

微重力下颗粒物质动力学性质综述

黄雨^{1,2}, 赵紫阳²

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

2. 同济大学 土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 针对微重力环境下颗粒物质动力学过程表现出与常规重力场环境迥然不同特征, 综述颗粒物质振动、碰撞、流动研究成果, 分析总结颗粒动力学机制与特点, 认为应加强对微重力环境下颗粒物质动力学行为机理研究, 尽早提出微重力下颗粒动力学性质分析思路与动力学模型。

关键词: 微重力; 颗粒物质; 振动; 碰撞; 流动

中图分类号: TP242

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.16.001

Review on dynamical properties of granular materials under microgravity

HUANG Yu^{1,2}, ZHAO Zi-yang²

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In the twenty-first century, with human space activities becoming frequent, much attention is being paid to dynamic behaviors of granular materials in space microgravity environment such as on the Moon and Mars. Due to the effect of microgravity environment, the dynamic process of granular materials shows a series of characteristics which are very different from those in the conventional gravity environment. The research results of vibration, collision and flow of granular materials in microgravity environment were summarized. The dynamic mechanism and characteristics of particles were analyzed and summarized. The research on the dynamical mechanism of particles was proposed to be especially strengthened in the future study of granular materials dynamics in microgravity environment. It is expected to bring forward as soon as possible some ideas of analysis on dynamic characteristics and dynamic models about particles under microgravity.

Key words: microgravity; granular materials; vibration; collision; flow

人类在探索地外行星过程中发现诸多外太空微重力环境下发生的大型岩质滑坡碎屑流。如 Apollo 17 登月舱触发的滑坡岩屑流^[1] 面积 27 km², 在平坦月球表面运动 5 km, 最大高度落差 2 km; 火星表面 3 个大的滑坡宽度范围近 120 km, 最大竖直落差达 914 km; 火星 Gangis Chasma 南坡的滑坡堆积物^[2] 体积 100 × 109 m³, 以超过 100 km/h 速度沿槽状谷地运动 60 km。图 1 为 NASA 伽利略计划公布的土卫八 Cassini Regio 区域大型滑坡。坡体由较细土质颗粒组成, 滑坡距离达 600 km^[3]。

由此看出, 因重力场的变化, 微重力下发生滑坡过程与常规重力场发生滑坡地质灾害迥然不同, 其超强

的动力特性、大规模高速远程运动、独特的失稳机理等均远超现有知识范畴。

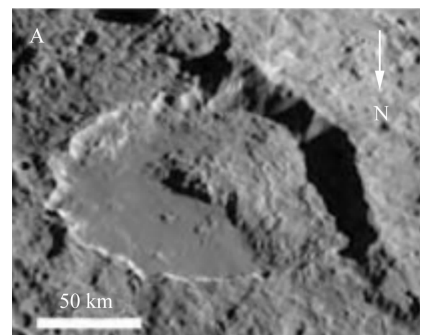


图 1 土卫八 Cassini Regio 区域滑坡^[3]

Fig. 1 Iapetus Cassini Regio regional landslide^[3]

基金项目: 国家自然科学基金(41072202); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-11-0382)

收稿日期: 2013-08-29 修改稿收到日期: 2013-12-31

第一作者 黄雨 男, 教授, 博士生导师, 1973 年生

邮箱: yhuang@tongji.edu.cn

中科院空间科技发展路线图提出, 2030 年实现首次载人登月, 2040 年建立短期有人值守的月球基地, 2050 年实现首次载人登陆火星^[4]。为此, 开展微重力环境下颗粒物质动力学行为研究, 具有明确的国家重

大需求背景,亦会促进工程地质学科在空间微重力科学领域发展。鉴于高速滑坡等地质灾害给人类生存造成的严重后果,需对微(弱)重力环境下大规模岩土流动破坏予以关注、充分考虑。研究微重力下颗粒材料的动力学行为机理及特点具有极重要现实意义及科学价值。

颗粒物质运动为触发滑坡、泥石流等自然灾害主要原因之一;但早期的颗粒物质研究更多关注颗粒物质在正常重力场中的动力学行为,对颗粒物质运动机理研究大多局限于探讨颗粒间力的作用及颗粒流动力学模型,对空间微重力环境下颗粒物质振动、碰撞、流动等动力学行为机制研究尚少。微重力环境指重力大小较地球重力加速度 980 cm/s^2 低得多的环境。颗粒物质为具有内在联系的复杂体系,整个颗粒介质在外力或内部应力发生变化时产生流动,表现出类似流体性质,形成颗粒流。研究发现,正常重力与微重力环境下所得颗粒形态特征大体相同,形态呈亚微米球形、椭球形颗粒分布,大小明显不同,微重力下颗粒是正常重力的两倍大,颗粒大小在微重力环境下较正常重力场中变化范围大得多^[5]。微重力环境中颗粒以悬浮形式存在,颗粒物质振动、碰撞、流动等动力学行为因重力水平极大减小产生明显变化,使颗粒体系发生失稳的诱因、运动过程及特点与地球重力场中迥然不同。因此,基于微重力独特的环境条件,由动力学角度出发分析颗粒物质振动、碰撞、流动等运动行为是颗粒物质研究的重要方向。研究问题有:①颗粒物质在振动、碰

撞、流动时的基本性质、特点;②影响颗粒物质振动、碰撞、流动因素;③颗粒物质振动、碰撞、流动可能诱发的后果。此研究有助于了解微重力下颗粒动力学行为机制,为人类进行空间探索提供有价值的理论依据。为此,本文对微重力下颗粒物质振动、碰撞、流动认识进行综述,分析总结颗粒动力学机制及特点。

1 振动

已有诸多对在微重力环境下以振动作为驱动源的颗粒运动行为规律进行的研究。如美国宇航局在太空探针火箭上进行的颗粒物质力学实验,用空间微重力环境中振动干、湿颗粒模拟地震条件,获得动力学过程图像^[6]。Pierrer 等^[7-8]进行的火箭实验中发现粒子数密度足够大区域或容器中颗粒按晶格紧密排列,容器中只有两个颗粒时会出现周期性“超声压缩”最终达到共振状态。中国科学院物理研究所在八号育种卫星上首次开展的对微重力下颗粒物质在小幅振动驱动下运动行为研究^[9]发现气体分布状态的颗粒速度分布满足非高斯指数分布规律,非通常的分子气体麦克斯韦分布。Garrabos 等^[10-12]在空中客机 A300-0g 抛物线飞行计划实验中研究气体分布状态的颗粒受振动时对容器壁的冲量分布,颗粒数 $N = 36, 48$ 的实验结果见图 2,其中 PDF 指几率分布函数, A 为振幅, I 为撞击强度, f 为容器振动频率。由 2 图看出,在不同实验条件下撞击强度 I 标度化后的分布函数 $p(I)$ 满足指数分布^[12]。

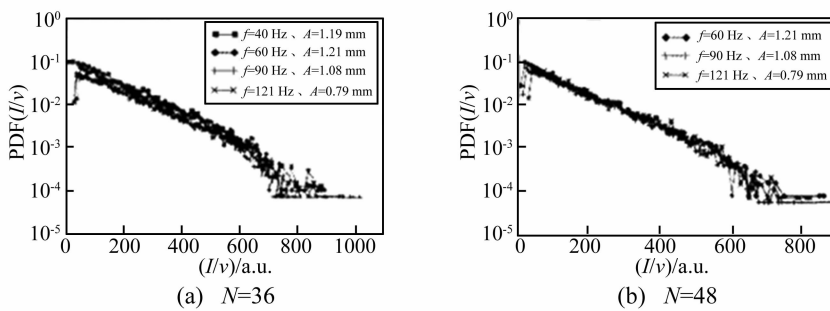


图 2 撞击强度 I 的几率分布函数^[12]

Fig. 2 Probability density functions of the impulse I of the impacts on the sensor^[12]

颗粒体系为多尺度耗散体系,因密度或体积变化存在相转变过程^[6]。Opsomer 等^[13]利用 Mini-Texus5 试验参数在三维模拟中发现微重力下振动颗粒体系存在 4 种不同动态机制: I 气态、II 局部聚集、III 完全聚集、IV 弹跳聚集。I ~ IV 动态机制相变图见图 3,其中, r 为颗粒半径, η 为颗粒密度。由图 3 看出, r, η 不同取值颗粒体系分别对应 4 种不同状态,振动会使 r, η 变

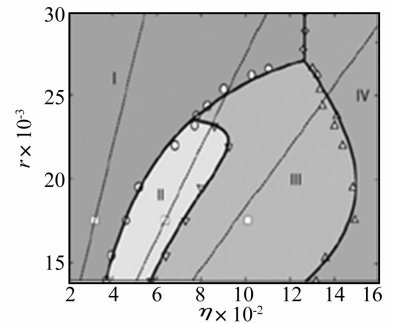


图 3 4 种不同动力学机制相变图^[13]

Fig. 3 Phase diagram distinguishing four different dynamical regimes^[13]

化,导致颗粒体系发生相变。

Saadatmand 等^[14]将一球形颗粒置于微重力状态下充满液体的容器中,平行于 z 轴方向以一定振幅、频率施加振动,由于颗粒与周围液体密度不同,颗粒被迫产生类似邻近容器壁振动。实验结果表明,液体黏稠度为 $1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时,颗粒与容器壁间压力小于液体内部其它区域压力,与最近容器壁间流体速度最高,且在其与最

近容器壁间空隙中振荡作往返运动。可见,颗粒体系的稳定性与激发振动大小密切相关。受到振动时体系内部颗粒分布及密度会发生变化,从而改变颗粒间摩擦力,力链网络中力的分布亦会变化。力链上任何局部或微小位置变动均可能引起颗粒体系较大变化,造成“蝼蚁之穴,溃堤千里”结果^[15]。即空间环境中较小振动均可能触发大型滑坡。

由此可知,微重力下颗粒物质在振动驱动下的基本性质为:① 颗粒物质数量较少时,颗粒之间发生碰撞概率较小,颗粒体系在足够大区域中可达共振状态;② 颗粒速度分布为非高斯指数分布;③ 振动颗粒体系

随颗粒半径、密度不同存在 4 种相变。

2 碰撞

空间微重力环境下以悬浮形式存在的颗粒由于非弹性碰撞致能量损耗,颗粒会产生聚集或粘结,而气体分子系统则不会^[6]。微重力下微米大小颗粒碰撞速度足够小,碰撞后颗粒相互粘结形成不规则颗粒集合体,粘结后两颗粒会绕粘结体质心旋转,集合体随颗粒的逐渐变大,会更快从周围气体中分离^[16],见图 4。由图 4 可知,两灰尘颗粒以 9 mm/s 速度发生碰撞后粘结在一起并绕其中心旋转。

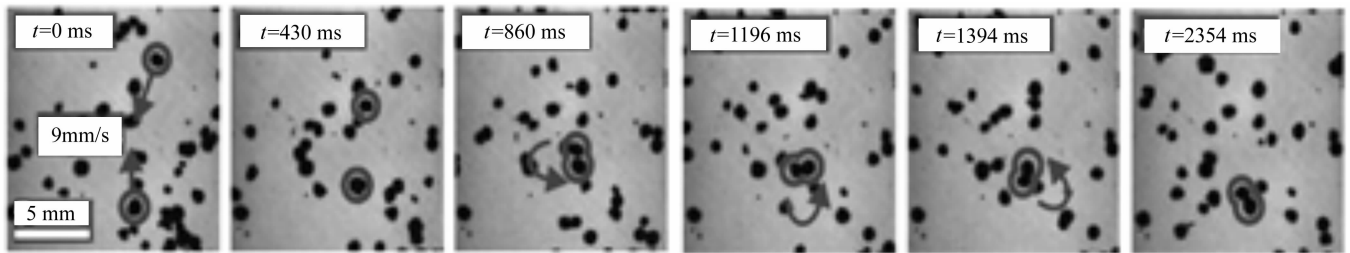


图 4 两灰尘颗粒以 9 mm/s 速度碰撞的粘结次序图^[16]

Fig. 4 An image sequence of a sticking collision between two dust aggregates at a velocity of 9 mm/s^[16]

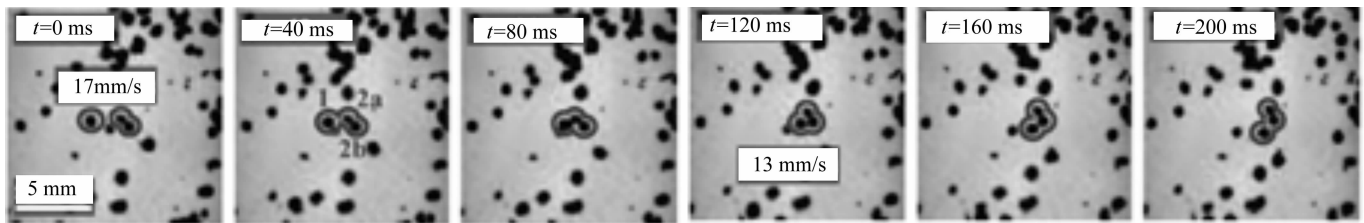


图 5 单个灰尘颗粒以 17 mm/s 速度与 2 个灰尘颗粒碰撞的粘结次序图^[16]

Fig. 5 An image sequence of a sticking collision between a single dust aggregate and a dust-aggregate dimer at a velocity of 17 mm/s^[16]

单个与 2 个灰尘颗粒发生碰撞后粘结一起的次序见图 5。Weidling 等^[16]在微重力实验中用新装置研究大小不同灰尘颗粒集合体间的自由碰撞,推断颗粒碰撞后由粘结至弹跳的分离变化并非突然,存在速度相差两数量级的过渡带,在过渡带中颗粒碰撞后可能发生粘结或弹跳。发生粘结概率会随碰撞速度减小而增大。颗粒越小,碰撞时发生粘结概率越大。

单颗粒与集合体间发生碰撞后较单颗粒间更易发生粘结。颗粒碰撞后粘结概率随碰撞速度的减小而增大,随颗粒尺寸的减小而增大^[17]。灰尘颗粒集合体碰撞后粘结会导致更大结构的形成^[18]。Blum^[19]在落塔中进行多颗粒体系以超低速碰撞试验发现,碰撞速度大于一定值时碰撞颗粒碰撞后会粘结在一起,入射颗粒贯入深度与碰撞速度有关,深度大于其半径时由目标颗粒弹跳进入射轨道。颗粒碰撞时粘结、弹跳可同时发生。由此可见,空间微重力环境下颗粒间碰撞后是否粘结取决于碰撞时颗粒速度大小,颗粒碰撞时粘

结概率随碰撞速度的减小而增大,但速度大于某临界值时颗粒碰撞后又黏结在一起。在速度相差两个数量级过渡带中颗粒碰撞后可能粘结亦可能分离。

3 流动

颗粒流研究开始于 20 世纪 50 年代。Bagnold^[20]通过对蜡球在甘油-酒精-水溶液中进行同轴剪切流变仪实验研究,揭示出颗粒的摩擦应力本构关系。Ogawa^[21]引入“颗粒温度”概念,定义平动颗粒温度为 $T = \langle c^2 \rangle / 3$,其中无规速度 $c = \langle v - u \rangle$,尖括号表示整体平均。Cundall 等开发出第 1 个研究颗粒介质力学行为的二维离散元模拟程序,获得与动光弹实验极吻合结果,成为离散元模拟颗粒运动开端。Spencer^[22]发展了以 Mohr-Coulumb 条件为基础的“双剪切”理论并用于颗粒流动研究。实验证明该模型较有效。有研究亦观察到颗粒流自发无序混合、指进、非均匀尺寸颗粒偏聚等^[23-26]。

Cundall 等首创的离散元 (DEM) 成为重要颗粒流动数值模拟方法, 即将介质离散成独立元或粒子, 单个颗粒为 1 个元, 相邻间存在几种相互作用。自然界中多数颗粒形状不规则, 大部分呈椭圆形, 用球形近似不会产生明显误差, 故圆球颗粒间相互作用成为离散颗粒动力学基础^[27]。孙其诚等^[28]据对颗粒接触作用方式不同分为 3 种模型: ① 基于接触力学的离散模型; ② 软球模型; ③ 硬球模型。其中①为基础, ②、③为基于接触力学离散模型的简化。工程中将以软球模型为主。

Hofmeister 等^[29]用玄武岩球在真空条件下准二维沙漏装置中模拟颗粒物质的流动行为, 实验测得不同重力水平下颗粒流动体积流量、休止角、摩擦角、速度、颗粒流厚度变化见图 6。据理论, 颗粒流体积流量为重力的平方根^[30], 但实验结果表明指数为 0.60, 较理论预测值偏大。颗粒物质流动速度随深度的增加而减小; 重力水平越高颗粒流动速度减小越快; 颗粒流厚度

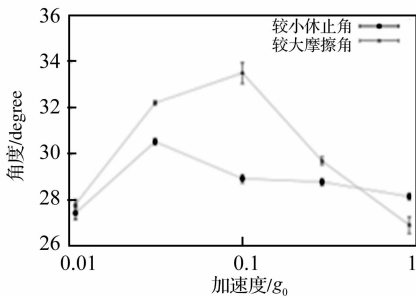


图 6 休止角、摩擦角与重力水平函数关系^[29]

Fig. 6 Repose angle and friction angle as a function of gravity level^[29]

综上可知, 颗粒物质流动时随重力水平增大颗粒体积流量呈指数增加, 速度随深度增加下降越快, 表面流厚度呈增大趋势; 摩擦角、休止角与重力水平大小相关。微重力环境下颗粒沿斜坡流动随斜坡倾角的变化而不同, 运动的岩土颗粒微重力下流动时间更长。由于重力极大减小, 颗粒物质流动特点被放大。

4 结论

颗粒物质空间动力学行为特点、机理、动力学模型、触发因素及可能产生的后果等直接关系到未来对空间的探索; 微重力条件提供了直接观察颗粒运动规律的环境, 使对颗粒体系的基本动力学机制研究成为可能。通过综述, 结论如下:

(1) 微重力环境中颗粒发生振动、碰撞、流动条件、触发因素、机制、特点及可能产生的后果需综合考虑岩土颗粒性质(大小、形状、材料)、荷载特征、外界环境等多种因素。

(2) 颗粒振动、碰撞、流动三种动力学行为间相互

随重力水平增大而增大。由图 6 可知, 摩擦角随重力的变化幅度较休止角大。

Huang 等^[31]通过利用微重力落塔设备分别采集微重力状态及 1 g 重力状态下颗粒材料沿不同倾角斜坡流动的相关数据发现, 模型箱倾角对岩土颗粒材料流动特性有较大影响。小倾角时仅部分砂土流动, 且持时较短; 大倾角时全部砂土流动, 持时较长。给定初始速度时岩土颗粒材料在微重力环境中流动持时更长、范围更大。进入微重力环境后原未获得初速度的岩土颗粒在整个实验中处于静止状态。已获得初速度的岩土颗粒则在减弱的重力场中继续流动, 且持时更长, 流动范围更广。微重力环境下运动中的岩土颗粒能量衰减较慢, 流动至模型箱尾部时能顺模型箱壁面改变方向继续流动, 最终在残余重力及颗粒间相互作用下流动停止。30°倾角下常规重力环境与微重力环境岩土颗粒流动构型对比见图 7。

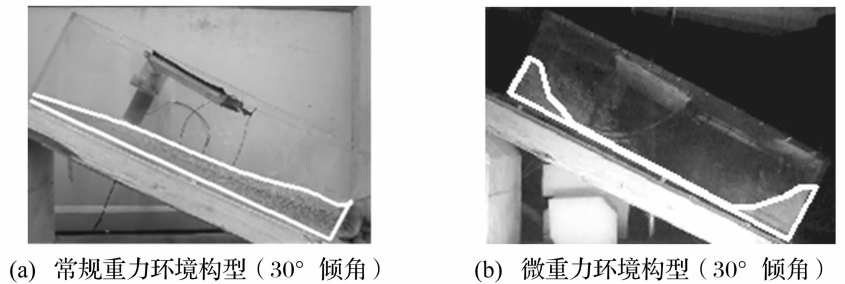


图 7 常规、微重力环境砂土颗粒流动构型^[31]

Fig. 7 Final configurations of sand particles flow in normal gravity and microgravity^[31]

作用, 可能存在相互关系, 且直接影响颗粒体系稳定性, 故需研究颗粒动力学行为与稳定性关系。

(3) 微重力条件下颗粒物质动力学模型相对滞后, 已有适用于重力场颗粒运动的多种模型是否适用于微重力下颗粒运动尚不清楚。因此需探寻适用于空间微重力环境中多颗粒相互作用及非均匀颗粒动力学特征的新理论、新模型, 指导登月、火星探索。

参考文献

- [1] Masursky H, Colton G W, El-Baz F. Apollo over the moon: a view from orbit [M]. Washington, D. C.: National Aeronautics and Space Administration, 1978, SP-362.
- [2] Malin space science systems. mars orbiter sees landslide [EB/OL]. <http://spaceflightnow.com/news/n0111/05marslandslide/>, 2001. 11. 05.
- [3] NASA. Giant landslide on iapetus [EB/OL]. <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA06171>, 2005. 01. 07.
- [4] 人民网. 中科院发布未来五十年中国科技发展路线图 [EB/OL]. <http://scitech.people.com.cn/GB/9451859.html>, 2009. 06. 11.
- [5] 徐宇. 烟尘颗粒基本特性的测试与分析[J]. 化学推进剂

- 与高分子材料, 2002 (1): 18–20.
- XU Yu. Test and analysis of basic characteristics of soot particles [J]. *Chemical propellants and polymeric materials*, 2002 (1): 18–20.
- [6] 厚美瑛. 空间环境颗粒物质运动行为的研究[J]. *物理*, 2008, 37(10): 729–732.
- HOU Mei-ying. Research on the motor behavior of particulate matter in the space [J]. *Physical*, 2008, 37(10): 729–732.
- [7] Evesque P, Adjémian F. Stress fluctuations and macroscopic stick-slip in granular materials[J]. *The European Physical Journal E*, 2002, 9(3): 253–259.
- [8] Evesqu P. *Granular materials: fundamentals and applications* [M]. Ed by S. Antony, Royal Society of Chemistry, 2004: 29–62.
- [9] Hou M, Liu R, Zhai G, et al. Velocity distribution of vibration-driven granular gas in Knudsen regime in microgravity [J]. *Microgravity Science and Technology*, 2008, 20(2): 73–80.
- [10] Garrabos Y, Evesque P, Palencia F, et al. Coherent behavior of balls in a vibrated box[EB/OL]. <http://arxiv.org/pdf/cond-mat/0611613v1.pdf>, 2006. 11. 23.
- [11] Leconte M, Garrabos Y, Palencia F, et al. Inelastic ball-plane impact: an accurate way to measure the normal restitution coefficient [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(24): 1–3.
- [12] Falcon E, Aumaître S, Evesque P, et al. Collision statistics in a dilute granular gas fluidized by vibrations in low gravity [J]. *Europhysics Letters*, 2006, 74(5): 830–836.
- [13] Opsomer E, Ludewig F, Vandewalle N. Phase transitions in vibrated granular systems in microgravity [J]. *Physical Review E*, 2011, 84(5): 1–5.
- [14] Saadatmand M, Kawaji M, Hu H H. Vibration-Induced attraction of a particle towards a wall in microgravity-the mechanism of attraction force[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2012, 24(1): 53–64.
- [15] 孙其诚, 王光谦, 胡凯衡. 颗粒物质力学几个关键问题的思考[J]. *自然科学进展*, 2008, 18(10): 1104–1110.
- SUN Qi-cheng, WANG Guang-qian, HU Kai-heng. Several key issues on granular materials mechanics [J]. *Progress in Natural Science*, 2008, 18(10): 1104–1110.
- [16] Weidling R, Güttler C, Blum J. Free collisions in a microgravity many-particle experiment. I. dust aggregate sticking at low velocities [J]. *Icarus*, 2012, 218(1): 688–700.
- [17] Beitz E, Güttler C, Weidling R, et al. Free collisions in a microgravity many-particle experiment-II: the collision dynamics of dust-coated chondrules [J]. *Icarus*, 2012, 218(1): 701–706.
- [18] Kothe S, Blum F, Weidling R, et al. Free collisions in a microgravity many-particle experiment. III: the collision behavior of sub-millimeter-sized dust aggregates [J]. *Icarus*, 2013, 225(1): 75–85.
- [19] Blum J. Astrophysical microgravity experiments with dust particles [J]. *Microgravity Science and Technology*, 2010, 22(4): 517–527.
- [20] Bagnold R A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid particles in a Newtonian fluid under shear [J]. *Proc R Soc Lond A*, 1954, 225(1160): 49–63.
- [21] Ogawa S. Multitemperature theory of granular materials [C].// Cowin S C, Satake M. *Proceedings of continuum mechanics and statistical approaches to the mechanics of granular media of US-Japan* [A]. Tokyo: Gukunjutsu bunken Fukuyukai, 1978: 208–217.
- [22] Spencer A J M. Plane deformations of ideal granular materials [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1983, 31(2): 105–122.
- [23] Shinbrot T, Alexander A, Muzzio F J. Spontaneous chaotic granular mixing [J]. *Nature*, 1999, 397(6721): 675–678.
- [24] Pouliquen O, Delour J, Savage S B. Fingering in granular flows [J]. *Nature*, 1997, 386(24): 816–817.
- [25] Maske H A, Havlin S, King P R, et al. Spontaneous stratification in granular mixtures [J]. *Nature*, 1997, 386(27): 379–381.
- [26] Baxter J, Tüzün U, Heyes D, et al. Stratification in poured granular heaps [J]. *Nature*, 1998, 391(6663): 136–136.
- [27] 吴清松, 胡茂彬. 颗粒流的动力学模型和实验研究进展 [J]. *力学进展*, 2002, 32(2): 250–258.
- WU Qing-song, HU Mao-bin. Progress on kinetic model and experimental research of granular flow [J]. *Advances in mechanics*, 2002, 32(2): 250–258.
- [28] 孙其诚, 王光谦. 颗粒流动力学及其离散模型评述 [J]. *力学进展*. 2008, 38(1): 87–100.
- SUN Qi-cheng, WANG Guang-qian. Commentary on granular flow dynamics and discrete model [J]. *Advances in mechanics*, 2008, 38(1): 87–100.
- [29] Hofmeister P G, Blum J, Hei? elmann D. The flow of granular matter under reduced-gravity conditions [C].// Nakagawa M, Luding S. *Proceedings of the 6th International Conference on Micromechanics of Granular Media* [A]. New York: AIP Publishing, 2009: 71–74.
- [30] Hagen G. *Druckund bewegung des trockenensandes* [J]. Bericht über Diezur Bekanntmachung Geeigneten Verhandlungen der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1852, 35(2): 35–42.
- [31] Huang Y, Mao W. First results derived from a drop-tower testing system for granular flow in a microgravity environment [J]. *Landslides*, 2013, 10(4): 493–501.