

受振颗粒“毛细”系统中的对流与有序化^{*}

姜泽辉[†] 张 峰 郭 波 赵海发 郑瑞华

(哈尔滨工业大学物理系, 哈尔滨 150001)

(2009 年 11 月 2 日收到; 2009 年 11 月 30 日收到修改稿)

将球形颗粒倒入内径较窄的管状容器时, 管壁的曲率会对颗粒的堆积结构产生影响, 存在壁效应. 实验表明通过连续的竖直方向的振动, 壁效应可以被强化, 颗粒可以经由对流由无序排列转变为稳定的同轴筒形“壳层”结构. 每一壳层内, 颗粒是二维的六角密堆积, 在这一转变过程中, 颗粒堆积率的径向分布由初始的衰减振荡转变为等幅振荡. 分析了堆积率的不均匀性及空气在对流中的作用, 以及形成“壳层”结构的动力学过程, 对“壳层”结构的稳定性亦进行了讨论.

关键词: 颗粒物质, 对流, 有序化, 毛细

PACC: 4610, 0570F, 4755M, 6800

1. 引 言

颗粒物质因其广泛存在而受到工程界和物理学界的长期关注^[1-6]. 颗粒物质的主要特征是颗粒间存在着耗散相互作用(摩擦与非弹性碰撞), 这导致颗粒体系很难用传统的气、固、液理论来加以描述. 通过振动, 由外界输入能量来观察颗粒体系的动力学行为, 进而研究其一般特性是一种常用的手段. 在振动作用下, 颗粒体系可以表现出极丰富的运动形式. 其中, 颗粒的对流运动是一种典型的且与许多其他现象相关联的行为. 对流的产生与多种因素有关, 例如, 容器壁的摩擦^[7], 空气的作用^[8-10], 颗粒的尺寸^[11], 颗粒间的摩擦及碰撞恢复系数^[12, 13]等. 颗粒间的耗散相互作用导致, 只有当输入能量足够大, 约化振动加速度大于临界值^[14] $\Gamma_c = 1.2$ 时, 才能出现对流(这里, 约化振动加速度 Γ 指的是振动加速度的峰值与重力加速度 g 的比).

振动使颗粒获得动能做局域的无规运动, 从而间距变大能够流动(例如, 对流), 但间距变大也使颗粒有机会调整相互间的位置, 取势能最低的有序排列结构. 在振动作用下, 颗粒的无规运动和有序化成为对立统一体. 无序运动导致很难通过振动获得大尺度无缺陷的“颗粒晶体”(granular crystals). 近年来, 人们通过类似“分子外延生长”技术才得以

实现. 例如:

1) 在横向振动的方盒中, 通过以非常低的速率添加尺寸均匀的玻璃珠, 可以得到一种有序排列结构^[15]. 其中, 每一层内颗粒是二维六角密堆积, 而层与层是随机堆垛的. 堆积率为 0.67. 2) 在竖直振动的正三角形容器中, 以极低的速率添加钢珠, 可以获得完整的六角密堆积(hcp)结构^[16]. 这种方法要求容器的横向尺寸必须与最终的 hcp 结构严格匹配, 且振动强度不能太大($\Gamma = 1.09$). 形成这种结构的过程非常缓慢, 以小时计. 堆积率为 0.74. 3) 在长方或正方形容器中, 颗粒(钢珠)一次填装, 振动由强缓慢变弱, 将颗粒由无序堆积“退火”冷却成 fcc 或 bcc 结构^[17]. 4) 在圆筒形容器中, 批量添加玻璃珠(每次约 200 颗), 施加三维振动($\Gamma \approx 2.4$)可以得到 fcc 结构^[18]. 由于器壁附近存在很多缺陷, 堆积率约为 0.72.

这几种方法的特点是, 在低振动强度下, 以很慢的速率添加颗粒才能形成有序结构. 虽然采用振动“退火”(vibration annealing)技术可以一次添加颗粒一次形成有序化结构, 但“退火”速率不能太快^[17](用时大于 13 min). 这里的共性问题是在弱振条件下, 能量决定着体系的最终状态, 取势能最低的紧密排列结构. 但这种状态或结构并不是最稳定的, 因为一经强振就会被破坏掉且不能恢复. 这似乎暗示着, 强振下不可能形成稳定的有序结构.

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10974038)资助的课题.

[†] E-mail: zehuijiang@yahoo.com

但实际情况并非如此.

最近,我们在玻璃管容器中观察到另外一种有序结构——筒形“壳层”结构. 颗粒一次性装入,呈无序堆积,然后沿竖直方向施加连续的简谐振动. 当 $\Gamma \approx 1.2$ 时,体系出现对流,随着 Γ 的增加对流速度加快. 但是,当 $\Gamma \approx 2.3$ 颗粒先在容器底部某个位置形成有序排列(晶核),然后逐渐扩张并向上生长直至上表面. 生长完成后,颗粒呈无对流的有序“壳层”结构. 随着 Γ 的增加,完成这种有序排列所需的时间迅速减小.

这种有序结构极其稳定,即使振动加速度很高 ($\Gamma > 10$) 亦能生成,且不会“融化”,返回到无序排列的对流态,说明这种有序结构能有效地吸收外界输入的能量,将颗粒无规运动的影响降到最低. 反之,由于颗粒密排在一起,没有空位使颗粒能够迁移,也就不会产生对流,这也说明对流与堆积率之间存在着必然联系^[19, 20]. 颗粒由无序排列的对流态向无对流的有序“壳层”结构转变的动力学机理是什么? 为何一旦形成“壳层”结构就能保持稳定而不会被破坏掉,而且不再出现对流? 这是本文的主要研究内容. 我们使用的容器横向尺寸比较小(30个颗粒直径以内),这实际上相当于构建了一个颗粒的“毛细”系统,容器壁对颗粒的排列结构必然存在影响. 对此,给予了讨论.

2. 实 验

实验在内径为 15.90 mm 的玻璃管内进行,容器底为由不锈钢板,颗粒选用直径为 1.00 ± 0.01 mm 的硬质合金钢珠(或不锈钢珠). 振实后颗粒床厚度为 36.4 mm. 容器固定在振动台的台面上,台面在竖直方向做简谐振动 $x = A \sin(\omega t)$, A 和 ω 分别为台面的振幅和角频率, $\omega = 2\pi f$, f 为振动频率. 振动加速度由固定在台面上的加速度传感器测定,约化加速度表示为 $\Gamma = A\omega^2/g$. 台面的横向振动加速度小于纵向加速度的 6%. 振动频率保持固定, $f = 60$ Hz. 空气相对湿度为 40%—50%. 为避免因磨损而造成的污垢积累,累计振动 10 h 左右将颗粒及容器内壁用丙酮仔细清洗一次.

每次实验将钢珠用玻璃漏斗装入容器内,呈随机堆积,堆积率约为 0.61,突然施加振动,将 Γ 由 1 迅速增加到某个预定值 (> 1.2). 颗粒床中立即出现对流运动,颗粒沿侧壁向下运动,在内部向上运

动形成循环. 在 $1.2 < \Gamma < 2.3$ 之间,这种对流运动往往是不对称的,也就是,沿四壁向下的运动速度不完全相同,有的地方快,有的地方慢甚至向上. 这导致颗粒床上表面不是水平的,而是倾斜的. 但是当 $\Gamma > 2.3$ 时,颗粒床中的对流基本上是对称的,颗粒沿四壁向下运动到底部后向内迁移(图 1(a)). 在颗粒床底部靠近侧壁的某个角落会形成局部的有序排列(图 1(b)),这部分相当于一个小的“晶核”. 多数情况下,这个“晶核”会快速横向生长,占满底部的几层(通常 3—5 层,图 1(c)),然后,向上生长直至上表面(图 1(d)). 在向上生长过程中,下部处于紧密的有序排列状态,且无对流运动,而上部未“结晶”的部分仍处于无序排列的对流态.

当“结晶”过程完成后,体系要花费一段时间来消除残存其中的点缺陷和线缺陷,对于最外层,一般可以看到十余个点缺陷和最多两个线缺陷. 点缺陷是一个空位环绕 6 个球(图 2 中部). 点缺陷通常是通过吸入其上方的某个球而被弥合掉. 这导致点缺陷沿“之”字路径,时快时慢地逐渐“浮”到上表面而消失. 线缺陷通常起始于最底层的某个部位,沿 60° 角向上延伸,如果有两个线缺陷,通常共有一个起点,都与水平面呈 60° 角向上延伸(两者夹角亦为 60°). 线缺陷是通过上片的颗粒整体沿线缺陷方向下滑一个颗粒直径的距离,将起始处的空位补上而被弥合掉,在以上缺陷弥合过程中还会有新缺陷出现,主要出现在最底部的 1—4 层中. 这是因为内层中的缺陷弥合需要部分外层颗粒向内迁移来补充,而这种补充主要发生在颗粒床的底部. 但不管怎样,经过几轮的缺陷弥合与生成,缺陷逐渐减少,所有颗粒最终会进入一种无对流的、稳定的有序排列状态.

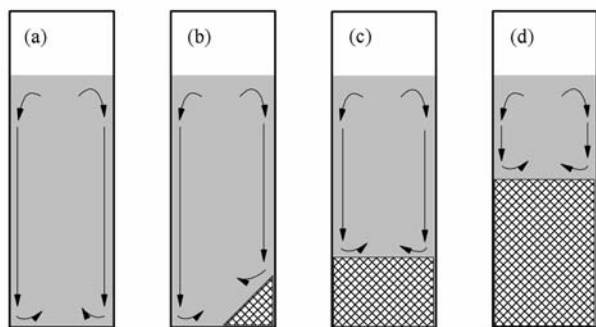


图 1 有序化过程示意图,灰色区域代表无序排列的对流态,箭头表示对流方向,网格区域代表无对流的有序化排列区域

图 2 给出了 $\Gamma = 9.8$ 时的排列结构,颗粒个数

约为 8860, 垛成 42 层, 堆积率约为 0.65, 稍大于随机密堆积率, 为了观察内部结构, 振动停止后将透明液体胶(502 胶), 倒入颗粒床中, 固化后将玻璃管敲碎, 取出固化块并逐层剥离. 图 3(a) 给出了最外 5 层颗粒的排列情况, 可以发现内部明显存在“壳层”结构. 图 3(b) 给出了腰部横断凸锥面上的排列情况, 锥面与水平线的夹角约为 23° , Rocke^[15] 曾观察到类似的同轴筒形“壳层”结构, 但他所用的方法与我们的有所不同, 其容器不是固定在振动台上, 振动过程中要用手扶着容器, 更主要的是容器既有底又有盖, 而且要在底和盖上按要求刻好环形沟槽以匹配最终的“壳层”结构, 或者做成 27° 倾角的有环形台阶的圆锥面. Rocke 对“壳层”结构的堆积率与管-球直径比的关系作了分析, 堆积率随着直径比的增大而增大, 直径比趋于无穷时, 堆积率趋近 0.71. 我们得到的堆积率(~ 0.65)和其同直径比下的理论值一致.

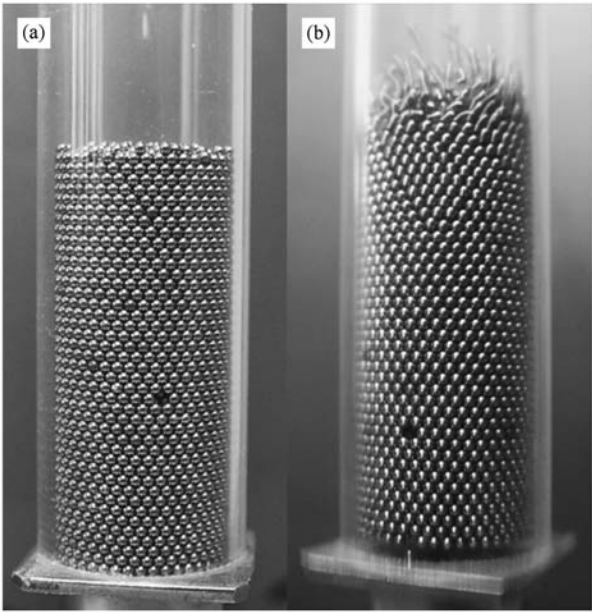


图 2 “壳层”结构, $\Gamma = 9.8$ (a) 振动停止后; (b) 振动中

在钢球数量不变的情况下, 也可以得到另外一种排列结构(或同素异构体), 其晶格取向沿竖直方向, 如图 4 所示. 这种结构只是偶尔出现在 Γ 大于 5 时, 振动施加后, 颗粒(最外层)迅速沿竖直方向排列成串并快速的向下移动, 这些排列起来的颗粒(包括残存的空位)一起移动到最底层后, 向内迁移, 这种方式提供了另一种调整相对位置消除空位的机理. 在最底层运动向内转向时, 后面的颗粒可以填补到空位上将其弥合, 随着空位的弥合, 对流

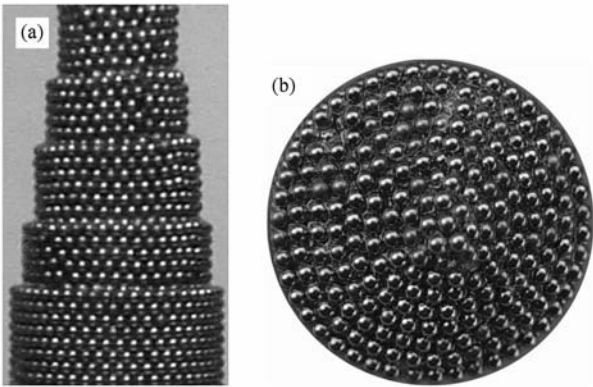


图 3 有序排列的内部结构 (a) 最外 5 层的排列; (b) 腰部横断锥面上的排列

速度将逐渐减慢, 大部分点缺陷被弥合后, 对流运动最终停止. 这一过程花费的时间明显小于前一种情况, 约为前者的 $1/10$. 振动停止后, 有时能看到一条贯穿整个颗粒床的沿竖直方向的线缺陷(振动过程中并不十分明显), 如图 4(a) 中箭头所指处所示. 在我们的实验中, 出现这种排列结构的概率大约是 5%.

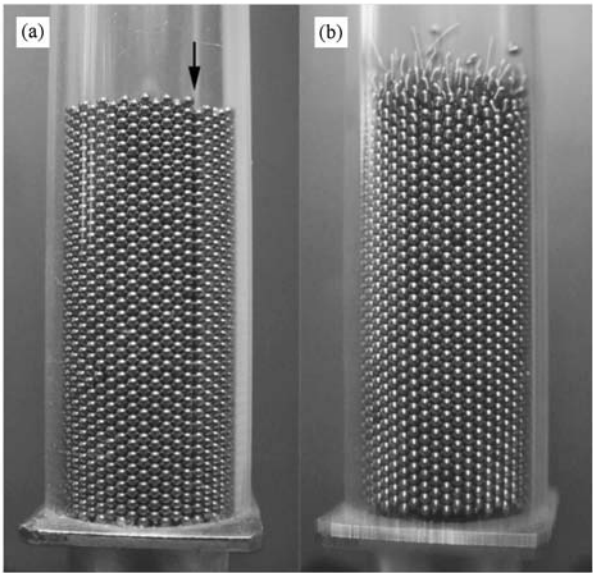


图 4 “壳层”结构的异构体, $\Gamma = 8.0$ (a) 振动停止后; (b) 振动中

3. 讨 论

对于窄容器中的排列结构问题必须考虑容器壁的影响, 即, 所谓的壁效应(wall effect), 研究表明^[22-29], 在将颗粒倒入容器的过程中, 由于器壁的存在, 颗粒已经不是均匀的随机密堆积, 在器壁处

孔隙度最大(等于1),向内孔隙度做振荡式衰减,振荡的周期为1个颗粒直径,经大约5个周期后衰减为0.36.造成这一结果的原因是紧贴侧壁的一层颗粒只能和器壁相切,致使这层颗粒的排列有了一定程度上的有序性,这种有序会向内传递,但由于颗粒层不像器壁那样平整(层内颗粒是随机堆积的),这种传递是短程的,会逐渐衰减掉,施加振动后,产生壁效应的物理机理仍在起作用,而且振动使颗粒的间距变大,颗粒能够调整相互间的位置而形成更有序的排列,使层与层间的有序性得到放大,因此,“壳层”结构可以认为是壁效应得到强化的产物.

但问题是为什么颗粒不原位调整,而要通过对流运动转变为“壳层”结构?为什么形成“壳层”结构后体系中就不存在对流,即使强振下结构仍能保持稳定?我们认为除了壁效应还与空气的作用有关,振动过程中,颗粒床整体做上下往复的“活塞”式运动,空气的冲刷作用不可忽略.由于器壁附近颗粒间的孔隙度较大,空气容易穿过,因而流动速度大于内部的^[30-34](且有着与孔隙度相对应的径向分布).这种差异导致器壁附近颗粒受到的阻力(包括器壁的摩擦力和空气阻力)大于内部颗粒的,从而引起颗粒床中的对流运动^[35].换言之,正是孔隙度的这种不均匀性造成颗粒床中出现对流,因而颗粒不可能通过原位调整而进入有序排列.一旦形成“壳层”结构,孔隙度的径向变化虽仍是振荡式的,但却是等幅振荡.气流速度的径向不均匀性消失,产生对流的动力学起因消失了,因而就不会出现颗粒的对流运动,除了气流速度差异消失这一点,“壳层”结构能保持稳定还与颗粒间的耗散相互作用有关,颗粒与颗粒间(包括颗粒与器壁间)的非弹性碰撞导致每次碰撞后颗粒会失去部分动能,形成“壳层”结构后,颗粒的堆积率加大,碰撞更加频繁,更能有效地吸收外界的能量,从而保持结构的稳定性.

耗散相互作用也是颗粒更容易先在容器底部某个角落形成局部的致密堆积的原因^[36, 37].受器壁几何形状的限制这部分颗粒只能堆积成局部的壳层结构,相当于一个小的“晶核”.由于这部分颗粒有较强的动能吸收能力,周围颗粒很容易被吸收进来,从而能够逐渐向外生长.图4所示的堆积结构,其生长机理不同,无明显的“晶核”生长过程,这是因为振动较强时,气流速度较大,使得颗粒沿竖直方向排列成串以顺应快速的对流运动成为可能,

在这种情况下,颗粒成串地向下移动,到达容器底部时向内迁移形成循环对流运动.几个循环后体系内的缺陷被消除,最终演变成稳定的“壳层”结构,因为这种纵向排列能较好地顺应对流运动,因而形成“壳层”结构所花费的时间较短.

图5给出了第一种有序“壳层”结构的转变时间随 Γ 的变化,这里转变时间包含两部分,第一部分为颗粒由无序排列通过对流转变为“壳层”结构所花费的时间 t_1 ;第二部分为消除残留缺陷所花费的时间 t_2 ,总的转化时间为两者之和 $\tau = t_1 + t_2$, τ 为10次测量的平均值,误差为最大值与最小值之差的一半,需要指出的是, t_1 要比 t_2 小得多,约为后者的一半.另外,记录 τ 时,要求颗粒床中点缺陷少于10个、线缺陷少于2个,且至少5 min内不出现新的缺陷.我们也注意到,当 Γ 不是特别大($1 < \Gamma < 2.4$)时,颗粒床中的对流速度很慢而且不是对称的,最底下的1—4层内总是存在着点缺陷,且颗粒不停地向内迁移造成无休止的对流运动.出现这种现象的原因目前尚不十分清楚,或许是此时的气流速度还不够大,还不能促成壁效应的强化.

由于“壳层”结构是由底部通过吸收颗粒不断向上生长的,生长速度近似为对流速度,根据文献[35]中给出的对流速度公式可以对转变时间 τ 做出估算,

$$\tau = K \frac{H_0^3}{g^2(\Gamma^2 - 1)^2} + \varepsilon. \quad (1)$$

其中, K 和 ε 为经验参数,这里分别取为 $K = 370$, $\varepsilon = 80$. $H_0 = 36.4$ mm为颗粒床厚度.图5给出了理论值和实验值的比较,二者基本一致.虽然 Γ 大于3.8后,颗粒床中会存在倍周期运动^[11, 35, 38, 39],但对转变时间的影响并不明显.这是因为倍周期运动影响对流速度主要体现在 t_1 中,而 t_2 在 τ 中占的份额较大容易将其淹没.

为了检验“壳层”结构与管径的关系,将管径增大.当管径增大到30.0 mm时,出现稳定“壳层”结构的区域明显变小, $3.0 < \Gamma < 6.0$.在这个区域之外,“壳层”结构不完整,会出现大面积的不规则排列,线缺陷的个数增多且可以始于颗粒床中的任何位置并以 60° 角向上延伸.另外,轴线附近“壳层”结构亦不明显(呈无序堆积或六角密堆积),这或许是由于管径过大对颗粒的整体约束作用变弱,如果将球径变小,出现稳定“壳层”结构的区域也变小甚至消失,例如,在内径为14.2 mm的玻璃管中填入 d

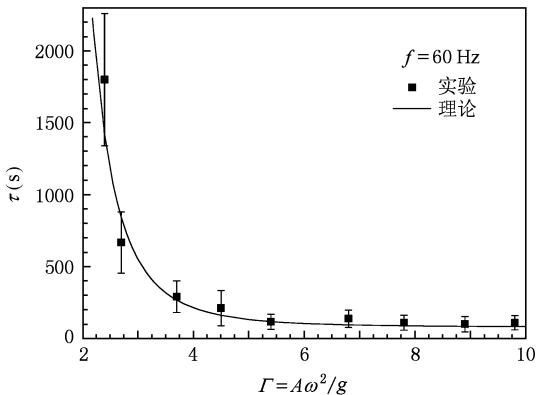


图5 颗粒床由对流态进入无对流“壳层”结构的转变时间随 Γ 的变化

$= 0.70 \pm 0.01$ mm 的硬质合金钢珠,偶尔出现在 $5.0 < \Gamma < 6.0$ 的范围内,而且是在污垢积累较多且空气湿度较大时才出现.即使出现也不能保持太久时间,短的几分钟就又回到对流态,对于 d 为 0.50 ± 0.01 mm 的硬质合金钢珠,不论管径多大都不会出现稳定的“壳层”结构(始终有对流).这表明存在一个临界颗粒尺寸($0.07\text{--}0.10$ mm).小于这个尺寸,颗粒的运动容易受到气流、污垢及静电荷积累等因素的影响,细致情况有待进一步的实验分析.

所观察到的“壳层”结构并不是理想的“晶体”,因为沿管径方向颗粒的排列不是有序的(见图2b)).这导致管径可以不是球径的整数倍,也不要钢球沿管壁一个挨一个刚好排满一圈.例如,在内径分别为 15.02, 15.46, 15.90 mm 的玻璃管中都可以形成稳定的“壳层”结构(球径 1.00 mm).在内径 15.90 mm 的管中,沿四壁排满一圈理论上需 46.8 个球,但实验中只观察到 46 个,多余的空间被

其它球分摊了.在振动过程中颗粒并不像静止时那样是紧密相切的,而是在各自格点附近做小幅的无规运动和旋转.所以,“壳层”是一种动态意义下的有序结构.

壁效应造成的有序结构也会存在于其他系统中,微孔中的水,分子孔壁、分子-分子间的相互作用导致孔壁附近分子排列的结构不同于体内的,密度也存在轴对称的径向分布^[40, 41].但在受振颗粒“毛细”系统中,颗粒间只存在“硬球”相互作用,且需经过对流进行位置调整而进入势能最低的有序排列.在这种系统中,壁效应的作用范围与体系横向尺寸相当,因而能够被强化,容易形成“壳层”结构.另外,转变成“壳层”结构前后,颗粒的总堆积率、堆积率的径向分布、气流速度等会发生相应的改变,这也为研究对流与这些因素的关系提供了便利.通过抽走部分空气或填充不同黏度的气体来检验对流速度如何改变,进而研究气体黏度及粒径对对流的影响.

4. 结 论

在受振颗粒“毛细”系统中,壁效应得到强化,颗粒可以通过对流由无序排列转变为稳定的“壳层”结构.在这一转变过程中,堆积率的径向分布由衰减振荡转变为等幅振荡.径向分布转变为等幅振荡后,颗粒所受阻力的差异消失,因而在“壳层”结构形成后颗粒床中无对流运动存在.另外,形成“壳层”结构后,颗粒的总堆积率变大,通过频繁的碰撞能有效地吸收外界输入的动能,从而保持结构的稳定.

[1] Bao D S, Zhou Y, Zhang Z S, Tang X W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1279 (in Chinese) [鲍德松、周英、张训生、唐孝威 2005 物理学报 **54** 1279]

[2] Zhong J, Peng Z, Wu Y Y, Shi Q F, Lu K Q, Hou M Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6691 (in Chinese) [钟杰、彭政、吴耀宇、史庆藩、陆坤权、厚美瑛 2006 物理学报 **55** 6691]

[3] Du X N, Hu L, Kong W Z, Wang W M, Wu Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6488 (in Chinese) [杜学能、胡林、孔维姝、王伟明、吴宇 2006 物理学报 **55** 6488]

[4] Liang X W, Li L S, Hou Z G, Lu 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] Sun Q C, Wang G Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4667 (in Chinese) [孙其诚、王光谦 2008 物理学报 **57** 4667]

[6] Peng Z, Li X Q, Jiang L, Fu L P, Jiang Y M 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2090 (in Chinese) [彭政、李湘群、蒋礼、符力平、蒋亦民 2009 物理学报 **58** 2090]

[7] Knight J B, Jaeger H M, Nagel S R 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 3728

[8] Pak H K, Van Doorn E, Behringer R P 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 4643

[9] Yan X, Shi Q, Hou M, Lu K, Chen C K *Phys. Rev. Lett.* **91** 014302

[10] Miao G, Huang K, Yun Y, Zhang P, Chen W, Wei R 2006 *Phys. Rev. E* **74** 021304

[11] Jiang Z H, Wang Y Y, Wu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4748 (in Chinese) [姜泽辉、王运鹰、吴 晶 2006 物理学报 **55** 4748]

[12] Risso D, Soto R, Godoy S, Cordero P 2005 *Phys. Rev. E* **72** 011305

[13] Ulrich S, Schroter M, Swinney H L 2007 *Phys. Rev. E* **76** 042301

[14] Evesque P, Rajchenbach J 1989 *Phys. Rev. Lett.* **62** 44

[15] Pouliquen O, Nicolas M, Weidwan P D 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 3640

[16] Nahmad-Molinari Y, Ruiz-Suarez J C 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 264302

[17] Carvente O, Ruiz-Suarez J C 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 018001

[18] Yu A B, An X Z, Zou R P, Yang R Y, Kendall K 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 265501

[19] Shinbrot T, Khakhar D, McCarthy J J, Ottino J M 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 829

[20] Shinbrot T, Khakhar D V, McCarthy J J, Ottino J M 1997 *Phys. Rev. E* **55** 6121

[21] Rocke F A 1971 *Powder Technol.* **4** 180

[22] Roblee L H S, Baird R M, Tierny J W 1958 *A. I. Ch. E. Journal* **4** 460

[23] Benenati R F, Brosilow C B 1962 *A. I. Ch. E. Journal* **8** 359

[24] Thadani M C, Peebles F N 1966 *Ind. and Eng. Chem. Process Design and Development* **5** 265

[25] Goodling J S, Vachon R I, Stelpflug W S, Ying S J 1983 *Powder Technol.* **35** 23

[26] Mueller G E 1992 *Powder Technol.* **72** 269

[27] Sederman A J, Alexander P, Gladden L F 2001 *Powder Technol.* **117** 255

[28] Du Toit C G 2008 *Nuc. Eng. Des.* **238** 3073

[29] Suzuki M, Shinmura T, Iimura K 2008 *Adv. Powder Technol.* **19** 183

[30] Bey O, Eigenberger G 1997 *Chem. Eng. Sci.* **52** 1376

[31] Bey O, Eigenberger G 2001 *Int. J. Therm. Sci.* **40** 152

[32] Götz J, Zick K, Heinen C, König T 2002 *Chem. Eng. Proc.* **41** 611

[33] Ziółkowska I, Ziółkowski D 2001 *Chem. Eng. Proc.* **40** 221

[34] Ziółkowska I, Ziółkowski D 2005 *Chem. Eng. Proc.* **44** 1167

[35] 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]

[36] Wildman R D, Huntley J M, Parker D J 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3304

[37] Talbot J, Viot P 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 64301

[38] Jiang Z H, Wang Y Y, Wu J 2006 *Europhys. Lett.* **74** 417

[39] Jiang Z H, Liu X Y, Peng Y J, Li J W 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5692 (in Chinese) [姜泽辉、刘新影、彭雅晶、李建伟 2009 物理学报 **54** 5692]

[40] Brovchenko I, Oleinikova A 2008 *Interfacial and Confined Water* (Amsterdam: Elsevier B. V.)

[41] Scott G D 1962 *Nature* **194** 956

Convection and crystallization in vertically vibrated granular ‘capillary’ systems^{*}

Jiang Ze-Hui[†] Zhang Feng Guo Bo Zhao Hai-Fa Zheng Rui-Hua

(*Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

(Received 2 November 2009; revised manuscript received 30 November 2009)

Abstract

The packing structure of identical spheres poured into a narrow cylindrical container will be influenced by the curvature of the container wall. This has been known as the wall effect. Our experiments reveal that under the action of vertical vibration, the wall effect can be enhanced, that the spheres, initially in a random packed state, can be organized through convection into a stable ordered packing consisting of a concentric array of cylindrical “shells” of spheres. In each shell the spheres are hexagonally arrayed. During such a structure transition, the packing density distribution, initially with a damped oscillatory variation along the radial direction, turns into an undamped one. The effects of interstitial air and inhomogeneity in the packing on the convection of particles, and thereby on the dynamics for the formation of “shell” structure, are analyzed. In addition, some discussions on the stability of the “shell” structure are made.

Keywords: Granular materials, convection, ordered packing, capillary

PACC: 4610, 0570F, 4755M, 6800

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10974038).

[†] E-mail: zehuijiang@yahoo.com