

引用格式:郭天宇,陈斯,李倩,等.铜闪速熔炼余热锅炉盐化风影响仿真分析[J].有色设备,2025,39(1):26-34.

GUO Tianyu, CHEN Si, LI Qian, et al. Simulation analysis of the impact of the air for sulfation on waste heat boilers in flash smelting of copper[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(1): 26-34.

# 铜闪速熔炼余热锅炉盐化风影响仿真分析

郭天宇<sup>1</sup>, 陈斯<sup>1</sup>, 李倩<sup>1</sup>, 骆祎<sup>2</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]** 为研究铜冶炼厂闪速熔炼余热锅炉内盐化风对其运行状态的影响, 本文以某工业铜闪速熔炼余热锅炉为研究对象, 使用 Fluent 软件进行仿真计算, 对比分析了有、无盐化风情况下锅炉内的流场、温度场、烟尘颗粒运动轨迹等。研究发现, 引入盐化风后, 炉内速度分布、温度分布、换热效果均发生显著变化: 开启盐化风时烟气进入辐射室后, 不容易产生直接冲顶; 开启盐化风条件下烟气平均温度在辐射室内略低于无盐化风条件, 在对流室内烟气平均温度略高于无盐化风条件。仿真结果不仅可以加深现场工艺人员对盐化风影响机制的理解, 还为优化操作调控提供了理论支撑, 从而提升余热锅炉的整体性能和稳定性。

**[关键词]** 铜冶炼; 闪速熔炼余热锅炉; 盐化风; Fluent 仿真; 流场; 温度场; 颗粒运动轨迹

**[中图分类号]** TF811 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)01-0026-09

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.01.003

## 0 引言

铜闪速熔炼及吹炼工艺是世界领先的铜冶炼技术<sup>[1]</sup>, 其中余热锅炉作为关键设备, 承担着回收高温烟气热能和捕捉烟尘的任务, 从而保障系统的平稳运行<sup>[2]</sup>。然而, 铜冶炼过程中产生的大量烟尘会导致余热锅炉出现积灰、磨损和腐蚀问题<sup>[3]</sup>, 随着工业生产的不断进步, 工厂对余热锅炉的安全性和可靠性要求也日趋严格, 准确掌握余热锅炉内部的流场和温度场分布, 对于确保锅炉的整体性能具有重要意义。由于余热锅炉内结构复杂, 烟气的流动与传热、传质过程均呈现出高度复杂性, 受余热锅炉内高温环境和当前检测手段限制, 生产中通常只能获得炉内个别位置的温度数据, 难以全面掌握炉内的流场详细状况、温度场分布。随着计算机技术和计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的发展, 数值模拟技术已经成为余热锅炉研究的重要手段。例如, 张健及其团队<sup>[4]</sup>实现了辐射室内气

体与颗粒两相流场及温度场模拟结果的三维可视化展示。与此同时, ZHANG 等<sup>[5]</sup>采用数值模拟技术针对余热锅炉的辐射部分结构进行了优化设计, 通过改进该区域的流场和温度场分布, 有效地缓解了烟尘积渣的问题。张劲松等<sup>[6]</sup>通过数值仿真手段优化了盐化风送风模式, 通过分析截面处烟气与盐化风的混合程度来判断盐化反应的进行程度。然而, 现有研究大多集中在锅炉结构和送风模式的影响分析上, 尚无系统性探究盐化风本身影响的相关研究。

本文采用 Fluent 软件对闪速熔炼余热锅炉进行了三维仿真研究, 重点分析了盐化风的影响。通过有、无盐化风条件下仿真结果的对比分析, 研究了盐化风对余热锅炉内部物理场(包括速度分布、温度分布、烟尘颗粒运动轨迹等多个方面)及其换热能力的影响。本研究不仅有助于加强对余热锅炉内部流场与温度场相互作用机制的理解, 而且为实际生产中更加科学合理配置盐化风提供了理论依据, 进而达到提高能源利用效率、降低环境污染的目标。

**[收稿日期]** 2024-11-01

**[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。

**[基金项目]** 国家重点研发计划 生活垃圾焚烧设施碳污协同智能控制技术及装备(2024YFC3909000); 中国科协的项目支持(2022QNRC001)。

## 1 计算模型

### 1.1 数学模型

闪速熔炼余热锅炉内涉及气体流动及传热的物理过程,在模拟中采用连续性方程、动量方程、能量方程及湍流模型计算。

连续性方程<sup>[7]</sup>是质量守恒定律在流体力学中的具体表述形式,其数学表达为描述守恒量传输行为的偏微分方程。其具体形式为式(1)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

式中: $\rho$ 、 $\mathbf{v}$  分别为气体密度、速度矢量; $t$  为时间。

动量方程<sup>[8]</sup>具体的表达形式为式(2)。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

式中: $p$  为静态压力; $\mu$  为黏度; $\mathbf{g}$  为重力加速度。

余热锅炉流体间热交换的形式有热传导、对流换热和辐射换热。传热过程中求解的能量方程<sup>[9]</sup>为式(3)。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\mathbf{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j \mathbf{J}_j + (\bar{\tau}_{\text{eff}} \mathbf{v}) \right) + S_h \quad (3)$$

式中: $k_{\text{eff}}$  为有效导热率; $\mathbf{J}_j$  为组分  $j$  的扩散通量。

等式右侧前三项分别为由于热传导、组分扩散、黏性耗散而引起的能量转移, $S_h$  为体积热源。

辐射换热选用 P1 辐射模型。辐射热流  $q_r$  计算<sup>[10]</sup> 见式(4)。

$$-\nabla q_r = aG - 4a\sigma T^4 \quad (4)$$

式中: $a$  为吸收系数; $G$  为入射辐射; $\sigma$  为斯蒂芬-玻

尔兹曼常数, $\sigma = 5.672 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

余热锅炉内流体为湍流流动,采用双方程模型中的标准  $k-\varepsilon$  模型<sup>[7]</sup> 进行计算。湍动能  $k$  方程和湍流耗散率  $\varepsilon$  方程分别见式(5)~(6)。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - G_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中: $G_k$  为由于平均速度梯度而引起的湍动能产生; $G_b$  为由于浮力影响而引起的湍动能产生; $Y_M$  为可压缩湍流脉动膨胀对总耗散率的影响; $\mu_t$  为湍流黏性系数, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ ;  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$  为常数, $C_{1\varepsilon}$  取 1.44, $C_{2\varepsilon}$  取 1.92, $C_\mu$  取 0.09;湍动能  $k$  和湍流耗散率  $\varepsilon$  的湍流普朗特常数分别为  $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

### 1.2 几何模型

根据某闪速熔炼余热锅炉 CAD 图进行 1:1 建模。数值仿真中选定的计算区域包括辐射室、对流室,如图 1 所示。辐射室入口设置有 6 个盐化风喷嘴,辐射室内设有辐射室挡板,辐射室挡板之后布置 2 组辐射室管屏。对流室入口设有对流室挡板,对流室挡板之后分别布置 2 组对流室凝渣管屏、5 组对流室对流管束。

为提高计算效率,本文在模拟过程中对物理模型进行了适当的简化处理:①模拟余热锅炉辐射室内烟气流动的整体形态,而未深入考虑水冷壁管精细结构对流场的具体影响,因此将边界条件简化为平滑的平面;②辐射室中心的挡板以及对流室入口

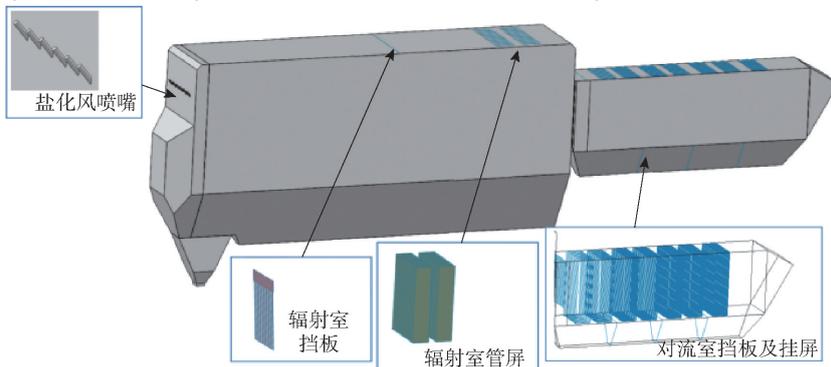


图 1 闪速熔炼余热锅炉几何模型

Fig. 1 Geometric model of flash smelting waste heat boiler

处的挡板被抽象为位于同一平面上、带有流通间隙的多个平板;③辐射室内的挂屏也被近似为一系列平行排列的平板。这些简化措施有助于降低计算复杂度,确保模拟工作的可行性和效率<sup>[11]</sup>。

建立余热锅炉网格模型,并对挡板、挂屏等附近区域网格进行加密,网格总数量为 1 796 万,网格正交质量大于 0.2,基本符合计算要求<sup>[12]</sup>。

表 1 闪速熔炼余热锅炉工艺参数

Table 1 Process parameters of flash smelting waste heat boiler

有、无盐 化风	烟气量/ (Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	烟气温度/ ℃	烟气成分/%					烟尘量/ (g·Nm <sup>-3</sup> )	盐化风量/ (Nm <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
			SO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O		
有	36 320	1 320	57.70	2.81	33.63	4.42	1.44	306	5 600
无	36 320	1 320	57.70	2.81	33.63	4.42	1.44	306	0

### 1.3.2 物性参数

根据《锅炉机组热力计算标准方法》<sup>[13]</sup>,查表拟合得出烟气平均成分的热导率及黏度关系式。烟气平均成分热导率满足温度的一次函数关系式,烟气平均成分黏度满足温度的二次函数关系式,下面给出了两个参数的近似拟合公式(式(7)~(8))和拟合曲线图(图 2、图 3)。烟气比热容按烟气各组分比热的质量分数加权平均计算,烟气各组分比热数据来自 Fluent 自带数据库。

$$\lambda = 2.18 \times 10^{-2} + 8.0 \times 10^{-5}t \quad (7)$$

$$\mu = 1.1415 \times 10^{-5} + 2.83 \times 10^{-8}t - 5 \times 10^{-12}t^2 \quad (8)$$

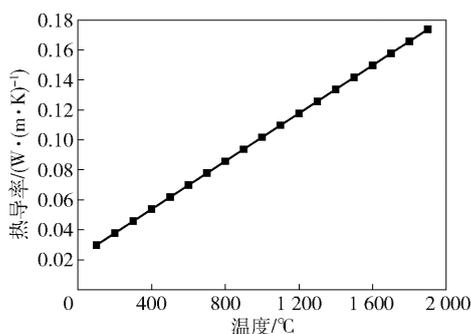


图 2 闪速熔炼余热锅炉烟气的热导率拟合曲线

Fig. 2 Fitting curve of flue gas thermal conductivity for flash smelting waste heat boiler

### 1.3.3 边界条件

闪速熔炼余热锅炉入口烟气温度的 1 320 °C,烟气流速及烟气成分如表 1 所示。闪速熔炼余热锅

## 1.3 物性参数与边界条件

### 1.3.1 工艺参数

本文针对某厂设计工况条件下闪速熔炼余热锅炉有、无盐化风 2 种情况进行仿真分析,除盐化风因素外,其他条件均保持一致,具体工艺参数如表 1 所示。通过对比分析 2 种情况下余热锅炉内速度分布和温度分布,系统研究盐化风对余热锅炉运行状态的影响。

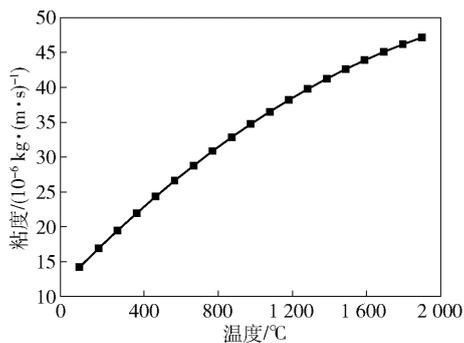


图 3 闪速熔炼余热锅炉烟气的黏度拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of flue gas viscosity for flash smelting waste heat boiler

炉入口速度以闪速炉仿真上升烟道出口速度结果为条件,其分布如图 4、图 5 所示。图 4 展示了闪速熔炼余热锅炉入口速度云图的观察视角及入口速度云图分布;图 5 为闪速熔炼余热锅炉当前工况下入口速度矢量图,该矢量图展示了从闪速炉上升烟道流出的烟气流向及大小。由图可知,余热锅炉入口烟气流速分布是不均匀的,顺着烟气流动方向看,入口的右上角速度较大,其余区域速度较小,入口速度的不均匀分布将对余热锅炉内烟气流场和温度场分布产生重要影响。

盐化风为空气,温度为 150 °C,流量如表 1 所示;烟尘颗粒采用质量入口边界条件,烟气含尘量如表 1 所示;出口边界设置为压力出口,压力取值为 -500 Pa;壁面边界设置为无滑移、定壁温边界条件,温度取冷却水平均温度为 258 °C<sup>[14]</sup>。

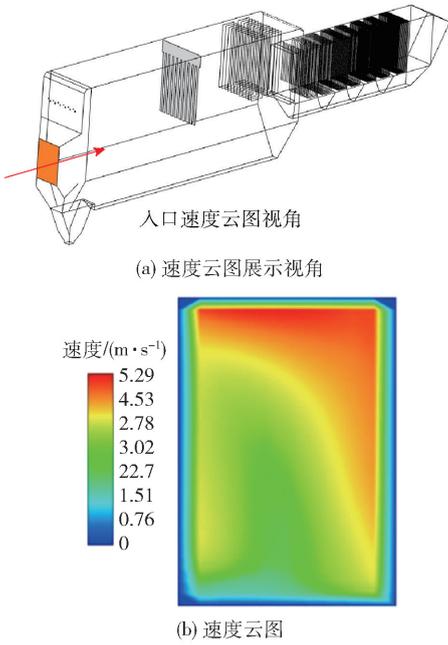


图4 闪速熔炼余热锅炉入口速度云图

Fig. 4 Velocity cloud chart at the inlet of flash smelting waste heat boiler

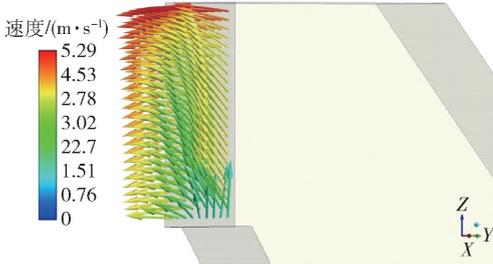


图5 闪速熔炼余热锅炉入口速度矢量图

Fig. 5 Velocity vector diagram at the inlet of flash smelting waste heat boiler

## 2 仿真结果与分析

### 2.1 速度分布

图6和图7分别为闪速熔炼余热锅炉当前研究工况下有无盐化风的三维速度矢量图和中心剖面速度矢量图。由图6、图7可知,无盐化风时,烟气在辐射室将会对余热锅炉上壁面产生直接冲顶<sup>[13]</sup>,冲顶范围在辐射室挡板前10~14 m处;在有盐化风的情况下,烟气流动方向被压至水平方向,不会对余热锅炉上壁面产生冲顶现象。对仿真结果进行数据分析得到有、无盐化风条件下穿过辐射室烟气挡板的烟气、受辐射室挡板阻碍产生回流的烟气以及绕过辐射室烟气挡板的烟

气量比例分别为1:2.15:4.04和1:0.46:1.78。结合数据分析和云图结果,可以得出无盐化风条件下烟气入射角度更高,烟气会对锅炉上壁面发生冲顶,并将有更大比例的烟气穿过辐射室挡板。

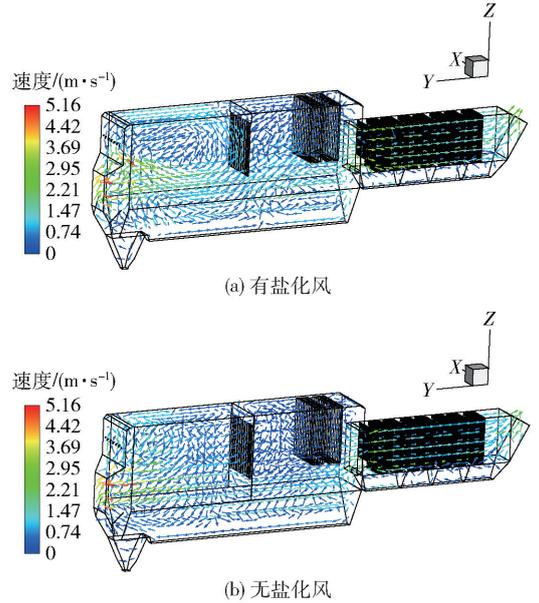
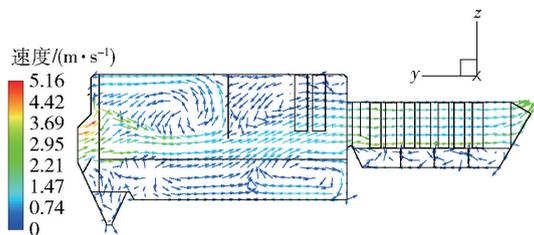


图6 有、无盐化风条件下闪速熔炼余热锅炉三维速度矢量图

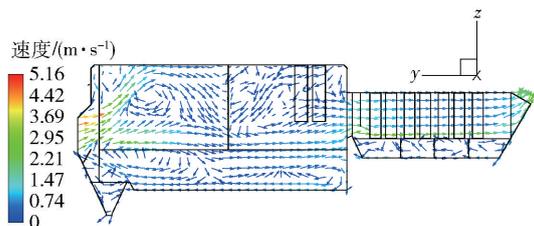
Fig. 6 Three-dimensional velocity vector diagram of flash smelting waste heat boiler under conditions of with and without the air for sulfation

图8和图9分别为闪速熔炼余热锅炉有、无盐化风情况下的中心剖面速度云图和速度流线图。由图8、图9可知,辐射室挡板后和对流室底部有明显速度较低的区域。若以0.5 m/s为限,划定低速区范围,有盐化风和无盐化风条件下低速区占比分别为24%和33%,无盐化风情况下低速区占比更高,这是由于该工况风量相对较小、总体流速较低导致的。在有盐化风工况中,辐射室挡板前和辐射室后半段底部存在明显涡流,无盐化风工况中烟气在辐射室前半段流动较为紊乱,有不少烟气发生回流。

烟尘颗粒的运动特征与烟气流动特征基本一致,这是由于通过沉淀池进入上升烟道内的颗粒粒径相对较小,其运动主要受气流带动<sup>[15]</sup>。由图10可知,辐射室和对流室的挡板明显降低了颗粒到达管屏时的速度,有效缓解了管组的磨损。在有盐化风条件下,辐射室管屏下半部和对流室管屏仍有较强的颗粒冲击,而在无盐化风条件下,颗粒对管屏的冲击情况明显缓解,但对流室管屏的最下端仍存在



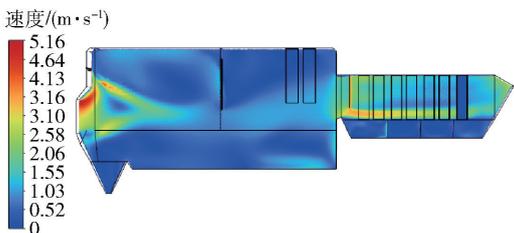
(a) 有盐化风



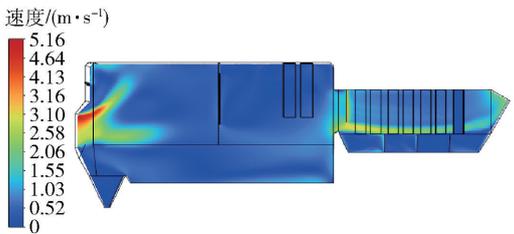
(b) 无盐化风

图 7 有、无盐化风条件下闪速熔炼余热锅炉中心剖面速度矢量图

Fig.7 Velocity vector diagram of the central section of flash smelting waste heat boiler under conditions of with and without the air for sulfation



(a) 有盐化风



(b) 无盐化风

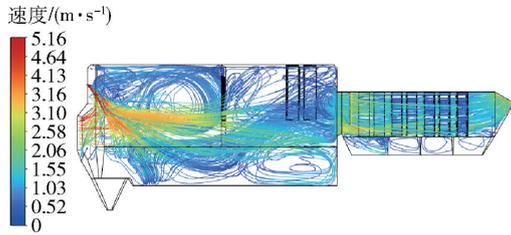
图 8 有、无盐化风条件下闪速熔炼余热锅炉中心剖面速度云图

Fig.8 Velocity cloud chart of the central section of flash smelting waste heat boiler under conditions of with and without the air for sulfation

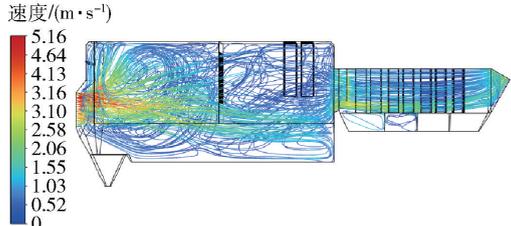
较大的颗粒冲击速度。

## 2.2 温度分布

图 11 分别为闪速熔炼余热锅炉当前所研究工况有盐化风和无盐化风情况下中心剖面温度分布云图,其中 258 °C 为水冷壁面温度,1 320 °C 为余热锅



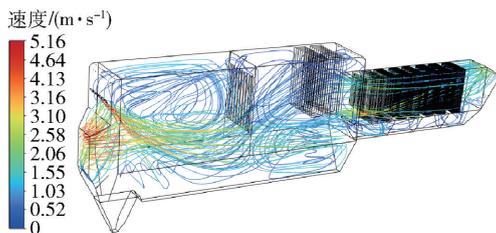
(a) 有盐化风



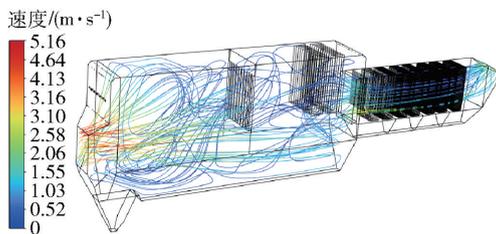
(b) 无盐化风

图 9 有、无盐化风条件下闪速熔炼余热锅炉速度流线图

Fig.9 Velocity streamline diagram of flash smelting waste heat boiler under conditions of with and without the air for sulfation



(a) 有盐化风



(b) 无盐化风

图 10 有、无盐化风条件下闪速熔炼余热锅炉烟尘颗粒流线图

Fig.10 Particle streamline diagram of flue dust in flash smelting waste heat boiler under conditions of with and without the air for sulfation

炉入口烟气温度。经统计,有盐化风和无盐化风工况的对流室入口平均温度分别为 658 °C、656 °C,对流室出口平均温度分别为 365 °C、352 °C。由数据可知,无盐化风工况对流室进、出口平均温度更低,这是由于其烟气入射角度更高,更能充分利用上方的管组、管束的换热<sup>[16]</sup>。

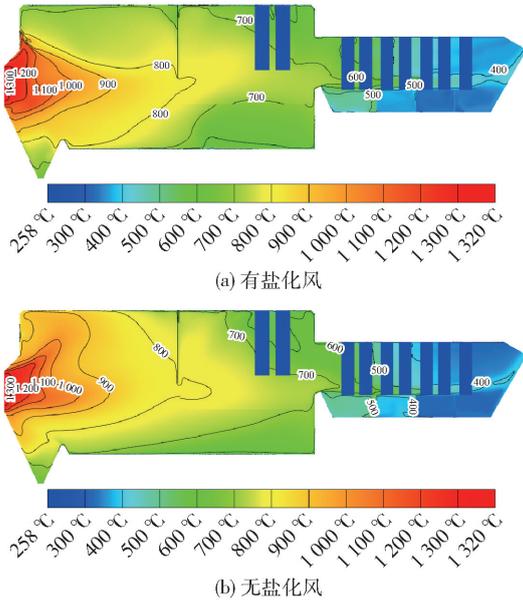


图 11 有、无盐化风条件下闪速熔炼余热锅炉中心剖面温度云图

Fig. 11 Temperature cloud chart of the central section of flash smelting waste heat boiler under conditions of with and without the air for sulfation

为研究烟气温度在烟气流动过程中的变化趋势,图 12 ~ 14 分别展示了闪速熔炼余热锅炉有、无盐化风条件下辐射室入口处、挡板前 0.5 m 处和挡板后 0.5 m 处垂直于流动方向的截面温度分布云图。由图 12 可知,辐射室入口处烟气温度最高,且高温主要集中于余热锅炉下半部分。在有盐化风条件下,烟气受盐化风影响很难达到盐化风喷枪上方,盐化风喷枪上方区域温度较低;在无盐化风条件下,由于入口速度分布的不均匀性,部分烟气能够到达盐化风喷枪上方区域,进而导致上方区域有一侧温度较高。由图 13 可知,烟气到达挡板前 0.5 m 处时,温度分布相较于辐射室入口截面更加均匀。在无盐化风条件下,温度分布的均匀性优于有盐化风条件,且整体温度略高。图 14 显示,烟气到达挡板后 0.5 m 处时,温度分布较挡板前 0.5 m 进一步趋

表 2 有、无盐化风条件下闪速熔炼余热锅炉辐射室各截面平均温度对比

Table 2 Comparison of the average temperature across different sections of the radiation chamber of flash smelting waste heat boiler under conditions of with and without the air for sulfation

位置	辐射室入口处		辐射室挡板前 0.5 m		辐射室挡板后 0.5 m	
	有	无	有	无	有	无
截面最高温度/°C	1 258	1 258	838	849	830	839
截面平均温度/°C	938	983	756	771	758	766

于均匀,同时温度有所较低。通过数据分析,将辐射室内各截面的平均温度数据汇总于表 2。由表 2 可知,辐射室内无盐化风情况下的平均温度普遍高于有盐化风情况。

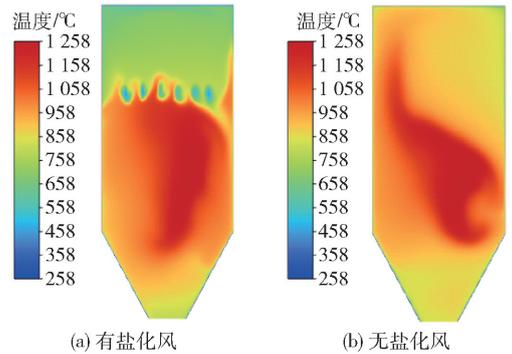


图 12 有、无盐化风条件下闪速熔炼余热锅炉辐射室入口处温度云图

Fig. 12 Temperature cloud chart at the entrance of the radiation chamber of flash smelting waste heat boiler under conditions of with and without the air for sulfation

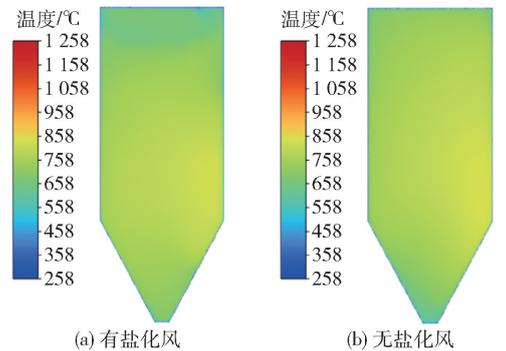


图 13 有、无盐化风条件下闪速熔炼余热锅炉辐射室挡板前 0.5 m 处温度云图

Fig. 13 Temperature cloud chart at 0.5 m before the baffle in the radiation chamber of flash smelting waste heat boiler under conditions of with and without the air for sulfation

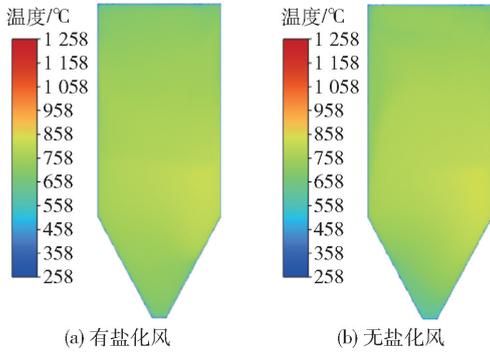


图 14 有、无盐化风条件下闪速熔炼余热锅炉辐射室挡板后 0.5 m 处温度云图

Fig. 14 Temperature cloud chart at 0.5 m after the baffle in the radiation chamber of flash smelting waste heat boiler under conditions of with and without the air for sulfation

图 15 ~ 18 分别为有、无盐化风条件下闪速熔炼余热锅炉对流室挡板前 0.5 m 处、对流室挡板后 0.5 m 处、对流室管屏后 0.5 m 处和对流室对流管束后 0.5 m 处温度分布云图。由图 15 可知, 对流室挡板前 0.5 m 处烟气温度相对较高, 该截面内除最下端区域外, 其余空间内温度分布都较为均匀, 有盐化风情况下, 高温区域相较无盐化风情况更大。图 16 显示, 烟气到达对流室挡板后 0.5 m 处时, 温度相对对流室挡板前 0.5 m 截面略有降低, 高温区域依然主要集中于除最下端以外的大部分空间内。有、无盐化风情况下在该截面的平均温度接近, 从温度分布看, 有盐化风情况下在该截面处存在 1 个长条状的低温区域, 无盐化风时, 则是在该截面上半部分有

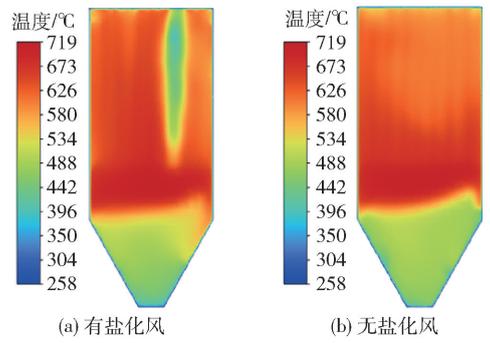


图 16 有、无盐化风条件下闪速熔炼余热锅炉对流室挡板后 0.5 m 处温度云图

Fig. 16 Temperature cloud chart at 0.5 m after the baffle in the convection chamber of flash smelting waste heat boiler under conditions of with and without the air for sulfation

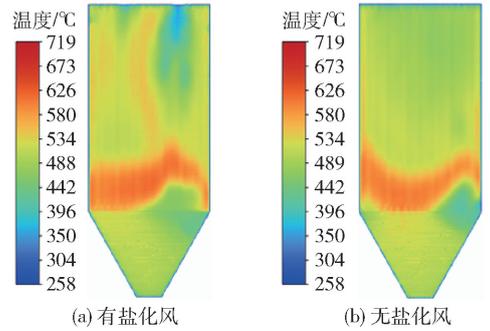


图 17 有、无盐化风条件下闪速熔炼余热锅炉对流室管屏后 0.5 m 处温度云图

Fig. 17 Temperature cloud chart at 0.5 m after the tube banks in the convection chamber of flash smelting waste heat boiler under conditions of with and without the air for sulfation

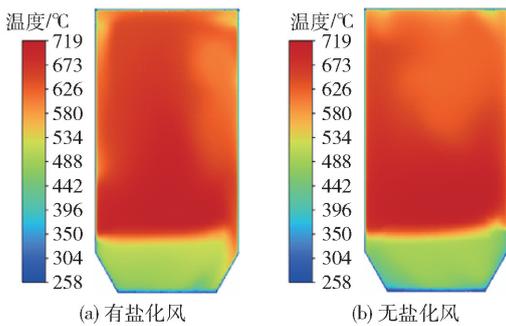


图 15 有、无盐化风条件下闪速熔炼余热锅炉对流室挡板前 0.5 m 处温度云图

Fig. 15 Temperature cloud chart at 0.5 m before the baffle in the convection chamber of flash smelting waste heat boiler under conditions of with and without the air for sulfation

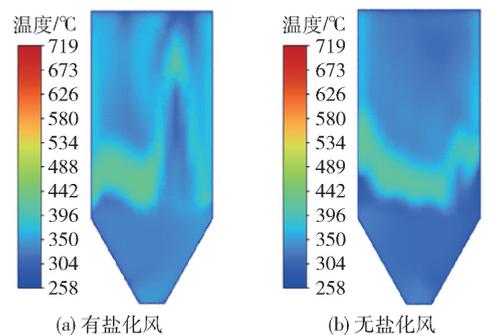


图 18 有、无盐化风条件下闪速熔炼余热锅炉对流室对流管束后 0.5 m 处温度云图

Fig. 18 Temperature cloud chart at 0.5 m after the convection tube banks in the convection chamber of flash smelting waste heat boiler under conditions of with and without the air for sulfation

更广泛的温度偏低的区域。由图 17 可知,烟气到达对流管屏后 0.5 m 处时,总体温度相对对流室挡板后 0.5 m 截面进一步降低,同时高温烟气集中于管屏下端;无盐化风情况相较有盐化风情况温度略低,且分布更为均匀。图 18 表明,烟气到达对流管束后 0.5 m 处时,平均温度相对对流室挡板前 0.5 m 截面已降低近 300 °C,其温度分布则与对流管屏后 0.5 m 截面几乎一致,无盐化风情况相较有盐化风情况总体温度下降得更为显著。对流室内各截面平均温度数据汇总于表 3。由表 3 可知,在对流室内有盐化风情况的烟气平均温度普遍高于无盐化风情况下的

烟气平均温度,该结论在对流室对流管束后 0.5 m 截面温度结果中体现得最为明显。

通过对比表 2 与表 3 的数据可知,在辐射室内,有盐化风情况下的烟气平均温度普遍低于无盐化风情况,是由于盐化风温度较低,其作用近似于引入了一个冷源。然而,进入对流室后,有盐化风情况下的烟气温度开始高于无盐化风情况,尤其是在经过对流管屏和管束后,这种差异变得尤为显著,这主要是因为盐化风时烟气速度分布更为偏下,导致烟气与管屏、管束的换热接触面积相应减小。

表 3 有、无盐化风条件下闪速熔炼余热锅炉对流室各截面平均温度对比

Table 3 Comparison of average temperature across different sections of the convection chamber of flash smelting waste heat boiler under conditions of with and without the air for sulfation

位置	对流室挡板前 0.5 m		对流室挡板后 0.5 m		对流室管屏后 0.5 m		对流室对流管束后 0.5 m	
	有	无	有	无	有	无	有	无
截面最高温度/°C	719	719	710	707	623	619	432	428
截面平均温度/°C	629	619	595	598	522	519	359	344

### 3 结论

本文通过对某厂闪速熔炼余热锅炉开展仿真计算研究,对比了设计工况下有无盐化风启动时余热锅炉的运行状态。通过仿真结果可直接获得有无盐化条件下余热锅炉内的流场分布、温度场分布、烟尘运行轨迹等结果。

通过仿真结果分析发现,在该设计条件下,无盐化风启动时烟气在辐射室将会对余热锅炉上壁面发生直接冲顶,开启盐化风可以避免烟气直接冲击余热锅炉上顶壁面,但对管屏的直接冲击更强。结合工艺建议适当降低盐化风量,使烟气流速度方向呈水平略偏上的状态,更有利于充分利用余热锅炉的管组、管束换热能力,但仍需综合考量烟尘对管屏及管束可能产生的冲刷磨损影响。

本研究通过仿真计算探讨了闪速熔炼余热锅炉在不同启动条件下的运行特性,揭示了盐化风对烟气流动及热交换过程的重要影响。结果表明,合理调控盐化风量是优化余热锅炉运行状态、提升换热效率并降低设备磨损的关键。未来可进一步细化盐化风参数优化,并结合实际运行数据验证仿真结论,为闪速熔炼余热锅炉的设计与运行提供更精准的指导。

### [参考文献]

- [1] Gao D B, Peng X Q, Song Y P, et al. Mathematical modeling and numerical optimization of particle heating process in copper flash furnace[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(5): 1506 - 1517.
- [2] Schmidt A, Montenegro V, Reuter M, et al. CFD Study on the Physical Behavior of Flue Dust in an Industrial-Scale Copper Waste Heat Boiler[J]. Metallurgical and Materials Transactions, B. Process metallurgy and materials processing science, 2022(1): 53B.
- [3] 周俊. 闪速炉废热锅炉结灰与 SO<sub>3</sub> 发生的原因分析[J]. 有色金属(冶炼部分), 2003(1): 17 - 20.
- [4] 张健, 周萍, 陈卓, 等. 炼铜闪速余热锅炉的数值仿真及其可视化[J]. 有色冶金设计与研究, 2015, 36(4): 14 - 16, 23.
- [5] Dongjie Zhang, Ting Ma, Study on slagging in a waste-heat recovery boiler associated with a bottom-blown metal smelting furnace, Energy, Volume 241, 2022, 122852.
- [6] 张劲松, 高龙飞, 任鹏, 等. 基于数值模拟的铜闪速炉余热锅炉盐化风送风模式优化[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(11): 20 - 25.
- [7] 郭天宇, 张瑛华, 姚心, 等. CFD 在垃圾焚烧炉膛设计上的应用[J]. 有色设备, 2019(2): 42 - 48.
- [8] 许建, 夏际先, 王晓东, 等. 基于 APROS 的联合循环机组

- 余热锅炉仿真模型[J]. 锅炉技术, 2018, 49(2):1-7.
- [9] 王晓瑜. 余热锅炉流动与传热数值模拟及仿真平台开发[D]. 成都:西南交通大学, 2013.
- [10] 宋冬根, 丁晟, 鞠霞, 等. 铜冶炼闪速炉余热锅炉辐射室的仿真与优化[J]. 有色冶金设计与研究, 2010, 31(3):19-22.
- [11] 丁晟. 闪速炼铜余热锅炉辐射室流场温度场数值模拟及结构优化[D]. 杭州:浙江大学, 2011.
- [12] 钟崴, 丁晟, 宋冬根, 等. 闪速炼铜余热锅炉辐射室流场温度场数值模拟[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(2):321-326.
- [13] 北京锅炉厂设计科. 锅炉机组热力计算标准方法[M]. 北京:机械工业出版社, 1976.
- [14] 张冬洁, 徐建炎, 蔡宁生, 等. 数值模拟方法在余热锅炉结构优化中的应用[J]. 中国有色冶金, 2013, 42(4):50-54.
- [15] 徐伟, 陈斯, 姚心, 等. 垃圾发电余热锅炉烟道仿真研究[J]. 有色设备, 2024, 38(1):24-31.
- [16] 李东波, 胡杰, 邹贵阳, 等. 超大型侧吹熔池熔炼余热锅炉烟气流动及烟尘黏附研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(8):11-19.
- [17] 杨卫宏, 赖亚欣, 萧泽强. 余热锅炉流场温度场数值计算[J]. 中国有色金属学报, 2000(2):278-281.

## Simulation analysis of the impact of the air for sulfation on waste heat boilers in flash smelting of copper

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

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

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

**Abstract:** In order to investigate the impact of the air for sulfation on the operational status of the copper flash smelting waste heat boilers, this paper takes an industrial copper flash smelting waste heat boiler as the research subject and employs Fluent software for simulation calculations. The flow field, temperature field, and flue dust particle trajectories inside the boiler under conditions with and without the air for sulfation are compared. The results indicate that after introducing the air for sulfation, significant changes occurred in the velocity distribution, temperature distribution, and heat exchange effect in the boiler. When the air for sulfation is introduced, the gas flow in the radiant chamber is less likely to cause direct ceiling impact, and the average temperature of the gas flow in the radiant chamber is slightly lower than that under conditions without the air for sulfation. However, in the convection chamber, the average temperature of the gas flow is slightly higher under conditions with the air for sulfation compared to that without air for sulfation. The simulation results not only deepen the understanding of field process personnel regarding the influence mechanisms of the air for sulfation, but also provide theoretical support for optimizing operational adjustments, thereby enhancing the overall performance and stability of the waste heat boiler.

**Keywords:** copper smelting; flash smelting waste heat boiler; air for sulfation; Fluent simulation; flow field; temperature field; particle motion trajectory

