

烧结烟气冷却式烧结竖炉传热传质数值研究

孙雪茗, 王子兵

(华北理工大学 冶金与能源学院, 河北 唐山 063210)

摘要: 为了改善烧结烟气 CO 治理效果, 解决现有治理手段不完善及由此引发的环境污染、资源浪费问题, 本文提出将烧结烟气替代传统空气作为烧结竖炉冷却气的新工艺。通过 CFD-DEM 耦合法, 基于仿真软件 Fluent 与 Rocky 进行气固逆流流动模拟, 并通过编译用户自定义函数在 Fluent 中实现气固逆流换热模拟, 重点分析烧结矿颗粒直径、气料比及矿烟初温对烧结冷却效率和 CO 脱除效果的影响规律。研究结果表明: 当烧结矿颗粒直径小于 0.036 m、热矿初温处于 902~930 K、气料比维持在 831~1 088 m³/t、冷烟初温为 332~362 K 时, 烧结冷却效果显著提升, 同时 CO 脱除效率达到最优。本文成果可为烧结烟气 CO 协同治理工艺的优化设计及工业应用提供理论支撑与技术借鉴。

关键词: 竖式冷却; 烧结烟气; 烧结矿; 逆流换热; 数值模拟

中图分类号: TF341.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)01-0022-09

doi: 10.13402/j.gcjs.2026.01.004

Numerical study on heat and mass transfer in a sintering shaft furnace cooled by sintering flue gas

SUN Xueming, WANG Zibing

(College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: In order to improve the treatment efficiency of CO in sintering flue gas and solve the problems of environmental pollution and resource wastage caused by imperfect existing treatment methods, this study proposes a novel process that the traditional air is replaced with sintering flue gas as the cooling gas in a sintering shaft furnace. In this study, by means of CFD-DEM coupling method and based on Fluent and Rocky simulation software, the gas-solid countercurrent flow was simulated and by compiling user-defined functions, the gas-solid countercurrent heat transfer is simulated with the Fluent simulation software, to focus on analyzing the effects of sinter particle diameter, gas-to-material ratio, and initial temperature of sinter flue gas on sintering cooling efficiency and CO removal effectiveness. The results indicate that significant improvements in sintering cooling efficiency and optimal CO removal effectiveness can be achieved when the sinter particle diameter is below 0.036 m, the initial temperature of hot sinter ranges between 902 and 930 K, the gas-to-material ratio is maintained at 831~1 088 m³/t, and the initial temperature of cold flue gas ranges from 332 to 362 K. The findings of this study can provide theoretical support and technical references for the optimized design and industrial application of synergistic CO treatment processes for sintering flue gas.

Key words: vertical cooling; sintering flue gas; sinter; countercurrent heat transfer; numerical simulation

烧结烟气污染物成分复杂, 其中 SO₂、NO_x 的治理技术已较为成熟^[1-2], 而 CO、二噁英等组分的脱除技

术仍需优化。数据显示, CO 在烧结烟气中体积占比约为 1%, 质量浓度可达 7 000~10 000 mg/Nm³; 由于

收稿日期: 2025-06-06

作者简介: 孙雪茗(2000—), 男, 硕士研究生, 从事工业节能减排方面的研究。

通信作者: 王子兵(1966—), 男, 教授, 从事工业节能减排方面的研究工作。

烧结烟气排放量巨大, 每年造成的碳煤损失相当可观, 且 CO 对人体健康和环境危害显著^[4-5]。针对这一问题, 李杰等^[6]、王月娟^[7]通过实验证明, 烧结矿内 FeOx 成分可有效催化氧化烧结烟气中的 CO, 当烟气温度升至 446 ℃ 以上时, CO 脱除率可达 90% 以上, 这为烧结烟气 CO 净化提供了新思路。

烧结余热回收是降低烧结工艺能耗的关键路径^[8]。其中, 烧结矿竖式冷却(竖冷窑)作为新兴余热回收技术^[9], 通过烧结矿与空气在竖冷窑内的逆流换热, 可实现烧结矿冷却与空气显热回收的双重目标——冷却后的烧结矿输出工艺, 升温后的空气则输送至余热锅炉发电, 实现余热的再次利用^[10]。对比传统环冷工艺, 竖冷有效规避了漏风量大、热回收率低等缺陷^[11-12]。烧结烟气经排放前必需的脱硝脱硫处理后, 温度可降至 70 ~ 90 ℃, 恰好满足烧结矿冷却气的温度要求。

综上, 本文采用烧结烟气作为烧结矿竖冷窑冷却介质, 通过数值模拟系统分析不同工况下的换热效果, 明确最优运行参数区间, 旨在为烧结烟气 CO 协同脱除及竖冷窑技术的工业化应用提供理论支撑及科学参考。

1 模型构建

1.1 物理模型与基本假设

由于现阶段烧结竖冷窑实际投产案例较少,

缺乏足够的运行数据, 而干熄焦炉与烧结竖冷窑同为竖式冷却炉, 选用武钢干熄焦炉的几何尺寸作为参考, 设计简化的烧结竖冷窑模型。窑体主要由预存段、引流段、冷却段、十字风道、中心风帽和周向进风口组成, 相关参数如表 1 所示。

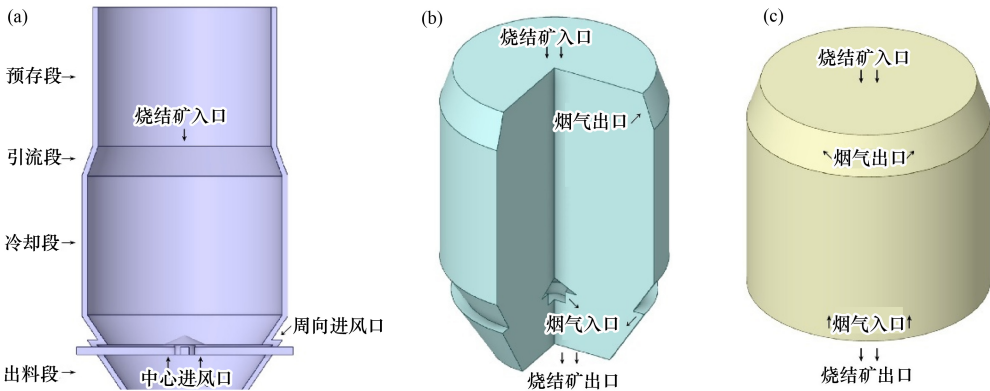
烧结竖冷窑本质上是一种气固逆流移动床。灼热的烧结矿从窑体上部进入, 依靠自身重力在窑内缓慢向下移动至出料口; 冷却气则由窑体下部鼓入, 与烧结矿形成逆向对流——在冷却烧结矿的同时, 冷却气自身吸收其显热升温, 最终从上部出风口排出。

模型构建方面, 采用软件 SpaceClaim 建立竖冷窑三维模型并提取其流体域。针对气固传质模拟, 因其尺寸模型中烧结矿颗粒数量过大(计算量过高), 而缩小模型不会显著影响气体流动规律的研究, 故按 1:10 比例缩小模型并删除十字风道部分以减轻计算负担。对于气固传热模拟, 若采用缩小模型计算会导致结果偏差过大(无法满足实际参考需求), 而原尺寸模型 CFD-DEM 耦合计算的算力需求极高(对计算机配置要求严苛), 因此仅采用 CFD 方式引入多孔介质模拟原尺寸模型的换热过程, 并尽可能缩小计算范围(仅保留引流段与冷却段区域)。竖冷窑及其流体域模型如图 1 所示。

利用软件 Meshing 对流体域进行网格划分, 并开展网格无关性测试。测试结果表明, 对应模型

表 1 烧结竖冷窑尺寸数据 m

预存段		引流段	冷却段		中心进风口		周向进风口		出料段
高度	内径	高度	高度	内径	内径	外径	内径	外径	高度
7	8	1.5	7	9	1	2	7.125	8.125	4



(a) 竖冷窑模型剖面; (b) 传质模拟流体域 (1:10); (c) 传热模拟流体域 (原尺寸)

图 1 竖冷窑物理模型示意

的最佳网格单元数分别为 810 048 和 818 447。当模型单元数高于该值时,流动及换热模拟效果的变化幅度较小,故选取这两个网格数分别作为对应模型后续模拟的最终网格数。详细网格剖分图如图 2 所示,其中流动模拟的网格中心进风口和周向进风口区域进行了加密处理。

考虑到真实烧结矿颗粒形状的复杂性、竖冷窑内堆积状态的多样性,以及烧结矿与烧结烟气物性参数随温度变化的特性,为提升数值模拟的准确性并降低计算复杂度,对竖冷窑物理模型作出假设如下。

(1) 模拟区域简化为竖冷窑圆柱体结构,划分为引流段和冷却段;其中,气体边界设定为冷却段底部入口与引流段侧端出口,固体边界设定为引流段顶部入口与冷却段底部出口。

(2) 烧结矿入料方式采用全截面均匀覆盖入料,颗粒简化为密度均匀的标准球体,直径选用当量直径,堆积方式设定为各向同性均匀排布。

(3) 烧结矿与烧结烟气的部分关键物性参数设置为随温度变化的函数关系。

(4) 忽略竖冷窑内部颗粒间的辐射换热效应,以及窑体隔热壁面的热损失。

1.2 数学模型与控制方程

为更还原真实工况,模拟过程采用 Ansys 旗下的 Fluent 与 Rocky 软件在同一工作台内进行 CFD-DEM 气固耦合模拟。考虑到烧结矿颗粒尺寸较大,CFD-DEM 耦合采用半解析法;同时,由于烧结烟气为不可压缩黏性流体的非定常流动,基于 Navier-Stokes 方程选用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟罐内气体流动。模拟过程严格遵循质量守恒、动量守恒及能量守恒原理,具体数学模型控制方程如下。

(1) 连续性方程:

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

式中: x_i 为方向向量; ρ_f 为烟气密度, kg/m^3 ; u_i 为烟气矢量流速, m/s 。

(2) 添加多孔介质损失源项的动量传输方程:

实际烧结矿料层可视作多孔介质,多孔介质引起的流体黏性损失和惯性损失可通过源项 S_i 的形式引入动量方程,从而更真实地表达移动床层内气体的动量变化,动量方程及源项的具体公式如下。

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

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

其中:

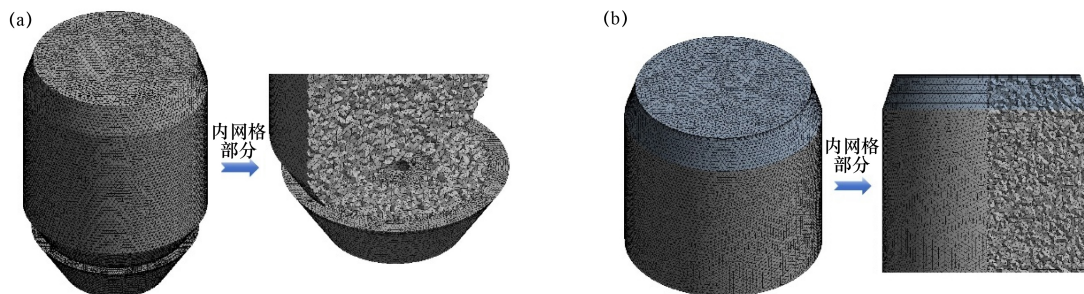
$$\frac{1}{\alpha} = \frac{85.4(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3 d_p^2} \quad (4)$$

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

式中: u_j 为烟气分向矢量流速, m/s ; P_{ij} 为表面压力, Pa ; g_i 和 f_i 分别为体积作用力和阻力, N/m^3 ; S_i 为多孔介质损失源项; μ 为烟气动力黏度, $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$; $1/\alpha$ 和 C 分别为采用 Ergun 型方程计算的料层内黏性和惯性阻力系数^[13]; ε 为料层平均孔隙率; d_p 为颗粒当量直径(颗粒实际平均直径与形状因子之积), m 。

(3) 局部非热力学平衡双能量方程:

相较于平衡方程,非热力学平衡方程更适用于颗粒床层内局部气固温度相差较大的情况,这是由于气固两相热容和热导率相差较大所决定的^[14]。该方程的本质是将烟气温度 T_f 和烧结矿温



尺寸比例: (a) 1:10; (b) 原尺寸

图 2 流体域网格剖分图

度 T_s 分别作为独立变量, 通过在模拟过程中以单位微元体内气固两相的不同热状态进行表征, 更接近现实工况。能量方程的具体公式^[15]如下。

气固能量方程:

$$(\rho c)_f u_f \cdot \nabla T_f = \varepsilon \nabla \cdot (\lambda_f \nabla T_f) + h_v (T_s - T_f) \quad (6)$$

$$(\rho c)_s u_s \cdot \nabla T_s = (1 - \varepsilon) \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T_s) - h_v (T_s - T_f) \quad (7)$$

式中: ρ_s 为烧结矿密度, kg/m^3 ; c_f 和 c_s 分别为烟气和烧结矿热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; u_f 和 u_s 分别为烟气和烧结矿表观速度, m/s ; T_f 和 T_s 分别为烟气和烧结矿温度, K ; λ_f 和 λ_s 分别为烟气和烧结矿热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; h_v 为气固对流体体积换热系数, $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ 。

体换热系数^[16]及经验公式^[17]:

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

$$Nu = \frac{h d_p}{\lambda_f} = 0.2 \varepsilon^{0.055} Re_p^{0.657} Pr^{0.333} \quad (9)$$

式中: h 为气固对流面积换热系数, $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$; Nu 为努塞尔数; Re_p 为雷诺数; Pr 为普朗特数。

(4) 烧结矿和烟气物性参数方程:

真实物质的热物性参数多为温度的函数, 因此为提高模拟准确度, 将烧结矿与烟气的重要物性参数设为随温度变化的函数。各物性参数基于实际数据, 通过元素分析法拟合, 并通过用户自定义函数 (user-defined functions, UDF) 形式植入模拟软件, 各项参数的适用温度阈值均覆盖了研究所涉及的全部温度范围。具体参数关系如下。

烧结矿参数:

$$c_s(T) \propto T \quad (10)$$

$$\lambda_s(T) \propto \frac{1}{T} \quad (11)$$

式中: $c_s(T)$ 为烧结矿热容函数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $\lambda_s(T)$ 为烧结矿热导率函数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T 为物质瞬态温度, K 。

烧结烟气参数:

$$[c_f, \lambda_f, \mu](T) \propto T \quad (12)$$

$$\rho_f(T) \propto \frac{1}{T} \quad (13)$$

式中: $c_f(T)$ 为烧结烟气热容函数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

$\lambda_f(T)$ 为烧结烟气热导率函数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; $\mu(T)$ 为烧结烟气动力黏度函数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; $\rho_f(T)$ 为烧结烟气密度函数, kg/m^3 。

1.3 仿真模式与边界条件

气体流动模拟采用 CFD - DEM 耦合方法进行仿真。流体端以流体动力学计算软件 Fluent 为终端平台, 采用隐式格式进行方程离散, 同时采用 SIMPLE 算法进行求解。固体端选用颗粒动力学计算软件 Rocky 作为链接平台, 通过调用 Fluent 中相同数据文件 (Data) 与案例文件 (Case) 进行入料模拟。待流场与颗粒场达到动态平衡后, 采用半解析法进行软件耦合。具体边界条件设置: 颗粒入口位于引流段顶部 (预存段底部), 入口直径为 0.3 m, 采用质量流量入口边界; 颗粒出口为出料段底部。气体入口包括中心进风圆环和周向进风圆环, 设置为速度入口边界; 气体出口位于引流段侧面, 设置为压力出口边界。

气固换热模拟采用 CFD 搭配 UDF 的方法实现。首先将烧结矿与烧结烟气的物性参数 (随温度变化关系) 通过 UDF 形成编写并导入 Fluent, 同时对烧结矿入料过程的动态行为进行 UDF 编码以实现模拟控制。具体边界条件设置: 竖冷窑冷却段底部设为流体入口, 采用速度进口边界; 引流段侧部设为流体出口, 采用压力出口边界。固体入口位于竖冷窑引流段底部, 采用质量流量进口边界; 固体出口与流体入口位置一致 (即冷却段底部), 设置为等质量流量出口边界。竖冷窑顶部壁面和圆柱体侧部壁面均设置为绝热壁面; 引流段区域维持微正压环境, 并保持与烧结矿入窑温度一致的气氛条件, 以确保流体与固体热源充分接触, 防止流体在冷却段发生非垂直流动。

1.4 模型验证

以武钢干熄焦炉实际运行工况为研究对象, 基于实际运行参数 (表 2) 进行换热模拟计算, 并将模拟结果与现场实测数据进行对比分析, 验证模型的有效性。模拟值与实际值的对比结果如表 3 所示。由表 3 可知: 烧结矿出口温度模拟值的相对误差为 6.18%, 空气出口温度模拟值的相对误差为 -5.51%, 误差水平满足工程精度要求, 表明模型具有较高的可靠性。

表 2 实际运行参数

矿处理量/ ($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	气料比/ ($\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$)	烧结矿入 口温度/K	空气入口 温度/K
550	1 050	873	298

表 3 模型验证对比数据 K

矿料出口温度		空气出口温度	
实际	模拟	实际	模拟
356	378	671	634

2 结果分析

换热模拟计算以某钢厂烧结工序实际调研数据为基准，以保障模拟结果的合理性。为了分析变参数条件下烧结烟气竖冷窑的传热性能，需选用一个典型模拟工况作为对照。该工况基于钢厂实际技术资料、管道内物料真实温损数据和前期烧结余热回收系统热焓计算结果构建，竖冷窑内气固物理场分析亦基于该工况的模拟结果展开，具体热工参数如表 4 所示。

2.1 传质模拟结果分析

图 3、4 分别为流固耦合计算区域的烧结颗粒填充图和 XY 截面处料层内烧结烟气的速度云图。由图 3、4 可知：气体进入窑体后因料层阻力作用流速骤减；当流动至引流段并排出时，速度逐渐回升。这是因为气体在流动过程中，越靠近料层上部压力越低，导致体积流量和流速相应增加。此外，在同一高度线上，除引流段内部及气体出口处速度变化较为剧烈外，其余位置的气体速度大小与方向基本一致，分布较为均匀；而引流段顶部区域出现速度突降现象，是因为气体在微正压环境下流动时撞击壁面，导致动量迅速衰减所致。

图 5 为流固耦合计算区域内料层内烧结烟气的速度矢量图。由图 5 可知：气体自竖冷窑底部通入后向上流动，填充料层效果良好，到达引流区前的流动轨迹变化较小。这是因为引流区气压低于冷却区，但高于气体出口区域；气体进入窑体后，在矿料孔隙中穿行时局部气压偏高，而在

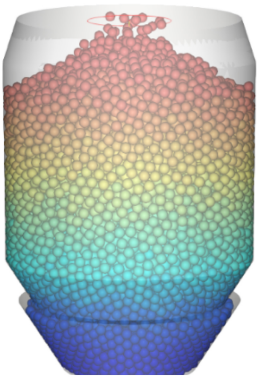


图 3 竖冷窑颗粒填充

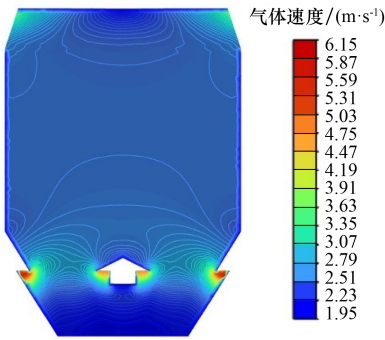


图 4 烧结烟气速度云图

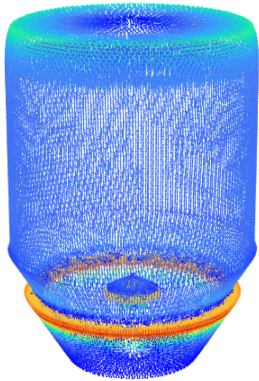


图 5 烧结烟气速度矢量

引流区低压环境的牵引作用下，流向趋于固定。

2.2 传热模拟结果分析

图 6 为流固耦合计算区域 XY 截面处料层内烧结烟气的静压力云图。由图 6 可知：随着料层高度的增加，气体静压力逐渐减小，且压降梯度（即压力随高度的变化速率）呈递增趋势。这是因为气体温度升高导致其密度变大，速度也因此变快，单位体

表 4 竖冷窑热工参数

烧结矿质量 流量/($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	冷却烟气气料 比/($\text{m}^3\cdot\text{t}^{-1}$)	烧结矿进口 温度/K	冷却烟气进口 温度/K	烧结矿颗粒直 径/m	料层 孔隙率	烧结矿真密 度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	烧结矿体积密 度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
416	1075	903	333	0.035	0.42	3 300	1 914

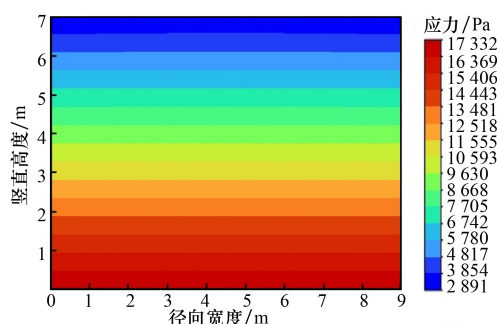


图 6 冷却段 XY 截面气体静压力云图

积内的气体静压力也随之减小, 而根据流体流动方程, 压降与速度呈正相关关系, 故其也随之变大。

图 7 为流固耦合计算区域 XY 截面处料层内烧结烟气的温度云图。由图 7 可知: 沿料层高度方向, 气体温度整体呈生升高趋势, 这是气固逆流换热的直接体现; 且越接近冷却区顶部, 气体升温速率越快, 这是由于气固间温差随高度增加而不断扩大所致。其根本原因在于气体热容与自身温度呈正相关关系——温度越高, 单位质量气体吸收相同热量时温度变化越小(即升温速率降低), 间接加剧了气固间的温差。从细节特征看, 同一水平高度上, 两侧区域升温速率高于中心区域, 这与引流段和气体出口外侧的环境压强分布密切

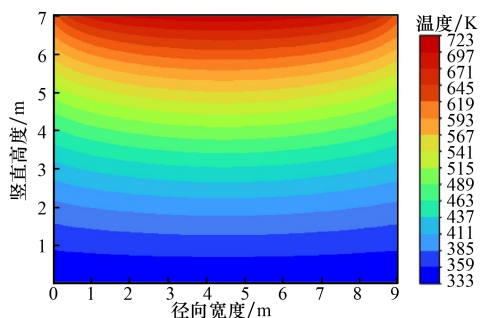


图 7 冷却段 XY 截面气体温度云图

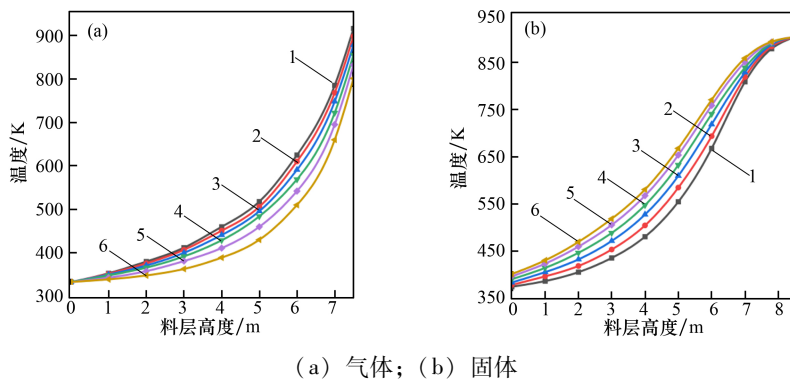
相关。由于料层内部压力整体高于引流段, 而外界压力整体低于引流段, 根据气体状态方程, 气体分子流动更易沿压力梯度方向进行; 因两侧区域压力梯度略小于中心区域, 气体流速在此处略微偏大, 从而表现为升温速率的差异。

3 影响因素分析

气固参数均以烧结烟气 CO 脱除为出发点, 因此首先以有效实验温度为参考, 设定烟气目标加热温度为 446 °C; 其次以传统冷矿输送带的极限温度 150 °C 为参考, 设定烧结矿目标冷却温度为 150 °C, 进而开展烟气净化与烧结矿冷却协同优化的数值分析。

3.1 颗粒直径对传热性能的影响

在气料比为 1 075 m³/t、烧结矿入窑温度为 903 K 及烧结烟气入窑温度为 333 K 的边界条件下, 沿竖罐内部料层由下向上, 气固两相温度随烧结矿颗粒直径变化的规律如图 8 所示。由图 8 可知: 在相同高度下, 烟气和烧结矿温度均随颗粒直径增大而减小。颗粒直径梯度为 0.045、0.040、0.035、0.030、0.025、0.020 m 时, 烟气出口温度依次为 660、695、722、748、768、785 K。这是因为颗粒直径增大导致烧结矿体积密度减小, 单位体积内中空区域增多, 烧结显热减少, 烟气在矿料孔隙中对流换热时获得的焓值降低, 因此其出口及内部温度均呈下降趋势。烧结矿出口温度对应为 401、396、390、383、378、374 K。矿料体积密度的降低意味着任意时刻竖罐内烧结矿质量减少, 在矿流量恒定条件下, 烧结矿表观位移速



(a) 气体; (b) 固体
颗粒直径/m: 1—0.02; 2—0.025; 3—0.03; 4—0.035; 5—0.04; 6—0.45。

图 8 颗粒直径对气固温度变化的影响

度提高;同时,孔隙率增大导致烟气流动的黏性阻力与惯性阻力减小,烟气流速随之上升,两者相对速度增大,最终质量更少的烧结矿与烟气进行更强的对流换热,故其出口及内部温度亦呈降低趋势。

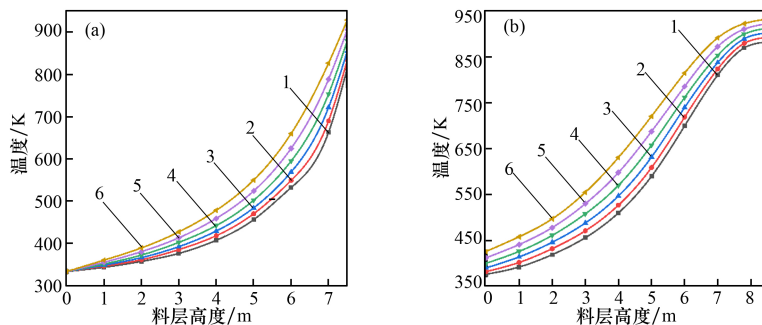
3.2 矿烟入窑温度对传热性能的影响。

(1) 热矿入窑温度对传热性能的影响

在烧结矿孔隙率为 0.41、气料比为 $1\ 075\ \text{m}^3/\text{t}$ 及烧结烟气入窑温度为 333 K 的边界条件下,沿竖罐内部料层由下向上,气固两相温度随烧结矿入窑温度变化的规律如图 9 所示。由图 9 可知:相同高度下,烟气和烧结矿温度均随烧结矿入窑温度升高而升高。烧结矿初温梯度为 933、923、913、903、893、883 K 时,烟气出口温度依次为 827、789、754、722、690、663 K。这是因为烧结矿入窑温度升高使烧结矿输入显热增加,烟气获得的焓值增大,且烟气在料层任意位置与烧结矿的温差随之扩大,强化了二者间的换热,因此烟气出口及内部温度均呈升高趋势;烧结矿出口温度依次为 426、412、400、390、382、376。在烧结矿进料流量恒定的条件下,初始温度升高显著提升了烧结矿自身显热。尽管气固间换热

因温差扩大而增强,但由于烧结烟气总输入热量不变,竖罐内任意时刻的总热焓随热矿初温升高而提高,最终导致烧结矿出口及内部温度同步升高。

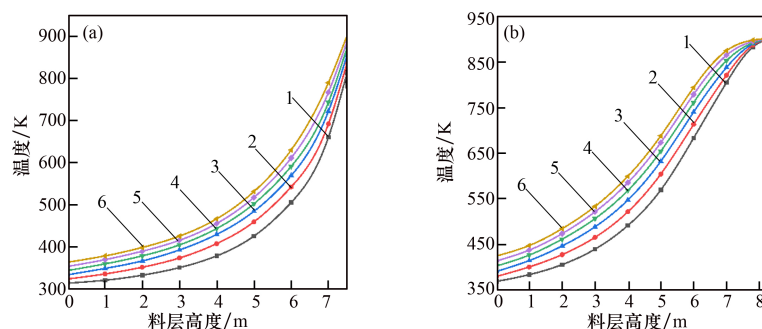
(2) 冷烟入窑温度对传热性能的影响。在烧结矿孔隙率为 0.41、烧结矿入窑温度为 903 K 及气料比为 $1\ 075\ \text{m}^3/\text{t}$ 的边界条件下,沿竖罐内部料层由下向上,气固两相温度随烧结烟气入窑温度变化的规律如图 10 所示。由图 10 可知:相同高度下,烟气和烧结矿温度均随烧结烟气入窑温度升高而升高。冷烟初温梯度为 363、353、343、333、323、313 K 时,烟气出口温度依次为 790、767、743、722、692、660 K。从竖罐内总输入热量来看,烟气初始温度升高显著提升了其总焓值,在烧结矿输入显热不变的条件下,烟气在各位置的焓值均有所提升,因此其出口及内部温度呈升高趋势;烧结矿出口温度依次为 424、413、402、390、379、368 K。由于各位置烟气温度升高导致烧结矿与烟气的温差减小,换热强度被削弱;同时,烧结矿热导率随温度升高呈下降趋势(高温时导热能力减弱),最终造成烧结矿出口及内部温度同步升高。



(a) 气体; (b) 固体

热矿初温/K: 1—883; 2—893; 3—903; 4—913; 5—923; 6—933。

图 9 热矿初温对气固温度变化的影响



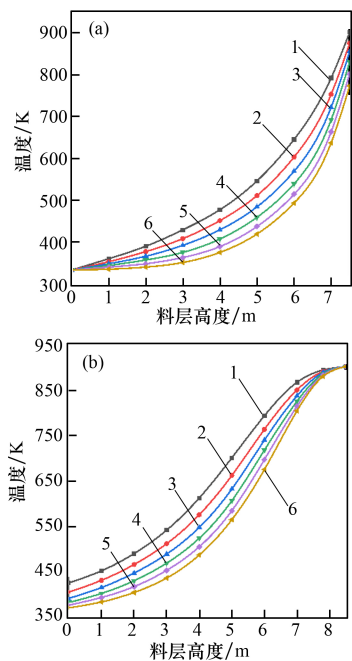
(a) 气体; (b) 固体

热矿初温/K: 1—313; 2—323; 3—333; 4—343; 5—353; 6—363。

图 10 冷烟初温对气固温度变化的影响

3.3 气料比对传热性能的影响

在烧结矿孔隙率为 0.41、烧结矿入窑温度为 903 K 及烧结烟气入窑温度为 333 K 的边界条件下, 沿竖罐内部料层由下向上, 气固两相温度随气料比变化的规律如图 11 所示。由图 11 可知: 相同高度下, 烟气和烧结矿温度均随气料比增大而减小。气料比梯度为 1 450、1 325、1 200、1 075、950、825 m^3/t 时, 烟气出口温度依次为 637、663、692、722、753、792 K。从换热强度角度来看, 当烧结矿进料流量恒定时, 气料比的提高意味着烟气入窑流速的增大, 进而导致竖罐内任意位置的烟气流速加快, 气固间换热能力增强; 但烟气与热矿的接触时间随之显著减少, 模拟结果表明, 换热效率受烟气短接触时间的影响大于其高换热系数的正向作用, 因此烟气出口及内部温度均呈降低趋势; 烧结矿出口温度依次为 369、375、381、390、404、424 K。由于烧结矿在竖罐内停留时间不变, 高速气流会加剧其热量散失, 在高速气流作用下被更强冷却, 最终导致烧结矿出口及内部温度同步降低。



(a) 气体; (b) 固体

气料比/ $(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$: 1—825; 2—950; 3—1 075;
4—1 200; 5—1 325; 6—1 450。

图 11 气料比对气固温度变化的影响

4 结 论

(1) 移动床气固逆流换热过程中, 越靠近料

层顶部, 气体温度越高; 因热膨胀效应, 气体流速随之增大; 同时, 由于料层内部与外界存在压差, 越靠近烟气出口处, 气体压力越小。受气固对流换热特性影响, 气体换热能力随高度增加而增强, 导致其升温幅度逐渐增大, 并进一步引发速度梯度与压力降的同步变化。

(2) 烧结矿料颗粒直径增大将导致单位体积热矿显热减少, 同时烟气流速提高, 进而强化烧结矿与烟气的换热强度, 并降低烟气热焓的利用效率。在本文工况下, 烧结矿颗粒直径宜控制在 0.036 m 以下。

(3) 烧结矿入窑初始温度决定了竖罐内部总烧结显热的大小。其值增大时, 料层内部各位置气固温差随之增大, 烧结矿余留的显热更多, 烟气换热强度更高且获得的热量更充足。在本文工况下, 烧结矿最佳入窑温度宜控制为 902 ~ 930 K。烧结烟气入窑初始温度的提高增加了竖罐内部烟气总输入显热, 但其作为冷源时, 料层内各位置气固温差显著降低; 同时, 由于烧结矿在高温下热导率偏低, 其热转移量减少, 而烟气的热量留存更多。在本文工况下, 烧结烟气最佳入窑温度宜控制为 332 ~ 362 K。

(4) 气料比的大小不仅反映了单位时间内烟气的流入量, 还代表了烟气流速。吨矿风量增大将直接强化烧结矿与烟气的换热强度, 同时缩短烟气在竖罐内的停留时间。在本文工况下, 烧结烟气最佳气料比宜控制为 831 ~ 1 088 m^3/t 。

参考文献:

- [1] 张宁宁. 钢铁企业烧结烟气综合治理技术[J]. 冶金管理, 2023(5): 18-20.
- [2] 毛瑞, 张涛, 邵久刚. 烧结烟气脱硫脱硝技术现状及展望[J]. 中国冶金, 2025, 35(5): 1-9.
- [3] 刘东辉, 刘涛, 孟超. 烧结烟气 CO 治理现状及减排分析[J]. 冶金能源, 2024, 43(1): 8-13.
- [4] 李洪涛. 环境空气中 CO 对健康的影响[J]. 科技资讯, 2017, 15(8): 132; 134.
- [5] 程扬, 李杰, 朱金伟, 等. 烧结烟气 CO 减排研究动态[J]. 矿产综合利用, 2022(2): 22-25.
- [6] 李杰, 杨爱民, 高彦. 一种一氧化碳处理工艺: CN202110553990.1[P]. 2022-02-08.

- [7] 王月娟,周仁贤,蒋晓原,等. ZrO_2 负载过渡金属催化剂的结构和催化性能[J]. 石油化工, 1999 (9): 588 – 592.
- [8] 蔡九菊,王建军,陈春霞,等. 钢铁企业余热资源的回收与利用[J]. 钢铁, 2007(6): 1 – 7.
- [9] 蔡九菊,董辉. 烧结过程余热资源的竖罐式回收装置与利用方法: 200910187381. 8[P]. 2011 – 01 – 05.
- [10] 董辉,李磊,刘文军,等. 烧结矿余热竖罐式回收利用工艺流程[J]. 中国冶金, 2012, 22(1): 6 – 11.
- [11] 冶飞. 环冷机密封对烧结余热回收效率影响的探讨[J]. 新疆钢铁, 2017(4): 38 – 42.
- [12] 卢红军,戚云峰. 烧结余热的基本特点及对烧结余热发电的影响[J]. 烧结球团, 2008(1): 35 – 38.
- [13] 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.
- [14] WAKAO N, FUNAZKRI T. Effect of fluid dispersion coefficients on particle-to-fluid mass transfer coefficients in packed beds[J]. Chemical Engineering Science, 1978, 33(10): 1375 – 1384.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 冯军胜,董辉,刘靖宇,等. 烧结矿余热回收竖罐内气固传热特性[J]. 化工学报, 2015, 66 (11): 4418 – 4423.