

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.08.001

多枪顶吹连续吹炼过程中喷枪排布方式的数值模拟

于海波^{1,2}, 罗劲松^{1,2}, 邓戈^{1,2}, 朱鹏春¹, 胡一平^{1,2},
黄浩宸¹, 李文杰^{2,3}, 王仕博², 胡建杭²

- 云南铜业股份有限公司 西南分公司, 昆明 650101;
- 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 昆明 650093;
- 中铜东南铜业有限公司, 福建 宁德 352106)

摘要: 多枪顶吹连续吹炼工艺因其低空污染小、炉衬寿命长、连续化程度高等优点而备受冶金行业瞩目。以工业冶金炉窑为研究对象, 基于计算流体力学, 对多枪顶吹连续吹炼炉内气-渣-铜硫多相混合流场进行了数值模拟。探索了多枪单排布置和交错式布置对炉内流场、湍动能和气含率的影响。研究表明, 相较于双排交错式喷枪布置方案, 单排布置具有更强的搅拌能力、较大的熔池横向及纵向扩散范围, 以及更小的静态区域体积。此外, 喷枪单排布置方案下的气含率始终高于双排交错布置, 证明了单排的喷枪排布方式有利于渣层搅拌效率的提高, 加速铜沉降, 降低生产能耗。

关键词: 铜冶炼; 多枪顶吹吹炼; 火法冶炼; 数值模拟; 喷枪排布

中图分类号: TF811

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2024)08-0001-10

Numerical Simulation of Lance Arrangement in Multiple-Lance Top-Blowing Continuous Converting Process

YU Haibo^{1,2}, LUO Jinsong^{1,2}, DENG Ge^{1,2}, ZHU Pengchun¹, HU Yiping^{1,2},
HUANG Haochen¹, LI Wenjie^{2,3}, WANG Shibo², HU Jianhang²

- Southwest Copper Branch, Yunnan Copper Co., Ltd., Kunming 650101, China;
- State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
- China Copper Southeast Copper Co., Ltd., Ningde 352106, Fujian, China)

Abstract: The continuous multiple-lance top-blowing process has attracted much attention in metallurgical industry for its advantages of low pollutant gas emission, long service life, and high continuity. With industrial metallurgical furnace as the research object, numerical simulation of gas-slag-copper matte multiphase mixed flow in the continuous multiple-lance top-blowing furnace was carried out by means of computational fluid dynamics. The effects of single-row and staggered arrangement of multiple lances on the flow field, turbulent kinetic energy and gas holdup in the furnace were explored. The results show that compared with the two-row staggered lance arrangement method, the single-row arrangement method has higher mixing capacity, larger lateral and vertical spreading ranges of the molten, and a lower volume of stirring dead region. Moreover, the gas holdup under the single-row lance arrangement method is

收稿日期: 2024-03-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3902000)

作者简介: 于海波(1984-), 男, 硕士, 高级工程师

consistently higher than that under the double-row staggered arrangement, which proves that the former operating method is conducive to the improvement of the slag layer mixing efficiency, accelerated copper sedimentation, and reduced production energy consumption.

Key words: copper smelting; multi-lance top blowing; pyrometallurgical process; numerical simulation; lance arrangement

随着全球铜资源的不断耗竭,铜原料供应日益紧张,选矿石品位逐渐降低,原料成分也变得更加复杂。为满足当前的节能减排、资源综合回收和环保要求,我国铜冶炼厂不断进行技术升级改造,引入并开发了一系列世界领先的现代强化炼铜工艺,如富氧双侧吹熔炼^[1-2]、白银炉熔炼^[3-4]、闪速熔炼和底吹熔炼^[5-6]等。熔炼工艺主要为造渣反应,而熔炼过程所生产的熔炼渣需要送入下一个工业炉进行造渣处理。

目前,世界上大多数采用 PS 转炉吹炼工艺处理冰铜^[7-8]。该工艺具有流程简单、易操作、易掌握等优点,但同时也具备了吹炼效率较低等缺点。在转炉过程中,送风时率仅为 60%~80%,期间需频繁倾炉、转动、停风,频繁用包子倒入铜铕,倒出炉渣、粗铜。此外,由于炉口无法密封,容易造成烟气逸散,影响车间操作环境。出炉烟气间断,不稳定,烟气量和烟气 SO₂ 浓度大范围波动,给制酸过程带来很大麻烦。作为一种可以替代 PS 转炉吹炼处理冰铜的工艺,多枪顶吹工艺将高速富氧空气通过安装在距熔体上方一定距离的多根喷枪注入炉内。高速射流搅动熔体并为熔体提供氧化氛围,使得二者发生剧烈的氧化和造渣反应,去除富氧侧吹熔炼过程中产生的铜铕中的硫和铁等杂质,并得到含铜量约为 98.5%~99.5%的粗铜^[9]。与传统的 PS 转炉工艺相比,多枪顶吹吹炼工艺在技术装备、节能减排、资源回收利用以及环境保护等方面都表现十分突出,具有流程短、设备先进、安全性能高、加工成本低、作业连续稳定、作业环

境好以及炉衬寿命长等特点^[10-11]。然而,目前对于多枪顶吹连续吹炼炉中气渣-铜铕多相混合流场的研究鲜有报道。顶吹炉操作参数的优化有待深入研究。

本文以工业尺度多枪顶吹连续吹炼炉为研究对象,采用计算流体力学对炉内多相混合流场进行数值模拟。对比了多枪单排或双排交错分布条件下的流体速度场、湍动场和气含率。以期多枪顶吹连续吹炼炉的优化以及有色金属的节能环保提供坚实的理论依据。

1 数值方程

针对熔池熔炼过程中所包含的气-铜渣-粗铜等三种互不相溶的流体介质,常采用流体体积(VOF)模型。该模型的基本假设是多相流体之间不存在相互贯穿,多相物质共享一套守恒方程,而任意控制单元内的所有相的体积分数之和恒定为 1。为了区分各相物质在多枪顶吹连续吹炼炉内的分布,引入了流体体积分数方程。同时,炉内流体在运动、搅动以及动量扩散过程中需严格遵循质量和能量守恒方程。

顶吹炉内射流的高速运动、气-渣的强搅拌作用涉及了复杂的湍流运动。因此,还需要考虑流体的湍流运动模型。本文采用了由 Launder 和 Spalding 所提出的标准 $k-\epsilon$ 模型。该模型通过求解未知变量 k (湍流动能)和 ϵ (湍流耗散率)来封闭 Navier-Stokes 方程。所涉及的方程见表 1,方程中各符号的物理含义及单位见文献[12]。

表 1 用于模拟炉内多相运动的控制方程^[12]

Table 1 Governing equations for modeling multiphase motions in furnaces^[12]

名称	方程
动量守恒	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F}$
连续性方程	$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \alpha_q = \frac{S_{\alpha_q}}{\rho_q}$
能量守恒	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\vec{u}(\rho E) + p] = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + S_h$
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	$\rho = \sum \alpha_q \rho_q$
混合相黏度	$\mu = \sum \alpha_q \mu_q$
k 方程	$\rho \left[\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(k u_i) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$
ε 方程	$\rho \left[\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\epsilon u_i) \right] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \epsilon \frac{G_k + C_{3\epsilon} G_b}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon$

2 多枪顶吹吹炼炉三维仿真模型

如图 1 所示,建立了顶吹两种排布方式的模拟模型,尺寸与设计图纸一致。吹炼炉的长轴和短轴尺寸分别为 13.2 m 和 9.8 m。炉体总高为 3.3 m。炉内包含粗铜和铜渣在内的两种高温熔体。为了准确模拟炉内的流动现象,减少不必要的干扰因素,方便建模以及简化模拟过程,在研究过程中忽略进料口以及出料口,同时只考虑了炉膛区域作为流体的计算区域,模型进行以下简化:

- 1) 假设炉内流体为牛顿流体且不可压缩;
- 2) 忽略熔炼过程中投料以及炉渣和铜钎排放对熔池高度的影响;
- 3) 忽略渣层内的化学反应,只对炉膛内部的多相物理流动过程进行研究。

粗铜层位于炉体底部,其厚度为 1.1 m。渣层在粗铜层上方,且具有 0.4 m 的厚度。八根顶吹喷枪竖直固定安装在渣层上方。高速射流将喷枪、渣层、粗铜及烟气流动区域通过分区域划分网格,对渣层采用扫掠方法划分网格并进行局部加密,如图 1(b)所示。

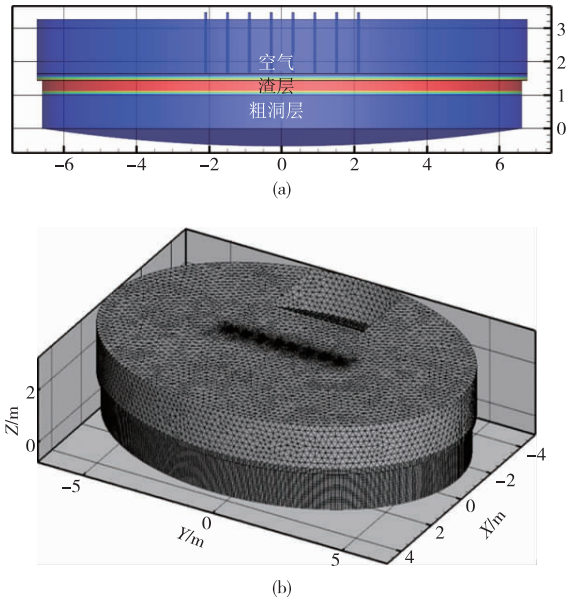


图 1 顶吹炉内各相分布示意图(a)及多枪顶吹炉的网格图(b)

Fig. 1 Schematic diagram of the distribution of phases in the top-blowing furnace (a) and grid of the furnace(b)

3 模型验证

考虑到本研究多喷枪顶吹炼炉实际尺寸与物理模拟的试验条件,对模拟结果进行验证,保证计算结果的可靠性的同时验证了水模型的合理性。利用高速摄像机对水模型试验装置中的混合搅动情况进行拍摄,将模拟结果与捕捉的图像进行对比。由图2可知,拍摄的气泡运动行为和数值模拟的结果很相

似,证实了水模型试验的可靠性,并且也证实了数值模拟中建立的数学模型所采取的一系列求解方法的准确性和可行性。此外,凹坑形状将其分为浪涌、喷溅与穿透三种模式,冲击凹坑为浪涌模式时,冲击凹坑液面有轻微凹陷且没有液滴的生成。冲击凹坑为喷溅模式时,冲击凹坑液面有一定的凹陷并伴随着大量液体的飞溅。而穿透模式的冲击凹坑向外飞溅的液滴会明显减少,并形成了较深的凹坑。

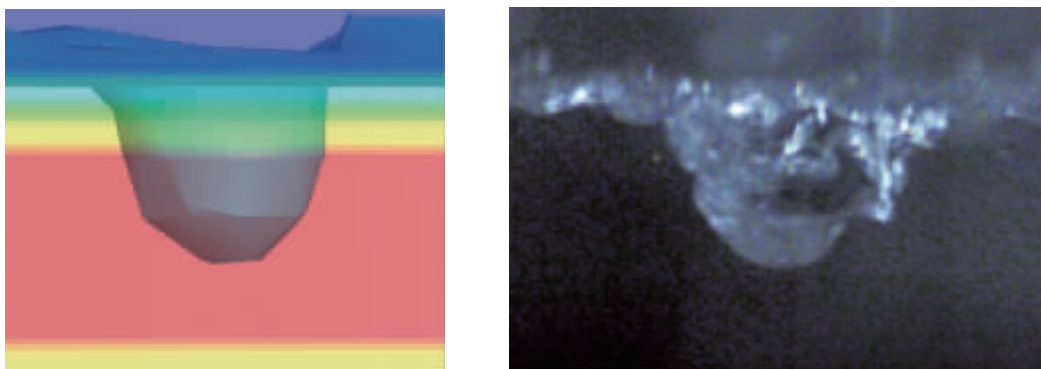


图2 顶吹模拟结果与试验结果对比

Fig. 2 Comparison between simulation data and experimental results of top-blowing

本研究引用无量纲凹坑形状指数(冲击凹坑的深度与凹坑直径的比值)对其进行表征,形象地描述冲击凹坑的形貌。熔池具有特定的凹坑形状指数及其对应的冶炼特征,凹坑的形状指数可实现对实际冶炼过程无法观测的冲击凹坑的数字化表征。该指数可由式(1)进行描述。

$$I_c = h_c / d_c \tag{1}$$

式中, I_c 为凹坑的形状指数; h_c 为凹坑深度(m); d_c 为凹坑直径(m)。

$Q=60$ L/min时,凹坑的形状指数为0.56。模拟与试验的误差小于5%,说明此时凹坑的形貌特征最好,对应更好的冶炼特性。

4 仿真结果分析

喷枪是多喷枪顶吹炉的重点研究内容,在吹炼过程中,气体通过喷枪冲及渣层,为反应提供富氧空气和熔体搅拌所需动力,直接影响顶吹炉的粗铜品位、粗铜含硫量、炉渣含铜率、炉寿及顶吹设备的能耗,故研究排布方式对搅拌效果的影响是非常有必要的。本文建立了单排和双排交错式共两种喷枪的排布方式的模拟模型。喷枪直径、喷枪之间的水平距离以及炉体尺寸与生产工艺保持一致,如图3所示。

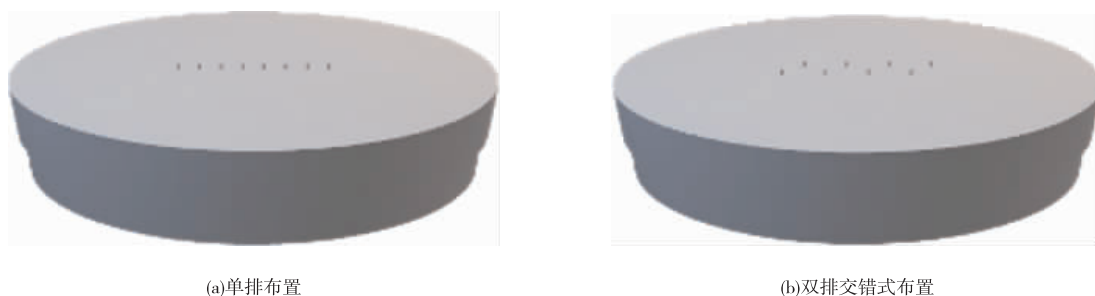


图3 中部出渣/端头出渣几何形状和网格模型

Fig. 3 Geometry configuration and mesh of the middle slagging/end slagging furnace

由图4可以明显地看出,双排交错式布置的空气相与渣层之间的混合不明显,渣层的搅动较小,其

动量扩散区域也小,局限于喷枪下方,此时液面波动幅度较小,横向的搅动效果差,熔池两端的动量传递

效果较差。单排布置的搅拌效果更强,主要原因是喷枪之间的相互作用,有效抑制了主射流的向下偏转,随着吹炼过程的进行,熔渣被完全吹走并移向熔池的外围。在熔池内部横向搅拌范围最大,对熔池上半部的搅拌效果更好,尤其是在渣层区域,与空气相的接触面积更大,高速气流进入炉膛后对渣层产

生较大的冲击,气-渣-金相互作用过程具有明显的瞬态和不稳定特征,并在此过程中产生了表面波,表面波的传播加剧了气-渣-金界面的不稳定性 and 不规则性。渣层受到高速气流对其的剪切作用,产生横向的流动效果,在实际生产中,有利于富氧空气与渣层的相间接触及反应,粗铜从渣中分离沉淀。

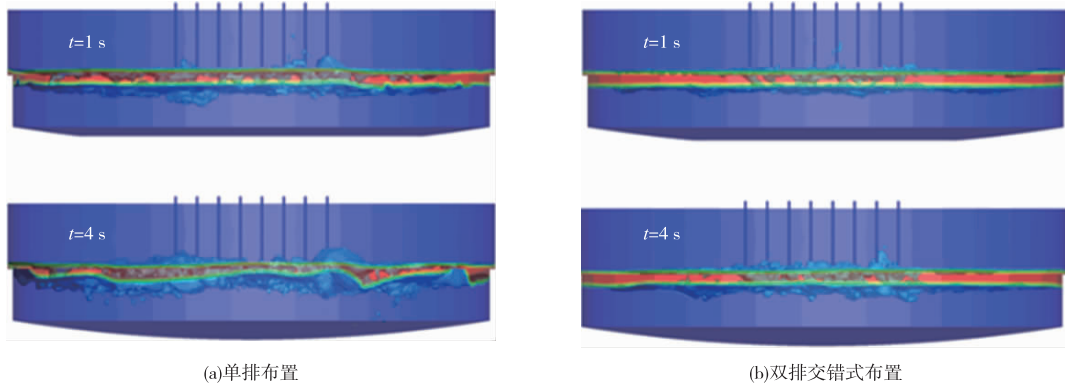


图 4 喷嘴所在位置横截面速度分布

Fig. 4 Cross-sectional velocity distribution at nozzle location

图 5(a)选取了 $t=2$ s 时刻炉内喷口周围不同位置的三条线段,并提取三条线内的熔体速度分布。整体来说,双排交错式布置在 L_1 的速度要大于单排布置的速度,存在较大的速度逆差,但单排布置在 L_2 及 L_3 的速度较大,说明单排布置在渣层具有较好的横向动量扩散能力。高速气流提供熔池内部流动的动力,将更多的动能收束于渣层是吹炼的目的。多喷枪的气流之间会相互影响,提供的横向动量,因此,管中的水平和垂直速度逐渐增加,单排布置的熔体速度较大,存在不均匀、有较大峰谷差值的速度场,熔体在富氧空气冲击熔池后存在较为明显的动能传递,使渣层有更好的流动特性,提高了渣层的搅拌效率。

图 6 为顶吹炉水平截面处的流体速度分布,其中液面和中间层分别表示渣相表面以及渣层中间截

面位置。由图 6 可知,在渣相表面,单排布置和双排交错布置的主要区别在于高速区域(红色)的分布差异,而两种喷枪排布方式在中间层的差异主要集中于高速区域的大小,即搅拌性能的强弱。单排布置在水平面以及铅垂面上的速度较大,扩散明显优于双排布置。

顶吹过程为湍流流动过程,可看成由时均流动与脉动流动叠加而成,各流体层之间有干扰。湍动能是湍流流动过程常见的模拟量。湍流运动过程消耗的总能量 E 可表示为脉动能耗散 ϵ 与时均能量耗散 E_1 的总和。在单排布置的顶吹湍流运动中,脉动黏性耗散 ϵ 更大,证明用于流体碰撞的功更大,产生的微涡旋数量更多,一定程度上反应了单排布置顶吹体系的流体碰撞及其运动规律较为优异。

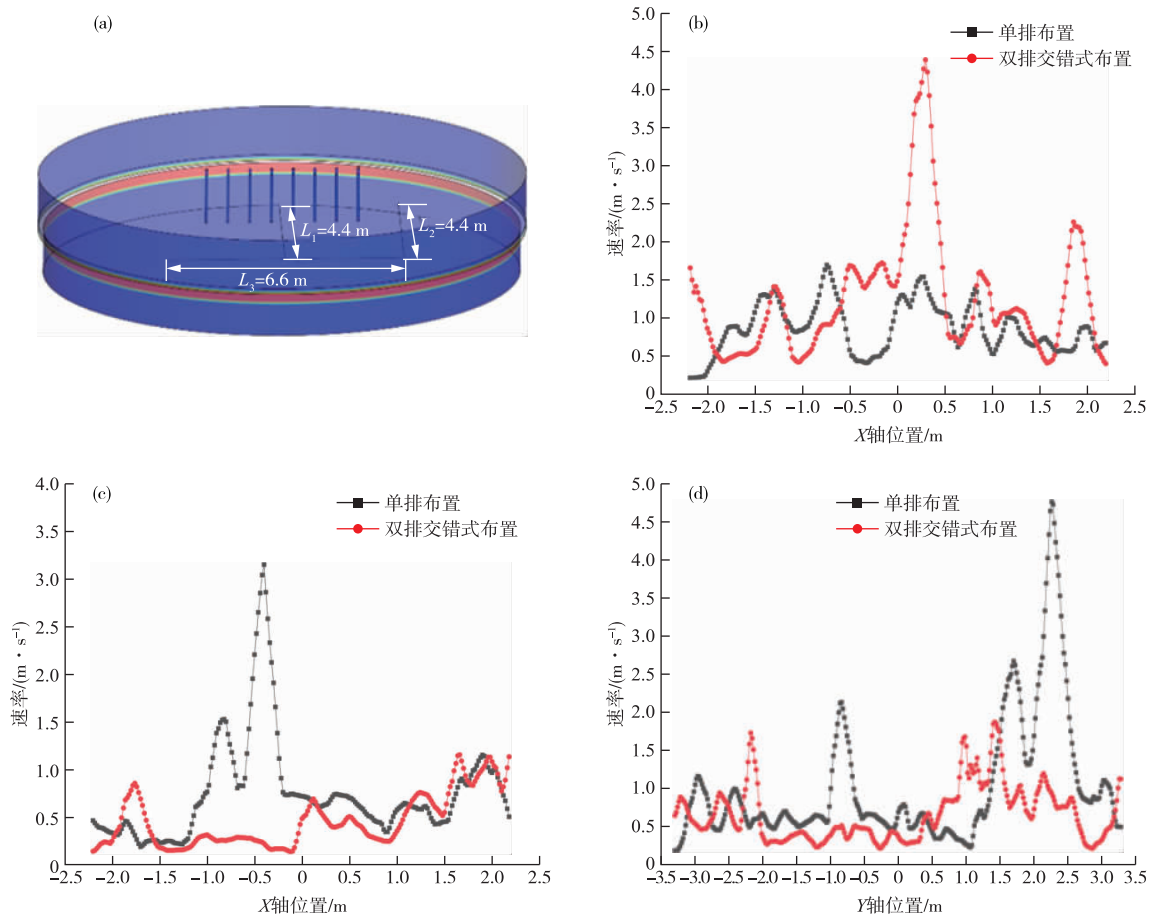


图5 喷嘴所在位置横截面速度分布

Fig. 5 Cross-sectional velocity distribution at nozzle location

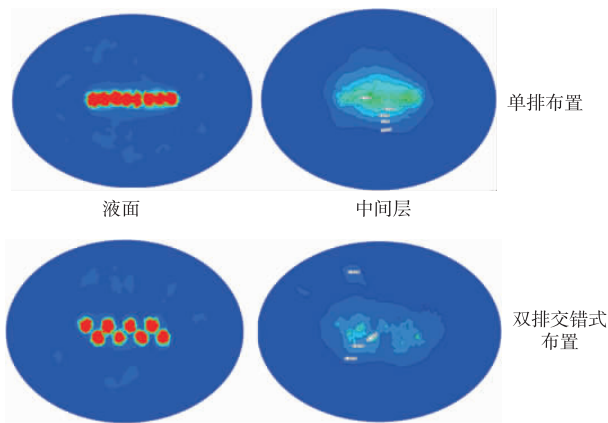


图6 顶吹炉内水平截面处的速度分布

Fig. 6 Velocity distribution at the horizontal cross-section in the top-blowing furnace

图7表示两种不同的喷枪排布方式下枪内射流扰动顶吹炉内流场并形成湍动能的瞬时分布图。双排交错式布置湍动能扩散区域较小,特别是在0.5s时,渣层中部水平截面湍动能并未扩散开,总体而言,

3s内水平截面湍动能活跃区域的数值基本都在8以下。单排布置的搅拌效果更强,湍动能横向大范围群岛式扩散,说明在渣层区域,其动量传递效果明显。总体上3s内的水平截面湍动能活跃区域的数值在24上下,是双排交错式布置的三倍。

图8表示单排、双排交错两种不同的喷枪布置方式下炉内的迹线发展情况。双排交错式布置的射入气体更多地直接向上逸散,而单排布置射入气体与熔池接触较多,有利于反应进行以及炉膛内温度的扩散,避免炉膛内部局部高温。图9为喷枪周围局部区域的流体迹线图。由局部气流迹线可以看出,单排布置的高速气流冲击熔体表面后向四周及上方扩散,有利动量的横向传递,各喷枪射出气流相互作用,加速熔池内部反应,但各喷枪射流之间耗散较少,大部分动量作用于熔体运动。而双排交错式布置喷枪正下方区域湍流特性明显,但两排喷枪的射流相互抵消,不利于动量横向扩散,能量产生耗散,不利于富氧空气与渣层反应。

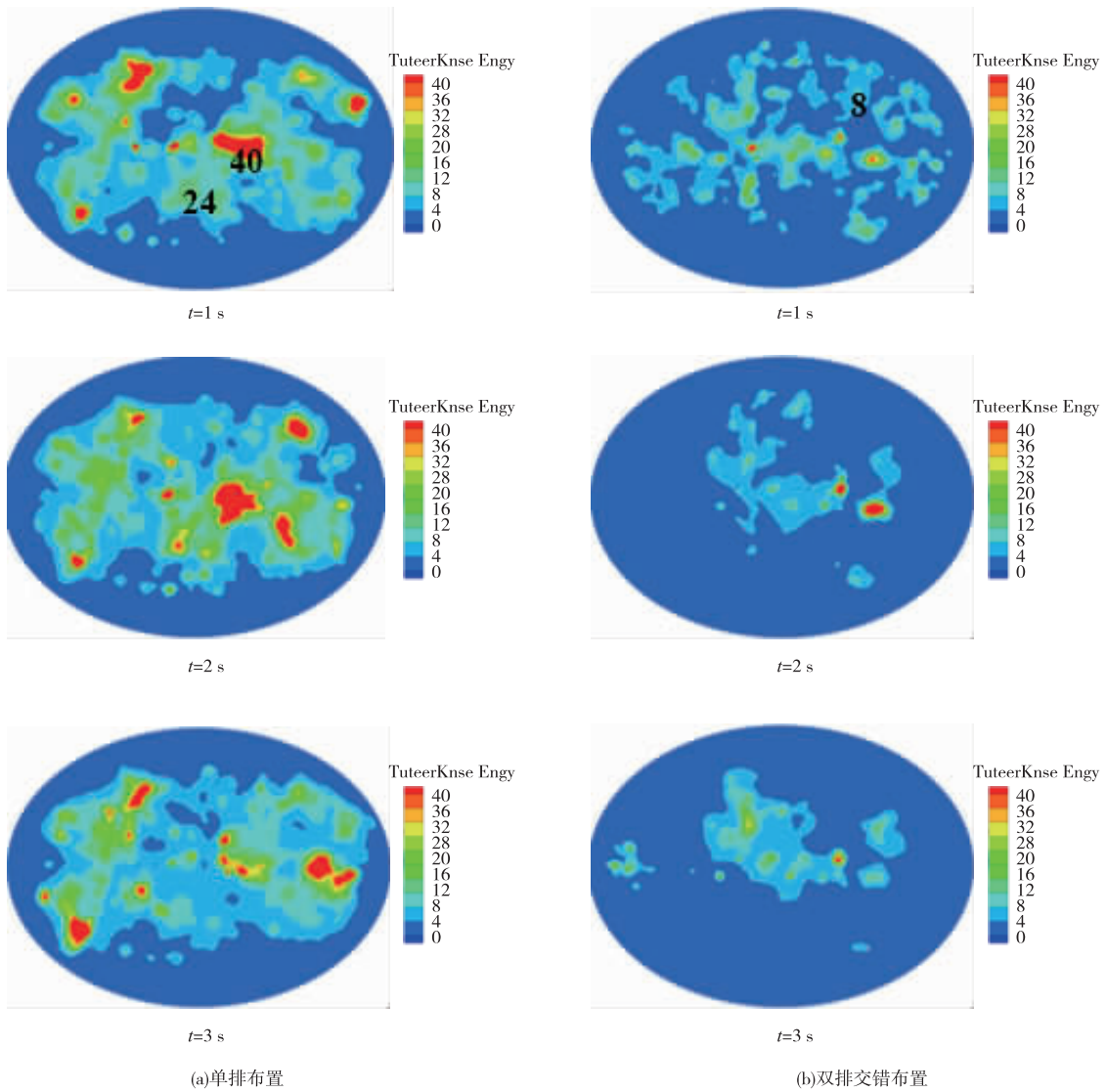


图 7 熔体水平截面湍动能随时间的变化

Fig. 7 Variation of turbulent kinetic energy with time in the horizontal cross section of the molten

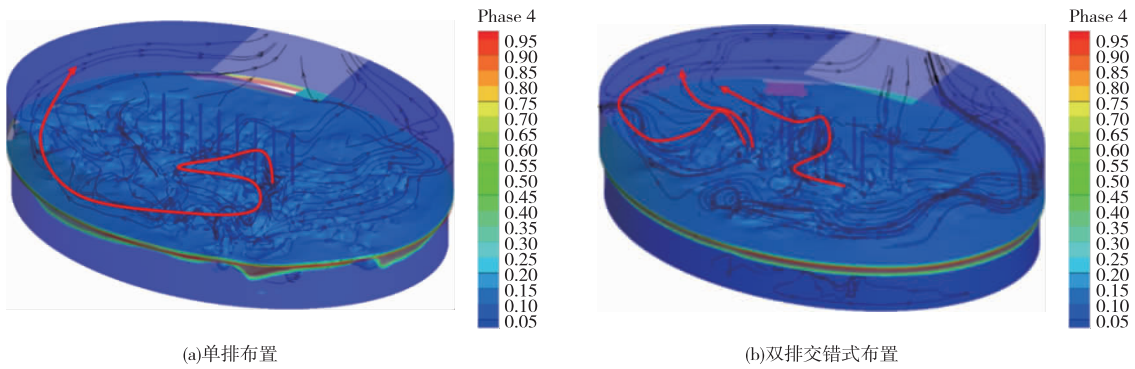


图 8 不同喷枪排布方式下炉膛内的迹线发展

Fig. 8 Trace development in the furnace with different arrangement methods of the lances

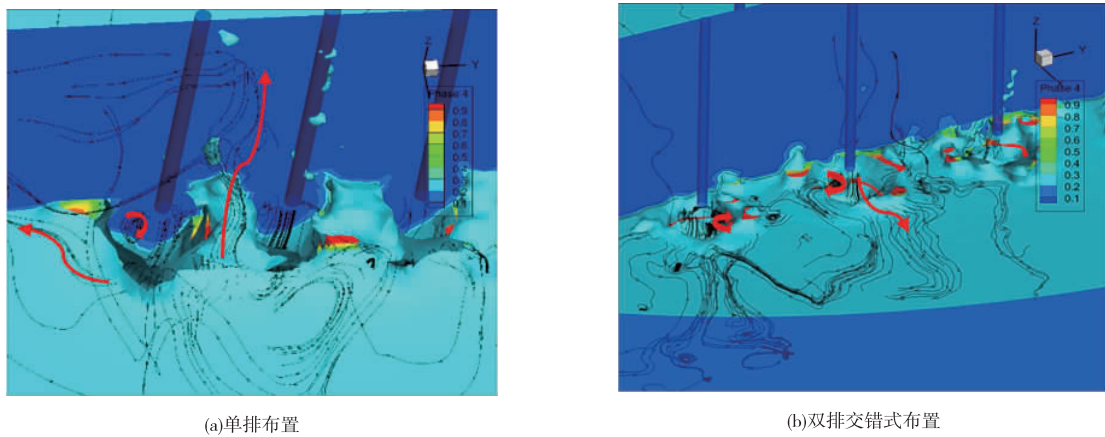


图9 不同喷枪排布方式下炉膛内局部区域的迹线发展

Fig.9 Trace development in the localized region of the furnace with different arrangement methods of the lances

气含率对气液接触面积、反应速率等其他流体力学参数有重要影响,也是表征气液两相流体力学的重要参数。对炉内 $z=1.2、1.3$ 和 1.4 m 三个水平横截面处的气含率进行了定量统计。三个截面的位置如图 10(a)所示。其中,图 10(b)-10(d)分别表示 $1\sim 4$ s 内 $z=1.2、1.3$ 和 1.4 m 水平面的气含率,而图 10(e)表示三个截面处气含率的时均值。由图 10 可知,单排布置与双排交错式布置中气含率随时间的变化。从整体上看,双排交错式布置的气含率逐渐降低,说明高速气流冲击渣层后形成的凹陷逐渐回缩,已经完成发展的阶段,达到稳定状态,液面的波动减弱,双排交错式布置的排布方式不利

于动量收束,且 $t=4$ s 时双排交错式布置气含率仅为单排布置气含率的 32% 甚至更低,气-渣相间接触面积较小会导致气体与渣的反应速率降低,不利于熔池内反应的进行与粗铜的产出。单排布置的气含率较大,表现出更好的气体在渣层的分布特性,说明熔池表面的震荡特性较好,渣层波动更为明显,具有更好的搅拌效果。从局部看,单排布置的气含率呈现出增长的趋势,渣层三个平面均有 15% 以上的提升,特别是在渣层与粗铜相交界面上 10 cm 的水平截面,提升率达到 93%,说明气体与渣相的接触面积仍在增大,呈现稳定发展的态势。

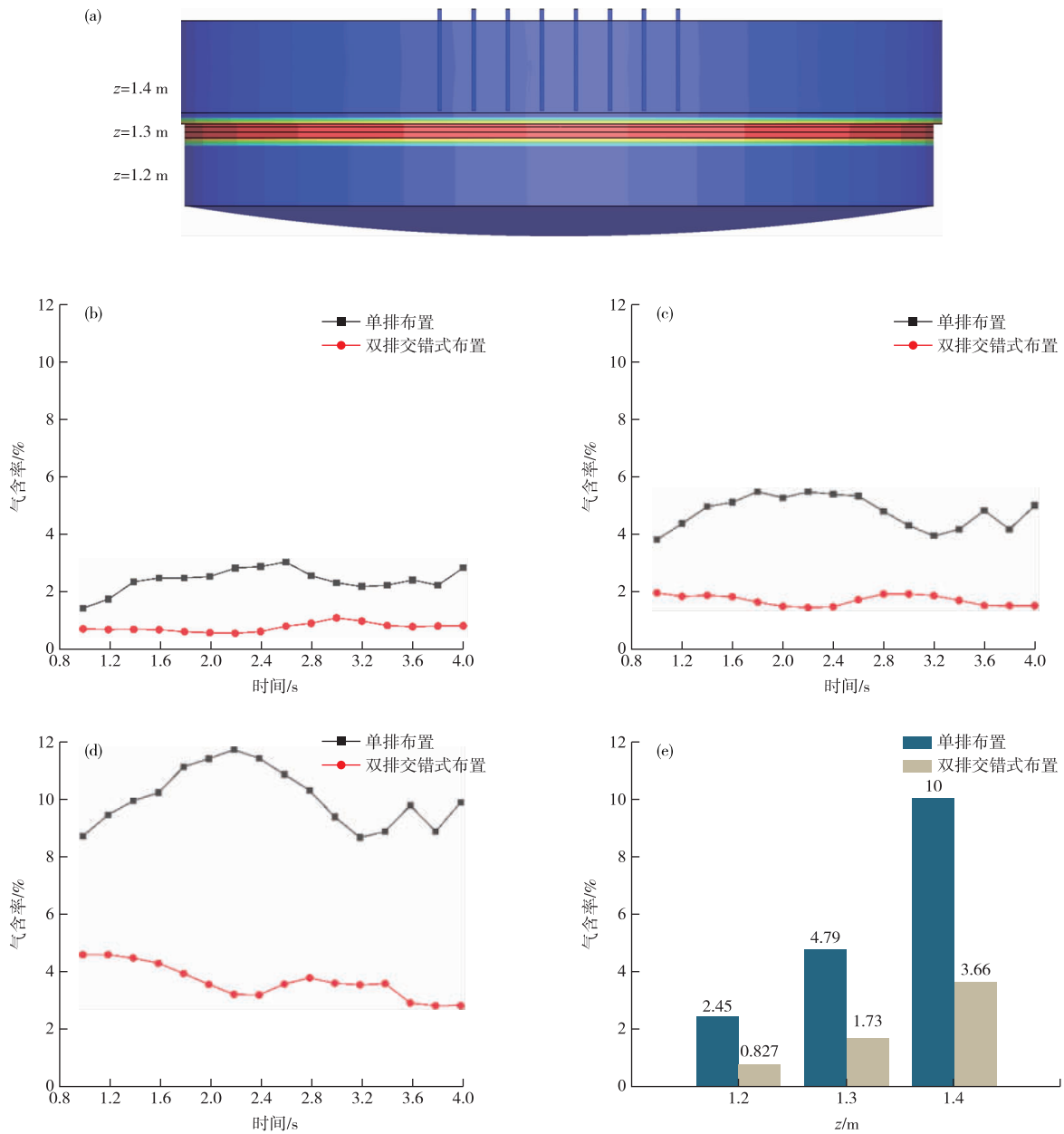


图 10 $z=2.0\text{ m}$ 高度截面下速度分布云图及面积占比

Fig. 10 Contour plots of the velocity and corresponding area percentage at $z=2.0\text{ m}$

5 结论

1) 分析了单排布置工况与双排交错式布置在渣层中部的速度表现。当进气速度相同时,单排布置情况下的渣层整体速度要更大,说明该种喷枪排布方式可以将更多的能量利用于渣相的运动,使得渣层具有更好的流动特性。双排交错式布置条件下的熔体速度不利于渣层的动量收束。

2) 熔体混合程度的快慢与平均湍流强度大小有关,平均湍流强度越大,流体能够越快的进行混合。单排布置湍动能平均数值为双排交错式布置的 3 倍。

熔池渣层湍动能的扩散使得气体与熔体接触更充分,能提高富氧利用率,有利于实现熔池更充分地自热。

3) 当 $z=1.2\text{ m}$ 时,单排布置的气含率较双排交错布置多 1.623%,且这种差值随着高度的增加而不断增大,说明气体与渣相的接触面积仍在增大,有利于气-渣两相间的反应,降低渣含铜率。

参考文献

[1] 李田玉,袁朝新,孙彦文. 双侧吹富氧熔炼试生产实践[J]. 有色金属(冶炼部分),2017(4):13-15.

- LI T Y, YUAN C X, SUN Y W. Trial production practice of double side oxygen-enriched smelting[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)* 2017(4): 13-15.
- [2] 王定纯,刘燕,李小龙,等.铜富氧双侧吹过程中物料卷吸的模拟[J/OL].*材料与冶金学报*:1-11[2023-02-16].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1473.TF.20220314.2017.006.html>.
- WANG D C, LIU Y, LI X L, et al. Simulation on material distribution of copper oxygen-enriched double-side blowing process[J/OL]. *Journal of Materials and Metallurgy*: 1-11 [2023-02-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1473.TF.20220314.2017.006.html>.
- [3] 廖文江.“白银炼铜法”工艺的发展和展望[J].*有色冶金设计与研究*,2019,40(2):30-31,50.
- LIAO W J. Development and prospect of Baiyin copper smelting process[J]. *Nonferrous Metals Engineering & Research*,2019,40(2):30-31,50.
- [4] 杨立有,罗雷.白银炼铜法技术改造实践[J].*甘肃冶金*,2022,44(2):41-43.
- YANG L Y, LUO L. Practice of technical transformation of silver copper smelting process[J]. *Gansu Metallurgy*, 2022,44(2):41-43.
- [5] 王保仁,杨洪英,金哲男,等.砷在富氧底吹炼铜过程中走向及物相结构[J/OL].*中国有色金属学报*:1-18 [2023-02-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.tg.20231226.1152.001.html>.
- WANG B R, YANG H Y, JIN Z N, et al. Arsenic distribution and phase structure in oxygen-enriched bottom blown copper smelting process[J/OL]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*:1-18[2023-02-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.tg.20231226.1152.001.html>.
- [6] 郭学益,王亲猛,廖立乐,等.铜富氧底吹熔池熔炼过程机理及多相界面行为[J].*有色金属科学与工程*,2014,5(5):28-34.
- GUO X Y, WANG Q M, LIAO L L, et al. Mechanism and multiphase interface behavior of copper sulfide concentrate smelting in oxygen-enriched bottom blowing furnace[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*,2014,5(5):28-34.
- [7] 周俊.铜冶炼工艺技术的进展与我国铜冶炼厂的技术升级[J].*有色金属(冶炼部分)*,2019(8):1-10.
- ZHOU J. Advances in copper smelting and converting process and technical upgrading in Chinese smelters[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*,2019(8): 1-10.
- [8] 李卫民.铜吹炼技术的进展[J].*云南冶金* 2008,37(5):24-28.
- LI W M. Advances in copper converting technology[J]. *Yunnan Metallurgy*,2008,37(5):24-28.
- [9] 林荔,何峰.富氧侧吹熔炼-多枪顶吹吹炼工艺全流程数值模拟[J].*有色金属(冶炼部分)*,2023(6): 103-112.
- LIN L, HE F. Numerical simulation of whole process of oxygen-enriched side-blown smelting and multi-lance top-blown converting[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*,2023(6):103-112.
- [10] 刘京超.多枪顶吹连续吹炼炉高浓度富氧炼铜生产工艺[J].*山西冶金*,2022,45(9):107-108.
- LIU J C. High concentration oxygen enriched copper smelting process in multi-lance top blowing continuous converting furnace[J]. *Shanxi Metallurgy*, 2022, 45(9): 107-108.
- [11] 李晋生.顶吹炼铜双炉系统在侯马冶炼厂的应用[J].*山西冶金*,2008,31(3):47-48.
- LI J S. Application of dual-furnace system for top-blown copper smelting in Houma Smelter[J]. *Shanxi Metallurgy*,2008,31(3):47-48.
- [12] 李文杰.非浸没顶吹非线性强化搅拌的数值模拟研究[D].昆明:昆明理工大学,2023.
- LI W J. Numerical simulation of non-submerged top blowing nonlinear enhanced agitation[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2023.