

不同振动模式下颗粒分离行为的数值模拟*

赵啦啦[†] 刘初升 闫俊霞 蒋小伟 朱 艳

(中国矿业大学机电工程学院, 徐州 221116)

(2009 年 9 月 20 日收到; 2009 年 10 月 21 日收到修改稿)

利用三维离散元法对垂直方向上的直线、圆和椭圆振动模式颗粒分离过程进行了数值模拟研究, 对直线振动时上层大颗粒的波动及圆和椭圆振动时出现的聚集、循环等现象的形成机理进行了分析, 并讨论了振动强度对各振动模式下颗粒分离形态的影响规律. 研究表明, 综合运用空隙填充、侧面驱动的颗粒运动和能量非均匀分布三种机理, 并结合颗粒群的速度矢量分布情况能够较好地解释各振动模式下的颗粒分离行为. 振动强度对圆和椭圆振动模式的分离形态具有显著的影响, 并在振动强度约为 3 时, 各种振动模式均具有良好的颗粒分离效果和稳定的颗粒运动状态.

关键词: 振动模式, 颗粒分离, 离散元法, 数值模拟

PACC: 4610, 6120J

1. 引 言

颗粒物质是与流体、固体并存于自然界中的一种重要物质形态, 在外部周期力作用下, 颗粒可展现出尺寸分离 (size segregation)、对流运动 (convection motion)、表面驻波 (surface standing waves)、拱起 (arching) 等许多复杂的集体行为^[1]. 颗粒系统的研究是当前国际上的一个研究热点, 具有重要的基础科学意义和工程应用价值^[2,3].

颗粒的尺寸分离由于在基础研究和生产实践中有着重要作用而成为一个重要的研究课题. 针对颗粒系统的分离现象, 目前已有的研究大都是在垂直直线振动条件下进行的. 研究发现, 在不同的振动条件下颗粒系统呈现出的巴西果、反巴西果、三明治等多种分离构型^[4-6], 并已经注意到了振动模式对颗粒分离的影响, 对不同的振动模式下的颗粒分离行为及物理机理进行了研究. 如文献[7—10]对水平直线振动模式下的颗粒分离机理进行了研究, 文献[11]对倾斜方向直线振动模式下的颗粒静态堆积和对流等特殊现象进行了数值模拟及物理分析, 文献[12—14]对水平圆振动模式下的颗粒分离规律进行了深入研究, 并发现了水平圆振动模式

下的巴西果、反巴西果、聚集等特有现象. 显然, 在不同模式的振动激励下, 颗粒系统表现出了不同的分离特征, 而目前大部分研究者却忽略了振动模式的影响. 因此, 对颗粒系统进行多种振动模式下的分离行为研究具有重要的理论意义^[15].

离散元法 (discrete element method, DEM) 是 20 世纪 70 年代发展起来的用于计算散体介质系统力学行为的一种数值方法, 在岩土工程、采矿工程、矿物加工、物料分选等散体工程技术领域得到了成功的应用, 成为目前研究颗粒系统行为的一种有效数值方法^[16]. 因此, 本文基于三维离散元法对球形颗粒系统在直线、圆和椭圆振动模式下的分离过程进行了数值模拟, 并对各振动模式下颗粒分离机理进行了理论分析, 为深入理解和进一步完善颗粒分离理论提供参考依据.

2. 数学模型

本文将讨论振动盒在垂直方向上的直线、圆和椭圆 3 种振动模式下的颗粒分离过程及机理, 其中 3 种振动模式的定义如图 1 所示.

以 O 点为中心, 根据运动轨迹的不同而将各振动运动分别定义为直线振动模式、圆振动模式和椭

* 国家自然科学基金 (批准号: 50574091, 50774084), 江苏省“333 工程”科研基金和煤炭加工与高效洁净利用教育部重点实验室开放基金 (批准号: CPEUKF 08-02) 资助的课题.

[†] E-mail: lalazhao@163.com

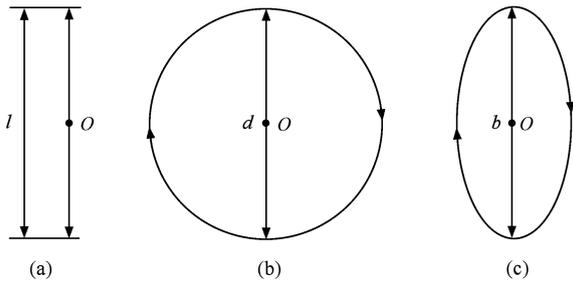


图1 振动模式定义 (a)直线振动, (b)圆振动, (c)椭圆振动

圆振动模式. 直线振动轨迹长度 l , 圆振动模式轨迹直径 d , 椭圆振动模式长轴的长度 b 数值上均等于 $2A$ (A 为简谐运动单振幅, 椭圆短轴取为长轴的一半). 直线、圆和椭圆振动模式的振动强度均可根据下式求得^[17]

$$\Gamma = \frac{(2\pi f)^2 A}{g}$$

式中 Γ 为振动强度, f 为振动频率, g 为重力加速度.

对于颗粒间碰撞作用的模拟, 本文仍采用 Oda^[18] 改进离散元法 (modified distinct element method, MDEM) 的软球干接触模型模拟振动筛面上颗粒之间的碰撞作用, 数学模型如图 2 所示. 其中, k_n 和 d_n 分别为法向刚度和阻尼, k_t 和 d_t 为切向刚度和阻尼, k_r 和 d_r 为滚动刚度和阻尼. 颗粒间作用力可根据颗粒离散元法基本原理求得^[19].

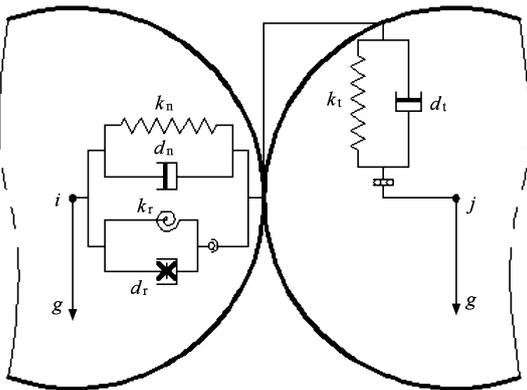


图2 颗粒接触模型

3. 数值模拟及分析

文中选取材质相同但粒径不同的二元球形颗粒, 其物理参数可参考文献[20], 其他模拟参数如表 1 所示. 当振动频率为 16 Hz, 振幅为 3 mm 时, 直

线、圆和椭圆振动模式下的颗粒分离形态如图 3 所示.

表 1 模拟参数

振动盒尺寸(长×宽×高) /mm × mm × mm	颗粒直径 /mm	颗粒形状	大小颗粒 数量
120 × 50 × 80	5, 10	球形	120, 960

颗粒分离初始阶段, 振动盒中填充相同体积的大小颗粒并且处于均混状态, 如图 3(a) 所示. 在直线、圆和椭圆振动激励的作用下分离 15 s 后的情景分别如图 3(b) 至 (d) 所示. 由图 3(b) 及其分离过程可知, 直线振动模式具有良好的颗粒分离效果, 发生分离的大颗粒均位于上层, 并且在分离过程中呈现出较规律的波动运动, 并在中间位置处具有一定的聚集现象. 圆和椭圆振动模式下颗粒系统具有相似的分选特征, 均具有显著分离效果的同时还具有大小颗粒分块聚集的特殊现象, 即发生分离的大颗粒聚集于颗粒系统的左上方, 而部分小颗粒则聚集在振动盒的右端, 如图 3(c) 和 (d) 所示.

对于直线振动模式, 仅利用空隙填充机理^[21,22] 即可解释分离过程中的巴西果现象, 但难以解释上层大颗粒的波动运动和聚集现象. 因此, 文中将综合多种机理并结合颗粒系统的速度矢量分布情况^[23] 进行分析. 为排除振动盒前后面的影响, 在振动盒宽度方向上的中间位置处取 20 mm 厚度的切片, 并以其中的颗粒为讨论对象.

直线振动时相邻两个振动周期中的颗粒速度矢量分布及平均动能变化情况, 分别如图 4 和图 5 所示. 在振动盒底面的作用下, 颗粒群受压缩并向上运动, 如图 4(a) 所示. 由于颗粒系统的惯性, 使受压缩颗粒群向振动盒左右两边压紧, 而中间位置处的颗粒密度降低. 此时, 两边的颗粒分别向着左上方和右上方运动, 中间颗粒由于颗粒间的非弹性碰撞引起的能量耗散以及颗粒密度的影响, 颗粒未能得到足够的能量而使颗粒速度方向具有一定各异性. 此过程中, 两侧颗粒的平均动能相接近且大于中间颗粒. 振动盒运动至最大振幅位置并与颗粒群脱离接触后, 颗粒群位置达到最高并开始自由下降(瞬时平均动能接近零), 并且中间颗粒在重力作用下首先下落并滑向两侧, 而两侧颗粒由于惯性迟滞了速度的变化, 如图 4(b) 所示. 相应的颗粒动能随着下落过程而逐渐增大, 并且中间颗粒动能明显大于两侧. 当颗粒群再次与振动盒底面接触时, 中间位置处将形成一个波谷, 并进入下一个振动周期.

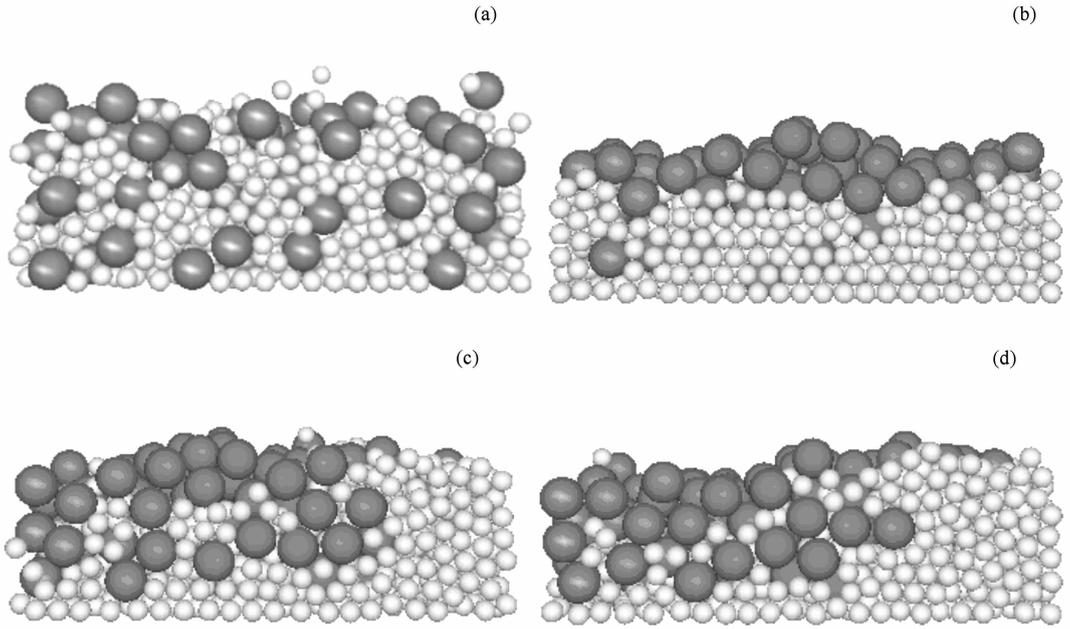


图3 不同振动模式下的颗粒分离特征 $f=16\text{ Hz}$, $A=3\text{ mm}$ (a)初始状态($t=0\text{ s}$); (b), (c)和(d)分别为 $t=15\text{ s}$ 时直线振动、圆振动和椭圆振动的颗粒分离形态

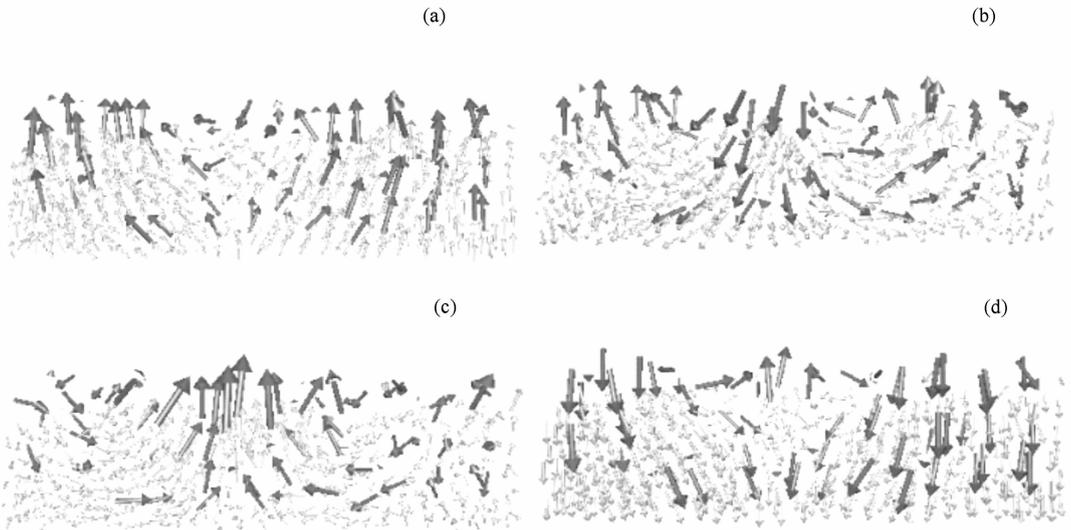


图4 直线振动模式相邻两个振动周期中颗粒速度矢量分布情况 (a)和(b)一个振动周期中颗粒的上升和下降; (c)和(d)相邻振动周期中颗粒的上升和下降

当颗粒群再次被向上抛掷时,左右两侧受压缩且运动迟滞的颗粒在左右侧面的作用下而挤向中间位置,从而使上层大颗粒在中间位置处聚集. 中间颗粒受到挤压而密度增加,并被推至高于两侧颗粒位置而形成波峰,如图4(c)所示. 此过程中,中间颗粒平均动能大于两侧,直至颗粒运动至最高位置. 当振动盒开始向下运动并与颗粒脱离时,颗粒群位置达到最高并开始下落. 与上一周期

情况相反,此时两侧颗粒速度首先发生变化,而中间颗粒却产生了运动迟滞,如图4(d)所示. 此过程中,两侧处于松散状态的颗粒平均动能变化快于中间颗粒,而当颗粒与底面接触后,将重复上述的循环过程. 在整个分离过程中,空隙填充机理作用下的颗粒分离,始终伴随在颗粒的循环压缩运动中. 从图5还可以看出,中间颗粒在整个分离过程中的平均动能值最大($2.83 \times 10^{-6}\text{ J}$),而左右两部分平均

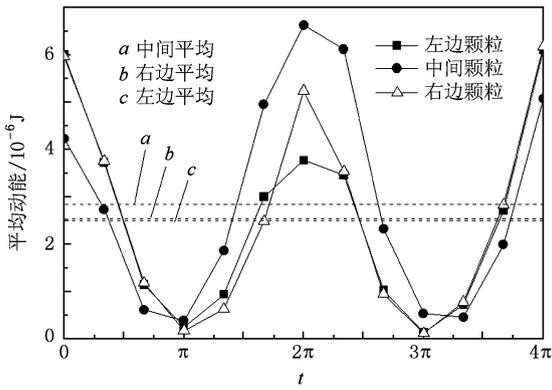


图5 直线振动模式下的颗粒平均动能变化规律

动能值较小且基本相等 ($2.5 \times 10^{-6} \text{ J}$), 其变化规律及分布情况与颗粒的波动运动完全一致, 即颗粒速度矢量的分布及动能的非均匀分布均反映了颗粒

分离行为的物理机理.

圆振动分离的一个振动周期中颗粒系统速度矢量分布及平均动能变化情况, 分别如图 6 和图 7 所示. 颗粒受到底面一个斜向上的碰撞力(方向与圆轨迹相切)后, 其运动状态发生改变, 即左边颗粒速度矢量具有显著的一致性并向左上方运动, 但由于颗粒运动滞后于振动盒而未能与左侧面接触并与左侧面间形成了空隙. 右侧颗粒由于右侧面的作用而受到压缩, 颗粒速度流向也在右侧面作用下而逐渐发生改变, 并在颗粒密度较小处形成了一个运动分界区, 如图 6(a) 所示. 当颗粒与左侧面接触时, 靠近左侧面的颗粒速度发生了反向, 而其他颗粒则由于惯性的作用而继续向左上方或右上方运动, 运动分界区进一步扩展, 如图 6(b) 所示.

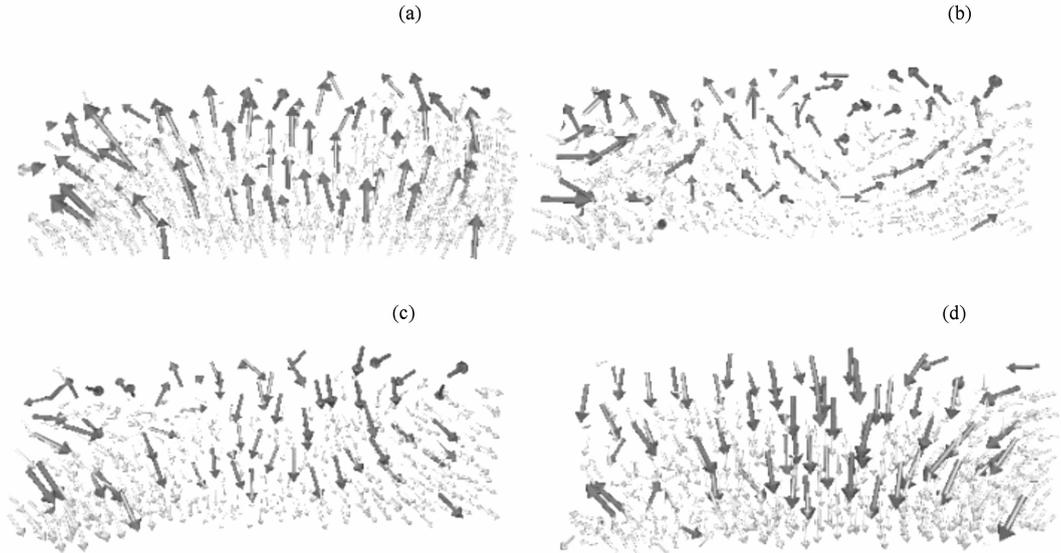


图6 圆振动模式一个振动周期中的颗粒速度矢量分布情况 (a) 颗粒上升, (b) 左侧面驱动, (c) 颗粒自由运动, (d) 右侧面驱动

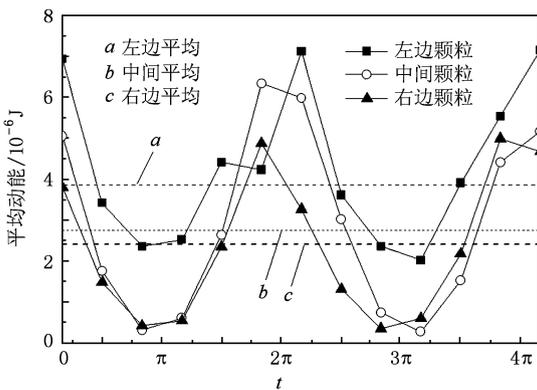


图7 圆振动模式下的颗粒平均动能变化规律

当颗粒运动至最高位置后, 在重力和来自左侧面压缩力的共同作用下, 颗粒群向右下方运动, 如图 6(c) 所示. 此时, 左侧颗粒瞬时平均动能约为 $2.36 \times 10^{-6} \text{ J}$, 而中间和右侧颗粒平均动能接近零. 在右侧面与颗粒接触后, 靠近右侧面的颗粒受压缩而使其运动方向改变并且向左传递, 如图 6(d) 所示. 需要注意的是, 空隙填充机理作用下的颗粒分离现象仍伴随在颗粒循环压缩运动过程中. 由于左边颗粒向左上方的运动和右侧面向左的压缩作用, 以及颗粒运动的滞后而形成的与左侧面之间的空隙, 使得发生分离的大颗粒聚集在颗粒群的左上方位置. 另外, 分离过程中各部分颗粒平均动能具有

明显的分布梯度,即左边部分颗粒的平均动能最大($5.87 \times 10^{-6} \text{ J}$),右边部分的颗粒平均动能最小($2.4 \times 10^{-6} \text{ J}$),这种能量的非均衡分布与颗粒的特殊分离现象相一致.

当振动强度增加(频率不变而振幅增大)时,直线振动的颗粒分离构型不变,而圆和椭圆振动的颗粒分离特征发生了显著的变化.当 $\Gamma = 4.12$ 时,圆和椭圆振动中的大颗粒均出现了近似圆形的循环

现象,同时颗粒的分离和聚集作用减弱,如图8(a)和(c)所示.当 $\Gamma = 5.15$ 时,圆和椭圆振动中的大颗粒均出现了左大和右小的双循环现象,如图8(b)和(d)所示.其机理可解释为:振动强度较大时,大小颗粒占据空隙的能力则趋于相同,颗粒间由非弹性碰撞引起的能量耗散已不能将能量完全吸收,从而使包括顶层大颗粒在内的整个颗粒系统流态化.由于椭圆振动的颗粒分离行为同圆振动相似,因此

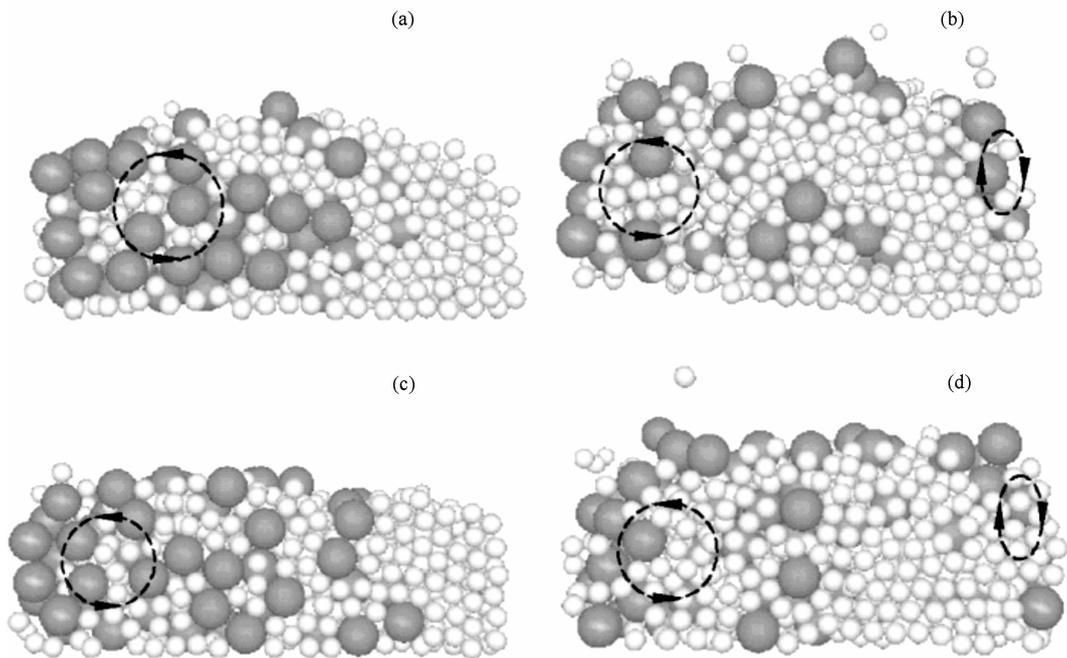


图8 振动强度对圆和椭圆分离形态的影响 $f = 16 \text{ Hz}$, $t = 15 \text{ s}$ (a)和(c) $\Gamma = 4.12$ 时的圆和椭圆振动;(b)和(d) $\Gamma = 5.15$ 时的圆和椭圆振动

文中不再讨论.

4. 结 论

在低频范围内,利用三维离散元法对直线、圆和椭圆振动模式下的颗粒分离过程进行了数值模拟,分析了各种振动模式下颗粒分离行为的物理机理,得出以下结论:1. 振动模式对颗粒分离行为及形态具有显著的影响作用.直线振动模式时,大颗粒除在垂直方向上具有显著的巴西果效应外,还在上层界面上具有明显的波动运动.圆和椭圆振动模式均出现了聚集、循环等特殊分离形态.2. 综合

运用空隙填充、侧壁驱动的颗粒运动和能量非均匀分布机理能够较准确地解释各种振动模式下的颗粒分离现象,而颗粒系统的速度矢量分布能够为理解和分析颗粒分离行为提供直观参考.3. 振动强度对圆和椭圆振动的颗粒分离形态有较大的影响作用.当振动强度约为3时,三种振动模式下的颗粒系统均具有较好的分离效果和稳定的运动状态.当振动强度增大时,圆和椭圆振动的颗粒系统在侧壁作用下被流化而出现循环现象.4. 三维离散元法是一种有效的数值模拟方法,能够较精确地模拟和预测颗粒系统的分离行为,能够为颗粒分离理论的研究提供参考依据.

- [1] Jiang Z H, Jing Y F, Zhao H F, Zheng R H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 5923 (in Chinese) [姜泽辉、荆亚芳、赵海发、郑瑞华 2009 物理学报 **58** 5923]
- [2] Burtally N, King P J, Swift M R 2002 *Science* **295** 1877
- [3] Mullin T 2002 *Science* **295** 1851
- [4] Liang X W, Li L S, Hou Z G, Lü Z, Yang L, Sun G, Shi Q F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2300 (in Chinese) [梁宣文、李粮生、侯兆国、吕震、杨雷、孙刚、史庆藩 2008 物理学报 **57** 2300]
- [5] Daniel C H, Paul V Q, Stefan L 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3423
- [6] Jiang Z H, Lu K Q, Hou M Y, Chen W, Chen X J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2244 (in Chinese) [姜泽辉、陆坤权、厚美瑛、陈唯、陈相君 2003 物理学报 **52** 2244]
- [7] Liffman K, Metcalfe G, Cleary P W 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 4574
- [8] Mullin T 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4741
- [9] Zhou D W, Chen S Y, Cai Q D 2006 *Chin. J. Comput. Phys.* **23** 559 (in Chinese) [周迪文、陈十一、蔡庆东 2006 计算物理 **23** 559]
- [10] Guo C R, Cai S H, Yang Y 2007 *J. Shandong Univ. Nat. Sci. Ed.* **43** 44 (in Chinese) [郭长睿、蔡绍洪、杨洋 2007 山东大学学报(理学版) **43** 44]
- [11] Tennakoon S G K, Behringer R P 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 794
- [12] Schnautz T, Brito R, Kruehle C A, Rehberg I 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 028001
- [13] Aumaitre S, Kruehle C A, Rehberg I 2001 *Phys. Rev. E* **64** 041305
- [14] Aumaitre S, Schnautz T, Kruehle C A, Rehberg I 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 114302
- [15] Arshad Kudrolli 2004 *Rep. Prog. Phys.* **67** 209
- [16] Zhu H P, Zhou Z Y, Yang R Y, Yu A B 2008 *Chem. Engng. Sci.* **63** 5728
- [17] Wen B C, Liu F Q 1982 *The Theory and Application of Vibration Machinery* (Beijing: China Machine Press) p22 (in Chinese) [闻邦椿、刘凤翹 1982 振动机械的理论及应用(北京:机械工业出版社) 第 22 页]
- [18] Oda M, Iwashita K, Kakiuchi T 1997 *Importance of Particle Rotation in the Mechanics of Granular Materials* (Rotterdam: Balkema) p207
- [19] Zhao Y Z, Cheng Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 322 (in Chinese) [赵永志、程易 2008 物理学报 **57** 322]
- [20] Zhao L L, Liu C S, Yan J X, Xu Z P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1874 (in Chinese) [赵啦啦、刘初升、闫俊霞、徐志鹏 2010 物理学报 **59** 1874]
- [21] Schröter M, Ulrich S, Kreft J, Swift J B, Swinney H L 2006 *Phys. Rev. E* **74** 011307
- [22] Rosato A, Strandburg K J, Prinz F, Swendsen R H 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 1038
- [23] Grossman E L 1997 *Phys. Rev. E* **56** 3290

Numerical simulation of particle segregation behavior in different vibration modes^{*}

Zhao La-La[†] Liu Chu-Sheng Yan Jun-Xia Jiang Xiao-Wei Zhu Yan

(College of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

(Received 20 September 2009; revised manuscript received 21 October 2009)

Abstract

Particle segregation processes in different vibration modes are simulated based on 3D discrete element method (DEM). The phenomena of wave motion of large particles in upper layer that appears in the segregation processes of linear vibration mode, accumulation and circulation that appear in circular and elliptical vibration mode are analyzed. And the influences of vibration intensity on the segregation pattern of the circular and elliptical mode were also discussed. The results show that the segregation behaviors in different modes can be well explained by a combination of three mechanisms: void filling, sidewall-driven transport of particles and nonequipartition of energy, and the distribution of particle velocity vectors. The vibration intensity has a great effect on the segregation pattern of circular and elliptical mode. For each vibration mode, fine particle segregation effect and stable particle moving state is obtained when the value of vibration intensity is about 3.

Keywords: vibration mode, particle segregation, discrete element method, numerical simulation

PACC: 4610, 6120J

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50574091, 50774084), the Research Foundation of Jiangsu Province "333 Project" and Open Foundation of the Key Laboratory of Coal Processing and Efficient Utilization, Ministry of Education, China (Grant No. CPEUKF 08-02).

[†] E-mail: lalazhao@163.com