

湿颗粒体系下冲击坑的形成模式分析

刘鑫¹, 颜文超², 吴自雨¹, 周文龙¹, 徐昇¹,
张思睿¹, 肖儿良¹

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093; 2. 山东劳动职业技术学院 教务处, 济南 250300)

摘要: 为深入理解行星表面复杂环境下冲击坑的形成机制, 在实验室模拟低速撞击过程, 系统研究了颗粒粒径和含水量对冲击坑动力学行为的影响。实验采用不同粒径的玻璃珠作为颗粒床, 通过调节含水量, 利用高速相机和粒子图像测速(PIV)技术捕捉冲击过程中颗粒的流动特性。结果表明, 湿颗粒体系中的冲击坑形成存在扩散崩塌型、堆积崩塌型和不崩塌型3种典型模式, 其形成模式由颗粒粒径和含水量共同决定。通过冲击坑形成模式相图的分析, 详细讨论了相图发送相变的原理。进一步分析冲击坑尺度形成规律发现, 冲击坑直径随含水量增加而减小并趋于稳定, 而在相同含水量下, 湿颗粒粒径越大, 冲击坑直径越大, 最终得出冲击尺度特征统一描述的幂律规律。研究成果可为理解行星地质演化提供实验依据和理论模型。

关键词: 湿颗粒; PIV; 冲击坑形成模式; 相图; 尺度规律

中图分类号: TH 89 **文献标志码:** A

Analysis of impact craters formation mode in wet particle system

LIU Xin¹, YAN Wenchao², WU Ziyu¹, ZHOU Wenlong¹, XU Sheng¹, ZHANG Sirui¹, XIAO Erliang¹

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. Academic Affairs Office, Shandong Labor Vocational and Technical College, Jinan 250300, China)

Abstract: In order to understand the formation mechanism of impact craters in the complex environment of planetary surfaces, low-velocity impact processes were simulated in a laboratory, and the effects of particle size and moisture content on the dynamic behavior of impact craters were systematically investigated. By adjusting the moisture content, the high-speed camera and particle image velocimetry (PIV) technology were employed to capture the flow characteristics of particles during the impact process. The results show that there are three typical formation modes of impact craters in the wet

收稿日期: 2024-08-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12072200, 12002213); 崂山实验室科技创新项目(LSKJ202203507)

第一作者: 刘鑫(2000—), 男, 硕士研究生。研究方向: 颗粒流测量技术。E-mail: 1471052007@qq.com

通信作者: 肖儿良(1969—), 男, 副教授。研究方向: 信号获取与处理。E-mail: xiaerliang@usst.edu.cn

引文格式: 刘鑫, 颜文超, 吴自雨, 等. 湿颗粒体系下冲击坑的形成模式分析[J]. 上海理工大学学报, 2025, 47(4): 422-429.

Citation: LIU Xin, YAN Wenchao, WU Ziyu, et al. Analysis of impact craters formation mode in wet particle system[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2025, 47(4): 422-429.

granular system: the diffusion collapse mode, the accumulative collapse mode, and the no collapse mode. The formation mode is jointly determined by the particle size and moisture content. Through the analysis of the phase diagram of impact crater formation modes, the principle of phase transformation in the phase diagram was discussed in detail. Further analysis of the formation law of impact crater scale reveals that the diameter of the impact crater decreases and tends to stabilize with the increase of moisture content. Under the same moisture content, the larger the particle size of the wet granular material, the larger the diameter of the impact crater. Finally, a power-law relationship for the unified description of impact scale characteristics was derived. The research results can provide experimental basis and theoretical models for understanding the geological evolution of planets.

Keywords: *wet particle; PIV; impact craters formation mode; phase diagram; scaling law*

自阿波罗计划以来, 人们向太阳系发射了大量的轨道探测器及着陆器, 传回的图像证明冲击坑是许多行星表面的主要形貌。火星被公认为是与地球环境相似度较高的行星之一, 在其表面观察到 384 343 个直径超过 1 km 的冲击坑^[1]。研究人员通过冲击坑特征来了解行星演化过程, 为行星探测任务提供理论基础。因此, 对冲击坑的研究受到大量科研人员的重视。

颗粒物质是离散的复杂系统^[2-3], 行星表面是由大量离散细小的颗粒物质组成, 并且冲击坑大部分由高速冲击造成, 难以通过物理实验来进行研究。Walsh^[4]通过低速冲击实验发现, 低速冲击形成的冲击坑与高速冲击形成的冲击坑具有相同的幂律关系。因此, 在过去的几十年里, 大量科研人员通过低速撞击颗粒物质对冲击进行了详细研究, 包括抛射体的形状、入射角度、穿透深度等。此外, 颗粒床的物理性质及其动态响应过程也得到了广泛的讨论。冲击坑的形成过程极其复杂, Pica 等^[5]通过实验和仿真将冲击坑形成过程分为 3 个阶段: 碰撞、穿透以及崩塌。碰撞阶段主要是小球接触颗粒床, 颗粒床被压缩, 小球的速度迅速降低; 穿透阶段是小球持续挖掘颗粒的过程, 形成瞬时冲击坑; 崩塌阶段是瞬时冲击坑的修正过程, 最后形成稳定的冲击坑。以上实验都集中在干燥的颗粒材料上, 但是一些研究证明, 火星、月球等表面土壤中存在液体。因此, 越来越多的学者开始重视湿颗粒冲击的研究。当颗粒体系加入一定量的液体后, 液体会在颗粒间形成液桥, 颗粒材料的性质会发生显著变化。Zhang 等^[6-7]通过实验和仿真对小球撞击湿颗粒材料的动力学进行了研究, 与干湿颗粒材料中小球的穿透深度

以及碰撞持续时间进行了比较。Haruna 等^[8]通过小球低速冲击湿沙成坑实验, 发现随着含水量的增加, 沙的屈服应力能增大 10 倍, 导致冲击坑的尺度发生极大的变化。冲击坑的尺度随液体含量变化的关系已经得到了广泛研究, 但对湿颗粒体系下冲击坑的形成过程研究目前还比较少。

相图可以帮助了解物质的相态转变规律, 从而指导材料研究和工艺制备。Dijksman 等^[9]通过弱振动颗粒材料, 调整施加的应力和振动强度, 得到了一个堵塞、蠕变流动和稳定流动的相图。Saluena 等^[10]通过分子动力学模拟研究振动颗粒材料的集体耗散特性, 能量损失率表明在外力的幅频平面上存在 3 种不同的状态: 固态、对流态和气态。Li 等^[11]通过改变湿颗粒柱初始高宽比、含水率和颗粒粒径, 在实验中观察到颗粒柱崩塌过程中的 3 种典型流动状态, 给出了描述不同流动状态的相图。相图在颗粒材料研究上的应用越来越广泛, 为研究颗粒冲击提供了更好的方法。

本文通过实验研究了不同粒径玻璃珠组成的含水颗粒床在小球冲击作用下的响应过程, 观察到小球冲击下冲击坑的 3 种形成模式, 给出了冲击坑形成模式相图, 讨论了相图的特征、相变原理及冲击坑形成模式的时间特性, 同时对冲击坑的尺度进行了讨论分析。

1 实验设计与方法

1.1 实验装置

本研究使用如图 1(a) 所示的装置进行含水颗粒体系下垂直冲击实验。在实验中, 一个直径 D 为 3.0 cm, 质量 m 为 20 g 的内部填充磁性材料

小球利用磁性底座静止释放，从高度 $H=50\text{ cm}$ 的位置自由下落，以约 3.13 m/s 的速度冲击颗粒床表面。 2400 g 颗粒自由堆积在长 25 cm 、宽 20 cm 的不锈钢容器中，颗粒粒径分别为 0.5 、 1.0 、 2.0 mm ，颗粒床的厚度大约为 3 cm ，其厚度足以保证冲击过程中小球不会撞击容器底部。为了防止冲击导致的颗粒飞溅溢出，将不锈钢容器放置在 $30\text{ cm}\times 30\text{ cm}\times 50\text{ cm}$ 的亚克力缸中。在小球的上方使用高

速相机记录整个冲击过程，使用 LED 光源 (SL-200 W) 对拍摄过程进行补光处理，以获得高质量的图片。在不同的含水量(质量分数，下同)情况下分别进行冲击实验，具体实验参数见表 1。实验体系中含水量定义为

$$\omega = \frac{m_w}{m_g} \times 100\%$$

(1)

式中： m_g 为颗粒的质量； m_w 为水的质量。

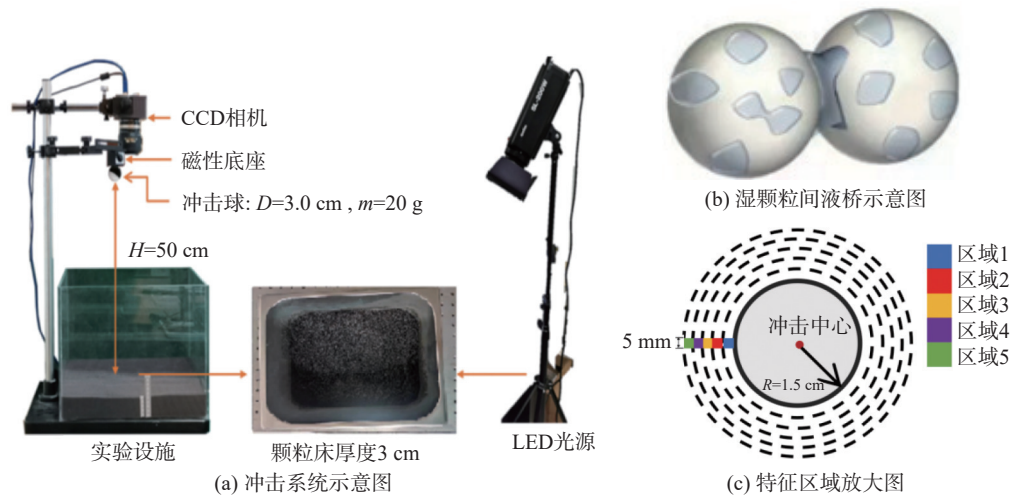


图 1 实验装置系统图

Fig.1 System diagram of the experimental setup

表 1 实验参数

Tab.1 Experimental parameters

参数	数值
颗粒粒径 <i>d</i> /mm	0.5、1.0、2.0
颗粒密度 <i>ρ_g</i> /(kg·m ⁻³)	2510
水密度 <i>ρ_w</i> /(kg·m ⁻³)	1000
表面张力 <i>γ</i> /(N·m ⁻¹)	0.074
0.5 mm 粒径颗粒床含水量 <i>ω</i> /%	0、0.5、0.6、0.8、1、2
1.0 mm 粒径颗粒床含水量 <i>ω</i> /%	0、0.5、1、2、4、7、10、12、15
2.0 mm 粒径颗粒床含水量 <i>ω</i> /%	0、0.5、1、2、4、7、10、12、15
冲击球直径 <i>D</i> /mm	30
冲击球质量 <i>m</i> /g	20
冲击球初始速度 <i>v</i> /(m·s ⁻²)	3.13
CCD 相机时间分辨率/(帧·s ⁻¹)	334
CCD 相机空间分辨率/px	2368×1 720

为了得到初始表面平整的含水颗粒床，采取与 Zhong 等^[12] 类似的湿颗粒制备方法。使用高压喷壶将水雾化的同时喷洒在颗粒床表面，然后静置沉降 15 min，液体在颗粒间会形成如图 1(b) 所

示的液桥。为了保证每次冲击实验前湿颗粒床表面平整，每进行一次冲击实验后就重新制备湿颗粒床。

1.2 粒子图像测速

粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术是一种瞬态、多点、无接触式光学测量技术^[13]。利用小的示踪剂粒子对流场进行可视化，并对可视化的数字图像进行分析，得到速度分布。其基本原理是通过分析连续的两张图像，来计算特定区域粒子的速度信息。假设在一个时间间隔 Δt 内，示踪粒子 A 在 x 和 y 方向上的位移分别为 Δx 和 Δy ，则其在 x 和 y 方向上的速度 u 和 v 可以通过如下公式计算：

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

(2)

$$v = \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

(3)

当间隔时间 Δt 足够小时， u 和 v 则可以表示该点在 x 和 y 方向上的实际速度。

使用 PIV 技术对实验图片进行处理，得到颗粒床表面颗粒的速度流场。以小球接触颗粒床的

时刻作为 0 时刻, 当首次出现颗粒速度方向向内指向小球的时刻作为开始崩塌时刻。以冲击点作为形成冲击坑的中心, 崩塌区域的外边缘作为冲击坑的边界, 边界与中心的距离作为冲击坑的半径。当形成冲击坑过程中不发生不崩塌时, 则以向外扩散最远的颗粒作为冲击坑的边缘。为了更好地了解颗粒床表面颗粒的速度特征, 如图 1(c) 所示, 选取 5 个 5 mm×5 mm 的区域内粒子的速度, 求取速度平均值作为该区域的特征速度。

1.3 冲击实验过程

图 2 展示了经过 PIV 处理的 1 mm 颗粒粒径冲击实验的结果图, 3 种不同含水量(0、2%、12%)的颗粒床在受到小球冲击作用的瞬间都表现出类似的现象。在小球接触颗粒床的时刻, 小球的能量开始传递给颗粒介质, 导致颗粒介质向外扩散飞溅。颗粒介质向外扩散直至形成冲击坑的过程中, 出现了 3 种不同的颗粒运动形式: 扩散崩塌型 (diffusion collapse, DC)、堆积崩塌型 (accumulative collapse, AC) 以及不崩塌型 (no collapse, NC)。

在干燥情况下($\omega=0$), 如图 2(a) 所示, 小球冲击颗粒床导致飞溅的颗粒不断向外部扩散。随着时间的推移, 靠近冲击点的颗粒飞溅速度逐渐减小至 0, 颗粒不再向外飞溅, 开始转向向内崩塌。远离冲击点的颗粒一直处于向外扩散的状态, 在向外扩散的颗粒与向内崩塌的颗粒之间有一段速度接近 0 的准静止区域。此时, 从瞬时冲击坑到最后形成稳定冲击坑的崩塌过程中, 颗粒床同时存在向外扩散和向内崩塌的颗粒。为了简单起见, 将形成这种冲击坑的类型称为扩散崩塌型。

当颗粒体系的含水量 $\omega=2\%$ 时, 冲击坑形成过程为堆积崩塌型。图 2(b) 展示了堆积崩塌型冲击坑的形成过程。与扩散崩塌型类似, 在开始时刻冲击导致的飞溅颗粒也会向外扩展, 但是飞溅颗粒扩展的范围要远远小于扩散崩塌型的飞溅范围。这些飞溅的颗粒会堆积在瞬时坑的边缘, 当向外飞溅堆积颗粒的速度不断减小至 0 时, 所有在瞬时坑边缘堆积的颗粒全部开始向内坍塌。瞬时冲击坑向最终稳定冲击坑转变时, 颗粒床只存在向内崩塌的颗粒, 没有向外扩散的颗粒。因此, 将这种冲击坑的类型称为堆积崩塌型。

当颗粒体系含水量 $\omega=12\%$ 时, 冲击坑形成过

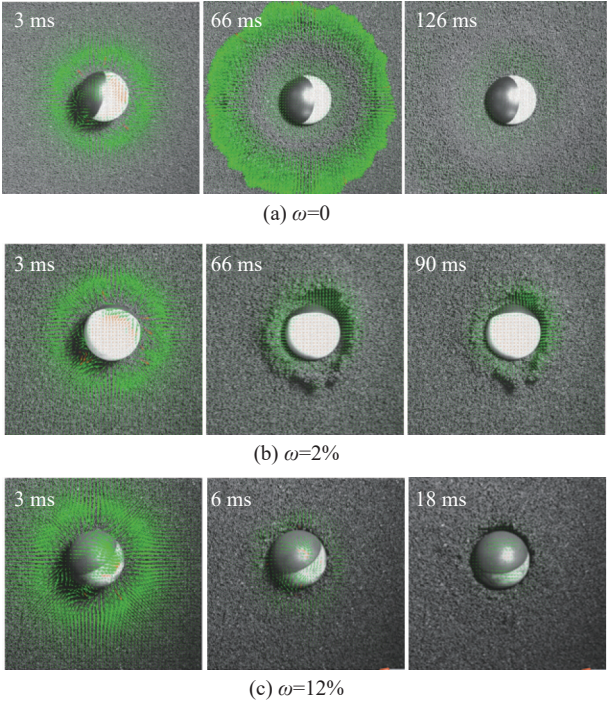


图 2 颗粒粒径 1 mm 时冲击过程速度流场图

Fig.2 Velocity field diagram of the impact process for 1 mm particle size

程为不崩塌型。图 2(c) 展示了不崩塌型冲击坑的形成过程。在该种类型下, 仅仅在冲击瞬间时刻有极少量的颗粒向外飞溅, 在小球的冲击压实颗粒床的过程后形成冲击坑。该情况下产生的冲击坑并没有发生向内崩塌现象, 瞬时冲击坑即为最终稳定的冲击坑。因此, 将形成这种冲击坑的类型称为不崩塌型。

综上所述: 扩散崩塌型的主要特征为在形成冲击坑的过程中会同时出现向外扩散和向内崩塌的颗粒; 堆积崩塌型的特征为在形成冲击坑的过程中, 颗粒会堆积在瞬时坑的边缘, 随后全部颗粒向内崩塌; 不崩塌型的特征为在冲击坑形成过程中仅在冲击的瞬间有少量颗粒飞溅, 在小球的冲击压实作用下形成的冲击坑不发生崩塌修正行为。

2 冲击实验结果与分析

2.1 冲击坑形成模式相图

实验研究了分别由不同粒径玻璃珠组合的含水颗粒床在小球冲击作用下的响应过程。使用高速相机连续记录了不同含水量的颗粒床受冲击作用后的流变特征。在不同的实验条件下观察到颗粒床表面受冲击作用后 3 种典型的流动形式。根据不同的实验结果, 绘制了冲击坑形成方式的相

图。图 3 展示了小球冲击作用下，冲击坑直径与颗粒粒径及含水量之间的关系。从图中可以看出，在粒径相同的情况下，随着含水量的增加，冲击坑的直径减小到某一临界值后保持不变。当颗粒体系为干燥的情况下，冲击坑的直径与颗粒粒径无关，其大小几乎相同。在加入液体后，当含水量相同时，颗粒粒径越大，冲击产生的冲击坑直径也越大。图中 3 种不同的颜色分别对应上文中介绍的 3 种冲击坑形成过程。不难看出，在含水量较小的情况下，冲击坑的形成过程都为扩散崩塌型。随着含水量的增加，扩散崩塌型逐渐转变为堆积崩塌型。当含水量增大到一定程度时，冲击坑形成方式转变为不崩塌型。由此可以得出，冲击坑的形成过程主要受到颗粒粒径 d 和颗粒体系含水量 ω 的影响。

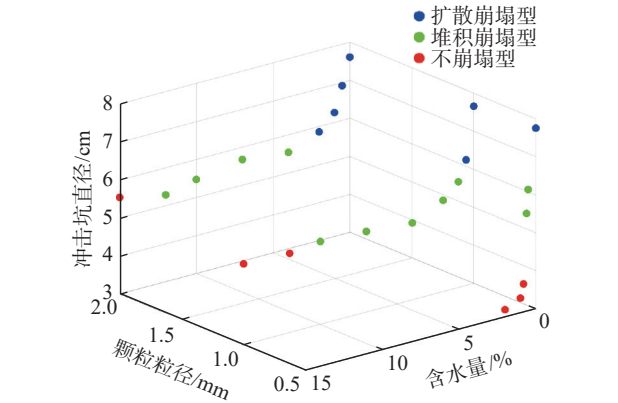


图 3 冲击坑直径与颗粒粒径及含水量之间的关系图
Fig.3 Relationship diagram between impact craters diameter, particle size, and moisture content

图 4 为参数空间(ω, d)中湿颗粒床冲击坑形成模式相图，图中 3 个区域分别对应于实验中观察到的冲击坑不同形成过程。

从图 4 中可以看出，当含水量 ω 较小时，3 种粒径的颗粒床受到的冲击作用都表现出扩散崩塌型的冲击坑形成过程。随着含水量 ω 的增大，逐渐转变为堆积崩塌型。当颗粒体系中含水量增加到一定程度时，其瞬时坑的崩塌完全被抑制，转变为不崩塌型冲击坑形成过程。颗粒体系内加入液体后，在颗粒之间形成液桥，增加了颗粒间的内聚力，颗粒体系的屈服强度在一定范围内会逐渐增大。小球冲击穿透颗粒床时会消耗更多的能量，更少的能量用于颗粒的飞溅。另外，在较低含水量的情况下，湿颗粒间的液体主要存在于颗粒间的接触点处，颗粒间的接触较少，系统相对松散。随着含水量的增加，颗粒间的间隙被逐步

填充，液桥会逐渐融合，形成更为连续的网络结构，颗粒间的连接变得更加紧密，湿颗粒间液桥会由钟摆态转变为索状态。Scheel 等^[14]发现在较低的含水量情况下，颗粒会形成较小的团簇体，随着含水量的增加，小团簇体会逐渐合并成更大的团簇体。较大团簇体飞溅需要更多的能量，当小球传递给颗粒床的能量不足以支持其飞溅时则会堆积在瞬时坑的边缘。因此，冲击坑形成过程出现从扩散崩塌型向堆积崩塌型的转变。当含水量足够大时，湿颗粒间的内聚力已经大于颗粒自重，从而抑制了瞬时坑的崩塌，导致冲击坑形成方式转变为不崩塌型。这种现象与 Li 等^[11]的研究结果类似，在无能量输入时，颗粒系统由于自身的重力而产生崩塌，而在加入一定量的液体后崩塌被抑制，出现了不崩塌的现象。

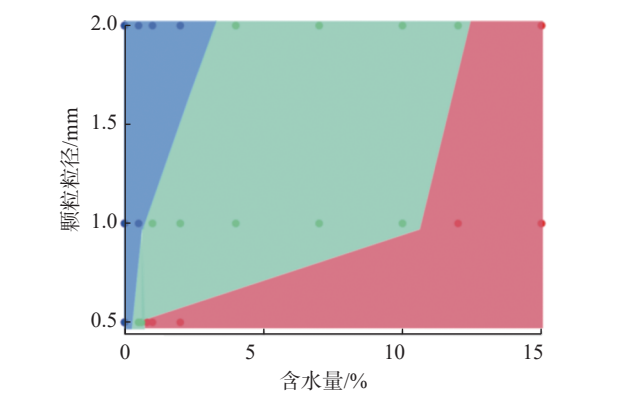


图 4 冲击坑形成模式相图
Fig.4 Phase diagram of impact craters formation mode

此外，实验结果表明 3 种不同粒径的颗粒发生相变时，临界含水量各不相同，其发生相变的范围与颗粒粒径和含水量相关。由于相图发生转变的原因不同，无法通过同一个无量纲参数来表达。采用 Artoni 等^[15]提出的无量纲参数 $B_0^m \omega^n$ 对分界线进行量化。其中： $B_0 = (\rho_g d^2)/\gamma$ 表征为颗粒自身重力与毛细力的比值； γ 为液体的表面张力； m 和 n 为互不相关的指数。本文采用 $B_0^{-1} \omega^2$ 来量化扩散崩塌型与堆积崩塌型的分界线，其数值为 3.01，使用 $(D/d)^{-\frac{1}{3}} (B_0^{-1} \omega^{\frac{2}{3}})^{\frac{1}{3}}$ 来量化堆积崩塌型与不崩塌型的分界线，其数值为 0.64。

为了解冲击坑形成过程中 3 种模式下 1 mm 粒径颗粒床表面颗粒的流动特征，绘制了特征区域(图 1(c))平均速度随时间变化的曲线。

如图 5 所示，不同含水量的颗粒介质在初始时刻都表现出相同的速度特征。在小球的冲击作用下，小球的能量逐渐转移给颗粒介质，颗粒介

质在较短时间内获得足够大的动能,从而向四周飞溅扩散。值得注意的是,在含水量 $\omega=0$ 的实验中,颗粒的飞溅速度最大;含水量 $\omega=12\%$ 的实验中,颗粒的飞溅速度最小。液体在颗粒间隙中形成液桥使得颗粒体系具有内聚力,内聚力会随着含水量的增加而增大到某一临界后保持不变。小球冲击含水量更高的颗粒床时,破坏液桥需要消耗更多的能量,更少的能量传递给颗粒介质,颗粒的飞溅速度逐渐减小。随后在摩擦作用下,小球的能量逐渐减小,当小球的动能减小到0时,形成瞬时冲击坑。在含水量 $\omega=0$ 和 $\omega=2\%$ 的实验中,瞬时冲击坑开始发生崩塌,颗粒的速度开始增大,最后崩塌规模缓慢减小,颗粒速度减小到0,形成最终稳定的冲击坑。而在含水量 $\omega=12\%$ 的实验中,瞬时冲击坑并没有发生崩塌,颗粒介质的速度没有减小后再增大的情况,而是直接减小至0。此时,颗粒间液体的毛细力作用大于颗粒自身的重力,使得颗粒没有发生崩塌现象。此外,在 $\omega=2\%$ 的实验中,飞溅的颗粒堆积在瞬时坑的周围,具有更大的重力势能。而含水量 $\omega=0$ 的实验中,更多的能量被用于飞溅的颗粒向外扩展。因此,在崩塌过程中,当 $\omega=2\%$ 时,崩塌速度远大于 $\omega=0$ 时的崩塌速度。

2.2 冲击坑形成模式的时间特性分析

瞬时坑开始崩塌的时间统计结果如图6所示,其数值与颗粒床的粒径和含水量没有任何关系,大致在0.05 s附近。图5(a)、(b)中也可以观察到在0.05 s时,崩塌导致特征区域的颗粒速度开始增大。开始崩塌时间在干燥情况下的结果与Katsuragi等^[16]的研究结果类似。根据Katsuragi等在干燥颗粒体系下的冲击实验,冲击物体的停止时间在冲击初始速度大于特征速度 $(D/g)^{1/2}$ 时,小球的停止时间为恒定值 $(D/g)^{1/2}$ 。瞬时坑开始崩塌时间与小球的停止时间几乎相同。因此,可以认为当小球停止,小球不再向颗粒体系传输能量时,瞬时冲击坑开始崩塌。然而,Zhang等^[6-7]通过试验和仿真证明,湿润情况下小球的停止时间几乎都相同,并且均小于干燥情况下的停止时间,与本文的结果一致。Shen等^[17]通过离散元法(discrete element method, DEM)仿真证明小球的停止时间与颗粒间的摩擦系数有关。当摩擦系数大于0.4时,小球的停止时间将不再发生变化。颗粒在干燥情况下摩擦系数为0.6,在加入水后,水的

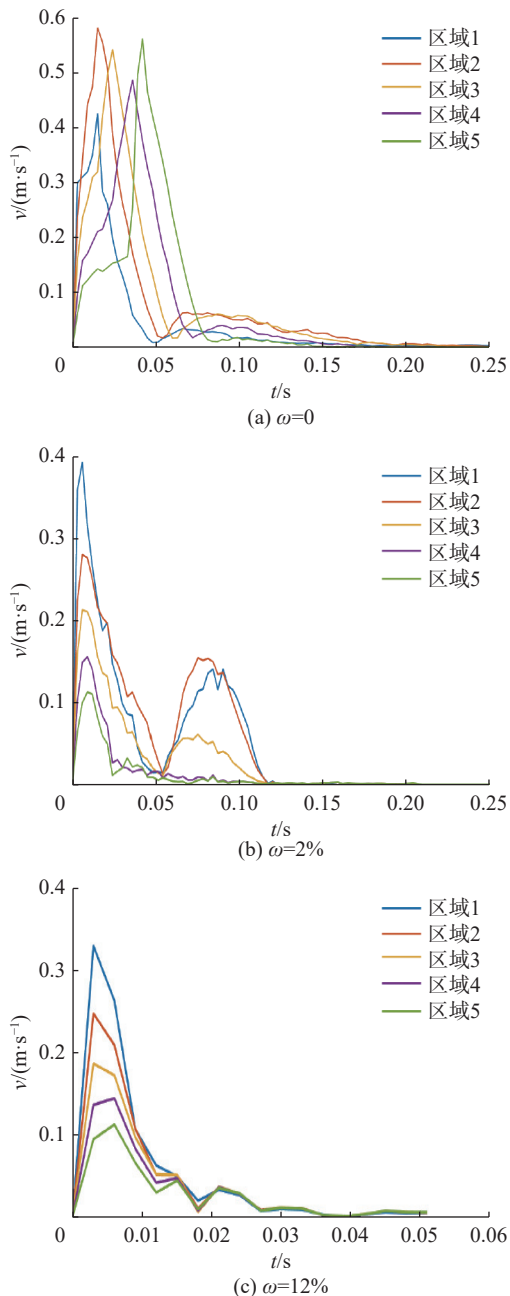


图5 撞击-崩塌过程中1 mm 粒径颗粒床上特征区域速度随时间变化的曲线

Fig.5 Velocity variation curves of characteristic regions on 1 mm granular bed during the impact-collapse process

润滑作用可能会减小其摩擦系数,但是其结果也大于0.4。因此,在干燥和湿润情况下,小球的停止时间均未发生变化,即开始崩塌的时间都相同。

2.3 冲击坑尺度分析

如图3所示,3种粒径的颗粒床产生的冲击坑直径随含水量变化的趋势相同。随着含水量的增加,冲击坑的直径减小到某一临界值后保持不变,这与Haruna等^[8]的结果类似。液体的加入使颗粒间具有毛细力,从而抑制了颗粒间的重排。

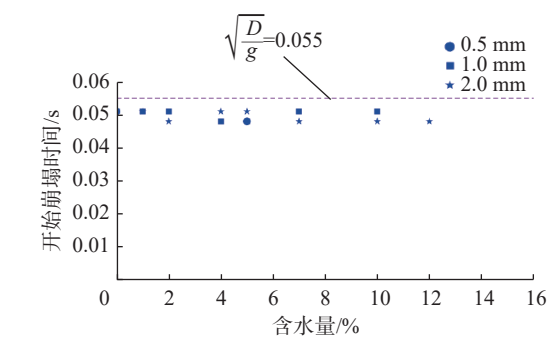


图 6 开始崩塌时间随含水量的变化

Fig.6 Change of the time of beginning collapse with moisture content

颗粒间的毛细力主要与含水量相关，并随着含水量的增加达到某个临界值后保持不变。在冲击过程中，冲击球的释放高度不变，整个系统开始具有的能量相同，毛细力越大颗粒体系的屈服强度越大，颗粒体系发生剪切重排所需要的能量越多。与此同时，小球挖掘时所耗散的能量越多，形成的冲击坑直径越小。当含水量增大到一定数值时，颗粒间的毛细力不再随含水量而变化，冲击坑直径保持不变。

颗粒粒径也会对冲击坑直径产生影响。在干燥情况下，3 种不同粒径的颗粒床受冲击形成的冲击坑直径几乎相同。Walsh 等^[4]在干燥颗粒体系下发现冲击坑的直径与能量成 1/4 幂律关系。在干燥情况下，冲击球都是从同一高度自由下落，冲击初始能量一样。因此，干燥情况下不同粒径的颗粒床在小球的冲击作用下形成直径大小相同的冲击坑。当颗粒体系具有相同含水量时，颗粒床的粒径越大，所形成的冲击坑直径也越大，这可能与孔隙率有关。孔隙率是指块状材料中孔隙体积与材料在自然状态下总体积的百分比。随着粒径的增加，单一尺寸球体组成的颗粒床孔隙率会减小，小粒径颗粒单位体积的液桥数量显著多于大颗粒液桥的数量。因此，对于较小的颗粒粒径，其受毛细管力的影响更为明显，从而导致冲击产生更小直径的冲击坑。

上述结果表明，冲击坑的直径受到颗粒粒径 d 和含水量 ω 的影响。冲击坑的尺度分析通常使用无量纲数。类似地对冲击坑直径进行无量纲化分析，如图 7 所示，无量纲化冲击坑直径 $d^* = D_{\text{crater}}/D$ 。其中： D_{crater} 为冲击坑直径； D 为冲击小球直径。得到 $d^* = -1.4(D/d)^{-\frac{1}{3}}(B_0^{-1}\omega^{\frac{2}{3}})^{\frac{1}{3}}$ 的幂律关系。图中有部分点偏离了幂律分布，这些点都是

不发生崩塌的实验数据点。瞬时冲击坑没有经过最后的崩塌修正过程，从而导致并不满足幂律关系。这一现象与 Bak 等^[18]提出的自组织临界性理论相一致，该理论指出系统在达到临界状态之前可能会表现出不同的统计特性。此外，Markovic 等^[19]讨论了复杂系统中幂律分布的普遍性，并指出在某些情况下，系统可能不会完全遵循幂律分布，特别是在系统的动态过程中存在非平衡因素时。在本文研究的特定情况下，未发生崩塌的数据点可能代表了冲击坑在达到最终稳定状态之前的一个中间阶段。这些数据点可能没有经历足够的动力学过程来达到自组织临界状态，因此，表现出偏离幂律分布的特性。

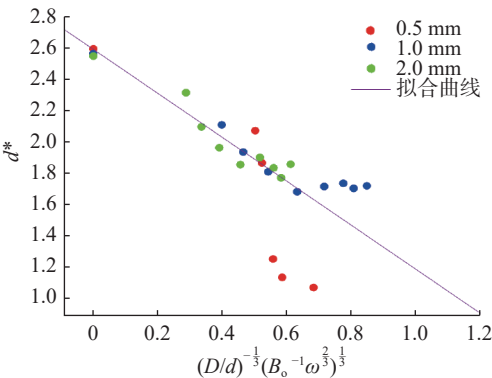


图 7 无量纲化冲击坑直径与颗粒粒径及含水量的关系图
Fig.7 Relationship diagram between dimensionless impact craters diameter, particle size, and moisture content

3 结 论

为了研究含水颗粒体系下冲击坑的形成过程，使用 PIV 技术对冲击过程进行了测量。研究发现，含水颗粒体系下，冲击坑的形成会呈现出 3 种不同的模式，这主要依赖于颗粒粒径 d 和含水量 ω 。通过不同条件下的实验结果，给出了在参数空间 (ω, d) 中表征冲击坑形成的模式相图，其中，3 个区域分别对应冲击坑形成的 3 种模式。分析了含水量 ω 和颗粒粒径 d 对冲击坑形成过程的影响，讨论了它们导致冲击坑形成模式转变的原因。引入无量纲参数 $B_0^{-1}\omega^2$ 和 $(D/d)^{-\frac{1}{3}}(B_0^{-1}\omega^{\frac{2}{3}})^{\frac{1}{3}}$ 定量分析模式转变的临界参数。讨论了 3 种模式下冲击坑形成过程中特征区域的颗粒流动速率。对瞬时坑开始崩塌时间进行统计，结果发现，开始崩塌时间与颗粒粒径和含水量没有任何关系，其数值固定为 $(D/g)^{\frac{1}{2}}$ 。

定量分析了含水量和颗粒粒径对冲击坑直径的影响规律。结果表明:在颗粒粒径相同时,随着含水量的增加,冲击坑的直径减小到某一临界值后保持不变;干燥情况下,3种不同粒径的颗粒床受冲击形成的冲击坑直径几乎相同;颗粒体系含水情况下,在含水量相同时,颗粒粒径越大,所形成的冲击坑直径也越大。最后,通过无量纲化分析了冲击坑直径与颗粒粒径及含水量之间的幂律关系。本文研究为理解行星地质演化过程及相关工程应用提供了理论模型。然而,本文没有考虑到冲击物体质量、大小、形状等物理参数对含水颗粒冲击结果的影响,后续需进一步设计合理实验来进行研究。

参考文献:

- [1] ROBBINS S J, HYNEK B M. A new global database of Mars impact craters ≥ 1 km: 1. Database creation, properties, and parameters[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2012, 117(E5): E05004.
- [2] 华云松, 戴红阳, 李宏泽, 等. 二维颗粒系统中指数分布的几何结构[J]. *光学仪器*, 2022, 44(4): 67–72.
- [3] 李岚晟, 李然, 杨晖. 崩塌条件下颗粒重排区域的堆积结构图像测量方法[J]. *光学仪器*, 2025, 47(2): 33–42.
- [4] WALSH A M, HOLLOWAY K E, HABDAS P, et al. Morphology and scaling of impact craters in granular media[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(10): 104301.
- [5] PICA CIAMARRA M, LARA A H, LEE A T, et al. Dynamics of drag and force distributions for projectile impact in a granular medium[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(19): 194301.
- [6] ZHANG X L, ZHANG D S, WANG Y F, et al. Dynamic characteristics of sphere impact into wet granular materials considering suction[J]. *Granular Matter*, 2023, 25(2): 18.
- [7] ZHANG X L, ZHAO H H, CHENG H Y, et al. The force and dynamic response of low-velocity projectile impact into 3D dense wet granular media[J]. *Powder Technology*, 2024, 434: 119309.
- [8] TAKITA H, SUMITA I. Low-velocity impact cratering experiments in a wet sand target[J]. *Physical Review E*, 2013, 88(2): 022203.
- [9] DIJKSMAN J A, WORTEL G, VAN HECKE M. Rheology of weakly vibrated granular materials[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2009, 1145(1): 343–346.
- [10] SALUEÑA C, PöSCHEL T, ESIPOV S E. Dissipative properties of vibrated granular materials[J]. *Physical Review E*, 1999, 59(4): 4422–4425.
- [11] LI P S, WANG D M, WU Y S, et al. Experimental study on the collapse of wet granular column in the pendular state[J]. *Powder Technology*, 2021, 393: 357–367.
- [12] ZHONG T, LIU X, ZHANG Y Y, et al. Penetration dynamics of a carbonate sand: a synchrotron phase contrast imaging study[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 152: 103839.
- [13] 杨晖, 张国华, 王宇杰, 等. 密集颗粒体系的颗粒运动及结构测量技术[J]. *力学进展*, 2018, 48: 201812.
- [14] SCHEEL M, SEEMANN R, BRINKMANN M, et al. Morphological clues to wet granular pile stability[J]. *Nature Materials*, 2008, 7(3): 189–193.
- [15] ARTONI R, SANTOMASO A C, GABRIELI F, et al. Collapse of quasi-two-dimensional wet granular columns[J]. *Physical Review E*, 2013, 87(3): 032205.
- [16] KATSURAGI H, DURIAN D J. Unified force law for granular impact cratering[J]. *Nature Physics*, 2007, 3(6): 420–423.
- [17] SHEN W G, ZHAO T, CROSTA G B, et al. Influence of inter-particle friction and damping on the dynamics of spherical projectile impacting onto a soil bed[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 835271.
- [18] BAK P, TANG C, WIESENFELD K. Self-organized criticality[J]. *Physical Review A*, 1988, 38(1): 364–374.
- [19] MARKOVIĆ D, GROS C. Power laws and self-organized criticality in theory and nature[J]. *Physics Reports*, 2014, 536(2): 41–74.

(编辑: 丁红艺)