

## 液滴在颗粒层内渗透流动动态过程的激光荧光实验测量

钟哲晗, 卓建坤, 姚强

引用本文:

钟哲晗, 卓建坤, 姚强. 液滴在颗粒层内渗透流动动态过程的激光荧光实验测量[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(7): 1446–1453.  
ZHONG Zhe-han, ZHUO Jian-kun, YAO Qiang. Experimental measurement of the penetration of a droplet into a granular medium using laser and fluorescence[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(7): 1446–1453.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202807.1446>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 封闭玻璃管道内液体折射率的非接触测量

Non-contact measurement for liquid refractive index in a closed pipe

*光学精密工程*. 2016, 34(10): 2408–2416 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162410.2408>

### 复杂颗粒流速度场分布的空间滤波测量

Measurement of velocity field distribution of complex particle flow by spatial filter

*光学精密工程*. 2018, 26(11): 2632–2638 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182611.2632>

### 利用平面激光诱导荧光技术及CH滤镜测量微喷管射流火焰OH及CH基元

Measurement of OH and CH radicals in micro-jet flames using planar laser induced fluorescence and CH filter

*光学精密工程*. 2017, 25(5): 1119–1125 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172505.1119>

### 双频激光干涉三自由度微振动测量系统

Three-degree-of-freedom micro-vibration measurement system based on dual-frequency laser interference

*光学精密工程*. 2019, 27(7): 1435–1443 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192707.1435>

### 3.53 μm激光外差太阳光谱测量系统

Laser heterodyne spectrometer for solar spectrum measurement in the 3.53 μm region

*光学精密工程*. 2018, 26(8): 1846–1854 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182608.1846>

文章编号 1004-924X(2020)07-1446-08

# 液滴在颗粒层内渗透流动动态过程的 激光荧光实验测量

钟哲晗<sup>1\*</sup>, 卓建坤<sup>1</sup>, 姚强<sup>1,2</sup>

(1. 清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084;  
2. 新疆大学电气工程学院能源与动力系, 新疆乌鲁木齐 830046)

**摘要:** 为了实现下落液滴在颗粒层内渗透流动的三维快速测量, 本文开发了一种基于激光-荧光-高速相机的光学测量系统, 用以拍摄记录不同时刻颗粒层内液体的分布形貌。该系统由三个部分组成, 首先, 液滴和颗粒层在撞击渗透系统中接触, 采用折射率匹配方法减少光学散射; 其次, 光学信号采集系统拍摄记录颗粒层内液体的形貌分布随时间的变化, 通过改变拍摄截面, 可以实现准三维测量; 最后, 在数据处理系统中使用 Matlab 程序完成对实验数据的分析, 可以获得液体在层内不同方向上距离、速度和加速度的时空分布, 进一步为流体在颗粒层渗透时的受力、动量和能量变化的动态理论模型的建立和验证提供支撑。实验系统的空间分辨率达到 0.02 mm, 时间分辨率达到 0.5 ms, 满足渗透过程测量稳定可靠、高时空分辨率的要求。

**关键词:** 光学测量; 激光荧光; 液滴; 颗粒层; 撞击; 渗透

中图分类号: TK11 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20202807.1446

## Experimental measurement of the penetration of a droplet into a granular medium using laser and fluorescence

ZHONG Zhe-han<sup>1\*</sup>, ZHUO Jian-kun<sup>1</sup>, YAO Qiang<sup>1,2</sup>

(1. *Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *Department of Energy and Power Engineering, School of Electric Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: zzhthu@qq.com*

**Abstract:** To analyze the fast penetration of a 3D droplet into a granular medium and its flow, an optical measuring system comprising a laser, fluorescence, and a high-speed camera has been developed. The system consists of three parts: the penetration segment, wherein droplets contact a medium, adding index-matched fluids to reduce light scattering; the optical signal acquisition segment, which captures the liquid morphology in the medium at different conditions and performs a quasi-3D measurement using laser sheets; and the data processing segment, which analyzes experimental data. The moving distance, speed, and acceleration of the droplet in diverse directions at

收稿日期: 2019-12-16; 修订日期: 2020-01-09.

基金项目: “十三五”国家重点研发资助项目 (No. 2018YFB0605000)

different times are measured to describe such dynamic process. Moreover, the data can support the establishment and verification of the dynamic theory, comprising force, momentum, and energy. The spatial resolution of this system is 0.02 mm, and its time resolution is 0.5 ms. They can address requirements such as real time, strong stabilization, and high spatial and desired time resolutions.

**Key words:** optical measurement; laser and fluorescence; droplet; granular medium; impact; penetration

## 1 引 言

液滴撞击并渗透进颗粒层是自然界普遍存在的现象。无论是水滴落到土壤中<sup>[1]</sup>,或是湿法制药<sup>[2-3]</sup>,还是广泛应用的喷淋冷却<sup>[4]</sup>、喷淋除尘和喷墨打印等<sup>[5]</sup>,都由这个基本过程组成。

在研究液滴撞击颗粒层之前,学者们对两种类似的物理过程了解得更透彻。一种是液滴撞击固体、液体表面,另一种是刚性球撞击颗粒层。液滴撞击到界面后会在毫秒时间尺度内发生形变和飞溅<sup>[6]</sup>,随着高速成像技术的发展,液滴撞击研究已经覆盖粗糙表面、表面微结构、变压力和温度条件,并关注高速撞击下气泡的形成和影响,且建立了相应的临界速度和相似律准则等<sup>[6-9]</sup>;而另一种过程是刚性球撞击颗粒层,相关研究经历了数十年<sup>[10-17]</sup>。入射固体球需要克服临界屈服应力以渗入颗粒床中,随后粒状材料进一步耗散了它们的初始能量,并且以与普通液体中的黏性耗散不同的机制进行<sup>[14-17]</sup>。研究获得了经典的撞击凹坑直径和刚性球入射能量的  $1/4$  次方关系<sup>[13]</sup>。

液滴撞击渗透颗粒层,虽说是上述撞击过程的延伸,但研究工作大多集中在过去十年,其复杂的内在物理机制仍在探索中<sup>[18-23]</sup>。其过程可以分为两部分,一部分是颗粒层表面和液滴在相撞过程中的形变,主要的物理量包括液滴直径、变形流动速率等;另一部分是砸入颗粒层内部的液体的流动渗透,主要物理量包括渗透时间、渗透流动速率等。对于第一部分研究,撞击表面液体形变和颗粒凹坑的形貌是主要的研究对象,通过高速摄影获得撞击过程的图片,在此基础上,Hiroaki Katsurag 总结的颗粒层凹坑的 4 种不同形貌(撞击坑、环状坑、平底坑和沉积坑),其凹坑半径和 We 数为  $1/4$  次方关系<sup>[18]</sup>;Zhao 等测量发现了颗粒层凹坑深度随时间和孔隙率的变化曲线,修正疏松颗粒层中的 We 数,并给出液滴最大形变直径和修正无量纲数  $We^+$  的  $1/4$  次方关系(液滴形

变主要由表面张力阻止),和修正无量纲数  $Re^+$  的  $1/5$  次方关系(液滴形变主要由流动阻力阻止)<sup>[22-23]</sup>。而除了液滴在颗粒表面的形变之外,还会有液体渗透进入颗粒层,内部液体的渗透和流动对于整个过程的影响不可忽略,并值得关注。现有研究有测量液滴从开始触碰到完全没入颗粒层的整个渗透时间(200 ms 以内)<sup>[18,24-25]</sup>和液滴撞击产生震荡变形的持续时间<sup>[18]</sup>;以及渗透完成后液滴和颗粒的黏附形貌<sup>[26]</sup>。

在渗透过程中,由于介质内不同相之间光学折射率往往不一致,光线通过介质时产生大量散射,宏观上表现为介质不透明,光线被颗粒层阻断,这使得层内液体的流动追踪困难,这部分的实验方法一直较为稀缺。由于三维测量较难实现,部分学者将渗透实验简化为二维进行测量。Lembach 利用液体和颗粒的透光性测量狭缝容器中的渗透,用 LED 光获得渗透图像<sup>[27]</sup>。其实实验方法简单可行,可是只能测量二维渗透(容器狭缝只有 1.2 mm,液滴直径超过了 2 mm),且这种狭缝容器中液体在壁面上的流动对实验结果的影响不可忽略,有其局限性;还有一些二维实验研究忽略纵向方向,只考虑扁平的平面二维渗透<sup>[28-31]</sup>。这些二维实验研究较易实现,可由于一个方向上边界的限制和影响,无法反映三维渗透特性。此外,Reis 等尝试使用 MRI 获取颗粒介质中液体的分布形貌,用以研究液体的汽化过程<sup>[32-33]</sup>。其实实验能够获得液体的分布信息,可是这种方法的局限性一个在于它只能反映二维的浓度信息,另一个在于时间分辨率过低,一张图片成像需要 5 min,无法反映快速变化的渗透物理过程,不能满足高速测量需求。近期,Munuhe 等使用基于 X 射线的 Micro-CT 测量下落液滴在颗粒层内的分布,测得液滴在颗粒层内呈现正上方凹陷的半球形,此外还测量了 3 个液滴叠加后的分布形貌,以及静置 24 h 后的形貌<sup>[34]</sup>。这是首次在实验中直接观测到液滴在颗粒层中的三维静态分布形貌。但是由于这些测量方法成像和重构的

时间较长,在秒量级,而撞击渗透的动态过程较快,在毫秒量级,上述技术的时间分辨率相对不足。

本文针对液滴的快速动态过程测量问题,发展了基于激光-荧光-高速相机的测量方法,通过跟踪记录激光激发的液滴荧光信号的变化,来获取内部液体渗透的实时信息,得到液体的空间分布和流动速度信息,进而掌握和分析动态过程。这一方法也可以用于研究其他的渗透和流动过程。

## 2 实验

激光-荧光-高速相机测量方法的原理是将液滴用荧光信号标记,将面激光信号投射在液滴选定截面,当液滴渗透到该截面后,受激光激发产生荧光信号,荧光信号通过滤光片后,由高速相机记录荧光液滴在颗粒层内部的流动,实现对液体在颗粒层内渗透和流动过程的动态观察和记录。如图 1 所示,激光-荧光-高速相机测量系统由撞击渗透系统、光学信号采集系统和数据处理系统三部分构成。

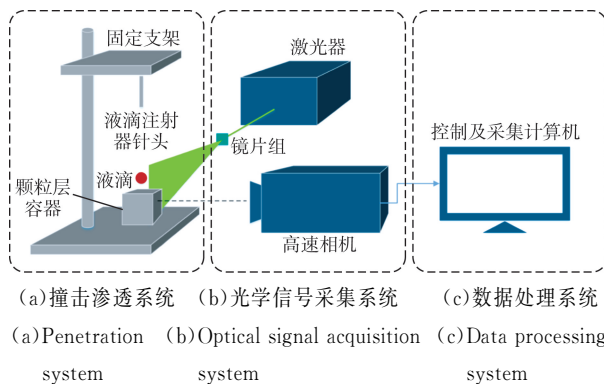


图 1 激光-荧光-高速相机测量实验系统

Fig. 1 Laser-fluorescence high-speed camera measuring system

### 2.1 撞击渗透系统

撞击渗透系统由液滴发生及其控制装置和被撞击颗粒层构成,用于生成液滴、调整液滴下落高度和落点、以及固定被撞击颗粒层。

在液滴产生控制装置中,液体从注射器中推出,推送至特定大小的针头处排出,生成液滴,液滴的大小可以用针头来控制;针头由支架固定,可在三维方向移动,用于调整液滴下落的空间位置。

本实验用针头产生的液滴直径为 1.2 mm。液滴成分和颗粒层中填充液体相同。荧光染料选用若丹红 B。

被撞击颗粒层放置在液滴下方。颗粒使用 100  $\mu\text{m}$  的 PMMA 颗粒。在颗粒层中填充折射率匹配的液体,最大程度消除荧光通过颗粒层时产生的散射,让测量结果更准确。这里使用的液体由水和硫二甘醇组成,通过调整两者比例,可以改变混合液体的光学折射率,使其折射率尽量接近 PMMA 颗粒。填充后,理想情况是固液两相折射率一致,混合物在光学上犹如单一介质,光线能够在介质内保持畅通笔直,不会被散射影响。放置颗粒的容器呈长方体,尺寸为 12 mm  $\times$  12 mm  $\times$  30 mm。渗透过程是个三维过程,通过液滴和颗粒层填充相同的液体,来保证实验在水平面上各向同性,从而可以实现测量中以垂直面的二维信息来描述三维过程。而颗粒容器的尺寸需要综合考虑壁面效应和光学散射干扰,壁面效应希望容器尺寸越大越好,而光学散射干扰希望容器尺寸越小越好,因此,本文通过折射率匹配方法最后选定了本实验所用容器尺寸。

### 2.2 光学信号采集系统

光学信号采集系统由激光器、高速相机和透镜构成,用于拍摄和记录液滴的渗透过程。实验目标是将激光投射到带有荧光材料的液滴上,让液滴能够发射特定波长的荧光信号,并通过滤光片过滤原激光信号,留下荧光信号进入相机,记录一定时间内荧光信号的变化信息。

将 532 nm 激光器(研邦科技,型号 RN-H-532 nm)产生的点激光通过凹凸镜组合,在一个方向上拉伸变换成面激光,从侧面入射到颗粒层中,调整激光位置,使得面激光穿过颗粒层的正中心,获取荧光信号可直接反映出该平面上液滴在颗粒层中的分布,如图 2(a)所示。在激光器和凹凸透镜之间可以添加一个小平面镜,通过小平面的旋转,可以周期性改变激光射入颗粒层的位置,从而改变颗粒层被照亮截面的位置,获取不同截面上液滴的分布信息,如图 2(b)所示。在实验中,激光面的扫描速度可以达到 20 面每毫秒。进一步对这些激光面进行整合重构,可以达到局部准 3D 的测量效果。

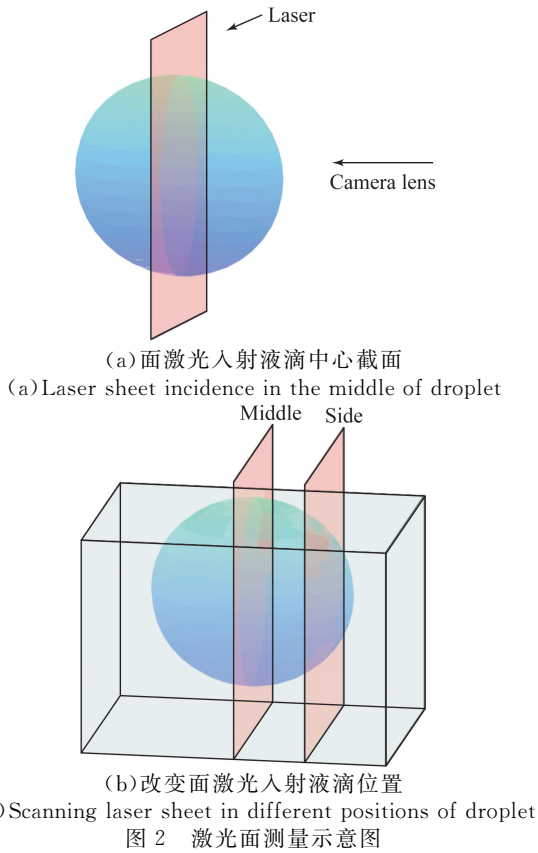


Fig. 2 Schematic diagram of laser sheet measurement

当带有荧光物质的液滴被激光激发后,液滴外被反射的激光和荧光信号同时进入高速相机镜头中。为了阻挡短波长激光信号,获得长波长纯荧光信号,实验时在相机镜头前添加滤光片(Edmund, 600 nm)。测试效果如图 3 所示,在未放置滤光片之前,相机记录的发亮区域包括有针头和悬挂于上面的液滴;若是将滤光片置于相机镜头前,则能过滤针头反射的激光信号,而通过液滴内的荧光信号;若是将滤光片置于激光源头前,则由于它阻挡了激光信号,视野内没有任何光信号。由此测试可以验证加入滤光片可以排除激光信号的干扰,之后拍摄获得的信号是实验所需要的荧光信号。

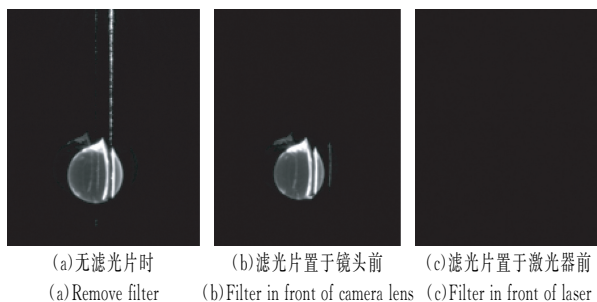


图 3 滤光片测试图

Fig. 3 Images of droplet with and without optical filter

高速相机型号为美国 Phantom V1612,显微镜镜头采用 Navitar 12 倍变焦透镜系统,相机最大像素为  $1\,280 \times 800$ ,最高拍摄频率为  $28\,000$  frame/s。实验中设定相机像素为  $640 \times 480$ ,针对一个截面的拍摄频率为  $2\,000$  frame/s,曝光时间为  $1$  ms。在本实验条件下,系统的空间分辨率达到  $0.02$  mm,时间分辨率达到  $0.5$  ms。拍摄前将高速相机固定好,正对着渗透区域,和面激光入射方向成  $90^\circ$ ,同时调整相机焦平面,使之与投射在液滴内的激光面重合。拍摄过程中保持激光器功率和相机参数不变,对不同工况的液滴渗透过程拍照,可获得一系列清晰且强度不饱和的液体渗透照片。

### 2.3 数据处理系统

数据的储存和处理由连在高速相机上的计算机完成。从相机上传送来的数据是一张张部分区域发亮的图片,这些发亮的区域代表着液滴在颗粒层内部的分布,记录下不同时刻的照片数据,即液体分布的动态变化过程。得到的渗透图像像素为  $640 \times 480$ ,把图片组导入 Matlab,编程将图像矩阵化,对发亮区域进行识别,我们可以得到区域边界移动的信息。这些边界移动涵盖了二维平面所有方向上的边界变化,对于感兴趣的方向,进一步分析得到该方向上的边界距离、速度和加速度的信息。用于数据处理的 Matlab 程序流程如图 4 所示。

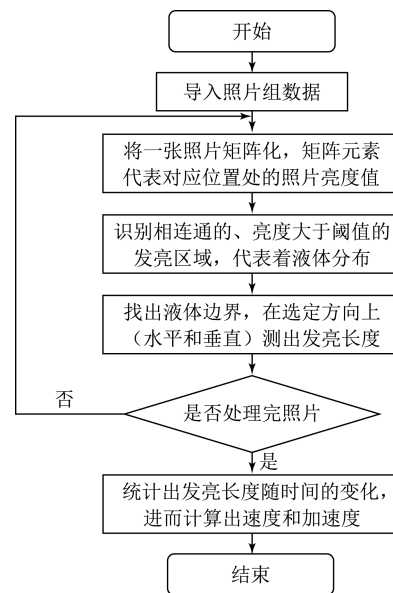


图 4 Matlab 图像处理程序

Fig. 4 Matlab image processing program

### 3 实验结果及分析

渗透过程的系列图像如图 5 所示,图 5 给出了液滴中心截面从渗透开始 0~0.5 s 过程中,每间隔 0.05 s 拍摄的图片,以及 1 s 和 2 s 时的渗透图片。从图中可以看出,液滴开始从高处落下,以一定速度撞击在湿润颗粒层上部;撞击过后,液滴

开始变形,同时开始往层内渗透流动;在渗透过程中,液体一方面横向扩展,另一方面纵向扩展,形成越来越大的发亮区域。

从实验数据中可获得每一时刻层内液体的分布形貌。为了方便呈现结果,在这里选择两个参数进行展示,分别为横向、纵向最大发亮距离,代表了渗透过程中某一时刻液滴流动的最大宽度和最大深度。

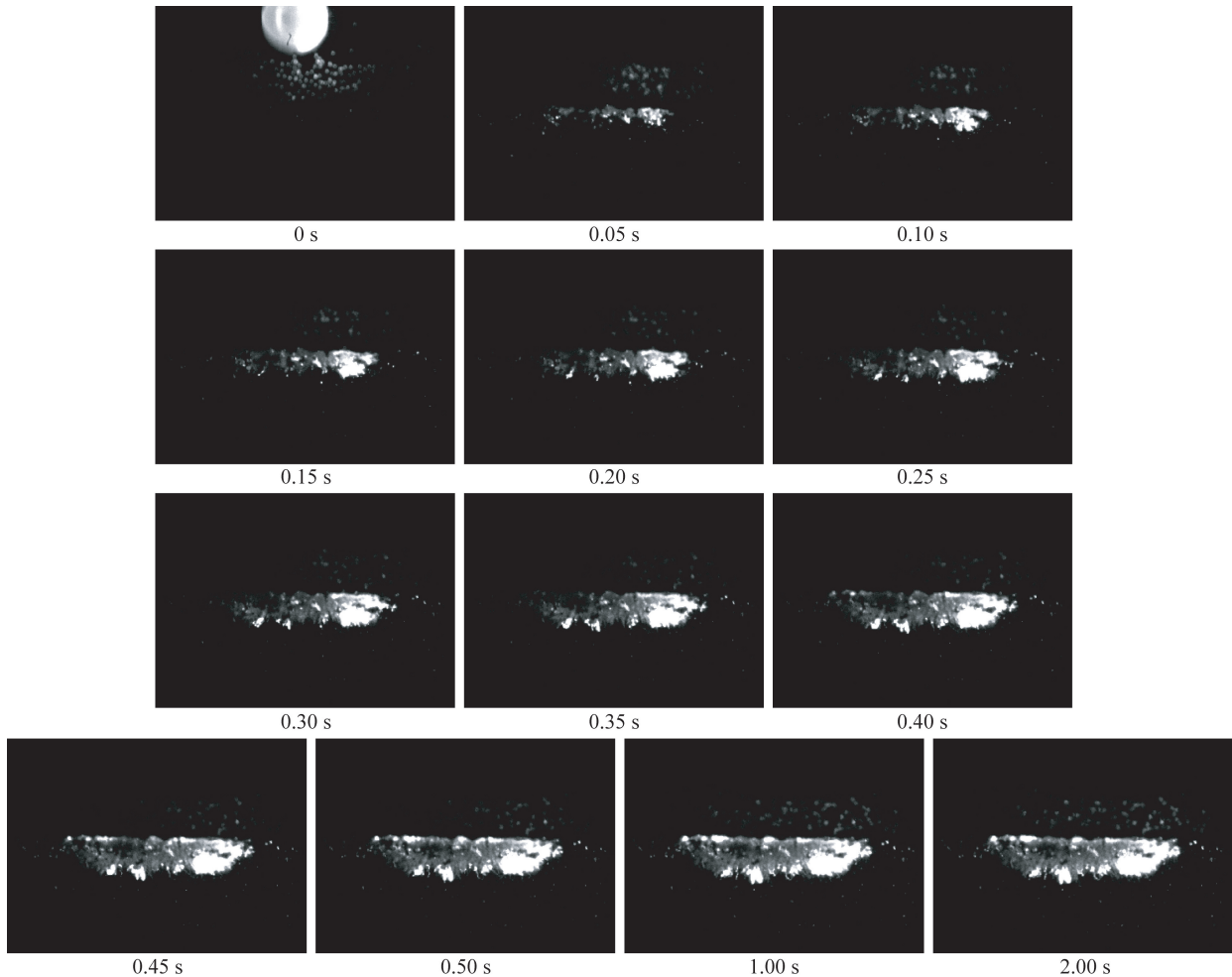


图 5 液滴下落后在颗粒层内部渗透流动过程

Fig. 5 Droplet flows in granular medium

图 6 给出了液滴 3 个不同下落高度时,2 s 内渗透宽度和深度随时间的变化曲线。从图中可以看出,本实验方法能够得到两个方向上渗透的实时距离信息。这里的时间分辨率由相机速度决定,如果需要更精确的速度信息,可以提高相机速度,以达到实验需要。从数据中可以初步推断,渗透的快速过程发生在 1 s 内,要想获取较完整的

信息,实验的时间分辨率最好达到 1 ms 以上。

除了液滴中心截面的渗透信息,实验还可以拓展到液滴其他截面的信息。通过改变面激光照亮的位置,获得不同位置截面的液体流动,进而获得准 3D 渗透信息。实验中尝试了最多 20 个截面,图 7 给出了液滴下落高度为 35 mm 时,液滴中心截面和相隔 2.1 mm 处截面的宽度和深度数据。

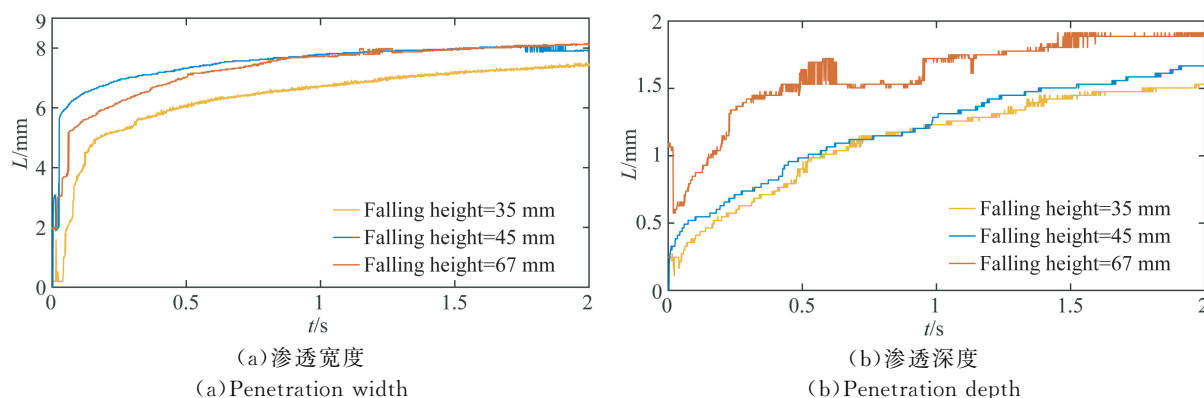


图6 液滴在三个不同高度随时间的变化曲线  
Fig. 6 Variation of droplet flowing at three falling heights

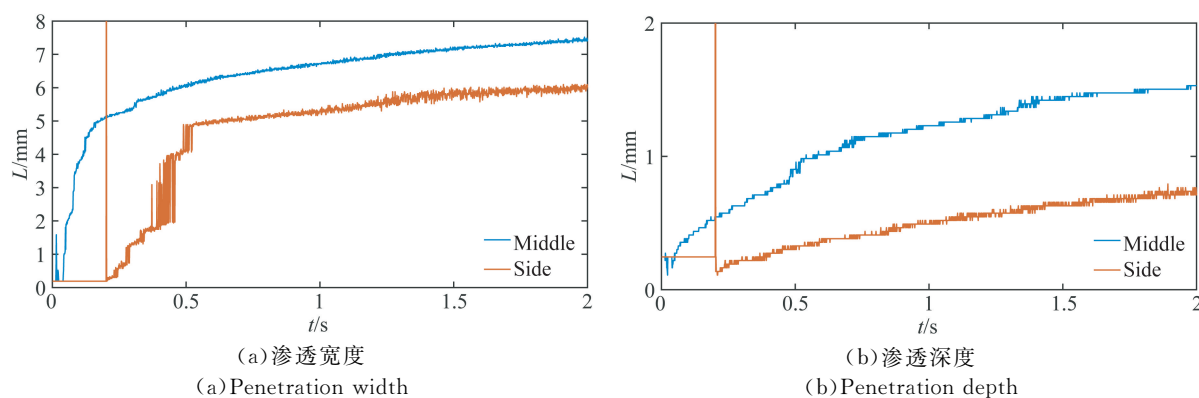


图7 改变激光面位置液滴随时间的变化曲线  
Fig. 7 Variation of droplet flowing with laser sheet in two different positions

## 4 结论

本文搭建了激光-荧光实验系统,用以记录和分析液滴与湿颗粒层碰撞后层内液体的渗透流动过程。通过折射率匹配等实验方法,降低了湿颗粒层内的光散射,利于光信号的采集和分析。通过高速拍摄得到了每个时刻层内液体的分布形貌,可以获得不同方向上渗透距离随时间的变化

信息,进而分析得到不同方向上液滴渗透的速度和加速度信息,便于后续受力和能量变化规律的研究。同时还可以得到液滴不同截面处的渗透形貌,进而重构出准3D渗透流动过程。初步试验表明这一方法行之有效,实验系统的空间分辨率达到0.02 mm,时间分辨率达到0.5 ms,可满足渗透过程测量的稳定可靠、高时空分辨率的要求,能够较为准确地记录和描述这个快速变化的动态过程,得到之前研究未能获取的信息。

### 参考文献:

- [1] THORODDSEN S T, THORAVAL M J, TAKEHARA K, *et al.*. Droplet splashing by a slingshot mechanism [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, 106(3): 034501.
- [2] HAPGOOD K P, KHANMOHAMMADI B. Granulation of hydrophobic powders [J]. *Powder Technol.*, 2009, 189(2): 253-262.
- [3] NGUYEN T, SHEN W, HAPGOOD K. Drop penetration time in heterogeneous powder beds [J]. *Chem. Eng. Sci.*, 2009, 64(24): 5210-5221.
- [4] PASANDIDEH-FARD M, AZIZ S D, CHANDRA S, *et al.*. Cooling effectiveness of a water drop impinging on a hot surface [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2001, 22 (2): 201-210.
- [5] VAN DAM D B, LE CLERC C. Experimental study of the impact of an ink-jet printed droplet on a solid substrate [J]. *Phys. Fluids*, 2004, 16 (9): 3403-3414.
- [6] QUÉRÉ D. Fluid dynamics: impact on Everest [J]. *Nature*, 2005, 435(7046): 1168-1169.

- [7] GILET T, BUSH J W M. Erratum: Chaotic bouncing of a droplet on a soap film [J]. *Physical review letters*, 2009, 103: 019901.
- [8] RIBOUX G, GORDILLO J M. Experiments of drops impacting a smooth solid surface: A model of the critical impact speed for drop splashing [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(2): 024507.
- [9] GUÉMAS M, MARÍN Á G, LOHSE D. Drop impact experiments of non-Newtonian liquids on microstructured surfaces [J]. *Soft Matter*, 2012, 8(41): 10725-10731.
- [10] NELSON E L, KATSURAGI H, MAYOR P, et al.. Projectile interactions in granular impact cratering [J]. *Phys. Rev. Lett*, 2008, 101(6): 068001.
- [11] LOHSE D, BERGMANN R, MIKKELSEN R, et al.. Impact on soft sand: void collapse and jet formation [J]. *Phys. Rev. Lett*, 2004, 93(19): 198003.
- [12] BELADJINE D, AMMI M, DGER L, et al.. Collision process between an incident bead and a three-dimensional granular packing [J]. *Phys. Rev. E*, 2007, 75(6): 061305.
- [13] WALSH A M, HOLLOWAY K E, HABDAS P, et al.. Morphology and scaling of impact craters in granular media [J]. *Phys. Rev. Lett*, 2003, 91(10): 104301.
- [14] JAEGER H M, NAGEL S R, BEHRINGER R P. Granular solids, liquids, and gases [J]. *Rev. Mod. Phys.* 1996, 68(4):1259.
- [15] DE GENNES P G. Granular matter: a tentative view [J]. *Rev. Mod. Phys.* 1999, 71(2): s374.
- [16] KADANOFF L P. Built upon sand: theoretical ideas inspired by granular flows [J]. *Rev. Mod. Phys.* 1999, 71(1): 435-444.
- [17] ARANSON I S, TSIMRING L S. Patterns and collective behavior in granular media: theoretical concepts [J]. *Rev. Mod. Phys.* 2006, 78(2): 641.
- [18] KATSURAGI H. Morphology scaling of drop impact onto a granular layer [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(21): 208001.
- [19] LONG E J, HARGRAVE G K, COOPER J R, et al.. Experimental investigation into the impact of a liquid droplet onto a granular bed using three-dimensional, time-resolved, particle tracking [J]. *Physical Review E*, 2014, 89(3): 032201.
- [20] CLANET C, BÉGUIN C, RICHARD D, et al.. Maximal deformation of an impacting drop [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2004, 517: 199-208.
- [21] NEFZAOU E, SKURTYS O. Impact of a liquid drop on a granular medium: Inertia, viscosity and surface tension effects on the drop deformation [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, 41: 43-50.
- [22] ZHAO S C, DE JONG R, VAN DER MEER D. Raindrop impact on sand: a dynamic explanation of crater morphologies [J]. *Soft Matter*, 2015, 11(33): 6562-6568.
- [23] ZHAO S C, DE JONG R, VAN DER MEER D. Liquid-grain mixing suppresses droplet spreading and splashing during Impact [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(5): 054502.
- [24] ANANTH PRAVEEN KUMAR A, SANDIREDDY V P, BANERJEE T, et al.. Dynamics of a liquid droplet on a granular bed of microstructured particles: from lens formation to marble effect [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, 54(3): 1131-1141.
- [25] MARSTON J O, SPRITTLES J E, ZHU Y, et al.. Drop spreading and penetration into pre-wetted powders [J]. *Powder Technology*, 2013, 239: 128-136.
- [26] GAO T X, SINGARAVELU A S S, OKA S, et al.. Granule formation and structure from single drop impact on heterogeneous powder beds [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2018, 552(1/2): 56-66.
- [27] LEMBACH A, ROISMAN I, TROPEA C. Drop impact on porous media [C]. *Proceeding of ILASS-Europe, 24th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Estoril, Portugal*, 2011.
- [28] STAROV V M, KOSTVINTSEV S R, SOBOLEV V D, et al.. Spreading of liquid drops over dry porous layers: complete wetting case [J]. *Colloid Interface Sci*, 2002, 252(2): 397-408.
- [29] 王伟, 张敏, 占国清, 等. 面向空气静压支承的多孔材料渗透特性研究 [J]. *光学 精密工程*, 2017, 25(9): 2359-2366.  
WANG W, ZHANG M, ZHAN G Q, et al.. Study on permeability characteristics of porous materials for aerostatic support [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(9): 2359-2366. (in Chinese)
- [30] DANINO D, MARMUR A. Radial capillary penetration into paper: limited and unlimited liquid reservoirs [J]. *Colloid Interface Sci*, 1994, 166(1): 245-250.

- [31] BORHAN A, RUNGTA K K. An experimental study of the radial penetration of liquids in thin porous substrates [J]. *Colloid Interface Sci*, 1993, 158(2): 403-411.
- [32] REIS N C Jr, GRIFFITHS R F, MANTLE M D, *et al.*. Investigation of the evaporation of embedded liquid droplets from porous surfaces using magnetic resonance imaging [J]. *Heat Mass Transfer*, 2003, 46(7):1279-1292.
- [33] REIS N C Jr, GRIFFITHS R F, MANTLE M D, *et al.*. MRI investigation of the evaporation of embedded liquid droplets from porous surfaces under different drying regimes [J]. *Heat Mass Transfer*, 2006, 49(5/6): 951-961.
- [34] MUNUHE T, LEBRUN A, ZHU L, *et al.*. Using micro-ct to investigate nanofluid droplet sorption in dry powder beds [J]. *Powder Technology*, 2017, 305: 232-240.

#### 作者简介:



钟哲晗(1991—),男,福建厦门人,博士生,2013年于清华大学获得学士学位,主要从事液滴、颗粒及燃烧污染物控制方向的研究。E-mail: zzhthu@qq.com



卓建坤(1975—),男,福建莆田人,博士,副研究员,1997年、2000年于浙江大学分别获得学士、硕士学位,2008年于清华大学获得博士学位,主要从事生物质及可再生能源多能互补利用等方面的研究。E-mail: zhuojk@tsinghua.edu.cn