

## 烧结机混料除尘系统管网风量平衡与优化调节

焦 阳<sup>1</sup>, 赵晨豪<sup>2</sup>, 李新强<sup>1,4</sup>, 赖志强<sup>1</sup>, 李朝阳<sup>1</sup>, 杨文奇<sup>3</sup>, 万长欢<sup>3</sup>, 党小庆<sup>2</sup>

(1. 中国重型机械研究院股份公司, 陕西 西安 710018; 2. 西安建筑科技大学 a. 环境与市政工程学院;  
b. 陕西省环境工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 北京利德衡环保工程有限公司, 北京 102308;  
4. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 为了提高混料除尘系统管网的收集效率(以 $2 \times 500 \text{ m}^2$ 烧结机为例), 本文采用数值模拟方法对管网流场进行分析, 通过在集气罩支管上设置变径管的方法对除尘系统管网进行阻力平衡优化。模拟结果表明: 管网速度与压力分布符合由风机提供动力的管网特征, 管网整体处于负压状态, 负压绝对值由管网进气口向管网总出口处逐渐增大。 $2 \times 500 \text{ m}^2$ 烧结机混料除尘系统管网存在较为严重的风量不平衡问题, 各吸尘点风量偏差均在10%以上, 在冬季设计风量下管网1吸尘点的风量不平衡率最高达-65%; 管网2吸尘点的风量不平衡率最高达-67%; 在集气罩支路上增设变径管可有效调节管网的风量不平衡性, 调整后在冬季和夏季的集气罩风量偏差均不超过10%, 可以使各集气罩风量达到设计要求。研究可为前期工程设计提供帮助, 大大节省工程调试费用, 缩短工期, 并有助于风量不平衡管道的调节和改造。

**关键词:** 烧结机; 混料除尘系统; 风量平衡; 数值模拟; 变径管

**中图分类号:** X701; TF046.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-8764(2025)05-0131-12

**doi:** 10.13403/j.sjqt.2025.05.088

## Air volume balance and optimal regulation of dust removal system network on a sinter strand

JIAO Yang<sup>1</sup>, ZHAO Chenhao<sup>2</sup>, LI Xinqiang<sup>1,4</sup>, LAI Zhiqiang<sup>1</sup>, LI Zhaoyang<sup>1</sup>, YANG Wenqi<sup>3</sup>,  
WAN Changhuan<sup>3</sup>, DANG Xiaoping<sup>2</sup>

(1. China Heavy Machinery Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710018, Shaanxi, China; 2. Xi'an University of Architecture and Technology a. School of Environmental and Municipal Engineering; b. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Environmental Engineering, Xi'an 710055, Shaanxi, China; 3. Beijing Lideheng Environment Protection Engineering Co., Ltd., Beijing 102308, China; 4. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to improve the collection efficiency of the pipe network of the mixture dust removal system( taking the  $2 \times 500 \text{ m}^2$  sintering machine as an example), the flow field of the pipe network is analyzed by numerical simulation method, and the resistance balance of the pipe network of the dust removal system is optimized by setting the adapter bonnet on the branch pipe of the gas collection hood. The simulation results show that the speed and pressure distribution of the pipe network are in line with the characteristics of the pipe network powered by the fan, and the whole pipe network is in a negative pressure state, and the absolute value of negative pressure gradually increases from the air inlet of the pipe network to the general outlet of the pipe network. There is a serious air volume imbalance in the pipe network of the

**收稿日期:** 2025-03-20; **修回日期:** 2025-04-03

**基金项目:** 陕西省重点研发计划资助项目(2024SF-ZDCYL-05-06); 国机重装重大科研项目(2023ZLKY-13); 国机重装青年科技基金资助项目(QNJJ-2024-09)

**作者简介:** 焦 阳(1999—), 男, 助理工程师, 从事大气污染控制技术及其装备方面的工作。

**通信作者:** 党小庆(1964—), 男, 博士, 教授, 从事大气污染控制技术及其装备方面的研究。

2 × 500 m<sup>2</sup> sinter strand mixture dust removal system, and the air volume deviation of each suction point is more than 10%, and the air volume imbalance rate of the 1st dust suction point of the pipe network is up to -65% under the design air volume in winter. The air volume imbalance rate of the 2nd vacuum point of the pipe network is up to -67%; The addition of adapter bonnet on the branch road of the air collector can effectively adjust the air volume imbalance of the pipe network, and the deviation of the air volume of the air collection hood in winter and summer is not more than 10%, which can make the air volume of each air collection hood meet the design requirements. The research can provide assistance for the preliminary engineering design, greatly save the cost of engineering commissioning, shorten the construction period, and help the adjustment and transformation of unbalanced air volume pipelines.

**Key words:** sinter strand; mixing dust removal system; air volume balance; numerical simulation; adapter bonnet

混料作为钢铁烧结生产过程的重要环节, 通过使原料充分混合, 提高料层透气性, 从而满足烧结生产的需要<sup>[1]</sup>。在混料工序中, 常通过加入热水或蒸汽提高混合、制粒效果, 但由此产生大量含湿含尘混合废气, 这些水汽共生粉尘是烧结厂粉尘的主要来源之一<sup>[2-3]</sup>。我国烧结设备正在向着大型化、智能化、环保化发展, 中国宝武新钢 660 m<sup>2</sup> 烧结机是目前世界上最大的烧结机, 具有显著的经济效益, 但对于原料质量也提出了更高的要求<sup>[4]</sup>。为优化制粒效果, 现有企业采用三混工艺提升制粒质量, 换料过程的增加和传送带长度的增加, 导致废气收集管网复杂化<sup>[5]</sup>。目前混料除尘管网系统具有除尘点多、除尘风量大、粉尘易沉降、易堵塞的特点<sup>[6-7]</sup>。除尘管网风量平衡是工业烟气净化系统设计过程的重要环节, 各除尘管道的风量平衡性直接关系到整个系统的正常运行与烟尘收集效果, 同时对运行成本也会产生影响<sup>[8]</sup>。烧结混料除尘系统吸尘点多管网复杂, 对于这类复杂管网而言, 管网阻力平衡尤为重要。

在钢铁行业的废气治理过程中, 各除尘点的设计风量因生产条件的不同而有所差异, 除尘管网的设计不平衡率应控制在 10% 以内<sup>[9]</sup>。为了确保风量的合理分配和含尘气体的有效收集, 除尘管网的设计和运行阶段需要进行相应的调节。目前在管网设计中常用的风量平衡方法主要包括传统阻力平衡计算, 开发风量平衡软件和计算流体力学方法三种。传统的设计方法是通过设计初始流速确定管道规格, 从而计算各部分阻力损失。刘再新等<sup>[10]</sup>在龙钢 3<sup>#</sup> 烧结机配料除尘系统设计时, 通过阻力平衡计算并设置阻力平衡器, 实现了除尘系统长期稳定运行。韩文宏等<sup>[11]</sup>以带三通的风管为模型, 分析了压力平衡公式在管径计算

中的问题, 指出在计算并联管路的阻力平衡时, 应充分考虑局部件对局部阻力系数的影响, 并建议对计算结果进行反复验证。然而目前除尘管网受生产工艺和场地限制, 结构较为复杂, 吸尘点密集, 支路繁多, 传统计算方法效率较低。第二种方法是通过研发风量平衡软件来计算除尘系统的风量, 并将计算得到的管道风量与设计风量进行比较, 从而实现阀门开度的调节。李准等<sup>[7]</sup>将宝钢湛江 1<sup>#</sup> 烧结机机尾工程实际运行情况与开发的阻力平衡计算软件进行比较, 发现实际风量与设计风量偏差小于 10%, 证明软件计算结果可靠性。黄勇波等<sup>[12]</sup>采用动态法对管网结构进行优化调整, 并采用 Excel 和 VBA 平台开发除尘管网平衡优化软件, 通过模拟管道流动来进行水力计算, 进而对管道风量进行求解, 将吸尘点风量不平衡率控制在 10% 以内。孙志顺等<sup>[13]</sup>通过软件 Visual Basic 6.0 进行编程开发阻力平衡器实现对除尘管网的平衡计算, 通过调整管径实现阻力平衡。第三种方法是采用计算流体力学方法对管网系统进行模拟, 直接获得各支路的压力和速度分布, 从而优化管网结构。DE ALMEIDA 等<sup>[14]</sup>运用 CFD 模拟对管网系统内含尘气体的流速和温度进行研究, 通过改善管道的几何结构, 实现更稳定的流动状态。赵坤等<sup>[8]</sup>采用 Fluent 软件对某钢铁企业烧结机尾内部流场进行数值模拟, 通过在主管和支管上增设管道阀门和调节管径的方法, 实现对管道系统的有效调节, 满足工程实际应用要求。数值模拟方法在准确高效方面有其独特的优势, 可通过对管网反复调节, 直到满足设计要求, 但目前研究大多关注提高除尘设备的净化效率, 而对于废气收集系统的收集效率和效果研究较少。

本文基于烧结机混料除尘系统管网, 采用数

值模拟方法对管网吸尘点风量偏差进行分析,针对吸尘点风量不平衡的问题,通过调节局部阻力,改善风量分配现状,使各吸尘点风量达到设计风量,保证对含尘废气的有效收集,从而为复杂管网系统阻力平衡设计提供参考。

## 1 模型与计算方法

### 1.1 物理模型及参数

研究以某钢铁厂  $2 \times 500 \text{ m}^2$  烧结混料除尘系统为背景,整个系统功能区包括皮带通廊、烧结室和混合室,根据混料除尘系统集气罩与管道相对位置,使用 Revit 软件 1:1 建立物理模型,几何结构如图 1 所示。图 1 中,混料除尘系统管网分为管网 1 和管网 2 两部分,管网 1 共有集气罩 49 个,冬季设计风量为  $3.47 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,管网 2 共有集气罩 47 个,冬季设计风量为  $3.39 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,混料除尘系统管网各吸尘点支管管径及设计风量如表 1 所示。烧结机一混后大部分会有水蒸气逸散,导致实际操作时冬季除尘风量大,夏季除尘风量小,夏季除尘风量为冬季的 70%,夏季管网 1 设计风量为  $2.429 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,夏季管网 2 设计风量为  $2.373 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。由于管网 1 和管网 2 模型复杂,集气罩数量繁多,为方便后续调整优化,根据吸尘点风量以及管道直径变化对管网进行管段划分和标号,将管网 1 和管网 2 分别划分为两个支路,其中支路 1 有管段 5 个,支路 2 有管段 4 个(各支

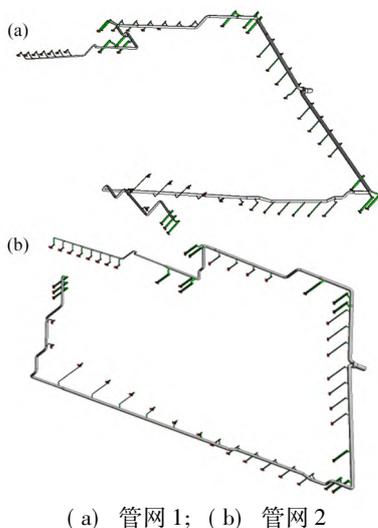


图 1  $2 \times 500 \text{ m}^2$  烧结机混料除尘系统管网

Fig. 1 System pipe network of  $2 \times 500 \text{ m}^2$  sintering machine mixing dust removal

表 1  $2 \times 500 \text{ m}^2$  烧结混料除尘系统管网设计参数  
Table 1 Design parameters of the pipeline network for the  $2 \times 500 \text{ m}^2$  sintering mixing dust removal system

除尘系统	吸尘点数量/个	集尘管规格/(mm × mm)	设计风量/( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )
管网 1	35	∅325 × 4	3 000
	2	∅377 × 4	5 000
	1	∅480 × 4	10 000
	11	∅720 × 5	20 000
管网 2	33	∅325 × 4	3 000
	2	∅377 × 4	5 000
	1	∅480 × 4	10 000
	11	∅720 × 5	20 000

路管段由 1 起编),管段划分示意如图 2 所示。

### 1.2 控制方程

烧结机混料除尘系统管网内部流场是复杂的三维湍流流场,为了使模拟能接近实际运行情况,提高计算准确度,做出相关假设:①流体做定常流动,流体中各点运动参数和时间无关;②流体为不可压缩流体;③内部气体流动为黏性气体的湍流流动。在对烧结机混料除尘系统管网进行数值模拟的过程中选择控制方程<sup>[15-16]</sup>,其控制方程如下。

连续性方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = \text{div}(\boldsymbol{\mu} \cdot \text{grad} \mathbf{u}) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_u \quad (2)$$

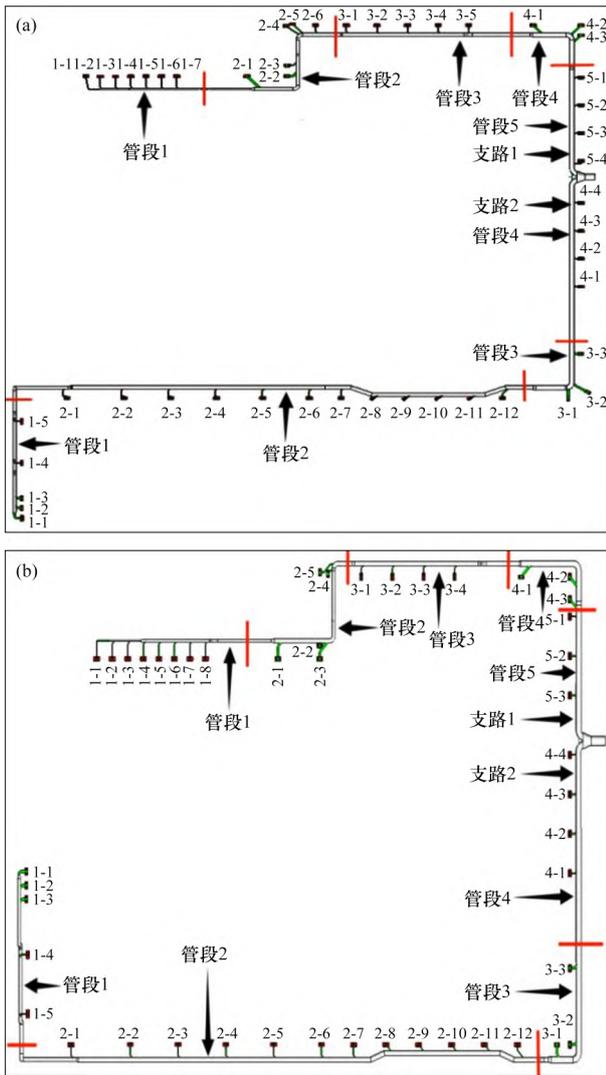
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \mathbf{u}) = \text{div}(\boldsymbol{\mu} \cdot \text{grad} v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_v \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \mathbf{u}) = \text{div}(\boldsymbol{\mu} \cdot \text{grad} w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_w \quad (4)$$

输运方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ &\frac{C_1 \varepsilon}{k} G_k - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $\rho$  为流体密度， $\text{kg/m}^3$ ； $u$ 、 $v$ 、 $w$  为速度矢量  $\mathbf{u}$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的分量， $\text{m/s}$ ； $\mu$  为动力黏度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； $S_u$ 、 $S_v$ 、 $S_w$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向上的广义源项； $p$  为压强， $\text{Pa}$ ； $k$  为湍流动能； $\varepsilon$  为湍流耗散率； $u_i$  为时均速度， $\text{m/s}$ ； $\mu_t$  为湍流黏度； $G_k$  为由于平均速度梯度引起的湍动能  $k$  的产生项； $x_i$  和  $x_j$  为  $x$  在  $i$  和  $j$  方向上的分量； $C_1$  和  $C_2$  为经验常数， $C_1 = 1.44$ ， $C_2 = 1.92$ ； $\sigma_k$  和  $\sigma_\varepsilon$  分别是与  $k$  和  $\varepsilon$  对应的 Prandtl 数。



(a) 管网 1；(b) 管网 2  
图 2 管网管段划分示意

Fig. 2 Schematic diagram of pipe network division

### 1.3 计算方法与边界条件

研究采用 Revit 按 1:1 比例构建烧结机混料除尘系统管网几何模型。三维模型划分网格后导入流体动力学软件 Fluent 中，采用有限体积法进行

稳态计算，计算模型选用标准  $k-\varepsilon$  双方程模型，求解的差分格式采用一阶迎风格式；计算时选择分离求解器，压力速度耦合方式采用 SIMPLE 算法。数值模拟边界条件设置参数见表 2。

表 2 边界条件设置

Table 2 Boundary condition setting

边界名称	边界类型	参数设置
管网出口	速度出口	$v = 11.15 \sim 16.25 \text{ m/s}$
集气罩入口	压力入口	—
集气罩及管道表面	绝热壁面	—

### 1.4 模型有效性验证

控制方程及求解方法的选择对数值模拟结果的准确性与可靠性影响显著。为验证数值模拟的准确性，与已有文献 [17] 的实测数值进行对比以验证数值模拟的有效性，三维模型如图 3 所示。数值模拟的各项参数与其保持一致。模拟结果如图 4 所示。由图 4 可知，各集气罩的模拟值与实测值具有较高的吻合性。

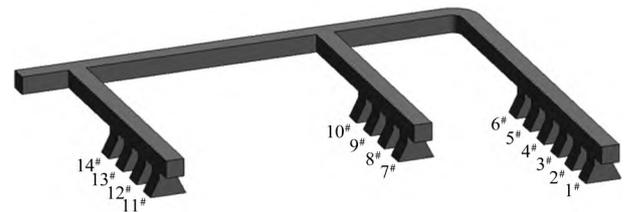
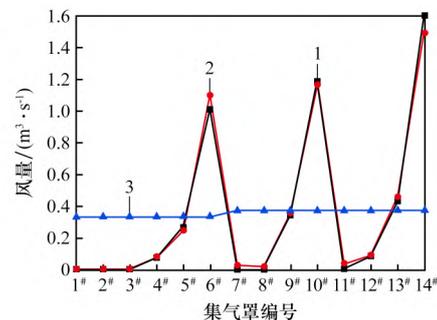


图 3 三维模型示意

Fig. 3 3D model diagram



1—实测数值；2—调节前模拟值；3—设计风量。

图 4 集气罩风量试验与模拟结果

Fig. 4 Experimental and simulated airflow rates of a capture hood

### 1.5 传统通风管道风量平衡调节方法

传统管道风量调试过程是根据原风量验证结果，计算各管道的压力损失，而后根据压力损失调节各吸尘点的风量，使管网各集气罩的风量达

到平衡。

以管网1支管1上1-1集气罩和5-4集气罩为例,若想使两集气罩风量达到设计风量,则需要满足以下计算:

集气罩1-1的压力损失( $\Delta P_1$ , Pa)与集气罩5-4的压力损失( $\Delta P_2$ , Pa)计算分别见式(6)、(7):

$$\Delta P_1 = \left( \xi_1 + \sum \xi_i + \lambda \frac{l}{D} \right) \cdot \frac{\rho V_1^2}{2} \quad (6)$$

$$\Delta P_2 = \left( \xi_2 + \sum \xi_i + \lambda \frac{l}{D} \right) \cdot \frac{\rho V_2^2}{2} \quad (7)$$

式中:  $\xi_1$ 、 $\xi_2$ 为局部阻力系数;  $\sum \xi_i$ 为所有阻力系数之和;  $\lambda$ 为沿程阻力系数;  $l$ 为管长, m;  $D$ 为管径, m;  $V_1$ 、 $V_2$ 为管道风速, m/s。

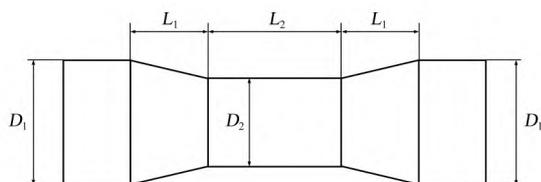
对于集气罩1-1和集气罩5-4,在管径不变的前提下,  $\xi_1$ 和 $\xi_2$ 与 $\lambda$ 为定值。使两者并联管道压力损失平衡( $\Delta P_1 = \Delta P_2$ ),则有:

$$\frac{1}{2} \rho V_1^2 \xi_1 = \frac{1}{2} \rho V_2^2 \xi_2 \quad (8)$$

可见,传统的风量调试必须在除尘系统施工结束后进行,调试周期长,同时要在每个吸尘点的支管道上安装风量调节阀,投资成本高。本研究考虑通过数值模拟方法对整个管网系统进行阻力平衡计算,并以其他局部阻力部件取代阀门,以节省施工成本。

### 1.6 局部变径管阻力损失

局部变径管示意如图5所示,即在某段直管段中间截取一段换为直径更小的管道,局部变径管道通常包括收缩段、小直径直管段和扩张段三部分。因此,设置局部变径管是通过改变流场形状来改变阻力,实际上是用收缩段和扩张段的局部阻力损失以及小直管段的沿程阻力损失,取代原本直管段的沿程阻力损失<sup>[18]</sup>。



$D_1$ —管段直径;  $D_2$ —小直径管段直径;

$L_1$ —渐缩渐扩段长度;  $L_2$ —小直径管段长度。

图5 局部变径管道示意

Fig. 5 Schematic of a local pipe size transition

对于具有变径管的支管,其管段压力损失计算如下<sup>[19]</sup>:

$$\Delta P = \Delta P_i + \Delta P_m \quad (9)$$

式中:  $\Delta P$ 为管段的总压力损失, Pa;  $\Delta P_i$ 为管段的沿程阻力损失, Pa;  $\Delta P_m$ 为管段的局部压力损失, Pa。

对于管段的沿程阻力损失:

$$\Delta P_i = l \times \frac{\lambda}{D} \times \frac{\rho v^2}{2} = l R_1 \quad (10)$$

式中:  $R_1$ 为单位长度管道的沿程压力损失,简称比压损, Pa/m;  $v$ 为流速, m/s。

流体在管道内流动的 $\lambda$ 值取决于流体的流动状态和管壁的相对粗糙度( $K/d$ )。 $\lambda$ 值可以按照科尔布鲁克(Colebrook)公式<sup>[20]</sup>计算:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left( \frac{K}{3.71d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (11)$$

式中:  $K$ 为管道内壁的当量绝对粗糙度, m;  $Re$ 为雷诺数。

局部压力损失可按下式计算:

$$\Delta P_m = (\xi_3 + \xi_4) \xi \frac{\rho v^2}{2} \quad (12)$$

式中:  $\xi_3$ 为渐扩段局部阻力系数;  $\xi_4$ 为渐缩段局部阻力系数,局部变径管道局部阻力系数的选取依照《管道压力降计算》(HG/T 20570.7—95)。

### 1.7 评价指标

《工业建筑供暖通风与空气调节设计规范》(GB 50019—2015)中要求实际风量与设计风量的偏差不应大于 $\pm 10\%$ ,具体计算方法如下:

$$w = \frac{Q_m - Q_s}{Q_s} \times 100\% \quad (13)$$

式中:  $w$ 为风量偏差;  $Q_m$ 为模拟风量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $Q_s$ 为设计风量,  $\text{m}^3/\text{h}$ 。

## 2 烧结混料除尘系统管网集气罩风量确定

### 2.1 管网1数值模拟结果分析

烧结混料除尘系统管网1速度云图及压力云图分别如图6、7所示。由图6可知,管网1各支路速度分布趋势一致,由管网最远端向管网出口处管道内流速逐渐增大,在各个支路管段1处,由于吸尘点距管网出口较远,吸尘点风量存在较大负偏差,管段1风速明显小于设计风速。由图7

可知, 管网整体处于负压状态, 且负压绝对值由管网最远端向管网出口处呈现递增趋势, 压力分布符合由风机提供动力的管网特征。

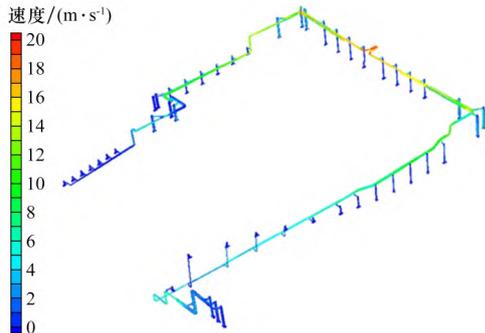


图 6 烧结混料除尘系统管网 1 速度云图

Fig. 6 Velocity contour of pipe network 1 in the sinter mixing dedusting system

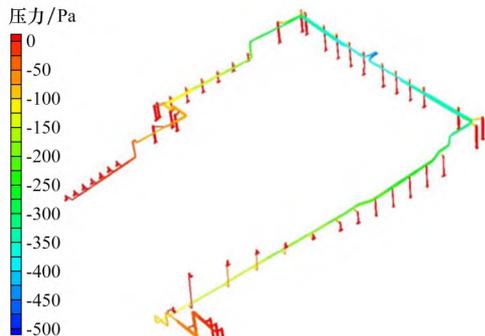


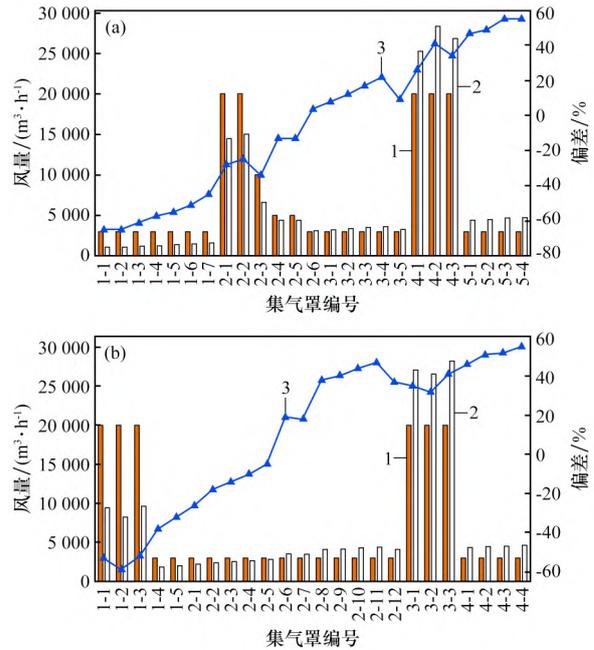
图 7 烧结混料除尘系统管网 1 压力云图

Fig. 7 Pressure contour of pipe network 1 in the sinter mixing dedusting system

烧结混料除尘系统管网 1 各集气罩设计风量与模拟风量如图 8 所示。由图 8 可知, 支路 1 阻力略小于支路 2, 模拟风量大于设计风量, 风量偏差仅为 1%, 因此两支路总风量满足设计要求。由于各支路上吸尘点数量多且管道较长, 因此各支路上吸尘点风量偏差较大, 各支路吸尘点风量变化趋势一致, 距离管网出口越远的吸尘点风量负偏差越大, 只有少数几个吸尘点满足设计要求, 其余吸尘点风量偏差均超过 10%, 支路 1 吸尘点 1-1 风量偏差最大为 -65%, 须进行阻力平衡调节使各吸尘点风量满足设计要求。管网 1 阻力模拟结果显示, 各个支路靠近管网出口处吸尘点阻力较小, 可以采用增设变径管的方法, 从而减小该处吸尘点的风量。

### 2.2 管网 2 数值模拟结果分析

烧结混料除尘系统管网 2 速度云图如图 9 所



(a) 支路 1; (b) 支路 2

1—设计风量; 2—模拟风量; 3—偏差。

图 8 烧结混料除尘系统管网 1 各集气罩设计风量与模拟风量

Fig. 8 Designed and simulated airflow rates for each capture hood in pipe network 1 of the sinter mixing dedusting system

示。由图 9 可知, 管网 2 各支路速度分布趋势一致, 由管网最远端向管网出口处管道内流速逐渐增大, 在各个支路管段 1 处, 由于吸尘点距管网出口较远, 吸尘点风量存在较大负偏差, 管段 1 风速明显小于设计风速。烧结混料除尘管网 2 压力云图如图 10 所示。由图 10 可知, 管网整体处于负压状态, 且负压绝对值由管网最远端向管网出口处呈现递增趋势, 压力分布符合由风机提供

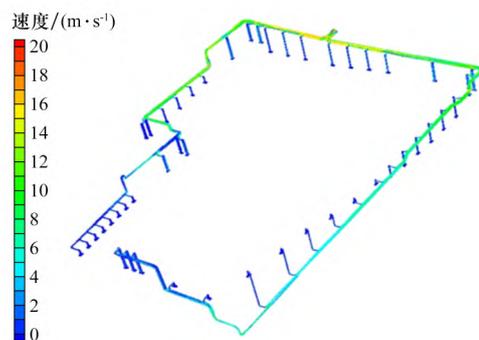


图 9 烧结混料除尘系统管网 2 速度云图

Fig. 9 Velocity contour of pipe network 2 in the sinter mixing dedusting system

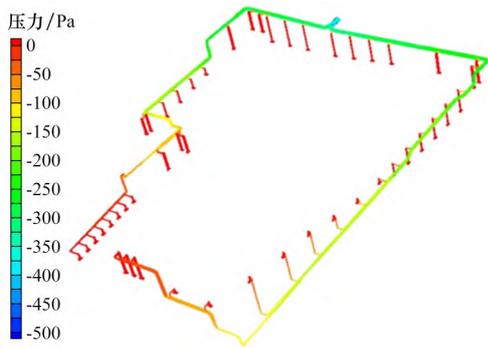
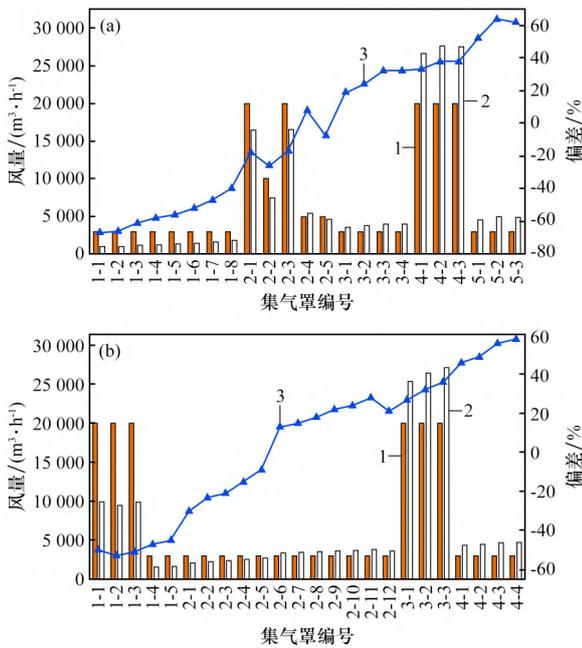


图 10 烧结混料除尘系统管网 2 压力云图

Fig. 10 Pressure contour of pipe network 2 in the sinter mixing dedusting system

动力的管网特征。

烧结混料除尘系统管网 2 各支路风量如图 11 所示。由图 11 可知, 支路 1 相较于支路 2 阻力较小, 模拟风量大于设计风量, 风量偏差为 4.41%, 因此两支路总风量满足设计要求。由于各支路上吸尘点数量多且管道较长, 因此各支路上吸尘点风量偏差较大, 各支路吸尘点风量变化趋势一致,



(a) 支路 1; (b) 支路 2

1—设计风量; 2—模拟风量; 3—偏差。

图 11 烧结混料除尘系统管网 2 各集气罩设计风量与模拟风量

Fig. 11 Designed and simulated airflow rates for each capture hood in pipe network 2 of the sinter mixing dedusting system

距离管网出口越远的吸尘点风量负偏差越大, 只有少数几个吸尘点满足设计要求, 其余吸尘点风量偏差均超过 10%, 支路 1 吸尘点 1-1 风量偏差为 -65%, 支路 2 吸尘点 4-4 风量偏差为 58%, 须进行阻力平衡调节使各吸尘点风量满足设计要求。管网 2 阻力模拟结果显示, 各个支路靠近管网出口处吸尘点阻力较小, 可以采用增设变径管的方法, 从而减小该处吸尘点的风量。

### 3 烧结混料除尘系统管网阻力平衡调节

#### 3.1 冬季管网 1 集气罩阻力平衡调节

为平衡烧结混料除尘系统管网各吸尘点阻力, 本文通过增设变径管的方法, 增加吸尘点支路上的局部阻力, 通过调整变径管结构, 使各吸尘点风量满足设计要求, 各吸尘点支路具体调整措施如表 3 所示。烧结混料除尘系统管网 1 阻力平衡

表 3 烧结机混料除尘系统管网 1 调整情况

Table 3 Adjustment summary for pipe network 1 of the sinter machine mixing dedusting system

支路	管段	吸尘点编号	$D_2$ /mm	$L_1$ /mm	$L_2$ /mm
支路 1	管段 1	1-1	调节其余吸尘点后, 此点风量偏差在合理范围内。		
		1-2	调节其余吸尘点后, 此点风量偏差在合理范围内。		
		1-3	调节其余吸尘点后, 此点风量偏差在合理范围内。		
	1-4	260	200	500	
	1-5	230	200	500	
	1-6	200	200	500	
	1-7	190	200	500	
支路 2	管段 2	2-1	450	200	500
		2-2	450	200	200
		2-3	300	200	200
	2-4	215	200	500	
	2-5	210	200	500	
	2-6	160	200	500	
支路 3	管段 3	3-1	160	200	500
		3-2	160	200	500
		3-3	160	200	500
		3-4	155	200	500
		3-5	160	200	500

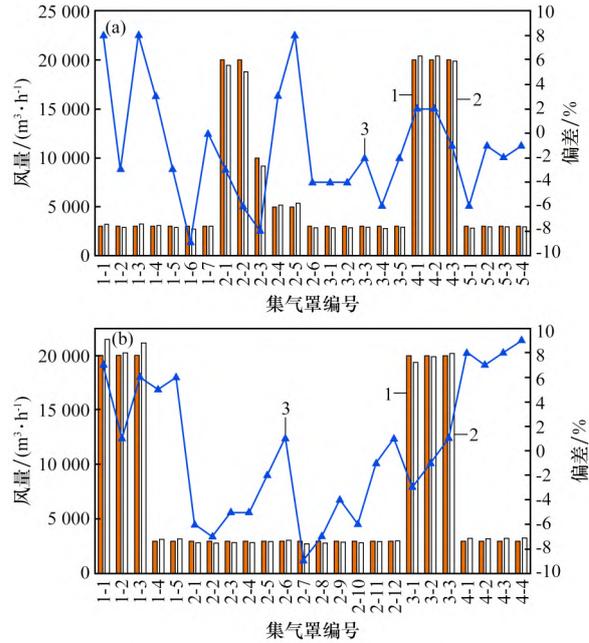
表 3(续)

支路	管段	吸尘点 编号	$D_2/mm$	$L_1/mm$	$L_2/mm$
支路 1	管段 4	4-1	420	200	500
		4-2	420	200	500
		4-3	410	200	500
	管段 5	5-1	150	200	500
		5-2	150	200	500
5-3		150	200	500	
5-4		150	200	500	
支路 2	管段 1	1-1	调节其余吸尘点后,此点风量 偏差在合理范围内。		
		1-2	调节其余吸尘点后,此点风量 偏差在合理范围内。		
		1-3	调节其余吸尘点后,此点风量 偏差在合理范围内。		
		1-4	200	200	500
		1-5	200	200	500
	管段 2	2-1	170	200	500
		2-2	170	200	500
		2-3	170	200	500
		2-4	170	200	500
		2-5	170	200	500
		2-6	165	200	500
		2-7	160	200	500
管段 3	2-8	160	150	150	
	2-9	160	150	150	
	2-10	160	150	150	
	2-11	155	150	150	
	2-12	155	200	500	
管段 4	3-1	420	200	500	
	3-2	420	200	500	
	3-3	420	200	200	
	4-1	155	200	500	
管段 4	4-2	155	200	500	
	4-3	155	200	500	
	4-4	155	200	500	

调节后各支路吸尘点风量如图 12 所示。由图 12 可知,调节后将吸尘点风量偏差最大值由 -65% 降低至 9%,各吸尘点风量偏差均在 10% 以下,满足设计要求。

3.2 冬季管网 2 集气罩阻力平衡调节

为降低集气罩风量较大的管道风量,在管道



(a) 支路 1; (b) 支路 2  
1—设计风量; 2—模拟风量; 3—偏差。

图 12 调整后烧结混料除尘系统管网 1 各集气罩设计风量与模拟风量(冬季)

Fig. 12 Designed and simulated airflow rates for each capture hood in pipe network 1 of the sinter mixing dedusting system after adjusted( winter)

上增设变径管,增加集气罩支路上的局部阻力,进而可以调整变径管结构,使集气罩满足设计风量的要求,各吸尘点支路具体调整措施如表 4 所示。烧结混料除尘系统管网 2 阻力平衡调节后各

表 4 烧结机混料除尘系统管网 2 调整情况

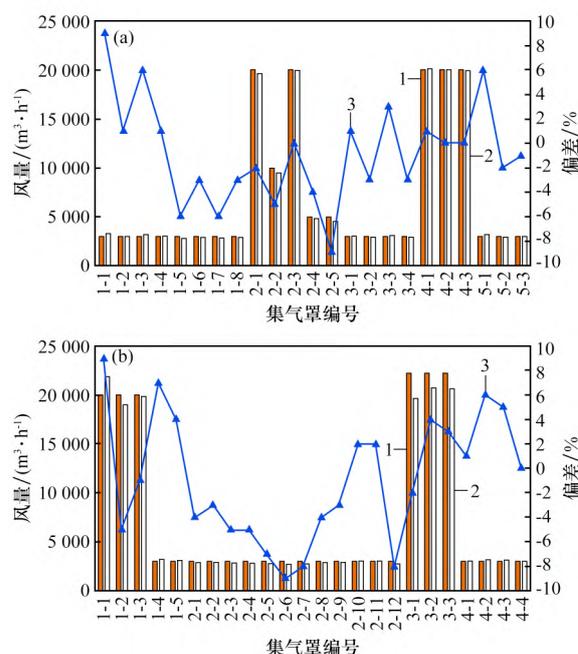
Table 4 Adjustment summary for pipe network 2 of the sinter machine mixing dedusting system

支路	管段	吸尘点 编号	$D_2/mm$	$L_1/mm$	$L_2/mm$
支路 1	管段 1	1-1	调节其余吸尘点后,此点风量 偏差在合理范围内。		
		1-2	调节其余吸尘点后,此点风量 偏差在合理范围内。		
		1-3	调节其余吸尘点后,此点风量 偏差在合理范围内。		
	1-4	250	200	500	
	1-5	220	200	500	
	1-6	210	200	500	
	1-7	190	200	500	
	1-8	180	200	500	

表 4(续)

支路	管段	吸尘点 编号	$D_2/mm$	$L_1/mm$	$L_2/mm$
支路 1	管段 2	2-1	450	200	500
		2-2	管径调整为 400 mm		
		2-3	450	200	500
		2-4	200	200	200
		2-5	200	200	500
	管段 3	3-1	160	200	500
		3-2	155	200	500
		3-3	155	200	500
		3-4	155	200	500
	管段 4	4-1	415	200	500
		4-2	415	200	500
		4-3	415	200	500
	管段 5	5-1	150	200	500
		5-2	150	200	500
		5-3	150	200	500
支路 2	管段 1	1-1	调节其余吸尘点后,此点风量 偏差在合理范围内。		
		1-2	调节其余吸尘点后,此点风量 偏差在合理范围内。		
		1-3	调节其余吸尘点后,此点风量 偏差在合理范围内。		
		1-4	200	200	500
		1-5	200	200	500
	管段 2	2-1	170	200	500
		2-2	170	200	500
		2-3	170	200	500
		2-4	165	200	500
		2-5	160	200	500
		2-6	160	200	500
		2-7	160	200	500
管段 3	2-8	160	200	200	
	2-9	160	200	200	
	2-10	160	200	200	
	2-11	160	200	200	
	2-12	155	200	500	
管段 4	3-1	420	200	500	
	3-2	420	200	200	
	3-3	415	200	200	
管段 5	4-1	155	200	500	
	4-2	155	200	500	
	4-3	155	200	500	

支路吸尘点风量如图 13 所示, 调节后将吸尘点风量偏差最大值由  $-67\%$  降低至  $9\%$ , 各吸尘点风量偏差均在  $10\%$  以下, 满足设计要求。



(a) 支路 1; (b) 支路 2

1—设计风量; 2—模拟风量; 3—偏差。

图 13 调整后烧结混料除尘系统管网 2 各集气罩设计风量与模拟风量(冬季)

Fig. 13 Designed and simulated airflow rates for each capture hood in pipe network 2 of the sinter mixing dedusting system after adjusted( winter)

### 3.3 夏季管网集气罩阻力平衡调节

在上述管网优化的基础上, 对夏季管网各集气罩风量进行验证, 夏季管网 1 与管网 2 各吸尘点风量如图 14 和图 15 所示。由图 14、15 可知, 对管网进行阻力平衡调节后, 尽管夏季管网总风量降低, 但各个吸尘点设计风量也随之降低, 在阻力平衡调节的基础上, 调节后夏季管网 1 集气罩风量偏差最大为  $9\%$ , 管网 2 集气罩风量偏差最大为  $-9\%$ , 各集气罩的风量偏差依旧在  $10\%$  以内。

## 4 结 论

(1) 对烧结混料除尘系统管网内流场的数值模拟结果表明, 管网速度与压力分布符合由风机提供动力的管网特征, 内流场整体处于负压状态, 且负压绝对值由管网进气口向管网总出口处逐渐增大。

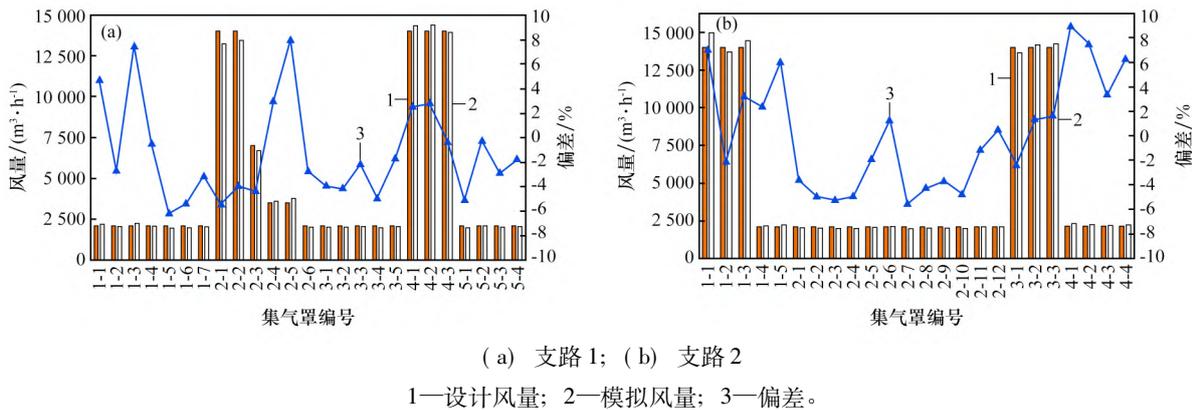


图 14 调整后烧结混料除尘系统管网 1 各集气罩设计风量与模拟风量(夏季)

Fig. 14 Designed and simulated airflow rates for each capture hood in pipe network 1 of the sinter mixing dedusting system after adjusted( summer)

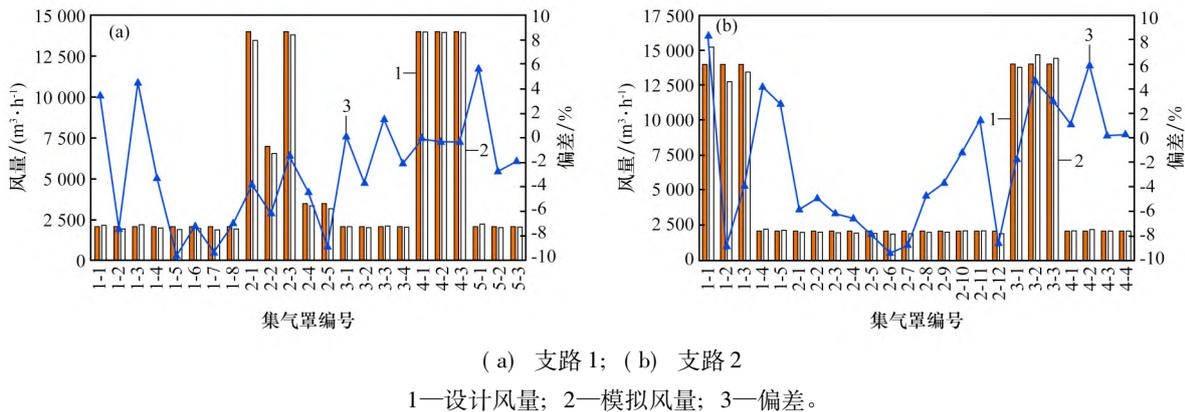


图 15 调整后烧结混料除尘系统管网 2 各集气罩设计风量与模拟风量(夏季)

Fig. 15 Designed and simulated airflow rates for each capture hood in pipe network 2 of the sinter mixing dedusting system after adjusted( summer)

(2) 由于原烧结混料除尘系统管网设计简单,未考虑各支路吸尘点风量平衡问题,导致各点运行风量无法达到设计风量,各集气罩距管网出口越远,风量偏差越大,偏差最大可达 $-67\%$ ,严重影响除尘系统收集效率。

(3) 系统管网风量平衡优化在原设计基础上,通过增加局部变径管有效控制各支路间的阻力平衡,优化调节后在冬季和夏季的各吸尘点风量偏差均不超过 $10\%$ ,各点实际风量达到设计要求,此优化对复杂管网系统的设计和改造具有积极意义。

### 参考文献:

- [1] 刘长禹,刘祚. 烧结混合废气除尘理论研究[J]. 矿业工程,2024,22(3):56-59.  
LIU Changyu, LIU Zuo. Theoretical research on sintering mixed waste gas [J]. Mining Engineering, 2024, 22(3): 56-59.
- [2] 王益滨. 高能微雾抑尘技术在烧结厂混料机上的应用[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2022(3): 1-5.  
WANG Yibin. Application of high energy micro-mist dust suppression technology in sintering plant mixer [J]. Sulphur Phosphorus & Bulk Materials Handling Related Engineering, 2022(3): 1-5.
- [3] 徐攀,董江兵,田会峰,等. 湿电除尘在烧结一次混料的使用和工艺改进[J]. 河南冶金, 2023, 31(4): 38-42.  
XU Pan, DONG Jiangbing, TIAN Huifeng, et al. Application and process improvement of wet electrostatic precipitation in sintering primary mixing [J]. Henan Metallurgy, 2023, 31(4): 38-42.
- [4] 景涛,赵利明,甘敏,等. 大型烧结机的设计特点及生产实践[J]. 烧结球团, 2022, 47(5): 20-27.  
JING Tao, ZHAO Liming, GAN Min, et al. Design

- features and production practices of representative large-scale sintering machine [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2022, 47(5): 20–27.
- [5] 毛晓明,熊林,李建. 强混对制粒过程的影响研究 [C]//第十一届中国钢铁年会论文集: S01. 炼铁与原料. 上海: 宝山钢铁股份有限公司研究院, 2017: 67–73.  
Mao Xiaoming, Xiong Lin, Li Jian. Study on the Effect of Strong Mixing on the Granulation Process [C]// Proceedings of the 11th China Iron and Steel Annual Conference: S01. Ironmaking and Raw Materials. Shanghai: Baoshan Iron & Steel Co., Ltd. Research Institute, 2017: 67–73.
- [6] 李明. 基于 BIM 模型的烧结机机尾废气净化系统管网设计模拟优化与应用研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.  
LI Ming. Design simulation optimization and application research of exhaust gas purification system of sintering machine tail based on BIM model [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019.
- [7] 李准,黎前程. 全平衡负压除尘系统技术研究及工程应用 [J]. *烧结球团*, 2017, 42(3): 75–78.  
LI Zhun, LI Qiancheng. Technology research and engineering application on fully balanced negative pressure dust removal system [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2017, 42(3): 75–78.
- [8] 赵坤,党小庆,黄璞,等. 工业烟气净化系统的风量平衡调节及数值模拟应用研究 [J]. *环境污染与防治*, 2015, 37(5): 78–82.  
ZHAO Kun, DANG Xiaoqing, HUANG Pu, et al. Air volume adjustment of purification system and the application of numerical simulation research in industrial flue gas [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2015, 37(5): 78–82.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工业建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB 50019—2015 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design code for heating ventilation and air conditioning: GB 50019—2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2016.
- [10] 刘再新,陈添乐. 烧结环境除尘超低排放技术研究及生产应用 [J]. *烧结球团*, 2016, 41(3): 57–61.  
LIU Zaixin, CHEN Tianle. Study on ultra-low emission technology of sintering environmental dedusting and its production application [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2016, 41(3): 57–61.
- [11] 韩文宏,顾迎春,胡爽. 关于通风管道压力平衡公式的探讨 [J]. *暖通空调*, 2004, 34(1): 23–25.  
HAN Wenhong, GU Yingchun, HU Shuang. Discussion on the pressure balance formula for ventilating duct [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2004, 34(1): 23–25.
- [12] 黄勇波,封洪波. 利用 Excel VBA 开发除尘管网平衡计算软件 [J]. *建筑热能通风空调*, 2008, 27(5): 102–105.  
HUANG Yongbo, FENG Hongbo. Developing balancing software for dedusting duct system with excel VBA [J]. *Building Energy & Environment*, 2008, 27(5): 102–105.
- [13] 孙志顺,钱付平,张天. 通风除尘管网阻力平衡系统的改进及平衡计算软件开发 [J]. *安徽工业大学学报(自然科学版)*, 2018, 35(2): 178–185.  
SUN Zhishun, QIAN Fuping, ZHANG Tian. An improvement of resistance balance system and software development of its calculation in ventilation and dust removal network [J]. *Journal of Anhui University of Technology (Natural Science)*, 2018, 35(2): 178–185.
- [14] DE ALMEIDA SANTOS B O, MAIA B T, GARAJAU F S, et al. Numerical modeling of flow into primary dedusting system of a 130 t converter [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2012, 1(1): 21–26.
- [15] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.  
TAO Wenquan. Numerical heat transfer [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
- [16] 王福军. 计算流体力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.  
WANG Fujun. Computational fluid dynamics analysis [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [17] 黄淮,党小庆,李世杰,等. 不同工作模式下 VOCs 废气收集系统阻力平衡数值模拟与应用 [J]. *环境工程学报*, 2020, 14(2): 440–447.  
HUANG Zhun, DANG Xiaoqing, LI Shijie, et al. Numerical simulation and application on resistance balance of VOCs collection system in different working modes [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(2): 440–447.

- [18] 杨光,孙美佳,李宝宽. 铝电解槽排烟管道风量调节数值模拟[J]. 轻金属,2022(6):57-62.  
YANG Guang, SUN Meijia, LI Baokuan. Numerical simulation of air volume regulation in exhaust pipe of aluminum reduction cells [J]. Light Metals, 2022(6): 57-62.
- [19] 马广大. 大气污染控制技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社,2010.  
MA Guangda. Technical manual of air pollution control [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [20] MORE A A. Analytical solutions for the Colebrook and White equation and for pressure drop in ideal gas flow in pipes [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(16): 5515-5519.
- 
- (上接第 101 页)
- [7] LANZERSTORFER C, BAMBERGER-STRASSMAYR B, PILZ K. Recycling of blast furnace dust in the iron ore sintering process: Investigation of coke breeze substitution and the influence on off-gas emissions [J]. ISIJ International, 2015, 55(4): 758-764.
- [8] 吴胜利,王筱留,张建良. 钢铁冶金学(炼铁部分)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2019.  
WU Shengli, WANG Xiaoliu, ZHANG Jianliang. Iron and steel metallurgy (ironmaking section) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2019.
- [9] REDDY P S R, BISWAL S K, DAS B, et al. Recovery of iron and carbon values from iron blast furnace flue dust by beneficiation techniques [J]. Powder Handling and Processing, 1996, 8(2): 139-142.
- [10] 闫永旺,陈义胜,杨燕,等. 从高炉瓦斯灰中分选铁和碳的试验研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2008, 27(1): 15-18.  
YAN Yongwang, CHEN Yisheng, YANG Yan, et al. The investigation of sorting iron and carbon from the blast furnace gas ash [J]. Journal of Inner Mongolia University of Science and Technology, 2008, 27(1): 15-18.
- [11] JU J R, FENG Y L, LI H R, et al. Study of recycling blast furnace dust by magnetization roasting with straw charcoal as reductant [J]. Physicochemical Problems of Mineral Processing, 2022, 58(3): 149265.
- [12] LONG H L, LI H Y, MA P C, et al. Effectiveness of thermal treatment on Pb recovery and Cl removal from sintering dust [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 403: 123595.
- [13] LONG H L, LI H Y, MA P C, et al. Effectiveness of thermal treatment on Pb recovery and Cl removal from sintering dust [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 403: 123595.
- [14] 王在谦,唐云,舒聪伟,等. 难选褐铁矿氯化离析焙烧—磁选研究[J]. 矿冶工程, 2013, 33(2): 81-83.  
WANG Zaiqian, TANG Yun, SHU Congwei, et al. Study on chloridizing segregation roasting-magnetic separation for refractory limonite [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2013, 33(2): 81-83.
- [15] 肖军辉,张裕书,冯启明,等. 难选赤褐—菱铁矿离析焙烧—弱磁选提铁研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(10): 3573-3579.  
XIAO Junhui, ZHANG Yushu, FENG Qiming, et al. Upgrading iron of refractory hematite and limonite-siderite ores using segregation roasting-low intensity magnetic separation [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(10): 3573-3579.
- [16] CHEN D, GUO H W, XU J F, et al. Recovery of iron from pyrite cinder containing non-ferrous metals using high-temperature chloridizing-reduction-magnetic separation [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2017, 48(2): 933-942.
- [17] 赵强. 强化褐铁矿磁化焙烧的新工艺及机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.  
ZHAO Qiang. Study of new technique and mechanism of strengthening limonite's magnetizing roasting [D]. Changsha: Central South University, 2010.