



烧结矿竖冷装置内气固运动及接触条件模拟

李承志, 张宇^a, 蒋景胜^a, 张伟

(武汉科技大学 a. 冶金与能源学院; b. 钢铁冶金与资源利用省部共建教育部
重点实验室 湖北 武汉 430081)

摘要: 烧结矿竖冷工艺是一种高效节能环保的烧结余热回收新技术, 然而该工艺在试运行阶段存在料床局部阻力过大、烧结矿冷却不均匀和余热回收率低于预期等问题。为解决上述问题, 本文采用一种解析型 CFD-DEM 方法对烧结矿竖冷装置内的气固多相流场进行高精度计算, 从本质上明确烧结矿与冷却气体之间的耦合运动行为规律, 重点分析烧结矿在竖冷装置内的堆积特性(如空隙率分布等)和运动模式, 研究冷却空气在与烧结料层逆流接触过程中的流动行为和分布规律, 分析不同区域的高精度气相流场数据(如速度场等)。结果表明: 在多通道分流布料条件下, 料床径向空隙度分布较为均匀; 料床上部烧结矿以 1.0 mm/s 左右的速度稳定下降, 形成活塞流; 装置拐角处和中心风帽上方存在颗粒滞留区; 冷却室底部和排料段内烧结矿速度显著提升, 形成漏斗流; 冷却气体在上升过程平均速度逐渐下降并向壁面方向扩散, 装置拐角处和中心风帽上方区域的气固接触条件相对较差, 可通过调整收缩段倾角、中心/周向进风流量比、中心风帽外沿倾角和尺寸等方式进行改进。研究结果可为烧结矿竖冷工艺系统的优化提供技术支撑。

关键词: 烧结矿; 竖冷工艺; 气固运动; 接触条件; 解析型 CFD-DEM

中图分类号: TF046.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)03-0026-12

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.03.039

Simulation of gas-solid movement and contact conditions in sinter vertical cooler

LI Chengzhi, ZHANG Yu^a, JIANG Jingsheng^a, ZHANG Wei

(Wuhan University of Science and Technology a. School of Metallurgy and Energy; b. Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan 430081, Hubei, China)

Abstract: The sinter vertical cooling process is a new technology for sintering waste heat recovery with high efficiency, energy saving and environmental protection, but the process has such problems in the trial operation stage as excessive local resistance of the material bed, uneven cooling of sinter and lower waste heat recovery rate compared with expectation. In order to solve the above problems, an analytical CFD-DEM method is used to calculate the gas-solid multiphase flow field in the sinter vertical cooler with high precision, essentially clarify the coupling motion behavior between the sinter and the cooling gas, focus on the analysis of the accumulation characteristics (such as porosity distribution, etc.) and motion mode of the sinter in the vertical cooler, research the flow behavior and distribution law of the cooling air in the process of countercurrent contact with the sinter bed, and analyze the high-precision gas phase flow field data (such as velocity field) in different regions. The results show that the radial porosity distribution of the material bed is relatively uniform under the condition of multi-channel split distribution. The sinter in the upper part of the media bed steadily decreases at a rate of

收稿日期: 2024-10-18; 修回日期: 2024-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52104340); 湖北省重点研发计划资助项目(2022BCA058); 中国博士后科学基金资助项目(2020M672425)

作者简介: 李承志(1989—)男, 副教授, 从事绿色低碳烧结、高炉炼铁工艺方面的研究工作。

about 1.0 mm/s forming a piston flow. There are particle retention zones at the corners of the device and above the central hood; the sinter velocity at the bottom of the cooling chamber and in the discharge section is significantly increased forming a funnel flow. The average velocity of the cooling gas gradually decreases and spreads to the wall during the ascent process, and the gas-solid contact conditions at the corner of the device and the area above the central hood are relatively poor, which can be improved by adjusting the inclination angle of the shrinkage section, the center/circumferential air inlet flow ratio and the inclination and size of the outer edge of the central hood. The results can provide a technical support for the optimization of the sinter vertical cooling process system.

Key words: sinter; vertical cooling process; gas-solid movement; contact conditions; analytical CFD-DEM

烧结工序的能源消耗约占我国钢铁工业能源消耗总量的 12%^[1], 通过回收烧结余热降低工序能耗是钢铁企业节能减排的重要方向之一。烧结余热资源主要包括烟气和烧结矿余热, 其中烧结矿余热约占余热资源总量的 70%^[2-3], 且其能量品位更高。因此, 实现烧结矿余热的高效再利用一直是烧结余热资源回收的核心问题。当前烧结矿余热资源的回收主要通过环冷机或带冷机实现, 但是这类装置的主要缺陷是漏风率较高(30%~50%)、气固热交换效率低、回收废气的热品位差异大、烟尘中颗粒物排放污染大气等^[4-6]。为此, 近期国内学者提出以气固密闭逆流换热方式为核心的烧结矿竖冷工艺及余热回收技术^[7-8]。该工艺具有气密性好(漏风率接近于零)、气固换热效率高、热废气能量品位高、颗粒污染物零排放等优势。然而, 该工艺尚未发展成熟, 根据梅钢等企业的中试结果, 其还存在烧结矿料床局部阻力过大、气流分布不均匀和部分排出的烧结矿温度过高等问题^[9-10]。

在竖冷装置内, 烧结矿与空气充分接触是保证高换热效率的重要前提。烧结矿粒度分布很广, 其在堆积过程中容易在冷却装置内产生明显的粒度偏析, 导致料床空隙率分布差异大, 料层阻力不均匀, 从而使得气固接触条件不良^[11]。若该问题无法解决, 则不利于未来竖冷工艺的发展与应用。因此, 亟须研究气固两相在逆流接触过程中的真实运动行为以及各相的动态分布特性, 为烧结矿竖冷系统内气固接触条件的优化提供理论依据。现阶段对竖冷工艺的试验研究主要集中于烧结矿在立式固定床中的宏观堆积特性和气体阻力特性^[12-15]。这类研究无法考虑烧结矿在竖冷装置内的运动行为, 也较难获得烧结矿料床的内部堆积结构以及气流在料床中的分布情况。鉴于试验

研究方法的局限性, 相关学者采用数值模拟方法对烧结矿竖冷装置内气固运动状态进行了研究。刘玮寅等^[16]模拟了竖冷装置内气体与烧结矿的接触过程, 将烧结矿料床简化为各向同性的多孔介质结构, 并假设气体为稳态达西流。该研究忽略了料床的非均匀离散性以及气体在料床内的实际流动状态, 因此模拟结果较难反映真实的气固接触情况。张思平等^[17]、孙俊杰等^[18]、祁腾飞等^[19]采用离散元法(DEM)模拟了烧结矿在竖冷装置内的运动行为, 模拟结果相对于多孔介质模型更接近真实的颗粒堆积状态。

为进一步考虑烧结矿与气体的互为运动影响, 祁腾飞等^[20]通过非解析型流体-颗粒耦合计算方法(unresolved CFD-DEM method)模拟了竖冷装置局部区域的气固两相流动行为。该方法存在最小网格尺寸限制, 难以获得高分辨率气相流场, 并且采用经验公式计算气固相之间的作用力^[21], 其数值受公式中经验常数取值、流场瞬时状态和流场计算精度的影响很大, 因此气固相之间的力一般为近似估算值^[22]。此外, 气固相之间力的计算经验公式通常是以单一颗粒为实验研究对象总结得来, 因此只适用于颗粒稀疏的气固两相系统。若将经验公式应用于颗粒稠密的气固两相系统, 模拟结果会与实际气固运动情况存在较大的差异。

相比之下, 解析型 CFD-DEM 耦合计算方法没有最小网格尺寸限制^[23], 可以获得高分辨率的气相流场, 并通过直接积分颗粒表面流场应力来计算气固相之间的力, 能够显著提升计算结果的准确度, 因此更适用于颗粒稠密的烧结矿竖冷气固多相系统。由于解析型算法的计算量很大, 目前大多应用于小尺寸且颗粒较少的气固系统, 尚无在冶金领域大规模气固系统中应用的先例。为此, 本文借助高性能计算集群首次将解析型耦合算法

应用于烧结矿竖冷气固多相系统中,以期获得更加准确的气固运动数据,为烧结矿竖冷工艺优化提供有力支撑。

1 数学模型理论

1.1 气相控制方程

气相的运动控制方程主要包括连续性方程和动量传输方程:

$$\frac{\partial(\rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{u}_f) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_f \mathbf{u}_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_f \mathbf{u}_f \mathbf{u}_f) = -\nabla P - F_f + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho_f g \quad (2)$$

式中: ρ_f 为气体密度, kg/m^3 ; \mathbf{u}_f 为气体速度矢量, m/s ; t 为时间, s ; P 为气体压强, Pa ; $\boldsymbol{\tau}$ 为黏性应力张量, Pa ; F_f 为相间作用力, N ; g 为重力加速度, m/s^2 。

1.2 固体颗粒相控制方程

固体颗粒相的运动分为平动和转动部分,其控制方程如下。

$$m_i \frac{d\mathbf{u}_i}{dt} = F_i^c + F_i^d + m_i g + F_{if} \quad (3)$$

$$I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \mathbf{T}_{ij} \quad (4)$$

式中: m_i 为颗粒 i 质量, kg ; \mathbf{u}_i 为颗粒平动速度矢量, m/s ; F_i^c 、 F_i^d 分别为颗粒所受弹性碰撞力和黏滞阻尼力, N ; $m_i g$ 为颗粒所受重力, N ; F_{if} 为流体对颗粒作用力, N ; I_i 为颗粒转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; $\boldsymbol{\omega}_i$ 为颗粒转动角速度, rad/s ; \mathbf{T}_{ij} 为接触力切向分量产生的扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。颗粒之间各类作用力和力矩的计算公式详见文献 [24]。

1.3 解析型 CFD-DEM 耦合计算方法

流体-颗粒多相耦合计算方法主要分为解析法和未解析法。未解析法要求网格尺寸为颗粒直径的 3~5 倍以上来保证流体相控制方程中空隙率的计算精度 [25-26], 然而这也使该方法难以展示颗粒尺度上的流场信息。解析法在流体相控制方程中不需要引入空隙率, 流体-颗粒相之间的作用力可直接计算为流体应力张量在流体-颗粒表面的积分:

$$F_f = \oint_{\Omega_p} \mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\sigma} dS \quad (5)$$

式中: Ω_p 是颗粒-流体的相界面, m^2 ; \mathbf{n} 是颗粒-流体相界面的外法向量, m ; $\boldsymbol{\sigma}$ 是流体在颗粒表面上的应力张量, Pa ; S 为面积单元, m^2 。对于不可压缩流体有:

$$\boldsymbol{\sigma} = -P\mathbf{I} + \boldsymbol{\tau} = -P\mathbf{I} + \mu_f(\nabla \mathbf{u}_f + \nabla^T \mathbf{u}_f) \quad (6)$$

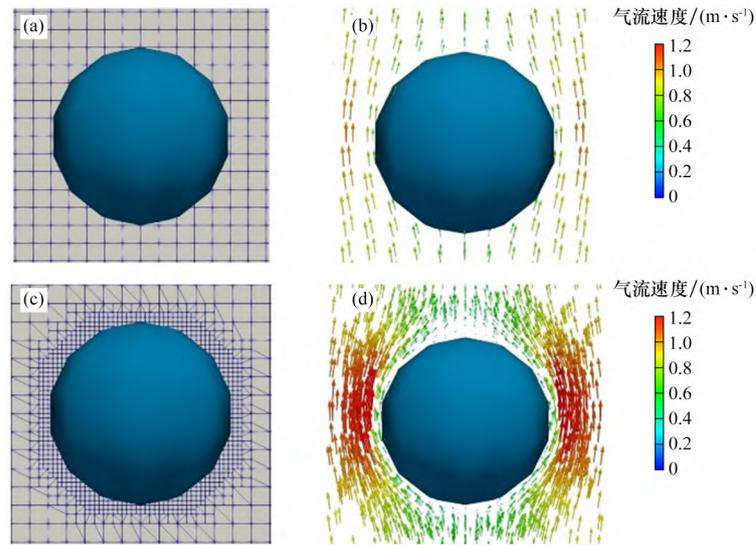
式中: \mathbf{I} 是二阶单位张量, Pa ; μ_f 为流体的有效黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

解析法可以准确地描述颗粒尺度上的流场信息,但是要求网格尺寸至少要小于颗粒直径的 1/8, 因此当颗粒数量较多时, 网格总数也会相应增加, 从而需要借助更多的计算资源。浸没边界法(IBM)是一种典型的解析型 CFD-DEM 耦合法 [27]。它的基本原理是将颗粒“浸没”到流体网格计算域中, 通过各网格单元中流体相的体积分(颗粒内部为 0, 纯流体域为 1)来表示颗粒的形状。在 IBM 算法中, 颗粒表面的流场信息(如速度、压强等)通常具有较大梯度, 因此在气固相界面处需要高密度网格来获取高分辨率的流场信息。本文使用 OpenFOAM 软件中的动态网格细化模块“dynamicFvMesh”对气固相界面处的网格进行了适当细化处理, 使细化后的网格能够适应高梯度流场区域计算, 从而更加清晰地展示相界面处的流场信息。动态网格细化技术是针对相界面处某个网格(原始尺寸为 d_0), 按照 $d_n = (1/2)^n d_0$ 算法进行分割细化, 其中 n 为分割次数, 原网格会被分解为 2^n 个细化网格, d_n 为分解 n 次后每个细化网格的尺寸。单一颗粒附近网格细化前后及对应速度矢量流场效果演示如图 1 所示。

2 模拟研究方法

2.1 烧结矿竖冷装置模型

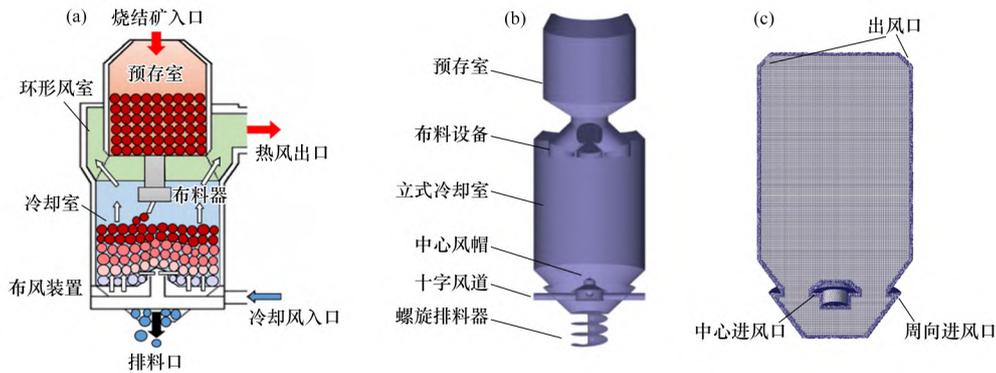
本文以焦炭干熄炉为参考设计烧结矿竖冷装置, 其主要结构包括预存室、布料器、冷却室、布风装置和排料设备等, 如图 2(a) 所示。在模拟烧结矿运动的 DEM 模块中, 竖冷装置的几何模型如图 2(b) 所示, 其中布料器设计为倾斜式多口管道结构, 目的是减弱烧结矿在冷却室内的偏析程度。在模拟冷却气体运动的 CFD 模块中, 冷却室



(a) 细化前网格; (b) 网格细化前流场; (c) 细化后网格; (d) 网格细化后流场

图 1 单一球形颗粒附近网格细化示例及颗粒表面速度矢量流场对比

Fig. 1 Example of mesh refinement and comparison of velocity vector field around single sphere



(a) 烧结矿竖冷装置示意图; (b) DEM 模块中竖冷装置几何模型; (c) CFD 模块中流体区域及网格划分

图 2 烧结矿竖冷装置设计图及各计算模块中所建立模型

Fig. 2 Design of vertical sinter cooling furnace and its models in each module

对应的计算域如图 2(c) 所示, 其中气体分别由中心进风口和周向进风口流入, 出风口与图 2(a) 所示的环形风室相连接。流体计算域的初始网格数为 246 万个, 其中大部分为六面体网格。为减少耦合计算负担, 模型相比于中试规模竖冷装置做了适当缩小, 其中冷却室直径为 1.0 m, 料床设计高度为 1.25 m, 烧结矿质量流率设计为 10 kg/s, 冷却空气总流量设计为 6 m³/s。

2.2 主要参数及边界条件设置

为获得烧结矿的粒度分布, 从某企业炼铁厂随机选取一批烧结矿(约 70 kg)进行筛分试验。筛分结果显示, 烧结矿的粒度主要集中在 10 ~ 50 mm 范围内, 质量分数达 75%。另一方面, 为减少壁

面效应对烧结矿在冷却室中堆积和运动过程的影响, 冷却室直径与烧结矿直径之比应不小于 20, 因此烧结矿的直径上限也设定在 50 mm。综合以上分析, 本文采用 10 ~ 50 mm 的烧结矿作为研究对象, 并参考相关试验方法^[28-29]测量烧结矿的关键物性参数(表观密度、摩擦系数等), 得到烧结矿具体粒度分布及主要物性参数如表 1 所示。

在 DEM 模型中, 按表 1 所示粒度分布(各粒度范围内每个烧结矿的直径为随机值)在预存室内分批次下落烧结矿; 当堆积高度达到约 0.5 m 时, 打开位于预存室下方的布料设备, 通过倾斜多口管道下落烧结矿至冷却室中并堆积形成立式料床; 当料床高度接近 1.5 m 时, 打开排料口, 以一定的

表 1 DEM 模型中烧结矿的粒度分布及颗粒的主要物性参数

Table 1 Particle size distribution and main physical parameters of sinter applied in the DEM model

粒度/ mm	粒级质量 分数/%	颗粒的主要物性参数								
		$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	E/GPa	$\mu_{s,pp}$	$\mu_{s,wp}$	$\mu_{r,pp}$	$\mu_{r,wp}$	σ	$e_{r,pp}$	$e_{r,wp}$
10~20	16.2	3.68	1.78	0.52	0.44	0.41	0.32	0.25	0.20	0.42
20~30	45.8	3.61	1.75	0.55	0.46	0.39	0.31	0.25	0.22	0.40
30~40	20.3	3.58	1.68	0.53	0.47	0.38	0.34	0.25	0.21	0.39
40~50	17.7	3.56	1.62	0.53	0.45	0.43	0.33	0.25	0.22	0.40

注: ρ 为表观密度; E 为弹性模量; $\mu_{s,pp}$ 为颗粒-颗粒摩擦系数; $\mu_{s,wp}$ 为颗粒-壁面摩擦系数; $\mu_{r,pp}$ 为颗粒-颗粒滚动摩擦系数; $\mu_{r,wp}$ 为颗粒-壁面滚动摩擦系数; σ 为泊松比; $e_{r,pp}$ 为颗粒-颗粒恢复系数; $e_{r,wp}$ 为颗粒-壁面恢复系数。

角速度旋转位于排料口下方的螺旋排料器, 通过螺旋排料器排出冷却室底部的烧结矿。当排料过程持续一个周期后(即烧结矿从进入冷却室至排出冷却室), 冷却室内烧结矿的堆积和运动过程达到相对稳定的状态。

在 CFD 模型中分别设置中心进风口和周向进风口为速度入口、出气口为压力出口、容器壁面为无滑移边界条件。中心进风口的内、外环半径分别为 0.08 m 和 0.144 m, 面积为 0.045 m²; 周向进风口的内、外环半径分别 0.41 m 和 0.33 m, 面积为 0.186 m²。根据空气流量分配比和各自风口面积计算得到中心、周向进风口的速度, 设置出口压力为微负压。当烧结矿运动过程达到稳态后, 将 DEM 颗粒信息导入 CFD 模块, 并完成颗粒附近网格的初始细化, 随后开始耦合计算。CFD-DEM 耦合计算流程如图 3 所示, 主要模拟参数如表 2 所示。

本文模拟的计算环境是 Ubuntu 22.04 操作系统, DEM 模块和 CFD 模块分别通过开源软件 LIGGGHTS 和 OpenFOAM 执行计算过程, 耦合计算通过 CFDEM® coupling 开源软件实现。计算硬件资源主要包括 AMD EPYC7452 处理器(64 核心、主频 2.35 GHz) 和 1.0 TB 内存(DDR4 2 933 MHz)。

2.3 解析型 CFD-DEM 耦合算法验证

为验证解析型 CFD-DEM 耦合模型的准确性,

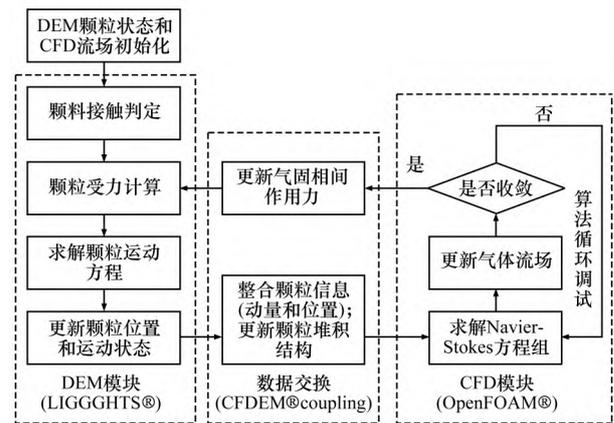


图 3 CFD-DEM 耦合计算模型框架示意

Fig. 3 Schematic diagram of the coupled CFD-DEM computational model framework

开展相关试验用于对比分析。由于烧结矿竖冷装置比较复杂, 直接测量料床内部的气固运动情况比较困难。经过综合考量后, 最终选择以烧结矿立式固定床为对象进行模型验证。原因有两点: ① 在竖冷装置内气相运动速度(1~5 m/s) 远大于烧结矿运动速度(1~5 mm/s), 因此在忽略烧结矿运动的前提下, 可以将竖冷装置内部的烧结矿料床看作立式固定床; ② 试验重点是检验气体在流经烧结矿料床时气固相之间的接触情况(包括接触面积和气固相之间的力等) 是否与真实情况相接近, 而这可以通过测量气体流经固定床的压降来大致判断。基于以上分析, 建立实验室规格的烧

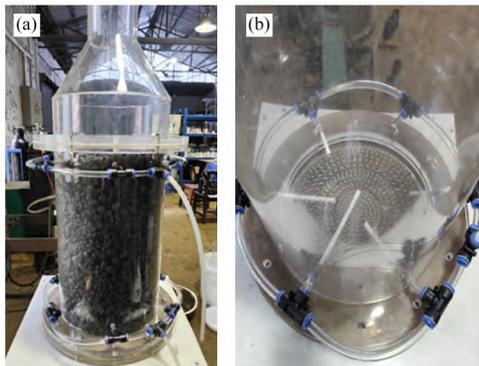
表 2 CFD-DEM 耦合计算过程主要相关参数

Table 2 Main parameters for CFD-DEM coupled calculation

颗粒数量	网格细化后数量	中心、周向进 风流量分配比	空气运动黏度/ ($m^2 \cdot s^{-1}$)	布料管道		时间步长/s	
				倾角/(°)	数量	DEM 模块	CFD 模块
105 800	$7.35 \times 10^6 \sim 8.18 \times 10^6$	1:3.5	1.5×10^{-5}	45	4	1×10^{-5}	1×10^{-4}

结矿立式固定床模型, 并开展相关验证工作。

烧结矿立式固定床实验台如图 4 所示, 其主要由固定床、鼓风机、涡街流量计、补偿式微压计组成。固定床直径为 0.27 m, 料床堆积高度为 0.5 m。鼓风空气经由流量计从固定床底部布风板进入。容器内设有高度差为 0.4 m 的压力引出孔, 并在两个测量面上各埋入 6 个不同深度的压力导管。各导管在固定床外部相通并连接到微压计的一端, 确保测量值为截面处的真实压强。烧结矿的粒度范围为 10 ~ 25 mm。在试验过程中, 空气流量范围设定为 80 ~ 400 Nm³/h (间隔为 80 Nm³/h), 并测量对应流量下的料床压降。相应地, 采用解析型 CFD-DEM 方法建立相同尺寸的烧结矿固定床模型, 在固定床内随机生成 10 ~ 25 mm 的颗粒并堆积至 0.5 m 高度, 最后在不同鼓风量条件下计算料床的阻力压降。

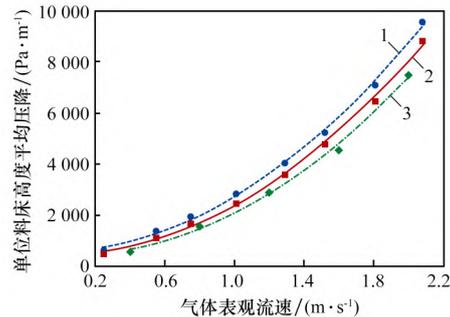


(a) 烧结矿立式固定床实验台;
(b) 冷却段内部压力导管布局

图 4 实验室规格烧结矿立式固定床压降测量试验装置
Fig. 4 Pressure measurement device of lab-scale vertical sinter fixed bed

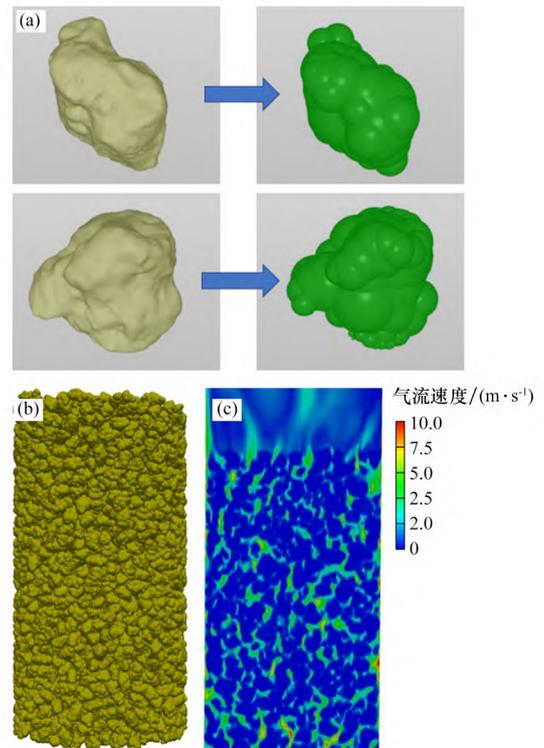
单位料床高度压降的模拟值与实验测量值对比如图 5 所示。由图 5 可以看到, 模拟计算与试验测量压降均随气体表观流速的增大呈“抛物线”型上升, 两者的变化趋势保持一致。当气体表观流速相同时, 模拟压降会略高于试验值, 主要原因是烧结矿颗粒模型没有多孔结构, 因此气体无法从其内部通过, 只能沿颗粒表面绕流, 压力阻损相对较大。此外, 为考虑烧结矿非规则形貌对料床堆积结构和气固相之间力等参数的影响, 采用多重球体组合法建立非规则烧结矿颗粒模型, 并对非规则颗粒料床的压降进行模拟计算, 将计

算结果与原模拟结果、试验测量结果进行对比, 如图 6 所示。由图 6 可见, 非规则颗粒料床的压降模拟值与试验测量结果更加接近, 说明非规则烧结矿颗粒模型可以提高 CFD-DEM 耦合计算的精度。相比于球形颗粒, 非规则烧结矿颗粒不仅能够反映更加真实的堆积特性, 而且也使气固两相



1—模拟结果(球形颗粒); 2—模拟结果(非规则颗粒);
3—试验测量结果

图 5 单位料床高度压降模拟值与试验测量值对比
Fig. 5 Comparison of simulated and experimental pressure drop per unit sinter bed height



(a) 非规则烧结矿颗粒模型; (b) 立式固定床堆积结构;
(c) 料床内气体流场分布

图 6 非规则烧结矿颗粒模型应用于立式固定床模拟研究
Fig. 6 Irregular sinter model applied to the simulation of vertical sinter fixed bed

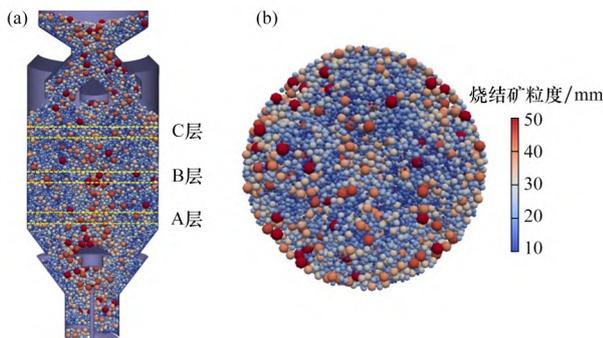
的接触情况更接近于现实,从而提高气固相之间力的计算精度。然而,由于非规则颗粒的运算量非常大,因此目前仅在立式固定床的验证工作中进行尝试。在下一步工作中,计划借助高性能计算集群将非规则烧结矿颗粒模型应用于竖冷装置内的气固耦合计算。综上所述,采用解析型 CFD-DEM 耦合方法得到的模拟结果与试验测量结果比较接近,从而验证该方法的准确性。

3 模拟结果与讨论

3.1 烧结矿堆积特性

烧结矿在冷却室内的堆积特性(如径向粒度分布和空隙度分布等)对排料过程中烧结矿的运动模式和气固接触状态有显著影响。孙俊杰等^[18]研究了布料方式对烧结矿粒度偏析的影响,认为将布料喉管由单通道竖直改为多通道分流后,烧结矿在冷却室内的偏析情况可以得到明显改善,并且料床的有效高度也有所增加。该方法也是目前中试阶段经常使用的一种布料方法。

在多通道分流布料条件下,烧结矿料床内部纵切面和堆尖料面区域的粒度分布情况如图 7 所示。由图 7 可见,在该布料条件下,各分流管道下方均形成了高度约为 0.15 m 的料堆,后续下落的烧结矿经过料堆斜面后自然滚动堆积,形成了初始的料床结构。在径向方向上(从料床中心线至壁面),小粒度烧结矿主要集中于料床的中段区域



(a) 冷却室内部堆积结构(纵切面);
(b) 堆尖料面粒度分布(俯视图)

图 7 多通道分流布料条件下烧结矿料床内部纵切面及堆尖料面区域的粒度分布

Fig. 7 Size distributions in the vertical cross section and top surface of sinter packing formed under multiple inclined feeding condition

(即料堆所在的径向位置),大粒度烧结矿主要集中于料床中心区域,这种堆积结构能使小颗粒在径向分布相对均匀,避免小颗粒在料床中心区域集中堆积,造成该区域的平均空隙度过小,影响气流与烧结矿的热交换效率。

为进一步分析烧结矿料床的堆积结构,分别在冷却室高度为 0.4~0.5 m、0.7~0.8 m 和 1.0~1.1 m 的区间内提取三个料层(A、B、C 层),对所提取料层的径向粒度分布和空隙度分布进行分析。图 8(a) 展示了三个料层的径向平均粒度分布情况,其中采用的平均粒度定义为索特平均直径:

$$d_{sv} = \frac{\sum_1^N n_i d_i^3}{\sum_1^N n_i d_i^2} \quad (7)$$

式中: d_{sv} 表示索特平均直径, m; N 为选择料层内烧结矿颗粒的总数; n_i 表示直径为 d_i 的烧结矿颗粒个数。

由图 8(a) 可见: 由料床中心线至中段区域,烧结矿平均粒度沿径向逐渐下降; 由中段至近壁面区域,烧结矿平均粒度变化相对比较平稳,仅

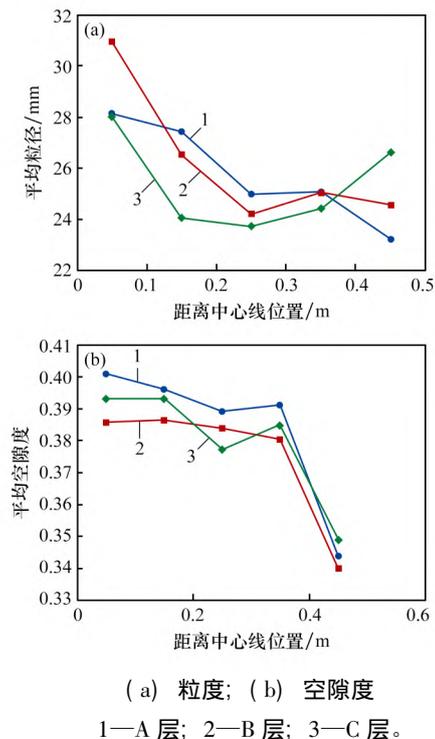


图 8 料床不同高度料层中烧结矿径向粒度分布和径向空隙度分布情况

Fig. 8 Radial size and voidage distributions in the selected layers at different heights of sinter packing

在近壁面处随料层高度的变化产生了一定的浮动。各料层整体径向粒度分布比较一致,即中心区域烧结矿平均粒度相对较大,小粒度烧结矿广泛分布于中段和近壁面区域。

各料层的径向平均空隙度分布情况如图8(b)所示。由图8(b)可见,受烧结矿径向粒度分布的影响,料床中心及中段区域的空隙度较高(0.38~0.40)。一方面,烧结矿在料床中心区域的平均粒度较大,因此容易形成大空隙结构;另一方面,尽管在中段区域烧结矿的平均粒度较小,但是该区域的小粒度颗粒比较集中,因此整体粒度范围偏窄,不容易产生大空隙内包裹小颗粒的渗透现象。相比之下,在近壁面区域不同粒度的烧结矿混合堆积,容易产生渗透现象,从而降低了该区域的平均空隙度。烧结矿料床内部空隙度的分布情况如图9所示。

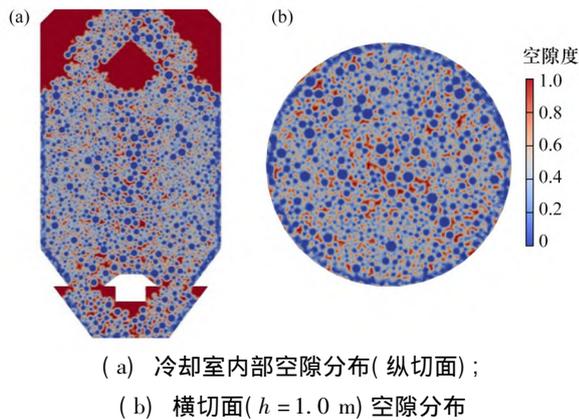


图9 多通道分流布料条件下烧结矿料床内部纵切面及横切面空隙度分布

Fig. 9 Voidage distributions in the vertical and horizontal cross sections of sinter packing formed under multiple inclined feeding condition

3.2 烧结矿运动模式

在稳定排料过程中,冷却室内烧结矿速度分布如图10所示。由图10可见,在冷却室上部,烧结矿以约 1.0 mm/s的速度缓慢下降,速度分布相对均匀,形成类似活塞流的运动模式。当烧结矿下降至中段时,其径向速度分布开始发生变化,主要表现为中心区域速度显著提升。这种变化主要受到下方排料运动的影响。在冷却室底部(即排料通道上方)烧结矿的移动速度会显著提升,但是中心风帽的存在限制了底部中心区域颗粒的竖直

下移,因此该区域上方的烧结矿会偏转下移方向,形成图10(a)中黄线标注的运动区域。当烧结矿达到冷却室下部时,其平均速度进一步增大,径向速度分布相对均匀。在竖冷装置拐角处,烧结矿的运动速度显著减小,形成局部滞留区域。当烧结矿达到冷却室底部时,由于壁面与中心风帽所围成的通道截面积逐渐减小,因此烧结矿的下降速度也逐渐提升,形成漏斗流的运动模式。另一方面,在同一高度的中心风帽附近,烧结矿的速度仅有 $2 \sim 3$ mm/s,是典型的局部滞留区。在冷却室底部与螺旋排料器之间的排料段内,由于其横截面积不断减小,烧结矿流动形成了漏斗流。

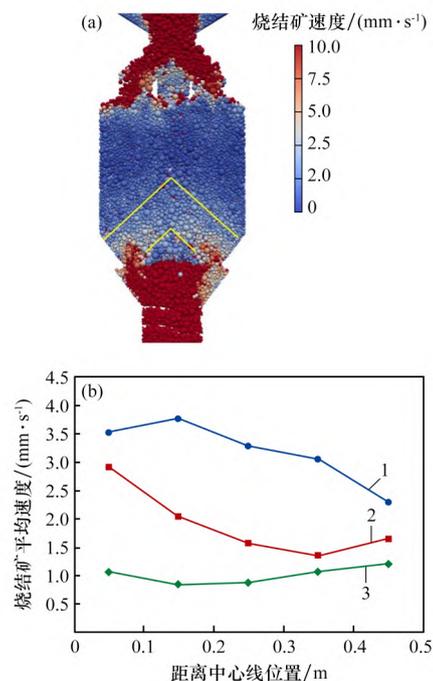


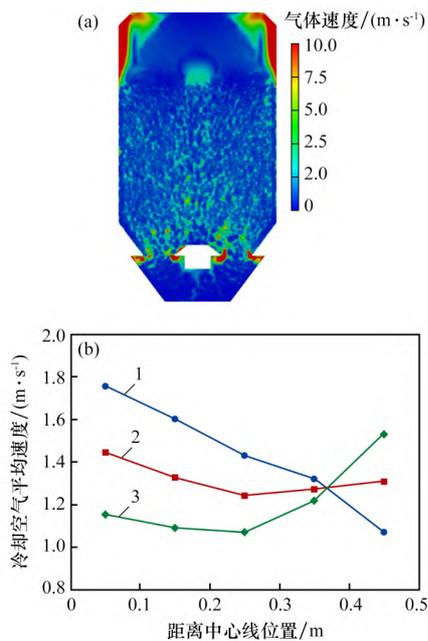
图10 稳态排料过程中立式冷却装置内烧结矿速度分布情况

Fig. 10 Sinter velocity distribution in the vertical sinter cooler during steady discharging process

3.3 冷却空气流场分析

在料床堆积结构和烧结矿运动模式的影响下,冷却空气在冷却室内的速度分布情况如图11所示。由图11可见,当冷却空气分别由中心和周向进风口进入冷却室时,其平均流速均超过 10 m/s。随着这两部分气体在冷却室底部汇合并与缓慢下

降的烧结矿接触,其平均流速减小至 $1 \sim 2 \text{ m/s}$ 。冷却气体在上升过程中会与烧结矿持续进行动量交换,因此其整体速度会逐渐下降。在 $0.4 \sim 0.5 \text{ m}$ 的高度区间内(A层),受该处料床结构的影响,气流速度由中心区域至近壁面区域逐渐下降($1.8 \text{ m/s} \rightarrow 1.1 \text{ m/s}$)。在 $0.7 \sim 0.8 \text{ m}$ 的高度区间内(B层),冷却气体的平均速度下降至约 1.3 m/s ,同时由于冷却室下部中心区域的部分高速气体会在上升时逐渐向壁面方向扩散(图12),因此在B层近壁面处的气体速度会有所升高,导致整体径向速度分布比较均匀。在 $0.7 \sim 0.8 \text{ m}$ 的高度区间内(C层),冷却气体的整体速度进一步下降至 1.2 m/s 左右,但是近壁面区域的气体速度保持上升,最终在料床上方与出气口之间形成局部高速流场。该流场的形成也与出气口附近的速度流场有关,在此暂不做详细讨论。



(a) 冷却室气流速度分布(纵切面);
(b) 冷却空气径向速度分布
1—A层; 2—B层; 3—C层。

图 11 竖冷装置内冷却空气的速度分布情况

Fig. 11 Cooling air velocity distribution in the vertical sinter cooler

3.4 局部气固接触条件分析

解析型 CFD-DEM 算法的优势在于模拟结果能够清晰显示颗粒尺度上的流场信息,从而为分析多相系统内局部区域的气固接触状态提供数据支

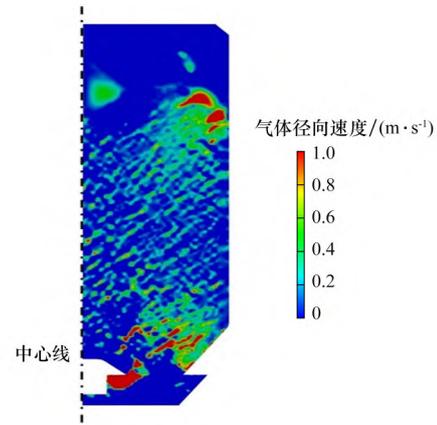


图 12 竖冷装置内部冷却空气的径向分速度流场(部分区域)

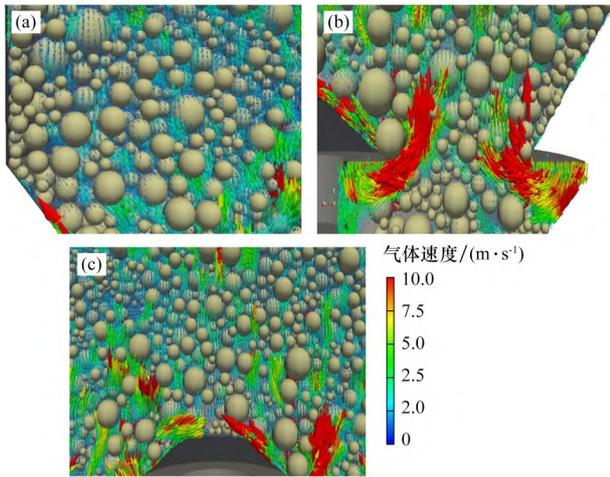
Fig. 12 Radial air velocity distribution in the vertical sinter cooler (partial region)

持。本文以烧结矿竖冷装置三个局部区域为例进行简要探讨。图13(a)显示了竖冷装置拐角区域的气固接触情况。由3.2节中烧结矿速度分布可知,拐角区域的烧结矿运动速度较低,属于颗粒滞留区,同时由于进入冷却室的气流也无法在短时间内沿径向扩散到此处,因此气固接触条件较差,烧结矿与气体的热交换速率较慢,影响了气固系统的整体换热效率。鉴于此,需要通过调整收缩段倾角、中心与周向进风的流量比等参数来实施优化工作。

图13(b)显示了冷却空气入口附近的气固接触情况。当冷却空气分别由中心和周向进风口鼓入后,其在冷却室底部迅速汇合形成高速气流,随后扩散进入烧结矿料床。此处烧结矿已经处于气固热交换末期,在与冷却气流完成接触后,由下部排料段排出竖冷装置。值得注意的是,若平均粒度超过一定数值,烧结矿可能会在通道最窄处造成堵塞。因此需要根据竖冷装置的结构设计严格控制烧结矿的粒度分布。如有必要,需在进入竖冷装置之前对烧结矿进行二次破碎。

图13(c)显示了中心风帽上方区域的气固接触情况。受到中心风帽结构的影响,进入料床的冷却气体大部分会直接向上流动并沿径向逐渐扩散,仅有少部分气体沿风帽表面上升后与风帽上方的烧结矿接触。相比于同高度的邻近区域,风帽上方的平均气流速度较低,而且该处的烧结矿运动速度也较低,因此是局部气固接触条件较差

的位置。为解决该问题,可以适当增加中心风帽外沿的倾角并尽量减小风帽结构的尺寸。



(a) 冷却室拐角处气固接触; (b) 进气口汇流处气固接触; (c) 中心风帽上方气固接触

图 13 竖冷装置内不同局部区域烧结矿与冷却空气的接触条件

Fig. 13 Contact conditions between sinters and cooling air in different local areas of vertical sinter cooler

3.5 两种 CFD-DEM 耦合算法对比

将非解析型和解析型 CFD-DEM 耦合计算方法在烧结矿竖冷装置中的应用算例进行对比,得到竖冷装置内料床空隙度分布和气体速度场分布的模拟结果如图 14、15 所示。由图 14 可知,采用非解析型算法得到的空隙度分布具有较低的分辨率,因此无法获得各局部区域精确的空隙度数值,进而影响了气固相之间力的计算准确度。当采用解析型算法时,结合动态网格细化方法,每个烧结矿的颗粒边界都可以被精准捕捉并且颗粒之间的空隙结构也可以清晰地展示,这为颗粒边界附近流场应力张量的积分计算提供了重要的基础条件,保证了气固相之间力的计算准确度。由图 15 可知,在非解析型算法中气体流动速度为网格内颗粒与流体运动速度的计算平均值,因此流场无法显示出被烧结矿颗粒所占据的区域(气体理论速度为零)。相比之下,在解析型算法中,由于气体在料床中的分布是离散的,因此对应的速度流场也显示出离散特性,即被烧结矿颗粒所占据位置的气体流速显示为零,这种分布更加符合真实的流场分布状态。此外,采用解析型算法得到的气体流场模拟结果也能够比较直观地显示料床

内烧结矿与冷却气体的接触情况,从而有助于快速判断各局部区域是否存在气固接触不良的问题。

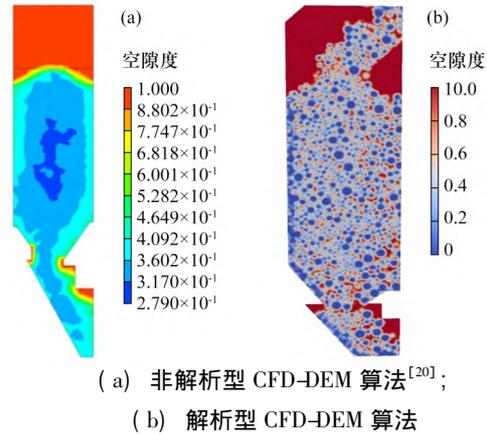


图 14 非解析型和解析型 CFD-DEM 算法在烧结矿竖冷装置中空隙度模拟结果对比

Fig. 14 Comparison between the simulated voidage results obtained from the applications of unresolved and resolved CFD-DEM coupling methods to vertical sinter cooler

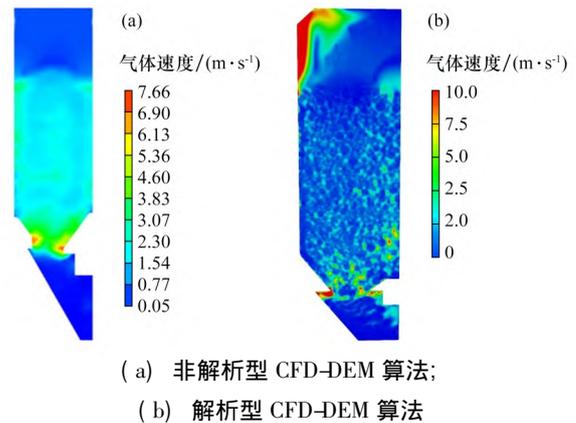


图 15 非解析型和解析型 CFD-DEM 算法在烧结矿竖冷装置中气体速度流场模拟结果对比

Fig. 15 Comparison between the simulated gas velocity distributions obtained from the applications of unresolved and resolved CFD-DEM coupling methods to vertical sinter cooler

综上,相比于非解析型耦合算法,解析型耦合算法不仅可以提供更加精确的空隙度分布数据,而且气体流场分布也更符合实际情况,可以为竖冷装置内气固接触条件的判断提供更加丰富的数据支持。

4 结论

(1) 在多通道分流布料条件下,烧结矿的平

均粒度从中心到壁面区域逐渐减小;料床空隙度在中心及中段区域分布较为均匀,但在近壁面区域出现较明显的下降。

(2) 在稳定排料过程中,料床上部烧结矿以 1.0 mm/s 左右的速度下降。受中心风帽和排料段影响,料床中下部形成了局部高速运动区;在装置拐角处和中心风帽上方存在颗粒滞留区;在冷却室底部和排料段内,烧结矿速度提升并形成漏斗流。

(3) 冷却气体在料床内上升过程中,其平均速度逐渐下降并且逐渐向壁面方向扩散运动,在装置拐角处和中心风帽上方局部区域的气固接触条件相对较差。

(4) 装置拐角处与中心风帽上方区域的气固接触条件相对较差,可通过调整收缩段倾角、中心/周向进风流量比、中心风帽外沿倾角和尺寸等方式进行改进;排料段通道最窄处可能会造成堵塞,需要严格控制烧结矿的粒度分布。

(5) 相对于非解析型耦合算法,解析型耦合算法可以显示更加精确的空隙度分布,而且气流场分布也更符合实际情况,对烧结矿竖冷技术的优化工作具有积极意义。

参考文献:

- [1] 戚义龙,黄世来,余正伟,等.持续降低烧结工序能耗的关键协同技术开发与应用[J].烧结球团,2023,48(4):110-118;126.
QI Yilong, HUANG Shilai, YU Zhengwei, et al. Development and application of key synergistic technologies continuously reducing energy consumption in sintering process[J]. Sintering and Pelletizing, 2023, 48(4): 110-118; 126.
- [2] 李建军,邵雁,熊劲,等.烧结工序节能减排技术研究综述[J].烧结球团,2022,47(5):95-101.
LI Jianjun, SHAO Yan, XIONG Jin, et al. Research review on energy saving and emission reduction technology in sintering process[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(5): 95-101.
- [3] 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 & Steel, 2011, 46(11): 93-98.
- [4] 刘传鹏,李国俊,林文佳,等.环冷机余热回收与利用系统的能量分析[J].钢铁,2015,50(12):60-66.
LIU Chuanpeng, LI Guojun, LIN Wenquan, et al. Energy analysis of waste heat recovery and utilization system for ring cooler[J]. Iron & Steel, 2015, 50(12): 60-66.
- [5] 董辉,赵勇,蔡九菊,等.烧结-冷却系统的漏风问题[J].钢铁,2012,47(1):95-99.
DONG Hui, ZHAO Yong, CAI Jiuju, et al. Leakage of sintering-cooling system[J]. Iron & Steel, 2012, 47(1): 95-99.
- [6] 张震,温荣耀,廖继勇,等.烧结矿双级冷却工艺及设备技术研发与应用[J].烧结球团,2024,49(4):101-106.
ZHANG Zhen, WEN Rongyao, LIAO Jiyong, et al. Research and application of two-stage cooling process and equipment technology for sinter[J]. Sintering and Pelletizing, 2024, 49(4): 101-106.
- [7] 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].2009-09-15.
CAI Jiuju, DONG Hui. Vertical type recycling device and utilization method of waste heat resource during sintering process: 200910187381.8 [P]. 2009-09-15.
- [8] 张玉柱,赵斌,张尉然.一种可高效回收烧结矿显热的立式烧结矿冷却机:20091007451.6[P].2009-06-23.
ZHANG Yuzhu, ZHAO Bin, ZHANG Weiran. A type of vertical sinter cooling device capable of efficiently recycling sinter sensible heat: 20091007451.6 [P]. 2009-06-23.
- [9] 仲园.梅钢烧结竖冷炉运行实践[J].冶金动力,2021,40(2):79-82;85.
ZHONG Yuan. Operation practice of sintering vertical cooling furnace in Meishan steel[J]. Metallurgical Power, 2021, 40(2): 79-82; 85.
- [10] 孙俊杰.梅钢烧结矿竖冷炉工艺的运行状况和分析[C]//2020年全国炼铁生产技术会暨炼铁学术年会.重庆:中国金属学会,2020:364-368.
SUN Junjie. Operation status and analysis of vertical sinter cooling technology in Meishan Steel [C]//2020 National Conference of Ironmaking Production Technology & Annual Academic Conference of Ironmaking. Chongqing: Chinese Society of Metals, 2020: 364-368.
- [11] 祁腾飞,黄军,张永杰.烧结矿竖式冷却工艺应用难点及机制研究进展[J].钢铁研究学报,2021,33(7):557-565.

- QI Tengfei ,HUANG Jun ,ZHANG Yongjie. Application difficulties and mechanism research progress of sinter vertical cooling process [J]. Journal of Iron and Steel Research 2021 33(7) :557 – 565.
- [12] 冯军胜,张晟,赵亮,等. 烧结矿竖罐内气固换热? 传递特性[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(12):4443–4453.
- FENG Junsheng,ZHANG Sheng,ZHAO Liang, et al. Exergy transfer characteristics of gas solid heat transfer in sinter vertical tank [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2021,52(12):4443–4453.
- [13] 李含竹,高建业,冯军胜,等. 烧结矿余热回收竖罐内料层阻力特性实验研究[J]. 钢铁研究学报,2018,30(1):8–13.
- LI Hanzhu,GAO Jianye,FENG Junsheng, et al. Experimental study on resistance characteristics in vertical tank for recovering sinter waste heat [J]. Journal of Iron and Steel Research 2018 30(1):8–13.
- [14] FENG J S,ZHANG S,DONG H, et al. Frictional pressure drop characteristics of air flow through sinter bed layer in vertical tank [J]. Powder Technology 2019 344:177–182.
- [15] ZHANG S Z,WEN Z,LIU X L, et al. Experimental study on the permeability and resistance characteristics in the packed bed with the multi-size irregular particle applied in the sinter vertical waste heat recovery technology [J]. Powder Technology 2021 384:304–312.
- [16] 刘玮寅,鄢曙光,吴浪,等. 烧结矿竖罐式冷却过程数值模拟[J]. 矿产保护与利用,2018,38(4):63–68.
- LIU Weiyin,YAN Shuguang,WU Lang, et al. Numerical simulation of cooling process in vertically-arranged sinter coolers [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources 2018 38(4):63–68.
- [17] 张思平,张震,温荣耀,等. 烧结立式冷却机流场数值模拟研究[J]. 烧结球团,2017,42(6):19–21;33.
- ZHANG Siping,ZHANG Zhen,WEN Rongyao, et al. The flow field simulation research of sintering vertical cooler [J]. Sintering and Pelletizing 2017 42(6):19–21;33.
- [18] 孙俊杰,张永杰,徐曩. 烧结矿竖冷炉内物料的偏析[J]. 钢铁,2020,55(3):16–22.
- SUN Junjie,ZHANG Yongjie,XU Ji. Segregation of sinter particles in sinter shaft cooler [J]. Iron & Steel,2020,55(3):16–22.
- [19] 祁腾飞,黄军,孙俊杰,等. 竖冷炉内烧结矿运动行为的离散元模拟[J]. 钢铁研究学报,2022,34(3):239–247.
- QI Tengfei,HUANG Jun,SUN Junjie, et al. Flow behavior of sinter in shaft cooler with DEM simulation [J]. Journal of Iron and Steel Research 2022 34(3):239–247.
- [20] QI T F,LI H F,SUN J J, et al. Simulation of gas-solid flow in sinter vertical cooling furnace [J]. Journal of Iron and Steel Research International 2023 30(11):2133–2142.
- [21] BATISTA J N M,SANTOS D A,BÉTTEGA R. Determination of the physical and interaction properties of sorghum grains: Application to computational fluid dynamics-discrete element method simulations of the fluid dynamics of a conical spouted bed [J]. Particuology 2021 54:91–101.
- [22] MAO J,ZHAO L H,DI Y T, et al. A resolved CFD-DEM approach for the simulation of landslides and impulse waves [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 2020 359:112750.
- [23] APTE S V,MARTIN M,PATANKAR N A. A numerical method for fully resolved simulation (FRS) of rigid particle-flow interactions in complex flows [J]. Journal of Computational Physics 2009 228(8):2712–2738.
- [24] KOU M Y,WU S L,WANG G, et al. Numerical simulation of burden and gas distributions inside COREX shaft furnace [J]. Steel Research International,2015,86(6):686–694.
- [25] 蔡国庆,刁显锋,杨芮,等. 基于 CFD-DEM 的流-固耦合数值建模方法研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报,2024,56(1):17–32.
- CAI Guoqing,DIAO Xianfeng,YANG Rui, et al. Research progress of fluid-solid coupling model based on CFD-DEM coupling [J]. Journal of Harbin Institute of Technology 2024 56(1):17–32.
- [26] 姚鹏,王远,冒刘鹏,等. CFD-DEM 模型最优网格尺寸的理论推证[J]. 泥沙研究,2023,48(5):1–7;34.
- YAO Peng,WANG Yuan,MAO Liupeng, et al. Theoretical validation on the optimal mesh size of CFD-DEM model [J]. Journal of Sediment Research,2023,48(5):1–7;34.
- [27] KIM W,CHOI H. Immersed boundary methods for fluid-structure interaction: A review [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow 2019 75:301–309.

(下转第 69 页)

- GUO Xingwei ,WANG Juan ,XU Yanhui , et al. The calculation and ascertain of critical-grade for the exploitation of polymetallic deposit[J]. China Mining Magazine 2008 ,17(3) :63 -64; 68.
- [8] 贾文龙,陈甲斌. 低品位铁矿资源开发经济性分析[J]. 金属矿山 2009(3):1-4;83.
JIA Wenlong ,CHEN Jiabin. Economic analysis of the exploitation of low-grade iron ore resources [J]. Metal Mine 2009(3):1-4;83.
- [9] 王英杰. 铁尾矿在建筑材料领域应用的研究进展[J]. 陶瓷 2022(9):9-13.
WANG Yingjie. Research progress on the application of iron tailings in the field of construction materials [J]. Ceramics 2022(9):9-13.
- [10] 刘畅. 铁尾矿制备多孔材料的应用基础研究[D]. 长沙:中南大学 2023.
LU Chang. Applied basic research of porous material derived from iron tailings [D]. Changsha: Central South University 2023.
- [11] 张祖刚,许继龙,欧张文. 梅山细粒湿尾特性及资源化利用研究[J]. 现代矿业 2021 37(9):1-4;24.
ZHANG Zugang ,XU Jilong ,OU Zhangwen. Study on fine grain wet tailings characteristics of Meishan and discussion on its resource utilization [J]. Modern Mining , 2021 37(9):1-4;24.
- [12] 郝淑慧. 梅山矿业:全力推进全生命周期“无废矿山”建设[N]. 中国冶金报 2024-09-11(5).
HAO Shuhui. Meishan Mining: To promote the construction of “waste free mine” in the whole life cycle [N]. China Metallurgical News 2024-09-11(5).

(上接第19页)

- [33] YANG B ,HUANG Q ,CHEN M D ,et al. Mn-Ce-Nb-O_x/P84 catalytic filters prepared by a novel method for simultaneous removal of particulates and NO [J]. Journal of Rare Earths 2019 37(3):273-281.
- [34] 徐慕涛,支晓欢,计雯钰,等. PTFE@SMCC-8/P84-HCl 滤料的制备与性能研究[J]. 化工新型材料, 2022 50(10):214-219;225.
XU Mutao ,ZHI Xiaohuan ,JI Wenyu ,et al. Study on preparation and performance of PTFE@SMCC-8/P84-HCl filter material [J]. New Chemical Materials 2022 , 50(10):214-219;225.
- [35] 陆胜勇. 垃圾和煤燃烧过程中二噁英的生成、排放和控制机理研究[D]. 杭州:浙江大学 2004.
LU Shengyong. Mechanism and experimental study on PCDD/Fs formation ,emission and control during Solid Waste and coal combustion processes [D]. Hangzhou: Zhejiang University 2004.
- [36] 马云峰. 铈基催化剂低温降解氯苯和二噁英机理研究[D]. 杭州:浙江大学 2023.
MA Yunfeng. Study on the catalytic degradation mechanism of chlorobenzenes and PCDD/Fs over cerium-based catalysts at low temperature [D]. Hangzhou: Zhejiang University 2023.
- [37] DVORÁK R ,CHLAPEK P ,JECHA D , et al. New approach to common removal of dioxins and NO_x as a contribution to environmental protection [J]. Journal of Cleaner Production 2010 ,18:881-888.
- [38] FINO D , RUSSO N , SARACCO G , et al. A multifunctional filter for the simultaneous removal of fly-ash and NO_x from incinerator flue gases [J]. Chemical Engineering Science 2004 ,59:5329-5336.
- [39] 赵国东,李青梅,张玲,等. 国产聚酰胺亚胺纤维滤料在水泥窑粉尘治理上的应用[J]. 水泥 2018(2):56-58.
ZHAO Guodong ,LI Qingmei ,ZHANG Ling , et al. Application of domestic polyimide fiber filter material on dust pollution control of cement kiln [J]. Cement 2018 (2):56-58.
- [40] 邱娟. 锰基催化剂催化降解二噁英及催化滤料性能研究[D]. 杭州:浙江大学 2022.
QIU Juan. Catalytic destruction of PCDD/Fs over Mn-based catalysts and performance of catalytic filters [D]. Hangzhou: Zhejiang University 2022.

(上接第37页)

- [28] LI C Z ,MORENO-ATANASIO R ,O’DEA D , et al. Experimental study on the physical properties of iron ore granules made from Australian iron ores [J]. ISIJ International 2019 59(2):253-262.
- [29] WANG D ,SERVIN M ,BERGLUND T , et al. Parametrization and validation of a nonsmooth discrete element method for simulating flows of iron ore green pellets [J]. Powder Technology 2015 283:475-487.