

doi: 10.20237/j.issn.1007-7545.2026.06.002

富氧熔池熔炼顶枪旋流器耦合变角度侧枪 多相流数值模拟及试验研究

许克霆¹, 杨贵严^{1,2}, 王旭滨³, 高泽磊³, 王仕博¹, 王天杰¹, 唐灏文¹

- (1. 昆明理工大学 冶金与能源工程学院, 昆明 650093;
2. 金川集团铜贵股份有限公司, 甘肃 金昌 737100;
3. 金川集团镍钴股份有限公司 镍冶炼厂, 甘肃 金昌 737100)

摘要: 近年来, 硫化镍矿中氧化镁含量大幅升高, 导致熔炼过程中熔体黏度增大, 熔炼效率降低, 且传统顶吹冶金炉存在混合效率差、熔体喷溅严重的问题。为了从改变传输方式的角度解决上述问题, 本研究提出了一种顶枪旋流器耦合侧吹多枪变角度喷吹技术, 构建了顶侧复吹炉数学模型与实物水模型, 使用VOF模型与 k -epsilon模型对炉内流场的复杂湍流和熔池内气-渣-铋三相流动过程进行了模拟, 获取了不同时间下炉内三维流场数据, 同时根据相似准则进行了顶侧复吹水模型试验, 将试验结果与数值模拟结果进行了流型对比, 验证了数值模拟结果的可靠性。对比分析了两种喷吹条件对炉内流场的影响。结果表明, 在相同进风量下, 顶侧复吹工况的渣层平均速度提升了107.97%, 渣层湍流动能提升了62.10%, 渣层平均气含率提升了425.54%, 壁面剪切力为单顶吹工况的3.26倍。分析了顶侧复吹条件下流场传质规律, 发现顶侧复吹流场中存在主导的二维水平流动结构。本研究提出的顶枪旋流器耦合变角度侧枪技术, 显著提升了熔池搅拌效率, 加强了熔池反应强度, 但对炉壁产生了较大剪切力, 后续应用性研究应考虑如何降低炉壁冲刷及炉体失稳的风险。

关键词: 顶侧复吹; 计算流体力学; 过程强化; 熔池熔炼; 多相流

中图分类号: TF815 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-7545(2026)06-1146-13

引用格式: 许克霆, 杨贵严, 王旭滨, 等. 富氧熔池熔炼顶枪旋流器耦合变角度侧枪多相流数值模拟及试验研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2026(6): 1146-1158. DOI: 10.20237/j.issn.1007-7545.2026.06.002.

XU Keting, YANG Guiyan, WANG Xubin, et al. Multiphase Flow in Oxygen-Enriched Bath Smelting: Numerical Simulation and Experimental Investigation of a Top Lance Swirl Generator Coupled with Variable-Angle Side Lances[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2026(6): 1146-1158. DOI: 10.20237/j.issn.1007-7545.2026.06.002.

现代熔池熔炼技术中, 使用范围最广泛且冶炼效率获得高度认可的方式主要可分成顶吹、侧吹以及底吹这三种喷吹方式^[1]。在富氧顶吹熔池熔炼系统里, 顶吹炉是整个熔炼系统极为关键的核心装备, 此熔炼炉呈一个密闭状态的立式圆柱形构造, 氧气经由顶部喷枪以射流的形态进入炉内。这些气流首先进入渣层中, 并且以气泡的状态在渣层里进行运动。在渣层中, 气相与液相这两相之间存在相当大的接

触面积, 与此同时接触的时间也较长, 气体可以在熔体内停留相对较长的一段时间, 最终所生成的熔铋能够对贵金属进行高效回收^[2-4]。

顶吹熔炼工艺就是把精矿原料从炉顶的送料口加到熔池里, 与此同时, 喷枪插进熔池中, 形成一定的穿透程度, 富氧空气借助喷枪吹进熔池, 使得熔体以及炉料产生剧烈的搅拌现象。在此过程中, 气、固、液三相依靠卷吸效应在熔池里面充分混合并且被搅

收稿日期: 2025-12-25 修回日期: 2026-03-17 录用日期: 2026-03-18

基金项目: 云南省科技攻关计划项目(202501AS070131); 云南省重大科技专项(202302AQ370001-4)

作者简介: 许克霆(1998—), 男, 硕士研究生; 通信作者: 王仕博(1978—), 男, 工学博士, 副教授, 硕士生导师

©Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy) Editorial Department 2026. This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License.

拌起来,进而使得冶炼过程的速度得以提升^[5-8]。镍顶吹熔炼过程主要生成的产品包含镍锍、炉渣和烟气。其中,镍锍以及炉渣以熔融混合的方式进入到沉降炉中,借此达成镍和炉渣相互分离的目的。而镍锍会在转化炉里面被吹炼成为粗镍,炉渣经过水破碎处理之后再进行出售。烟气在经过余热回收以及除尘等一系列操作之后被制成硫酸,再出售^[9-11]。

顶吹式反应器在化工、制药、冶金等诸多领域均有大规模的应用。最初的单孔道喷气式顶吹技术可细分为浸没式与非浸没式两种类型,其中非浸没式顶吹技术对于反应区的搅拌程度远远低于浸没式顶吹技术。近年来,国内外针对富氧熔池熔炼过程所开展的数值模拟研究逐渐变得越来越多。WANG等^[12]研究并建立起了含有气液混合物的Y形管道的三维数学非定常流动模型,此模型运用顶吹来增强动量搅拌,经过对8种不同油气比的工况结果加以对比后发现,其模拟结果和水模型结果较为契合,而且当油气比处于1:2的情况时,气液混合扰动能够形成熔池内旋流扩散的最佳效果。万章豪等^[13]采用VOF方法针对顶吹浸没熔池中的氮气-渣-铜锍的流体力学特性以及搅拌特性展开数值研究,深入探讨了气体入射速度以及旋流给流体涡流结构、气体穿透深度和流体速度所带来的影响,研究结果说明,气泡的形成会增加流体速度,而气泡的上升则会降低流体速度。YANG等^[14]凭借建立起的耦合响应面分析的三维瞬态数学模型,对留渣量、氧枪高度以及顶吹氮气流量给120 t顶吹转炉溅渣过程产生的影响展开了研究,最终得出的结论是,溅渣密度以及溅渣面积比会随着留渣量的增加而不断增大,留渣量对溅渣效果的影响最显著,而且顶吹氮气流量与喷溅面积比呈现出正相关的关系。王仕博^[15]把铜艾萨炉顶吹熔池热态搅拌过程当作研究对象,针对炉内的传质情况、不同气体流速以及喷枪位置等因素给熔池熔炼效率带来的影响展开了研究,最终获得了具有实际生产理论指导意义的优化操作参数。徐建新^[16]就艾萨炉炉膛中多相流混合时间预测这一问题展开了研究,并且采用数值模拟与水模型试验相结合的方式提出了一种全新的混合时间预测方法。

侧吹技术作为一种重要的熔池搅拌方式,在冶金反应器中得到广泛应用。国内外学者围绕侧吹射流的搅拌机理开展了大量研究。在侧吹射流的基本行为方面,研究表明,侧吹气体以水平或一定倾角喷入熔池后,受浮力作用迅速向上偏转,形成气液两相羽

流区。然而,单一侧吹模式仍存在以下不足:一是轴向搅拌能力有限,侧吹气流的搅拌作用主要集中在熔池中上部,对底部熔体的搅拌效果不足;二是熔池中心区域往往存在搅拌死区,影响整体混合效率;三是侧吹气流反冲作用导致喷嘴附近壁面应力集中,加剧炉衬侵蚀风险;四是气泡分布范围相对集中,气-液反应界面有限^[17-18]。陈兴华等^[19]针对优化前后各类顶吹氧枪参数以及枪位特点,结合VOF多相流模型对复吹转炉实施了数值模拟,依据试验结果找出了最理想的顶吹氧枪结构方案。李勇^[20]借助物理模拟与数值模拟相结合的方式,对顶底复合吹转炉内部进行了仿真试验,结果显示,转炉熔池内的死区主要分布在炉底中心以及靠近炉壁的区域,增加底吹氩气强度对于减少死区比例的意义并不是很大。LI等^[21]建立起能够描述顶底复吹转炉内气液两相流动的数学模型,考察了底枪数量、位置以及顶枪高度给气液两相流产生的影响,并且通过已报道的实际测量结果进行了验证,验证结果表明,复吹转炉的搅拌能量主要来源于由浮力驱动的底吹气泡,底风口的布置方式给复吹转炉的气泡羽流带来了十分显著的影响。李世旺等^[22]把数值模拟与数理统计相结合起来,建立起多孔道底吹喷吹强化搅拌的三维数学模型,以液体的气含率方差以及平均湍动能强度等作为平均标准,对比了直管与多孔道喷枪的试验结果,结果表明,多孔道喷枪在提升熔体搅动能的同时能够让中上部熔体的混合变得更加充分。李宝宽等^[23]建立起底吹钢包内气-钢液-渣三相流动的数学模拟模型,利用多相流体积法(VOF)模拟了渣层的运动行为,模型结果再现了底吹钢包内气-钢液-渣三相流动的现象。GUO等^[24]在不同的氧枪倾角以及角度间距条件下,建立起氧气底吹炉的仿真模型,分析了不同工况给熔体流动特性产生的影响,分析结果表明,将两排氧枪的角度设置为 $0^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 的组合是比较合理的,这样能够在熔池内形成较好的气动搅拌强度以及气体分散效果,进而提高熔炼效率。姜保成等^[25]为了研究高温且密闭的大型底吹炉内熔体搅拌现象,采用计算流体力学(CFD)方法,建立起与实际设备相对应的等效几何模型,并且通过数值模拟计算分析了大型底吹炉内气动搅拌的机理。XI等^[26]借助数值模拟方法对某大型底吹铅冶炼炉展开了研究,分析了不同平面、监测点以及熔池区域的流动特性,并且建立起底吹炉熔池速度分布的预测公式,研究结果表明,两个相邻氧枪之间的流动会相互产生影响,能够有效

地减少低速区的存在情况。LIU等^[27]建立模拟70 t底吹氩搅拌钢包内气泡-钢-渣多相流动的瞬态数学模型,考察了不同气体流量下渣眼面积以及渣滴分散的情况,研究表明,气泡的运动、渣眼的形成与崩塌、钢-渣界面的波动性以及卷渣行为均能够在当前的VOF模型和大涡模拟(LES)中得到较为理想的预测。

上述相关研究给优化富氧顶吹冶炼炉的流场以及搅拌效率打下了重要的基础。不过就怎样明显地缩减炉内搅拌死区并进一步提高搅拌效率这个关键问题而言,当前已有的技术方案还不够完善。本文在现有的顶吹和侧吹技术的基础之上,提出了一种把新式顶枪旋流器和侧吹多枪变角度喷吹技术耦合起来的技术(图1)。这种技术把这两种技术各自的优势融合到一起,期望在强化反应器里多尺度物质还有能量传递的时候,能够有效地增加富氧空气和熔体相互接触的面积,进而给出一种全新的解决办法,以便达成更高的反应效率。

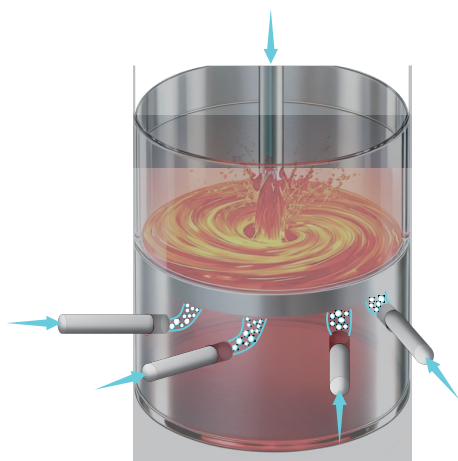


图1 顶侧复合反应器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a top-side combined reactor

1 模型构建

本研究选取某富氧顶吹冶炼炉当作物理模型构建的基础。为了提升计算方面的效率,在着手建立物理模型之前,还做出了下述4个方面的简化处理。

1) 本研究作为顶侧复吹技术强化机理的基础性探索,在模型构建中采用了冷态假设,即忽略熔池内高温环境下的复杂物理化学反应(如硫化矿氧化、熔剂分解、相变等),并将多相物性参数(密度、黏度、界面张力)设为恒定值。同时,为聚焦流场动力学行为,计算中未考虑能量方程及热浮力效应。上述简化处

理旨在剥离次要因素,集中揭示流动结构与传质之间的本质关联,是机理研究的常规且有效手段。

2) 本研究着重对流场里面的熔体以及富氧空气展开瞬态流动的相关计算工作。所设计的模型其结构属于富氧顶吹炉的部分结构范畴,在该流场中,渣相以及钨相均呈现出不可压缩的牛顿流体特性,并且还具备湍流方面的特性。

3) 重力加速度设为 9.81 m/s^2 。

4) 本研究中喷吹气体以产生稳定射流为准,探讨该条件下流场中的宏观物质交换趋势及能量扩散规律。

1.1 物理模型及网格模型的建立

本研究所采用的物理模型呈现出圆柱体形态,其直径达到5 000 mm,高度则为4 000 mm。顶吹枪以及侧吹枪皆是圆柱形状,顶吹枪处于圆柱体的轴心位置,在顶部喷枪处还额外加装了旋流器,方向为左螺旋。一共有六杆侧吹喷枪,其轴心与反应器底面距离为1 500 mm,喷枪的具体构造情况以及流场流体初始的分布状况参照图2。

本研究中侧吹喷枪采用非均匀排布,该设计基于以下流体力学原理与强化目标:

1) 利用非对称动量注入这一方式,打破原先多个对称涡旋同时存在的局面,进而推动侧吹能量和顶吹旋流达成协同状态,由此形成在规模上占据主导地位的大尺度环流,如此一来便能对熔体针对壁面所造成的冲刷作用起到一定的削弱效果。

2) 为确保在工程实际中应用的可行性并维持炉体运行稳定性,该设计可抵消部分由射流引起的横向合力,从而有效避免在强搅拌过程中可能诱发的炉体横向失稳风险。

1.2 网格无关性验证

为保证数值模拟结果的准确性,消除网格数量对计算结果的影响,本节进行了网格无关性验证。设计了5套逐级加密的网格,网格数量分别为120万、140万、160万、180万和200万。以同一时刻下不同高度渣层平均合速度作为监测指标,对比不同网格数量下的计算结果。计算结果如图3所示。当网格数量从120万增加至140万时,渣层平均合速度变化率为2.4%;继续加密至180万时,变化率降至0.7%,小于5%的判定阈值。表明计算结果已达到网格收敛,继续加密网格对结果影响有限。综合考虑计算精度与时间成本,选用180万网进行后续所有工况的数值模拟。

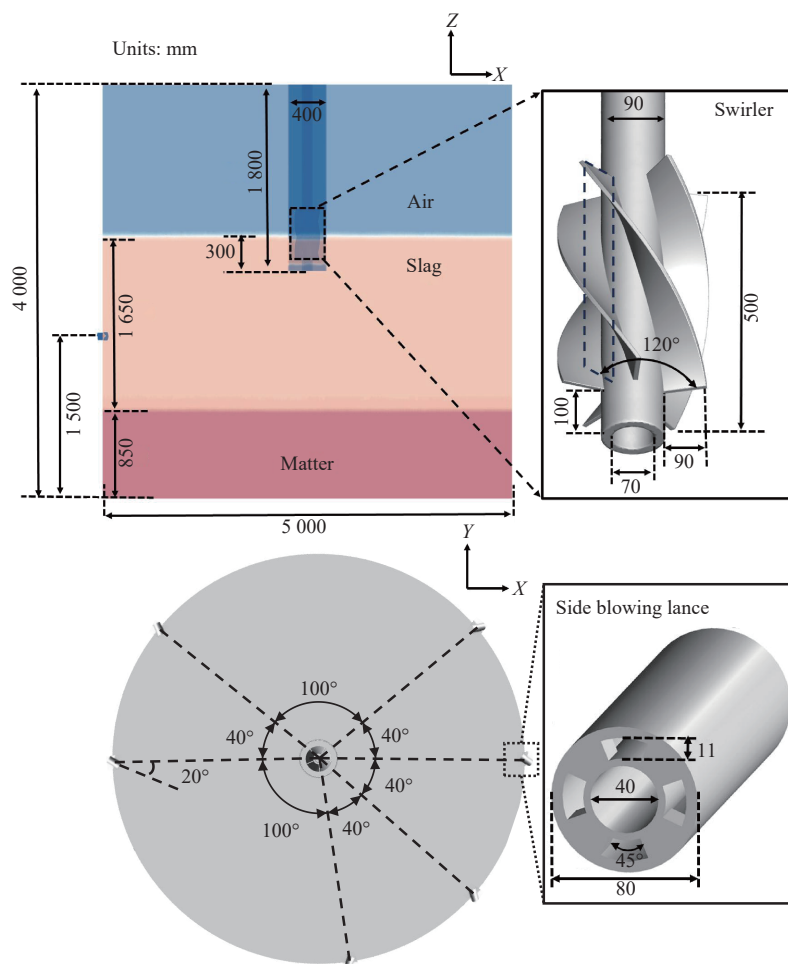


图2 顶侧复合反应器结构图

Fig. 2 Structural diagram of a top-side combined reactor

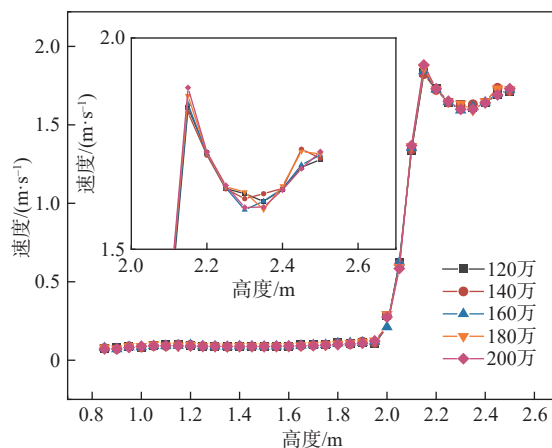


图3 不同网格数量下渣层合速度对比折线图

Fig. 3 Grid independence validation: average velocity in the slag layer vs. grid number

本研究所搭建网格模型如图4所示,本网格模型采用非结构化网格,非结构化网格允许在感兴趣的特定区域进行局部细化或粗化,这种适应性对于捕捉不同空间尺度的流动现象(如边界层、湍流)至关重

要。网格划分的结果是六面体网格,由于熔炼过程中高速气体搅动渣层为主要的研究区域,因此,对该反应区域进行网格加密处理。考虑到浸没喷嘴附近的气体流速较大,对该区域的网格也进行了局部细化。网格尺寸分别为5、10、20、40 mm。

1.3 数学模型多相流模拟模型选择

气液两相流在流动的过程中,严格遵循着三个基本的物理学原理,即质量守恒定律、牛顿第二定律以及能量守恒定律。通过对方程加以计算所获取的模拟结果,能够让我们更深入地了解气相与液相二者之间界面的具体行为情况。

1)在顶吹炉内部存在着气液两相流的情况,其中气相与液相之间有着清晰且明确的界面,在二者进行搅拌混合的时候,相间密度方面并不会出现剧烈的变化,并且各自均为不可压缩流动的状态,所以选用VOF模型对其界面的形状以及运动加以跟踪并捕捉。在VOF模型里,每一种流体在所设定的计算域中都会占据不同比例的体积分数,把各个流体的体

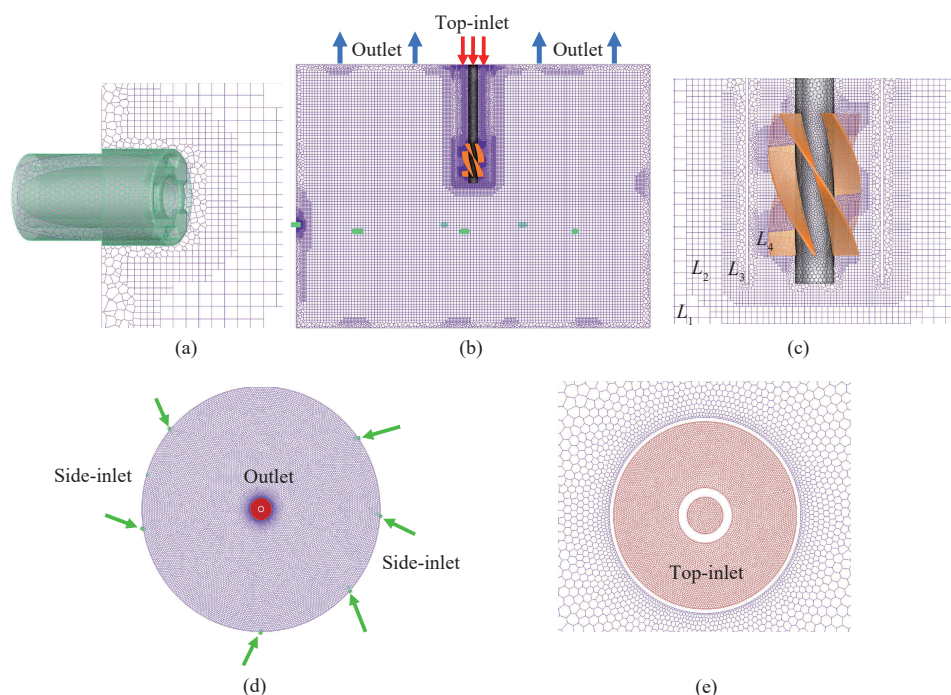


图4 顶侧复合反应器网格模型示意图: (a)侧吹枪周围网格局部放大图; (b) Z-X截面网格图; (c)顶吹枪旋流器周围网格局部放大图; (d)俯视角网格图; (e)顶吹枪入口网格局部放大图

Fig. 4 Schematic diagram of the mesh model for the top-side combined reactor: (a) Locally enlarged view of mesh around side-blown lance; (b) Mesh diagram of Z-X Cross-section; (c) Locally enlarged view of mesh around top-blown lance swirler; (d) Top-down view of mesh; (e) Locally enlarged view of mesh at top-blown lance inlet

积分全部加起来之后其总和为1。VOF方法是借助体积分函数来表述流体自由表面的具体位置以及流体所占据的体积,这种方法所占用的内存相对较小,而且操作起来较为简单还颇具成效。通过对一个或者多个相的体积分连续性方程展开求解的操作,便能够对相间的界面予以追踪。第 q 相体积分数的连续性方程为:

$$\frac{1}{\rho_q} \left\{ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) - [S_{\alpha_q} + \sum (m_{pq} - m_{qp})] \right\} = 0 \quad (1)$$

式中, ρ_q 是第 q 相所对应的物理密度; $\mathbf{v}_q$ 是第 q 相的速度; m_{pq} 是从第 p 相向第 q 相传质的过程; m_{qp} 是从第 q 相向第 p 相进行传质的过程; S_{α_q} 为源项,其默认情况下所取的值为零。

在对基本相体积分加以计算的时候,务必要确保所有相的体积分之和等于1,而不需要求解该体积分方程:

$$\sum \alpha_q = 1 \quad (2)$$

除了连续性方程外,控制方程当中还有动量方程这一项。对整个计算域的单一动量方程加以求解,便能够获取在各个阶段都可共享的速度场。而动量方程是借助物理参数当中的密度以及黏度这两个方

面和体积分建立起关联的:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\Delta p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{v}$ 为速度; $\mathbf{v}^T$ 为速度转置矩阵; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; $\mathbf{F}$ 为体积力; Δp 为压力差。

2)在本研究所涉及的气-渣-铕三相流中,存在着气泡方面的相关行为。而气泡在液体里进行运动时,其与液体表面的张力有着极为密切的关联。所以说,把表面张力当作是动量方程里的一个源项来对待。当表面张力处于恒定状态,并且仅仅把界面法向力这一因素考虑进去的时候,表面两侧所存在的压力差是由表面张力系数以及相界面的双向曲率半径这两个方面来决定的。其相关的表达式为:

$$p_2 - p_1 = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (4)$$

熔渣-铕、气体-熔渣和气体-铕的相界面张力系数分别为: $\sigma_{\text{matte-slag}} = 0.0175 \text{ N/m}$, $\sigma_{\text{slag-air}} = 0.33 \text{ N/m}$, $\sigma_{\text{matte-air}} = 0.41 \text{ N/m}$ 。

表面张力模型会借助界面法线的局部梯度这一方式来对相界面的曲率加以计算。这里所说的假设,

是依照第 q 相体积分数梯度所定义出来的相界面法线, 而对应的值为:

$$n = \Delta \alpha_q \quad (5)$$

曲率 k 是单位法线的散射, 公式为:

$$k = \nabla \cdot \mathbf{n}' \quad (6)$$

其中 $\mathbf{n}'$ 是单位法线, 表达式:

$$\mathbf{n}' = \frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|} \quad (7)$$

3) 湍流模型选择

湍流模型的选取对多相流数值模拟结果的准确性具有重要影响。常用的湍流模型主要包括 Standard $k-\varepsilon$ 、RNG $k-\varepsilon$ 、Realizable $k-\varepsilon$ 及 RSM (Reynolds Stress Model) 等。针对本文所涉及的顶侧复吹反应器, 若采用 LES 方法, 有望更精细地捕捉顶吹射流与侧吹射流相互作用产生的非定常涡结构、气泡破碎与聚并过程, 以及熔池自由液面的瞬态波动。然而, LES 方法对网格分辨率要求极高, 计算成本显著增加。若采用 Standard $k-\varepsilon$ 模型, 由于其基于各向同性湍流假设, 可能高估湍流黏性, 导致对旋转流场的预测偏差。RNG $k-\varepsilon$ 模型虽通过重整化群理论改进了耗散率方程, 对强剪切流有一定改善, 但在强旋流场中的表现与 Realizable $k-\varepsilon$ 相近^[28]。因此, 本文选用可实现 $k-\varepsilon$ 湍流模型并将其和 VOF 模型相结合, 以此开展后续的数值计算工作。如此一来, 便能够在确保计算效率的情况下, 计算得出与实际所呈现的现象最为相近的气液两相湍流流动效果。

在能够实现的 $k-\varepsilon$ 湍流模型中, 假设气相、渣相以及钎相有着相同的湍流动能(k) 以及湍流能量耗散率(ε) 的具体数值。除此之外, 关于 k 和 ε 的控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot \left(\rho \tilde{v} k - \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) = G_k + \rho \varepsilon \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot \left(\rho \tilde{v} \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) = \quad (9)$$

$$\rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}}$$

式中 μ_t 为湍流黏度, 计算公式为:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

μ_t 根据平均应变和湍流场计算得出。其中 C_μ 、 G_k 为湍流动能产生量, 计算公式:

$$G_k = \mu_t S^2 \quad (11)$$

可实现的 $k-\varepsilon$ 湍流模型的参数保持不变:

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2 \quad (12)$$

$$\eta = S \frac{k}{c}, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (13)$$

相较于瞬态结果而言, 依据平均值来对流场变量加以比较, 往往更具实际意义。具体操作上, 在每一个时间步长内, 针对相关变量实施统计平均处理, 得到变量 F 所对应的时间平均值, 其具体的计算公式应为:

$$\bar{\Phi} = \frac{i \Phi t_i}{i t_i} \quad (14)$$

式中, $\bar{\Phi}$ 是变量的平均值, Φ_i 是变量在第 i 个时间步长的值, t_i 是时间。

1.4 顶侧复合反应器边界条件和求解方法设置

运用 SIMPLE 算法来求解无压 Navier-Stokes 方程, 在此过程中, 由速度分量构成的矢量方程是以速度与压力耦合且呈分离的形式去求解的, 并且把残差设定为 10^{-5} , 能够保证连续性方程具备收敛性。在开展数值模拟的时候, 时间步长和流体速度以及网格大小之间存在着十分紧密的关联性。在这项工作中, 气相的速度是随着时间的推移而发生变化的, 其变化规律遵循着正弦函数。所以说, 依据库朗数(Co) 对模拟流所具有的可变时间步长进行相应的建模操作, 而库朗数其实就是时间步长(Δt)、网格大小(Δx) 以及流体实际速度(u) 的函数关系, 相关内容可参照式(16):

$$Co = u \frac{\Delta t}{\Delta x} < Co_{\max} \quad (16)$$

式中, $Co_{\max}$ 是 Co 的最大值(或称为全局 Courant 数)。在 $Co_{\max}$ 数值较低时, 是能够获得适当的时间精度及模拟精度的, 但如果 $Co_{\max}$ 过小将显著增加计算成本。参考之前的顶吹及侧吹研究调查, $Co_{\max}$ 的选择小于 1, 因此, 在当前工作中, 被设置为 0.5。

本研究中数值模拟所设物性参数及流场初始参数见表 1。

2 模拟结果分析

2.1 水模型试验与模拟结果对比

要保证计算结果是准确的, 就得对模拟计算得出的结果通过水模型试验来加以验证。依据相似原理去构建水模型试验平台, 让水模型试验的工况和模拟工况在内部达成相似的状态。遵循相似原理里的三

表1 各相物性参数、流场初始参数和物理量

Table 1 Physical properties of each phase and initial flow field parameters

参数(物理量)	数值(符号)	单位	参数(物理量)	符号	单位
渣相密度	3 000	kg/m ³	相间质量传递率	m	kg/(m ³ ·s)
铈相密度	4 000	kg/m ³	压强	ρ	Pa
气相密度	0.235	kg/m ³	动力黏度	μ	Pa·s
渣相黏度	1.5	Pa·s	重力加速度	g	m/s ²
铈相黏度	0.8	Pa·s	单位体积体积力	F	N/m ³
气相黏度	5.565×10^{-5}	Pa·s	表面张力系数	σ	N/m
气-渣相界面张力系数	0.33	N/m	曲率半径	R	m
气-铈相界面张力系数	0.41	N/m	界面法向量	$\mathbf{n}$	
渣-铈相界面张力系数	0.018	N/m	湍动能	k	m ² /s ²
顶吹入口速度(单顶吹)	120	m/s	湍流耗散率	ε	m ² /s ³
顶吹入口速度(顶侧)	100	m/s	湍动能产生项	G_k	kg/(m·s ³)
侧吹入口速度	300	m/s	应变率模	S	s ⁻¹
第 q 相体积分数	α_q		平均应变率张量	S_{ij}	s ⁻¹
第 q 相密度	ρ_q	kg/m ³	应变-产生比	η	
第 q 相速度	v_q	m/s	时间步长	Δt	s
时间	t	s	网格尺寸	Δx	m

个关键点,也就是几何相似、动力相似以及运动相似,这三个方面分别牵涉到模型和实际系统在几何形状、力还有运动方面的相似性。在按照相似原理搭建水模型试验装置时,要全面综合考量这三个方面的相似性,从而确保实验结果具备可靠性以及准确性。

1) 几何相似:模型和实际系统的几何形状以及尺寸是呈比例关系的。也就是说,模型所运用的诸如长度、角度、面积还有体积等一系列参数,都得依据特定的比例尺来实施缩放操作。假设实际系统的长度是 L ,并且选定比例尺为 $1:n$,那么模型的长度就会是 L/n 。而且,除了要保证几何形状的相似性之外,模型里面的结构状况、边界条件以及区域划分等方面,也都需要和实际系统维持在相同的状况之下。几何相似公式:

$$AB/CD=BC/DE=AC/CE$$

其中 AB 和 CD 属于两个相似图形的对应边长范畴,而 BC 以及 DE 则构成了它们的另一组对应边长,至于 AC 和 CE ,则是它们的第三组对应边长。几何相似性指的是两个图形在形状方面是完全一致的,仅仅在大小这一方面存在差异。要是两个图形呈现出相似的特点,那么它们相应的各个角会是相等的状态,并且它们对应边的长度之间会形成一定的比例关系。

2) 动力相似:模型与实际系统在力和运动的传递方面保持相似。这意味着在模型中使用的力(如重力、压力、摩擦力等)和运动(如速度、加速度、角速度等)必须按照一定的比例尺进行缩放。要满足动力相似,需要确保模型中的流体性质(如密度、黏度)也按照比例尺进行缩放。动力相似公式是用于描述两个动力

系统相似的公式。如果两个动力系统是相似的,那么它们的运动状态可以通过相似变换进行转换。动力相似公式:

$$m_1/m_2=F_1/F_2=\rho_1/\rho_2=v_1/v_2=c_1/c_2$$

m_1 以及 m_2 代表的是两个相似动力系统的质量, F_1 与 F_2 分别是这两个系统的力, ρ_1 和 ρ_2 对应着它们各自的密度, v_1 和 v_2 则是它们各自的速度,而 c_1 和 c_2 分别是它们的比热容。

3) 运动相似:模型和实际系统在流体的流动特性层面维持着相似的状态。具体而言,在模型当中所观测到的各类流动现象,像是流线、涡旋以及波动等等,都与实际系统里面的流动现象保持着相同的状况。运动相似公式属于用来表述两个运动系统相似性的公式。当两个运动系统呈现出相似的情况时,那么它们各自的运动状态便能够凭借相似变换来达成转换的操作。运动相似公式:

$$m_1/m_2=F_1/F_2=a_1/a_2=v_1/v_2=s_1/s_2$$

其中 m_1 和 m_2 是两个相似运动系统的质量, F_1 和 F_2 是它们的力, a_1 和 a_2 是它们的加速度, v_1 和 v_2 是它们的速度, s_1 和 s_2 是它们的位移。

根据相似准则构建的水模型试验平台见图5,以1:10的比例构建顶侧复吹反应器的水模型试验平台,其长宽高三维模型尺寸为2.0 m×0.5 m×0.5 m,使用有机玻璃板搭建而成,顶部设有旋流器喷枪,喷枪直径为0.4 m,侧壁上有6支侧吹喷枪,喷枪直径为0.08 m。搭配一台空气压缩机,标准状态下最高气量可以达到75 m³/s,对每支喷枪配备气体流量阀,精准控制每支喷枪的气量。水模型炉体内液面高度为

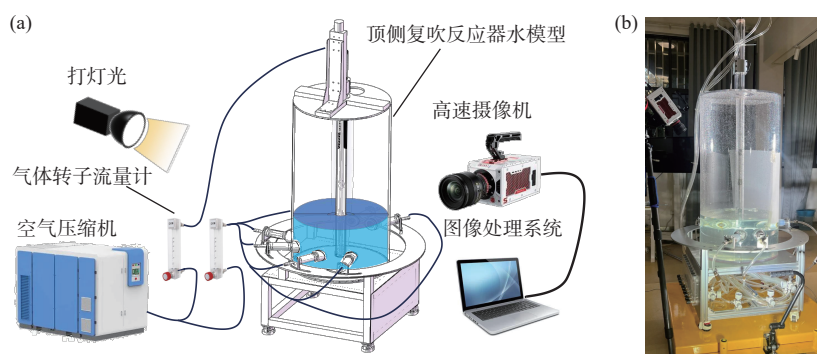


图5 顶侧复吹反应器水模型试验示意图: (a) 试验布置图; (b) 顶侧复吹反应器水模型实物照片

Fig. 5 Schematic diagram of the water model experiment for the top-side combined blowing reactor: (a) Experimental setup; (b) Physical photograph of the water model of the top-side combined blowing reactor

0.25 m, 并配备高速摄像机, 实时记录模型中的气泡运动以及流型的变化。

图6为高速摄像机拍摄的水模型试验照片与数值模拟结果的对比图。由图6可以看出, 水模型试验

结果与模拟结果高度吻合, 流型变化具有相似性, 且当流动时间为5.5 s时, 两者的顶吹喷枪周围均出现了液相喷溅后产生的液膜穿孔现象, 证明了数值模拟结果的科学性与准确性。

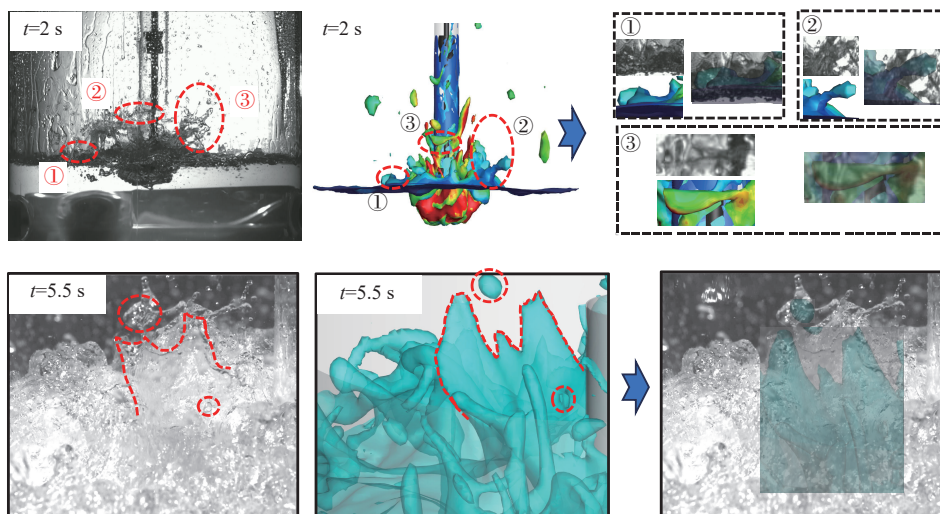


图6 水模型试验结果与数值模拟结果对照图

Fig. 6 Comparison between water model experimental results and numerical simulation results

2.2 流场参数定量对比

为深入探究单顶吹与顶侧复吹两种供气模式对流场特性的影响, 本节选取了渣层合速度、气含率、湍动能及壁面剪切力等关键参数进行定量对比分析。考虑到渣相液面波动将对上述参数产生较大影响, 为减小误差, 本节只统计高度在0.9~2.5 m的流场相关参数。这些参数分别反映了熔池的搅拌强度、气体分布、湍流混合效率及对炉衬的冲刷作用, 对评价冶炼效果及炉衬寿命具有重要意义。

2.2.1 渣层合速度

渣层合速度反映了渣相的流动与混合情况。图7(a)列出了顶侧复吹(下称TSCB)与单顶吹(下称TB)模

式渣层区域不同高度截面平均合速度对比。结果表明, TSCB模式下, 0.9~2.5 m各个高度截面平均合速度均明显高于TB模式, 在高度为1.45~1.60 m时, 受侧吹射流影响, TSCB模式渣层速度明显提升; 在高度为1.65~2.00 m时, TSCB模式渣层合速度较TB模式提升了0.5 m/s; 对于TB模式, 高度在2.0 m以下时, 渣层平均合速度远小于0.5 m/s。同时, 对比两种模式下0.85~2.5 m合速度分布云图可知, 与TB流场随高度降低而速度急剧衰减、底层出现明显低速区不同, TSCB模式在各高度截面上均保持了较高的合速度值, 表明侧吹气流有效补充了能量, 形成了贯穿熔池整体的强协同环流, 为实现均匀混合与高效传

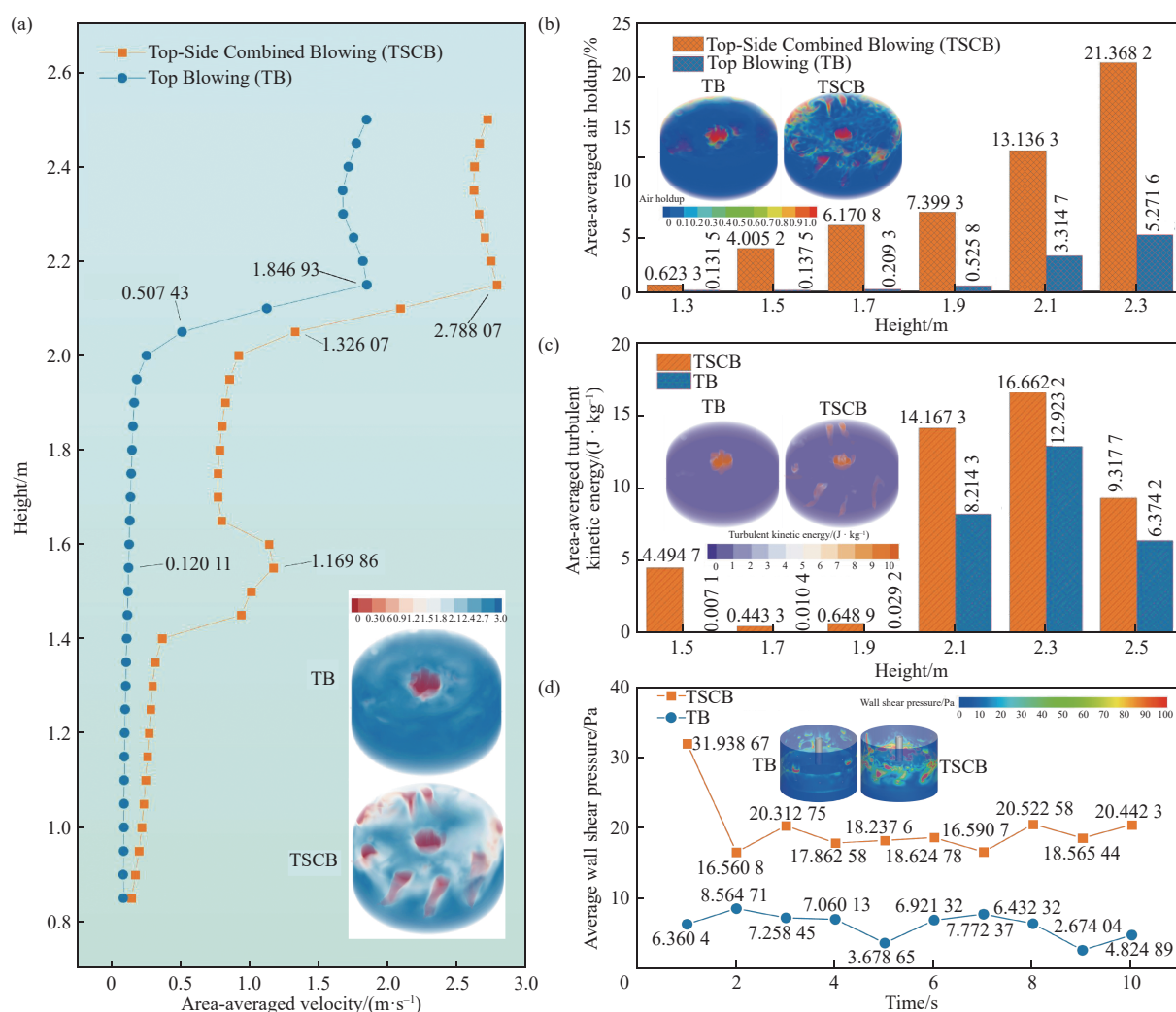


图7 单顶吹与顶侧复吹工况流场参数定量对比

Fig. 7 Quantitative comparison of flow field parameters between single top-blowing and top-side combined blowing conditions

质提供了理想流场结构。由计算得出,顶侧复合模式下渣层平均合速度为1.14 m/s,较单顶吹模式渣层平均合速度(0.55 m/s)提高了107.97%。由此可知,侧吹气流的引入显著增强了渣相的切向运动,形成了更强烈的循环流,打破了单顶吹在渣层下部形成的搅拌死区,从而提高了整体搅拌强度,有利于加速气-渣反应。

2.2.2 气含率

气含率反映了气相在熔池中的分布与滞留情况,直接影响气-液反应界面与传质效率。图7(b)列出了两种模式下不同高度截面平均气含率的对比。结果表明,TSCB模式下,渣层平均气含率为5.86%,较TB模式的渣层气含率(1.11%)提升了425.54%。对比两种模式下1.3~2.3 m气相分布云图可知,顶侧复吹模式下气泡分布范围更广,大气泡集中现象有所缓解。由此可知,侧吹气流将大气泡破碎为更细小

的气泡,并使其在熔池中分布更均匀,增加了气-渣接触面积。这表明TSCB更有利于气-渣反应的进行。

2.2.3 湍动能

湍动能(Turbulent kinetic energy, TKE)是衡量湍流混合强度的重要参数。图7(c)展示了两种模式下不同高度截面平均湍动能的对比。结果表明,TSCB模式下,熔池平均湍动能为4.72 J/kg,较单顶吹(2.91 J/kg)提高了62.10%。高湍动能区域主要分布在顶吹射流冲击区和侧吹气流附近。湍动能的提高意味着更强烈的湍流扩散和混合,有利于能量与质量的传递。TSCB通过顶吹与侧吹的协同作用,在更大范围内产生了高湍流区域,从而提升了整体混合效率。

2.2.4 壁面剪切强度

壁面剪切强度反映了流体对炉衬的冲刷作用,是评估炉衬寿命的关键参数。图7(d)对比了0~10 s两种模式下的平均壁面剪切强度。结果表明,TSCB

模式下,平均壁面剪切强度为 20.05 Pa,高于TB的 6.15 Pa,且侧吹射流周围存在壁面剪切强度大于 100 Pa 的区域。由此可知,虽然顶侧复吹增强了搅拌,但也加剧了对炉衬的冲刷,特别是在侧吹气流对应的壁面区域。

2.2.5 综合对比

综合以上参数的定量对比,顶侧复吹技术的优势得以明晰:侧吹气流的引入,与顶吹射流形成协同效应,共同驱动熔池流动。这不仅直接提升了熔池的整体搅拌强度,更重要的是,它改变了能量的输运和耗散方式。

具体而言,侧吹将顶吹集中的能量有效地输运至熔池更大范围,并破碎大气泡,使气体分布更均匀,从而极大地扩展了有效反应界面。这一“能量扩散效应”是顶侧复吹在混合效率上远优于单顶吹工艺的根本原因。

与此同时,模拟结果揭示了两种模式下壁面剪切力分布的局部差异,这为优化炉体冷却系统设计、确保装置长期稳定运行提供了参考。

2.3 顶侧复吹流场传质规律分析

上述定量分析表明,顶侧复吹技术在渣层合速度、渣层气含率、湍动能等关键参数上均显著优于单顶吹工艺。为从根本上揭示顶侧复吹的优越性机理,下文将聚焦于传质过程的量化表征,剖析流场结构对冶金反应速率的控制作用。

通过提取流场不同高度截面上速度及质点迹线,本研究观察到一个关键现象:不同高度界面的流体迹线高度重叠,如图 8 所示,图 8(a)~(d)分别是在 Z 为 1.7、1.9、2.1、2.3 m 高度截面上计算的流体质点迹线。可以观察到,尽管起始高度不同,这些迹线的轨迹和空间分布呈现出高度的一致性,趋向于重叠。这表明流场存在强烈的垂直混合和主导的二维水平流动结构。

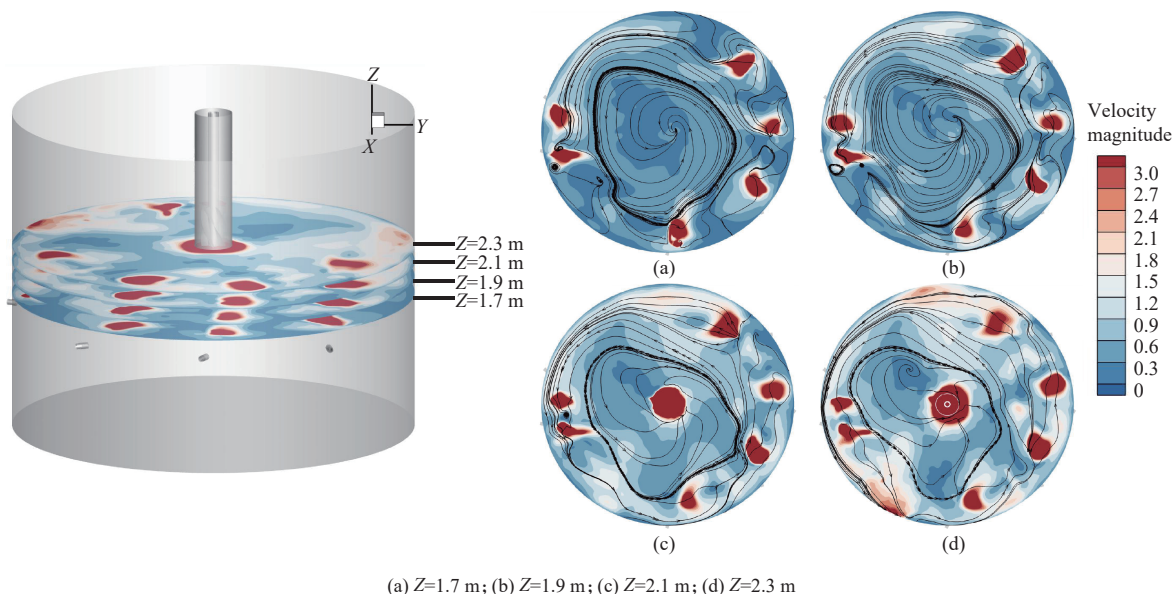


图 8 顶侧复吹反应器流场不同高度截面速度云图及流体质点迹线

Fig. 8 Flow field velocity contour plots at different height sections and fluid particle trajectories in a top-side combined blowing reactor

迹线在不同高度上的重叠现象,揭示了顶侧复吹流场内高效的垂向传质机制。流体微团在顶枪射流及侧枪射流的共同作用下,其水平运动轨迹保持一致,同时由于垂向的湍流扩散及大尺度涡旋结构的存在,微团在不同高度层间发生了充分的混合。这意味着,从传质的角度看,流场能够快速地将物从一层输运到另一层,从而使整个流体区域在水平流动方向上趋于均一化。这种特性对于反应器内的快速混合至关重要。

迹线的高度重叠性进一步表明,该流场表现出显著的准二维流动特征。这种流动结构类似于 Taylor

柱或大尺度柱状涡,其涡量或流动能量在垂直方向上的变化很小。在这种模式下,传质过程主要由这些大尺度二维结构控制。物质在水平面上的输运是主导的,而垂向的传质则通过这些结构内部的二次流或小尺度湍流实现。

3 结论

1) 在与单顶吹模式保持相同进气量条件下,顶侧复吹模式使渣层平均合速度提升 107.97%,渣层平均气含率提升 425.54%,湍动能提升 62.10%,有效打破

了单顶吹在渣层下部形成的搅拌死区,实现了气相在熔池空间内的更均匀扩散,极大增加了气-渣反应的有效接触面积。值得注意的是,本研究的冷态结果虽不能直接定量表征热态反应速率,但所揭示的流场结构及传质强化趋势,在考虑热效应及化学反应后仍具指导意义。尽管具体数值会随温度、化学反应而变,但“顶侧复吹优于单顶吹”这一定性结论具有跨工况的稳健性。

2) 流场迹线分析揭示,顶侧复吹模式下不同高度截面的流体质点运动轨迹高度重叠,表明流场呈现出强烈的准二维流动特征与高效的垂向混合能力,该准二维流动结构是顶侧复吹模式强化多相传质的核心机理。

3) 顶侧复吹技术在显著强化熔池搅拌的同时,也使壁面平均剪切力从 6.15 Pa 激增至 20.05 Pa,且局部壁面剪切力大于 100 Pa,表明炉衬侵蚀风险随之增加。针对这一问题,建议优化侧吹喷枪分布方式,同时选用具备高抗侵蚀性的耐火材料作为炉壁组成材料,以保障炉体寿命。

参考文献

- [1] WANG M D, NIE Q Q, XIE G Y, et al. Mathematical modelling and CFD simulation for oxygen removal in a multi-function gas-liquid contactor[J]. Processes, 2023, 11(6): 1780. DOI: 10.3390/pr11061780.
- [2] CHEN S Y, OUYANG Y, VANDEWALLE L A, et al. CFD analysis on hydrodynamics and residence time distribution in a gas-liquid vortex unit[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 446: 136812. DOI: 10.1016/j.ccej.2022.136812.
- [3] YAO Y C, DING J, ZHANG Y Y, et al. Heat transfer performance of pillow plate heat exchanger with molten salt and supercritical carbon dioxide[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 183: 122211. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.122211.
- [4] HU J Y, YANG S L, WANG H. VOF study of mesoscale bubble flow dynamics in the side-blown gas-liquid two-phase reactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 480: 147983. DOI: 10.1016/j.ccej.2023.147983.
- [5] WAN Z H, YANG S L, KONG D S, et al. Numerical study of bath dynamics in the industrial-scale top submerge lance furnaces[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2023, 54(4): 2159-2173.
- [6] LIU P, YANG S L, HU J H, et al. Numerical investigation of gas-liquid flow hydrodynamics in three-dimensional bottom-blown reactor via LES-VOF coupled model[J]. Chemical Engineering Science, 2023, 282: 119338. DOI: 10.1016/j.ces.2023.119338.
- [7] LAI K, YANG S L, WANG H. Numerical investigation of bubble dynamics and multi-scale flow characteristics in the bottom-blown gas-liquid reactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 474: 145868. DOI: 10.1016/j.ccej.2023.145868.
- [8] SEGAWA T, MIZUNUMA H, MURAKAMI K, et al. Turbulent drag reduction by means of alternating suction and blowing jets[J]. Fluid Dynamics Research, 2007, 39(7): 552-568.
- [9] 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.
- [10] CAO L L, WANG Y N, CHENG Z F, et al. Bubble formation and surface sloshing in the TSL flow with a viscous liquid[J]. JOM, 2022, 74(12): 4920-4929.
- [11] SONG C, PAN Y H, MA P, et al. Numerical simulation on the influence of submerged combustion on splashing and heat transfer in TSL furnace[J]. Metals, 2022, 12(2): 328. DOI: 10.3390/met12020328.
- [12] WANG Y H, WANG S B, WEI Y G, et al. Numerical simulation of gas-liquid mixed top blowing to enhance momentum diffusion[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 181: 115971. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115971.
- [13] 万章豪, 杨世亮, 孔德颂, 等. 顶吹浸没熔炼炉中气-渣-铜钼多相流搅拌特性的数值模拟[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(7): 2231-2244.
- [14] WANG Z H, YANG S L, KONG D S, et al. Numerical modelling of stirring characteristics of gas-slag-copper matte multiphase flow in bath with top submerged lance[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(7): 2231-2244.
- [15] YANG G, LI B K, SUN M J, et al. Numerical simulation of the slag splashing process in a 120 tons top-blown converter[J]. Metals, 2023, 13(5): 940. DOI: 10.3390/met13050940.
- [16] 王仕博. 艾萨炉顶吹熔池流动与传热过程数值模拟研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [17] WANG S B. Numerical simulation research of flow and heat transfer on top-blown bath in ISA furnace[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
- [18] 徐建新. 多相体系搅拌混合效果评价方法及其应用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
- [19] XU J X. Research on evaluation methods and applications of stirring and mixing effects in multiphase systems[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012.
- [20] 邹全. 富氧侧吹熔池熔炼过程中气液两相流数值模拟研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.
- [21] ZOU Q. Numerical simulation of gas-liquid two-phase flow in oxygen-enriched side-blown molten pool melting process[D].

- Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023.
- [18] 杨世亮, 肖清泰, 徐建新, 等. 有色金属熔池熔炼过程混沌流非线性强化研究进展综述[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2024, 49(4): 1-24.
- YANG S L, XIAO Q T, XU J X, et al. Review on the advancements in nonlinear process intensification of chaotic flows in bath smelting of nonferrous metals[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2024, 49(4): 1-24.
- [19] 陈兴华, 胡志勇, 朱荣, 等. 基于数值模拟的110 t复吹转炉氧枪优化研究[J]. 工业加热, 2019, 48(4): 36-39.
- CHEN X H, HU Z Y, ZHU R, et al. Optimization research of the oxygen lance structure in a 110 t BOF steelmaking process based on the numerical simulation[J]. Industrial Heating, 2019, 48(4): 36-39.
- [20] 李勇. 顶底复吹转炉内气液两相流行为的模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- LI Y. Numerical simulation of gas and liquid flow in steelmaking converter with top and bottom combined blowing[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
- [21] LI Y, LOU W T, ZHU M Y. Numerical simulation of gas and liquid flow in steelmaking converter with top and bottom combined blowing[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2013, 40(7): 505-514.
- [22] 李世旺, 王仕博, 王华, 等. 多孔道底吹喷枪搅拌的数值模拟与强化机理分析[J]. 化工进展, 2020, 39(9): 3563-3573.
- LI S W, WANG S B, WANG H, et al. Numerical simulation and strengthening mechanism analysis of multi-channel bottom-blowing spray lance stirring[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(9): 3563-3573.
- [23] 李宝宽, 顾明言, 齐凤升, 等. 底吹钢包内气/钢液/渣三相流模型及渣层行为的研究[J]. 金属学报, 2008, 44(10): 1198-1202.
- LI B K, GU M Y, QI F S, et al. Modeling of three-phase (gas/molten steel/slag) flows and slag layer behavior in an argon gas stirred ladle[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(10): 1198-1202.
- [24] GUO X Y, JIANG B C, WANG Q M, et al. Effect of angle setting of two rows of oxygen lances on flow characteristics of large bottom-blown furnaces[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(11): 4245-4254.
- [25] 姜保成, 郭学益, 王亲猛. 基于CFD的大型底吹炉内熔体气动搅拌二维分析[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(6): 39-50.
- JIANG B C, GUO X Y, WANG Q M. Two-dimensional analysis of melt pneumatic stirring in large bottom blowing furnace based on CFD[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(6): 39-50.
- [26] XI W L, NIU L P, SONG J B. Flow field study of large bottom-blown lead smelting furnace with numerical simulation[J]. Metals, 2023, 13(6): 1131. DOI: 10.3390/met13061131.
- [27] LIU W, TANG H Y, YANG S F, et al. Numerical simulation of slag eye formation and slag entrapment in a bottom-blown argon-stirred ladle[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2018, 49(5): 2681-2691.
- [28] FENG Y, LI X S, REN X D, et al. Influence of the turbulence model on the numerical predictions of cold turbulent flow in a heavy-duty gas turbine DLN combustor[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2024, 196: 108735. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2023.108735.

Multiphase Flow in Oxygen-Enriched Bath Smelting: Numerical Simulation and Experimental Investigation of a Top Lance Swirl Generator Coupled with Variable-Angle Side Lances

XU Keting¹, YANG Guiyan^{1,2}, WANG Xubin³, GAO Zelei³, WANG Shibo¹, WANG Tianjie¹, TANG Haowen¹

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

2. Jinchuan Group Copper and Precious Metals Co., Ltd., Jinchang 737100, Gansu, China;

3. Nickel Smelting Plant, Jinchuan Group Nickel and Cobalt Co. Ltd., Jinchang 737100, Gansu, China)

Abstract: In response to the challenges posed by rising magnesium oxide (MgO) content in nickel sulfide ores, which increases melt viscosity and reduces smelting efficiency, as well as the limitations of conventional top-blown furnaces characterized by poor mixing efficiency and significant melt splashing, this study introduces an innovative blowing technology. The proposed solution integrates a top lance swirl generator with multiple variable-angle side-blown lances. This approach fundamentally transforms the traditional single axial momentum input system into a coupled input mode that combines axial momentum as the primary driver with supplementary radial momentum

input. This strategic redesign aims to enhance radial momentum transfer within the molten bath, effectively reduce stirring dead zones, and create a more homogeneous mixing environment while mitigating the problematic melt splashing typically observed in top-blown operations. To systematically evaluate the proposed technology, comprehensive mathematical modeling and physical water modeling approaches were implemented. A detailed computational model of the top-side combined blowing furnace was developed using the Volume of Fluid (VOF) method to track multiphase interfaces and the standard k -epsilon turbulence model to simulate the complex turbulent flow field. These numerical simulations generate comprehensive three-dimensional flow field data at various time intervals, capturing the detailed dynamics of gas-slag-matte three-phase interactions within the smelting bath. Simultaneously, a physically scaled water model was constructed based on well-established similarity criteria, and flow visualization experiments were conducted to provide empirical validation of the numerical predictions. The close agreement between experimental flow patterns and simulation results confirmed the reliability of the computational model for analyzing complex multiphase flow phenomena in metallurgical systems. Comparative analysis between the novel combined blowing technology and conventional single top-blowing operations reveals significant differences in key hydrodynamic parameters under equivalent total gas flow conditions. The quantitative results demonstrate substantial improvements in the slag layer performance metrics for the combined blowing configuration: average velocity increases by 107.97%, turbulent kinetic energy rises by 62.10%, and average gas holdup surges dramatically by 425.54%. However, this enhanced mixing performance comes with an important trade-off-the wall shear stress increases to 3.26 times that of the conventional top-blowing operation. The analysis of the flow field structure under the combined blowing regime reveals the formation of a dominant two-dimensional horizontal flow pattern that contributed to the improved mixing characteristics. The results indicate that the integrated top-lance-swirl and variable-angle-side-lance technology effectively addresses the limitations of traditional top-blowing by significantly enhancing bath stirring efficiency and intensifying metallurgical reaction kinetics. The substantial increase in wall shear stress represents a critical consideration for practical implementation. Applied research building upon these findings should focus on developing operational strategies, design modifications, or refractory solutions that mitigate the risks associated with enhanced wall scouring and potential furnace instability, thereby enabling the benefits of improved mixing to be realized while ensuring operational reliability and equipment longevity in industrial applications.

Key words: top-side combined blowing; Computational Fluid Dynamics (CFD); process intensification; bath smelting; multiphase flow

Received date: 2025-12-25

Revised date: 2026-03-17

Accepted date: 2026-03-18

Foundation item: Project(202501AS070131) supported by the Science and Technology Research and Development Program Project of Yunnan Province; Project(202302AQ370001-4) supported by the Yunnan Major Scientific and Technological Project

First author: XU Keting; Tel: +86-15538305595; E-mail: amao1998666@163.com

Corresponding author: WANG Shibo; Tel: +86-13888807645; E-mail: ph.d.wangshibo@foxmail.com