

引用格式: 谢剑才, 李兵, 王放, 等. 铜闪速炉上升烟道结构对烟尘粘结影响的数值分析[J]. 有色设备, 2024, 38(6): 50-57.

XIE Jiancai, LI Bing, WANG Fang, et al. Numerical analysis of effect of copper flash smelting furnace flue structure on dust adhesion[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(6): 50-57.

# 铜闪速炉上升烟道结构对烟尘粘结影响的数值分析

谢剑才<sup>1</sup>, 李兵<sup>2</sup>, 王放<sup>1</sup>, 范进军<sup>1</sup>, 陈卓<sup>2</sup>, 万兴邦<sup>2\*</sup>

(1. 金隆铜业有限公司, 安徽 铜陵 244021; 2. 中南大学 能源科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

**[摘要]** 铜冶炼过程中上升烟道烟尘粘结常常对生产的稳定性及安全性造成显著影响, 因此一直是铜冶炼企业共同关注的重要问题之一。本文以铜闪速熔炼过程为对象, 基于数值仿真方法对当前闪速炉沉淀池出口与上升烟道连接部位典型结构下的烟气流动过程进行数值模拟与分析, 通过比较不同结构下烟气流动过程特点发现: 当采用“拱顶”加速型烟道连接结构时, 上升烟道内的烟尘粘结主要发生在与沉淀池出口同侧壁面的回流区以及对侧的壁面高速区附近, 这一结果与生产现场炉体检修时发现的上升烟道主要结瘤部位相一致; 相比较而言, 沉淀池出口与上升烟道采用“平顶”连接型结构时, 烟道内局部高速区域有所减小, 烟道入口处的烟气平均速度降低 18.2%, 烟气的流通效果更好; 此外, 对颗粒相分析发现, 平顶结构设计下, 进入烟道的烟尘颗粒含量降低了 9.5%, 表明用平顶结构在一定程度上有助于减轻上升烟道内的烟尘粘结与结瘤现象。

**[关键词]** 炼铜闪速炉; 烟尘粘结; 上升烟道; 沉淀池; 数值模拟

**[中图分类号]** TF811

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1003-8884(2024)06-0050-08

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.06.007

闪速炼铜技术是现代铜冶炼中的主要技术之一, 具有产能大、综合能耗低、自动化程度高等优点<sup>[1]</sup>, 每年采用闪速炼铜技术生产的金属铜占全球铜总产量的 40% 以上<sup>[2]</sup>。闪速炉是闪速炼铜工艺中的核心设备, 其炉体结构包括反应塔、沉淀池及上升烟道等部分<sup>[3]</sup>。在闪速炉生产中, 上升烟道内产生烟尘粘结是生产实践中的常见问题, 但当烟尘粘结严重甚至发生结瘤时, 则不仅会显著影响炉内烟气流动, 给生产操作带来困难, 而且可能对设备运行效率与炉体安全造成不利影响, 因而引起闪速炉生产企业的普遍关注。

针对这一问题学者们进行了一系列的研究和探索。吴建华<sup>[4]</sup>通过总结生产实践经验, 提出造成上升烟道内烟尘粘结的原因主要有炉内烟气转向、渣层中  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  含量高以及炉况波动等, 并提出采取定

点投入焦炭还原粘结块、高温烧融等措施来有效减少上升烟道中的烟尘粘结以及结瘤问题。黄文华<sup>[5]</sup>在上升烟道结构设计中引入了天然气烧嘴以助于处理烟道结瘤问题, 有效提高了烟道的作业率。袁精华<sup>[6]</sup>在闪速炉结构优化设计中建议适当增加沉淀池宽度和气相空间高度, 并将烟气流速控制在 6 m/s 以下, 以减少烟气对炉体壁面冲刷并降低烟尘发生率。简正柱等<sup>[7-8]</sup>在某闪速炉改造方案中, 根据改造后的烟气温度、烟气量及余热锅炉入口的烟气温度, 提出了扩大烟道内径及出口尺寸从而增加冷却强度并控制出口烟气流速的改进方案, 并采用数值模拟的方法验证了方案的合理性。彭天照<sup>[9-10]</sup>认为烟道结瘤的源头是闪速炉内烟尘发生率高, 因此可针对性地采取措施降低炉内烟尘率, 如在工艺方面可改良冰铜喷嘴结构, 在炉体结构方面应尽量扩大烟道出口尺寸, 在烟道墙两侧设置烧嘴, 并保证烟道出口处的密封性防止漏风等。甘聪<sup>[11]</sup>在综合分析烟尘性质异常原因的基础上, 提出加强对原料成分、精矿反应、烟气温度及相关参数进行合理控制, 并通过加强对排烟系统的检查清理等针对性措施, 极大地减少了上升烟道开口部及锅炉辐射部第一挡屏的粘结现象。郭引刚等<sup>[12]</sup>通过对结瘤成分进行分析得出了烟尘粘结形成的原因有烟气含

**[收稿日期]** 2024-08-20

**[第一作者]** 谢剑才(1983—), 男, 湖南双峰人, 工程师, 大学本科, 主要从事铜冶炼生产技术工作。

**[通信作者]** 万兴邦(1992—), 男, 湖南常德人, 副教授, 博士, 主要从事有色金属的高效提取及其过程强化调控研究。

**[基金项目]** 国家重点研发计划-循环经济关键技术与装备-铅锌矿搭配金属基固废铅锌同步冶炼成套装备与集成示范(2022YFC3901605)。

尘量大、炉况波动引起的精矿颗粒在反应塔反应不完全以及精矿杂质含量高等,并通过采取调整烧嘴位置、天然气量和煤粉加入量等措施有效降低了铜闪速吹炼炉烟道出口的烟尘粘结问题,保证了闪速炉的安全稳定运行。董广刚<sup>[13]</sup>通过试验对比了爆破法和局部过热法在控制上升烟道出口粘结上的效果,结果表明局部过热法更有助于解决闪速炉上升烟道出口粘结问题,大幅提高了闪速炉的作业率。杨述凯等<sup>[14]</sup>根据上升烟道内的烟尘粘结机理制订了鼓氧、添加粘结抑制剂和上升烟道点油枪等处理方案,并对几种方案的实施效果进行了对比,结果表明鼓氧和上升烟道点油枪处理方案均有利于抑制上升烟道内的烟尘粘结现象。

上述研究工作主要集中在对上升烟道结构以及闪速炉生产操作的改进方面<sup>[15-18]</sup>,针对引起烟道内烟尘粘结的机理分析较少。本文针对当前闪速炉沉淀池与上升烟道连接部“拱顶”加速型与“平顶”连接型 2 种典型结构下炉内高温烟气流动过程开展数值模拟与分析,来探究不同结构型式对闪速炉上升烟道内的烟气运动与烟尘粘结的影响,以此为上升烟道的结构与优化提供参考。

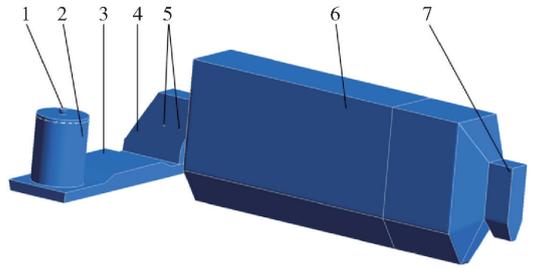
## 1 数值模型的构建

### 1.1 物理模型

为正确模拟沉淀池与上升烟道内烟气流动过程,本文以某工业闪速炉为对象,建立了包含了闪速炉反应塔(包括精矿喷嘴)、沉淀池气相空间、上升烟道、余热锅炉辐射部以及部分对流部空间在内的数值计算物理模型。物理模型中反应塔近似为圆柱形,其高径比  $H/D$  为 1.3;沉淀池长度 24 m,其中反应塔下方沉淀池气相空间高 1.2 m,在反应塔出口方向,沉淀池顶部呈  $10^\circ$  向上倾斜,在与上升烟道连接部呈  $10^\circ$  向下倾斜,沉淀池中部高度 2 m;上升烟道高度为 7 m,与余热锅炉连接部出口截面尺寸为  $2.7\text{ m} \times 4\text{ m}$ ;余热锅炉辐射部尺寸为长  $34\text{ m} \times$  宽  $7\text{ m} \times$  高  $16\text{ m}$ 。物理模型离散化采用结构化网格与非结构化网格相结合的方式,并对精矿喷嘴、天然气烧嘴等区域进行局部网格加密,计算域总网格数约 213 万。

### 1.2 数学模型

数值模拟中将气相与颗粒相运动与传热过程视为稳态过程,其中气相的质量、动量与能量传递过程



1—精矿喷嘴; 2—反应塔; 3—沉淀池气相空间; 4—上升烟道; 5—天然气烧嘴; 6—余热锅炉辐射部; 7—余热锅炉对流部

图 1 数值仿真物理模型

Fig. 1 Physical models for numerical simulation

采用欧拉法求解,颗粒相的运动与传热过程采用拉格朗日法求解。用以描述和求解气粒两相传递过程的控制方程如下<sup>[19]</sup>。

#### 1.2.1 气相传递过程通用控制方程

在对该过程气相进行描述时,其质量传递、动量传递与热量传递控制方程具有相似的表述形式。在稳态条件下其通用控制方程见式(1)。

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi + S_{p\phi} \quad (1)$$

式中: $\rho$  为密度; $u_i$  为速度分量; $\phi$  为通用因变量; $\Gamma_\phi$  为广义扩散系数; $S_\phi$  为来自于气相的源项; $S_{p\phi}$  为来自于气相与颗粒相相互作用产生的源项。

气相通用控制方程中各项所对应的取值见表 1。

表 1 气相通用控制方程中各项所对应的取值  
Table 1 Corresponding values in the gas-phase general control equations

方程	$\phi$	$\Gamma_\phi$	$S_\phi$	$S_{p\phi}$
连续性	1	0	0	$S_{pm}$
动量	$u_i$	$\mu_{\text{eff}}$	$-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nabla \left( \mu_{\text{eff}} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) + \rho g_i$	$S_{pmi}$
湍动能	$k$	$\mu_0 + \frac{\mu_T}{\sigma_k}$	$G_k + G_b - \rho \varepsilon$	0
湍动能耗散率	$\varepsilon$	$\mu_0 + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}$	$\frac{\varepsilon}{k} (c_1 G_k - c_2 \rho \varepsilon)$	0
能量	$h$	$\frac{\mu_0}{Pr} + \frac{\mu_T}{\sigma_h}$	$Q_{\text{rad}} + Q_r$	$S_h$
组分	$Y_i$	$\frac{\mu_0}{Sc} + \frac{\mu_T}{\sigma_Y}$	$R_i$	$S_{pY}$

表 1 中的分  $u_i$  为速度分量; $k$  为湍动能; $\varepsilon$  为湍动能耗散率; $h$  为热焓; $Y_i$  为气相中第  $i$  种组分的质量分数; $\mu_{\text{eff}}$  代表有效黏度,为分子黏度  $\mu_0$  与湍流黏度  $\mu_T$  之和,其中  $\mu_T = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$ ;  $\rho g_i$  ( $i = x, y, z$ ) 为重力

产生的沿*i*方向上的体积力分量; $G_k$ 为湍动能生成项; $G_b$ 为浮力生成项; $\sigma_k$ 为湍动能的普朗特常数; $\sigma_\epsilon$ 为湍流耗散率的普朗特常数; $\sigma_h$ 为能量方程中的普朗特常数; $\sigma_Y$ 为气相组分输运方程中的普朗特常数; $Pr$ 为普朗特数; $Sc$ 为施密特数; $Q_{rad}$ 和 $Q_r$ 分别为辐射换热与化学反应热产生的源项; $R_i$ 为化学反应过程中组分*i*的生成率; $S_{pm}$ 、 $S_{puj}$ 、 $S_h$ 、 $S_{pY}$ 分别代表由于气粒相互作用而带给各个控制方程的源项; $c_\mu$ 、 $c_1$ 、 $c_2$ 为常数。

### 1.2.2 颗粒相求解控制方程

描述颗粒相运动与传热过程的控制方程包括运动方程与能量守恒方程。在求解颗粒相运动过程时,颗粒受力仅考虑重力及气相运动对颗粒产生的作用力,其运动方程如式(2)所示<sup>[20]</sup>。

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (2)$$

式中: $u$ 和 $u_p$ 分别为气相与颗粒相的速度; $\rho$ 和 $\rho_p$ 分别为气相与颗粒相的密度; $g$ 为重力加速度; $F_D$ 为气相对颗粒的作用力(当气相速度小于颗粒速度时为阻力,反之则为曳力)。

颗粒传热过程控制方程如式(3)所示<sup>[21]</sup>。

$$\sum (m_p C_p) \frac{dT}{dt} = Q_c + Q_r + Q_{rad} \quad (3)$$

式中: $m_p$ 为颗粒的质量; $C_p$ 为颗粒的比热容; $T$ 为颗粒的温度; $Q_c$ 为颗粒相与气相之间的对流换热; $Q_r$ 为化学反应热; $Q_{rad}$ 为颗粒与气相、颗粒与颗粒、颗粒与壁面之间的辐射传热。

### 1.3 闪速熔炼过程化学反应设置

根据闪速炼铜过程的反应机理<sup>[2]</sup>,本文在仿真计算中共设置了8个反应来模拟该过程(表2)。

### 1.4 数值求解边界条件设置

数值模型中设置的边界条件类型包括壁面、气相入/出口边界和颗粒相注入边界等。

#### 1.4.1 壁面边界条件设置

数值计算中各壁面均设置为无滑移壁面,并采用标准壁面函数进行计算;各壁面设置为定温边界,根据实际的物理场中温度分布设置具体的温度数值。

#### 1.4.2 气相入口边界设置

气相入口包括闪速炉喷嘴和烧嘴的气相入口,均设置为质量流量入口,其数值为实际运行基准工况下的配风参数,工艺风量为25 000 Nm<sup>3</sup>/h,氧浓度为76.3%,中央氧流量和分散风量分别为1 300和

表2 闪速熔炼化学反应模型

Table 2 Chemical reactions during copper flash smelting

反应类型	化学反应方程式
氧化分解反应	1 2CuFeS <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> → Cu <sub>2</sub> S + 2FeS + SO <sub>2</sub>
	2 2Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub> + O <sub>2</sub> → 5Cu <sub>2</sub> S + 2FeS + SO <sub>2</sub>
	3 3FeS + 5O <sub>2</sub> → Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> + 3SO <sub>2</sub>
氧化反应	4 2Cu <sub>2</sub> S + 3O <sub>2</sub> → 2Cu <sub>2</sub> O + 2SO <sub>2</sub>
	5 FeS <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> → FeS + SO <sub>2</sub>
	6 FeS + 3Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> → 10FeO + SO <sub>2</sub>
	7 3Cu <sub>2</sub> O + FeS → 6Cu + FeO + SO <sub>2</sub>
造渣反应	8 2FeO + SiO <sub>2</sub> → Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>

2 000 Nm<sup>3</sup>/h,烧嘴天然气量为180 Nm<sup>3</sup>/h、空气量为900 Nm<sup>3</sup>/h。

#### 1.4.3 气相出口边界设置

计算区域的出口设置在余热锅炉的对流部,其边界条件设为压力出口,数值设为-20 Pa(表压)。

#### 1.4.4 颗粒相注入边界设置

闪速熔炼过程中的入炉物料由干精矿与烟灰按表3所示配比掺混而成,其物相组成、粒径分布均为现场取样分析所得结果<sup>[22]</sup>(表4、表5),仿真计算过程中使用的各物料成分的相关物性参数如表6所示。

表3 基准工况下配料参数

Table 3 Feedstock parameters under baseline operating conditions

入炉物料	t/h		
	干精矿	烟灰	总计
质量	180.0	9.3	189.3

表4 干矿和烟灰成分

Table 4 The composition of dry ore and ash %

物相种类	干精矿		烟灰	
	质量分数	物相种类	质量分数	物相种类
CuFeS <sub>2</sub>	66.5	CuSO <sub>4</sub>	29.5	
FeS <sub>2</sub>	4.0	Cu <sub>2</sub> O	13.2	
SiO <sub>2</sub>	16.4	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	8.8	
Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>	2.5	SiO <sub>2</sub>	6.6	
Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	10.6	Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	41.9	

表5 入炉物料的粒径分布

Table 5 Particle size distribution of feedstock materials

入炉物料	μm		
	最小直径	最大直径	平均粒径 d*
干精矿+烟灰	20.0	200.0	55.4

表 6 入炉物料各成分相关物性参数

Table 6 Physical property parameters of feedstock components

入炉物料 成分	定压比热容/ ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	标准生成焓/ ( $\text{kJ}\cdot\text{kmol}^{-1}$ )	标准生成熵/ ( $\text{kJ}\cdot\text{kmol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
$\text{CuFeS}_2$	540	$-1.9 \times 10^5$	124.9
$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$	750	$-3.8 \times 10^8$	361.9
$\text{FeS}_2$	659	$-1.7 \times 10^5$	52.9
$\text{Cu}_2\text{O}$	574	$-0.8 \times 10^5$	116.2
$\text{Fe}_3\text{O}_4$	868	$-11.1 \times 10^5$	146.2
$\text{SiO}_2$	537	$-9.1 \times 10^5$	41.5
$\text{CuSO}_4$	619	$-7.7 \times 10^5$	109.0
$\text{Fe}_2\text{SiO}_4$	770	$-2.6 \times 10^5$	60.8

## 2 上升烟道烟尘粘结机理分析

### 2.1 闪速炉烟尘粘结特性

闪速炉中烟尘主要来源于反应塔中的小颗粒以及沉淀池中被烟气夹杂的铜铈与炉渣小液滴等。按照烟尘特点及粘结发生的温度区间通常可以将烟尘分为粘结性烟尘、粘附性烟尘以及松散性烟尘<sup>[23-25]</sup>。①粘结性烟尘主要存在于高温区(1 170 K 以上),大部分烟尘呈熔融或半熔融状态下形成的积灰,烟尘性质主要表现为粘结性强,难于清理;②粘附性烟尘主要存在于过渡区(920 ~ 1 220 K),烟尘大部分为固体颗粒,有部分熔融,在一定外力作用下可使烟尘脱落;③松散性烟尘(920 K 以下)则多为固体烟尘,可采用机械清灰方式予以清理。在生产中形成烟尘结瘤问题的通常是第一、二种烟尘,由大量烟尘(尤其是粘结性烟尘)堆积而形成的结瘤不仅需要定期清理,当结瘤严重时还需要采取爆破等方法予以清除,否则将给生产及安全均造成严重影响。

通过从余热锅炉灰斗中取得的烟尘样品并进行分析得到烟尘中的主要可能物相及其熔点如表 7 所示。在闪速熔炼过程中,其氧势条件使得金属氧化物在上升烟道中难以盐化,且大部分金属硫酸盐在 1 170 K 左右又会分解成氧化物,因此,上升烟道烟尘中的物相主要是金属氧化物。可以看到,铅、砷等氧化物熔点均在 1 170 K 以下,铜的氧化物熔点也在 1 470 K 左右,烟尘中这些低熔点物质在烟气高温条件下可能处于熔融状态,一旦撞击到炉体壁面极易在壁面固结或附着而形成粘接性烟尘或粘附性烟尘,而高熔点的氧化物在烟气中其表面或整体已发生固结,当这些固体颗粒附着到炉体壁面则多形成

松散性烟尘。因此,烟尘成分、烟气流动与温度条件是影响烟尘粘结的重要因素。

表 7 烟尘颗粒物相及其熔点

Table 7 Phase composition and melting point of dust particles

颗粒物相	MgO	CaO	ZnO	PbO
熔点/K	3 125	2 853	2 248	1 161
颗粒物相	$\text{As}_2\text{O}_3$	$\text{Cu}_2\text{O}$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_3\text{O}_4$
熔点/K	585	1 508	1 838	1 867

### 2.2 上升烟道中烟气流动与烟尘粘结的数值模拟结果分析

数值模拟中选取了 10 个截面(包括上升烟道入口面、出口面、上升烟道中南北方向的 7 个截面以及闪速炉南北方向中心截面)来进行数据处理与结果展示,以分析沉淀池与上升烟道内气相与颗粒的流场与温度场分布情况。典型截面的选取如图 2 所示。

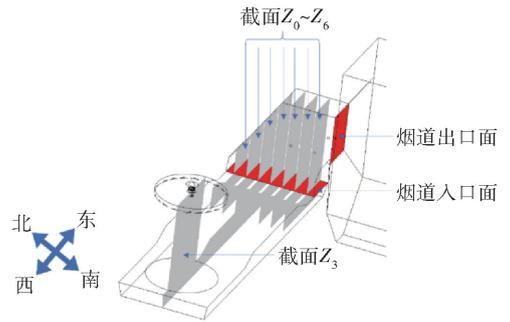


图 2 典型截面的选取示意

Fig. 2 Schematic diagram of typical cross-sections

图 3 为上升烟道南北方向  $Z_0 \sim Z_6$  共 7 个截面的温度云图。由图可知,在上升烟道入口处、烟道东侧以及西侧近壁区域气相速度较高,其中最大烟气流速可达 5 m/s 左右。

进一步,通过图 4 对中心截面上的气相速度矢量结果进行分析可知,气流在进入上升烟道后出现回卷,并在西侧壁面下部形成了一个高速区域;同时靠近东侧壁面的气相速度也较高。这些区域的烟气流速大,可夹带的烟尘颗粒多,当烟气冲击到壁面时,夹带的烟尘容易附着在壁面而发生粘结。这一结果与闪速炉生产现场炉体点检时发现的上升烟道东西侧壁面结瘤较为严重的现象相符合。

图 5 所示为上升烟道各截面上的温度分布云图。可以看到,上升烟道内的烟气温度均为 1 500 K 以上,最高可达 1 600 K,其中烟道西侧壁面附近的

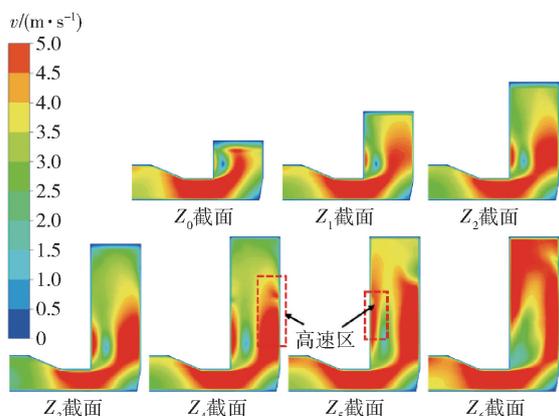


图3 上升烟道南北向不同截面速度分布云图

Fig.3 Velocity contours of different cross-sections in north and south directions of the upward flue

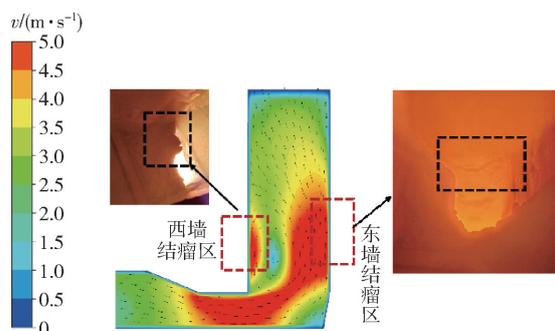


图4 上升烟道南北中心截面气相矢量图及现场对应位置结瘤照片

Fig.4 Gasphase vectors of the north and south central cross-sections in the upward flue and corresponding onsite pictures

气相平均温度要高于东侧。在此温度条件下,烟尘中  $\text{Cu}_2\text{O}$ 、 $\text{PbO}$  等低熔点氧化物可能为熔融状态,这些颗粒随着烟气流动而冲击到壁面后,一方面,可能在壁面形成粘结性烟尘;另一方面,这些颗粒附着在壁面后可能形成一层熔融/半熔融粘附层,使得其他熔融或固结颗粒附着后形成粘结性或粘附性烟尘。当烟尘量大、烟尘性质异常时,则可能使得上升烟道壁面粘结严重甚至产生结瘤。

### 3 不同烟道连接型式下烟尘粘结特点分析与对比

闪速炉体中“拱顶”加速型以及“平顶”连接型结构是当前闪速炉炉体设计中 2 种典型的沉淀池与上升烟道连接型式。其中,“拱顶”加速型结构的设

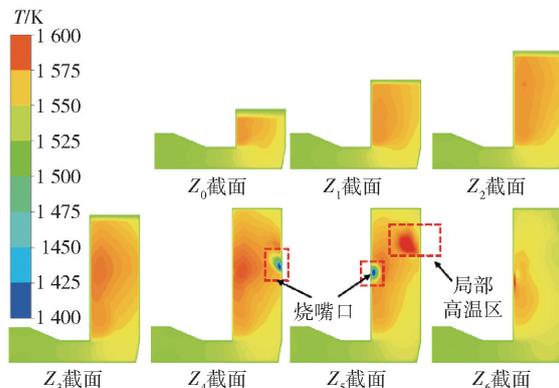


图5 上升烟道南北向不同截面温度分布云图

Fig.5 Temperature contours of different cross-sections in north and south directions of the upward flue

计思想是通过减小沉淀池出口面积来加快烟气流速,加强烟气湍流,从而促使更多的烟尘液滴碰撞并附着在炉体壁面上,达到降低烟尘率的目的。“平顶”连接型结构在生产实践中应用更为广泛,其设计理念是采用较大的沉淀池出口,使得烟气流速降低,夹带的烟尘沉降下来。2 种结构设计各有特点,本节通过数值模拟对这 2 种烟道连接型式下的烟气流动与烟尘粘结特点进行分析。

如图 6 所示,在上述沉淀池拱顶结构的基础上将沉淀池与上升烟道连接处的下降段去除,将沉淀池顶由最高处水平延伸并与上升烟道相连接,即将上升烟道部分由原来的拱顶(A1)结构改为平顶(A2)结构,并在与上文相同的工况条件下对其进行数值仿真分析。

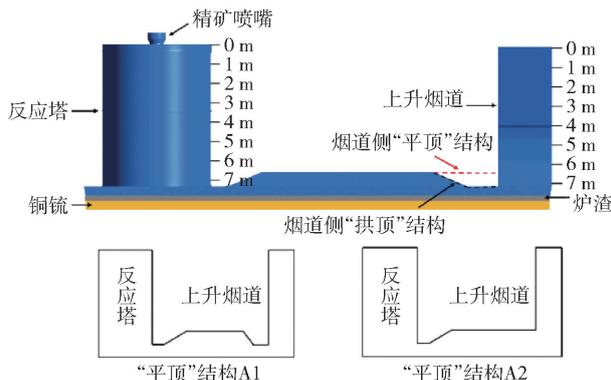


图6 上升烟道的“拱顶”以及“平顶”结构示意

Fig.6 Schematic diagram of the “Arch Roof” and “Flat Roof” structures in the upward flue

#### 3.1 上升烟道内烟气流动特点

图7为2种连接型式下上升烟道内不同截面上

的气相速度云图。由图 7 可知,在上升烟道入口处,以靠近沉淀池顶与烟道东侧壁面区域内的气相速度较高。同时,气流在进入上升烟道后出现回卷,在靠近西侧壁面处形成了一个局部高速区域。通过比较可以发现,将上升烟道由拱顶结构改为平顶结构后,上升烟道内高速区以及气流回卷形成的局部高速区域均有所缩小,烟气对上升烟道东侧壁面的冲刷将有所减弱。

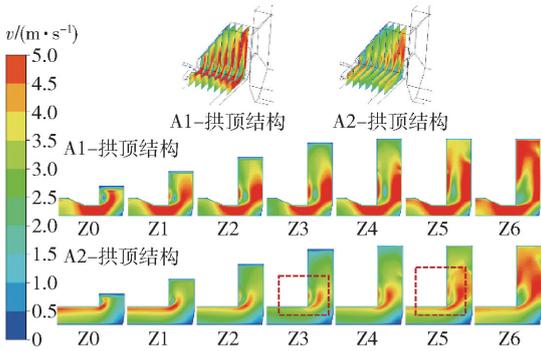


图 7 上升烟道南北向不同截面速度分布云图

Fig. 7 Velocity contours of different cross-sections in north and south directions of the upward flue with different structures

图 8 为上升烟道中心截面上的气相速度矢量图。可以看到,烟道东侧壁面的气流速度较大,同时,由于烟道内温度较高,烟气中夹杂的颗粒容易在此处形成粘结;而在烟道西侧,由于气体回卷形成了局部的高速区,也容易造成烟尘颗粒在此处盘桓而粘结于壁面。

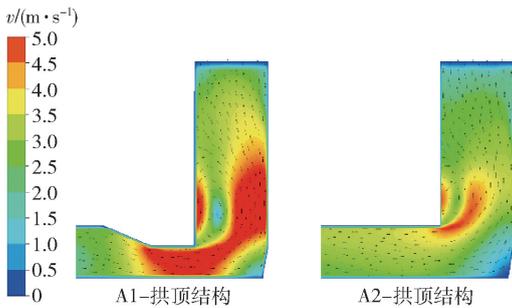


图 8 上升烟道中心截面气相矢量

Fig. 8 Gas phase velocity vector diagram of the central cross-sections in the upward flue

由表 8 可知,当沉淀池与上升烟道连接型式由拱顶改为平顶结构后,烟道入口处的烟气平均速度由 4.4 m/s 降低至 3.6 m/s,降幅 18.2%,烟道出口处的烟气平均流速同样降低 7%。由此得出,连接

型式的改变有效地降低了上升烟道内的烟气流速,有利于烟尘沉降。由表 8 对颗粒质量流量的数值模拟结果可知,在平顶连接型式下,上升烟道入口处的烟尘颗粒质量流量比拱顶型式下同比降低 9.5%,从而可能有助于减轻烟道壁面粘结或结瘤现象。

表 8 上升烟道出入口烟气流速及颗粒质量流量变化规律  
Table 8 Variation regulars of flue gas velocity and particle mass flow rate at the inlet and outlet of the upward flue

	A1 拱顶结构	A2 平顶结构
入口烟气流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	4.404	3.582
入口烟气流速相对增长率/%	—	-18.66
出口烟气流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	6.313	5.864
出口烟气流速相对增长率/%	—	-7.11
入口颗粒质量流量/( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )	3.403	3.079
入口颗粒质量流量相对增长率/%	—	-9.50
出口颗粒质量流量/( $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )	3.401	3.078
出口颗粒质量流量相对增长率/%	—	-9.49

### 3.2 上升烟道内烟气温度分布

图 9 为 2 种结构下闪速炉上升烟道中  $Z_0 \sim Z_6$  不同截面上的气相温度分布云图。可以看到,2 种连接型式下闪速炉上升烟道内气相温度分布相类似:由于天然气的燃烧,烟气进入上升烟道后其温度会有所上升,因此上升烟道上部的气相温度较高;平顶连接型式下,烟道中整体气相温度略高于拱顶结构,但烟道入口东西两侧壁面附近的温度分布也更加均匀。

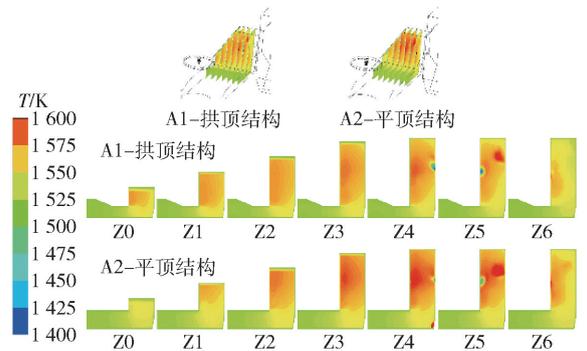


图 9 上升烟道南北向不同截面温度分布云图

Fig. 9 Temperature contours of different cross-sections in north and south directions of the upward flue with different structures

将图 6 中闪速炉反应塔和上升烟道不同高度截面上的气相平均温度整理如图 10 所示。可以看到,

沉淀池与上升烟道连接型式的改变对反应塔各高度横截面上的期限平均温度影响不明显,但是在上升烟道中,平顶结构下的烟气平均温度要比拱顶结构下高出约 10 K,保持在 1 543 K 左右。

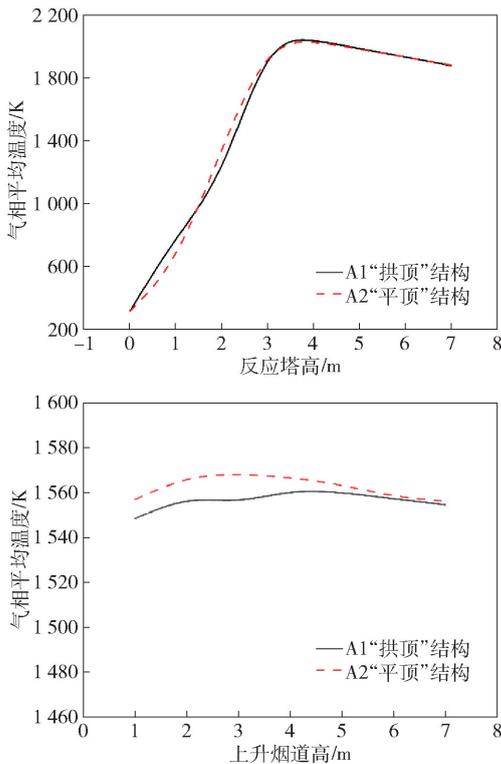


图 10 闪速炉反应塔与上升烟道各高度截面气相平均温度分布图

Fig. 10 Average gas phase temperature at different heights of the reaction shaft and upward flue in the flashsmelting furnace

如表 9 所示,在烟道结构调整后,烟尘颗粒的温度变化也不大,其中烟道入口处,2 种结构下的颗粒温度相同,但由于烟道入口面积增加后,烟气流速降低,使得炉内对流换热强度降低,因此在烟道出口处,平顶结构下的颗粒平均温度要比拱顶结构略有提升,但 10 K 左右的温度差别对于改善烟道粘结现象的作用有限,因此实际生产中还是更多地采用补充天然气的方法来应对壁面烟尘粘结严重的问题。

## 4 结论

本文以某工业铜闪速熔炼炉为原型,基于闪速炉内气粒两相流动、传热与反应过程的数值模拟结果,对闪速炉上升烟道内烟气流动与烟尘粘结特点进行分析。

表 9 上升烟道出入口颗粒相温度变化规律

Table 9 Variation regulars of particle temperature at the inlet and outlet of the upward flue

	A1 拱顶 结构	A2 平顶 结构
入口颗粒平均温度/K	1 553. 35	1 517. 76
入口颗粒平均温度相对增长率/%	—	0. 03
出口颗粒平均温度/K	1 510. 87	1 520. 92
出口颗粒平均温度相对增长率/%	—	0. 67
出入口颗粒温度降幅/K	42. 48	32. 84

1) 上升烟道内的气相平均温度约 1 500 K,该温度下部分烟尘颗粒处于熔融状态,容易被烟气夹带冲击至烟道壁面而产生粘结性烟尘或粘附性烟尘,这是引起烟道内烟尘粘结现象的重要原因。

2) 上升烟道内易发生烟尘粘结的位置主要在与沉淀池出口同侧壁面的回流区以及对侧的壁面高速区。对比沉淀池与上升烟道的不同连接型式,采用平顶结构有利于降低烟道内的烟气流速,减少进入烟道的烟尘量,从而有助于减轻闪速炉上升烟道的烟尘粘结/结瘤现象。

### [参考文献]

- [1] Wan X, Fellman J, Jokilaakso A, et al. Behavior of waste printed circuit board (WPCB) materials in the copper matte smelting process[J]. Metals, 2018, 8(11): 887.
- [2] Wan X, Shen L, Jokilaakso A, et al. Experimental approach to matte - slag reactions in the flash smelting process[J]. Mineral processing and extractive metallurgy review, 2021, 42(4): 231 - 241.
- [3] Chen Z, Peng X, Zhu Z, et al. Thermodynamic and CFD analysis of recycling Cu-As-containing filter cake waste and black copper sludge by feeding them back into FSF[J]. Minerals Engineering, 2023, 199: 108132.
- [4] 吴建华. 奥托昆普型闪速炉上升烟道粘结处理实践[J]. 湖南有色金属, 2017, 33(4): 33 - 35.
- [5] 黄文华. 大型闪速炉的结构设计及探讨[J]. 有色冶金设计与研究, 2010, 31(6): 33 - 34.
- [6] 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.
- [7] 简正柱, 黄文华. 某闪速炉改造方案的确定[J]. 有色冶金设计与研究, 2016, 37(5): 33 - 35.
- [8] 熊宗维, 黄文华, 袁精华. 闪速炉水冷上升烟道的 CFD 数值仿真[J]. 有色金属(冶炼部分), 2013(2): 21 - 23.
- [9] 彭天照. 闪速吹炼炉改造设计研究[J]. 有色冶金设计与研究, 2023, 44(6): 19 - 22.
- [10] 彭天照. 强化冶炼环境中闪速熔炼炉炉体及优化综述

- [J]. 冶金管理, 2023(17): 32-33.
- [11] 甘聪. 闪速熔炼炉排烟系统粘结影响因素分析及控制措施[J]. 中国有色冶金, 2019, 48(6): 45-48, 66.
- [12] 郭引刚, 韩战旗, 王伯义, 等. 铜闪速吹炼烟道口结焦原因分析及控制实践[J]. 中国有色冶金, 2018, 47(5): 27-28, 33.
- [13] 董广刚. 祥光“双闪”上升烟道出口粘结控制实践[J]. 铜业工程, 2010(4): 41-43.
- [14] 杨述凯, 杨贵严, 杨思文. 金川铜闪速炉喉口部结焦控制研究与实践[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(9): 48-51.
- [15] 万爱东, 郭万书, 张更生, 等. 广西金川公司闪速吹炼炉特点及生产运行实践[J]. 有色设备, 2017(1): 52-57.
- [16] 桂云辉. 国外某闪速炉冷修改造实践[J]. 湖南有色金属, 2016, 32(1): 50-52.
- [17] 杨佳, 刘昱彤. 镍闪速炉上升烟道抑制结焦技术研究[J]. 造纸装备及材料, 2023, 52(10): 40-42.
- [18] 李文彬. 铜闪速熔炼三年长周期生产实践[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(3): 60-64.
- [19] 朱鹏飞. 铜闪速熔炼过程多物理场耦合数值模拟与协同分析[D]. 长沙:中南大学, 2022.
- [20] 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.
- [21] 高东波, 彭小奇, 宋彦坡, 等. 铜闪速炉内颗粒受热过程的数学建模与数值优化(英文)[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(5): 1506-1517.
- [22] 王云霄. 铜闪速炉分散风旋流喷吹方案的数值仿真与优化研究[D]. 长沙:中南大学, 2011.
- [23] 李详人. 闪速炉锅炉烟尘故障浅析[J]. 矿冶, 2003, 12(2): 66-68.
- [24] 刘安名, 汪志全, 刘春生, 等. 闪速炉锅炉烟灰清除剂应用研究[J]. 铜业工程, 2014(2): 32-35.
- [25] 谭少松. 铜闪速吹炼炉烟尘粘结机理及抑制方法研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学, 2021.

## Numerical analysis of effect of copper flash smelting furnace flue structure on dust adhesion

XIE Jiancai<sup>1</sup>, LI Bing<sup>2</sup>, WANG Fang<sup>1</sup>, FAN Jinjun<sup>1</sup>, CHEN Zhuo<sup>2</sup>, WAN Xinbang<sup>2\*</sup>

(1. Jinlong Copper Co, Ltd., Tongling 244021, China;

2. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The adhesion of dust in the upward flue during the copper smelting process significantly influenced the stability and safety of production, and the issue of dust adhesion had become one of the most common problems faced by copper-making enterprises. Focusing on a specific flash smelting furnace, a numerical simulation and analysis of the flue gas flow process at the connection between the current flash smelting furnace settler outlet and the flue were conducted. By comparing the characteristics of the flue gas flow process under different structures, the following results were discovered: when an arched acceleration-type flue connection structure was used in the simulation, dust adhesion in the flue primarily occurred in the recirculation zone on the same side as the settler outlet and near the high-velocity zone on the opposite wall. This result was consistent with the main locations of adhesion phenomena found during on-site furnace maintenance. In comparison, when a horizontal connection structure was used between the settler outlet and the riser shaft, the high-velocity areas in the flue were reduced. The maximum flue gas velocity decreased by 18.8%, resulting in better flue gas flow. Additionally, the analysis of the particle phase revealed that under the flat-top structure design, the amount of dust particles in the flue decreased by 9.5%, indicating that this structure can mitigate the adhesion of dust within the flue to a certain extent.

**Keywords:** copper flash smelting; dust adhesion; uptake flue; settler; numerical simulation

