

振动颗粒物质“巴西果”分离效应实验和理论研究

彭亚晶[†] 张卓 王勇 刘小嵩

(渤海大学物理系, 锦州 121000)

(2011年7月1日收到; 2011年11月24日收到修改稿)

本文通过实验和理论研究了影响“巴西果”分离的因素及其物理机理. 分析了振动加速度、大小颗粒尺寸和密度对分离时间的影响, 并利用流体模型对分离时间作估算, 对实验结果进行定性解释. 结果表明在振动频率固定时, 调节振动加速度是控制“巴西果”分离的一个主要手段. 振动加速度存在一个临界值, 当高于此临界值时, “巴西果”分离的主要物理机理由对流机理转变为几何填充机理, 且振动加速度对分离影响变小, 大颗粒尺寸对分离的影响增大. 可通过调节大颗粒的尺寸来改变分离效果. 当大、小颗粒密度比为1时, 仍会出现“巴西果”分离现象. 增大小颗粒尺寸或密度可以促进“巴西果”分离.

关键词: 颗粒物质, “巴西果”分离, 分离时间, 分离机理

PACS: 45.70.-n, 45.70.Mg

1 引言

颗粒物质是离散固体颗粒的集合体, 它广泛存在于自然界中, 如粮食、煤矿等^[1]. 颗粒物质的振动行为在工业、农业、药业生产上具有重要的应用, 如选矿、材料分离、药品制备等^[2]. 最近, 人们试图努力理解振动或旋转过程中颗粒物质的尺寸分离, 并通过改变操控参数和其他影响因素来增加或减小分离. 但到目前为止, 仍然没有掌握对分离效应的调控方法, 和对分离机理也缺乏进一步定性理解^[3].

通常情况下, 较大的颗粒会在振动过程中移动到较小颗粒的上部, 这种分层现象称为“巴西果”分离^[4,5]. “巴西果”分离是振动颗粒混合物的一个主要现象, 寻找影响“巴西果”分离的因素及其形成的物理机理受到众多学者的广泛关注. 影响颗粒物质分离的因素较多, 如外界驱动参数(加速度、频率), 颗粒物质的性质(如形状、密度和尺寸), 间隙空气, 颗粒层数, 容器边界条件, 容器内部摩擦等^[6-10]. 目前, 大量的实验和模拟用来研究“巴西果”分离现象, 分离也被归因于各种物理机理, 如几何填充(或渗漏)、对流、拱的形成、凝聚以及间

隙空气浮力与几何力之间的竞争等. 其中, 几何填充和对流是解释垂直振动系统分离比较普遍的物理机理^[11-13]. 几何填充指由于粒子尺寸不同, 较小粒子很容易通过空隙下落到大粒子的下方. 当振动颗粒物质时, 颗粒床从密集态转变到稀疏态^[14], 在床膨胀过程中, 粒子间形成较大空隙引起粒子填充, 而小粒子更容易通过空隙渗漏到大颗粒的下方, 导致大颗粒朝着表面向上运动形成“巴西果”分离现象^[15,16]. 对流指整个颗粒床在振动过程中出现中间较宽区域向上运动, 边缘较窄区域向下运动^[17]. 在对流作用下, 大粒子随中间区域向上运动到颗粒床顶部, 然后因尺寸较大不能沿边缘向下运动到底部而出现“巴西果”分离.

分离是由振动引起的, 振动的方式(垂直振动或水平振动)和条件(振动加速度、频率、振幅)对分离现象起着决定性的作用. Vanel等^[18]研究了振动频率对分离的影响, 表明了在不同频率范围, 颗粒床展现的运动情况是不同的, 如在低频, 颗粒床出现成堆现象; 在中间频率, 内部流动仍然存在, 但是没有成堆出现; 在高频, 几乎出现高度无序的状态. Schroter等^[19]研究了振幅效应, 表明在低振幅处, 会出现较大粒子上升到表面的“巴西果”分离, 在大振幅处, 则会出现小颗粒上升到表面的“反

[†] E-mail: pengyajing@126.com

巴西果”分离. Cooke 等^[20]研究表明,在低尺寸比例、低加速度情况下,颗粒的分离仍然是由于对流引起,对流使大颗粒和其周围的小颗粒以同样的速度上升,但是这种上升不是连续的,而是间歇性的阶梯式上升. Duran 等^[21]提出尺寸分离要求大、小颗粒的尺寸比大于临界值 2.8. 然而此临界值的得出存在着较多异议^[22],例如,若颗粒间不是紧密排列或者大颗粒不是一个, Duran 模型中颗粒的有序重组是否成立,该临界尺寸比应如何计算. 况且,在很多尺寸比小于 2.8 的实验和模拟中,仍然可以观察到尺寸分离. 此外,间隙空气和颗粒床的层厚对分离形式也有着重要的作用. Yan 等^[9]表明,当颗粒物质处于流化状态时,间隙空气还可能形成负气压梯度使大颗粒向下运动,产生“反巴西果”效应. Jiang 等^[10]表明,颗粒床厚度对其运动模式有较强的影响,但关于层厚对分离效应的影响还需做进一步细致的讨论. 可见,尽管先前的研究已经揭示了重要发现,但由于颗粒物质分离过程的复杂性,使人们对引起尺寸分离的物理机理及控制分离的主要条件因素的认识还不完善,例如,调节哪个影响因素在什么范围内,哪个机理对分离起主导作用等. 因此,有必要通过实验或模拟对颗粒物质分离特性做进一步的研究.

为了揭示“巴西果”分离的主要物理机理及与其相应的调控因素参数范围,本文通过实验和理论对“巴西果”分离过程进行了系统的研究,考察了振动加速度,大、小颗粒的尺寸和密度对分离时间的影响,并利用流体模型对分离时间作近似计算,对实验结果给出了定性的解释. 结果表明:在频率一定条件下,调控“巴西果”分离的主要因素是约化振动加速度 Γ ,当 Γ 小于某一临界值时,对流机理对分离起主要作用;当 Γ 大于此临界值时,几何填充机理对分离起主要作用. 并且,一些因素对分离的影响程度也会随着 Γ 超过此临界值而发生改变,即大颗粒的尺寸对分离影响变大,加速度对分离的影响变小. 在一定范围内增加小颗粒尺寸或密度会促进“巴西果”分离. 当大、小颗粒密度比为 1 时,仍会出现“巴西果”分离现象.

2 实验

实验装置如图 1 所示,信号发生器发出的正弦信号,经功率放大器放大并输入到激振器的振动平台上,连接一个内径为 39.2 mm 的玻璃容器,容器

底是用铝合金做的以减少静电分离. 颗粒装在玻璃容器里. 振动台上有一个加速度传感器,它与加速度测量计相连测量振动加速度. 填加颗粒物质的质量用精度为 0.05 mg 的托盘天平称量. 填加的高度用一个毫米精度的游标卡尺测量.

实验采用闯入模型系统. 选用四个大小不同的陶瓷大颗粒,直径分别为 3.5 mm, 6.3 mm, 9.51 mm, 12.69 mm. 床颗粒也有四种,分别是直径为 0.5—0.6 mm 陶瓷颗粒, 0.5—0.6 mm 玻璃颗粒, 0.8—1.0 mm 陶瓷颗粒, 0.8—1.0 mm 玻璃颗粒. 陶瓷颗粒和玻璃颗粒的密度分别为 $2.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 和 $2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. 每个大颗粒分别放入四个不同的颗粒床中进行实验,先把大颗粒放入容器的底部中间位置,再倒入小颗粒,每一次都保持颗粒床的高度 $H = 45.6 \text{ mm}$,振动频率保持 $f = 60 \text{ Hz}$ 不变. 信号发生器的电压从 0.7 V 开始增加,中间间隔为 0.1 V,从 1.0 V 开始记录. 每一个电压对应于一个约化的振动加速度 $\Gamma = 4\pi^2 Af^2/g$ 值,其中 A 是振幅, f 是振动频率, g 为重力加速度. 用秒表记录每一个 Γ 下大颗粒从底部到露出颗粒床表面所用的时间,每一个时间重复测量 5 次,最后得出的数据为 5 次测量的平均值. 实验中,用加湿器加湿空气以减少静电,采集数据前要预热仪器 10 分钟左右以减小因仪器内部的稳定性导致的误差.

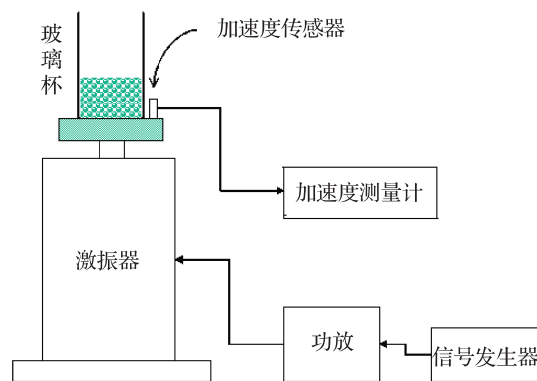


图 1 测量大粒子上升时间的实验装置图激振器

3 实验结果与讨论

3.1 振动加速度对分离的影响

通过实验我们分别做出了四个大颗粒在同一个颗粒床中的上升时间 t 与加速度 Γ 的关系曲线,如图 2 所示. 从图中可以看出,大颗粒上升时间随着振动加速度的增大而呈减小趋势. 当 Γ 低于某

个临界值时, 大颗粒上升时间随 Γ 的变化比较敏感 (图中左边较陡部分), 即 Γ 增加一个小量, 上升时间却减小得很大. 当 Γ 高于此值时, 大颗粒上升时间随 Γ 的变化较缓和 (图中右边较平部分), 但总体上是在逐渐减小. 通过对实验现象的观察分析, 我们得出此结果是由于在不同振动强度范围, 颗粒物质内部的运动状态不同, 导致各因素对“巴西果”分离的影响程度和主要物理机理也不相同. 实验中, 我们能清楚的观察到, 在 Γ 较小时 (信号源电压约 0.7 V, 相应的加速度值约 1.4), 颗粒在其位置附近做微小的颤动, 容器边缘颗粒在向下移动的过程中在任意高度处偶尔进入容器的内部, 颗粒床表面出现成堆现象. 当 Γ 逐渐增大到 1.9 左右 (此时信号源电压大约 0.9 V), 颗粒的运动加快, 明显可见边缘颗粒沿着器壁向下运动. 当 Γ 继续增大到 3 左右 (信号源电压在 1.6 V 左右), 成堆现象消失, 颗粒运动较剧烈, 颗粒物质内部比较松散, 但仍然有对流存在. 再增大 Γ , 明显可见整个颗粒体系被抛离底面, 颗粒变得沸腾起来.

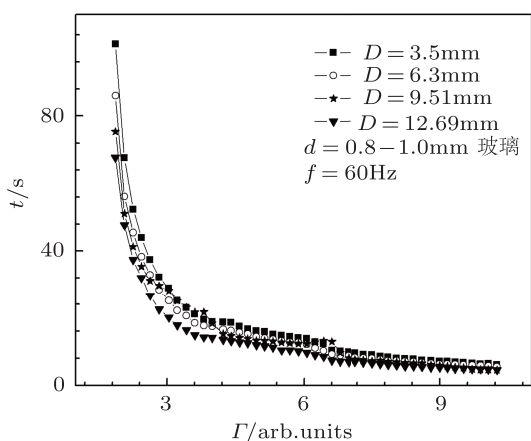


图2 大颗粒上升时间随振动加速度变化曲线

在振动过程中, 由于器壁的摩擦和间隙空气的存在, 要形成对流, 我们所观察到的边缘颗粒偶尔进入容器内部现象已在 Cooke 的二维模型^[20]中被认为是导致滑移和成批运动的原因, 也是导致对流的原因. 同时, 我们观察到的成堆现象也是由对流的相对旋转产生的, 颗粒之间彼此相互接触并以力拱的形式相互作用^[23]. 因此, 在较低振动加速度范围, 对流对分离起主要的作用, 大颗粒在对流的带动下上升到颗粒床表面, 加速度的增加对对流的增加有直接的影响. 所以, 加速度对上升时间的影响较大; 而在较高振动加速度范围内, 虽然也存在对

流, 但加速度的强度使颗粒的运动加快, 颗粒之间变得松散, 出现空隙, 成堆所需要的支持力消失, 颗粒要填充空隙. 此时, 几何填空机理对分离起主要的作用, 加速度的增加在增大了颗粒的填空次数的同时也增大了空隙. 因此, 加速度对大颗粒上升的时间影响变小. 大颗粒上升时间随 Γ 的这种变化在其他颗粒床中也都可以观察到, 如图 3 所示, 此为 $d = 0.5-0.6$ mm 陶瓷床的 $\Gamma-t$ 曲线图. 可见, 这种变化规律是与颗粒的性质无关的, 具有普遍性.

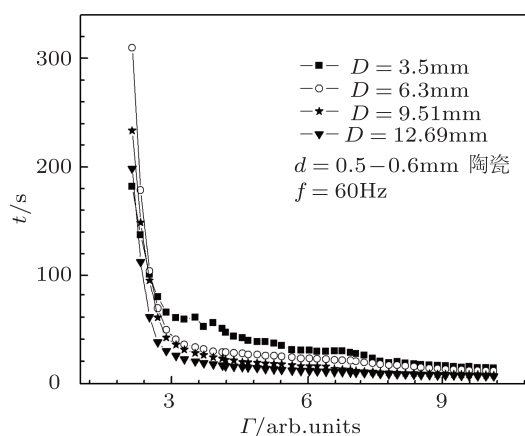


图3 振动加速度对大粒子上升时间的影响

因此, 在频率一定时 ($f = 60$ Hz), 振动加速度是控制“巴西果”分离的主要因素. 在低加速度范围, 对流是导致分离的主要机理; 在高加速度范围, 几何填空是导致分离的主要机理. Clement^[24]等人也表明, 在高振动加速度处, 几何填空机理导致不同尺寸颗粒间发生“棘轮效应”或“渗漏效应”, 从而形成“巴西果”分离. 而在低振动加速度处, 导致分离的是颗粒和器壁间的摩擦引起的对流^[25,20]. Vanel 等人^[18]通过实验也表明当振动频率 $f = 40-75$ Hz, 振动加速度 $\Gamma \approx 4$ 时, 并无对流存在, 几何填空机理起主要作用.

实际上, 当振动强度较大时, 颗粒间松散出现间隙, 间隙空气对分离也要产生一定的影响. 但对于我们所研究的较大尺寸的床颗粒来说 (≥ 0.5 mm), 间隙空气产生的负气压梯度并不显著, 可以忽略^[8,9]. 间隙空气只对粒子运动起到摩擦阻力的作用.

当然, 本实验结论是建立在小颗粒床层数足够大 (约大于 10 层) 的基础上的. 因为颗粒物质的运动模式强烈地依赖于颗粒床层厚和振动加速度^[8,24]. 若颗粒床层数较小, 则在较低振动强度下

会出现“颗粒气体”现象,即颗粒处于完全流化状态^[26].只有小颗粒层数足够大,颗粒床内部才会出现聚集态,进而有表面成堆、对流等现象产生^[10].

为了寻找 Γ - t 曲线所遵循的规律,我们对每一条曲线进行了计算机拟合,绝大部分曲线都近似符合同一个拟合方程.以 $D = 6.3 \text{ mm}$, $d = 0.8\text{—}1.0 \text{ mm}$ 的玻璃颗粒床为例,如图 4 所示.

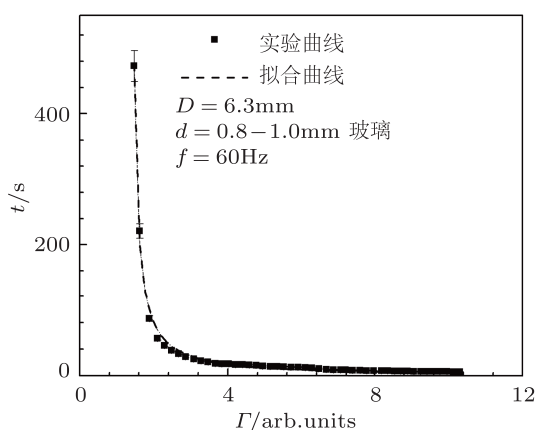


图 4 Γ - t 曲线的拟合. 黑方形为实验测量曲线, 虚线为计算机拟合曲线

图中, 黑方形代表实验测量曲线, 虚线代表计算机拟合曲线. Γ - t 曲线的拟合方程为

$$t = \frac{a}{b\Gamma + c}, \quad (1)$$

这里 $a = 36.55$, $b = 0.76$, $c = -1.02$. 对于其他曲线, a , b , c 的值要有所不同, 可见 a , b , c 是和颗粒本身性质有关的常数. 可见, 大颗粒上升时间随加速度的增加呈一次反比的关系减少. 同样, Liffman 等人^[27] 在研究颗粒系统的分离效应时, 也给出了大颗粒上升时间与加速度呈一次方反比关系.

3.2 大颗粒直径对分离的影响

在同一个颗粒床中, 四个大颗粒在其中的上升时间虽然都随着振动加速度 Γ 的增加而减小, 但在同一个 Γ 下, 它们的上升时间是不同的, 即在填充高度相同情况下 ($H = 45.6 \text{ mm}$), 相应的平均上升速度也不相同. 为了方便分析, 我们将 Γ - t 曲线转换成 Γ - v 曲线, 如图 5 所示, 颗粒床为 $0.8\text{—}1.0 \text{ mm}$ 的陶瓷颗粒. 图中可观察到, 在低加速度范围, 四个大颗粒的上升速度差别较小, 但基本上遵循着大颗粒的直径越大, 其上升速度越大的变化趋势. 这和 Cooke 等人^[20] 在二维模型中得出的结论是一致的. 而在 Γ 较大的区域, 四个大颗粒的上升速度的

差别明显增大, 但也遵循大颗粒直径越大速度越大的规律. 分别从较低和较高加速度范围来看, 速度随 Γ 的增加近似直线上升. 大颗粒直径越大, 直线的斜率越大, 大颗粒上升的越快. 并且, 在低 Γ 范围内直线的斜率要大于高 Γ 范围内的斜率. 可见, 在低 Γ 范围内, 速度受 Γ 的影响较大, 受大颗粒直径的影响较小; 而在高 Γ 范围内, 速度受 Γ 的影响变小, 受大颗粒直径的影响变大. 这也从一个侧面表明了: 在低加速度和高加速度范围, 导致分离的主要机理是不同的. 在低加速度区, 由器壁摩擦力导致颗粒床内部出现对流, 大颗粒在对流的带动下只是随着小颗粒向上运动, 大颗粒的直径对分离的作用较小; 而在较高加速度范围, 几何填充效应使大颗粒的直径直接影响着其下方空隙的大小, 进而影响填充几率, 对分离的影响较大.

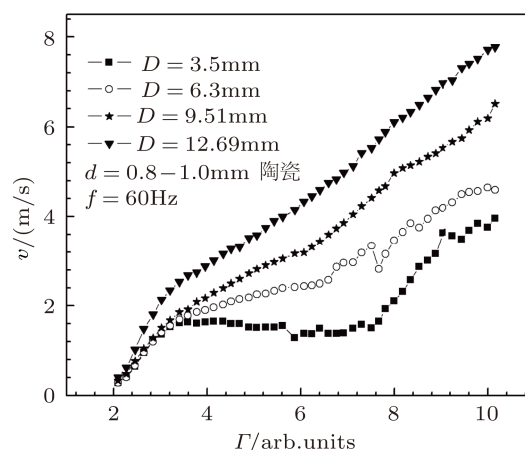


图 5 大颗粒平均上升速度随振动加速度的变化曲线

3.3 小颗粒的直径对分离的影响

图 6 表明了直径为 6.3 mm 的陶瓷大颗粒分别在直径 $0.5\text{—}0.6 \text{ mm}$ 和 $0.8\text{—}1.0 \text{ mm}$ 的玻璃床中, 大颗粒上升时间随颗粒直径比的变化关系. 显然, $0.5\text{—}0.6 \text{ mm}$ 的颗粒床的分离时间要大于 $0.8\text{—}1.0 \text{ mm}$ 颗粒床的分离时间. 可见, 小颗粒的尺寸对分离时间起着重要作用. 通常, 人们普遍认为大颗粒的上升时间随直径比的增加近似直线的减小^[28]. 然而, 我们的实验表明, 这种说法是有前提限制的, 它只适用于保持小颗粒(颗粒床)尺寸不变而改变大颗粒尺寸的情况. 当小颗粒的尺寸改变时, 增加大、小颗粒直径比还可以使大颗粒的上升时间变长, 从而对分离有抑制作用. 以图中的 A, B 两点为例, B 点比 A 点的直径比大, 但其对应的上升时间

却比 A 点的上升时间大很多. 这种现象也同样出现在陶瓷颗粒床中. 可见, 增大小颗粒尺寸对“巴西果”分离有促进的作用. 此外, 图 6 还表明大颗粒上升时间随直径比近似直线变化, 此现象与 Vanel 等人 [18] 的结论是一致的.

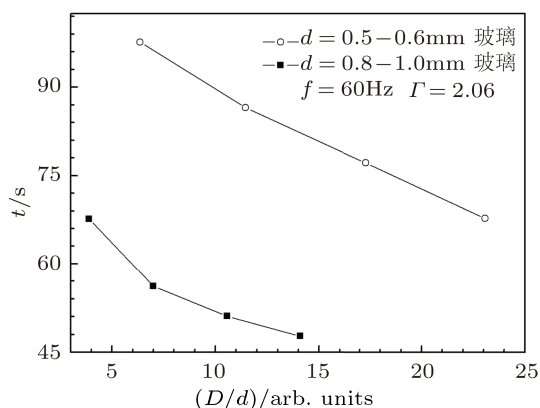


图 6 不同颗粒床中, 大颗粒上升时间随大、小颗粒直径比变化曲线

3.4 小颗粒材料对分离的影响

为了寻找颗粒床的材料对“巴西果”分离的影响, 我们把每一个大颗粒分别放在四种颗粒床中测量大颗粒上升的时间. 图 7 表示直径为 6.3 mm 的陶瓷大颗粒分别放在四种颗粒床中平均上升速度随振动加速度的变化关系. 显然, 在尺寸相同的情况下, 颗粒床的密度 (玻璃密度大于陶瓷密度) 越大, 大颗粒上升速度越大, 分离时间越小. 这样, 在保持大颗粒密度不变的情况下, 上升时间随密度比的减小而减小. 这恰好与先前 Liffman 等人 [27] 所得的结论相反, 他们通过实验得出大颗粒上升时间随密度比的增加近似成平方根反比关系减小. 之所以出现这种差别是因为 Liffman 等人是在保持颗粒床密度不变而改变大颗粒的密度, 而我们的实验是保持大颗粒的密度不变而改变颗粒床的密度. 因此, 对于不同密度的颗粒床 (其他因素不变), 上升时间可以随密度比的增加而增加. 当然, 需要指出的是, 若大颗粒密度太小, 即低于小颗粒密度乘以大颗粒的体积分数, 则大颗粒不会上升, 而是会下沉出现“反巴西果”效应 [9].

此外, 实验观察到, 陶瓷颗粒床中的陶瓷大颗粒在实验范围内任意大小振动加速度下都会上升到颗粒床表面, 并部分露出停留在表面. 可见, 当大、小颗粒密度比为 1 时, 仍然会出现“巴西果”分离. 此现象不支持 Shinbrot 等人 [29] 的结论, 即当密

度比接近 1 时, 大颗粒要在颗粒床中不断的对流循环, 不会发生“巴西果”分离现象.

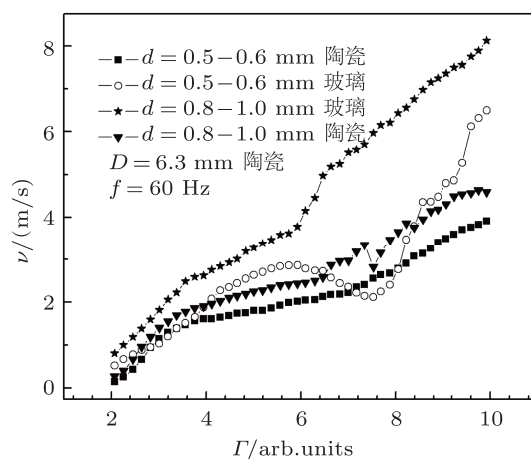


图 7 大颗粒上升时间随小颗粒性质变化曲线

4 流体模型近似计算

振动颗粒物质混合物, 由于颗粒之间的非弹性碰撞不断的消耗颗粒的动能, 相当于颗粒间有黏滞阻力的作用, 这种性质使振动的颗粒物质与流体相类似 [30]. 由于我们关心的是颗粒床内部的运动, 所以可把小颗粒作为参考物, 考虑振动过程中大颗粒向上穿越小颗粒的过程. 这样可以不考虑颗粒床的整体运动方式、振动加速度大小以及颗粒床内部小颗粒的运动状态. 对此过程, 我们把彼此间有黏滞阻力作用的小颗粒看成是流体, 运用流体动力学理论对振动过程中大颗粒在小颗粒床中的上升时间做近似计算.

4.1 流体阻力公式

对于运动的流体来说 [31], 它的力学性质中比较重要的首先是密度, 它是流体惯性的量度. 当流体在加速或减速运动时, 对其中的物体要产生加速度, 加速度与流体密度的乘积便是流体的惯性力. 其次是黏性, 它会产生流体的黏性力, 是流体对形变的摩擦阻抗的量度. 惯性力和黏性力的比值称为雷诺数. 它是在力平衡状态时惯性力与黏性力比值的量度. 不同流体的雷诺数不同. 若流体的雷诺数较低, 则该流体以黏性力为主; 若雷诺数较高, 则该流体以惯性力为主. 流动的流体对在其中静止的物体要有阻力的作用. 对于低雷诺数流体, 阻力遵

从 Stokes 定律, 可表示为

$$f = cvR\eta, \quad (2)$$

其中, f 为物体受到的阻力, v 为流体的速度, R 为流体中物体的尺寸 (对于球体, 是球体的半径), η 为流体的黏滞系数, c 为常数. 对于高雷诺数流体, 其阻力与流体速度的平方、物体尺寸的平方、流体的密度成正比, 表示为

$$f = cv^2\rho R^2, \quad (3)$$

其中 ρ 为流体的密度, 其他量同上.

4.2 分离时间的近似计算

首先把颗粒床等效成低雷诺数流体, 考虑大颗粒一次穿越过程, 设半径为 R 的大颗粒在流体中以初速度 v_0 向上运动, 由于受到重力和流体阻力 (间隙空气和小颗粒阻力) 的作用最终上升了 x 距离后静止下来. 在此过程中, 把瞬时阻力用平均阻力代替, 并由动能定理有

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = mgx + \frac{v_0}{2}R\eta cx, \quad (4)$$

解得

$$x = \frac{\frac{1}{2}mv_0^2}{mg + \frac{v_0}{2}R\eta c}, \quad (5)$$

大颗粒的质量 m 为

$$m = \frac{4}{3}\pi R^3\rho_L, \quad (6)$$

式中 ρ_L 为大颗粒的密度. 设经过 N 次这样的穿越, 大颗粒上升到颗粒床 (高度 H) 表面. 则

$$N = \frac{H}{x}, \quad (7)$$

把 (5) 和 (6) 带入 (7) 并整理得

$$N = \frac{3\pi H}{2} \left(\frac{\eta c}{R^2\rho_L v_0} + \frac{4\pi g}{3v_0^2} \right), \quad (8)$$

大颗粒的上升时间和上升次数成正比, 即有

$$t \propto \frac{3\pi H}{2} \left(\frac{\eta c}{R^2\rho_L v_0} + \frac{4\pi g}{3v_0^2} \right), \quad (9)$$

再用高雷诺数流体模型做近似计算. 把 (4) 式中的右末端项用 (1) 式代替, 得到大颗粒上升时间为

$$t \propto \frac{3\pi H}{2} \left(\frac{\rho_S c}{R\rho_L} + \frac{4\pi g}{3v_0^2} \right), \quad (10)$$

其中 ρ_S 为颗粒床的密度. 在其他量不变的情况下, (9) 和 (10) 式表明: (a) 分离时间随大颗粒的密

度 (ρ_L) 和尺寸 (R) 的增加而减小; (b) 分离时间随大颗粒初速度 v_0 增加而减小; (c) 颗粒物质的黏滞系数 η 增加, 分离时间 t 减小; (d) 颗粒床的高度 H 增加, 分离时间 t 增加; 这些结论均与当前实验结果相一致.

大颗粒相对小颗粒上升的初动能是与振动加速度 Γ 成正比的, 即有

$$v_0^2 \propto \Gamma, \quad (11)$$

因此,

$$t \propto \Gamma^{-1}. \quad (12)$$

可见, 两种情况计算的大颗粒上升时间均与振动加速度成反比. 这和我们的实验结果相符.

然而 (10) 式表明颗粒床的密度增大, 分离时间增加. 这与我们的实验结果相矛盾的. 可见, 应用低雷诺数阻力公式计算的结果比高雷诺数阻力公式的效果更好, 表明在振动下的颗粒物质与以黏性为主的流体更相似. 但是, 黏性流体模型给出的分离时间 (见式 (9)) 没能体现出小颗粒的直径和密度的影响. 所以, 此计算模型还不够理想, 流体和具有一定尺寸、密度和硬度的小颗粒毕竟还存在一些差异. 实际上, 静止的流体对在其中运动的物体的阻力的确遵循着流体密度越大, 由于惯性对物体阻碍的能力越大, 物体上升时间越长. 而对于颗粒物质体系, 在振动的过程中, 大颗粒下方的小颗粒还要对大颗粒有向上的推力作用, 使大颗粒的动能增加, 并且小颗粒的密度越大, 惯性越大, 碰撞中传递给大颗粒的能量越多, 大颗粒上升的越快. 因此, 流体模型中忽略了小颗粒的硬度是导致此矛盾结果的主要原因, 还有待进一步的研究.

5 结论

本文通过实验对影响“巴西果”分离因素及分离机理进行了探讨, 并应用流体模型作定性分析. 结果表明, 在振动频率不变情况下, 振动加速度存在某个临界点, 它使“巴西果”分离机理及主要影响因素发生改变. 当大于此临界点时, 大颗粒尺寸对分离时间影响变大, 而振动加速度对其影响减小, 主要分离机理由对流机理转变为几何填充机理; 大颗粒上升时间和加速度成反比; 增大小颗粒的尺寸 (直径大于 0.5 mm) 或密度 (不大于大颗粒密度除以其体积分数) 可以促进“巴西果”分离; 黏性流体模型能够较好解释振动下颗粒物质的分离特性,

但此模型忽略了小颗粒由于具有一定的硬度而对大颗粒的向上推动作用,同时也忽略了小颗粒的尺寸效应.因而该流体模型还存在一定的不足,仍然需做进一步的研究和讨论.

非常感谢哈尔滨工业大学的姜泽辉教授对本实验的支持.

- [1] Sun Q C, Jin F, Wang G Q, Zhang G H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 0030 (in Chinese) [孙其诚, 金峰, 王光谦, 张国华 2010 物理学报 **59** 0030]
- [2] Hu Y, Hu L 2009 *Journal of Shandong University* **44** 25 (in Chinese) [胡云, 胡林 2009 山东大学学报 **44** 25]
- [3] Rong L W, Zhan J M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 5572 (in Chinese) [容亮湾, 詹杰民 2010 物理学报 **59** 5572]
- [4] Hong D C, Quinn P V, Stefan L 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3423
- [5] Zhao, Y Z, Jiang M Q, Zheng J Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1812 (in Chinese) [赵永志, 姜茂强, 郑津洋 2009 物理学报 **58** 1812]
- [6] Metzger M J, Remy B, Glasser B J 2011 *Powder Technology* **205** 42
- [7] Mobius M E, Lauderdale B E, Nagel S R, Jaeger H M 2001 *Nature* **414** 270
- [8] Yan X Q, Shi Q F, Hou M Y, Lu K Q 2003 *Physics* **32** 748 (in Chinese) [阎学群, 史庆藩, 厚美瑛, 陆坤权 2003 物理 **32** 748]
- [9] Yan X Q, Shi Q F, Hou M Y, Lu K Q 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 014302
- [10] Jiang Z H, Wang Y Y, Wu J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4748 [姜泽辉, 王运鹰, 吴晶 2006 物理学报 **55** 4748]
- [11] Duran J, Mazozi J, Clement E, Rajchenbach J 1994 *Phys. Rev. E* **50** 5138
- [12] Tai C H, Hsiau S S, Kruelle C A 2010 *Powder Technology* **204** 255
- [13] Rosato A, Strandburg K J, Prinz F, Swendsen R H 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 1038
- [14] Knight J B 1997 *Phys. Rev. E* **55** 6016
- [15] Barker G C, Metha A 1993 *Nature* **364** 486
- [16] Hsiau S S, Yu H Y 1997 *Powder Technology* **93** 83
- [17] Mehta A, Barker G C 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 394
- [18] Vanel L, Rosato A D, Dave R N 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 1255
- [19] Schroter M, Ulrich S, Kreft J, Swift J B, Swinney H L 2006 *Phys. Rev. E: Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics* **74** 011307
- [20] Cooke W, Warr S, Huntley J M, Ball R C 1996 *Phys. Rev. E* **53** 2812
- [21] Duran J, Rajchenbach J, Clement E 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 2431
- [22] Kudrolli A 2004 *Rep. Prog. Phys.* **67** 236
- [23] Chen W Z, Wei R J, Wang B R 1997 *Phys. Lett. A* **228** 321
- [24] Clement C P, Pacheco-Martinez H A, Swift M R, King P J 2010 *Europhysics Letters* **91** 54001
- [25] Knight J B, Jaeger H M, Nagel S R 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 3730
- [26] Falcon E, Fauve S, Laroche C 1999 *Eur. Phys. J. B* **9** 183
- [27] Liffman K, Muniandy K, Rhodes M, Gutteridge D, Metcalfe G 2001 *Granular Matter* **3** 205
- [28] Ahmad K, Smalley I J 1973 *Powder Technology* **8** 69
- [29] Shinbrot T, Muzzio F J 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4365
- [30] Zhang H, Guo Y B, Chen X, Wang D, Cheng P J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2030 (in Chinese) [张航, 郭蕴博, 陈骁, 王端, 程鹏俊 2007 物理学报 **56** 2030]
- [31] Tan G S 1979 *Shape and Flow: Talking about Resistance to Fluid Dynamics* (Beijing, China: Science Publishers) [谈镐声 1979 形与流: 漫谈阻力流体动力学 (北京: 科学出版社)]

Experimental and theoretical investigations of the effect of “Brazil Nut” segregation in vibrating granular matters

Peng Ya-Jing[†] Zhang Zhuo Wang Yong Liu Xiao-Song

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

(Received 1 July 2011; revised manuscript received 24 November 2011)

Abstract

Size segregation is one of important properties of vibrating granular matters. It is significant to understand and study the segregation mechanisms and parameter range of controlling factors of mixed granular matters for the development of industry, agriculture and pharmaceutical. In this paper, we investigate the influence factors and physical mechanisms of “Brazil Nut” segregation experimentally and theoretically. The influences of vibrating acceleration, sizes and densities of large and small granules on the segregation time are analyzed. The hydro-model is used to evaluate segregation time and explain the experimental results qualitatively. Results show that the vibration acceleration is a main controlling factor for “Brazil Nut” segregation in the case of fixed frequency. There is a critical acceleration. When the acceleration is larger than its critical value the main physical mechanism changes from convection to filling voids, and the effect of acceleration on segregation decreases, while the effect of size of large granule on it increases. Furthermore, “Brazil Nut” segregation still arises when the density ratio is equal to 1. The increase of the size or density of small granular may enhance “Brazil Nut” segregation.

Keywords: granular matter, “Brazil Nut” segregation, segregation time, segregation mechanism

PACS: 45.70.-n, 45.70.Mg

[†] E-mail: pengyajing@126.com