

## 烧结机烟气循环罩气流模拟优化

陈伟豪<sup>1</sup>, 余雪峰<sup>1</sup>, 高瑞芳<sup>2</sup>, 侯 健<sup>2</sup>, 焦国帅<sup>2</sup>, 黄小波<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学 绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室, 北京 100000;

2. 邯钢钢铁集团有限责任公司, 河北 邯郸 056000)

**摘要:** 针对烧结循环烟气末端分配不均的问题, 采用计算流体力学方法对邯钢 360 m<sup>2</sup> 烧结机烟气循环系统烟气分配端进行了烟气流动模拟仿真研究, 分析了现有的侧进气口条件下烧结料面烟气分布, 并分别进行了弧形导流板、直转角导流板和井式导流板对流场均匀性的改进性分析。结果表明, 现有侧进气口条件下, 密封罩内烟气集中于进气口对侧料面, 存在较大的烟气均分优化空间。在导流板对流场的改进性分析中, 弧形导流板提高了料面气流 20.69% 的均匀性, 直转角导流板提高了料面气流 13.71% 的均匀性, 井式导流板提高了料面气流 57.93% 的均匀性。井式导流板结构提高烧结料面循环烟气均匀分布的性能最佳, 且其加工难度较弧形导流板更容易, 同时不影响烧结检修时的工人正常通行, 可实现低成本改善料面烟气分布。

**关键词:** 烧结; 烟气循环; 密封罩; 流场仿真; 导流板

中图分类号: X701; TF046.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)05-0123-08

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.05.087

## Optimization of airflow simulation of flue gas circulation hood of sintering machine

CHENG Weihao<sup>1</sup>, SHE Xuefeng<sup>1</sup>, GAO Ruifang<sup>2</sup>, HOU Jian<sup>2</sup>, JIAO Guoshuai<sup>2</sup>, HUANG Xiaobo<sup>2</sup>

(1. National Key Laboratory of Green and Low-Carbon Iron and Steel Metallurgy, University of Science and Technology

Beijing, Beijing 100000, China; 2. Handan Iron & steel Group Co., Ltd., Handan 056000, Hebei, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of uneven distribution of flue gas at the end of the sintering cycle, the flue gas flow simulation study is carried out on the flue gas distribution end of the flue gas circulation system of 360 m<sup>2</sup> sintering machine Handan Iron & steel Group Co., Ltd. by computational fluid dynamics, and the flue gas distribution on the sintering material surface under the existing side inlet conditions is analyzed, and the improved uniformity of the convective field of arc deflector, straight angle deflector and well deflector is analyzed respectively. The results show that under the condition of the existing side air inlet, the flue gas in the sealing hood is concentrated on the material surface opposite the air inlet, and there is a large space for optimization of flue gas equalization. In the improvement analysis of the convection field of the deflector, the arc deflector improves the uniformity of the airflow on the material surface by 20.69%, the straight angle deflector improves the uniformity of the airflow on the material surface by 13.71%, and the well deflector improves the uniformity of the airflow on the material surface by 57.93%. The well deflector structure improves the performance of the uniform distribution of circulating flue gas on the sintering material surface, and its processing difficulty is easier than that of the arc deflector, and at the same time, it does not affect the normal passage of workers during sintering maintenance, which can improve the flue gas distribution on the material surface at low cost.

收稿日期: 2025-01-17; 修回日期: 2025-06-06

基金项目: 河钢集团揭榜挂帅项目(HG202412)

作者简介: 陈伟豪(2003—), 男, 硕士研究生, 从事炼铁烧结, 固流体模拟方面的研究工作。

通信作者: 余雪峰(1978—), 男, 教授, 从事高炉低碳炼铁和冶金固废综合利用相关工艺技术研究。

**Key words:** sintering; flue gas circulation; sealed cover; flow field simulation; deflectors

我国作为当前全球最大钢铁生产和消费国,处于初步脱碳阶段中期的钢铁行业加速转型对于我国实现碳达峰、碳中和目标具有至关重要的作用<sup>[1~3]</sup>。其中,铁矿烧结工序在为高炉提供优质含铁原料的同时,也对大气污染防治提出了严峻的要求。该工序的烟气排放量约占钢铁企业总排放量的一半<sup>[4]</sup>,烟气包含的气态污染物主要有颗粒物、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>等<sup>[5~6]</sup>。这些污染物对空气质量和人类生命健康都构成了极大的威胁。过程优化作为应对上述问题的三大烧结烟气治理手段之一,其具有可操作性强,投资成本低<sup>[7~8]</sup>的优点。因此,烧结烟气循环技术作为过程优化的典型技术被列入国家大气污染防治重点工业行业清洁生产推广技术之一<sup>[9]</sup>。

烧结烟气循环技术是将部分烟气再次循环进入烧结料面重新参与烧结反应,能有效减少烟气及其污染物排放,重复利用烟气余热,燃烧产物,并最终改善烧结矿质量的一种有效途径<sup>[10~11]</sup>。国内外大多数学者在循环烟气的技术过程、烟气反应机理和模型等方面进行了大量研究来探讨对烧结过程的影响<sup>[12~15]</sup>,而利用单流场仿真计算,针对烟气循环系统设备改造的研究并不多。杨正伟等<sup>[16]</sup>对600 m<sup>2</sup>烧结机烟气循环系统中的烟气混合器、分配器及循环罩三大核心部件进行仿真,得出烟气分配器需增设导流板、烟气循环罩需优化结构等结论。许源等<sup>[17]</sup>对沙钢4号烧结机烟气循环系统的烟气分配器及循环烟罩进行数值模拟,研究表明,将烟气分配器安装在循环烟罩的上部时,循环烟气在料面温度和速度分布梯度较小。任伟等<sup>[18]</sup>对不同结构的烟气分配器内部流场进行数值模拟,分析了主管管径变化对各支管流量分配的影响,研究表明,多级变径结构流量分配更均匀。陈思墨等<sup>[19]</sup>对500 m<sup>2</sup>烧结机热风循环罩进行了数值模拟与结构优化,对进气口、导流板和整流花板的结构特征进行了优化。彭坤乾<sup>[20]</sup>对弧形罩进行数值模拟和流场分析,通过组合不同型式的导流装置优化烟罩内部结构,提高了烟气循环罩流场分布的均匀性。杨亚朋等<sup>[21]</sup>引入了浸入式水口的设计理念,将其与烧结烟气循环罩结合,

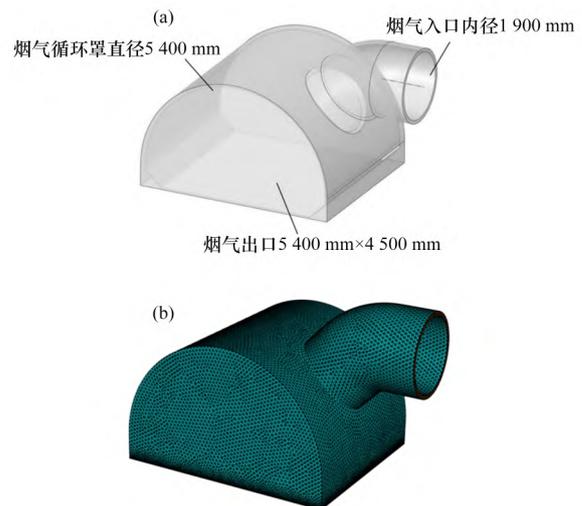
实现烟气的分流和均匀分布。

邯钢360 m<sup>2</sup>烧结机烟气循环系统改自旧有烧结机,循环烟气分配端在烟气密封罩侧边安装烟气管道,形成国内烧结烟气循环系统典型模型—弧形罩侧进风模型,该模型易使烧结料面处循环烟气分布不均,进而影响烧结矿产、质量的稳定。本文以该烧结厂烟气循环系统为研究对象,将烟气循环罩作为计算域进行模拟仿真,通过设置不同型式的导流板,优化循环烟气在弧形烟气罩内流动状态,最终实现循环烟气在料面横向分布的均匀化,台车运行方向气流适当扩散,并将仿真优化方案应用于生产实践,以提高烧结效率,减少废气排放。

## 1 烧结烟气循环罩物理模型的构建

### 1.1 物理模型及网格划分

图1所示为360 m<sup>2</sup>烧结机烟气循环系统烟气密封罩简化模型。该模型包含侧进气管和单节烟气循环罩。



(a) 简化模型; (b) 模型网格划分

图1 烧结烟气循环罩简化模型及网格划分

Fig. 1 Simplified model and meshing diagram of sintering flue gas circulation hood

对模型进行六面体非结构化网格划分,理论上网格划分越精细模型引入的误差就越小,但网格越多计算压力也越大,网格无关性验证见图2。由图2可知,200万以上网格数量几乎不再影响料

面平均速度。因此, 网格总数选取约为 210 万, 网格单元平均质量为 0.751, 计算密度较优和网格质量良好。

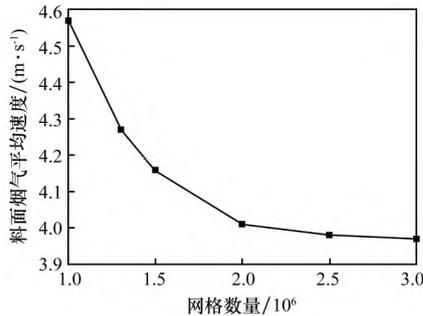


图2 基于料面平均烟气速度的网格独立性测试

Fig. 2 Mesh independence test based on the average flue gas velocity at the mixture surface

## 1.2 控制方程

针对烟气循环罩烟气流的模拟, 在保证求解精度并反映流场规律的前提下, 为减小计算压力, 对单节热风循环罩物理模型做出假设: 各支管的烟气流量均匀分配; 烧结物料表面负压一致; 介于现场密封循环罩封闭性良好, 不考虑侧壁漏风现象; 不研究温度场, 不考虑换热; 忽略烟气中颗粒物对流场的影响。

本文选用工业应用广泛的  $k$ -epsilon 涡黏模型对热风循环罩内流场进行研究, 不考虑换热, 设定循环罩内烟气为不可压缩气体, 湍流流动, 相关求解方程描述如下。

连续性方程式:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (1)$$

动量方程式:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

湍流动能方程式:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \mu_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon + S_k \quad (3)$$

湍流耗散方程式:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \mu_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon G_k}{k} - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $x_i$ 、 $x_j$  为笛卡尔坐标系中的坐标值 ( $i = 1, 2, 3, j = 1, 2, 3, i \neq j$ ),  $\text{m}$ ;  $u_i$ 、 $u_j$  为  $x_i$ 、 $x_j$  方向的速度矢量,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $S_m$ 、 $S_k$ 、 $S_\varepsilon$  为源项,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ;  $p$  为压强,  $\text{Pa}$ ;  $\tau$  为应力张量,  $\text{N}/\text{m}^2$ ;  $g_i$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $F_i$  为流体质量力,  $\text{N}$ ;  $k$  为湍动能, 表示单位质量下湍流脉动动能,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $\varepsilon$  为湍流耗散率, 表示单位质量下湍流动能转化为内能的速率,  $\text{m}^2/\text{s}^3$ ;  $\mu_t$  为湍流黏度,  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ;  $G_k$  为由于平均速度梯度湍流动能产生项,  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^3)$ ;  $C_1$ 、 $C_2$  为无量纲经验常数;  $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$  分别为无量纲湍动能和耗散率的湍流普朗克常数。

## 1.3 物料参数及边界条件设定

根据现场提供的烟气主管总流量为 33 万  $\text{m}^3/\text{h}$  的数据, 假设各支管平均分配, 换算成支管入口速度为 8.083  $\text{m}/\text{s}$ , 并作为模拟设定烟气入口速度值; 料面负压为 -10 Pa; 温度实测取平均值 170  $^\circ\text{C}$ ; 密度取 0.898  $\text{kg}/\text{m}^3$ ; 黏度取  $2.28 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ , 具体见表 1。

表1 循环烟气参数

Table 1 Circulating flue gas parameters

温度/ $^\circ\text{C}$	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	黏度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$	流动形式
170	0.898	$2.28 \times 10^{-5}$	湍流

在数值模拟中, 循环烟气的进气口采用速度入口边界条件, 而出口则采用压力出口边界条件。此外, 烟气管壁的处理采用了标准壁面边界条件。

## 1.4 评价指标

对于烟气出口风速分布情况, 采用速度方差  $S^2$  来定量判断烧结料面风速的均匀性, 如式(5)所示。方差可以用来表征速度在料面上的变化, 其中  $S^2$  值越接近 0, 表明烟气分布越均匀。

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{n} \quad (5)$$

式中:  $v_i$  为烧结料面网格划分后, 各个节点的速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $\bar{v}$  为烧结料面各离散节点平均速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $n$  为无量纲数, 表示烧结料面网格划分后的节点个数。

## 2 现有循环罩仿真分析

现有生产条件中, 热风循环罩的初始气流迹

线正视图如图 3 所示, 气流迹线底视图如图 4 所示, 初始循环罩料面三维速度云图如图 5 所示。由图 3 可以看出, 由于科恩达效应<sup>[22]</sup>, 烟气经过进气口管道下转角处出现最大速度, 为 12.05 m/s, 随后由于进气口在垂直方向上的导流程度有限, 烟气直接因惯性作用在循环罩内来流方向延长线上保持聚集, 冲击至左侧料面, 部分烟气冲向左侧挡风板, 随后沿罩内形成低速回流, 最后进入

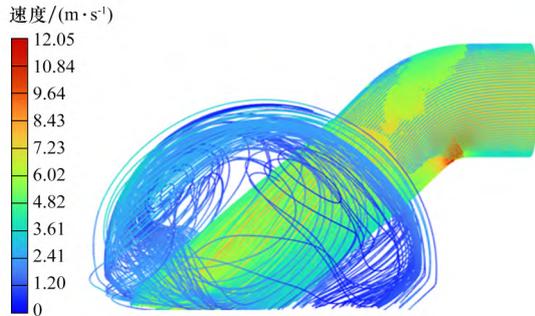


图 3 初始循环罩气流迹线正视图

Fig. 3 Front view of the airflow trace of the initial recirculation hood

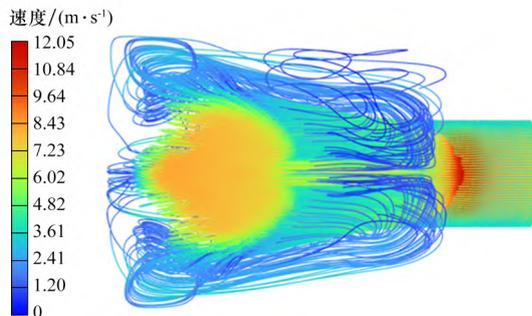


图 4 初始循环罩气流迹线底视图

Fig. 4 Bottom view of the airflow trace of the initial recirculation hood

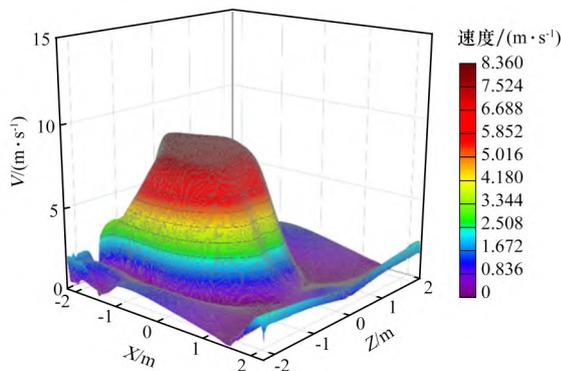


图 5 初始循环罩料面三维速度云图

Fig. 5 Three-dimensional velocity contour of the initial circulating shroud surface

右侧缺风料面。由图 4 可以看出, 烟气水平方向扩散效果不佳, 除进气口对侧中心料面外, 其他大部分料面几乎没有烟气覆盖。由图 5 可以看出, 进气口对侧中心料面处存在烟气出口最高流速, 为 8.36 m/s, 总体料面速度方差经计算为 6.934 6。

### 3 循环罩结构优化与仿真分析

#### 3.1 弧形导流板优化

针对无任何导流装置的侧进风弧形罩内流场分布不均匀问题, 在烟气入口和烟气罩交接位置增加 6 块弧形导流板, 同时为了保证每股气流流量相同, 上下层导流板间距略大于中部导流板间距, 且导流板弧度从上往下逐渐变大, 如图 6 所示。优化后的气流迹线正视图如图 7 所示, 气流迹线底视图如图 8 所示, 料面三维速度云图如图 9 所示。由图 7 可知, 烟气流通过不同偏转角度的弧形导流板, 较大的补充了右侧料面的风量, 同时几乎消除了冲击挡风板后形成的沿循环罩的低速回流。由图 8 可知, 烟气横向均分作用改善明显, 烟气出口料面形成的 5 个横向排布的烟气峰从左到右逐渐变得窄长, 这是因为随着导流板调

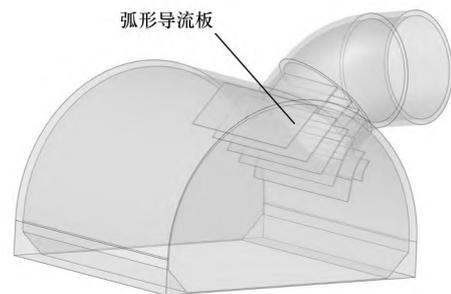


图 6 弧形导流板结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of arc deflector structure

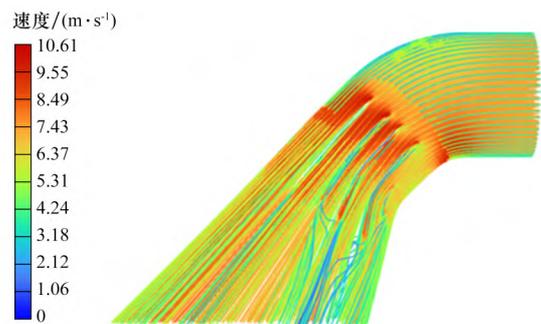


图 7 弧形导流板优化气流迹线正视图

Fig. 7 Curved deflector optimizes the front view of the airflow trace

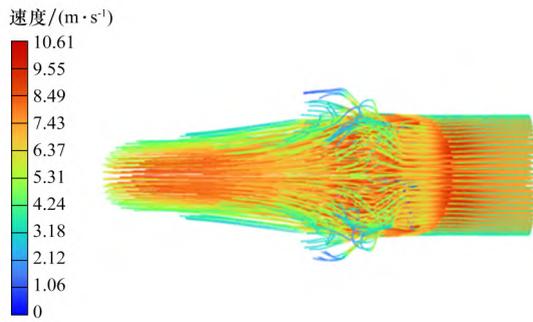


图8 弧形导流板优化气流迹线底视图

Fig. 8 Curved deflector for optimized airflow trace

bottom view

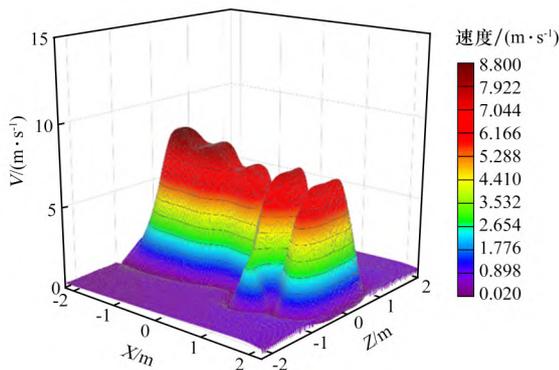


图9 弧形导流板优化料面三维速度云图

Fig. 9 Three-dimensional velocity contour of the optimized material surface of the arc deflector

整角度变大,烟气流冲击板面的压力越来越大,气流在板面的积压扩散越来越明显。由图9可知,烟气基本覆盖了4.5 m宽的横向料面,流体偏斜的情况有了较大改善,且各个烟气流速峰峰值速度大致相同,烟气流横向均分改善效果较为明显。

相比于原结构,分流后的循环烟气罩内最高流速为10.61 m/s,下降11.95%,料面上流速稍有增加,料面最高流速为8.8 m/s,增加了5.26%,但总体方差减小,速度方差为5.499 5,下降20.69%。

### 3.2 直转角导流板优化

在弧形导流板设置方案的基础上,为了减小机械加工难度,设置一套直转角导流板方案,由于直转角导流板气流流向调整相比较弧形导流板的气流流向调整较为生硬,所以再增加一块导流板,提高导流能力,其结构如图10所示。烟气循环罩的气流迹线正视图如图11所示,气流迹线底视图如图12所示,料面三维速度云图如图13所

示。由图11可以看出,当转角较大时,直转角导流板的右侧大转角导流板下的气流迹线相比较弧形导流板气流迹线较为紊乱,同时比起弧形导流板也略微提高了罩内最高流速,达到了11.75 m/s,但仍然小于现有烧结罩罩内最高流速,较其下降2.48%。由如图12可知,当烟气被分成6股向下吹扫,在料面形成6个烟气峰,但相比较于弧形导流板,直转角导流板右侧两个烟气峰有较大的速度峰值波动,左侧气流峰峰值达到9.4 m/s,右侧第一个峰变得十分窄长,速度也明显的低于其

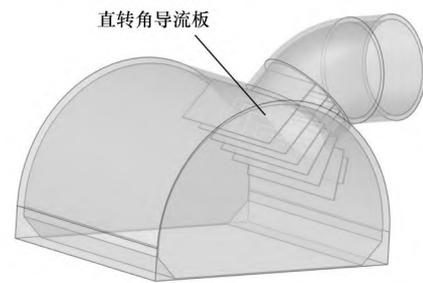


图10 直转角导流板结构示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the structure of the straight-turning angle deflector

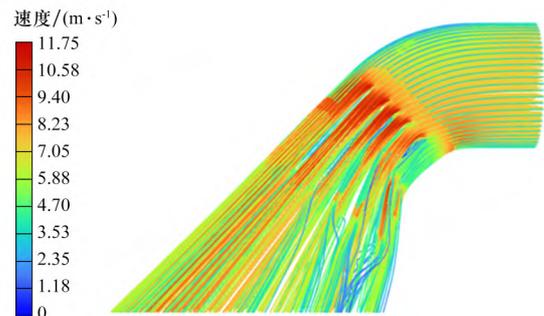


图11 直转角导流板优化气流迹线正视图

Fig. 11 Straight angle deflector optimizes the positive view of the airflow trace

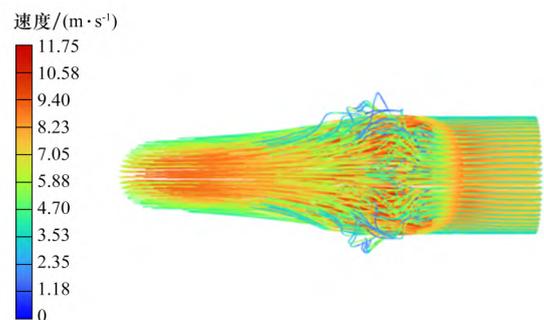


图12 直转角导流板优化气流迹线底视图

Fig. 12 Bottom view of the optimized airflow trace from the right-angle deflector

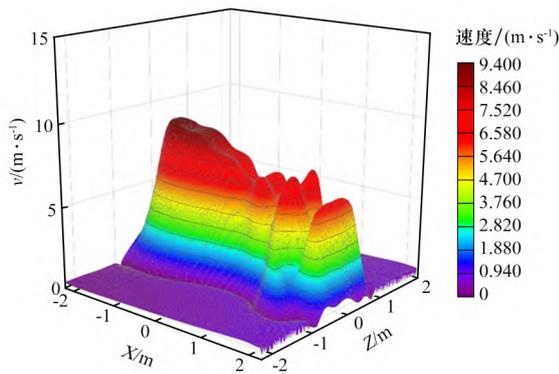


图 13 直转角导流板优化料面三维速度云图

Fig. 13 Three-dimensional velocity contour of the material surface optimized by the straight-angle deflector

他峰。从图 13 可以看出, 烟气流速峰虽然波动大于弧形导流板, 但由于增加了一块导流板, 料面气流横向覆盖面积广于弧形导流板。

相比于原结构, 料面烟气最高流速达到 9.4 m/s, 增加 12.44%, 总体方差为 5.983 7, 降低 13.71%, 并且其相比于弧形导流板, 机械加工成本更低, 实践中更易实现, 同时也能达到不错的横向烟气流均分作用。

### 3.3 井式导流板优化

前两种导流方案可以实现烟气在料面横向气流较为均匀的分布, 但由于实际生产过程中, 烟气循环罩配备的烟气管道有限, 若只考虑料面横向上的均匀性, 虽然可以改善烟气左右不均的情况, 但在烟气管道未覆盖的烟气循环罩盲区烟气供应量时常是不足的。对于这个问题, 杨亚朋等<sup>[21]</sup>在烟气进气口设置导流板的基础上于料面上方设置水平的多孔导流薄板来重新规整烟气分布, 理论上做到了烟气在料面较大程度的均匀性改善, 但考虑到水平多孔导流薄板受到的烟气冲击力较大, 悬空安装较为不便, 且易对烧结检修过程中工作人员的通行造成不便, 本文未采取该方式进行模拟优化, 将重点放在烟气入口。

在直转角导流板的基础上再增加竖向导流板, 构成井式导流板。相互嵌合的井字结构提高了导流板的整体稳定性, 同时竖向导流板适当扩张了中心气流, 减弱了中心气流强度, 使烟气流在台车运行方向适当扩散, 提高了烟气在料面上的覆盖面积, 其结构如图 14 所示。井式导流板优化气

流迹线正视图、底视图以及料面三维速度云图分别如图 15 ~ 17 所示。由图 15 可看出, 烟气流横向覆盖范围并无减小, 在导流板处存在最高烟气流速, 为 11.75 m/s, 烟气流经过竖向导流板的扩散后重新形成了轻微低速回流。由图 16 可看出, 气体扩散后, 中心气流流速大大减小, 由于科恩达效应, 中心部分分股的气流又呈重新聚拢, 烟气整体覆盖料面的面积大大增加。由图 17 可看出, 相比于原结构, 烟气出口最高流速为 7.7 m/s, 减少 7.89%; 速度方差为 2.917 2, 减少 57.93%。

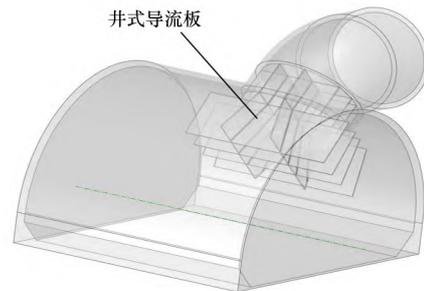


图 14 井式导流板结构示意图

Fig. 14 Schematic diagram of well-type deflector structure

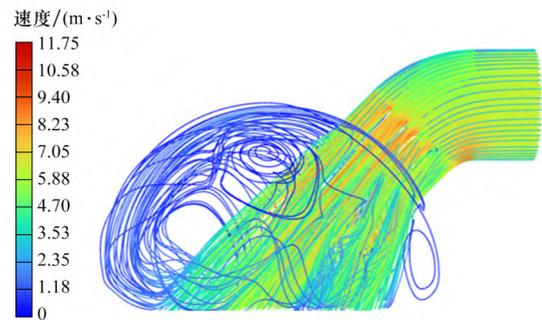


图 15 井式导流板优化气流迹线正视图

Fig. 15 Front view of the well-type deflector optimized airflow trace

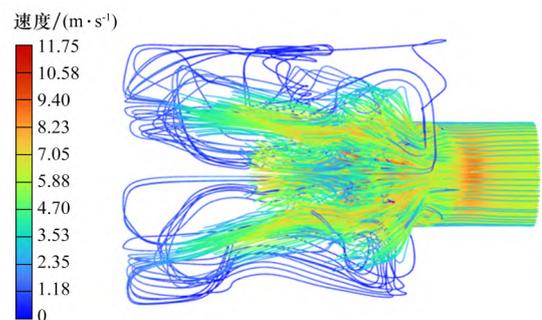


图 16 井式导流板优化气流迹线底视图

Fig. 16 Bottom view of the optimized airflow trace of the well-type deflector

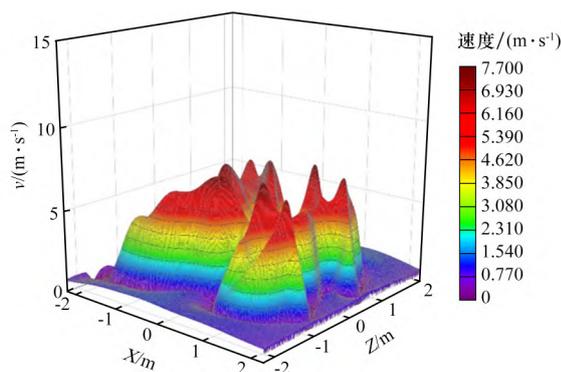


图 17 井式导流板优化料面三维速度云图

Fig. 17 Three-dimensional velocity diagram of the optimized material surface of the well-type deflector

## 4 结 论

本文通过对邯钢 360 m<sup>2</sup> 烧结机烟气循环系统的烟气分配端进行模拟仿真, 得出以下结论:

(1) 原结构烟气从侧向进入罩内, 导致料面烟气分布不均, 模拟结果表明, 进入料面烟气速度方差达到了 6.93, 表现出明显的不均匀性。

(2) 在烟气入口处增设弧形导流板后, 将烟气按流量均分成多股, 调整不同烟气股流向。优化后, 料面烟气速度方差降低至 5.50, 相比原结构降低了 20.69%, 表现出较好的改善效果。

(3) 为了降低机械加工难度, 将弧形导流板改为直转角导流板。优化后, 料面烟气速度方差为 5.98, 虽然略高于弧形导流板, 但相比原结构降低 13.71%, 且在成本和实际操作性方面具有优势。

(4) 在直转角导流板的基础上再增加竖向导流板, 构成井式导流板, 在提高导流板的结构稳定性的同时, 减弱了中心气流强度, 提高了烟气在料面上的覆盖面积。优化后, 料面烟气速度方差降低至 2.92, 相比原结构降低 57.93%, 效果显著。

本文利用计算流体力学方法, 对烧结烟气密封罩进行了单速度流场模拟, 为导流板的工程结构设计提供了参考。在未来工作中, 应当进一步考虑实际烧结生产存在的烟气流量变化、密封罩的漏风状况、烟气温度的变化和烟气颗粒物对罩内烟气流的影响。后续研究可以从烟气动态初始条件和包含热、流、固的多物理场耦合模拟展开。

## 参考文献:

- [1] 殷宪哲, 郑金星. 第四次产业革命下的我国钢铁工业发展的思考 [J]. 江西冶金, 2019, 39(1): 45-48.  
YIN Xianzhe, ZHENG Jinxing. A study on the development of iron and steel industry in the background of the fourth industrial revolution [J]. Jiangxi Metallurgy, 2019, 39(1): 45-48.
- [2] 刘宇浩. 钢铁行业中的绿色冶金技术研究与应用 [J]. 冶金与材料, 2024, 16(8): 130-132.  
LIU Yuhao. Research and application of green metallurgical technology in iron and steel industry [J]. Metallurgical and Materials, 2024, 16(8): 130-132.
- [3] 于勇, 朱廷钰, 刘霄龙. 中国钢铁行业重点工序烟气超低排放技术进展 [J]. 钢铁, 2019, 54(9): 1-11.  
YU Yong, ZHU Tingyu, LIU Xiaolong. Progress of ultra-low emission technology for key processes of iron and steel industry in China [J]. Iron & Steel, 2019, 54(9): 1-11.
- [4] 李超群, 徐文青, 朱廷钰. 烧结烟气循环技术研究现状与发展前景 [J]. 河北冶金, 2019(S1): 1-6.  
LI Chaoqun, XU Wenqing, ZHU Tingyu. Recent advances and development prospect of sintering flue gas cycle technology [J]. Hebei Metallurgy, 2019(S1): 1-6.
- [5] 陈富松, 袁亚强, 康宏毅, 等. 当前形势下烟气循环烧结工艺发展现状及展望 [J]. 中国冶金, 2024, 34(2): 21-34.  
CHEN Fusong, YUAN Yaqiang, KANG Hongyi, et al. Development status and prospect of flue gas recirculation sintering process under current situation [J]. China Metallurgy, 2024, 34(2): 21-34.
- [6] 吕国红. 钢铁行业大气污染物减排方法分析 [J]. 化工管理, 2022(30): 38-40.  
LYU Guohong. Analysis of air pollutant emission reduction method in iron and steel industry [J]. Chemical Management, 2022(30): 38-40.
- [7] FAN X, YU Z, GAN M, et al. Flue gas recirculation in iron ore sintering process [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2016, 43(6): 403-410.
- [8] 李勇, 王利刚, 余雪峰, 等. 烧结机烟气循环技术 [J]. 河北冶金, 2024(5): 80-84.  
LI Yong, WANG Ligang, SHE Xuefeng, et al. Sintering machine flue gas circulation technology [J]. Hebei Metallurgy, 2024(5): 80-84.

- [9] 温胜坤. 烧结烟气循环技术应用及系统设计要点分析[J]. 中国设备工程, 2025, (6): 210-212.  
WEN Shengkun. Application of sintering flue gas circulation technology and analysis of key points in system design [J]. China Plant Engineering, 2025 (6): 210-212.
- [10] 苏步新, 张标, 邵久刚. 我国烧结烟气循环技术应用现状及分析[J]. 冶金设备, 2016(6): 55-59.  
SU Buxin, ZHANG Biao, SHAO Jiugang. Analysis of domestic sintering flue gas technology and its application [J]. Metallurgical Equipment, 2016(6): 55-59.
- [11] 刘仕虎, 周茂军. 烟气循环烧结工艺综述及其在宝钢应用的探讨[J]. 宝钢技术, 2018(6): 37-44.  
LIU Shihu, ZHOU Maojun. Review of flue gas circulation sintering process and its application in Baosteel [J]. Baosteel Technology, 2018(6): 37-44.
- [12] ZHU T Y, WANG X, LI C Q, et al. Numerical simulation of CO emission in a sintering pot under flue gas recirculation [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 452: 139069.
- [13] 章裕东, 龙红明, 伍英, 等. 热废气循环条件下的烧结过程反应解析[J]. 烧结球团, 2020, 45(5): 63-70.  
ZHANG Yudong, LONG Hongming, WU Ying, et al. Analysis on reaction in sintering process under hot exhaust gas circulation [J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(5): 63-70.
- [14] ZHANG S Z, WEN Z, WANG G, et al. The effects of operational parameters on flue gas recirculation iron ore sintering process: Sensitivity analysis based on numerical simulation and industrial onsite experimental validation [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2020, 47(4): 368-380.
- [15] 陈许玲, 郑如月, 范晓慧, 等. 烟气循环烧结过程料层温度及 NO<sub>x</sub> 排放模拟模型[J]. 钢铁, 2020, 55(2): 23-30.  
CHEN Xuling, ZHENG Ruyue, FAN Xiaohui, et al. Numerical simulation model of temperature and NO<sub>x</sub> emission in flue gas circulating sintering process [J]. Iron & Steel, 2020, 55(2): 23-30.
- [16] 杨正伟, 王兆才, 温荣耀, 等. 烧结烟气循环系统仿真模拟研究[J]. 烧结球团, 2018, 43(3): 63-68.  
YANG Zhengwei, WANG Zhaocai, WEN Rongyao, et al. Simulation research of sintering flue gas recirculation system [J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(3): 63-68.
- [17] 许源, 毛瑞, 王飞, 等. 烧结烟气循环系统数值模拟[J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(7): 675-681.  
XU Yuan, MAO Rui, WANG Fei, et al. Numerical simulation of sintering flue gas circulation system [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2020, 32(7): 675-681.
- [18] 任伟, 高璟, 徐文青, 等. 基于 Fluent 的烧结烟气循环系统设备-烟气分配器数值模拟[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2021, 42(1): 56-61.  
REN Wei, GAO Jing, XU Wenqing, et al. Numerical simulation of sintering flue gas circulation system equipment-flue gas distributor based on fluent [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2021, 42(1): 56-61.
- [19] 陈思墨, 周浩宇, 朱蓉甲, 等. 烧结热风循环罩数值模拟与结构优化[J]. 中国冶金, 2022, 32(3): 119-124.  
CHEN Simo, ZHOU Haoyu, ZHU Rongjia, et al. Numerical simulation and structure optimization of sintering hot air circulating hood [J]. China Metallurgy, 2022, 32(3): 119-124.
- [20] 彭坤乾. 烧结烟气循环罩导流装置的数值模拟与优化[J]. 现代交通与冶金材料, 2022, 2(2): 45-53.  
PENG Kunqian. Numerical simulation and optimization of sintering flue gas circulating hood diversion devices [J]. Modern Transportation and Metallurgical Materials, 2022, 2(2): 45-53.
- [21] 杨亚朋, 李杰, 郝鑫涛, 等. 基于改进型进气口结构的循环烟罩数值模拟[J]. 中国冶金, 2024, 34(8): 138-148.  
YANG Yapeng, LI Jie, HAO Xintao, et al. Numerical simulation of flue gas circulation hood based on improved air inlet structure [J]. China Metallurgy, 2024, 34(8): 138-148.
- [22] 叶雅玲, 彭小勇, 胡畏, 等. 基于科恩达效应通风装置气流特性研究[J]. 建筑热能通风空调, 2017, 36(11): 23-27.  
YE Yaling, PENG Xiaoyong, HU Wei, et al. Airflow characteristic of ventilation installation based on coanda effect [J]. Building Energy & Environment, 2017, 36(11): 23-27.