

# 链算机回转窑球团热废气循环工艺及数值模拟研究

何璐瑶<sup>1</sup>, 王 鑫<sup>2\*</sup>, 胡 兵<sup>1,3</sup>, 甘 敏<sup>2</sup>, 朱 亮<sup>2</sup>, 魏进超<sup>1,3</sup>, 代友训<sup>1</sup>

(1. 中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南 长沙 410205; 2. 中南大学资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083;  
3. 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:** 针对链算机回转窑环冷机生产过程中废气外排量、余热利用率低的问题, 在原有废气循环的基础上, 提出了一种将过渡预热段的热废气循环到环冷机二段的废气循环工艺, 并对新模式下的球团冷却过程进行模拟仿真研究。基于计算流体力学理论基础, 结合局部非热力学平衡理论和磁铁矿氧化反应模型, 采用 CFD 软件建立了数值仿真模型, 揭示了废气循环对球团冷却的影响规律。研究表明, 采用新的烟气循环系统之后, 冷却二段的废气温度从 511 ℃ 提高到 523 ℃, 提高了热利用效率。采用该废气循环模式, 可减少废气排放 11.5%, 循环回收热量占球团生产热量总支出的 3.45%。为球团生产进一步节能减排提供了新的方向, 对于球团清洁生产具有重要意义。

**关键词:** 球团; 链算机-回转窑-环冷机; 废气循环; 数值模拟; 节能减排

中图分类号: TF046, X756 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2021)04-0085-07

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.04.015

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音  
与作者  
聊科研

## Recirculating process of pellet exhaust gas from grate-kiln and numerical simulation

He Luyao<sup>1</sup>, Wang Xin<sup>2\*</sup>, Hu Bing<sup>1,3</sup>, Gan Min<sup>2</sup>, Zhu Liang<sup>2</sup>, Wei Jinchao<sup>1,3</sup>, Dai Youxun<sup>1</sup>

(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China; 2. School of Minerals Processing & Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 3. National Engineering Research Center of Sintering and Pelletizing Equipment System, Changsha 410205, Hunan, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of large exhaust gas discharge and low waste heat utilization rate of the grate-kiln ring cooler, a waste gas cycle technology that recycles the hot waste gas from the transitional preheating section to the second section of the circular cooling machine, was proposed. Then the pellet cooling process after using the waste gas cycle was simulated and studied. Based on the theory of computational fluid dynamics and combined with the local non-thermodynamic equilibrium theory and the magnetite oxidation reaction model, a numerical simulation model was established by CFD software to reveal the influence of exhaust gas cycle on pellet cooling. The results show that the exhaust gas temperature of the second cooling stage increases from 511 ℃ to 523 ℃ after adapting the flue gas circulation system, improving the heat utilization efficiency. The exhaust gas emission can be reduced by 11.5%, and the energy occupying 3.45% of the total heat expenditure for pellet production can be recovered. This study provides a new direction for further energy saving and emission reduction in pellet production, which is of great significance for pellet cleaner production.

收稿日期: 2020-12-11

基金项目: 湖南省自然科学基金(2019JJ51007)资助项目。

作者简介: 何璐瑶(1983-), 硕士研究生, 主要从事烧结球团领域专利情报分析工作, E-mail: heluyao@cie-cn.com; \* 通讯

作者: 王鑫(1996-), 硕士研究生, 主要从事冶金过程数值模拟的研究, E-mail: xingxiang@csu.edu.cn。

**Key words:** pellet, grate-kiln ring cooler, exhaust gas circulation, numerical simulation, energy saving

## 0 引言

钢铁工业是一个高耗能、高污染的行业。随着国家环保要求的日益严格,对钢企的能源消耗以及污染排放都提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。球团生产作为炼铁炉料加工的重要组成部分,占到了高炉入炉原料的 13%,其中 70% 以上由链算机-回转窑-环冷机工艺生产。因此,降低链算机-回转窑-环冷机生产过程的能源消耗和污染物排放,对钢铁企业的绿色发展具有重要意义。

链算机-回转窑-环冷机球团生产中废气量大,排放的烟气中含  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ 、 $\text{CO}_x$ 、粉尘等成分,同时外排废气具有一定的温度,倘若能够把这部分废气中的热量利用起来,对链算机-回转窑-环冷机低能耗生产有很大帮助。目前,链算机-回转窑-环冷机工艺的风流系统中,本身就存在一定的内部循环,以常见的链算机-回转窑生产线(三段冷却)为例,环冷一、二、三段烟气分别循环到回转窑、链算机预热过渡段和鼓风干燥段,回转窑尾部的热风进入链算机预热段,预热段热风循环到抽风干燥段<sup>[2-5]</sup>。但干燥段和预热过渡段的废气没有被循环利用,每生产 1 t 球团矿预热过渡段带走的热量占外排废气的 60% 以上,同时每吨球团的废气排放量高达 1 500  $\text{m}^3$  以上。

本研究创新性地提出在原有循环的基础上,将预热过渡段的污染物含量低的风箱的烟气循环到环冷二段上,以提高热量的利用效率,减少废气的外排量。此种循环方式,无须改变现有的工艺流程,也不

需要增加大型设备,可以大幅降低设备投资及运行费用,对球团低能耗清洁高效生产具有重要意义。但废气的进一步循环,会改变球团的冷却过程,因此需要研究废气循环对环冷机球团温度分布的影响。笔者以局部非热力学平衡理论和计算流体力学理论为基础,结合磁铁矿氧化反应动力学模型,建立了数值模拟模型,在模型的基础上以节能减排为目标,研究了废气循环对球团生产的影响及废气循环的节能减排效果。

## 1 仿真模型

### 1.1 废气循环模式

链算机主要包括四个功能段,分别为鼓风干燥段(UDD)、抽风干燥段(DDD)、预热过渡段(TPH)、预热段(PH),外排废气主要来自 UDD 段、DDD 段和 TPH 段排放的废气。因 DDD 段和 TPH 段废气中污染物含量高,需要净化达标后才能向外排放,因此减少 DDD 段或 TPH 段的废气量,可以减少废气和污染物的排放,降低废气净化的成本。

由于 DDD 段的废气温度一般低于 100  $^{\circ}\text{C}$ ,其循环利用的价值低,而 TPH 段的废气温度相对较高,大于 150  $^{\circ}\text{C}$ ,是潜在可循环利用的废气。TPH 段的废气组成见表 1。由于 6<sup>#</sup>风箱靠近 DDD 段,部分 DDD 段的废气易串风到 6<sup>#</sup>风箱,导致 6<sup>#</sup>风箱的  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$  等污染物浓度较高,而 8<sup>#</sup>风箱靠近 PH 段,同样由于易串风导致 8<sup>#</sup>风箱的污染物浓度也较高。相对而言,TPH 段中间位置 7<sup>#</sup>风箱废气中的污染物浓度较低、氧气含量较高,适合循环利用。

表 1 TPH 段风箱废气组成  
Table 1 Composition of bellows waste gas in TPH section

| 风箱号            | $\text{O}_2/\%$ | $\text{NO}\times 10^6$ | $\text{SO}_2\times 10^6$ | $\text{CO}_2/\%$ | 温度/ $^{\circ}\text{C}$ |
|----------------|-----------------|------------------------|--------------------------|------------------|------------------------|
| 6 <sup>#</sup> | 19.25           | 116                    | 132                      | 0.7              | 154                    |
| 7 <sup>#</sup> | 19.85           | 70                     | 65                       | 0.5              | 170                    |
| 8 <sup>#</sup> | 17.22           | 268                    | 295                      | 1.7              | 215                    |

构建的烟气循环系统如图 1 所示。从链算机 TPH 段 7<sup>#</sup>风箱引出的废气与空气混合后,进入环冷机二段。进入环冷机二段的气体在球团冷却过程中被加热,温度升高后导回 TPH 段为球团的升温提供能量。本烟气循环系统的关键在于环冷二段冷却气

体由空气变为热废气与空气的混合气体,冷却气体介质的变化可能会影响球团冷却过程的正常运行,因此建立了环冷机冷却仿真模型,对废气循环过程球团料层温度场进行仿真模拟,以揭示废气循环对球团冷却的影响规律。

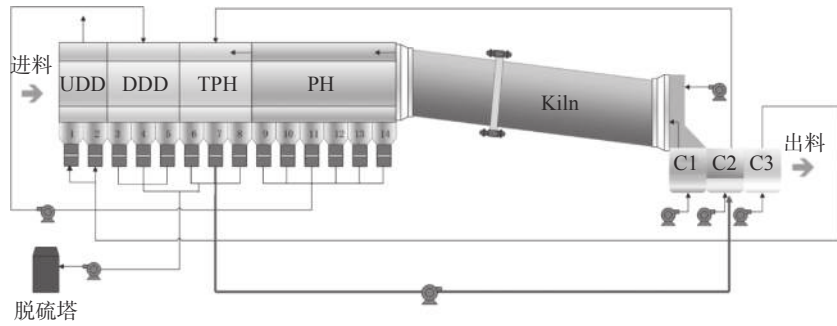


图1 链算机-回转窑-环冷机过程示意

Fig. 1 Process diagram of grate-kiln ring cooler

## 1.2 物理模型

选取环冷机一节台车为研究单位, 模拟环冷机在运行过程中的温度场变化<sup>[6]</sup>。环冷机总冷却面积 68 m<sup>2</sup>, 运行一周时间为 2 700 s, 一节台车宽度为 2.2 m, 长 1.5 m。环冷机物理模型如图 2 所示, 图中下方黄色区域为球团矿区域, 料高 0.76 m, 上方网格区域为空气域。

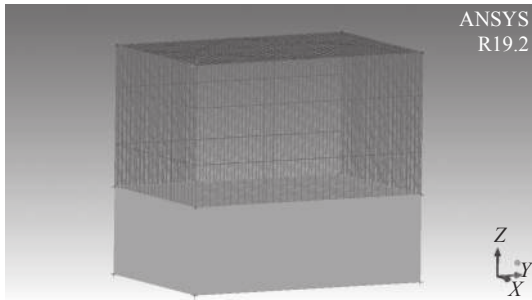


图2 环冷机台车几何模型

Fig. 2 Geometric model of circular cooler car

环冷机内部的传热传质非常复杂, 为了简化台车内部的流体流动和传热过程, 做了如下假设:

- 1) 环冷机运行稳定, 台车的参数不随时间变化;
- 2) 球团矿的结构不随时间和温度变化;
- 3) 台车壁面与外界换热很小, 忽略不计;
- 4) 气体为不可压缩气体, 球团矿为多孔介质;
- 5) 从 TPH 段导入的热烟气与冷空气完全混匀后进入球团料层;

- 6) 忽略烟气在循环系统管道流动中的热损失。

## 1.3 数学模型

### 1.3.1 多孔介质模型

采用多孔介质模型<sup>[7]</sup>模拟台车上球团矿料层结构。选用层流方程模拟气流在球团矿中的流动。多孔介质内的粘性阻力和惯性阻力系数通过 Ergun 方程计算得出<sup>[8-9]</sup>, 计算公式见 (1) ~ (3):

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{150}{d_p^2} * \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \mu * v + \frac{1.75}{d_p} * \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \rho * v^2 \quad (1)$$

由式 (1) 可知, 粘性阻力系数为:

$$\alpha = \frac{d_p^2}{150} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^3} \quad (2)$$

惯性阻力系数为:

$$C_2 = \frac{3.5}{d_p} \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (3)$$

式中,  $\Delta p$  为压力损失, Pa;  $H$  为料层厚度, m;  $\mu$  为流体粘性系数, kg/(m·s);  $d_p$  为粒子的平均直径, m;  $\varepsilon$  为孔隙率, %;  $v$  为流体速度, m/s;  $\rho$  为流体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\alpha$  为粘性阻力系数;  $C_2$  表示流体在流体过程中做加速运动所引起的附加阻力。

### 1.3.2 局部非热平衡双能量方程

以气相、固相非热力学平衡理论为基础, 采用局部非热平衡双能量方程模拟料层内部换热<sup>[10-11]</sup>。

固相能量方程:

$$(1-\varepsilon)(\rho c)_s \frac{\partial t_s}{\partial t} = (1-\varepsilon) \nabla (\lambda_s \nabla t_s) + (1-\varepsilon) * q_s - h_v(t_s - t_g) \quad (4)$$

气相能量方程:

$$\varepsilon(\rho c)_g \frac{\partial t_g}{\partial t} + (\rho c)_g v * \nabla t_g = \varepsilon \nabla (\lambda_g \nabla t_g) + \varepsilon * q_g - h_v(t_s - t_g) \quad (5)$$

式中,  $\varepsilon$  为孔隙率, %;  $\rho$  为密度, kg/m<sup>3</sup>;  $c$  为比热容, J/(kg·K);  $\lambda_s$  和  $\lambda_g$  分别为固体和气体的热导率, W/(m·K);  $q_s$  和  $q_g$  分别为固相和气相发热源项, W/m<sup>3</sup>;  $t_g$  为气相温度, K;  $t_s$  为固相温度, K;  $h_v$  为固相与气相之间的对流换热系数, W/(m<sup>2</sup>·K)。

### 1.3.3 磁铁矿氧化模型

在进入环冷段之后, 球团矿氧化亚铁含量约为 3%, 基本在环冷一段氧化完全。

一般认为反应步骤分为三个: 气相中的氧气向

球团表面扩散(外扩散)、氧气通过赤铁矿层的微孔扩散(内扩散)、氧气与磁铁矿颗粒在界面发生化学反应<sup>[12-13]</sup>。基于混合控制模式,给出了磁铁矿半径随时间的变化关系式:

$$R_m = \frac{4\pi \cdot d_m^2 \cdot M \cdot (C_{O_2} - C_{O_2}^*)}{\frac{d_{m0}}{Sh \cdot D_{O_2}} \cdot \left(\frac{d_m}{d_{m0}}\right)^2 + \frac{d_m/2 \cdot (d_{m0} - d_m)}{d_{m0} \cdot D_{HP}} + \frac{1}{k_{M-H}}} \quad (6)$$

式中,  $R_m$  为反应速率,  $\text{mol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ;  $d_m$  为颗粒粒径,  $\text{m}$ ;  $M$  为磁铁矿分子量,  $\text{kg}/\text{mol}$ ;  $C_{O_2}$  为氧气浓度,  $\text{mol}/\text{m}^3$ ;  $C_{O_2}^*$  为氧气平衡浓度;  $Sh$  为谢尔伍德数;  $D_{O_2}$  为氧气扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $k_{M-H}$  为平衡常数。

磁铁矿 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) 氧化的反应焓  $\Delta H_m$  固定放热

为  $510 \text{ kJ}/\text{kg}$ 。

#### 1.4 边界条件与料层结构参数

采用常规的冷却方式,入口边界条件采用速度入口,其中  $0 \sim 900 \text{ s}$  为环冷一段,入口流量为  $10.5 \text{ 万 m}^3/\text{h}$ ,温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $900 \sim 1800 \text{ s}$  为环冷二段,入口流量为  $9.5 \text{ 万 m}^3/\text{h}$ ,温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $1800 \sim 2700 \text{ s}$  为环冷三段,入口流量为:  $13.5 \text{ 万 m}^3/\text{h}$ ,温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。出口边界条件为压力出口,  $p = -22.5 \text{ Pa}$ ,壁面为无滑移边界条件。当采用废气循环的冷却方式,冷却二段的气体介质为  $3.2 \text{ 万 m}^3/\text{h}$  热废气与  $6.3 \text{ 万 m}^3/\text{h}$  空气的混合气体,热废气的温度为  $170 \text{ }^\circ\text{C}$ ,计算得到混合气体的温度为  $74 \text{ }^\circ\text{C}$ 。球团矿及其构成的料层物性参数见表2。

表2 球团矿物性参数  
Table 2 Pellet property parameters

| 球团矿密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 球团矿比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3})$ | 球团半径/ $\text{mm}$ | 料床孔隙率/% | 料床导热系数/ $[\text{J} \cdot (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})^{-1}]$ |
|------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------|---------|--------------------------------------------------------------------------|
| 2 400                                    | 303                                         | 14                | 0.4     | 3.0                                                                      |

## 2 数学模型的求解

采用 simple 算法离散模型内部传热传质微分方程,并进行数值计算。为了确保数值计算的稳定性,平衡计算精度和计算时间,选取时间步长为  $1 \text{ s}$ ,计算时间为  $2700 \text{ s}$ 。采用第二类边界条件,模型初始温度采用现场数据赋值。数值模拟常量<sup>[14]</sup>见式(7)~(11)。

$$\lambda = 0.0244 * \left(\frac{tg}{273.15}\right)^{0.82} \quad (7)$$

$$\mu = 3.2133 * 10^{-7} * t_g^{0.7073} \quad (8)$$

$$Re = \frac{\rho_g V_g d_p}{\mu_g} \quad (9)$$

$$Pr = \frac{\mu_g C_g}{k_g} \quad (10)$$

$$Cp_g = 1000 * (0.9956 + 0.000093 * tg) \quad (11)$$

其中,  $\lambda$  为气体导热系数,  $\text{J}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $\mu$  为气体粘度,  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ ;  $Re$  为雷诺数;  $Pr$  为普朗特数;  $Cp_g$  为气体比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ; 料层比热容为:  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $700 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $968 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ :  $1057 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

## 3 计算结果分析

### 3.1 环冷机冷却过程温度分布

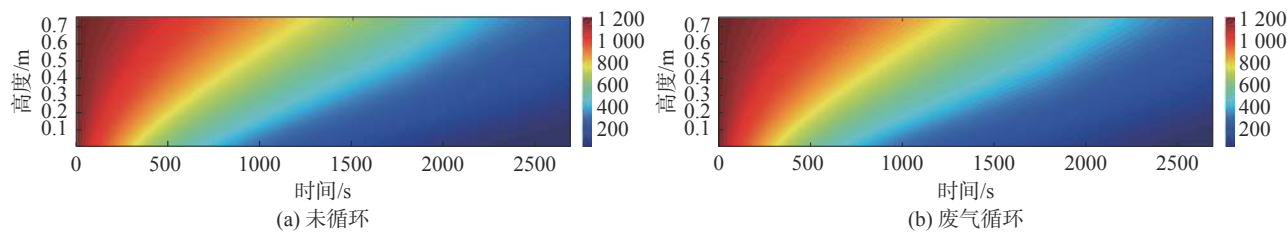
根据以上废气循环数学模型,分别对循环前和

循环后的环冷过程进行仿真模拟计算,得到环冷机球团温度的二维分布云图。云图中横坐标代表时间,与台车移动方向一致,纵坐标代表料层高度,不同的颜色代表球团料层温度的高低。气体从台车下部鼓入料层,与球团矿料层发生剧烈热交换,之后变为热废气从台车上部排出。图3(a)为空气冷却条件下,环冷机球团温度的二维分布,可知球团料层从下部开始逐渐冷却,代表低温的蓝色区域逐渐向上扩大,直到料层冷却为  $132 \text{ }^\circ\text{C}$ ,料层冷却完成。

对模型模拟的准确性进行了验证,采用热电偶分别在三个冷却段烟罩的中心位置对热废气的温度进行检测,并与模拟值进行比较,结果见表3。在温度较高的冷却一段和冷却二段,废气温度的模拟值和实测值误差在  $5\%$  以内,在温度相对较低的冷却三段,模拟的误差为  $7.8\%$ ,从整体来看,模拟的准确性较好,满足模型精度的要求。

将 TPH 段 7 号风箱的烟气循环到环冷机二段后,其温度云图的变化见图3(b)。加入循环气体之后从环冷二段,即  $900 \text{ s}$  之后开始,冷却气体变为热废气与冷空气混合气体,料层温度较引入循环之前有所升高。从  $1800 \text{ s}$  开始,冷却模式与引入循环气体之前相同,由环冷二段引入热烟气造成的球团温度升高的影响逐渐减小,最终料层冷却为  $144 \text{ }^\circ\text{C}$ ,料层冷却完成。





图中各颜色对应的温度见右侧温度标尺

图 3 环冷机球团温度云图

Fig. 3 Pellet temperature contour in circular cooling machine

表 3 温度模拟值和实测值比较

Table 3 Comparison between the simulated and measured temperature values

|        | 模拟值/℃ | 实测值/℃ | 误差/% |
|--------|-------|-------|------|
| 一段烟罩中心 | 930   | 902   | +3.1 |
| 二段烟罩中心 | 517   | 536   | -3.5 |
| 三段烟罩中心 | 303   | 281   | +7.8 |

3.2 料层断面温度分布

图 4 是环冷机料层横断面的温度云图, 图中各颜色对应的温度见左侧温度标尺。图 5 是循环前后环冷机二段、三段末球团温度对比。从图 4、5 可以看出, 由于在冷却二段引入了循环热废气, 冷却二段结束时, 其料层横断面的温度较之未循环的料层, 其温度略有上升, 上部高温区域变宽, 下部低温区域变窄。在冷却三段结束时, 当未采用废气循环, 温度云

图整体呈蓝色分布, 只有上部少量区域呈浅绿色, 料层基本冷却完成。当引入循环废气之后, 冷却三段末的料层上部区域温度较之循环前有所升高。

废气循环对环冷机不同位置断面平均温度的影响见表 4。在加入循环废气之后, 环冷二段结束的料层温度由未加入时的 334 ℃ 升高到 359 ℃, 冷却废气温度由 366 ℃ 上升到了 389 ℃, 冷却二段的废气平均温度从 511 ℃ 提高到 523 ℃, 提高了热利用效率。由于环冷二段冷却气体变为温度更高的混合气体, 与球团矿温差减小, 冷却效率下降, 所以循环之后的料层温度高于循环之前的料层温度。在引入热废气之后, 环冷机出口的球团矿均温由 132 ℃ 升高到 144 ℃, 烟气温度由 129 ℃ 上升到 139 ℃。但采用废气循环系统之后, 球团的温度仍能控制在 150 ℃ 以下。

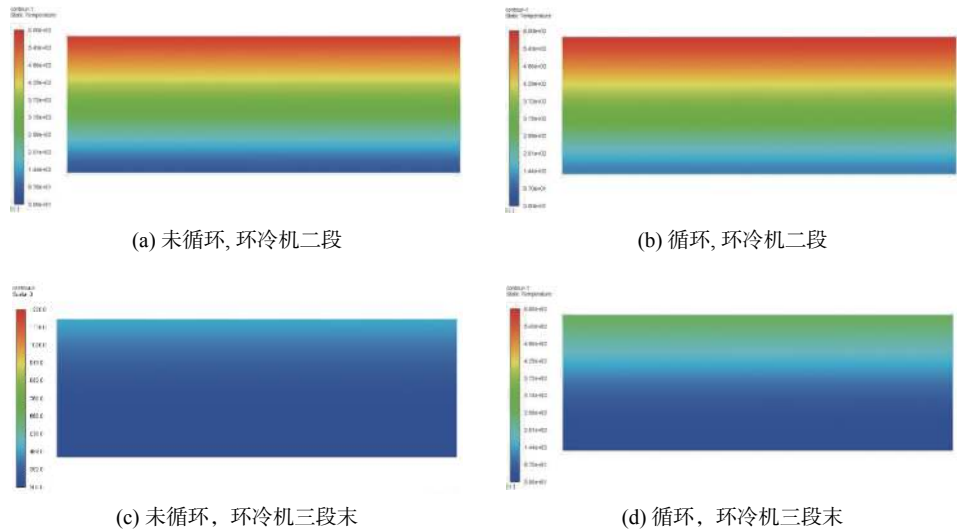


图 4 环冷二段和三段末台车高度方向上的温度云图

Fig. 4 Temperature contour in the height direction of the second and third section in the circular cooling machine

3.3 烟气循环对球团节能减排的影响

在链篦机-回转窑-环冷机生产过程中 TPH 段与 DDD 段共产生 27.8 万 m<sup>3</sup>/h 废气, 这些废气因污

染物含量高需要进行净化处理之后, 才能向外界排放。当采用废气循环工艺后, 其中 3.2 万 m<sup>3</sup>/h 的废气引入循环系统, 可减少废气排放量 11.5%。

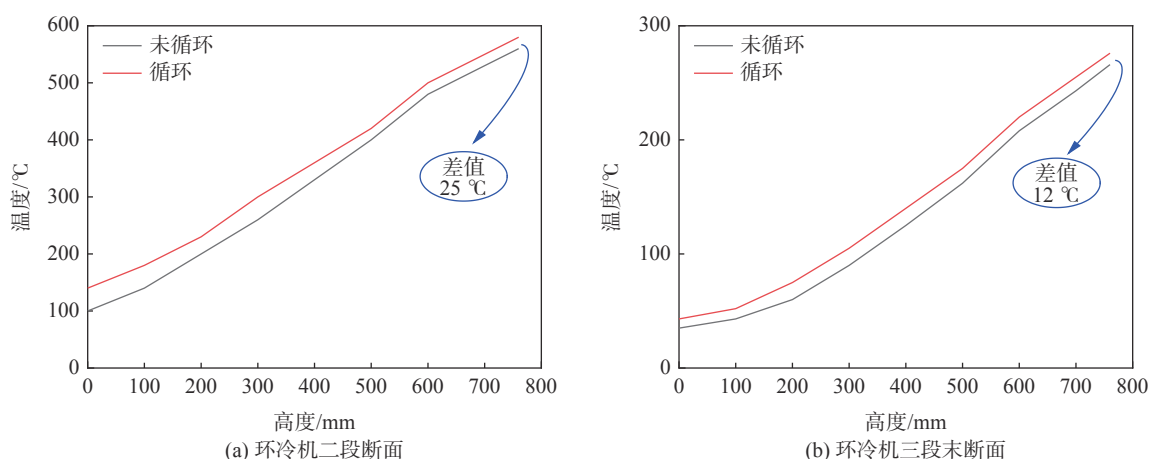


图5 循环前后环冷机二段、三段末球团温度对比

Fig. 5 Comparison of pellet temperatures of the second and third section in the circular cooling machine before and after the cycle

表4 废气循环对环冷机不同位置断面平均温度的影响

Table 4 Influence of exhaust gas cycle on average temperature of different positions on circular cooler

°C

| 是否循环 | 项目  | 环冷一段  |     |     | 环冷二段 |     |     | 环冷三段 |     |     |
|------|-----|-------|-----|-----|------|-----|-----|------|-----|-----|
|      |     | 初始    | 结束  | 平均  | 初始   | 结束  | 平均  | 初始   | 结束  | 平均  |
| 未循环  | 球团矿 | 1 238 | 684 | 961 | 684  | 334 | 509 | 334  | 132 | 233 |
|      | 烟气  | 1 072 | 656 | 864 | 656  | 366 | 511 | 366  | 129 | 248 |
| 废气循环 | 球团矿 | 1 238 | 684 | 961 | 684  | 359 | 522 | 359  | 144 | 252 |
|      | 烟气  | 1 072 | 656 | 864 | 656  | 389 | 523 | 389  | 139 | 264 |

当采用废气循环之后 3.2 万  $\text{m}^3/\text{h}$  的  $170\text{ }^\circ\text{C}$  热废气循环到环冷机二段, 废气携带能量 35 986.44 kJ/t。公式如下:

$$Q = \frac{q_v * \rho_g * C_{p_g} * t_g}{M} \quad (12)$$

其中,  $Q$  为热量, kJ/h;  $q_v$  为标况流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $\rho_g$  为烟气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C_{p_g}$  为烟气定压比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $t_g$  为废气温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $M$  为球团矿台时产量, t/h。

依据工厂现场数据得到链篦机-回转窑-环冷机工艺整个生产过程中热支出为: 1 042 417.11 kJ/t, 其中循环热量达到球团生产热量总支出的 3.45%。

将 TPH 段 7<sup>#</sup>风箱的废气循环到环冷二段, 这部分废气又循环到 TPH 段最后外排, 其中污染物的含量少, 氧气浓度变化不大, 不会对球团的质量带来影响。考虑到实际生产应用和推广情况, 如果预热过渡段风箱污染物含量较低时, 可以考虑采用此种循环方式, 工艺简单, 能够有效减少废气的排放量, 减少能耗, 也不会增加外排烟气中的污染物浓度; 如果过渡预热段风箱污染物含量高, 采用此种循环工艺时, 则需要增加脱硝措施。

## 4 结论

1) 基于局部非热平衡双能量方程模型, 多孔介质模型, 磁铁矿氧化数学模型, 以工厂现场数据为基础, 借助 fluent 软件为计算平台构建了烟气循环环冷机球团矿仿真模拟模型。经过现场实测数据验证表明, 计算结果与现场基本吻合, 仿真模拟模型正确可靠, 可以用于工业生产过程的模拟计算分析。

2) 针对废气循环对球团冷却影响规律的研究表明, 保持环冷二段总风量不变的前提下, 引入热废气对球团冷却的影响较小, 而废气温度从  $511\text{ }^\circ\text{C}$  提高到  $523\text{ }^\circ\text{C}$ , 提高了热利用效率。虽然在冷却二段末球团料层温度较正常生产上升  $25\text{ }^\circ\text{C}$ , 但是由于在冷却三段气固温差加大, 冷却效率增强, 冷却三段末出口球团温度仅比未循环时上升  $12\text{ }^\circ\text{C}$ , 最终出口球团温度为  $144\text{ }^\circ\text{C}$ , 完全符合球团正常生产要求。

3) 采用烟气循环系统之后, 可以减少含有污染物的废气排放 11.5%, 降低了大量含有污染物的废气排放, 节约了废气净化处理的成本。同时占球团生产热量总支出 3.45% 的热量被循环回收利用, 降

低了燃料的消耗,减少了燃料燃烧过程中二氧化碳,氮氧化物等污染物的产生。

## 参考文献

- [1] Li Xinchuang. Ultra-low emission is a major green revolution in the history of iron and steel in China—Interpretation of opinions on promoting the implementation of ultra-low emission in iron and steel industry[J]. *Chinese Iron and Steel Industry*, 2019, (6): 9–19.  
(李新创. 超低排放是中国钢铁史上的重大绿色革命--解读《关于推进实施钢铁行业超低排放的意见》[J]. *中国钢铁业*, 2019, (6): 9–19.)
- [2] Jiang Tao, Fan Xiaohui, Li Guanghui. Iron ore agglomeration[M]. Changsha: Central South University Press, 2016.  
(姜涛, 范晓慧, 李光辉. 铁矿造块学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2016.)
- [3] Xia Jianfang, Yu Xiangyang, Zhao Xianqiong. Optimization of process parameters based on minimum target of cooling energy consumption of sinter cooler[J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2016, 28(1): 13–19.  
(夏建芳, 喻向阳, 赵先琼. 基于环冷机冷却能耗最小目标的工艺参数优化[J]. *钢铁研究学报*, 2016, 28(1): 13–19.)
- [4] Feng J X, Liang K L, Sun Z B, *et al.* Cooling process of iron ore pellets in an annular cooler[J]. *Int J Miner Metall Mater*, 2011, 18: 285–291.
- [5] Croft T N, Cross M, Slone A K, *et al.* CFD analysis of an induration cooler on an iron ore grate-kiln pelletising process[J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22(9–10): 859–873.
- [6] Song Yu. Numerical simulation and analysis of the cooling process of pellets in a circular cooler[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2019.  
(宋昱. 球团矿在环冷机中冷却过程的数值模拟分析[D]. 唐山: 华北理工大学, 2019.)
- [7] Liu Wei, Fan Aiwu, Huang Xiaoming. Theory and application of heat and mass transfer in porous media[M]. Beijing: Science Press, 2006.  
(刘伟, 范爱武, 黄晓明. 多孔介质传热传质理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.)
- [8] Hinkley J, Waters A G, Litster J D. An investigation of pre-ignition air flow in ferrous sintering[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1994, 42(1–2): 37–52.
- [9] Qi Xia, Dai Fangqin. Gas resistance characteristics of a heat storage packed ball bed[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2015, 15(5): 770–773.  
(祁霞, 戴方钦. 蓄热小球填充床的气体阻力特性[J]. *过程工程学报*, 2015, 15(5): 770–773.)
- [10] Jiang Wujun, Ge Xiurun. Application of double energy equation to porous media of ventilated embankment[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(6): 1170–1172.  
(蒋武军, 葛修润. 双能量方程在通风路基多孔介质中的应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(6): 1170–1172.)
- [11] Zhang X, Chen Z, Zhang J, *et al.* Simulation and optimization of waste heat recovery in sinter cooling process[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 54(1): 7–15.
- [12] Zhao Jiapi. Numerical modelling of the iron ore sintering process and its experimental validation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.  
(赵加佩. 铁矿石烧结过程的数值模拟与试验验证[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.)
- [13] Sadrnezhaad S K, Ferdowsi A, Payab H. Mathematical model for a straight grate iron ore pellet induration process of industrial scale[J]. *Computational Materials Ence.*, 2009, 44(2): 296–302.
- [14] Li Yang, Li Boquan, Zhang Xiliang, *et al.* Mathematical modeling and numerical simulation of pellet drying process[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2018, 43(4): 33–39.  
(李洋, 李伯全, 张西良, 等. 球团干燥过程的数学建模与数值模拟研究[J]. *烧结球团*, 2018, 43(4): 33–39.)

编辑 杨冬梅