

等径球颗粒群流动特征实验研究

余莲英 李艳洁 徐泳

(中国农业大学 理学院, 北京 100083)

摘要 为考察等径球颗粒流动特性以便正确地设计模型试验或简化离散元计算,进行了透明可视的二维(单层紧密排列)平底仓钢珠卸料实验、拟二维矩形料槽玻璃球卸料实验和三维半圆柱平底仓玻璃球卸料实验。结果表明:二维(单层)精确等径球颗粒床具有微晶格效应,因此流动是畸变的;半圆柱仓的三维流动不出现畸变;而第3方向取几个球厚度的拟二维流动也避免了微晶格效应和畸变。透明半圆柱平底仓的玻璃球卸料实验表明用它取代圆柱仓可以较好反映圆柱仓内颗粒流动规律。拟二维和半圆柱仓的简化对诸如球床式核反应堆堆芯内球流一类问题的模型实验和离散元模拟有实用价值。

关键词 颗粒; 球流; 模型实验; 料仓; 离散元法

中图分类号 O 347.7

文章编号 1007-4333(2006)06-0116-05

文献标识码 A

Experimental study on flow characteristics of a stream of isodiametric sphere

Yu Lianying, Li Yanjie, Xu Yong

(College of Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract To observe its flow features of a monosized spherical particle assembly, discharge experiments were carried out for three types of configurations: 1) two dimensional (2D) test of a single-layer packing of steel beads within a flat bottomed bin, 2) quasi-two dimensional (Q2D) test of a group of glass beads within a transparent rectangular bin, and 3) three dimensional (3D) test of a group of glass beads within a semi-cylindrical bin. The experimental results demonstrate that a 2D packing of isodiametric particles leads to distortional flow due to 'microcrystallinities', while the quasi-two dimensional arrangement (Q2D) with a thickness of several particle diameters and the three dimensional arrangement (3D) effectively avoid the distortion. The test with a transparent semi-cylindrical bin reveal the flow features of the real cylindrical bin well in a visualized way. So a Q2D or a semi-cylindrical simplified configuration is available for the model test of pebble flow in the core of a high temperature reactor or for similar discrete element simulation.

Key words particle; pebble flow; model test; bin; discrete element method

在颗粒学分析研究中,无论天然颗粒还是人造颗粒,为使数学处理简单通常采用等径颗粒按一定规则排列^[1];但在数值计算例如离散元模拟时,天然颗粒系统被简化为一定级配的多粒度系统或单粒度颗粒系统来处理,而人造颗粒则按实际的单粒度系统描述。有些三维分布的颗粒群可以简化为“二维”系统,即用1个球心共面的系统^[2-4]取代相应的

三维或轴对称系统(取其中心立面),这样不仅简化了计算,且容易得到清晰的流动形态图。显然,用单粒度颗粒去分析本来是多粒度的系统,或者用“二维”的系统代替实际的三维系统,有必要对其合理性进行实验验证。

本研究针对尺寸较精确的等径球颗粒群,按照典型的料仓卸料颗粒流动问题设计实验,观察颗粒

收稿日期: 2006-08-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10372113)

作者简介: 余莲英,实验师,主要从事材料力学实验和散体力学实验研究, E-mail: ylybj@cau.edu.cn

流动特性并进行分析,以期得到离散元简化的依据。

1 单层紧密排列(2D)平底仓钢珠卸料实验

采用单层钢珠紧密排列方式进行二维平底料仓钢珠实验。球床高 447.67 mm,宽 300 mm。卸料口宽度 75 mm。所用钢珠粒径 6 mm,分深、浅 2 色。球床按深浅相间方式自上而下共分有 14 个色层,每个色层有 6 层同色球,每层球依次有 50 或 49 粒钢珠。钢珠总数 4 158 个。

平底料床钢珠卸料过程历时约 15 s,不同时刻的料床断面见图 1。可见,从开口卸料起到 0.55 s

时(图 1(a))仅见出料口上方 4 条斜线组成的区域出现流动且基本对称,说明各层剪切变形具有明显的取向性;到 1.1 s 时(图 1(b)),下部深浅各 3 层均可见有不对称现象,而上部断面保持水平下降,这说明紧密排列使得各层颗粒结合如同刚体;到 1.65 s 和 2.75 s 时(图 1(c)和(d)),上部断面可见明显的不对称切变; $t = 3.85$ s 时两侧的钢珠快速流动导致中部隆起(图 1(e)),随后中部落加快断面不对称加强;历时 7.15 s 时中部快速下落形成 30° 倾斜的凹陷直到 11.0 s 流动近于结束,留下的钢珠呈 30° 斜度堆积。

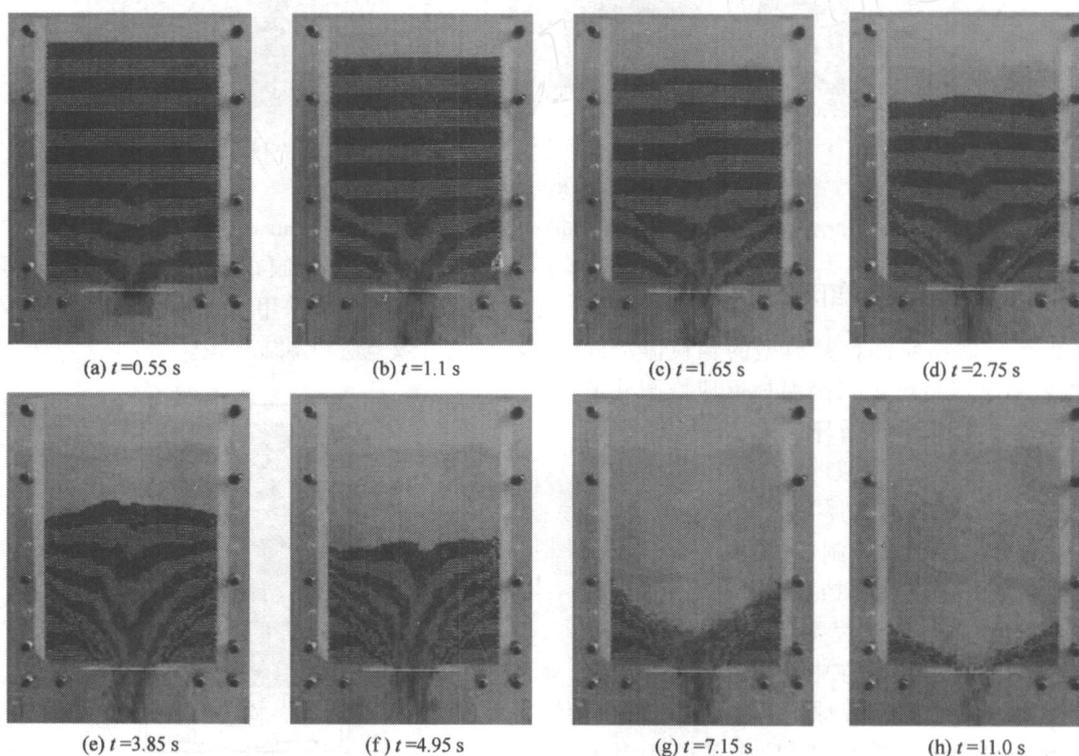


图 1 平底料仓钢珠卸料过程断面图

Fig. 1 Flow patterns of 2-D silo's discharge with isodiametric steel beads

平底仓中等径钢珠紧密排列的流动与通常的颗粒流动明显不同。表明在二维紧密排列下,严格几何对称结构的料床出现了相当不对称的流动,Langstong 等^[4]的离散元模拟结果也证明了这一点,称其为“微晶格性”。这种现象并非偶然,原因在于严格的紧密排列极大地限制了单个颗粒的运动自由度。因为二维状态下约束一个物体运动只需要 3 个单约束就可以了,而紧密排列的每个颗粒就有 6 个接触点,每个接触点除了法向“约束”外,切向也有摩擦。当卸料口开启后,附近的局部流动产生的空隙难以向上部均匀传递,因而出现由于微小间隙的随

机性导致流动的不对称取向,颗粒相互间的紧密嵌合影响了颗粒自身滚动和自由落体而出现排队式流动的现象。这里将此现象称为流动的不协调或畸变性。若把等径球采取随机方式装入平底料仓后卸料,这种“微晶格”效应有所缓解但无实质性改变,因为圆球在平面内的几何特征会自动形成紧密排列和有限的空穴。

2 拟二维(Q2D)矩形料槽玻璃球卸料实验

为避免等径颗粒在上述规则排列情况下的微晶格效应,设计了拟二维(Q2D)矩形料槽玻璃球卸

料实验。该装置由外料槽和可以在外料槽内上下滑动内料槽组成,内料槽里随机装填有相同直径(d)的玻璃球,内料槽在层厚方向上取适当宽度($6d$),在内料槽中间有宽度 $3d$ 的卸料口(图2(a))。

拟二维矩形料槽的玻璃球在卸料过程中的2个颗粒断面见图2(b)和(c)。可以看出,从初始状态直到卸料完成,球颗粒流动是连续和平滑的。这是由于在厚度方向上颗粒数增加了,使得颗粒排列的

随机性大大增加,同时颗粒在厚度方向上具有自由度,所以颗粒流动整体上变得对称和协调。这说明只要在厚度方向上放松约束,就可以打破玻璃球在料槽中的规则排列取向性,得到好的结果。目前我国某核能研究院正在进行的模仿高温核反应堆圆柱形堆芯内的等径核燃料球的循环流动就是采用拟二维的料槽和玻璃球进行试验的,其料仓的颗粒床等于在圆柱形堆芯的中心面的前后各取1个堆积厚度。

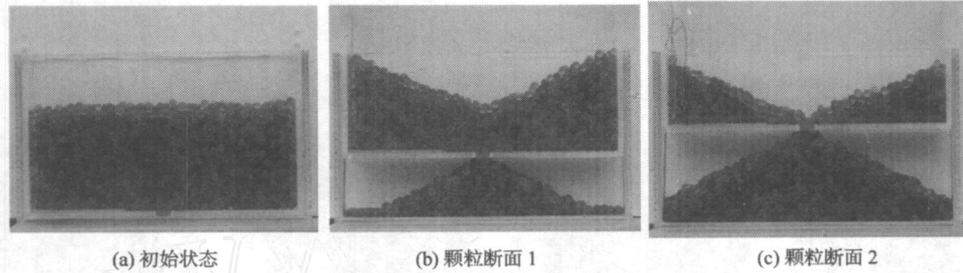


图2 拟二维矩形料槽玻璃球卸料实验

Fig. 2 Profiles of quasi-two dimensional bin by DEM simulation

3 三维半圆柱仓玻璃球卸料轨迹跟踪实验

圆柱仓等径球颗粒卸料是典型的颗粒流动问题,其最重要的应用是球床式高温核反应堆圆柱形堆芯内的等径核燃料球的循环流动^[5]。为了揭示仓内颗粒流动形态特征,近似地将圆柱仓取半体形成半圆柱仓。半圆柱容器主体用壁厚为10 mm、内径240 mm的有机玻璃圆管制成,前面装有一宽度与料仓外径相当的有机玻璃挡板,底板上有直径为60 mm的出口(图3)。为了完整观察轴对称面上颗粒球心的运动规律,半圆柱在中面多出半个颗粒的尺寸。球颗粒总数为11 500,球床高度467 mm。所用颗粒材料为表面磨砂玻璃球,平均直径0.01 m(误差 <1 mm)。选择接近上表面9个涂红的同质玻璃球为标志球进行跟踪。在颗粒随机装填过程中将9粒被跟踪球定位并紧贴前有机玻璃挡板放置。这9个跟踪球大致水平等间距定位。

图4示出卸料过程的颗粒流动特性。图4(a)为卸料前颗粒床,开始卸料后底部开口处的颗粒快速流出(图4(b)),影响到颗粒床上部下降,因出口较大为仓径 $1/4$,表现为中心导向的整体流动,因此跟踪的9粒红球形成抛物线状且曲率随下落逐渐增大(图4(c)和(d))。此后中部的跟踪球迅速流出而外侧的跟踪球向中下方聚拢直到流出(图4(e))。仓底周边直角附近的滞留区在卸料最后阶段迅速缩小直到卸料终止。从图4(f)可见滞流区断面是自

出口边缘的矢径与倾角 30° 斜线形成的三角形区域。这表明国际上采用的把堆芯底部制成 30° 锥底状可以有效地避免滞流现象。

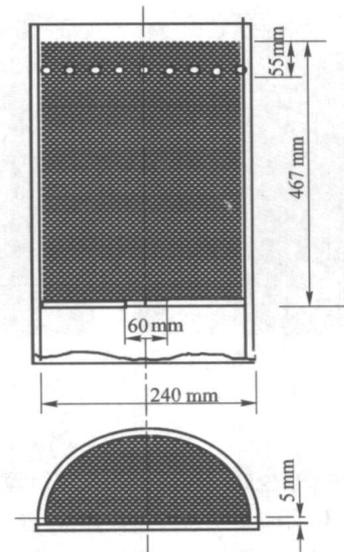


图3 半圆柱平底仓结构示意图

Fig. 3 Sketch of semi-cylindrical bin

多数情况下在卸料中跟踪球都能保持在圆柱仓的“中面”,即紧贴在前挡板上。由于观察到的颗粒断面的变化规律与实际圆柱仓内颗粒流动规律相同,所以用半圆柱仓代替圆柱仓以观察分析颗粒流动行为是可行的;但颗粒与前挡板的摩擦作用对卸料仍有一定影响,今后应考虑用对所用颗粒摩擦系

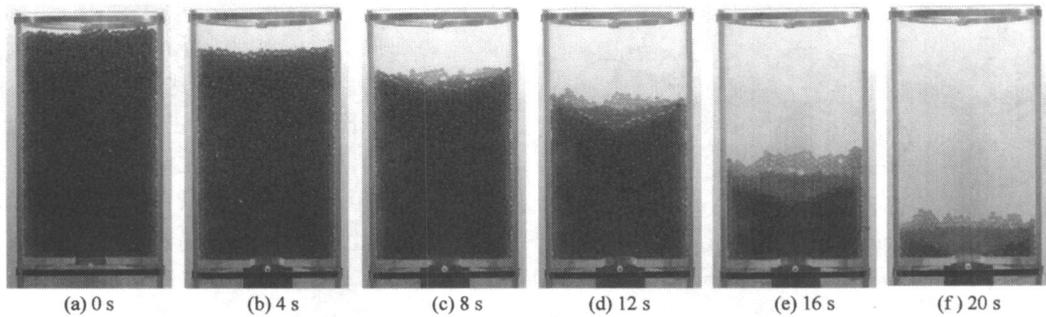


图 4 半圆柱平底仓卸料过程(时间为约值)

Fig. 4 Flow patterns in the discharge process of the semi-cylindrical bin

数小的玻璃或其他透明材料代替目前的有机玻璃。

整理连拍的实验照片并利用软件确定各跟踪球的球心坐标,即可绘出跟踪球的运动轨迹。图 5 示出 2 次实验所得的跟踪球轨迹图。比较这 2 次试验结果可看出,尽管球的直径相对于仓体尺寸较大,位置也不是十分精确,每次装球各处孔隙也并非完全

均匀,但在对称位置跟踪球的轨迹线形状是基本对称的,2 次实验结果吻合得很好;主要差异是最外侧的 2 个球在后期流向中心轴的轨迹一为弧线,一为直线。所以,当仓径与粒度比值较大的时,半圆柱仓的实验完全可以得到更精确的跟踪颗粒的流形轨迹,并据此得到流线场和速度场等有用信息。

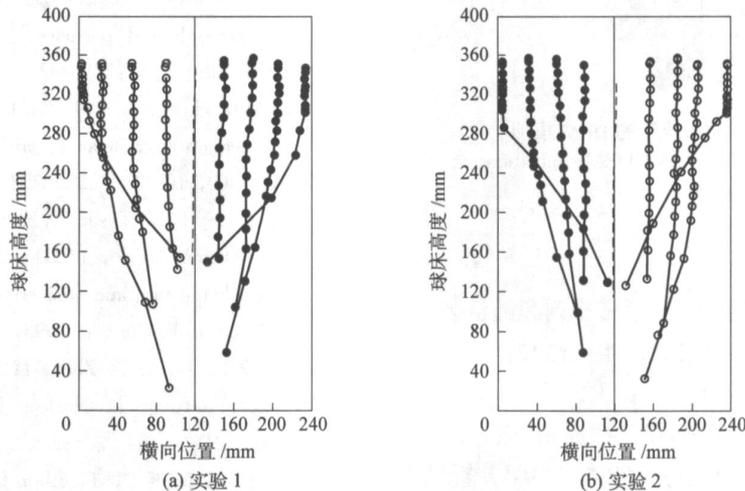


图 5 平底仓卸料跟踪球的轨迹

Fig. 5 Trajectories of traced spheres in the bin

4 讨论分析

颗粒排列方式对流动的影响见图 6。图 6(a)和 (b) 示出从单层球心共面二维仓钢珠卸料实验取出的 2 种接触情况。图 6(a) 中,由于钢珠粒径精确并且紧密排列,当所研究的中心处的球被周边 6 个静止球全接触包围时,处于全约束状态。只有中心球周围的彼此接触的 2 个球移开后,才可能在克服接触摩擦情况下运动。在图 6(b) 中,设下面的 2 个球在同一水平上且被固定,若上面的球只与下面的 2 个球接触,需要先上升到与右下方球接触的最高位

后才能流动。图 6(c) 为三维堆积的俯视图,设下层的 3 个球在同一水平上且被固定,它们上层中间的球并不需要达到与下层球接触的最高位后才流动,而更容易沿 2 个接触的下层球间的构槽流动。而在拟二维和三维半圆柱平底料仓情况下,在球颗粒随机排列情况下,并不存在水平面而是高低参差,所以就更加容易流动,不可能出现二维紧密排列的畸变流动。

如果采用一定粒度级配的球群进行二维的实验或离散元法模拟,畸变流动也不会发生。图 7 示出采用 5 种粒度级配随机生成的颗粒组合体的料床的

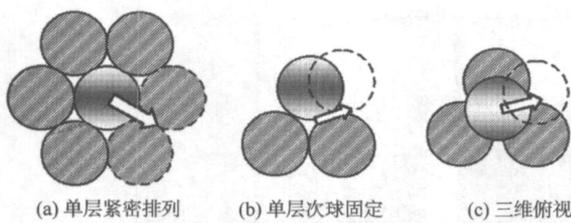


图6 约束对球颗粒流动的影响结果

Fig. 6 Effects of constraints of freedom on flow trends
2-D silo discharge

模拟结果^[6]。可以看出各层断面的流动是对称和协调的,其原因是大小颗粒的无序使得颗粒间孔隙率和颗粒运动的自由度增大。

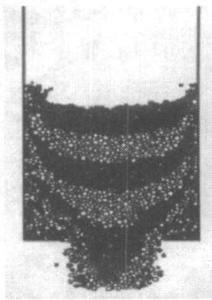


图7 5种粒度2D球床的DEM模拟

Fig. 7 Predicted profiles from DEM simulations of
5 sizes of spheres

5 结论

本研究对不同装填方式(紧密排列和随机装填)和不同结构形态(二维、拟二维、半圆柱)的等径颗粒的重力流动特征进行了研究,结果如下:

1) 等径二维紧密排列会产生“晶格”效应,导致不协调的畸变流动。用这种对散体的力学分析只能得到静态的上限结果,不适宜用于数值模拟。等径二维离散元模拟应采用一定粒度级配的颗粒组

合体。

2) 在拟二维结构下,等径颗粒群的流动不会产生畸变流动,可用来简化某些三维颗粒流动。

3) 用半圆柱仓代替圆柱仓观察分析仓内颗粒流动是可行的,颗粒断面变化与实际圆柱仓的流动规律相同,采用半圆柱仓可以得到跟踪颗粒精确的流形轨迹,据此可得到流线场和速度场等有用信息供设计参考。

致谢:感谢清华大学核能与新能源技术研究院姜胜耀教授、段日强、杨星团副教授的指导;艾有刚和杜敬同学参加了部分实验,谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] 霍召欣,黄文彬. 等径圆球组简单压缩下的宏观应力-应变关系[J]. 力学与实践,2003,25(3):23-25
- [2] Matuttis H G, Luding S, Herrmann. Discrete element simulations of dense packings and heaps made of spherical and non-spherical particles [J]. Powder Technology, 2000, 109(1-3):278-292
- [3] Sadd M H, Adhikari G, Cardoso F. DEM simulation of propagation in granular materials[J]. Powder Technology, 2000, 109(1-3):222-233
- [4] Langston P A, Tusun U, Heyes D M. Discrete simulations of granular flow in 2D and 3D hoppers: dependence of discharge rate and wall stress on particle interactions [J]. Chem Engng Sci, 1995, 50(6): 967-987
- [5] Wu Z X, Lin D C, Zhong D X. The design features of the HTR-10 [J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 218(1-3): 25-32
- [6] 徐泳, Kafui K D, Thornton C. 用颗粒离散元法模拟料仓卸料过程[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 65-69