烧结料面燃气喷吹系统仿真模拟研究与应用

陈思墨，周浩宇，王业峰，李 谦，刘 前

（1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；2. 国家烧结球团装备系统工程技术研究中心，湖南 长沙 410205）

摘要：为了提高喷吹燃气混合的均匀性，确定合理的喷吹管结构参数，本文运用Fluent数值仿真软件，对燃气喷吹系统进行建模和流场仿真，分析不同喷吹速度（30、40、50 m/s）、喷孔角度（0°、30°、60°）和管间距（500、600、700 mm）对料面燃气峰值体积分数和喷吹范围的影响。研究结果表明：双孔喷吹时，随着速度的增大，料面燃气峰值体积分数、喷吹范围逐渐增大；随着喷孔角度的增大，料面燃气峰值体积分数逐渐减小，喷吹范围逐渐增大；随着管间距的增大，料面燃气峰值体积分数和喷吹范围均先增加后减小；在300～500 Nm^3/h喷吹量下，优选的喷孔角度为60°，管间距为700 mm。新技术成功应用于中天钢铁工业现场后，当喷吹总流量为300 Nm^3/h时，吨矿固体燃料消耗量减少2.8 kg。

关键词：烧结；燃气喷吹；流场；仿真模拟；均匀喷吹

中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2022)02－0046－06

doi：10.13403/j.sjqt.2022.02.023

Research and application on simulation of gas injection system at sintered material surface

CHEN Simo, ZHOU Haoyu, WANG Yefeng, LI Qian, LIU Qian

(1. *Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha* 410205, *Hunan, China*; 2. *National Engineering Research Center of Sintering and Pelletizing Equipment System, Changsha* 410205, *Hunan, China*)

Abstract: In order to improve the uniformity of gas injection mixture and determine the reasonable structural parameters of the injection tube, Fluent numerical simulation software is used to model and simulate the flow field of the gas injection system, and analyze the effects of different injection speeds (30, 40, 50 m/s), injection hole angles (0°, 30°, 60°) and tube spacing (500, 600, 700 mm) on the peak volume fraction of gas at the sintered material surface and the injection range. The results show that: with double-hole injection, the peak volume fraction of gas at the sintered material surface and the injection range gradually increase as the speed increases; with the increase of the angle of the injection hole, the peak volume fraction of gas at the sintered material surface gradually decreases and the injection range gradually increases; with the increase of the tube spacing, the peak volume fraction of gas at the sintered material surface and the injection range first increase and then decrease; at 300 ~ 500 Nm^3/h injection volume, the preferred injection hole angle is 60° and the tube spacing is 700 mm. After the new technology is successfully applied to the industrial site of Zhongtian Iron and Steel, the solid fuel consumption per ton of mine is reduced by 2.8 kg when the total injection flow rate is 300 Nm^3/h.

Key words: sintering; gas injection; flow field; analogue simulation; even injection

钢铁工业是我国国民经济的支柱产业，同时也是高能耗、高污染行业，其吨钢CO_2排放量达1.5 t[1-2]。而烧结工序又是钢铁行业节能减排的重点和难点，其能耗约占钢铁生产总能

收稿日期：2020－12－03；**修回日期**：2021－01－21

基金项目：湖南省科技创新平台与人才计划（2018TP1033）；长沙市科技重大专项项目（kp1902003）

作者简介：陈思墨（1994—），男，工程师，从事铁矿烧结、球团热能工程领域的研究工作。

耗的 8.3%，排放废气量约占钢铁生产总废气量的一半左右[3-4]。燃气喷吹技术作为一种新型强化烧结技术，既能减少配碳量、降低吨矿能耗，又能减少 NO_x 排放量。该技术通过减少混合料中配碳和在料面喷吹未燃态燃气，实现均热烧结[5]。

国内外一些钢铁企业对该技术进行了深入研究，如：2008 年日本 JFE 公司开发的“super sinter”技术，该技术通过在点火后料面喷吹未燃态 LNG，实现吨矿工序能耗降低 1.65 kg 标煤[6-7]；2015 年，梅钢采用焦炉煤气喷吹，其吨矿工序能耗降低 1.48 kg 标煤[8]；2016 年，韶钢采用焦炉煤气喷吹，实现吨矿工序能耗降低 1.99 kg 标煤[9]。以上技术的喷吹角度和喷吹管间距未经流场优化设计，燃气易局部富集后逃逸和着火，严重影响系统安全稳定运行，燃气喷吹不均匀导致喷吹量难以提高，减碳量较低。在不同的喷吹流量工况下，理论上有不同的最优喷吹角度和管间距组合，但是因为这两个参数在制作安装完喷吹管后就已确定，所以找到一组在设计喷吹流量范围下整体最优的参数组合是保证燃气喷吹均匀性的关键。

目前对燃气喷吹系统的喷吹混合均匀性的数值研究还较少，而保证燃气喷吹混合的均匀性是决定减碳量高低和喷吹安全性的关键。为此，本文运用 Fluent 数值仿真软件，对燃气喷吹系统进行建模和流场仿真，基于仿真结果提出喷吹管结构参数的优化措施，并将其成功应用于某钢铁工业现场，以实现燃气的安全稳定均匀喷吹，并减少吨矿固体燃料消耗量。

1　燃气喷吹工艺原理

燃气喷吹工艺是在烧结总耗热量不变的前提下，将未燃态的气相燃料（氢气、天然气、焦炉煤气等）喷入点火后料面中，替代部分固体燃料，并在燃烧带上部燃烧为烧结过程供热。由于喷入的燃气在燃烧带上部燃烧，可有效延长上部烧结矿液相冷凝结晶时间，降低冷却速度，为优质铁酸钙的形成创造有利条件，避免传统烧结由于料层蓄热效应导致的上部料层热量不足、下部料层热量过剩的问题，实现均热烧结[10-11]。

虽然现阶段燃气喷吹工艺在工业应用过程中取得了一定成效，但存在以下两点问题：

（1）系统喷吹的燃气与空气难混匀，喷吹量难以提高，安全性低。由于现有燃气喷吹系统的喷吹角度和管间距没有做到最优，喷出的燃气与附近空气的混匀程度较低，喷吹系统无法保证各区域燃气体积分数的一致性，使燃气易逃逸和着火，极易引发安全事故。为保证安全性，系统运行时的燃气喷吹总量一般按 8% LEL（爆炸下限）来计算燃气量，这限制了喷吹量的提高。

（2）无法精确控制料层内燃烧带和过湿层的厚度及下移速度。由于现有燃气喷吹系统的喷吹工艺参数是通过烧结杯试验和现场工业试验确定的，未对料层内燃烧带和过湿层的形成和动态机理进行深入研究，导致无法精确控制其厚度及下移速度；实际工艺参数处于粗控和盲控的阶段，导致无法进一步提高燃气喷吹系统的工业应用效果。

为进一步提高喷吹量和保证安全性，需要对燃气喷吹系统的喷吹结构参数进行优化，保证在不同工况下喷吹燃气的混合均匀性。

2　燃气喷吹系统模型的建立

2.1　物理模型

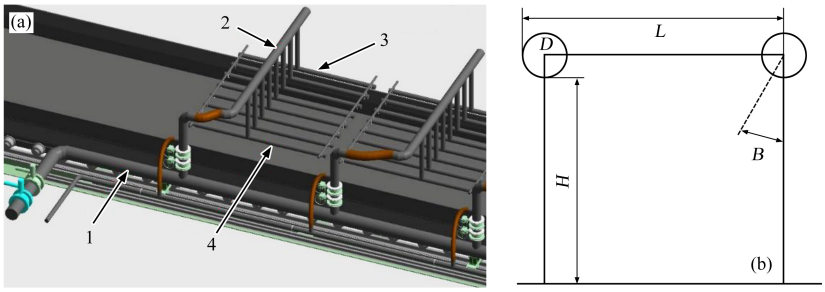
燃气喷吹系统、喷吹管的物理模型如图 1 所示。由图 1（a）可知：燃气由喷吹总管进入喷吹支管，再由喷吹管上的喷吹孔喷出，喷出的燃气与空气混合后进入料面，并在固体燃料燃烧带的上部燃烧，为烧结过程供热。燃气喷吹系统由喷吹管组成，为简化模型，选取两个相邻燃气喷吹管建模。由图 1（b）可知：除喷孔角度为 0°时（即垂直向下喷吹），喷吹管上设置 1 个喷孔，其余角度都为对称布置的两个喷孔。

喷吹速度与流量关系如式（1）所示。

$$Q = 3\,600sv \tag{1}$$

式中：Q 为喷吹支管流量，m^3/h；s 为喷吹支管喷孔总面积，m^2；v 为喷吹速度，m/s。

喷吹系统仿真的初始条件：喷吹管直径为



（a）燃气喷吹系统；（b）喷吹管

1—喷吹总管；2—喷吹支管；3—喷吹管；4—喷吹孔。

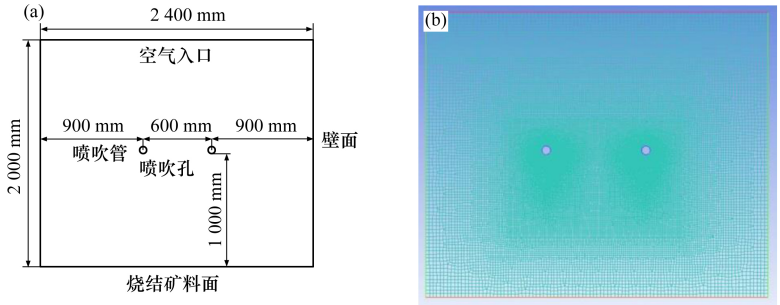
L—相邻两喷吹管距离(mm)；D—喷吹管直径(mm)；H—喷吹管下端距离料面高度(mm)；B—喷孔角度(°)。

图 1 物理模型示意

Fig. 1 Physical model diagram

φ_1，喷孔直径为 φ_2，单个喷孔截面积为 $\pi \times 10^{-6}$ m^2；忽略壁厚，喷吹介质为 CH_4，料面负压设为 −5 Pa，喷吹管下端距离料面高度设为 H。将某烧结厂燃气喷吹系统的数据代入式(1)计算可得：当喷吹系统总流量为 300、400、500 Nm^3/h 时，对应的喷孔喷吹速度分别为 30、40、50 m/s。

当管间距 L 为 600 mm 时，喷吹系统仿真的计算域和网格如图 2 所示，喷吹系统仿真的边界条件、求解模型如表 1 所示。



（a）计算域；（b）网格

图 2 L = 600 mm 时的计算域和网格

Fig. 2 Calculation domain and Mesh when L = 600 mm

表 1 喷吹系统仿真边界条件和计算模型

Table 1 Boundary conditions and numerical simulation model of injection system simulation

边界条件					计算模型		
烧结矿料面	燃气入口(喷吹孔)	空气入口	壁面	喷吹管	湍流模型	输运方程	求解算法
Pressure-outlet	Velocity-inlet	Pressure-outlet	Wall	Wall	k-epsilon	species transport	Coupled

2.3 数学模型

对富氢燃料喷吹系统的流场模拟采用的求解模型：①k-epsilon 湍流模型模拟气体流动；②采能量方程模拟温度变化；③组分输运模型模拟天然气成分。

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_z \tag{2}$$

式中：ρ 为流体密度，kg/m^3；u_i 为流动方向的速度，m/s；x_i 为流动方向的速度，m/s；t 为单位时间，s；S_z 为源相。

动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \tag{3}$$

式中：p 为压强，Pa；g_i 为重力加速度，m^2/s；τ 为应力张量，Pa；u_i 和 u_j 为速度矢量，m/s；F_i 为流体质量力，N。

能量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_i}(k_e \frac{\partial T}{\partial x_i}) - \sum h_{j'} J_{j'} + u_j \tau_{ij} + S_h \quad (4)$$

$$E = h_{j'} - \frac{\rho}{p} + \frac{u_i^2}{2} \quad (5)$$

式中：k_e 为有效热传导系数，W/(m^2·K)；$h_{j'}$ 为理想气体的显熵，J/K；$J_{j'}$ 为组分扩散流量，m^3/s；τ_{ij} 为黏性耗散，Pa；S_h 为化学反应热和其它体积热源项，J；T 为流体温度，K。

3　仿真分析

3.1　喷吹管喷吹速度仿真分析

不同喷吹速度的仿真结果如表 2 所示。由表 2 可以看出，当喷孔角度为 0°，采用单孔喷吹，管间距为 700 mm 时，随着速度的增大，料面燃气峰值体积分数逐渐减小，喷吹范围逐渐增大。

表 2　不同喷吹速度的仿真结果

Table 2　Simulation results of different injection speeds

喷吹速度/(m·s^{-1})	料面燃气峰值(体积分数)/%	喷吹范围/mm
50	11.8	301.5
40	12.0	276.0
30	12.6	259.5

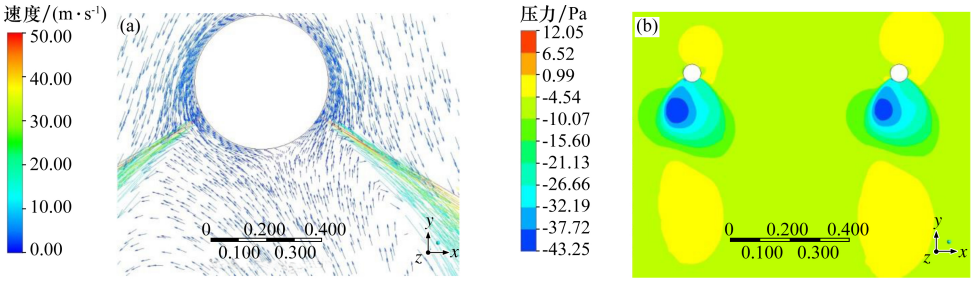
不同喷吹速度和喷孔角度的仿真结果如表 3 所示。由表 3 可以看出，当喷孔角度为 30°和 60°，采用双孔喷吹时，随着速度的增大，料面燃气峰值体积分数逐渐增大，喷吹范围逐渐增大。

表 3　不同喷吹速度和喷孔角度的仿真结果

Table 3　Simulation results of different injection speed and nozzle angle

喷吹速度/(m·s^{-1})	喷孔角度/(°)	料面燃气峰值体积分数/%	喷吹范围/mm
50	60	14.5	471.9
	30	22.1	301.5
40	60	14.1	471.9
	30	21.8	276.0
30	60	13.2	453.7
	30	20.4	259.5

喷孔角度为 60°，喷吹速度为 50 m/s 的回流区速度矢量、压力分布如图 3 所示。造成料面燃气峰值体积分数规律差异的主要原因：双孔喷吹时，喷吹管下部存在低压回流区，喷出的燃气回流到喷吹孔附近和刚喷出的燃气混合，喷出速度越快，回流现象越明显；而单孔喷吹时，位于喷吹管下部的喷吹孔所喷出的高速燃气消除了低压回流区，直接喷向料面。



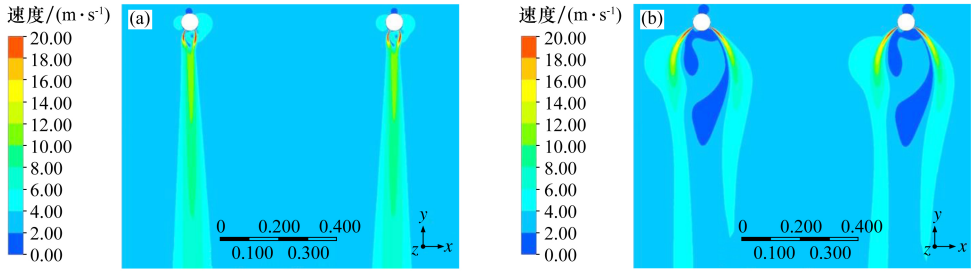
（a）回流区速度矢量分布；（b）压力分布

图 3　喷孔角度为 60°、喷吹速度为 50 m/s 时回流区的速度矢量和压力分布

Fig. 3　Velocity vector and pressure nephogram of recirculation zone with nozzle angle B is 60 degrees and injection speed is 50 m/s

3.2　喷吹管喷孔角度仿真分析

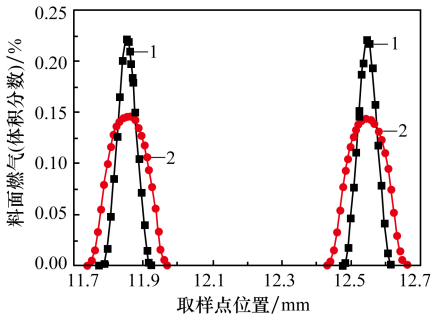
喷吹速度为 50 m/s，喷孔角度为 30°和 60°的速度分布、料面燃气体积分数分布如图 4、5 所示。从表 3 和图 4、5 可以看出：当管间距为 700 mm，喷吹速度相同时，速度云图中喷孔角度为 60°的喷吹范围显著大于喷孔角度为 30°的喷吹范围，且随着喷孔角度的增大，料面燃气峰值体积分数逐渐减小，喷吹范围逐渐增大；单孔喷吹、喷孔角度为 0°，比双孔喷吹、喷孔角度为 30°和 60°时流量减少一半，但料面燃气峰值体积分数和喷吹范围并未大幅变化。为使喷吹均匀性最佳，优选的喷孔角度为 60°。



喷孔角度/（°）：（a）30；（b）60

图 4 喷吹速度为 50 m/s 时不同喷孔角度下速度分布

Fig. 4 Velocity nephogram with different nozzle angle and injection speed is 50 m/s



喷孔角度/（°）：1—30；2—60。

图 5 喷吹速度为 50 m/s 时不同喷孔角度下料面燃气体积分数分布

Fig. 5 Gas concentration distribution curve of material surface with different nozzle angle and injection speed is 50 m/s

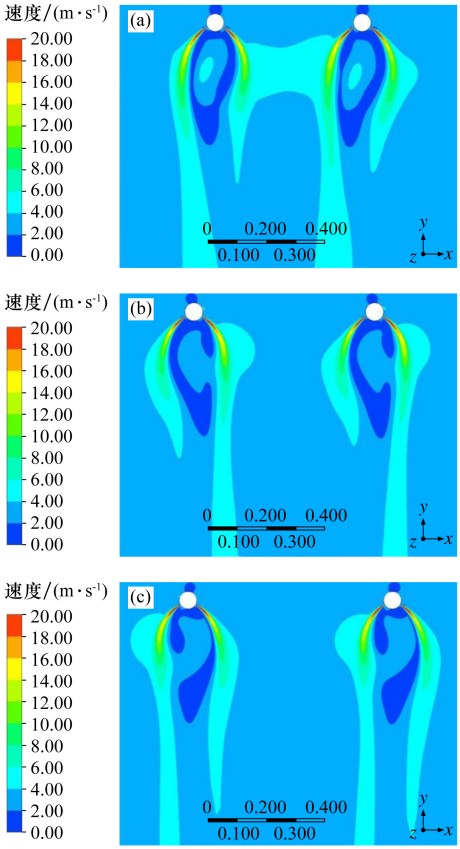
3.3 喷吹管间距仿真分析

不同喷吹速度和管间距的仿真结果如表 4 所示。喷吹速度为 50 m/s，喷孔角度为 60°，管间距分别为500、600、700 mm的速度分布、料面燃气体积分数分布曲线如图 6、7 所示。由表 4 和图 6、7 可以看出，当喷孔角度为 60°，喷吹速度相同时，其速度分布相似，随着管间距的增大，料面燃气峰值体积分数和喷吹范围都是先增加后减小。为使喷吹均匀性最佳，优选的管间距为 700 mm。

表 4 不同喷吹速度和管间距的仿真结果

Table 4 Simulation results of different injection speed and pipe spacing

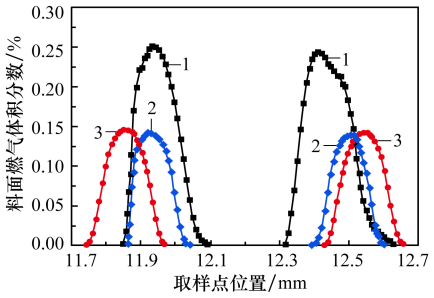
喷吹速度/(m·s⁻¹)	管间距/mm	料面燃气峰值体积分数/%	喷吹范围/mm
50	700	14.5	471.9
	600	23.5	553.1
	500	24.1	474.3
40	700	14.1	471.9
	600	23.7	544.4
	500	19.8	464.8
30	700	13.2	453.7
	600	22.6	518.3
	500	16.0	421.3



管间距/mm：（a）500；（b）600；（c）700

图 6 喷吹速度为 50 m/s、喷孔角度为 60°时不同管间距下速度分布

Fig. 6 Velocity nephogram with different pipe spacing with nozzle angle is 60 degrees and injection speed is 50 m/s



管间距/mm：1—500；2—600；3—700

图 7　喷吹速度为 50 m/s、喷孔角度为 60°时料面燃气体积分数分布曲线

Fig. 7　Gas concentration distribution curve of material surface with different pipe spacing when nozzle angle is 60 degrees and injection speed is 50 m/s

4　应用效果

通过仿真分析，得到燃气喷吹系统在300 ~ 500 Nm^3/h 喷吹量下的最优喷孔角度为 60°，管间距为 700 mm。将优化后的系统参数应用于江苏某钢铁工业现场后，系统最大天然气喷入量提升至 500 Nm^3/h，未发生着火逃逸，系统安全稳定运行，当喷吹系统总流量为 300 Nm^3/h 时，替代吨矿固体燃料量为 2.8 kg/t，提升上料量为 0.7 t/h，新技术应用前后比对数据表如表 5 所示。

表 5　燃气喷吹工艺技术应用前后数据对比

Table 5　Comparison of data before and after application of gas injection technology

项目	燃气报警器最大检测值/%	着火逃逸情况/（次·月$^{-1}$）	固体燃料消耗/（$kg_{标煤}\cdot t^{-1}$）	天然气最大喷入量/（$Nm^3\cdot h^{-1}$）	上料量/（$t\cdot h^{-1}$）
技术应用前	2.16×10^{-3}	6	54.87	300	1 025.2
技术应用后	2.00×10^{-5}	0	52.07	500	1 025.9
参数变化值	-2.14×10^{-3}	−6	−2.80	+200	+0.7

5　结　论

（1）当喷孔角度为 0°，采用单孔喷吹时，随着速度的增大，料面燃气峰值体积分数逐渐减小，喷吹范围逐渐增大；当喷孔角度为 30°和 60°，采用双孔喷吹时，随着速度的增大，料面燃气峰值体积分数逐渐增大。

（2）随着喷孔角度的增大，料面燃气峰值浓度逐渐减小，喷吹范围逐渐增大；随着管间距的增大，料面燃气峰值体积分数和喷吹范围都是先增加后减小；在 300 ~ 500 Nm^3/h 喷吹量下，优选的喷孔角度为 60°，管间距为 700 mm。

（3）随着喷吹速度的增大，喷吹管下端的回流增强，料面燃气峰值体积分数随之升高；双孔喷吹相较于单孔喷吹，燃气与空气的接触面积更大，料面燃气峰值体积分数更低，混合更均匀。

参考文献：

[1] 叶恒棣. 钢铁烧结烟气全流程减排技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2019.
YE Hengdi. Flue gas full-process emission reduction technology for sintering of iron and steel[M]. Beijing, Metallurgical Industry Press,2019.

[2] 王国栋. 钢铁行业技术创新和发展方向[J]. 钢铁,2015,50(9):1 - 10.
WANG G D. Technology innovation and development direction of iron and steel industry[J]. Iron & Steel,2015,50(9):1 - 10.

[3] 赵春丽,许红霞,杜蕴慧,等. 关于推进我国钢铁行业绿色转型发展的对策建议[J]. 环境保护,2017,45(Z1):41 - 44.
ZHAO Chunli,XU Hongxia,DU Yunhui,et al. Green Transformation Development Countermeasures in China′s Iron and Steel Industry[J]. Environmental Protection,2017,45(Z1):41 - 44.

[4] 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.

[5] 周浩宇,李奎文,雷建伏,等. 烧结燃气顶吹关键装备技术的研发与应用[J]. 烧结球团,2018,43(4):22 - 26.
ZHOU Haoyu,Li Kuiwen,LEI Jianfu,et al. Development and application of key equipment technology for top gas injection in sintering process[J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(4):22 - 26.

（下转第 60 页）

10(9):750 – 767.

[14] 刘文权,吴记全. 烧结强力混合和强化制粒创新技术[C]//2017年全国烧结球团技术交流年会暨“提质增效、创新驱动、绿色发展”行业主题研讨会论文集. 宜昌:全国烧结球团信息网,2017:155 – 158.
LIU Wenquan, WU Jiquan. Innovation technology of sintering strong mixing and strengthening granulation [C]//2017 National Sintering Pelletizing Technology Exchange Annual Conference and Symposium on “Improving Quality and Efficiency, Innovation-Driven, Green Development”. Yichang: National sinter pellet information network, 2017: 155 – 158.

[15] 王建晖,胡岳华,傅菊英,等. 有机黏结剂强化烧结制粒[J]. 中南工业大学学报,1997(1):28 – 30.
WANG Jianhui, HU Yuehua, FU Juying, et al. Investigation on strengthening granulation of sinter mix with organic binder[J]. Journal of Central South University of Technology, 1997(1): 28 – 30.

[16] 周东峰. 分级制粒法非均质烧结工艺研究[D]. 辽宁:东北大学,2006.
ZHOU Dongfeng. Study of the Non-isotropic sintering graft by separated granulation[D]. Liaoning: Northeastern University, 2006.

[17] 张贺雷. 宝钢高配比镜铁矿与含铁粉尘的复合造块工艺研究[D]. 长沙:中南大学,2014.
ZHANG Helei. Research on composite agglomeration process with high-ratio of specularite ore and iron-bearing dust of Baosteel[D]. Changsha: Central South University, 2014.

[18] ZHU D Q, SHI B, PAN J, et al. Effect of pre-briquetting on the granulation of sinter mixture containing high proportion of specularite concentrate[J]. Powder Technology, 2018(331): 250 – 257.

[19] 吕学伟,郭家宝,游洋,等. 铁矿粉烧结制粒过程颗粒行为研究综述[J]. 钢铁研究学报,2021,33(10):1084 – 1094.
LÜ Xuewei, GUO Jiabao, YOU Yang, et al. Particles behavior of iron ore fine during granulation process: A review[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(10): 1084 – 1094.

[20] 何云华. 圆筒混合机内物料运动状态的研究[J]. 烧结球团,2007,32(1):1 – 4.
HE Yunhua. Research on the movement states of material in drum mixer[J]. Sintering and Pelletizing, 2007, 32(1): 1 – 4.

[21] 周密,杨松陶,姜涛,等. 强化制粒对含铬型钒钛混合料烧结的影响[J]. 钢铁,2015(3):39 – 43.
ZHOU Mi, YANG Songtao, JIANG Tao. Effect of enhanced granulation on Cr-bearing vanadium and titanium magnetite sintering[J]. Iron and Steel, 2015(3): 39 – 43.

[22] 李文琦. 优化烧结料层透气性和温度场的研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
LI Wenqi. Investigation on optimizing permeability and temperature field of sintering bed[D]. Changsha: Central South University, 2012.

[23] WU S L, WANG Q F, BIAN M L, et al. Influence of iron ore characteristics on FeO formation during sintering[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2011, 18(5): 5 – 10.

(上接第51页)

[6] 周文涛,胡俊鸽,郭艳玲. 国外烧结球团突破性技术研究进展[J]. 烧结球团,2015,40(2):5 – 10.
ZHOU Wentao, HU Junge, GUO Yanging. Research progress about breakthrough sintering & pelleting technologies[J]. Sintering and Pelletizing, 2015, 40(2): 5 – 10.

[7] OYAMA Nobuki, IWAMA Yuji, YAMAMOTO Tetsuyu. Development of secondary-fuel injection technology for energy reduction in the iron ore sintering process[J]. ISIJ International, 2011, 51(6): 913 – 921.

[8] 李和平,聂慧远,韩凤光,等. 焦炉煤气强化烧结技术在梅钢的应用[J]. 烧结球团,2015,40(6):1 – 3.
LI Heping, NIE Huiyuan, HAN Fengguang, et al. Application of intensified sintering technology with COG in Meisteel[J]. Sintering and Pelletizing, 2015, 40(6): 1 – 3.

[9] 叶恒棣,周浩宇,王兆才,等. 高配比富氢燃料烧结技术研究及展望[J]. 烧结球团,2020,45(5):1 – 7.
YE Hengdi, ZHOU Haoyu, WANG Zhaocai, et al. Research and prospect of high proportion hydrogen-rich fuel sintering technology[J]. Sintering and Pelletizing, 2020, 45(5): 1 – 7.

[10] 程志龙,杨剑,魏赏赏,等. 燃气喷吹技术调控铁矿烧结熔化特性的实验研究[J]. 工程热物理学报,2017,38(5):1044 – 1050.
CHENG Zhilong, YANG Jian, WEI Reward, et al. Experimental study of gaseous fuel injection method for controlling heat pattern of melting zone in iron ore sintering[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(5): 1044 – 1050.

[11] 白晨光,谢皓,邱贵宝,等. 烧结料层中的蓄热模型[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2008(9):1002 – 1007.
BAI Chenguang, XIE Hao, QIU Guibao, et al. An accumulation heat model and its application in iron ore sintering[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2008(9): 1002 – 1007.