

受碾区域内颗粒轴向流动特性的离散元模拟

韩燕龙 贾富国 曾勇 王爱芳

Granular axial flow characteristics in a grinding area studied by discrete element method

Han Yan-Long Jia Fu-Guo Zeng Yong Wang Ai-Fang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 234502 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.234502

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234502>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I23>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

驾驶员预估效应下车流能耗演化机理研究

[Analysis of evolution mechanism of traffic energy dissipation by considering driver's forecast effect](#)

物理学报.2015, 64(15): 154503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154503>

部分道路关闭引起的交通激波特性研究

[Study of the shock wave induced by closing partial road in traffic flow](#)

物理学报.2015, 64(11): 114502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.114502>

基于有向渗流理论的关联微博转发网络信息传播研究

[Information spreading in correlated microblog reposting network based on directed percolation theory](#)

物理学报.2015, 64(4): 044502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044502>

考虑动态车间距的一维元胞自动机交通流模型

[One-dimensional cellular automaton model of traffic flow considering dynamic headway](#)

物理学报.2015, 64(2): 024501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024501>

中小学门口道路上学期间的一个元胞自动机模型

[A cellular automaton model for the road in front of elementary and middle school gates during students going to school](#)

物理学报.2014, 63(9): 094502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.094502>

受碾区域内颗粒轴向流动特性的离散元模拟*

韩燕龙 贾富国[†] 曾勇 王爱芳

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

(2015年5月25日收到; 2015年8月3日收到修改稿)

为探讨受碾状态颗粒的稳定流动, 在碾辊轴与筛筒组成的受碾区域内, 建立了轴向运动的颗粒流离散元物理模型. 研究表明: 受碾区域内各颗粒沿轴向运动能力的差异造成了颗粒流密度不均匀; 颗粒与筛筒间的静摩擦系数影响颗粒轴向流动的形态、速率及集散程度, 受碾区域内单层颗粒的轴向均方偏差与流动时间的平方正相关, 属于“super”扩散; 整体分析受碾区域发现, 颗粒的轴向平均速度沿轴向坐标逐渐增大, 而颗粒的三轴合成平均速度沿轴向坐标逐渐降低; 受碾区域内各轴向位置处颗粒运动的剧烈程度不同, 沿轴向坐标颗粒的波动速度平方呈现先增大后降低而后又增大的趋势; 单颗粒的碰撞总能量损失能谱也表明了颗粒运动程度不同, 即轴向流动时在受碾区域的前半段碰撞剧烈, 能量损失多, 在后半段碰撞程度弱, 能量损失较少. 通过对受碾区域内颗粒流动的数值模拟分析, 明晰了颗粒在受碾条件下稳定流动特性, 有益于碾磨工业对产品品质控制及设备参数优化的研究.

关键词: 颗粒流动, 受碾区域, 离散元, 模拟**PACS:** 45.70.Vn, 02.60.Cb, 83.80.Fg**DOI:** 10.7498/aps.64.234502

1 引言

颗粒物料是由众多离散颗粒相互作用而形成的具有内在有机联系的复杂系统, 在食品、药品、化工及农业物料等领域都涉及对颗粒体的研究^[1]. 在一些颗粒系统中, 其往往呈现出复杂的运动特性, 如二元颗粒体的分离、颗粒混合、碾磨设备内颗粒间的能量传递及碰撞破碎^[2-5], 明晰这些现象的关键是要掌握颗粒的动态流动行为^[6]. 目前对颗粒流动行为的试验研究多采用图像或光学原理进行, 即采用高速摄像手段进行单颗粒运动轨迹跟踪试验、采用粒子图像速度系统(PIV)进行颗粒群瞬时全流场试验、采用多普勒原理的激光衍射粒度仪(PDPA)进行的颗粒粒度和速度空间分布试验^[7]. 但上述试验手段受限于颗粒处理规模、获取的运动特性信息量, 而不适合颗粒在复杂系统内流动碰撞等内容的研究.

而研究颗粒流动特性需以微观尺度获取颗粒运动信息^[8]. 需明晰每个颗粒的运动属性, 如受到的接触力、运动速度及碰撞能等. 近年来由Cundall等开发的离散单元法(discrete element method, DEM)成为了研究散粒体动力学的有效手段, 它能跟踪每个颗粒的运动, 利用颗粒之间、颗粒与边界之间碰撞产生的能量交换来预测颗粒群的详细运动过程, 且每个颗粒的运动属性会被记录, 经过30多年的发展, 该方法的计算效率、模拟准确度得到提高, 现在已能在复杂系统下计算数百万的颗粒运动^[7].

本文拟研究颗粒在横式碾磨设备内的流动, 涉及颗粒的碰撞等运动属性. 基于上述分析, 可采用DEM分析碾磨设备内颗粒动态流动行为. 针对DEM研究颗粒的流动过程, Cleary^[9]曾以颗粒介质轴向位置分布规律分析球磨机内颗粒轴向运输. Cunha等^[10]以颗粒在立轴式破碎机内的停留时间

* 黑龙江省自然科学基金(批准号: E201322)、哈尔滨市优秀学科带头人基金(批准号: 2013RFXXJ086)和哈尔滨市应用技术研究与应用开发项目(批准号: 2013DB2BG005)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: jfg204@163.com

分布表征流动性能. Morrison 等^[11]曾通过颗粒的速度分布对比分析了塔式磨与球磨机内颗粒流动差异. 这些研究表明颗粒的一些微观运动属性可以作为宏观介质流动研究的评价指标. 而针对碾磨设备工作参数对颗粒流动性能的影响研究, Lu 等^[12]分析了滚筒内壁粗糙程度对颗粒流动性能的影响规律. Parker 等^[13]发现滚筒内颗粒的轴向运动与颗粒尺寸密切相关, 而与滚筒尺寸无关. Third 等^[14]发现水平滚筒内颗粒的轴向扩散系数依赖颗粒的尺寸、重力及滚筒旋转转速, 并总结出该系统内同质颗粒的轴向扩散满足菲克第二定律. 从上述学者研究可知, 可从多角度对颗粒流动展开模拟研究, 如颗粒流动过程轨迹变化、力传递、速度波动及能谱分析等.

本文以三维离散元法对碾轴与筛筒间的颗粒稳定流动过程进行了数值分析, 该过程分析有益于碾米加工领域对产品品质控制及设备参数优化. 针对颗粒流密度轴向分布不均现象, 从颗粒流动形态、速率及集散度三个方面分析单层受碾颗粒的轴向流动过程. 同时宏观分析颗粒流动速度分布及单颗粒碰撞能量损失, 旨在明晰颗粒流动的各向异性.

2 数值模拟及模型建立

本文拟采用数值方法分析颗粒在受碾状态下的轴向稳定流动过程. 如图 1, 与颗粒流发生接触碰撞作用的几何体结构主要包括四部分: 集料斗、螺旋输送机、筛筒及碾辊轴. 螺旋输送机为单头螺旋, 其长度为 60 mm, 螺距为 12 mm; 碾辊轴长度为 80 mm, 直径为 20 mm, 轴上对称分布两根厚度为 4 mm 的直筋; 筛筒外径为 50 mm.

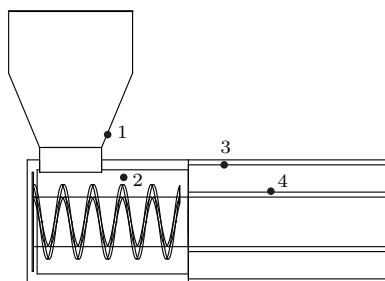


图 1 几何体结构简图 (1. 集料斗 2. 螺旋输送机 3. 筛筒 4. 碾辊轴)

Fig. 1. Geometry structure diagram.

图 2 简述了颗粒在该几何体内的运动过程, 首先颗粒在重力作用下充满料斗, 接着开启颗粒进

料口, 并使螺旋输送机及碾辊轴以 800 r/min 转动, 期间颗粒将沿轴向输送, 颗粒流以螺旋线沿轴向运动^[15], 经 2.5 s 后颗粒将在整个几何体内流动, 此后颗粒的平均速度变化不大, 将形成稳定流动.

在稳定流动过程中, 颗粒在接触到碾辊轴时, 贴近碾轴的颗粒运动剧烈, 贴近筛筒的颗粒运动较舒缓, 造成颗粒翻滚、易位, 且颗粒将受来自碾轴及其他颗粒的擦离、碾磨作用. 故本文将重点分析碾辊与筛筒组成的区域, 即颗粒的受碾区域, 颗粒在该区域内运动过程被定义为受碾状态下颗粒的轴向流动.

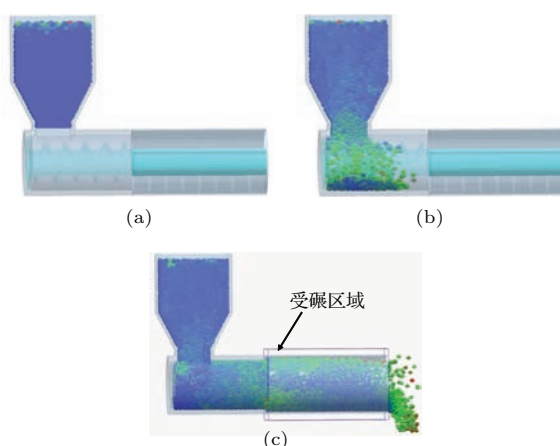


图 2 (网刊彩色) 颗粒轴向流动模拟过程 (a) 颗粒充满料斗; (b) 颗粒输送; (c) 颗粒稳定流动

Fig. 2. (color online) The simulation process of granular axial flow: (a) Filling hopper with particles; (b) particles conveying; (c) the process of stable flow.

为模拟连续流动, 设置集料斗内不间断生成颗粒, 即连续供料, 保证颗粒流动过程中集料斗内充满颗粒. 模型中, 球形颗粒密度为 $1538 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 且粒径分布为半径均值 1.5 mm, 方差 0.08 的正态分布, 这符合等效球径糙米物料属性, 而各几何体部件采用不锈钢材质.

采用离散单元法模拟受碾颗粒流动, 颗粒间及颗粒与几何体部件间的接触力计算模型的选取对模拟结果准确性有很大影响^[16]. 模拟过程借助 Hertz-Mindlin 接触模型计算每个颗粒的运动信息, 该接触模型将颗粒所受作用力分解到接触点的法向和切向两个方向, 每个方向上的力简化成弹性力及阻尼作用力, 切向力除考虑弹性力及阻尼力外, 还需兼顾库仑摩擦力的限制. 接触模型将法向和切向力耦合, 从而计算出颗粒在接触碰撞时受到的空间作用力, 并通过迭代, 计算出颗粒群在仿真时间内的位置信息^[17]. 基于此, 流动过程中每个颗粒的

平动运动方程为

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = m_i \mathbf{g} + \sum_{j=1}^{n_i} (\mathbf{F}_n + \mathbf{F}_n^d + \mathbf{F}_t + \mathbf{F}_t^d). \quad (1)$$

每个颗粒的转动运动方程为

$$I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i} (\mathbf{T}_t + \mathbf{T}_r), \quad (2)$$

式中, $m_i \mathbf{g}$ 为颗粒重力、 \mathbf{F}_n 为法向接触力、 \mathbf{F}_n^d 为法向阻尼、 \mathbf{F}_t 为切向接触力、 \mathbf{F}_t^d 为切向阻尼、 \mathbf{T}_t 为切向力矩、 \mathbf{T}_r 滚动摩擦力矩、 I 为颗粒转动惯量、 n_i 为与颗粒 i 接触的颗粒总数、 \mathbf{V} 为颗粒速度、 $\boldsymbol{\omega}_i$ 为颗粒角速度, 接触模型参数的详细分析可见前期研究部分 [18]. 模拟系统中所需的参数见表 1, 其中以 20% 的 Rayleigh 时间步长作为计算时间步长.

表 1 仿真所需参数
Table 1. Parameters used in simulation.

参数名称	参数值	参数名称	参数值
颗粒密度/kg·m ⁻³	1538	几何体密度/kg·m ⁻³	7800
颗粒泊松比	0.25	几何体泊松比	0.3
颗粒剪切模量/Pa	3.75 × 10 ⁸	几何体剪切模量/Pa	7 × 10 ¹⁰
颗粒间恢复系数	0.6	颗粒与几何体间恢复系数	0.5
颗粒间静摩擦系数	0.3	颗粒与筛筒间静摩擦系数	0.1—0.7
时间步长/s	1.35 × 10 ⁻⁶		

3 模拟分析及讨论

3.1 受碾区域颗粒流密度分布

颗粒稳定流动后, 如图 3 所示, X 轴表示轴向, Y 轴 Z 轴表示端面径向, 坐标原点为出口端面中心, 依据等距原则, 将受碾区域划分 7 层作为分析区域, 模拟中动态观测发现, 在该区域内颗粒将沿轴向流动 (X 轴方向), 在该方向颗粒流密度分布不均, 即靠近螺旋输送机一端 (第 1 层) 颗粒密集, 后续各层颗粒数目逐渐减少, 颗粒层变稀疏.

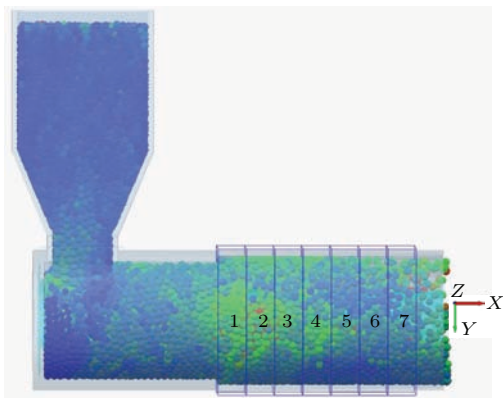


图 3 (网刊彩色) 受碾区域内颗粒分布
Fig. 3. (color online) The particle distribution in the grinding area.

以采样间隔 0.01 s 择取 4.5—5 s 内颗粒运动信息, 图 4 定量描述该区域内沿轴向颗粒数目变化情

况. 由图中可见, 每一层的颗粒数都随时间波动变化, 纵观一层到七层, 沿轴向颗粒数逐渐减少, 前后两层均以约 50 粒的速率降低, 即颗粒流密度逐渐降低, 实际颗粒流在受碾设备内也有类似现象 [19].

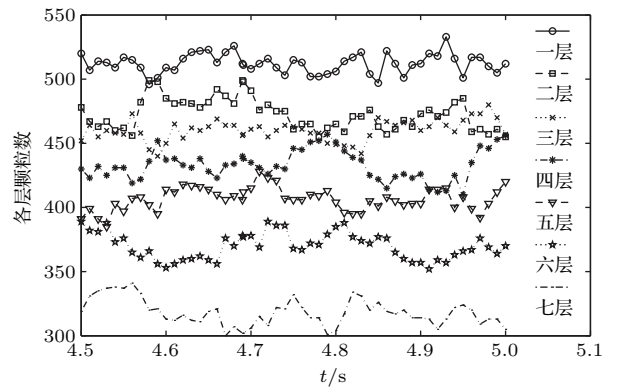


图 4 (网刊彩色) 稳定流动时各层颗粒数
Fig. 4. (color online) The particle numbers of every layer in steady flow conditions.

3.2 受碾区域内单层颗粒流动

为分析受碾区域内颗粒数目沿轴向降低的原因, 在该区域内选取一层颗粒 (对应于图 3 中第一层区域内颗粒, 为便于观测其他层颗粒未显示), 如图 5 所示 (图中以颗粒轴向速度作为图例), 从初始时刻 (以稳定流动 4.5 s 时刻作为初始零时刻) 至 0.21 s 后, 同一层的颗粒表现出不同的轴向运动能力, 当经 0.21 s 后, 部分颗粒已经运动到第六层, 而某些颗粒轴向移动的位移很小, 仍处于第一层的位

置. 从图5(b), (c)两时刻单层颗粒运动图可见, 贴近碾轴中心层颗粒似有更快的轴向运动能力.

若以 $X_k(0)$, $X_k(t)$ 表示单层颗粒中在初始时刻及 t 时刻后颗粒 k 的轴向坐标, 考虑某些颗粒接触碰撞后会沿轴向回弹, 故以 $[X_k(t) - X_k(0)]^2$ 描述单层颗粒中各个颗粒经 t 时刻后沿轴向运动的能力. 图6表示了单层颗粒经0.07 s后轴向运动能力在Y-Z面内的分布图. 图中颗粒颜色表征每个颗粒轴向位移量的平方, 从图中可直观看出, 经0.07 s后单层颗粒轴向位移量的平方值 $([X_k(0.07) - X_k(0)]^2)$ 在该层径向分布不一致, 贴近碾轴位置处颗粒移动的轴向位置量平方值变化

明显. 层中每个颗粒在空间分布位置不同, 处于碾轴位置的颗粒比筛筒边界的颗粒具有更快的轴向运动速度. 对同一轴向位置, 若该位置处所有颗粒保持整体轴向运动, 宏观流动则不会呈现颗粒疏密变化. 然而由于中心层颗粒与边界层颗粒的轴向运动能力差异, 造成开始相对集中的颗粒层逐渐开始疏散扩张, 这也可从图5(a)与(d)中证实, 若宏观考虑整个受碾区域段内, 每一轴向坐标位置都会因颗粒空间运动能力不同造成该位置处颗粒的运动扩张, 故在稳定流下会呈现出颗粒流密度降低的现象. 因而受碾区域内沿轴向颗粒流密度逐渐降低的原因与颗粒沿轴向运动能力密切相关.

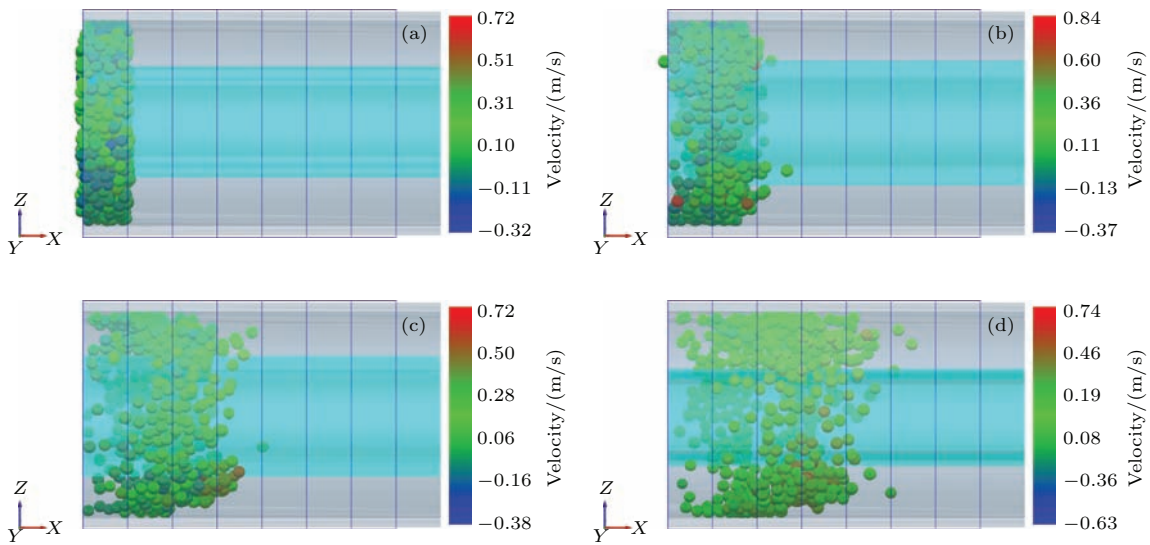


图5 (网刊彩色) 受碾区域内单层颗粒流动 (a) 初始时刻; (b) 0.07 s 时; (c) 0.14 s 时; (d) 0.21 s 时

Fig. 5. (color online) The single particles flow in the grinding area: (a) At the initial time; (b) in time of 0.07 s; (c) in time of 0.14 s; (d) in time of 0.21 s.

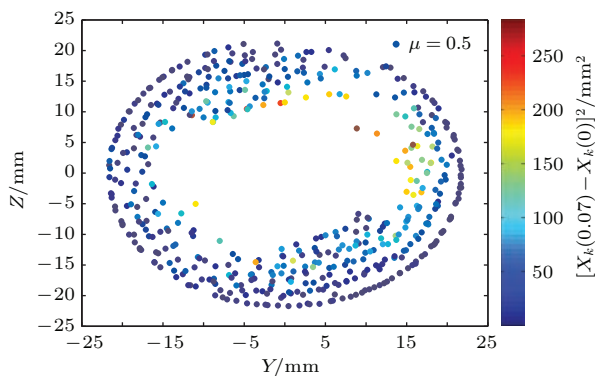


图6 (网刊彩色) 单层颗粒轴向运动能力分布

Fig. 6. (color online) The axial movement ability distribution of single particles.

颗粒属性及几何体部件工作参数, 如颗粒粒径、密度、摩擦系数及部件转速等都与流动性能密切相关^[20-22]. 上述分析发现颗粒轴向流动过程,

中心层和边界层的颗粒运动能力不同, 越贴近筛筒的颗粒轴向运动能力越弱, 但上述模拟研究是将颗粒与筛筒壁间的静摩擦系数 μ 等于0.5. 为探究颗粒与筛筒壁间静摩擦系数对颗粒流动的阻滞影响规律, 本文另外模拟了 μ 分别为0.1, 0.3, 0.7时受碾区域内颗粒的轴向流动情况. 采取与图6同样方法, 提取图3中第一层区域内颗粒, 待颗粒稳定流动后, 经0.07 s后采集该层内每个颗粒轴向位移量平方值, 以该值的大小表征轴向运动能力的强弱. 图7为不同摩擦系数的单层颗粒轴向运动能力图. 从图中可看出, 在各摩擦系数下层内每个颗粒的轴向运动能力都不完全相同. 由图7(a)看出, 当 μ 为0.1时, 下半壁面颗粒受重力影响, 颗粒堆积, 轴向流动弱. 但在中心层及上半壁面, 筛筒壁对颗粒流阻滞作用弱, 颗粒仍具有较快的轴向流动. 这造成

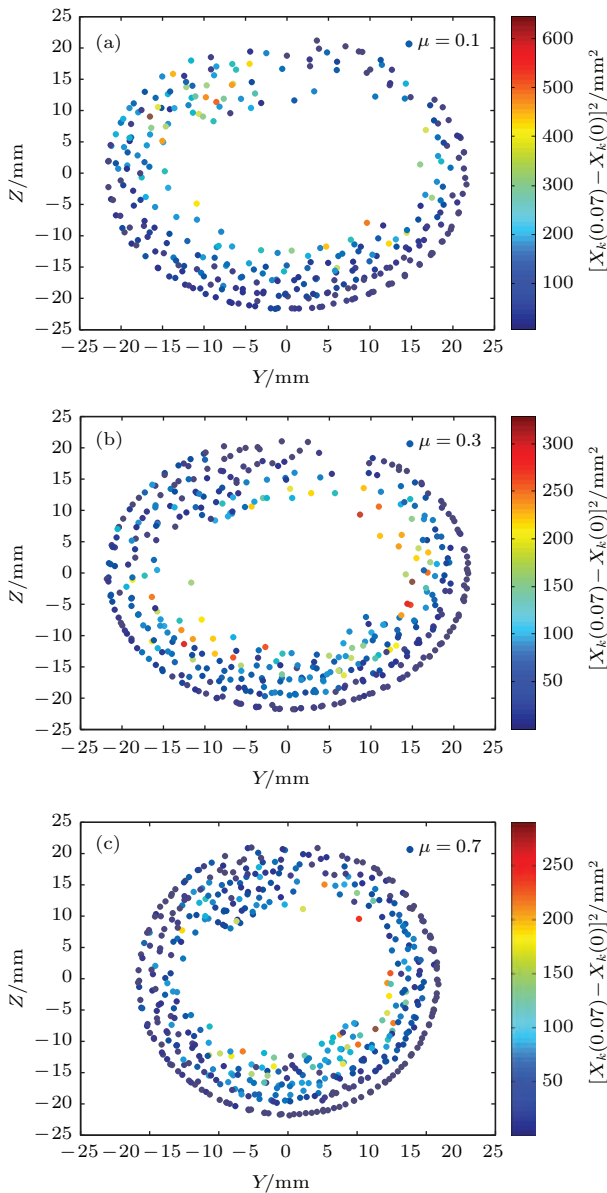


图7 (网刊彩色) 不同摩擦系数的单层颗粒轴向运动能力分布 (a) 静摩擦系数为0.1; (b) 静摩擦系数为0.3; (c) 静摩擦系数为0.7

Fig. 7. (color online) The axial movement ability distribution of single particles for different friction coefficient: (a) the static friction coefficient of 0.1; (b) the static friction coefficient of 0.3; (c) the static friction coefficient of 0.7.

颗粒层以‘/’状, 保持倾斜形态轴向流动扩张. 当 μ 大于0.3后, 继续增加筒壁与颗粒间的摩擦系数对流动形态影响较小, 各摩擦系数下都表现为: 筛筒壁面对颗粒流产生较强阻滞作用, 但中心层颗粒受碾后有较快的轴向运动能力, 单层颗粒都将呈‘ \cup ’状, 保持中心层与边界层差速形态运动扩张. 纵观各图发现, μ 为0.1时, 颗粒轴向运动能力最大(图例值较大), 但此值下单层颗粒较稀疏(图中颗粒点数少). μ 大于0.3后, 不同摩擦系数下单层颗粒运

动趋势相同, 但层中颗粒数目随摩擦系数增大而增多. 受碾区域内其他层轴向运动情况与此分析一致, 不再赘述.

上述研究发现 μ 值不同时, 单层颗粒轴向流动不同. Third等^[14]曾研究旋转滚筒内颗粒的轴向扩散时发现, 滚筒中心位置单层颗粒的轴向运动符合“normal”扩散模型, 即单层颗粒轴向均方偏差与运动时间呈线性变化, 即

$$\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [X_k(t) - X_k(0)]^2 = 2D_{ax}t, \quad (3)$$

式中, N 层中颗粒总数, D_{ax} 为轴向扩散系数, 此式中 $\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [X_k(t) - X_k(0)]^2$ 即为轴向均方偏差(MSD). 为表征不同摩擦系数下单层颗粒轴向流动扩散, 如图8所示, 作出了轴向MSD与时间 t 间的关系.

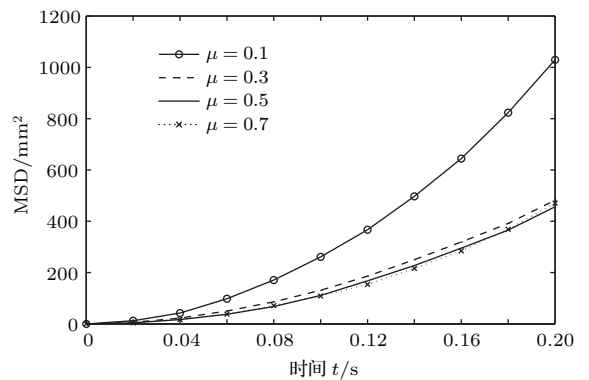


图8 不同摩擦系数的单层颗粒轴向均方偏差
Fig. 8. Mean square distribution of single particles for different friction coefficient.

由图中可看出, 受碾区域内颗粒轴向 $MSD \propto t^2$, 受碾状态颗粒的轴向流动属于“super”扩散^[14]. 从图中可证实, 当 μ 为0.1时, 颗粒层轴向流动最快, 当 μ 大于0.3时, 各时间下颗粒轴向流动速率随摩擦系数增大而略为降低, 流动趋势相似, 变化不明显.

上述结果表明, 颗粒与筛筒壁间摩擦阻滞作用会影响单层颗粒轴向流动形态及层内各颗粒流动速率, 从而造成了单层颗粒轴向扩张, 见图5(a)到(d)的流动过程. 为表征颗粒与筛筒壁间静摩擦系数对单层颗粒轴向扩张的影响, 如图9所示, 作出单层颗粒在轴向运动0.21 s后, 不同摩擦系数的层内颗粒轴向坐标概率密度分布. 从图中发现, 当 μ 为0.1时, 颗粒轴向分布的幅宽与其他系数下接近,

表明运动相同时间后, 该条件下颗粒集散程度与其他静摩擦系数下相似, 又因为颗粒轴向运动最快, 故其轴向坐标分布峰值较其他系数下右移; 当 μ 大于0.3时, 虽颗粒层流动形态、速率等相近, 但颗粒层集散程度略有差异, 当 μ 从0.3增加到0.7, 轴向坐标分布逐渐“变宽”, 表明颗粒层疏散扩张程度随颗粒与壁面间的摩擦系数增加而略增大.

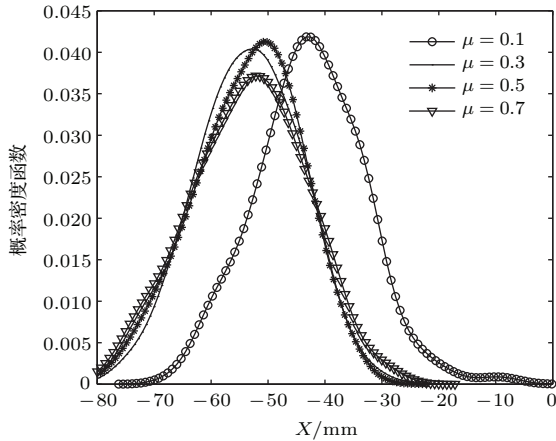


图9 不同摩擦系数的单层颗粒轴向位置分布
Fig. 9. Axial position distribution of single particles for different friction coefficient.

3.3 受碾区域内整体颗粒流动

单层颗粒运动信息不能全面表征受碾区域内颗粒的流动过程, 不同轴向位置的颗粒, 其运动特性也不同. 在稳定时间段50个采样时刻内, 择取各采样轴向坐标区域内所有颗粒的 X, Y 及 Z 轴方向平均速度, 依(4), (5)式可计算出稳定流动时间轴向各位置区域颗粒的轴向平均速度 U_x 及三个方向合成平均速度 U .

$$U_x = \frac{\sum_{i=1}^{50} U_i^x}{50}, \quad (4)$$

$$U = \sqrt{(U_x)^2 + (U_y)^2 + (U_z)^2}, \quad (5)$$

式中, U_i^x 为 i 时刻各采样轴向坐标区域内所有颗粒在轴向(X 方向)的平均速度; U_y, U_z 分别为颗粒的 Y, Z 轴方向平均速度, 计算方法同(4)式.

图10(a)即受碾区域内各轴向坐标处颗粒的轴向平均速度分布, 从图中可看出受碾区域内由进口至出口, 颗粒的轴向平均速度逐渐增大. 依据单层颗粒运动分析结果可知, 这主要因为颗粒流密度逐渐降低, 颗粒的轴向运动空间变大, 轴向的阻滞作用减弱, 故颗粒的轴向平均速度会有增大趋势.

同时可看出, 随着摩擦系数的增大, 同比轴向速度降低.

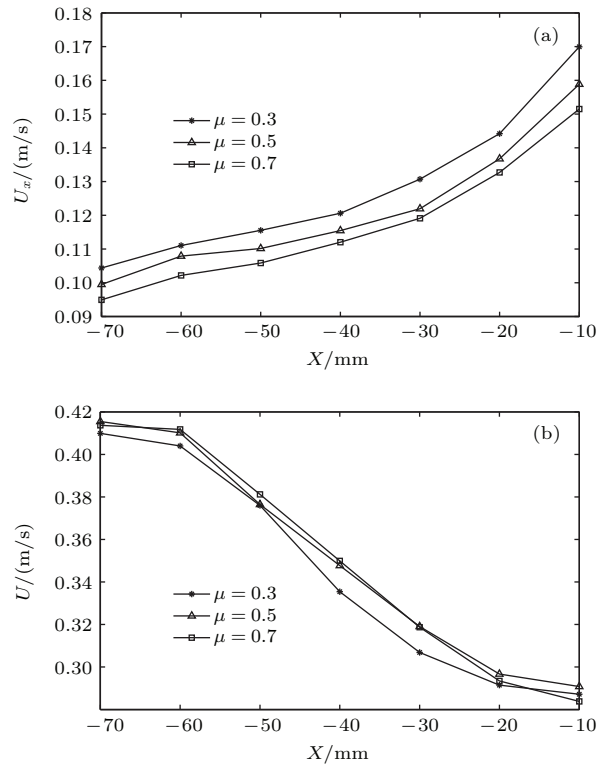


图10 受碾区域颗粒速度分布 (a) 颗粒平均速度轴向分量; (b) 颗粒平均速度分布
Fig. 10. Particle velocity distribution in the grinding area: (a) the axial average velocity; (b) the average velocity.

虽颗粒轴向平均速度沿轴向逐渐增大, 但从图10(b)看出, 颗粒三轴合成平均速度却沿轴向坐标逐渐降低, 且随着摩擦系数的增大, 同比平均速度增加, 但在出口端附近颗粒三轴合成平均速度降低速率减小. 造成这种变化趋势的主要原因是: 颗粒越密集颗粒间碰撞频次越高, 碾辊轴引入系统的能量能更多的传递给颗粒, 造成颗粒的平均速度也越高. 因受碾区域沿轴向颗粒数目逐渐减少, 故平均速度逐渐降低, 可能受边界效应, 在出口端附近颗粒的速度降低速率减缓. 由上述分析可知, 壁面与颗粒静摩擦系数增大时, 同一轴向位置颗粒数目会增多(颗粒越密集), 为证实这点, 如图11所示, 作出受碾区域沿轴向颗粒体积分数变化图, 此处体积分数表示为各采样轴向坐标区域内颗粒总体积与采样区域几何体空腔体积比值. 由图中可直观看出颗粒体积沿轴向以非线性方式逐渐降低, 且颗粒体积分数随静摩擦系数增大而增加, 即造成了平均速度随摩擦系数增大而增大. 上述分析结论与

Yang 等对碾磨机内介质流动分析结论一致 [23]. 综之, 轴向位置颗粒的平均速度与该位置处的颗粒流密度密切相关.

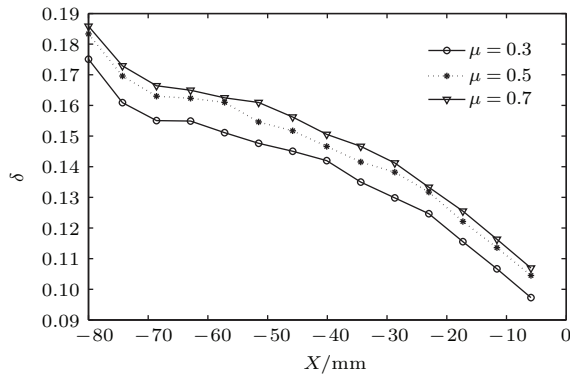


图 11 受碾区域颗粒体积分数

Fig. 11. Particle volume fraction in the grinding area.

受碾区域颗粒轴向流动过程中, 各位置处的颗粒运动的剧烈程度也不一致. 采用孟凡净 [24] 分析理论, 在轴向各位置区域, 利用 X, Y 及 Z 方向的平均速度均方差和作为每个轴向位置区域内所有颗粒的波动速度平方 T^2 , 计算式如下:

$$D(U_i^x) = \frac{\sum_{i=1}^{50} (U_i^x - U_x)^2}{50}, \quad (6)$$

$$T^2 = D(U_i^x) + D(U_i^y) + D(U_i^z), \quad (7)$$

式中, $D(U_i^x), D(U_i^y)$ 及 $D(U_i^z)$ 分别为 X, Y 及 Z 方向的平均速度均方差.

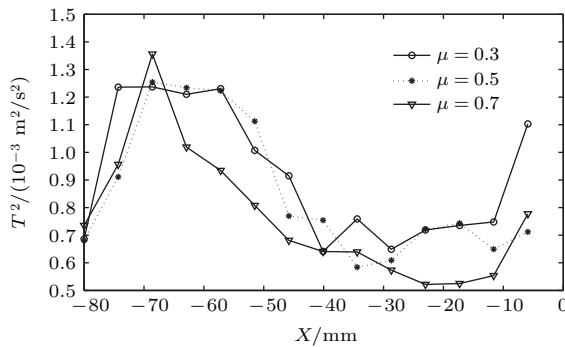


图 12 受碾区域颗粒波动速度平方

Fig. 12. The velocity fluctuations square of particles in the grinding area.

图 12 表示为受碾区域颗粒波动速度平方沿轴向坐标变化图. 由图中看出, 不同摩擦系数下颗粒的波动速度平方变化趋势一致. 在受碾区域进口端位置的颗粒, 其波动速度平方迅速上升, 而后沿轴向各位置处的颗粒, 波动速度平方逐渐降低, 但在

出口端附近的颗粒, 其波动速度平方又呈现上升趋势. 宏观比较受碾区域内颗粒, 前半段内颗粒波动速度较大, 受到碰撞及碾辊轴碾削作用的程度也相应较大. 为证实这点, 在刚进入受碾区域的颗粒中随机选取了一粒, 获取其分别运动在受碾区域前半段内时, 每次发生碰撞时的碰撞总能量损失, 作出该颗粒在前后半段的能谱图, 如图 13 所示.

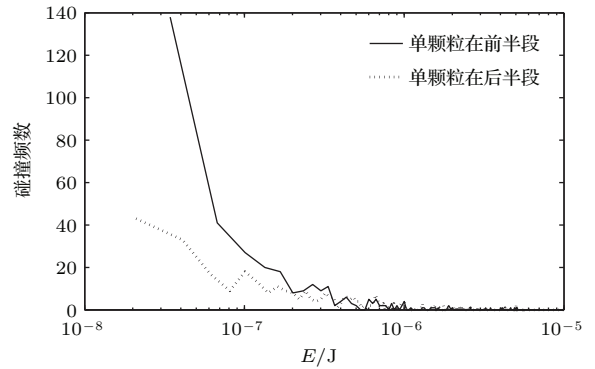


图 13 受碾区域不同段内单颗粒能谱

Fig. 13. Single particle spectrum in the different sections of grinding area.

需要说明的是, 受碾区域轴向长度为 80 mm, 从进口至出口对应的轴向坐标为: $-80-0$ mm. 受碾区域前半段的量化轴向坐标为: $-80-40$ mm, 后半段的轴向坐标为: $-40-0$ mm. 从图中看出, 该颗粒在前后半段受到大于 10^{-6} J 能级碰撞的次数都很少. 多数碰撞的能级都较低, 但在低能级段可看出, 颗粒在前半段受到更多的碰撞.

表 2 颗粒碰撞能量损失
Table 2. Total energy loss of particles.

单颗粒序号	前半段内碰撞次数	前半段内碰撞能量损失总和 $E_{总}/J$	后半段内碰撞次数	后半段内碰撞能量损失总和 $E_{总}/J$
1	1008	1.84×10^{-4}	32	1.94×10^{-5}
2	553	4.44×10^{-4}	108	1.74×10^{-4}
3	630	3.62×10^{-4}	247	6.14×10^{-5}
4	578	3.41×10^{-4}	139	1.77×10^{-4}
5	576	3.69×10^{-4}	560	4.08×10^{-5}
6	630	3.62×10^{-4}	247	6.14×10^{-5}
7	305	1.47×10^{-4}	249	1.38×10^{-4}
8	942	3.32×10^{-4}	389	4.69×10^{-5}
9	361	3.17×10^{-4}	123	1.07×10^{-4}
10	960	3.33×10^{-4}	389	4.69×10^{-5}

为验证上述单颗粒能否表征多数颗粒在受碾区域前后半段内的碰撞差异. 如表 2 所示, 又作出了 10 粒颗粒在前后半段内的碰撞次数及碰撞能量损失总和信息. 由该表可看出, 在受碾区域进口段随机选取的每个颗粒, 在前半段内的碰撞次数较后半段内多, 同时碰撞能量损失总和也是在前半段内损失较大. 某些颗粒在前后半段内, 甚至碰撞次数相差 30 倍, 碰撞能量损失总和和相差一个量级, 如表 2 序号 1 颗粒.

这可表明受碾区域内沿轴向颗粒运动的剧烈程度有差异, 就前后半段整体而言, 在前半段内颗粒运动更为剧烈, 其内颗粒波动速度平方也较后半段内大, 发生这一现象的原因也与轴向颗粒流密度变化密切相关.

4 结 论

1) 颗粒与筛筒间的静摩擦系数 μ 小于 0.3 时, 单层颗粒在受碾区域内以倾斜形态轴向流动, 速率较快; 当 μ 大于 0.3 时, 单层颗粒以中心层与边界层差速形态轴向流动, 随摩擦系数增大轴向颗粒集散趋势略有疏散.

2) 在受碾区域内因每个颗粒的轴向运动能力不同, 使颗粒层运动扩张, 造成颗粒流密度沿轴向逐渐降低, 且颗粒的轴向流动属于“supper”扩散.

3) 在受碾区域内颗粒的运动具有各向异性, 由进口至出口颗粒的轴向平均速度逐渐增大, 而三轴合成平均速度逐渐降低, 这与颗粒碰撞能量损失及颗粒间能量传递有关.

4) 颗粒在受碾区域内的轴向稳定流动时, 在前半段颗粒的波动速度平方大于后半段, 且颗粒在前半段的碰撞次数较多、碰撞总能量损失较大, 这表明了颗粒沿轴向运动剧烈程度不同.

参考文献

- [1] Sun Q C, Wang G Q 2008 *Adv. Mech.* **38** 87 (in Chinese)
[孙其诚, 王光谦 2008 力学进展 **38** 87]

- [2] Zhao Y Z, Jiang M Q, Zheng J Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1812 (in Chinese) [赵永志, 江茂强, 郑津洋 2009 物理学报 **58** 1812]
- [3] Tahvildarian P, Mozaffari F E, Upreti S 2013 *Particulology* **11** 619
- [4] Sinnott M D, Cleary P W 2015 *Miner. Eng.* **74** 163
- [5] Wang M H, Yang R Y, Yu A B 2012 *Powder Technol.* **223** 83
- [6] Pasha M, Hassanpour A, Ahmadian H, Tan H S, Bayly A, Ghadiri M 2015 *Powder Technol.* **270** 569
- [7] Ma Z, Li Y M, Xu L Z 2013 *Trans. CSAM.* **44** 22 (in Chinese) [马征, 李耀明, 徐立章 2013 农业机械学报 **44** 22]
- [8] Jayasundara C T, Yang R Y, Yu A B, Rubenstein J 2010 *Int. J. Miner. Process.* **96** 27
- [9] Cleary P W 2006 *Appl. Math. Model.* **30** 1343
- [10] Cunha E R D, Carvalho R M D, Tavares L M 2013 *Miner. Eng.* **43** 85
- [11] Morrison R D, Cleary P W, sinnott M D 2009 *Miner. Eng.* **22** 665
- [12] Lu G, Third J R, Muller C R 2014 *Particulology* **12** 44
- [13] Parker D J, Dijkstra A E, Martin T W, Seville J P K 1997 *Chem. Eng. Sci.* **52** 2011
- [14] Third J R, Scott D M, Scott S A 2010 *Powder Technol.* **203** 510
- [15] Zhu Y Y 1999 *Rice Processing and Comprehensive Utilization*(Beijing:China Light Industry Press) p149 (in Chinese) [朱永义 1999 稻谷加工与综合利用(北京:中国轻工业出版社)第 149 页]
- [16] Hu J P, Guo K, Zhou C J, Hou C 2014 *Trans. CSAM.* **45** 61 (in Chinese) [胡建平, 郭坤, 周春健, 侯冲 2014 农业机械学报 **45** 61]
- [17] Chen J, Zhou H, Zhao Z, Li Y M, Gong Z Q 2011 *Trans. CSAM.* **42** 79 (in Chinese) [陈进, 周韩, 赵湛, 李耀明, 龚智强 2011 农业机械学报 **42** 79]
- [18] Han Y L, Jia F G, Tang Y R, Liu Y, Zhang Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 174501 (in Chinese) [韩燕龙, 贾富国, 唐玉荣, 刘扬, 张强 2014 物理学报 **63** 174501]
- [19] Zhou X Q 2011 *Rice Processing Technology and Equipment*(Beijing:China Light Industry Press) p163 (in Chinese) [周显青 2011 稻谷加工工艺与设备(北京:中国轻工业出版社)第 163 页]
- [20] Khanal M, Jayasundara C T 2014 *Particulology* **16** 54
- [21] Jayasundara C T, Yang R Y, Yu A B, Curry D 2008 *Chem. Eng. J.* **135** 103
- [22] Yang R Y, Yu A B, Mcelroy L, Bao J 2008 *Powder Technol.* **188** 170
- [23] Yang R Y, Jayasundara C T, Yu A B, Curry D 2006 *Miner. Eng.* **19** 984
- [24] Meng F J, Liu K 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 134502 (in Chinese) [孟凡净, 刘焜 2014 物理学报 **63** 134502]

Granular axial flow characteristics in a grinding area studied by discrete element method*

Han Yan-Long Jia Fu-Guo[†] Zeng Yong Wang Ai-Fang

(Department of Engineering Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

(Received 25 May 2015; revised manuscript received 3 August 2015)

Abstract

Granular grinding is one of the most important unit operations used in a wide variety of industries. Examples can be found in the food industry, for instance, rice processing, etc.. The performance of grinding can be characterized by the particle flow process. Thus in order to study the stable flow process of particles during grinding, we must establish a discrete element model (DEM) of granular axial flow in the grinding area between the grinding roller and the screen drum. DEM is a numerical method used for modelling the mechanical behaviour of granular materials. When DEM is used in grinding, the particle motion is controlled by contact models that are governed by physical laws. Using EDEM software, the process of grinding can be simulated and analyzed. The simulation system chooses continuous feeding; after a period of time, it reaches a steady flow. Research results show that the uneven distribution of particle flow density (PFD) is caused by the axial movement difference of particles in the grinding area. The form, flow rate and distribution of granular axial flow are influenced by static friction coefficient difference between particles and screen drum. Axial mean square deviation of single particles in the grinding area is positively correlated with the square of time, which follows a “super” diffusive behavior defined by some studies. By an overall consideration of the grinding area, we find that the axial average velocities increase, however, the average velocities that are synthesized by three-axis velocities gradually decrease along the axial direction. This is because in a different axial position with different PFI, the PFI plays the key role in energy transfer. More energy will be transferred between high PFI particles that may cause high particle velocity. We also find that the fluctuation velocity square of particles presents the trend of first increasing then decreasing and finally increasing along the axial direction. The difference between PFIs is also elucidated by the total energy dissipation in each collisional energy level for a single particle. Results show that the single particle can endure intenser collision, more energy loss in anterior half segment than those in the second half of the grinding area. As mentioned above, the particle flow was analyzed in terms of particle flow intensity, particle velocity, collision energy, collision number, and so on. Some experimental results confirm the validity of the simulation. The simulation reflects the stable flow characteristics of particles in the grinding area and provides bases and references for further studying the product quality control and grinding equipment parameters optimization.

Keywords: particle flow, grinding area, discrete element, simulation

PACS: 45.70.Vn, 02.60.Cb, 83.80.Fg

DOI: 10.7498/aps.64.234502

* Project supported by the National Science Foundation of Heilongjiang Province, China (Grant No. E201322), the Harbin Foundation for Outstanding Academic Leaders, China (Grant No. 2013RFXXJ086), and the Application Technology Research and Development Project of Harbin, China (Grant No. 2013DB2BG005).

[†] Corresponding author. E-mail: jfg204@163.com