

瓢型摆振槽颗粒偏析效果的离散元模拟

马学东, 陈 强, 李玲玲, 宋 华, 李亚运

(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 为了强化瓢型摆振槽在摆振时物料颗粒的偏析效果, 以三维离散元法为手段, 选用塑料球和钢球的二元干颗粒, 依次对光槽时单独摆振、光槽时组合摆振、添加凸起槽时组合摆振 3 种情况颗粒偏析过程进行离散元模拟研究, 并以颗粒体积分数为评判标准, 且结合模拟偏析云图, 进行颗粒偏析效果评价。结果表明, 组合摆振强于单独摆振的偏析效果, 添加凸起槽强于光槽分层效果, 相较于光槽时单独摆振, 添加凸起槽时组合摆振时颗粒的偏析程度可提高 10%~15%。

关键词: 摆振; 颗粒偏析; 离散元法

中图分类号: TD452 文献标志码: A

文章编号: 1008-5548(2017)04-0082-06

Discrete element simulation of particle layering behavior under combination vibration in scoop shimmy groove

MA Xuedong, CHEN Qiang,

LI Lingling, SONG Hua, LI Yayun

(School of Mechanical Engineering & Automation,

University of Science and Technology Liaoning,

Anshan 114051, China)

Abstract: To explore the layering behavior of material particles when swinging vibration, the method of three-dimensional discrete element was used to simulate the layering process of plastic balls and steel balls under single pendulum on light groove, combined swing on light groove and combined swing on adding embossment groove. The particle segregation effect was evaluated with the particle volume concentration as the evaluation criterion. The results indicate that the layered effect of combined swing vibration is better than that of single swing vibration, the layered effect of adding convex groove is better than that of the light groove. And volume concentration of plastic ball particles for

the adding convex groove can be improved to 10%~15%.

Keywords: swing vibration; particles segregation; discrete element method

早在 1 600 多年前, 在先贤刘义庆所著的《世说新语》中, 就有“簸之扬之, 糠秕在前, 洮之汰之, 砂砾在后。”的记载^[1], 说明振动和水流可以使不同质的颗粒产生偏析及分离效应。同时, 颗粒物质在振动下的分离、偏析效应在农产品颗粒分级、摇床选矿、振动筛筛选中有着广泛的应用^[2-5]。近年来, 振动下颗粒偏析行为的研究引起了众多科学家的兴趣^[6-9]。瓢型容器常被应用于谷物的偏析处理, 使用瓢型槽淘米和去除砂石的偏析应用在中国达数千年之久。在振动分离过程中, 常常伴随着低频率复合的手工振动。

不同的振动形态所产生的颗粒分离、分层行为是不同的, Zeilstra 等^[10]采用离散元法模拟研究了垂直直线振动时相同尺寸、不同密度的颗粒物质的分层行为, Chaiworn 等^[11]研究了垂直直线振动下在环形容器中的巴西果效应, Wu 等^[12]研究了水平摆振对颗粒分离行为的影响, Schanutz 等^[13]采用离散元模拟和实验研究了单层干颗粒在水平圆周振动下的颗粒沿圆周方向的分离行为。以上学者探讨了在不同振动模式下颗粒物质的分离及分层行为, 但对瓢型摆振槽在组合摆振下强化颗粒分层效果的研究关注不足, 对于瓢型摆振槽结构变化时所导致偏析分层效果的研究未见报道。本文将探讨振动方式的组合, 改变摆振槽结构变化的颗粒偏析效果, 以期对发明新型的颗粒分离机械提供参考。

1 数值模拟的力学基础

离散元法的基本原理主要包括颗粒接触模型和牛顿第二定律两方面意义。接触模型即力-位移关系, 用于单元间接触力及力矩的求解; 牛顿第二定律则用来计算分析离散单元运动的相关信息。图 1 为相对运动时颗粒接触动力学模型简图, 图 1 中 v_i 和 v_j 为颗粒 i 和 j 的速度矢量, ω_i 和 ω_j 的为两颗粒的角速度, F_{cn} 和 F_{dt} 分别为颗粒 i 的法向接触力、法向阻尼力, F_{ct} 、 F_{dt}

收稿日期: 2016-09-06, 修回日期: 2017-06-06。

基金项目: 辽宁省高校创新团队支持计划, 编号: TL2015014。

第一作者简介: 马学东(1965—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为机械振动。E-mail: madong912@126.com。

通信作者简介: 陈强(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为机械振动。E-mail: 594776802@qq.com。

分别为颗粒 i 切向接触力和切向阻尼力, T 为颗粒 i 的转动力矩。

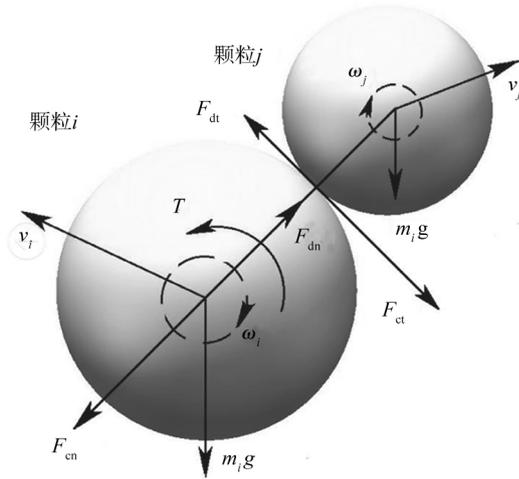


图 1 相互作用时颗粒的接触动力学模型
Fig. 1 Contact dynamics model of particles

由图中颗粒接触动力学模型可知, 颗粒运动时, 主要受自身重力、颗粒间法向分力、切向分力及切向力矩和库伦摩擦力矩的多重作用。而由文献[10]可知, 当所研究颗粒物质为较大微粒(颗粒直径大于 1 mm)时, 间隙中空气影响可以忽略不计。第 i 个颗粒(质量 m_i , 转动惯量 I_i)的运动方程^[14-15]可以表示为

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = m_i g + \sum_{j=1}^{n_i} (F_n + F_t) \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i} (T_i + T_r) \quad (2)$$

式中 v_i 、 ω_i 分别为颗粒 i 的速度和角速度, $m \cdot s^{-1}$ 、 $rad \cdot s^{-1}$; g 为重力加速度, $m \cdot s^{-2}$; F_n 、 F_t 分别为法向力、切向力, N; T_i 、 T_r 为切向力矩和滚动摩擦力矩, $N \cdot m$ 。

通过颗粒运动方程及力-位移关系, 可获得所有颗粒在不同时刻的受力及运动轨迹。求出众多颗粒所受的力及力矩是复杂的, 经典计算无能为力, 但离散元法可以很好地描述以上复杂的力学行为^[16-18]。

2 单独摆振时颗粒分层行为的模拟

2.1 摆振槽及颗粒的几何模型

模拟所选的 2 种颗粒为钢球与塑料球, 且半径皆为 2 mm。模拟所用的摆振槽为半球形, 其半径为 75 mm, 摆振槽模型见图 2。

模型的原型为淘米的瓢, 淘米时瓢可作单方向的

垂直摆振(摆振方向同重力方向夹角为锐角), 也可作水平摆振(摆振方向同重力方向夹角为 90°)。实际淘米时, 瓢可作垂直摆振、水平摆振, 在不同时间段实现不同的摆振。

针对图 2 摆振槽模型, 定义绕 X 轴或绕 Z 轴的振动为垂直摆振, 绕 Y 轴的振动为水平摆振。把瓢抽象为半球, 没有考虑水的冲刷作用, 颗粒置换为塑料球和钢球, 其目的是为了研究干颗粒在摆振作用下颗粒的偏析效果。

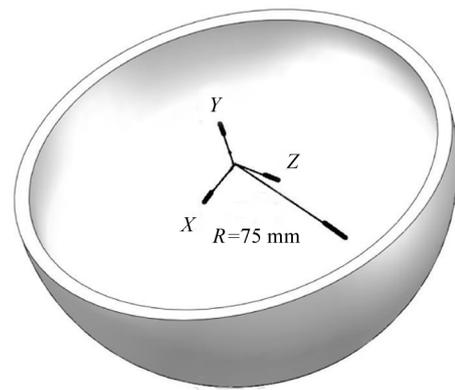


图 2 摆振槽模型
Fig. 2 Size of swing vibration groove

2.2 模拟参数的设置

应用离散元软件 EDEM 模拟钢球与塑料球的分层过程, 根据颗粒及钢制摆振槽材料属性^[19-22], 分别设置钢球、塑料球和钢制摆振槽的物性参数及接触参数, 材料的物性参数如表 1 所示, 材料的接触参数如表 2 所示。

表 1 材料的物性参数
Tab. 1 physical parameters of materials

材料	泊松比	弹性模量/Pa	密度/($kg \cdot m^{-3}$)
塑料	0.37	4.3×10^8	900
钢	0.3	7.9×10^{10}	7850

表 2 材料的接触参数
Tab. 2 Contact parameters of materials

接触参数	弹性恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
塑料与塑料	0.45	0.5	0.05
塑料与钢	0.45	0.5	0.01
钢与钢	0.7	0.2	0.01

垂直摆振频率与振幅采用试算法求出,频率与振幅过小,颗粒层偏析效果较差,但过高的频率、过大的摆角会造成颗粒的飞溅,影响偏析的稳定性,难以形成固定分层,因此,设置摆振为绕 X 轴振动,试算的摆振频率为 10 Hz,振幅为 15°。

在 EDEM 软件中应用颗粒工厂产生塑料球和钢球。将 2 个颗粒工厂设置为同一正方形颗粒工厂平面,边长为 50 mm,其几何中心与坐标系原点重合,且处于 XY 平面内。塑料球和钢球的初始速度为 0.3 m·s⁻¹,颗粒工厂每秒产生 2 000 个颗粒,塑料球和钢球各产生 1 000 个。且取 Rayleigh 时间步长(T_R)的 30%为固定操作时间步长。

颗粒分层过程的模拟如图 3 所示。总模拟时间为 20 s,0~1 s 时间内,摆振槽不摆振,根据颗粒的产生速度 2 000 个颗粒在 1 s 内产生完毕。由于颗粒为随机产生,因此,2 种颗粒在摆振槽可均匀混合,混合效果如图 3a 所示。随后,1~20 s 时间内,摆振槽绕 X 轴作垂直摆振,颗粒不断发生相互碰撞,20 s 时颗粒出现了明显的分层现象,部分塑料球(白球)位于钢球(黑球)上方,部分塑料球被压在底部,分层呈“三明治”形状,如图 3b 所示。

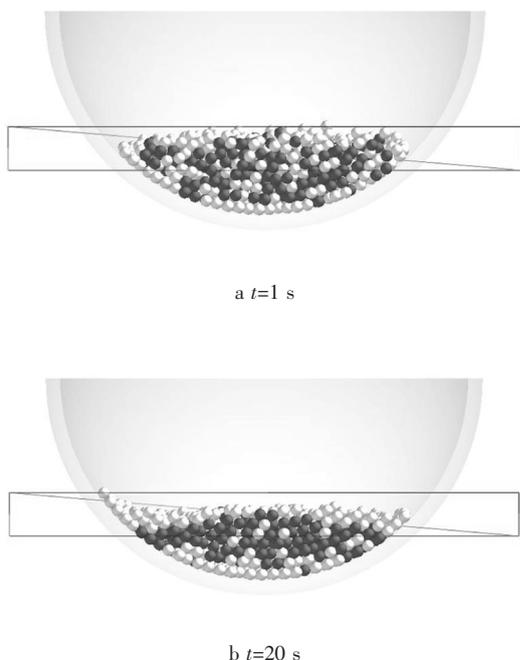


图 3 颗粒分层过程的模拟
Fig. 3 Simulation of layering process

2.3 垂直摆振机理探讨

在周期性的摆振振动作用下,依靠颗粒与颗粒碰撞、颗粒与摆振槽之间的摩擦力及颗粒自身的重力,使颗粒间形成相互作用,进而使颗粒出现复杂的力学行为。塑料球和钢球在垂直摆振过程中,相互接触碰

撞,颗粒位置和运动参数也在不断变化,为更详细地研究垂直摆振分层的机理,提取颗粒间接触数量的变化曲线,如图 4 所示。

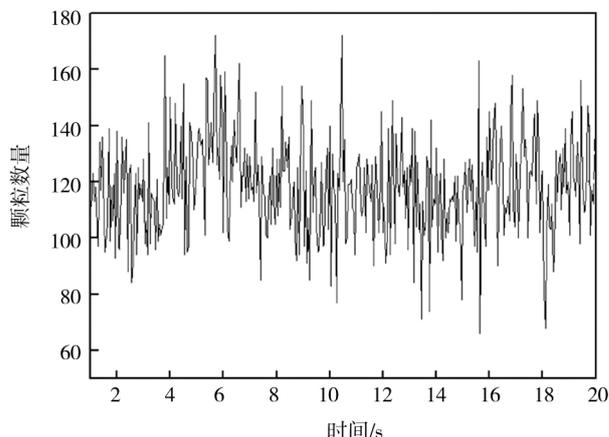


图 4 颗粒间接触数量的变化
Fig. 4 Change of contact numbers between the particles

从图可看出,颗粒间接触的数量随着摆振而发生周期性的变化,颗粒间接触的数量越多说明颗粒堆越紧凑;颗粒间接触的数量越少说明颗粒堆越松散,因此,可以推断出,颗粒堆是在发生周期性伸缩变化的,而颗粒堆的周期性伸缩变化是由颗粒间的间隙变化所造成的,由此可推断出颗粒间的间隙也是发生变化的。颗粒间接触的数量越多,颗粒间隙越小;反之,颗粒间隙越大。颗粒间隙变化为颗粒的位置交换及偏析分层提供了必要条件。

对垂直摆振 1~20 s 内的颗粒速度和动量进行了数据处理,塑料球和钢球的平均速度及平均动量变化曲线如图 5 和图 6 所示。

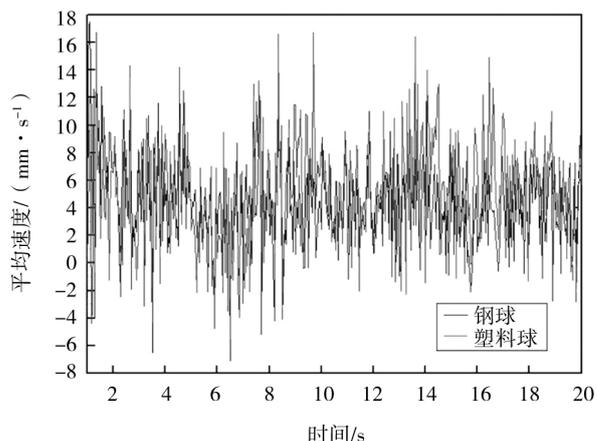


图 5 塑料球和钢球平均速度变化曲线
Fig. 5 Average velocity of plastic particles and steel particles with time

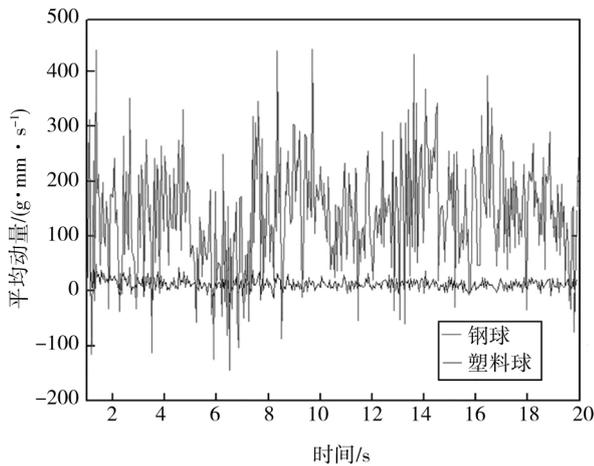


图 6 塑料球和钢球平均动量变化曲线

Fig. 6 Average kinetic energy of plastic ball particles and steel ball particles with time

由图 5 可以看出,在整个运动过程中塑料球与钢球的速度基本保持一致。但图 6 显示,在摆振过程中塑料球与钢球的动量相差很大,钢球的动量远大于塑料球。根据动量公式,结合速度和动量变化曲线可以看出,物体的质量越大,动量也就越大。而用于研究的 2 种颗粒的体积相同,体积相同密度不同的 2 种颗粒在摆振分层过程中,密度大的颗粒在重力作用下更容易向下运动,密度小的颗粒被挤入上方,于是便出现了密度小的颗粒在上密度大的颗粒在下的分层现象。

3 摆振对颗粒的分层的影响

为更直观地表征摆振分层的效果及分层稳定性,引入塑料球的体积分数作为衡量指标^[23],其中,塑料球的体积分数表达式为

$$C_j(x,t) = \frac{V_j(x,t)}{\sum_{i=1}^n V_i(x,t)} \quad (3)$$

式中: C_j 为选取区域 x 内 t 时刻塑料球的体积分数; V_j 为选取区域内塑料球的总体积, m^3 ; V_i 为选取区域内第 i 种颗粒的体积, m^3 ; n 为选取区域内颗粒的种类数,颗粒为 2 种,分别为塑料球和钢球。因此,选用体积分数来评价偏析分层效果及分层稳定性。

3.1 光槽时单独摆振方式对颗粒分层的影响

摆振为绕 X 轴的垂直摆振,摆振频率为 10 Hz,振幅为 15° ,模拟时间为 20 s。图 7 为单独摆振时塑料球体积分数随时间的变化曲线。

由图可知,在 1~10 s 的摆振过程中,上层塑料球

颗粒的体积分数增加速率很快,说明颗粒分层速度较快;10~20 s 的后半段塑料球颗粒体积分数增加速率缓慢,且有波动,塑料颗粒体积分数小于 0.61。由图 7 中摆振槽模型剖面图可知,大部分塑料球升入颗粒层上层,钢球处于中层,仍有部分塑料球被压在颗粒层最下部,呈现“三明治式”结构,分层效果有待改善。

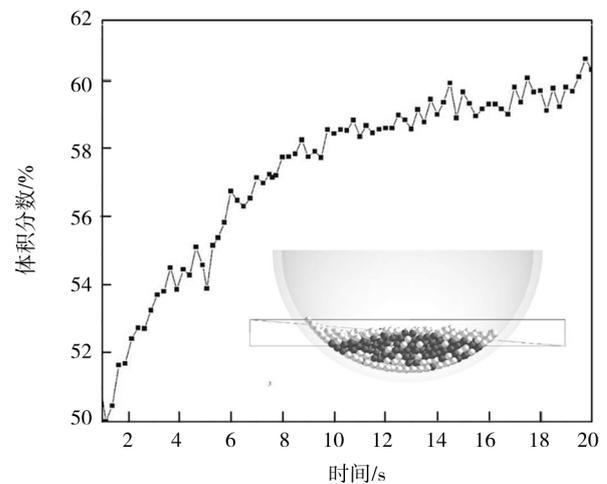


图 7 单独摆振时塑料球体积分数随时间的变化曲线

Fig. 7 Volume concentration of plastic ball particles under single swing vibration

3.2 光槽时组合摆振方式对颗粒的分层的影响

摆振槽为光槽时,组合摆振方式为:1) 在 1~7 s 内,绕 X 轴的垂直摆振,摆振的频率为 10 Hz,振幅为 15° ;2) 在 7~14 s 内,绕 Z 轴的垂直摆振,摆振的频率为 10 Hz,振幅为 15° ;3) 从 14~20 s,绕 Y 轴的水平摆振,摆振的频率为 10 Hz,振幅为 15° 。图 8 为组合摆振时塑料球的体积分数随时间变化曲线。

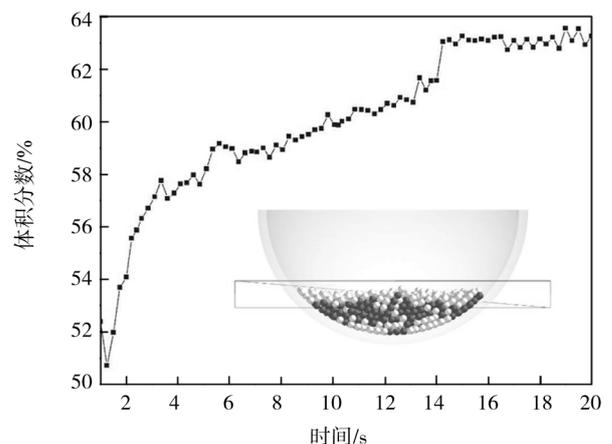


图 8 组合摆振时塑料球的体积分数随时间变化曲线

Fig. 8 Volume concentration of plastic ball particles under combined swing vibrations

由图可知,摆振在 1~4 s 的前半段,上层塑料球颗粒的体积分数增加速率很快,在 4~7 s 时间段,偏析趋于稳定,塑料球颗粒的体积分数在 0.585 左右波动。在 9~14 s 内,绕 Z 轴的垂直摆振,塑料球颗粒在选择框内的体积分数增大到 0.615 左右,从 14~20 s,绕 Y 轴的水平摆振,塑料球颗粒体积分数增大到 0.63,说明在改变垂直振动方向后,颗粒的偏析程度提高。且体积分数波动较小。

由图 8 中摆振槽模型剖面图可知,20 s 时大部分塑料球升入颗粒层上层,钢球处于中层,仍有部分塑料球被压在颗粒层最下部,因此,分层效果较差。综上所述表明:从颗粒体积分数的波动可知绕 X、Z 轴的垂直摆振可强化颗粒的偏析程度,绕 Y 轴的水平摆振只是改善了上层塑料球的分布,并不能使下部的塑料球大量升入上部料层。

3.3 摆振槽添加凸起对颗粒分层的影响

从图 7 和图 8 可以看出,有部分塑料球被压在颗粒层底部,说明颗粒层底部被压实,颗粒层底部的搅动小,需强化颗粒层底部搅动。为了改善摆振分层的效果,在摆振槽内底面添加了 5 个半径为 2 mm 的半球形凸起,添加凸起后摆振槽的几何模型见图 9。摆振槽添加凸起半球后,采用组合摆振,组合摆振的次序、方式、时间同光槽时组合摆振方式,绕 X、Z、Y 轴的摆振频率,振幅保持不变。

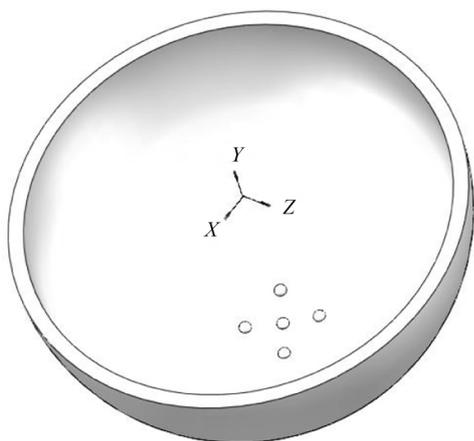


图 9 添加凸起后摆振槽的几何模型

Fig. 9 Geometric model of swing vibration groove after adding embossment

通过模拟得到添加凸起时塑料球的体积分数随时间的变化曲线(见图 10)。由图可知,底部添加半球形凸起结构后,在 1~7 s 时,采用单一绕 X 轴垂直摆振时,颗粒的体积分数增大为 0.66 左右,但是波动较大,这说明料层的稳定性较差。继而,绕 Z 轴垂

直摆振时,颗粒的体积分数波动更大,说明半球形结构的搅动使颗粒上蹿下跳,颗粒的偏析分层极不稳定。从 14~20 s,绕 Y 轴的水平摆振,塑料球颗粒体积分数增大到 0.785,且体积分数波动较小。相较于光槽单独摆振和组合摆振,塑料球颗粒的体积分数增加了 15%。

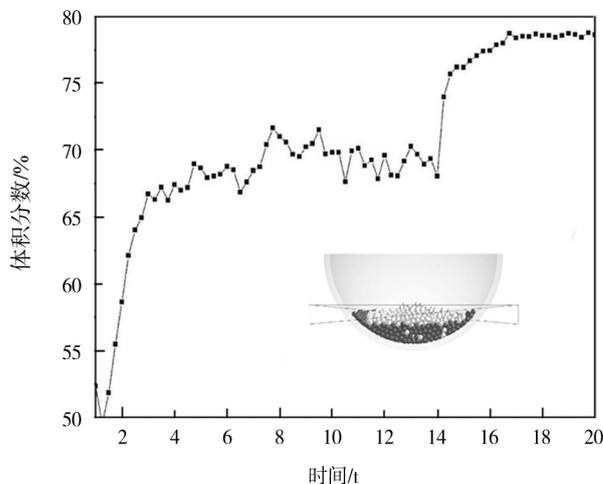


图 10 添加凸起时塑料球的体积分数随时间的变化曲线
Fig. 10 Volume concentration of plastic ball particles when adding embossment

由图 10 中摆振槽的剖面图可知,几乎所有的塑料球都升入颗粒层上层,钢球处于下层,较少出现塑料球被压在颗粒层最下部现象。综上所述,半球形结构使颗粒层松散度增大,对强化偏析产生有利影响,添加凸起强化了颗粒的分层效果。

4 结论

对摆振下二元干颗粒偏析分层的过程进行了三维离散元模拟研究,得出如下结论:

1) 垂直摆振分层机理:垂直摆振圆周振动造成了颗粒松散,使颗粒间的间隙发生伸缩变化。颗粒间隙变化为颗粒的位置交换及偏析提供了必要条件。对于相同体积的颗粒,密度大的颗粒动量远大于密度小的颗粒动量,因此,体积相同时,密度大的颗粒在重力作用下更容易向下运动,而密度小颗粒被挤入上方,于是便出现了密度小的颗粒在上、密度大的颗粒在下的分层现象。

2) 光槽在单独摆振以及组合摆振时,仍有部分塑料球被压在颗粒层的最下部,颗粒的分层效果有待于进一步改善。

3) 添加凸起的摆振槽绕 X、Z 轴作垂直摆振时,前半段时间内,偏析分层的稳定性较差。在摆振的后半段时间内,绕 Y 轴的水平摆振,塑料球颗粒体积分

数增大到 0.785。20 s 时,在颗粒层最底部几乎全部为钢球,分层效果极佳。

4) 本文中的摆振模拟的原型来源于日常生活中瓢的摆振偏析分层实践,模拟结果与实践结果相一致,表明分层模拟结果的正确性。

参考文献(References):

- [1] 陆坤权,刘奇星. 颗粒物质 :上[J]. 物理, 2004(9):629-635.
- [2] 史庆藩,阎学群,厚美瑛,等. 振动混合颗粒形成的反巴西果分层及其相图的实验观测[J]. 科学通报, 2003(4):328-330.
- [3] OTTINO J M, KHAKHAR D V. Mixing and segregation of granular materials[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2000, 32(1): 55-91.
- [4] MULLIN T. Coarsening of self-organized clusters in binary mixtures of particles[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(20):4741-4744.
- [5] 鲍德松,张训生. 颗粒物质与颗粒流[J]. 浙江大学学报(理学版), 2003, 30(5):514-517.
- [6] 赵永志,江茂强,郑津洋. 巴西果效应分离过程的计算颗粒力学模拟研究[J]. 物理学报, 2009, 58(3):1812-1818.
- [7] SHINBROT T. Granular materials:the Brazil nut effect - in reverse[J]. Nature, 2004, 429(6990):352-3.
- [8] MULLIN T. Mixing and de-mixing[J]. Science, 2002, 295(5561): 1851-1851.
- [9] 姜泽辉,陆坤权,厚美瑛,等. 振动颗粒混合物中的三明治式分离[J]. 物理学报, 2003, 52(9):2244-2248.
- [10] ZEILSTRA C, MA V D H, KUIPERS J A. Simulation of density segregation in vibrated beds[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2008, 77(3 Pt 1):031309.
- [11] CHAIWORN P, FEI F C, WANG C Y, et al. Brazil nut effect in annular containers[J]. Granular Matter, 2011, 13(4):379-384.
- [12] WU P, WANG S, XIE Z, et al. Influence of rotation on BN separation in binary particle system[C]// American Institute of Physics, 2013:722-725.
- [13] SCHNAUTZ T, BRITO R, KRUELLE C A, et al. A horizontal brazil-nut effect and its reverse[J]. Physical Review Letters, 2005, 95(2):028001.
- [14] 赵永志,江茂强,徐平,等. 颗粒堆内微观力学结构的离散元模拟研究[J]. 物理学报, 2009, 58(3):1819-1825.
- [15] 赵永志,程易. 水平滚筒内二元颗粒体系径向分离模式的数值模拟研究[J]. 物理学报, 2008, 57(1):322-328.
- [16] 李洪昌,李耀明,唐忠,等. 基于 EDEM 的振动筛分数值模拟与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5):117-121.
- [17] LI J, WEBB C, PANDIELLA S S, et al. Discrete particle motion on sieves—a numerical study using the DEM simulation[J]. Powder Technology, 2003, 133(1/2/3):190-202.
- [18] 高红利,赵永志,刘格思,等. 阻尼对水平滚筒内二元颗粒体系径向分离模式形成的影响[J]. 物理学报, 2011, 60(7):74501-074501.
- [19] TRANNINGER C, PRADES F, SCHAFFER W, et al. Impact modification of polypropylene with ethylene- α -olefin copolymers: Influence of density and comonomer type on structure and properties [C]// International Conference on Times of Polymers & Composites. American Institute of Physics, 2014, 1599(1):94-97.
- [20] 阳霞,杨鸣波,李忠明,等. 具有负泊松比效应的聚烯烃共混物[J]. 高分子学报, 2003, 1(2):221-224.
- [21] LAKES R S. Saint-Venant end effects for materials with negative poisson's ratios[J]. Journal of Applied Mechanics, 1992, 59(4):744-746.
- [22] 张忠君,胥德峰. 不同温度下聚丙烯塑料板拉伸与弹性模量试验研究[J]. 工程与试验, 2005, 45(3):18-18.
- [23] 赵啦啦,刘初升,闫俊霞,等. 颗粒分层过程三维离散元法模拟研究[J]. 物理学报, 2010, 59(3):1870-1876.