

## 烧结矿竖冷炉内气固传热过程焓分析

冯军胜<sup>1</sup>, 焦宇鸣<sup>1</sup>, 赵 亮<sup>2</sup>, 董 辉<sup>2</sup>

(1. 安徽建筑大学 环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 烧结矿余热回收利用是影响钢铁企业节能降碳的主要因素之一, 而烧结矿床层内气固换热过程直接影响出口热载体的温度和余热回收效果。基于此, 本文以烧结矿竖冷炉为研究对象, 借鉴非热力学平衡和多孔介质内流动传热理论建立竖冷炉内气体动量方程和气固双能量方程模型, 重点分析进口矿温、进口风量和风温等关键运行参数对竖冷炉床层内气固换热过程的影响规律。结果表明: 随着进口矿温、进口风量和风温的升高, 床层内气流压力焓增大; 床层内出口热载体温度焓和净焓均随进口风量的升高先增大后变小, 而随进口矿温和进口风温的升高逐渐增大。焓效率随着进口风量和风温的升高先增大后变小, 而进口矿温的升高会导致焓效率的降低。在满足排矿温度的前提下, 应尽可能提高进口风温, 并通过设置进口矿温和进口风量, 竖冷炉能够获得较大的空气净焓和焓效率。

**关键词:** 烧结矿; 移动床; 气固传热; 温度焓; 压力焓; 焓效率

**中图分类号:** TF046.4; TK11<sup>+</sup>5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-8764(2025)04-0161-09

**doi:** 10.13403/j.sjqt.2025.04.070

## Analysis on cooling process of sinter in vertical tank of waste heat recovery

FENG Junsheng<sup>1</sup>, JIAO Yuming<sup>1</sup>, ZHAO Liang<sup>2</sup>, DONG Hui<sup>2</sup>

(1. School of Environmental and Energy Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, Anhui, China;

2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

**Abstract:** The efficient recycling of waste heat resources of sinter is one of the important measures for iron and steel enterprises to achieve the goal of "double carbon", but the cooling process of sinter in the bed directly affects the quality and waste heat recovery effect of the outlet heat carrier. Based on this, the gas flow and gas-solid heat transfer model in the vertical tank are established based on the porous medium theory and the local non-thermodynamic equilibrium dual-energy equation, and the influence of key operating parameters of the vertical tank such as sinter inlet temperature, cooling air flow and inlet temperature on the sintering cooling process in the bed is studied in detail. The results show that with the increase of sinter inlet temperature, cooling air flow and inlet temperature, the airflow pressure increases. The cooling air outlet temperature exergy and net exergy increase first and then decrease with the increase of cooling air flow, and gradually increase with the increase of sinter and cooling air inlet temperature. The exergy efficiency first increases and then decreases with the increase of cooling air flow and inlet temperature. The increase of sinter inlet temperature will lead to a decrease in exergy efficiency. Under the premise of meeting the discharge temperature, the air inlet temperature should be increased as much as possible, and by setting the sinter inlet temperature and air inlet flow, the vertical tank can obtain

**收稿日期:** 2024-10-16; **修回日期:** 2024-11-13

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51974087); 安徽省高等学校科学研究项目(2022AH050262); 安徽省自然科学基金资助项目(1908085QE203)

**作者简介:** 冯军胜(1988—), 男, 副教授, 从事余热回收利用、新型热力循环等方面的研究。

**通信作者:** 董 辉(1969—), 男, 教授, 从事余热回收利用方面的研究。

greater air net exergy and exergy efficiency.

**Key words:** sinter; mobile bed; gas-solid heat transfer; temperature exergy; pressure exergy; exergy efficiency

烧结余热资源约占钢铁企业余热资源的 8% 左右,是最具降碳潜力的余热资源之一<sup>[1-2]</sup>。由于环冷机结构和余热回收的特点,环冷机出口风温和余热回收率较低<sup>[3]</sup>。竖冷炉是为克服现有烧结环冷机不足而提出的高效烧结余热回收设备,其余热利用率可超过 75%<sup>[4]</sup>。目前,竖冷炉内气体流动和气固传热直接影响床层内气流压降和出口热载体温度,导致气流穿透料层所消耗的鼓风机功率和和竖冷炉出口热载体可用能随之发生变化。因此,开展竖冷炉内气固换热过程焓分析对强化床层内能量传递具有十分重要的意义。

近年来,针对烧结矿冷却过程的研究主要集中在影响因素和参数优化。张家元等<sup>[5]</sup>研究了环冷机内气固换热过程。结果表明,环冷机内烧结矿分层布料可有效提高余热回收量,分层布料比常规工况提高 23.2%。张晟等<sup>[6-7]</sup>研究了环冷机内气固传热过程,详细分析了环冷机关键运行参数对余热回收的影响规律。结果表明,随着入口风速的增加,出口热载体的焓焓先增大后减小。此外,ZHANG 等<sup>[8-9]</sup>分析了热工参数对环冷机内焓传递性能的影响,同时通过正交试验得到了最优的参数组合。结果表明,随着进口风量的变小和余热回收段长度的增加,环冷机的余热回收效果改善。王双等<sup>[10]</sup>开展了烧结冷却机循环热风接入点的优化分析,并计算了不同优化方案下烧结矿的冷却过程。结果表明,改变原有循环热风接入点方案可有效提高环冷机吨矿余热回收量。除了环冷机内烧结矿冷却过程,王为术等<sup>[11]</sup>改变单一参数对余热回收竖冷炉内气固换热过程进行了研究,并对不同参数变化下竖式冷却炉内传热效果进行了评价。结果表明,当增大气固比、提升冷却段高度和直径时,气固换热效果增强。PAN 等<sup>[12]</sup>、FENG 等<sup>[13]</sup>、ZHANG 等<sup>[14]</sup>构建了竖冷炉内烧结矿冷却过程的计算模型,研究了竖冷炉操作参数对床层内气固传热和焓传递过程的影响。结果表明,竖冷炉进口风量和风温对床层内热载体出口温度和热量焓有很大影响。

目前,国内外有关烧结矿冷却过程的研究主

要以床层内气固传热的影响因素分析为主,涉及竖冷炉内烧结矿冷却过程的焓效率分析还鲜有文献报道。基于此,本文以热力学第二定律为基础,构建出竖冷炉内热载体净焓和焓效率的一般表达式;然后,借鉴非热力学平衡和多孔介质内流动传热理论,建立竖冷炉内气体流动及气固传热模型,详细研究竖冷炉运行参数,即进口矿温、空气流量和进口风温对床层内烧结矿冷却过程的影响,并分析床层内气体净焓和焓效率的变化规律,为烧结矿竖冷炉热工参数优化提供理论支撑。

## 1 仿真模型描述

### 1.1 模型与假设

余热回收竖冷炉结构示意图如图 1 所示,主要由进料段、预存段、坡道段、冷却段和出料段五部分组成。根据竖冷炉内气体流动分布的研究结果<sup>[15]</sup>,竖冷炉内气固换热过程主要发生在冷却段,设置预存段是为了保证竖冷炉进料段不存在漏风现象,而设置坡道段是为了保证烧结矿的顺利移动和升温后冷却空气的收集。因此,在数值模拟过程中,将竖冷炉冷却段设置为物理模型的计算区域。

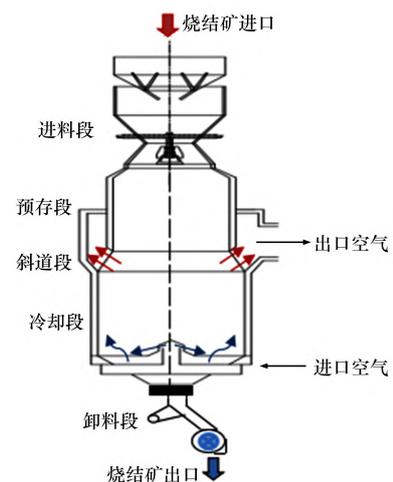


图 1 烧结矿竖冷炉示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sinter vertical cooler

为了提高数值计算精度,将竖冷炉冷却段设置为多孔介质区域,同时对竖冷炉内气固换热模型进行简化处理。具体模型简化如下。

(1) 竖冷炉运行参数保持不变。

(2) 烧结床层为均匀且各向同性的多孔介质,高温下烧结矿的孔隙率和变形暂不考虑。

(3) 忽略了垂直槽壁处的热损失以及烧结床层的辐射换热。

## 1.2 数学描述

竖冷炉内气固换热过程的具体方程<sup>[16-17]</sup>如下所示。

(1) 质量守恒方程。

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_g u_i) = 0 \quad (1)$$

式中:  $\rho_g$  为气流密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $u_i$  为  $i$  方向上气流速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $x_i$  为  $i$  方向上气流运动距离,  $\text{m}$ 。

(2) 动量守恒方程。

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_g u_i u_j) = -\frac{\partial}{\partial x_i}\left(p + \frac{2}{3}\rho_g k\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \mu_t\right)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right)\right] + S_i \quad (2)$$

式中:  $u_j$  为  $j$  方向上流体速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $p$  为流体压力,  $\text{Pa}$ ;  $k$  为湍流动能,  $\text{N}\cdot\text{m}/\text{kg}$ ;  $\mu$  为流体动力黏度,  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ;  $\mu_t$  为湍流黏度,  $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ;  $x_j$  为  $j$  方向上流体运动距离,  $\text{m}$ ;  $k$  为  $\delta_{ij}$  为湍流修正系数;  $u_l$  为  $l$  方向上的流体速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $x_l$  为  $l$  方向上流体运动距离,  $\text{m}$ ;  $S_i$  为  $i$  方向上动量方程源项,  $\text{N}/\text{m}^3$ 。

为了描述气体在多孔介质中的流动,动量方程源项  $S_i$  的表达式<sup>[13]</sup>如下。

$$S_i = -\left(\frac{\mu}{\alpha}u_i + \frac{1}{2}C_2\rho_g|u_i|u_i\right) \quad (3)$$

式中:  $1/\alpha$  为黏滞阻力系数,  $\text{m}^{-2}$ ;  $C_2$  为惯性阻力系数,  $\text{m}^{-1}$ 。其具体计算方法<sup>[18]</sup>如下。

$$\frac{1}{\alpha} = [85.4 + 3294e^{(-0.085D/d_p)}] \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d_p^2} \quad (4)$$

$$C_2 = [0.632 + 2.8e^{(-0.112D/d_p)}] \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 d_p} \quad (5)$$

式中:  $D$  为冷却段内径,  $\text{m}$ ;  $d_p$  为烧结矿当量直径,  $\text{m}$ ;  $\varepsilon$  为床层空隙率。

(3) 能量守恒方程。

由于烧结床层中气固两相的导热系数和热容量差异较大,因此在同一高度烧结矿与冷却空气的温差明显。竖冷炉冷却段内气固换热过程的双

能量方程<sup>[17]</sup>分别如下。

烧结矿:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_s c_s u_s T_s) = (1-\varepsilon) \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x_i}\right) - h_v(T_s - T_g) \quad (6)$$

冷却空气:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_g c_g u_g T_g) = \varepsilon \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial x_i}\right) + h_v(T_s - T_g) \quad (7)$$

式中:  $\rho_s$  为固体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $c_s$  和  $c_g$  分别为固体和气体比热容,  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ;  $u_s$  和  $u_g$  分别为固体下移速度和气体流速,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $T_s$  和  $T_g$  分别为固体和气体温度,  $\text{K}$ ;  $\lambda_s$  和  $\lambda_g$  分别为固体和气体导热系数,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;  $h_v$  为气固体积换热系数,  $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$ 。

烧结床层的体积换热系数和传热努塞尔数  $Nu$  的计算方法<sup>[19-20]</sup>如下所示。

$$h_v = \frac{6h(1-\varepsilon)}{d_p} = \frac{Nu\lambda_g}{d_p} \frac{6(1-\varepsilon)}{d_p} \quad (8)$$

$$Nu = 0.198\varepsilon^{0.07} Re^{0.66} Pr^{1/3} \quad (9)$$

式中:  $Re$  为雷诺数;  $Pr$  为普朗特数;  $h$  为气固面积传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。其表达式如下。

$$Re = \frac{\rho_g u_g d_p}{\mu} \quad (10)$$

$$Pr = \frac{c_g \mu}{\lambda_g} \quad (11)$$

当烧结温度一定时,焓值的表达式如下所示。

$$E_{x,s} = m_s \left( \int_{T_0}^{T_s} c_s dT - T_0 \int_{T_0}^{T_s} \frac{c_s}{T} dT \right) = m_s c_s (T_s - T_0) \left( 1 - \frac{T_0}{T_s - T_0} \ln \frac{T_s}{T_0} \right) \quad (12)$$

当气体温度恒定时,焓值的表达式如下所示。

$$E_{x,g} = m_g \left( \int_{T_0}^{T_g} c_g dT - T_0 \int_{T_0}^{T_g} \frac{c_g}{T} dT \right) = m_g c_g (T_g - T_0) \left( 1 - \frac{T_0}{T_g - T_0} \ln \frac{T_g}{T_0} \right) \quad (13)$$

式中:  $E_{x,s}$  和  $E_{x,g}$  分别为烧结矿和冷却空气的焓值,  $\text{MW}$ ;  $m_g$  为空气质量流量,  $\text{kg}/\text{s}$ ;  $T_0$  为环境温度,  $\text{K}$ ;  $m_s$  为烧结矿质量流量,  $\text{kg}/\text{s}$ ;  $T$  为温度,  $\text{K}$ 。

当空气通过竖冷炉床层时,由于气体黏和惯性阻力的存在,床层内必然会产生气流压降,其中涉及黏性阻力损失和惯性阻力损失。气体流经

床层能量损失可以用气体流动压力焓来定量描述, 气流压力焓计算方法<sup>[7]</sup>如下。

$$E_{x,g,p} = m_g R_g T_0 \int_{p_0}^{p_{in}} \frac{dp}{p} = m_g R_g T_0 \ln \frac{p_{in}}{p_0} = m_g R_g T_0 \ln \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \quad (14)$$

式中:  $E_{x,g,p}$  为气流压力焓, MW;  $R_g$  为气体常数, J/(kg·K);  $p_{in}$  为气流进口压力, Pa;  $p_0$  为环境压力, Pa;  $\Delta p$  为气流压降, Pa。

由式(14)可知, 气体流过烧结床层的压降大于零, 因此气流的压力焓大于零, 这意味着气体流过烧结床层需要消耗外部功。竖冷炉中的冷却空气净焓定义为冷却空气出口焓与气流压力焓之差, 其可由下式确定。

$$E_{x,g,net} = E_{x,g,out} - E_{x,g,p} \quad (15)$$

$$E_{x,g,net} = m_g c_g (T_{g,out} - T_0) \left[ 1 - \frac{T_0}{T_{g,out} - T_0} \ln \frac{T_{g,out}}{T_0} \right] - m_g R_g T_0 \ln \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \quad (16)$$

式中:  $E_{x,g,net}$  为冷却空气净焓, MW;  $E_{x,g,out}$  为冷却空气出口温度焓, MW;  $T_{g,out}$  为烧结矿出口温度, K。

焓效率是指利用的净输出用能占总输入用能的比例。焓效率越高, 说明系统的能量回收利用效率越高。净焓效率计算方法如下。

$$\eta_{ex} = \frac{E_{x,g,net}}{\sum E_{in}} \times 100\% = \frac{E_{x,g,out} - E_{x,g,p}}{E_{x,s,in} + E_{x,g,in}} \times 100\% \quad (17)$$

式中:  $\eta_{ex}$  为焓效率, %;  $E_{x,s,in}$  为烧结矿进口焓值, MW;  $E_{x,g,in}$  为进口空气焓值, MW。

### 1.3 网格生成和边界条件

使用ICEM软件进行如图1所示仿真区域的几

何构造和网格生成, 并确定具有四边形元素的三维结构化网格用于仿真区域的网格生成。仿真区域的生成结果如图2所示。采用Fluent软件对模拟区内的气固流动和换热进行计算, 并基于用户自定义函数(UDF)二次开发平台定义和编写烧结矿和冷却空气的物性参数, 以及固体能量方程对流项中的源项( $S_i$ )和对流换热系数( $h$ )。

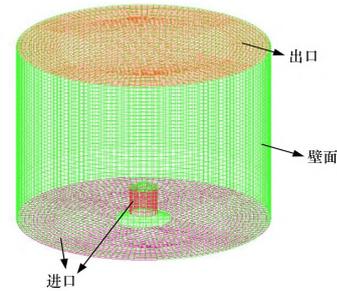


图2 模拟区域网格生成

Fig. 2 Mesh generation of simulation area

图2也给出了仿真区域的边界设置, 模拟区底部和中心风帽为气体质量进口边界, 而模拟区顶部设置为气体压力出口边界。模拟区出口处的气体压力相对值设置为零。冷却段壁面采用绝热边界条件, 不考虑散热。

### 1.4 模型验证

由于竖冷炉尚未完全工业化, 还处于实验研究阶段, 难以获得其实际运行参数。因此, 根据文献[13]中提到的自制试验装置来获取测量数据, 并通过模拟计算值与测量值的关系, 检验所建立计算模型的可靠性。以冷却空气出口温度作为仿真模型的验证目标, 得到五种工况下的对比结果如表1所示。由表1可知, 五种工况下的出口风温模拟值与试验测量数据基本一致, 且模拟值与试验测量数据的最大偏差小于6%, 说明上述竖冷炉冷却段的模拟模型和计算方法是可信和正确的。

表1 模拟计算值与实验测量数据对比

Table 1 Comparison of simulation values with experimental measurement data

工况	烧结矿进口温度/℃	空气流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	烧结矿流量/(kg·h <sup>-1</sup> )	进口风温/℃	出口风温		
					试验测量值/℃	模拟值/℃	偏差/%
1	769.2	2 127	2 520	20	504.5	481.6	-4.56
2	873.6	1 723	2 160	20	631.3	594.5	-5.83
3	720.9	1 684	2 160	20	502.4	478.6	-4.74
4	732.7	1 545	1 800	20	477.9	454.2	-4.96
5	781.4	1 499	1 800	20	543.1	518.3	-4.57

## 2 结果与讨论

本文的数值计算工况以某钢铁企业 360 m<sup>2</sup> 烧结机的生产情况为基准,该烧结机年产 390 万吨烧结矿,进入竖冷炉冷却段的烧结矿质量流量为 152 kg/s。根据文献[13]结果,冷却段内径设置为 9 m,冷却段高度设置为 7 m,模拟所用烧结矿物性参数及环境条件如表 2 所示<sup>[21-22]</sup>。根据所构建的竖冷炉内气固换热模型,本文开展竖冷炉关键运行参数,即进口矿温、进口风量和进口风温对床层内气固换热过程的影响规律分析。竖冷炉关键运行参数的变化范围如表 3 所示。

### 2.1 进口矿温的影响

将进口风量和风温分别设置为 190 kg/s 和 293 K,测定不同进口矿温下床层内出口风温、出口矿温和气流压降的变化情况,如图 4 所示。由图 4 可知,随着进口矿温的升高,出口风温、出口矿温和气流压降逐渐增大。这是因为,进口矿温的升高使得床层内气固换热温差逐渐升高,床层内气固换热量也随之变大,导致给定流量下出口风温升高。假定烧结矿产量、冷却空气流量、床层内气固换热时间均恒定,进口矿温的升高而带入竖冷炉内烧结矿显热并没有被空气完全带走,导致出口矿温也逐渐升高。此外,气固换热量的变大使得床层内气流温度升高,气流速度也随之变大,造成气固之间碰撞加剧,床层内气流惯性力也变大,因此气流压降逐渐变大。

图 4 显示了床层内热载体出口温度焓和气流压力焓随进口矿温的变化。由图 4 可以看出,热载体出口温度焓和气流压力焓都随进口矿温的升高而逐渐增大。这可以解释为,对于给定的冷却空气流量,进口矿温的增加导致出口风温和气流压降的增大,并且根据式(13)、(14),热载体出口温度焓和气流压力焓也逐渐增大。

不同进口矿温下热载体净焓和焓效率的变化

如图 5 所示。由图 5 可看出,随着进口矿温的升高,热载体净焓逐渐变大,而焓效率逐渐减小。这可以解释为,由于进口矿温的升高,热载体出口温度焓总是大于气流压力焓,造成热载体净焓也随之增大。此外,进口矿温的升高导致出口矿温增加,烧结矿出口温度焓也增加,并且在竖冷炉内焓损失逐渐增加,从而导致焓效率的减少。

### 2.2 进口风量的影响

当进口风温和矿温分别为 293 K 和 923 K 时,不同进口风量条件下床层内出口风温和矿温,以及气流压降的变化情况如图 6 所示。由图 6 可以看出,随着进口风量的增大,床层内出口风温和矿温逐渐减小,气流压降逐渐变大。这可以解释为,根据热力学第一定律,当进口矿温一定时,出口风温随进口风量的增大而减小。随着进口风量的增大,床层内气固换热量变大,烧结矿冷却速率也相应增大,导致出口矿温变小。此外,进口风量的增大导致气体表观速度的增加,气体流过烧结床层的黏性力和惯性力也增加,因此气流压降随之增大。

图 7 显示了床层内出口热载体温度焓和气流压力焓随进口风量的变化。由图 7 可以看出,随着进口风量的增大,出口热载体温度焓先增大后减小,气流压力焓逐渐变大。这可以解释为,在进口矿温和流量一定时,出口热载体携带的热量随着出口矿温的降低而逐渐增大,并且由于出口矿温的限制,出口热载体携带热量的增加幅度逐渐变小。由于出口风温随进口风量的升高而逐渐变小,热载体能级也随之降低。出口风温越低,热载体能级下降幅度越大。由于出口热载体温度焓是出口热载体携带的热量与能级的乘积,因此出口热载体温度焓随着进口风量的增加而达到最大值。此外,进口风量的增大导致烧结床层气流压降的增加,气流压力焓也相应增加。

不同进口风量下热载体净焓和焓效率的变化

表 2 烧结矿物理参数及环境条件

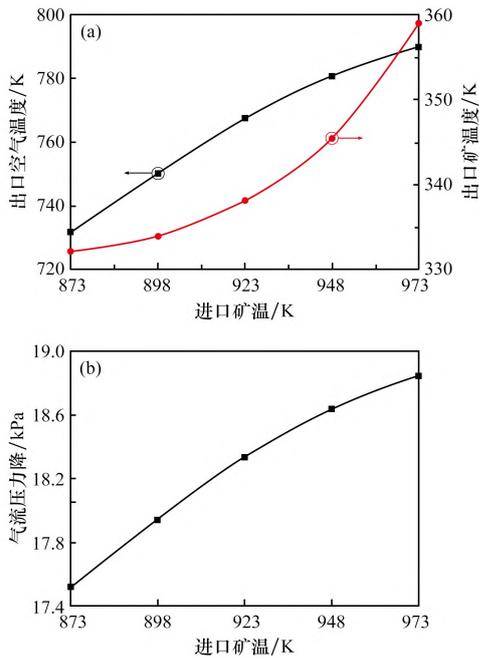
Table 2 Sinter physical parameters and environmental conditions

烧结矿 等效直径/m	烧结矿比热容/ (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	导热系数/ (J·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	真密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	床空隙率	环境温度/K	环境压力/Pa
0.035	337.03 × (T <sub>s</sub> - 273)	2.87	3 400	0.41	293	101 325

表 3 关键运行参数的变化范围

Table 3 Variation range of key operating parameters

水平	烧结矿 进口温度/K	空气流量/ (kg·s <sup>-1</sup> )	进口 风温/K
1	873	170	293
2	898	180	313
3	923	190	333
4	948	200	353
5	973	210	373



(a) 出口风温与矿温; (b) 气流压降

图 3 出口风温与矿温和气流压降随进口矿温的变化  
Fig. 3 Changes of outlet air and sinter temperatures, as well as gas flow pressure drop with inlet sinter temperature

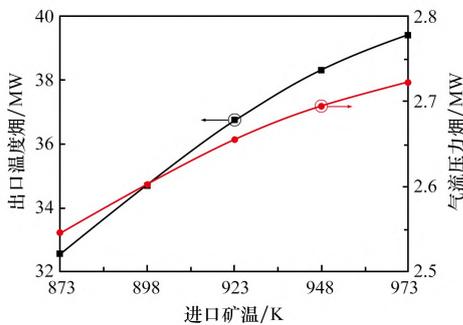


图 4 出口温度焓和气流压力焓随进口矿温的变化  
Fig. 4 Changes of outlet temperature exergy and gas flow pressure exergy with inlet sinter temperature

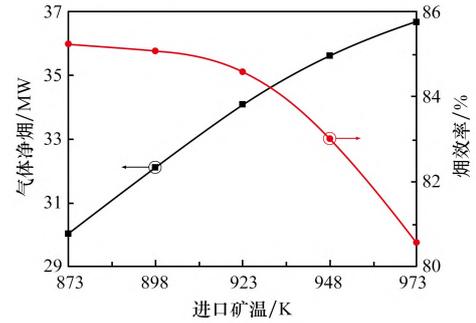
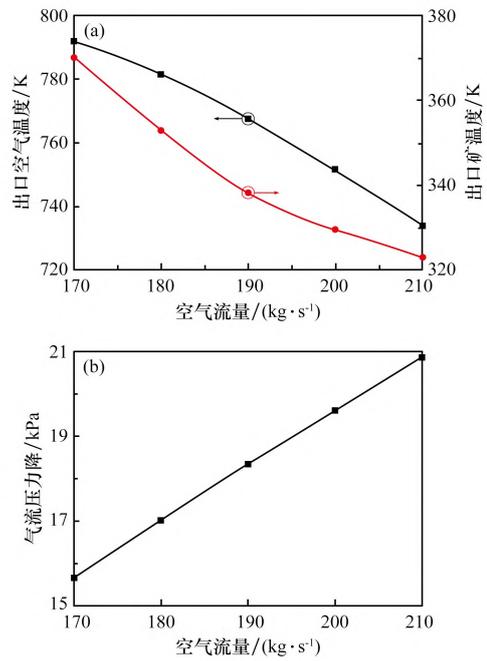


图 5 热载体净焓和净焓效率随进口矿温的变化  
Fig. 5 Changes of heat carrier net exergy and exergy efficiency with inlet sinter temperature



(a) 出口风温与矿温; (b) 气流压降

图 6 出口风温与矿温和气流压降随进口风量的变化  
Fig. 6 Changes of outlet air and sinter temperatures, as well as gas flow pressure drop with inlet air flow rate

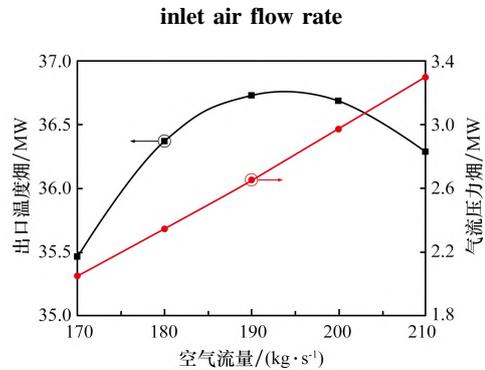


图 7 出口温度焓和气流压力焓随进口风量的变化  
Fig. 7 Changes of outlet temperature exergy and gas flow pressure exergy with inlet air flow rate

情况如图8所示。由图8可以看出,随着进口风量的变大,热载体净焓和焓效率先增大后减小。这可以解释为,随着进口风量的增加,出口热载体温度焓的值总是大于气流压力焓的值,因此热载体净焓的变化趋势与出口热载体温度焓相同。此外,由于进口风量的增加,进口热载体温度焓增加幅度较小,这也导致竖冷炉内进口焓增加幅度较小,即式(17)中给定的烧结矿进口热流密度的分母值,因此,焓效率也随着进口风量的增加先增加后减小。

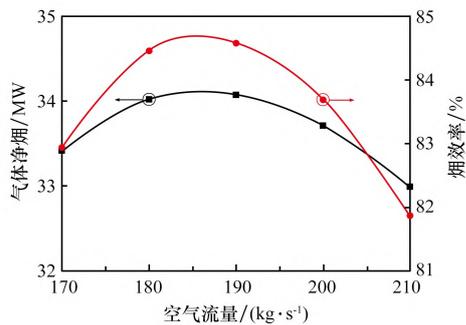


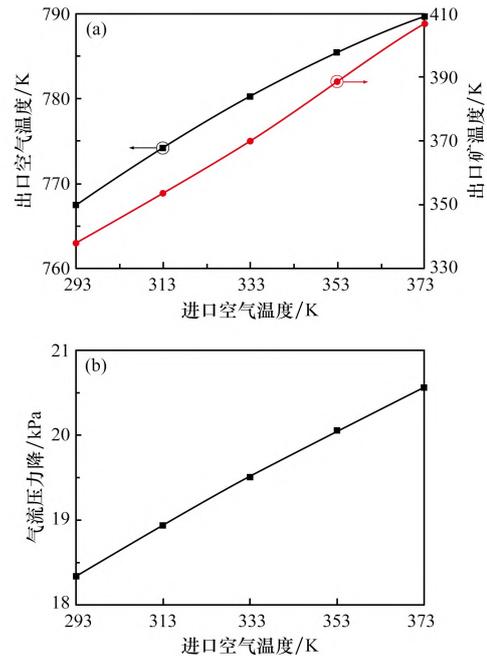
图8 热载体净焓和焓效率随进口风量的变化

Fig. 8 Changes of heat carrier net exergy and exergy efficiency with inlet air flow rate

### 2.3 进口风温的影响

当进口风量和矿温分别设置为 190 kg/s 和 923 K 时,不同进口风温下烧结床层内出口风温和矿温,以及气流压降的变化情况如图9所示。由图9可以看出,随着进口风温的增大,床层内出口风温和矿温,以及气流压降均逐渐变大。这可以解释为,在一定进口风量下,出口风温的增大使得床层内气体表观流速变大,床层内气固换热强度也相应变大,从而导致出口风温的增大。此外,随着进口风温的增大,床层内气固换热温差逐渐变小,气固换热量也随之变小,造成出口矿温变大。此外,由于床层内气体表观速度的增加,气流压降也相应增加。

床层内出口热载体温度焓和气流压力焓随进口风温的变化如图10所示。由图10可以看出,随着进口风温的增大,出口热载体温度焓和气流压力焓均逐渐变大。这可以解释为,由于进口风温的增大导致出口风温和气流压降的变大,根据式(13)、(14)可知,出口热载体温度焓和气流压力焓也随之变大。



(a) 出口风温与矿温; (b) 气流压降

图9 出口风温与矿温和气流压降的影响随进口风温的变化

Fig. 9 Changes of outlet air and sinter temperatures, as well as gas flow pressure drop with inlet air temperature

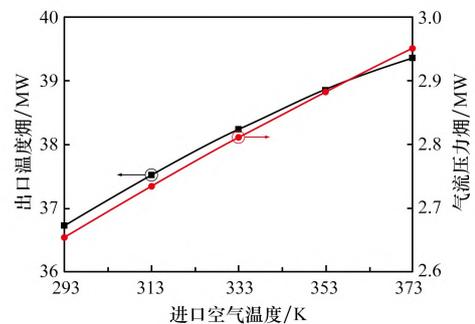


图10 出口温度焓和气流压力焓随进口风温的变化

Fig. 10 Changes of outlet temperature exergy and gas flow pressure exergy with inlet air temperature

图11显示了不同进口风温下热载体净焓和焓效率的变化情况。由图11可以看出,随着进口风温的增大,热载体净焓逐渐变大,而焓效率先增大后减小。这可以解释为,由于图10所示的出口风温增加时,出口热载体温度焓总是大于气流压力焓,因此热载体净焓也逐渐变大。此外,图9所示的出口热载体温度焓随进口风温的增加趋势明显小于气流压力焓,这导致热载体净焓的增加幅度也相应变小。另外,进口风温越大,出口热

载体温度越高,导致式(17)中分母值的增加幅度变大,因此焓效率随着进口风温的增加先增大后变小。

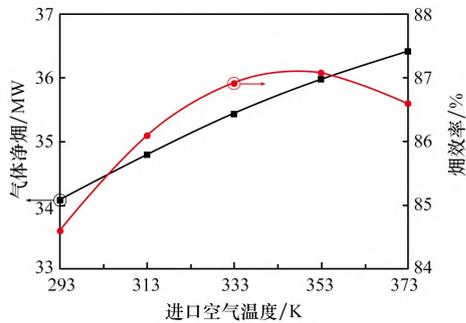


图 11 热载体净焓和净焓效率随进口风温的变化

Fig. 11 Changes of heat carrier net exergy and exergy efficiency with inlet air temperature

### 3 结论

(1) 采用多孔介质内流动传热和非平衡热力学理论,建立竖冷炉内气体流动和换热计算模型,通过用户自定义函数将床层内流动阻力系数和换热系数编译到计算模型中。模拟计算值与不同试验工况下获得的试验数据偏差均小于6%,所构建的计算模型是可靠的。

(2) 进口矿温、进口风量和风温是影响竖冷炉内气固换热的三个主要参数。出口热载体温度焓随进口矿温和风温的升高而逐渐变大,而随进口风量的增大先增大后减小。进口矿温、进口风量和风温的增大只能导致床层内气流压力焓的变大。

(3) 随着进口风量的升高,热载体净焓可获得最大值,但随着进口矿温和风温的增大,热载体净焓逐渐变大。进口矿温的增大导致焓效率降低,而通过调节床层内进口风量和风温,竖冷炉可以获得最大的焓效率。

(4) 在竖冷炉实际运行过程中,在满足排矿温度的前提下,应尽可能提高进口风温,同时合理设置进口矿温和风量,使得竖冷炉能够获得较大的热载体净焓和焓效率。竖冷炉未来研究应聚焦床层内颗粒流动和气固传热的耦合,即竖冷炉内烧结矿顺利排料的同时强化床层内气固换热过程,进而获得更高的出口风温和热载体净焓。

### 参考文献:

- [1] 董辉,林贺勇,张浩浩,等. 烧结热工测试与分析[J]. 钢铁,2011,46(11):93-98.  
DONG Hui, LIN Heyong, ZHANG Haohao, et al. Thermal test and analysis of sintering cooling system[J]. Iron and Steel, 2011, 46(11): 93-98.
- [2] 王新东,田京雷,宋程远. 大型钢铁企业绿色制造创新实践与展望[J]. 钢铁,2018,53(2):1-9.  
WANG Xindong, TIAN Jinglei, SONG Chengyuan. Innovative practice technology and outlook in large iron and steel enterprise green manufacturing[J]. Iron and Steel, 2018, 53(2): 1-9.
- [3] 董辉,李磊,刘文军,等. 烧结矿余热竖冷炉式回收利用工艺流程[J]. 中国冶金,2012,22(1):6-11.  
DONG Hui, LI Lei, LIU Wenjun, et al. Process of waste heat recovery and utilization for sinter in vertical tank[J]. China Metallurgy, 2012, 22(1): 6-11.
- [4] 蔡九菊,董辉. 烧结过程余热资源的竖冷炉式回收与利用方法及其装置:200910187381.8[P]. 2009-09-15.  
CAI Jiuju, DONG Hui. Method and device of sinter waste heat recovery and utilization with vertical tank: 200910187381.8[P]. 2011-01-05.
- [5] 张家元,田万一,戴传德,等. 环冷机分层布料仿真与优化[J]. 化工学报,2012,63(5):1385-1390.  
ZHANG Jiayuan, TIAN Wanyi, DAI Chuande, et al. Simulation and optimization of sinter circular cooler layer-loading[J]. CIESC Journal, 2012, 63(5): 1385-1390.
- [6] 张晟,冯军胜,董辉. 基于热载体焓焓为判据的环冷机热工参数仿真优化[J]. 化工学报,2017,68(11):4129-4136.  
ZHANG Sheng, FENG Junsheng, DONG Hui. Simulation and optimization of thermal parameter of sinter annular cooler based on enthalpy exergy of heat carrier[J]. CIESC Journal, 2017, 68(11): 4129-4136.
- [7] 张晟,高建业,冯军胜,等. 基于热载体焓焓的环冷机余热回收段仿真优化[J]. 中南大学学报(自然科学版),2018,49(8):2083-2090.  
ZHANG Sheng, GAO Jianye, FENG Junsheng, et al. Simulation and optimization of heat recovery section of annular cooler based on enthalpy exergy of heat carrier[J]. Journal of Central South University (Science and

- Technology),2018,49(8):2083-2090.
- [8] ZHANG S,ZHAO L,FENG J S, et al. Parameter optimization of gas-solid heat transfer process in sinter packed bed based on further exergy analysis[J]. Chemical Engineering Research and Design,2019,146:499-508.
- [9] ZHANG S,ZHAO L,FENG J S, et al. Effect of operating parameters on gas-solid exergy transfer performance in sinter annular cooler[J]. Applied Thermal Engineering,2020,181:115928.
- [10] 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;98. 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;98.
- [11] 王为术,甄娟,郭嘉伟,等. 烧结矿竖式冷却炉气固传热影响因素研究[J]. 烧结球团,2023,48(5):33-42. WANG Weishu,ZHEN Juan, GUO Jiawei, et al. Research on influencing factors of gas-solid heat transfer in sinter vertical cooling furnace[J]. Sintering and Pelletizing,2023,48(5):33-42.
- [12] PAN L S,WEI X L,PENG Y, et al. Theoretical study on the cooling procedure for vertical flow sinters[J]. Applied Thermal Engineering,2017,127:592-601.
- [13] FENG J S,ZHANG S,DONG H, et al. Effect of gas inlet parameters on exergy transfer performance of sinter cooling process in vertical moving bed[J]. Applied Thermal Engineering,2019,152:126-134.
- [14] ZHANG S,ZHAO L,FENG J S, et al. Thermal analysis of sinter vertical cooler based on waste heat recovery[J]. Applied Thermal Engineering,2019,157:113708.
- [15] 冯军胜,董辉,赵勇. 烧结矿余热回收竖冷炉内气体流动的数值计算[J]. 东北大学学报(自然科学版),2015,36(5):660-664. FENG Junsheng,DONG Hui,ZHAO Yong. Numerical investigation of gas flow in vertical tank for recovering sinter waste heat[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2015,36(5):660-664.
- [16] YANG J,ZENG M,WANG Q W, et al. Forced convection heat transfer enhancement by porous pin fins in rectangular channels[J]. Journal of Heat Transfer,2010,132(5):051702.
- [17] 冯军胜. 烧结矿余热回收竖冷炉内气固传热过程及其应用研究[D]. 沈阳:东北大学,2017:45-48. FENG Junsheng. Study on gas-solid heat transfer model in vertical tank for recycling sinter waste heat[D]. Shenyang:Northeastern University,2017:45-48.
- [18] FENG J S,DONG H,DONG H D. Modification of Ergun's correlation in vertical tank for sinter waste heat recovery[J]. Powder Technology,2015,280:89-93.
- [19] SOON H,HO J,KOOK L. Fixed-bed adsorption for bulk component system. non-equilibrium, non-isothermal and non-adiabatic model[J]. Chemical Engineering Science,1995,50(5):813-825.
- [20] FENG J S,DONG H,GAO J Y, et al. Experimental study of gas-solid overall heat transfer coefficient in vertical tank for sinter waste heat recovery[J]. Applied Thermal Engineering,2016,95:136-142.
- [21] FENG J S,DONG H,GAO J Y, et al. Numerical investigation of gas-solid heat transfer process in vertical tank for sinter waste heat recovery[J]. Applied Thermal Engineering,2016,107:135-143.
- [22] TIAN F Y,HUANG L F,FAN L W, et al. A comprehensive characterization on the structural and thermophysical properties of sintered ore particles toward waste heat recovery applications[J]. Applied Thermal Engineering,2015,90:1007-1014.