

颗粒偏析对工业级铜闪速熔炼炉多相流场及反应过程的影响

李倩¹, 郭天宇¹, 骆祎², 向阳², 陈斯¹

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 阳新弘盛铜业有限公司, 黄石 435200)

[摘要] 实际生产运行中,铜闪速炉内常存在颗粒偏析、分布不均、下生料等问题。为研究颗粒入口不均匀分布对闪速炉反应塔内气-粒两相分布、传热和反应特性等的影响,将精矿喷嘴出口颗粒不均匀分布作为反应塔入口边界条件,采用CFD-DEM耦合模型对工业级铜闪速熔炼炉进行仿真分析。模拟结果表明,颗粒入口分布均匀性直接影响反应塔内气-粒分布特性;颗粒入口分布不均匀时,反应塔内气体和颗粒的分布均呈梭形分布,容易导致高温区接近壁面,影响闪速炉寿命;入口不均匀分布使颗粒在局部位置集中,在距离塔顶2 m高度区域内升温速率和反应速率加快,在反应塔内颗粒的平均停留时间略有增加。通过考虑颗粒入口的不均匀分布,进一步提高了铜闪速熔炼炉多物理场耦合仿真的准确性,使仿真结果更接近实际生产情况,从而为生产工艺优化提供更准确的指导依据。

[关键词] 铜闪速熔炼; 颗粒偏析; 多物理场耦合仿真; CFD; DEM

[中图分类号] TF811

[文献标志码] A

[文章编号] 2097-2423(2025)06-0057-07

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.06.009

0 引言

铜闪速熔炼技术因具有生产效率高、能源消耗少、环境保护好等优势^[1-2],已成为现代火法炼铜的主要方法^[1]。针对冶炼过程的传统研究主要为实验室研究和工厂测试。随着市场竞争对产能和质量的不断提高,以及工业过程数字化、智能化控制需求的日益增强,传统的研究方法已经难以适应当今日益复杂的冶金工业设备^[3]。数值仿真技术是继传统实验研究和工厂测试之后的一种研究方法,弥补了传统冶金研究方法周期长、成本高且效果不理想

的不足,已受到越来越多研究者青睐,在闪速熔炼研究中得到了较为广泛的应用^[4-8]。

李欣峰等^[9]采用欧拉-朗格朗日耦合方法对闪速炉内气固两相体系进行数值仿真研究,计算结果显示,气相在反应塔内会发生偏流,烟气温度计算结果与现场测量结果的相对误差在2%以内,验证了其仿真模型的准确性。陈卓等^[10]采用CFD仿真对铜熔炼过程中分散风与工艺风的动量比进行研究,探究其对颗粒分散效果的影响。李俊标等^[11]对闪速熔炼过程进行数值模拟研究,发现精矿颗粒进入反应塔后平均停留时间约0.8 s,粒径对颗粒的速度和停留时间有显著影响。黄金堤等^[12]基于数值仿真技术研究了颗粒粒径对闪速炉内颗粒运行轨迹、速度、温度等参数的影响规律,结果显示,颗粒运动速度和升温速率均随粒径的增大呈现减小趋势。

上述已有的铜闪速炉仿真研究中,均认为颗粒在反应塔入口为均匀下料,但实际生产运行中,颗粒喷嘴出口处常出现颗粒分布不均的情况,颗粒偏析会导致反应塔内气-粒分散特性发生变化,造成局部区域颗粒集中,降低反应空间的利用效率,进而引起反应不充分、下生料等问题^[13-14];同时,颗粒的偏析还会导致反应塔内部分高温区接近壁面,加速炉衬的侵蚀,影响设备寿命^[13]。因此,本文在前人前

[收稿日期] 2025-08-05

[基金项目] 国家重点研发计划“有色金属生产过程多相多场先进工艺控制与优化软件”(2022YFB3304900)。

[作者简介] 李倩(1989—),女,山东泰安人,工程师,博士,主要从事有色冶炼反应器仿真工作。

[引用格式] 李倩,郭天宇,骆祎,等.颗粒偏析对工业级铜闪速熔炼炉多相流场及反应过程的影响[J].绿色矿冶,2025,41(6):57-63.

LI Qian, GUO Tianyu, LUO Yi, et al. Effect of particle segregation on the multiphase flow fields and reaction processes in industrial-scale copper flash furnaces[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(6): 57-63.

期工作^[15]研究基础上,采用 CFD-DEM 多物理场耦合模型对某工业级铜闪速熔炼炉进行颗粒偏析仿真研究,以喷嘴出口颗粒不均匀分布为反应塔入口颗粒边界条件,将喷嘴造成的颗粒偏析分布引入闪速炉,对炉内气-粒分散、传热和反应特性进行研究,进一步提高仿真结果的准确性。通过对比本次仿真结果与颗粒均匀入口分布的仿真结果^[15],揭示入口条件的关键影响,为现场生产运行提供一定的调控依据。

1 计算模型

本文基于前人前期工作基础建立某工业级闪速熔炼炉几何模型,所研究的闪速炉几何结构和骆祎^[15]研究的闪速炉结构一致,几何模型和网格处理可参考该文献^[15]。

1.1 数学模型

基于欧拉-拉格朗日框架的 CFD-DEM 耦合模型,对闪速炉内的气固体系进行仿真研究。流体相采用 CFD 方法,通过求解连续性方程、动量守恒方程、能量守恒方程、组分传输方程和湍流模型,获得气相的速度场、温度场、组分浓度场等流体力学信息,湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型。颗粒运动采用 DEM 模型进行求解。具体模型和主要化学反应参考前期工作^[15],本文不再赘述。通过自定义耦合接

口实现流体相和颗粒相的数据传输,耦合计算过程如图 1 所示。

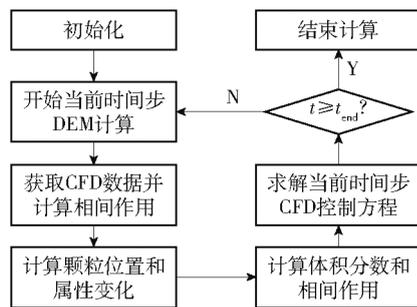
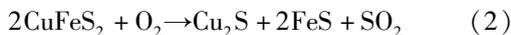


图 1 CFD-DEM 耦合计算流程

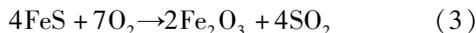
1.2 主要化学反应

仿真计算过程中,考虑的主要化学反应如下。

黄铜矿、黄铁矿的分解反应:



FeS 的氧化反应:



1.3 操作参数

本文研究的工况条件和前期骆祎^[15]的工况条件一致,各操作参数见表 1。混合精矿由铜精矿、渣精矿、吹炼渣、石英和烟灰 5 种物料组成,各物料的质量分数见表 2。颗粒组分的比热容、密度、生成焓等物性参数参考李俊标^[8]所采用的参数。

表 1 操作参数

参数	混合精矿		富氧空气		流化风		中心风		盐化氧	
	投料量/ ($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$	体积流量/ ($\text{Nm}^3\cdot\text{h}^{-1}$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$						
数值	278.56	80	60 800	25	200	80	700	25	1 920	25

表 2 混合精矿组成 %

物料	铜精矿	渣精矿	吹炼渣	石英	烟灰
质量分数	74.04	3.94	3.58	11.83	6.61

1.4 边界条件

为研究反应塔入口颗粒偏析引起的闪速炉内气-粒分散和反应特性的变化,在保证和前期工作^[15]工况条件一致的情况下,本文引入喷嘴出口颗粒的分布特性作为颗粒边界条件。将反应塔颗粒入口沿周向分为 20 个区域,如图 2(a)所示,按照如图 2(b)所示的精矿喷嘴出口颗粒周向分布结果分别对每个区域内的颗粒质量流量进行设置。其他气相入口边界设置为速度入口边界条件,出口设置为压力出口,

出口压力为 -100 Pa 。

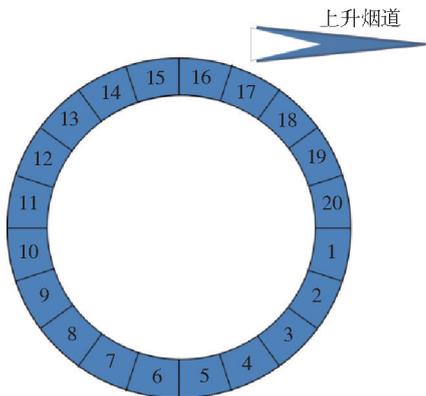
2 结果分析

2.1 气相结果

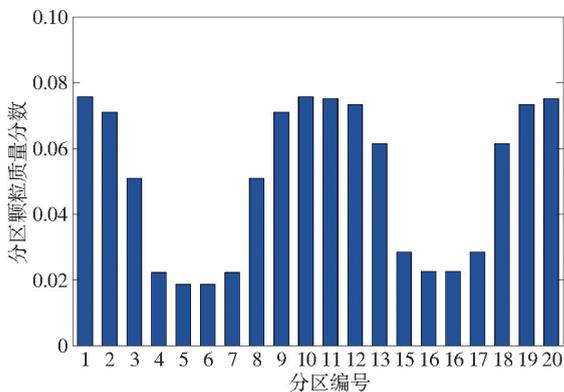
为说明闪速炉内的速度、温度分布,取反应塔两个中心截面进行云图展示,分别为闪速炉正视视角和侧视角时的两个中心截面,如图 3 所示。

2.1.1 气相速度分布

当前条件下闪速炉沿反应塔两个中心截面的气相速度分布云图如图 4 所示。由图 4(a)可知,气相进入反应塔,在喷嘴下方速度最大,随后速度逐渐减小并在塔内膨胀扩散,呈上窄下宽的锥形分布。由图 4(b)可知,截面 2 的速度分布更窄,说明气相在



(a) 分区示意(闪速炉俯视角)



(b) 分布结果

图 2 反应塔颗粒入口分布条件

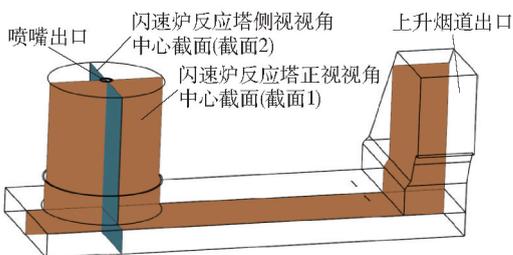
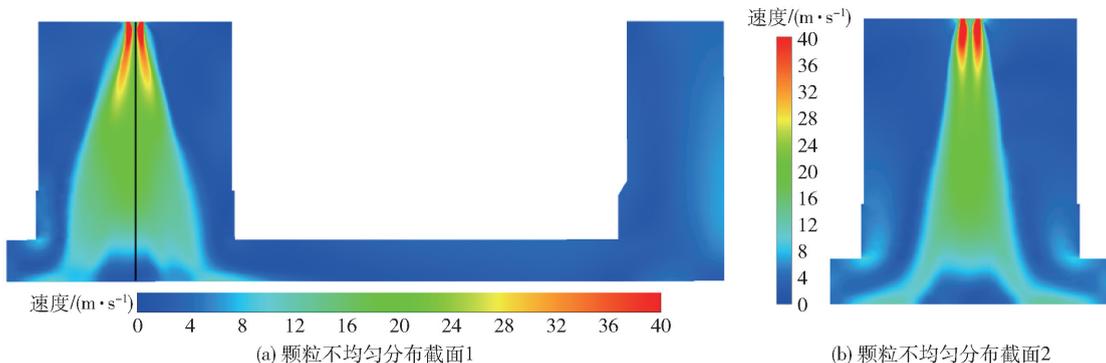


图 3 闪速炉中心截面位置示意

反应塔内的分布不是中心对称的形式。通过与颗粒入口周向均匀分布的结果^[15](图 4(c))对比可知,引入图 2(b)所示颗粒不均匀分布条件后,在图 4(a)视角下反应塔内气柱的分布更宽,且气相向上升烟道反方向(图中左侧)偏移的情况更为明显。

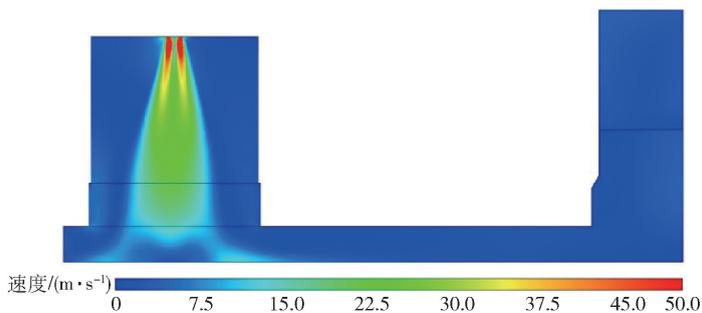
这是因为颗粒在喷嘴出口位置沿闪速炉整体结构的长度方向两侧(图 2 中编号 1~3、18~20 与 8~13 对应的区域)分布更为密集,进入反应塔后,受动量交换及反应放热影响,使气相在左右两侧膨胀更为明显,分布更宽。

距离反应塔塔顶分别为 3.0 m 和 4.5 m 两个高度截面的气相速度分布云图如图 5 所示,该图更直观地展示了气相速度在不同反应塔轴向位置水平截面上的分布形式。由图 5 可以发现,进入反应塔后,喷嘴下方的气柱向下逐渐变宽,气体速度逐渐减小。在反应塔入口颗粒周向分布不均匀条件下,气相进入反应塔后在颗粒分布影响下形成向左右两侧拉长



(a) 颗粒不均匀分布截面1

(b) 颗粒不均匀分布截面2



(c) 颗粒入口周向均匀分布时截面1速度分布云图^[15]

图 4 闪速熔炼炉气相速度分布云图

的分布状态,而在颗粒入口均匀分布时,气相在反应塔内基本呈中心对称的分布形式^[15],说明颗粒入口的不均匀分布,不仅影响颗粒在闪速炉内的运动和分布,同时也会对气相的分布状态产生明显影响。

因此,在进行闪速炉仿真计算时,不考虑喷嘴内颗粒分布状态的影响,将其简化为均匀分布,可能会导致仿真结果偏离实际生产情况。

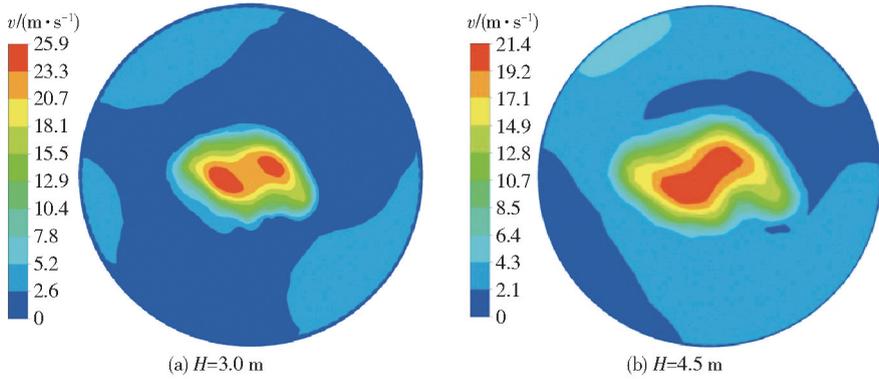


图5 反应塔不同高度位置气相速度分布云图

2.1.2 气相温度分布

闪速炉内两个中心截面位置的气相温度分布云图如图6所示。由图6可知,在反应塔中心位置有温度较低的气体分布,且温度沿反应塔轴向逐渐升高;和图3速度分布一致,截面1的气柱分布比截面2的分布更宽;此外,在距离塔顶约1 m的位置,气

相分布边缘处烟气温度已升高至约1 400 ℃,说明此处温度已达到颗粒反应温度,颗粒发生化学反应。图6(b)显示,在反应塔中下部,烟气温度最高,且高温区域变宽。气体在反应塔内流场的不均匀分布,使气相高温区更接近反应塔内左右两侧壁面,容易造成壁面温度升高,影响炉体寿命。

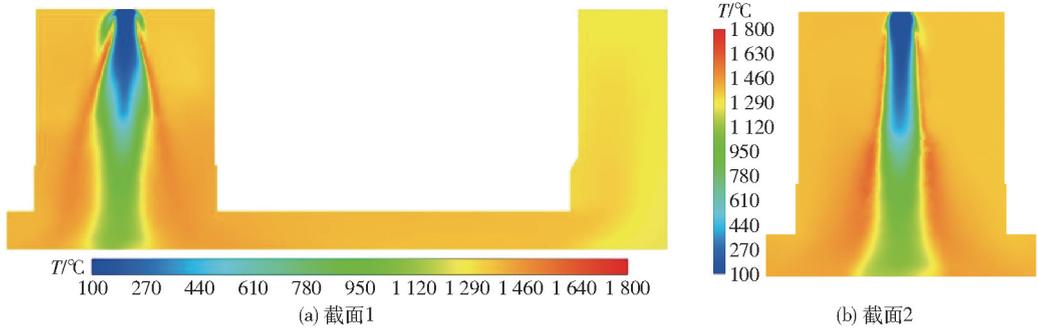


图6 闪速熔炼炉气相温度分布云图

2.2 颗粒相结果

2.2.1 颗粒温度分布

闪速炉内两个不同视角下的颗粒温度分布结果如图7所示。由图7(a)可知,正视视角下,入口分布不均匀时颗粒在反应塔内的分布比入口颗粒均匀

分布^[15]时更宽。图7(b)可以更直观说明这一点,在反应塔颗粒入口位置,混合精矿在左右两侧分布更为集中,进入反应塔后,两侧颗粒被气体带向更远的位置,使反应塔内的颗粒分布在俯视图下呈现向两侧拉长的梭形(图7(b)),所以左右两侧

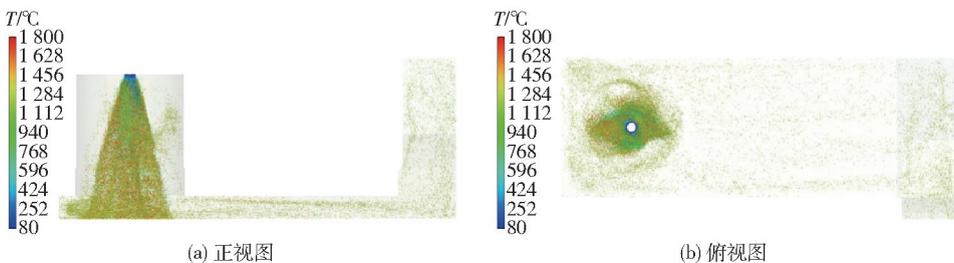


图7 闪速熔炼炉颗粒温度分布图

变宽。

当前颗粒入口分布条件下,颗粒平均温度沿反应塔轴向的变化曲线如图8所示。由图8可知,与入口颗粒均匀分布条件下的温度^[15]对比,在反应塔塔顶下方2 m区域内,入口颗粒分布不均匀条件下颗粒的升温速度更快。在反应塔中下部,两种工况条件下温度变化曲线基本一致,颗粒最高温度均出现在距离反应塔顶部约5 m的位置。

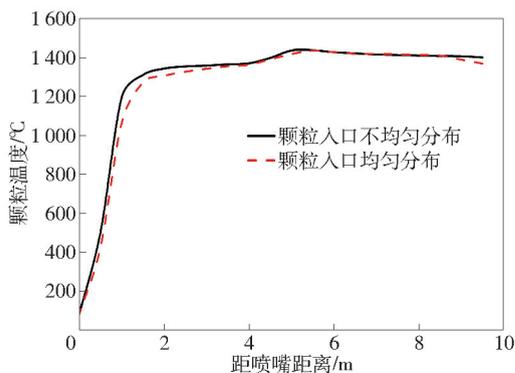


图8 颗粒温度沿反应塔高度变化关系

2.2.2 颗粒速度

当前入口分布状态条件下,颗粒平均速度在反应塔不同高度位置的变化曲线如图9所示。由图9可知,颗粒进入反应塔后,自塔顶下落1 m距离内,颗粒速度快速增大至12 m/s,随后又逐渐增大至14 m/s。在距离塔顶5~7 m处,颗粒速度维持在14 m/s下落。进入沉淀池烟气空间后,因流体通道增大,烟气流速减小,颗粒平均速度也随之逐渐减小,最后以10.5 m/s的速度落入沉淀池中。

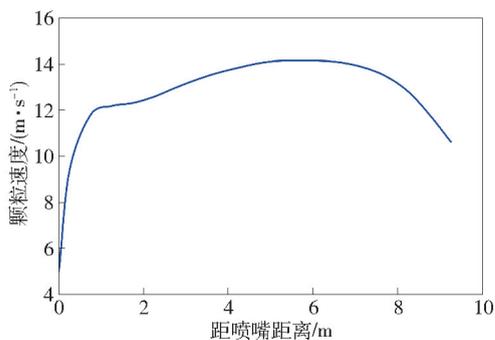


图9 颗粒速度沿反应塔高度变化关系

2.2.3 颗粒停留时间

颗粒在反应塔内的停留时间分布曲线如图10所示。由图10可知,与入口颗粒均匀分布时^[15]相比,颗粒不均匀分布的停留时间分布曲线发生明显变化:停留时间分布曲线变宽且向右平移,平均停留时间为0.72 s,比入口均匀分布的颗粒平均停留时

间0.67 s^[15]略有增大。这是因为颗粒入口不均匀分布时,颗粒在反应塔左右两侧形成相对集中的分布区域(图7(b)),导致颗粒的下落速度降低,停留时间增加。因此,颗粒入口的不均匀分布会显著影响颗粒的运动过程。

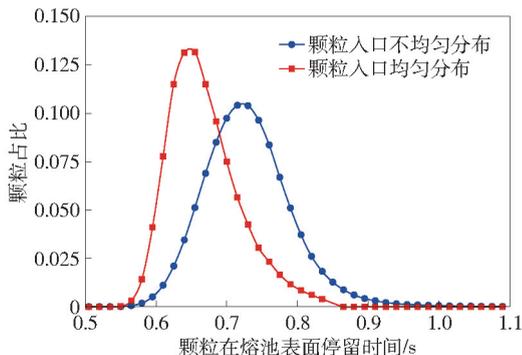


图10 颗粒自反应塔入口至熔池表面停留时间分布曲线

2.2.4 颗粒组分质量分数

反应塔内颗粒 CuFeS_2 质量分数沿反应塔高度的变化关系曲线如图11所示。由图11可知,颗粒入口不均匀分布时, CuFeS_2 组分质量分数在距反应塔塔顶2 m内下降更快,即反应速率更大,这是因为当前条件下颗粒在塔顶升温速率更快,可以更早达到反应温度,表明颗粒的局部集中使其传热和反应过程得到强化;在距离塔顶2 m以下区域,入口不均匀分布条件下颗粒中 CuFeS_2 组分质量分数与入口均匀分布时结果基本一致。

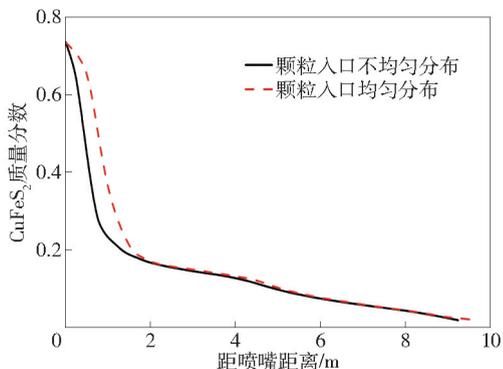


图11 颗粒 CuFeS_2 组分质量分数沿反应塔高度变化关系

当前颗粒入口不均匀分布条件下闪速熔炼炉颗粒不同组分质量分数沿反应塔高度的变化曲线如图12所示。由图12可知,除 FeS 这一中间产物的质量分数沿反应塔高度方向呈先增大后减小的变化趋势外,其他组分质量分数均呈单向变化趋势:反应物组分 CuFeS_2 和 FeS_2 质量分数逐渐减小,生成物组分

Cu_2S 和 Fe_2O_3 质量分数逐渐增大。在距反应塔塔顶约 1 m 高度内,各组分质量分数变化较快, CuFeS_2 在该范围内反应了约 70%;在距塔顶位置大于 1 m 的区域,质量分数的变化速度逐渐减小。

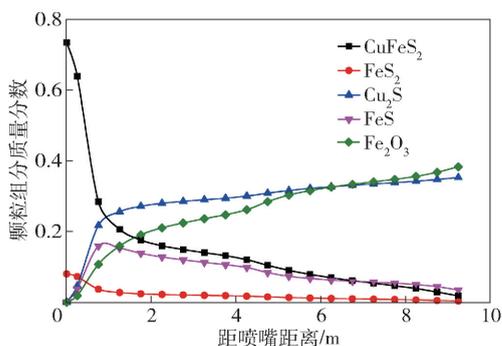


图 12 颗粒组分质量分数沿反应塔高度的变化

3 结论

本文在他人前期工作基础上,采用 CFD-DEM 耦合模型,对某工业级铜闪速熔炼炉开展多相流仿真研究。创新性地引入精矿喷嘴出口颗粒周向非均匀分布特征作为边界条件,研究了颗粒偏析对反应塔内气-粒两相分散特性、温度、速度分布及颗粒停留时间等关键参数的影响。通过考虑颗粒不均匀分布特性,进一步提高模拟结果的真实性,为现场工艺调控提供更可靠的理论依据。本文得出以下主要结论:

1) 反应塔入口颗粒分布的均匀性直接影响反应塔内气-粒分布特性:在当前研究的入口颗粒分布不均匀条件下,颗粒在反应塔内呈向两侧拉伸的“锥形”分布,即俯视角颗粒分布为梭形分布,使反应高温区向壁面偏移,导致高温气流和熔融颗粒直接冲刷壁面,不仅加速壁面的磨损,还可能影响闪速炉寿命。

2) 颗粒入口分布不均匀导致其在反应塔内分布存在偏析,局部位置颗粒相对集中,进而导致颗粒在反应塔内的平均停留时间略有增加。

3) 在距反应塔塔顶 1 m 范围内,各组分质量分数急剧变化,颗粒在此高度范围完成大部分化学反应。

4) 和均匀分布入口条件相比,在当前不均匀分布条件下,颗粒在反应塔顶部 2 m 区域内升温速率

和反应速率更快;但两种工况下反应塔底部的 CuFeS_2 最终组分质量分数基本一致。

[参考文献]

- [1] 朱祖泽,贺家齐. 现代铜冶金学[M]. 科学出版社,2003.
- [2] 刘树峰. 闪速熔炼技术发展趋势[J]. 铜业工程, 2013, 5(123): 8-11.
- [3] 黄金堤. 铜闪速吹炼过程仿真研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2011.
- [4] 陈卓,谭文科,宋彦坡,等. 铜闪速熔炼过程数值模拟研究现状与展望[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023, 6(2): 23-30.
- [5] ZAIM E H, MANSOURI S H. A new mathematical model for copper concentrate combustion in flash smelting furnaces[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2017, 231(2): 119-130.
- [6] 郭天宇,李倩,骆祎,等. 基于多物理场耦合仿真技术的冶金铜闪速炉多工况优化研究[J]. 有色设备, 2025, 39(4): 83-93.
- [7] SOLNORDAL C B, JORGENSEN F R A, KOH P T L, et al. CFD modelling of the flow and reactions in the Olympic Dam flash furnace smelter reaction shaft[J]. Applied Mathematical Modelling, 2006, 30(11): 1310-1325.
- [8] 李俊标. 基于 Fluent 的铜闪速熔炼多场仿真[D]. 赣州: 江西理工大学, 2011.
- [9] 李欣峰,梅焱,张卫华. 铜闪速炉数值仿真[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2001(3): 262-266.
- [10] 陈卓,毛永宁,赵荣升,等. 闪速炉熔炼配风对反应过程的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(2): 730-737.
- [11] 李俊标,谢剑才,王凤阳. 高强度铜闪速熔炼过程颗粒行为仿真研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(9): 35-38.
- [12] 黄金堤,黄茜琳,李亮星,等. 铜闪速吹炼过程颗粒行为仿真研究[J]. 山西冶金, 2012(6): 4-6.
- [13] 尧颖瑾. 铜闪速炉下料偏析模型实验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- [14] 谢锴,米沙. 闪速熔炼精矿喷嘴下料偏析仿真与试验研究[J]. 矿冶工程, 2015, 35(4): 75-83.
- [15] 骆祎. 基于 CFD-DEM 耦合的铜闪速熔炼炉数值仿真研究[J]. 世界有色金属, 2024(12): 32-36.

Effect of Particle Segregation on the Multiphase Flow Fields and Reaction Processes in Industrial-Scale Copper Flash Furnaces

LI Qian¹, GUO Tianyu¹, LUO Yi², XIANG Yang², CHEN Si¹

(1. China ENFI Engineering Corporation Ltd., Beijing 100038, China;

2. Yangxin Hongsheng Copper Industry Co., Ltd., Huangshi 435200, China)

Abstract: In actual production operation, issues such as particle segregation, non-uniform distribution and raw material settlement often occur within copper flash furnace. In order to study the influence of non-uniform particle inlet distribution on gas-particle distribution, heat transfer and reaction characteristics in the reaction shaft of flash furnace, the particle non-uniform distribution at the outlet of the concentrate nozzle was set as the reaction shaft inlet boundary conditions. A CFD-DEM coupled model was employed for simulation analysis on an industrial-scale copper flash smelting furnace. The simulation results show that the uniformity of particle at the inlet directly affects the gas-particle distribution characteristics in the reaction shaft. Under non-uniform particle inlet conditions, the distribution of both gas and particles in the reaction shaft undergoes deformations, which may lead the high temperature closer to the wall, and consequently reduce the service life of the flash furnace. The non-uniform inlet distribution leads to localized particle accumulation. The heating rate and reaction rates increase within the 2 m zone below the shaft top, and the average residence time in the reaction shaft slightly increases. By considering the non-uniform particle inlet distribution, the accuracy of multi-physics coupled simulation for copper flash melting furnace has been further improved, making the simulation results more consistent with actual production conditions, thereby providing more reliable guidance for process optimization.

Key words: copper flash smelting; particle segregation; multi-physics coupling simulation; CFD; DEM