阳极炉精炼粗铜形成阳极铜;④电解阳极铜产出最终产物电解铜。其中,吹炼过程是火法炼铜工艺流程的关键一环。吹炼炉的搅拌效果直接影响到整个工艺流程中铜金属的直收率,但当前冶炼企业采用的吹炼工艺设备较为单一。

当前,国内外铜精矿大部分采用P-S转炉吹炼。该工艺流程简单、易操作、易控制,但吹炼效率低。业内专家提出用多枪顶吹吹炼炉替代P-S转炉,采用富氧侧吹熔池熔炼-多枪顶吹吹炼-阳极炉精炼三炉协同工艺,通过三连炉直接热连接,实现真正意义上的连续炼铜生产<sup>[6-7]</sup>。多枪顶吹吹炼工艺效率高、生产稳定、自动化程度高,可弥补P-S转炉吹炼工艺的不足<sup>[2]</sup>。该工艺控制富氧空气经由竖直安装在渣层上方一定距离的多根喷枪输送至顶吹炉内,促进铜精矿的氧化反应,使得渣层中的Cu<sub>2</sub>S与FeS相互作用形成粗铜。随后,粗铜由吹炼炉末端转入阳极炉进行热精炼<sup>[8]</sup>。然而,多枪顶吹连续吹炼技术相对较新,炉体结构设计和工艺优化主要依赖于生产经验。因此,深入了解多枪顶吹过程中气-渣-粗铜的多相运动与分布规律,对提高工业生产效率至关重要。

**[收稿日期]** 2024-03-13

**[基金项目]** 云南省重大科技专项计划(202302AB080017)。

**[作者简介]** 于海波(1987—),男,河北围场人,高级工程师,工程硕士,主要从事铜火法冶炼工作。

**[引用格式]** 于海波,罗劲松,邓戈,等.多枪顶吹连续吹炼炉氧枪参数优化数值模拟研究[J].绿色矿冶,2024,40(5):45-52.

YU Haibo, LUO Jinsong, DENG Ge, et al. Numerical investigation on the optimization of oxygen lance parameters in multi-lance top-blown continuous converting furnace[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(5): 45-52.

本文重点考察了多枪顶吹吹炼过程中氧枪参数(包括炉型、喷枪数量、枪位和喷枪间距)对顶吹炉内气-渣-铜渣三相搅拌效果的影响,定性和定量分析了不同运行条件下炉内的搅拌死区以及高速射流对渣层的扰动效果,为多枪顶吹连续吹炼工艺的优化提供重要参考。

## 1 数值方程

为模拟顶吹吹炼过程中涉及的气体、铜渣和粗铜等三相不混溶流体的运动和分布规律,常采用流体体积分数(VOF)模型。该模型中所有流体介质均采用同一套守恒方程。各相在顶吹炉流体计算域内的分布则采用流体体积分数方程进行求解,而各相在任意网格单元中的体积分数之和始终为1。在多枪顶吹吹炼过程中,射流冲击搅动熔体,使得计算域内部存在复杂的湍流流动过程。本文引入标准  $k-\varepsilon$  湍流模型,通过求解湍流动能  $k$  和湍流耗散率  $\varepsilon$  这两个未知变量,封闭 Navier-Stokes 方程。本文所采用的数值计算方程见表1。

表1 流体的控制方程

类型	名称	方程
守恒方程	质量守恒	$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \alpha_q = \frac{S_{\alpha_q}}{\rho_q}$
	动量守恒	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla[\mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}$
	能量守恒	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla[\mathbf{u}(\rho E) + p] = \nabla(k_{eff} \nabla T) + S_h$
子方程	流体能量方程	$E = \frac{\sum \alpha_q \rho_q E_q}{\sum \alpha_q \rho_q}$
	混合相密度	$\rho = \sum \alpha_q \rho_q$
模型	混合相黏度	$\mu = \sum \alpha_q \mu_q$
	$k$ 方程	$\rho \left[ \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (k u_i) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$
湍流方程	$\varepsilon$ 方程	$\rho \left[ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\varepsilon u_i) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \varepsilon \frac{G_k + C_{3\varepsilon} G_b}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$

注:式中  $F$  为体积力;  $g$  为重力加速度;  $G_k$  为平均速度梯度产生的湍流动能;  $G_b$  为浮力产生的湍流动能;  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$  为经验常数项;  $k$  为湍流动能;  $k_{eff}$  为有效热传导;  $p$  为流体压强;  $S_{\alpha_q}$  为质量源项;  $S_h$  为能量源项;  $t$  为瞬时时刻;  $T$  为温度;  $u$  为流体运动速度;  $\alpha_q$  为第  $q$  相的体积分数;  $\mu$  为流体黏度;  $\varepsilon$  为湍流耗散率;  $\rho_q$  为第  $q$  相的密度;  $\sigma_k$  为湍流动能对应的普朗特数;  $\sigma_\varepsilon$  为湍流耗散率对应的普朗特数;  $x, y, z$  为方位坐标。

## 2 多枪顶吹吹炼炉几何模型

多枪顶吹连续吹炼炉几何模型如图1所示,炉体横截面形状为椭圆形,其长轴、短轴和高度的尺寸分别为13.2 m、9.8 m和3.3 m。模拟过程中假定各相流质为牛顿流体且不可压缩,且忽略吹炼过程中铜渣的流入、粗铜的流出以及炉内的化学反应。图1中的红色区域表示厚度为0.4 m的铜渣。由于密度差异,气相区和粗铜层分别位于铜渣上方以及下方的蓝色区域。其中,铜渣和粗铜的密度分别为  $4000 \text{ kg/m}^3$  和  $5200 \text{ kg/m}^3$ ,而二者的黏度分别为  $0.4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  和  $0.004 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。气体以  $200 \text{ m/s}$  的注入速度由喷枪处自上而下进入吹炼炉。气体对铜渣层的搅拌作用使得后者形成湍流运动态势。为了准确捕捉这种湍流流动规律,采用了285万网格数量。

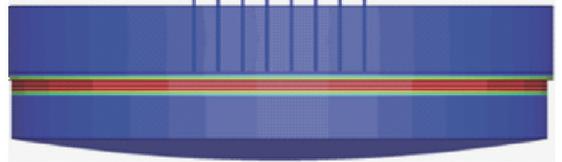


图1 多枪顶吹连续吹炼炉结构示意图

## 3 仿真结果分析

### 3.1 炉型对熔体搅拌特性的影响

为了研究顶吹炉炉体形状对炉内湍流量扩散以及搅拌性能的影响,对比了圆形顶吹炉以及椭圆形顶吹炉两种炉型在喷枪单排布置条件下熔体的运动速度以及搅拌死区的占比。两种不同炉型的横截面积以及操作参数相同,其横截面形状如图2所示。

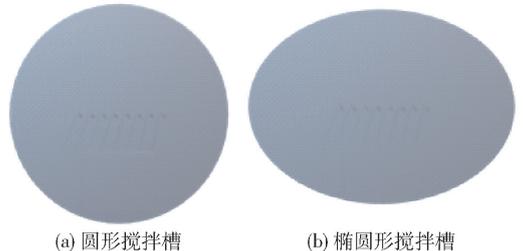


图2 两种不同顶吹炉横截面形状对比

两种炉型条件下射流对熔体的搅动特性如图3所示。图中红色区域代表体积分数大于0.95的渣层,渣层上方的蓝色区域表示空气相,而下方的蓝色区域表示粗铜层。由图3可知,在圆形炉体喷枪正下方区域出现明显湍流现象,但其他区域运动特性较差,不利于渣层与富氧空气的接触;在椭圆形炉体中,喷枪短轴方向距炉墙距离较短,会形成不平衡的震荡

效果,在喷枪正下方富氧空气与铜渣充分反应的同时,动能更好地向四周传递,用于渣层流体的搅拌,维持其流动性。相对来说,椭圆形炉体与单排布置的喷枪排布方式配合更合理,能起到较好的喷吹效果。

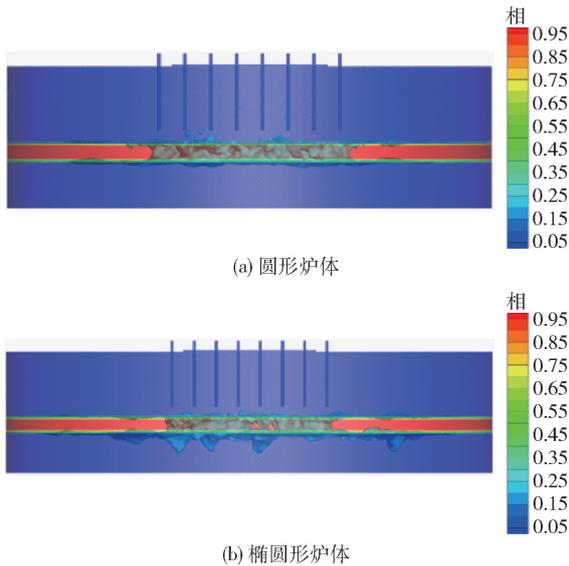


图3 不同炉型条件下射流对熔体的搅动特性

如图4所示,选取了两条处于受影响较大区域中的采样线。采样线上的熔体运动速度随着喷吹强度的衰减而发生变化,具有初值敏感性,能较好地反映搅拌效果以及流体运动变化,进而比对不同炉型参数下的熔池搅拌效果。

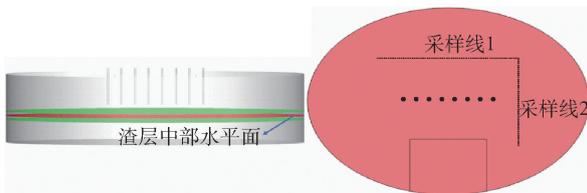


图4 渣层中部采样线选取

不同炉型中两条采样线上的速度曲线如图5所示。从图5中可以明显看出,两条采样线上椭圆形炉体工况具有较大的流体速度。在采样线1上,圆形炉体的平均速度为0.094 m/s,而椭圆形炉体的平均速度为0.244 m/s,椭圆形炉体的平均速度较圆形炉体提高了159.6%。在采样线2上,圆形炉体平均速度为0.093 m/s,而椭圆形炉体的平均速度为0.105 m/s,后者较前者提高了12.9%。椭圆形炉体在两条采样线上的平均速度均高于圆形炉体,体现了更强的气-渣混合能力。

利用代码将图片数字化处理,将流动速度低于0.05 m/s定义为熔池的流动死区,并将湍动能低于

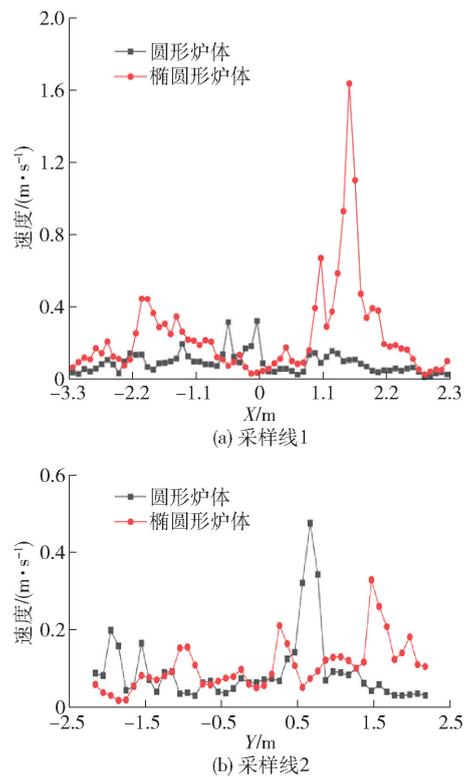


图5 不同炉型下两条采样线上速度曲线

$0.25 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 的区域定义为熔池的相对静态区域。不同炉型条件下的流动死区占比和相对静态区域占比分别如图6和图7所示。图中色块代码#0030FF以及#0061FF区域为圆形炉体和椭圆形炉体内熔池的搅拌死区(应用于速度场)。根据两种炉体的速度云图进行数字化分析,圆形炉体的熔池流动死区占比为76.8%,而椭圆形炉体熔池流动死区占比为63.7%,后者较前者缩小了17.1%,说明椭圆形炉体达到了减少搅拌死区的效果。圆形炉体的熔池相对静态区域为89.7%,椭圆形炉体的熔池相对静态区域为64.8%,后者较前者缩小了27.8%,有利于熔池保持流动,避免渣层黏度增大而导致生产效率降低。速度云图以及湍动能云图的数字化表征说明了椭圆形炉体在喷枪单排布置方式下的优势,即椭圆形炉体的混合强度比圆形炉体更大。

### 3.2 喷枪数量对熔体搅拌特性的影响

喷枪数量是影响吹炼性能的关键参数之一。为了对比不同喷枪数量条件下的搅拌效果,对比了8支喷枪与6支喷枪的气液混合模拟结果。吹炼过程中,气体总流量  $Q_g = \pi r u_g n$ 。其中  $r$ 、 $u_g$  和  $n$  分别代表喷口半径、喷吹速度和喷枪数量。为了保证气体总量和喷吹速度相同,8支喷枪与6支喷枪的喷口直径分别设置为76 mm和88 mm。

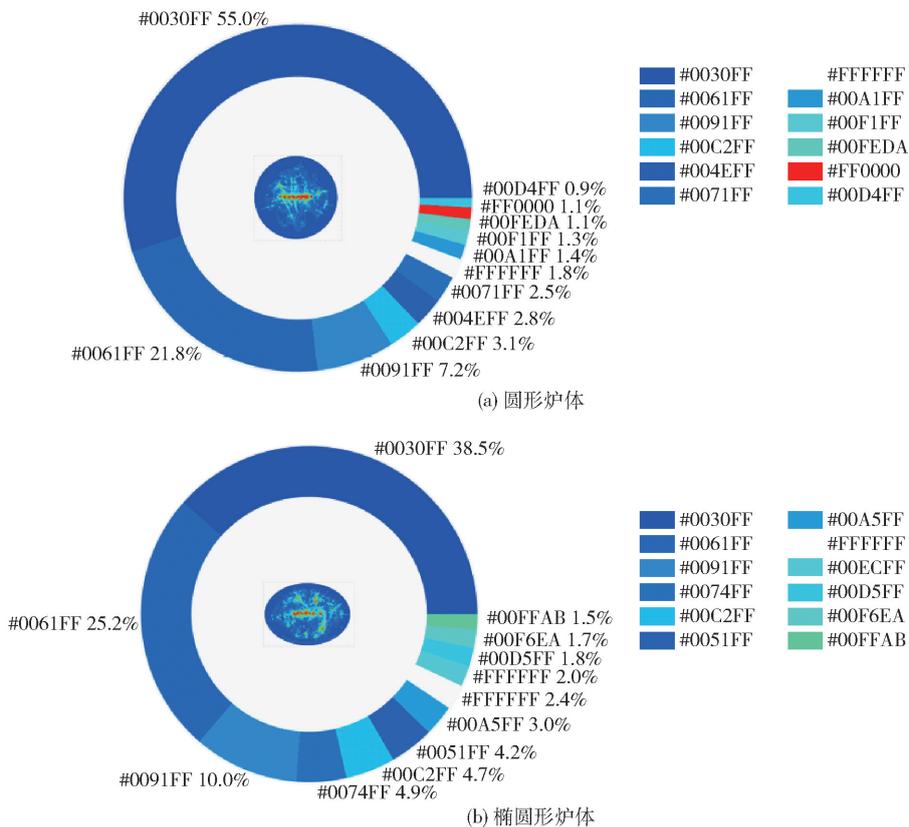


图6 不同炉型条件下熔池内搅拌死区占比

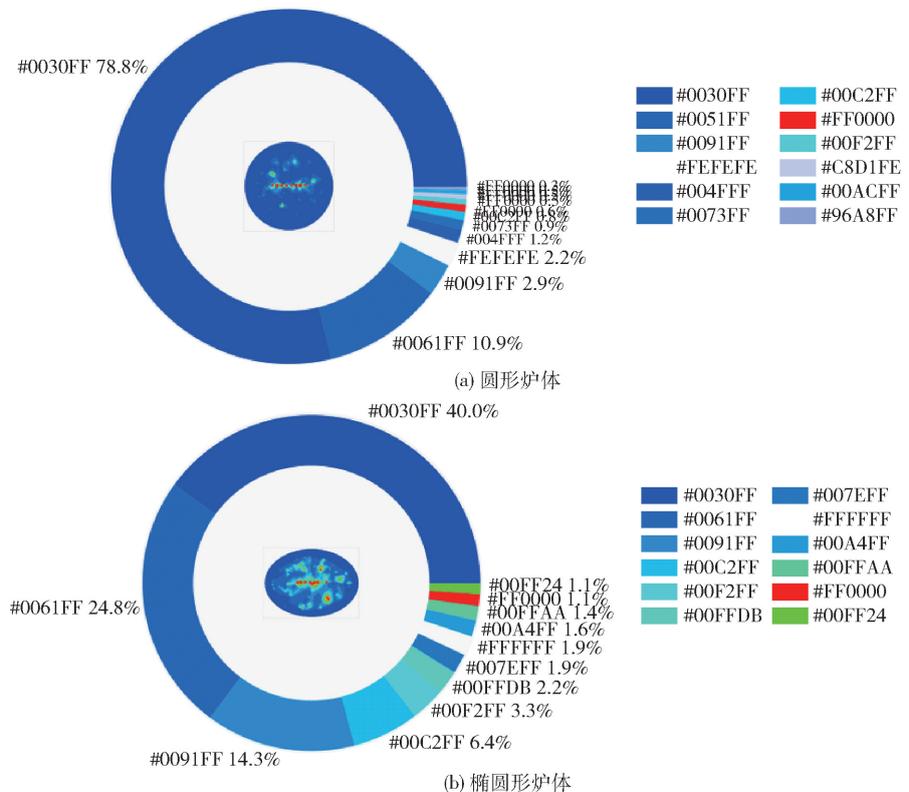


图7 不同炉型条件下熔池内端动能分布及相对静态区域占比

6支喷枪和8支喷枪条件下射流对熔体的搅拌效果如图8所示。由图8可知,当喷枪数量为6时,射流对熔体横向搅拌范围以及纵向穿透能力较小,距离喷枪较远区域的速度表现较差;当喷枪数量为8时,射流对熔体的横向扩散及纵向扩散能力较强。说明多喷枪的排布有利于富氧空气在熔池内部的充分利用,能更合理地控制搅拌动能用于熔池搅拌。

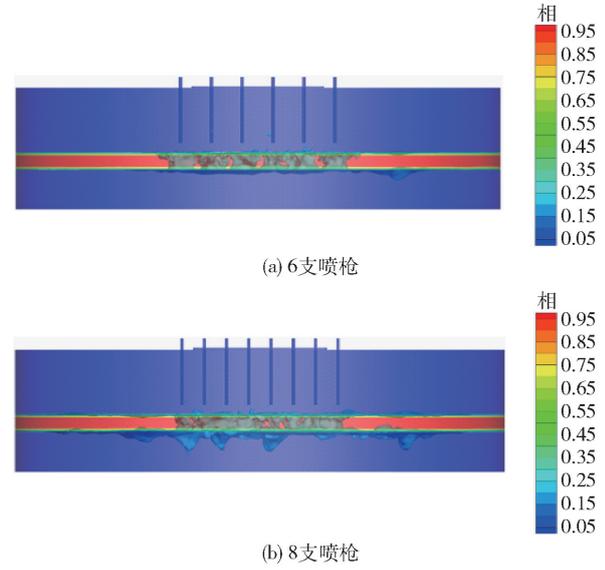


图8 不同喷枪数量条件下射流对熔体的搅动效果

不同喷枪数量条件下熔池内搅拌死区占比如图9所示。由图9可知,6支喷枪和8支喷枪条件下熔池流动死区占比分别为90.6%和63.7%,即前者的熔池流动死区比后者多26.9%。在渣层中,8支喷枪的流体速度梯度较大,速度差使得位于渣层中部的流体基于炉体中心扩散流动,再经回流与其他流体碰撞,提高了搅拌强度。6支喷枪条件下射流对熔体的搅拌范围仅集中于喷枪下方流体,由中心向炉壁方向运动的流体速度较小,并未对其他熔体产生太大扰动,熔池内搅拌流场相对稳定。

### 3.3 枪位对熔体搅拌特性的影响

本小节研究了氧枪喷头到静止金属熔池液面的距离(枪位)对椭圆形顶吹炉内气-熔体搅动特性的影响。0.3 m枪位以及0.2 m枪位条件下射流对熔体的搅拌效果如图10所示。由图10可知,相比于0.3 m枪位,0.2 m枪位提升了射流对熔体沿径向和轴向的搅拌效果,扩大了高速射流的搅拌范围,但该条件下射流在熔体中的穿透深度过大。因此,0.2 m枪位适合于吹炼初期或者熔体黏度较高的情况。

不同枪位条件下熔池流动死区的占比如图11所示。由图11可知,0.3 m枪位和0.2 m枪位条件下熔池流动死区占比分别为63.7%和34.7%,即

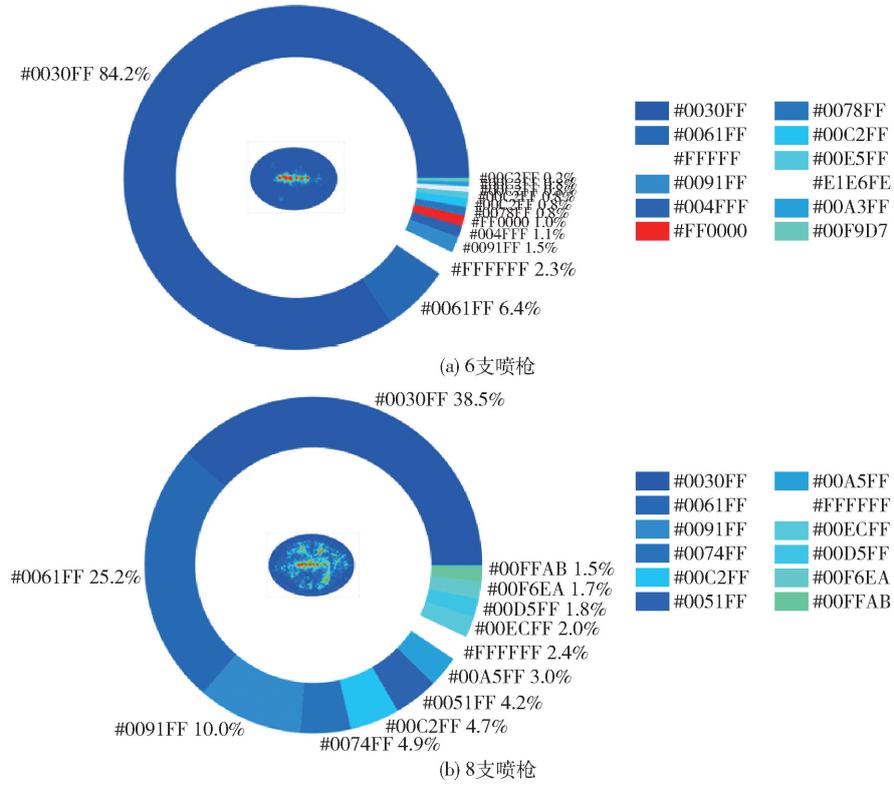


图9 不同喷枪数量条件下熔池内搅拌死区占比

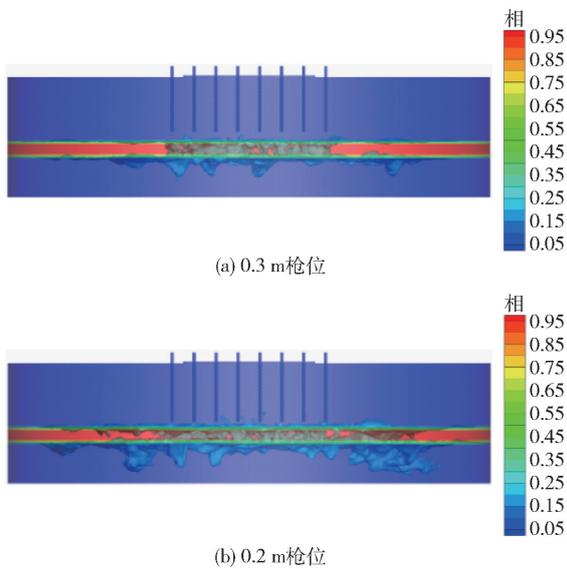


图 10 不同枪位条件下射流对熔体的搅动效果

前者的熔池流动死区比后者多 29%，证明了枪位变化对搅拌强度影响较大。相较于 0.3 m 枪位，0.2 m 枪位的运行条件能将射流的大部分动量收束于熔体内部，熔体动能沿轴向的扩散效果较好。此外，在 0.2 m 枪位工况下，高速射流始终对熔体产生强烈的搅拌作用，使得熔体的速度较大，湍流混合能力较强，搅拌效果更优。

### 3.4 喷枪间距对熔体搅拌特性的影响

氧枪直径 76 mm/氧枪间距 600 mm(工况 1)、氧枪直径 81 mm/氧枪间距 600 mm(工况 2)、氧枪直径 81 mm/氧枪间距 650 mm(工况 3)以及氧枪直径 81 mm/氧枪间距 700 mm(工况 4)四种工况下，渣层中部水平界面处的速度分布如图 12 所示。

由图 12 可知，工况 2 条件下渣层中部流场相对稳定，而工况 1 条件下由于氧枪直径较小，剪切力较

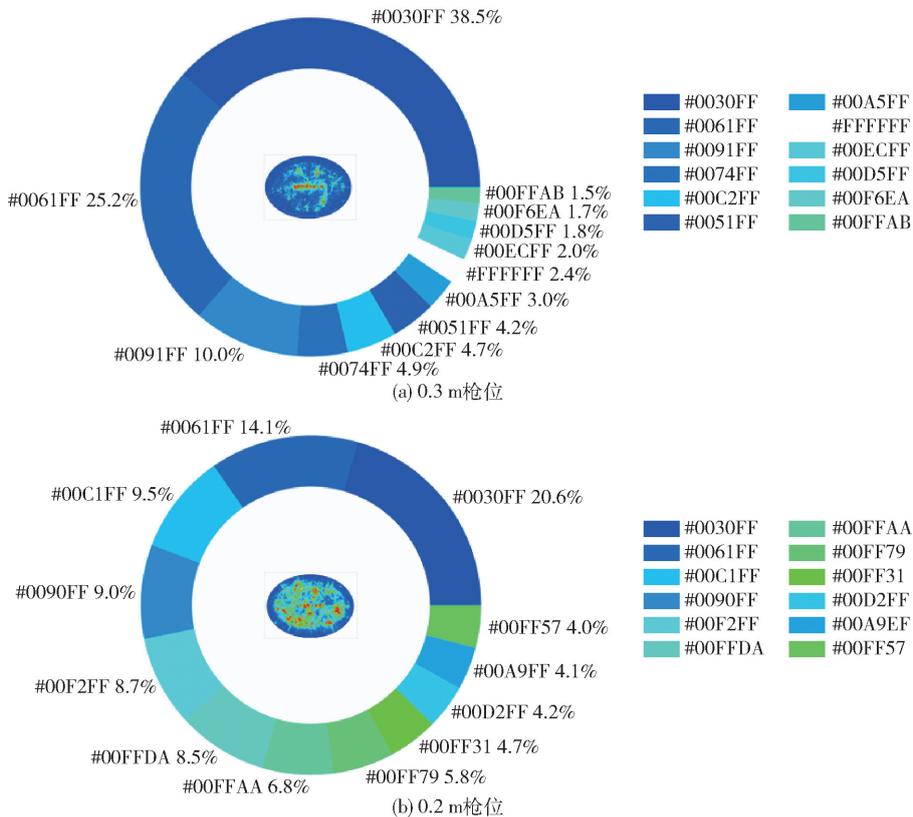


图 11 不同枪位速度分布及流动死区占比

大，炉内会产生熔体喷溅现象。喷溅的熔体分散至炉内各区域，并带动近炉壁区域的熔体流动。当氧枪间距增大至 650 mm 时，喷枪下方流体速度梯度大，整体速度场呈扁长的形态，渣层飞溅现象不明显。然而，当间距增大至 700 mm 时，熔池内会产生剧烈的喷溅作用，这种喷溅作用会显著降低炉膛的服役

寿命。因此，多枪喷吹过程中氧枪间距设置应小于 700 mm。

上述 4 种工况条件下熔池的流动死区如图 13 所示。由图 13 可知，工况 1~4 条件下熔池的流动死区占比分别为 65.6%、75.9%、81.5% 和 31.5%。在 4 种工况下，氧枪直径 81 mm/氧枪间距 700 mm

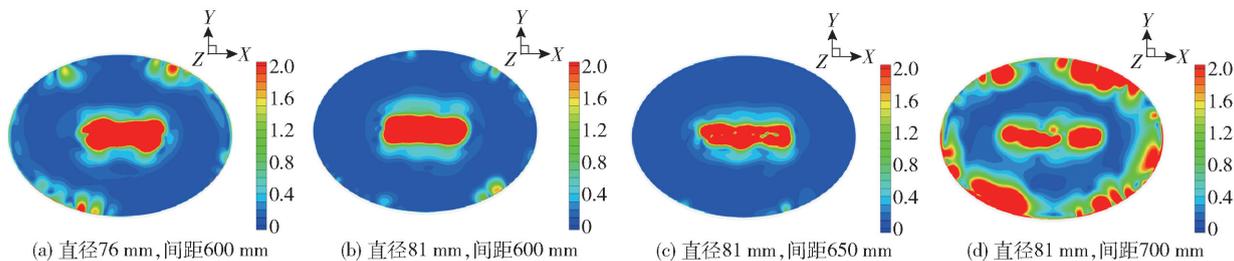


图 12 不同喷枪间距下渣层中部水平面的速度分布

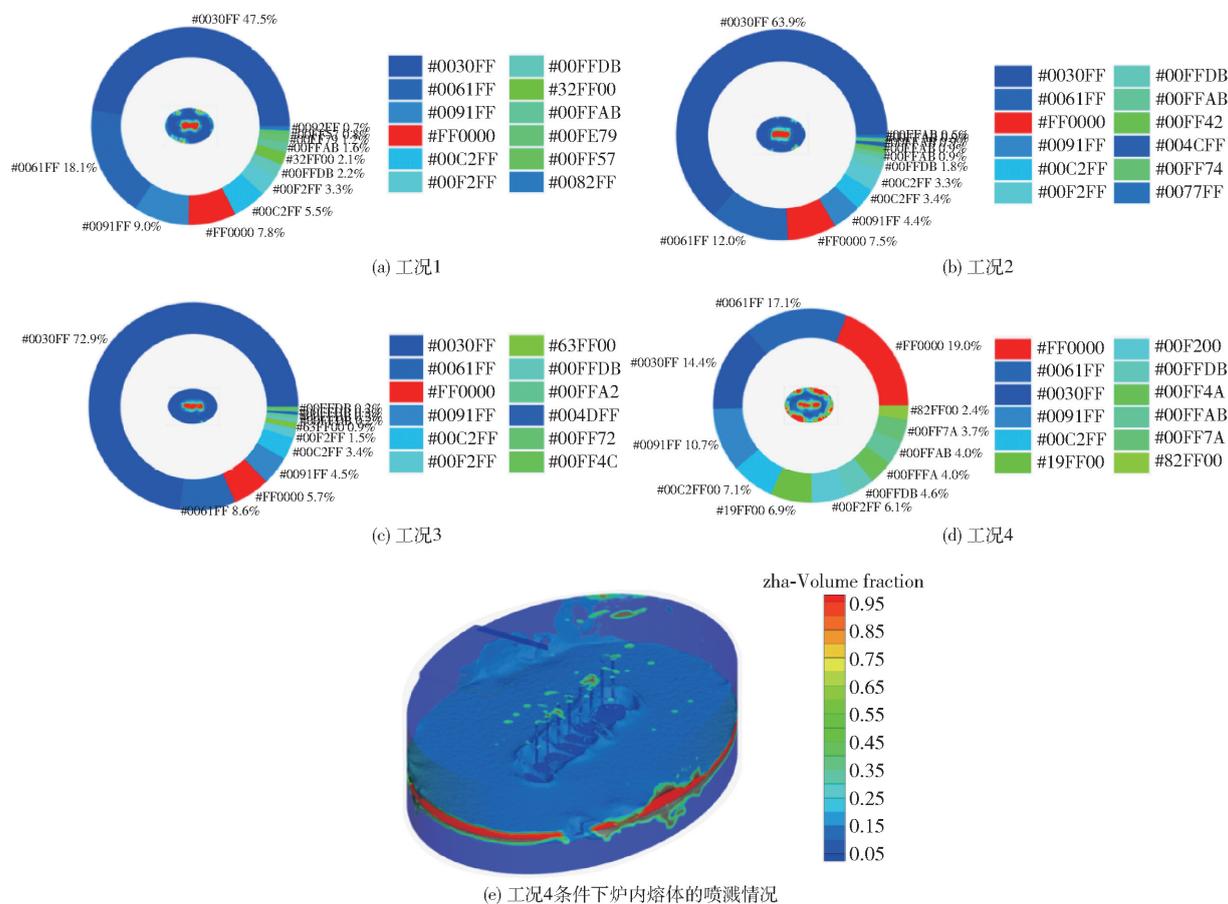


图 13 4 种工况条件下熔池的流动死区

工况的熔池流动死区占比最低,但其喷溅现象如图 13(e)所示,炉壁受喷溅熔体的冲击作用最强;在其他 3 种工况中,氧枪直径 76 mm/氧枪间距 600 mm 工况的熔池流动死区占比最低,且熔体运动较为稳定,故喷枪间距的合理设定范围为 600 ~ 650 mm,这既能保证一定的搅拌效果,也能避免铜渣的强喷溅作用。

## 4 结论

1) 相比于圆形截面的顶吹炉,椭圆形截面的顶吹炉具有更强的射流搅拌效果以及更低的搅拌死区

占比。

2) 喷枪数量增加提升了射流对熔体的搅拌强度,抑制了搅拌死区的形成,增大了熔体动量的扩散范围。

3) 枪位的减小可以有效提升高速射流对熔体的搅拌,但同时也会增加粗铜层的运动强度。因此,过小的枪位反而会降低吹炼效率。

4) 氧枪直径 81 mm/氧枪间距 700 mm 工况条件下具有较大的喷溅强度。氧枪直径 76 mm/氧枪间距 600 mm 工况条件具有较好的搅动能力和较低的喷溅强度。喷枪间距的合理范围为 600 ~ 650 mm。

## [参考文献]

- [1] KULCZYCKA J, LELEK A, LEWANDOWSKA A, et al. Environmental impacts of energy-efficient pyrometallurgical copper smelting technologies: the consequences of technological changes from 2010 to 2050[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, 20(2): 304–316.
- [2] ZHOU S, GUO X, TIAN B, et al. Investigation on direct-to-blister smelting of chalcocite via thermodynamics and experiment[J]. *Metals*, 2021, 11(1): 19.
- [3] ZHAO B, LIAO J. Development of bottom-blowing copper smelting technology: a review[J]. *Metals*, 2022, 12(2): 190.
- [4] 陈淑萍, 伍赠玲, 蓝碧波, 等. 火法炼铜技术综述[J]. *铜业工程*, 2010(4): 44–49.
- [5] HE J, ZHANG M, CHEN H, et al. Enhancement of leaching copper by organic agents from waste printed circuit boards in a sulfuric acid solution[J]. *Chemosphere*, 2022(307): 135924.
- [6] 徐风. 三连炉连续炼铜工艺生产实践[J]. *有色冶金节能*, 2022, 38(2): 45–48.
- [7] 李建辉, 葛晓鸣, 柳庆康. 富氧侧吹熔炼-多枪顶吹连续吹炼-火法阳极精炼热态三连炉连续炼铜技术的开发、工业化应用及发展方向[J]. *有色设备*, 2021, 35(3): 64–67, 75.
- [8] LIU Z, XIA L. The practice of copper matte converting in China[J]. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section C, Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 2019, 128(1–2): 117–124.

## Numerical Investigation on the Optimization of Oxygen Lance Parameters in Multi-lance Top-blown Continuous Converting Furnace

YU Haibo<sup>1,2</sup>, LUO Jinsong<sup>1,2</sup>, DENG Ge<sup>1,2</sup>, ZHU Pengchun<sup>1</sup>, HU Yiping<sup>1,2</sup>,  
HUANG Haochen<sup>1</sup>, LI Wenjie<sup>2,3</sup>, WANG Shibo<sup>2</sup>, HU Jianhang<sup>2</sup>

(1. Southwest Copper Branch, Yunnan Copper Co., Ltd., Kunming 650101, China;

2. School of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

3. China Copper Southeast Copper Co., Ltd., Ningde 352106, China)

**Abstract:** With the rapid development of copper smelting technology, multi-lance top-blown continuous converting approach is applied and gradually extended. Numerical simulation of gas-copper slag-blister copper three-phase mixing characteristics in the furnace was carried out by means of computational fluid dynamics. The influence of the furnace shape, as well as the number, position, diameter and spacing of the multi-lance, on the mixing intensity and stirring dead zone in the furnace were investigated. The results demonstrate that stirring dead zone and relative static region of the bath in furnace with an elliptical cross-section are reduced by 17.1% and 27.8%, respectively, compared to a furnace with a circular cross-section. The stirring dead zone in the furnace is reduced from 90.6% to 63.7% as the lance number is increased from 6 to 8. The dead zone is reduced from 63.7% to 34.7% when the lance position is reduced from 0.3 m to 0.2 m. The case with lance diameter of 76 mm and lance spacing of 600 mm have high stirring capacity of jet and low splashing intensity of molten. If lance diameter and spacing are too large, the slag splashing intensity is enhanced, which is not favorable to industrial production.

**Key words:** copper smelting; multi-lance top-blown continuous converting; oxygen lance; pyrometallurgy; CFD