

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2026.03.010

引用格式: 宋英俊, 熊国涛, 李晓宇, 周维, 周卫辛, 胡君毅, 李应华, 杨世亮. 侧吹熔炼炉炉宽对熔池搅拌特性的影响机制[J]. 矿冶, 2026, 35(3): 435-443.

SONG Yingjun, XIONG Guotao, LI Xiaoyu, ZHOU Wei, ZHOU Weixin, HU Junyi, LI Yinghua, YANG Shiliang. Mechanism of the influence of furnace width on bath stirring characteristics in a side-blown smelting baths[J]. Mining and Metallurgy, 2026, 35(3): 435-443.

侧吹熔炼炉炉宽对熔池搅拌特性的影响机制

宋英俊¹ 熊国涛¹ 李晓宇¹ 周 维¹ 周卫辛¹ 胡君毅² 李应华² 杨世亮²

(1. 中国十五冶金建设集团有限公司, 武汉 430073;

2. 昆明理工大学, 冶金与能源工程学院, 昆明 650093)

摘 要: 侧吹熔池熔炼炉的大型化对炉体结构提出了新的挑战, 其中炉膛宽度的放大会显著改变气液两相流场组织和有效反应体积分布。本研究基于数值仿真方法, 构建不同炉体宽度下的三维瞬态数值模型, 研究熔池内气-液两相流动形态、界面扰动、搅拌强度及混合均匀性。结果表明: 在所有工况中, 侧吹射流及气泡羽流始终主要集中于喷枪附近的近壁区域, 炉膛中心和下部大面积为低速、低气含区。随着炉宽增大, 近壁循环尺度有所放大、界面扰动和气泡横向扩展增强, 但中心区域卷吸程度反而减弱, 弱搅拌甚至“死区”体积分数增加; 渣层平均气含率随炉宽由 2.5 m 增至 3.4 m 呈下降趋势, 表明单位体积熔体获得的气相参与度被明显稀释。不同炉宽下侧吹射流在高黏度熔体中的水平穿透深度差异较小, 说明炉宽变化对射流贯穿能力和自由表面稳定性的影响有限。

关键词: 富氧侧吹; 炉膛宽度; 熔池搅拌; 多相流; 数值模拟

中图分类号: TF 806.26

文献标志码: A

文章编号: 1005-7854(2026)03-435-09

Mechanism of the influence of furnace width on bath stirring characteristics in a side-blown smelting baths

SONG Yingjun¹ XIONG Guotao¹ LI Xiaoyu¹ ZHOU Wei¹ ZHOU Weixin¹
HU Junyi² LI Yinghua² YANG Shiliang²

(1. China No.15 Metallurgical Construction Group Co., Ltd., Wuhan 430073, China;

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

Abstract: The large-scale development of side-blown bath smelting furnaces poses new challenges to furnace structure design, among which the increase in furnace width significantly alters the gas-liquid two-phase flow organization and the distribution of effective reaction volume. In this study, three-dimensional transient numerical models under different furnace widths were established based on numerical simulation methods to investigate the gas-liquid two-phase flow morphology, interface disturbance, stirring intensity, and mixing uniformity within the bath. The results indicate that, under all operating conditions, the side-blown jet and bubble plume remain predominantly concentrated in the near-wall region adjacent to the tuyere, while the central and lower parts of the furnace exhibit large areas of low velocity and low gas holdup. As the furnace width increases, the scale of near-wall circulation expands, interface disturbance and lateral bubble spread are enhanced, but the entrainment intensity in the central region weakens, leading to an increase in the volume fraction of weakly stirred or even "dead" zones. The average gas holdup in the slag layer shows a decreasing trend as the furnace width increases from 2.5 m to 3.4 m, indicating a significant dilution of gas-phase participation per unit volume of melt. The horizontal penetration depth

收稿日期: 2025-11-15 修回日期: 2026-01-28 录用日期: 2026-02-09

第一作者: 宋英俊, 学士, 助理工程师, 研究方向为冶金炉窑工程。E-mail: 543447387@qq.com

通信作者: 杨世亮, 博士, 教授; E-mail: yangshiliang0802@163.com

©Mining and Metallurgy Editorial Department 2026. This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License.

of the side-blown jet in the high-viscosity melt exhibits little variation with furnace width, suggesting that changes in furnace width have a limited effect on jet penetration capability and free surface stability.

Keywords: oxygen-enriched side-blown; furnace width; bath stirring; multiphase flow; numerical simulation

富氧侧吹熔池熔炼技术凭借原料适应性强、熔炼强度高及环境友好等优势,近年来在铜冶炼领域获得了广泛应用,约占行业新增产能的60%^[1,2]。目前,国内已相继建成或在建多条年产30~40万t级的侧吹炼铜生产线,大型富氧侧吹炉正成为未来发展的重要方向。

为破解有色冶炼行业降本增效、侧吹炉大型化与其非线性过程强化搅拌能力不足之间的矛盾,现有研究主要采用水模实验和数值模拟两种手段。相比实验,数值模拟能够提供更详尽的流场数据,且不受高温环境与炉窑尺寸等实际条件制约^[3-5],已成为优化熔池冶炼过程与炉体设计的有力工具,广泛应用于侧吹熔池熔炼中强化搅拌的多物理场研究。常见的侧吹仿真模型包括流体体积(VOF)模型和Mixture欧拉多相流模型:前者适用于泡状流态模拟,可处理气液相物性差异大的问题;后者适用于射流主导的流动。对于熔池内湍流模拟,主要采用 $k-\varepsilon$ 方程模型^[6]。LIU等^[7]对比了多种湍流模型,发现Realizable $k-\varepsilon$ 模型在预测侧吹气泡尺寸、穿透深度及表面波动高度方面与实验数据吻合良好。在射流流态与穿透性研究方面,斯威本理工大学的HUDA等^[8]发现高温下气相射流的穿透深度为常温条件下的2.26倍,并将高温熔池流动划分为风口射流区、循环区与沉降区。针对侧吹炉寿命,北京科技大学的WEI和XIAO等^[9,10]指出侧吹喷枪的倾角设计会增加射流垂直方向的速度分量,从而加剧喷枪及炉衬的侵蚀。在工艺与结构对冶炼过程的影响方面,中南大学的刘维超^[11]和周萍等^[12]提出,提高风速或降低侧吹风口高度虽能提高混匀效率,但也会引发更严重的熔体飞溅。

近年来,炉体大型化(尤其是炉膛宽度的增加)带来了新的流场组织难题。现有固定角度侧吹喷枪在宽炉膛中搅拌覆盖不足,导致熔池流动不均、反应效率下降。实际工程中侧吹炉炉膛宽度长期受限,正是因为宽度增加后射流搅动减弱、气含率降低。因此,亟需深入研究炉体宽度对侧吹熔池内多相流场与强化搅拌特性的影响规律,明确合理的炉宽范围及放宽策略,为大型富氧侧吹熔炼炉的设计优化提供指

导。本研究聚焦炉膛宽度变化对侧吹熔池搅拌的影响,采用高精度计算流体力学(CFD)模拟,分析不同炉宽工况下熔池气液两相流动形态与湍流搅拌结构特征,重点评估炉膛放大对混合均匀性及熔体飞溅风险的作用机制,并提出相应的结论与工程建议。

1 数值模型描述

VOF模型用于捕捉气液两相的交界面,对于多相之间的相界面是通过求解多相体积分数的连续性方程来进行跟踪的,对于第 q 相,这个方程有如下形式:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \alpha_q = \frac{S_{\alpha_q}}{\rho_q} \quad (1)$$

式中, α_q 为第 q 相的体积分数; ρ_q 为第 q 相的密度; S_{α_q} 为源项。

在VOF模型中,通过求解侧吹炉整个区域内单一的动量方程来获得速度场,同时速度场作为计算结果由各相共享,动量方程取决于基于控制容积内所有相的体积分数所得到的 ρ 和 μ 。

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

式中, ρ 为流体的密度; $\vec{u}$ 为流体的速度; μ 为流体的粘度; $\vec{F}$ 为表面张力。

在VOF模型中,能量方程的表达式为:

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

$$E = \frac{\sum \alpha_q \rho_q E_q}{\sum \alpha_q \rho_q} \quad (4)$$

式中, E_q 是通过第 q 相的比热容和共享的温度 T 计算得到的; k_{eff} 为有效热传导;源项 S_h 包含辐射和其它容积热源。

对于侧吹熔池熔炼炉内气、渣、铜钼多相共存的湍流运动,本研究采用Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型进行描述,该模型的涡黏性公式保证了正应力为正,并满足剪切的施瓦茨不等式^[13],提高了对流动自由剪切层和大规模回流的预测精度。与VOF方法耦合时,Realizable $k-\varepsilon$ 能够更好地捕捉多相流中相界面与湍流之间的相互作用。

在 Realizable k - ε 模型中, k 和 ε 的控制方程分别为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla(\rho \vec{u} k) - \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) \nabla^2 k = G_k + \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla(\rho \vec{u} \varepsilon) - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right) \nabla^2 \varepsilon = \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (6)$$

2 物理参数与边界条件

根据某 574 m³ 大型富氧侧吹炉的工程图纸, 按比例 1:1 重建炉膛几何结构。炉体主要尺寸: 长约 24.0 m、高 7.2 m。炉底为碟形结构, 炉顶为拱顶, 以增强炉体的强度和热应力分散能力。熔池初始相分布设定中, 0.95 m 厚铜铈相连续分布于炉底区域, 其上方覆盖 1.15 m 厚渣相介质层。铜铈相、渣相及炉内气相(烟气)分别取代表性温度 1 250 ℃、1 300 ℃ 和 1 280 ℃ 作为初始温度设定。喷枪安装高程位于渣-铈界面以上 0.565 m 处。其它模型参数见表 1。在熔炼过程中, 富氧混合气体由氧气与氮气按 4:1 体积比混合配制而成, 通过风口鼓入渣层。单支喷枪喷嘴直径为 0.034 m, 最大供气强度为 1 000 Nm³·h⁻¹, 通过渣层的气相射流形成离散气泡群, 其浮力驱动产生的湍动能显著强化了熔池内部循环流动, 进而优化了气-渣体系的热质传递效率及冶金反应动力学条件。其他模拟相关操作参数见表 2。其中, 渣相与铜铈相均视为不可压缩牛顿流体, 且暂不考虑化学反应、相变、辐射换热及溶质传递等效应, 研究重点聚焦于动量传递主导下的两相分布、界面扰动、循环流动与宏观搅拌强度差异。

表 1 侧吹炉模型参数

Table 1 Side-blown furnace model parameters

参数	数值	参数	数值
炉高/m	7.2	喷枪间距/mm	600
炉长/m	24.0	喷枪直径/mm	34.0
喷吹气量/(Nm ³ ·h ⁻¹)	1 000	铜铈高度/m	0.95
喷吹气速/(m·s ⁻¹)	282.18	铜渣高度/m	1.15

计算域几何体仅由没有空隙的流体区域组成, 采用对称边界条件, 网格数量约为 667 万(图 1)。针对侧吹炉渣相搅拌区域、风口及附近区域进行局部加密, 确保可以捕捉到关键流动特征。为有效捕捉近壁面流动, 在近壁面区域采用 3 层棱柱网格。喷吹入口采用速度入口边界。炉膛顶部气相出口采用压力出

表 2 侧吹熔池熔炼系统操作条件参数

Table 2 Operating conditions of side-blown

melting pool system

参数	值
重力加速度/(m·s ⁻²)	9.81
环境压力/Pa	101 325
铈相密度/(kg·m ⁻³)	5 183
铈相黏度/(kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	0.001 83
铈相热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	3.95
铈相比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	910.65
渣相密度/(kg·m ⁻³)	3 800
渣相黏度/(kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	0.2
渣相热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	2.09
渣相比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	1 453
气-铈相间张力系数/(N·m ⁻¹)	0.442
气-渣相间张力系数/(N·m ⁻¹)	0.389

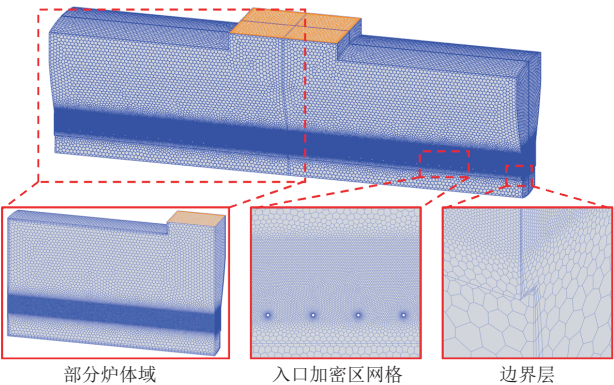


图 1 计算域网格划分示意

Fig. 1 Schematic diagram of computational domain mesh generation

口, 环境压力取 101 325 Pa; 对称面采用对称边界; 其余壁面为无滑移固壁。数值求解采用压力基瞬态求解器。VOF 界面重构采用 Geo-Reconstruct 格式; 压力-速度耦合采用 PISO 算法, 动量与湍流方程采用二阶迎风格式。时间推进采用固定时间步长 5.0×10⁻⁵ s, 每个时间步迭代不超过 30 次, 使连续性残差低于 10⁻³。计算时长覆盖喷吹启动至准稳态阶段(0~8 s), 关键统计量在后 3 s 时间窗内取时间平均。

为评估炉体宽度对侧吹熔池流场和搅拌性能的影响, 设计了四组对比工况, 仅改变炉膛宽度参数, 其余结构和操作条件保持一致。选取的炉体宽度 L , 分别为 2.5、2.8、3.1 和 3.4 m, 对应模拟窄、中等、较宽和超宽炉膛结构, 以研究炉宽对流场的影响。图 2 展示了 2.5 m 炉宽条件下侧吹炉窑结构, 以及不同炉宽条件下炉膛截面尺寸的变化。

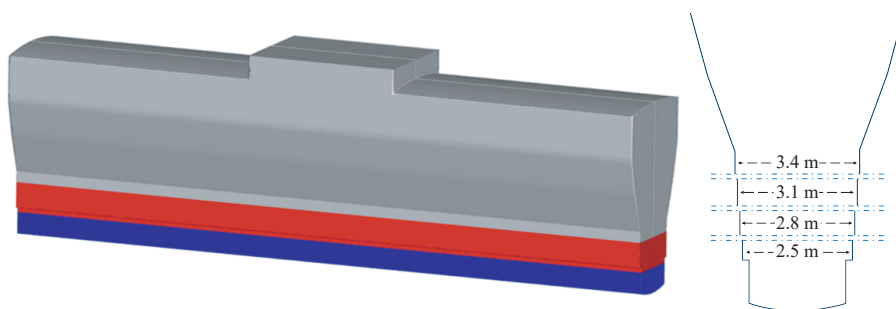


图2 侧吹炉窑结构及炉体宽度工况示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the side-blown furnace structure and furnace body width under operating conditions

3 结果与讨论

瞬态气液两相分布图理解喷吹过程中气泡群的动态演化、界面失稳机制及局部气液相互作用提供了关键依据,能够直观地反映射流扰动在熔池内的空间分布特征与瞬时搅拌行为。图3为不同炉宽工况下侧吹熔池气液相间界面瞬态速度分布云图。由图3可知,炉膛宽度对气泡射流在熔池内的空间分布形态影响明显:在窄炉(宽度2.5 m)中,喷入熔池的气泡主要沿喷枪所在侧壁贴附上升,几乎不向炉中心扩散,气液界面保持相对平整;当炉宽增至2.8 m

时,气泡羽流开始部分脱离侧壁约束,朝炉中心方向迁移,局部扰动影响范围有所扩大;继续增宽至3.4 m时,气泡羽流扩散范围进一步增加,界面出现复杂的波动褶皱。这表明更宽阔的炉膛为气泡运动提供了更充裕的空间,减弱了壁面黏附效应,促进气泡的碎裂和分散。然而即便在最宽炉膛中,气泡仍然以靠近喷吹侧壁的分布为主,气体并未真正均匀遍及整个炉横截面,说明适度增加炉宽虽有助于扩大气液扰动的空间覆盖范围,但无法使气泡在炉内完全均匀散布至中心区域。

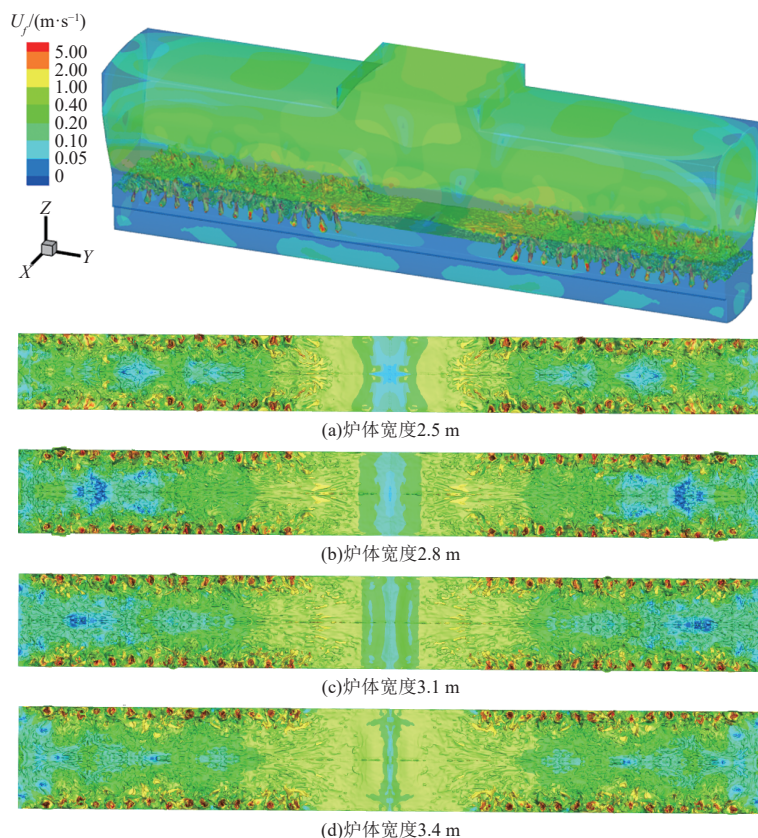
图3 不同炉宽工况下气液相间界面瞬态速度分布云图($t=8$ s)Fig. 3 Transient velocity distribution cloud maps of the gas-liquid interface under different furnace width conditions($t=8$ s)

图4为不同炉宽工况下熔池截面的气相体积分数(气含率)云图,从图4可以更加定量地观察气泡在熔池中的扩散程度和混合均匀性。由图4可知,在所有炉宽条件下,气泡均主要集中于喷枪射流上方并沿侧壁形成明显的“贴壁上浮”羽流带。对于窄炉(2.5 m),由于炉膛横向空间受限,高气含率区域局限在靠近侧壁的狭窄通道内,横向扩散范围很小,炉心大部分区域处于低气含状态。随着炉宽增大到2.8 m和3.1 m,中等宽度炉膛中羽流带向炉中心方

向有所外展,气含率等值线分布趋于平缓,说明已有气泡逸出至炉心区域,搅拌覆盖范围得到扩大。对于超宽炉膛(3.4 m),高气含率区域进一步向横向扩展,两侧壁附近上升的气泡流在接近渣层液面处逐渐汇合,形成跨越整个炉膛宽度的气泡覆盖带。炉宽增加显著减轻了壁面对气泡羽流的束缚作用,促进更多气泡向炉中心迁移,从而一定程度上提升了熔池内气液混合的空间均匀性。

然而,尽管炉宽3.4 m时气相覆盖范围大幅增

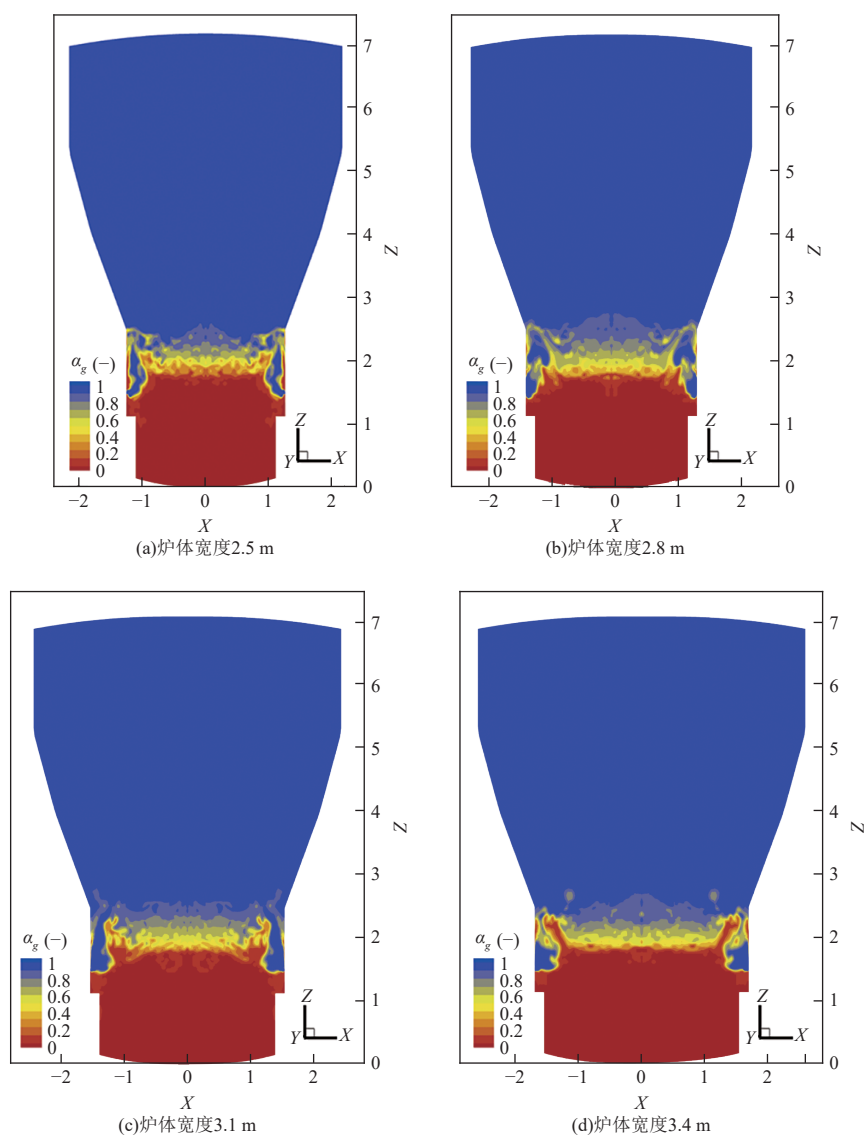


图4 气相体积分数分布云图示意, $t=8$ s

Fig. 4 Schematic diagrams of gas phase volume fraction distribution, $t=8$ s

加,但气泡浓度最高的区域依然位于喷枪侧壁附近及液面附近。炉膛中心深部的气含率相较于近壁区域仍然偏低。这说明炉体加宽并未使气泡真正遍布整个炉膛截面,气液分布的均匀性提升是相对和有限的。在超宽炉膛中,熔池中央下部区域的气泡含

量依然较少,这将导致这些区域的反应物得不到气相充分接触,局部搅拌作用不足。

炉膛宽度作为决定熔池流动空间尺度的关键几何参数,直接影响射流的发展形态、动量传递路径和回流循环结构的规模。通过对比分析不同炉宽(2.5、

2.8、3.1、3.4 m)下熔池内部速度分布云图和流线结构(图5),可以揭示炉宽对熔池流动特性与搅拌效率的影响规律。从图可以看出,各工况中高速区均紧贴喷枪所在侧壁沿上升通道分布,形成典型的“贴壁射流+上升羽流”结构,而炉膛中心和下部大面积为蓝色低速区,流线疏散、曲率较小,表明中心熔体处于明显的弱搅拌状态。随着炉宽由2.5 m增至2.8 m和3.1 m,靠壁主循环尺度有所放大,但其核心位置愈发偏向

侧壁,炉心低速区范围随之扩大;当炉宽进一步增大到3.4 m时,高速带仍局限于近壁通道,中心及对侧下部几乎完全被低速区占据,局部回流涡旋弱小而分散,呈现近似“死区”的流动特征。这说明在现有喷吹条件下,炉宽放大并未将射流动量均匀铺展至炉膛中央,反而强化了近壁集中搅拌、削弱了中心卷吸,导致参与冶炼反应的有效熔体体积分数随炉宽增加而下降,过宽炉体不利于整体混合与反应效率的提高。

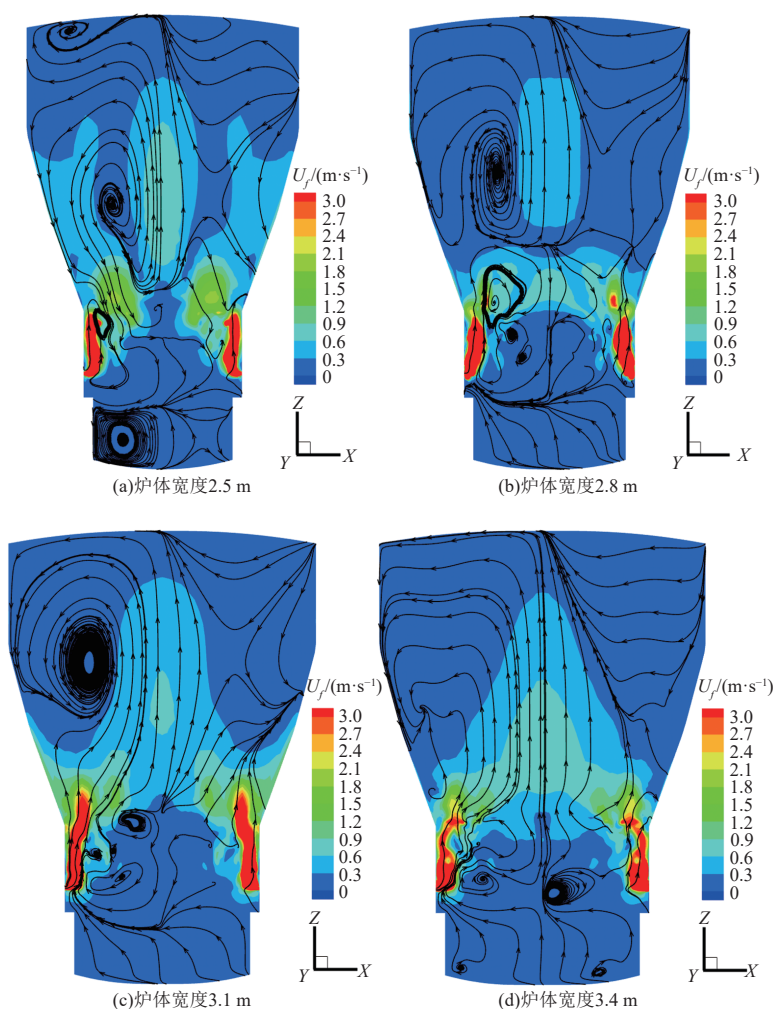


图5 不同炉体宽度下侧吹过程速度分布及流线示意($t=8$ s)

Fig. 5 Schematic diagrams of velocity distribution and streamlines during side blowing process under different furnace widths($t=8$ s)

为定量评估炉宽对侧吹射流横向推进能力的影响,提取了各工况下射流在渣层内的水平穿透长度(图6(a))。射流穿透长度定义为喷枪中心线上时均气相体积分数首次低于0.5的位置到喷嘴出口的距离。结果表明,在炉宽2.5~3.4 m,各工况射流穿透深度差异不大,数值介于约232~248 mm,最大差值不足16 mm。可见在本研究所设定的喷吹强度和物性参数下,炉膛几何尺寸对射流动量横向贯穿能力的影响很

小。即使炉膛加宽至3.4 m,侧吹射流在高黏度熔体中的穿透长度仍保持在与窄炉近似的水平。这是由于射流穿透深度主要取决于喷吹动能和熔体的物性参数,如密度和黏度,而炉宽的改变更多地影响射流的偏转角度和在炉内的回流形态,对单股射流自身的贯穿力作用有限。因此,适度增加炉宽并不会削弱侧吹射流在熔池中的穿透性能,反映出喷枪射流具有一定的自主贯穿能力,不易受炉膛横截面尺寸影响。图6(b)-(d)

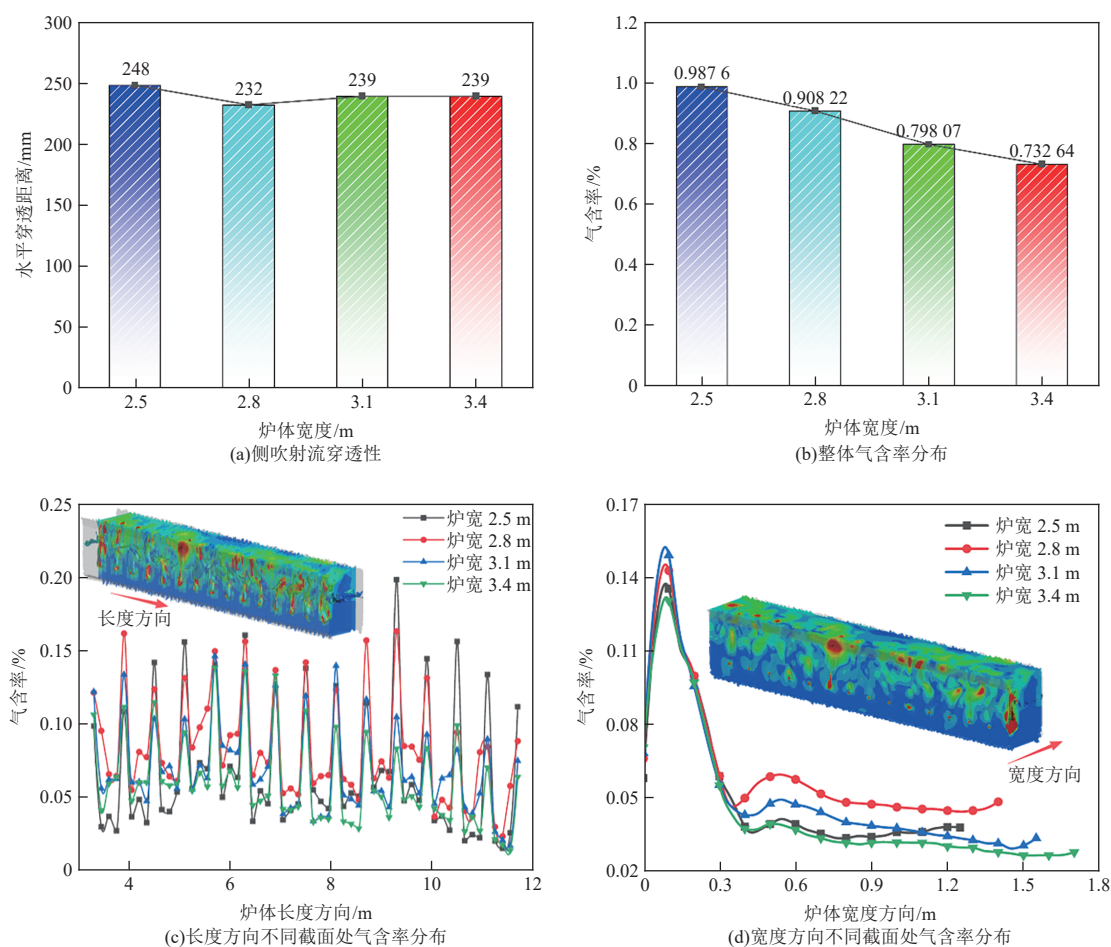


图6 炉宽对侧吹射流穿透性以及渣层气含率的影响

Fig. 6 Effects of furnace width on side-blown jet penetration and slag gas holdup

进一步给出了不同炉体宽度条件下不同区域渣层气含率变化的统计结果。可以看出,在喷吹强度保持不变的条件下,随着炉体宽度增大,渣层平均气含率呈下降趋势,整体降幅约为26%,表明在更宽的炉膛中,相同气量被分配到更大的熔体体积内,单位体积内所能获得的气相参与度降低,气液接触和搅拌作用在统计意义上被“稀释”。结合前述速度场和气泡分布云图中“射流及气泡主要集中在近壁区域、炉心为低速弱扰动区”的特征可知,在炉宽放大过程中,近壁高气含区虽始终存在,但其对中央区域的影响逐渐减弱,导致中心熔体卷入气泡搅拌的体积分数不断减少,越来越多的熔体处于低气含、弱搅拌状态。从能量与体积效应角度,可将喷吹对熔池的有效搅拌能力表征为单位体积功率输入 $\varepsilon=P/V$ (P 为气体做功功率, V 为渣层参与搅拌的有效体积)。在喷吹强度与喷嘴条件固定时, P 近似不随炉宽变化而显著改变,而 V 随炉宽近似线性增加,导致 ε 随炉宽放大而下降,从而使湍动能生成和气泡卷吸能力被“稀释”,表现为平均气含率单调下降与中心区欠曝气加剧(图6(d)),进一步佐证

了炉体过宽并不利于熔池整体参与反应和冶金效率提升。

喷溅质量是表征侧吹炉内喷吹扰动强度与系统运行稳定性的核心物理量,其动态行为直接关联于气泡上浮破裂、气液界面失稳及局部动量过载所引发的高温熔体喷射现象。图7显示了不同炉体宽度条件下熔池喷溅质量随时间演化的变化规律。为定量表征喷溅行为,在任一时刻 t ,将自由液面基准高度以上0.1 m的空间范围定义为喷溅统计域($z>2.2$ m),并将该统计域内液相的总质量记为喷溅质量。可以看到,在喷吹初始阶段,各曲线在极短时间内同时出现一个尖锐的高峰,峰值接近3 000 kg,随后迅速衰减并伴随数个次级峰,表明射流刚入炉时对自由表面产生强烈冲击,触发剧烈但短暂的喷溅过程;之后系统进入准稳态振荡区,喷溅质量在600 kg上下波动。综合各曲线形态可知,各炉宽下喷溅质量随时间的峰值、衰减节奏及稳态振荡水平高度相近,说明喷溅行为主要由局部近壁射流及气泡破裂所主导,单纯加宽炉膛并不会显著降低或放大喷溅风险。可

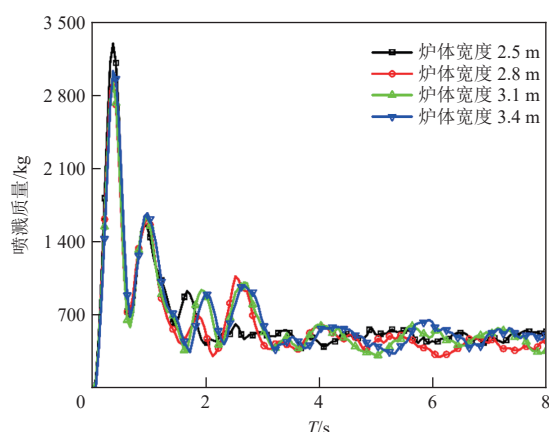


图7 不同炉体宽度下喷溅量随时间的变化

Fig. 7 Variations of splash volume over time for different furnace widths

见,在现有喷吹条件下,炉体过宽的主要问题在于削弱中心区参与冶炼反应的比例,而非明显改善或恶化自由表面喷溅行为,后续炉宽扩大优化可通过喷枪布置和搅拌方式调整来兼顾中心搅拌与喷溅控制。

4 结论与展望

1)炉体宽度显著影响熔池内鼓泡搅拌结构的空分布。当炉宽为2.5~3.4 m时,侧吹射流及其诱导的气泡羽流始终沿喷枪所在侧壁形成“贴壁上升”通道,高速区与高气含率区主要集中于近壁区域。随着炉宽增大,近壁大尺度循环结构虽有所放大,但其核心位置愈发偏向侧壁,炉膛中心及下部的低速、低湍流区域体积分数增加,弱搅拌乃至局部“死区”现象加剧,导致中心熔体参与循环与冶炼反应的比例持续下降。

2)炉宽放大导致熔池整体曝气水平被稀释。当炉宽由2.5 m增至3.4 m时,渣层平均气含率由约0.99%下降至约0.73%。在总喷吹气量不变的条件下,相同气体被分配至更大的熔体体积中,单位体积熔体获得的气相参与度显著降低,这是大尺度炉膛中整体反应效率下降的根本原因之一。

3)在本研究条件下,炉宽对射流贯穿能力及喷溅风险的影响有限。不同炉宽下,渣层内射流水平穿透深度始终维持在232~248 mm的窄幅区间内,表明射流在高黏度熔体中的横向贯穿能力主要由喷吹动能与物性决定,对炉膛横截面尺寸不敏感;各炉宽下喷溅质量的峰值、衰减节奏及稳态振荡水平高度相近,说明喷溅行为主要由局部近壁高能区控制,单纯加宽炉膛并不会显著降低或放大喷溅风险。

单一通过增加炉膛宽度来实现侧吹炉的大型化

并不可取。过宽的炉体虽在几何上增大了反应空间,但近壁集中搅拌、炉心弱扰动及整体气含率下降等效应,会使更多中心熔体难以充分参与冶炼反应,从而制约工艺效率的提升,建议炉膛宽度控制在3.1 m以内。未来在产能放大需求下,若炉宽须超过3.1 m,侧吹炉设计应同步提高中心区动量与曝气覆盖,通过优化喷枪数量与布置、高度与倾角,发展多排或可调角度喷枪,并与顶吹、底吹等复吹方式协同,强化炉心区域的搅拌与曝气,以实现大型富氧侧吹炉内反应区的全截面均匀强化。

参考文献

- [1] 张学友,王海北, MA HAO. 铜产业的双碳目标实现路径与方法[J]. 矿冶, 2024, 33(3): 456-465.
ZHANG X Y, WANG H B, MA H. Paths and methods for achieving carbon peaking and carbon neutrality in the copper industry[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(3): 456-465.
- [2] 张敏, 匡彪, 李东波, 等. 富氧双侧吹铜熔池熔炼炉上升烟道结渣的矿物学分析[J]. 矿冶, 2024, 33(3): 438-447.
ZHANG M, KUANG B, LI D B, et al. Mineralogical analysis of rising flue slag in an oxygen-enriched double-side-blowing copper bath smelting furnace[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(3): 438-447.
- [3] 艾元方, 周睿, 帕提玛·柯孜尔亚. U形炉操作参数正交试验法优化[J]. 矿冶, 2018, 27(4): 66-71.
AI Y F, ZHOU R, PATIMA K. Optimization of operational parameters for U shaped furnace based on orthogonal experiment[J]. Mining and Metallurgy, 2018, 27(4): 66-71.
- [4] 刘力刚, 蔡新雨, 赵震, 等. 有芯感应炉熔沟焦耳热与流场数值模拟[J]. 矿冶, 2022, 31(3): 119-125.
LIU L G, CAI X Y, ZHAO Z, et al. Numerical simulation on Joule heating and flow field in melting channel of channel type induction furnace[J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(3): 119-125.
- [5] 吕南, 袁朝新, 孙彦文. 小型等离子体铜渣贫化炉的设计优化与开发[J]. 矿冶, 2022, 31(1): 114-119.
LYU N, YUAN C X, SUN Y W. Design optimization and development of small plasma copper slag dilution furnace[J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(1): 114-119.
- [6] 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.
WANG B, SHEN S Y, RUAN Y W, et al. Simulation of gas-liquid two-phase flow in metallurgical process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(4): 619-632.
- [7] LIU Y T, YANG T Z, CHEN Z, et al. Experiment and numerical simulation of two-phase flow in oxygen enriched side-blown furnace[J]. Transactions of Nonferrous Metals

- Society of China, 2020, 30(1): 249-258.
- [8] HUDA N, NASER J, BROOKS G, et al. Computational fluid dynamics (CFD) investigation of submerged combustion behavior in a tuyere blown slag-fuming furnace[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2012, 43(5): 1054-1068.
- [9] WEI G S, ZHU R, TANG T, et al. Study on the impact characteristics of submerged CO_2 and O_2 mixed injection (S-COMI) in EAF steelmaking[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2019, 50: 1077-1090.
- [10] XIAO Y D, LU T, ZHOU Y, et al. Computational fluid dynamics study on enhanced circulation flow in a side-blown copper smelting furnace[J]. *JOM*, 2021, 73: 2724-2732.
- [11] 刘维超. 烟化炉内气液两相流动数值模拟研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- LIU W C. Numerical simulation on gas-liquid two-phase flow in fuming furnace[D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [12] 祝振宇, 周萍, 陈卓, 等. 气体喷吹对富氧侧吹炉内两相流动影响的数值模拟[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(2): 398-408.
- ZHU Z Y, ZHOU P, CHEN Z, et al. Numerical simulation on effect of air injection on two-phase flow in oxygen-enriched side-blown furnace[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(2): 398-408.
- [13] SHIH T H, LIOU W W, SHABBIR A, et al. A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows[J]. *Computers & Fluids*, 1995, 24(3): 227-238.