

颗粒物质“巴西果”分离的影响因素及分离机制概述^{*}

彭亚晶^{1,†} 刘小嵩¹ 甄珍¹ 姜泽辉²

(1 渤海大学物理系 锦州 121000)

(2 哈尔滨工业大学物理系 哈尔滨 150001)

摘要 “巴西果”分离(BNS)是振动颗粒物质的一个主要现象. 近几年来,寻找影响“巴西果”分离的因素及其形成的物理机制受到众多学者的广泛关注. 文章系统地总结了影响“巴西果”分离的各种因素及相关物理模型,指出了各种模型的适用范围及存在的不足. 阐述了目前颗粒物质研究热点及今后需要开展的研究工作的方向.

关键词 颗粒物质,“巴西果”分离,概述

Control factors and mechanisms of Brazil-nut segregation in granular matter

PENG Ya-Jing^{1,†} LIU Xiao-Song¹ ZHEN Zhen¹ JIANG Ze-Hui²

(1 Department of Physics, Bohai University, Jinzhou 121000, China)

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

Abstract Brazil-nut segregation is a marked phenomena of granular matter. Recently, much attention has focused on the factors and physical mechanisms that influence the segregation. This paper summarizes these factors and the various models of Brazil-nut segregation, indicating their application range and limits. Current research areas and future directions are given.

Keywords granular, Brazil-nut segregation, review

1 引言

颗粒物质是指尺寸在 $100\mu\text{m}$ 以上的固体颗粒构成的离散体系. 它广泛存在于自然界中,如沙子、矿石、雪花、谷物等,是最为人们所熟悉的颗粒物质类型之一. 由于颗粒的种类和性质各不相同,在应用过程中,例如在混合、储存过程中,在管道中输送时,会发生分离、堵塞管道等现象,给工农业生产带来了很大的不便. 另外,自然界中很多的自然灾害(如沙尘暴、雪崩、滑坡等)都可以视为颗粒物质的相互作用带来的后果. 因此,研究颗粒物质的特性对经济发展和科技进步有着重要的作用.

不同种类的颗粒混合后,通过振动、旋转、倾倒、流动等方法,都会自发地分离开. 通常大颗粒会浮在小颗粒的上方,称为“巴西果”分离(Brazil-Nut Seg-

regation,简称为 BNS)^[1]. “巴西果”分离是颗粒物质的一个主要现象. 近几年来,寻找影响“巴西果”分离的因素及其形成的物理机制受到众多学者的广泛关注. 人们通过计算机模拟和实验对分离机制进行了大量研究^[2-4]. “巴西果”分离过程取决于物理条件的细微变化. 在这些物理条件中,颗粒的尺寸、颗粒的密度、振动加速度和振动频率是最主要的因素. 其他特性,如颗粒间的摩擦、碰撞及系统的边界条件等也会影响“巴西果”分离过程. 本文着重对影响“巴西果”分离的因素及相关物理模型以及各模型的适用范围和存在的不足进行系统的概述,并阐明颗粒物质当前的研究热点和今后的工作方向.

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10974038)资助项目

2011-03-07 收到

[†] 通讯联系人. Email: pengyajing@126.com

2 影响“巴西果”分离的因素

2.1 尺寸效应

在振动系统的环境中,最早对“巴西果”分离做出解释的是 Brown^[5]. 他最先总结了振动对煤块的影响. 当运煤结束后,发现大煤块总是在上面. 他指出:之所以会出现这种现象,是因为在振动过程中,大块物体比小块物体有更多的振动自由度,所以即使大块物体的密度比小块物体的密度大,它也会被振动到上面去.

几十年后,Williams^[6]做了一系列的实验,指出了颗粒尺寸是引起分离的最重要因素. 他做了一个模拟实验,把一个大颗粒和一些小珠子放在一个矩形容器里,此被称为闯入模型系统(intruder model system),如图 1 所示. 此系统是两种颗粒等体积混合后的一种简化,其中忽略了大颗粒之间的相互作用. 当系统得到适度的振动时,大颗粒就会上升. 对此,Williams 解释为:当上下振动时,容器底部的小颗粒静止不动,而容器边缘和上部的小颗粒上下振动碰撞大颗粒使其像齿轮似的向上移动.

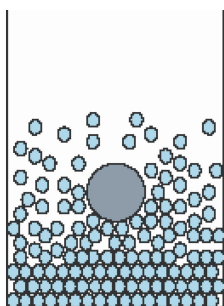


图 1 闯入模型系统^[6]

后来 Rosato 等人^[7]开展了理论研究,从几何角度对闯入模型系统中的“巴西果”分离进行了阐释. 他们用 Monte Carlo 模拟技术阐明了局部几何填充机制能导致尺寸分离. 当颗粒在其周围上下振动时,颗粒间就会出现空隙,这些空隙也是上下振动的结果. 在向上振动的过程中,颗粒获得动能而飞离开底部边界,这时空隙就会出现. 在重力作用下,由于小颗粒的尺寸小,它填充空隙的可能性比大颗粒要大得多,所以大颗粒无法落回原处. 这样,每填充一次,大颗粒都会平均上移一点,最后上升到小颗粒床的顶部.

随后, Ahmad 和 Smalley^[8]在尺寸分离的研究中得出结论:大颗粒的尺寸越大,“巴西果”分离得越快.

2.2 密度效应

密度是影响“巴西果”分离的另一个重要因素.

Shishodia 和 Wassgren^[9]通过实验得出在振动流化状态下,大颗粒在颗粒床中的平均高度随大小颗粒密度比(0.6—0.75 范围内)的增加而近似线性地减小. Ohtsuki^[10]对此状态进行了分子动力学的模拟分析,结果表明,当密度比超过 1 时,大颗粒就会由于受重力而下沉到容器底部.

Liffman 等人^[11]利用近二维的系统研究了浓密的颗粒系统(没有对流形成)中密度对“巴西果”分离的影响. 他们把大的空心的钢盘和小的玻璃颗粒混合在一起,通过向钢盘中填充不同密度的物质而改变它本身的重量及其与玻璃颗粒的密度比,得出了钢盘上升时间随大、小颗粒密度比的增加而减小,如图 2 所示. 对此,他们提出了一个与尺寸、密度相关的上升模型,即容器每受振一次,大颗粒都要穿过小颗粒床一段位移,最后由于受到阻力的作用而静止下来. 在大颗粒向上运动的过程中,要产生贯穿到颗粒床表面的楔形力链. 通过考虑楔形几何关系和两种颗粒的密度,得出大颗粒上升时间与密度比 r_ρ 近似成平方根反比的关系:

$$T_r = \frac{F}{\Gamma d_1} \sqrt{\frac{1}{r_\rho d_s}}, \quad (1)$$

式中 F 为与摩擦力、物质参数和初始时刻大颗粒在颗粒床中的深度有关的函数, d_1 和 d_s 分别为大、小颗粒的直径, r_ρ 为大颗粒与小颗粒的密度之比. 此式表明,大颗粒从底部上升到表面的时间和大颗粒的直径成反比,和大、小颗粒的密度比平方根成反比关系. 按照 Liffman 的平方反比关系,大颗粒上升时间会一直随密度比的增加而减小. 显然,这与 Shishodia 的流化状态下的结论是相矛盾的. Rippie^[12]等人对两种颗粒混合系统进行了实验研究,结果也不支持 Liffman 的这一结论. 他们得出分离率会随着小颗粒的密度的增加而增大. 对上述矛盾, Rippie 认为是由于二者所采用的研究体系不同而引起的. 然而,两种颗粒的密度比对尺寸分离效应的影响并不是绝对的,还要看其他因素的影响. Shinbrot 等人^[13]通过实验表明,当大颗粒的密度较小时,颗粒间空隙中空气的作用就会变得较为重要. 他们发现,当大颗粒的密度比周围颗粒的密度大时,大颗粒就会下沉到容器的底部,称为“反巴西果”分离(RBNS). 对此,他们指出,这是空气的反浮力效应和惯性效应共同作用的结果. 对于相同尺寸的大颗粒,密度小则惯性就小,以致在振动过程中受上面小颗粒的碰撞和空气压力作用的大颗粒很容易上下振动,因而在它下面较难出现稳定的空隙,致使小颗

粒无法向下填充,因而大颗粒就要下沉.

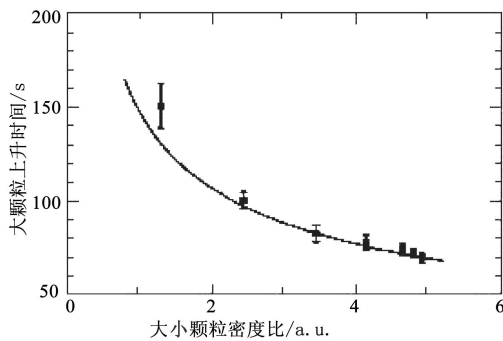


图2 大颗粒上升时间随大小颗粒密度比的变化关系^[11](图中曲线表示上升时间随密度比增加成平方反比关系减小)

后来 Akiyama^[14]发现,当振动的强度足够强以致在循环振动中能把整个颗粒床向上抬起来时,较重的颗粒就会向上运动,最终形成反密度分离,这是密度大导致惯性大的结果.

2.3 边界摩擦和非弹性碰撞效应

人们很早就发现,对流是存在于振动的颗粒物质中的一种现象,并用它来解释“巴西果”分离.然而,边界摩擦是形成对流的重要因素.颗粒之间的摩擦力和颗粒与边界器壁之间的摩擦力的大小不同会导致颗粒体系中的对流方向的不同,从而导致大颗粒的运动方向也不相同^[15].图3说明了边界摩擦对对流的影响.图3中的容器壁右侧有很细的水平条纹,它的存在增大了颗粒与边界之间的摩擦力,容器左侧壁是光滑的.显然,摩擦力增强了对流效应.然而,在有摩擦存在的情况下,用尺寸比为4.8的铅球做实验,却没有观察到分离现象^[16].这是因为铅球具有相当低的碰撞恢复系数,使颗粒之间在发生非弹性碰撞后无法得到足够的能量发生相对位移,从而抑制了分离.

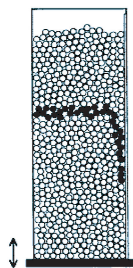


图3 边界摩擦对对流的影响^[15]

2.4 间隙空气效应

间隙空气对大颗粒的运动有显著的影响.大颗粒的密度越小,间隙空气的作用就越加明显^[17].Yan等人^[18]的实验表明:在竖直振动闯入模型系统中,在没有间隙空气存在的情况下(真空),大颗粒总是上升到颗粒表面;在间隙空气存在的条件下,大颗粒

可以上升,也可以下沉,这要取决于大小颗粒间的密度比和尺寸比.图4表明,在间隙空气存在条件下,大小颗粒密度比存在一个临界值 χ_c ,当密度比 χ 大于此临界值 χ_c 时,会出现大颗粒向上运动的“巴西果”分离;如果密度比小于此临界值,则会出现大颗粒向下运动的“反巴西果”分离,大颗粒下沉时间随密度比的增加而减小.实验中,他们用图4所示的U形管测量了颗粒床中的气压变化,结果如图5所示.图5表明,颗粒床中的空气压力随距离颗粒床表面深度的增加而减小,并随加速度的增加而减小.他们还指出:只有尺寸足够小($d < 0.5\text{mm}$)的颗粒系统才易形成RBNS,如果小颗粒的尺寸或密度较大,它们运动的速度较慢,导致能量转移较慢,就不容易分离.这种负梯度分布的气压要对大颗粒产生向下的压力作用,大颗粒在重力、气体压力、惯性力(向上振动引起的)、向上托力(小颗粒碰撞引起)共同作用下运动,它上升与否取决于这几个力的合力是否大于零.

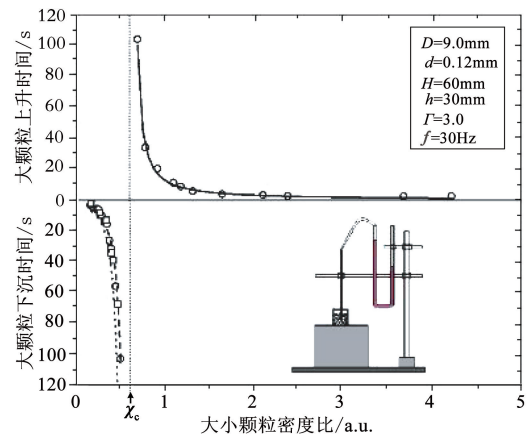


图4 间隙空气对“巴西果”分离的影响^[18](图中 D, d 分别为大、小颗粒的直径, H, h 分别为容器及容器中颗粒床的高度, Γ, f 分别为约化振动加速度和振动频率)

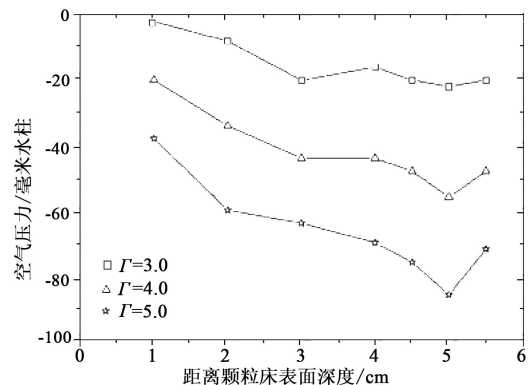


图5 三种振动加速度下(□为 $\Gamma = 3.0$,△为 $\Gamma = 4.0$,☆为 $\Gamma = 5.0$)振动颗粒床中空气压力随距离颗粒床表面深度的变化^[18]

2.5 内聚力效应

颗粒物质的离散特性不是一成不变的^[19]. 当环境湿度较大或把少量的液体添加到颗粒物质中时, 颗粒之间就会形成“液体桥”. 由于液体表面存在张力, 所以颗粒之间会出现一种相互关联的表面张力, 使得颗粒之间不再是离散的, 此力称为内聚力. 内聚力影响振动过程中颗粒之间的相对运动, 反作用于几何填空机制, 阻碍分离. Samadan 等人^[20]通过实验得出添加液体(水)的体积百分数对具有不同尺寸比的颗粒混合物分离的影响, 如图 6 所示. 显然, 添加少量的液体对尺寸比较小的颗粒混合物的分离有较大的抑制作用. 这是因为小颗粒比大颗粒更容易受内聚力的影响. 他们还用甘油代替水, 发现添加液体的粘性越大, 对分离的抑制作用越大. 后来 Li 等人^[21]的实验表明: 水平循环振动湿颗粒物质时会出现从分离到混合的转变. 对于具有一定直径比的颗粒物质, 若添加小部分液体, 则会促进分离, 否则会抑制分离.

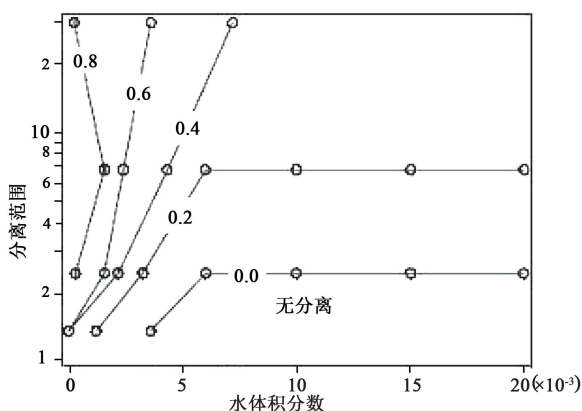


图 6 颗粒物质分离范围随添加水体积分数和大小颗粒尺寸比(0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8)的变化情况^[20], 它表明, 水体积分数较小时, 半径比越小, 颗粒混合物越不易分离

内聚力不仅存在于液体中, 而且存在于固体物质中, 例如振动过程中颗粒物质间彼此存在的静电力以及磁性物质产生的磁力也都属于内聚力. 它们可以使颗粒形成团簇, 阻碍“巴西果”分离^[22].

除了以上几种因素外, 输入颗粒物质系统的振动频率、振动加速度及能量方式等也是“巴西果”分离的重要影响因素. 最近, 姜泽辉等人^[23]发现了一个重要的规律: 在正弦振动颗粒混合物系统中, 颗粒床是成倍周期规律运动的, 亦即按 2 周期、4 周期、混沌状态运动, 接下来是按 3 周期、6 周期、混沌状态运动, 等等. 随后, 我们^[24]进一步探索了倍周期运动对“巴西果”分离的影响, 指出了倍周期运动影响“巴西果”分离的实质是倍周期分岔点的效应. 在倍周期分岔点附近, 倍周期运动相应地减少了大小颗

粒的相对运动次数, 从而延长了大颗粒的上升时间, 抑制了“巴西果”分离. 但这种抑制不起决定作用, 上升时间仍然要随振动加速度的增加而减小. 最近, 姜泽辉等人^[25]对倍周期运动效应做了进一步研究, 结果表明, 在振动足够强、容器内径较小以致出现稳定对流的条件下, 在颗粒物质出现 2 倍、4 倍周期之后, 倍周期运动导致平均对流速度减慢, 进而导致“巴西果”分离速度减慢.

3 “巴西果”分离模型

3.1 几何填空模型

Savage 等人^[26]通过实验指出: 在颗粒数较少的情况下, 每次振动中的颗粒都要重新组合, 进而提出了颗粒物质几何填空分离机制, 如图 7 所示. 图 7 说明, 在受振过程中, 颗粒间会出现空隙, 在颗粒下落过程中, 小颗粒的尺寸小, 它有更大的几率填充在大颗粒下面的空隙中, 导致大颗粒向上移动. 这样, 每填充一次, 大颗粒都会平均上移一点, 最后上升到小颗粒床的顶部, 这就是颗粒物质几何填空分离机制, 这机制被称为几何填空模型.

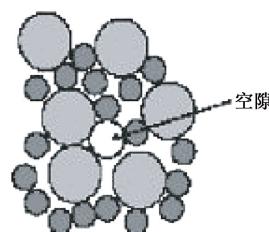


图 7 几何填空模型^[26]

然而, 此模型对于振幅较小和密闭容器中的稠密颗粒体系是不成立的^[16]. 这是因为, 如果振幅太小, 则颗粒间不能产生空隙, 而容器中颗粒太密, 则没有足够的空间形成空隙, 两种情况都不能使颗粒重组, 不会出现几何填空现象. 同时, 此模型对大颗粒有尺寸的限制, 大颗粒的尺寸要足够大, 才能产生一定的空隙, 使小颗粒有一定的填充几率.

3.2 成拱模型

Duran 等人^[27]根据振动系统中大、小颗粒的位置不同, 提出了另外一种几何模型——成拱模型. 他们指出, 大颗粒在小颗粒中是以力拱的稳定结构存在, 如图 8 所示. 大颗粒完全由其中心下方的两个小颗粒支撑, 组成一个拱形, 并且大颗粒的正下方要形成一个空隙. 当大颗粒相对于小颗粒向上移动时, 其周围的小颗粒要重新组合, 填充空隙, 使大颗粒上移. 小颗粒的重新组合区域限定在由边界 $B_1(T)$ 和

B2(T)所组成的三角形区域. 在 B1(T)和 B2(T)以外的区域,颗粒之间仍然是以拱形紧密排列的. 当大颗粒向上运动时,其中心下方的小颗粒要向下填充空隙;当大颗粒回落时,又会遇到一个新的拱形结构阻止它下落,使大颗粒发生向上的位移. 然而,此几何模型有它的局限性. 首先,它假设了边界 B1(T)和 B2(T)的结构在振动过程中不发生变化,并且整个几何结构相对于竖直轴是对称的. 其次,它要求振幅和大、小颗粒的直径比都要较大(超过某一临界值),以保证在振动过程中大颗粒与小颗粒之间出现合适的相对位移,这样大颗粒下方的小颗粒才能进入空隙中阻止它下落. Duran 按照此模型计算得出,在二维空间中,大、小颗粒的临界尺寸比 $\Phi_c^{2D}=12.9$;在三维空间中,临界尺寸比 $\Phi_c^{3D}=2.78$. 随后,在一些近二维的小振幅的实验中也得到了此临界尺寸比,结果与 Duran 的值很接近. 但是,临界尺寸比在很多方面仍然令人困惑^[16]. 例如,如果颗粒间不是紧密排列的,临界尺寸比应如何去计算,是否还存在? 如果放入少数几个大颗粒, Duran 模型中颗粒的有序重组是否还成立? 这些问题目前还不清楚. 更主要的是,在很多尺寸比小于上述临界值的实验和模拟中,仍然可以观察到分离现象.

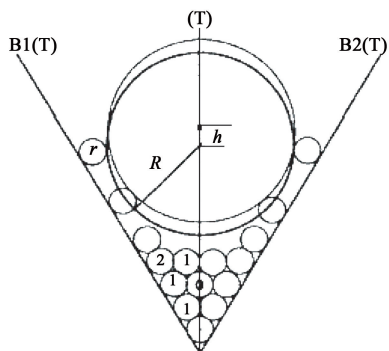


图8 成拱模型^[27](其中 R 为大颗粒的半径, r 代表小颗粒的半径, h 代表大颗粒发生向上的位移, B1(T)和 B2(T)为拱形结构的左右边界)

3.3 能量模型(惯性模型)

Nahmad 等人^[28]提出能量或惯性在“巴西果”分离中也起了较大的作用. 他们在实验中发现,振动颗粒物质的振幅 A 越大,大颗粒上升的位移越大. 对此,他们提出了一个能量模型或惯性模型进行解释:设 $t=0$ 时刻,整个系统(底部的振台、容器、颗粒物质)处在向上运动的最大速度时刻,即速度 $v=A\omega$ (ω 为振动角频率),振动加速度 $a=0$. 当颗粒全部被向上抛离底面时,振动加速度 $a=-g$ 时,所有颗粒都有共同的上抛速度. 颗粒在向上运动过程

中,由于容器壁的摩擦和颗粒之间的相互碰撞,颗粒之间经过压力重组和成拱转化,不久就会再次与容器具有共同的运动加速度. 其中大颗粒也要参与这种变化. 但由于大颗粒质量(惯性)大,向上运动的初始动能较大,所以在几乎相同的阻力作用下,它要比小颗粒多向上运动一段距离. 经过多次振动,大颗粒最终要上升到颗粒床表面.

能量模型的提出给“巴西果”分离机制的研究提供了一个广阔的思路,即从测量上升的大颗粒的运动着手,打破了以往集中测量大颗粒上升时间的思路. 当然,此模型在计算中忽略了大颗粒的势能.

3.4 二维模型

Cooke 等人^[29]研究了颗粒物质在以低加速度做竖直振动时大颗粒的上升情况. 发现当颗粒尺寸比较小及加速度较低时,大颗粒是间歇性地、阶梯式地向上运动,如图9所示. 图中所用的颗粒是一个直径为 14mm 的大钢球和一些直径为 2mm 的小钢珠,约化加速度 $\Gamma=1.17$. 他们用摄像机拍摄和跟踪大颗粒的间歇式上升过程,发现颗粒床内部存在两种运动:一种是大颗粒和其周围的小颗粒一起同速向上运动;另一种是小颗粒之间发生位错, Cooke 把这两种运动称为成批运动和滑移运动. 图10给出了振动过程中小颗粒与大颗粒的相对位置. 此图被旋转了 90° , 使大颗粒从左到右横越纸面运动. 大、小颗粒尺寸比 $\Phi=7$, 约化加速度 $\Gamma=1.32$. 图中的点区域表示正在成批运动的小颗粒,它推动大颗粒一起向上运动,而斜线区域小颗粒相对于大颗粒则要落后,形成滑移平面. 对此,他们提出了一个分离机制:大颗粒向上运动是因为形成了对流,这种对流的驱动力是滑移和成批运动. 大颗粒在对流中与其周围的小颗粒同速上升. 然而,由于滑移和成批运动并不是时刻存在的,所以这种上升不是连续的,而是间歇式的. 因此,大颗粒间歇性的阶梯式的上升是由相对滑移和成批运动的有限频率导致的,它使大颗粒和周围的小颗粒在有限的尺寸跳跃中向上运动. 此模型否定了低加速度情况下没有对流存在以及“巴西果”分离强烈地依赖于几何分离的说法.

3.5 三维模型

Jullien 等人^[30]在闯入模型系统中把振动过程简化为颗粒向上扩张的过程,并且假定每一次振动后,颗粒都达到完全静止的状态. 由此提出在低振动频率和大振幅情况下的三维模型,如图11所示. 图中(a)和(b)分别是一次振动之前和之后的颗粒结构图. 他们指出:在稳定状态下,大颗粒下方会出现一

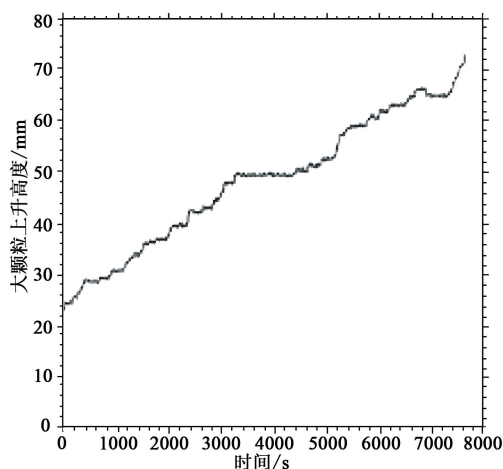


图9 低加速度情况下大颗粒上升高度随时间变化情况^[29],它表明,大颗粒是间歇性地、阶梯式地向上运动

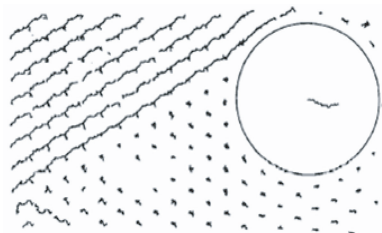


图10 滑移平面和成批运动情况^[29],它表明,大颗粒与周围附近小颗粒成批向上运动,并与其他小颗粒之间出现滑移平面

个和它相切的圆锥形的洞.当向上振动时,由于大颗粒重心下的小颗粒要先于大颗粒重组,所以图11(a)中区域(1)的小颗粒会向下移动到洞中,最终形成图11(b)的形式,从而使大颗粒向上位移 δ .这样反复振动,大颗粒就会不断地上升.

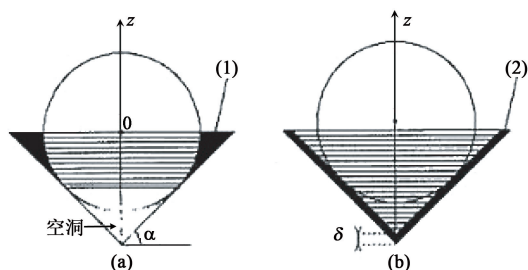


图11 低振动频率和大振幅情况下的三维模型^[30](图中 α 为圆锥形边界与水平面的夹角)

然而,此三维模型忽略了成拱效应和颗粒的集体效应(例如流化).同时,它要求小颗粒的尺寸不能太大,否则存在区域(1)中的颗粒不会很多,就不会产生分离.因此,大小颗粒间的尺寸比要达到一个临界值 Φ_c .是此三维模型的有效条件.通过实验,Jullien等人测出 $\Phi_c \approx 2.8$,即只有尺寸比大于2.8的颗粒混合物才能出现分离.这与Duran等人^[27]利用成拱模型算出三维情况下的临界尺寸比基本相符.

此外,有很多人指出了三维模型的不足之

处^[31]:第一,把每一次振动的开始时刻都认为颗粒处于图11(a)中的静止结构是不合理的,因为大颗粒会破坏那种静止结构;第二,没有考虑和尺寸分离密切相关的振幅,忽略了大量颗粒的集体运动,而集体运动是振动颗粒物质的一个基本特性;第三,把整个过程看作是稳定有序的,忽略了颗粒物质的无序状态,而无序是振动时颗粒物质的重要特征;第四,此模型只把初始时刻的驱动力视为随机的,而在振动过程中却没有引进随机因子,所以会有临界尺寸比 Φ_c 的存在,实际上 Φ_c 是不存在的.

3.6 对流模型

Knight^[15]通过实验得出对流是导致颗粒物质分离的机制.由于摩擦力和间隙空气的存在,在振动中,颗粒物质系统会形成中间区域颗粒向上运动,边缘颗粒向下运动的对流.大颗粒在对流的带动下从中间上升到表面,之后向边缘移动,最终因其尺寸较大,不能进入边缘狭窄的向下运动区域,因而不能下移,从而形成“巴西果”分离.然而,当改变振动加速度或容器的形状时,对流的方向会发生改变,形成“反巴西果”分离,如图12所示.图12(a)表明,在矩形容器中,出现中间区域向上而两边区域向下的对流运动,最终形成“巴西果”分离.图12(b)表示在锥形容器中,出现中间区域向下而两边区域向上的对流运动,最终形成“反巴西果”分离.

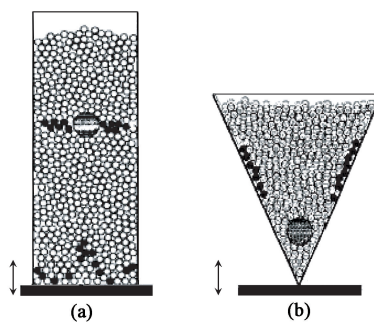


图12 (a)对流导致“巴西果”分离;(b)对流导致“反巴西果”分离^[15].这表明,在不同振动加速度和使用不同容器时,对流导致的分离方式也不相同

3.7 反密度分离模型

通常,振动或旋转尺寸相同、密度不同的两种颗粒混合时,密度大的颗粒会下移到底部,这是因为在重力的作用下它向下运动的动量较大.然而,Akiyama等人^[14]发现,当振动的强度足够大以致在循环振动中能把整个颗粒床提升起来时,密度大的颗粒会向上运动,最终形成密度大的颗粒在上面而密度小的颗粒在下面的反密度分离.对此,他们解释为:颗粒的动量与其质量成正比.当颗粒被提升离开

底面时,密度大的颗粒动量大,因而在几乎相同阻力作用下,其向上运动的位移大.

反密度分离与颗粒的尺寸无关,它主要依赖于颗粒床的高度与容器直径之比,这意味着颗粒床的适度流化是其分离的关键.

3.8 渗漏和凝聚的竞争

Hong 等人^[32]提出,不同的颗粒物质在不同的温度范围内具有不同的存在状态.颗粒物质在流化态与凝聚态之间有一临界温度值 T_c ,它与颗粒物质的直径和质量有关.当该系统的温度在两种物质的临界温度之间时,一种物质处于流化状态,另外一种处于凝聚状态.流动的颗粒要在凝聚的颗粒之间发生填充,这被称为渗漏效应.这种渗漏效应与凝聚效应之间的竞争决定了分离效果.图 13(a)为渗漏效应大于凝聚效应的“巴西果”分离.此外,他们指出,当改变颗粒物质的直径和质量时,会出现“巴西果”分离与“反巴西果”分离之间的转化,并计算出两种分离模式转化的分界线与大、小颗粒质量比、尺寸比和空间的维数有关,即近似满足 $y = x^{1/(D-1)}$, x 表示大、小颗粒质量比, y 表示大、小颗粒直径比, D 为空间维数.图 13(b)表明在二维空间系统中,“巴西果”分离和“反巴西果”分离转化分界线为一曲线.

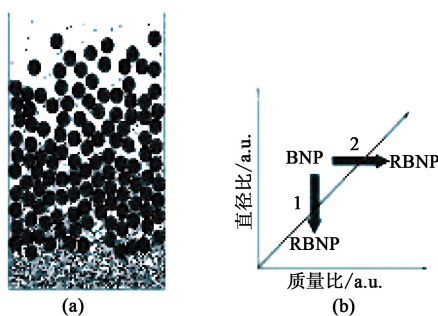


图 13 (a) 渗漏效应大于凝聚效应导致“巴西果”分离; (b) 二维空间系统中分离转化图^[32] (图中 BNP 表示“巴西果”效应, RBNP 表示“反巴西果”效应)

与前几个模型相比,这种模型对颗粒的尺寸、密度和填充高度等都没有限制,适用的范围比较广泛.然而,Canul-Chay 等人^[33]对此模型提出了质疑,认为此模型中把颗粒物质的温度视为相同,实际上颗粒床中存在着垂直方向的温度梯度,而所有的温度都包含在两种颗粒物质的临界温度之间.此外,两种颗粒物质之间会发生相互碰撞,流化的颗粒要对凝聚的颗粒施加拉力的作用,而此模型对此却未给予考虑.

3.9 动态循环分离模型

2008 年,北京理工大学的梁宣文等人^[34]发现了

一种新的随时间周期变化的分离形态,即在一定振动频率和振动加速度作用下,“巴西果”、“反巴西果”和“三明治”这几种分层构型之间出现动态的循环反转.图 14 给出了在一定振动频率 f 和加速度 T 范围内,两种颗粒物质混合物的空间分层情况.图中 C 区代表三种分离结构出现动态循环,即“巴西果”分离—“三明治”分离(或“反巴西果”分离)—“巴西果”分离,依次循环往复. D 区为向混合区过渡的另一种动态循环,表现为部分“巴西果”、部分“反巴西果”和部分“三明治”分离状态的动态循环反转.区域 A, B 分别表示颗粒静止态和“巴西果”分离状态.区域 E, F 表示颗粒物质处于混合态和强烈流化态.

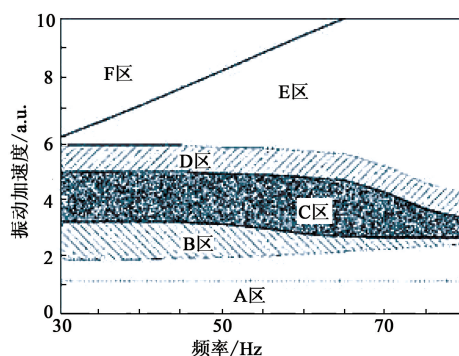


图 14 空间分层相图^[34]

2010 年, Liu 等人^[35]的研究发现,在气流和振动的共同作用下,闯入模型系统“巴西果”分离向“反巴西果”分离转化存在着过渡区.该过渡区有着特殊的颗粒分布形式和规律,即“巴西果”分离—不稳定“反巴西果”分离—稳定“反巴西果”分离.随着气流速率的增大,颗粒物质的分离速率存在一极值点,该极值点所对应的气流速度值不受振动参数以及大颗粒尺寸的影响.这一研究成果对颗粒物质的认识提出了新的研究视角和方法.

实际上,颗粒物质的各种分离及分离方式之间的转化和过渡情况不仅与外加的振动条件(如振动方式、振动频率和加速度等)有关,而且还与所研究对象体系(如颗粒密度、尺寸等)有着密切的关系.因此,一些实验现象和相应的理论模型,如 Hong 等人和 Liu 等人的“巴西果”分离向“反巴西果”分离的过渡和梁宣文等人的三种基本分离形式的转换规律等,都有其成立条件和各自的适用范围.

4 结论

本文对“巴西果”分离的影响因素及相关分离模型做了系统的概述.颗粒物质的分离不仅和物质本身

性质(如尺寸、密度、磁性等)有密切的关系,而且系统内部间隙空气、摩擦力和外界振动模式对“巴西果”分离也有重要的影响,其中尺寸在“巴西果”分离中是起积极作用的主要因素。多年来,很多学者对上述这些因素进行了细致的研究,并对闯入模型系统和两种颗粒混合系统提出了多种物理模型去解释“巴西果”分离机制,但这些模型仍有其适用范围和不足之处。

尽管大量的研究发现了许多颗粒物质分离的特殊现象,并指出了影响分离的因素及提出了相关理论模型,但在揭示颗粒物质分离机制方面至今尚无能被普遍接受的解释。因此,颗粒物质的分离机制还有待更进一步的研究。目前,多数实验集中在改变振动条件,如应用非封闭的振动床,采用非线性(圆形或椭圆形)振动方式等,以期发现新的分离方式和规律。理论研究集中在发展新的理论、模型和方法,探求颗粒物质各种分离机制。最近,“巴西果”分离、“反巴西果”分离及“三明治”分离三种基本分离方式的相互转化条件及机理成为颗粒物质方面研究的热点。需要指出的是,目前大部分研究成果都是建立在具有均一尺寸的球形颗粒基础上,而实际颗粒形状并不是理想球形的,并且集体颗粒还存在着一定的尺寸分布。虽然,考虑这两种因素将会给实验数据分析和理论模拟带来很大的困难,但有些研究者^[36]已开始利用实验结合计算机模拟方法向此方向进军,期望获得重要进展。

参考文献

- [1] Breu A P J, Ensner H M, Kruelle C A *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2003, 90(1):014302
- [2] 朱纪跃,张攀,周又和. 兰州大学学报, 2009, 45(6):104 [Zhu J Y, Zhang P, Zhou Y H. Journal of Lanzhou University, 2009, 45(6):104(in Chinese)]
- [3] 姜泽辉,陆坤权,厚美瑛等. 物理学报, 2003, 52(9):2244 [Jiang Z H, Lu K Q, Hou M Y *et al.* Acta Physica Sinica, 2003, 52(9):2244(in Chinese)]
- [4] Zheng X J, Xie L, Zhou Y H. Journal of Geophysical Research, 2006, 111(D11):D11109. 1
- [5] Brown R L. J. Inst. Fuel. 1939, 13:15
- [6] Williams J C. Fuel Soc. J. 1963, 14:29
- [7] Rosoto A, Strandburg K J, Prinz F *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1987, 58(10):1038
- [8] Ahmad K, Smalley I J. Powder Technol. , 1973, 8(3):69
- [9] Shishodia N, Wassgren C R. Phys. Rev. Lett. , 2001, 87(8):84302
- [10] Ohtsuki T, Kinoshita D, Takemoto Y *et al.* J. Phys. Soc. Japan. , 1995, 64:430
- [11] Liffman K, Muniandy K, Rhodes M *et al.* Granular Matter, 2001, 3(3):205
- [12] Rippie E G, Olsen J L, Faiman M D. J. Pharmaceut. Sci. , 1964, 53:1360
- [13] Shinbrot T, Muzzio F J. Phys. Rev. Lett. , 1998, 81(20):4365
- [14] Akiyama T, Kimura M, Tanimura H *et al.* Advanced Powder Technol. , 2001, 12(1):105
- [15] Knight J B, Jaeger H M, Nagel S R. Phys. Rev. Lett. , 1993, 70(24):3728
- [16] Kudrolli A. Rep. Prog. Phys. , 2004, 67:236
- [17] Mobius M E, Lauderdale B E, Nagel S R *et al.* Nature. 2001, 414:270
- [18] Yan X, Shi Q, Hou M *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2003, 91:01430
- [19] Williams J C. Powder Technol. , 1976, 15:228
- [20] Samadani A, Kudrolli A. Phys. Rev. Lett. , 2000, 85(24):5102
- [21] Li H M, McCarthy J J. Phys. Rev. Lett. , 2003, 90(18):184301
- [22] Blair D L, Kudrolli A. Phys. Rev. E, 2003, 67(24):021302
- [23] 姜泽辉,李斌,赵海发等. 物理学报, 2005, 54(3):1273 [Jiang Z H, Li B, Zhao H F *et al.* Acta Physica Sinica, 2005, 54(3):1273(in Chinese)]
- [24] 彭亚晶. 振动颗粒物质‘巴西果’分离的研究. 硕士论文, 哈尔滨工业大学 [Peng Y J. The research on Brazil Nut segregation in vibrated granular matter. Master Thesis, Harbin Institute of Technology(in Chinese)]
- [25] 姜泽辉,邢亚芳,赵海发等. 物理学报, 2009, 58(9):5923 [Jiang Z H, Xing Y F, Zhao H F *et al.* Acta Physica Sinica, 2009, 58(9):5923(in Chinese)]
- [26] Savage S, Lun C K K. J. Fluid Mech. , 1988, 189:311
- [27] Duran J, Rajchenbach J, Clement E. Phys. Rev. Lett. , 1993, 70(16):2431
- [28] Nahmad-Molinari Y, Canul-Chay G, Ruiz-Sua' rez J C. Phys. Rev. E, 2003, 68(8):041301(1)
- [29] Cooke W, Warr S, Huntley J M *et al.* Phys. Rev. E, 1996, 53(3):2812
- [30] Jullien R, Meakin P. Phys. Rev. Lett. , 1992, 69(4):640
- [31] Barker G C, Mehta A, Grimson M J. Phys. Rev. Lett. , 1993, 70(14):2194
- [32] Hong D C, Quinn P V, Stefan L. Phys. Rev. Lett. , 2001, 86(15):3423
- [33] Canul-Chay G A, Belmont P A, Nahmad-Molinari Y *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2002, 89(9):189601
- [34] 梁宣文,李粮生,侯兆国等. 物理学报, 2008, 7(4):2300 [Liang X W, Li L S, Hou Z G *et al.* Acta Physica Sinica, 2008, 7(4):2300(in Chinese)]
- [35] Liu C P, Wang L, Wu P *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2010, 104(185):188001
- [36] Caulkin R, Jia X, Fairweather M *et al.* Phys. Rev. E, 2010, 81:051302