

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.12.002

双侧吹熔池熔炼炉内气液两相流数值模拟

陈朝辉¹, 赵升辉², 赵明杰¹, 赵国华¹, 张小雪¹, 陈卓², 宋彦坡²

(1. 赤峰云铜有色金属有限公司, 内蒙古 赤峰 024000;
2. 中南大学 能源科学与工程学院, 长沙 410083)

摘要:为了探索铜双侧吹熔池熔炼过程增产增效的实现途径,以赤峰云铜有色金属有限公司的实际双侧吹熔池熔炼炉为原型,运用VOF等方法构建了炉内气液两相流动过程数值模型,据此对不同送风流量(1 300、1 500、1 700 m³/h,标态)条件下的熔炼过程进行了数值模拟。结果表明,提升送风流量能够在一定程度上提高熔炼效率,但同时也可能导致烟尘发生率增大等问题,因此,送风流量的增幅不宜过大。

关键词:送风流量;熔池熔炼;数值模拟;气液两相流;双侧吹

中图分类号:TF811 文献标志码:A 文章编号:1007-7545(2024)12-0008-09

Numerical Simulation of Gas-Liquid Two Phase Flow in a Double-Side-Blown Bath Smelter

CHEN Zhaohui¹, ZHAO Shenghui², ZHAO Mingjie¹, ZHAO Guohua¹,
ZHANG Xiaoxue¹, CHEN Zhuo², SONG Yanpo²

(1. YCC Chifeng Non-ferrous Metals Co., Ltd., Chifeng 024000, Inner Mongolia, China;
2. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to explore the approach to increase production efficiency of copper Double-Side-Blown (DSB) smelting process, a numerical model of gas-liquid two phase flow was developed by using VOF and other methods for an actual DSB smelting furnace in YCC Chifeng Non-ferrous Metals Co., Ltd., and the smelting process under different air flow rate (1 300, 1 500 and 1 700 m³/h, in standard condition) was numerical simulated. The simulation results show that increasing the air supply flow can improve the smelting efficiency to a certain extent, but it may also lead to the increase of the incidence of dust, so the increase of the air supply flow should not be too large.

Key words: air flow rate; bath smelting; numerical simulation; gas-liquid flow; double-side-blown

熔池熔炼具有原料适应性强、烟尘率低等多种优点,在铜、镍等多种有色金属造钼熔炼中应用广泛^[1]。根据气流吹入熔池的方式,熔池熔炼又可分为顶吹、侧吹、底吹以及复合吹等多种。近十多年来,中国在引进国外熔池熔炼技术的基础上,研究开发出了连续底吹、富氧双侧吹等具有自主知识产权

的新技术。其中,赤峰云铜有色金属有限公司(后文简称赤峰云铜)研发的富氧双侧吹熔池熔炼炉在国内已有多家铜冶炼企业得到了成功应用,具有良好的生产技术经济指标^[2-3]。

侧吹熔池熔炼过程本质上是空气与熔体在熔炼炉内流动、接触并反应的过程,因而,炉内气液两相

收稿日期:2024-06-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52304377)

作者简介:陈朝辉(1988-),男,副高级工程师;通信作者:宋彦坡(1979-),男,博士,副教授,硕士生导师

流行为与熔炼效果息息相关。然而,由于熔炼炉内的高温、强冲刷特征,现有检测技术难以直接感知炉内两相流状态,国内外学者主要通过水模型以及数值模拟试验获取前述信息。魏季和等^[1]对侧顶复吹 120 t AOD 炉进行了水模型试验,研究发现侧吹主枪气体流量对炉内气液混合起决定性作用。王书晓等^[4]搭建了侧吹熔池的水模型试验台,研究发现气体流量、喷枪孔径等工艺参数对气流穿透深度等两相流动特征的影响规律。这些研究在揭示了熔池熔炼炉内气液两相流的基本特征与变化规律,但是,水模型试验既难以获取熔池内部流体速度等物理场精细特征,又难以反映高温熔池内的气液两相流行为。

数值模拟也是目前研究热态熔池内气液两相流行为的主要手段。李鹏等^[5]采用 VOF(volume of fluid, 流体体积函数)多相流模型模拟了侧吹气体在熔炼池内的流动过程,并通过水模型试验验证了数值模型的可靠性。LIU 等^[6]构建了某富氧侧吹炉的水模型与数值模型,发现使用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型获取的气体贯穿深度等模拟结果与水模型试验最为接近。刘泛函^[7]对瓦纽科夫炉熔炼过程进行了多相(气相、渣相、铜铈相)多场(浓度场、流场、温度场)耦合数值模拟,据此探究了瓦纽科夫炉的最佳技术指标。ZOU 等^[8]耦合应用 VOF 和 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型对富氧侧吹熔铅过程进行数值模拟,研究了气流喷入速度、熔体淹没深度等因素对炉内熔体喷溅高度的影响规律。WU 等^[9]对不同工况下铜富氧侧吹熔炼炉内的气液两相分布状态进行了数值模拟,探究了炉渣挡板对气液混合效果的影响。XIAO 等^[10]构建了双侧吹熔炼过程的气-渣-铈三相数值模型,探讨了通过改变气体喷入模式改善熔池中心弱环区的流场的方案。此外,还有一些学者对于类似熔池熔炼炉,对底吹炉^[11-14]、PS 转炉^[15-17]、烟化炉^[18-20]等,进行了数值模拟研究。

前述研究工作提高了人们对侧吹熔池熔炼过程的认知与操作水平。然而,由于侧吹熔池熔炼工艺的复杂性,前述研究多是面向某个具体问题(如贯穿深度、喷溅或搅拌等),缺乏对过程的全面分析;另一方面,由于该工艺的设备结构与操作模式在近年均有了较大改进,部分已有的研究结论已不适用改进后的工艺。鉴于此,本文将对赤峰云铜的铜富氧双侧吹熔池熔炼过程进行数值模拟,从气体贯穿深度、熔体喷溅、气液界面面积等多个角度,尽量全面地研究不同送风流量条件下熔池中的气液两相流特征,从而为双侧吹铜熔池熔炼炉生产过程的参数优化提

供重要参考。

1 数值模拟方法与过程

1.1 总体研究方案

赤峰云铜的富氧双侧吹铜熔池熔炼炉的结构如图 1 所示。炉体高 6.775 m(不包括烟气管道区域),全长 14.16 m,熔渣相区域宽约 2.5 m。在熔渣相区域的炉体两侧分布有 22 对风口(富氧气体入口)。

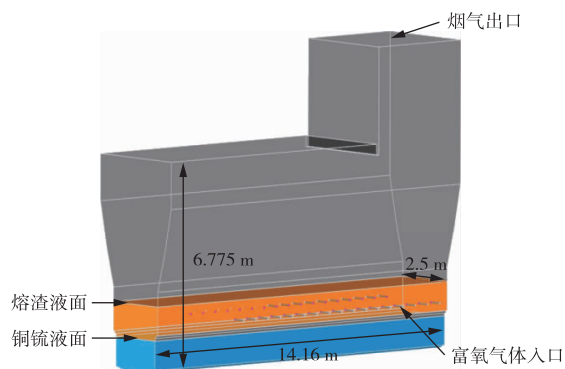


图 1 富氧双侧吹炉炉体结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the oxygen-enriched double-side-blown furnace

本文的主要研究目的是:获取典型流量条件下炉内气液两相流特征,并探究送风流量对气液两相流关键特征的影响规律,进而为该过程的增产增效提供参考或指导。相应地,本文的总体研究方案如下:

1)在一定简化条件下,构建富氧双侧吹铜熔池熔炼炉的数值模型,包括物理模型、控制方程与关键边界条件等;

2)研究气液两相流行为特征的描述方法,并构建出相应的指标或变量;

3)对不同送风流量(1 300、1 500、1 700 m³/h,标准状态下,下同)下的熔炼过程进行数值模拟,据此分析熔池内的气液两相流行为特征及其对熔炼效果的影响,分别称为 Case 1 300、Case 1 500、Case 1 700。

1.2 双侧吹熔池熔炼炉数值模型

由于熔炼炉风口排布均匀、各风口送风流量相同且在长度方向熔体的整体流速较小,因此,熔池内部气液两相流特征在长度方向理论上将具有一定的周期性。考虑到这一特点,同时考虑到算力负担与模拟精度的平衡,本文选取包含有 3 对(6 个)风口的局部区域作为几何模型(后文简称“三对风口几何模型”),如图 2 所示。三对风口几何模型的算力负担远远小于全炉几何模型,同时,能够较大程度上缓解边界设置对模拟结果的影响。

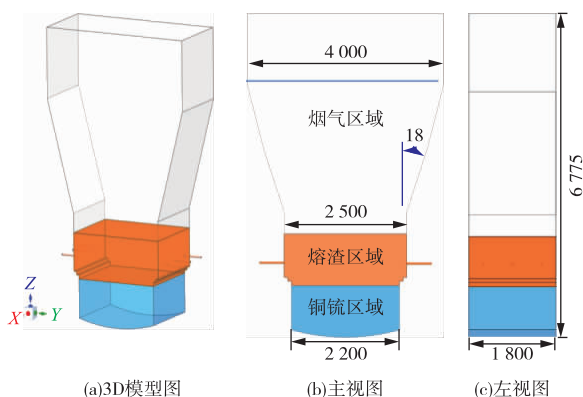


图2 几何模型示意图(单位:mm)

Fig. 2 Diagram of the geometric model(Unit:mm)

由于本研究关注的是熔池内的气液两相流动行为,而非上部烟气流动过程,所以,图2所示的几何模型忽略了烟道。为进一步提高计算资源的利用效率,本文采用不均匀网格对计算区域进行离散化。在渣相区域(尤其是风口附近),气液两相作用强烈、流动特征变化较大,为精确刻画这些变化,对该区域进行了局部网格加密;而在炉体上部,流体运动特征变化小而平缓,因而,沿炉体高度方向直至模型顶部,本文采用逐渐稀疏的网格划分策略。网格划分示意图如图3所示,网格数量为1 618 758个。

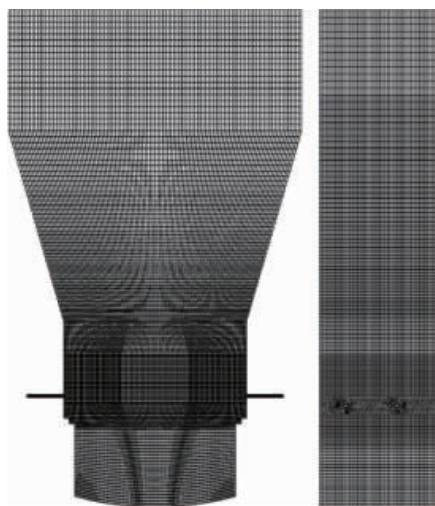


图3 三对风口炉体模型网格划分示意图

Fig. 3 Diagram of the mesh of the 3-pair tuyere furnace model

本文选用VOF多相流模型描述炉内气体-熔渣-铜钼三相流运动行为,其中,气相设为主相。VOF模型通过求解连续性方程、动量方程和能量方程等基本控制方程,并处理控制体积中的流体占比描述两种或三种互不相溶的流体的流动与传热过

程,适用于本文模拟问题。为了使方程封闭,还必须联立合适的湍流模型,本文选用Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型。该模型在不同的流动条件下具有更好的适用性^[21],在工业和科学计算领域应用广泛。

在熔炼过程中,气体温度发生了巨大的变化,从进入熔池时的20~30℃提高到了1 000℃以上。巨大的温变将导致气体密度的大幅度变化(3~5倍),这种变化显然会影响熔池中的流动特征。为了更准确地获取熔池内的流动特征,本文将气体设为理想气体,依据理想气体状态方程来反映压力和温度对气体密度的影响。

1.3 关键边界条件与物性参数设置

本文数值模型包含如下四类边界条件。

1) 壁面,炉体两个侧壁(图2(a)中y方向的两个折面)与底面设置为定温无滑移壁面(气相区熔渣区与铜钼区壁面温度分别设置为1 553、1 618与1 563 K)。

2) 压力出口,炉体顶部设置为-10 Pa(表压)的压力出口。

3) 质量流量入口,6个风口均设置为质量入口,温度设置为295 K。实际熔炼过程中,每个风口鼓入氧浓度为80%的富氧空气1 300 m³/h,据此折算出各风口质量流量为0.469 9 kg/s。同理,1 500、1 700 m³/h工况对应的质量流量分别为0.542 2、0.614 5 kg/s。

4) 周期性边界,沿流动方向的两个断面(图2(a)中x方向的两个端面)设置为周期性边界。周期性边界条件允许在计算域的两个端面上,通过交换数据来保持一致性,可以减小因计算域未完全包含全炉所导致的误差。

仿真计算过程中使用的气相、熔渣相和铜钼相的相关参数设置如表1所示。熔渣相和铜钼相的密度和比热容按照其化学成分组成计算得到,黏度采用文献^[22]中的数据。

表1 各相的主要参数

Table 1 Main parameter for each phase			
名称	气体	熔渣	铜钼
密度/(kg·m ⁻³)	—	4 002	4 887
比热容/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	1 006.43	1 130	559
黏度/(Pa·s)	1.79×10^{-5}	2.5×10^{-1}	2.0×10^{-3}
初始温度/K	1 553	1 618	1 563

注:气相密度按理想气体状态方程计算。

1.4 熔炼炉内气液两相流特征描述方法

主要采用如下几个指标描述熔炼炉内气液两相

流特征。

1)熔渣区域液相平均速度,指熔渣区域(如图 2 所示)中液相速度绝对值的平均值。该指标反映了气体对熔池搅动的剧烈程度,适度的搅动有利于气液反应及渣渣分离的进行,过大可能会加剧壁面耐火材料的损耗。

2)气体贯穿深度,即从风口喷入的高速气体能够进入熔体的深度。文献中对贯穿深度的定义不完全一致,本文以沿风口中心线向炉内方向上从风口到第一个气液界面之间距离作为气体贯穿深度,如图4 所示。较大的贯穿深度有利于气液反应进行,且能降低风口附近壁面耐火材料的损耗。

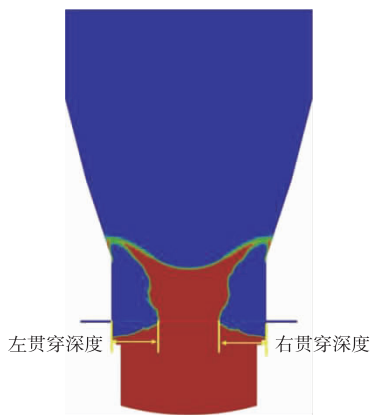


图 4 气体贯穿深度定义示意图

Fig. 4 Diagram of the defined gas penetration depth

3)90%喷溅高度。诸多文献采用最大喷溅高度,即熔体能够到达的最大高度,作为表征熔池喷溅程度的指标。但对本文对象而言,该指标已无法区分不同流量工况的差异。为此,本文定义一个新的特征参数,即 90%喷溅高度,来表征熔体的喷溅程度。90%喷溅高度指相当于熔渣区域体积 10%的熔体所能达到或超越的最高位置。

4)气液界面面积,指炉内气体和液体之间的接

触面积。气液界面面积越大,对气液反应的进行越有利。

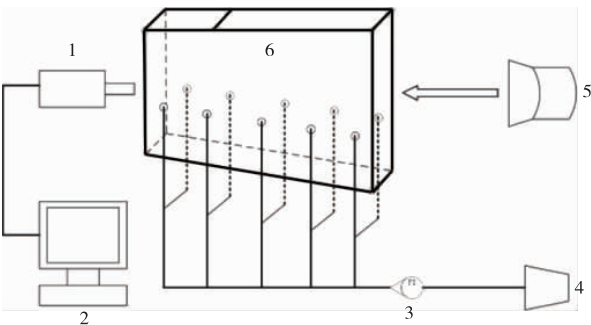
2 仿真模型验证

受现有检测技术的限制,目前尚难以利用实际检测数据对模拟结果进行直接验证。对于此问题,当前学术界的一般处理方法是:利用水模型试验验证方法的准确性,并通过网格独立性验证保证网格划分方法的合理性。

2.1 模拟方法验证

利用文献[23]报道的水模型试验结果验证本文模拟方法(数学模型)的准确性。文献[23]的侧吹熔池水模型试验台如图 5 所示。根据水模型实际尺寸构建了几何模型(单对风口),按 1.2 节方法划分网格(网格单元数量 39 万,如图 6 所示)、选择多相流模型、湍流模型等数学模型,送风流量、浸没深度等操作参数以及流体物性参数均按照文献[23]设置。

利用本文方法获得的仿真结果与文献水模型试验结果基本一致,从下方喷嘴注入的气体均贴着壁面上浮,气泡生长规律与基本形状相似,如图 7 所示。



1-高速摄像机;2-电脑;3-转子流量计;4-空气泵;
5-LED 光源;6-侧吹炉水模型。

图 5 文献[23]水模型试验台示意图

Fig. 5 Diagram of the water model system from literature [23]

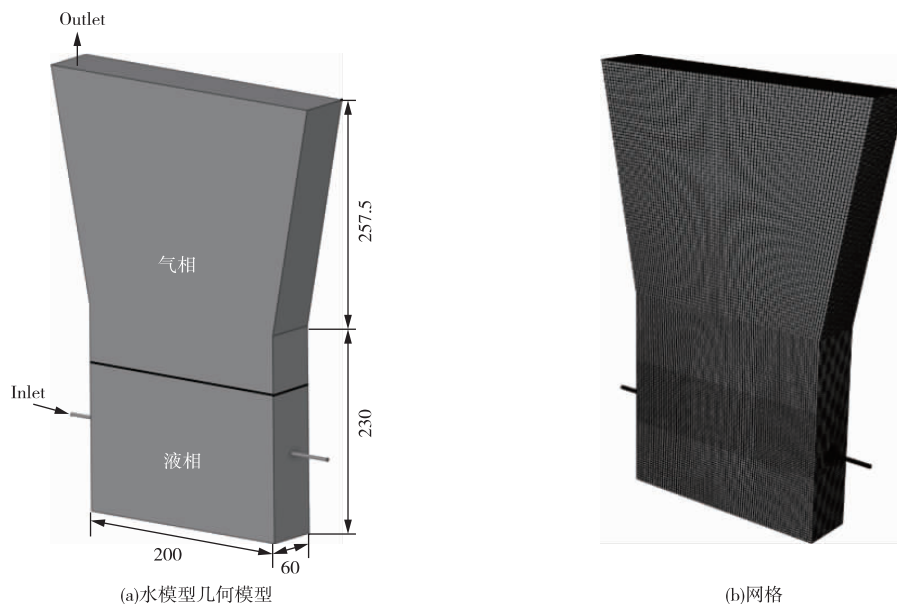


图6 侧吹熔池单对风口几何模型(a)及网格(b)(单位:mm)

Fig. 6 Geometric model (a) and mesh (b) of the 1-pair tuyere side-blown bath model(Unit:mm)

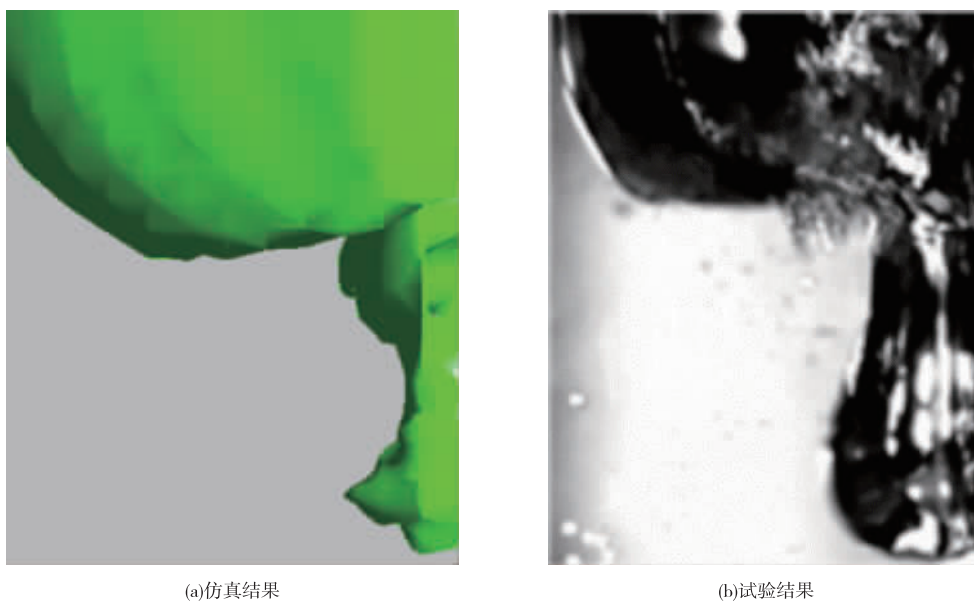


图7 风口附近气泡的仿真结果(a)和试验结果^[23](b)

Fig. 7 Simulation result (a) and experimental result^[23] (b) of the bubbles near the tuyere

2.2 网格独立性检验

选取4种网格尺寸(40、25、20和15 mm,分别占据半炉宽的3.2%、2.0%、1.6%、1.2%)生成相应的4个网格,分别命名为C40、C25、C20和C15,相关信息见表2。

基于4种不同的网格,运用1.2、1.3节方法,对风口送风流量为1 300 m³/h的工况分别进行了数值模拟,熔渣区域液相平均速度随时间变化的曲线

见图8,其时均值(0~5 s时间段内)如表3所示。

表2 不同网格尺寸下的几何模型参数

Table 2 Geometric model parameters for different meshes

网格名称	网格尺寸/mm	占比/%	网格数量/万
C40	40	3.2	22
C25	25	2.0	103
C20	20	1.6	161
C15	15	1.2	466

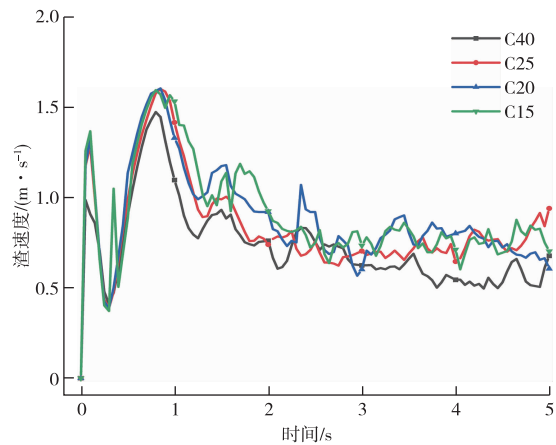


图 8 四种网格下熔渣区域液相平均速度

Fig. 8 Values of averaged velocity of liquid phase in slag region under 4 different meshes

表 3 四种网格下熔渣区域液相平均速度时均值

Table 3 Time-averaged averaged velocity of liquid phase in slag region under 4 different meshes

网格名称	时均值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对误差/%
C40	0.735	-19.1
C25	0.839	-7.7
C20	0.899	-1.1
C15	0.909	0

对数值模拟而言,计算网格越精细(单元尺度越小、网格规模越大),模拟计算结果越可靠,但消耗的计算资源也越多。根据图 8 与表 3 可知,C20 与 C15 的计算结果仅相差 1.1%,但前者网格规模仅为后者的 1/3。因此,综合考虑准确性和计算效率,本文选取 C20 作为计算网格。

3 仿真结果分析

3.1 熔渣区域液相平均速度

三种工况下熔渣区域液相平均速度随时间变化曲线如图 9 所示。 $t=0\text{ s}$ 时刻,渣相静止,速度为 0,随着气体喷出进入炉内,渣相受气体形成的气泡挤压,速度急剧增大,气泡破裂后,飞溅的渣液下落,与气体发生剧烈的碰撞,受气体搅动,下落的渣液约在 $t=1.0\text{ s}$ 时刻达到最大速度,但随着时间的推移,渣液波动逐渐稳定,速度会逐渐趋于稳定,最终在 0.82 m/s 上下波动。

三种工况下 0~5 s 内(500 个数据点)熔渣区域液相平均速度的时均值如表 4 所示。表 4 进一步说明,随着流量的增加,内熔渣区域液相平均速度呈现出逐渐增加的趋势。这表明更高的流量条件下,渣

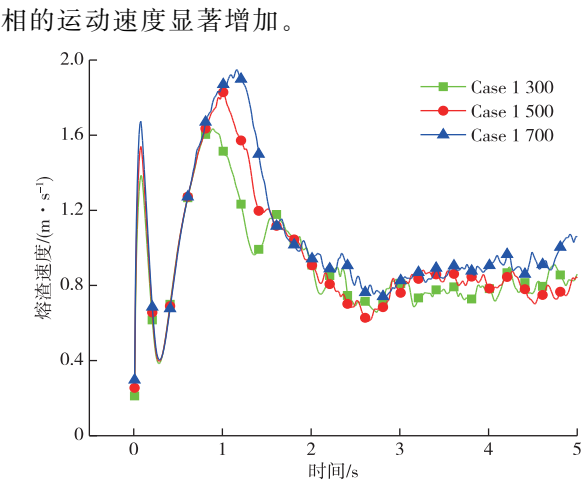


图 9 熔渣区域液相平均速度

Fig. 9 Averaged velocity of liquid phase in slag region

表 4 不同流量下熔渣区域液相平均速度的时均值

Table 4 Time-averaged averaged velocity of liquid phase in slag region at different flow rates

工况	时均值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	相对增长率/%
Case 1 300	0.92	0
Case 1 500	0.96	4.35
Case 1 700	1.05	14.13

3.2 气体贯穿深度

三种工况下 0~5 s 内贯穿深度如图 10 所示,对应的时均值数据见表 5。由图 10 与表 5 可知,随着流量增大,贯穿深度逐渐增大;在 $1\,700\text{ m}^3/\text{h}$ 流量条件下,气体贯穿深度仍小于熔池宽度的 1/2。如前文所述,贯穿深度增大能够促进气液反应并保护风口附近壁面的耐火材料,因此,从贯穿深度这一指标看,送风流量仍有进一步提升的空间。

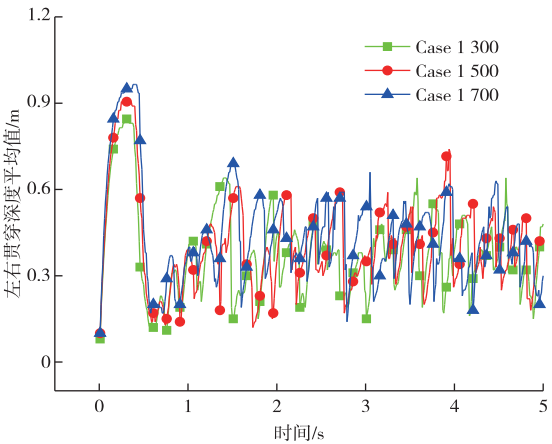


图 10 气体贯穿深度

Fig. 10 Gas penetration depth

表 5 不同流量下气体贯穿深度的时均值
Table 5 Time-averaged gas penetration depth at different flow rates

工况	时均值/m	相对增长率/%
Case 1 300	0.38	0
Case 1 500	0.41	7.89
Case 1 700	0.45	18.42

3.3 90%喷溅高度

三种工况下,熔体的 90%喷溅高度随时间变化如图 11 所示,对应的时均值数据见表 6。图 11 中基准高度为初始条件下的熔体液面位置,气体吹入熔池前,根据 1.4 节定义,90%喷溅高度在基准液面以下 0.105 m。因此,90%喷溅高度在 $t=0$ s 时刻位于基准液面之下;随气体鼓入,该值急剧增大,在 $t=0.4$ s 时刻(第一个大气泡即将破裂)前后达到最大值;随后,随着熔体回落,90%喷溅高度逐渐降低,在 $t=1.0$ s 时刻达到谷值;而后,是反复发生的气泡“生长-破裂”循环,随时间推进,气液两相波动逐渐稳定。由图 11 与表 6 均可看出,随着流量增大,90%喷溅高度将会增大,这预示着熔炼炉内的喷溅问题将有所恶化。

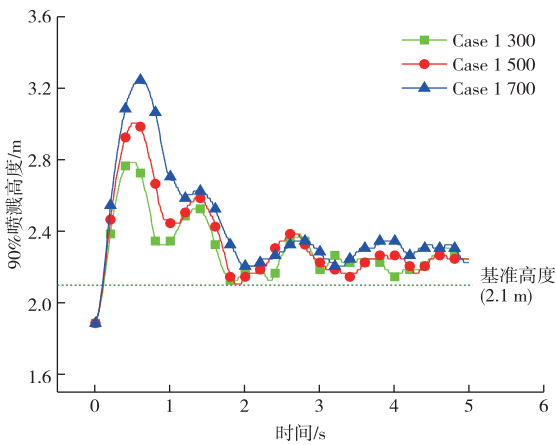


图 11 90%喷溅高度
Fig. 11 90% splash height

表 6 不同流量下 90%喷溅高度的时均值
Table 6 Time-averaged 90% splash height at different flow rates

工况	时均值/m	相对增长率/%
Case 1 300	2.30	0
Case 1 500	2.35	2.17
Case 1 700	2.44	6.09

3.4 气液界面面积

三种工况下气液界面面积随时间变化曲线如图 12 所示,对应的时均值数据见表 7。初始时刻($t=0$ s),气

液界面面积为 4.5 m^2 (熔体的上表面积);随着气体喷吹进入炉内,气液界面面积急剧增大,在 $t=0.4$ s 时刻达到第一个峰值;而后,随着第一个大气泡的破裂,部分气体脱离液相,气液界面面积有一个小幅度减小;而后,随着气泡的“生长-破裂”循环,气液界面面积发生周期性波动;在前几个循环(1.5 s 以前),由于滞留在熔池的小气泡持续增多,气液截面面积在波动的同时,整体上呈增大趋势;最后($t=2.5$ s 后),随着气液波动逐渐稳定,气液界面面积在 43.9 m^2 上下以较小的幅度波动。由图 12 及表 7 还可以发现,随着流量增大,炉内气液界面面积将增大,这有利于加速熔池的气液反应。

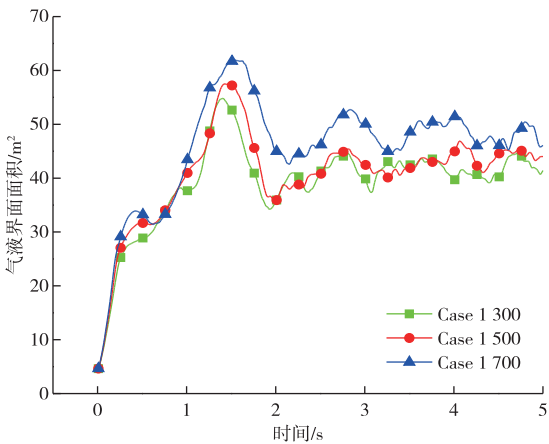


图 12 炉内气液界面面积
Fig. 12 Gas-liquid interface area in furnace

表 7 不同流量下气液界面面积时均值变化表
Table 7 Time-averaged gas-liquid interface area at different flow rates

工况	气液界面面积时均值/ m^2	相对增长率/%
Case 1 300	39.2	0
Case 1 500	40.9	4.3
Case 1 700	45.7	16.6

3.5 熔炼炉内气液两相的分布状态

综合图 10、11、12 可知,熔炼炉内气液两相流动大约在 $t=2.5$ s 之后进入准稳态(各指标参数小幅度波动,不再大幅度变化)。因此,本文重点对 $t=5.0$ s 时刻熔炼炉内的气液两相的分布状态进行分析。 $t=5.0$ s 时刻,熔炼炉内不同高度水平截面上液相(熔体相)体积分数平均值如图 13 所示。

从图 13 可以看出,三种工况下,炉内气液两相分布特征基本一致:在铜铈初始液面以下的空间内几乎没有气体存在,相应地,铜铈相受气体的扰动较小,在实际生产中有利于渣相与铈相的进一步分离;自风口位置向上至渣相初始液面以下,液相体积分

数在80%上下波动,该区域对应于实际生产中的剧烈反应区;渣相初始液面以上,液相体积分数先急剧下降后缓慢下降,在3/5炉体高度处基本降至0,说明飞溅到炉顶的熔体相对较少。

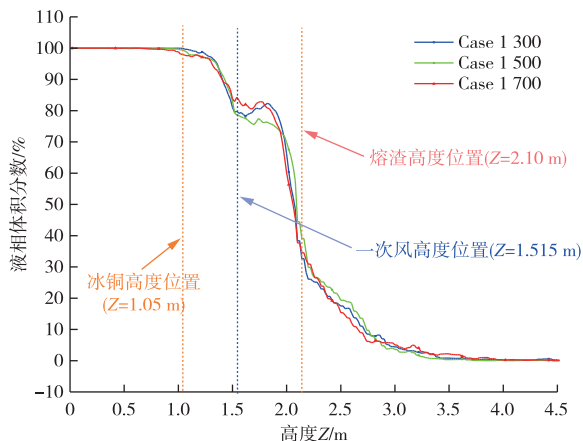


图 13 熔体相体积分数沿炉体高度的变化

Fig. 13 Liquid volume fraction along furnace height

此外,3种工况下的炉内气液两相分布特征存在差异:1)随着送风流量增大,进入铜铈区域的气体增多,相应地,铜铈相受到了更大的气体扰动,这对于渣铈相的分离不利;2)送风流量越大,熔体的喷溅现象越严重,这与3.3节的分析结果一致。

综合3.1~3.5节各类分析结果可以看出,增大送风流量一方面能够加快熔炼反应从而提高生产率,但另一方面也会加剧熔体喷溅以及铜铈相的扰动;定量地看,相对于1 300 m³/h流量工况(目前操作工况),相对略高的流量工况在理论上具有更高熔炼效率,同时,熔体喷溅及铜铈相扰动问题亦不严重。

4 结论

以赤峰云铜的铜富氧双侧吹熔池熔炼炉为原型,综合运用VOF、计算流体力学等方法,构建了炉内气液两相流动过程数值模型,据此对1 300、1 500与1 700 m³/h三种典型流量工况下的熔炼过程进行了数值模拟。为了定量客观地描述熔炼炉内的气液两相流行为特征,定义了气流贯穿深度、90%熔体喷溅高度等特征变量。通过对三种工况模拟结果的对比分析,一方面发现了熔炼炉内的气液两相流的主要行为特征(如气体贯穿深度、喷溅情况等),另一方面也发现研究对象的产能可以通过增加送风流量进一步提升。

参考文献

[1] 魏季和,朱宏利,池和冰,等.侧顶复吹条件下AOD转

炉熔池内流体的混合特性[J].过程工程学报,2009,9(增刊1):364-368.

- WEI J H, ZHU H L, CHI H B, et al. Mixing characteristics of fluid in AOD converter bath under side and top combined blowing conditions[J]. Chinese Journal of Process Engineering, 2009, 9(S1): 364-368.
- [2] 宾万达. 瓦纽科夫过程及其在我国的应用前景[C]//中国首届熔池熔炼技术及装备专题研讨会论文集. 昆明, 2007: 6-16.
- BIN W D. Vanyukov process and its application prospects in China[C]//Proceedings of the First China Symposium on Bath Smelting Technology and Equipment, Kunming. Kunming, 2007: 6-16.
- [3] 葛晓鸣,王举良. 铜富氧侧吹熔池熔炼的生产实践[J]. 有色金属(冶炼部分), 2011(8): 13-16.
- GE X M, WANG J L. Production practice of copper oxygen-enriched side-blown bath smelting[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2011(8): 13-16.
- [4] 王书晓,陈学刚,温治. 侧吹炉内气流穿透和搅动行为实验研究[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(6): 97-102.
- WANG S X, CHEN X G, WEN Z. Experimental study on gas flow penetration and stirring behavior in side-blown furnace[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(6): 97-102.
- [5] 李鹏,姚心,郭天宇,等. 侧吹熔池熔炼气液混合特征的数值模拟研究[J]. 有色设备, 2019(2): 16-24.
- LI P, YAO X, GUO T Y, et al. Numerical simulation study on gas-liquid mixing characteristics in side-blown bath smelting[J]. Nonferrous Equipment, 2019(2): 16-24.
- [6] LIU Y T, YANG T Z, CHEN Z, et al. Experimental and numerical simulation of two-phase flow in an oxygen-enriched side-blown oxidizing furnace [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(1): 249-258.
- [7] 刘泛函. 瓦纽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.
- LIU F H. Numerical simulation and evaluation method of mixing enhancement in side-blown bath of Vanyukov furnace[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [8] ZOU Q, HU J H, YANG S L, et al. Investigation of the splashing characteristics of lead slag in side-blown bath melting process[J]. Energies, 2023, 16(2): 1007. DOI:10.3390/en16021007.
- [9] WU X D, WANG S B, HU J H, et al. Analysis on phase distribution and flow field morphology in double

- side blown gas-liquid mixture flows with high temperature and high density melt[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2023, 11: 1175875. DOI: 10. 3389/fenrg. 2023. 1175875.
- [10] XIAO Y D, LU T T, ZHOU Q Q, et al. Computational fluid dynamics study on enhanced circulation flow in a side-blown copper smelting furnace[J]. *JOM*, 2021, 73(9): 2724-2732.
- [11] 余跃, 李东波, 陈学刚, 等. 底吹炉喷枪强化冷却仿真优化[J]. *有色冶金节能*, 2020, 36(6): 43-48.
YU Y, LI D B, CHEN X G, et al. Simulation optimization of lance cooling in bottom-blown furnace[J]. *Nonferrous Metallurgy Energy Saving*, 2020, 36(6): 43-48.
- [12] 董择上, 李东波, 姚心, 等. 富氧底吹铜熔炼炉内气-液多相流研究[J]. *有色设备*, 2019(2): 36-41.
DONG Z S, LI D B, YAO X, et al. Research on gas-liquid multiphase flow in oxygen-enriched bottom-blown copper smelting furnace[J]. *Nonferrous Equipment*, 2019(2): 36-41.
- [13] 郭学益, 姜保成, 王亲猛, 等. 氧气底吹炼铜模拟仿真研究进展[J]. *有色金属科学与工程*, 2022, 13(3): 9-19.
GUO X Y, JIANG B C, WANG Q M, et al. Progress in simulation and emulation research of oxygen bottom-blown copper smelting[J]. *Nonferrous Metal Science and Engineering*, 2022, 13(3): 9-19.
- [14] 郭学益, 王双, 王亲猛, 等. 氧气底吹熔池熔炼过程气泡生长行为仿真研究[J]. *中国有色金属学报*, 2018, 28(6): 1204-1215.
GUO X Y, WANG S, WANG Q M, et al. Simulation study on bubble growth behavior during oxygen bottom-blown melting process[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2018, 28(6): 1204-1215.
- [15] 薄凤华, 梁文玉. 兑铁水过程转炉除尘仿真模拟[J]. *冶金设备*, 2020(4): 15-21.
BO F H, LIANG W Y. Simulation of converter dust removal during the process of iron-making [J]. *Metallurgical Equipment*, 2020(4): 15-21.
- [16] 吴红林, 漆鑫, 代龙果. 转炉侧吹熔炼水模型及计算机仿真实验研究[J]. *世界有色金属*, 2017(22): 17-19.
WU H L, QI X, DAI L G. Experimental study on the water model and computer simulation of converter side-blown smelting[J]. *World Nonferrous Metals*, 2017(22): 17-19.
- [17] 李林山, 赵宇娟, 金泽志. 转炉铜钨吹炼终点判断仿真研究[J]. *中国有色冶金*, 2021, 50(6): 22-28.
LI L S, ZHAO Y J, JIN Z Z. Simulation study on the endpoint judgment of converter copper matte blowing process [J]. *China Nonferrous Metals Metallurgy*, 2021, 50(6): 22-28.
- [18] 张岭, 宋守恒. 烟化炉风口水套的数值仿真分析[J]. *工业加热*, 2012, 41(1): 32-34.
ZHANG L, SONG S H. Numerical simulation analysis of the water jacket at the tuyere of the fuming furnace[J]. *Industrial Heating*, 2012, 41(1): 32-34.
- [19] 张岭, 汪大明. 烟化炉风口水套的优化设计与数值模拟[J]. *有色冶金节能*, 2013, 29(5): 31-34.
ZHANG L, WANG D M. Optimization design and numerical simulation of the water jacket at the tuyere of the fuming furnace [J]. *Nonferrous Metallurgy Energy Saving*, 2013, 29(5): 31-34.
- [20] 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 study on gas-liquid two-phase flow in fuming furnace [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [21] ANSYS Inc. ANSYS FLUENT theory guide [M]. Canonsburg: ANSYS Inc, 2017: 15-58.
- [22] VAISBURD S, BRANDON D G, KOZHAKHMETOV S, et al. Physicochemical properties of matte-slag melts taken from Vanyukov's furnace for copper extraction[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2002, 33: 561-564.
- [23] YANG B W, LIU W, JIAO F, et al. Numerical simulation and application of an oxygen-enriched side-blown smelting furnace for the treatment of electroplating sludge[J]. *Sustainability*, 2023, 15(13): 10721. DOI: 10. 3390/su151310721.