

# 巴西坚果效应之谜

申兵辉 韩萍



巴西坚果是产于巴西、委内瑞拉和圭亚那的一种果树的种子,含有丰富的油和蛋白质,是一种极具经济价值的坚果。上世纪30年代,巴西人在长途运输坚果时,发现装有不同大小坚果的容器经过长途颠簸,总是大的果子浮在上层、细碎的小果留在下面。根据常识,大而重的坚果在振动过程中受重力影响应当沉在下面,但事实却与想象截然相反,所以这种现象被称为巴西坚果效应(Brazil nut effect)。巴西坚果效应很容易通过简单实验来验证,例如将图1(a)中一定数量的5种大小不同的果粒装入容器中,颠簸数次后,最大的几个果粒就会浮于容器的上面,如图1(b)所示。

## 一、对巴西坚果效应的解释

法国科学家德热纳(De Gennes)在1991年的诺贝尔物理学奖颁奖会上提出颗粒物质的概念。颗粒物质指尺度范围在 $1\mu\text{m} \sim 10^4\text{m}$ 之间的颗粒的集合体(尺度小于微米量级时,布朗运动就比较明显,通常不属于颗粒物质的研究范围)。颗粒物质在日常生活中司空见惯,如沙石、泥土、盐、糖、谷物等。从能量角度看,颗粒物质重力势能远大于其他形式的势能,温度对它的影响很小,热运动可忽略。从相互作用角度看,颗粒可看作刚体,彼此间的相互作用主要是摩擦力。由于颗粒物质体系能量的耗散相当强,所以它具有无穷多的亚稳态,可以随意堆积保持稳定。从上世纪30年代以来,巴西坚果效应一直令人困惑不已。迄今为止,还没有哪个成熟理论能够圆满解释颗粒物质的这些行为。困难之处在于,尽管颗粒物质与传统的固、气、液三态都有某种联系,但是我们不能简单地将其归入固、液、气三态中的任一种,因此也不能用现有的物理定律对它进行定量描述。首先,虽然单一颗粒可看作固体,但它

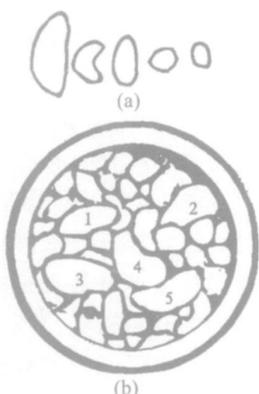


图1

们以很大数量累积时,就整体而言,使颗粒物质凝聚到一起的作用力比固体内部原子或分子间的作用力小得多,所以其并非固体;其次,尽管颗粒物质具有某种流动性,且能够适应容器的形状,但它不是真正的液体,因为它们可以堆积成金字塔的形状并支撑物体的重量;最后,如果把颗粒物质看成气体,它又不受温度影响,按气体分子运动理论,当温度升高时,分子的无规热运动加剧,而加热一堆颗粒物质却不能使每个颗粒改变其运动状态,所以颗粒物质显然也不是气体。颗粒物质的独特共性可归结为四个方面:颗粒物质内部相互作用以碰撞和摩擦为主、小的涨落对其性质有重要影响、颗粒物质中的布朗运动可以忽略不计、整个体系是强耗散体系。

自从颗粒物质的概念提出以后,巴西坚果效应泛指颗粒物质受到竖直方向的振动时,大颗粒位于混合物的顶部,而小颗粒位于底部的现象。

人们对巴西坚果效应进行了大量研究,但其机理至今还不完全清楚,仍是一个谜。一个较为直观的解释为,固体混合物中存有一定的空隙。受重力作用的颗粒倾向于向下运动,最终能否移动取决于有没有空间容纳它。容器内的空隙大小不一,较小的颗粒既可挤入小空隙,又可挤入较大的空隙,而大颗粒则只能挤入较大的空隙,因此小颗粒更容易挤入这些空隙。经过几个周期的振动,所有颗粒都上下反复运动,小颗粒占据了大颗粒下面的空隙,阻止它往回运动,最终使大颗粒浮在上表面。最初的解释可归纳为下面几种机制:第一种是筛子效应,小颗粒从大颗粒之间的空隙中过滤下来;第二种机制为成拱效应,根据拓扑学理论,振动过程中小颗粒在大颗粒下面的空隙中进行几何重构从而楔住了大颗粒,阻止其下降;第三种为对流机制,大颗粒被向上的对流运动带到顶部,但是在向下的对流运动过程中,它们不能跟随小颗粒沿器壁向下运动,从而在此搁浅。

上面的解释只是定性的。2002年,美国芝加哥大学的一个研究小组在实验室中测量了大颗粒上升到表面的时间,并分析了影响这个时间的几个因素。他们的工作公布以后,巴西坚果效应成了21世纪初

的一个研究热点。实验采用直径为 0.5~1.0mm 的玻璃珠作为小颗粒,用直径为 2.54cm 的钢球或圆盘作为大颗粒,其上钻有不同尺寸的孔,以改变其密度,振动器由一个频率为 13Hz 的正弦信号驱动。球体用于模拟三维的大颗粒;圆盘用于模拟二维大颗粒,但由于实验中小颗粒及容器仍是三维的,故称为二维系统。实验结果显示,大颗粒的上升时间与大小颗粒的密度比之间有密切关系。在二维系统中,大颗粒的上升时间随密度比的增大而非线性地单调减小。而在三维系统中,大颗粒的上升时间在某个密度比时出现一个峰值。前面的几种解释用不同方法从不同角度解释了巴西坚果效应的某些方面,根据这些理论,大颗粒上升到表面的时间要么与大小颗粒的密度比无关,要么单调地依赖于大小颗粒的密度比,因此不能解释这个实验结果。

就在研究人员百思不得其解之时,一个被忽略的因素引起了关注——颗粒间空气的作用。该研究小组在低压下重新进行了测量,为了避免颗粒之间的气压小于外界大气压力时,器壁受力造成颗粒之间产生黏附作用,他们在容器外侧又套上了一个直径 19.7cm、高 21.8cm 的柱状容器,使大气压力作用在外部容器上,内部容器内的颗粒就可以在低压下自由运动。结果显示,无论二维系统(图 2)还是三维系统(图 3),低压下大颗粒的上升时间与颗粒密度比的依赖性大大降低,并且密度比越小,气压变化的影响越明显。对于较重的大颗粒,可以忽略

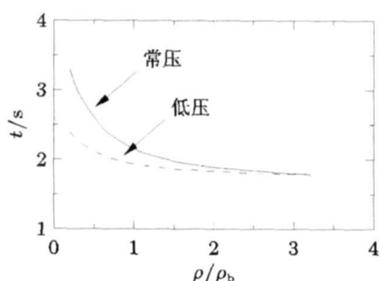


图 2 二维系统大颗粒上升时间与密度比的关系

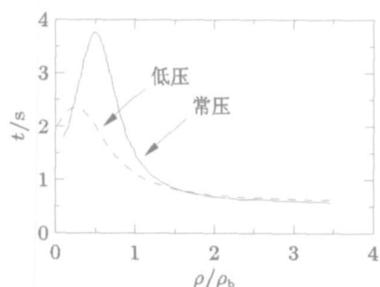


图 3 三维系统大颗粒上升时间与密度比的关系

空气的作用,而对于较轻的大颗粒,密度依赖性几乎完全取决于颗粒间的空气。

低压实验证实了空气的作用是产生密度依赖性的重要原因。但是,是什么原因使二维系统与三维系统中,大颗粒的上升时间随密度比的变化曲线出现明显差异呢?研究人员最初猜想这与颗粒和器壁间的摩擦力有关。因为在三维系统中,大颗粒是用钢球做成的,它们与器壁的摩擦力很小,可以忽略不计;在二维系统中,大颗粒是一个个钢制的圆盘,盘中心钻有大小不等的孔使其具有不同质量,与圆球相比,圆盘与器壁的摩擦力要大一些。为了证实这个结论,研究人员用三种不同材料制成的圆盘替代原来的颗粒重新进行实验,其中两种由塑料制成,另一种用聚四氟乙烯制成。这些材料与器壁之间具有不同的摩擦因数,如果摩擦力是导致密度依赖性的主要因素,那么对于这三种材料将得出不同结果。但是,实验曲线显示这三种结果与前面用钢制材料所做的实验曲线并无明显差异。因此,与空气的影响相比,摩擦力的影响很小,可以排除。

为了弄清楚产生这种差异的原因,研究人员借助高速摄像机对振动期间颗粒的运动细节进行了观测,虽然没能揭开谜底,却有了重大的意外收获。他们将高速摄像机分别固结在实验室中的固定位置以及振动平台上,记录下大颗粒在两个参考系中的运动情况。将大颗粒埋入直径为 1mm 的玻璃珠以下 6.4cm 处,拍摄大颗粒的位移随时间的变化。结果显示,无论在哪个参考系,质量较大的颗粒都具有较大的位移,因此它们可以更快地到达表层。录像显示,在碰到容器之前,大的颗粒具有恒定不变的加速度,这意味着它们在此过程中受到一个恒定的作用力,这个力大于重力,因为其加速度约为  $15\text{m/s}^2$ ,大约为重力加速度的 1.5 倍。那么,是什么因素产生了额外(重力以外)的力  $F_{ex}$  呢?仔细分析发现,额外的力有两个来源:一是颗粒周围空气的压力梯度,二是大小颗粒之间的摩擦力。图 4 显示了常压和低压下  $F_{ex}$  随大颗粒质量的实验曲线,从图 4 可以看出,当大气压力减小时,  $F_{ex}$  也随之减小,这为压力梯度产生附加力的解释提供了间接证据。研究人员把大颗粒埋入玻璃珠内较浅的表面附近,重新进行测量,结果与前面的结果基本相同,只是玻璃珠的行为更接近流体,并且振动过程中空气在更短的时间内

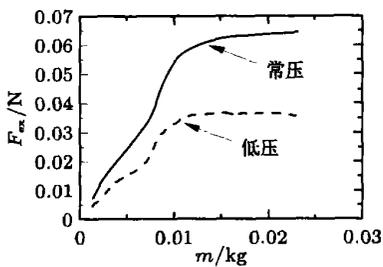


图4 常压和低压条件下  $F_{cs}$  随大颗粒质量的变化曲线

到达表面附近,从而使表面附近空气的压力梯度也相应变小。所以这种情况下,作用于颗粒上的额外的力也较小。这个实验虽然不能精确描述空气的作用,但它肯定了颗粒间的空气在巴西坚果效应中扮演了重要角色。

2003年,中科院物理所和北京技术物理研究所的研究人员对颗粒周围气压的影响进行了新的实验研究,他们将大颗粒混入振动着的小颗粒基底中,观测小颗粒尺寸、大颗粒密度以及周围气压对大颗粒运动的影响。结果发现,在没有空气时,大颗粒总是上升,而存在空气时,大颗粒不仅可获得向上的正浮力,而且还有一个向下的负浮力。不过,只有大颗粒密度及小颗粒尺度足够小时,才产生负浮力。这个负浮力可用小颗粒基底上的反常气压分布来解释。

搞清楚气流、介质对流以及大颗粒间复杂的相互作用是理解巴西坚果效应的关键,很有可能是这些不同的相互作用模式造成不同的密度依赖行为以及其他相关现象,要完全揭开巴西坚果效应之谜,仍需大量理论工作和实验研究。

## 二、反常巴西坚果效应和水平巴西坚果效应

早期的研究都集中于少量的大颗粒与大量的颗粒的混合物的情形。2001年,美国与德国的物理学家与计算机专家将等量的大小颗粒物质混合在一起,进行了实验与计算机模拟研究。他们发现,在不同振动条件下,这些颗粒的行为有时像流体、有时像固体。当振动足够轻柔时,这些颗粒因受引力影响而“凝固”;振动剧烈时,这些颗粒表现得像流体。这种现象可与温度做类比,容器中两种不同尺度的颗粒具有不同的凝固点,一种颗粒凝固成紧密的壳层而另一种颗粒仍保持“流动”状态,从而导致它们的分离。计算机模拟显示,大颗粒首先凝固。当大颗粒相对较小时,它们将形成多孔筛状,小颗粒便从缝隙中过滤到底部。这种情形对应于正常巴西坚果效应。而当大颗粒足够多时,或大小颗粒的尺度相对

接近的情况下,却表现出相反的行为,即大小不等的颗粒物质在受到竖直方向振动时,大颗粒下沉到容器底部,小颗粒则仍在上面随容器振动。这种现象称为反常巴西坚果效应(reverse Brazil-nut effect)。他们认为,正常巴西坚果效应向反常巴西坚果效应的转变,是由颗粒之间的筛子效应与凝聚效应共同竞争导致的,在理论上可找出临界点。基于分子动力学的二维与三维系统的计算机模拟基本证实了他们的理论。

2003年,美国德州大学奥斯汀分校的教授及其同事在实验和模拟两个方面取得了新的研究成果,他们发现扭结可以促使产生水平方向的巴西坚果效应。当搅拌速度非常高时,容器内会出现扭结,它将容器内的谷物分成两个区域(或者说两个相),扭结一边的谷物向上运动,另一边的谷物向下运动;大颗粒谷物从两个振荡区内流动出来向扭结处集中。科学家可通过调节驱动力信号来控制扭结在容器内的位置,这样就能通过移动扭结的位置集中收集容器一侧的大颗粒谷物。这类水平方向的巴西坚果效应实际上是扭结处产生的非线性雪崩现象,这类不稳定的雪崩在容器内引起对流滚动,并裹挟着大颗粒向扭结处集中,显然这类水平巴西坚果效应具有良好的商业前景,将广泛用于不同大小颗粒混合物的有效分离。

## 三、巴西坚果效应的应用

颗粒物质的研究和人类的生产、生活有密切联系。从人类认识自然和改造自然的角度来说,对许多自然现象和灾害(沙尘暴、泥石流、雪崩、地震)的研究就显得十分重要;从节约能源角度来看,当今世界的颗粒传输和积累要消耗全球总能源的10%,因此对其进行研究具有重要的实际意义。巴西坚果效应最直接的应用就是分离颗粒物质。目前已发明根据大小和密度分离颗粒物质的设备。这种设备在工农业生产中有着广泛用途,预计市场价值高达10亿美元。

然而由于巴西坚果效应,混合均匀的大小不等的颗粒物质受到竖直方向振动而出现的空间非均匀分布(称为偏析),也使某些行业的生产受到困扰。例如药品和食品生产中,人们总是希望各种原材料尽可能混合均匀,但是生产过程中的振动会不可避免地导致大小颗粒分离,或使流动物质堆积成团,从而严重影响生产效率。据不完全估计,单单这一项就

# 物理知识在汽车上的应用

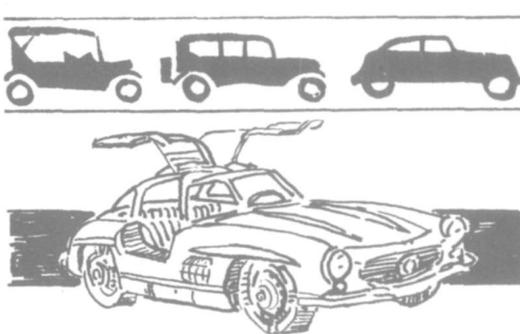
吕兴行 朵丽华

生活、学习、工作处处离不开物理知识,随着社会的发展,有车族不断壮大,汽车上的物理知识非常多,这里介绍几项,供大家参考。

## 一、“防抱死”讲安全

防抱死系统是现代中高档轿车必不可少的装备,很多汽车广告都会把防抱死刹车系统(ABS)作为“卖点”,其实,ABS是antilock braking system的英文缩写,中文译为“防死锁刹车系统”。

未安装该系统的汽车在遇到紧急情况时来不及分步缓刹,只能一脚踩死,汽车则因惯性继续向前滑冲,可能出现侧滑、跑偏、方向不受控制等危险。装有ABS的车,在车轮即将到达下一个锁死点时,通过轮胎上的传感器向防抱死系统电脑发出信号,电脑就会令刹车系统不再刹车,于是刹车就在抱死和不抱死之间交替进行,电子式防抱死刹车(其结构组



成见图1)1秒内可作用60~120次(机械式为6~12次),相当于不停地刹车、放松,类似于机械“点刹”。可避免紧急刹车时方向失控及车轮侧滑,保证行车安全,缩短刹车距离。

## 二、玻璃贴膜作用大

防眩光 贴膜有一定颜色,可减弱可见光的强度,降低

对人眼的刺激,有助于改善司机视野、确保驾驶安全。建议用户尽量不要选取透光度太低的膜,车窗膜(尤其是前排两侧窗的膜)选择透光度在85%以上的较为适宜。这样的侧窗膜无需挖孔且不影响视线,还能在夜间行车时减弱后面来车大灯照射在反光镜的强烈眩光反射,在雨夜行车、倒车、调头时保证视线良好。茶色贴膜既能反射一部分光,又能吸收一部分光,这样透进车内的光线较弱。想从车外看清乘客的面孔,面孔反射的光应足以透射到玻璃外面。由于车内光线较弱,没有足够的光透射出来,所以很难看清乘客的面孔。

阻隔紫外线 紫外线在太阳光中约占3%,过量的紫外线照射会诱发人体皮肤癌变,还会造成物品褪色、塑料橡胶件老化。高品质的车膜可阻隔99%以上的紫外线,不仅能有效防止车内乘员因过量紫外线照射而灼伤皮肤,还能保护车内音响及其他内饰。

隔热 传热的方式有传导和辐射,贴膜的玻璃

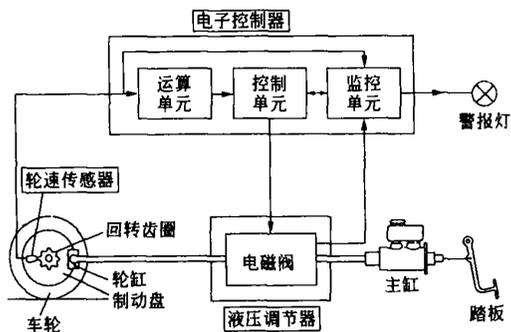


图1 ABS组成示意图

会浪费掉一半以上的生产能力。因此弄清巴西坚果效应的机理,有可能找到一种人为控制颗粒物运动模式的方法,使其不受巴西坚果效应的影响。

据观察,小行星表面的结构、纹理甚至形状等,就是受反复火山喷发或热流引起的机械波动的影响。科学家在实验室中将水平的沙子层放到沿竖直方向振动的床上,发现沙子变成锥形,大的沙粒从锥形中心上升到顶部并在那里堆积,然后沿锥形的边向各个方向下落,这就是沙粒的对流运动。也许正是这种对流运动,使山脉和河流具有特定的形状。

所以,研究巴西坚果效应有助于揭开小行星风化层或火山堆的成因。

研究颗粒物,尤其是其动力学行为,有着重要的理论意义。颗粒物既非流体,亦非简单固体,而具有独特性质。其运动形式极为复杂,再加上颗粒物之间的相互碰撞,可能导致混沌运动,致使现有理论无法全面描述。相信随着研究的不断深入,会出现一个新的科学分支,即融分子动力学、流体力学和非线性科学于一体的颗粒动力学。

(北京中国农业大学理学院应用物理系 100094)