

富氧铜侧吹熔池熔炼炉内流场与混匀效率模拟研究

肖亚冬^{1,2}, 刘燕^{1,2*}, 赵洪亮³, 张延安^{1,2*}, 李小龙^{1,2}, 王坤^{1,2}

(1. 东北大学 多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

2. 东北大学 材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819;

3. 北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083)

[摘要] 鉴于冶金炉窑的高温与不可见性, 大多测量手段受到限制, 所以本文采用数值模拟对高温下富氧铜侧吹熔炼炉内的流场与混匀效率进行分析。受浮力影响, 侧吹气流具有区域性的特点, 主要对气流上升轨迹周围熔体直接搅拌, 熔池中心存在低速区域, 速度小于 0.1 m/s。受侧吹气流反冲作用, 壁面高应力区域集中在喷嘴附近以及气泡上浮路径周围, 该区域壁面应力是相邻喷枪间壁面应力的 2~3 倍, 炉衬更易受损。通过熔池内环流分布状态, 沿喷枪轴线方向将熔池划分为高速喷吹区与环流搅拌区。其中环流搅拌区为主反应区, 速度小于 1 m/s, 但速度分布更加均匀, 组分的均混时间为 34.10 s。平行环流喷吹技术对熔池的混合效率改善最明显, 湍流黏度为原工况的 1.51 倍, 均混时间相对降低 62.18%。

[关键词] 侧吹炉; 气体射流; 混合时间; 湍流运动; 熔炼炉; 铜精矿; 氧化熔炼; 火法冶金

[中图分类号] TF811

[文献标志码] A

[文章编号] 1003-8884(2024)01-0015-09

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.01.003

0 引言

铜富氧侧吹熔池熔炼技术将铜精矿原料从炉顶直接投入鼓风翻腾的熔池中, 在浸没式侧吹富氧空气的搅拌作用下进行铜精矿的氧化熔炼^[1]。该技术原料适应性强, 能够处理成分复杂的含铜物料和低品位铜精矿。随着富矿资源的减少, 生产使用的铜矿石品位逐渐下降, 难处理的多金属复杂铜矿占比不断增加, 熔池熔炼的优势将逐渐显现出来。目

前, 国内多家有色冶金设计院与高校均在参与富氧侧吹炉的设计与建立工作^[2-5]。鉴于铜富氧侧吹熔炼炉内反应过程的高温与不可见性, 目前研究者们一般采用模拟的手段对侧吹炉内流场进行分析计算, 来改善炉体结构, 提高熔炼效率。但目前对侧吹炉内混匀效率的研究一般采用物理模拟的手段, 且以水为介质, 高温高黏度熔体内组分混匀效率的研究仍然较少。

根据气液反应双模理论确定, 改善侧吹炉内气液流场分布, 提高搅拌强度, 可以减薄反应边界层厚度, 提高传质效率。张莹^[6]和姜文涛^[7]在对钢包底吹氩气过程的反应动力学进行研究时, 均将熔池搅拌功率作为计算传质系数的重要参数。目前一般采用数值模拟与物理模拟的手段对侧吹炉内的流场进行分析。Zhu^[8-10]以物理模拟为主要手段对圆形侧吹炉内的气液混合行为、局部气泡特性以及浸没侧吹气体的流动与穿透行为进行了详细的分析, 并采用因次分析法建立了混合时间、局部气液比界面面积和气流穿透深度与侧吹炉各工艺参数间的经验公式。研究过程中借助了电导率仪、气泡参数测量仪和高速相机等工具。方毓^[11]通过 PIV 三维流场测速仪研究了侧吹炉内熔炼区域操作条件的改变对于沉降区内的流场的影响。Li 等^[12]在对侧吹炉内乳

[收稿日期] 2023-12-19

[第一作者] 肖亚冬(1996—), 男, 河南三门峡人, 博士研究生, 主要从事有色冶金侧吹熔炼炉模拟研究。

[通信作者] 刘燕(1970—), 女, 湖南湘乡人, 博士, 教授, 主要研究方向为反应器的物理数值模拟、冶金反应工程和化学工程与技术。

张延安(1960—), 男, 河南周口人, 教授, 博士生导师, 主要从事冶金固废资源化利用、特殊冶金、冶金反应工程学等方面的研究。

[基金项目] 中国博士后科学基金第 16 批特别资助(站中)(2023T160088); 国家自然科学基金青年基金(52304324)。

[引用格式] 肖亚冬, 刘燕, 赵洪亮, 等. 富氧铜侧吹熔池熔炼炉内流场与混匀效率模拟研究[J]. 有色设备, 2024, 38(1): 15-23.

化现象的研究过程中,采用图像处理软件 Image Pro-Plus 对高速相机拍到的试验结果进行处理,对不同工况下乳化液滴的粒径分布进行了统计。Zhao 等^[13]在对铜转炉吹炼过程进行水模型实验时,同样利用该软件对熔池内微小气泡的粒径分布情况进行了统计。在这些以物理模拟为主要研究手段的研究中,大多以水为熔体的模拟材料,并借助一些测量仪器与统计软件侧吹炉内气液混合规律进行分析。但当以硅油等黏度较高流体对渣层进行模拟时,这些测量仪器将无法使用,仅能对高速相机拍到的结果进行统计分析。因为 PIV 测速、混匀时间测量等过程均需向溶液中添加示踪粒子,再通过示踪粒子对气液混合规律进行分析。而数值模拟则可以直接对高温高黏度的熔渣运动特性与混合效率进行分析。

Zhang 等^[4]采用数值模拟的手段对瓦斯科夫炉中的速度场进行了分析,并对熔池的多相流动以及涡流形成做了详细分析。邵品^[14]通过数值模拟的方法对底吹炉的喷枪排布方式进行了优化,得出结论:随着底吹炉内喷嘴数量的增加,熔池内的气泡分散性将显著提高。邵品还通过组分输运方程,对示踪剂在底吹炉高温熔体中的混匀效率进行了分析。除此之外,Joel^[15]将射流锥角作为鼓泡流向射流过渡的判据,并利用 Themelis 等提出的射流轨迹方程对不同射流锥角下的气流轨迹进行了描述。李鹏等^[16]将铅冶炼熔炼炉中的侧吹喷枪置于两种不同高度处发现,深侧吹下熔池底部钼层的速度峰值将会更小,对钼层的扰动更小,有利于渣金分离。这些研究均采用了数值模拟的手段,对侧吹炉内的高温流场进行了分析,但主要针对侧吹炉内高温流场的湍流运动情况进行分析,混匀效率的分析较少。

在本文中,针对目前富氧侧吹炉内多相流场的研究现状,采用计算流体力学(CFD)的方法对富氧侧吹熔炼过程进行了数值模拟,对侧吹过程的流场分布与渣相组分混匀效率进行了研究,并以统计平均后的速度场对高温熔体中的组分扩散速度进行了分析,为侧吹炉的操作参数与结构参数的优化提供了理论基础。

1 研究方法

1.1 几何模型与网格划分

参照某厂铜侧吹炉设计图建立炉体三维模型,如图 1(a)所示。整个炉体共 32 对喷枪。在模型建

立的坐标系下, x 方向上几何位置为 -2.00 m 至 2.00 m ; y 方向几何位置为 0 m 至 25.07 m ; z 方向上几何位置为 -0.15 m 至 6.40 m 。针对流场分析特点,对富氧铜侧吹熔炼炉进行合理简化:①选取炉内主要熔体和气体流动区域作为计算域,不考虑外部机械结构和壁面厚度,仅针对炉内流体计算域进行几何建模;②在庞大的炉体结构中,侧吹气体作为外加动力源,气体搅拌强度是决定熔池反应效率的重要因素,且考虑到同时计算气液氧化反应过程的复杂性,本文在对侧吹炉内流场进行研究时忽略化学反应对熔池内气液分布状况的影响;③在工厂生产过程中,铜硫与炉渣通过虹吸口与溢流口放出,速度较慢。在亚音速条件下,侧吹气体将与熔体快速混合,侧吹气泡的平均上浮周期约为 1.25 s ^[17]。在数值模拟的 10.00 s 计算周期内,铜硫与炉渣的生成与放出影响较小,故不考虑。

使用 ANSYS ICEM 对侧吹炉模型进行网格划分。为提高圆形喷枪与炉体连接处网格质量,将圆形喷枪根据喷枪截面面积等效为方形。由于侧吹炉喷枪位于炉体壁面上,临近壁面位置法向速度梯度非常大,所以根据标准壁面函数方法要求将第一层网格高度定位为 12.00 mm ,并对临近壁面区域网格进行加密。网格模型均采用六面体网格,网格数量达到 509 万。由于完整炉型体积庞大,且网格众多,需耗费大量计算资源,所以对其进行稳态计算。另外,由于富氧侧吹炉喷吹区域内各部分设计均匀,且流场分布有着区域性的特点,所以选择其中 4 对喷枪宽度部分进行瞬态计算,并将两侧截面定义为周期性边界,以便考虑其他喷嘴的影响。网格模型如图 1(b)所示。综合考虑计算速度与收敛条件,以及网格内体积分对气液界面描述的准确性,确定网格数量约为 45 万^[18]。

1.2 数学模型建立

本文主要研究对象为以气钼渣三相为基础的多相流动,流场中三相界面分明,故采用 VOF 多相流模型对该浸入式侧吹过程进行数值模拟。计算过程中将渣相设置为主相,气相与钼相设置为次相。

VOF 模型通过求解多相体积分连续性方程跟踪相界面,计算方程为式(1)与(2):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_m \rho_m) + \nabla \cdot (\alpha_m \rho_m \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

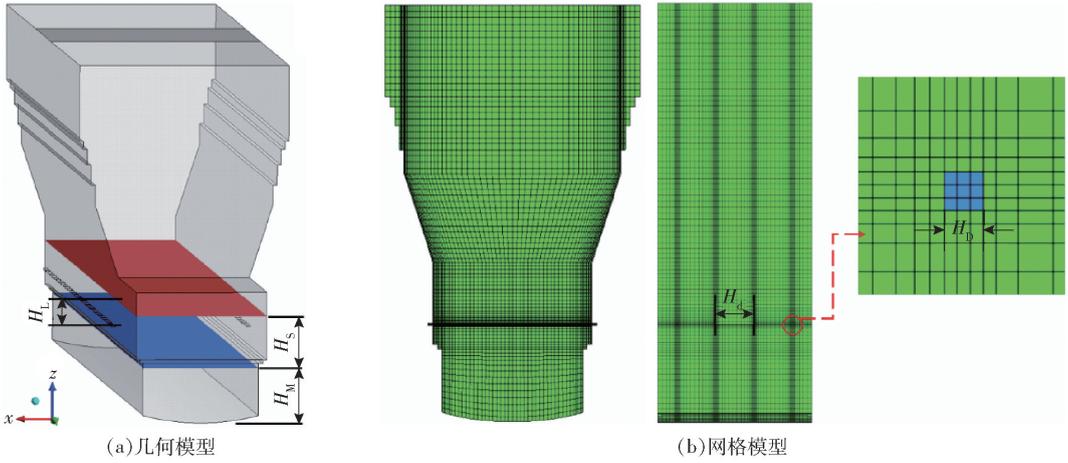


图1 铜侧吹炉的几何与网格模型

式中: g, m, s 为气、钨、渣三相; α_q (q 代表 g, m, s 三相) 为第 q 相的体积分数; ρ_q 为第 q 相的密度, kg/m^3 ; \vec{v} 为流体速度, m/s 。

其中气钨渣三相体积分数满足式(3), 如下:

$$\alpha_m + \alpha_s + \alpha_g = 1 \quad (3)$$

在 VOF 模型中, 速度场是各相共同作用的结果, 由各相共享。动量方程具体形式如下:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + f_{st} \quad (4)$$

密度 ρ 与黏度 μ 均是基于体积分数的平均值计算所得到, 计算公式如下:

$$\rho = \alpha_g \rho_g + \alpha_s \rho_s + \alpha_m \rho_m \quad (5)$$

$$\mu = \alpha_g \mu_g + \alpha_s \mu_s + \alpha_m \mu_m \quad (6)$$

f_{st} 是界面张力, 选用连续介质界面张力模型, 计算公式如下:

$$f_{st} = \sigma_{sg} \frac{\alpha_s \rho_s c_g \nabla \alpha_g + \alpha_g \rho_g c_s \nabla \alpha_s}{\frac{1}{2}(\rho_s + \rho_g)} + \sigma_{mg} \frac{\alpha_m \rho_m c_g \nabla \alpha_g + \alpha_g \rho_g c_m \nabla \alpha_m}{\frac{1}{2}(\rho_m + \rho_g)} + \sigma_{sm} \frac{\alpha_s \rho_s c_m \nabla \alpha_m + \alpha_m \rho_m c_s \nabla \alpha_s}{\frac{1}{2}(\rho_s + \rho_m)} \quad (7)$$

$$c_q = \nabla \hat{n} \quad (8)$$

$$\hat{n} = \frac{n}{|n|} \quad (9)$$

$$n = \nabla \alpha_q \quad (10)$$

式中: σ_{qq} 为熔池内任意两相间的界面张力, N/m ; \hat{n}

为单位法向量。

Realizable $k-\varepsilon$ 模型如下所示, 相比于 $k-\varepsilon$ 系列中其他 2 种湍流模型, Realizable $k-\varepsilon$ 模型涡黏性系数表达式中的 C_μ 不再是通过实验得到的经验常数, 而是平均应变、旋转速率、系统旋转角速度和湍流场的函数。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla \cdot (\rho \nu k - \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) \nabla k) = G_k + \rho \varepsilon \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \nu \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right) \nabla \varepsilon) = \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (12)$$

式中: μ_t 为湍流黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。计算公式如下:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (13)$$

式中, C_μ 为平均应变、旋转速率、系统旋转角速度和湍流场的函数。

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (14)$$

式中: S 为平均应变率张量的模; G_k 为由平均速度梯度产生的湍流动能, m^2/s^2 ; C_2 为经验常数, 取值 1.90; σ_k 为湍动能对应的普朗特数, 取值为 1.00; σ_ε 为湍动耗散率对应的普朗特数, 取值为 1.20。

1.3 边界条件与物性参数

计算所用边界条件均根据某铜冶炼厂实际生产条件确定。其中壁面条件设置为无滑移边界, 喷枪入口处均设置为速度入口, 单个喷枪入口速度为 $240 \text{ m}/\text{s}$, 湍流强度 3.07%, 烟气出口处设置为压力出口。方程求解过程中选择压力速度耦合算法, 采用一阶迎风差

分格式,方程残差收敛标准为 10^{-3} ,计算过程中时间步长设置为 10^{-4} 。

熔池内渣和钎物性参数的测定由工厂实地取样后,采用 HRV-1600P 型高温黏度测试仪和 SQV-II-14 型材料高温综合物性测试仪进行测定。并使用标准方法《化工产品密度、相对密度的测定》(GB/T 4472—2011)、《软化点以上的玻璃黏度的测定标

准》(ASTM C965—1996(2012))、《表面张力的测定》(GB 22237—2008)和《界面张力的测定》(GB/T 19466.4—2016)检测渣和钎的密度、黏度、表面张力和界面张力。为考虑低温气体射流进入高温熔体的后的受热膨胀作用,选择 Fluent 中的不可压缩理想气体确定气相材料的密度。各相的主要物性参数设置如表 1 所示。

表 1 富氧侧吹炉模型计算参数

参数	值	参数	值
风口直径, H_D/m	0.038	钎相密度, $\rho_m/(kg \cdot m^{-3})$	4520
渣层厚度, H_S/m	1.00	气相黏度, $\mu_g/(Pa \cdot s)$	1.80×10^{-5}
钎层厚度, H_M/m	1.05	渣相黏度, $\mu_s/(Pa \cdot s)$	0.21
喷枪浸没高度, H_L/m	0.50	钎相黏度, $\mu_m/(Pa \cdot s)$	0.0023
喷枪间距, H_d/m	0.60	渣相表面张力, $\sigma_{sg}/(N/m)$	0.32
气相密度, $\rho_g/(kg \cdot m^{-3})$	1.15	钎相表面张力, $\sigma_{mg}/(N/m)$	0.42
渣相密度, $\rho_s/(kg \cdot m^{-3})$	3360	渣-钎间界面张力, $\sigma_{sm}/(N/m)$	0.02

2 结果与讨论

2.1 模型验证

在几何相似比为 10:1,且满足修正弗劳德准则的水模型下对上述数学模型进行验证^[19]。对比所用数值模拟结果以水模型材料参数与操作参数为基础计算得到。结果发现,物理与数值模拟中气流形态同样呈现出生长、脱离及上浮并破碎的三个阶段,如图 2 所示。上浮气泡会在完全脱离风口的短时间内受液相卷吸作用而发生破碎,破碎为无数的小气泡,这些小气泡在浮力作用下上浮,最终在液面处汇集并突破液面。汇集的小气泡会聚集产生新的大气泡,漂浮在熔池液面处。另外,这些破碎产生的小气泡也会在熔池内环流搅拌的作用下进入熔池中间区域。侧吹炉内的气泡变化过程都可以通过本文所采用的 VOF 多相流模型和 Realizable $k-\varepsilon$ 湍流模型展现,所以说本文采用的数学模型得到了验证。

喷枪口处气流形态由鼓泡式向射流转变的过程如图 3 所示。在流量 $1.00 \sim 4.00 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 之间,修正弗劳德数 Fr' 分别为 19.41、77.66、174.73 和 310.64。如图 3(a)(b)所示,当气体流量较小,处于 $1.00 \sim 2.00 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 时,侧吹气体在喷枪口处形成气泡,通过大气泡的上浮过程对熔池进行搅拌,熔池中间区域的气液搅拌形式仍以环流为主,与文献[19]结果相对应。该现象同样与图 2 中侧吹鼓泡式气

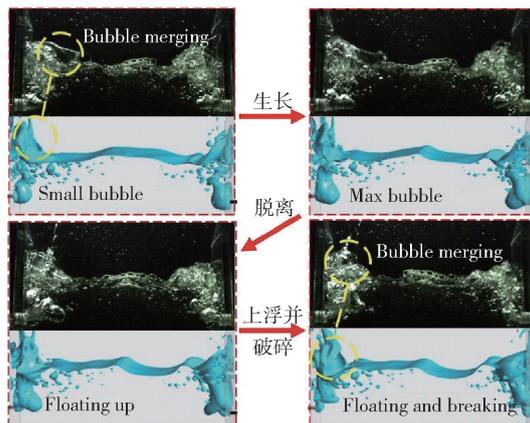


图 2 数值模拟结果与物理试验结果对比验证

泡变化过程相对应。如图 3(c)所示,当气体流量增加至 $3.00 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 时,气流与周围液相间的相互作用增加,气泡在喷枪口处便开始出现破碎现象。此时,侧吹气体对熔池内搅拌强度明显加剧,而且破碎后小气泡在上浮过程中可以直接对熔池中间区域进行搅拌。如图 3(d)所示,当气体流量增加至 $4.00 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 时,侧吹气流已经可以在熔池内形成形状完整的牛角状射流,侧吹气泡在喷枪轴线为气泡柱形式,熔池中间充满小气泡,但该状态还不稳定。在该状态下侧吹气流对熔池中心的搅拌也由环流所产生的间接搅拌,转变为目前众多微气泡上浮所产生的直接搅拌。该气流形态转变过程符合 Zhu 等^[10]的研究结果。此外,由于左右两侧气流喷吹的不同步性,熔池液面将

会出现剧烈的左右翻涌晃动现象,由此所产生的波浪将会对熔池壁面进行冲击,使炉体的支撑结构承受巨大的应力,如图3(c)(d)中黄线所示。

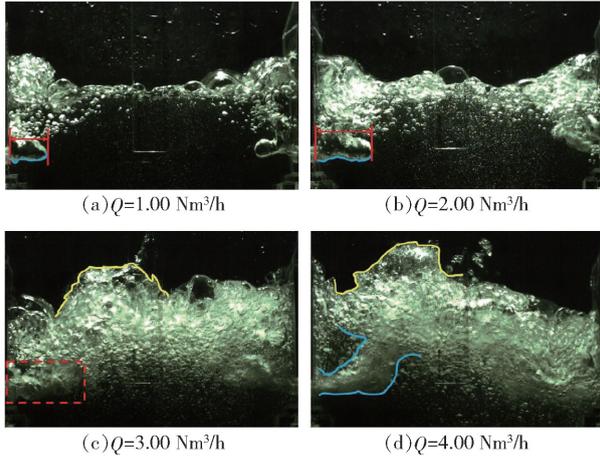


图3 气流形态转变过程

2.2 侧吹炉内多相流场分布

对富氧铜侧吹熔炼炉进行仿真计算,侧吹炉内整体流场分布结果如图4所示。图4(a)所示气相体积分数等值面结果可以对侧吹炉内气体喷吹形貌进行描述。侧吹过程中,富氧气体将以一定的速度鼓入渣层,并在气液相间的粘性作用下带动周围熔体一起运动。由于气体对熔体剧烈的搅动作用,熔池的液面将会有所上涨,且熔池的液面位置会发生一定程度的喷溅。富氧气体喷入熔体后容易对相邻喷枪产生影响,气泡呈现出不规则的形状。即无法形成图2中所示较完整的椭球型气泡,将会发生偏移或凹陷,或呈现为不规则球形。另外,在炉墙的阻隔作用下,喷吹区内的喷溅现象以及液面波动对炉体侧面的渣室影响较小,渣室中熔体较为平静。结合图4(b)所示气体流线分布结果可以看出,由于浮力的作用,富氧气体主要分布于风口上方区域,对风口下方的熔体几乎不产生直接搅动作用,更有利于渣铈界面处渣铈的分离沉降。因此,熔池内的高速区域主要集中在气体的上浮路径周围,即气体的直接搅拌区域。若要提高熔池内的搅拌强度,提高熔炼效率,应该提高气体的搅拌范围。如目前常用的喷枪偏转角度等直接方式,或文献[17]所采用的喷枪间气流相互作用产生环流的间接方式。在液面上方的烟气区域,渐阔炉型使气流速度得以降低,在浮力作用下平稳的汇集于炉顶处的烟道口处。烟气流速的降低对于降低喷溅液滴的上升高度有促进作用。

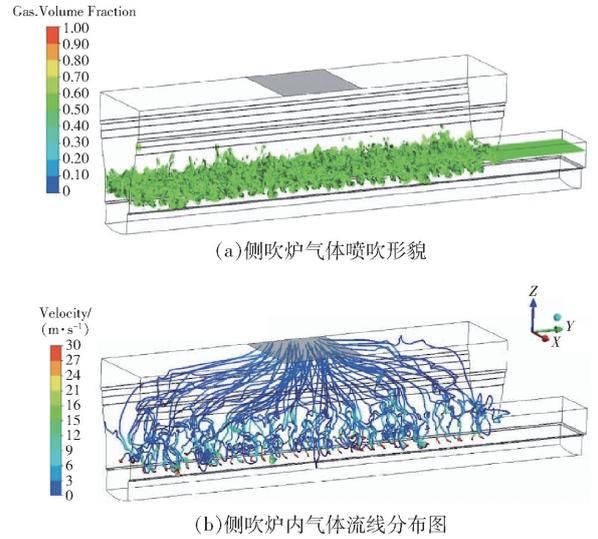


图4 侧吹炉内整体流场分布

图5展示了侧吹炉内近壁区域截面 $x = 1.00 \text{ m}$ 和熔池中间区域 $z = 1.70 \text{ m}$ 上的速度分布。受侧吹气流穿透深度的影响,目前侧吹熔炼炉的主要放大方式为加长炉体,炉宽则被限制在 2.5 m 。从图5(b)所示熔炼炉内整体速度分布来看,每个侧吹气流喷吹过程中的主要影响区域为风口前方的喷吹区域及上浮路径周围,且不同喷枪位置处的速度分布较为相似,具有区域性的特点。即在目前长炉体条

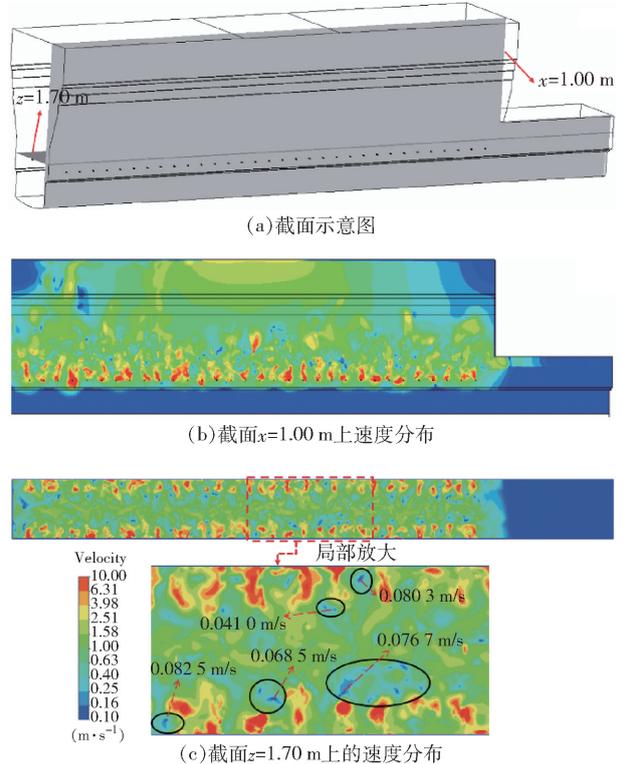


图5 侧吹炉内速度分布图

件下,较远位置处的喷枪间是互不干扰的。另外,通过图 5(c)可以发现,熔池中间区域存在着多个低速区域,这些位置中的熔体速度小于 0.10 m/s。这些位置处几乎不发生搅拌,不利于熔池中各相的混合与反应,需要对侧吹炉喷枪流量、角度以及排布方式等操作参数进行优化,以改善该情况。

图 6 所示为富氧侧吹炉壁面应力分布结果,壁面应力代表侧吹熔池搅拌过程中气流或熔体对炉体的冲击力。高应力区域集中在喷嘴附近以及气泡上浮路径周围,该区域壁面应力是相邻喷枪间壁面所受应力的 2~3 倍,表明该区域壁面炉衬更易受损。在气流喷吹过程中会受到来自熔体的挤压作用,这将使壁面受到来自高速气流和高温熔体的反冲,使喷嘴周围壁面的压力要大于其他区域。在气泡上升过程中会在黏性作用下带动周围熔体一起运动,导致熔体对壁面产生冲刷作用,增加气泡上浮路径周围壁面受到的应力。

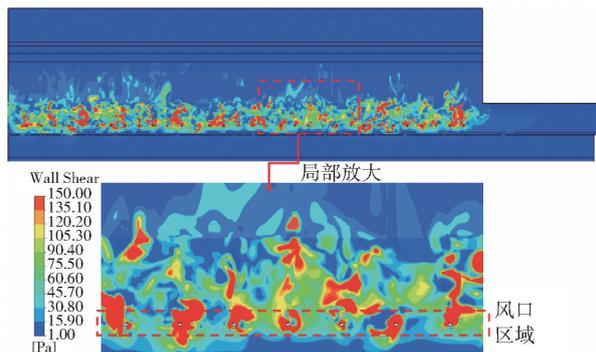
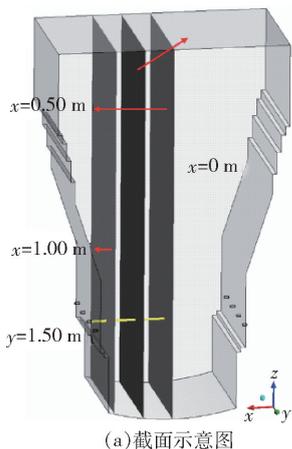
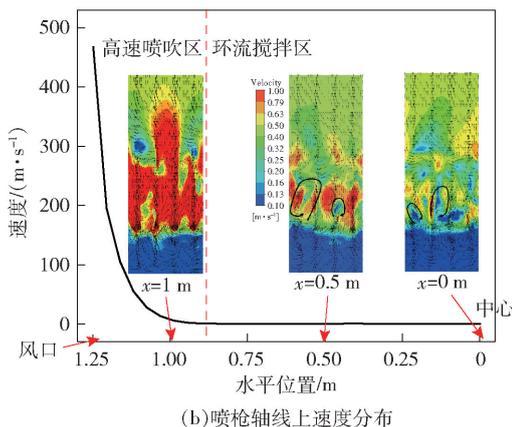


图 6 侧吹炉壁面应力分布

鉴于侧吹气体的区域性特点,对侧吹炉内 4 对喷枪区域进行瞬态计算,并在计算稳定后,对平均场



(a) 截面示意图



(b) 喷枪轴线上速度分布

图 7 侧吹炉内喷枪轴线方向速度分布

进行统计。下述分析过程均在该平均场的基础上进行。喷枪轴线上的速度分布,以及气流喷吹方向不同截面上的速度分布如图 7 所示。由于富氧气体吹入熔池后会在惯性力作用下不断向前穿透运动,同时在黏性作用下将动能传递给周围熔体,最终当气流水平方向分速度减小至 0 时在浮力作用下上浮。所以本文以平均气流穿透深度 0.365 m 为界限^[17],将熔池内的气流搅拌区定位为高速喷吹区与环流搅拌区。气流穿透深度影响范围包含了整个高速喷吹区,该区域内速度变化梯度很大。气体在喷枪末端受热膨胀,在喷枪出口 $x = 1.25$ m 处速度瞬间由入口的 240 m/s 增加至 466.91 m/s,并迅速将动能传递给周围熔体,在 $x = 1.20$ m 处速度已降低至 194.81 m/s。由于气流初速度较大,即使截面 $x = 1.00$ m 处于该区域的末端,仍然有较高的速度。该截面上喷吹区域的流体速度几乎都大于 1.00 m/s。而在超过气流穿透深度影响范围的环流搅拌区内,喷吹区域的流体速度明显降低。该区域中的熔体主要依靠气流搅动所产生的涡流效果,熔体的方向变化较大。

2.3 侧吹炉内物质混合与反应效率分析

在上述稳定流场的计算基础上对熔池的混合特性进行分析。该过程以示踪剂对侧吹炉内反应物质在熔池中的扩散状态进行仿真计算,对示踪剂的浓度进行无量纲化处理,如式(16)所示。当无量纲浓度的变化趋势稳定在平衡浓度的 $\pm 5\%$ 时,熔池达到了均匀混合,其所需的时间为熔池的混匀时间。熔池内各点混匀时间的计算通过自定义函数 UDF 实现。

$$C_{\text{non-dimensional}} = C/C_0 \quad (16)$$

式中, $C_{\text{non-dimensional}}$ 为示踪剂的无量纲浓度; C 为熔池

内某一点的绝对浓度; C_0 为示踪剂在渣层中完全混匀后的平衡浓度。

如图 8(a) 所示, 类比于生产过程中的投料位置, 示踪剂由渣层的液面中心处给入, 且其材料属性与渣相近似。通过对示踪剂浓度分布的计算, 得出图 8(b)(c) 中的无量纲浓度分布结果与混合时间分布结果。在稳定的侧吹流场下, 示踪剂将会跟随

气液搅拌快速扩散, 在扩散初期浓度发生明显的波动, 并在 34.10 s 内达到混合均匀。通过分析发现, 混匀区域主要分布于渣层内的环流搅拌区, 此处流场的搅拌主要由侧吹气泡上升所产生的环流控制, 速度分布更加均匀, 更易达到均匀混合。这部分混匀区域为生产过程中的主要反应区域, 可以满足侧吹熔炼过程的需要。

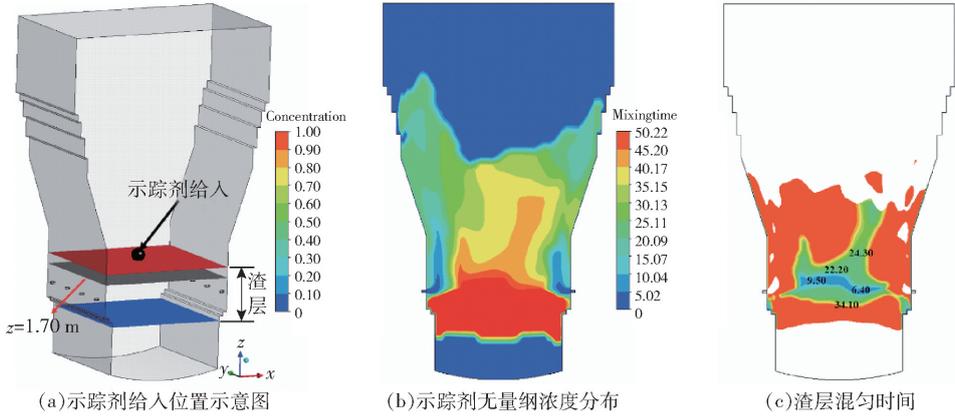


图 8 侧吹炉内混匀效率分析

针对图 5 中熔池内的低速区域, 提出了环流喷吹技术进行改善^[17,20]。该技术通过改变喷枪排布方式实现, 并利用相邻侧吹气流间的相互作用在熔池内产生新的环流, 提高熔池搅拌强度。其中平行环流喷吹将炉壁两侧喷枪朝相反方向水平偏转 15° ; 交错环流喷吹将炉壁两侧的喷枪在水平方向上朝相反方向平移 100 mm; 位差环流喷吹将炉壁两侧相对位置的喷枪在垂直方向上朝相反方向平移 100 mm。

根据前文环流喷吹技术改善效果的分析结果得知, 平行环流喷吹模式对流场的改善效果最好。原工况和环流喷吹模式下截面 $z = 1.70$ m 上的混合时间分布如图 9 所示。该截面上的平均混合时间分别为 32.79 s、12.40 s、35.14 s 和 36.23 s。对比发现, 平行环流模式下的混合时间明显变快, 且

混匀区域明显增加。相比于原工况, 平行环流模式下的平均混合时间降低了 62.18%。这说明在相邻流股的相互叠加作用下, 平行环流模式在熔池的整场内所形成的水平环流确实起到了强化熔池搅拌的作用, 使熔池内的反应物质更快分散并混合均匀, 有利于提高熔池内各区域的反应速度, 提高熔炼效率。

对于侧吹气体搅拌作用, 主要通过引起熔体湍流, 提高熔体内物质扩散速率。考虑湍流影响的组分扩散速率方程中包含质量扩散与对流两项, $J_i = -\left(\rho D_{i,m} + \frac{\mu_i}{Sc_i}\right) \nabla Y_i$ 。式中 $D_{i,m}$ 为组分在熔体内部的扩散系数, 为物性参数。 μ_i 为湍流黏度, 受熔体湍流状况影响。 Sc_i 为施密特数, 为熔体黏度与组分扩散系数的比值 $\nu_i/D_{i,m}$, Fluent 中默认取值 0.70。

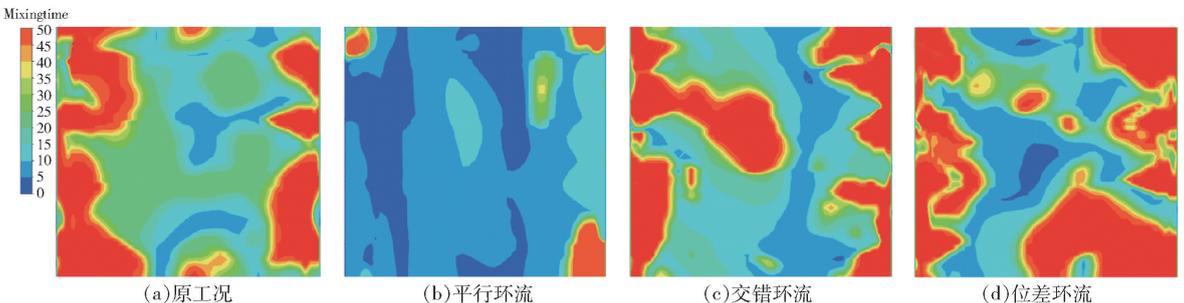


图 9 熔池中心 $z = 1.70$ m 处混合时间分布

所以湍流黏度 μ_t 为控制熔体中物质扩散效率的关键变量^[21]。熔池中心位置 $z = 1.70 \text{ m}$ 处的湍流黏度如图 10 所示。该截面上的平均湍流黏度分别为 $33.34 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、 $50.48 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、 $30.49 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 和 $36.34 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。相

比之下,平行环流模式下的湍流黏度最大,是原工况的 1.51 倍。也更进一步的说明了平行环流模式对侧吹熔池搅拌均匀性,与反应物质混匀效率的提升的促进作用。

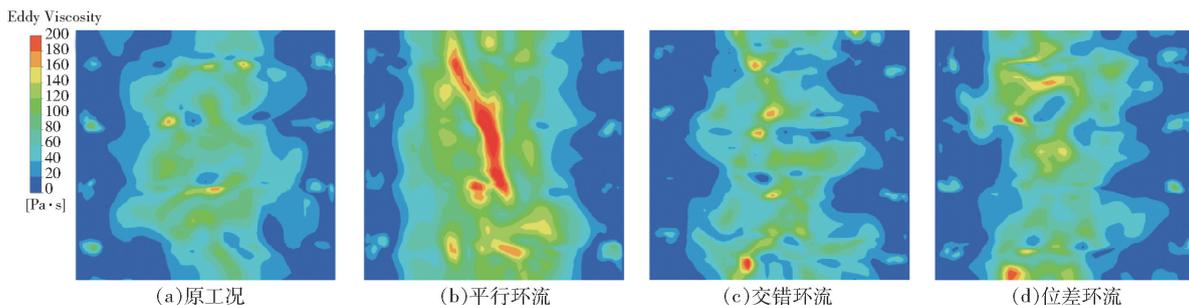


图 10 熔池中心 $z = 1.70 \text{ m}$ 处湍流黏度分布

3 结语

本文对富氧铜侧吹熔池熔炼炉内的多相流场与混匀效率进行模拟,得到以下结论。

1) 在鼓泡流状态下,侧吹气流形态呈现出生长、脱离及上浮并破碎的三个阶段,本文所用数学模型通过该特征得到验证。随着气体流量的增加,修正弗劳德数 Fr' 增加至 310.64,侧吹气流逐渐由鼓泡流转变为不稳定的射流,气流穿透深度明显提高。

2) 在浮力作用下,侧吹气流对熔池的搅拌具有区域性的特点,主要对侧吹气流上升轨迹周围熔体进行直接搅拌。熔池中心存在低速区域,速度小于 0.10 m/s 。受侧吹气流反冲作用和气泡上浮过程中对壁面冲刷作用,侧吹炉壁面高应力区域集中在喷嘴附近以及气泡上浮路径周围,是相邻喷嘴间区域炉壁应力的 2~3 倍,炉衬更易受损。

3) 通过气流穿透深度与熔池内环流分布,将熔池沿喷枪方向划分为高速喷吹区与环流搅拌区。其中环流搅拌区为熔池主要混合与反应区域,该区域速度小于 1.00 m/s ,但分布更加均匀,相对更易达到均匀混合,均混时间 34.10 s 。平行环流喷吹技术对熔池的混合效率改善明显,熔池环流搅拌区内的湍流黏度是原工况的 1.5 倍,混匀时间降低 62.18%,使示踪剂在渣层中扩散速率得到提高。

[参考文献]

[1] 瞿秀静. 重金属冶金学[M]. 北京:冶金工业出版社, 2011.
[2] 陈学刚, 王忠实. 侧吹浸没燃烧熔池熔炼工艺的开发和应用[A]有色金属工业科技创新-中国有色金属学会第十届

学术年会论文集[C]//长沙:吕长鑫, 2016: 90-97.

[3] 袁建平. 新技术与新装备在南方铜业的应用与发展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(5): 31-35.
[4] Zhang H, Zhou C, Bing W, et al. Numerical simulation of multiphase flow in a Vanyukov furnace[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2015, 115(5): 457-463.
[5] 刘冠廷. 铜富氧双侧吹像炼炉中多相流的数值模拟[D]. 沈阳:东北大学, 2015.
[6] 张莹. “钢-渣-夹杂物-耐火材料-合金-空气”六相多元体系下的钢、渣和夹杂物成分变化的动力学研究[D]. 北京:北京科技大学, 2019.
[7] 姜文涛. 钢包精炼过程的多相流传输行为及反应动力学研究[D]. 沈阳:东北大学, 2015.
[8] Zhu Shuai, Zhao Qiuyue, Liu Yan, Zheng Mingzhao, Li Xiaolong, Zhang Ting'an. Mixing behavior in a side-blown vortex smelting reduction reactor[J]. Metallurgical and Materials Transactions B-Process Metallurgy and Materials Processing Science, 2021, 52(6): 4082-4095.
[9] Zhu Shuai, Zhao Qiuyue, Liu Yan, et al. Local bubble characteristics in a side-blown vortex smelting reduction reactor[J]. Metallurgical and Materials Transactions B-Process Metallurgy and Materials Processing Science, 2022, 53(4): 2303-2320.
[10] Zhu Shuai, Zhao Qiuyue, Li Xiaolong, Liu Yan, Li Tianci, Zhang Ting'an. Flow and penetration behavior of submerged side-blown gas[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2023, 30(6): 1067-1077.
[11] 方毓. 富氧双侧吹熔炼炉沉降区及贫化电炉的物理模拟[D]. 沈阳:东北大学, 2015.

- [12] Li Xiaolong, Liu Yan, Wang Dongxing, et al. Emulsification and flow characteristics in copper oxygen-rich side-blown bath smelting process[J]. *Metals*, 2020, 10(11): 1520 – 1533.
- [13] Zhao Hongliang, Wang Jingqi, Liu Fengqin, et al. Experimental study on bubble distribution and splashing in a Peirce-Smith copper converter[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2021, 52(10): 440 – 450.
- [14] 邵品. 冶金熔体内气泡行为的数值模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [15] Kapusta Joel. Submerged gas jet penetration: a study of bubbling versus jetting and side versus bottom blowing in copper bath smelting[J]. *JOM*, 2017, 69(6): 970 – 979.
- [16] 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, 33(2): 16 – 24.
- [17] Xiao Yadong, Lu Tingting, Zhao Hongliang, et al. Computational fluid dynamics study on enhanced circulation flow in a side-blown copper smelting furnace[J]. *JOM*, 2021, 73(9): 2724 – 2732.
- [18] Zhu Shuai, Zhao Qiuyue, Li Xiaolong, et al. CFD simulation of gas-slag-metal multiphase flow in a side-blown vortex smelting reduction reactor[J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2023, 9(3): 1033 – 1049.
- [19] Xiao Yadong, Wang Jie, Lu Ting-ting, et al. An Experimental Study on Gas-Liquid Flow and Mixing Behavior in a Copper Side-Blown Smelting Furnace [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2023, 54, 756 – 764.
- [20] 赵洪亮, 肖亚冬, 王成彦, 等. 一种侧吹熔炼炉高效喷吹的方法[P]. 北京市: CN111964471B, 2022 – 09 – 09.
- [21] Zhao Hongliang, Lu Tingting, Yin Pan et al. An Experimental and Simulated Study on Gas-Liquid Flow and Mixing Behavior in an ISASMELT Furnace [J]. *Metals*, 2019, 9(5): 565 – 577.
- [22] 顾明杰, 祁永峰, 李智, 等. 富氧侧吹熔池熔炼生产金属化镍阳极工艺研究[J]. *绿色矿冶*, 2023, 39(5): 9 – 14.

Simulation study on flow field and mixing efficiency inside oxygen-rich copper side-blown smelting furnace

XIAO Yadong, LIU Yan, ZHAO Hongliang, ZHANG Ting'an, LI Xiaolong, WANG Kun

Abstract: Due to the high temperature and invisibility of metallurgical furnaces, most measurement methods are limited. Therefore, this paper uses numerical simulation to analyze the flow field and mixing efficiency in the oxygen-rich copper side-blown smelting furnace at high temperature. Affected by buoyancy, the side blown airflow has regional characteristics, mainly stirring the melt directly around the upward trajectory of the airflow. There is a low-speed area in the center of the melt pool, with a speed less than 0.1 m/s. Due to the backflushing of the side blowing airflow, the high-stress area on the wall is concentrated near the nozzle and around the upward path of bubbles. The wall stress in this area is 2 – 3 times that of the wall stress between adjacent spray guns, making the furnace lining more susceptible to damage. By analyzing the distribution of circulating currents in the molten pool, the molten pool is divided into a high-speed blowing zone and a circulating stirring zone along the axis of the spray gun. The circulating stirring zone is the main reaction zone, with a velocity of less than 1 m/s, but the velocity distribution is more uniform, and the mixing time of the components is 34.10 seconds. The parallel circulation injection technology has the most significant improvement on the mixing efficiency of the molten pool, with turbulent viscosity 1.51 times that of the original operating conditions and a relative reduction of 62.18% in mixing time.

Key words: side blowing furnace; gas jet; mixing time; turbulent motion; smelting furnace; copper concentrate; oxidation smelting; pyrometallurgy

