

空间环境颗粒物质运动行为的研究*

厚美瑛[†]

(中国科学院物理研究所 北京凝聚态物理国家实验室 北京 100190)

摘要 颗粒体系是一种动力学特性未被很好理解的新类型凝聚态物质. 对微重力环境下颗粒物质运动行为的研究不论在基础物理或太空探测中都具有重大意义. 文章回顾了过去 10 年来国内外在无重力环境中以振动作为驱动源的颗粒物质运动空间实验研究所取得的进展, 并展望了颗粒物质运动的物理规律的研究前景.

关键词 微重力 颗粒物质 动力学

Granular behavior in microgravity

HOU Mei-Ying[†]

(Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract A granular system is a new kind of condensed matter, for which a full dynamic description is still not available. An understanding of granular behavior in microgravity is of great importance not only for basic research in physics but also for the exploration of space. In this article we summarize the achievements obtained so far in the study of granular motion driven by vibration under microgravity conditions. Future research in this field is also discussed.

Keywords microgravity, granular medium, kinetics

颗粒物质广泛存在于星球表面和人类生存的环境中. 广义地说, 一切离散态物质都可归为颗粒物质体系, 或用颗粒模型处理, 如公路上的车辆、路上的行人, 以致宇宙空间的物质等. 颗粒物质不同于一般固体、液体和气体. 其运动行为与普通物质不同, 显示出奇异的、有时有悖于常理的特性. 对于这类颗粒物质的运动规律的研究已经引起物理学家广泛的关注^[1-3]. 已故的诺贝尔奖得主、著名理论物理学家 de Gennes 曾提出将颗粒物质列为一种新类型的凝聚态物质. 这方面的研究现已成为一个受到重视的前沿问题, 比如“颗粒流动的原理”已被列为“集合态物质(cooperative matter) 前沿”的 11 个大问题之一; “颗粒流的动力学理论”被美国“Science”杂志列为当今 125 个科学大问题之一.

颗粒的运动行为在太空勘探中扮演重要角色. 火星表面常年曝露在沙尘暴中. 在火星表面上建立任何结构形式的建筑物或其他装置, 均应能抵挡得住大量的沙尘暴. 除此之外, 不久的将来人类在月球或

火星上的活动也使得对颗粒流的认识成为必须探究的空间问题之一. 火星的泥土含有水分, 其中的氧和氢可能用来供维持生命. 月球土壤有充足的氧, 可以用来维持月球勘探. 实现这些元素的抽取必须要对这些土壤进行某种操作. 欲得到有效并且长时间操作的装置, 对颗粒流的精确控制是至关重要的. 空间操作允许的误差远小于地面的同等实验所要求的. 因此空间勘探急需我们改进现有的对颗粒流动的基础认识. 现有的适用于地面的经验公式并不适用于其他重力环境, 我们仍需改进我们的基础科学认知, 为在太空操作颗粒物质设计更精确的装备.

在空间环境下, 颗粒(如气体分子)以悬浮形式存在, 由于非弹性碰撞引起的能量损耗, 颗粒可能会产生聚集, 这是气体分子系统所没有的. 这一独特性质使得即使是一个简单的颗粒系统也很难清楚描

* 国家自然科学基金重大国际合作项目(批准号: 10720101074)

2008-09-16 收到

[†] Email: mayhou@iphy.ac.cn

述,空间实验的观察数据变得尤为重要.对微重力环境下颗粒物质运动行为研究在基础物理与太空探测中都具有重大的意义.

颗粒物质的性质及动力学研究于1990年代起被列入美国及欧洲空间局空间科学研究重点项目之一.美国宇航局(NASA)于1996年在STS-79,1998年在STS-89和2001年在STS-107太空探针火箭上开展了颗粒物质的力学性质实验,在微重力环境下进行了以振动干、湿颗粒来模拟地震条件的实验,成功地得到了其动力学过程的图像以及压力数据.NASA计划开展的“微重力颗粒流动实验”还包括:重力与颗粒物质项目(研究微重力条件下三维颗粒体系力链链长与数目的变化)、碰撞剪切流的颗粒分层项目(研究微重力条件下颗粒的分层机制)、颗粒物质的静电学研究项目(研究同种电荷颗粒短程相吸引的机理),和微重力装置中的固-气相互作用项目(研究微重力条件下颗粒流动时歇气体对颗粒运动的影响).法国的物理学家Falcon等人^[4]于1998年在Mini-Texus五号太空探针火箭上在微重力条件下首次观察到三维颗粒气-凝相变,论文发表于1999年的“Phys. Rev. Lett.”上.法国航天局提供失重飞机、火箭和空间站等各种微重力实验平台,对颗粒气体的运动行为和统计性质进行研究^[4-9],使得法国目前的研究水平处于遥遥领先地位.

目前国内,在中国科学院和中国航天局的支持下,中国科学院物理研究所于2006年9月在实践八号育种卫星上首次开展了对微重力条件下颗粒物质在小幅振动驱动下的运动行为的研究^[10].此项目得到法国航天局的支持,并与法国方面相关研究小组一起,利用抛物线飞行,对失重情形下的颗粒运动行为进行研究,得到 g -跳(抛物线飞行时,飞机的抖动带来的重力场变化称为 g -跳)与振动驱动的颗粒运动的关系.通过分析和统计所有这些实验数据,发现颗粒气体的速度分布不是通常分子气体的麦克斯韦分布,而是满足一种非高斯的指数分布律.

下面我们介绍在空间环境中,对非弹性碰撞引起能量损耗的气态悬浮颗粒的运动行为规律进行研究所取得的进展,主要阐释在微重力情况下颗粒气体在低密度(Knudsen区域)和较高密度(平均自由程远小于系统尺寸)两种条件下颗粒运动规律的不同,并介绍由这一套颗粒微重力实验系统发展出来的可用于准确测量颗粒的恢复系数的技术手段.基于这些实验和结果,我们还将讨论不同情况下理论

模型的有效性及其局限性.

最早的空间颗粒运动实验研究是1998年在Mini-Texus五号太空探针火箭中进行的^[4],该实验通过振动驱动方形容器(边长 $L=10\text{mm}$)中填充的若干层颗粒(直径 $d=0.4\text{mm}$)并观察这些颗粒的运动行为.实验所观察到的颗粒的分布状况如图1所示,其中从左向右容器中的颗粒层数分别为 $n=3, 2, 1$ 层,容器以正弦方式上下振动,图1(a)和(b)分别为容器振动至最上方和最下方时观察到的情形.由此可以看到(1)当 $n=1$ 时,整个体系处于均匀分布的颗粒气体状态,此时颗粒的平均自由程 l_c 大于容器的特征尺寸 L ,气体非常稀薄并且每个颗粒差不多是孤立的,即体系处于Knudsen区域;当 $n=2$ 和3时,颗粒与颗粒之间的碰撞概率增加,由于耗散颗粒在容器中部形成团簇,而上下部分为较稀疏的颗粒气体状态,颗粒通过团簇的“蒸发”和“凝结”的机制,确保此两相之间的平衡.(2)在所有的情况中,临近器壁处都存在清空区,这是因为颗粒的运动速度小于驱动激发的速度,驱动过程实质上是一个“超声”性质的压缩过程.

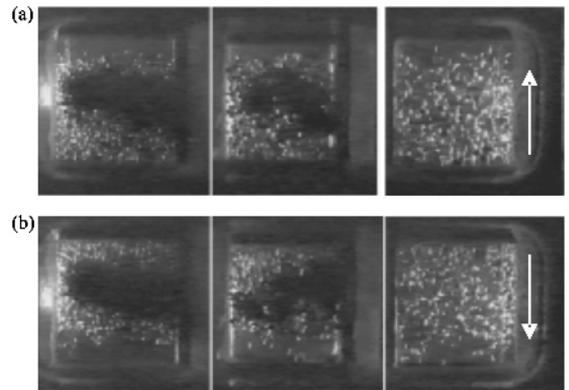


图1 Mini-Texus-5太空探针火箭中的空间颗粒运动实验图像记录(振动频率与振幅分别为60Hz和1mm)

颗粒数目的改变能够导致颗粒气体分布的本质性变化,这一实验结果告诉我们,颗粒这样的耗散体系的物理本质是多尺度的,体系因密度或体积的变化存在相转变过程.为了研究这其中的物理实质,一系列的实验在法国科学家的努力下展开,他们在微重力环境下系统地由极低数密度逐渐增加颗粒数目来研究颗粒气体的物理特性和运动行为.

在随后的Maxus 5^[5]和Maxus 7^[6]火箭上的实验中,Pierrer等人在不同尺寸容器中放入不同数目的颗粒,如图2所示,其中图2(a)颗粒数目最少的盒子里只放有2颗.从图中可以观察到类似于图1

中的分布形态. 在粒子数密度足够大的区域或容器里, 甚至可以观察到颗粒按照晶格紧密排列. 对于只有两个颗粒的容器, 则出现周期性的“超声压缩”, 最终达到一个受迫的共振状态. 在这个过程中, 由于颗粒数目较少, 并且在受迫情形下两个颗粒的运动行为渐趋一致, 使得颗粒与颗粒之间的相互碰撞概率很小, 最终几乎对整个体系没有影响, 颗粒能够稳定地处于共振状态.

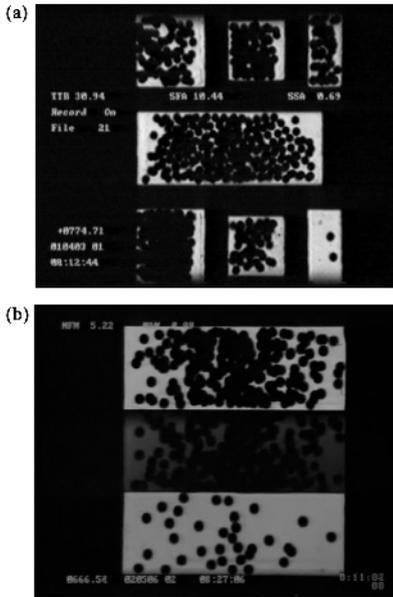


图2 Maxus 5 火箭 (a) 和 Maxus 7 火箭 (b) 上的空间颗粒运动实验图像记录 (振动频率与振幅分别为 10.5 Hz 和 3 mm)

这种稳定的共振态 给物理学家们提供了一个很好的测量颗粒碰撞的恢复系数的手段. 颗粒与器壁的碰撞可以很容易地通过压力传感器以脉冲的形式记录下来. 对于连续的碰撞过程, 两次碰撞之间的时间可以通过记录的数据准确地得到, 然后根据固定的容器尺寸, 在共振情形下即可计算出颗粒在两次碰撞之间的飞行速率, 于是恢复系数即可根据其定义公式计算得到. 由于这一方法非常简便, 非常适宜大量数据的获取, 而且统计平均的结果能够给出非常精确的恢复系数值. Garrabos 等人^[7-9]在空中客机 A300-0g 的抛物线飞行实验中设计了如图 3 所示的实验装置, 利用此方法对颗粒的基本物理属性恢复系数进行了测量. 他们发现, 在很宽的速度范围内, 颗粒碰撞的恢复系数随碰撞的速度变化很小. 在同样的实验装置内, Garrabos 等人还放入更多数目的颗粒, 进一步研究气体分布状态的颗粒对容器壁作用产生的冲量分布, 实验结果如图 4 所示 (图中 PDF 为几率分布函数, I 为撞击强度, v 为颗粒飞行速度, N 为颗粒数, f 为容器振

动频率, A 为容器振动的振幅). 可以看到, 不同实验条件下的撞击强度 I 标度化后分布函数 $\rho(I)$ 满足指数分布律. 由于 I 的大小与球的速度 v 是线性相关, 因此 $\rho(v) \propto \exp\{-v/(kA\omega)\}$ (k 是依赖于在容器中颗粒数目的参数), 即速度分布满足 $f(v) \propto (1/v) \exp\{-v/(kA\omega)\}$. 更多的实验结果给出这一速度分布规律至少在 $0.3 (N=12) < n < 1.2 (N=48)$ 的范围内和 $A < 2.5 \text{ mm}$, $30 \text{ Hz} < f < 120 \text{ Hz}$ 的振动条件下是成立的.

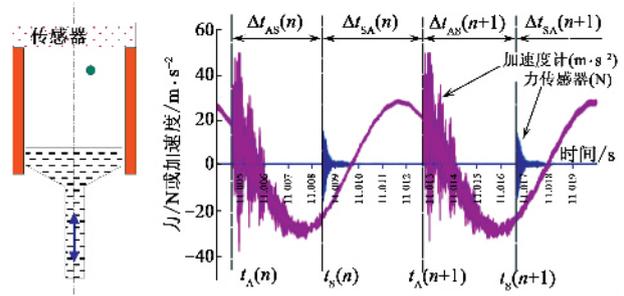


图3 失重飞机 A300-0g 实验装置图及测量得到的典型信号

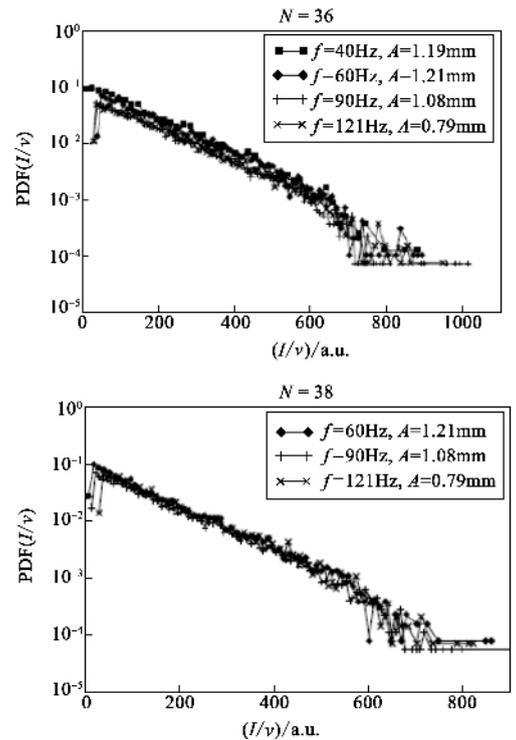


图4 在失重飞机实验中, 在颗粒数 $N=36, 48$ 的情况下 (样品池的直径 $D=13 \text{ mm}$, 样品池的高度 $H=10 \text{ mm}$, 钢珠直径 $d=2 \text{ mm}$), 通过传感器测量撞击强度 I 的典型几率分布函数

颗粒气体的速度分布与分子体系的麦克斯韦分布不同, 如何从物理上去理解是非常重要的. 一个简单的解释是, 振动壁靠碰撞输入的是动量, 而不是类似于分子体系中的温度或能量, 整个体系的物理量应该基于“动量统计”, 而非“热统计”, 于是类似于

麦克斯韦分布律的推导,可以很容易得到上面给出的指数正比于 v 而非 v^2 的分布规律;另一个解释是将气体根据密度分成两部分,边界附近仍然是 Knudsen 机制,容器的中心几乎没有受到激励,这两部分的耦合将导致边界处气体的速度分布为 $f(v) \propto (1/v) \exp\{-v/(kA\omega)\}$.

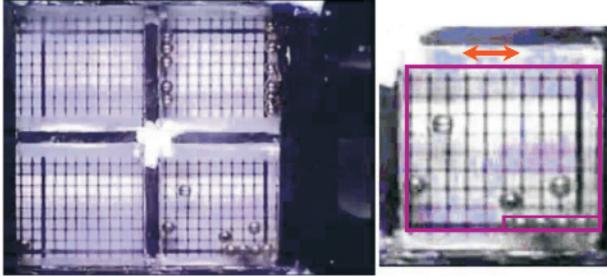


图5 摄像记录的育种卫星实验样品池中颗粒的运动轨迹

由于分布律问题是统计物理的基础,要建立合适的颗粒统计学理论,必须研究清楚颗粒体系的分布律问题.为此,在2006年的 SJ-8 卫星上,就这一问题进行了进一步的实验研究^[10].实验容器如图5所示.整个体系基本是一个准二维的系统,这样就可方便地通过拍摄的手段直接获取颗粒的运动情况,并通过粒子跟踪方法得到颗粒在任一时刻的位置和运动速度.分析数据取自图5中右图所示容器的实验结果,其中包含4个运动颗粒.长时间的统计结果(如图6所示)给出,在不同的振动条件下,颗粒的两个维度上的速度几率分布函数均能很好地满足指数分布律,即 $\text{PDF}(v) \propto \exp\{-[v/v_0]\}$.可见这种对传统分子体系的麦克斯韦分布律的偏离在颗粒体系中是非常普遍的,由于耗散性质,颗粒气体满足指数类型的分布律.这其中的物理机制仍有待于进一步的研究,在考虑了所有的影响参数之后,是否存在一种普适的分布规律仍然是值得思考的问题.

微重力条件提供了直接观察颗粒运动物理规律的必要环境,使得对颗粒体系的一些基本物理机制的研究成为可能.从颗粒气体的团聚行为,到统计基础上的速度分布律问题,这些研究工作无疑都有助于促进我们对颗粒体系的深入理解.虽然目前的实验数据还很有限,但是对在 Knudsen 域颗粒气体所展现的基本特征的研究,揭示了密度变化导致的颗粒气体气-凝相变的物理机制,给出了颗粒气体可能的速度指数分布规律等重要物理内容.同时,在实验过程中还发展了一种可以用来精确测量颗粒的恢复系数这一重要物理参数的实用手段.

当然这些实验结果还只是一个起步,关于颗粒

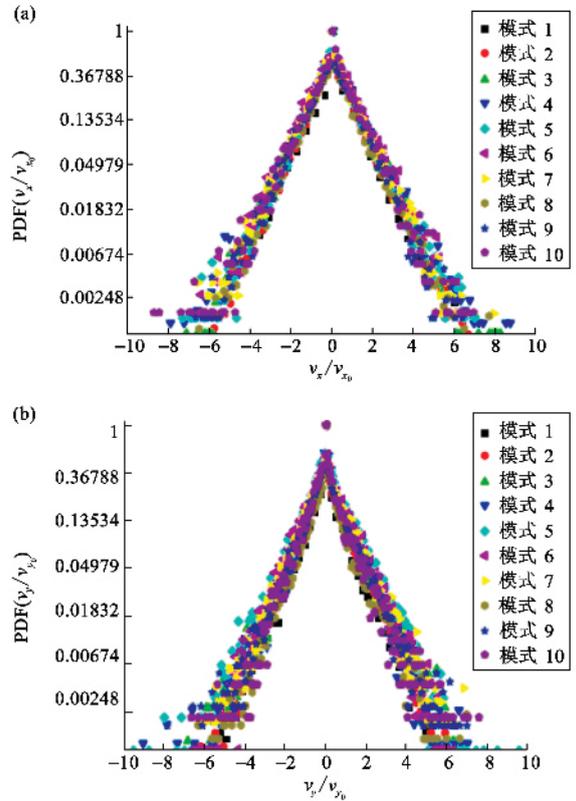


图6 准二维实验统计测量得到的颗粒气体 x 方向与 y 方向速度的几率分布函数

体系更多的重要问题的实验研究,如颗粒气体的气-凝相变的临界行为^[11]、颗粒体系的布居振荡行为^[12]和输运问题等等,仍有待于进一步的实验研究.这样的研究不仅是出于对基础科学研究的兴趣,更重要的是理解颗粒运动机制之后,在可预见的将来,在人类为了生存资源而移居其他星球时,能够知道如何去处理、操作和控制颗粒物质.

参考文献

[1] Kadanoff L P. Rev. Mod. Phys. ,1999 71 #35
 [2] de Gennes P G. Rev. Mod. Phys. ,1999 71 :S374
 [3] Jaeger H M ,Nagel S R ,Behringer P R. Rev. Mod. Phys. , 1996 68 :1259
 [4] Falcon E ,Wunenburger R ,Evesque P *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1999 ,83 :440
 [5] Evesque P ,Adjemian F. Eur. Phys. J. E ,2002 ,9 :253
 [6] Evesque ,P. GRANULAR MATERIALS :fundamentals and applications. Ed by S. Antony ,Royal Society of Chemistry 2004. 29—62
 [7] Garrabos Y ,Evesque P ,Palencia F *et al.* ArXiv tond-mat/0611613
 [8] Leconte M ,Garrabos Y ,Palencia F *et al.* Appl. Phys. Lett. , 2006 ,89 :243518
 [9] Falcon E ,Aumaitre S ,Evesque P *et al.* Europhys. Lett. ,2006 ,74 :830
 [10] Hou M ,Liu R ,Zhai G *et al.* Microgravity Sci. Technol. ,2008 ,20 :73
 [11] 刘锐,李寅,厚美瑛.物理学报,2008,57:4660 [Liu R ,Li Y C , Hou M Y. Acta Physica Sinica ,2008 ,57 :4660(in Chinese)]
 [12] Hou M Y ,Tu H E ,Liu R *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2008 ,100 : 068001