

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2016.11.009

烧结矿竖罐内气固传热过程数值模拟与优化

冯军胜, 董辉, 高建业, 李含竹

(东北大学 国家环境保护生态工业重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 以某钢铁企业 360 m² 烧结机年产 390 万 t 烧结矿为研究对象, 建立了竖罐内气固传热过程的数学模型, 模拟研究了影响竖罐内气固传热过程的主要因素及其影响规律, 得到了竖罐适宜的操作参数. 研究表明: 随着气体表观流速的减小和空气进口温度的增加, 烧结矿出口温度和空气出口温度均逐渐增加; 烧结矿颗粒直径的减小导致烧结矿出口温度的降低和空气出口温度的增加. 竖罐适宜的操作参数为: 空气进口标况流量 45.5 万 m³/h, 颗粒当量直径 0.025 m, 空气进口温度 130 °C.

关键词: 烧结矿; 竖罐; 多孔介质; 数值模拟; 优化

中图分类号: TK 11⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)11-1559-05

Numerical Simulation and Optimization of Gas-Solid Heat Transfer Process in Sinter Vertical Tank

FENG Jun-sheng, DONG Hui, GAO Jian-ye, LI Han-zhu

(SEP Key Laboratory on Eco-industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: DONG Hui, professor, E-mail: Dongh@smm.neu.edu.cn)

Abstract: Taking 360 m² sintering machine with the annual output of 3 900 kt sinter in an iron and steel company as a research sample, a mathematical model of gas-solid heat transfer process in sinter vertical tank was established. The main factors affecting the gas-solid heat transfer process in vertical tank and their influence rules were studied through numerical simulation and the suitable operation parameters was determined. The results show that with the decrease of gas superficial velocity and the increase of air inlet temperature, the sinter outlet temperature gradually increases, as well as the outlet temperature of cooling air. The decrease of sinter particle diameter results in the decrease of sinter outlet temperature and the increase of air outlet temperature. The optimal operation parameters of vertical tank are as follows: the air inlet flow under the standard condition is 455 000 m³/h, the particle equivalent diameter is 0.025 m and the air inlet temperature is 130 °C.

Key words: sinter; vertical tank; porous media; numerical simulation; optimization

烧结矿余热竖罐式回收是针对传统烧结余热回收系统的弊端, 借鉴干熄焦炉的结构和工艺提出的一种烧结矿显热高效回收方式^[1], 竖罐床层内气固传热是决定烧结余热罐式回收可行性的主要因素之一.

目前, 烧结矿余热回收竖罐还处于理论研究阶段, 而关于烧结矿床层内气固传热的数值研究主要集中在烧结环冷机中. Leong 等^[2]采用多孔介质气固传热模型和局部热平衡模型, 研究了料

层空隙率的分布对环冷机烧结矿床层内气固传热的影响, 但没有考虑冷却空气和烧结料层之间的对流换热. Jiang 等^[3]建立了环冷机内三维流动和传热的数学模型, 对烧结环冷机内的气固传热过程进行了模拟计算. Zhang 等^[4]基于多孔介质模型和局部热力学非平衡模型, 采用正交实验方法对影响环冷机的操作参数进行了参数优化. Liu 等^[5]建立了烧结环冷机的二维数学模型, 模拟分析了不同热工参数对烧结矿余热回收量的影响.

综上所述,目前烧结环冷机内气固传热过程的数值模拟研究较多,但涉及到烧结矿床层内气固传热过程的稳态模拟研究还鲜有文献报道.为此,本文以多孔介质模型为基础,基于局部非平衡热力学双能量方程,建立烧结竖罐内三维稳态气固传热模型,模拟研究竖罐内气固传热过程的影响因素及其影响规律,并在此基础上,采用正交实验的方法对影响罐体内气固传热过程的主要因素进行优化分析,获得竖罐适宜的操作参数,旨在为烧结矿余热竖罐的设计和运行提供理论依据.

1 模型的建立

1.1 物理模型及其假设

本文针对竖罐本体建立物理模型,如图 1 所示,热烧结矿从竖罐顶部进入预存段,在冷却段与逆流而来的冷却风进行强烈换热后从竖罐底部排出,而冷却风从斜道区出口排出. 烧结矿竖罐具体结构尺寸详见文献[6]. 本文采用分块网格生成技术对竖罐本体区域进行网格划分,在气固换热较为强烈的区域使用加密网格,而对于其他计算区域则使用较为稀疏的网格,同时对所划分网格进行无关性验证.

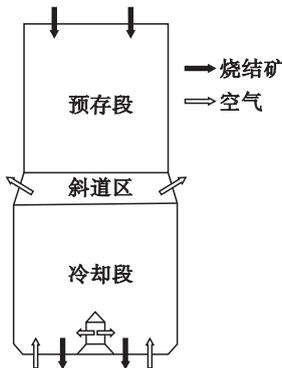


图 1 烧结矿竖罐物理模型

Fig. 1 Physical model of sinter vertical tank

考虑到竖罐内气体流动和气固传热过程的复杂性,在保证模拟计算精度和得到影响因素规律的前提下,对烧结矿竖罐的物理模型作如下假设:

- 1) 竖罐内的气体流动被视为单相稳态流动;
- 2) 烧结矿为各相同性多孔介质;
- 3) 竖罐内的气体为不可压缩流体,但气体密度的变化符合理想气体状态方程;
- 4) 忽略竖罐内的辐射换热过程,只考虑导热和对流换热过程.

1.2 数学模型

竖罐内气体流动与气固传热控制方程如下:

- 1) 连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_f u_j) = 0. \quad (1)$$

- 2) 动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_f u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(P_{ij}) + g_i - f_i. \quad (2)$$

式中: ρ_f 为冷却空气密度, kg/m^3 ; u_i, u_j 分别为气体在 i, j 方向上的速度, m/s ; P_{ij} 为表面压力矢量, 包括静压力和气体黏性压力; g_i 为气体在 i 方向上的体积作用力, N/m^3 ; f_i 为作用在单位体积气体上的反方向阻力, N/m^3 .

在动量方程右边增加一个源项就可以模拟烧结矿竖罐内气体的动量传输过程.

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

式中: $1/\alpha$ 为黏性阻力系数; C_2 为惯性阻力系数; μ 为气体动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; u 为气体流动速度, m/s .

本文采用修正 Ergun 型方程计算竖罐床层内的黏性阻力系数和惯性阻力系数^[7].

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{85.4(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d_p^2}, \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{0.632(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3 d_p}. \quad (5)$$

式中: ε 为床层空隙率; d_p 为烧结矿颗粒当量直径, m .

- 3) 能量方程.

对于竖罐内烧结矿和气体之间的换热过程采用局部非平衡热力学稳态双能量方程对其进行求解^[8],即对烧结矿和冷却空气分别建立能量方程如下:

固相:

$$(1-\varepsilon)\rho_s c_s u_s \cdot \nabla \theta_s = (1-\varepsilon) \nabla \cdot (\lambda_s \nabla \theta_s) - h_v(\theta_s - \theta_f), \quad (6)$$

气相:

$$\rho_f c_p u_f \cdot \nabla \theta_f = \varepsilon \nabla \cdot (\lambda_f \nabla \theta_f) + h_v(\theta_s - \theta_f). \quad (7)$$

式中: ρ_s 为烧结矿的密度, kg/m^3 ; c_s 和 c_p 分别为烧结矿和空气的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{C})$; u_s 和 u_f 分别为颗粒表观下移速度和气体表观流速, m/s ; θ_s 和 θ_f 分别为烧结矿和空气温度, C ; λ_s 和 λ_f 分别为烧结矿和空气的导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{C})$; h_v 为气固对流体积换热系数, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{C})$.

利用 Achenbach 准则关系式^[9]计算 h_v :

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

其中, h 可由式(9)确定^[4]:

$$Nu = \frac{hd_p}{\lambda_f} = 2 + 0.6Pr^{1/3}Re^{1/2}. \quad (9)$$

式中： h 为气固对流面积换热系数， $J/(m^2 \cdot s \cdot ^\circ C)$ ； Nu 为对流传热努塞尔数； Pr 为普朗特数； Re 为颗粒雷诺数； μ 为空气动力黏度， $kg/(m \cdot s)$ 。

本文的数值模拟基于 Fluent 14.5 平台，通过用户自定义函数 UDF 编写了双能量方程中导热系数、比热容和对流换热系数等参数，并将这些参数编译到数值计算中。

1.3 边界条件

罐体底部和风帽的气体进口采用速度进口边

界条件。对于竖罐墙体，设置为绝热壁面。对于斜道段空气出口，设置为压力出口边界条件，设置相对压力为 0。

1.4 模型验证

目前烧结矿竖罐正处于理论研究阶段，竖罐全面而准确的运行数据无法获得。鉴于烧结矿竖罐和干熄焦炉同属颗粒移动床层内气固逆流式换热。本文以宝钢和武钢典型的干熄焦炉运行工况为例^[10]，计算出典型工况下焦炭的出口温度和热载体的出口温度。干熄焦炉典型工况参数及模拟计算结果如表 1 所示。

表 1 典型工况参数及模拟计算结果
Table 1 Typical working condition parameters and calculation results

工况 $t \cdot h^{-1}$	气焦比 $m^3 \cdot t^{-1}$	焦炭进口 温度/ $^\circ C$	气体进口 温度/ $^\circ C$	焦炭出口温度			气体出口温度		
				实测值/ $^\circ C$	计算值/ $^\circ C$	误差/%	实测值/ $^\circ C$	计算值/ $^\circ C$	误差/%
140	1 450	1 000	130	170	186	9.41	900	858	4.67
75	1 320	1 050	200	250	274	8.00	850	822	3.29

从表 1 可以看出，采用本模型所得焦炭出口温度和热载体出口温度的模拟结果与实际测量结果基本一致，最大误差也在 10% 以下，因此，可认为本文所建立的模型是可靠的。

2 模拟结果与分析

本模拟计算以某钢铁企业 360 m^2 烧结机年产 390 万 t 烧结矿的实际生产工况为基准，竖罐入口参数分别为：烧结矿处理量 152 kg/s ，烧结矿入口温度 650 $^\circ C$ 。利用已建立的计算模型，针对影响竖罐内气固传热过程的 3 个主要参数：气体表观流速、烧结矿当量直径和入口风温对竖罐内气固传热过程的影响规律，各个主要参数的取值如表 2 所示。

表 2 数值模拟计算工况
Table 2 Conditions of numerical simulation

气体表观 流速/ $(m \cdot s^{-1})$	烧结矿当 量直径/ m	空气进口 温度/ $^\circ C$
2.0	0.025	100
2.3	0.030	110
2.7	0.035	120
3.0	0.040	130

不同烧结矿颗粒直径条件下，竖罐空气和烧结矿出口温度和烧结矿出口温度随气体表观流速的变化规律如图 2 所示。

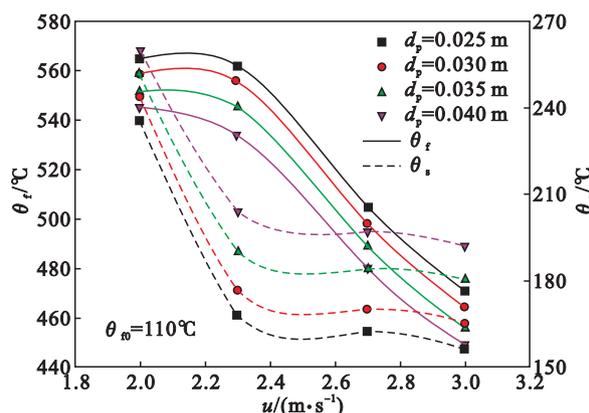


图 2 气体表观流速对空气和烧结矿出口温度的影响
Fig. 2 Effect of gas superficial velocity on air and sinter outlet temperatures

由图 2 可知，随着气体表观流速的减小，空气出口温度和烧结矿出口温度均逐渐增加。空气出口温度在表观流速较低时下降趋势较平缓，在表观流速较大时下降趋势较大，而烧结矿出口温度的变化趋势则与之相反。这是由于，气体表观流速较低时，烧结矿与冷却空气之间的对流换热系数也较低，导致竖罐内烧结矿冷却速度变小，烧结矿出口温度会变大。反之，气体表观流速的增大导致烧结矿冷却速度的增加，但在入口风温不变的条件下，空气的冷却能力是一定的，导致烧结矿出口温度下降趋势变缓。同时根据能量守恒定律可知，由于入口空气流量的增加，烧结矿出口温度下降趋势变缓必然会导致出口冷却风温度的急剧下降。

不同气体表观流速条件下，竖罐空气出口温

度和烧结矿出口温度随颗粒当量直径的变化规律如图 3 所示.

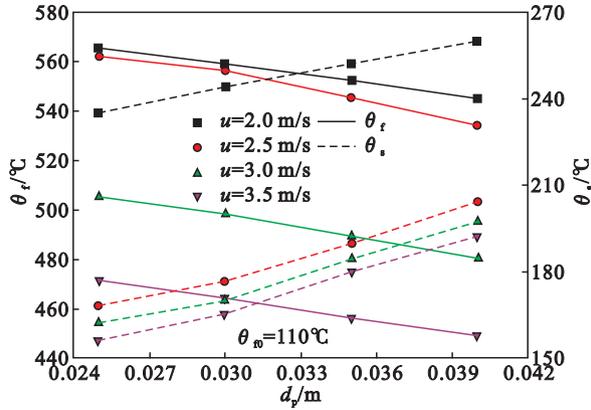


图 3 颗粒当量直径对空气和烧结矿出口温度的影响

Fig. 3 Effect of particle equivalent diameter on air and sinter outlet temperatures

由图 3 可知,随着烧结矿颗粒直径的减小,空气出口温度逐渐增加,烧结矿出口温度逐渐降低.这是由于,烧结矿颗粒直径的减小将导致颗粒导热热阻的减小,进而导致烧结矿与冷却空气之间综合传热系数的增加,导致烧结矿冷却速度增加和烧结矿出口温度的降低.根据能量守恒定律可知,在入口空气流量一定的条件下,烧结矿出口温度的降低必然会导致出口冷却风温度的增加.

图 4 为不同气体表观流速条件下,竖罐空气出口温度和烧结矿出口温度随入口空气温度的变化示意图.

由图 4 可知,随着空气进口温度的增加,空气出口温度和烧结矿出口温度均逐渐增加.这是由于,在气体表观流速一定时,入口风温的增加将导

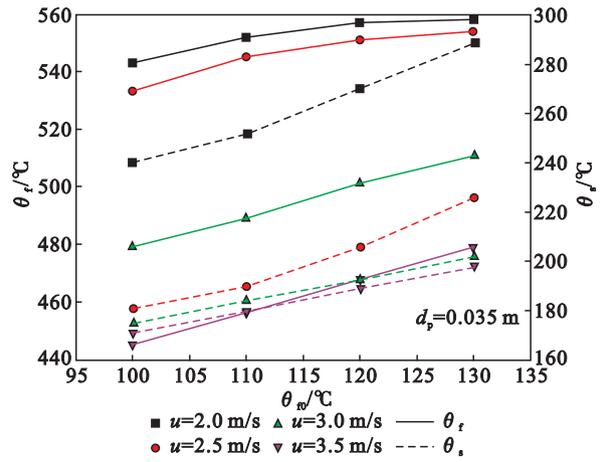


图 4 空气进口温度对空气和烧结矿出口温度的影响

Fig. 4 Effect of air inlet temperature on air and sinter outlet temperatures

致空气进口标况流量的减少,竖罐入口处空气的冷却能力降低,导致烧结矿出口温度增加.此外,入口风温的增加也会导致罐体内对流换热系数的增加,从而引起烧结矿与空气间对流换热量的增加,导致空气出口温度的增加.

3 正交优化实验

借助 Fluent 模拟计算平台,利用正交实验方法对气体表观流速、颗粒直径和入口风温 3 个参数 4 个水平进行优化分析,选择正交表 $L_{16}(4^3)$ 进行试验分析,即 3 参数、4 水平和 16 工况的正交实验.试验优化指标为竖罐单位时间余热回收量和出口空气焓量.正交实验设计与模拟计算结果如表 3 所示.

表 3 正交实验工况模拟计算结果

Table 3 Simulation results of orthogonal experimental conditions

工况	气体表观流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	烧结矿直径/m	空气进口温度/°C	空气出口温度/°C	余热回收量/($\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$)	出口空气焓量/($\text{kJ}\cdot\text{s}^{-1}$)
C1	2	0.025	100	565	61 671.64	27 419.63
C2	2	0.03	110	559	58 181.23	26 873.21
C3	2	0.035	120	557	54 963.5	26 028.36
C4	2	0.04	130	551	51 931.86	24 966.53
C5	2.3	0.025	110	562	67 341.46	31 161.99
C6	2.3	0.03	100	544	67 464.69	30 393.92
C7	2.3	0.035	130	554	60 243.81	28 955.16
C8	2.3	0.04	120	542	61 196.28	28 686.28
C9	2.7	0.025	120	516	67 094.62	31 175.14
C10	2.7	0.03	130	520	64 598.18	30 783.6
C11	2.7	0.035	100	479	66 475.3	29 182.02
C12	2.7	0.04	110	480	63 712.35	28 536.66
C13	3	0.025	130	493	66 351.05	31 436.7
C14	3	0.03	120	476	66 475.3	30 471.37
C15	3	0.035	110	456	65 852.78	29 199.48
C16	3	0.04	100	436	64 975.9	27 858.1

由表 3 可知,单位时间余热回收量和出口空气焓量较大的工况有 C5, C6, C9, C13 和 C14. 这 5 组工况所得出口空气的能级分别为 0.461 9, 4 505, 4 646, 4 738 和 0.458 4. 因此, C13 为模拟计算最优工况, 其单位时间余热回收量为 66 351.05 kJ/s, 对应的 3 种参数最优组合为: 气体表观流速 3 m/s, 即空气标况流量 45.5 万 m^3/h , 颗粒当量直径 0.025 m, 入口空气温度 130 $^{\circ}\text{C}$.

4 结 论

1) 以多孔介质模型和局部非平衡热力学模型为基础所建立的竖罐传热计算模型模拟的典型工况条件下焦炭出口温度和热载体出口温度的计算值与实测值之间的误差在 10% 以下, 很好地描述了干熄焦炉内的气固传热过程, 验证了模型的可靠性.

2) 影响烧结矿竖罐内气固传热过程的主要因素为气体表观流速、颗粒直径和入口风温. 随着气体表观流速的减小和空气进口温度的增加, 空气出口温度和烧结矿出口温度均逐渐增加; 随着烧结矿颗粒直径的减小, 空气出口温度逐渐增加, 烧结矿出口温度逐渐降低.

3) 利用已验证的模型对影响烧结矿竖罐内气固传热过程的 3 个参数进行了正交实验优化分析, 并以单位时间余热回收量和出口空气焓量为优化目标, 得到了烧结矿竖罐最优的运行工况: 进口空气标况流量 45.5 万 m^3/h , 颗粒当量直径 0.025 m, 入口空气温度 130 $^{\circ}\text{C}$.

参考文献:

[1] 蔡九菊, 董辉. 烧结过程余热资源的竖罐式回收与利用方法及其装置: 中国, 200910187381.8 [P]. 2009-09-15.
(Cai Jiu-ju, Dong Hui. The method and device of sintering

waste heat recovery and utilization with vertical tank: China, 200910187381.8 [P]. 2009-09-15.)

- [2] Leong J C, Jin K W, Shiau J S, et al. Effect of sinter layer porosity distribution on flow and temperature fields in a sinter cooler [J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 2009, 16 (3): 265-272.
- [3] Jiang J Y, Chiu Y W. 3-D transient conjugated heat transfer and fluid flow analysis for the cooling process of sintered bed [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29 (14): 2895-2903.
- [4] Zhang X H, Chen Z, Zhang J Y, et al. Simulation and optimization of waste heat recovery in sinter cooling process [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 54 (1): 7-15.
- [5] Liu Y, Yang J, Wang J, et al. Energy and exergy analysis for waste heat cascade utilization in sinter cooling bed [J]. *Energy*, 2014, 67: 370-380.
- [6] 冯军胜, 董辉, 赵勇. 烧结矿余热回收竖罐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 Jun-sheng, 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.)
- [7] 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.
- [8] 冯军胜. 烧结矿余热回收竖罐内气固传热模型研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2014: 45-48.
(Feng Jun-sheng. Study on gas-solid heat transfer model in vertical tank for recycling sinter waste heat [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014: 45-48.)
- [9] Hwang K S, Jun J H, Lee W K. Fixed-bed adsorption for bulk component system: non-equilibrium non-isothermal and non-adiabatic model [J]. *Chemical Engineering Science*, 1995, 50 (5): 813-825.
- [10] 潘立慧, 魏松波. 干熄焦技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 15-18, 251-264.
(Pan Li-hui, Wei Song-bo. Coke dry quenching technology [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005: 15-18, 251-264.)