

引文格式:王俊青,刘思达,徐进,等.颗粒形状和旋转溜槽结构对高炉布料颗粒动力学行为的影响[J].中国有色冶金,2024,53(5):141-157.

WANG Junqing, LIU Sida, XU Jin, et al. Effect of particle shape and rotating chute geometry on the particle dynamic behaviour in blast furnace burden distribution process[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024,53(5):141-157.

颗粒形状和旋转溜槽结构对高炉布料颗粒动力学行为的影响

王俊青^{1,2}, 刘思达^{1,2}, 徐进^{1,2}, 周宗彦^{1,2}

(1. 江西省颗粒系统仿真与模拟重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 江西理工大学 国际创新研究院, 江西 南昌 330013)

[摘要] 旋转溜槽是高炉布料系统的重要部件,通过改变溜槽角度和转速可以影响物料在溜槽出口端的速度和分布,从而影响炉料的下落轨迹。本文以旋转溜槽作为研究对象,采用离散单元法对物料流动进行模拟仿真,分析了溜槽设计、角度以及颗粒种类和形状对炉料颗粒下落轨迹、溜槽出口端位置颗粒的尺寸分布和速度分布以及颗粒偏析的影响。计算结果表明:溜槽下料过程中不可避免地会出现颗粒偏析情况;溜槽角度对布料过程的影响显著,角度越大料流越稳定;炉料粒径越大,颗粒形状对下料过程的影响越明显;方形溜槽能够有效地聚拢下料过程中的料流宽度,从而达到精准布料的效果;耐磨衬板的加入在一定程度上也能达到精准布料的效果。

[关键词] 高炉布料; 旋转溜槽; 颗粒轨迹; 颗粒偏析; 离散单元法

[中图分类号] TF543.3; TF537 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2024)05-0141-17

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2024.05.018

0 引言

高炉炼铁是目前最主要的炼铁工艺。在炼铁过程中,首先将铁矿石(主要为烧结矿、球团矿等)、燃料(主要为焦炭)、辅助原料(石灰石等)等自炉顶装入高炉内部,同时从高炉底部风口喷入约 1 200 °C 热风,铁矿石在高炉内与还原气体 CO 和焦炭发生一系列化学反应,最终被还原为铁水^[1]。在此过程中,高炉上部的高炉布料制度对整个炼铁过程起着重要的调控作用。炼铁原料通过传送带送入料罐,随后原燃料颗粒依次通过节流阀、中心喉管落入旋

转溜槽上,并在设定好的旋转速度和角度下流出溜槽,在炉喉空区内做落体运动,最后物料堆积在炉喉处形成料面。高炉布料操作直接影响着炉料分布,进而影响炉顶煤气流分布。因此,布料操作是高炉高效稳定顺行的关键因素之一,对高炉的节能降耗起着重要的作用。

目前,高炉布料多采用无料钟布料,无钟炉顶布料灵活多变,可根据设定的旋转圈数和溜槽角度来确定合适的布料矩阵。但在实际操作中,受观察和测量手段的限制,无法直接测量炉料颗粒在经过料斗和旋转溜槽以及自由下落过程中准确的运动数据,从而给设定合理的布料矩阵带来了难度。为此,国内外研究人员采用理论模型和数值模拟方法对高炉布料过程中炉料颗粒的运动行为进行了相关研究^[2-7],尤其是离散单元法(DEM)的应用。Yu等^[8]通过离散单元法研究了4种不同颗粒形状对料仓内颗粒和偏析的影响,结果表明颗粒形状对偏析影响不大,但对颗粒流动的连续性有影响。Zhang等^[9]通过对颗粒速度、轨迹、配位数和混合指数等

[收稿日期] 2024-04-16

[第一作者] 王俊青(1996—),女,山西朔州人,硕士研究生,主要从事高炉炼铁方面的研究。

[通信作者] 周宗彦(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事颗粒多相流和矿冶过程智能化方面的研究。

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(52276154);江西省教育厅科学技术项目(GJJ2200855, GJJ2200815)。

数据的分析,揭示了物料在料仓填充过程中粒径偏析的机理。Zhang 等^[10]采用离散单元法建立了一个三维模型,详细分析了放料过程中颗粒的流动和偏析,研究结果表明由于偏析的影响,大颗粒比小颗粒更早从漏斗中排出。杜鹏宇^[11]、Hirishi 等^[12]通过模拟研究了高炉布料过程中料流轨迹的变化规律。Hol-zinger 等^[13]研究了溜槽的起始角度和料仓结构的变化对颗粒物料质量分布的影响。朱文睿^[14]、孙俊杰^[15]、徐文轩等^[16]利用离散单元法模拟了旋转溜槽布料过程,分析了溜槽的截面形状和倾角大小对炉料颗粒粒度偏析的影响,结果都发现矩形截面溜槽比半圆形截面溜槽的料流轨迹更集中且精度更佳。Kou^[17]、张斌等^[18]也做了相似的研究,研究了初始料面形状及溜槽截面形状对炉料分布的影响,研究结果发现矩形截面溜槽可以有效减少高炉周向炉料偏析行为。

刘俊涵等^[19]研究了溜槽倾角(12°~41°)、料线深度(0~2 m)对布料过程中焦炭料流轨迹及落点半径的影响,得到了不同溜槽倾角、料线深度下焦炭料流轨迹,深入探究了无钟高炉布料料流轨迹的变化规律,实现了料流轨迹的可视化。Hong 等^[20]研究了槽长、料线水平和溜槽角度对颗粒运动和径向分布的影响。结果表明,随着溜槽长度或角度的增加,颗粒更容易向与溜槽旋转方向相反的方向滑动;炉料往往随着溜槽长度的增加而聚集,并随着料线水平或溜槽角度的增加而分散。高绪东等^[21]通过研究 Y 形管和中心喉管对布料以及偏析的影响,发现 Y 形管和中心喉管尺寸对炉料落点半径影响较小;减小其长度可以在节省成本的同时减少炉料在 Y 形管中的偏析现象;溜槽长度对炉料落点半径影响较大,应选择合理的溜槽长度,一般溜槽长度和炉喉半径比值取 0.88~0.92 为宜。Yu 等^[22]通过离散单元法研究了颗粒在沿倾斜固定溜槽流动时的角速度分布和平移速度分布。结果表明,溜槽横截面上的角速度分布呈 V 形,即与平移速度的分布相反;无论颗粒的大小和形状如何,轨迹中颗粒的质量分数都表现出相似分布;随颗粒尺寸的增大,平均角速度增大,平移速度减小,而颗粒形状只影响角速度。

综上所述,目前高炉布料的研究大部分仍采用单一粒径、球形颗粒为研究对象,而在高炉布料实际操作中,每种炉料往往是由多个不同粒径且形状不

规则的颗粒混合而成。因此,本研究以多粒径分布的炉料颗粒为研究对象,同时也对非球形颗粒的运动行为进行了模拟仿真。本研究利用离散单元法分析了不同溜槽结构与颗粒形状的情况下,溜槽倾角与转速对排料过程中炉料颗粒在溜槽内部、离开溜槽后的运动轨迹和偏析情况,以及颗粒在溜槽出口端的速度和分布的影响规律,从而为优化高炉布料提供有用的信息和依据。

1 模型描述

本模拟以离散单元法为基础,以焦炭颗粒和烧结矿颗粒为研究对象,对不同粒径的颗粒在旋转溜槽上以及离开旋转溜槽后颗粒轨迹流的运动情况进行模拟计算。离散单元法是继有限元法、计算流体力学(CFD)之后,用于分析颗粒系统动力学问题的又一种强有力的数值计算方法。在 DEM 中,基于牛顿第二运动定律对颗粒平移和旋转两个运动进行描述,其控制方程分别可以写为式(1)、(2)。

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j f_{ij}^c + \sum_k f_{ik}^{nc} + f_i^f + f_i^g \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j M_{ij} \quad (2)$$

式中: v_i 和 ω_i 分别为粒子 i 的平移速度(m/s)和角速度,1/s; f_{ij}^c 和 M_{ij} 是由粒子 j 或壁作用于粒子 i 的接触力和力矩,N,N·m; f_{ik}^{nc} 是由粒子 k 或其他源作用于粒子 i 的非接触力(如范德华力),N; f_i^f 是粒子 i 上的粒子-流体相互作用力,N; f_i^g 是重力,N。

本研究由于没有考虑流体的流动,因此颗粒与流体之间的相互作用力 $f_i^f = 0$ 。许多文献里已经给出了各种模型来计算这些力和力矩,具体的公式可以参见有关文献^[23-24],这里不再赘述。

2 计算条件

本研究以文献[25]高炉炉顶布料模型为依据,利用 Solidworks 和 Rocky 建立了无钟炉顶布料系统三维几何模型。布料模型包括料罐、中心喉管和旋转溜槽三个部分,如图 1 所示。模拟中使用的颗粒材料是焦炭和烧结矿,表 1 给出了两种颗粒的粒度分布,其中每种材料颗粒都采用了 5 种不同的粒度分布。模拟所用材料的物性如表 2 所示,计算时不考虑气流影响。表 3 为本模拟的算例表。图 2 为模拟所选用的三种溜槽结构,溜槽结构选用含耐磨衬

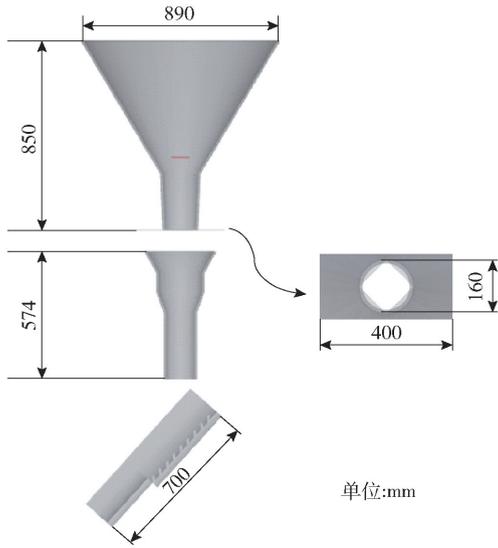


图1 本研究中用的布料模型

Fig. 1 Burden distribution model used in this work

板半圆形界面溜槽作为基准溜槽,光滑半圆形截面溜槽和光滑矩形截面溜槽作为对比模拟。颗粒形状选用球形颗粒以及在等体积下长径比分别为1.5倍和3倍的椭球体,如图3所示。

表1 焦炭和烧结矿颗粒粒度分布

Table 1 Size distribution of coke and sinter particles used in the simulation

焦炭颗粒		烧结矿颗粒	
颗粒粒度/mm	质量分数/%	颗粒粒度/mm	质量分数/%
25 ~ 30	9	10 ~ 15	7
16 ~ 25	33.5	6.5 ~ 10	15
9 ~ 16	42	4.5 ~ 6.5	33
6 ~ 9	12.5	2.5 ~ 4.5	20
6	3	2.5	25

表2 模拟所用材料物性参数

Table 2 Material properties used in the simulation

物料	杨氏模量/ MPa	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	滚动摩擦因数	软化系数	质量流速/ ($\text{t}\cdot\text{h}^{-1}$)	颗粒-颗粒 滑动摩擦	颗粒壁面 滑动摩擦
焦炭	10	1 800	0.5	0.1	21	0.7	0.3
烧结矿	10	3 000	0.5	0.1	21	0.7	0.3

表3 焦炭算例表

Table 3 Simulation cases for coke and sinter particles

算例序号	溜槽角度(θ)	溜槽转速(Rev)/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	颗粒形式	溜槽类型
No. 1(基准)	42°	8	球体	半圆形含耐磨衬板溜槽
No. 2	34°	8	球体	半圆形含耐磨衬板溜槽
No. 3	47°	8	球体	半圆形含耐磨衬板溜槽
No. 4	42°	6	球体	半圆形含耐磨衬板溜槽
No. 5	42°	12	球体	半圆形含耐磨衬板溜槽
No. 6	42°	8	球体	矩形光滑溜槽
No. 7	42°	8	球体	半圆形光滑溜槽
No. 8	42°	8	1.5倍长径比椭球体	半圆形含耐磨衬板溜槽
No. 9	42°	8	3倍长径比椭球体	半圆形含耐磨衬板溜槽

3 结果与讨论

在本研究中,通过对3种不同溜槽倾角下焦炭颗粒轨迹流的分析,将数值模拟结果与文献[24]中的数值模拟结果、实验数据结果进行对比,来验证数

值模型的准确性。焦炭颗粒轨迹流的模拟结果与文献中模拟和实验的对比如图4所示。结果表明轨迹流曲线与文献中模拟数据、实验数据吻合较好。因此,所使用的数值模型准确性满足要求,可以用于后续的研究。

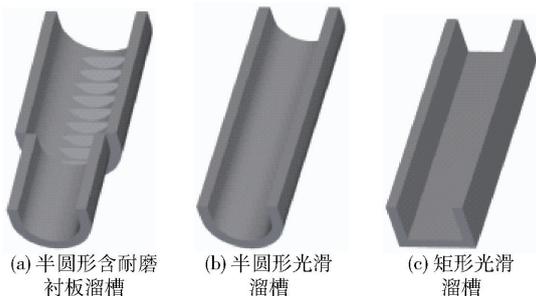


图2 各种溜槽结构示意图
Fig.2 Various chute designs

3.1 焦炭与矿石的流动分析

3.1.1 颗粒在溜槽内部的流动情况和速度分析

图5为不同的溜槽倾角下炉料颗粒在旋转溜槽

内的流动情况,其中不同颜色表示炉料在运动过程中的速度大小。可以看出,从料仓中倾倒的颗粒首先掉入耐磨衬板中,然后在耐磨衬板被填充时通过旋转的溜槽发生流动。颗粒的颜色与粒子的速度相对应,首先倾倒的颗粒被耐磨衬板片固定在耐磨衬板区域速度很低,位于表层的炉料颗粒速度相对较高。下落颗粒的撞击面积随溜槽角度的变化而变化,当溜槽角度为 34° 时,大多数颗粒会落在耐磨衬板的下端部分;当溜槽角度增大到 42° 时,大多数粒子会落在耐磨衬板的中间部分;当溜槽角度为 47° 时,大多数颗粒会落在耐磨衬板的上端。可以看出,最初下落的炉料颗粒首先填充了耐磨衬板的空隙,溜槽角度越大,需要填充的空隙越多,用来填充空隙的颗粒在溜槽运行过程中

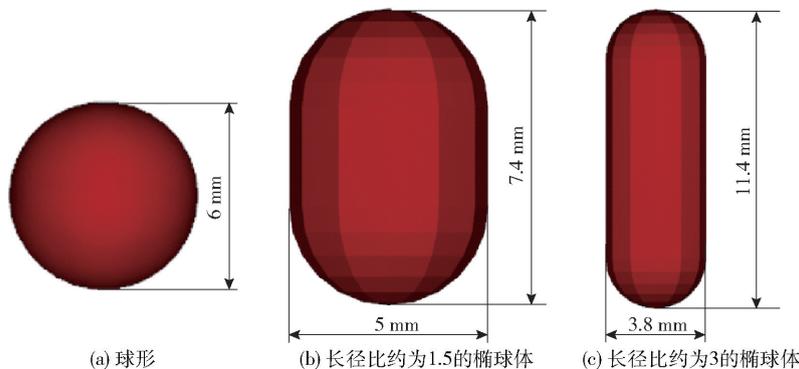


图3 颗粒形状

Fig.3 Particle shapes used in this work

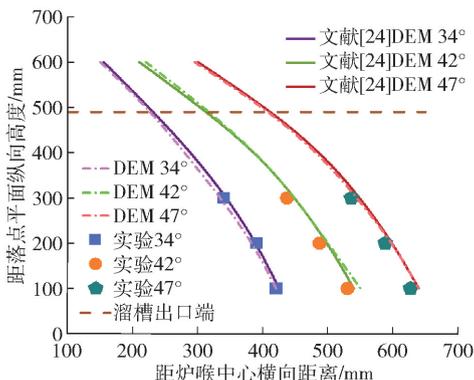


图4 模型可行性验证

(图中实验数据来自文献[24])

Fig.4 Validation of the DEM model

(The experimental data are from Ref [24])

几乎不移动,后落下的颗粒对先落下的颗粒进行冲击,然后沿着溜槽下落。通过这一的现象可以判断,

耐磨衬板区域贮存的颗粒可以很大程度上减少或减缓溜槽在运行过程中的磨损情况。

图6为不同倾角下炉料颗粒在溜槽出口端的速度分布。由图可以看出,随着溜槽角度的增大,颗粒速度减小,这主要是由于颗粒在因耐磨衬板而形成的缓冲区面积增大,减缓了颗粒的运动速度,使颗粒在离开溜槽时速度增速减慢,料流更加稳定。

图7给出了在溜槽倾角为 42° 的情况下,溜槽转速分别为6、8、12 r/min时对炉料颗粒运动形态的影响。图中不同颜色表示炉料在运动过程中的速度变化情况。从图中可以看出,随着溜槽转速的增大,颗粒在溜槽出口端的偏移程度也发生变化,转速越快,颗粒在溜槽出口端的偏移越大。通过对颗粒轨迹流的料流宽度的分析发现,颗粒流在溜槽出口端偏移程度越大,颗粒流的轨迹越不稳定,料流宽度越大,如图8所示。

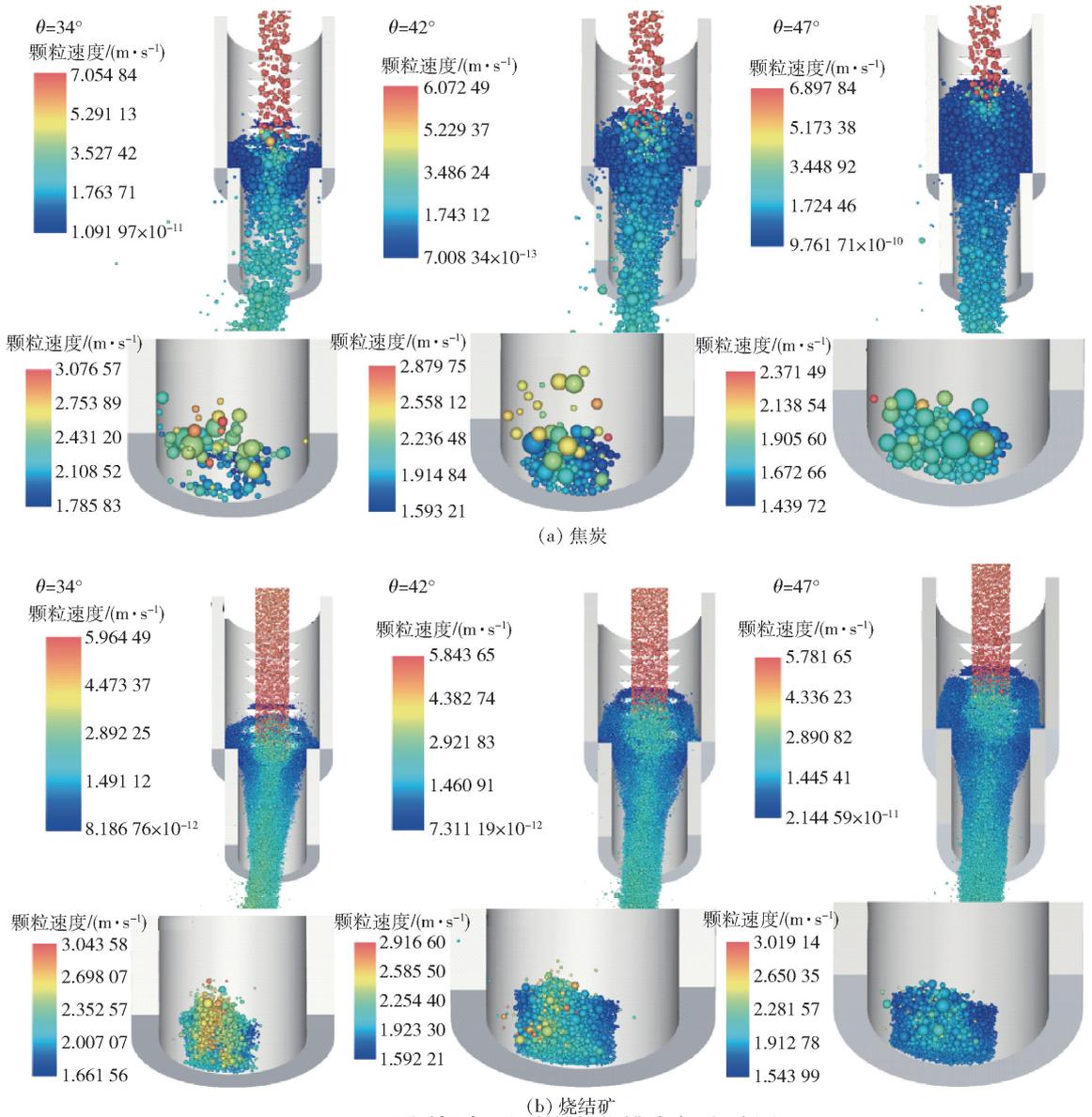


图5 不同倾角下颗粒在溜槽内部流动图

Fig. 5 Flow patterns of coke and sinter particles at different chute angles

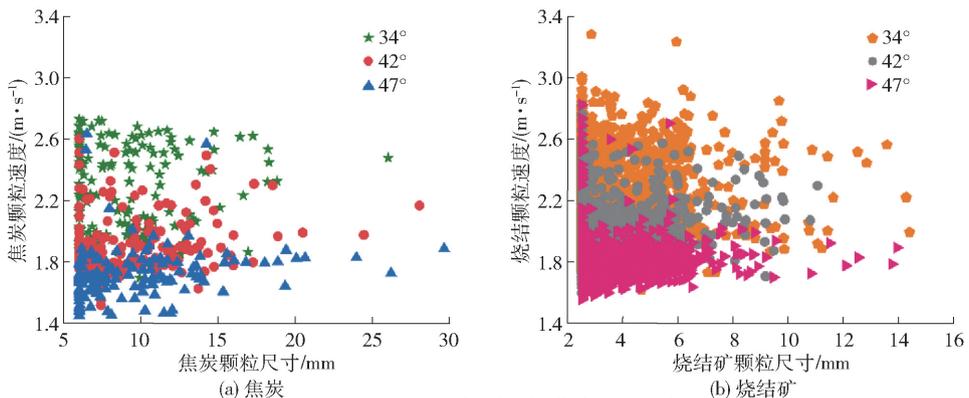


图6 不同倾角下颗粒在溜槽出口端速度分布

Fig. 6 Velocity distribution of coke and sinter particles at the chute tip at different chute angles

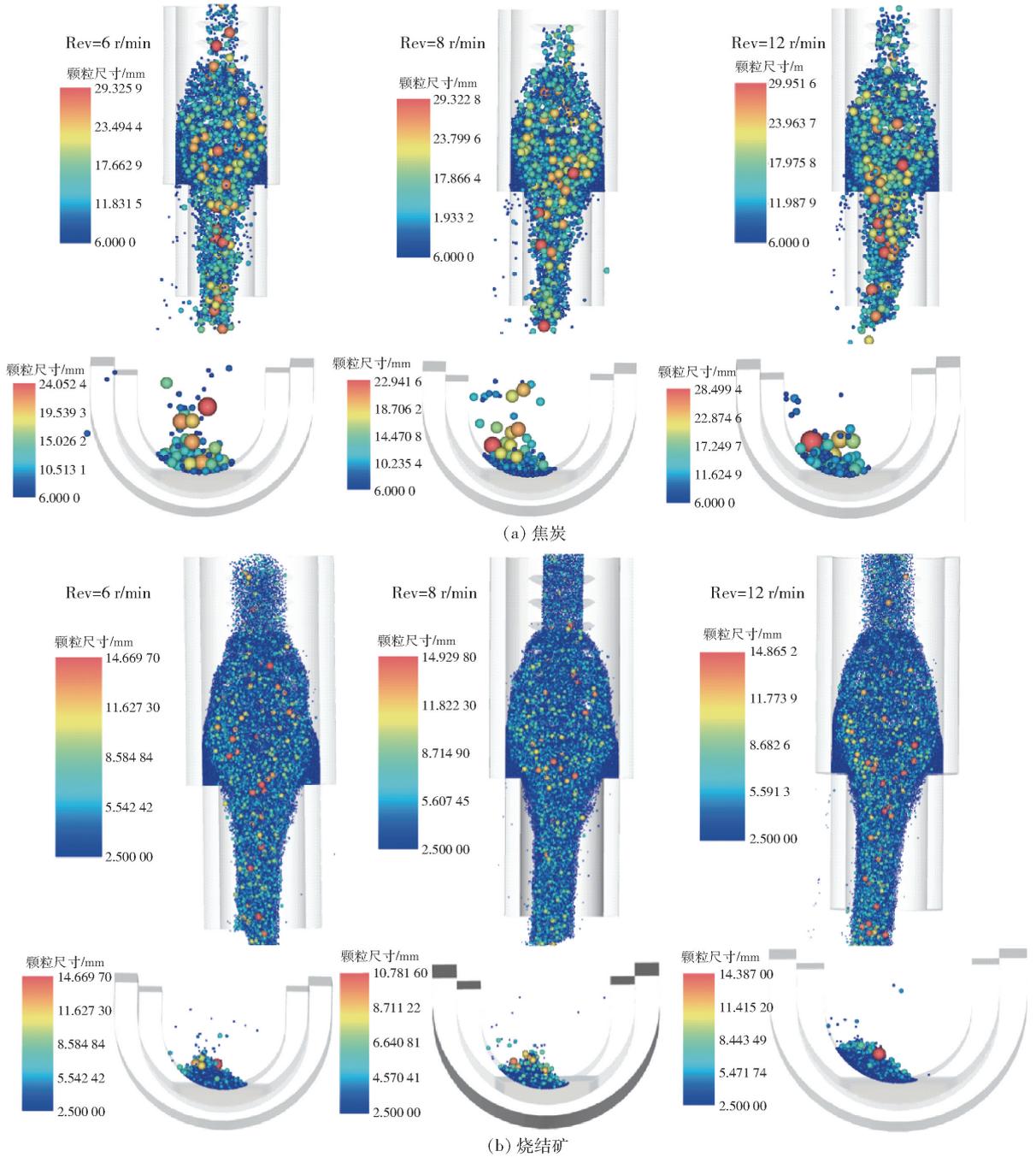


图7 不同溜槽转速下颗粒在溜槽内部流动情况

Fig.7 Particle flow patterns on the chute at different chute rotating speeds

图9分别为不同粒径的焦炭颗粒和烧结矿颗粒在溜槽出口处时水平、垂直方向的速度和整体速度的分布。由图可知,焦炭和烧结矿颗粒的速度都随着颗粒尺寸的增大而增大。这是由于在颗粒流动的过程中,小颗粒穿过大颗粒间的空隙,更容易与溜槽表面发生接触;大颗粒位于表层,受到溜槽的影响较小。因此,炉料在通过溜槽下落时,不可避免地会产

生偏析现象。

3.1.2 颗粒轨迹和落点位置

图10和图11分别为焦炭颗粒和烧结矿颗粒在溜槽倾角为34°、42°、47°时的轨迹流图,其中颗粒的颜色代表颗粒的速度大小。从图中可以看出,在溜槽倾角为34°时,不论是焦炭还是烧结矿,其轨迹流都较为松散;倾角为42°时,颗粒轨迹流较为稳定;

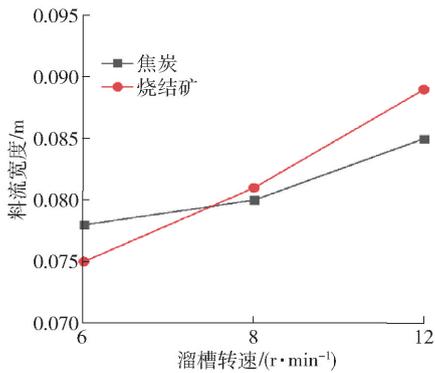


图8 不同溜槽转速时颗粒在溜槽出口端的料流宽度

Fig. 8 The width of particle flow streams at the chute tip at different rotating speeds

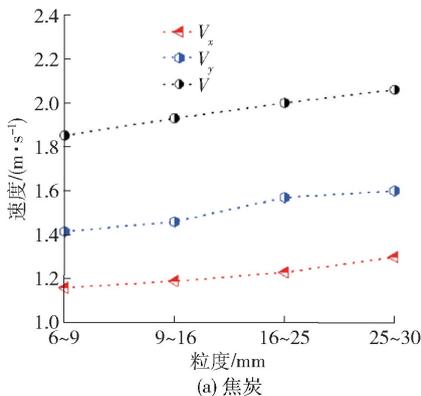


图9 不同粒径的颗粒在溜槽出口端的速度

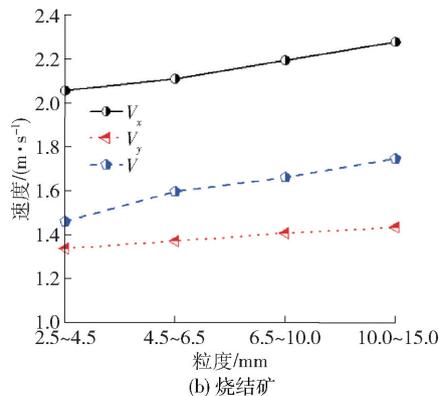


图12 和图13 是焦炭和烧结矿颗粒在溜槽倾角

Fig. 9 Velocity of different sized particles at the chute tip for coke and sinter

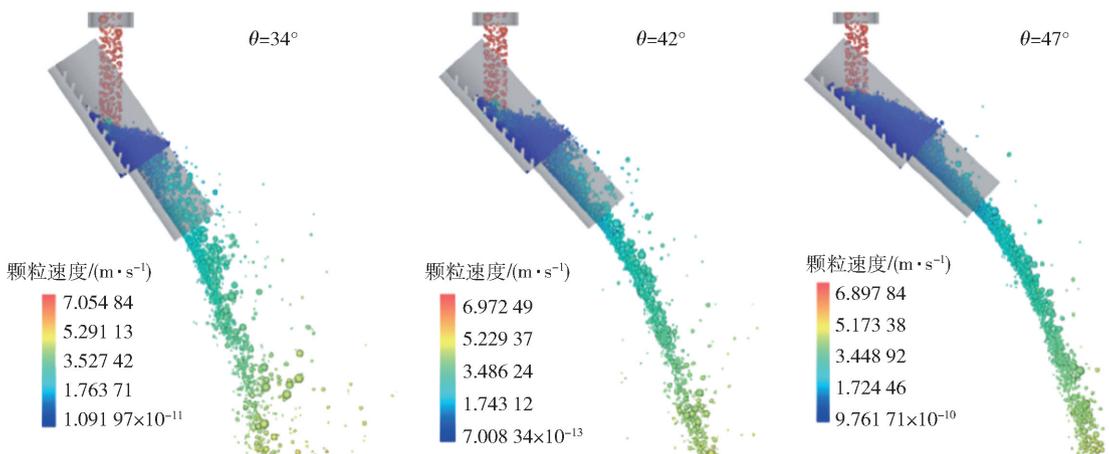


图10 焦炭颗粒在不同倾角下轨迹流云图

Fig. 10 Flow streams of coke particles at different chute angles

47°时,颗粒流最为稳定。这主要是由于当溜槽角度较小时,颗粒与溜槽内壁接触较少且速度较大,导致炉料在下落过程中更加活跃;当溜槽倾角增大后,颗粒流(尤其是与溜槽内壁直接接触的颗粒)受到溜槽对颗粒下落过程中的阻力增大,颗粒速度较小,料流相对稳定。同时,从图中可以发现,当颗粒在倾角为34°的溜槽中流动时,颗粒因耐磨衬板而形成的缓冲区的面积大约占整个衬板的一半;当倾角为42°时,缓冲区的面积大约增大为耐磨衬板的三分之二;当倾角为47°时,颗粒基本占满了整个耐磨衬板。颗粒在因耐磨衬板而形成的缓冲区面积增大,减缓了颗粒的运动速度,使颗粒在离开溜槽时速度减慢,料流更加稳定。

为34°、42°、47°时不同粒径的轨迹流图。由图中可以看出,溜槽倾角为34°时,颗粒流的落点位置最靠

近炉喉中心,当溜槽角度增大为42°时,轨迹流的落点位置距离炉喉中心较远,而当溜槽倾角为47°时,

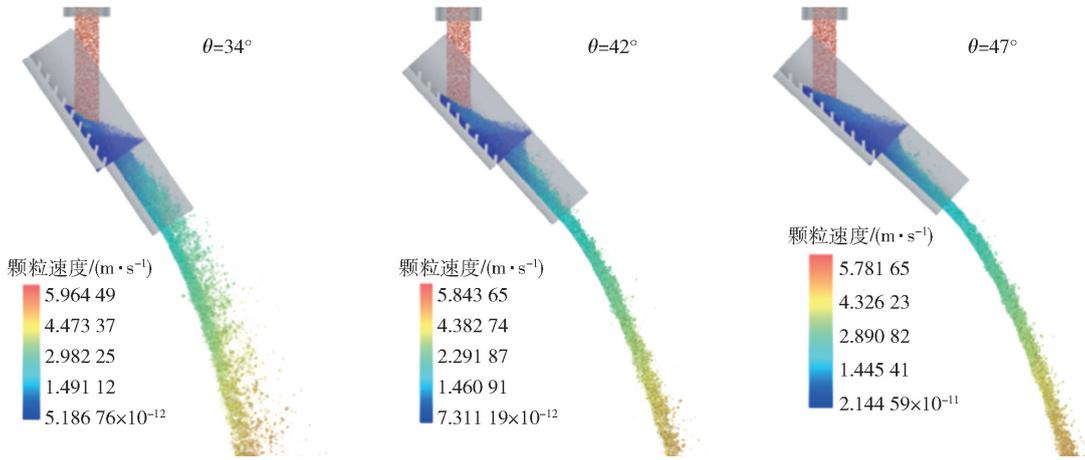


图 11 烧结矿颗粒在不同倾角下的轨迹流云图

Fig. 11 Flow streams of sinter particles at different chute angles

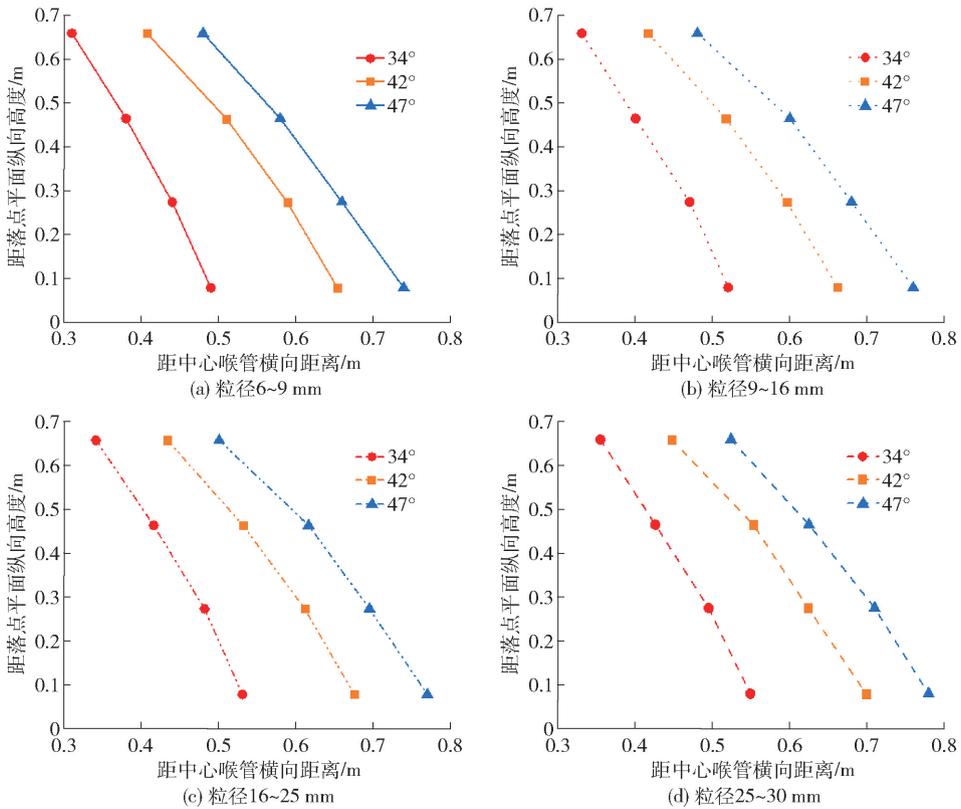


图 12 不同粒径的焦炭颗粒轨迹流位置图

Fig. 12 Trajectories of coke particles with different sizes

落点位置最远,靠近炉壁。这是由于随着溜槽倾角的增大,延长了溜槽的水平有效长度(即颗粒在溜槽上运动的距离),溜槽出口端距离炉喉中心横向距离更远,颗粒在离开溜槽时的位置更靠近炉壁,从而导致轨迹流整体更加靠近炉壁,落点位置更远。

对比不同粒径颗粒的轨迹可以发现,随着颗粒粒径的增加,轨迹以及落点逐渐向炉壁靠近。对比烧结矿和焦炭两种颗粒的轨迹图也可以看出,烧结矿的轨迹更靠近炉壁。这与图 9 中的不同粒径和种类的颗粒速度相一致。

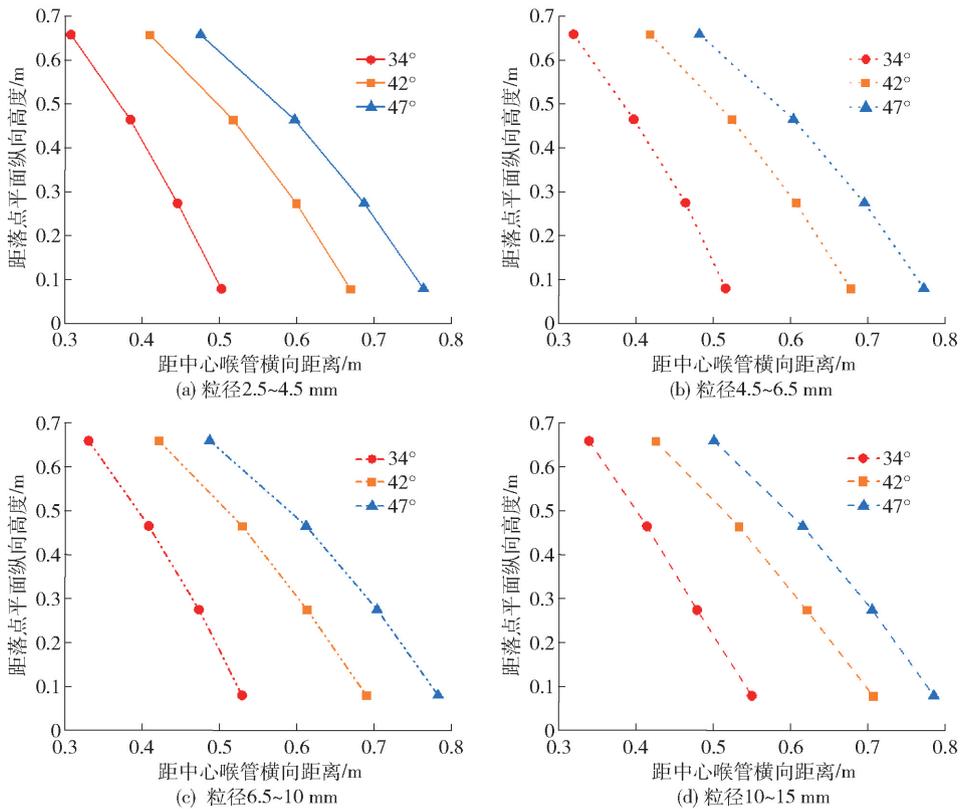


图13 不同粒径的烧结矿颗粒轨迹流位置图

Fig. 13 Trajectories of sinter particles with different sizes

3.1.3 颗粒偏析分析

图14为溜槽倾角 42° 时,焦炭颗粒在空区中的轨迹图。图中颗粒的不同颜色代表颗粒的不同粒径。从图中可以看到,焦炭颗粒发生了明显的偏析现象。小粒径颗粒集中在内部,即靠近炉喉中心的位置,随着颗粒尺寸的增大,轨迹靠近炉壁,这说明

大粒径颗粒集中在料流的外侧,更靠近炉壁。经过量化分析发现,不同粒径范围的颗粒通过含耐磨衬板的半圆形截面溜槽端口流出后,颗粒的流动轨迹随着下落高度相差越来越大,当颗粒到达炉喉处时,4种不同粒径范围的焦炭颗粒的落点位置相差较大。其中,6~9 mm的焦炭颗粒落点位置距中心喉

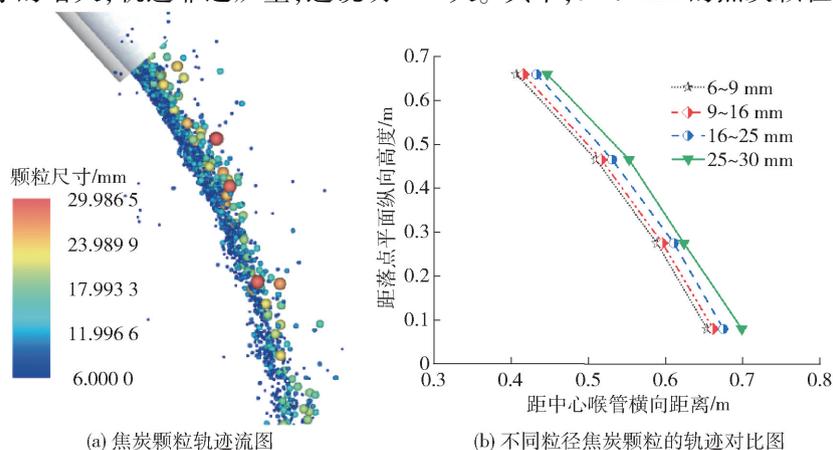


图14 焦炭颗粒在空区中轨迹图

Fig. 14 The trajectory of coke particles in the empty area

管横向距离约为 0.654 m, 9 ~ 16 mm 的颗粒落点位置为 0.662 m, 16 ~ 25 mm 颗粒的落点位置约为 0.675 mm, 最大粒径范围的焦炭颗粒 25 ~ 30 mm 的落点位置约为 0.699 m。

图 15 为溜槽倾角 42° 时, 烧结矿颗粒在空区中的轨迹图。可以发现, 烧结矿的颗粒流也发生了明显的偏析现象。经过量化分析发现, 2.5 ~ 4.5 mm 的焦炭颗粒落点位置距中心喉管横向距离约为

0.669 m, 4.5 ~ 6.5 mm 的颗粒落点位置约为 0.678 m, 6.5 ~ 10 mm 颗粒的落点位置约为 0.69 mm, 最大粒径范围的焦炭颗粒 10 ~ 15 mm 的落点位置约为 0.706 m。烧结矿颗粒与焦炭颗粒轨迹流模拟结果一致。焦炭颗粒和烧结矿颗粒在炉喉空区处流动轨迹的偏析现象主要源自于炉料颗粒在溜槽中运动时, 小颗粒容易穿过大颗粒间的空隙, 更易与溜槽壁面接触, 从而受到更大的阻力, 在出口端的速度更小。

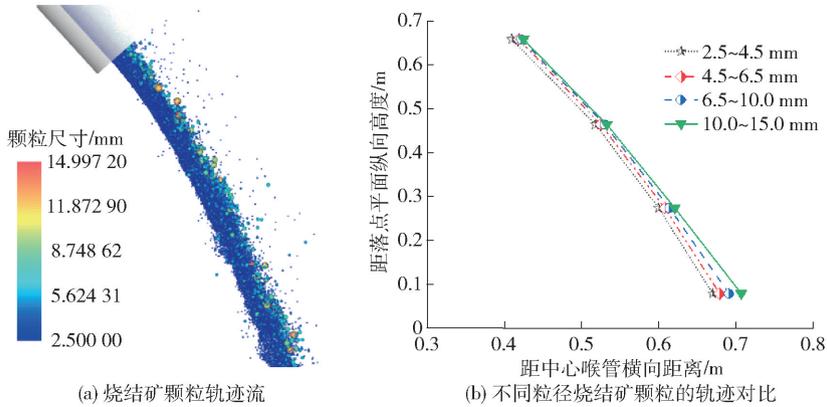


图 15 烧结矿颗粒在空区中轨迹

Fig. 15 The trajectory of sinter particles in the empty area

3.2 颗粒形状影响

3.2.1 对颗粒速度的影响

图 16 为溜槽倾角 42°、溜槽转速 8 r/min 的情况下, 3 种不同形状的焦炭颗粒在空区中下落时的速度分布情况。可以看出, 在颗粒粒径为 6 ~ 9 mm 时, 球体和椭球体在整个轨迹流中的速度基本相差不大; 在颗粒粒径为 9 ~ 16 mm 时, 不同形状颗粒的轨迹流速度有了明显的差别, 球体颗粒的速度在整个轨迹流中的速度均大于非球形颗粒的速度, 其中 1.5 倍长径比椭球体的速度大于 3 倍长径比的椭球体。整体来讲, 球体颗粒的速度比 1.5 倍长径比的椭球体颗粒的速度快大约 0.05 m/s, 比 3 倍长径比的椭球体颗粒的速度快大约 0.115 m/s; 在颗粒粒径为 16 ~ 25 mm 时, 这种差异更加显著, 球体颗粒的速度比 1.5 倍长径比的椭球体颗粒的速度增加约 0.1 m/s, 比 3 倍长径比的椭球体颗粒的速度增加约 0.22 m/s; 在颗粒粒径为 25 ~ 30 mm 时, 球体颗粒的速度比 1.5 倍长径比的椭球体颗粒的速度增加约 0.12 m/s, 比 3 倍长径比的椭球体颗粒的速度增加约 0.42 m/s。

矿颗粒在空区中下落时的速度分布情况。可以看出, 结果和焦炭颗粒基本相同, 随着颗粒粒径的增大, 由颗粒形状所带来的速度影响越来越大。

3.2.2 对颗粒轨迹与落点位置的影响

图 18 为 3 种不同形状的焦炭颗粒在空区中的流动轨迹位置图。可以看出, 当颗粒粒径范围在 6 ~ 9 mm 时, 3 种不同形状的颗粒轨迹流基本重合; 当颗粒粒径范围在 9 ~ 16 mm 时, 虽然 3 条轨迹流相差不大, 但是可以看出球体颗粒的轨迹流更加靠近炉壁, 3 倍椭球体的颗粒离炉壁最远; 当颗粒粒径为 16 ~ 25 mm 时, 3 条轨迹差异相对明显, 球体颗粒的轨迹流最靠近炉壁, 其次是 1.5 倍椭球体, 3 倍椭球体的轨迹流离炉壁最远; 当颗粒粒径范围在 25 ~ 30 mm 时, 轨迹差异更加显著。这是由于颗粒粒径越小, 受到颗粒形状的影响程度越小; 颗粒粒径越大, 颗粒受到颗粒形状的影响就越大。不同形状的小粒径颗粒在空区中的速度相差不大, 因此轨迹流重合度较高; 随着粒径增大, 非球体在溜槽中流动过程受到的阻力相对较大, 导致球体颗粒的速度比椭球体更大, 故其轨迹流更加靠近炉壁。

在 6 ~ 9 mm 粒径时, 3 倍椭球体颗粒的落点位

图 17 为相同模拟条件下, 3 种不同形状的烧结

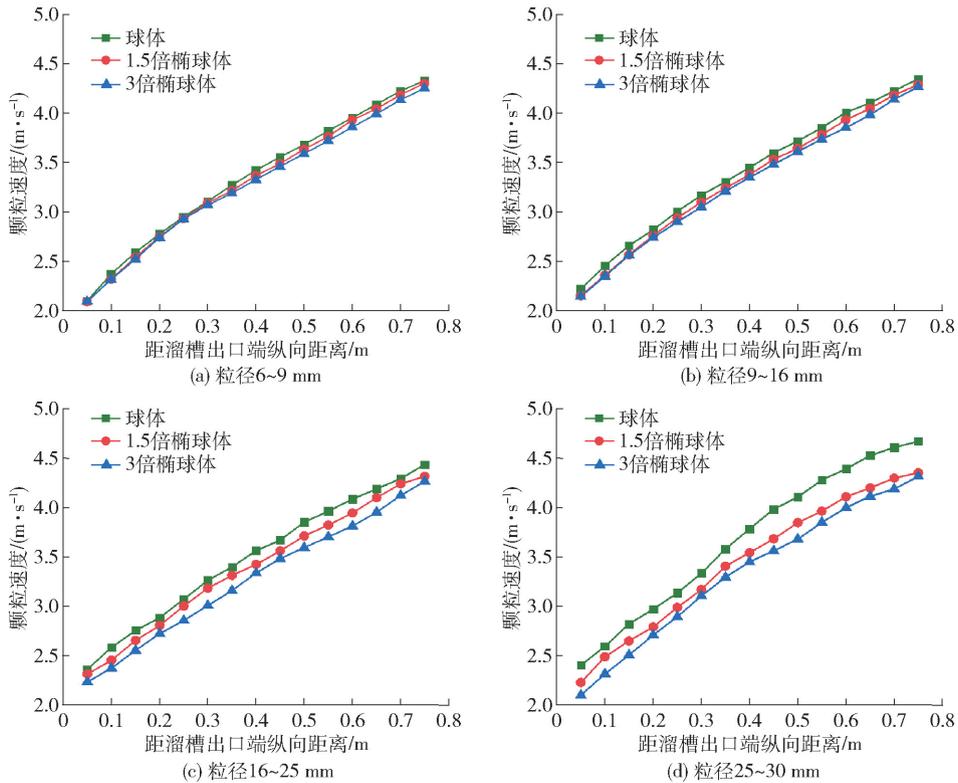


图 16 不同形状和粒径的焦炭颗粒在空区的流动速度

Fig. 16 Velocity of coke particles with different shapes and sizes

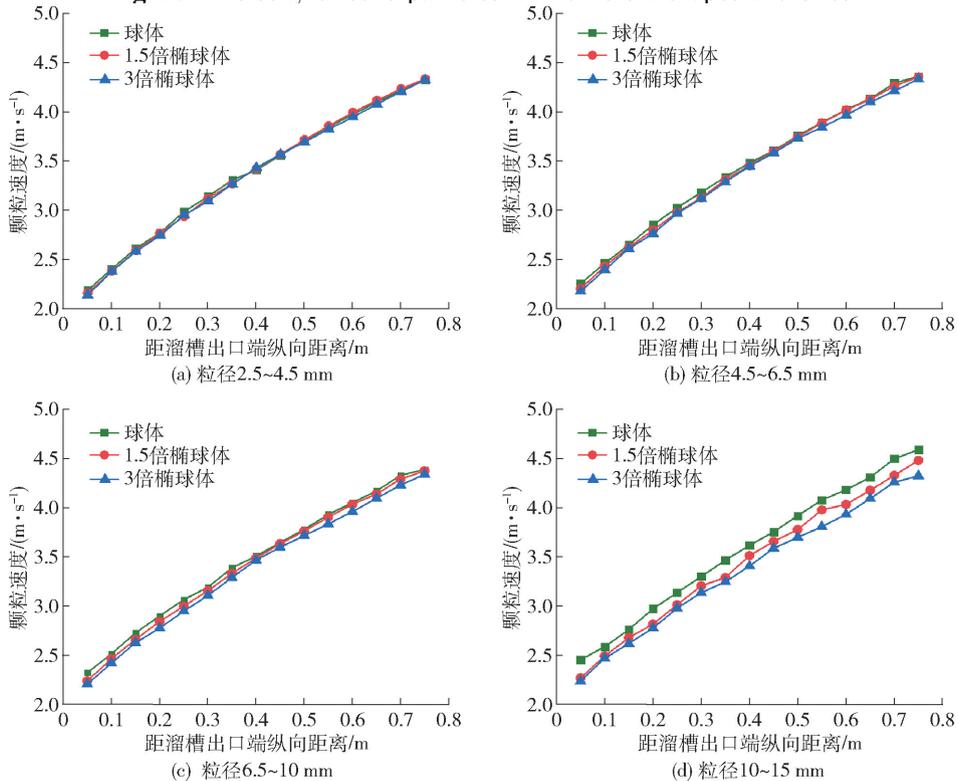


图 17 不同形状和粒径的烧结矿颗粒在空区流动速度

Fig. 17 Velocity of sinter particles with different shapes and sizes

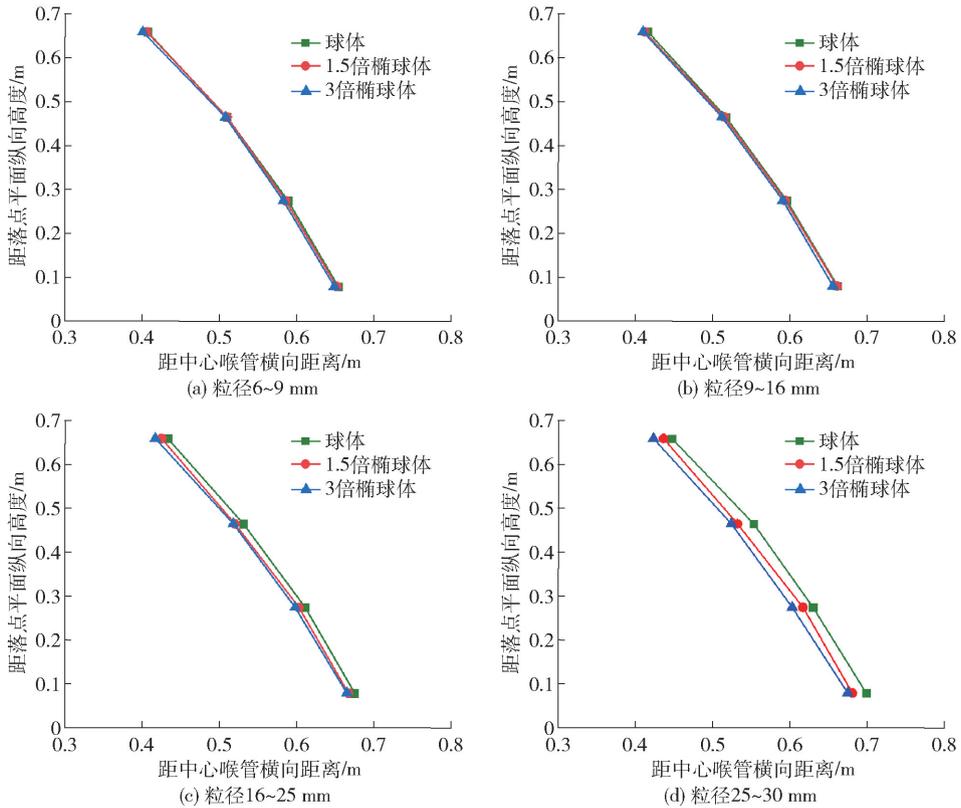


图 18 不同形状和粒径的焦炭颗粒在空区流动位置图

Fig. 18 Trajectories of coke particles with different shapes and sizes

置为距中心喉管横向距离 0.649 m, 1.5 倍椭球体颗粒落点位置为距中心喉管横向距离 0.652 m, 球体颗粒的落点位置为距中心喉管横向距离 0.654 m。在 25 ~ 30 mm 粒径时, 3 倍椭球体颗粒的落点位置为距中心喉管横向距离 0.675 m, 1.5 倍椭球体颗粒的落点位置为距中心喉管横向距离 0.681 m, 球体颗粒的落点位置为距中心喉管横向距离 0.699 m。由此得出, 在相同粒径下, 3 倍长径比椭球体的落点位置距离炉喉中心的横向距离最近, 球体颗粒的落点位置距离炉喉中心的横向距离最远, 而且随着颗粒粒径的增大, 3 种不同形状的颗粒流落点位置相差越来越大, 在同一形状的轨迹流中, 颗粒粒径越大, 落点位置越远。

图 19 为相同模拟条件下, 3 种不同形状的烧结矿颗粒在空区中的流动轨迹位置图, 可以看出, 结果和焦炭颗粒基本一致。

3.3 溜槽结构的影响

3.3.1 溜槽结构对料流速度的影响

图 20 为 42° 倾角下焦炭颗粒和烧结矿颗粒在 3

种不同结构溜槽内部的流动情况。可以看出, 当炉料在半圆形溜槽上运动时, 炉料随溜槽转动发生偏移, 而炉料在矩形溜槽上运动时, 部分炉料在一侧聚集, 但整体偏移程度变化不大。这是由于炉料在半圆形溜槽上运动时, 受到的科氏力的影响程度大于矩形溜槽, 且炉料在半圆形溜槽时的初始运动状态随溜槽转动而变化, 对炉料在整个半圆形溜槽上运动轨迹影响较大。

如图 21 所示, 焦炭和烧结矿在离开光滑半圆形截面溜槽后, 在空区中的落点速度均在 5.2 ~ 6.1 m/s 之间, 两种颗粒在离开光滑矩形截面溜槽后, 在空区中的落点速度差别不大, 也在 5.2 ~ 6.1 m/s 之间。而焦炭在离开含有耐磨衬板的半圆形截面溜槽后, 在空区中的落点速度为 4.28 ~ 4.48 m/s, 烧结矿为 4.32 ~ 4.58 m/s, 这主要是由于颗粒通过耐磨衬板时, 降低了炉料的运动速度, 使炉料在溜槽上运动时间变长, 导致炉料落入空区的速度减小。

3.3.2 溜槽结构对料流轨迹的影响

图 22 为溜槽倾角 42° 时, 焦炭颗粒分别在离开

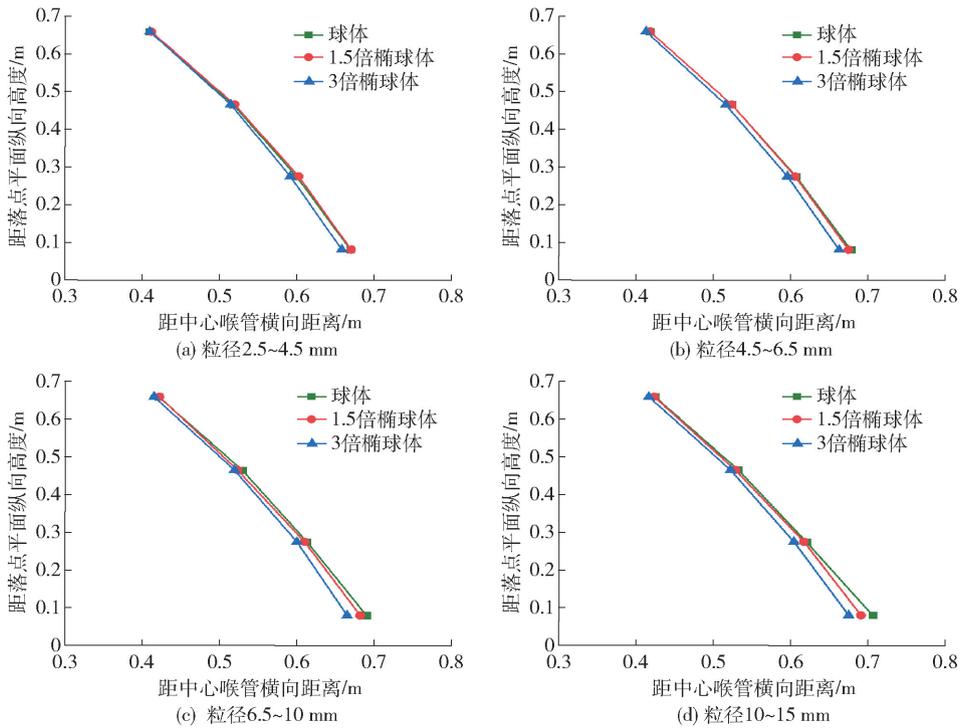


图 19 不同形状和粒径的烧结矿颗粒轨迹

Fig. 19 Trajectories of sinter particles with different shapes and sizes

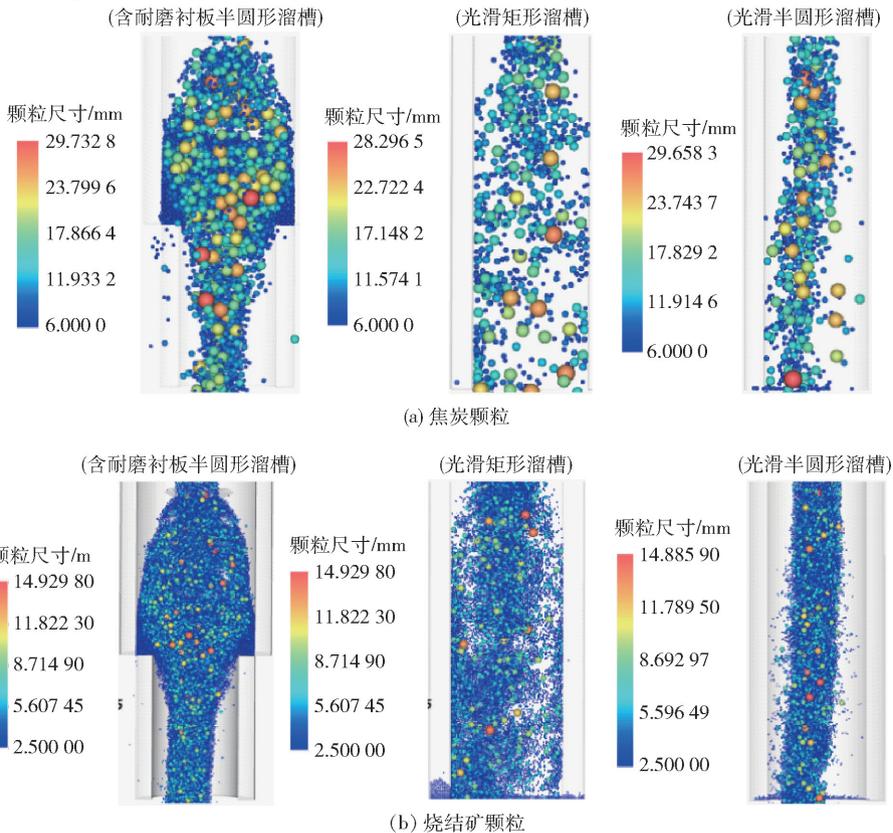


图 20 焦炭颗粒和烧结矿颗粒在不同溜槽内部的流动情况

Fig. 20 Flow patterns of coke and sinter particles in the different chutes

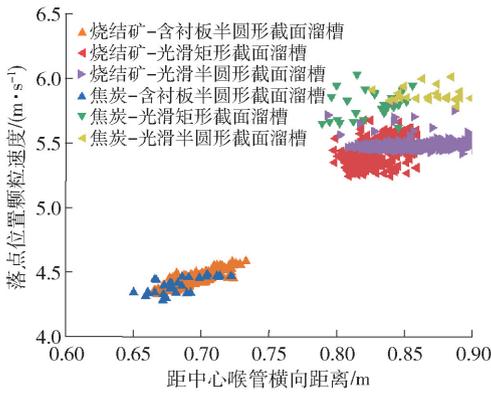


图 21 颗粒在离开不同结构溜槽后的落点速度分布

Fig. 21 Velocity distribution in the radial direction for coke and sinter particles

含耐磨衬板半圆形溜槽、光滑半圆形溜槽、光滑矩形溜槽后的轨迹流位置对比图。由图中可以看出,炉料在离开含耐磨衬板的溜槽之后的轨迹流明显更加靠近炉喉中心,这是由于焦炭在有耐磨衬板的溜槽中运动时,随着炉料的下落,部分炉料在衬板缝隙中

堆积,形成鼓包状的缓冲区并降低了炉料的运动速度,运动轨迹更加平缓。

颗粒粒径为 6 ~ 9 mm 时,含耐磨衬板溜槽所在的颗粒流落点半径为 0.654 m;光滑矩形溜槽所在的颗粒流的落点半径为 0.826 m;光滑半圆形溜槽所在的颗粒流落点半径为 0.87 m。随着颗粒粒径的逐渐增大,无论何种溜槽,颗粒的落点位置都相应更远,更加靠近炉壁处。在颗粒粒径为 25 ~ 30 mm 时,含耐磨衬板溜槽所在的颗粒流落点半径为 0.699 m;光滑矩形溜槽所在的颗粒流落点半径为 0.859 m;光滑半圆形溜槽所在的颗粒流落点半径为 0.936 m。因此,使用含耐磨衬板的半圆形溜槽布焦炭时落点半径最小,而使用光滑半圆形溜槽布焦炭时的落点半径最大,比前者平均大 0.229 m。光滑矩形溜槽布料的落点半径小于光滑半圆形溜槽布料时的落点半径,落点半径平均小 0.059 m。

图 23 为相同模拟条件下,3 种不同溜槽结构下的烧结矿颗粒在空区中的流动轨迹位置对比图。经过量化分析发现,结果和焦炭颗粒基本一致。

图 24 为溜槽结构对焦炭和烧结矿料流宽度的

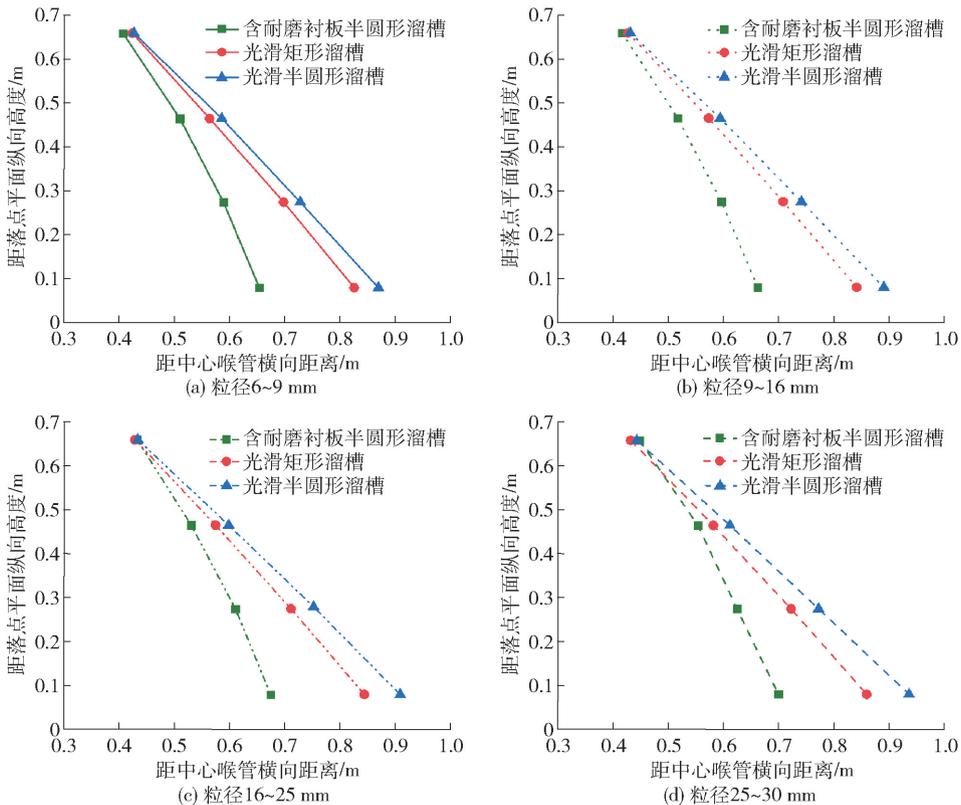


图 22 焦炭颗粒在不同溜槽结构下的轨迹流

Fig. 22 Effect of the chute design on the trajectories of different coke sizes

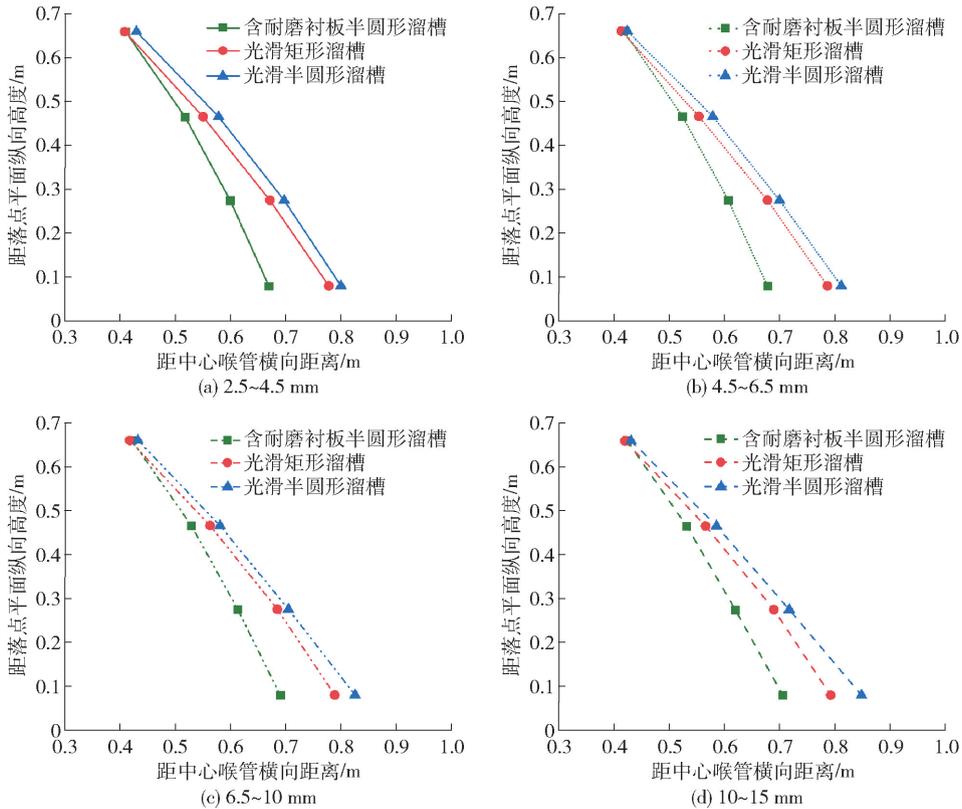


图 23 烧结矿颗粒在不同溜槽结构下的轨迹流

Fig. 23 Effect of the chute design on the trajectories of difference sinter sizes

影响。由图中可以看出,矩形截面对应的料流宽度小于半圆形截面溜槽的料流宽度,而有衬板的半圆形溜槽所对应的料流宽度小于光滑半圆溜槽的料流宽度。这是由于炉料在离开光滑矩形溜槽末端时的偏析程度较光滑半圆形溜槽的小,导致炉料在下落过程中比较聚集,所形成的料流宽度较小;而炉料会

在有衬板溜槽上形成缓冲区,导致炉料在溜槽内运动时的速度较小,故形成的料流宽度更小。

4 结论

本文通过 DEM 仿真模拟研究了溜槽结构、角度以及颗粒种类和形状对炉料颗粒下落轨迹、溜槽出口端位置颗粒的尺寸分布和速度分布以及偏析的影响,得到以下主要结论。

1) 焦炭和烧结矿颗粒在下料至旋转溜槽后,首先倾倒的颗粒被耐磨衬板片固定在耐磨衬板区域,基本不流动,炉料表面层颗粒正常流动。溜槽倾角越大,颗粒在溜槽出口端颗粒的速度越小。当炉料颗粒离开溜槽在空区流动时,通过对比三种溜槽倾角,发现倾角越大,轨迹流越稳定;同时,颗粒流也发生了明显的偏析现象。小粒径颗粒集中在内部,即靠近炉喉中心的位置,颗粒尺寸越大,颗粒越靠近炉壁,大粒径颗粒则集中在轨迹流外侧。

2) 不同形状的小粒径颗粒在空区中流动的速度相差不大,随着颗粒粒径的增大,颗粒形状所带来

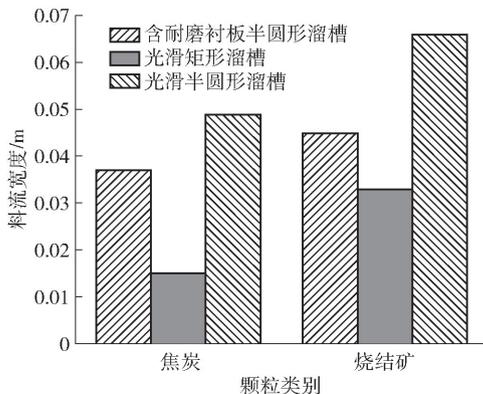


图 24 溜槽结构对料流宽度的影响

Fig. 24 Effect of the chute design on the width of the particle stream

的影响越来越大,其中球体颗粒的速度最大。在相同粒径下,三倍长径比的椭球体的落点位置距离炉喉中心的横向距离最近,球体颗粒最远。随着颗粒粒径的增大,三种不同形状的颗粒流落点位置相差越来越大。在同一颗粒形状的轨迹流中,颗粒粒径越大,落点位置越远。

3)炉料在半圆形溜槽上运动时的偏移程度大于在矩形溜槽上的偏移程度,这是由于炉料在半圆形溜槽上运动时,所受到的科氏力的影响程度大于矩形溜槽。颗粒流在离开含耐磨衬板的半圆形溜槽之后,颗粒的落点速度和落点位置均为最小。通过对比三种不同结构溜槽下颗粒在空区中的流动轨迹,发现颗粒在离开含耐磨衬板的半圆形溜槽后,颗粒流最靠近炉喉,落点位置距中心喉管横向距离最近。通过料流宽度的研究发现,矩形截面对应的料流宽度小于半圆形截面溜槽的料流宽度,而有衬板的半圆形溜槽所对应的料流宽度小于光滑半圆形溜槽的料流宽度。综合来讲,颗粒在矩形溜槽上分布较为均匀且料流宽度较窄,矩形出口溜槽更有利于实现高炉精准布料,减小炉料在高炉中的偏析,建议后续重视矩形溜槽的研究与实验,以实现布料的优化。

[参考文献]

[1] ZHANG W. A review on the dissection of quenched blast furnaces—spanning from the early 1950s to the 1970s[J/OL]. *Process*, 2016, 4, 36. <https://doi.org/10.3390/pr4040036>.

[2] CHAKRABARTY A, BISWAS R, BASU S, et al. Characterisation of binary mixtures of pellets and sinter for DEM simulations[J]. *Advanced Powder Technology*, 2022, 33(1): 103358.

[3] CHEN J, ZUO H, XUE Q, et al. A review of burden distribution models of blast furnace[J]. *Powder Technology*, 2022, 398: 117055.

[4] CHEN J, ZUO H, ZHAO H, et al. Burden circumferential mass segregation at the blast furnace with parallel hoppers[J]. *Powder Technology*, 2022, 409: 117845.

[5] LI Z, KUANG S, LIU S, et al. Numerical investigation of burden distribution in ironmaking blast furnace[J]. *Powder Technology*, 2019, 353: 385–397.

[6] WEI H, NIE H, LI Y, et al. Measurement and simulation validation of DEM parameters of pellet, sinter and coke particles[J]. *J Powder Technology*, 2020, 364: 593–603.

[7] 滕杰,郭庆,郭柄江,等.高炉布料溜槽长寿化的离散元模拟研究[J].*有色冶金节能*,2020,36(5):38–43.

TENG Jie, GUO Qing, GUO Bingjiang, et al. Discrete element

simulation study on service longevity of blast furnace distributing chute[J]. *Energy Saving of Nonferrous Metallurgy*, 2020, 36(5): 38–43.

[8] YU Y, SAXEN H. Segregation behavior of particles in a top hopper of a blast furnace[J]. *Powder Technology*, 2014, 262: 233–241.

[9] ZHANG T F, GAN J Q, PINSON D, et al. Size-induced segregation of granular materials during filling a conical hopper[J]. *Powder Technology*, 2018, 340: 331–343.

[10] ZHANG J L, QIU J Y, GUO H W, et al. Simulation of particle flow in a bell-less type charging system of a blast furnace using the discrete element method[J]. *Particuology*, 2014, 16(5): 167–177.

[11] 杜鹏宇,程树森,胡祖瑞,等.高炉无钟炉顶布料料流宽度数学模型及试验研究[J].*钢铁*, 2010, 45(1): 14–18.

DU Pengyu, CHENG Shusen, HU Zurui, et al. Mathematical model of burden width in a bell-less top blast furnace and modeling experimental research[J]. *Iron & Steel*, 2010, 45(1): 14–18.

[12] MIO H, NAKAUCHI T, KAWAGUCHI Y. High-speed video recording of particle trajectory via rotating chute of nagoya No. 3 blast furnace and its comparison with simulated behavior using DEM[J]. *ISIJ International*, 2017, 57(2): 272–278.

[13] HOLZINGER G, SCHATZL M. Effect of chute start angle and hopper change on burden distribution during the charging process of a bell-less top blast furnace with two parallel hoppers[J]. *Powder Technology*, 2022, 395: 669–680.

[14] 朱文睿,雷丽萍,曾攀.溜槽对高炉无料钟布料粒度偏析的影响研究[J].*力学与实践*, 2014, 36(6): 764–769.

ZHU Wenrui, LEI Liping, ZENG Pan. The effect of the chute on the particle size segregation in a bell-less top blast furnace[J]. *Mechanics and Practice*, 2014, 36(6): 764–769.

[15] 孙俊杰,狄瞻霞,李家新,卢开成.溜槽形状及倾角对料流运动的影响[J].*钢铁*, 2019, 54(4): 19–23.

SUN Junjie, DI Zhanxia, LI Jiaxin, et al. Influence of inclination and shape of chute on movement of burden flow[J]. *Iron & Steel*, 2019, 54(4): 19–23.

[16] 徐文轩.高炉布料偏析优化及炉内气固两相流动特征研究[D].北京:北京科技大学,2020.

XU Wenxuan. Investigation on burden distribution segregation optimization of blast furnace and gas solid flow characteristics in blast furnace[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.

[17] KOU M Y, XU J, WU S L, et al. Effect of cross-section shape of rotating chute on particle movement and distribution at the throat of a bell-less top blast furnace[J]. *Particuology*, 2019, 44(3): 194–206.

[18] 张斌.高炉布料过程布料矩阵的逆计算研究[D].内蒙古:内蒙古科技大学,2020.

ZHANG Bin. Study on the inverse calculation of the distribution

- matrix in the blast furnace distribution process [D]. Inner Mongolia; Inner Mongolia University of Science and Technology, 2020.
- [19] 刘俊涵, 黄明蓉, 孙俊杰, 等. 基于 DEM 的无钟高炉布料料流轨迹研究[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(12): 1253-1259.
LIU Junhan, HUANG Mingrong, SUN Junjie, et al. Study on material flow trajectory with DEM for bell-less top charging of blast furnace [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2021, 33(12): 1253-1259.
- [20] HONG Z, ZHOU H, WU J, et al. Effects of operational parameters on particle movement and distribution at the top of a bell-less blast furnace based on discrete element method [J]. Steel Research International, 2021, 92(1): 2000262.
- [21] 高绪东, 程树森. 高炉无料钟参数对料流轨迹的影响[J]. 钢铁研究学报, 2009, 21(7): 5-19.
- [22] YU Y W, SAXEN H. Analysis of rapid flow of particles down and from an inclined chute using small scale experiments and discrete element simulation [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2012, 38(6): 432-441.
- [23] LIU S, ZHOU Z, DONG K. Numerical investigation of burden distribution in a blast furnace [J]. Steel Research International, 2015, 86(6): 651-661.
- [24] ZHOU Z Y, ZOU R P, PINSON D, et al. Dynamic simulation of the packing of ellipsoidal particles [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(16): 9787-9798.
- [25] LIU S. Discrete particle simulation of burden materials in blast furnace top [D]. Monash University, 2017.

Effect of particle shape and rotating chute geometry on the particle dynamic behaviour in blast furnace burden distribution process

WANG Junqing^{1,2}, LIU Sida^{1,2}, XU Jin^{1,2}, ZHOU Zongyan^{1,2}

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory for Simulation and Modelling of Particulate Systems, Nanchang 330013, China;

2. International Innovation Research Institute, Jiangxi University of Science and Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: The rotating chute is an important component of the blast furnace burden distribution system. It can affect the speed and distribution of burden materials at the chute tip by changing chute angle and rotating speed, hence further impact the falling trajectory. In this work, we use the discrete element method to study the behavior of burden materials under different conditions including varying the chute structure, chute angle, and particle shape. The results demonstrate that the segregation can occur during the chute distribution process, and the chute angle of the chute has a great influence on the burden distribution. The larger the angle, the more stable the material flow; the larger the particle size, the greater the influence of the particle shape. The square shaped chute can effectively decrease the width of the material flow, thereby achieving the effect of precise distribution. The addition of wear-resistant lining plates can also achieve the precise distribution to a certain extent.

Key words: blast furnace burden; rotating chute; particle trajectory; particle segregation; discrete element method

江西理工大学矿冶过程智能化研究中心团队简介

江西理工大学矿冶过程智能化研究中心团队以推进矿业资源高效利用、矿冶过程低碳绿色化和智能化为目标,通过严谨的数值仿真及物理实验在不同尺度解析颗粒-颗粒-颗粒-流体的多相流动、热质传递及化学反应规律,结合机理-数据双驱动建模技术,开发面向“双碳”目标绿色生产的矿冶优化技术及“卡脖子”工业软件(算法),为战略性矿产资源高效利用开发及冶金过程节能减排提供技术和数据支撑。主要研究方向有:①矿冶过程跨尺度数值建模及智能化;②多相流传输理论与数值模拟仿真;③颗粒散料体处理技术开发和过程模拟及优化;④材料热力学与动力学及工业过程智能化;⑤先进稀土钢铁材料开发及制造流程工艺系统优化。中心建有国家级及省级平台各1个,拥有研究人员10人,其中国家级人才1人、江西省科技领军人才3人,教授2人,副教授及特聘副教授6人,超80%的团队成 员为海外高水平大学的引进人才。