

基于气流分配均匀性的无动力热风烧结管道 数值模拟及结构优化

张 华^{1,2}, 乐文毅¹, 李安桂², 谢冬明¹, 李建华¹, 陈添乐¹, 刘明坤¹

(1. 中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410205; 2. 西安建筑科技大学 a. 建筑设备科学与工程;
b. 教育部低碳建筑环境国际合作联合实验室, 陕西 西安 710055)

摘要: 烧结工序中无动力热风烧结烟气可用于加热台车料面, 减少烧结燃料消耗, 但因管道结构特点会导致烟气分配不均匀, 因此, 对烟气分配管道结构进行优化设计可有效避免烟气分配不均匀的问题, 提高台车料面加热均匀性。本研究以某烧结厂无动力热风烧结装置为研究对象, 采用计算流体力学方法研究了无动力热风烧结主管道、一次分配管道、二次分配管道结构对气流均匀性的影响。结果表明, 原设计热风进入烟气分配管道后, 一次分配管道热风速度方差为 0.257, 二次分配管道内热风速度方差为 0.696, 气流均匀性较差; 针对原结构气流分配不均问题, 通过优化调整后一次分配热风速度方差为 0.037 9, 二次分配热风速度方差为 0.144, 相比于原结构均匀性分别提高了 85.3%、79.3%, 使得热风能均匀进入料面, 消除了热风对料面加热不均等问题, 有利于烧结节能运行。研究结果可为烧结工序中无动力热风管道设计提供参考依据。

关键词: 无动力热风烧结; 管道结构优化; 均匀分配; 节能运行; 数值模拟

中图分类号: TF046.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)02-0112-08

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.02.032

Numerical simulation and structural optimization of non-powered hot air sintering pipeline based on uniformity of airflow distribution

ZHANG Hua^{1,2}, YUE Wenyi¹, LI Angui², XIE Dongming¹,

LI Jianhua¹, CHEN Tianle¹, LIU Mingkun¹

(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China;

2. Xi'an University of Architecture and Technology a School of Building Services Science and Engineering;

b International Joint Laboratory on Low Carbon Built Environment, Ministry of Education, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: In the sintering process, the non-powered hot air sintering gas can be used to heat the material surface of the trolley and reduce the consumption of sintering fuel, but due to the characteristics of the pipeline structure, the gas distribution will be unevenly distributed, so the optimal design of the gas distribution pipeline structure can effectively avoid the problem of uneven gas distribution and improve the heating uniformity of the material surface of the trolley. In this study, the non-powered hot air sintering device of a sintering plant is taken as the research object, and the effects of the structure of the main pipeline of non-powered hot air sintering, primary distribution pipeline and secondary distribution pipeline on the airflow uniformity are investigated by computational fluid dynamics method. The results show that after the original design hot air enters the gas distribution pipeline, the variance of the hot air velocity in the primary distribution pipeline is 0.257, and the variance of the hot air velocity in the secondary distribution pipeline is 0.696, and the uniformity of the air flow is poor. In view of the uneven distribution of the airflow of the original structure, the variance of the primary

收稿日期: 2024-10-30; 修回日期: 2024-12-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50778145)

作者简介: 张 华(1984—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 从事通风除尘系统安全运行及节能方面研究。

distribution hot air velocity is 0.037 9 and the variance of the secondary distribution hot air velocity is 0.144, which is 85.3% and 79.3% higher than that of the original structure, respectively, so that the hot air can enter the material surface evenly, eliminating the problem of uneven heating of the hot air on the material surface, which is conducive to the energy-saving operation of sintering. The results can provide a reference for the design of non-powered hot air pipeline in the sintering process.

Key words: non-powered hot air sintering; pipeline structure optimization; uniform distribution; energy-efficient operation; numerical simulation

钢铁工业作为国民经济的基础产业,其能源消耗量约占全国能耗的15%~20%,同时,也是余热资源最多的行业之一^[1-2]。烧结工序是钢铁工业的基本组成部分,其能耗仅次于高炉炼铁工序,约占钢铁生产总能耗的8.3%,具有能耗高、污染大、余热利用率低等特点。在烧结生产中,约占烧结总热量50%~60%的物理热被烧结矿带走^[3-5]。在环(带)冷机上冷却烧结矿过程中,产生大量高温热废气,将高温热废气送到烧结机料层表面进行热风烧结是利用环(带)冷机热废气的一种主要方法^[6]。

基于是否采用风机将热废气输送至烧结机料面,热风烧结装置可分为有动力和无动力两类^[7]。无动力热风烧结是利用环冷机鼓风产生的正压力、台车料面的负压和温差引起的热气上升力,将环(带)冷机上的高温废气通过热风管引导到烧结机点火炉后端的热风罩内,用于加热烧结混合料,减少烧结燃料消耗^[8]。目前,国内外的研究主要集中在有动力热风烧结过程中的结构优化及烟气均匀性分配方面的研究^[9-10]。陈思墨等^[11-12]以首钢京唐500 m²烧结机热风循环系统的热风循环罩为研究对象,对进气口、导流板和整流花板的结构进行了分析和优化,提出了导流措施的最佳优化方案。罗云飞等^[13]对某钢厂循环烟气罩内烟气流动状态及漏风状况进行模拟,采用优化烟气罩内导流板结构和数量的方式,削弱了烟气罩内烟气旋转流动,使烟气分布更均匀。王双等^[14]对某钢厂烧结带冷机的循环热风接入点进行优化,对不同优化方案下烧结矿的冷却过程进行数值模拟,为烧结带冷机循环热风在风箱接入方式上提高余热回收效果提供依据。

综上所述,由于目前主要研究的是有动力热风烧结烟气均匀分配,而无动力热风烧结装置在

管网动力及烟气分配方式上与有动力热风烧结装置存在显著差异,目前尚未见针对无动力热风烧结烟气均匀分配方式的系统研究。因此,有必要对无动力热风烧结的烟气分配方式及其分配效果进行深入研究,以期优化烧结工艺、提高烧结效率和降低能耗提供理论依据和技术支持。本文对某烧结厂无动力热风烧结管道内循环烟气流动状态进行数值模拟研究,针对该装置管道内气流均匀性较差的问题,经分析发现主要源于原有结构设计的缺陷。基于烟气均匀分配原理,本文对无动力热风烧结主管道、一次分配管道及二次分配管道的流场均匀性进行系统研究,并根据模拟结果提出优化改进方案。该方案旨在实现环冷热废气的均匀送风,确保台车料面的均匀加热,从而提升烧结过程的节能效果。

1 模型的建立

1.1 控制方程

本文主要研究对象为某烧结厂无动力热风烧结管道内循环烟气流动均匀性,其数学模型主要由流场构成,管道内烟气可看作不可压缩流体,选用Realizable k- ϵ 湍流模型^[15-17]可更好的描述其在管道内部流动特性,涡流耗散率的输运方程可从精确的方程中推导得到,对旋转流动、强逆压梯度的边界层流动、流动分离和二次流描述能够更加符合湍流的物理特性。在建立Realizable k- ϵ 湍流模型时需做出如下假设:①物料表面为热风出口且物料表面负压一致;②忽略流体温度对流体性能的影响;③所有壁面均认为是绝热且无滑移壁面。在考虑温度对流体流动特性影响条件下,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:

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

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

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

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div}\left(\frac{h}{c_p} \text{grad}T\right) + S_T \quad (5)$$

输运方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_l}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_l}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$\rho C_1 E \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{V} \varepsilon} \quad (7)$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; u 、 v 、 w 为速度矢量在 x 、 y 、 z 方向上的分量, m/s ; t 为时间, s ; S_u 、 S_v 、 S_w 为 x 、 y 、 z 方向上的广义源项; p 为压强, Pa ; c_p 为定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; h 为流体的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; T 为温度, K ; S_T 为黏性耗散项; μ 为动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ_l 为湍流黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; k 、 ε 分别为湍动能和湍流耗散率; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项; C_1 、 C_2 为经验常数; σ_k 、 σ_ε 分别为湍动能和湍流耗散率的湍流普朗特数; u_i 为速度矢量在 x_i 方向的质量, m/s ; V 为与湍流相关的特性体积尺寸, m^3 ; E 为能量密度, J/m^3 。

1.2 物理模型

原有热风烧结管道三维模型如图 1 所示。图 1 中, 原有无动力热风烧结管道共有两个进气口, 进气口直径均为 2 000 mm, 热风烧结管道末端直径为 1 500 mm, 烟气分配器位于热风烧结管道末端。其中, 7 根水平方向一次分配管道直径为 720 mm, 每根一次分配管道竖直向下方向有六根直径为 325 mm 的二次分配管道。热风由进气口

1、2 进入热风烧结管道中流经 90° 双弯头后进入烟气分配器, 在烟气分配器中经过一次分配和二次分配后进入烧结层料面, 其中进气口 1 热风温度为 425 K, 进气口 2 热风温度为 624 K。本文构建与工程实际 1:1 热风管道三维模型作为整个计算域进行数值求解, 所有参数与工程实际相同, 网格规模在 400 万左右。

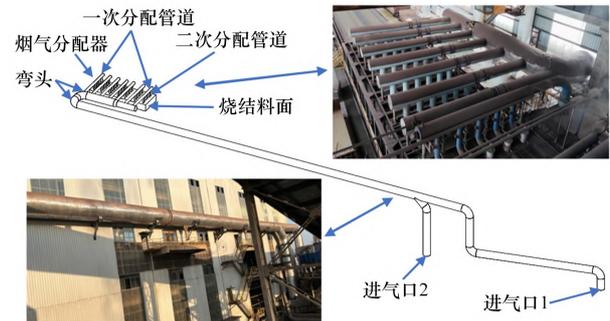


图 1 原有热风烧结管道三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of the original thermal air sintering pipeline

1.3 边界条件与求解设置

根据项目现场热风烧结管道进气口测试, 远端进气口 1 压力为 33 Pa, 热风温度为 425 K; 近端进气口 2 入口压力为 29 Pa, 热风温度为 624 K; 烧结矿料面负压为 -11 Pa, 边界条件具体设置见表 1 所示。本文采用基于压力的求解器, 稳态、湍流模型选择 Realizable k - ε 湍流模型, 选用标准壁面函数处理近壁面区域, 在求解器设置中, 同时开启能量方程和组分运输模型; 压力 - 速度耦合方式采用 Coupled 算法, 对流相全部采用 Second Order Upwind 模式。

表 1 边界条件

Table 1 Boundary conditions

边界名称	边界类型	参数设置
进气口 1	Pressure-inlet	33 Pa, 425 K
进气口 2	Pressure-inlet	29 Pa, 624 K
壁面	Wall	—
烧结矿料面(出口)	Pressure-outlet	-11 Pa, 310 K

2 结果与分析

2.1 原有管道分配均匀性分析

对原有无动力热风烧结管道流场进行数值求解, 得到中心截面速度云图、烟气分配管道速度

及流量三维柱状图分别如图 2、3 所示。由图 2 可知,烟气分配器中一次分配管道 A 位于热风烧结管道 90°弯头处,会干扰弯头处正常气流运动。当热风流经 90°弯头时,一部分气流直接进入一次分配管道 A 中,致使该管道内气流速度高于其余一次分配管道,该管道断面平均速度为 7.21 m/s,比平均流速高 17.37%。图 3 给出了各支管出口速度平均值和出口流量的三维柱状图,由图 3 可知,A 支管的各分配管出口速度平均值和出口流量明显大于其它管道,同时,一次分配管内部按照气流前进方向,管道 1~6 流速增加趋势明显,各支管流量分配不均匀。方差是衡量数据分布均匀性的一个重要指标,为了更好的判断管道结构气流分配的均匀性,引入速度方差 $(\Delta V)^2$,其计算式如下:

$$(\Delta V)^2 = \frac{1}{n}[(v_1 - \bar{v})^2 + (v_2 - \bar{v})^2 + \dots + (v_n - \bar{v})^2] \quad (8)$$

式中: v_1 、 v_2 、 v_n 表示第 n 个分支管出口的平均速度, m/s, \bar{v} 表示各分支管出口平均速度的平均值, m/s, 其计算式可以表示为

$$\bar{v} = \frac{1}{n}[v_1 + v_2 + \dots + v_n] \quad (9)$$

当速度方差较小时,说明分支管的出口平均速度围绕其均值波动较小,分布较为均匀;而当速度方差较大时,说明分支管的出口平均速度围

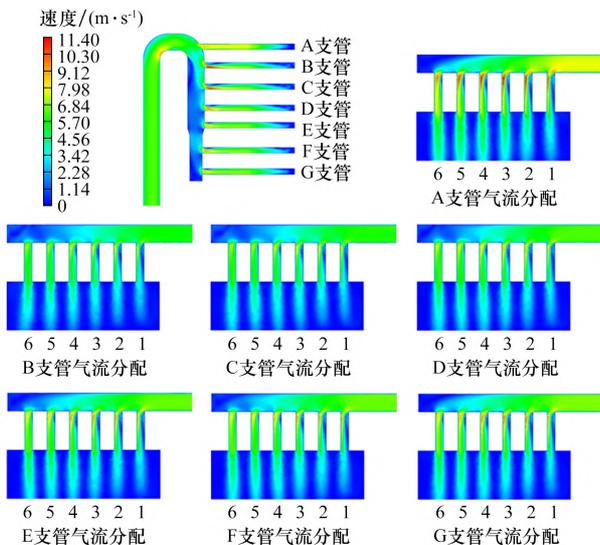


图 2 原有热风烧结管道烟气分配中心截面速度云图

Fig. 2 Velocity contour plot at the central cross-section of flue gas distribution in the original hot-air sintering pipeline

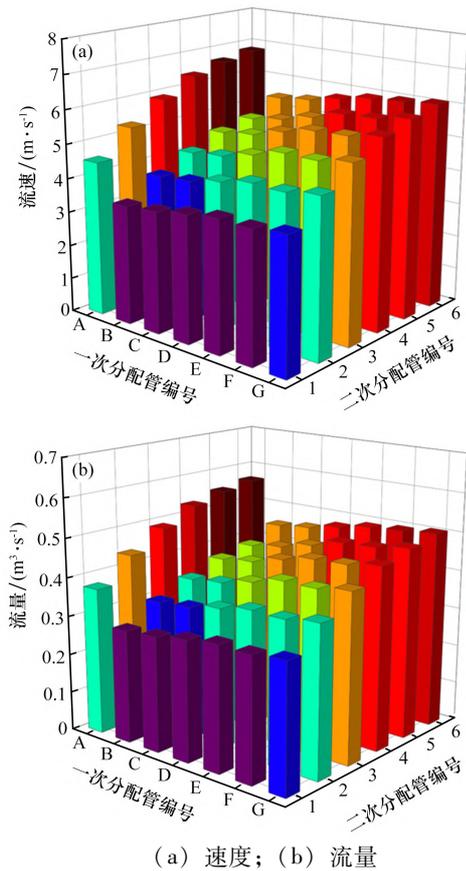


图 3 原有热风管道烟气分配三维柱状图

Fig. 3 3D distribution histogram of exhaust gas in original hot-air duct

绕其均值波动较大,分布不够均匀。

该方案下热风烧结系统风量为 17.64 m³/s,一次分配管道内热风速度方差为 0.257,二次分配管道内热风速度方差为 0.696,速度方差值较大,说明该结构形式下分支管的出口平均速度围绕其均值波动较大,其中 A 分配管最为明显,因此,该结构下烟气分配器中气流分布均匀性较差,会导致烧结矿料面上热风分配不均,需要进一步调整优化。

2.2 原有管道调整后结果与分析

为了排除一次分配管道 A 在弯头位置对原有方案气流均匀的影响,现调整一次分配管道 A 位置来改善热风烧结管道内气流运动情况。A 分配管调整后热风烧结管道中心截面速度云图如图 4 所示。由图 4 可知, A 分配管调整后,管道内断面平均速度为 6.51 m/s,与其余一次分配管道断面平均速度偏差为 7.07%,均匀性得到改善。图 5 给出了 A 分配管调整后各分支管出口平均速度和出口流量的三维柱状图。由图 5 可知, A 分配

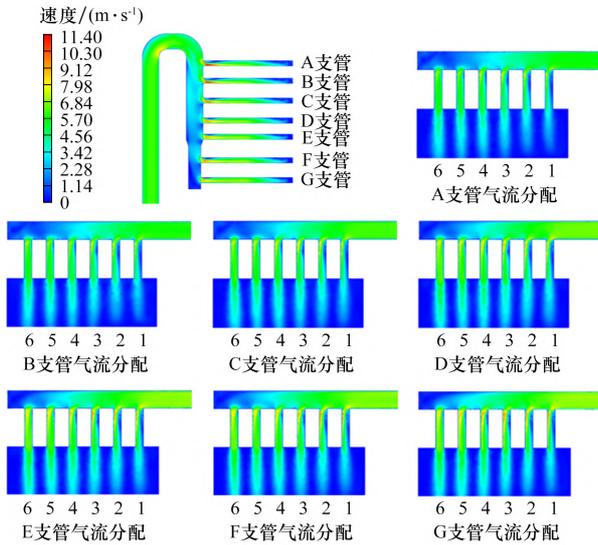


图 4 A 分配管优化后热风管道的中心截面速度云图
Fig. 4 Velocity cloud of the central cross-section of the hot air duct after optimization of distribution pipe A

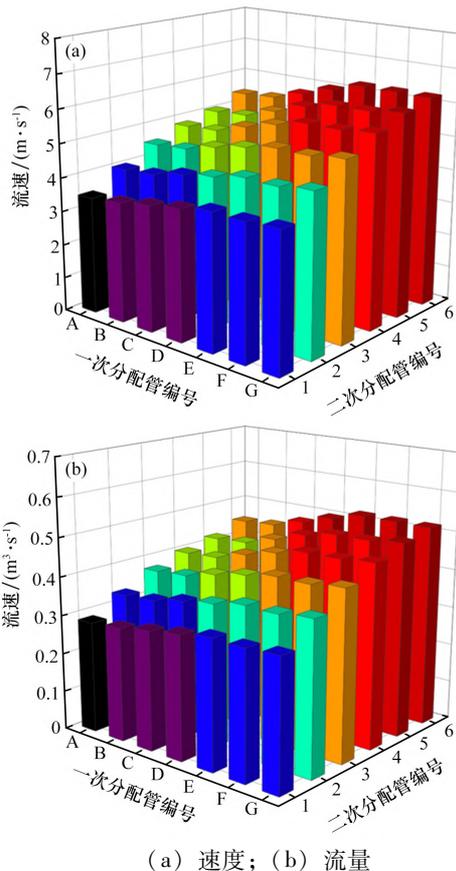


图 5 A 分配管优化后热风管道的分配三维柱状图
Fig. 5 3D histogram of hot air duct distribution after optimization of distribution pipe A

管的各支管出口平均速度和出口流量与调整前相比明显变小，A 分配管的各支管出口平均速度更

接近平均值 \bar{v} ，均匀性变好，但是，主管道和一次分配管内部按照气流前进方向，管道平均流速增加趋势依然明显。主要原因是烟气在沿各支管的分配过程中，两根临近出流管道之间的动压差不等于两侧孔间的压力损失，导致各出流管处的静压不相等，没有形成均匀出流。

A 分配管调整后一次分配管道平均速度方差为 0.121，二次分配管道平均速度方差为 0.615，相比于原结构的方差值分别下降了 52.9% 和 11.6%。说明 A 分配管调整后，虽然 A 管道中各支管出口的平均速度和流量减少，但支管出口平均速度更接近平均值 \bar{v} ，气流均匀性有所提升，但二次分配管道平均速度方差依然较大，料面上热风分配不均，需要通过改变分配方式进一步调整优化。

3 结构优化与仿真分析

3.1 烟气均匀分配原理

要实现无动力热风烧结烟气在台车料面均匀分配，需要保证每根分支管的流量实现均匀分配，根据均匀送风原理，每根支管分配的烟气体积计算公式见式(10)。

$$L_0 = 3\ 600\mu \cdot A_0 \cdot v_s = 3\ 600\mu \cdot A_0 \cdot \sqrt{\frac{2p_j}{\rho}} \quad (10)$$

式中： μ 为孔口流量系数； A_0 为孔口面积， m^2 ； v_s 为孔口出流速度； m/s ； ρ 为流体密度， kg/m^3 ； p_j 为出口静压， Pa ；

实际工程中， μ 和 ρ 一般都相等，要实现孔口流量相等，则需要保证式(10)中的 p_j 和 A_0 相等。根据能量守恒方程：

$$p_{j1} + p_{d1} = p_{j2} + p_{d2} + \Delta p \quad (11)$$

式中： p_{j1} 、 p_{j2} 为 1、2 断面出口静压， Pa ； p_{d1} 、 p_{d2} 为 1、2 断面动压， Pa ； Δp 为 1、2 断面处压力损失， Pa ；

如果要满足每根支管的静压相等，则由式(11)可以等到：

$$p_{d1} - p_{d2} = \Delta p \quad (12)$$

由公式(12)可知，满足气流均匀分配的条件是两分支管之间的动压降等于两分支管之间的压

力损失,因此结构优化过程中可以通过调节主管的管径来满足式(12)的要求。

3.2 主管道结构优化

针对原有无动力热风烧结管道气流分配不均匀问题,首先对主管道的结构进行优化(图6),分别取消无动力热风烧结管道双弯头及后部主管,延长一次分配管与双弯头前的主管连接,并根据公式(12)的计算方法,在一次分配管的B支管和C支管之间增设渐缩管来实现动压差等于压力损失。优化后管道中心截面速度云图如图7所示。由图7可知,一次分配管的均匀性明显增加,二次分配管出口平均流速沿流向不断增加,存在明显的差别。图8给出了主管道优化后各分支管出口平均速度和出口流量的三维柱状图。由图8可知,一次分配管道A内流速明显下降,其余各一

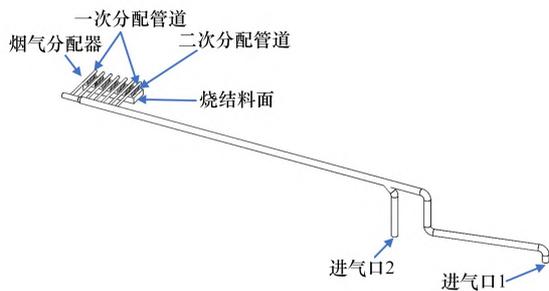


图6 主管道优化后热风烧结管道示意

Fig. 6 Schematic of hot air sintering pipe after main pipe optimization

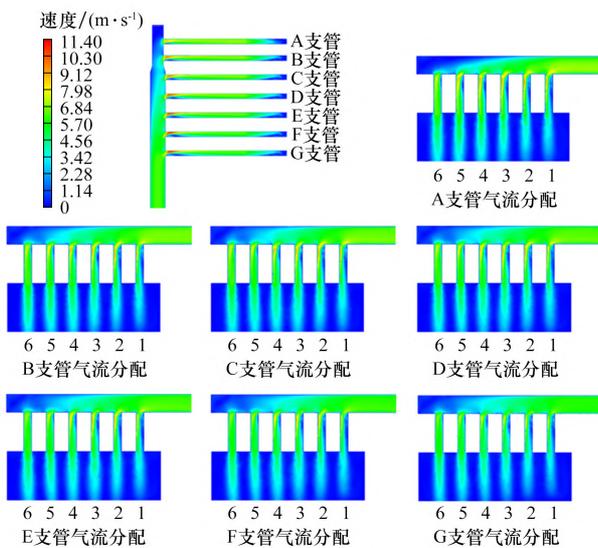
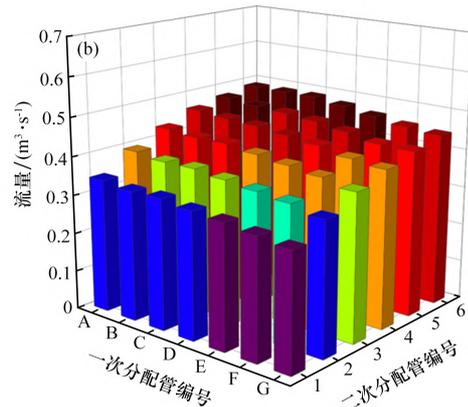
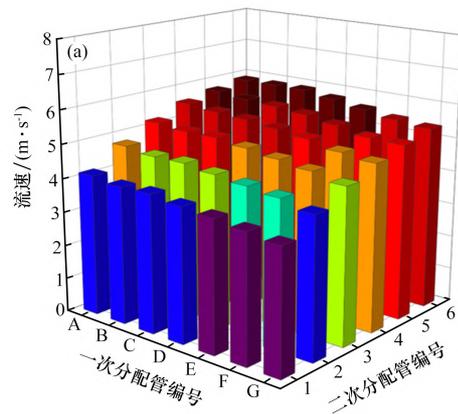


图7 主管道优化后热风烧结管道中心截面速度云图

Fig. 7 Velocity cloud of hot air sintering pipe center section after main pipe optimization



(a) 速度; (b) 流量

图8 主管道优化后出口烟气分配三维柱状图

Fig. 8 3D histogram of exit flue gas distribution after main pipe optimization

次分配管沿速度方向呈增加趋势,但增加趋势不明显,基本实现了均匀送风的要求。由于没有对二次分配管进行优化调整,因此,二次分配管各支管速度沿气流前进方向明显增加,气流均匀性较差。

主管道优化后热风烧结管道总流量为 $17.32 \text{ m}^3/\text{s}$,与原方案相比流量减少了 $0.32 \text{ m}^3/\text{s}$,变化量较小,但由于减少了二个弯头,与原方案相比优化后管道材料量减少。优化后一次分配管道内最大流速为 6.4 m/s ,平均速度方差为 0.0626 ,与原方案相比方差降低了 75.6% ,气流均匀性良好;二次分配管道内平均速度方差为 0.403 ,与原方案相比方差降低了 42.1% ,气流分配得到改善,但均匀性依然较差;说明根据均匀分配原理调整主管管径后,一次分配管烟气分配均匀性得到明显改善。

3.3 一次分配管道优化

为了增加一次分配管气流分配均匀性,根据

公式(12)的计算方法,在一次分配管第3和第4支管之间增加渐缩管,增加4支管后的主管速度,从而保证了动压差等于各出口管道之间的压力损失。优化后无动力热风烧结管道烟气分配速度及流量三维柱状图如图9所示。由图9可知,优化后一次分配管道热风速度方差为0.0462,与原方案相比方差降低了82%,二次分配管道热风速度方差为0.281,与原方案相比方差降低了59.6%,一次分配管和二次分配管的气流均匀性都得到明显改善。说明根据烟气均匀分配原理在一次分配管道上增设渐缩管可以有效改善二次分配管道内气流分布不均的问题。

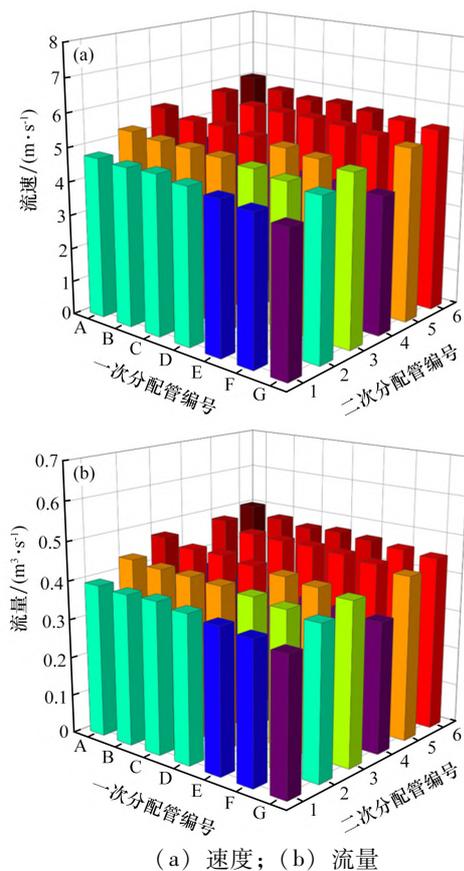


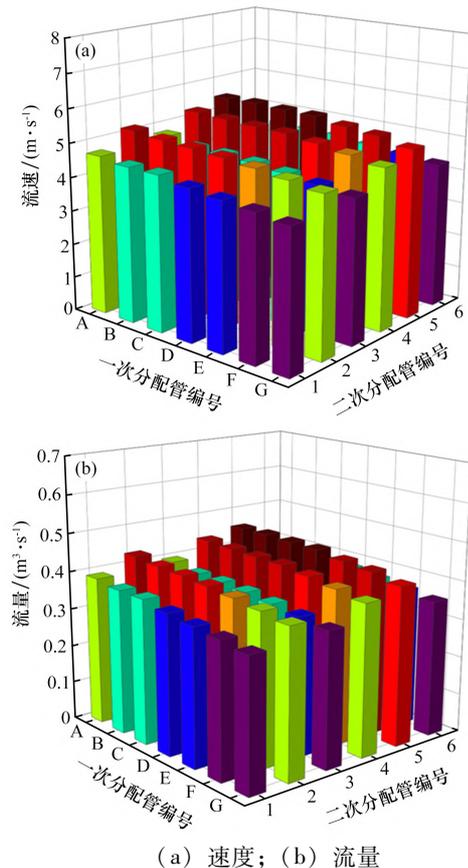
图9 改进一次分配管道后烟气分配三维柱状图

Fig.9 3D histogram of flue gas distribution after primary distribution pipeline Improvement

3.4 二次分配管道优化

针对二次分配管道内烟气分配不均匀的问题,在改进一次分配管道结构的基础上,根据公式(10),可以通过调整各分配管的孔口面积 A_0 来实现烟气均匀分配,即调整二次分配管道部分管道直径,将二次分配管道3、管道4、管道6的管径

分别由原来的325 mm调整为300、360、290 mm。优化后热风烧结管道模拟结果如图10所示。由图10可知,优化后一次分配管道热风速度方差为0.0379,与原方案相比方差降低了85.3%,二次分配管道热风速度方差为0.144,与原方案相比方差降低了79.3%。说明调整二次分配管道管径可以有效改善二次分配管道内气流分布不均的问题。



(a) 速度; (b) 流量
图10 改进二次分配管道后烟气分配三维柱状图
Fig.10 3D histogram of flue gas distribution after secondary distribution pipeline Improvement

4 结论

(1) 由于原有无动力热风烧结管道结构设计缺陷,一次分配管道A位置不合理,导致该管道内流速较大。一次分配管道热风平均速度方差为0.257,二次分配管道热风平均速度方差为0.696,气流均匀性较差。

(2) 主管道优化方案在原方案的基础上将热风管段末端双弯头取消,并根据均匀分配原理在管道上增加了变径管,不仅降低了管道材料量,同时改善了一次分配管内气流分配。优化后进入

一次分配管道的热风速度方差为0.062 6,相比于原方案降低了75.6%,进入二次分配管道的热风速度方差为0.403,相比于原方案降低了42.1%,提高了烟气分配器内气流均匀性。

(3)在对热风烧结主管道结构优化的基础上,在一次分配管道上增设渐缩管,一次分配管道热风速度方差为0.046 2,二次分配管道热风速度方差为0.281,相比于原结构分别降低了82%和59.6%。在改进的基础上,使得热风烧结管道内热风分布更加均匀,其流场优化效果明显优于单一结构改进。

(4)在优化主管道和一次分配管的基础上,调整二次分配管道直径,优化后一次分配管道热风速度方差为0.037 9,二次分配管道热风速度方差为0.144,相比于原方案方差分别降低了85.3%和79.3%。通过同时优化的主管道、一次分配管道和二次分配管道,使得烟气分配器中气流分布更加均匀,从而提高台车料面加热均匀性。

参考文献:

- [1] LI Y, ZHU L. Cost of energy saving and CO₂ emissions reduction in China's iron and steel sector[J]. *Applied Energy*, 2014, 130: 603–616.
- [2] FENG J S, ZHAO L, ZHANG S, et al. Exergy analysis and parameter optimization of sinter cooling process in vertical moving bed for waste heat recovery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2020, 175: 115370.
- [3] 汤铃, 贾敏, 伯鑫, 等. 中国钢铁行业排放清单及大气环境影响研究[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(4): 1493–1506.
TANG Ling, JIA Min, BO Xin, et al. High resolution emission inventory and atmospheric environmental impact research in Chinese iron and steel industry[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(4): 1493–1506.
- [4] LI C Q, LIU G R, QIN S, et al. Emission reduction of PCDD/Fs by flue gas recirculation and activated carbon in the iron ore sintering[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 327: 121520.
- [5] LI J J, YE H D, WEI J C, et al. Capture and migration of particulate matter in activated carbon sintering flue gas purification system based on ultra-low emission target[J]. *Fuel*, 2023, 350: 128764.
- [6] 靳华东, 刘相伯. 烧结及球团环冷机高温废气余热回收应用研究[J]. *科技资讯*, 2021, 19(24): 30–33.
JIN Huadong, LIU Xiangbo. Study on the application of waste heat recovery from high temperature waste gas of sintering and pelletizing environment-friendly cooler[J]. *Science & Technology Information*, 2021, 19(24): 30–33.
- [7] 景涛, 周志安, 黄后芳, 等. 唐山国丰 230 m² 烧结机热风烧结新工艺的应用[J]. *烧结球团*, 2016, 41(4): 11–14.
JING Tao, ZHOU Zhian, HUANG Houfang, et al. Application of new hot gas sintering technology in the 230 m² sinter machine of Tangshan Guofeng Iron and Steel Co., Ltd. [J]. *Sintering and Pelletizing*, 2016, 41(4): 11–14.
- [8] 景涛. 环冷机零排放技术及低温热废气的再利用方法[J]. *世界有色金属*, 2022(1): 170–172.
JING Tao. Circular cooler zero-emission technology and recycling method of low-temperature hot exhaust gas[J]. *World Nonferrous Metals*, 2022(1): 170–172.
- [9] FAN X H, YU Z Y, GAN M, et al. Appropriate technology parameters of iron ore sintering process with flue gas recirculation[J]. *ISIJ International*, 2014, 54(11): 2541–2550.
- [10] AHN H, CHOI S, CHO B. Process simulation of iron ore sintering bed with flue gas recirculation[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2013, 40(2): 120–127.
- [11] 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.
- [12] 陈思墨, 李文辉, 周浩宇, 等. 燃气喷吹耦合热风循环烧结的热风罩内数值模拟与结构优化[J]. *烧结球团*, 2023, 48(4): 24–29.
CHEN Simo, LI Wenhui, ZHOU Haoyu, et al. Numerical simulation and structural optimization of hot air hood used for hot air circulation sintering coupled with gas injection[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2023, 48(4): 24–29.
- [13] 罗云飞, 龙红明, 赵利明, 等. 烟气循环烧结热风罩内气流数值模拟及优化[J]. *工程科学学报*, 2022, 44(11): 1852–1859. (下转第134页)

- KANG Jiangang, YANG Bentao, WEI Jinchao, et al. New technology on reduction of pollution and carbon emissions and collaborative disposal of solid wastes in iron ore sintering[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2023, 48(3): 20-26.
- [4] 刘敬东, 李军希, 孙莹. 钢铁企业烧结机头灰提盐工艺实践[J]. *山西冶*, 2023, 46(9): 135-136.
- LIU Jingdong, LI Junxi, SUN Ying. Practice of salt extraction process for sintering machine head ash in iron and steel enterprises[J]. *Shanxi Metallurgy*, 2023, 46(9): 135-136.
- [5] 叶恒棣, 颜旭, 魏进超, 等. 多源含铁固废的元素赋存形态及其对处置技术路线的影响[J]. *烧结球团*, 2022, 47(5): 59-68.
- YE Hengdi, YAN Xu, WEI Jinchao et al. Mode of occurrence of elements in multi-source iron-containing solid waste and its influence on disposal technical route[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2022, 47(5): 59-68.
- [6] 田颖, 孙磊, 王雨. 烧结机头、高炉布袋除尘灰回用技术探讨[J]. *包钢科技*, 2023, 49(1): 36-40.
- TIAN Ying, SUN Lei, WANG Yu. Discussions on technologies for recycling fly ash of sintering machine head and blast furnace bag[J]. *Science and Technology of Baotou Steel*, 2023, 49(1): 36-40.
- [7] 冯哲愚, 王磊, 刘彦廷, 等. 烧结机头灰处置技术对比与研究进展[J]. *烧结球团*, 2023, 48(5): 24-32.
- FENG Zheyu, WANG Lei, LIU Yanting, et al. Comparison and research progress of disposal technologies of sintering machine head ash[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2023, 48(5): 24-32.
- [8] 王东, 王海波, 吕扬, 等. 烧结机机头电除尘灰和脱硫废液的协同资源化利用[J]. *烧结球团*, 2024, 49(1): 106-112.
- WANG Dong, WANG Haibo, LU Yang, et al. Synergistic resource utilization of electric precipitator dusts and waste desulfate liquor of sintering head[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2024, 49(1): 106-112.
- [9] 张雪凯, 贺颖捷, 李佳, 等. 钢铁含铈高盐固废/废水协同水洗技术研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2024(4): 87-93.
- ZHANG Xuekai, HE Yingjie, LI Jia, et al. Study on collaborative washing technology of thallium-containing high-salinity solid waste and wastewater from steel industry[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2024(4): 87-93.
- [10] 曾洁, 邹威亮, 陈欣宇, 等. 基于硫化钠的垃圾焚烧飞灰 EDTA 提取液中重金属回收试验研究[J]. *化工矿物与加工*, 2024, 53(4): 42-49.
- ZENG Jie, ZOU Weiliang, CHEN Xinyu, et al. Experimental study on recovery of heavy metals from EDTA extraction solution of fly ash from waste incineration based on sodium sulfide[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2024, 53(4): 42-49.
- [11] 范庆玲, 郭小甫, 袁俊生. 化学沉淀法去除飞灰浸取液中重金属的研究[J]. *河北工业大学学报*, 2019, 48(3): 21-26.
- FAN Qingling, GUO Xiaofu, YUAN Junsheng. The removal of heavy metals in fly ash leaching solution by chemical precipitation[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2019, 48(3): 21-26.

(上接第 119 页)

- LUO Yunfei, LONG Hongming, ZHAO Liming, et al. Numerical simulation and optimization of the flow in the sintering flue gas circulating hot air hood[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(11): 1852-1859.
- [14] 王双, 徐冰, 陈光, 等. 烧结冷却机循环热风接入点优化模拟研究[J]. *烧结球团*, 2022, 47(4): 83-91.
- WANG Shuang, XU Bing, CHEN Guang, et al. Simulation research on optimization of circulating hot air access point of sintering cooler[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2022, 47(4): 83-91.
- [15] 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.
- [16] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- TAO Wenquan. Numerical heat transfer[M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
- [17] 方达宪. 流体力学[M]. 2 版. 南京: 东南大学出版社, 2018.
- FANG Daxian. Hydromechanics[M]. 2nd ed. Nanjing: Southeast University Press, 2018.