烧结冷却机循环热风接入点优化模拟研究

王 双[1]，徐 冰[2]，陈 光[1]，包向军[1]，李晓丽[1]，张 璐[1]，胡 鹏[1]
(1. 安徽工业大学 能源与环境学院，安徽 马鞍山 243002；2. 马鞍山钢铁股份有限公司，安徽 马鞍山 243000)

摘要：某钢厂烧结带冷机的系统漏风率较严重、循环热风热量未充分利用，导致余热回收效率偏低。本文提出在加强系统密封的同时，对循环热风接入点进行优化，以充分利用循环热风热量；并对不同优化方案下烧结矿的冷却过程进行数值模拟计算。结果表明：将循环风机引回的 150 ℃热风供给烧结矿温度最高的 1# 风箱，同时将 1# 风箱原有鼓风机接在 2# 风箱原有循环热风接入点的方案，在余热回收方面取得的效果最为明显，可将吨矿余热回收热量从 428.65 MJ/t 提升至 506.12 MJ/t，提升幅度达到 18.08%，同时该方案可减小烧结矿换热初期温差，进而可提高烧结矿的成品率和冶金性能。本文研究结论可为烧结冷却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。

关键词：烧结矿；烧结冷却机；循环热风；数值模拟
中图分类号：TF046.4；TF32　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000－8764(2022)04－0083－09
doi：10.13403/j.sjqt.2022.04.058

Simulation research on optimization of circulating hot air access point of sintering cooler

WANG Shuang[1]，**XU Bing**[2]，**CHEN Guang**[1]，**BAO Xiangjun**[1]，**LI Xiaoli**[1]，**ZHANG Lu**[1]，**HU Peng**[1]
(1. *School of Energy and Environment*，*Anhui University of Technology*，*Ma'anshan* 243002，*Anhui*，*China*；
2. *Ma'anshan Iron & Steel Company Ltd.*，*Ma'anshan* 243000，*Anhui*，*China*)

Abstract：The system leakage rate of sintering belt cooler in a steel plant is serious and the heat of circulating hot air is not fully utilized，resulting in low efficiency of waste heat recovery. It is proposed to optimize the access point of circulating hot air while to strengthen the seal，and the numerical simulation of the cooling process of sinter under different optimization schemes is carried out. The results show that the solution of supplying the 150 ℃ hot air from the circulating fan to the 1# blast box with the highest sinter temperature and connecting the original blower of the 1# blast box to the original circulating hot air access point of the 2# blast box has the most obvious effect in waste heat recovery，which can increase the waste heat recovery from 428.65 MJ/t to 506.12 MJ/t with an increase of 18.08%，and the solution can reduce the temperature difference at the beginning of sinter heat exchange，which can improve the yield and metallurgical performance of sinter. The results can provide a basis for improving the waste heat recovery effect of circulating hot air in the blast box access method of sintering cooler.

Key words：sinter；sintering cooler；circulating hot air；numerical simulation

在长流程钢铁生产过程中，烧结工序消耗的能源占钢铁厂总能源消耗的 9%～12%，仅次于炼铁工序所消耗的能源。我国钢铁生产过程中，烧结能耗较先进国家的吨矿平均能耗约高 20 kg 标煤[1－3]，因此我国烧结工序仍具有很大的节能空间。烧结过程中节能措施可从烧结矿

收稿日期：2021－10－19；**修回日期**：2021－12－16
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2020YFB1711101)；冶金过程节能与污染物控制安徽省教育厅工程技术研究中心开放基金资助项目(GKF20－1)
作者简介：王 双(1991—)，男，工程师，从事炉窑热工系统节能方面的研究。
通信作者：陈 光(1963—)，男，教授，从事炉窑热工系统节能以及钢铁流程智能制造等方面的研究。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

余热回收、工艺优化、降低漏风率等多方面考虑，其中烧结矿余热回收方法的节能效果最好，该方法每吨产品可节能 0.55 GJ，回报周期约为 2.8 年[4]。在烧结生产过程中，烧结矿显热占烧结工序能耗约 45%，该部分热量在冷却机内通过鼓入空气进行冷却，冷却后热风的平均温度约为 250 ℃，根据热风温度的不同，可将整个冷却机划分为高、中和低温段，仅高温段(热风温度约 370 ℃)和中温段(热风温度约 290 ℃)产生的热风具有余热回收价值。冷却机带出的热风所含热量约占烧结能耗的 29%[1-3]，为充分利用该部分余热资源，通常在烧结冷却工艺后建设余热锅炉，将冷却机高、中温段产生的高温废气引入余热锅炉产生蒸汽用于发电[5-6]，经过余热锅炉换热后的废气温度约为 150 ℃，该部分余热废气可作为循环风送回冷却机，进一步提高冷却热风温度，提升余热发电水平。

为深入挖掘烧结矿冷却过程中的余热利用潜力，学者们多采用模拟仿真的方法对冷却机内冷却过程进行分析，通过采用 Fluent 等软件研究分析影响烧结矿冷却换热的主要因素及其影响规律[7-8]，进而找寻提高余热利用率的突破口。将经过余热锅炉后的低温烟气引回冷却机即为一种充分利用余热的方法，而在循环风接入冷却机时存在接入点位置选取和风箱配风不均匀的问题。针对风箱配风不均匀的问题，张效鹏等[9]通过在环冷机循环风机段增设导流装置，改善了各个风箱出口速度的均匀性。而循环热风在风箱上的接入点位置，工程应用中多按照经验设置，尚无深入研究。

通过对某钢厂烧结冷却工艺进行调研，发现其带式冷却机(简称“带冷机”)产生的热风温度以及余热发电系统的吨矿发电量均处于较低水平。针对该系统余热利用效率低的问题，本文通过分析该烧结带冷机的设备组成、工艺流程、余热回收烟道布置等发现，该系统循环热风接入点的位置存在问题，因此提出优化循环热风接入点的解决方案，可为其他相关问题提供改进思路。

1 烧结冷却机系统概况

某钢厂烧结冷却机为传统的带式冷却机，有效冷却长度为 96 m，有效冷却面积为 432 m^2，主要由 222 个台车(含托辊)、6 个矩形风箱(配套 6 台鼓风机)、烟罩、烟道、烟囱以及附属的余热锅炉及循环风机等部分组成，如图 1 所示。其中，沿台车运行方向对矩形风箱以及鼓风机进行编号(1#～6#)，每个矩形风箱分出 4 个风管对台车底部进行鼓风。带冷机顶部设有 5 个烟囱(0#～4#)，其中 0#烟囱热风并入 1#烟囱，与 2#烟囱热风一起进入余热锅炉，经余热锅炉换热后的低温废气经循环风机重新回

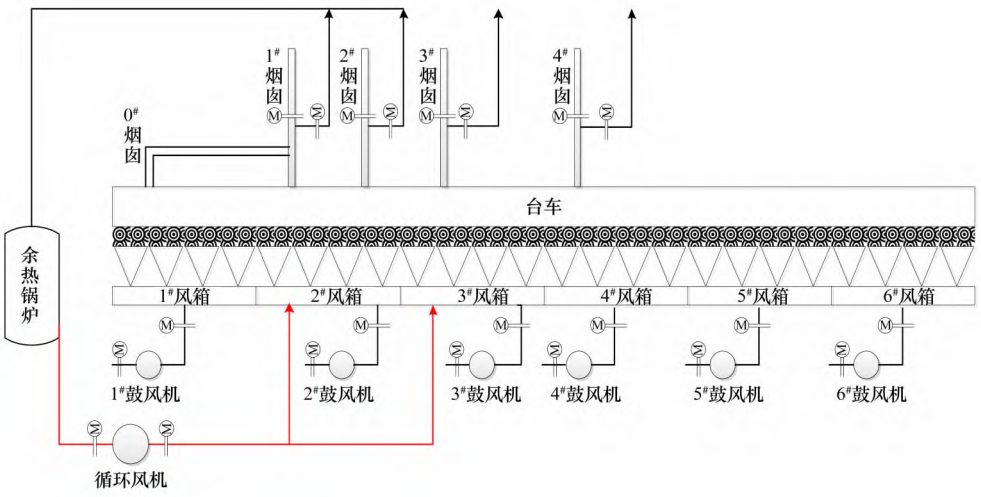


图 1 某钢厂烧结带冷机与结构示意

Fig. 1 Schematic diagram of sintering belt cooler and structure in a steel plant

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

到 2#、3#矩形风箱，进入台车进行换热。受环境温度影响，该带冷系统鼓风机在冬季仅开启 2 ~3 台，夏季开启 4 ~6 台，开启台数根据烧结矿冷却温度进行调控。

由于余热回收热量受热风温度和风量的影响，因此对该钢厂烧结冷却系统关键点的温度和风量进行测试计算。烧结带冷系统的温度与风量(以夏季开启 4 台鼓风机为例) 测试结果如表 1 所示。

表 1　某钢厂烧结带冷系统温度与风量测试参数

Table 1　Test parameters of temperature and air volume of sintering belt cooling system in a steel plant

温度测量点	温度值/℃	风量测量点	风量值/(kg·h^{-1})
1#烟囱入口	361. 48	1#鼓风机	1. 867 ×10^5
2#烟囱入口	296. 07	2#鼓风机	1. 936 ×10^5
3#烟囱入口	224. 70	3#鼓风机	1. 752 ×10^5
4#烟囱入口	181. 30	4#鼓风机	2. 505 ×10^5
锅炉废气入口	333. 67	鼓风机总风量	8. 060 ×10^5
锅炉废气出口	149. 60	循环风机风量	2. 201 ×10^5

上述温度测试结果一方面可为数值模拟计算边界条件的设置提供依据，另一方面可作为优化方案模拟结果的对照标准。冷却机系统风量平衡计算的内容分为两部分，一是冷却机系统进入的总风量，此部分包括循环风机 L_v 和鼓风机鼓入风量 L_g 之和，前者由锅炉热平衡得出，后者通过测试鼓入孔的气体流速计算获得; 二是冷却机系统出口风量，主要是烟囱排放，此部分分为废气回收量 L_v 和废气排散量 L_p，前者根据锅炉热平衡得出，后者经测试计算得出。

根据鼓入孔的气体流速计算鼓风机带入风量公式如下。

$$Q_g = c_p \cdot L_g \cdot \Delta t \tag{1}$$

式中: Q_g 为流体的热量，kJ/h; c_p 为流体标准状态下的平均比热，kJ/(℃ · Nm^3) ; L_g 为流体流量，Nm^3/h; Δt 为流体温度与环境温度的差值，℃。

以该方法计算得到 3#、4#烟囱外排风量合计约为 3. 190 ×10^5 kg/h，由此可得出整个带冷机系统的风量平衡如图 2 所示。

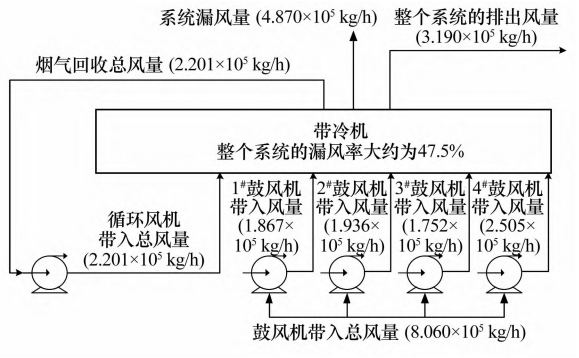


图 2　带冷机系统风量平衡

Fig. 2　Air volume balance diagram of system with cooler

经过系统风量平衡分析，发现该系统在余热回收方面存在以下几个问题: ① 系统密封设施老化，漏风严重，漏风率高达 47. 5%; ② 因漏风导致 3#风箱产生的废气温度不能达到回收要求，3#烟囱废气直接外排，未能有效利用; ③ 循环风机引回的 150 ℃左右热风接入点位于 2#和 3#风箱，但由于 3#烟囱废气直接外排，导致接入 3#风箱的循环热风热量直接浪费。针对该系统漏风问题，已采用新型密封装置进行改造，改造后的系统仍然存在循环热风热量利用不充分的问题，需进一步改进，故本文采用优化循环热风接入点的方案拟解决循环热风热量未充分利用的问题。

2　循环热风接入点优化方案及模型建立

2. 1　方案设计

根据现场测量所得到的实际情况，本文提出 7 种循环热风接入点的优化方案，以开启 4 台鼓风机为例，各接入方案具体情况描述和示意分别如表 3、图 3 所示。

2. 2　研究方法

本文采用 CFD 软件，通过建立和工业现场等比例的几何模型，建立质量、能量、动量守恒等方程，运用湍流模型、多孔介质非稳态热平衡模型进行求解[10 -12]，探究循环热风引入点的变化对烧结矿冷却过程的影响，通过分析烧结矿底、顶部温度和换热后热风温度的变化规

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3 循环热风接入方案汇总

Table 3 Summary of circulating hot air access schemes

方案编号	方案内容
方案 A(原方案)	在 1# ~4#鼓风机均开启的基础上,将循环风机引回的两股热风分别供给 2#、3#风箱的前端
方案 B_1	将循环风机引回的热风均供给烧结矿温度最高的 1#风箱,同时撤去 1#风箱原有的鼓风机
方案 B_2	在方案 B_1 的基础上,从风量平衡的角度,将 1#风箱原有鼓风机接在 2#风箱撤去循环热风的位置
方案 B_3	在方案 B_1 的基础上,将 1#风箱原有鼓风机接在 3#风箱撤去循环热风的位置
方案 C	从 3#风箱循环热风热量未充分利用角度考虑,将原有接在 3#风箱的循环热风接在 1#风箱的前端
方案 D	在方案 C 的基础上,将 1#、2#风箱的冷热风接入位置进行交换
方案 E_1	将循环风机引回的热风均供给 2#风箱,同时撤去 2#风箱原有的鼓风机
方案 E_2	在方案 E_1 基础上将撤去的 2#鼓风机接在 3#风箱撤去循环热风的位置

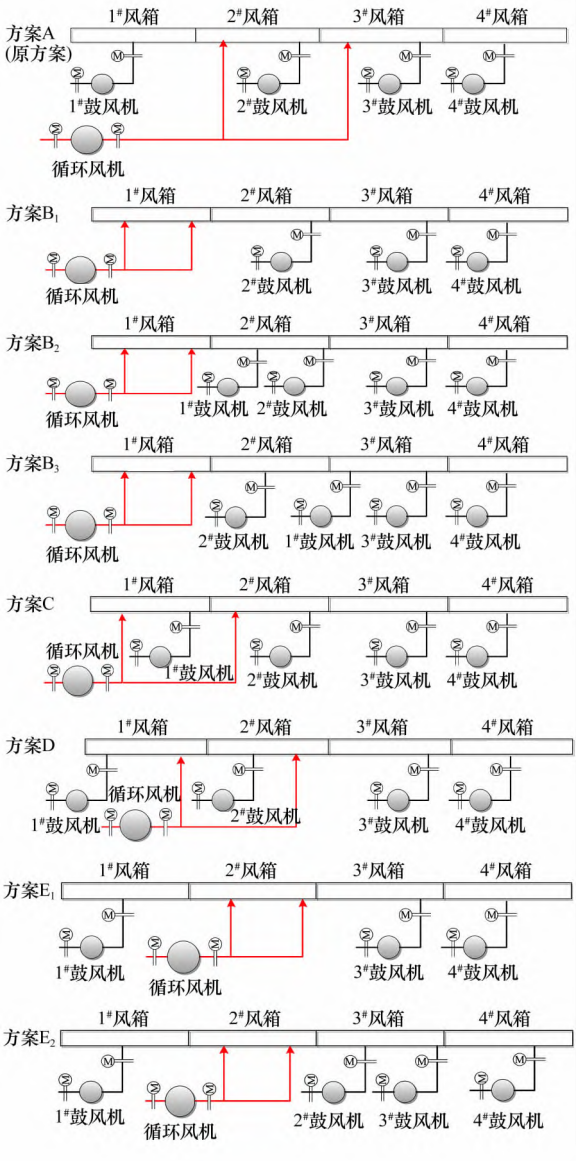


图 3 不同循环热风接入方案示意

Fig. 3 Schematic diagram of different circulating hot air access schemes

律，以及不同方案下的余热回收热量，对提出的不同循环热风接入点方案进行分析讨论。

2.3 模型建立与参数设置

为了节约计算资源，仅对单个烧结台车及下部梯形风箱建立模型，通过改变不同的进出口边界条件，同时根据台车运行速度设置台车经过每个风箱的时间步长，来模拟整个台车运行过程中的冷却流程。

首先建立与现场的台车及风箱同尺寸的几何模型，如图 4(a) 所示，模型上部为4 010 mm × 2 096 mm × 1 300 mm 规则的矩形台车。为了更清楚地探究出口烟气的流态，在高度方向又增加 800 mm。台车下部为梯形风箱，空气入口尺寸为 812 mm × 1 012 mm，下部清料口尺寸为 600 mm × 600 mm。网格划分如图 4(b) 所示，几何模型上部为规则的矩形，网格为六面体网格，下部为不规则图形，采用四面体网格，网格数量为 201 744，网格质量为 0. 84，正交质量为 0. 86。

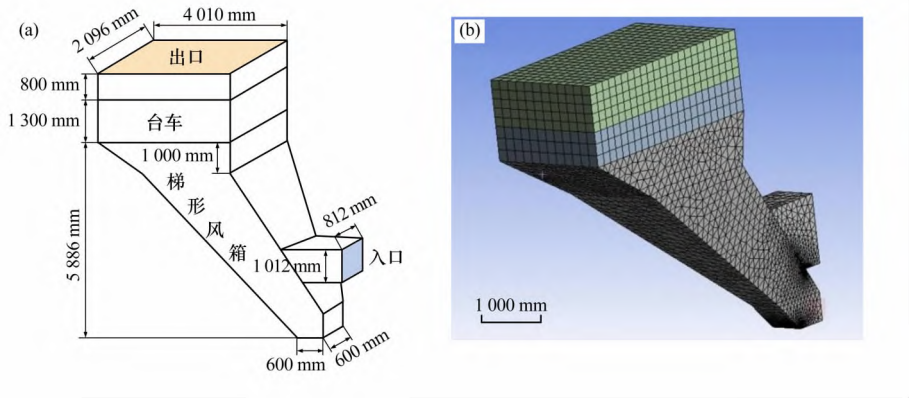
模拟过程中模型出入口均采用压力边界条件，入口根据现场测试结果，制定台车运行至不同位置的入口条件参数，如表 4 所示。出口压力设置为 0 Pa。台车运行速度为 1. 97 m/min，单个矩形风箱长度为 12 m，则经过每个风箱的时间设置为 366 s。

3 结果与讨论

3.1 冷却风箱静态结果分析与模型验证

烧结矿冷却风箱中静态模拟计算结果如图 5

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)　几何模型；(b)　网格划分

图 4　台车梯形风箱几何模型与网格划分

Fig. 4　Geometric model and grid division of trolley trapezoidal bellow

表 4　梯形风箱的入口条件参数

Table 4　Inlet condition parameters of trapezoidal bellow

矩形风箱编号	对应位置	参数	数值
1#	前端	入口全压/Pa	1 789. 5
		入口温度/℃	37. 9
	后端	入口全压/Pa	1 789. 5
		入口温度/℃	36. 7
2#	前端	入口全压/Pa	3 161. 4
		入口温度/℃	92. 1
	后端	入口全压/Pa	3 161. 4
		入口温度/℃	52. 4
3#	前端	入口全压/Pa	3 071. 2
		入口温度/℃	144. 6
	后端	入口全压/Pa	3 071. 2
		入口温度/℃	50. 9
4#	前端	入口全压/Pa	1 300. 2
		入口温度/℃	39. 0
	后端	入口全压/Pa	1 538. 8
		入口温度/℃	40. 0

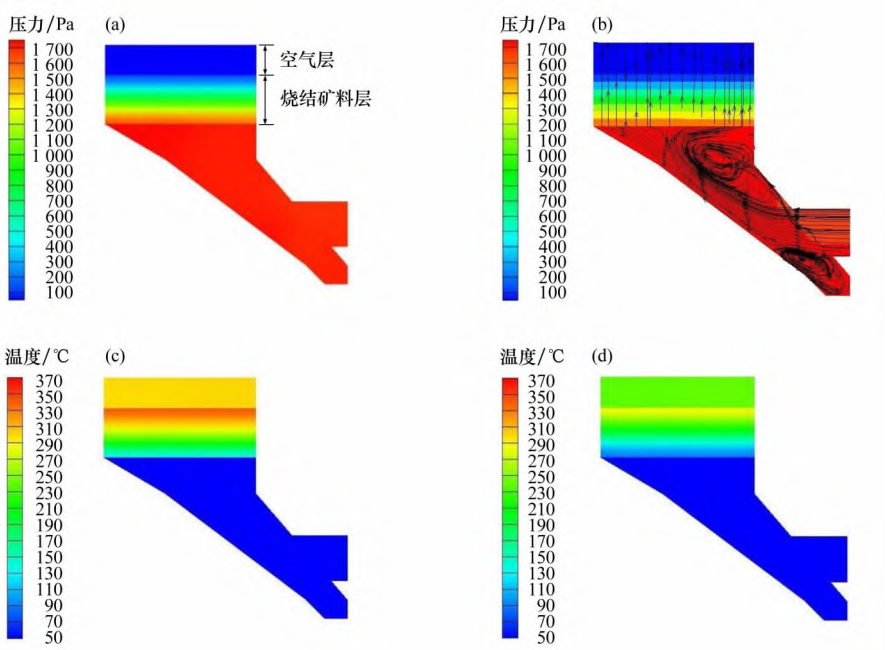
所示。由图 5 可知：入口压力为 1 789. 51 Pa，温度为 37. 9 ℃。

烧结矿料层及风箱的压力分布如图 5(a) 所示，由于入口局部阻力损失的影响，流体进入风箱内部后压力值减小，流体穿过致密多孔介质后阻力损失，压力进一步降低。为冷却风箱流场迹线分布如图 5(b) 所示。由图 5(b) 可知，在冷却风箱中存在两个明显的旋涡。流体进入风箱后在下部下料口处形成一个涡流，此处有一定的能量损失，但对流体运动影响不大。流体在风箱拐弯处形成第二个涡流，该涡流对整个流场产生了扰动，导致台车下部风箱内的流场不均匀。烧结矿冷却 10 min 时烧结矿料层温度分布图 5(c) 所示。由图 5(c) 可见：此时烧结矿料温已有明显分层，其中下部温度约为 230 ℃，该部分约占整个料层厚度的三分之一；中间温度约为 287 ℃，厚度约占整个料层厚度的十分之一；上部温度约为 347 ℃，约占整个料层厚度的五分之一；空气层温度约为 286 ℃，未出现分层的现象。冷却 30 min 时烧结矿的料层温度分布如图 5(d) 所示。由图 5(d) 可知：料层最下部温度已降低至 86. 8 ℃左右，大约占整个料层厚度的五分之一；中间料层温度为 230 ℃左右，大约占整个料层厚度的三分之二；上部温度在 287 ℃左右，大约占整个料层厚度的十分之一。

为了验证模拟的准确性，将烧结矿冷却过程的模拟结果和工业现场对应位置的烟气温度进行对比，即将模拟模型的烟气出口温度和现场烧结冷却机烟罩处实测的温度进行对比校验，结果如图 6 所示。

由图 6 可知：模拟的烟气出口温度与现场测得的烟气温度误差集中在 5% 以内，只有第 5 个测点误差较大，超过该范围。分析原因认为，该测点对应的风箱发生了堵塞，故烟气温度偏低，导致测试数据异常。因此可以得出建立的模型能够反应现场实际生产的运行工况，可进一步展开后续模拟探究。

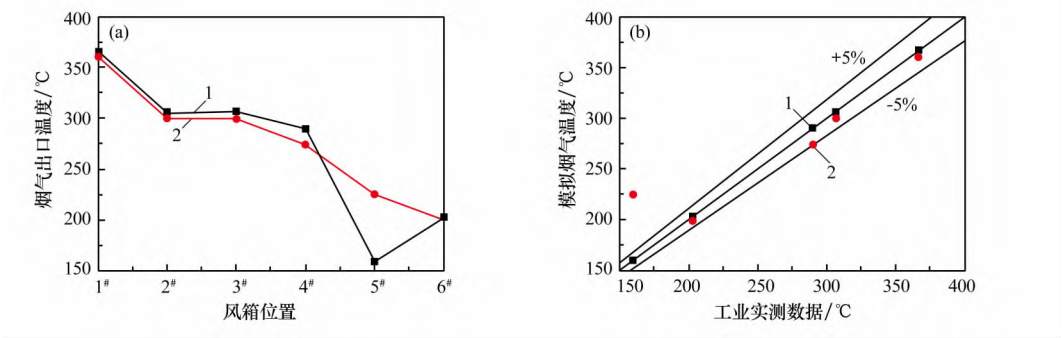
(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a) 冷却风箱压力分布；(b) 冷却风箱流场迹线分布；(c) 冷却 10 min 后烧结矿温度分布；(d) 冷却 30 min 后烧结矿温度分布

图 5 烧结矿冷却风箱静态模拟结果

Fig. 5 Static simulation results of sinter cooling bellows



(a) 结果对比；(b) 误差分析

1—工业实测数据；2—模拟烟气温度。

图 6 模拟结果与现场烟气温度对比及误差分析

Fig. 6 Comparison and error analysis between simulation results and on-site flue gas temperature

3.2 不同循环热风接入点模拟结果分析

通过改变循环热风接入点的位置，改变风箱的供风流量以及供风温度，进而影响烧结矿的冷却过程和余热回收量。不同模拟方案下的风箱风量如表 5 所示。由表 5 可知：各风箱风量随循环热风接入点的改变而变化。以方案 B_1 为例，当 2#风箱和 3#风箱的循环热风集中供给 1#风箱时，1#风箱的压力和流量随之增加，2#风箱和 3#风箱的压力和流量随之下降。其他几种方案各风箱流量也随着循环热风接入点以及鼓风机接入点的调整而发生变化，该变化对烧结冷却系统余热回收量的大小有直接影响。

不同循环热风接入点方案的计算结果如图 7 所示。将优化方案与现有方案对比发现，通过改变循环热风的不同接入点位置，烧结矿下部温度均有所提高，但不同方案下烟气温度和烧结矿上部温度变化有所差异。

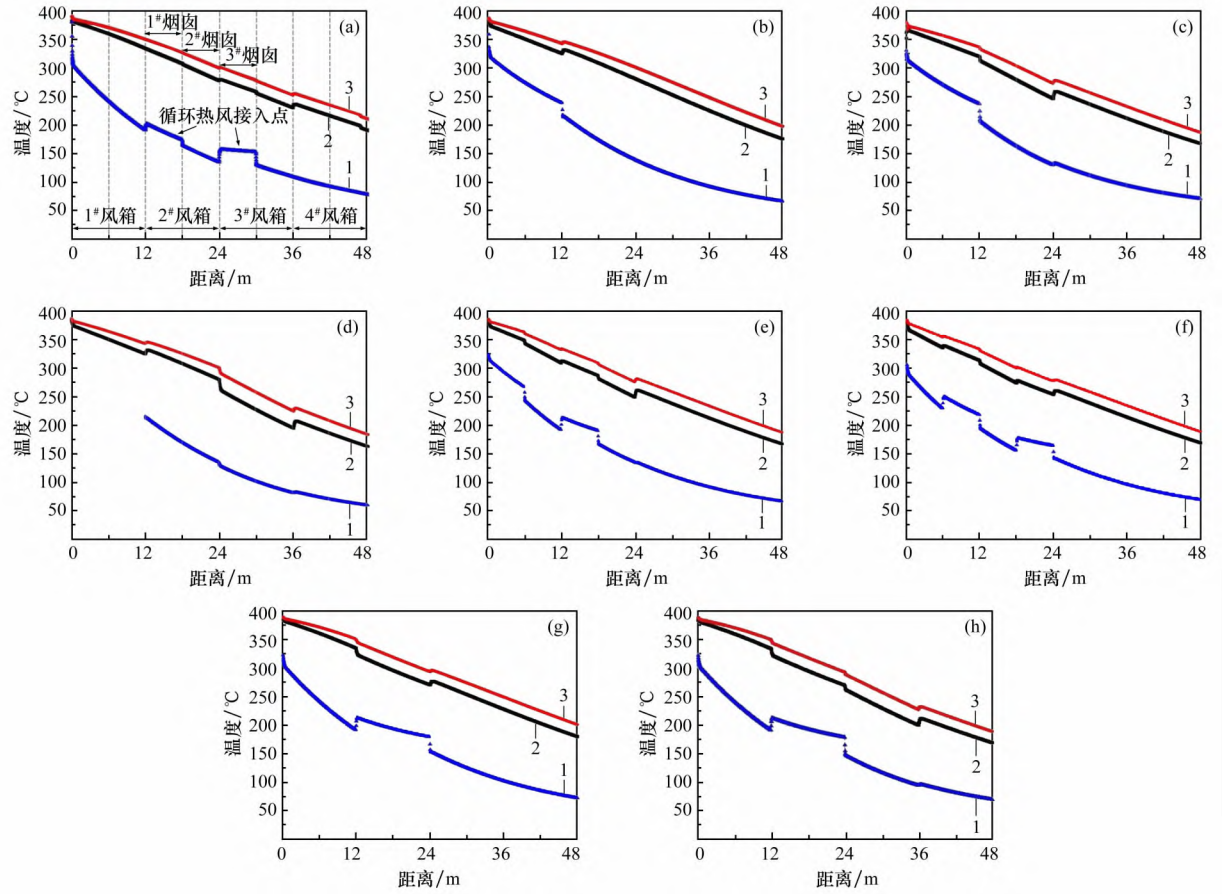
各方案烟气出口温度变化如图 8 所示。由图 8 可知：以烟气出口温度达到可回收烟气温度 300 ℃为准，在原有方案 A 基础上台车运行距离得以延长(即可回收利用烟气对应的风箱长度增加，进而增加烟气回收量) 的方案 B_1、方

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 5　不同循环热风接入点方案下风箱流量

Table 5　Bellows' flow under different schemes of circulating hot air access points　　**kg/h**

方案编号	1#风箱	2#风箱	3#风箱	4#风箱
方案 A	1.942×10^5	2.590×10^5	2.551×10^5	1.948×10^5
方案 B_1	2.563×10^5	1.948×10^5	1.948×10^5	1.948×10^5
方案 B_2	2.563×10^5	2.563×10^5	1.948×10^5	1.948×10^5
方案 B_3	2.563×10^5	1.948×10^5	2.563×10^5	1.948×10^5
方案 C	2.563×10^5	2.563×10^5	1.948×10^5	1.948×10^5
方案 D	2.563×10^5	2.563×10^5	1.948×10^5	1.948×10^5
方案 E_1	1.948×10^5	2.563×10^5	1.948×10^5	1.948×10^5
方案 E_2	2.563×10^5	2.563×10^5	1.948×10^5	1.948×10^5



(a)　方案 A(原方案)；(b)　方案 B_1；(c)　方案 B_2；(d)　方案 B_3；(e)　方案 C；(f)　方案 D；(g)　方案 E_1；(h)　方案 E_2

温度曲线：1—烧结矿底部供风；2—出口烟气（气体穿过烧结矿料层后的温度）；3—烧结矿顶部料面。

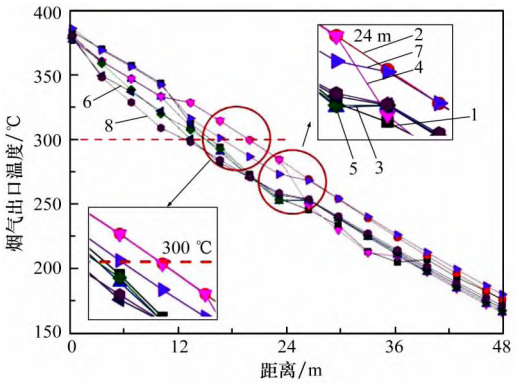
图 7　不同循环热风接入方案计算结果

Fig. 7　Calculation results of different circulating hot air access schemes

(注：横坐标为台车运行距离，每 12 m 对应 1 个风箱位置，0～12 m 对应 0#烟囱，12～18 m 对应 1#烟囱，18～24 m 对应 2#烟囱，24～30 m 对应 3#烟囱)

案 B_2 和方案 B_3，其他方案均有所减少；以 2# 烟囱对应的 24 m 距离为准，当台车运行至该位置时，各方案烟气出口温度相较于原方案 A 均有不同程度的提高。分析原因认为，原方案中接入 3#风箱的循环热风热量未充分利用，而各优化方案将循环热风的接入点均放置在 1#或 2#风箱，最大程度上实现了循环热风热量的回收利用，不同优化方案实现的余热回收效果也有所差异。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



1—方案 A(原方案)；2—方案 B_1；3—方案 B_2；4—方案 B_3；5—方案 C；6—方案 D；7—方案 E_1；8—方案 E_2。

图 8 不同方案下烟气出口温度变化曲线

Fig. 8 Temperature change curve of flue gas outlet under different schemes

3.3 不同循环热风接入点余热回收分析

为了进一步分析循环热风接入点的不同对余热回收产生的影响，通过计算达到余热回收烟气标准温度下，每吨烧结矿(简称“吨矿”)回收烟气热量大小来反映各方案的优劣。不同方案下 1#和 2#风箱中可回收烟气参数如表 6 所示。由表 6 可知，原方案 A 对应 1#风箱平均温度为 360 ℃，可回收风量为 1.942×10^5 kg/h，2#风箱平均温度为 348.5 ℃，可回收烟气流量为 6.47×10^4 kg/h，综合可回收热量为 426.4 GJ/h。经优化循环热风接入点后，各方案可回收热量较之原方案 A 均有所提高，其中方案 B_2 提升幅度最大。方案 B_2 中虽然 1#和 2#风箱的平均温度较之方案 A 有所降低，但该方案 1#风箱的可回收烟气流量较之方案 A 有明显增加，增长幅度高达 31.98%，最终该方案的可回收热量为 503.5 GJ/h，较之方案 A 提升 18.08%。其他方案相比于原方案均因为可回收烟气流量的变化而不同程度地提高了系统的可回收热量。

表 6 不同方案下可回收烟气参数(模拟值)

Table 6 Parameters of recoverable flue gas under different schemes(simulated values)

方案编号	1#风箱			2#风箱			可回收热量/(GJ·h^{-1})
	可回收烟气流量/(kg·h^{-1})	平均温度/℃	烟气焓值/(kJ·kg^{-1})	可回收烟气流量/(kg·h^{-1})	平均温度/℃	烟气焓值/(kJ·kg^{-1})	
方案 A	1.942×10^5	360.0	1 660.3	6.47×10^4	348.5	1 605.8	426.4
方案 B_1	2.563×10^5	350.1	1 613.4	3.25×10^4	329.0	1 512.9	462.7
方案 B_2	2.563×10^5	349.5	1 610.2	6.41×10^4	308.5	1 415.9	503.5
方案 B_3	2.563×10^5	350.1	1 613.4	3.25×10^4	329.0	1 513.0	462.7
方案 C	2.563×10^5	343.2	1 580.4	6.41×10^4	306.5	1 406.1	495.2
方案 D	2.563×10^5	339.3	1 562.1	3.20×10^4	303.8	1 393.5	445.1
方案 E_1	1.948×10^5	358.7	1 654.1	10.25×10^4	311.5	1 430.2	468.9
方案 E_2	2.563×10^5	332.7	1 530.6	2.56×10^4	300.7	1 379.0	427.7

为分析不同优化方案对吨矿可回收热量的影响，在考虑烧结冷却机漏风率的基础上，增加产品产量，对比分析不同方案对吨矿回收热量的影响，结果如表 7 所示。由表 7 可知，方案 B_2 的提升幅度最大，增长率为 18.08%，吨矿回收热量由从原方案 A 的 428.65 MJ/t 提升至 506.12 MJ/t。方案 C 也表现出较高的优越性，提升幅度为 16.13%。

通过优化烧结带冷机的循环热风接入点，不仅能提高系统的余热回收效果，而且循环热风前移能够提高烧结矿初始冷却温度，减小温差，降低高温段烧结矿的冷却速度，提升烧结矿质量。根据现场生产数据，经过优化后烧结矿转鼓强度提升 1.74%。该结论与其他学者的研究结果相符，潘鹤等[13]通过分析宝钢 20 a 的生产记录，并采用不同冷却制度开展烧结矿冷却实验，结果表明，采用保温冷却方式(即烧结矿保持在较高温度水平)时，烧结矿的成品率、转鼓强度等冶金性能均处于较高水平。侯向东[14]在分析影响烧结矿强度的因素时也提出，通过减缓烧结过程烧结矿的冷却速度，可消除或减少烧结矿的内应力与玻璃质，进而提高烧

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 7　不同方案下吨矿回收热量对比

Table 7　Comparison of recovered heat per ton of sinter under different schemes

方案种类	考虑漏风率后可回收热量/(GJ·h^{-1})	烧结矿产量/(t·h^{-1})	吨矿回收热量/(MJ·t^{-1})	增长率/%
方案 A	202.6	472.5	428.65	—
方案 B_1	219.8	472.5	465.10	8.50
方案 B_2	239.2	472.5	506.12	18.08
方案 B_3	219.8	472.5	465.11	8.50
方案 C	235.2	472.5	497.79	16.13
方案 D	211.4	472.5	447.39	4.37
方案 E_1	222.7	472.5	471.32	9.95
方案 E_2	203.1	472.5	429.91	0.29

结矿质量与性能。

综上可知，改变循环热风接入点(即循环热风接入点向前移动)能够提高烧结矿余热回收量，提升系统余热回收效率，同时还能提高烧结矿品质，因此本文的研究成果对工程应用具有一定的指导意义。

4　结　论

(1) 不同循环热风接入方式的计算结果表明，不同的循环热风接入点优化方案下，烧结矿下部温度均有所提高，但烟气出口温度和烧结矿上部温度的变化有所差异。在采用的循环热风接入点优化方案中，方案 B_2 的效果最好，该方案将循环风机引回的 150 ℃热风均供给烧结矿温度最高的 1#风箱，同时将 1#风箱原有鼓风机接入 2#风箱原有循环热风接入点。方案 B_2 将烧结冷却过程吨矿余热回收热量从原方案的 428.65 MJ/t 提升至 506.12 MJ/t，提升幅度达到 18.08%，在余热回收方面取得的效果最为明显。

(2) 将循环热风集中供应在 1#风箱，提高了烧结矿初始冷却温度，减小了冷却温差，进而降低了冷却速度，该过程对烧结矿的成品率以及转鼓强度等冶金性能可产生有利影响，根据现场生产数据，经过优化后烧结矿转鼓强度提升 1.74%。

参考文献:

[1] 陈志良，曹先常. 烧结低温冷却废气余热多级利用技术探讨[J]. 冶金能源，2017，36(1)：41－44.
CHEN Z L，CAO X C. Study on low temperature waste heat utilization technology for sinter cooling gas[J]. Energy for Metallurgical Industry，2017，36(1)：41－44.

[2] 伏启让，石国庆. 烧结环冷机余热回收工程实践[J]. 烧结球团，2019，44(4)：74－78.
FU Q R，SHI G Q. Engineering practice of waste heat recovery of circular cooler for sintering machine[J]. Sintering and Pelletizing，2019，44(4)：74－78.

[3] 吴洪勋，于连涛. 2×500 m^2 烧结系统余热回收技术的应用[J]. 山东冶金，2020，42(2)：49－50.
WU H X，YU L T. Adhibition of waste heat recovery utilization technology of 2×500 m^2 [J]. Shandong Metallurgy，2020，42(2)：49－50.

[4] 何坤. 冶金系统能源调控与流程配置优化的节能增效潜力研究[D]. 北京：北京科技大学，2019.
HE K. Research on energy saving and efficiency increasing potential of energy regulation and process optimization in metallurgical system[D]. Beijing：University of Science and Technology Beijing，2019.

[5] 王为术，徐维晖，董英斌. 烧结冷却废气余热回收循环系统设计[J]. 华北水利水电学院学报，2009，30(6)：67－70.
WANG W S，XU W H，DONG Y B. Design on the cycle system of waste heat recovery of flue gas from sinter straight cooler[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power，2009，30(6)：67－70.

[6] 苏相成. 凌钢 320 m^2 烧结环冷机余热回收节能分析[J]. 冶金能源，2021，40(2)：48－50.
SU X C. Energy saving analysis of waste heat recovery of sintering ring coolers on 320 m^2 in Lingyuan steel[J]. Energy for Metallurgical Industry，2021，40(2)：48－50.

(下转第 98 页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

SONG Yue. Study on the oxidation of semi-dried desulfurization ash and its applications[D]. Ma'anshan: Anhui university of technology,2019:4-5.

[24] 周臣,张子昕,谭文轶. 湿法脱硫工艺中 $MnSO_4$ 对 $CaSO_3$ 氧化与溶解速率的控制研究[J]. 环境工程,2017,35(7):106-109;80.

ZHOU Chen,ZHANG Zixin,TAN Wenyi. Study on oxidation rate of $CaSO_3$ with the catalyst of $MnSO_4$ in the process of wfgd[J]. Environmental Engineering,2017,35(7):106-109;80.

(上接第76页)

[10] 梅光军,余军,葛英勇,等. 降低包头铁精矿钾、钠含量的浮选试验研究[J]. 金属矿山,2006(2):31-35.

MEI Guangjun,YU Jun,GE Yingyong,et al. Reducing Na_2O and K_2O contents in baotou iron concentrate by flotation [J]. Metal Mine,2006(2):31-35.

[11] 梅光军,余军,葛英勇,等. 氟硅酸铵在赤铁矿与含铁硅酸盐浮选分离中的选择性抑制作用[J]. 矿冶工程,2005,25(4):24-26;29.

MEI Guangjun,YU Jun,GE Yingyong,et al. Selective depressive action of ammonium hexafluorosilicate in flotation separation of hematite and iron-containing silicate[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2005,25(4):24-26;29.

(上接第91页)

[7] 张晟,董辉. 环冷机内气固传热过程仿真及优化[C]//第十一届中国钢铁年会论文集. 北京:中国金属学会,2017:73-78.

ZHANG S,DONG H. Simulation and optimization of gas-solid heat transfer in sinter annular cooler[C]//Proceedings of the 11th China Iron and steel annual conference. Beijing: The Chinese Society for Metals,2017:73-78.

[8] 张小辉,张家元,戴传德,等. 烧结矿冷却过程数值仿真与优化[J]. 化工学报,2011,62(11):3081-3087.

ZHANG X H,ZHANG J Y,DAI C D,et al. Optimization and simulation of sinter cooling process[J]. CIESC Journal,2011,62(11):3081-3087.

[9] 张效鹏,周继良,潘文,等. 首钢京唐烧结 580 m^2 环冷机风量优化研究[C]//第十届全国能源与热工学术年会论文集. 杭州:中国金属学会,2019:300-309.

ZHANG X P,ZHOU J L,PAN W,et al. Study on air flow optimization of 580 m^2 circular cooler in jingtang sintering plant of shougang[C]//Proceedings of the 10th National Annual Conference on energy and thermal engineering. Hangzhou: The Chinese Society for Metals,2019:300-309.

[10] 陶文铨. 数值传热学(第2版)[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.

TAO W Q. Numerical Heat Transfer(Second Edition)[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press,2001.

[11] 唐家鹏. Ansys fluent 16.0 超级学习手册[M]. 北京:人民邮电出版社,2016.

TANG J P. Ansys fluent 16.0 Super learning manual[M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press,2016.

[12] 果晶晶,陈健,王书桓. 烧结矿余热罐内温度场的数值模拟研究[J]. 烧结球团,2019,44(3):64-67;72.

GUO J J,CHEN J,WANG S H. Study on numerical simulation of temperature field in waste heat tank of sinter[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(3):64-67;72.

[13] 潘鹤,金永龙,马洛文,等. 冷却制度对烧结矿性能的影响[J]. 钢铁,2007,42(11):5-8.

PAN H,JIN Y L,MA L W,et al. Study of influence of cooling conditions on properties of sinters[J]. Iron and Steel,2007,42(11):5-8.

[14] 侯向东. 影响烧结矿强度的因素及对策[J]. 科技情报开发与经济,2002(2):67-68.

HOU X D. Factors influencing the strength of agglomerate and countermeasures[J]. Sci/Tech Information Development & Economy,2002(2):67-68.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net