

颗粒气体的团簇行为*

厚美瑛[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2016-04-03收到

[†] email: mayhou@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20160404

Clustering behavior in granular gases

HOU Mei-Ying[†]

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

摘要 颗粒体系由于粒子间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。实践十号卫星为我们提供了长时稳定微重力条件,使得实验观察成为可能,有望获得团簇形成及颗粒冷却行为等颗粒动力学重要实验结果。

关键词 颗粒物质, 微重力, 团簇

Abstract Owing to the inelastic collisions and frictions among particles, granular systems are dissipative in nature. This intrinsic dissipative nature causes clustering in granular gas systems, the condition when this phenomenon happens will be helpful for gaining knowledge of pattern formations in non-equilibrium complex systems. The clustering phenomenon in granular gas can be modeled theoretically using phase-separation of van der Waals-like molecules. The prediction has been verified by molecular dynamics numerical simulations. However, due to the influence of the gravity, experimental verification is difficult in laboratory. SJ-10 provides us such an opportunity to gather important experimental evidences.

Keywords granular matter, microgravity, clustering

颗粒物质广泛存在于宇宙中,远至星际物质,近至和我们生活紧密相关的建筑材料(如土壤和沙石)、农产品(如米和豆等)、矿产品(如煤和铁)以及化工和医药原材料等等,都可视为颗粒物质(图1)。颗粒物质可以说是日常生活中除了水之外我们接触最多的一种物质形态。一些自然现象像沙尘暴、雪崩、地震、泥石流等地质灾害更是

与颗粒物质的运动行为息息相关。颗粒物质的运动行为研究还与我国21世纪长期战略任务“一带一路”的建设所涉及到人类活动与地球环境互动中的海床和脆弱陆域重大工程建设与安全问题息息相关。另外,近半个世纪以来,我国的航天工程技术飞速发展。星球探测执行宇宙探索任务时,不同重力场下土壤物理力学特性和动力学研究关系到诸如着陆器在星球表面的安全着陆等关键问题。颗粒材料的物理认识和发现将对世界经济和人类活动产生重要影响。

*地震行业科研经费(批准号:201208011)资助项目;中国科学院空间科学战略性先导科技专项(批准号:XDA04020200)

发展建立颗粒物质运动行为的普适性动力学理论还具有科学层面上的重大意义。在美国《科学》杂志(*Science*)创刊125年之际,颗粒物质运动行为的普适性动力学与湍流研究同时被列举为125个尚未解决的重大科学问题之一。

宇宙中一切具有质量的离散态物质,大到天体、小到分子均可视为颗粒物质。在这里,我们只考虑尺寸大于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的宏观颗粒所形成的体系。这样的体系,热扰动,即粒子的布朗运动,与颗粒的平动动能相比可以忽略不计。大量的宏观粒子形成的集合体我们称之为颗粒体系。它是具有离散性、结构无序性和能量耗散性的多体系统。

与分子气体进行比较,这种由快速运动的宏观粒子形成的颗粒体系,由于颗粒间的碰撞为非弹性碰撞,且碰撞伴有能量的损耗,使得局部凝聚或团簇形成成为可能。团簇形成的机理与条件一直是物理学家感兴趣的焦点之一,对此现象的认知有助于人们理解复杂体系自发形成的有序结构和麦克斯韦妖等现象的机理,以及建立非平衡态统计模型。

我们将这种颗粒体系出现的局部凝聚或团簇现象看成分子气体的气液共存现象,局部凝聚现象的出现有如在分子气体中出现气液共存相的液滴。我们以气液相分离为基础,建立颗粒气体相分离理论模型^[1],来解释颗粒体系中局部凝聚的团簇现象。理论虽然得到了分子动力学模拟的校验,然而由于宏观颗粒的运动行为受重力的影响,现象的观察难以实现,更谈不上系统的实验检验。在实践十号返回式科学实验卫星上,我们将在国际上首次在稳定的、数小时量级的较长微重力时间下,系统地进行颗粒流体的气液相分离和颗粒分仓聚集实验研究,有望观察到颗粒团簇和颗粒分仓聚集(麦克斯韦妖)现象,获得颗粒气体类范德瓦耳斯气体分子相分离理论模型验证数据,完善颗粒气体团簇形成机理的模型,进而获得空间颗粒物质运输的方法。

实践十号卫星的颗粒物质箱(见图2)分两个部分,单仓实验主要包含由两个活塞隔开的三个独立颗粒仓,双仓实验包含由活塞振动驱动的以窗



图1 颗粒物质



图2 实践十号颗粒物质箱的三层结构:上层为电控装置,中层为双仓实验模块层,下层为单仓实验模块层



图3 (a)国家微重力实验室落塔;(b)落舱;(c)实验装置

口相连的两个连通仓。

利用实践十号卫星约两周的在轨运行时间,我们将开展以下研究:

(1)单仓部分:通过活塞激振颗粒,以摄像拍照来观察在不同振动参数和颗粒数密度条件下,

颗粒的运动行为与团簇的形成情况,得到颗粒流体的气液相分离实验验证,解决完善颗粒流体力学模型的科学问题。

(2)双仓部分:利用宏观颗粒内禀的耗散性质,通过以不同振动参数激振不同颗粒数密度的连通仓中的颗粒,观察颗粒在两仓中的分布情况,得到微重力条件下颗粒分聚不同仓的相图,为颗粒物质在空间可能的定向输运提供实验依据与理论基础。

利用中国国家微重力实验室落塔(图3)的3.3 s短时微重力和德国不莱梅大学应用空间技术与微重力中心(ZARM, 图4)上抛式落塔的9.3 s短时微

重力,我们分别在2015年2月和2016年1月各进行了一系列地面短时微重力预实验,初步成功观察到了悬浮颗粒的团簇现象^[2]。

2015年2月在国家微重力实验室落塔预实验中,我们将样品仓分隔为宽度和深度一致(50 mm×10 mm)、长度 L_x 不同的5个样品池,置于一直线电机上,样品仓沿 x 方向振动,图5显示直径2.5 mm的钛颗粒在不同的 (L_{xi}, N_i) 样品池中的聚集情况,由图5(b)可见, (L_{xi}, N_i) 为(150, 500)时观察到明显的颗粒团簇聚集。其他仓颗粒处于气态分布。

2016年1月在德国不莱梅上抛式落塔9.3 s短时微重力试验中,我们用实践十号鉴定件的单双仓进行微重力预实验,对于单仓和双仓颗粒在每秒500帧的高速摄像观察中,得到团簇聚集和冷却在9 s微重力时间内的动态过程。图6给出一组单双仓实验观察的例子。单仓中左右两仓为直径1 mm的钛珠,中间仓为直径2 mm钛珠。图6(a)显示左仓(体积分数为0.02)为气态分布,右仓(体积分数为0.04)有局域团簇,中间仓(体积分数为0.09)有团簇分布。图6(b)显示在单边(左边)活塞

振动驱动下,直径1 mm颗粒(对双仓而言体积分数为0.02,单仓布居时为0.04)在填充少量大颗粒(2mm 直径)时在冷端(右端)有局域团簇。

将部分实验现象与分子动力学模拟相图^[3, 4]进行对比(图7)。图7(a)中纵轴 r 为颗粒半径与样品仓长度比,横轴 η 为颗粒的体积分数。相图中的4个区域分别为气体分布区(I区),局域团簇区(II区),团簇区(III区)和集体弹跳区(IV区)。不同颜色的星号为对应的实验点。实验数据点与模拟相图符合得很好,除了没有观察到反弹现象。图7(b)纵轴为样品仓长度与颗粒半径的比值 (δ/R) ,

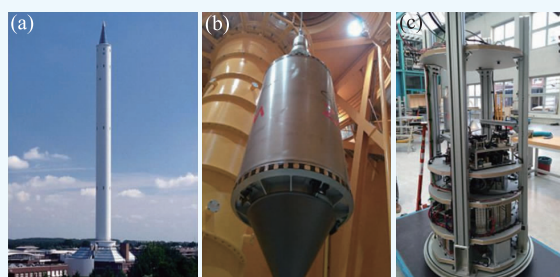


图4 (a)德国ZARM上抛式落塔;(b)落舱;(c)实验装置

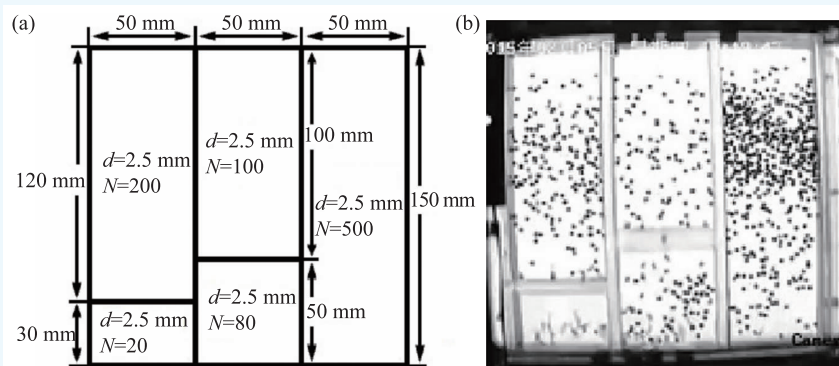


图5 在不同 (L_{xi}, N_i) 样品仓中观察到的颗粒分布情况^[2]

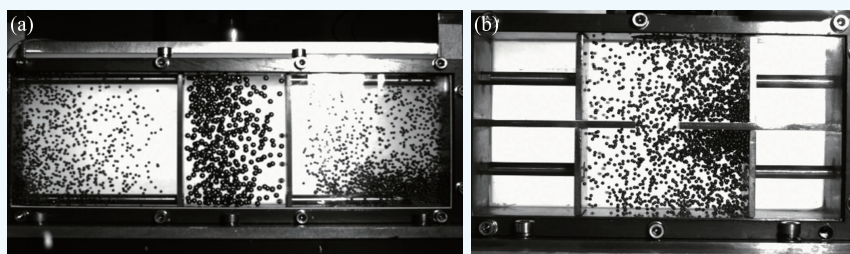


图6 (a)单仓颗粒的团簇观察;(b)双仓团簇分聚观察

横轴 ϕ 为颗粒的体积分数。我们选择填充的颗粒数使得实验点能在考虑单仓体积和双仓体积时对应的体积分数能跨过模拟相图中气态分布和团簇区的分界线。由于双仓分聚形成需要的微重力时间一般长于9 s, 图6

(b)观察到局域团聚现象, 但是左右仓分聚现象不明显。

实践十号提供的长时稳定微重力条件将使得

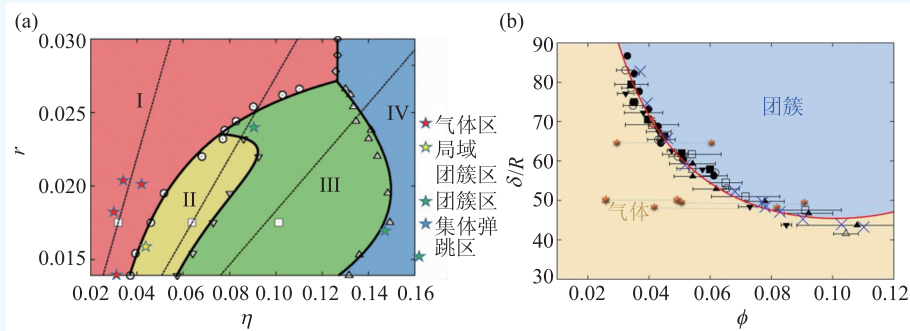


图7 (a) 实验点与单仓模拟相图^[3]比较; (b)实验点与双仓模拟相图^[4]比较

本项科学实验成为可能, 我们期望获得团簇形成与分聚、以及运动颗粒的冷却行为等颗粒动力学重要实验结果。

参考文献

- [1] Liu R, Li Y C, Hou M Y *et al.* Phys. Rev. E, 2007, 75:061304
 [2] 王花, 陈琼, 王文广 等. 物理学报, 2016, 65(1):014502
 [3] Opsomer E, Ludewig F, Vandewalle N. Phys. Rev. E, 2011,

84:051306

- [4] Opsomer E, Ludewig F, Vandewalle N. EPL, 2012, 99:40001

读者和编者

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕——<物理>四十年集萃》

部特推出优惠订阅活动: 向编辑部连续订阅2年《物理》杂志, 将获赠《岁月留痕——<物理>四十年集萃》一本(该书收录了从1972年到2012年在《物理》发表的40篇文章, 476页精美印刷, 定价68元, 值得收藏)。

希望读者们爱上《物理》!

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

(1) 邮局汇款

收款人地址: 北京603信箱, 100190

收款人姓名: 《物理》编辑部

(2) 银行汇款

开户行: 农行北京科院南路支行

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持, 《物理》编辑

户名: 中国科学院物理研究所

帐号: 112 501 010 400 056 99

(请注明《物理》编辑部)

咨询电话: 010-82649266; 82649277

Email: physics@iphy.ac.cn

