

振动混合颗粒形成的反巴西果分层及其相图的实验观测

史庆藩⁽¹⁾⁽²⁾ 阎学群⁽¹⁾⁽²⁾ 厚美琪⁽¹⁾ 牛小娟⁽¹⁾ 陆坤权^{(1)*}

(①中国科学院物理研究所, 北京 100080; ②北京理工大学物理系, 北京 100081. *联系人, E-mail: lukq@aphy.iph.ac.cn)

摘要 在混合均匀的铜颗粒和玻璃颗粒受到不同加速度 Γ 和频率 f 的正弦振动作用下, 获得了巴西果(BN)、反巴西果(RBN)、三明治(Sandwich)的不同分层相构型及其相图. 首次观测到小颗粒在上大颗粒在下的稳定的反巴西果分层(reverse Brazil Nut segregation)现象. 还观测到区分不同分层区域的 Γ 值具有滞后效应, 表明分层过程与系统的初始条件有关.

关键词 颗粒物质 反巴西果 三明治结构 振动分离

不同大小颗粒物质的分离和混合与许多的工业和技术有关, 如: 粉末冶金、化工、矿物、制药、食品、玻璃和建材等^[1-3]. 当颗粒混合物受到振动或摇动时, 一般来说大的颗粒向上运动而小的颗粒则向下运动形成分层, 这是人们通常所见到的所谓“巴西果”效应(Brazil Nut effect, 简称为BN). 它是一种源自于渗漏、几何重组和整体对流的现象^[4-11].

最近, 对于是否还有其他构形存在的问题成为人们关注的课题^[12-15]. 这关系到理解和控制不同条件下形成的分层构形. Hong 等人通过考虑渗漏效应与凝聚之间的竞争, 在理论上预言了“反巴西果”(reverse Brazil Nut, 简称RBN)分层的存在及产生的条件^[12]: 即在一个三维的混合物系统中, 如果构成混合物的两种不同颗粒的尺寸与质量比适当, 则反巴西果分层是有可能形成的. 然而到目前为止尚未见到有关这种分层的报道.

本文报道在不同加速度 Γ 和频率 f 的垂直正弦振动作用下($\Gamma = 4\pi^2 f^2 A/g$ 是无量纲加速度表达式, 式中 A 是正弦振动的幅值, g 是重力加速度), 初始混合均匀的铜颗粒和玻璃颗粒混合物分层现象的实验观测. 给出了在范围 $1.0 \leq \Gamma \leq 7.0$, $18 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$ 获得的分层相图, 包括了不同的分层相: 巴西果(BN)分层、反巴西果(RBN)分层、三明治(Sandwich)分层. 首次在实验上观测到了小颗粒在上大颗粒在下的稳定的反巴西果分层现象. 在双层的巴西果分层结构中的上面铜颗粒层表面发现了条纹斑图, 这种斑图类似于文献[13]中在垂直振动的单层颗粒系统所观测到的图形, 但这种双层系统的斑图发生在较高的 Γ

值. 观测到的另一个重要现象是区分不同分层区域的 Γ 值具有滞后效应, 说明分层与系统的初始条件有关.

1 实验

混合均匀的两种颗粒物质分别是: 较大的铜颗粒(直径 $d_A = (0.25 \pm 0.03) \text{ mm}$, 体积 4 mL , 层厚 $\mu_A \approx 16 d_A$)和较小的玻璃颗粒(直径 $d_B = (0.12 \pm 0.02) \text{ mm}$, 体积 4 mL , 层厚 $\mu_B \approx 32 d_B$). 两种颗粒的直径比 $d_A/d_B \approx 2$, 质量比 $m_A/m_B \approx 23$. 混合物颗粒装在内径 36 mm , 深 150 mm , 垂直固定在铜板基座上的圆柱形玻璃管中. 铜板基座则水平固定在一个频率 $10 \sim 100 \text{ Hz}$, 功率 $1 \sim 800 \text{ W}$ 的电磁激振器上. 施加于颗粒混合物上的振动加速度的大小由加速度计测量. 我们的实验所选择的振动加速度 Γ 和驱动频率 f 的范围分别是: $1.0 \leq \Gamma \leq 7.0$, $18 \text{ Hz} \leq f \leq 80 \text{ Hz}$. 实验开始前搅拌两种颗粒物质使之尽可能混合均匀, 然后使容器分别在不同的 f 和 Γ 下振动. 具体步骤是: 先固定振动频率 f , 然后逐渐增大振动的加速度 Γ (步幅 $\Delta\Gamma = 0.1$), 观测颗粒混合物的分层情况. 我们界定的稳定分层图形是指在各固定 Γ 和 f 值时能保持半小时以上的构形. 为了避免静电效应的影响, 环境湿度保持在 $(53 \pm 3)\%$.

2 分层相图与反巴西果分层

不同 Γ 和 f 所对应的分层相图以及相应的侧视典型照片如图1所示. 在区域A($\Gamma \leq 3.2$), 振动开始后颗粒混合物的上表面很快成堆并倾斜, 分层逐渐开始. 然后, 十分清晰的分界线出现在上层铜颗粒和下层玻璃颗粒之间. 这就是常见的大颗粒在上、小颗

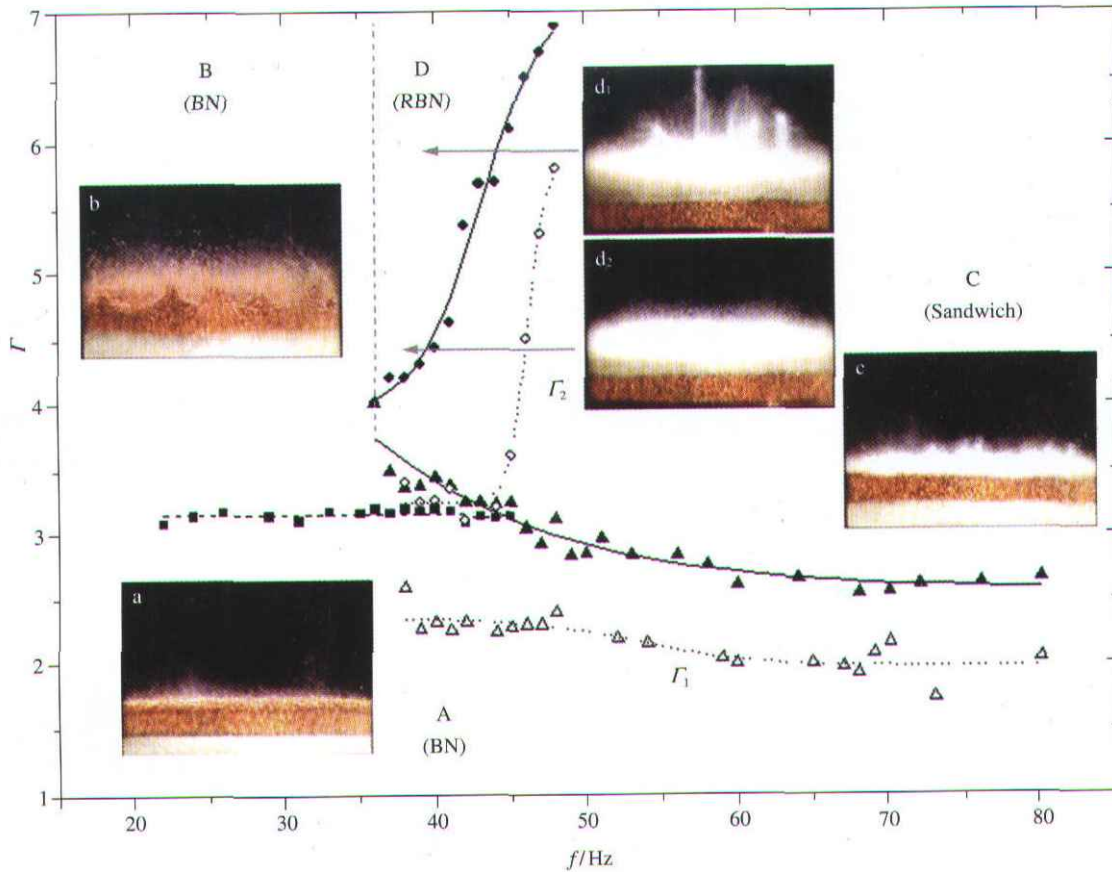


图 1

在不同加速度 Γ 和频率 f 的正弦振动作用下混合颗粒的分层相图以及相应的侧视典型照片。A 区, 巴西果分层区域(点线以下); 图片 a 摄于 $f = 52 \text{ Hz}$, $\Gamma = 2.50$ 。B 区, 巴西果分层区域(点线以上), 有条纹斑图生成。图片 b 摄于 $f = 28 \text{ Hz}$, $\Gamma = 4.10$ 。C 区, 三明治分层区域。图片 c 摄于 $f = 46 \text{ Hz}$, $\Gamma = 5.20$ 。D 区, 反巴西果分层区域。图片 d₁ 摄于 $f = 42 \text{ Hz}$, $\Gamma = 5.10$, 内有“局域激发”现象。图片 d₂ 摄于 $f = 42 \text{ Hz}$, $\Gamma = 4.30$ 。

粒在下的颗粒分离, 称之为“巴西果”效应, 如图片 a 所示。

当 $\Gamma \geq 3.0$, 对于不同的振动频率会出现不同的分层相, 如图中的区域 B、C 和 D 所示。

在低频区 ($f \leq 36 \text{ Hz}$) (B 区), 如图片 b 所显示的那样, 铜颗粒上层的表面表现为强烈的运动和流化并有条纹斑图生成, 其变化频率为 $1/2$ 激振频率, 同时上层和下层的分界面看上去有不稳定的波动。当继续增大 Γ 时, 铜上层表面的运动和流化则很剧烈, 以至于条纹斑图逐渐消失并呈现混乱的运动。

当振动频率在 $36 \text{ Hz} \leq f \leq 50 \text{ Hz}$ 的范围时, 存在一个如图所示的区域 D, 发生反巴西果分层现象, 当 $\Gamma \leq 4.5$ 时, 颗粒混合物先形成一个小颗粒在上大颗

粒在下的不完整反巴西果分层, 底部有少量小颗粒的残余, 这些颗粒从振动中获得能量并喷发到顶部, 形成如图片 d₁ 所示的所谓“局域激发”现象^[11]。这种现象一直延续到所有小颗粒都运动到顶层而达到如图片 d₂ 所示的稳定反巴西果分层为止。当 $\Gamma \geq 4.5$ 时, 图片 d₁ 所示的“局域激发”现象则始终存在。

在频率高于 36 Hz 的范围, 即图中的 C 区, 观测到了三明治分层, 铜颗粒层被夹在上下两玻璃颗粒层之间, 如图片 c 所示。三明治分层的形成有两种过程:

- (i) 振动开始后直接形成这种分层;
- (ii) 振动开始后巴西果分层首先很快形成, 两分层的界面呈倾斜状, 随着振动的进行, 下面的倾斜

玻璃颗粒层的顶部向上涌动并冲破铜颗粒上层的覆盖, 然后经过容器的某一侧壁翻滚到顶部形成玻璃颗粒上层, 同时有部分玻璃颗粒滞留在底部, 对较高的 f 值, 在顶部玻璃层的上表面也能看到类似于在区域 D 中所观测到的“局域激发”现象, 只是相对弱一些, 实际上, 这种三明治分层也可认为是巴西果和反巴西果分层的组合。

需要说明的是由于颗粒物质的复杂性, 在分层相图的 4 个区域之间, f 和 f_c 的分界线并非十分严格, 例如图中的 B 区(正巴西果)和 D 区(反巴西果)的分界线的所有实验测量点落在虚线附近 ± 1 Hz 范围内, 另一方面, 三明治分层(“三明治”分层在本文之前已由本研究组的姜泽辉等人观察到, 待发表)或反巴西果分层形成后, 若逐步降低振动加速度 f , 必须有较低的 f 值才能返回到原先的反巴西果或正巴西果分层状态, 而出现滞后现象, 图中的点画线 f_1 和 f_2 就表示这种滞后效应的转变线, 这种滞后也表明我们观测到的“三明治”和“反巴西果”分层是相对稳定的分离相区, 另外, 振动引起颗粒物质的分层现象与颗粒的尺寸、质量、体积比以及颗粒表面的性质等因素有关, 虽然难以改变各种因素进行测量, 但我们的实验结果表明确实存在反巴西果的稳定相区, 当其他因素改变时, 所对应的 f 及 f_c 相区分界线也会改变。

3 结论

在混合均匀的铜颗粒和玻璃颗粒受到不同加速度 f 和频率 f 的正弦振动的作用下, 获得了不同的分层构形及其相图。

首次观测到小颗粒层在上大颗粒层在下的稳定的反巴西果分层现象, 在双层的巴西果分层结构中的上面铜颗粒层的表面发现了条纹斑图, 其变化频率为 $1/2$ 激振频率, 另外还观测到了区分不同分层区域的 f 值具有滞后效应, 说明分层过程与系统的初始条件有关, 然而, 由于颗粒物质的复杂性, 对于上述实验结果尚无法在机理上给出确定的解释, 而且发生这种现象的实验条件也与 Hong 等人所预言的这种现象形成的理论条件不完全吻合, 对于这种分层变化的规律的解释还需要进一步的工作。

致谢 本工作为国家自然科学基金资助项目(批准号: 19834020)。

参 考 文 献

- 1 Jaeger H M, Nagel S R, Behringer R P. Granular solids liquids and gases. *Rev Mod Phys*, 1996, 68(4): 1259 ~ 1273
- 2 De Gennes P G. Granular Matter: a tentative view. *Rev Mod Phys*, 1999, 71(2): S374 ~ S381
- 3 Kadanoff L P. Built upon sand: theoretical ideas inspired by granular flows. *Rev Mod Phys*, 1999, 71(1): 435 ~ 443
- 4 Williams J C. The segregation of particulate materials. *Powder Technol*, 1976, 15: 245 ~ 251
- 5 Rosato A, Prinz F, Strandburg K J, et al. Why the Brazil nuts are on top: size segregation of particulate matter by shaking. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(10): 1038 ~ 1040
- 6 Jullien R, Meakin P. Three-dimensional model for particle-size segregation by shaking. *Phys Rev Lett*, 1992, 69(4): 640 ~ 643
- 7 Duran J, Rajchenbach J, Clément E. Arching effect model for particle size segregation. *Phys Rev Lett*, 1993, 70(16): 2431 ~ 2434
- 8 Knight J B, Jaeger H M, Nagel S. Vibration-induced size segregation in granular media: the convection connection. *Phys Rev Lett*, 1993, 70(24): 3728 ~ 3731
- 9 Cooke W, Warr S, Huntley J M, et al. Particle size segregation in a two-dimensional bed undergoing vertical vibration. *Phys Rev E*, 1996, 53(3): 2812 ~ 2822
- 10 Jullien R, Meakin P, Pavlovitch A. Three-dimensional model for particle-size segregation by shaking. *Phys Rev Lett*, 1992, 69(4): 640 ~ 642
- 11 Herrmann H J, Hovi J P, Luding S. *Physics of Dry Granular Media*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998, 553 ~ 703
- 12 Hong D C, Quinn P V, Luding S. Reverse brazil nut problem: competition between percolation and condensation. *Phys Rev Lett*, 2001, 86(15): 3423 ~ 3426
- 13 Bizon C, Shattuck M D, Swift J B, et al. Patterns in 3D vertically oscillated granular layers: simulation and experiment. *Phys Rev Lett*, 1998, 80(1): 57 ~ 60
- 14 Masaharu I. Bifurcations of a driven granular system under gravity. *Phys Rev E*, 2001, 64(3): 1304-1 ~ 1304-14
- 15 Burtally N, King P J, Swift M R. Spontaneous air-driven separation in vertically vibrated fine granular mixtures. *Science*, 2002, 295(3): 1877 ~ 1879

(2002-09-09 收稿, 2002-11-25 收修改稿)