

侧吹熔炼炉新型可旋转喷枪强化搅拌机制数值仿真研究

宋英俊¹, 李应华², 熊国涛¹, 李晓宇¹, 周 维¹, 周卫辛¹, 刘慧利²

(1. 中国十五冶金建设集团有限公司, 湖北 武汉 430073; 2. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 侧吹熔池熔炼炉喷枪的喷吹特性直接决定炉内反应强度和冶炼效率。本研究基于计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)对一种可旋转调节角度的新型侧吹喷枪强化熔池搅拌的过程开展机理研究, 并优化其结构参数。采用流体体积(volume of fluid, VOF)多相流模型耦合 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型, 对富氧侧吹熔炼炉内的气-液两相流动进行瞬态模拟, 考察喷枪旋转角度(0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60°)对熔池内流场和搅拌性能的影响。结果表明, 喷枪旋转角度对熔池流动具有非线性调控作用。适度旋转(30° 左右)可扩大气体扰动范围、提升界面更新率并改善搅拌均匀性; 而旋转角过小(0°)或过大(60°)均会导致流场偏斜和局部混合不良。综上所述, 新型侧吹可旋转喷枪通过优化旋转角度, 可在强化熔池搅拌的同时兼顾炉衬保护与喷枪寿命延长。本研究为大型富氧侧吹炉喷枪设计优化提供了理论依据和工程指导。

关键词: 富氧侧吹; 旋转可调喷枪; 熔池熔炼; 多相流; 数值模拟; 过程强化

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.03.002

中图分类号: TF 806.26 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)03-0014-10

铜熔炼工艺对国民经济和战略资源保障具有重要意义。当前铜的提取主要依赖火法熔炼。其中, 富氧侧吹熔炼作为一种高效清洁的熔池熔炼技术, 因原料适应性强、熔炼强度大、能耗低等优点, 在新建铜冶炼产能中占比约60%, 正成为主流工艺。富氧侧吹冶炼技术通过侧吹喷枪将富氧气体直接喷吹进入熔池, 以实现充分搅动熔体、强化熔炼反应的目的^[1]。喷枪作为该工艺的核心装备, 其喷吹特性直接决定了熔炼效率、产能和能耗。

鉴于喷枪作为核心装备的重要性, 国内外多家研究机构针对各种冶金炉窑的喷枪结构进行了研发、优化与升级工作, 涌现出了一批高性能喷枪制造领域的代表性公司、技术和产品。国际方面, Paul Wurth(卢森堡)、Outotec(芬兰)和SMS Group(德国)等公司以其独特、先进的喷枪产品, 推动了铜冶炼产业的转型和升级, 在全球金属冶炼行业中占据了重要地位。Paul Wurth公司以喷枪定制化、整体冶金技术综合服务和全球化运营为特点而备受关注^[2]; Outotec公司凭借其快速熔炼和智能化控制技术, 实现了铜冶炼的低能耗、低碳化^[3]; SMS Group公司的喷枪设计实现了不间断生产和智能监控, 大

幅提升了冶炼生产效率和稳定性^[4]。国内方面, 中国恩菲、江苏新春兴、华赣瑞林、中南大学和昆明理工大学等企业和高校在铜冶炼技术领域也取得了显著成就。中国恩菲工程技术有限公司开发的还原氧化炉水冷侧吹喷枪, 通过环形冷却通道提升了其耐用性, 可滑动式喷枪设计显著降低了提升功率及能耗^[5]; 江苏新春兴再生资源有限责任公司设计的侧吹喷枪, 有效地消除了熔炼炉内混合气体的爆燃风险^[6]; 江西华赣瑞林稀贵金属科技有限公司设计的侧吹喷枪结构显著优化了枪头的维护和更换流程^[7]; 中南大学的多股流粉煤喷吹技术及其设计的喷枪结构大幅提高了熔炼效率^[8]; 昆明理工大学的侧吹旋流射流喷枪及非预混微孔道结构混沌搅拌喷枪有效实现了多流体高效混合^[9-10]。这些创新成果为冶炼行业提供了高效、环保、智能的冶炼核心装备及熔炼工艺技术, 显著提升了冶炼厂的生产效率和产品质量。

近年来, 该领域多篇高水平学术论文表明, 当侧吹喷枪以一定角度安装时, 可获得较优的喷吹搅拌效果^[11-13]。在工程应用方面, 白银有色的白银炉(侧吹倾角约 17°)以及烟台国润的熔炼炉(侧吹倾角

收稿日期: 2025-11-28; 修订日期: 2026-04-09

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB2407300)

作者简介: 宋英俊(1988—), 男, 辽宁鞍山人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 火法冶金工艺优化与设备研发, E-mail: 543447387@qq.com;

通信作者: 刘慧利, 副教授, E-mail: lhlqwer@163.com

约6°)皆采用了倾斜侧吹方案,在运行中效果良好。然而,目前国内外针对富氧侧吹工艺开发高性能可调角度喷枪的报道较少。上述侧吹炉喷枪角度固定,难以满足不同冶炼阶段对搅拌强度的不同需求,限制了熔炼效率和炉体尺度的进一步提升^[14-15]。因此,研发新型可调角度的侧吹喷枪,可通过改变喷射角度来强化熔池多相湍流混合,有望成为提高熔炼强度、缓解炉体宽化瓶颈的关键途径。

基于上述背景,本研究研发了一种喷吹方向可在水平面内按需偏转的新型旋转侧吹喷枪^[16],并利用计算流体力学(CFD)高精度模拟手段^[17-19],系统分析了喷枪旋转角度对熔池搅拌效果的影响机制。首先,基于实际侧吹炉风口与渣-铕层厚度构建三维局部炉膛模型;然后,在流体体积(VOF)框架下获得气相射流破碎、气泡羽流演化及诱导循环流;最后,以熔池平均速度、湍流强度、气液接触面积、搅拌死区体积、熔体喷溅量等定量指标,阐明变角度喷吹的强化搅拌机理和对炉内多相流动的调控效应。研究旨在为新型冶金喷枪研制及大型侧吹炉高效运行提供理论指导和数据支撑。

1 数值模型描述

本研究采用瞬态三维数值计算框架对侧吹喷枪-熔池相互作用进行模拟。多相求解方面,采用VOF捕捉气液界面演化并获得气相体积分数的时空分布。针对侧吹熔池内气-渣-粗铜多相共存条件下的强剪切湍流流动情况,选用Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型闭合雷诺时均方程。将Realizable $k-\varepsilon$ 与VOF方法耦合后,可有效描述多相流中相界面与湍流结构之间的相互作用,有助于捕捉复杂流态条件下的界面变形、破碎与演化过程^[20-21]。

VOF模型中,多相界面通过求解各相体积分数的输运方程进行追踪,对于第 q 相有:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \alpha_q = 0 \quad \text{式(1)}$$

式中, $\mathbf{u}$ 为流体的速度。

VOF模型对整个流场仅求解一套动量方程和能量方程,其系数由各相体积分数加权得到的混合物性质 ρ 、 μ 决定:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[\mu \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right) \right] + \rho \mathbf{g} \quad \text{式(2)}$$

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

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

式中: ρ 为流体的密度; μ 为流体的黏度; E_q 由第 q 相的比热容及共享温度 T 计算得到; k_{eff} 为有效导热系数; $\mathbf{F}$ 为表面张力,采用连续表面力(CSF)模型处理,其体积力项为:

$$\mathbf{F} = \sum_{\text{pairs } ij, i < j} \sigma_{ij} \frac{\alpha_i \rho_i k_j \nabla \alpha_j + \alpha_j \rho_j k_i \nabla \alpha_i}{0.5(\rho_i + \rho_j)} \quad \text{式(5)}$$

Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型中控制方程分别为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot \left(\rho \mathbf{u} k - \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) = G_k + \rho \varepsilon \quad \text{式(6)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot \left(\rho \mathbf{u} \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon \right) = \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} \quad \text{式(7)}$$

其中, μ_t 为湍流黏度, G_k 为由平均速度梯度产生的湍动能生成项, C_μ 为与局部应变特征相关的模型函数。相关表达式如下:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \text{式(8)}$$

$$G_k = \mu_t S^2 \quad \text{式(9)}$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0 \quad \text{式(10)}$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.2, \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad \text{式(11)}$$

2 结构参数及边界条件

工程侧吹炉喷枪沿炉体长度方向成排布置,喷枪中心间距通常约为0.6 m。为聚焦单喷枪喷吹机理及旋转角对流动与混合的影响,并尽量减弱相邻喷枪耦合对结果的干扰,在喷枪布置方向截取长度为0.9 m的代表性炉膛区域建立三维瞬态模型。为了在准确模拟炉内流动现象的同时,尽可能减少不

必要的干扰因素,本研究对物理模型进行了优化。针对单喷枪喷吹机理,仅选取长度为0.9 m的炉膛区域展开研究。在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。喷枪安装高度位于渣-铈界面以上565 mm处,直径为34 mm。富氧气体由氧气与氮气按4:1体积比配制,经风口鼓入渣层,单支喷枪最大供气强度为1000 Nm³/h,数值模拟中将其等效为282.18 m/s的速度入口边界条件。在上述条件下,修正弗劳德数约为87,气体注入呈典型的“射流-破碎-气泡羽流”模式^[22-23],气相射流穿透渣层后在熔池内形成离散气泡群,气泡上浮所诱导的湍动强化熔池循环流动,从而改善气-渣体系的传热传质与冶金反应动力学条件。渣-铈物相参数见表1。

表1 渣铈物相参数

参数	值
铈相密度/(kg/m ³)	5183
铈相黏度/[kg/(m·s)]	0.00183
渣相密度/(kg/m ³)	3800
渣相黏度/[kg/(m·s)]	0.2
气-铈表面张力系数/(N/m)	0.442
气-渣表面张力系数/(N/m)	0.389

新型侧吹可旋转喷枪模型如图1所示。计算域几何体仅由连续的流体区域组成,网格数量约为1.16×10⁶。对侧吹炉渣相搅拌区域、风口及附近区

域进行局部加密,以确保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。受结构约束,喷枪倾角为10°,通过改变喷枪绕自身轴线的水平旋转角度,可以调整射流注入熔池的平面方向。本研究考察旋转角为0°、15°、30°、45°、60°五种情况下熔池内的多相流动特征,以揭示不同角度喷吹条件下多相流场结构随旋转角的变化规律。在保证计算成本可控的前提下,选取能够提供足够角度分辨率的15°间隔,以捕捉流动结构与混合特征随旋转角变化的趋势,识别关键转折点及可能的最优角度区间。所选区间0°~60°兼顾基准状态与较大偏转角度,用于系统评估旋转角对气相分布、循环流及搅拌死区的影响。数值仿真在开源平台OpenFOAM上进行^[24],每个算例均在配备4个AMD 9654 2.4 GHz处理器和1 TB内存的集群上完成。其中,入口湍流强度采用工程常用设定值5%,湍流积分长度取喷枪直径34 mm。炉顶设置为压力出口,表压为0 Pa。炉壁采用无滑移固壁边界条件,并结合壁面函数对近壁区进行处理。采用瞬态计算并确保连续性方程残差低于10⁻³,时间步长设定为5.0×10⁻⁵ s,总物理时间为8 s。气-液流动在3 s后趋于稳定,因此在5至8 s之间对瞬态流场信息进行时间平均统计。

3 结果与讨论

3.1 多相混合性能分析

图2展示了不同旋转角度工况下,侧吹射流形

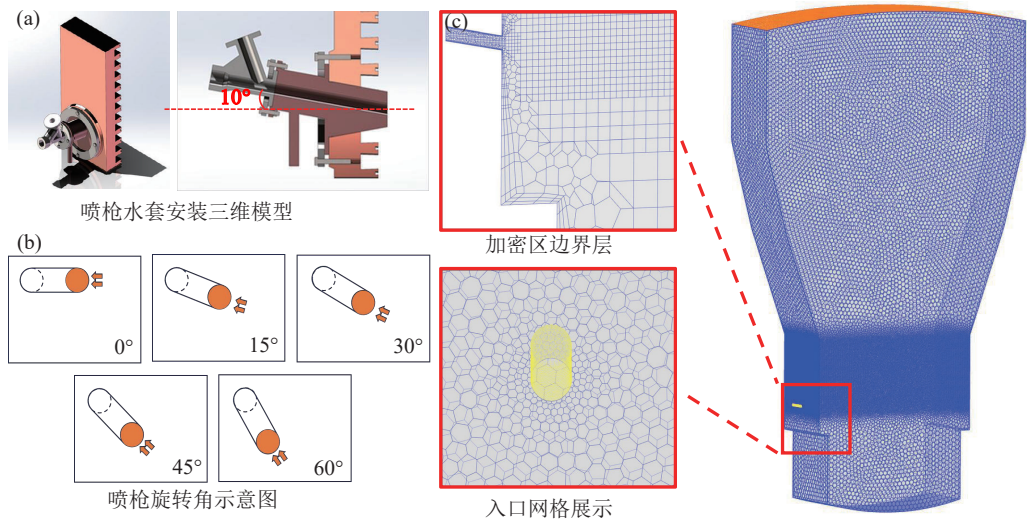


图1 (a)可旋喷枪模型结构、(b)喷枪旋转角以及(c)计算域网格示意图

Fig. 1 Schematic diagram of (a) rotatable lance structure, (b) lance rotation angle, and (c) computational domain

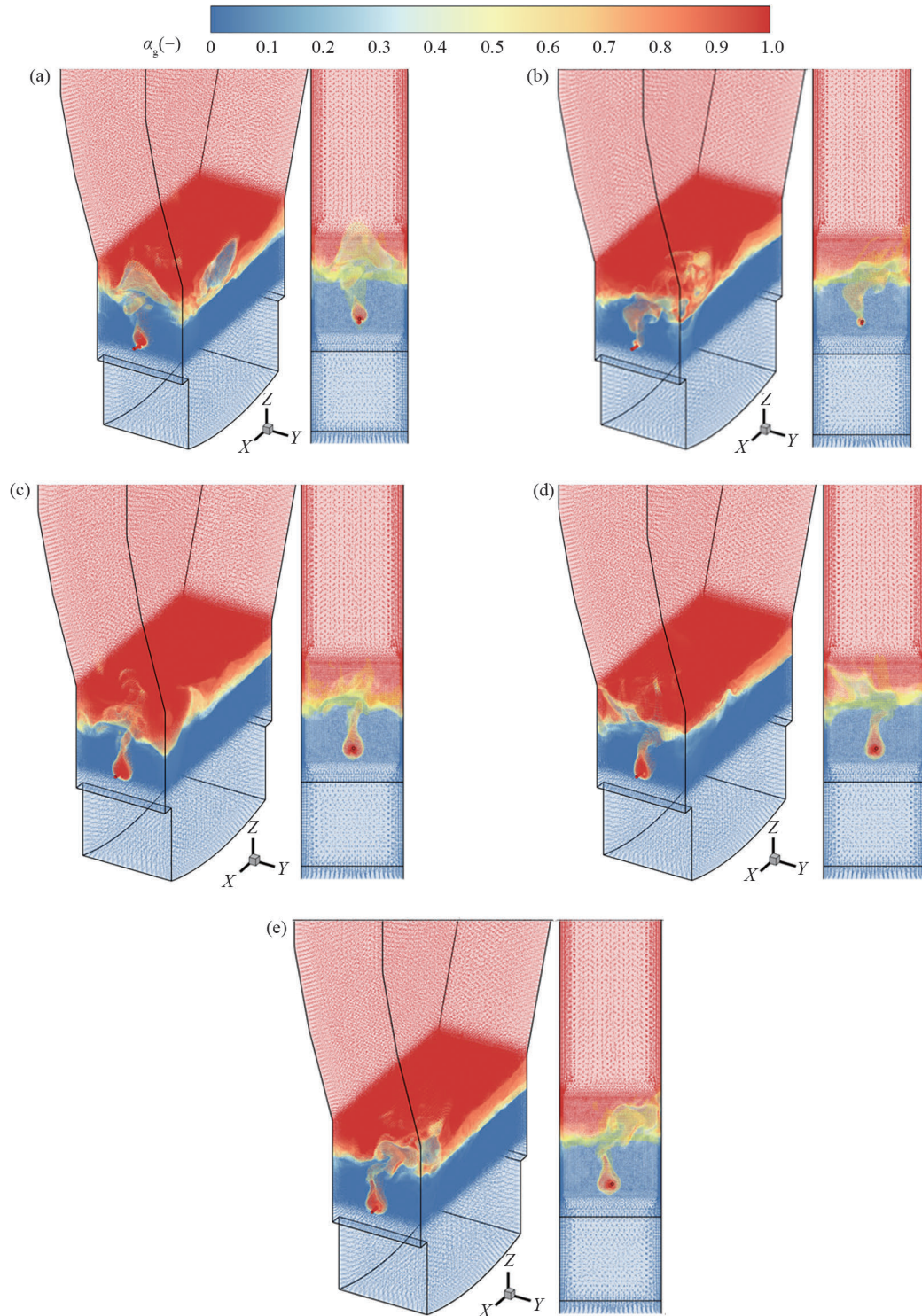


图2 瞬态气液两相流型流态分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of transient gas-liquid two-phase flow pattern: (a) 0°; (b) 15°; (c) 30°; (d) 45°; (e) 60°

成的瞬态气相体积分云图。可以看到,当喷枪旋转角为0°(即喷嘴指向炉膛横截面中心)时,射流沿对称平面水平射入熔池,气泡主要在喷口正前方上升,气相覆盖区域集中于喷枪正对方向,界面扰动范围较窄;旋转15°时,射流略偏斜,气泡沿倾斜方

向上浮,部分气泡轨迹偏离中心对称轴,气-液界面结构开始倾斜;旋转30°和45°时,射流入射方向进一步偏向炉体一侧,气泡扩散范围显著增大,气-液界面出现褶皱和卷吸现象,表明扰动强度增强但气相分布不再对称;旋转60°时,射流近似平行于

炉墙方向射入, 气泡上浮过程中发生明显的偏斜摆动, 大量气体聚集于靠近侧墙区域, 炉膛中心区域气泡稀少。由此对比可见, 适度的喷枪旋转角能够扩大气泡扰动区域、促进气泡破碎和界面展开。旋转角过小(0°)虽射流路径稳定, 但搅拌覆盖面有限。过大的旋转角(60°)则导致气泡偏流严重, 中心区域可能形成“死区”。

进一步分析各工况下熔池截面的平均气含率(图3)。结果显示: 0° 时气泡主要聚集在炉膛中心区域, 气相覆盖高度最高但区域集中, 渣层其余区域呈现大面积低气含率特征; 15° 和 30° 时, 渣层上部的气泡扩散范围逐渐扩大, 平均界面高度略有增加, 中心区域气相弥散程度提高, 其中 30° 工况的气相分布最为均匀, 渣层顶界面起伏明显, 表明搅拌强度增强; 当旋转角增至 45° 和 60° 后, 气相主射流通道偏离炉膛中心轴, 平均气相覆盖范围向一侧偏移, 另一侧(背向喷枪旋转方向一侧)渣层上方出现较平

坦的界面, 表明该区域气泡稀少、混合不足。

图4(a)展示了喷枪旋转角度对射流穿透深度的影响。 0° 旋转时射流径直向前贯穿, 水平穿透距离最大, 约为350 mm。当喷枪旋转偏离炉体对称轴, 穿透深度骤减。 15° 时仅约154 mm, 不足 0° 时的一半, 说明射流能量被迅速耗散, 难以深入对侧区域。随着旋转角增大到 30° 和 45° , 穿透深度逐渐恢复, 分别达到约283 mm和304 mm, 中等旋转角度能够在一定程度上兼顾射流延伸和横向扩展。当角度达到 60° 时, 穿透深度再次降至约201 mm。综合来看, 喷枪旋转角对射流水平穿透具有非线性影响: 过小角度有助于保持较大动量直线推进, 但横向扰动范围有限; 15° 时过早偏转导致能量快速衰减, 射流难以覆盖远端; $30^\circ\sim 45^\circ$ 区间射流既有较大横向偏移又保留了一定的深入能力, 表现出综合优势; 60° 时射流大部分能量沿壁面扩散, 远端覆盖不足。由此推断, 在本研究的倾角条件下, 旋转角 $30^\circ\sim 45^\circ$ 可实现

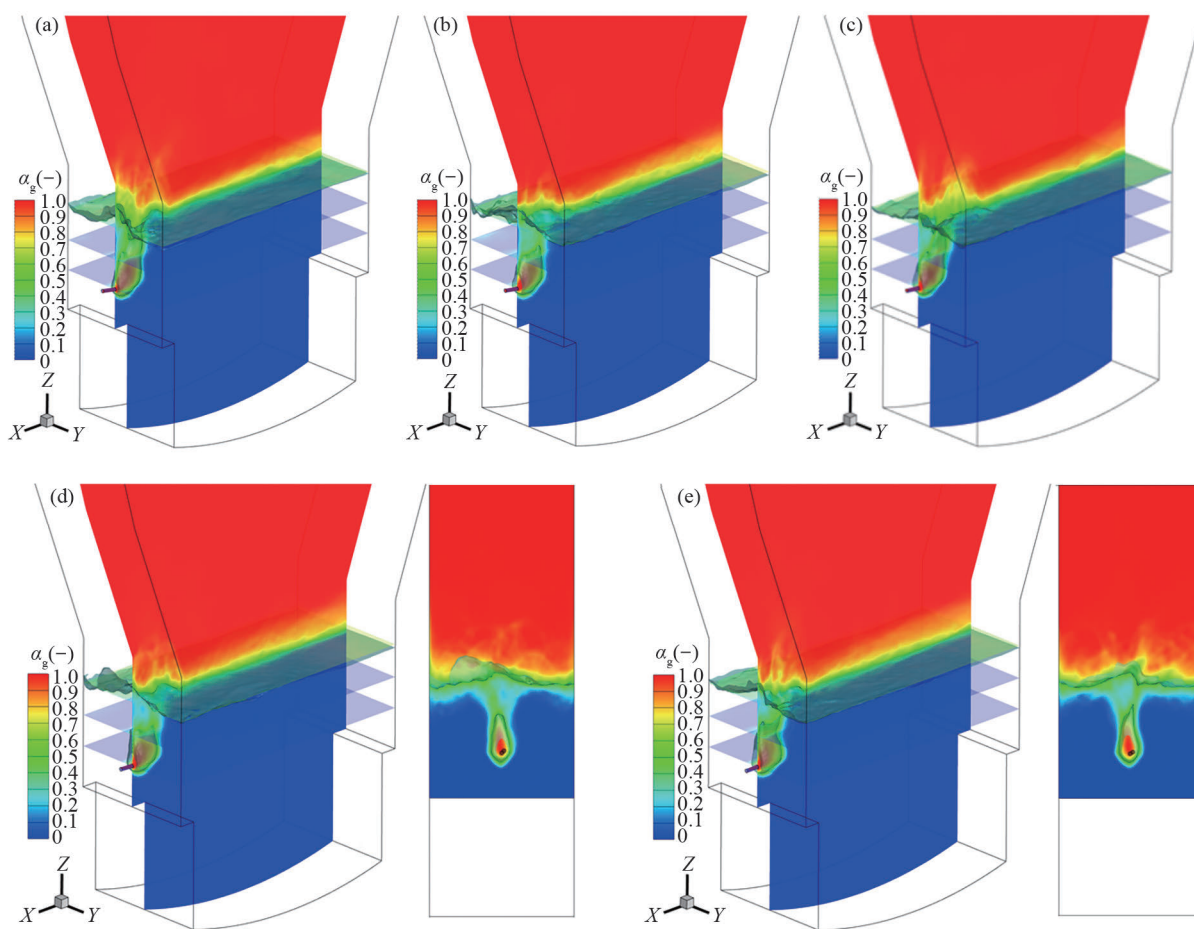


图3 时均气-液两相分布图

Fig. 3 Schematic diagram of time-averaged gas-liquid two-phase distribution: (a) 0° ; (b) 15° ; (c) 30° ; (d) 45° ; (e) 60°

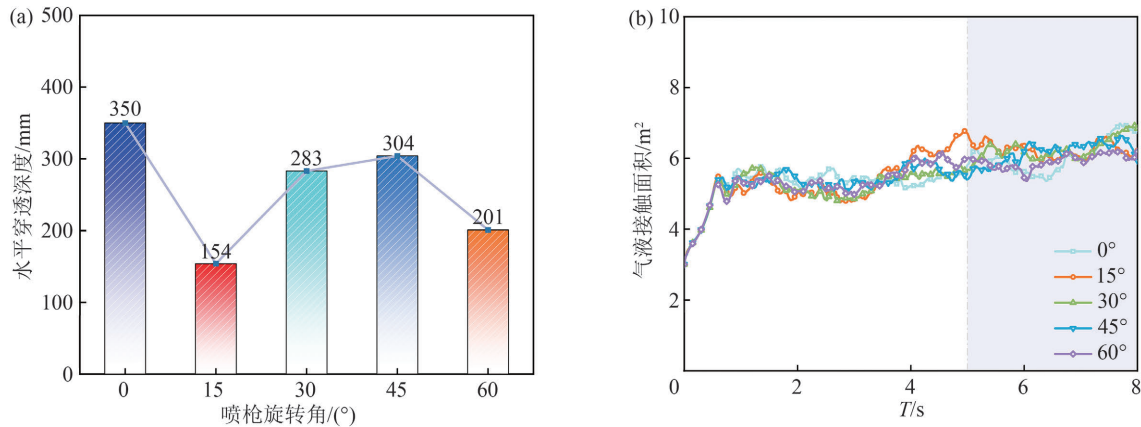


图4 喷枪旋转角度(a)对射流穿透特性的影响及(b)气-液接触面积随时间的变化

Fig. 4 Effects of lance rotation angle on (a) jet permeability and (b) gas-liquid contact area

动量传递与空间搅拌范围的较优匹配,是兼顾反应效率和搅拌深度的潜在优化区间。

图4(b)展示了各旋转角工况下气-液界面总面积随时间的变化。各曲线迅速上升后均进入振荡稳态的趋势,稳态阶段接触面积维持在 $5.8\sim 6.8\text{ m}^2$ 范围内。其中,30°和45°工况的整体曲线位于较高水平,峰值接近 7.0 m^2 ;60°工况时则保持在较低水平且波动较小,界面扩展能力受限;0°和15°工况时接触面积处于中间状态,15°时较为平稳且稍高于0°。这说明喷枪旋转角会显著影响气泡展布路径和界面扰动强度。中等偏大的旋转角(30°~45°)使射流偏离中心轴,鼓泡位置分散,有利于在渣层不同部位生成气泡界面,从而提高气液总接触面积;0°时由于射流路径单一,气泡主要集中在一侧,界面展开有限;15°时则保持稳定性的同时促进了气泡再分布,性能居中。值得一提的是,尽管60°时平均接触面积最低,但其界面扰动较弱,系统振荡也最小,说明此角度下气泡行为相对受控。总的来看,旋转角在一定范围内(15°~45°)有利于提升气液界面面积,显著强化传质潜力,但过大角度会因气泡偏流而限制界面拓展。

3.2 喷吹搅拌特性分析

图5展示了不同旋转角工况下熔池内渣液的时均速度云图以及流线分布。其中,流速低于 0.05 m/s 的区域标记为白色以突出停滞死区。由图5可以看出,旋转角改变了射流主循环的位置和范围。0°时射流动量集中在喷口正前方,形成穿透较深但横向范围窄的高速射流带,流场接近轴对称布局,但炉

膛两侧蓝色低速区面积较大,搅拌覆盖面有限;15°时主射流轴线偏离中心,动量部分贴壁流动,导致对侧出现大范围低速死区,整体搅拌效果较0°时明显变差;30°时情况显著改善,高速区(红黄色)覆盖范围扩大,中心区域形成较宽的中高速循环带,说明湍流强度和扰动范围同步提升,炉内大部分区域得到有效搅动,仅壁侧小区域为低速;45°时高速区域仍然较广,但可以看到部分动量被引导至偏斜位置,流线结构出现不对称回流,炉膛背向一侧速度降低;60°时流动结构严重偏向喷枪旋转方向一侧,大量液池区域速度低于 0.05 m/s ,核心扰动区远离炉中心,表明流场分布不均,传质效率降低。

进一步统计不同旋转角度下渣-相液体的平均流速。由图6(a)可见,流速在 $0.17\sim 0.20\text{ m/s}$ 之间波动。当旋转角为15°时平均流速达到最大,约为 0.202 m/s ;0°和30°工况下流速最低,分别约为 0.174 和 0.176 m/s ;45°和60°下平均流速约为 0.189 和 0.182 m/s 。总体来看,旋转角对熔池平均流速的调节幅度有限(最大与最小相差约13.9%),但15°工况下表现出更高的搅拌强度。其原因是:小角度偏转时,射流较集中且动量损失不大,且引入了一定的不对称扰动促进流动;角度增加到30°时,尽管覆盖范围扩大,但部分动量未能充分作用于主要反应区或产生了偏流,导致平均速度不增反降;过大角度又引入新的局部循环,对整体速度贡献有限。

图6(b)展示了不同喷枪旋转角度对熔体飞溅的影响。由图可知,所有工况在初始瞬间均出现一次剧烈飞溅的峰值,随后进入振荡波动的准稳态

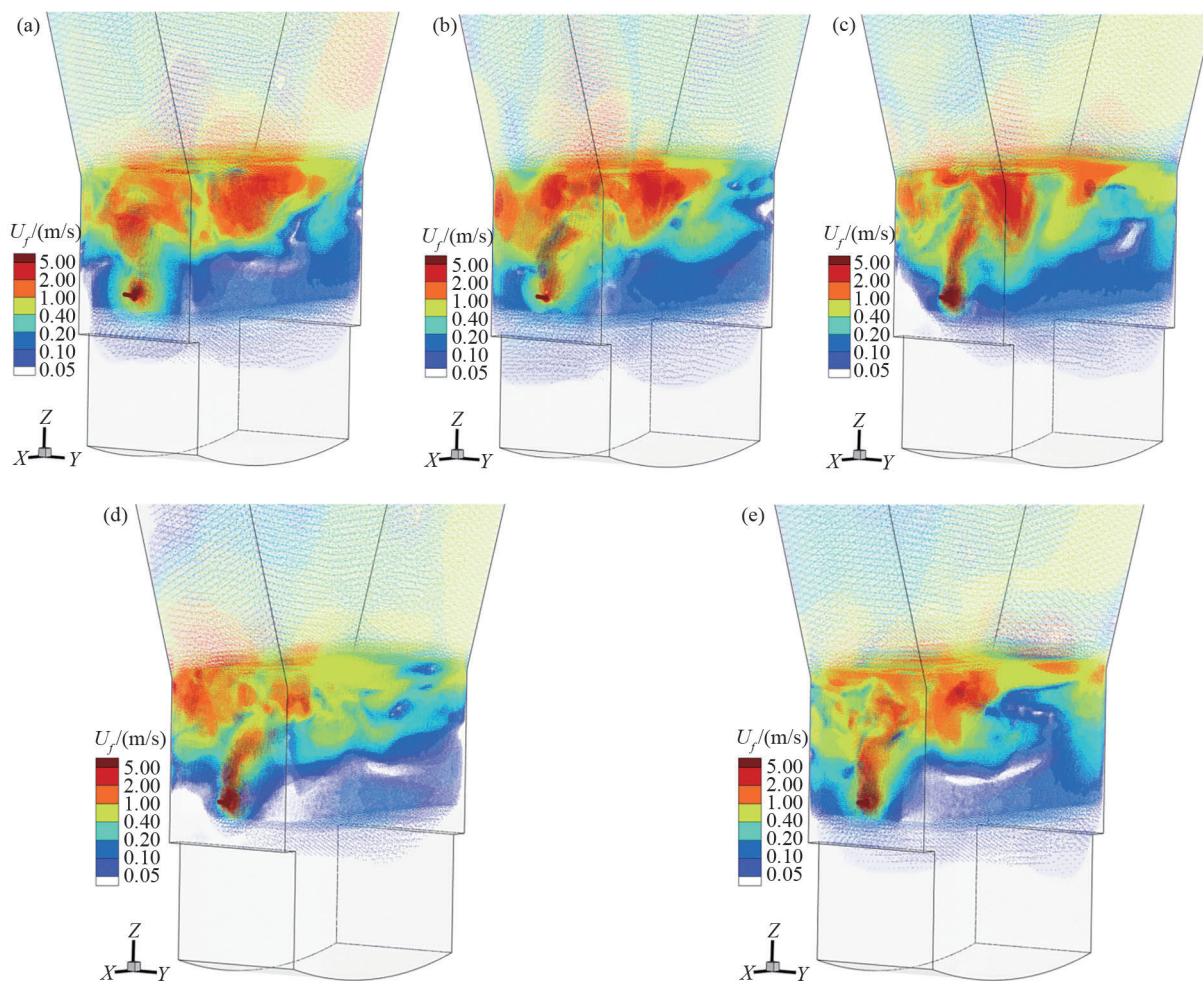


图 5 不同喷枪旋转角度下侧吹炉内时均速度分布云图

Fig. 5 Schematic diagram of the time-averaged velocity distribution inside the side-blown furnace under different lance rotation angles: (a) 0°; (b) 15°; (c) 30°; (d) 45°; (e) 60°

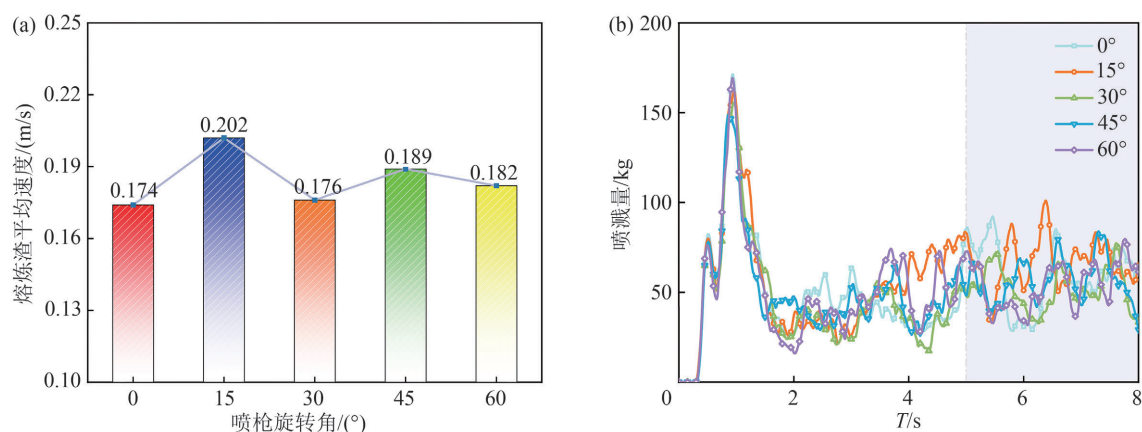


图 6 喷枪旋转角度对(a)熔炼区平均流速以及(b)熔体喷溅量随时间变化的影响

Fig. 6 Effects of lance rotation angle on (a) average velocity in melting zone and (b) variation of melt splash amount with time

($T > 5$ s)。在准稳态阶段,不同旋转角的喷溅水平差异明显:0°和15°工况的喷溅量保持在较高区间,波动频繁且幅度大,表明界面扰动活性强但系统稳定

性较差;30°、45°和60°工况的喷溅曲线相对平稳,波动幅度小,但喷溅量有所下降。这意味着,适度旋转有助于降低过度集中的界面扰动,减少熔体喷

溅。其中, 15°工况尽管增强了局部混合, 但也带来了气泡破裂, 不稳定性提高, 导致喷溅加剧; 而30°和45°工况下射流方向更加分散且均衡, 熔渣液面的扰动更可控, 喷溅情况反而改善, 是兼顾强化搅拌与运行安全的较佳旋转角度区间。60°时总体喷溅量最低, 但由于流场明显偏斜, 喷溅区域主要集中在炉墙附近, 可能存在对局部结构造成冲击的隐患。综合考虑搅拌效率和喷溅安全, 建议优先将喷枪旋转角控制在30°~45°范围内, 在此基础上通过多目标优化进一步平衡界面扰动强度和喷溅风险, 以实现高效稳定的冶炼操作。

图7为不同旋转角度下熔池渣相的死区($U_s \leq 0.05$ m/s)和强搅拌区($U_s \geq 0.10$ m/s)体积占比图。可以看到, 旋转角变化引起的死区和强搅拌区占比呈反向趋势: 当角度为0°时, 死区占比仅约10.6%, 强搅拌区达61.6%; 随着角度增至15°, 死区略增至11.8%, 强搅拌区降至57.1%, 说明射流偏离中心后动量分布稍有离散, 导致低速区扩大; 角度继续增大到30°和45°, 死区占比分别上升到13.3%和12.5%, 强搅拌区降至52.8%和56.3%, 均劣于0°工况; 角度为60°时, 死区比例略回落至12.9%, 强搅拌区约53.1%, 较45°时有所改善但仍低于0°时。整体而言, 旋转角为0°时熔池流动最均匀, 强搅拌区覆盖最广; 中等角度(15°~30°)时仍能够在死区控制方面保持较好水平, 同时维持一定强搅拌区比例; 角度过大(45°以上)时混合均匀性总体变差。

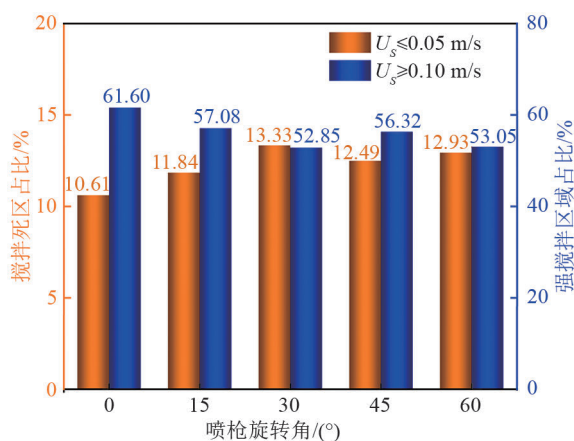


图7 喷枪旋转角度对搅拌死区与强搅拌区占比的影响

Fig. 7 Effects of lance rotation angle on the proportion of dead zone and strong mixing zone

4 结论

本研究基于VOF多相流CFD模拟, 揭示了侧吹熔炼炉可旋转喷枪角度对熔池搅拌的影响规律。主要结论如下: 喷枪旋转角度对熔池流场具有非线性调控作用, 适度旋转可拓展搅拌覆盖范围。旋转角位30°时熔池中心形成大尺度循环, 气泡分布最均匀, 渣层几乎无滞流死区; 而不旋转(0°)时射流贯穿深, 平均速度较高但局限于一侧; 大角度旋转(60°)时流场明显偏斜、混合不匀。旋转角对平均速度影响不大, 但对喷溅和回冲影响显著: 0°和15°工况喷溅量高且波动剧烈, 气泡回冲冲击集中; 30°和45°工况喷溅显著降低, 喷枪受力较平稳; 60°工况喷溅最低但流场偏斜严重。因而旋转角以30°~45°为宜, 可兼顾强化搅拌(提高界面面积约10%以上)与安全运行(喷溅量降低约30%, 回冲载荷分布均衡)。

新型侧吹可旋转喷枪作为冶金装备领域的一项创新探索, 为熔池熔炼过程强化提供了一种切实可行的方案, 有望突破传统侧吹炉炉体宽度固定的局限, 在保证炉衬寿命的同时实现更高效的熔炼。

本研究成果可为喷枪组角度排布方案设计提供基础理论和设计依据, 为我国铜冶炼的提质增效和大型化发展提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 黄文华, 刘涛. 侧吹炉的应用现状和发展前景[J]. 铜业工程, 2017(3): 54-59.
- [2] Parshakov V M, Tretyak A A, Borisenko V A. Reliable automatic control of radial gas distribution on blast furnace throat[J]. Metallurgist, 2023, 67(3): 273-282.
- [3] Wood J, Hoang J, Hughes S. Energy efficiency of the outotec® ausmelt process for primary copper smelting[J]. JOM, 2017, 69(6): 1013-1020.
- [4] Obiso D, Reuter M, Richter A. CFD investigation of rotational sloshing waves in a top-submerged-lance metal bath[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2021, 52(4): 2386-2394.
- [5] 郝朋越, 宋宁. 喷枪枪头、具有其的喷枪和喷枪枪头的加工方法: CN201710854471.2[P]. 2024-04-12.
- [6] 杨春明, 杨大伟. 一种熔炼炉用的侧吹喷枪及使用方

- 法: CN201811217326.4 [P]. 2019-09-20.
- [7] 肖鹏, 王红军, 叶逢春, 等. 侧吹喷枪和具有其的冶金熔炼设备: CN202010440670.0 [P]. 2025-07-01.
- [8] 张全, 鄂加强, 谢铠, 等. 高炉风口多股流喷吹粉煤与空气流动数值模拟 [J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(5): 453-457.
- [9] 王华, 王仕博, 王嘉伟. 一种熔池熔炼侧吹用旋流射流喷枪: CN201720776615.2 [P]. 2018-03-02.
- [10] 王华, 王子成, 王仕博, 等. 一种非预混微孔道结构混沌搅拌喷枪: CN202311765983.3 [P]. 2024-03-29.
- [11] Zhu S, Zhao Q Y, Li X L, et al. Flow and penetration behavior of submerged side-blown gas [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2023, 30(6): 1067-1077.
- [12] Xiao Y D, Lu T T, Zhou Y G, et al. Computational fluid dynamics study on enhanced circulation flow in a side-blown copper smelting furnace [J]. JOM, 2021, 73(9): 2724-2732.
- [13] Jiang Z W, Wang X, Qin Q W, et al. Study on optimization of nozzle angle for oxygen-rich side-blown lead melting furnace [J]. Metals, 2023, 13(3): 574.
- [14] 魏季和, 曹英, 朱宏利, 等. 侧顶复吹AOD精炼过程的数学模拟 [J]. 内蒙古科技大学学报, 2012, 31(2): 107-116.
- [15] 朱文云, 何宗庆, 李奕龙, 等. 富氧侧吹熔炼-多枪顶吹吹炼炼铜工艺杂质元素行为 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(3): 25-34.
- [16] 周维, 宋英俊, 李晓宇. 一种侧吹炉所用可旋转调整喷吹角度的风眼水套: CN202421781912.2 [P]. 2025-05-02.
- [17] 刘涛, 黄文华. 侧吹炉铜水套冷却强度的仿真研究 [J]. 铜业工程, 2021(4): 57-60.
- [18] 张红哲, 徐子昂, 刘光远, 等. 铜转炉吹炼炉口图像智能监测及辅助分析系统 [J]. 铜业工程, 2024(2): 1-7.
- [19] 官智超, 周灿, 邹舟, 等. 中国铜冶炼行业数字化转型挑战与关键技术 [J]. 铜业工程, 2025(4): 1-10.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 周萍, 成慰, 马骥, 等. 侧吹气流流动特性实验研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(8): 2879-2883.
- [23] 刘泛函. 瓦钮科夫炉熔池侧吹强化搅拌过程数值模拟及混合效果评价方法研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- [24] Cui J, Xia T, Qu Z Y, et al. Study on the motion characteristics of floating bubbles near the wall based on openfoam [J]. Journal of Marine Science and Application, 2025, 24(1): 32-45.

Numerical Study of Enhanced Stirring Mechanism of a Novel Rotatable Lance in Side-blown Smelting Furnace

Song Yingjun¹, Li Yinghua², Xiong Guotao¹, Li Xiaoyu¹, Zhou Wei¹, Zhou Weixin¹, Liu Huili²

(1. China 15th 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: Injection characteristics of side-blown lance in a bath smelting furnace directly govern reaction intensity and smelting efficiency. In this study, stirring enhancement mechanism of a novel side-blown lance with an adjustable rotation angle was investigated by computational fluid dynamics (CFD), and structural parameters of the lance were optimized. A volume-of-fluid (VOF) multiphase flow model coupled with the realizable $k-\varepsilon$ turbulence model was employed to conduct transient simulations of gas-liquid two-phase flow in an oxygen-enriched side-blown smelting furnace. Influence of lance rotation angle (0° , 15° , 30° , 45° , and 60°) on flow field and mixing performance of the molten bath was analyzed. Results indicated that lance rotation angle exerted a nonlinear control effect on bath hydrodynamics. A moderate rotation angle (around 30°) effectively enlarged gas-induced disturbance region, accelerated interfacial renewal, and improved the uniformity of bath stirring. In contrast, either a non-rotating angle (0°) or an excessively large rotation angle (60°) led to pronounced flow drift and deteriorated local mixing. Overall, the proposed side-blown rotatable lance, through appropriate optimization of rotation angle, can enhance bath stirring while simultaneously ensuring furnace lining integrity and prolonging lance service life. The findings provided a theoretical basis and engineering guidance for lance design and optimization in large-scale oxygen-enriched side-blown smelting furnaces.

Key words: oxygen-enriched side blow; adjustable-angle lance; bath smelting; multiphase flow; numerical simulation; process intensification

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.03.002

引文格式: 宋英俊, 李应华, 熊国涛, 李晓宇, 周维, 周卫辛, 刘慧利. 侧吹熔炼炉新型可旋转喷枪强化搅拌机制数值仿真研究[J]. 铜业工程, 2026(3): 14-23.

Song Yingjun, Li Yinghua, Xiong Guotao, Li Xiaoyu, Zhou Wei, Zhou Weixin, Liu Huili. Numerical study of enhanced stirring mechanism of a novel rotatable lance in side-blown smelting furnace[J]. Copper Engineering, 2026(3): 14-23.

投稿网址: www.tygc.net

微信公众号: jxtygc