

引用格式: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.  
GUO Tianyu, LI Qian, LUO Yi, et al. Research on multi-condition optimization of metallurgical copper flash furnace based on multi-physics coupling simulation technology[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(4): 83-93.

# 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

郭天宇<sup>1</sup>, 李倩<sup>1</sup>, 骆祎<sup>2</sup>, 李立<sup>2</sup>, 陈斯<sup>1</sup>

(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, 湖北 黄石 435200)

**[摘要]** 铜闪速熔炼炉内气-粒混合与反应特性受投料量影响显著,但投料量变化对两相体系分散及非均相反应的作用机制尚不明确。本研究基于 CFD-DEM 耦合方法,构建铜闪速熔炼过程多物理场耦合仿真模型,通过 4 种典型投料工况的仿真计算,系统研究了投料量变化对炉内气-粒两相流动、分散及化学反应特性的影响规律。研究发现,颗粒到达沉淀池熔池表面时平均停留时间均不足 1 s,且随投料量增大而减小;投料量较小(161 t/h)时,由于喷嘴出口颗粒周向分布不均匀性增强,导致反应塔内气-粒两相锥形分布发生明显畸变,在距离塔顶 3.0 m 范围内反应速率显著低于其他工况。本研究揭示了投料量通过改变气-粒空间分布状态影响反应效率的作用机制,为闪速熔炼工艺参数优化提供了理论依据。

**[关键词]** 铜; 闪速熔炼; 多工况; 多物理场耦合仿真; CFD; DEM; 模型

**[中图分类号]** TF811 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)04-0083-11

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.04.010

## 0 前言

闪速炼铜技术是先进的现代硫化铜矿冶炼技术之一,具有高处理量、高冶炼效率和低环境污染的优势<sup>[1-2]</sup>,已在世界范围内广泛推广应用。随着国民经济的发展,铜的需求量增加,闪速炼铜的生产强度也在不断增大<sup>[3-4]</sup>。闪速炉投料量和相应工艺风流量的变化,会使炉内气-粒两相的流动形态、运行轨迹、反应特性等发生改变。研究投料量变化对闪速熔炼炉内气-粒两相分散和反应特性的影响规律,可为闪速熔炼过程的工艺优化和调控提供重要的理论依据,具有重要的工程意义。

由于铜闪速熔炼是一个高度复杂的过程,受炉内生产条件(高温、强氧化环境)和现有检测手段限制,难以直接测量获得闪速炉内关键参数如烟气温

度、颗粒温度、颗粒成分等关键参数信息<sup>[5-9]</sup>。数值模拟技术因其成本低、周期短、可视化效果好等特点,成为研究闪速炼铜技术的重要技术手段<sup>[5,9-12]</sup>。徐鹏等<sup>[4]</sup>采用数值仿真方法系统研究了高投料量下闪速炉生产参数方案,基于正交试验,对操作参数匹配方案进行优化。陈卓等<sup>[3]</sup>采用 CFD 技术对大投料量下闪速炉进行仿真研究,对比分析了分散风和工艺风对炉内分散和反应过程的影响规律,结果表明,二者的动量比对闪速熔炼过程影响显著,并基于研究结果提出了分散风和工艺风的匹配建议。朱殷斌等<sup>[13]</sup>采用数值模拟手段,对闪速吹炼炉进行操作参数优化研究,优化后的操作参数条件下,氧气利用率得到有效提升。

已有研究工作表明,数值仿真技术已成为闪速炉操作参数优化的重要技术手段。本研究以某厂

**[收稿日期]** 2025-02-15

**[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);中国科协的项目支持(2022QNR001)。

**[第一作者]** 郭天宇(1988—),女,黑龙江安达人,高级工程师,博士,主要从事有色矿冶数字工程研发工作,现任中国恩菲工程技术有限公司恩菲研究院数字工程研究中心主任。

40 万 t 铜闪速熔炼炉为原型,采用 CFD-DEM(Computational Fluid Dynamic-Coupling Discrete Element Method)耦合方法对闪速熔炼炉进行数值仿真计算,探索不同投料量对闪速炉内气-粒混合特性、温度分布、反应过程的影响规律,为生产操作提供一定的理论依据。

## 1 计算模型

### 1.1 数学模型

为提高闪速炉内颗粒-流体运动的准确性,基于 CFD-DEM 耦合方法,构建闪速炉多物理场耦合

仿真模型。气相和颗粒分别通过 CFD 模型和 DEM 模型进行求解,2 个模型按照时间步进行耦合计算,并通过耦合接口进行流体和颗粒数据交互,计算相间质量、动量和能量传递,以源项或作用力形式分别返回 CFD 模型和 DEM 模型中。在基本的耦合框架中,进一步增加非均相化学反应模型,实现气相和颗粒之间的流动、传热、传质和化学反应全过程耦合计算。

#### 1.1.1 气相控制方程

对于气相湍流流动,本工作采用的计算模型如表 1 所示。

表 1 气相计算模型  
Table 1 Gas phase computational models

模型	方程	编号
连续性方程	$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = S_m$	(1)
动量守恒方程	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\boldsymbol{\tau}}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}$	(2)
能量守恒方程	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla[(\rho E + p)\mathbf{u}] = \nabla(\lambda_{\text{eff}} \nabla T) + S_h$	(3)
	其中, $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2}$	
组分传输方程	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla[\rho \mathbf{u} Y_i] = \nabla \left( \rho D_{i,m} + \frac{\mu_t}{Sc_i} \right) \nabla Y_i + R_i + S_i$	(4)
标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型	$k$ 方程 $\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla(\rho \mathbf{u} k) = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \varepsilon$	(5)
	$\varepsilon$ 方程 $\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla(\rho \mathbf{u} \varepsilon) = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$	(6)
	其中, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ , $G_k = 2\mu_t S_{ij} S_{ij}$	

表 1 中,各参数表示的含义分别如下: $\rho$  为气相密度; $\mathbf{u}$  为气相的速度; $S_m$  为气相的质量源项,主要为化学反应导致的气相质量的变化; $p$  为气相的静压; $\mathbf{F}$  为气相和颗粒之间的相间作用力,本文主要考虑曳力,其表达式如式(7)所示; $S_h$  为气相的热量源项; $Y_i$  为气相中  $i$  组分的质量分数; $R_i$  为化学反应引起的  $i$  组分的质量变化; $S_i$  为其他质量源项; $\mu$  和  $\mu_t$  分别为气相的动力黏度和湍流黏度; $k$  和  $\varepsilon$  的湍流普朗特数  $\sigma_k$  和  $\sigma_\varepsilon$  分别取值为  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ;  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_\mu$  为常数:  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$ 。

$$\mathbf{F} = F_{\text{drag}} = \frac{D_{\text{drag}} \rho_f}{(1 - \alpha_f)} (\mathbf{u}_f - \mathbf{u}_p) |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_f| \quad (7)$$

式中: $\alpha_f$  为气相的相含率; $\rho_f$  为气相密度; $\mu_f$  为气相黏度; $\mathbf{u}_p$  和  $\mathbf{u}_f$  分别为颗粒和气相的速度; $d_p$  为颗粒的

粒径。

#### 1.1.2 颗粒控制方程

为了更准确地描述闪速炉内颗粒的运动,采用基于拉格朗日框架的 DEM 模型对颗粒相进行计算。颗粒的运动分为平移和旋转 2 种,其速度和角速度变化通过牛顿第二定律求解,控制方程为式(8)~(9)。

$$m_{p,i} \frac{dv_{p,i}}{dt} = \sum_j F_{c,ij} + F_{pf,i} + F_{g,i} \quad (8)$$

$$I_{p,i} \frac{d\omega_{p,i}}{dt} = \sum_j (T_{ij} + M_{ij}) \quad (9)$$

式中: $m_{p,i}$  为颗粒  $i$  的质量; $v_{p,i}$  和  $\omega_{p,i}$  分别为颗粒  $i$  的速度和角速度; $I_{p,i}$  为颗粒  $i$  的转动惯量; $F_{c,ij}$ 、 $F_{pf,i}$  和  $F_{g,i}$  分别为颗粒  $i$  和颗粒  $j$  之间的接触力、颗粒与流体之间的相互作用力和颗粒的重力,接触力采用

Hertz-Mindlin 接触模型<sup>[14]</sup>进行计算; $T_{ij}$ 为切向力产生的力矩; $M_{ij}$ 为滚动摩擦产生的滚动力矩。

### 1.1.3 曳力模型

气-粒两相之间的曳力采用 Gidaspow 曳力模型<sup>[15]</sup>进行计算。该曳力模型综合了适用于密相气固流动体系(流体体积分率小于 0.8)的 Ergun 曳力模型<sup>[16]</sup>和适用于稀相气固流动体系(流体体积分率大于 0.8)的 Wen&Yu 曳力模型<sup>[17]</sup>。Gidaspow 曳力模型具体表示为式(10)~(11)。

$$D_{\text{dragcoeff}} =$$

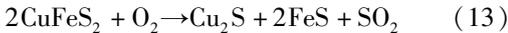
$$\begin{cases} \frac{150(1-\alpha_f)^2\mu_f}{\alpha_f d_p^2} + \frac{1.75(1-\alpha_f)\rho_f|\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_f|}{d_p} & \alpha_f < 0.8 \\ \frac{3}{4}C_d \frac{(1-\alpha_f)\rho_f}{d_p} |\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_f| \alpha_f^{-2.65} & \alpha_f \geq 0.8 \end{cases} \quad (10)$$

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re}(1.0 + 0.15Re^{0.687}) & Re \leq 1000 \\ 0.44 & Re > 1000 \end{cases} \quad (11)$$

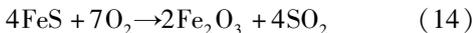
### 1.1.4 主要化学反应

混合精矿颗粒中主要成分为黄铜矿和黄铁矿,在闪速炉内发生的化学反应过程非常复杂<sup>[9]</sup>。随着温度升高,黄铜矿和黄铁矿首先发生分解反应,高价金属硫化物分解为低价的金属硫化物和硫;分解产物进一步发生氧化反应,氧化产物与混合精矿中的石英砂发生造渣反应等。在仿真计算时,需要对炉内的反应过程进行简化,本工作考虑的主要化学反应包括黄铜矿、黄铁矿的分解反应及分解产物 FeS 的氧化反应<sup>[6]</sup>。主要反应过程如下。

黄铜矿、黄铁矿的分解反应:



FeS 的氧化反应:



## 1.2 几何模型

以某 40 万 t 铜闪速熔炼炉为研究对象,构建闪速炉三维几何模型,如图 1 所示。其中,反应塔入口由中心风入口、工艺风入口和流化风(颗粒)入口组成,其局部放大结构如图 2 所示。闪速熔炼炉各结构关键尺寸见表 2。对几何模型进行网格划分,反应塔部分由多面体网格组成,靠近顶部喷嘴位置的网格进行加密处理,底部熔池和上升烟道部分由六

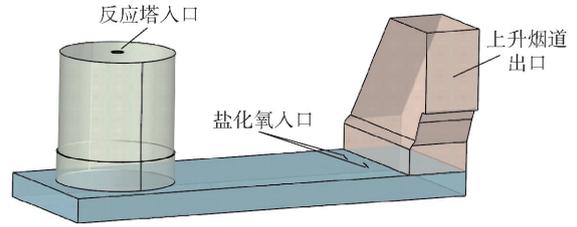


图 1 铜闪速熔炼炉几何模型

Fig.1 Geometric model of copper flash smelting furnace

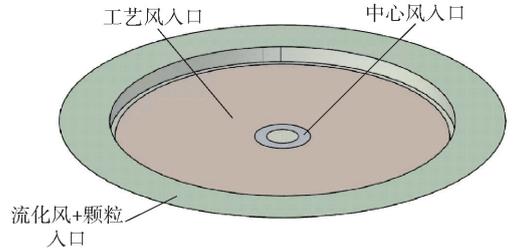


图 2 反应塔入口局部细节

Fig.2 Detail view of the reaction shaft inlet

表 2 闪速熔炼炉关键位置尺寸

Table 2 Dimension scheme of critical sections in the flash smelting furnace

参数	数值	m
反应塔直径	7.00	
反应塔高度	7.90	
沉淀池长度	25.91	
沉淀池烟气空间高度	1.50	
上升烟道出口宽度	3.50	
上升烟道出口高度	5.00	

面体网格组成,网格总数为 29.32 万,网格最大扭曲度为 0.837,最大长宽比 12.58。网格模型见图 3。

### 1.3 工况条件

为研究不同混合精矿投料量下炉内的气-粒分布和反应特性,针对 4 种典型投料量下的闪速熔炼炉进行数值仿真计算,各工况下的操作参数见表 3。混合精矿和流化风入口温度为 80 °C,工艺风、中心风和盐化氧入口温度均为 25 °C。

### 1.4 边界条件

颗粒经由精矿喷嘴进入反应塔内,受喷嘴内颗粒偏析效应影响,其分布呈现非均匀分布特征。基于精矿喷嘴计算工作,获得 4 种工况条件下颗粒在喷嘴出口截面的周向分布结果。具体统计方法为:

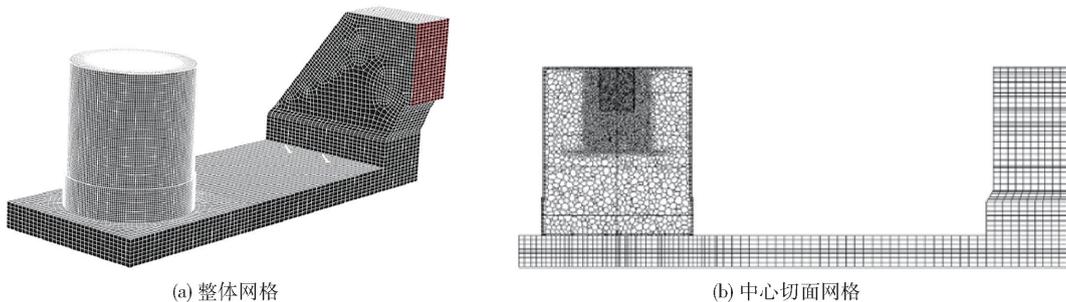


图 3 闪速熔炼炉网格模型

Fig. 3 Mesh model of the flash smelting furnace

表 3 闪速熔炼炉不同工况的操作参数

Table 3 Operating parameters of the flash smelting furnace under different conditions

工况 编号	混合精矿/ (t·h <sup>-1</sup> )	工艺风/ (Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	流化风/ (Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	中心风/ (Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	盐化氧/ (Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
工况 1	161.00	26 943	200	700	1 100
工况 2	245.50	40 624	200	700	1 690
工况 3	305.50	50 338	200	700	2 110
工况 4	332.50	54 752	200	700	2 300

将喷嘴出口沿周向等分为 20 个分区,统计每个分区内颗粒的质量分数,最终得到定量分布极坐标图(图 4),通过该图可直观了解各工况条件下颗粒喷嘴处各分区内的颗粒质量分数。

本工作将分布结果(图 4)作为反应塔颗粒入口边界条件,工艺风在气体喷嘴内形成旋流,并以旋流状态进入反应塔,以气体喷嘴计算所得出口速度结果作为工艺风的入口边界。中心风入口、盐化氧入口及流化风入口均设置为速度入口边界条件,速度

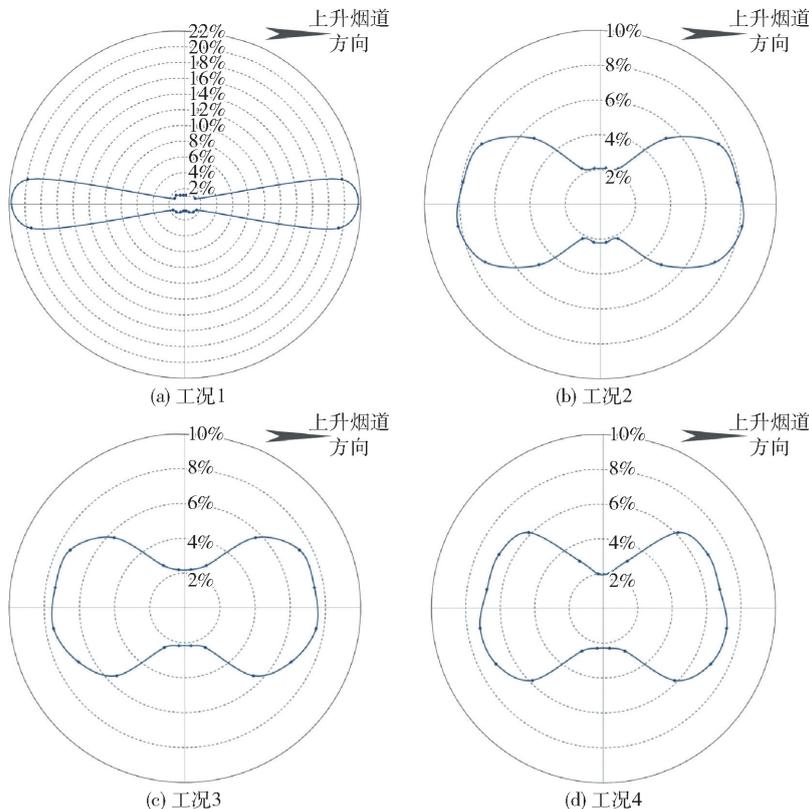


图 4 不同工况下喷嘴出口颗粒周向质量分数分布结果

Fig. 4 Circumferential mass fraction distribution of particles at the nozzle outlet under different operating conditions

大小通过各工况的体积流量(表3)计算所得,上升烟道出口设置为压力出口边界条件,压力值为 $-100\text{ Pa}$ 。

## 2 结果分析

### 2.1 气相速度分布

4种不同工况下反应塔中心截面的气相速度分布云图如图5所示,为使反应塔内的速度分布更为明显,将速度云图的标尺最大值限定为 $40\text{ m/s}$ ,实际各工况在入口处的速度最大值分别为 $61\text{ m/s}$ 、 $95\text{ m/s}$ 、

$118\text{ m/s}$ 、 $128\text{ m/s}$ 。气体进入反应塔后,在4种不同投料量下均呈现锥形自上而下运动。随着投料量的增大,工艺风的量也逐渐增大,因此在反应塔中心气体速度逐渐增大。工况2~工况4气体的分布形态基本一致,锥形分布大小差别不明显;在投料量较小时(工况1),气体分布和其他工况明显不同。在当前视角下,工况1气体在反应塔内的分布更宽,尤其在反应塔下部更明显,这是因为工况1条件下,颗粒在喷嘴出口处的周向分布均匀性相对更不理想(图4(a)),导致进入反应塔后出现明显的偏流。

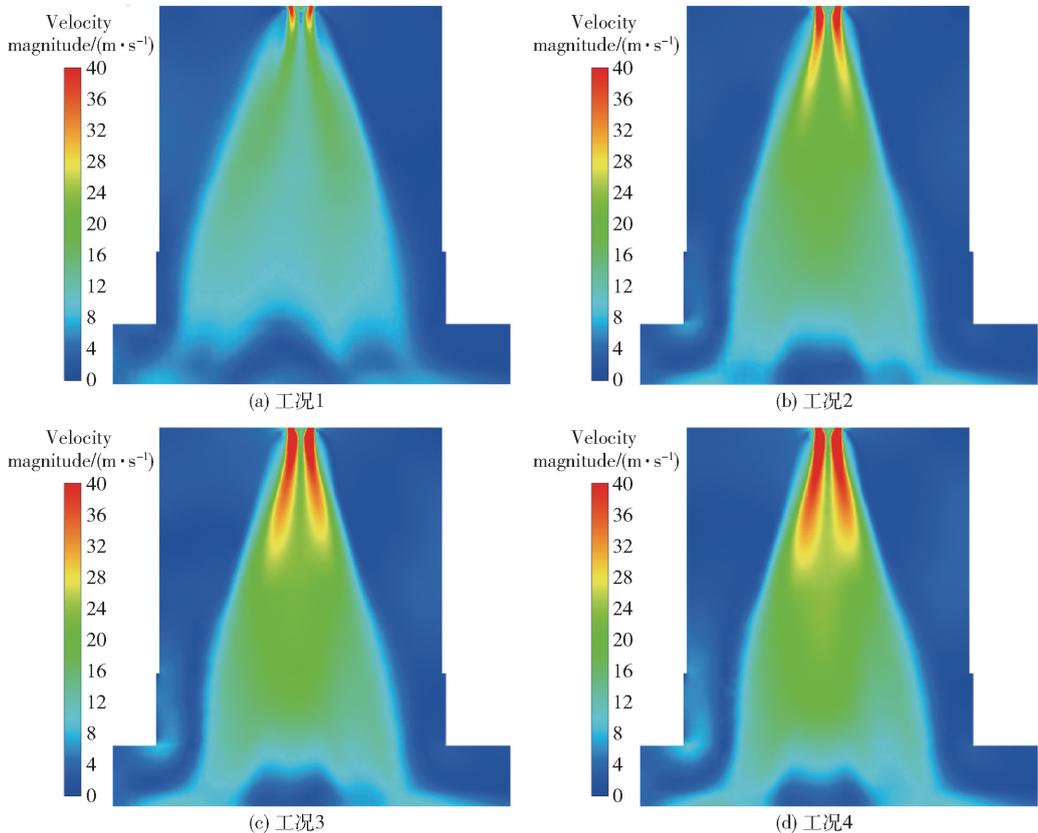


图5 不同工况条件下反应塔中心截面气相速度分布云图

Fig. 5 Contours of gas-phase velocity distribution at the central cross-section of the reaction shaft under different operating conditions

为更清晰地展示反应塔内气相的速度分布情况,图6给出了4种工况条件下距反应塔塔顶分别为 $1.5\text{ m}$ 、 $3\text{ m}$ 、 $4.5\text{ m}$ 、 $6\text{ m}$ 和 $7.9\text{ m}$ 截面处的气相速度分布云图。由图6可知,随着投料量增大,反应塔内气速逐渐增大。由于精矿喷嘴出口颗粒周向分布不均匀,进入反应塔时,在反应塔顶部沿沉淀池长度方向(图6视角左右方向)两侧颗粒较多。不均匀的颗粒入口条件和旋流的工艺风进入反应塔后,在

二者的相互作用下,气相在反应塔水平截面上并不是中心对称分布。工况2~工况4气体呈中间宽两头略窄的分布,且这种分布可以保持到反应塔底部,工况1由于颗粒在喷嘴出口偏析更为严重,导致反应塔水平截面上气体的分布变形更为严重。

为了解气相在沉淀池上部空间的速度分布,取沉淀池气相空间中间高度(距离沉淀池熔池表面 $0.75\text{ m}$ 高度)截面,其速度分布云图如图7所示。

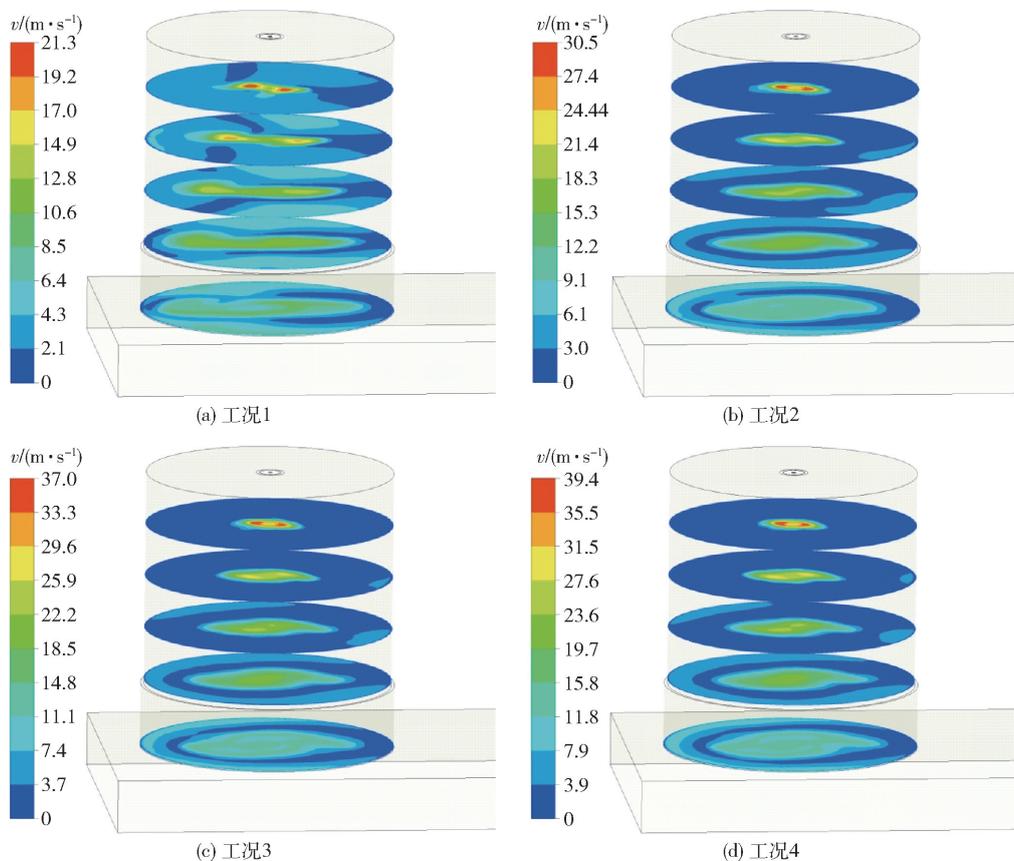


图 6 不同工况条件下反应塔高度截面气相速度分布

Fig. 6 Gas-phase velocity at selection height sections of the reaction shaft under different operating conditions

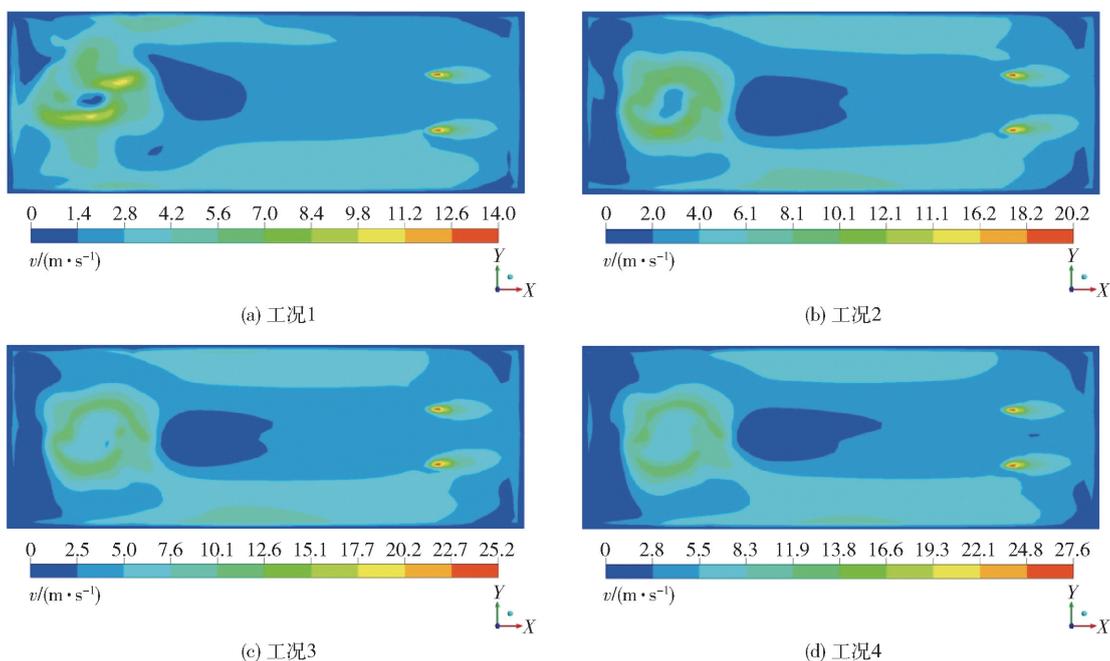


图 7 不同工况条件下沉淀池烟气空间速度分布云图

Fig. 7 Gas-phase velocity contours of the gas space in the settler under different operating conditions

可以发现在反应塔下方气相速度分布并不是中心对称,随投料量增大,反应塔下方位置的速度分布均匀性逐渐增强。在沉淀池烟气空间,气相在中心位置速度较小,靠近沉淀池壁面附近烟气速度较大,且烟气流动方向的右侧(图7下方壁面)速度更大,这与现场观察到的该侧壁面磨损严重的结果相吻合。

## 2.2 气相温度分布

图8为闪速炉中心截面气相温度分布结果。由于反应塔入口气相温度较低(见1.3),进入反应塔

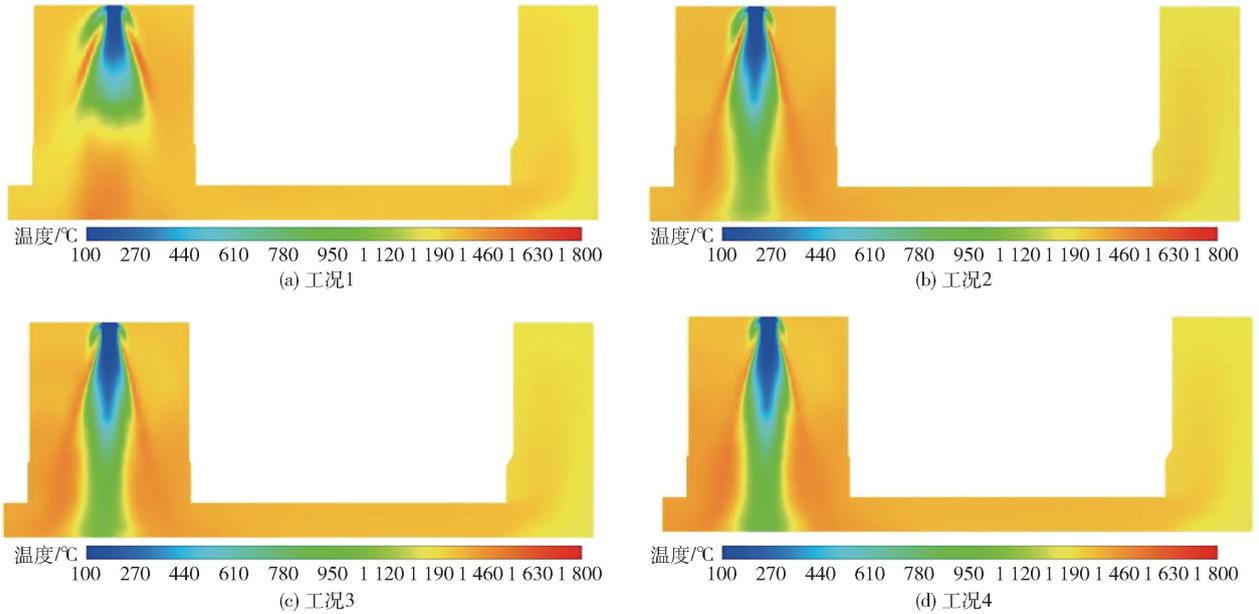


图8 不同工况条件下中心截面气相温度分布

Fig. 8 Gas-phase temperature contours at the central cross-section under different operating conditions

计算反应塔不同高度截面气相平均温度,并绘制气相平均温度随高度变化的曲线,如图9所示。

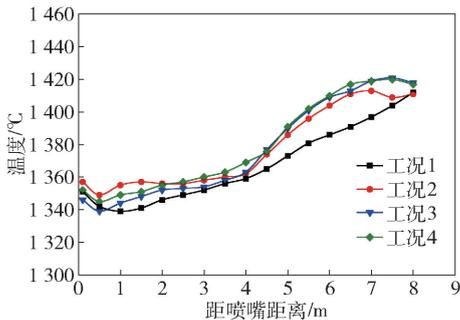


图9 不同工况条件下反应塔截面气相平均温度随高度变化结果

Fig. 9 Variation of the cross-section averaged gas-phase temperature with height in the reaction shaft under different operating conditions

后在喷嘴下方形成气相的低温区。受辐射传热和反应放热等因素影响,在喷入的气体柱(锥形区域)外缘,气相温度较高。和工况2~工况4不同,工况1反应塔中下部中心气相温度较高,这是因为工况1条件下颗粒入口分布不均匀性更强,受两侧分布较为集中的颗粒影响,气体分布相对更扁(图6(a)),在反应塔约2/3高度处,气体和颗粒在反应塔中心位置接触并反应,使该工况条件下反应塔中心位置温度升高。

由图可知,不同投料量下,反应塔内的截面气相平均温度均呈现沿轴向逐渐升高的趋势。在投料量较小时(工况1),气相平均温度整体略低于其他工况。在反应塔底部,4种工况下气相平均温度基本一致,均达到约1420°C。

表4为4种工况条件下统计得到的闪速炉各部位烟气的平均温度。随着投料量增大,闪速炉内的温度略有上升,但是整体差别不明显。在闪速炉内,沉淀池气相空间内烟气平均温度最高,由于沉淀池后端氯化氧的通入(25°C),使进入上升烟道的烟气温度有所下降。

## 2.3 颗粒温度分布

为直观展示颗粒在闪速炉内的分布情况,以颗粒温度为变量分别显示了4种工况条件下2个不同视角的颗粒分布结果,如图10所示。通过对比图10

表4 不同工况条件下闪速炉各部位烟气平均温度

Table 4 Average gas temperatures at characteristic zones of the flash furnace under different operating conditions

位置	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
反应塔	1 366. 24	1 376. 74	1 376. 41	1 379. 21
沉淀池	1 387. 39	1 387. 86	1 388. 39	1 385. 97
上升烟道	1 320. 94	1 330. 96	1 331. 99	1 330. 29

与图5~6,可以发现颗粒在反应塔内的分布状态和气相基本一致,到达沉淀池表面后,大部分颗粒落入沉淀池熔池中,一些小颗粒则会随烟气回流进入反

应塔,或进入沉淀池气相通道。从正视图看工况1颗粒的分散相比其他工况更宽,这与气相流场的分布结果一致。从俯视图可以发现,工况1颗粒分布在反应塔水平截面上呈现一个很扁的近椭圆形,颗粒流动形态向两侧分散;工况2~工况4,随着投料量的逐渐增大,喷嘴出口颗粒分布均匀性增强,颗粒在反应塔水平截面上的分布均匀性也逐渐变好。通过正视图可以发现,颗粒进入反应塔后,在距塔顶1 m 范围内,温度就迅速达到约1 200℃。

### 2.4 颗粒停留时间

通过对不同工况条件下颗粒到达熔池表面的停留时间进行统计分析,得到如图11所示颗粒停留时

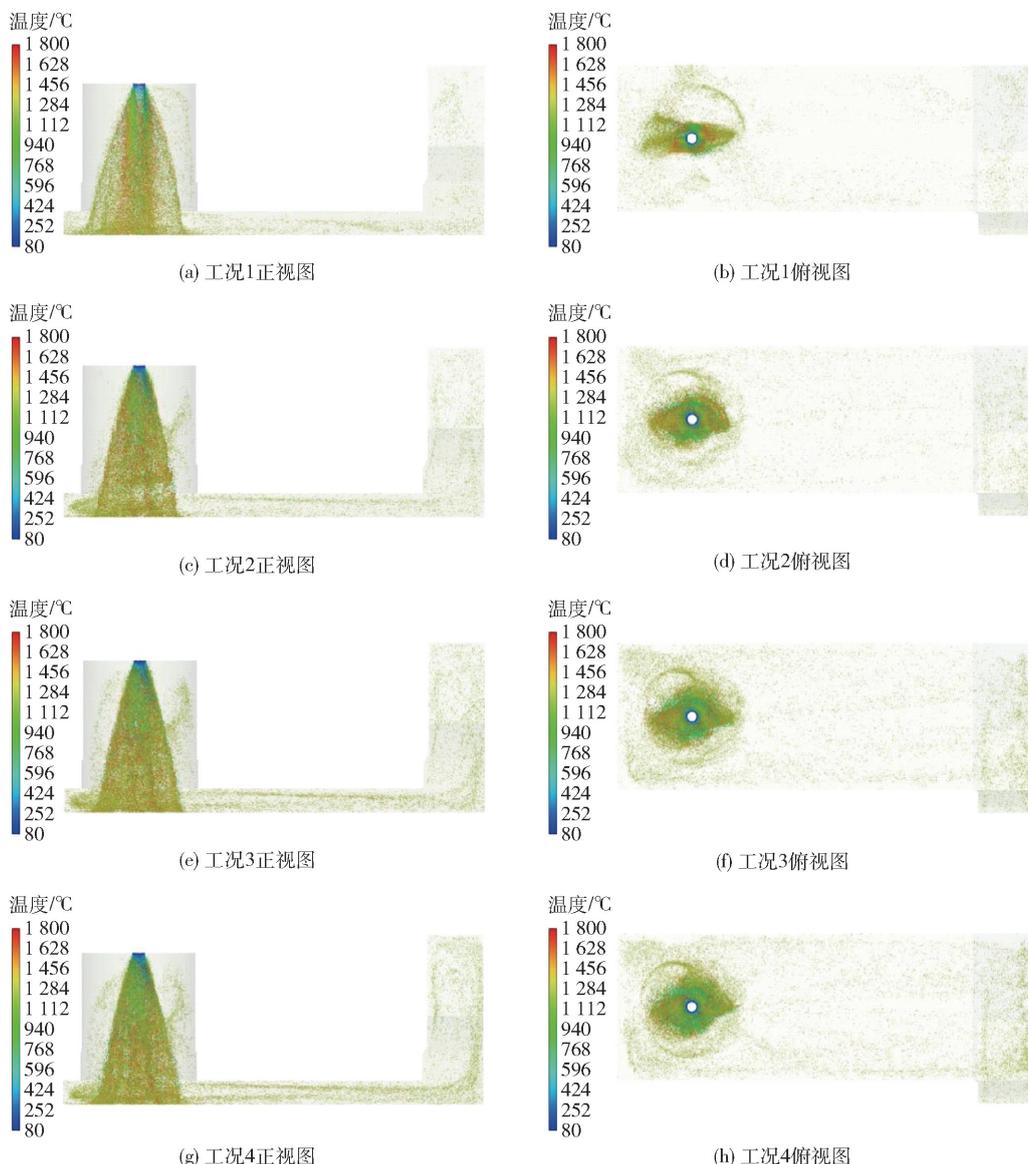


图10 不同工况条件下颗粒分散状态及温度分布

Fig. 10 Particle dispersion patterns and temperature distributions under different operating conditions

间分布曲线和平均停留时间计算结果。图 11(a) 表明,随投料量增大,颗粒停留时间分布曲线呈现明显的左移趋势,停留时间分布略有变窄。由图 11(b) 进一步可知,各工况下的颗粒平均停留时间分别为 0.98 s、0.76 s、0.70 s、0.67 s,表明 4 种工况下大部

分颗粒进入反应塔后均可在 1 s 内下落进入沉淀池。工况 2 ~ 工况 4 颗粒的平均停留时间随投料量增大变化较小;工况 1 由于投料量小,工艺风量相应降低,气体速度较小,颗粒下落速度明显变慢,导致颗粒到达熔池表面时停留时间较其他工况增大。

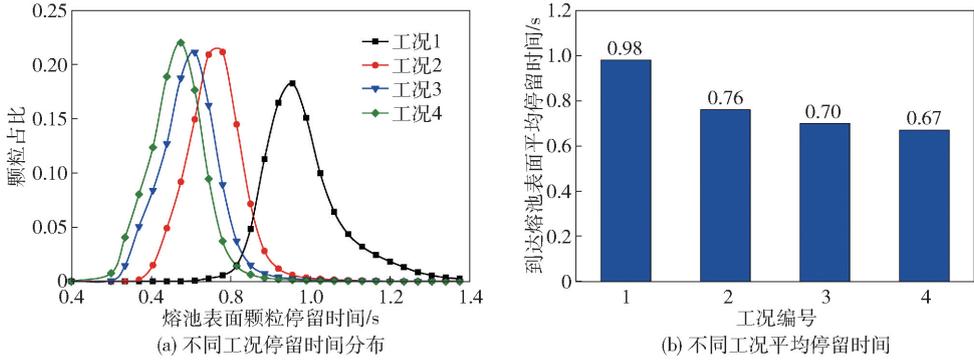


图 11 不同工况条件下熔池表面颗粒停留时间统计结果

Fig. 11 Statistical results of particle residence time on the melt surface under different operating conditions

## 2.5 颗粒组分的质量分数

为分析不同工况条件下颗粒组分变化,图 12 列出了不同工况下闪速熔炼炉内颗粒主要组分的平均

质量分数沿反应塔轴向的分布结果。结果表明,  $\text{CuFeS}_2$  和  $\text{FeS}_2$  的质量分数在距离反应塔顶约 1.5 m 范围内迅速降低,随后变化减缓,表明颗粒在此范围

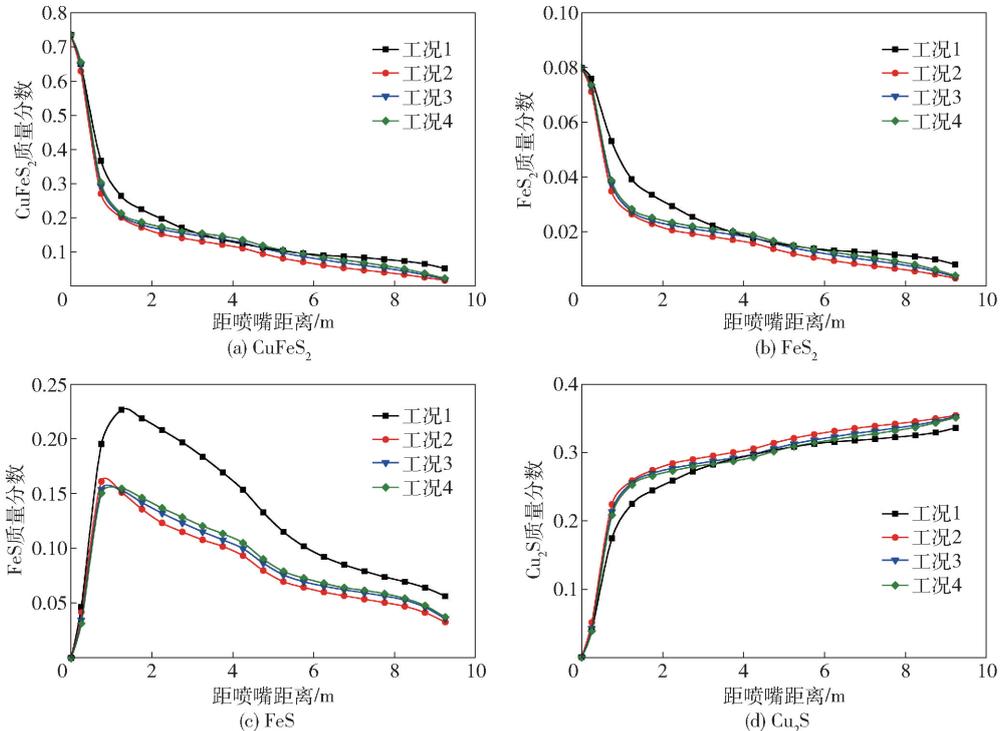


图 12 不同工况条件下颗粒主要组分质量分数沿反应塔高度变化曲线

Fig. 12 Variation of the mass fraction of particle main components with height in the reaction shaft under different operating conditions

内已基本完成主要化学反应。 $\text{FeS}$  作为中间产物,在距离反应塔顶 1.5 m 内呈现逐渐增大的趋势,随后沿反应塔轴向逐渐减少。 $\text{Cu}_2\text{S}$  组分在距离反应塔顶 1.5 m 内质量分数迅速增大,随后增大速度减缓,表明反应速度在距离塔顶 1.5 m 后逐渐减小。工况 1 投料量比较小的条件下,颗粒化学反应的速率和工况 2 ~ 工况 4 有明显的区别。在距离塔顶 3.0 m 高度范围及反应塔底部到沉淀池气相空间(距塔顶 6.0 ~ 9.4 m)内,工况 1 中  $\text{CuFeS}_2$  和  $\text{FeS}_2$  的分解反应速度均明显小于其他工况;而  $\text{FeS}$  质量分数的变化曲线表明,工况 1 条件下  $\text{FeS}$  氧化反应速度始终低于其他工况。工况 2 ~ 工况 4 颗粒的化学反应速度差别不明显,但随着颗粒量增大,反应塔内的化学反应速度略有减小。

### 3 结论

本研究建立了适用于工业级铜闪速熔炼过程的 CFD-DEM 多相多物理场耦合仿真模型,全面描述炉内颗粒和气相的流动与分散状态、传热和传质特性以及非均相化学反应过程。通过对某铜闪速熔炼炉实际生产中的 4 种典型工况条件进行仿真计算和结果分析,研究了混合精矿投料量、工艺风和盐化氧风量变化对闪速熔炼炉气-粒两相运动、传热、传质及化学反应的影响。

通过将精矿喷嘴出口颗粒的不均匀分布引入反应塔颗粒入口边界条件,获得不同工况条件下更为准确的反应塔内气相与颗粒的分布状态。仿真结果表明:①投料量变化对反应塔内气体-颗粒的分布状态具有明显影响,投料量较小时(工况 1),喷嘴出口颗粒周向分布均匀性不理想,导致进入反应塔后气相与颗粒的分布向两侧分散,气相及颗粒的锥形分布变形更为明显;②在当前研究的 4 种典型投料量下,颗粒从反应塔塔顶下落至熔池表面的停留时间均在 1 s 以内,停留时间分布曲线随投料量增加而左移,平均停留时间缩短;③颗粒进入反应塔后温度和组分质量分数均发生急剧变化,表明大部分化学反应在颗粒自喷嘴下落约 1.5 m 范围内完成,随后反应速度减缓,在进入反应塔 3.0 m 范围内,工况 1 条件颗粒化学反应速率明显低于其他工况。

通过多种典型工况仿真结果对比,研究了在改变气-粒空间分布状态条件下投料量影响反应效率的作用机制,为闪速熔炼生产过程的操作调控提供

一定的理论依据。

#### [参考文献]

- [1] 朱祖泽, 贺家齐. 现代铜冶金学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] 姜保成, 郭学益, 王亲猛, 等. 铜闪速熔炼多相流模型化研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(1): 207 - 228.
- [3] 袁精华. 高强度冶炼闪速炉优化设计对策[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(6): 39 - 43.
- [4] 许俊, 张建平, 张更生, 等. 闪速炉纯氧冶炼技术应用实践[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(3): 30 - 35.
- [5] 陈卓, 王云霄, 宋修明, 等. 高投料量下炼铜闪速炉内熔炼过程的数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(11): 2916 - 2921.
- [6] 郭天宇, 姚心, 王成成, 等. 冶炼电孤炉多物理场耦合仿真分析及结构优化[J]. 绿色矿冶, 2024, 40(6): 58 - 66.
- [7] 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(2): 23 - 30.
- [8] 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.
- [9] 骆伟. 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.
- [10] Gao D B, Peng X Q, Song Y P, et al. Mathematical modelling and numerical optimization of particle heating process in copper flash furnace [J]. Transactions of Non-ferrous Metals Society of China, 2021, 31(5): 1506 - 1517.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 朱殷斌, 任鹏, 吴辉, 等. 铜闪速吹炼炉操作参数优化的数值模拟研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(2): 14 - 22.
- [14] Sadd M H, Tai Q, Shukla A. Contact law effects on wave propagation in particulate materials using distinct element modeling [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 1993, 28(2): 251 - 265.
- [15] Gidaspow D, Bezburuah R, Ding J. Hydrodynamics of circulating fluidized beds: kinetic theory approach [C].

- Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization, 1992: 75 – 82.
- [16] Ergun S. Fluid flow through packed columns[J]. Chemical Engineering Progress, 1952, 48(2):89 – 94.
- [17] Wen C. Y., Yu Y. H. Mechanica of fluidization[J]. American Insitute of Chemical Engineers Symposium, 1966, 62: 100 – 111.

## Research on multi-condition optimization of metallurgical copper flash furnace based on multi-physics coupling simulation technology

GUO Tianyu<sup>1</sup>, LI Qian<sup>1</sup>, LUO Yi<sup>2</sup>, LI Li<sup>2</sup>, CHEN Si<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** The gas-particle mixing and reaction characteristics in a copper flash smelting furnace are significantly influenced by the feed rate, but the mechanism by which feed rate variations affect the dispersion of the two-phase system and heterogeneous reactions remains unclear. Based on the CFD – DEM coupling method, a multi-physics coupling simulation model for the copper flash smelting process was established in this study. Through simulations of four typical feed conditions, the influence of feed rate changes on the two-phase flow, dispersion, and chemical reaction characteristics in the furnace was systematically studied. The results show that the average residence time of particles on the melt surface of the settling is less than 1 s, and it decreases as the feed rate increases. At a lower feed rate (161 t/h), the enhanced circumferential non-uniformity of particle distribution at the nozzle outlet leads to significant distortion of the conical distribution of the gas-particle two-phase flow in the reaction shaft, resulting in a notably lower reaction rate within the 3.0-meter range below the shaft roof compared to other conditions. This research reveals the mechanism by which the feed rate affects the reaction efficiency by changing the spatial distribution of gas-particle, providing a theoretical basis for optimizing process parameters in flash smelting.

**Keywords:** copper; flash smelting; multi-condition; multi-physics coupling simulation; CFD; DEM; model

