

振动颗粒混合物中的三明治式分离*

姜泽辉^{1)2)†} 陆坤权¹⁾ 厚美瑛¹⁾ 陈 唯¹⁾ 陈相君¹⁾²⁾

¹⁾ (中国科学院物理研究所, 北京 100080)

²⁾ (哈尔滨工业大学应用物理系, 哈尔滨 150001)

(2002 年 11 月 29 日收到; 2003 年 1 月 10 日收到修改稿)

在竖直振动两种颗粒的混合物的实验中, 观察到了一种新的分离现象——“三明治”式分离, 即大而重的颗粒被夹在两层小的轻颗粒之间. 这不同于“巴西果”效应导致的大而重的颗粒在上的两层有序结构. 实验表明当振动加速度大于某个临界值时这种三层有序将取代两层结构, 而且是稳定的. 实验中观察到导致“三明治”式分离的两种不同的分离过程. 对这两种过程的物理机理及其与振动加速度、振动频率及颗粒尺寸等因素的关系做了研究, 并给出了相图.

关键词: 颗粒物质, 振动, 有序结构, 三明治式分离, 巴西果效应

PACC: 6475, 4720, 0570

1. 引 言

颗粒物质通常是指尺寸在几十微米以上的颗粒所构成的离散体系. 这类物质(如沙、矿石、谷物、化肥等)有着非常复杂的物理特性, 受到国内外物理学家的广泛注意^[1-5]. 两种不同性质(尺寸、密度等)的颗粒组成的混合物, 当受到外部的周期性扰动时, 两种颗粒往往会分离并形成一定的有序结构(斑图), 如, 倾倒时沙堆里形成的层化分离^[6-8], 水平转筒里沿筒轴形成的分离带^[9-11], 及水平振动混合物薄层时垂直于振动方向形成条状分离结构^[12]. 著名的“巴西果”效应^[13-17]指的是, 对混合物施加竖直方向的周期振动时, 大而重的颗粒将向上移动并停留在上面, 最终形成大颗粒在上小颗粒在下的两层结构. 最近, 我们在两种不同颗粒的混合物的竖直振动实验中, 发现了一种新的有序分离结构——“三明治”结构, 大而重的颗粒被夹在两层小的轻颗粒之间, 而不是分布在上表层. 本文给出的实验结果, 并对产生“三明治”式分离的物理机理进行了探讨.

2. 实验装置与结果

实验容器为一内径为 36mm 的玻璃圆筒. 筒底

由黄铜构成并固定在一电磁激振器(JZH-60T)的振动平台上. 激振器由信号发生器和功率放大器驱动, 可以产生竖直正弦机械振动. 振动加速度由振动加速度计读出. 所用颗粒为镍和玻璃球, 它们的直径分别为 0.32—0.45mm 和 0.16—0.18mm, 用量分别为 5ml. 为消除颗粒间及颗粒与器壁间摩擦产生的静电, 空气湿度保持在 55%—60%.

每次实验中, 保持频率不变, 加速度迅速由零增加到给定值. 每次施加振动之前, 将颗粒混合物尽量搅拌均匀, 以保证每次实验的初始情况相同. 振动强度用无量纲化振动加速度表示, $a = 4^2 f^2 A / g$ (其中 A 为振幅, f 为振动频率, g 为重力加速度). 实验频率范围为 25 f 80. 当 $a = 1.2$ 时, 系统出现“巴西果”分离, 大而重的颗粒跑到上层, 轻而小的颗粒在下层. 保持频率不变, 将加速度增加到超过临界值 a_1 时, 这种两层分离结构变得不稳定, 体系出现一种局域对流运动, 将部分小颗粒翻转到上表面, 最后形成稳定的三层结构, 我们称之为过程 I. 当加速度继续增大并超过另一临界值 a_2 时, 大颗粒直接由混合状态聚集到中间形成三层结构, 称之为过程 II. 继续增加加速度到第三个临界值 a_3 时, 体系进入无序状态.

图 1 和图 2 分别给出了体系由过程 I 和 II 演化

*国家自然科学基金(批准号:19834020)资助的课题.

†通信联系人, 0451-6413525 传真 0451-6221048 Email zehuijiang@yahoo.com.

成三层结构的示例. 图中频率均为 $f = 38 \text{ Hz}$, 加速度分别为 $a_1 = 4.41$ 和 $a_2 = 5.84$. 在过程 (图 1) 中, 体系首先形成“巴西果”分离, 如图 1 中最上面的照片. 但是几秒钟后, 这种两层结构变得不稳定, 两层之间的界面开始扭曲, 并时而向左时而向右运动. 再过几秒钟, 下面的小颗粒选择一个波峰(通常靠近器

壁)向上顶起. 之后, 这个波峰不断上涨, 最终冲破上层大颗粒翻涌而出. 近一半的小颗粒涌出后停留在上层, 体系进入稳定的“三明治”态.

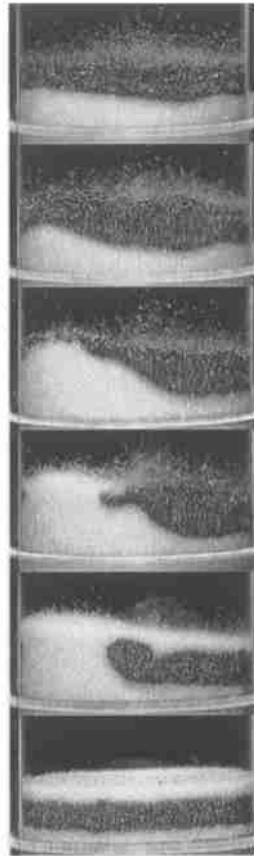


图 1 由双层结构向“三明治”态的演化(过程). 混合物由等体积(5ml)的镍颗粒(0.32—0.45mm)和玻璃颗粒(0.16—0.18mm)构成. 玻璃容器的内径为 36mm. 振动频率和加速度分别为 $f = 38 \text{ Hz}$ 和 $a = 4.12$. 图片时间序列由上而下, 其间隔依次为 3.5s, 0.25s, 1s 和 2s. 深色区域为镍颗粒

壁)向上顶起. 之后, 这个波峰不断上涨, 最终冲破上层大颗粒翻涌而出. 近一半的小颗粒涌出后停留在上层, 体系进入稳定的“三明治”态.

在过程 (图 2) 中, 突然施加振动后, 小颗粒迅速聚集达到体系中部形成一宽带, 但分离得不十分干净. 之后, 迅速渗漏到底部, 形成一底层, 而中间残余的部分小颗粒继续聚团形成一薄的分离层, 然后向上渗透形成上层. 大颗粒被留在中间, 但其中还有部分小颗粒. 这些小颗粒, 慢慢聚成小的团簇, 然后移向上表层或底层(视其所处位置而定). 在 $f = 38 \text{ Hz}$ 时, 过程 和 需要的时间都为 10s 左右, 随着

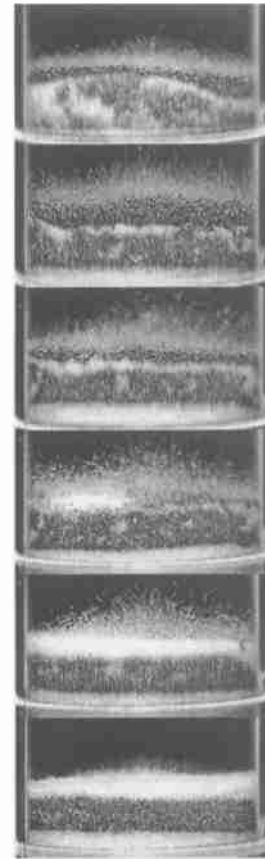


图 2 由均匀混合态直接向“三明治”态的演化(过程). 混合物与图 1 中相同. 振动频率和加速度分别为 $f = 38 \text{ Hz}$ 和 $a = 5.84$. 图片的时间间隔依次为 4.0s, 2.0s, 2.0s 和 4.0s

“三明治”式分离存在于一个很窄的区域内, $25 < f < 80, 3.5 < a < 6.7$. 图 3 给出了“三明治”态的相图. 图中, BNS(brazil nuts segregation)表示“巴西果”分离. SLS(sandwich-like segregation)表示“三明治”式分离. 图中给出的 a_1 和 a_3 是在一旦出现三层结构并能保持 5min 以上的情况下给定的. 在 a 不是很靠近 a_1 和 a_3 的情况下, 体系一旦达到“三明治”态就能持久稳定(小时计). 而一个稳定的“三明治”态, 其上下两层的厚度基本相等. a_2 两侧的虚线表示过程和过程 的界限不是十分分明, 而且当频率大于 38Hz 时在这个区域内还会出现不完整的三层结构. 有时上层或下层不完整, 有时还出现“反巴西果”^[18]分离. 另外, 三层结构还存在着迟滞现象, 形成三层结构后将 a 调到略小于 a_1 或略大于 a_3 , 三层结构还能保持足够长时间的稳定(数十分钟). 无论哪种过程, “三明治”态一旦形成, 其分离是非常彻底的. 在大颗粒中找不到小颗粒, 在小颗粒中也没有大颗粒.

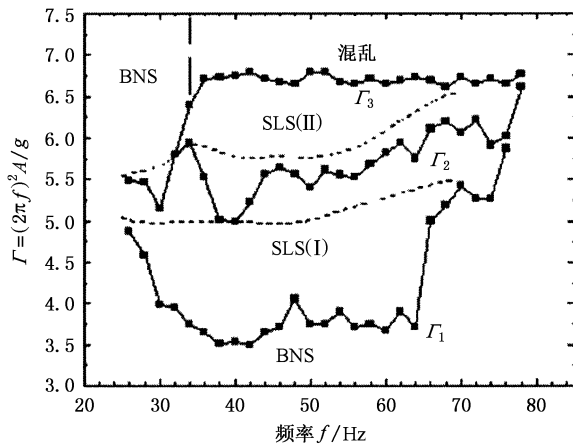


图3 “三明治”态的相图(曲线由实验确定,混合物与容器与图1和图2相同)

“三明治”态的存在还与其他因素有关. 出现分离的先决条件是密度大的颗粒尺寸必须大于密度小的颗粒,而且尺寸比必须接近或超过 2.0. 但是,如果尺寸比太大,也不会出现“三明治”式分离. 例如,在实验中保持玻璃球的尺寸不变,而镍颗粒的直径接近于 1.0mm 时,“三明治”态将消失. 另一个重要因素就是,两种颗粒的体积比及它们的绝对用量. 例如,保持玻璃颗粒的数量不变(5ml),镍颗粒的总体积必须大于 2.5ml. 否则,小颗粒的一些局部的小对流运动不断将三层结构破坏而无法稳定. 如果两种颗粒各自的体积超过 15ml 时,也观察不到“三明治”态. 需要说明的是以上因素都会对“三明治”态在相图中的存在区域产生影响. 例如,减少镍颗粒的用量, γ_2 和 γ_3 会减小而且频率向高频方向移动. 最后一个因素是容器的内径. 内径太小接近于 14mm 时,只会出现“巴西果”分离,而没有“三明治”分离. 当容器的内径增至 55mm 时,仍会出现“三明治”分离(两种颗粒的体积各为 30ml). “三明治”态对金属颗粒的材质不十分敏感. 在其他条件与前面的实验相同的情况下,将镍颗粒换为纯铜、黄铜及合金钢等仍可观察到“三明治”态. 这几种金属的密度相差不大,这表明“三明治”态对颗粒密度比的稍许变化不敏感.

3. “三明治”态产生的物理机理

“三明治”式分离导致了新的有序结构,其物理机理与“巴西果”效应不同. 一般认为“巴西果”效应是由于大颗粒不断被周围的小颗粒拱架起来的结

果. 振动过程中,大颗粒的上抛运动导致它的下面出现空隙,小颗粒容易填满这个空隙,并形成新的拱架结构从而使大颗粒不断被垫高^[19-26]. 或者认为,大颗粒上面的颗粒较疏松容易穿过,而下面的较密实穿过时阻力大,因而大颗粒总是具有向上运动的趋势^[27]. 不管怎样,这种现象首先与体系的流化有关. 振动(1.2)导致颗粒间距增大才使颗粒有可能迁移产生分离. 容器中颗粒体系的流化程度与振动强度有关,越大流化程度越高. 由于下部颗粒要承受上部颗粒的压力,其流化程度要低于上部的. 也就是,上部颗粒更容易表现出流体的流动性,而下部较密集,流动性相对较差处于类似于固体的状态.

“巴西果”效应发生在不太高的区域(1.2

1). 此时两层结构是稳定的,这说明下面的小颗粒还比较密集仍能形成瞬间的拱架结构支撑住大颗粒. 但是,当 $\gamma > \gamma_1$ 时(过程),体系完成“巴西果”分离后,从容器底部传来的能量使得分界面下面的小颗粒的流化程度加强,变得更易流动,导致两层结构变得不稳定. 这种不稳定性表现在分界面出现扭曲,并表现出缓慢的时左时右的行波运动. 这种波动类似于瑞利-泰勒(Rayleigh-Taylor)不稳定性导致的两种流体水平分界面上的表面波^[28]. 扰动(振动)使得表面波的振幅不断放大. 大到一定程度,小颗粒选择一个波峰通过局部对流翻涌到上表面. 由于底部的小颗粒仍然要承受上面所有颗粒的压力,流动性仍然较差,因而停留在原位.

在过程中($\gamma > \gamma_2$),体系流化的程度进一步加剧.“巴西果”效应导致底部先分离出一层小颗粒. 但上部流化得较剧烈,“巴西果”效应无法完整完成,而处于一种混合态. 由于这种混合态中大颗粒的重量引起的下沉趋势超过“巴西果”效应,因而大颗粒趋于沉聚到下面. 这与密度不同的两种液体的混合物中的分离情况相似.

“三明治”态之所以是稳定的还反映在它更有效地损耗容器底部传入的能量. 一旦进入“三明治”态,上表面的小颗粒基本没有流化,表面是平整光滑的. 只是在 30Hz 附近,表面会观察到几种规则斑图. 相反,在两层结构中,上表面的颗粒始终处于激烈流化的状态,飞扬得很高,类似于气态. 当容器的内径变得较小时,由于边界的影响,形成对流要难一些. 虽然两层结构不稳定,但难以通过对流使系统转化为稳定的三层结构.

4. 结 论

本文实验发现的“三明治”态是一种新的有序结构,它与“巴西果”效应不同.这说明竖直振动的两种颗粒的混合物中,“巴西果”效应导致的两层结构不是惟一的有序结构.在振动加速度小时,出现的是“巴西果”分离;当加速度大一些时就出现“三明治”分层.有两种形成“三明治”的物理过程,一种是经过“巴西果”阶段;一种是不经过“巴西果”阶段.形成

“三明治”态的原因是颗粒体系的流化加剧造成上面的颗粒流动性增强.这导致大而重的颗粒在上的两层结构变得不稳定.扰动会破坏这种不稳定结构,通过对流转化为稳定的三层结构.在竖直振动的两种颗粒的混合物时,是否还存在其他形式的有序结构将是一个值得研究的问题.

感谢张彤和牛小娟同志在实验方面所给予的帮助.感谢与刘寄星教授的有益讨论.

- [1] Jaeger H M, Nagel S R and Behringer R P 1996 *Rev. Mod. Phys.* **68** 1259
- [2] de Gennes P G 1999 *Rev. Mod. Phys.* **71** S374
- [3] Kadanoff L P 1999 *Rev. Mod. Phys.* **71** 435
- [4] Duran J 2000 *Sands, Powders, and Grains* (Springer-Verlag, New York)
- [5] Metha A and Barker G C 1994 *Rep. Prog. Phys.* **57** 383
- [6] Males H A, Havlin S, King P and Stanley H E 1997 *Nature* **386** 379
- [7] Baxter J, Tüü U, Heyes D, Hayati I and Fredlund P 1998 *Nature* **391** 136
- [8] Lecocq L and Vandewalle N 2000 *Phys. Rev. E* **62** 8241
- [9] Zik O *et al* 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 644
- [10] Hill K M Caprihan and Kakalios J 1997 *Phys. Rev. E* **56** 4386
- [11] Khosropour R, Valachovic E and Lincoln B 2000 *Phys. Rev. E* **62** 807
- [12] Mullin T 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 4741
- [13] William J C 1976 *Powder Technol.* **15** 245
- [14] Knight J B, Jaeger H M and Nagel S R 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 3728
- [15] Shinbrot T and Muzzio F J 2000 *Phys. Today* **53** 25
- [16] Shinbrot T and Muzzio F J 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4365
- [17] Mbiem M E *et al* 2001 *Nature* **414** 279
- [18] Hong D C, Quinn P V and Luding S 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3423
- [19] Ottino J M and Khakhar D V 2001 *Powder Technol.* **121** 117
- [20] Jullien R and Meakin P 1998 *Europhys. Lett.* **6** 629
- [21] Meadin P and Jullien R 1990 *J. Phys. (Paris)* **51** 1673
- [22] Duran J, Rajchenbach J and Clément E 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 2431
- [23] Duran J *et al* 1994 *Phys. Rev. E* **50** 5138
- [24] Rosato A, Strandberg K J, Prinz F and Swendsen R H 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 1038
- [25] Jullien R, Meakin P and Pavlovitch A 1992 *Phys. Rev. Lett.* **69** 640
- [26] Cook W, Warr S, Huntley J M and Ball R C 1996 *Phys. Rev. E* **53** 2812
- [27] Liffman K *et al* 2001 *Granular Matt.* **3** 205
- [28] Faber T E 1995 *Fluid Dynamics for Physicists* (Cambridge University Press)

Sandwich-like segregation in vertically vibrated binary granular mixtures *

Jiang Ze-Hui¹⁾²⁾ Lu Kun-Quan¹⁾ Hou Mei-Ying¹⁾ Chen Wei¹⁾ Chen Xiang-Jun¹⁾²⁾

¹⁾ (Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

²⁾ (Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(Received 29 November 2002; revised manuscript received 10 January 2003)

Abstract

In a vertically vibrated binary granular mixture, sandwich-like segregation pattern is observed; a layer of large heavy particles is sandwiched in between two layers of small particles. This pattern is different from the double-layer structure, known as the "Brazil nut" effect, where the large heavy particles populate on the top. Our experiments show that such a three-layer structure is a stable pattern. It occurs when the vibration acceleration is beyond a critical threshold. Two different segregation processes are observed. The mechanisms for these two segregation processes are discussed. The dependence of the segregation processes on the driving frequency f and acceleration, and the size ratio and volume ratio of the particles are also experimentally studied.

Keywords: granular materials, vibration, pattern, sandwich-like segregation, "Brazil nut" effect

PACC: 6475, 4720, 0570

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19834020).