

颗粒气体团簇行为实验研究

王花 陈琼 王文广 厚美瑛

Experimental study of clustering behaviors in granular gases

Wang Hua Chen Qiong Wang Wen-Guang Hou Mei-Ying

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 014502 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.014502

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014502>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I1>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

玻璃-橡胶混合颗粒的 ρ 芯

Mechanical response study of glass-rubber particle mixtures

物理学报.2015, 64(15): 154502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154502>

振动颗粒混合物中的周期性分聚现象与能量耗散

Energy dissipation and periodic segregation of vibrated binary granular mixtures

物理学报.2015, 64(13): 134503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134503>

二维晶格颗粒堆积中侧壁的压力分布与转向系数

Lateral pressure distribution and steering coefficient in two-dimensional lattice pile of granular material

物理学报.2015, 64(13): 134502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134502>

垂直振动激励下颗粒材料有效质量和耗散功率的研究

Dynamic effective mass and power dissipation of the granular material under vertical vibration

物理学报.2015, 64(4): 044501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044501>

孤立波在一维复合颗粒链中传播特性的模拟研究

Simulation study on the propagation of solitary waves in a one-dimensional composite granular chain

物理学报.2014, 63(15): 154502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.154502>

颗粒气体团簇行为实验研究*

王花¹⁾²⁾ 陈琼²⁾ 王文广²⁾ 厚美瑛^{2)†}

1) (北京理工大学物理学院, 北京 100081)

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

(2015年6月29日收到; 2015年9月27日收到修改稿)

颗粒体系由于非弹性碰撞和摩擦等内秉的能量耗散特性, 由宏观粒子形成的颗粒气体体系经常会有局部凝聚现象, 这是颗粒气体体系与分子气体体系的最大区别之一. 理解和预测这一现象的发生将有助于人们对远离平衡态体系的复杂现象, 如有序结构、斑图和团簇形成的认知. 这种局部凝聚现象可以类比于分子气体中亚稳分解形成的液滴, 将气液相分离用于解释和寻求局部凝聚现象的此模型得到了分子动力学模拟的校验. 但是实验的校验却由于宏观粒子运动受重力作用的影响难以在实验室中实现. 作为实践十号卫星的前期实验, 本文利用国家微重力实验室落塔装置, 以水平激振装有不同的尺寸和数目的颗粒样品, 在短时微重力条件下, 成功观察到颗粒气体团簇的形成; 并将实验结果与颗粒气体类范德瓦耳斯气体分子相分离模型对比, 由形成团簇样品的颗粒数密度条件, 来实验确定了所选颗粒的恢复系数, 得到直径为0.5 mm的钛珠颗粒的恢复系数在0.6—0.8之间, 直径为1 mm的钛珠颗粒的恢复系数约为0.8, 直径为2.5 mm的钛珠颗粒的恢复系数应大于0.8.

关键词: 颗粒气体, 微重力, 团簇, 落塔

PACS: 45.70.-n, 45.70.Mg

DOI: 10.7498/aps.65.014502

1 引言

颗粒物质在自然界、日常生活以及农业和工业生产过程中都普遍存在, 与人类的生存和生活环境息息相关^[1]. 不同外力条件作用下, 颗粒物质能表现出类似于固体、液体及气体的特性^[2]. 当体系中颗粒分布较为均匀, 能够快速运动而且颗粒运动的平均自由程相对于其尺寸大很多, 颗粒之间的相互作用以二体碰撞为主时, 该颗粒体系被称为“颗粒气体”体系^[3]. 颗粒气体不仅能够表现出普通气体所具有的性质, 还能够产生一些更为有趣的动力学行为, 如颗粒体系的自由冷却现象^[4]、麦克斯韦妖现象等.

在颗粒系统中, 颗粒之间以接触摩擦和非弹性碰撞为主要相互作用, 即颗粒系统是具有耗散的非

平衡系统. 对此类系统的研究需要借助外界驱动来提供能量以平衡体系内部的能量损耗^[5]. 即若无外界驱动力的存在, 在非弹性碰撞的作用下, 颗粒体系的动能会不断转化成热能, 出现自由冷却现象^[6]. 对于稳态颗粒气体体系, 密度的涨落也会破坏体系的均匀分布, 从而导致某个局部的数密度偶然增加, 使得该处颗粒之间的碰撞概率增大, 局部的能量损耗变得严重. 如果瞬时“热扰动”不足以阻止这种趋势, 局部的高密度聚集就会形成, 使得颗粒气体体系发生局部的凝聚现象, 类似于气体中形成的液滴. 我们可以将之类比于真实气液相变行为, 认为这就是颗粒气体中的亚稳分解现象, 颗粒气体经过此过程最终形成低密度区域(气相)和高密度区域(液相)共存的不均匀状态. 这种凝聚现象被称为颗粒“团簇”. 对于整个颗粒体系, 团簇在一

* 中国科学院空间科学战略性先导科技专项(批准号: XDA04020200)、国家自然科学基金(批准号: 11274354, 11474326)和地震行业科研经费(批准号: 201208011)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mayhou@iphy.ac.cn

起的颗粒就像是真实气体在液化过程中所形成的液滴^[7]. 颗粒气体从稀疏的均匀分布状态变化到局部团簇的状态, 称为颗粒体系的类气-液相变.

在过去数年中对于颗粒气体的这种相分离现象的理论研究, 类比于普通气体和液体的分析方法, 通过建立颗粒的流体力学方程, 结合范德瓦耳斯方程, 可以得到二维体系临界点附近的相分离行为^[8,9]和不同边界条件下发生相分离的条件、不稳定性根源及相分离形貌^[10–13]. 我们将二维模型推广到三维体系^[14–17], 得到三维体系的相分离发生的具体条件, 并通过分子动力学模拟检验了理论模型的结果, 发现了更为丰富的相分离现象. 但是由于相分离现象考虑的颗粒气体团簇的形成必须在零重力条件下实现, 而实验室条件下无法实现零重力环境, 这使得本文所述的微重力落塔实验对颗粒气体团簇行为的验证变得尤为重要. 首次颗粒气体相分离微重力实验预计将在2016年的实践十号科学卫星上实现^[18]. 本文主要介绍我们在落塔短时微重力环境中的预实验. 实验中成功地观察到了相分离现象, 并和理论模型所获得的相图对比, 得到了所用钛颗粒的恢复系数值: 直径为0.5 mm的钛珠颗粒的恢复系数在0.6–0.8之间, 直径为1 mm的钛珠颗粒的恢复系数约为0.8, 直径为2.5 mm的

钛珠颗粒的恢复系数应大于0.8.

2 落塔实验

2.1 实验装置

相对于其他实现微重力的实验方法(比如抛物线飞机失重实验、水浮法、气悬浮法等), 落塔实验具有精度高、稳定性好、可重复实验等优点^[19], 其缺点是只能实现短时微重力. 世界上多个国家拥有落塔实验设施, 欧洲比较典型的是著名的德国布莱梅大学应用空间技术与微重力中心的Bremen落塔, 塔高146 m, 试件从110 m的高处定位平台自由下落, 可以获得4.74 s的微重力时间, 微重力水平可达到 $10^{-9}g$ (其中 g 为重力加速度), 近几年来Bremen落塔实现了上抛试件的方案, 在底基下安装发射管, 可将载荷物件发送至塔顶, 改善后的落塔可以实现9.6 s的微重力时间, 吸引了各国科学家参与利用该落塔进行微重力实验研究^[20].

中国国家微重力实验室(NMLC)落塔自由落体设施高位116 m, 试件从83 m处自由落下, 可获得3.6 s的微重力时间, 微重力水平为 $10^{-3}g$, 是目前国内最高且获得微重力时间最长的落塔^[21]. 落塔外观、落舱及实验装置如图1所示.



图1 (a) 落塔外观; (b) 落舱; (c) 实验装置

Fig. 1. (a) The appearance of the drop tower; (b) falling module; (c) the setup.

颗粒样品仓示意图见图2. 五个相同深度和宽度、不同长度的样品仓置于一水平振动的直线电机平台上. 这样单次落塔实验我们可以测试5组不同

的仓体积和颗粒参数下的颗粒相分离情况. 五组样品仓的宽度和深度相同, 宽为50 mm, 深10 mm, 长度分别为150, 120, 100, 50和30 mm.

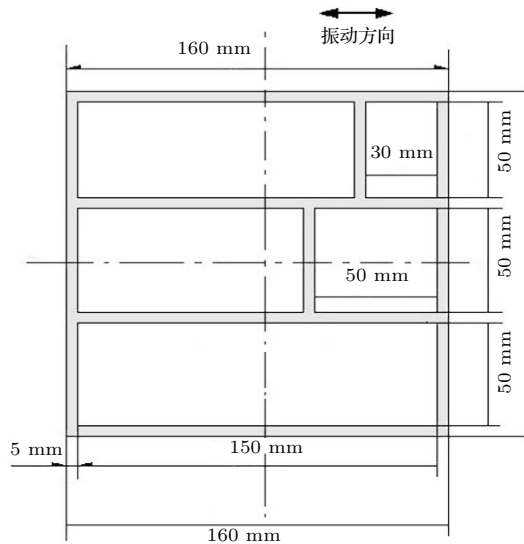


图2 单仓样品盒尺寸图 (mm), 样品盒深度 10 mm

Fig. 2. A sketch of the single cell.

为了解决颗粒之间碰撞或颗粒与容器壁碰撞所产生的静电问题, 样品盒内壁黏贴铜膜, 盒子底面采用透明导电玻璃, 以便得到清晰的实验图像. 样品盒固定在直线电机 (振幅 13 mm, 频率 5 Hz) 上, 相机位于样品盒正上方, 拍摄颗粒在各仓中的分布情况. 采光由样品盒与电机之间插入的平面灯提供以保证光照均匀.

2.2 实验过程

搭载的实验装置需要与地面模拟设备连接并检测、调试其工作状态, 当确定实验装置工作状态正常后, 遥控位于高处的两条平行铁轨之间的提升系统将舱盖悬挂并扣在搭载的实验装置上完成装舱过程, 舱盖需完全罩住实验装置并固定好, 然

后将落舱整体悬挂并调整落舱质心. 继续遥控提升系统将落舱安置在推车上, 至此实验前准备工作完成. 接着用推车将落舱运到井口, 落舱顶部与吸合-提升-释放分系统对接并拉升到 83 m 释放平台, 由中央控制中心检测并确定每个实验步骤正常并最终发出释放落舱的指令, 约 3.6 s 后落舱进入回收网并转入回收阶段, 落舱与回收网一起慢速下滑直至速度逐渐衰减为零, 调整回收网与落舱分离, 再次将吸合-提升-释放分系统与落舱顶部对接并将其拉升至井口装入推车, 打开落舱与分系统的对接, 由推车将落舱运出, 至此实验结束. 在落塔下降的 3.6 s 中, 颗粒均处于失重状态, 相机记录下颗粒体系运动的整个过程, 可以通过电荷耦合器件监视信号将录像传送出来.

2.3 实验结果

由实验图像可以看出, 下落开始即颗粒进入微重力环境后, 颗粒迅速处于失重漂浮状态. 在电机振动驱动下, 颗粒与容器壁碰撞获得速度, 这些高速运动的颗粒再通过碰撞将速度传递给其他颗粒, 通过颗粒-颗粒相互碰撞, 在一定实验条件下, 我们可以观察到团簇在仓中间形成. 如图 3 和图 4 所示, 直径为 2.5 mm 的钛颗粒盒子长度和颗粒数目 (L_x, N) 为 (150, 500) 和 (120, 300) 时, 颗粒体系出现团簇行为, 其他为颗粒气体状态; 对于直径为 1 mm 的钛颗粒, 当盒子长度和颗粒数目 (L_x, N) 为 (150, 2600), (100, 1600) 和 (50, 2000) 时, 颗粒体系出现团簇; 对于直径为 0.5 mm 的钛颗粒, 当盒子长度和颗粒数目 (L_x, N) 为 (30, 9000) 时, 颗粒表现为密集的颗粒液体状态.

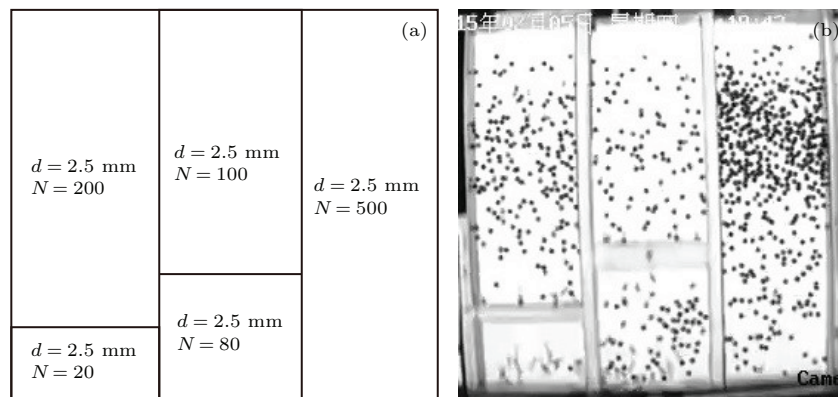


图3 (a) 各个盒子中所装颗粒尺寸及颗粒数目; (b) 实验现象

Fig. 3. (a) Numbers and sizes of particles in each cell; (b) the experimental observation.

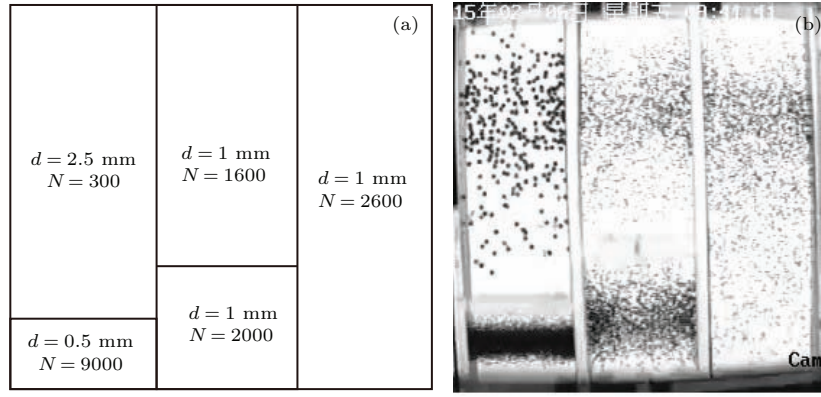


图4 (a) 各个盒子中所装颗粒尺寸及颗粒数目; (b) 实验现象

Fig. 4. (a) Numbers and sizes of particles in each cell; (b) the experimental observation.

3 基本模型

将发生非弹性碰撞的宏观颗粒考虑为类范德瓦耳斯分子, N 个直径为 d 、质量 $m = 1$ 的硬球颗粒放置于体积为 $V = L_x \times L_y \times L_z$ 的封闭矩形容器里. 颗粒的速度由与容器 L_x 方向一端的振动边壁碰撞获得. 为简单起见, 假设颗粒与容器壁之间的碰撞为完全弹性碰撞, 颗粒与颗粒之间碰撞为非弹性碰撞. 在无重力的条件下, 若仅考虑颗粒之间的法向非弹性碰撞, 定义法向恢复系数 e , 当 $1 - e \ll 1$ 时, 可以用流体力学方程来描述^[22,23]. 即当体系的能量损耗与能量注入达到平衡时, 体系处于稳定状态, 其动量与能量满足方程

$$p = nT(1 + 4G), \quad (1)$$

$$\nabla \cdot [\kappa \nabla T(\mathbf{r})] = I, \quad (2)$$

其中, $\mathbf{r}$ 是空间坐标矢量, p 是颗粒气体压强, T 为颗粒气体温度, 颗粒系统的体积分数 $v = \pi d^3 n / 6$. 可以通过 Enskog 近似方法得到热输运系数和能量耗散项为

$$\kappa = \frac{4dnT^{1/2}G}{\sqrt{\pi}} \left[1 + \frac{9\pi}{32} \left(1 + \frac{5}{12G} \right)^2 \right], \quad (3)$$

$$I = \frac{24(1-e)nT^{3/2}G}{\sqrt{\pi}d}, \quad (4)$$

$$G(v) = \frac{v(1-v/2)}{(1-v)^3}, \quad (5)$$

其中, κ 为热传输系数, I 为能量耗散项, G 为与体积分数的常数. 方程无量纲化以后, 能量耗散项具有常数

$$\eta = \frac{\pi}{3}(1-e^2)\left(\frac{L_x}{d}\right)^2 \quad (6)$$

是一个表征体系能量耗散性能的参量, 为颗粒恢复系数、尺寸和体系体积的函数.

此外, 根据体系中颗粒数目守恒的条件, 可得到无量纲化的平均颗粒数密度

$$f = N / (n_c V), \quad (7)$$

其中 $n_c = \sqrt{2}/d^3$ 是密堆积的粒子数密度.

给定不同的 η 和 f , 可以通过方程 (1) 和 (2) 求解体系的横向均匀稳定解及相应的约化颗粒气体压强 $P = p / (n_c T_0)$. 当 η 取某一个确定值, 对应不同的 f , 可以计算得到 p - f 曲线. 在气液相变的范德瓦耳斯理论中, 体系处于亚稳分解状态时, 对应的就是 p - f (压强-体积) 曲线中负压缩部分, 即 $\partial P / \partial V > 0$ 的部分, 此反常下降区域类似于气液相变的所谓负压缩区域, 对应于颗粒气体发生亚稳分解并产生相分离的区域, 因此颗粒气体的相分离可以归结为一种与气液相变相似的负压缩不稳定性. 采用这样的方法我们可以确定颗粒气体相图的两相共存边界及亚稳分解边界.

由于实验中以改变 L_x 来改变体系体积, 从而改变 f , 因此我们将解得的 η 和 f 相分离曲线改为以颗粒数 N 和 L_x 为轴的相图. 图 5—图 7 分别给出了计算所得到的 d 为 2.5, 1.0 和 0.5 mm 颗粒亚稳分解边界. 给定颗粒尺寸和碰撞恢复系数, 理论计算得到的两条分界线将体系中颗粒的状态分为气态、气液共存态和液态. 其中下部曲线以下的区域为颗粒气态, 两条分界线中间的部分是颗粒气液共存态即有团簇形成的区域, 上曲线以上表示体系为颗粒液态.

图3和图4为不同实验参数下所观察到的颗粒团簇现象, 将之以五角星标示于图5—图7的 N - L_x 相图中, 其中蓝色实心(红色空心)五角星表示实验观察到团簇(无团簇). 图5是颗粒直径为2.5 mm时的理论计算结果, 实验与理论对比可以看出, 2.5 mm钛颗粒的恢复系数大于0.8. 图6是颗粒直径为1 mm时的理论计算结果, 对比理论计算结果, 可得出直径为1 mm的钛颗粒的恢复系数约为0.8. 图7是颗粒直径为0.5 mm时的理论计算结果, 对比可发现钛颗粒的恢复系数值在0.6—0.8之间. 从以上分析可以看出, 恢复系数值随颗粒尺寸的增大而增大.

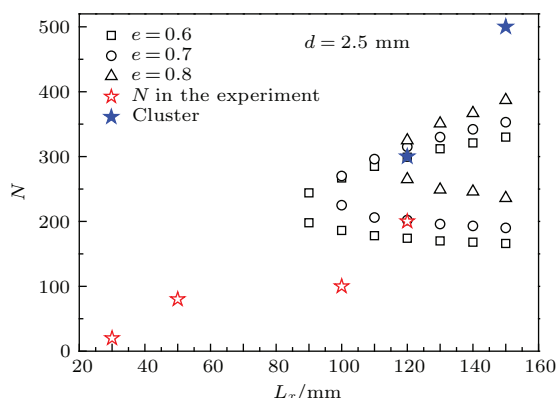


图5 (网刊彩色) 直径为2.5 mm时不同恢复系数下对应的团簇形成区域相图

Fig. 5. (color online) The (N, L_x) phase diagrams of clustering regime for different particle coefficients of restitution. Particle diameter is 2.5 mm. Stars are the observation locations. Hollow star means no clustering. Solid star means cluster being observed.

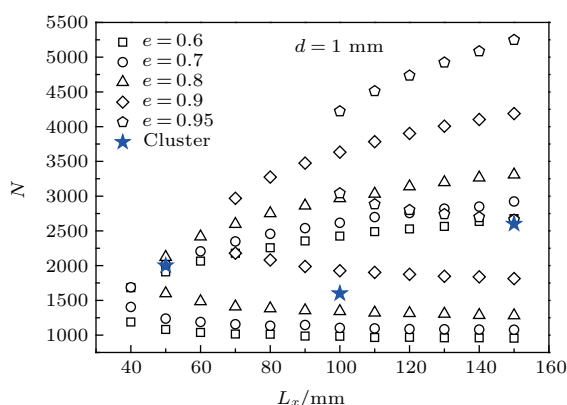


图6 (网刊彩色) 直径为1 mm时不同恢复系数下对应的团簇形成区域相图

Fig. 6. (color online) The (N, L_x) phase diagrams of clustering regime for different particle coefficients of restitution. Particle diameter is 1.0 mm. Stars are the observation locations. Hollow star means no clustering. Solid star means cluster being observed.

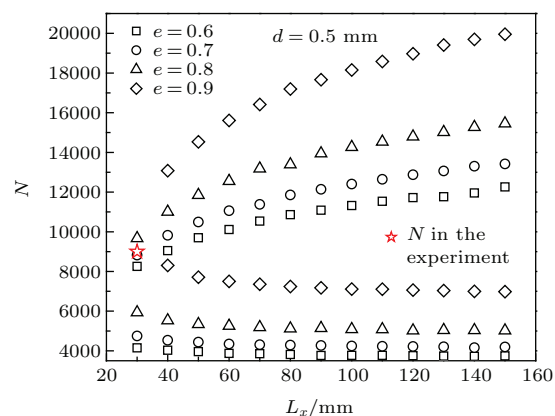


图7 (网刊彩色) 直径为0.5 mm时不同恢复系数下对应的团簇形成区域相图

Fig. 7. (color online) The (N, L_x) phase diagrams of clustering regime for different particle coefficients of restitution. Particle diameter is 0.5 mm. Stars are the observation locations. Hollow star means no clustering. Solid star means cluster being observed.

4 结 论

颗粒体系的耗散性质会导致颗粒气体体系内部出现局部的团簇行为, 这一现象只停留于理论计算分析与分子动力学模拟的层面上, 而从未被真实地观察到, 本文通过落塔实验成功观察到微重力环境下颗粒气体团簇现象, 并针对实验可测参数 N - L_x 用类范德瓦耳斯相分离模型预测两相共存(团簇)区域, 我们将实验观察到团簇的 N - L_x 值与理论计算结果进行比对, 间接获得了十分有用的钛颗粒的恢复系数值(直径为2.5 mm的钛颗粒恢复系数大于0.8, 直径为1 mm的钛颗粒恢复系数为0.8, 直径为0.5 mm的钛颗粒恢复系数在0.6—0.8之间). 这对于进一步精确确定相分离分界线提供了重要的参数值, 也为实现在零重力环境下颗粒气液两相分离实验奠定了基础.

感谢中国科学院力学研究所解京昌老师和林海老师对实验过程的帮助, 感谢中国科学院物理研究所刘锐老师对本文理论计算的指导.

参考文献

- [1] Sun Q C, Wang G Q 2009 *Introduction to Granular Material Mechanics* (Beijing: Science Press) p73 (in Chinese) [孙其诚, 王光谦 2009 颗粒物质力学导论 (北京: 科学出版社) 第73页]
- [2] Jaeger H M, Nagel S R 1996 *Rev. Mod. Phys.* **68** 1259
- [3] Campbell C S 1990 *Ann. Rev. Fluid Mech.* **22** 57

- [4] Grasselliy Y, Bossis G, Goutallier G 2009 *Europhys. Lett.* **86** 60007
- [5] Aranson I S, Tsimring L S 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 641
- [6] Pöschel T, Schwager T 2005 *Computational Granular Dynamics: Models and Algorithms* (Berlin: Springer)
- [7] McNamara S, Young W R 1994 *Phys. Rev. E* **50** 28
- [8] Argentina M, Clerc M G, Soto R 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 044301
- [9] Cartes C, Clerc M G, Soto R 2004 *Phys. Rev. E* **70** 031302
- [10] Khain E, Meerson B 2002 *Phys. Rev. E* **66** 021306
- [11] Khain E, Meerson B, Sasorov P V 2004 *Phys. Rev. E* **70** 051310
- [12] Livne E, Meerson B, Sasorov P V 2002 *Phys. Rev. E* **66** 050301(R)
- [13] Diez-Minguito M, Meerson B 2007 *Phys. Rev. E* **75** 011304
- [14] Hou M Y 2008 *Chin. J. Space Sci.* **28** 1 (in Chinese) [厚美瑛 2008 空间科学学报 **28** 1]
- [15] Hou M Y 2008 *Physics* **37** 729 (in Chinese) [厚美瑛 2008 物理 **37** 729]
- [16] Liu R, Li Y C, Hou M Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4660 (in Chinese) [刘锐, 李寅闯, 厚美瑛 2008 物理学报 **57** 4660]
- [17] Liu R, Li Y C, Hou M Y, Meerson B 2007 *Phys. Rev. E* **75** 061304
- [18] Hu W R, Zhao J F, Long M *et al.* 2014 *Microgravity Sci. Technol.* **26** 159
- [19] Qi N M, Zhang W H, Gao J Z, Huo M Y 2011 *China Academic Journal Electronic Publishing House* **29** 95 (in Chinese) [齐乃明, 张文辉, 高九州, 霍明英 2011 中国学术期刊电子出版社 **29** 95]
- [20] Jenkins J T, Richman M W 1985 *Arch. Rat. Mech. Anal.* **87** 355
- [21] Wei M, Wan S X, Yao K Z, Xie J C 2007 *China Academic Journal Electronic Publishing House* **4** 1 (in Chinese) [韦明, 万士昕, 姚康庄, 谢京昌 2007 中国学术期刊电子出版社 **4** 1]
- [22] Brey J J, Dufty J W, Kim C S 1998 *Phys. Rev. E* **58** 4638
- [23] Carnahan N F, Starling K E 1969 *J. Chem. Phys.* **51** 635

Experimental study of clustering behaviors in granular gases*

Wang Hua¹⁾²⁾ Chen Qiong²⁾ Wang Wen-Guang²⁾ Hou Mei-Ying^{2)†}

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

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

(Received 29 June 2015; revised manuscript received 27 September 2015)

Abstract

Granular materials are widely spread in nature and in industry. Owing to the inelastic collisions between particles and frictions among particles, granular systems are dissipative in nature. This intrinsic dissipative nature causes local clustering in granular gas systems. This is a unique phenomenon compared with the molecular gases. Understanding and predicting the condition and parameter values when this phenomenon happens will be helpful for us to gain knowledge of the conditions of clustering or pattern formations in non-equilibrium complex systems. The clustering phenomenon in granular gas is analyzed using phase-separation modeling of van der Waals-like molecules. The results from the model are verified by molecular dynamics numerical simulations. However, due to the influence of the gravity, experimental verification is difficult in laboratory. In this work, we perform an experiment in micro-gravity environment provided by the drop tower of National Microgravity Laboratory Chinese Academy of Science. In the experiment we for the first time observe the phase-separation clustering phenomenon. Comparing the observation condition with the model prediction, we are able to indirectly obtain the restitution coefficients of particles used in the experiment. A model calculation for the spinodal regime under experimental conditions is performed for possible particle restitution coefficients, and a comparison with the experimental observation allows us to justify the values of the restitution coefficients. It is found that the coefficient is larger for bigger particles. For $d = 2.5$ mm titanium particles, the restitution coefficient is higher than 0.8; for $d = 1$ mm titanium particles, the restitution coefficient is about 0.8, and for $d = 0.5$ mm titanium particles, the restitution coefficient is between 0.6 and 0.8. This useful result can be essential for comparing experimental observation with the theoretical and the numerical results, and is crucial to the success in the SJ-10 satellite experiments.

Keywords: granular gases, low-gravity, cluster, drop tower

PACS: 45.70.-n, 45.70.Mg

DOI: 10.7498/aps.65.014502

* Project supported by the “Strategic Priority Research Program-SJ-10” of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDA04020200), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11274354, 11474326), and the Special Fund for Earthquake Research of China (Grant No. 201208011).

† Corresponding author. E-mail: mayhou@iphy.ac.cn