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

陈思墨，李文辉，周浩宇，宋新义，刘 前，朱蓉甲
（中冶长天国际工程有限责任公司 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：热风烧结耦合燃气喷吹技术是在热风罩内同时进行热风循环烧结和燃气喷吹的一种新型强化烧结技术，该技术能提高烧结矿产质量、降低烧结固体燃料消耗和污染物排放量。当流场均匀性较低时，喷出的燃气易富集、着火和逃逸，严重影响运行安全。为此，本文利用Fluent软件对某烧结厂500 m^{2}烧结机热风罩内流场进行仿真模拟，结果表明：热风进入罩内后偏向于一侧料面，并在进气口下方产生回流死区使得外界空气进入罩内阻碍喷出的燃气进入料面，导致喷吹管附近燃气富集；通过优化罩内结构，使得进入料面的最大风速由6.42 m/s降低至2.72 m/s，料面风速方差由2.70降低至0.25，喷嘴出口区域和料面的最大燃气质量分数分别由1.82%和0.98%降低至1.30%和0.53%，相比原结构分别降低了57.63%、90.74%、28.57%和45.92%；优化后侧部漏风平均风速由1.17 m/s降低至0.22 m/s，相比原结构降低了81.2%，保证了燃气喷吹耦合热风循环烧结系统的安全高效稳定运行。

关键词：热风烧结；燃气喷吹；烟气循环；循环烟罩；数值模拟
中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2023)04－0024－06
doi：10.13403/j.sjqt.2023.04.050

Numerical simulation and structural optimization of hot air hood used for hot air circulation sintering coupled with gas injection

CHEN Simo，LI Wenhui，ZHOU Haoyu，SONG Xinyi，LIU Qian，ZHU Rongjia
（National Engineering Research Center of Sintering and Pelletizing Equipment System，Zhongye Changtian International Engineering Co.，Ltd.，Changsha 410205，Hunan，China）

Abstract：Hot air sintering coupled with gas injection technology is a new type of enhanced sintering technology for hot air circulation sintering and gas injection in the hot air hood，which can improve the quality of sintered minerals，reduce the consumption of burning solid fuel and pollutant emissions. When the uniformity of the flow field is low，the ejected gas is easy to enrich，catch fire and escape，which seriously affects the operation safety. Therefore，Fluent software is used to simulate the flow field in the hot air hood of a 500 m^2 sintering machine in a sintering plant，and the results show that：After the hot air enters the hot air hood，it is biased to one side of the material surface，and a return dead zone is generated under the air intake，so that the outside air enters the hot air hood and obstructs the ejected gas from entering the material surface，resulting in gas enrichment near the nozzle pipe. By optimizing the structure in the hot air hood，the maximum air speed entering the material surface is reduced from 6.42 m/s to 2.72 m/s，the variance of the air speed of the material surface is reduced from 2.70 to 0.25，and the maximum gas mass fraction of the nozzle outlet area and the material surface are reduced from 1.82% and 0.98% to 1.30% and 0.53%，respectively，which are reduced by 57.63%，90.74%，28.57% and 45.92% compared with the original structure. After optimizing the side sealing structure，the average air

收稿日期：2022－08－24；**修回日期**：2022－10－11
基金项目：湖南省科技成果转化及产业化计划资助项目(S2020GXGSHHCZ0001)
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。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

speed of the side air leakage is reduced from 1.17 m/s to 0.22 m/s, which is 81.2% lower than the original structure, ensuring the safe, efficient and stable operation of the gas injection coupled with hot air circulation sintering system.

Key words: hot air sintering; gas injection; flue gas circulation; circulating gas hood; numerical simulation

烧结是我国钢铁冶炼主要的原料加工工艺，其能耗与污染负荷分别占钢铁流程 9% 和 45%，是钢铁工业节能减排的重点和难点[1]。随着环保政策的日趋严格，国家对钢企烧结工序的节能减排和达标排放提出了更高的要求[2]。热风烧结工艺是将掺混空气后的热废气、热空气或富氧热风通入烧结机台车上部的密封罩中提高通过料层气流温度的一种烧结方法，能减少固体燃料配比、降低热应力、提高烧结矿的成品率[3]。燃气喷吹技术是通过在烧结机台车上部的喷吹装置向烧结矿料面喷吹燃气，从而替代烧结矿中的部分固体燃料，使燃气随空气进入烧结矿内的燃烧带燃烧放热，从而强化烧结过程[4-5]。

目前，国内外的研究主要集中在热风或烟气对烧结过程的影响[6-7]。任伟等[8]通过数值模拟对循环罩的进气角度、进气口间距和底座高度对罩内流场的影响进行了分析，得到了较优的结构参数；许源等[9]对沙钢 4 号烧结机烟气循环系统进行了数值模拟研究，在循环罩进气口加装导流板后改善了罩内流场均匀性；杨正伟等[10]以宝钢 600 m^2 烧结机烟气循环系统为对象，利用 Fluent 模拟了抬高烟气罩顶端、增加进气扩口长度和罩内导流板，改进后的气流分布有明显改善；罗云飞等[11]通过优化烟气罩内导流板结构和数量，改善了烟气的流动状态，使烟气分布更均匀，改善了烟气罩漏风状况，使 A 侧漏风口由漏风 1.2 m^3/s变为吸风 2.4 m^3/s；本文作者[12]针对原有热风罩结构进行了结构优化，新结构的料面热风最大速度为 2.82 m/s，热风速度的方差为 0.30，相比原结构分别降低了 55.7% 和 90.8%，使得水平方向流入的热风能垂直进入料面，消除了热风偏向和低速回流问题。虽然目前有学者对热风在罩内的流动状态和流场均匀性进行了部分研究，但对燃气喷吹耦合热风循环烧结的热风罩内热风与燃气耦合的流场流动状态和均匀性的研究鲜有报道。

本文通过对燃气喷吹耦合热风循环烧结系统的研究，建立耦合燃气喷吹装置的热风罩三维仿真模型，对某烧结厂 500 m^2 烧结机燃气喷吹耦合热风循环烧结的热风罩进行数值模拟，针对罩内热风与燃气耦合后混合气分布不均以及罩内燃气质量浓度过高的问题，优化罩内结构，使得水平方向流入的热风与燃气混合后垂直进入料面，消除热风偏向和低速回流死区，减少侧部漏风，显著降低喷嘴出口区域和料面的燃气浓度，保证燃气喷吹耦合热风循环烧结系统安全高效稳定运行。

1　热风罩模型的构建

1.1　基本假设

考虑到燃气喷吹耦合热风循环烧结的热风罩内流场仿真过程非常复杂，结合工程应用需求，在保证求解精度和反映流场规律的前提下，将单节热风循环罩作为研究对象，模型假设如下[12]：① 假设烟气总管进入各支管的烟气流量均匀分配，且热风循环罩进口流场一致；② 假设物料表面为烟气出口，且物料表面负压一致；③ 假设台车与热风循环罩侧壁存在漏风现象，且漏风处气压一致；④ 假设烟气内粉尘颗粒对流场没有影响；⑤ 因为不研究温度场，所以不考虑换热。

1.2　控制方程

选用 k-epsilon 湍流模型对热风循环罩内流场进行研究，其求解方程如下。

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=S_z \tag{1}$$

式中：ρ 为流体密度，kg/m^3；t 为时间，s；u_i 为流体速度，m/s；x_i 为流体位置，m；S_z 为源项，kg/(m^3·s)。

动量方程：

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

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_j 为流体速度，m/s；F_i 为流体质量力，N。

1.3　物理模型及边界条件

热风罩总长度为 24 m，台车宽度为 5 m，进

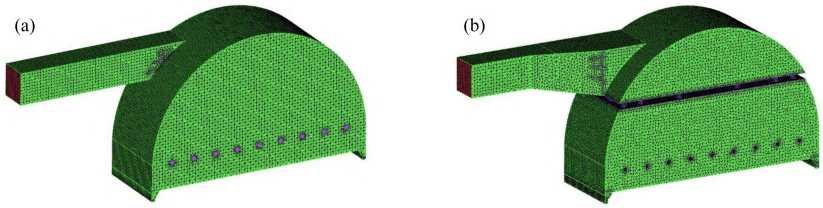
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

气口尺寸为1 500 mm×800 mm，燃气介质为CH_4，热风含氧量为20.5%，温度为100 ℃，总流量最大为2.5×10^5 Nm^3/h，假设各支管平均分配，换算成支管入口速度为9.65 m/s，设置热风流速度为10 m/s。料面负压设置为-5 Pa，侧部漏风处压力设置为0 Pa。由于每节热风罩的结构相同，且左右轴对称，因此取单节热风罩结构的一半进行仿真模拟。热风罩模型中的沿台车运动方向的前后端面设置为壁面，实际相邻热风罩的前后端面为连通结构无壁面隔断。

1.4 优化方案

根据现场运行情况，原有热风罩在运行时，热风总流量过高时会导致来流风速过大，同时由于导流板导流作用有限，使得左侧进入的热风偏向右侧，左侧只有少量热风进入料面，造成罩内热风分布不均。最终使得喷吹管喷出的燃气在左侧富集，容易着火，严重影响运行安全。并且热风罩与台车侧部的密封只有一层密封板，易出现侧部漏风，吹散靠近侧部的喷嘴喷出的燃气，燃气容易逃逸，影响运行安全。

为了降低来流速度，减少侧部漏风，使得罩内流场分布均匀，系统安全稳定运行。本文将进气口变为逐渐扩张的进气口，降低进入罩内的来流速度；将只有垂直方向导流效果的导流板改为兼具垂直和水平方向导流效果的立体导流板；通过新增的整流花板和导流筒将罩内空间分隔为两部分，形成整流室和混流室，使得导流筒喷出的热风风速、风量基本一致，方向垂直料面；将单层侧密封改为多层侧部软密封，减少侧部漏风。燃气喷吹耦合热风循环烧结的单节热风罩简化后原有结构的网格模型和优化后结构的网格模型如图1所示。



（a）原有结构；（b）优化后结构

图1 单节热风罩的网格模型

Fig. 1 Mesh model of single section hot air hood

2 仿真结果与分析

2.1 原结构的罩内流场

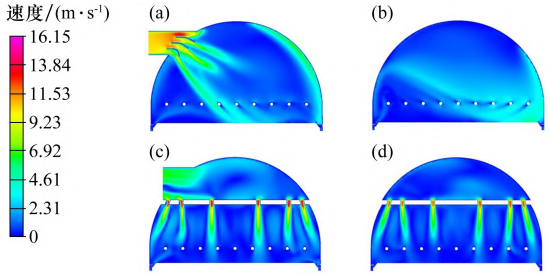
现有燃气喷吹耦合热风循环烧结的单节热风罩的两个垂直截面的速度分布如图2(a)、(b)所示，进气口水平截面的速度分布如图3(a)所示，垂直截面1的速度矢量分布如图4(a)所示，垂直截面1的CH_4质量分数分布如图5(a)所示。由图2(a)和(b)、图3(a)和4(a)可以看出，部分来流热风被下部导流板导向了料面，热风速度超过了5 m/s，而其他来流热风被中上部导流板导向料面过程中部分产生回流，冲刷进气口对侧的热风罩罩体，热风速度也超过了5 m/s。冲刷进气口对侧热风罩上的热风顺着热风罩壁面向下冲击该侧燃气喷吹装置和侧部密封装置，使得热风易携带燃气从侧部漏出，造成安全隐患。并且由于下部导流板导流效果有限，导致没有热风进入靠近进气口的下部空间，形成了回流死区，易使得外界空气从该侧侧部密封装置进入热风罩内。由图5(a)可以看出，由于进气口下部侧密封装置漏风冲击燃气喷吹装置的影响，导致燃气喷吹装置喷出的燃气无法顺利喷进料面，在喷嘴出口形成高浓度燃气区域，该区域最大燃气质量分数为1.82%，料面最大燃气质量分数为0.98%，存在较高安全风险。

2.2 优化后结构的罩内流场

优化后结构的单节热风罩的两个垂直截面的速度分布如图2(c)、(d)所示，进气口水平截面的速度分布如图3(b)所示，垂直截面1的速度矢量分布如图4(b)所示，垂直截面1的CH_4质量分数分布如图5(b)所示。由图2(c)和(d)、图3(b)和4(b)可以看出，热风进入扩张的进气口后便被减速，从10 m/s的来流速度降低至6 m/s进入热风罩内。来流热风经改进的立体导流板导流

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

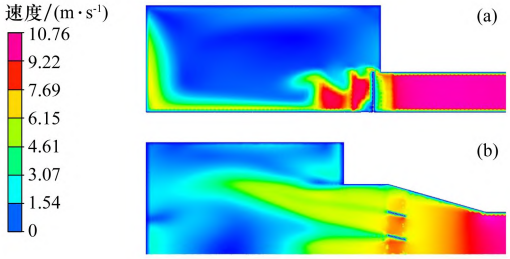
后均匀扩散到整流室内，保证了进入导流筒热风的均匀性。通过整流花板与热风罩形成的整流室，使得导流筒喷出的热风风速、风量基本一致，方向垂直料面。但在靠近进气口一侧的中间导流筒的热风风量较其他导流筒少，主要是因为该处导流筒最靠近进气口，来流热风的垂直向下速度矢量相比其他位置最小，导致进入该处导流筒的热风较少。由图 5(b)可以看出，虽然在喷嘴出口仍存在高浓度燃气区域，但喷嘴出口区域和料面的最大燃气质量分数分别为 1.30% 和 0.53%，相比原结构分别降低 28.57% 和 45.92%，提升了系统运行安全性。



（a）原结构垂直截面 1；（b）原结构垂直截面 2；（c）优化后结构垂直截面 1；（d）优化后结构垂直截面 2

图 2　不同垂直截面速度分布

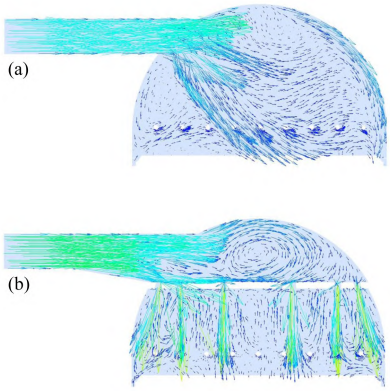
Fig. 2　Velocity nephogram of different vertical sections



（a）原结构；（b）优化后结构

图 3　进气口水平截面速度分布

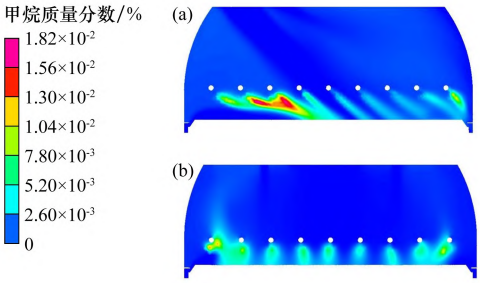
Fig. 3　Velocity nephogram of horizontal section of air inlet



（a）原结构；（b）优化后结构

图 4　垂直截面 1 的速度矢量分布

Fig. 4　Velocity vector nephogram of vertical section 1



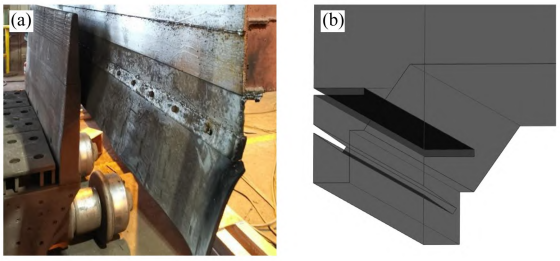
（a）原结构；（b）优化后结构

图 5　垂直截面 1 的甲烷质量分数分布

Fig. 5　CH_4 mass fraction nephogram of vertical section 1

2.3　优化侧部密封后的料面及侧部流场

优化侧部密封后的单节热风罩的侧部密封实物和模型如图 6 所示，原结构、优化后结构以及优化侧部密封后的料面速度分布如图 7 所示，侧部密封漏风速度分布图如图 8 所示。



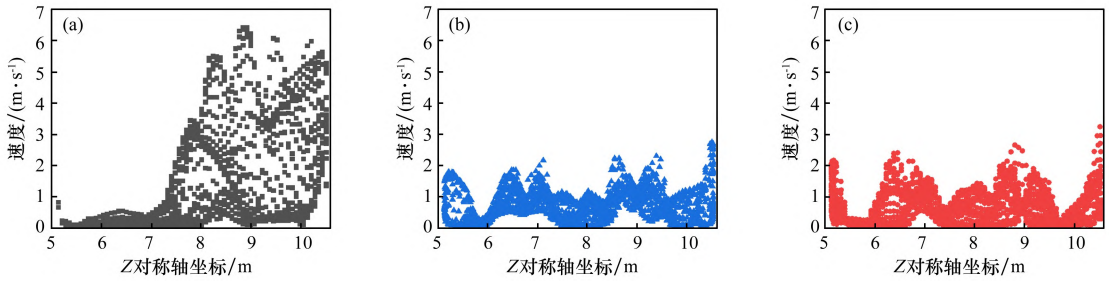
（a）实物图；（b）模型图

图 6　优化后的侧部密封装置

Fig. 6　Optimized side sealing device

由图 7 可以看出，原结构的料面风速在进气口一侧低，在远离进气口一侧高，流场分布不均，最大风速达 6.42 m/s，料面风速方差达 2.70。优化后结构的料面风速分布均匀，最大风速为 2.72 m/s，料面风速方差为 0.25，相比原结构分别降低 57.63%、90.74%。在优化结构的基础上进一步优化了侧部密封机构，发现与优化后结构的料面风速分布差异不大，最大风速为 2.72 m/s，料面风速方差为 0.31。优化侧部密封对热风罩内整体流场分布影响有限。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

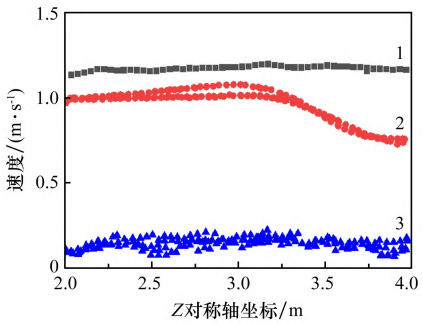


（a）原结构；（b）优化后结构；（c）优化侧部密封后结构

图 7 料面速度分布

Fig. 7 Velocity profile of charge level

由图 8 可以看出，原结构的侧部漏风风速平均值为 1.17 m/s。优化后结构的侧部漏风风速平均值为 0.96 m/s，最大值为 1.07 m/s，位置为进气口中央与热风罩侧壁的中间，最小值为 0.72 m/s，位置为热风罩侧壁。主要是中间位置来流热风垂直向下的速度矢量相比其他位置最小，导致进入该处导流筒的热风较少，漏风处垂直向下的热风风压较小，进入热风罩内的漏风增多，漏风速度较大。经导流板进入热风罩内的热风，从水平方向上看，一部分在进气口一侧热风罩侧壁位置回流，一部分直接流向进气口远端的热风罩侧壁，从垂直方向上看，其垂直向下的速度矢量相比其他位置最大，导致进入该处导流筒的热风较多，漏风处垂直向下的热风风压较大，进入热风罩内的漏风减小，漏风速度较小。优化侧部密封后结构的侧部漏风风速平均值为 0.22 m/s，相比原结构降低了 81.20%。



1—原结构；2—优化后结构；3—优化侧部密封后结构。

图 8 漏风速度分布

Fig. 8 Velocity profile of air leakage

3 应用效果

通过仿真分析与结构优化，得到燃气喷吹耦合热风循环烧结系统的最优结构和工艺参数。将优化后的系统应用于某烧结厂 2 台 500 m^2 烧结机后，未发生着火逃逸，系统安全稳定运行，当热风循环系统总管流量为 2.0×10^5 ~ 2.5×10^5 Nm^3/h，燃气喷吹系统总管流量为 350 ~ 450 Nm^3/h时，喷入的 CH_4 能替代的吨矿固体燃料消耗量为 1.5 ~ 2.0 kg。

4 结 论

（1）原结构的导流板的导流效果有限，无法将速度为 10 m/s 的来流热风由水平方向改变为垂直向下进入料面，使得一部分来流热风冲刷进气口对侧热风罩，易携带燃气从该侧部密封装置漏出。而在靠近进气口的下部空间，由于没有热风进入，形成了回流死区，易使得外界空气进入热风罩内冲击燃气喷吹装置，阻碍喷出燃气进入料面，在喷嘴出口形成高体积浓度燃气区域，造成热风罩内流场分布不均，喷嘴出口区域和料面的最大燃气质量分数分别为 1.82% 和 0.98%，存在较高安全风险。

（2）优化后的结构对罩内流场改善明显，10 m/s 的热风进入扩张的进气口后被降低至 6 m/s 进入热风罩内。来流热风经改进的立体导流板导流后均匀扩散至整流室，保证了进入导流筒热风的均匀性。通过整流花板将热风罩上部空间隔离形成的整流室，使得导流筒喷出的热风风速、风量基本一致，方向垂直料面。虽然在喷嘴出口仍存在高浓度燃气区域，但喷嘴出口区域和料面的最大燃气质量分数分别为 1.30% 和 0.53%，相比原结构分别降低 28.57% 和 45.92%，提升了系统运行安全性。

（3）原结构进入料面的最大风速为 6.42 m/s，料面风速方差为 2.70，优化后结构的料面最大风

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

速为 2.72 m/s，料面风速方差为 0.25，相比原结构分别降低 57.63%、90.74%。优化后结构显著提升了整体流场分布的均匀性，而优化侧部密封对热风罩内整体流场分布影响有限，最大风速为 2.72 m/s，料面风速方差为 0.31。原结构和优化后结构的侧部漏风风速平均值分别为 1.17 m/s 和 0.96 m/s，优化后结构对侧部漏风降低的影响程度较小，而优化侧部密封后结构的侧部漏风风速平均值为 0.22 m/s，相比原结构降低了 81.20%。所以在优化后结构的基础上进一步优化侧部密封，能在提升流场均匀性的同时，减少侧部漏风，保证燃气喷吹耦合热风循环烧结系统安全高效稳定运行。

参考文献：

[1] 王兆才，周志安，胡兵，等. 烧结烟气循环风氧平衡模型[J]. 钢铁，2015，50(12)：53－59.
WANG Z C，ZHOU Z A，HU B，et al. Wind-oxygen balance model of flue gas circulation in sintering. Iron and Steel，2015，50(12)：53－59.

[2] 李惠莹，王浩，金保昇. 浅谈烟气循环烧结工艺的发展现状及趋势[J]. 烧结球团，2018，43(1)：61－65.
LI H，HAO W，JIN B，et al. Development status and trend of flue gas recirculation sintering process[J]. Sintering and Pelletizing，2018，43(1)：61－65.

[3] 沈坷，张忠孝，代百乾. 烧结余能综合回收利用技术研究[J]. 烧结球团，2010，35(6)：1－4.
KE S，ZHANG Z S，DAI B Q. Study on comprehensive utilization of sintering residue energy[J]. Sintering and Pelletizing，2010，35(6)：1－4.

[4] 范晓慧，甘敏，季志云，等. 复合气体介质烧结的节能减排技术开发与应用[J]. 钢铁，2020，55(8)：62－69.
FAN X H，GAN M，YU Z Y，et al. Development and application of techniques for energy conservation and emission reduction during sintering process based on multiple-component gases medium[J]. Iron and Steel，2020，55(8)：62－69；74.

[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 H Y，LI K W，LEI J F，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.

[6] 张小辉，张家元，田万一，等. 烟气循环烧结的数值仿真[J]. 中南大学学报(自然科学版)，2014(4)：1312－1320.
ZHANG X H，ZHANG J Y，TIAN W Y，et al. Numerical simula-tion of flue gas circulation sintering[J]. Journal of Central South University：Science and Technology，2014(4)：1312－1320.

[7] 陈许玲，郑如月，范晓慧，等. 热风循环烧结过程料层温度及 NO_x 排放模拟模型[J]. 钢铁，2020，55(2)：23－30.
CHEN X L，ZHENG R Y，FAN X H，et al. Numerical simulation model of temperature and NO_x emission in flue gas circulating sintering process[J]. Iron and Steel，2020，55(2)：23－30.

[8] 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(1)：56－61.
REN W，GAO J，XU W Q 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(1)：56－61.

[9] 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 Y，MAO R，WANG F，et al. Numerical simulation of sintering flue gas circulation system[J]. Journal of Iron and Steel Research，2020，32(7)：675－681.

[10] 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 Z W，WANG Z C，WEN R Y，et al. Simulation research of sintering flue gas recirculation system[J]. Sintering and Pelletizing，2018，43(3)：63－68.

[11] 罗云飞，龙红明，赵利明，等. 烧结烟气循环热风罩内流动数值模拟及优化[J]. 工程科学学报，2021，44(11)：1852－1859.
LUO Y F，LONG H M，ZHAO L M，et al. Numerical simulation and optimization of the flow in the sintering flue gas circulating hot air hood[J]. Chinese Journal of Engineering，2021，44(11)：1852－1859.

[12] 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 S M，ZHOU H Y，ZHU R J，et al. Numerical simulation and structure optimization of sintering hot air circulating hood[J]. China Metallurgy，2022，32(3)：119－124.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net