

文章编号:1671-9352(2009)11-0025-04

颗粒物质在二维竖直环仓内的输运及隆起现象

胡云,胡林*

(贵州大学理学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要:采用2个共轴圆筒组成了一个环形容器的,在竖直振动激励下,使颗粒物质在这个二维无水平边界的容器中振动,观察到颗粒物质出现显著的隆起及输运现象,通过跟踪拍摄方法测量了这种隆起运动对振动频率的依赖关系。

关键词:颗粒物质;频率;隆起

中图分类号: O345 **文献标志码:** A

The heaping of granular materials at different vibration frequencies

HU Yun, HU Lin*

(Department of Physics, Guizhou University, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: Granular materials move in a two-dimensional container under vertical vibration using an annular container made of two concentric cylinders in this experiment. It is obvious that granular materials are heaping and transporting horizontally. The relationship between the transformation of heaping and the vibration frequency can be clearly observed by video photographs.

Key words: granular materials; frequency; heaping

0 引言

颗粒物质在自然界中普遍存在,如粮食、沙丘、煤矿、建筑材料、药品甚至生物细胞等都统称为颗粒物质,它的存在与运动与工业、农业、环境科学有直接的关系。例如,颗粒的振动行为对选矿、材料分离、制药业、岩体稳定性与地震等现象的基础研究和应用研究具有不可忽视的重要意义。颗粒物质在振动状态下会出现类似流体的行为,如对流输运,分层、表面波动^[1-3]。实验发现许多因素可导致隆起和对流,如摩擦作用^[4]及环境空气作用^[5]等。在工程领域,尽管人们对颗粒物质振动输运的研究有着悠久历史,但是认识和描述颗粒体系运动规律,控制和处理颗粒物质的技术远没有像处理流体那样得到系统发展,许多基本规律和关键技术尚不成熟,有待大量的实验和理论研究。

实验发现平铺于振动容器里的颗粒在一定的控

制参数下会形成各种斑图,当振动加速度和频率较小时,颗粒隆起成若干振动物子^[6];而在狭长形的矩形容器中观察到颗粒形成类似孤立波的隆起,且沿着器壁水平方向输运^[6-9]。颗粒在竖直振动下的对流隆起是多种系统参量共同作用下的复杂运动。大量实验表明^[6-7],外加振动频率对颗粒的对流强度有重要影响。陈伟中等人曾经研究了隆起和对流的频率域现象^[8],即低频下对流强度随频率增加而递减,当频率增到一定值时,则对流强度不再随着频率而变化,趋于稳定。在前人的实验中,频率是作为影响对流隆起强度的辅助因素来研究,即讨论隆起的有效频率及强度影响,涉及频率范围较为粗略。通过反复试验,调整振动最大速度、颗粒尺寸等实验参数,得到颗粒隆起运动显著、隆起波形相对稳定的最佳状态 30~40 Hz。(当频率过小时,颗粒在平衡位置振动剧烈,无法形成显著对流隆起;当频率过大时,颗粒没有足够能量维持振动对流,颗粒运动停滞。)在该条件下,观察到颗粒隆起运动对频率的依赖关

收稿日期:2009-05-19

基金项目:贵州省省长基金资助项目(2006-15);贵州省科技厅基金资助项目(20072003)

作者简介:胡云(1984-),女,硕士研究生,研究方向为颗粒物质,Email:singrele211@163.com

*通讯作者:胡林(1953-),女,教授,博导,研究领域为软物质物理,Email:hulin53@sina.com

系极为敏感,且在特定频率出现隆起波形迅速坍塌及再隆起的现象,类似于振动机械波的相位突变。另外,以往实验中多是采用狭长的矩形容器^[3,7-8]来制备准二维颗粒体系,在分析和讨论实验结果时忽略容器水平边界对颗粒对流隆起的影响。本实验则使用两个等轴圆筒构成环形容器,使颗粒沿着器壁在二维无水平边界空间中运动,消除了矩形容器中侧壁形成的水平边界效应。本文的实验结果能够更真实地体现竖直振动颗粒在二维空间中的对流输运及隆起运动。

1 实验装置

为了去除水平边界对颗粒运动的影响^[9],实验采用环形容器,构成二维无水平边界的颗粒系统。如图1所示,容器由2个90.0 mm高的同轴圆筒(透明有机玻璃)组成,外筒内径为11.0 mm,内外筒间距为5.0 mm。内外两个圆筒垂直固定在水平底板上,构成了一个二维狭长空间。在环形容器中加入直径约1.0 mm的SiO₂球形颗粒(经过18目的标准筛选),颗粒床的堆积高度为35.0 mm。通过信号发生器(YE1311D)产生正弦信号,经由功率放大器(YE5871)放大后传送到振动台(JZK-5)带动容器进行竖直振动。实验中保持 $A\omega = 600$ mm/s(其中 A 和 ω 分别是振幅和圆频率, $\omega = 2\pi f$),颗粒出现对流隆起现象;缓慢增加振动频率,隆起增高并伴随着一定的水平位移;继续增加频率,得到相对稳定的隆起波形。实验时在容器外筒表面附上10.0 mm × 10.0 mm坐标网格,使用摄像机进行跟踪拍摄,则可以完整记录振动颗粒表面隆起波形在不同频率下的涨落状态。

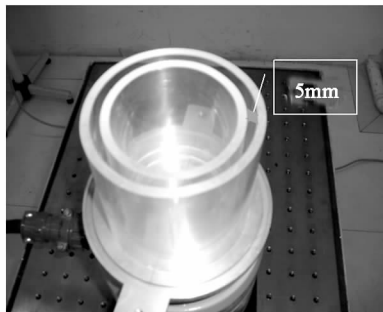


图1 实验容器示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental container

2 实验结果及分析

图2是实验中观察到的稳定隆起波形侧面图。实验结果显示,频率 $f = 30.0$ Hz左右,颗粒开始出现对流隆起现象,随着频率缓慢增加,隆起高度随

之增加; $f = 40.0$ Hz时,颗粒处于致密状态,对流停滞,隆起波形基本保持稳定。对这一过程进行跟踪拍摄,记录30.0~40.0 Hz频率范围内同一时刻不同位置的隆起高度(每隔0.5 Hz记录一次数据)。若把环形容器视作平面展开,即以容器外周长380 mm为水平坐标 $x:0 \sim 370$ mm(刻度首尾相接)、隆起高度 h 为纵坐标,根据拍摄数据可得到振动颗粒表面隆起波形的平面展开图。如图3所示,数据点由摄像机跟踪拍摄所得,实线是不同频率下对隆起波形的拟合曲线,拟合公式为 $h = h_0 + A \sin\left[\frac{(x - x_c)\pi}{w}\right]$,其中 h_0 、 A 、 x_c 、 w 分别是关于隆起波形初始高度、振幅、峰值水平位置及宽度的拟合参数。



图2 颗粒隆起波形图($f = 40$ Hz)

Fig.2 The waveform of particles' heaving ($f = 40$ Hz)

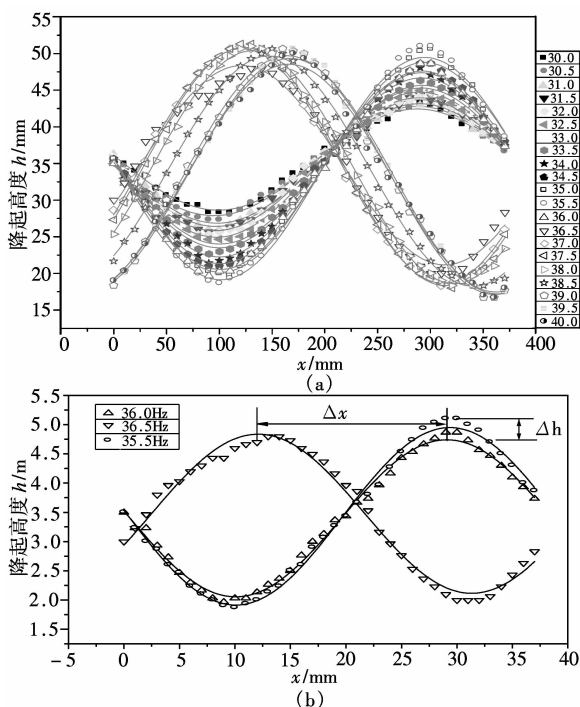


图3 颗粒表面隆起波形平面展开图

(a) 全程频率变化隆起波形图; (b) 局部频率变化隆起波形图

Fig.3 The plane waveform of particles' heaving

(a) The waveform of particles' heaving at all frequencies;

(b) The waveform of particles' heaving at local frequencies

注:图中散点是实验采集数据,实线是该频率下的拟合曲线,拟合公式是 $h = h_0 + A \sin\left[\frac{(x - x_c)\pi}{w}\right]$ 。

由图 3 可以看出颗粒表面隆起及输运现象:当 $f = 30.0 \text{ Hz}$ 时,颗粒出现隆起现象,隆起峰值坐标为 $x = 300.0 \text{ mm}$, $h = 43.0 \text{ mm}$;随着频率逐渐增大,隆起高度随之增加,当 $f = 35.5 \text{ Hz}$ 时, $h = 50.0 \text{ mm}$ 。在 $36.0 \sim 36.5 \text{ Hz}$ 范围内,颗粒表面隆起波形出现了急剧坍塌再隆起的现象,如图 3(b)的局部频率变化曲线所示。这此期间,隆起高度不再随频率增加而是迅速降低, $h = 4 \text{ mm}$;当 $f = 36.5 \text{ Hz}$ 时,颗粒隆起波形构象彻底改变,在原来波谷位置迅速生成新的隆起波峰,峰值坐标为 $x = 130.0 \text{ mm}$, $h = 48.0 \text{ mm}$,峰值水平位移量为 $\Delta x = 170 \text{ mm}$,俯视容器则观察到隆起中心相位角变化 $\Delta\varphi \approx \pi$,类似于机械波相位突变,如图 4 所示;随着频率增加,新的隆起波也随之增大,当 $f = 37.5 \text{ Hz}$ 时, $h = 51.0 \text{ mm}$;若频率继续增加,整体波形出现微小水平位移,从 37.5 Hz 到 40.0 Hz 波形大约平移了 40.0 mm ;频率 f 大于 40 Hz 后,颗粒对流隆起运动处于停滞状态,隆起波形保持稳定。

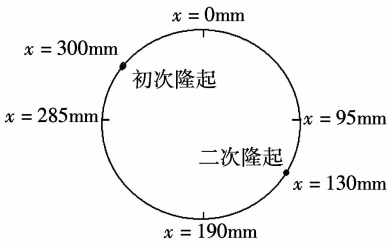


图 4 相位角变化俯视图

Fig.4 The planform of phasic change

从图 3 中不难看出,在不同频率下的隆起波形都具有相似形貌,可使用同样的拟合公式进行处理。若把图 3 中的数据做标度化处理,就可以得到一条反映振动颗粒表面隆起波形变化规律的曲线,如图 5 所示。由图 5 中可以看到,振动颗粒表面隆起的稳定波形满足 $h = h_0 + A \sin\left[\frac{(x - x_c)\pi}{w}\right]$,其振幅、峰值及宽度等相互制约,在系统外加参量作用下呈现不同的形貌。

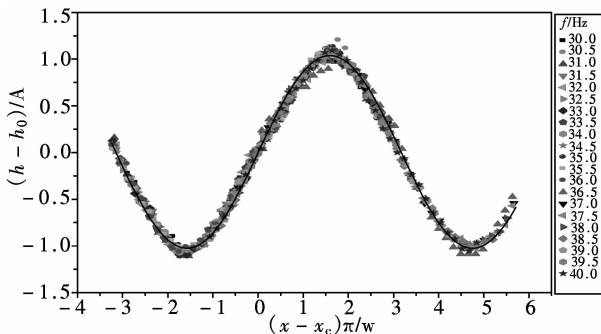


图 5 标度化的颗粒表面隆起波形

Fig.5 The unitary waveform of particles' heaving

实验结果显示,频率作为系统的主要控制参量,对颗粒表面隆起波的状态有显著影响,图 6 显示了颗粒隆起高度随频率的变化关系。图 6 中的分割线将频率域分成两部分,分别表示两次隆起运动的不同特征:当 $30.0 \text{ Hz} < f < 36.0 \text{ Hz}$,隆起波形随着频率增大而加速增高;当 $f = 36.0 \text{ Hz}$ 时,颗粒表面隆起波开始坍塌,隆起高度明显下降;将频率再继续增加到 36.5 Hz 时,观察到振动颗粒迅速重组,在原有隆起波形的波谷位置(图 6 中频率为 36.0 Hz 和 36.5 Hz 处)再次隆起,此次隆起波形达到稳定高度(约 50.0 mm)后不再随着频率增加而变化。

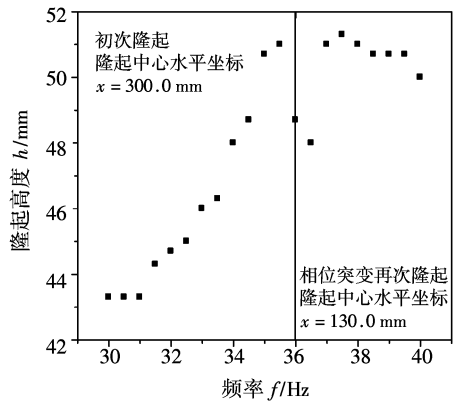


图 6 振动颗粒隆起高度随频率的变化

Fig.6 The height of heaping at the different frequencies

3 结语

实验观察并记录了振动颗粒在二维无水平边界环形容容器中的对流输运及隆起运动行为,着重讨论系统振动频率对颗粒系统对流过程及表面隆起波形的影响。通过反复实验观测,找到该实验条件下颗粒表面因对流而形成的隆起波形对频率的敏感域发生在 $30.0 \sim 40.0 \text{ Hz}$ 。利用摄像机拍摄系统的对流输运过程,进而获得运动参量数据,根据实验结果分析了这个区域内颗粒表面隆起波形的形貌变化规律服从: $h = h_0 + A \sin\left[\frac{(x - x_c)\pi}{w}\right]$,并讨论了频率对隆起高度的影响,给出相位突变的位置和相应频率。观察到系统在 36.5 Hz 这个特定频率时,颗粒隆起波形稳定性被破坏,颗粒自组织重新生成新的隆起波形。这种类似于机械波相位变化的运动机制,是值得深入探讨的独特行为。

参考文献:

[1] JAEGER H M, NAGEL S R, BEHRINGER R P. The physics of granular materials[J]. Physics Today, 1996, 49(4):32-38.
 [2] EVESQUE P, RAJCHENBACH J. Instability in a sand heap

注:图中散点为实验采集数据,横纵坐标分别是 $(h - h_0)/A$ 、 $(x - x_c)\pi/w$;实线是拟合曲线 $\sin\left[\frac{(x - x_c)\pi}{w}\right]$

- [J]. Phys Rev Lett, 1989, 62:44-46.
- [3] CHEN Weizhong. Experimental observation of self-localized structure in granular material[J]. Phys Lett A, 1995, 196: 321-325.
- [4] GALLAS J A C, HERMANN H J, SOKOLOWSKI S. Convection cells in vibrating granular media[J]. Phys Phys Lett, 1992, 69:1371-1374.
- [5] PAK H K, DOORN E V, BEHRINGER R P. Effects of ambient gases on granular materials under vertical vibration[J]. Phys Rev Lett, 1995, 74: 4643-4646.
- [6] 陆坤权, 刘寄星. 颗粒物质[J]. 物理, 2004, 33(10): 713-721.
- [7] OSAMU S. Dilatancy, buckling, and undulations on a vertically vibrating granular layer[J]. Phys Rev E, 2005, 72:051302.
- [8] CHEN Weizhong, WEI Rongjue, WANG Benren. Formation mechanism of the solitonshape heap and convectionin granular materials under vibration [J]. Phys Lett A, 1997, 228: 321-328.
- [9] WANG Junyi, WANG Wei, WANG Benren, et al. Effect of the boundary on the dynamics of solitary waves[J]. Chin Phys Lett, 1996, 13(7):481-484.

(编辑:孙培芹)