

烧结矿竖冷炉内物料流动的优化

李海峰^{1,2}, 祁腾飞², 张永杰², 邹宗树^{1,2}

(1. 东北大学 多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;

2. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为改善梅钢竖冷炉内物料流动,提出了边缘-中心混合布料的优化措施,并使用离散单元法分析该措施对竖冷炉内的物料速度分布以及运动流型的改善效果.结果表明,边缘-中心混合布料能够将颗粒速度分布,从现有中间单一布料方式的边缘区速度较小而中间区和中心区速度较大,改为边缘区和中心区速度较大,而中间区速度较小;同时将物料运动流型从原来的“U”型变为“—”型;并将颗粒下移的最小整体流指数,从原来的0.645增加至0.762,从而提高炉内物料流动的“整体流”程度.但该布料方式也会造成中间区大颗粒偏析严重.可尝试调整边缘和中心下料管的相对高度,以平衡物料流动的改善和偏析的增加.

关键词: 竖冷炉;烧结矿;流型;整体流;离散单元法

中图分类号: TF 046

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2025)01-0044-09

Optimization of Material Flow in Sinter Vertical Cooling Furnace

LI Hai-feng^{1,2}, QI Teng-fei², ZHANG Yong-jie², ZOU Zong-shu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ecological Metallurgy of Multimetallic Mineral (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LI Hai-feng, E-mail: lihf@smm.neu.edu.cn)

Abstract: In order to improve the material flow in the vertical cooling furnace of Shanghai Meishan Iron and Steel Co., Ltd., the optimization measures of edge-center combined charging are proposed, and the discrete element method (DEM) is used to analyze the improvement effect of this measure on the material velocity distribution and flow pattern in the vertical cooling furnace. The results show that the edge-center combined charging can change the velocity distribution law from the low-velocity in the sidewall area and high-velocity in the middle area and center area to high-velocity in the sidewall area and center area and low-velocity in the middle area. At the same time, the material flow pattern is changed from the original “U” type to “—” type. The minimum mass flow index of particles moving down is increased from 0.645 to 0.762, which improves the “mass flow” degree of material flow in the furnace. However, this charging method will cause serious segregation of large particles in the middle area. It is suggested to try to adjust the relative height of the edge and center charging pipes to balance the improvement of material flow and the increase of segregation.

Key words: vertical cooling furnace; sinter; flow pattern; mass flow; discrete element method (DEM)

烧结矿显热竖式回收工艺^[1]的核心设备是竖式冷却炉,简称为竖冷炉,其内部气固的逆流换热(高温烧结矿与低温冷却气体)直接决定着烧结矿的冷却效果和显热回收率.从本质上讲,竖

冷炉属于移动填充床范畴.受移动床结构、壁面粗糙度以及颗粒性质等因素的共同作用,炉内物料流动行为通常有3种不同的形式,即整体流式、漏斗流式和过渡流式^[2].整体流式,炉内所有的物

料均处于运动之中,无明显流动死区.颗粒的进入和排出顺畅,符合“先进先出”的原则.漏斗流式,炉壁区域存在严重的流动死区,此时颗粒流动区域主要集中在出口的正上方,符合“先进后出”的原则.过渡流式,物料流动形式介于整体流和漏斗流之间.反应器上部为整体流,下部为漏斗流,且2种流动存在流动边界^[3].竖冷炉内物料的流动不仅决定了料层粒径以及空隙率分布的更新,还影响着热矿入炉以及冷矿出炉的顺畅性.当物料流动不畅,出现漏斗流时,炉内部分区域近似形成流动死区.该区域内颗粒下移速度慢,更新时间长,破坏了截面颗粒下移速度的均匀性.导致该区域内已被冷却的颗粒不能及时排出炉外,进而形成无效冷却区,使得炉内有效换热空间相对减小.不仅浪费了冷却气体,降低了气体利用率,而且会导致出口处排矿温度升高,冷却气体温度降低,造成竖冷炉的换热效率下降.因此,应尽量提高竖冷炉内物料流动的整体性,避免在竖冷炉内形成漏斗流.

移动床内设置改流体是一种简单而有效改善物料流动的方法.Volpato等^[4]和Härtl等^[5]分别通过模拟和实验研究了筒仓内添加锥形改流体后,物料运动流型在卸料过程中的变化情况,发现锥形改流体能够将原来的漏斗流变成整体流.Wójcik等^[6]研究了沙砾筒仓内物料在无改流体以及加装双锥型、叠锥型、倒锥型改流体条件下,排料时沙砾的运动流型.发现无改流体时,物料呈典型的漏斗流,流动通道较窄.加入改流体后,物料流动通道变宽,且变宽程度与改流体的类型有关,其中倒锥型改流体对物料流型的改善效果最显著,物料最接近整体流.Chung等^[7]研究了锥型、横板型、BINSERT、空心圆柱和空心筒仓型改流体对 Fe_2O_3 颗粒在筒仓周期性排料和加料过程中流动行为的影响,发现使用前3种改流体时,颗粒径向和纵向的速度更加均匀,有利于提高颗粒流动的整体性.Ding等^[8]发现在半顶角固定时,双锥改流体能够将筒仓内颗粒运动流型从中心流改为整体流,同时还能够增大实现整体流所需的半顶角.虽然改流体能够改善移动床内物料的流动,但适宜的改流体结构以及最佳安装位置往往与移动床的炉型结构和尺寸有关,并不具备通用性.这就限制了改流体在工业设备中的大规模应用.

除安装改流体外,颗粒自身性质^[9-10]以及物料堆积方式^[11-12]也会对物料流动产生影响.王学

文等^[9]对煤仓卸料时煤散料流动特性进行了分析,发现煤粉含水率越低,壁摩擦因数越小,煤料流态越接近整体流.Balevičius等^[10]也发现降低摩擦系数可以使颗粒物料流型从漏斗流转变为整体流.Babout等^[11]使用X射线成像方法研究了移动床中卸料流型变化情况,发现物料初始堆积紧密容易产生漏斗流,而堆积松散则容易产生过渡流.Tian等^[12]则研究了初始料面高度对卸料过程中物料运动流型的影响,发现初始料层高度较高时,物料容易形成过渡流,而初始料层高度较低时,则易形成漏斗流.烧结矿竖冷炉的入炉物料粒度分布在0~150 mm,使得炉内充满了粒径大小各异的烧结矿颗粒,下移时颗粒间碰撞作用较强,速度朝向均匀性较差^[13],不利于形成整体流.文献[14]指出梅钢竖冷炉内当物料流动达到稳态时,位于炉腔边缘区域和中心风帽上方区域的烧结矿颗粒呈现更新缓慢的现象,这2处区域形成准静止区.基于此,本文从物料堆积方式的角度出发,利用不同尺寸颗粒流动性不同,同时结合现有炉型结构,尝试将现有的中间单一布料改为边缘-中心混合布料,以改变竖冷炉内物料的初始分布和下移模式,减少颗粒流动死区,提高颗粒流动的整体性,从而优化竖冷炉内物料流动,以期为竖冷炉的优化设计提供理论依据.

1 DEM模型的建立

1.1 物理模型

以梅钢竖冷炉单料仓为研究对象,详细的炉型结构尺寸见文献[15].为简化计算并降低计算成本,对料仓进行切片处理,厚度为最大颗粒粒径的5倍(750 mm),并忽略其他辅助设备,从而得到准三维扁平模型.现有中间单一布料以及边缘-中心混合布料如图1所示.为保留烧结矿粒度分布广的特征并兼顾计算成本,将烧结矿入炉粒度下限提升至10 mm.对于粒度小于10 mm的颗粒,并入10~25 mm粒度段内.

根据梅钢竖冷炉实际生产情况确定物料各粒度段所占质量分数,段内烧结矿的粒径则随机生成.详细的粒度分布如表1所示.通过堆密度和休止角实验结果^[16]标定模拟所需的参数,见表2.本文的模拟过程为:首先在烧结矿颗粒虚拟生成面中以一定速率生成烧结矿颗粒,并在重力作用下,沿2种下料管自由下落并落入竖冷炉腔中,当颗粒填充于整个炉腔和下料管时,终止颗粒生

成.然后设置炉料从炉底振动给料机处(未画出)开始排料的过程.通过调节颗粒生成速率和排料速率,使得炉腔和下料管内始终有颗粒填充.待物料下移到达稳定状态后,停止模拟过程,并进行数据整理,为降低前后壁面摩擦对颗粒下移带来的影响,本文统计计算域中心3倍颗粒最大粒径共计450 mm厚区域内的颗粒信息.

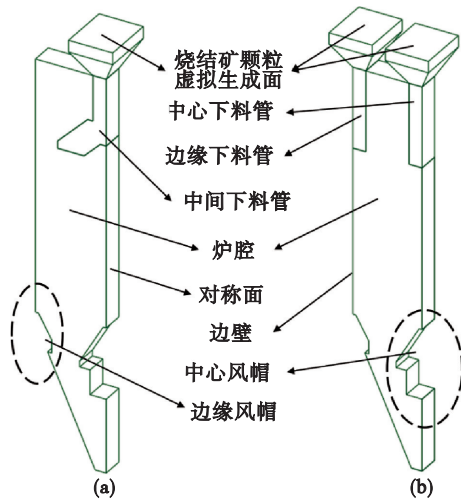


图1 2种布料方式对比

Fig. 1 Comparison of two charging methods

- (a)—现有中间单一布料方式;
(b)—边缘-中心混合布料方式.

表1 烧结矿粒度组成

Table 1 Sinter size composition

粒径范围/mm	10~25	>25~40	>40~80	>80~150
质量分数/%	20	35	30	15

1.2 数学模型

竖冷炉内烧结矿颗粒堆积紧密,且颗粒的体积质量远大于冷却气体的体积质量,因此气体对颗粒下移速度的影响可忽略不计^[17-19].采用Hertz-Mindlin经典力学软球模型描述炉内颗粒的运动行为,其平动-转动控制方程:

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (\mathbf{F}_{cn,ij} + \mathbf{F}_{dn,ij} + \mathbf{F}_{ct,ij} + \mathbf{F}_{dt,ij}) + m_i \mathbf{g}, \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \sum_{j=1}^{k_i} (\mathbf{T}_{ij} + \mathbf{M}_{ij}). \quad (2)$$

式中: m_i 为颗粒 i 的质量,kg; \mathbf{v}_i 为颗粒 i 的平动速度,m/s; t 表示时间,s; k_i 为颗粒 i 周围接触的颗粒数量; $m_i \mathbf{g}$ 为颗粒 i 的重力,N; $\mathbf{F}_{cn,ij}$, $\mathbf{F}_{dn,ij}$, $\mathbf{F}_{ct,ij}$ 及 $\mathbf{F}_{dt,ij}$ 分别为颗粒 i 与颗粒 j 之间的法向接触力、法向阻尼力、切向接触力及切向阻尼力,N; I_i 为颗粒 i 的转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$; $\boldsymbol{\omega}_i$ 为颗粒 i 的转动角速度,rad/s; \mathbf{T}_{ij} 和 \mathbf{M}_{ij} 为颗粒 i 与颗粒 j 间所受的切向力扭矩和滚动摩擦力扭矩, $\text{N}\cdot\text{m}$.式中所有力及扭矩的具体表达式参见文献[20-21].

表2 物性参数

Table 2 Physical property parameters

参数	泊松比	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	剪切模量/Pa	恢复系数	滑动摩擦系数	滚动摩擦系数
烧结矿	0.25	2.6×10^3	3.5×10^7	—	—	—
壁面	0.3	7.8×10^3	7×10^{10}	—	—	—
烧结矿-烧结矿	—	—	—	0.25	0.38	0.08
烧结矿-壁面	—	—	—	0.2	0.45	0.16

2 结果与讨论

2.1 模型验证

根据梅钢竖冷炉单料仓实际尺寸,按10:1比例缩小搭建一套实验室尺度的实验装置.该装置主要由储料仓、气动阀门、下料管、炉腔、料仓、中心风帽、风管、球阀和支架组成.其中炉腔部分为钢结构和亚克力壁面,高度为860 mm,炉腔水平尺寸为500 mm×500 mm.炉腔之上为下料管,下部为中心风帽及装有通风管道的风帽支架,如图2a所示.通过该装置进行物料流动实验,并与数值模拟结果比较以验证DEM模型的准确性.其中DEM模拟使用的参数亦通过实验用烧结矿的

堆密度和休止角实验进行标定.首先,通过储料仓和下料管将烧结矿在炉腔堆积至一定高度,然后在料层表面附近放置示踪粒子以记录烧结矿的运动轨迹.然后调节装置下部的球阀控制颗粒以一定速率下降120 s.最终得到的实验结果和模拟结果如图2b,图2c所示.从整体来看,颗粒下降轨迹十分接近,均呈炉腔中心区颗粒下移距离长,而边缘区颗粒下移距离短分布.分别提取示踪颗粒纵向坐标的平均值以定量比较实验和模拟结果的颗粒轨迹,如图2d所示.结果发现颗粒位置分布相近,且纵坐标最大误差为5.2%,从而证明了使用上述DEM模型研究烧结矿颗粒流动的准确性和可靠性.

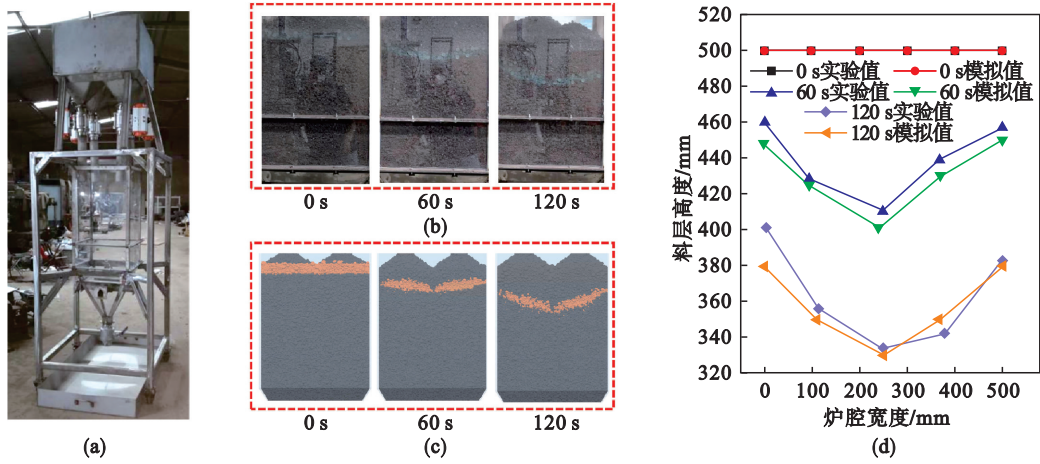


图 2 模型验证装置及结果对比

Fig. 2 Model validation device and result comparison

(a)—实验装置; (b)—实验结果; (c)—模拟结果; (d)—颗粒下移轨迹对比.

2.2 烧结矿速度分布

排料过程中,竖冷炉内烧结矿的速度一直处于波动之中^[16].尽管在炉内相同高度、不同宽度的位置上,颗粒的速度存在差异,但在同一时刻内,颗粒的变化趋势是一致的.也就是说炉内颗粒速度的相对大小是确定的.因此当烧结矿的流动达到稳态时,可选择该状态下烧结矿的速度进行研究以分析对比炉内不同区域颗粒的速度分布.

为定量描述颗粒速度的分布情况,将炉腔沿半径方向(x 轴)划分为 5 列,沿竖直高度方向(z 轴)划分 8 行,形成 40 个局部空间,其尺寸大小为 $480\text{ mm} \times 640\text{ mm} \times 450\text{ mm}$,如图 3 所示.

稳态时,烧结矿颗粒速度分布如图 4a,图 4b 所示.定义同一高度平面上,某局部空间内颗粒的平均速度与该平面上的平均速度之比为局部空间的相对平均速度 v_{mr} ,计算公式为

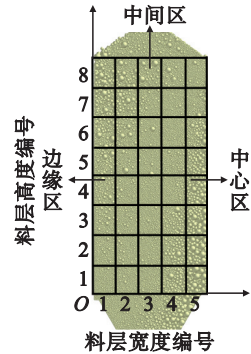


图 3 炉腔局部空间划分

Fig. 3 Local space division

$$v_{mr} = v_{mi} / \left(\frac{\sum_{i=1}^5 v_{mi}}{5} \right). \quad (3)$$

式中, v_{mi} 为编号 i 局部空间的平均速度, m/s .

烧结矿的流动达到稳定状态下炉腔颗粒的 v_{mr} 分布如图 4c 所示.由图 4c 可以看出,现有中间单一布料方式时,颗粒的 v_{mr} 在边缘区较小,为

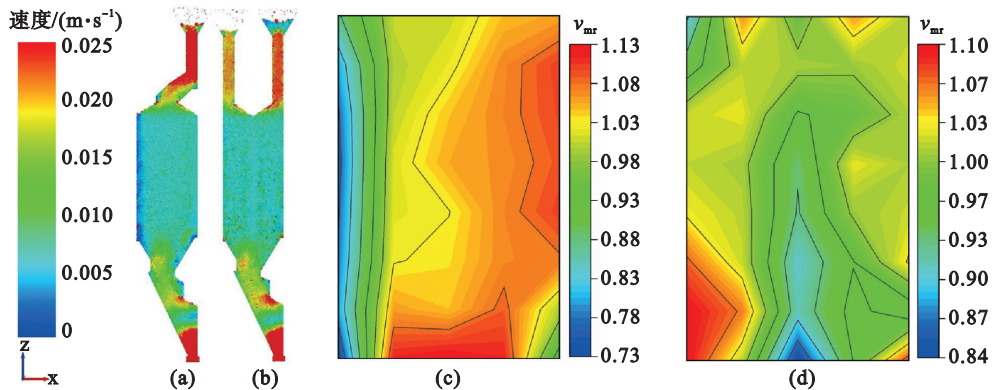


图 4 烧结矿颗粒速度及相对平均速度分布

Fig. 4 Distribution of sinter particle velocity and relative average velocity

(a)—现有中间单一布料的颗粒速度分布; (b)—边缘-中心混合布料的颗粒速度分布;

(c)—现有中间单一布料的颗粒相对平均速度分布; (d)—边缘-中心混合布料的颗粒相对平均速度分布.

0.7~0.8.随着局部空间从边缘区逐渐向中心区延伸, v_{mf} 也逐渐变大.在料层中上部, v_{mf} 在中心区取得最大值 1.1.而在料层下部, v_{mf} 在中间区取得最大值 1.13.这是因为在料层下部,中心风帽对中心区下部的颗粒产生阻碍,从而使得颗粒下移速度降低;而中间区直接与渐缩的下料通道相连接,因此颗粒速度升高.总体来看,颗粒的 v_{mf} 呈边缘区较小、中间区和中心区较大的分布.

由图 4d 可以看出,对于边缘-中心混合布料,烧结矿的 v_{mf} 分布规律发生大幅改变.在宽度方向上, v_{mf} 在中间区较小,为 0.8~0.9,而在边缘区和中心区较大,为 1.0~1.1.这是因为采用边缘-中心混合布料后,炉腔中间区成为左右两侧料堆的交界面,使得该区域内的颗粒受到左右两侧物料的挤压和摩擦作用增加,从而降低了颗粒下移速度.在高度方向上,边缘区颗粒速度随着料层高度的降低逐渐升高,而中间区和中心区则基本相反.这是因为在炉腔底部,颗粒即将进入宽度逐渐变窄的下料通道.而边缘-中心混合布料使得边缘区和中心区分布有较多的小颗粒.由于结构不同,中心风帽对颗粒的阻碍作用大于边缘风帽,这就使得边缘区的颗粒更容易进入下料通道,而中间区和中心区颗粒速度受到抑制,最终使得边缘区下方颗粒 v_{mf} 逐渐增大,并取得最大值 1.1;而中间区和中心区下部颗粒 v_{mf} 逐渐降低,并在中间区下部取得最小值 0.84.

2.3 烧结矿运动流型

为了追踪烧结矿的流动形态,需要在排料开始前对炉内物料进行标识,本文的标识规则为在竖直方向上间隔相同距离将相同料层厚度的烧结矿颗粒标记为黑色示踪粒子.研究发现,当排料时间达到 100 s 时,初始时刻的最上层黑色烧结矿颗粒基本下移至其下一层黑色颗粒的位置,此时使用白色对最上层的烧结矿颗粒进行重新标记.此后每间隔 100 s,就使用新的不同颜色标记最上层颗粒.研究发现,采用现有中间单一布料方式时,排料时间为 900 s 时竖冷炉内烧结矿的流动形态与排料时间为 800 s 时基本相同,而排料时间为 1 000 s 时的运动流型与 900 s 时亦差别不大.因此认为排料时间 900 s 时,烧结矿颗粒流动达到稳定状态.对于边缘-中心混合布料,发现排料间隔时间从 100 s 下降为 82 s,并且烧结矿颗粒下移在很短时间内即可达到稳定状态.这是因为使用边缘-中心混合布料后,烧结矿边缘下移低速区基本消失,使得烧结矿的下移速度整体

增加,因此缩短了下移相同料层厚度所用的时间间隔.

为使初始烧结矿全部排出炉腔,将其排料时间设置为 838 s.由此得到 2 种布料方式下,烧结矿的运动流型如图 5 所示.由图 5a 可知,现有中间单一布料方式下炉内存在 3 种流动区:①烧结矿颗粒在炉腔边缘区域和中心风帽上方区域更新缓慢,上述 2 个区域形成准静止区;②处于炉腔中间区和中心区的烧结矿颗粒速度较大且下降均匀,此区域的物料形成活塞流区;③处于下料通道内的物料因通道宽度变窄造成炉料聚集,进而形成了汇聚流区.整个料层近似呈“U”型下降.而边缘-中心混合布料时,沿水平方向,边缘区颗粒下移距离稍小于中间区和中心区,但总体上颗粒下移距离一致,即烧结矿基本能够呈“—”型均匀下降,如图 5b 所示.这是因为采用边缘-中心混合布料后,颗粒流动稳定时,有相当数量的小颗粒分布在炉腔边缘区和中心区,而大颗粒则分布在中间区.由烧结矿颗粒相对平均速度分布可知,边缘区下部颗粒速度较大,这意味着该区域内的小颗粒下移并未受到抑制,而是通过渗透作用进入了炉腔中间大颗粒区.这也就降低了边缘风帽对其上方颗粒下移的阻碍作用,从而使得边缘区颗粒的下移得到改善.在炉腔下部,中心区颗粒速度虽小于边缘区,但仍大于中间区,这就使得中心风帽壁面附近颗粒下移也得以改善.当然,由于边壁的摩擦作用,边缘区颗粒的下移距离仍略小于中间区和中心区.对于中间区的大颗粒,虽然处于下料通道正上方,但由于风帽段和锥型段始终填充有烧结矿颗粒,消除了大颗粒自由运动的自由空间,因此,大颗粒不会加速下落,而是随着其下方物料的移动而被动移动.尽管相对来说颗粒下移速度较低,但由于颗粒粒径较大,颗粒移动的距离可以通过大粒径来弥补,从而使得中间区料层的下移距离基本与边缘区和中心区一致.此时,炉内的流动区域可分为矩形炉腔内的活塞流区以及下料通道内的汇聚流区.

2.4 烧结矿“整体流”流动程度

引入整体流指数^[22-23] I_{mf} 来定量表征烧结矿流动的“整体流”程度.计算公式如下:

$$I_{mf} = \frac{v_{m,\min}}{v_{m,\max}} \quad (4)$$

式中, $v_{m,\min}$ 和 $v_{m,\max}$ 分别为同一料层高度平面内,局部空间 v_{mi} 的最小值和最大值,m/s.

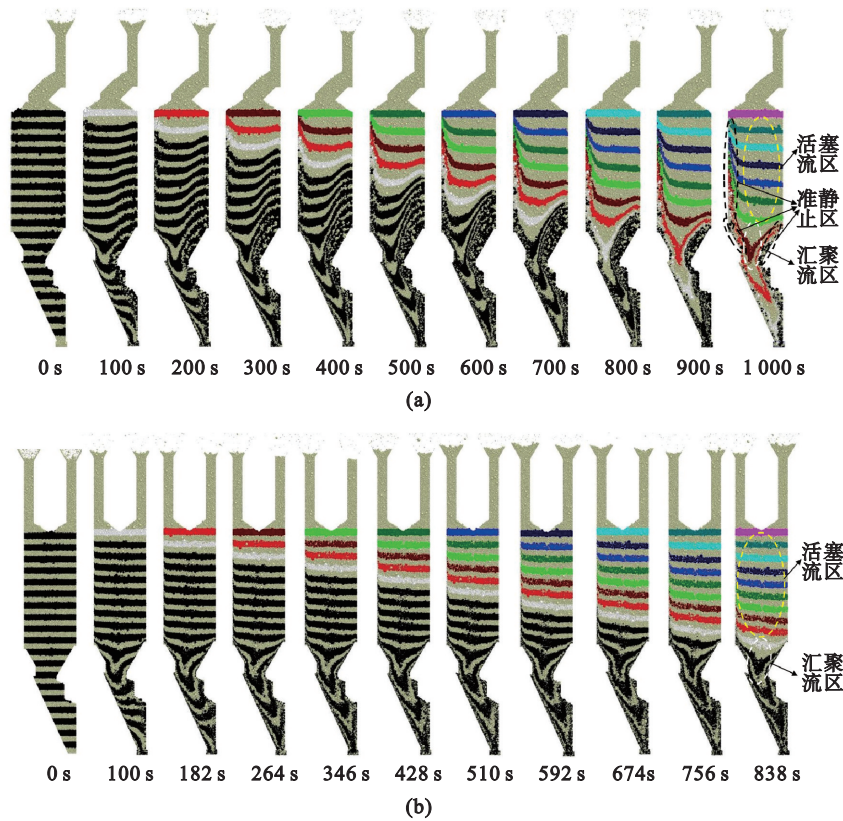


图 5 烧结矿运动流型

Fig. 5 Flow pattern of sinter particles

(a) — 现有中间单一布料方式; (b) — 边缘-中心混合布料方式.

$I_{mf} = 0.3$ 可作为漏斗流和整体流的分界点. 当 $I_{mf} > 0.3$ 时, 烧结矿的流态为整体流, 反之则为漏斗流. 2 种布料方式下, I_{mf} 分布如图 6 所示. 可知 2 种布料方式下, 颗粒均呈整体流流动. 现有中间单一布料方式下, 颗粒在料层底部取得 I_{mf} 最小值 0.645, 整个料层的 I_{mf} 为 0.737. 而对于边缘-中心混合布料, 颗粒 I_{mf} 最小值已提高为 0.762, 增幅为 18.14%; 整个料层的 I_{mf} 平均值达到 0.876, 增幅为 18.86%. 可知边缘-中心混合布料能够提高烧结矿“整体流”程度.

2.5 烧结矿物料分布变化

值得注意的是, 边缘-中心混合布料在改善物料流动的同时, 也会导致炉腔的物料粒径分布发生变化. 排料过程中, 炉腔物料分布变化如图 7 所示. 由图 7a 可知, 现有中间单一布料方式下, 随着排料的进行, “上部边缘三角区”内大颗粒在下移的同时亦逐渐向边缘区移动. 这是由于在中心风帽的阻挡作用下, 物料在下移的同时具有向边缘倾斜的趋势所致. “中心三角区”内大颗粒的数量随着物料的排出而减少, 但在中心风帽壁面附近仍有部分大颗粒残留. 新入炉的物料中, 有相当数量的大颗粒分布在炉腔中间区, 这是因为下料管与烧结矿料面相连, 新入炉的大颗粒没有滚动空间. 随着大颗粒逐渐占据炉腔中间区, 小颗粒逐步在中间-边缘区以及中间-中心过渡区富集, 且在中间-中心过渡区富集程度更高. 对于边缘-中心混合布料, 随着排料的进行, 新入炉的颗粒分别从边缘和中心下料管进入炉腔过渡区, 这也导致中间区的大颗粒占据范围逐步缩小. 由于大颗粒直接布置在下料通道上方, 因此, 物料在下移的过程中基本不存在向边缘倾斜的现象, 如图 7b 所示.

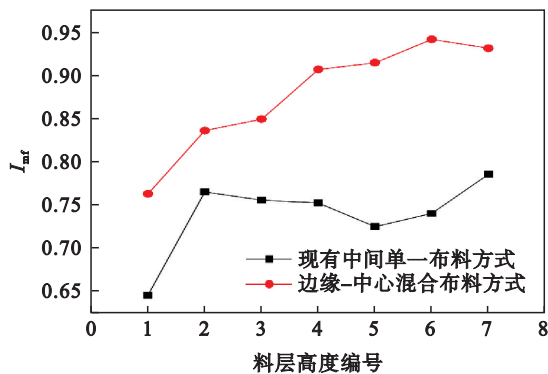


图 6 2 种布料方式烧结矿颗粒的整体流指数

Fig. 6 Mass flow index of sinter particles with two charging methods

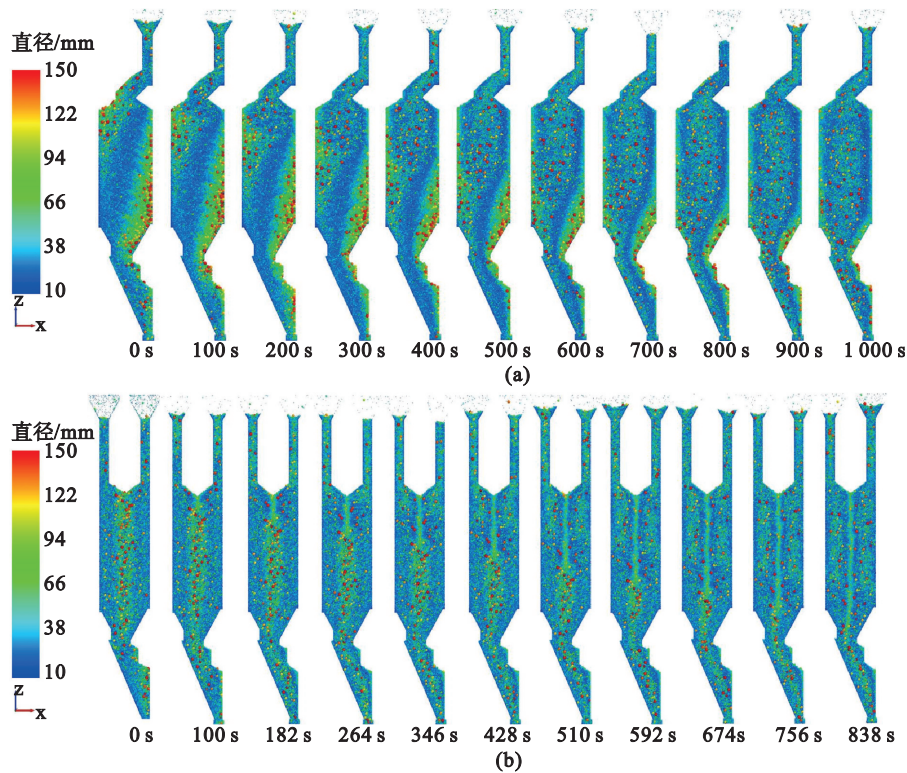


图7 排料过程物料分布

Fig. 7 Material distribution during discharge process

(a)—现有中间单一布料方式；(b)—边缘-中心混合布料方式。

引入局部空间内烧结矿颗粒的平均粒径 D_{nv} 进行定量分析,其表达式如下:

$$D_{nv} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^3}{n}} \quad (5)$$

式中: n 为局部空间内颗粒的数量; d_i 为单个颗粒的粒径, m.

2种布料方式下物料稳定流动时料层 D_{nv} 分布如图8所示. 首先,从水平方向来看, D_{nv} 发生起伏波动,变化较大. 现有中间单一布料时,在炉腔中心区发生严重的小颗粒偏析,此时 D_{nv} 最小为

0.026 9 m; 在边缘-中间过渡区发生程度较轻的小颗粒偏析,此时 D_{nv} 为 0.029 m 左右. 在炉腔边缘区和中间区发生大颗粒偏析,且炉腔中间区偏析较为严重, D_{nv} 最大为 0.035 2 m 左右. 对于边缘-中心混合布料,在炉腔中间区发生显著的大颗粒偏析, D_{nv} 最大可达 0.038 5 m; 而在边缘区和中心区下部,发生显著的小颗粒偏析, D_{nv} 最小为 0.026 m. 总的来说,在水平方向上,现有中间单一布料时, D_{nv} 近似呈“W”型分布,且中间区 D_{nv} 更大. 而边缘-中心混合布料时, D_{nv} 在中间区最大,并近似呈“Λ”型分布.

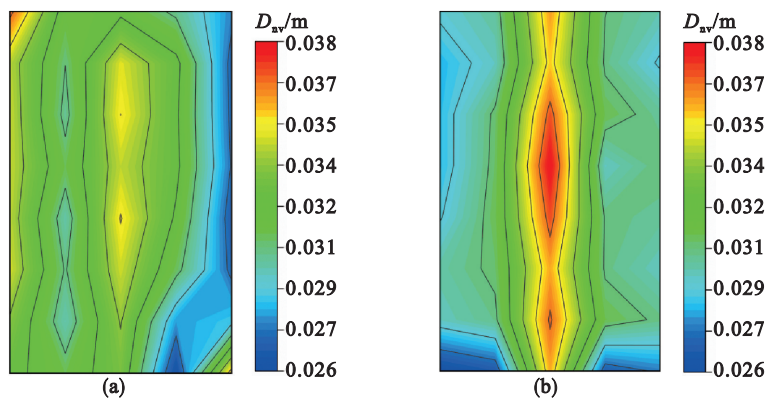


图8 稳态流动时物料分布

Fig. 8 Material distribution in steady state flow

(a)—现有中间单一布料方式；(b)—边缘-中心混合布料方式。

其次,从竖直方向来看, D_{nv} 发生的变动均较小,仅在炉腔底部时有所变化.而进入炉腔中上部后, D_{nv} 基本不变.说明 D_{nv} 只沿竖直方向变化较小.

由此可知,边缘-中心混合布料方式下,炉腔中间区会形成高 D_{nv} 通道.尽管能够改善现有中间单一布料方式下小颗粒的偏析,但高 D_{nv} 通道导致较大颗粒在此偏析聚集,造成该区域料层的空隙率显著升高,从而破坏了料层空隙率横向分布的均匀性,这对于改善料层内气流的分布是不利的.为平衡物料流动的改善和偏析的增加,在不采用其他措施的情况下,可尝试调整边缘下料管和中心下料管的相对高度,以控制大颗粒的落料点,在提高物料流动整体性的同时,亦能够防止中间区形成大颗粒偏析通道.

3 结 论

1) 边缘-中心混合布料能够改变炉内颗粒的速度分布规律,可将现有布料方式下,炉腔边缘区速度较小而中间区和中心区速度较大的分布,改为边缘区和中心区速度较大而中间区速度较小的分布.

2) 边缘-中心混合布料能够将物料运动流型从“U”型改善为“—”型.

3) 边缘-中心混合布料能够将物料的最小整体流指数 I_{mf} 从 0.645 提高至 0.762,增幅达到 18.14%.

4) 边缘-中心混合布料会导致炉腔中间区形成大颗粒偏析严重的通道.为平衡物料流动的改善和偏析的增加,可尝试对边缘下料管和中心下料管的相对高度进行调整.

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:200910187381.8[P].2010-02-24.
(Cai Jiu-ju, Dong Hui. Vertical tank type recovery and utilization method and device for waste heat resources in sintering process: 200910187381.8[P].2010-02-24.)

[2] Nguyen T V, Brennen C E, Sabersky R H. Funnel flow in hoppers [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1980, 47(4): 729-735.

[3] Zhong Z, Ooi J Y, Rotter J M. The sensitivity of silo flow and wall stresses to filling method [J]. *Engineering Structures*, 2001, 23(7): 756-767.

[4] Volpato S, Artoni R, Santomaso A C. Numerical study on the behavior of funnel flow silos with and without inserts through a continuum hydrodynamic approach [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2014, 92(2): 256-263.

[5] Härtl J, Ooi J Y, Rotter J M, et al. The influence of a cone-in-cone insert on flow pattern and wall pressure in a full scale silo [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2008, 86(4): 370-378.

[6] Wójcik M, Tejchman J, Enstad G G. Confined granular flow in silos with inserts—full-scale experiments [J]. *Powder Technology*, 2012, 222: 15-36.

[7] Chung Y C, Kuo T C, Hsiao S S. Effect of various inserts on flow behavior of Fe_2O_3 beads in a three-dimensional silo subjected to cyclic discharge, part I: exploration of transport properties [J]. *Powder Technology*, 2022, 400: 117220.

[8] Ding S, Li H, Ooi J Y, et al. Prediction of flow patterns during silo discharges using a finite element approach and its preliminary experimental verification [J]. *Particuology*, 2015, 18: 42-49.

[9] 王学文, Qin Yi, Tian Yan-kang, 等. 基于 EDEM 的煤仓卸料时煤散料流动特性分析 [J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(5): 130-134.
(Wang Xue-wen, Qin Yi, Tian Yan-kang, et al. Analysis on flow features of bulk coal during coal unloading period based on EDEM [J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(5): 130-134.)

[10] Balevičius R, Kačianauskas R, Mróz Z, et al. Discrete-particle investigation of friction effect in filling and unsteady/steady discharge in three-dimensional wedge-shaped hopper [J]. *Powder Technology*, 2008, 187(2): 159-174.

[11] Babout L, Grudzien K, Maire E, et al. Influence of wall roughness and packing density on stagnant zone formation during funnel flow discharge from a silo: an X-ray imaging study [J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 97: 210-224.

[12] Tian T, Su J L, Zhan J H, et al. Discrete and continuum modeling of granular flow in silo discharge [J]. *Particuology*, 2018, 36: 127-138.

[13] Zhao Y, Yang S L, Zhang L Q, et al. Understanding the varying discharge rates of lognormal particle size distributions from a hopper using the discrete element method [J]. *Powder Technology*, 2019, 342: 356-370.

[14] 祁腾飞, 黄军, 孙俊杰, 等. 竖冷炉内烧结矿分布的 DEM 模拟 [J]. *中国冶金*, 2022, 32(7): 20-26.
(Qi Teng-fei, Huang Jun, Sun Jun-jie, et al. DEM simulation of sinter distribution in vertical cooling furnace [J]. *China Metallurgy*, 2022, 32(7): 20-26.)

[15] 祁腾飞, 黄军, 孙俊杰, 等. 布料方式对竖冷炉内烧结矿偏析及气流分布的影响 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(10): 1422-1429.
(Qi Teng-fei, Huang Jun, Sun Jun-jie, et al. Effect of charging mode on sinter segregation and gas flow distribution in vertical cooling furnace [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2022, 43(10): 1422-1429.)

[16] 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 Teng-fei, Huang Jun, Sun Jun-jie, et al. Flow behavior of sinter in shaft cooler with DEM simulation [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2022, 34(3): 239-247.)

[17] 祁腾飞, 黄军, 孙俊杰, 等. 烧结矿粒度组成对竖冷炉运行影响的 DEM 模拟 [J]. *钢铁*, 2022, 57(5): 40-47.
(Qi Teng-fei, Huang Jun, Sun Jun-jie, et al. DEM simulation for effect of sinter particle size composition on operation of vertical cooling furnace [J]. *Iron and Steel*, 2022, 57(5): 40-47.)