

# 气压对颗粒物质振动分离的影响<sup>\*</sup>

阎学群<sup>1,2</sup> 史庆藩<sup>1,2</sup> 厚美瑛<sup>1</sup> 陆坤权<sup>1,†</sup>

(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)

陈志强

(中研院物理研究所 台北 115)

**摘要** 文章作者系统地研究了垂直振动颗粒床中,在不同气压、颗粒尺寸以及密度情况下大球的运动规律.实验发现,系统处于真空状态或低气压时,大球总是向上运动.然而,当在通常大气压下,大球则会出现上升和下降两种运动状态.大球下降这种运动状态,只在大球的密度和颗粒床中颗粒尺寸足够小时才会出现.颗粒床中的负气压梯度导致大球下降.

**关键词** 颗粒物质,分离,巴西果效应

## Effects of air on the segregation of particles in a shaken granular bed

YAN Xue-Qun<sup>1,2</sup> SHI Qing-Fan<sup>1,2</sup> HOU Mei-Ying<sup>1</sup> LU Kun-Quan<sup>1,†</sup>

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

(2 Department of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

CHEN Zhi-Qiang (Chan Chikeung)

(Institute of Physics, Academia Sinica, NanKang, Taipei 115)

**Abstract** The effects of interstitial air on the motions of a large intruder in a shaken granular bed are studied experimentally as a function of ambient air pressure, particle size of the bed, and the density of the intruder. It is found that the intruder always rises from the granular bed in the absence of air. However, the intruder can acquire both positive and negative buoyancy in the presence of air. Negative buoyancy can be observed only when both the density of the intruder and the particle size of the bed are small enough. This negative buoyancy can be explained by the unusual air pressure distribution found in the bed.

**Key words** granular matter, segregation, Brazil nut effect

颗粒物质 (granular matter) 是以离散态形式存在的物质形态. 颗粒物质在自然界、日常生活及生产和技术中普遍存在, 是最为人们所熟悉的物质类型之一, 其运动规律与一般固体和液体很不相同. 颗粒物质的复杂行为一直以来没有得到很好认识, 因此这一领域近年来受到物理学界的广泛关注<sup>[1-4]</sup>. 对于一个大小颗粒混合的系统, 当受到外界扰动 (如振动、摇动等) 时, 会发生大小颗粒的分离. 在垂直振动作用下, 一般是大颗粒运动到上层, 小颗粒运动到下层, 这称之为“巴西果效应” (Brazil nut

effect)<sup>[5]</sup>. 欧洲人常用的早餐穆兹利是以燕麦片和包括较大的巴西果在内的干果混合制成. 人们发现, 每天第一个从盒里倒出穆兹利的人总会得到更多的巴西果, 而最后倒穆兹利的人则只能得到燕麦片, “巴西果效应”名称源于此. 混合颗粒的振动分离是一个人们所熟知的现象. 但是长久以来, 人们对“巴西果效应”的形成机理并不十分清楚. 1998年, Shin-

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金 (批准号 10274098) 资助项目

2003-07-31 收到初稿 2003-09-26 修回

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: lukq@aphy.iphy.ac.cn

brot 等人又观察到了大颗粒向下运动的所谓“反漂浮”(reverse buoyancy)或称“反巴西果现象”<sup>[6-9]</sup>. 美国芝加哥大学的研究小组于 2001 年在 Nature 上发表的论文指出<sup>[10]</sup>, 气压的变化导致大颗粒上升的速度改变, 但未观察到“反巴西果现象”. 因此, 必须了解“反巴西果效应”是否确实存在, 存在的条件是什么.

最近, 我们通过不同密度大球在不同尺寸颗粒的床中振动的实验, 系统地研究了大球上升和下降的规律. 发现在床中颗粒间隙气体的存在是出现“反漂浮”的重要原因, 并且只有当床颗粒的尺寸和大颗粒(或大球)的密度足够小时, “反漂浮”现象才会出现<sup>[11]</sup>.

我们分别采用直径相同而密度不同的一个大球, 放在振动颗粒床中, 改变颗粒的尺寸和振动条件, 观察各种情况下大球在颗粒中上升还是下降, 并测量上升到表面或下降到底的时间. 在实验中, 将装颗粒的玻璃容器固定在电磁激振器上, 通过改变振动频率  $f$  和振幅  $A$  调节振动加速度. 用无量纲量  $\Gamma = 4\pi^2 A f^2 g^{-1}$  表示加速度大小, 其中  $g$  为重力加速度. 以下的实验结果都是在  $f = 30\text{Hz}$  条件获得的. 床颗粒分别采用直径为 0.12, 0.17, 0.20, 0.25, 0.70mm 的玻璃珠和 0.19, 0.29 mm 的钢珠. 不同密度的大球是由铜球壳内填充不同材料制成, 使大球和颗粒密度之比  $\rho/\rho_m$  从 0.17 到 4.20.

图 1 给出了同一直径不同密度的大球在玻璃珠颗粒床中上升和下降的规律. 此结果是在如下条件得到的: 玻璃珠平均直径  $d = 0.12\text{mm}$ , 密度为  $\rho_m = 2.5\text{g/cm}^3$ , 玻璃圆筒容器内径  $D = 55\text{mm}$ , 所装颗粒高度  $H = 60\text{mm}$ , 大球直径 9mm, 大球初始被置于距底部高为  $h = 30\text{mm}$  处, 振动加速度  $\Gamma = 3$ . 图中横坐标  $\chi = \rho/\rho_m$  为大球和颗粒密度比, 纵坐标  $T_r$  和  $T_s$  分别为大球上升到表面和下降到底部的时间. 可以清楚地看到, 存在着一个临界值  $\chi_c$ , 是大球上升和下降的分界. 当  $\chi > \chi_c$  时, 大球上浮到表面, 并保持在上表面上.  $T_r$  随  $\chi$  增加呈幂次减小, 遵从  $T_r \propto (\chi - \chi_c)^{-1}$  规律. 而当  $\chi < \chi_c$  时, 大球下沉, 到底部后不再上升,  $T_s$  随  $\chi$  减小而幂次减小, 遵从  $T_s \propto (\chi_c - \chi)^{-2.7 \pm 1.0}$  规律(大球处于颗粒中央位置)和  $T_s \propto (\chi_c - \chi)^{-2.3 \pm 0.9}$  规律(大球处于颗粒器壁位置). 在临界值  $\chi_c$  处(如果不考虑对流的影响), 大球将停留不动, 既不上浮也不下沉.

用不同振动加速度和不同颗粒尺寸的床进行的实验结果示于图 2(a)(b). 图 2 表明, 临界密度比

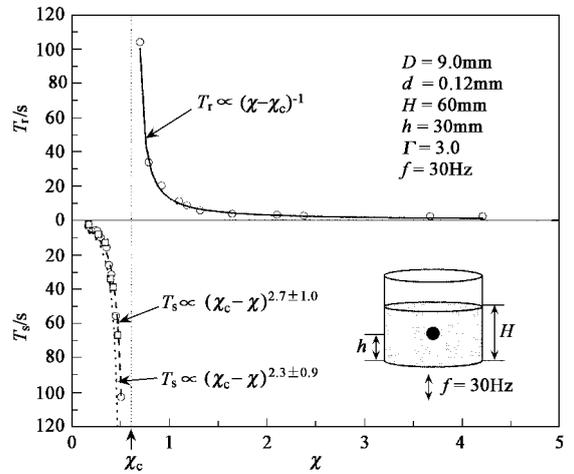


图 1 大球在颗粒床中的上升和下降时间随密度比  $\chi = \rho/\rho_m$  的变化(插图为颗粒床示意图)

$\chi_c$  值与颗粒直径和加速度大小无关, 图 1 和图 2 均为  $\chi_c \approx 0.65$ . 在  $\chi > \chi_c$  区, 大球上升时间  $T_r$  与  $\chi$  的关系对颗粒尺寸不敏感. 而在  $\chi < \chi_c$  区, 大球下降时间  $T_r$  与  $\chi$  的关系随颗粒尺寸而改变, 即“反巴西果”形成与颗粒尺寸有关, 颗粒尺寸大时不易产生“反巴西果效应”. 例如, 当颗粒尺寸大于  $d = 0.5\text{mm}$  时, 则观察不到“反巴西果现象”<sup>[10]</sup>. 同时, 我们在低真空(0.1atm)下进行了实验, “巴西果效应”总是存在, 而“反巴西果现象”消失. 表明使大球下降必定还有一种与颗粒性质无直接关系的因素, 我们推测是颗粒间的间隙气体.

为了进一步搞清大球向下运动是否由于颗粒间的间隙气体的作用, 我们使用了一个简易的装置对振动状态下颗粒床内的气压进行测量. 在颗粒中插入细玻璃管, 连接一装水的 U 型玻璃管, 通过观察水位的变化探测气压. 测量结果是: 发生“反巴西果”的颗粒床内部存在着一个负气压梯度, 气压随深度增加而降低. 如果是较大尺寸的玻璃颗粒床, 或较小颗粒尺寸但较重的金属颗粒床, 则内部不存在负气压梯度, 或只有极小负气压, 这种振动颗粒床不形成“反巴西果”. 由此我们可知, 在尺寸较小或较轻的颗粒中, 振动使颗粒体流化时形成的负气压梯度作用在大球上, 驱动大球向下运动, 产生了“反巴西果”效应.

大球在垂直振动颗粒床中受力运动情况可作如下分析. 大球受到的力包括: 向下重力  $f_g$ , 颗粒床振动向上惯性力  $f_i$ , 负气压梯度作用力  $f_p$ , 以及运动时颗粒阻力  $f_d$ . 显然, 当  $\chi > \chi_c$  时, 大球在振动颗粒床中受到向上的作用为  $f_i - (f_g + f_p + f_d)$ , 使大球上

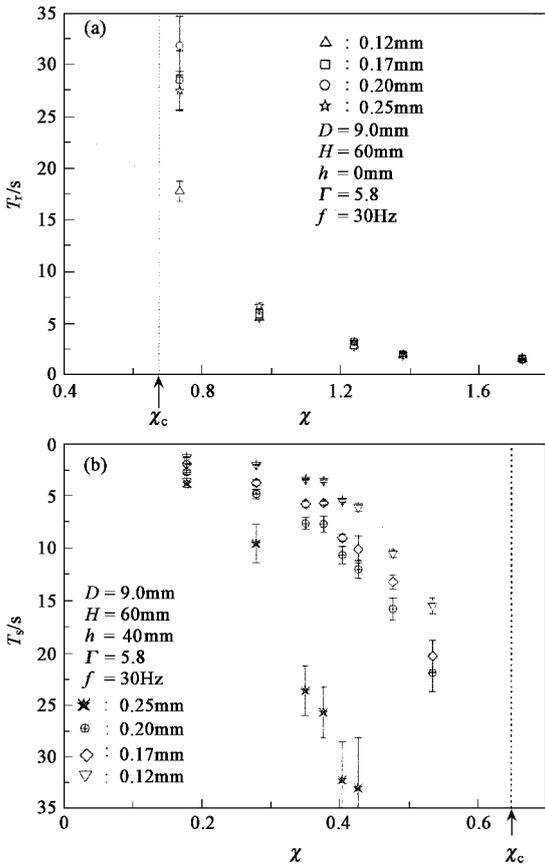


图2 当  $\Gamma = 5.8$  时, 大球在不同尺寸颗粒中的上升时间( a )下降时间( b )随密度比的变化

升. 当  $\chi < \chi_c$  时, 大球受到向下的作用为  $f_p - (f_i - f_g + f_d)$ , 使大球向下运动. 在  $\chi = \chi_c$  时, 大球受到的合力为 0, 将不会上浮或下沉.

我们将以上结果与液体中的情况相对比, 可知振动颗粒床中物体运动的特点. 物体在液体中上浮

或下沉时间均为  $T \propto a^{-2}(\rho - \rho_c)^{-1}$ , 其中  $a$  为球的半径  $\rho$  和  $\rho_c$  分别为球和液体的密度. 这是由于物体在液体中上升和下降的驱动力是重力和密度差, 来源是相同的. 而在颗粒物质中, 物体(这里为大球)运动时要受到一个向上的“惯性力”和负气压梯度作用力, 这使得颗粒物质中的物体运动行为与在流体中的行为不同.

由我们的实验结果可知, Shinbrot 等人<sup>[6]</sup>观察到了“反漂浮”现象, 而美国芝加哥研究小组却给出了不同结果<sup>[10]</sup>, 是因为 Shinbrot 等人使用的玻璃颗粒直径小到了正好能够出现负气压, 而美国芝加哥研究小组使用的床玻璃颗粒直径较大, 床内部没有负气压存在或负气压不够大的缘故.

至于 Hong 等人<sup>[12]</sup>通过计算机模拟提出, 没有气体存在的条件下仍会出现“反巴西果”现象, 这个问题正确与否, 仍需进一步研究.

### 参 考 文 献

[ 1 ] de Gennes P G. Rev. Mod. Phys. ,1999 71 S374  
 [ 2 ] Kadanoff L P. Rev. Mod. Phys. ,1999 71 #35  
 [ 3 ] Jaeger H, Nagel S. Science ,1992 255 :1523  
 [ 4 ] Jaeger H, Nagel S. Rev. Mod. Phys. ,1996 68 :1259  
 [ 5 ] Williams J C. Powder Technol. ,1976 ,15 :245  
 [ 6 ] Shinbrot T, Muzzio F. Phys. Rev. Lett. ,1998 81 #365  
 [ 7 ] Burtally N, King P J, Swift M R. Science 2002 295 :1877  
 [ 8 ] Shi Q, Yan X, Hou M *et al.* Chinese Science Bulletin 2003 , 48 :627  
 [ 9 ] 姜泽辉, 陆坤权, 厚美瑛等. 物理学报 2003 52 :2244 [ Jiang Z H, Lu K Q, Hou M Y *et al.* Acta Physica Sinica ,2003 52 : 2244( in Chinese )]  
 [ 10 ] Möbius M, Benjamin E, Nagel L S. Nature 2001 414 :270  
 [ 11 ] Yan X, Shi Q, Hou M *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2003 91 : 014302  
 [ 12 ] Hong D, Quinn P, Luding S. Phys. Rev. Lett. ,2001 86 : 3423



### · 物理新闻与动态 ·

## 水平的“巴西果效应” (Horizontal Brazil nut effect)

“巴西果效应”是一种在搅拌粒状混合物时出现的奇异现象, 即在摇动一个充满不同大小的谷物容器时, 在一定条件下, 在容器内会出现大尺寸的谷物颗粒上升到容器的顶部或者下沉到容器的低部. 最近美国德州大学奥斯汀分校的教授 Sung Joon Moon 及其同事在实验和模拟两个方面获得了新的研究成果, 他们发现利用扭结可以在水平方向上出现“巴西果效应”. 当搅拌速度非常高时, 在容器内会存在着扭结, 它将容器内的谷物分成两个区域(或者说两个相). 在扭结一边的谷物将向上运动, 另一边的谷物将向下运动, 而大

颗粒的谷物从两个振荡区内流动出来向扭结处集中. 科学家们可以通过调节趋动力信号来控制扭结在容器内的位置. 这样就能利用移动扭结的位置来达到将容器一侧的大颗粒谷物进行集中收集.

这类水平方向的“巴西果效应”实际上是在扭结处产生了一个非线性的雪崩现象. 这类不稳定的雪崩将在容器内引起对流滚动, 并裹挟着大颗粒的谷物向扭结处集中. 显然这类水平的“巴西坚果效应”具有极大的商用价值, 它将广泛地应用在对不同大小的颗粒混合物进行有效地分离方面.

(云中客 摘自 Physical Review Letters ,26 September 2003)