

准二维二元混合颗粒动态循环反转分层的体积效应*

吴宇航¹⁾ 郑宁¹⁾ 文平平¹⁾ 李粮生¹⁾ 史庆藩^{1)†} 孙刚^{2)‡}

1) (北京理工大学物理系, 原子分子簇科学教育部重点实验室, 北京 100081)

2) (中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190)

(2010年4月18日收到; 2010年5月11日收到修改稿)

对垂直振动作用下准二维二元混合颗粒系统的动态循环反转分层现象进行了系统研究, 得到了频率与加速度的关系相图, 并观测到分层的动态循环反转区域. 发现动态循环的反转周期与颗粒总体积的变化有单调递增关系. 利用 Hong 的竞争机制理论对动态循环反转的现象及其体积效应的机理给出了解释.

关键词: 颗粒, 分层, 周期

PACS: 45.05.+x, 45.70.-n, 05.20.-y

1. 引言

作为颗粒研究中的一个前沿问题, 混合颗粒振动分层一直是物理学家关注的学术焦点之一^[1-6]. 事实上, 颗粒分层的探究也极具实际应用价值, 如在矿物筛选、粉末冶金、制药过程等工农业生产中采用的技术都与颗粒分层有着密切的关系^[7]. 这些技术中有的以不同颗粒的混合为目的, 有的则以不同颗粒的分离为目的. 实验研究证明, 振动下的颗粒系统是一个极其复杂的耗散结构, 目前已知的分层机制有对流、渗漏、凝聚^[8-12]等, 同时这些机制还受到多种因素的影响, 如振动频率、振幅、空气作用、颗粒本身性质等^[13-15]. 由此, 人们提出了各种理论模型来试图解释分层现象, 但迄今为止尚未有一个公认的理论来准确解释颗粒分层现象, 只有 Hong 等^[16,17]的凝聚与渗透竞争的机制较有说服力.

一般来说, 垂直振动导致的混合颗粒分层的构型有巴西果(大颗粒在上而小颗粒在下), 反巴西果(小颗粒在上而大颗粒在下)和三明治(大颗粒层在上下两个小颗粒层之间)这三种分层类型, 并且这些分层构型都是稳态的, 即一旦分层构型形成后,

则总体状态就不再随时间改变, 至多是分层界面的倾斜角度略有变化, 或者层内有局部对流等现象存在. 最近的研究发现了一种新的分层现象, 即巴西果和三明治之间的动态循环翻转分层^[18,19]. 然而对这一现象尚缺乏系统的研究. 众所周知, 作为有限体系, 体系的体系大小对其性质有着决定性的作用, 所以颗粒系统的体积效应是一个重要的研究课题.

本文以二元混合颗粒系统为考察对象, 对循环反转分层现象的体积效应进行了重点观测. 实验中我们采用准二维颗粒系统, 这是考虑到观察与测量的客观性(三维系统下颗粒体系内部的分层界面存在弯曲, 难以准确观察). 我们首先得到了 f - Γ 相图, 同时测量了循环分层周期, 给出了振动周期与二元颗粒总体积的变化规律, 最后利用 Hong 的竞争机制理论对动态分层现象做出了解释.

2. 实验与结果

在实验中二元颗粒分别为铜球(直径为 $320 \mu\text{m} \pm 30 \mu\text{m}$, 密度为 8.38 g/cm^3)和氧化铝球(直径为 $170 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$, 密度为 1.65 g/cm^3). 二元混合颗

* 国家自然科学基金(批准号:10975014,10875166)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: qfshil23@bit.edu.cn

‡ 通讯联系人. E-mail: gsun@aphy.iphy.ac.cn

粒填充在扁方形玻璃容器中,容器底为金属平板,容器的尺寸为 40 mm × 10 mm × 50 mm (长 × 宽 × 高). 容器固定在垂直振动的电磁振动台上. 施加于容器的加速度和频率均由控制系统自动调节. 无量纲化振动加速度为 $\Gamma = 4\pi^2 A f^2 / g$, 其中 A 是振幅, g 是重力加速度. 在实验中我们选择的振动加速度范围是 $1.0 \leq \Gamma \leq 8.0$, 频率范围是 $20 \leq f \leq 50$ Hz. 实验开始前搅拌两种颗粒物质使之尽可能混合均匀, 然后使容器在所选频率和加速度范围内振动, 并记录各种条件下颗粒系统的形态特征. 实验环境的湿度为 $(20 \pm 5)\%$. 为了避免静电影响, 将金属底座接地, 并用金属汤匙搅拌颗粒. 由此得到的 $f-\Gamma$ 空间分层相图, 如图 1 所示. 图 1 中的 A 区表示颗粒集体的微弱振动态, 颗粒处处均匀混合, 内部有时会有对流发生, 但没有任何分层现象. B 区为巴西果分层区域, 此时铜颗粒占据上层位置, 氧化铝颗粒占据下层位置. C 区为混合区, 可以观察到其中有渗透、凝聚、对流和颗粒气化同时存在, 很难准确地定义该区域的颗粒行为. D 区是振飞区, 上层颗粒呈现颗粒气体状态. 区域 E 为循环反转分层区域, 我们的研究都将在 E 区中进行. 需要说明的是, 我们界定的颗粒系统构型均是指相应的 Γ 和 f 值均能保证 30 s 以上的状态.

在 E 区颗粒系统从混合态开始, 经过一段时间演化成巴西果态, 然后从巴西果态演变成为反巴西果态, 之后迅速变化成为三明治态 (从反巴西态过

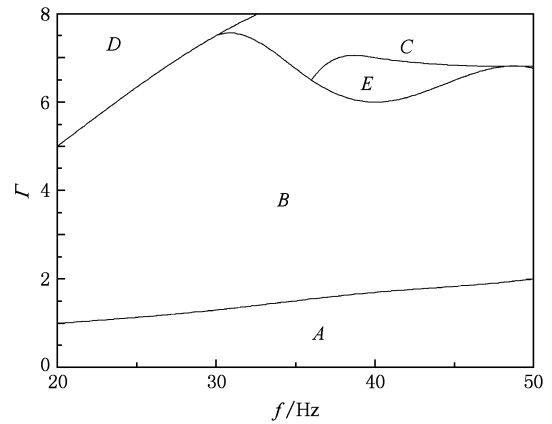


图 1 频率-加速度相图 A 区为微弱振动区, B 区为巴西果区, C 为混合区, D 为振飞区, E 为循环反转分层区

渡到三明治态一般不超过 1 s, 因此可以把反巴西果态看作为一个准稳态), 最后再返回到巴西果态. 这种巴西果态-反巴西果态-三明治态-巴西果态的动态循环会在实验中持续稳定地进行. 对于这种循环分层, 周期是一个重要参数, 不妨将其定义为从巴西果态开始, 再回复到下一个巴西果态开始所经历的时间. 以颗粒系统处于 $f = 40$ Hz, $\Gamma = 6.6$, 颗粒总体积为 3.6 mL (体积比为 1:1) 为例, 其状态演化过程分别如图 2(a) — (f) 所示. 图 2(a) 为振动后形成的巴西果态, 当巴西果状态确定时, 即铜层中几乎没有氧化铝颗粒时 ($< 5\%$), 将此时刻作为周期计时零点. 然而这种分层状态并不稳定, 随着时间的

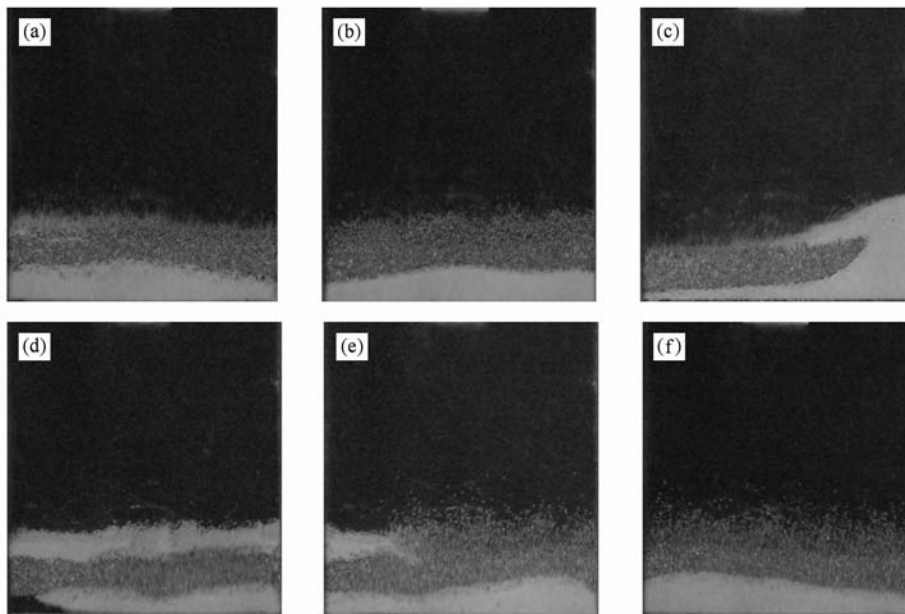


图 2 颗粒循环周期反转分层示意图 总体积为 3.6 mL, $f = 40$ Hz, $\Gamma = 6.6$, (a) — (f) 为状态演化过程

演化,铜颗粒逐渐向容器壁一侧堆积,颗粒体系的分界面出现倾斜,铜颗粒堆积带来的挤压造成氧化铝颗粒向另一侧倾斜.直至某一时刻,氧化铝颗粒从铜层最薄处(往往是堆积的反方向一侧)处涌出,如图2(c)所示.之后氧化铝颗粒迅速占据上层位置,覆盖在铜颗粒层之上,形成反巴西果态.随后氧化铝颗粒开始不断地向下渗漏,在一定时间内形成分界面鲜明的三明治构型,如图2(d)所示.随着系统继续演化,上层的氧化铝颗粒不断渗漏穿过铜颗粒层进入到最下层的氧化铝颗粒层,逐渐地上层氧化铝颗粒层变得稀薄,而铜层则逐渐地升至表面,如图2(e)所示.随着时间推移,系统重新恢复到铜颗粒层在上、氧化铝颗粒层在下的巴西果态,如图2(f)所示.至此计时所经历的时间为一个循环分层的周期,定义为 τ .此后随着时间延续,整个系统重复上述循环过程.

接着我们在 $f=40\text{ Hz}$ 和 $\Gamma=6.6$ 的振动条件下系统地测量了在铜与氧化铝颗粒体积比始终保持为1:1不变的条件下,总体积从3.6 mL增加至6.8 mL,周期与不同的颗粒总体积之间的相互关系.图3显示了改变颗粒总体积情况下的周期时间曲线.图中每个数据点是观测15个循环周期的平均值.其中实线为周期 τ 的时间曲线,可以看出曲线表现为单调上升,并呈现出一定的非线性.图中虚线是氧化铝颗粒突破铜层的一瞬间(如图2(c))至下一个巴西果态的开始(图2(f))的周期(定义为 τ_1)的时间曲线.可以看出,在一个总体积值上 τ_1 值非常接近 τ 值,且两条曲线的形状基本类似,因此解释转变时间 τ_1 将对阐明周期的体积效应问题有极大帮助.当颗粒体积小于3.6 mL或者大于6.8 mL,均会

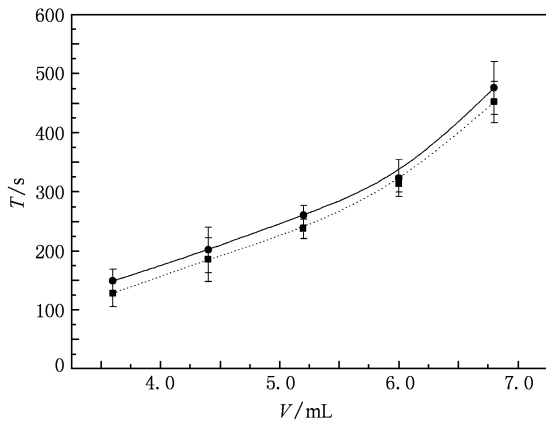


图3 循环反转分层现象循环周期 τ 与 τ_1 $f=40\text{ Hz}$, $\Gamma=6.6$, 实线表示 τ ,虚线表示 τ_1

导致循环分层现象的消失,因此可以认为这两个值是该颗粒体系耗散结构的体积临界点.

3. 讨 论

根据 Hong 等^[16,17]所提出的振动分层理论,循环反转分层机制可能是由于渗透与凝聚两个机制相互竞争的结果.在 Hong 的模型中, $T_c(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 与 $T_c(\text{Cu})$ 分别是氧化铝颗粒与铜颗粒的临界温度,两者之比为 $\frac{T_c(\text{Al}_2\text{O}_3)}{T_c(\text{Cu})} = \frac{m_{\text{Al}_2\text{O}_3} d_{\text{Al}_2\text{O}_3}}{m_{\text{Cu}} d_{\text{Cu}}}$,这里 $m_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 和 m_{Cu} 分别是氧化铝和铜的质量, $d_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ 和 d_{Cu} 分别是两者的颗粒半径,假设颗粒系统的温度 T 处于 $T_c(\text{Al}_2\text{O}_3) < T < T_c(\text{Cu})$,我们可以预期铜颗粒将会凝聚,而氧化铝颗粒则完全处于流化状态.当颗粒系统温度满足上述关系时,在巴西果态(如图2(a))至反转开始瞬间(如图2(c))所表示的时间内,由于颗粒的排列,体积较大的铜球在上,体积较小的氧化铝球在下,渗透机制的作用被极大削弱,因此凝聚机制将起到主要支配作用.此时铜颗粒向凝聚状态发展,体积减少而密度增加,倾向于下沉至容器底部.而氧化铝处于完全流化状态,体现出部分液体性质,倾向于上浮至容器上方.

我们在实验中也观测到,在巴西果状态形成后,铜层的振动范围在逐渐减少,如图4(b)所示.图4为 $f=40\text{ Hz}$, $\Gamma=6.6$ 下,颗粒总体积为6.8 mL(体积比为1:1)的循环状态.因为图2中的铜层过薄,在图中不易分辨铜层变化差异,故此我们需要选择较厚的铜层作为比较.铜层振动范围逐渐减少的事实意味着其动能不断损耗,而氧化铝层振动范围逐渐增加直至完全流化,意味着其动能不断增加,振动的激烈程度加剧.在氧化铝层振动加剧的情况下,铜层的振动趋于平缓,使得氧化铝层与铜层之间碰撞的力不断增加,直至氧化铝层有足够的力推开上方最薄处的铜层,涌上表面破坏平衡结构.但要说明的是,如果铜颗粒层本身质量过大,使得下方的氧化铝层无法冲破铜层,可使循环中断.而在反转瞬间(如图2(c))历经三明治态(如图2(d),(e))最后到达下一个巴西果态(如图2(f))所表示的时间内,渗透机制占据优势,铜颗粒之间的空隙足以使氧化铝颗粒渗透而至容器底层,从而从三明治态重新演化为巴西果态.这样凝聚与渗透在两个过程中轮流占据优势,使得循环不断继续.对

于周期与颗粒总体积之间的关系,如前所述,周期 τ 基本由 τ_1 决定. 而在这个渗透机制起主要支配的过程中,总体积的增加意味着铜层与氧化铝层厚度同时增加,铜层的变厚无疑会增加氧化铝颗粒在渗透过程中与铜颗粒碰撞的平均次数,也可能会影响到氧化铝的渗透速度,比较图 2(b)与图 4(b),明显后者的铜层厚度要比前者大得多(在渗透全程中,后者的铜层厚度一直比前者要大). 而在铜层上方氧化铝颗粒数目的增加,无疑会延长渗透时间,因

此,对于总体积增加的情况,铜层与氧化铝层同时增加都将有利于渗透时间的延长,所以定性来看,在循环反转分层允许的体积范围内,周期是总体积的单调增函数. 如果假设氧化铝颗粒在铜层上方的数量是影响渗透时间的惟一因素,周期时间曲线应该呈线性. 但实际测量得到的周期曲线末端的非线性,可能暗示了氧化铝颗粒的渗透速度会受到铜层厚度及氧化铝在铜层上数量的影响,对此我们需要进一步的研究.

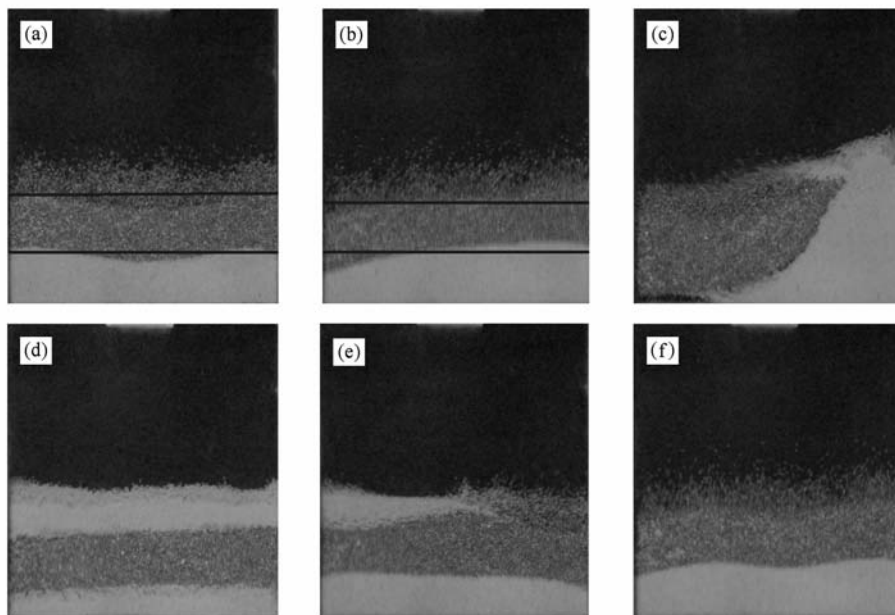


图 4 颗粒循环周期反转分层示意图 总体积为 6.8 mL 的循环状态. $f=40$ Hz, $\Gamma=6.6$, (a) 与 (b) 图中用深色线条标出的是铜颗粒层在振动中的体积, (a) — (f) 为状态演化过程

4. 结 论

观测了不同频率和振动幅度下准二维二元混合颗粒系统的相图分布,发现了动态循环分层的区

域,同时详细描述了循环周期内不同的分层行为,并且定义了一个重要参数:循环周期,发现循环周期随颗粒体系的总体积成单调上升关系. 最后利用凝聚与渗透的竞争机制解释了动态循环分层的现象,定性讨论了在循环反转分层中的体积效应.

- [1] Jiang Z H, Lu K Q, Hou M Y, Chen W, Chen X J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2244 (in Chinese) [姜泽辉、陆坤权、厚美英、陈 唯、陈湘君 2003 物理学报 **52** 2244]
- [2] Lu K Q, Liu J X, Wu L 2004 *Physics* **33** 629
- [3] Yang X Q, Liu F, Jia Y, Deng M, Guo H P, Tang G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1116 (in Chinese) [杨先清、刘 甫、贾 燕、邓 敏、郭海洋、唐 刚 2010 物理学报 **59** 1116]
- [4] Sun Q C, Jin F, Wang G Q, Zhang G H 2008 *Acta Phys. Sin.*

- 57** 30 (in Chinese) [孙其诚、金 峰、王光谦、张国华 2010 物理学报 **57** 30]
- [5] Zhao L L, Liu C S, Yan J X, Xu Z P 2008 *Acta Phys. Sin.* **59** 1870 (in Chinese) [赵啦啦、刘初升、闫俊霞、徐志鹏 2010 物理学报 **59** 1870]
- [6] Abdul Q, Shi Q F, Liang X W, Sun G 2010 *Chin. Phys. B* **19** 034601
- [7] Hermann H J, Hovi J P, Luding S 1998 *Physics of Dry Granular Media* (Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publisher)

- [8] Quinn P V, Hong D C, Luding S 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 189604
- [9] Breu A P J, Ensner H M, Kruelle C A, Rehberg I 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 014302
- [10] Knight J B, Jaeger H M, Nagel S R 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 3728
- [11] Nahmad-Molinari Y, Canul-Chay G, Ruiz-Suarez J C 2003 *Phys. Rev. E* **68** 041301
- [12] Liff K, Muniandy K, Rhodes M, Gutteridge D, Metcalfe G 2001 *Gran. Matt.* **3** 205
- [13] Rosato A, Strandburg K J, Prinz F, Swendsen R H 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 1038
- [14] Shinbrot T, Muzzio F J 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4365
- [15] Yan X, Shi Q, Hou M, Lu K, Chan C K 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 014302
- [16] Hong D C, Quinn P V, Luding S 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3423
- [17] Quinn P V, Hong D C 2000 *Phys. Rev. E* **62** 8295
- [18] Burtally N, King P J, Swift M R, Leaper M 2003 *Gran. Matt.* **5** 57
- [19] Liang X W, Li L S, Hou Z G, Lü 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 2010 物理学报 **57** 2300]

Volume effect in the cyclic segregation of quasi two-dimensional binary granular mixture *

Wu Yu-Hang¹⁾ Zheng Ning¹⁾ Wen Ping-Ping¹⁾ Li Liang-Sheng¹⁾ Shi Qing-Fan^{1)†} Sun Gang^{2)‡}

1) (Department of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

2) (Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 18 April 2010; revised manuscript received 11 May 2010)

Abstract

A systematic study about the cyclic segregation observed experimentally in a vertically vibrated quasi two-dimensional binary granular mixture is reported. The frequency-amplitude phase diagram was obtained, in which the region of cyclic segregation was found. We also measured the period of the cyclic segregation and showed the relationship between the period and total volume of granular mixture. Finally, the competition mechanism of percolation and condensation from Hong's theory is used to explain the cyclic segregation and volume effect qualitatively.

Keywords: granular matter, segregation, period

PACS: 45.05.+x, 45.70.-n, 05.20.-y

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10975014, 10875166).

† Corresponding author. E-mail: qfshi123@bit.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: gsun@aphy.iphy.ac.cn