

文章编号: 1001-4888(2024)01-0007-10

基于数字图像相关法的透明液滴形貌测量方法^{*}

谭新韵, 沈丽骊, 孙晨

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 对固体表面液滴形貌的测量与分析是探究固-液相互作用、表面性能表征中的重要环节。然而, 透明液滴通常在光学系统中难以成像, 从而为其全场形貌测量带来了极大困难。为此, 本文提出了一种透明液滴三维形貌测量方法, 以液滴诱发图像位移结合折射成像规律实现液滴形貌的测量。首先, 通过数字图像相关法测量液滴导致的固体表面图像位移; 其次, 建立基于折射成像的物理模型, 确立图像位移与液面高度之间的关系; 最后, 由实验测量到的图像位移, 结合物理模型求解液面高度, 实现液滴三维形貌的重建。实验结果表明, 所提出的方法能够准确地测量固体表面的液滴三维形貌, 并且适用于不规则液面的测量。

关键词: 液滴; 三维形貌; 数字图像相关; 全场测量

中图分类号: O39

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-23-093

0 引言

液滴在固体表面的附着、凝结与铺展等行为是极其常见的自然现象^[1], 同时也是化工^[2]、微电子^[3-4]、航空航天^[5]等领域中众多工程问题的典型物理原型。液滴在固体表面形成的形貌特征及其蒸发、铺展行为在很大程度上影响着设备性能。例如, 在燃料电池研究中, 良好的铺展性能能够改善气体通道和纤维扩散层中的水-空气传输效率, 从而提升聚合物电解质膜燃料电池性能^[6]; 在 3D 打印及喷墨打印中^[7-9], 墨滴的蒸发特性以及形状控制直接关系到打印精度; 在航空安全领域^[10-11], 云层液滴在飞行器表面的凝结与流动过程中的尺寸及形状特征决定翼面冰霜的形状, 液滴凝结研究可以为飞行器表面防结冰系统的设计与优化提供参考。因此, 准确表征液滴铺展、蒸发等过程中的形貌特征, 对探究固液表面相互作用规律、优化系统及结构表面设计等有着重要的意义。

液滴自身的力学及物理特性为其形貌测量带来了极大的困难。一方面, 液滴在测量时无法使用传统的接触式轮廓测量方法; 另一方面, 绝大部分液滴具有透明特性, 其表面难以进行反射式成像, 这为一些传统的光学三维测量方法, 如结构光法^[12-13]、立体视觉法^[14-15]、激光共焦法^[16]等带来了很大的困难; 此外, 液滴形貌还具有典型的时变特征, 其形貌会随着铺展、蒸发、凝结等过程发生微小而复杂的变化^[17], 这对测量方法的时空分辨率提出了很高的要求。

为解决透明液滴表面难以成像的问题, 有学者采用从液滴侧面成像的方法, 对液滴的轮廓曲线进行测量, 进而分析接触角、轮廓演化等^[18-19], 这类方法通常只能测量到液滴的二维轮廓。此外, 折射透镜法^[4]基于液滴表面折射或反射形成的明亮光圈实现轮廓的测量, 并能够快速推算接触角, 但该方法对于液滴形貌进行了表面近似于球盖、接触线近似圆形的假设, 因此只适用于液滴形状较为规则的情形。激光影射法^[20-21]可以实现非透明金属基底上的液滴的接触角测量, 同时可以利用投影上的干涉条纹识别

^{*} 收稿日期: 2023-05-06; 修回日期: 2023-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(12272227)

通信作者: 孙晨(1989—), 男, 副研究员。从事实验固体力学及测试方法研究。Email: sunchen712@sjtu.edu.cn

接触线附近的液滴轮廓,但这类方法通常只适用于测量液滴在固体表面的投影轮廓,无法获取液滴的三维形貌。透射云纹方法可以实现液面测量^[22],但主要用于测量液面表面的凹陷,并且不适用于大斜率液面的测量。

以上述方法为代表的液滴轮廓测量方法仅仅是以接触角等简单参量,或液滴在某个方向上的二维投影轮廓描述液滴形貌,无法获取其三维形貌,从而对于液滴铺展、蒸发等行为中的不规则形貌变化难以进行有效表征。为此,本文提出了一种基于全场光测技术以及折射模型的液滴形貌测量方法,来测量固体表面的透明液滴的三维轮廓。该方法的基本思想如下:首先,以数字图像相关法(Digital Image Correlation, DIC)为基础,测量液滴导致的固体表面图像位移;其次,基于光学折射原理建立物理模型,以获取图像位移与液滴表面各点高度之间的关系;最后,由实验测量的图像位移求解液面各点高度,实现液滴形貌的重建。该方法仅依靠折射定律进行模型建立,并未对液滴轮廓进行假设,因此可适用于不规则形状的液滴表征。本文基于该方法开展了蒸馏水蒸发过程的实验表征,实验结果表明,该方法具有较高的测量精度与可靠性。

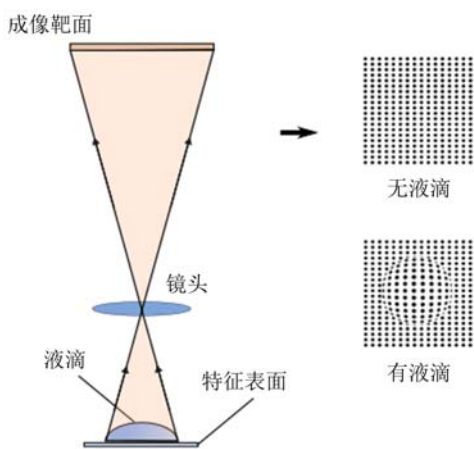


图 1 测量光路设计

Fig. 1 Optical path of the metrology

描述液滴表面折射导致的基底图像变化。DIC 是一种成熟的非接触式光学测量技术^[23-26],它通过将待测表面不同状态下的散斑图案与参考图像进行对比,根据灰度匹配寻找图像中各个点的对应关系,从而得到待测物体表面位移信息。在位移场测量中,采用基于子区域的 DIC 算法,逐点寻找参考图中各个点在目标图中的对应位置。采用零均值归一化最小平方函数(Zero-mean Normalized Sum of Squared Differences, ZNSSD)来描述不同图像中子区域的匹配程度:

$$C(p) = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M \left[\frac{f(x, y) - f_m}{\sqrt{\sum_{y=-M}^M [f(x, y) - f_m]^2}} - \frac{g(x', y') - g_m}{\sqrt{\sum_{y=-M}^M [g(x', y') - g_m]^2}} \right]^2 \quad (1)$$

$$\begin{cases} f_m = \frac{1}{(2M \times 1)^2} \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M f(x, y) \\ g_m = \frac{1}{(2M \times 1)^2} \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M g(x', y') \end{cases} \quad (2)$$

式中: $f(x, y)$ 为参考子区中点 $P(x, y)$ 的灰度值; $g(x', y')$ 为 $P'(x', y')$ 的灰度值; f_m 、 g_m 分别为参考子区和目标子区灰度平均值; p 为参考子区到目标子区的变形参数矢量。相关系数 $C(p)$ 数值越小,代表参考子区到目标子区匹配的可靠度越高^[27]。

基于 DIC 方法搭建的测量系统如图 2 所示。该系统由透射式光源(由光源及凹面反光镜组成)、载物台、散斑基底、成像系统构成。其中,散斑基底采用激光打印的方式,形成特定散斑尺寸大小的图案;点光源的光线经由凹面镜反射后汇聚到散斑基底上,穿过特征表面及液滴实现最终成像。通过更换不同类型的特征表面,如亲水、疏水等,可以分析不同表面上的液滴形貌特征。本文以无液滴的散斑基底

1 基本原理

1.1 测量系统设计

建立由图 1 所示的测量光路,该光路采用透射式成像,透射光从下方通过特征表面图案并穿过液滴内部,经由液滴表面折射后再成像至相机靶面。通过采集有液滴以及不含液滴的散斑图案,将对液滴三维形貌的测量转化为对折射引起的散斑图案图像位移的测量。根据小孔成像模型可以推断,成像靶面的点与液滴表面的折射点存在一一对应的关系,因此,通过全场图像位移可以实现液滴形貌的反向计算与重建。

1.2 位移测量

本文方法采用 DIC 获取全场位移,从而可以定量

照片作为参考,以连续拍摄的有液滴散斑基底照片作为目标图像,测量得到了三维液滴表面生成及形态变化过程中散斑基底在不同时刻通过液滴折射后的全场相对平面位移。值得一提的是,对于反射式表面,该系统同样可以经过简单的调整,采用被测表面的反射图像特征实现位移场的测量。

1.3 模型建立

建立基于折射光路的物理模型,以确立液滴三维形貌与散斑基底图像位移之间的定量关系。本文主要对接触角小于 90° 的液滴进行建模与测量。针对如图 3(a) 所示的液滴,将液滴底面 $X-O-Y$ 平面定义为液滴基准面。为不失一般性,选取任意剖面(A_0-O-Z_0)进行分析,将其向 $X-O-Z$ 平面进行投影,如图 3(b) 所示。其中, $O(0,0)$ 为工业相机镜头靶面中心到液滴基平面的投影坐标位置, $Z_0(0, z_0)$ 为小孔成像中镜头光心点, $X(x, h_1)$ 为液面剖面上某一折射点的坐标位置。

假设成像靶面某点在基底上无液滴时,该点在 X 轴上对应于实际空间点为点 $A_2(a_2, 0)$, 含有液滴时,对应于点 $A'_2(a'_2, 0)$ 。当前一液面折射点高度 h_0 已知时,在 Z 向上距离 X 轴高度 h_0 处建立水平轴 X_1 , $B_1(b_1, 0)$ 为 X_1 轴上计算点 A'_2 时所选取的参照点, $B_2(b_2, 0)$ 、 $B'_2(b'_2, 0)$ 分别为 $A_2(a_2, 0)$ 、 $A'_2(a'_2, 0)$ 的透射光路与 X_1 轴的交点。计算过程中参照点 B_1 的选取由 DIC 测量结果决定,通常选择特征点中距离待测点 A_2 最近的参照点。点 A_2 与 A'_2 的

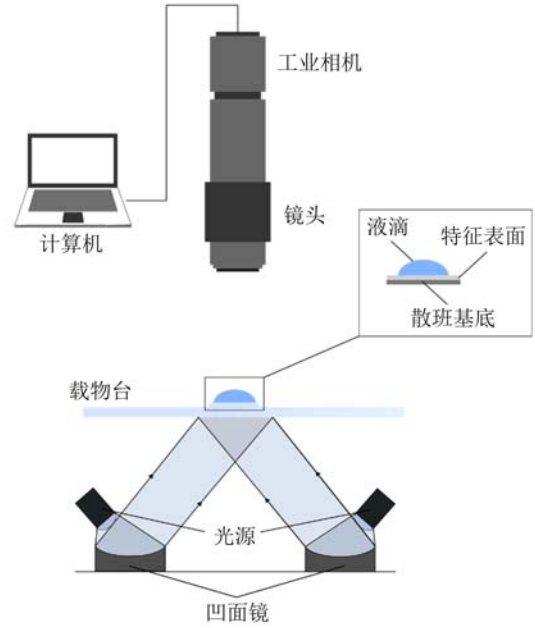


图 2 系统示意图

Fig. 2 System schematic

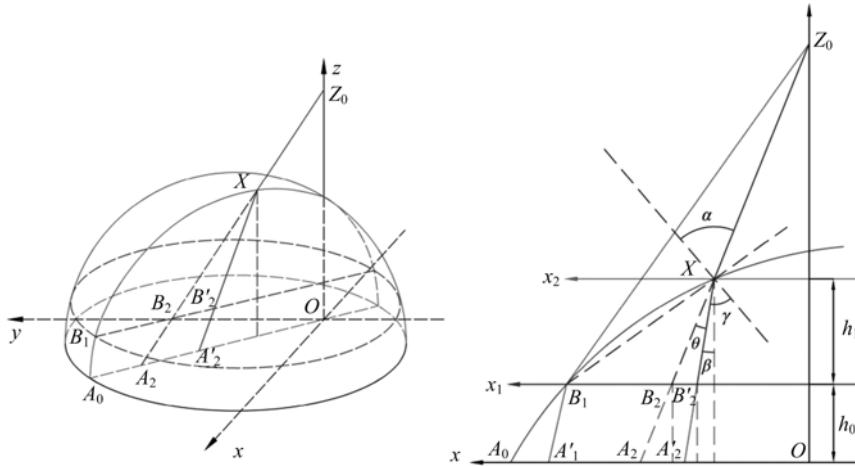


图 3 液滴折射模型：(a) 三维折射示意图；(b) $X-O-Z$ 平面折射投影

Fig. 3 Refraction model of the droplet: (a) three-dimensional refraction diagram;

(b) refraction projection onto the $X-O-Z$ plane

对应关系可由 DIC 的匹配关系确定,点 B_2 与 B'_2 之间的距离可以由相似关系确定, B_1 与 B_2 之间的距离可由 DIC 参考点的选取以及采样间隔确定。其中两轴间坐标转换关系如下:

$$\frac{b_2 - x}{a_2 - x} = \frac{h_1}{h_0 + h_1} \quad (3)$$

$$\frac{b'_2 - x}{a'_2 - x} = \frac{h_1}{h_0 + h_1} \quad (4)$$

设折射入射角为 α , 折射角为 γ , 实像 A_2 、虚像 A'_2 与折射点 $X(x, h_1)$ 所成的夹角为 θ , 待测液滴折射率为 i , 由余弦定理和入射折射角关系可以得到

$$\alpha = \theta + \gamma \quad (5)$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = i \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \cos^{-1} \frac{B_1 X^2 + B_2 X^2 - B_1 B_2'^2}{2 \times B_1 X \times B_2 X} \quad (7)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{B_2 X^2 + B_2' X^2 - B_2 B_2'^2}{2 \times B_2 X \times B_2' X} \quad (8)$$

液面折射点 $X(x, h)$ 中 x 和 h_1 在轴 X_1 坐标系下有关系:

$$h_1 = -z_0 \left(\frac{x}{b_2} + 1 \right) \quad (9)$$

将式(6)~(8)代入式(5)中, 可以将式(5)改写为

$$\frac{M}{i} = MN - \sqrt{1 - M^2} \times \sqrt{1 - N^2} \quad (10)$$

式中:

$$M = \frac{B_1 X^2 + B_2 X^2 - B_1 B_2'^2}{2 \times B_1 X \times B_2 X}, N = \frac{B_2 X^2 + B_2' X^2 - B_2 B_2'^2}{2 \times B_2 X \times B_2' X}$$

在式(10)中代入 DIC 计算得出的各点坐标, 化简后可以得到关于 P 的一元四次方程如下:

$$f(P) = \begin{bmatrix} P^4 \\ P^3 \\ P^2 \\ P \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} (1 - i^2) C^6 \\ 2(A + B)(1 - i^2) C^4 \\ [4AB + A^2 + B^2 C^2 + 2AB C^2 i^2 - (A + B)^2 i^2] C^2 \\ [2AB(A + B) i^2 + 2AB^2 + 2B \frac{A^2}{C^2}] C^2 \\ A^2 B^2 - A^2 B^2 C^2 i^2 \end{bmatrix}^T = 0 \quad (11)$$

式中: $P = x - b_2$, $A = b_2 - b_1$, $B = b_2 - b_2'$, $C = \sqrt{\left(\frac{z_0^2}{b_2^2} + 1\right)}$ 。

解方程式(11), 即可以由 P 求得液面折射点在 $O-XZ$ 平面上的横坐标 x , 根据式(1)、式(2)和式(7)即可得出对应的液面高度。同理, 利用相同的投影方法可计算得到液面折射点在 $O-YZ$ 平面上的横坐标 y 和对应的液面高度, 将两者矢量结合即可得到该像素点对应的液面折射点位置信息。至此, 建立起了液滴基准面上液面覆盖下任意一点位移和对应液面折射点高度的显式关系。

1.4 形貌重建

在形貌重建过程中, 通过相机标定技术确定模型中的待定参量 Z_0 。具体过程为: 采用张正友标定法^[28]确定相机外参矩阵, 可以得到液滴基准面到相机成像靶面的空间转换关系:

$$s \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K}[\mathbf{R} \mathbf{T}] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: (x_c, y_c) 为相机坐标; (X, Y, Z) 为世界坐标系; s 为比例因子; $\mathbf{K}$ 为相机内参数矩阵; $\mathbf{R}$ 、 $\mathbf{T}$ 分别为空间坐标系到相机坐标系的旋转矩阵及平移矩阵。在标定获得的外参数平移矩阵 $\mathbf{T}$ 中, 可得到相机距离液滴基准面的高度 Z , 通过小孔成像原理可确定镜头光心点 Z_0 :

$$Z_0 = \frac{L_0}{L_0 + L} Z \quad (13)$$

在物理模型基础上, 根据递推关系, 选取液滴边缘点作为递推起始点, 逐点实现液滴三维形貌的重建。其中, 液滴边缘点由 DIC 测量得到的位移场进行确定: 考虑到未被液滴覆盖区域的位移接近于 0, 因此, 对 DIC 测量得到的位移场进行阈值分割, 将位移绝对值大于给定值的区域定义为液滴区域, 并采用边缘检测算法确定液滴的边缘点, 将其液面高度定义为 0。以边缘点坐标以及高度为起始点, 通过物理模型逐点求解与之相邻点的相对高度值, 通过递推运算遍历所有点。沿 X 方向及 Y 方向分别遍历计算, 将得到的结果进行平均化处理, 重建出完整的液面三维形貌。

2 实验

2.1 实验设计

为验证所建立物理模型的可行性,本文根据图2所示示意图搭建测量系统。系统中采用型号为 Basler acA5472-5gm 的工业相机(分辨率为 $5472\text{pixel} \times 3648\text{pixel}$),配合 Navitar 长焦镜头,最终形成约 $9\text{mm} \times 6\text{mm}$ 的成像区域。通过在胶版纸上进行喷墨打印和聚氯乙烯塑封形成基底,为 DIC 测量提供散斑信息。实验标定中采用张正友标定法,棋盘格单格尺寸为 $0.25\text{mm} \times 0.25\text{mm}$,整体尺寸为 $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ 。最终形成的系统如图4所示。

在验证实验过程中,以蒸馏水作为实验工质,将其悬滴^[29]至测量区域中。对水滴蒸发过程图像进行连续采集,采样频率为每秒1帧,直至其完全蒸发。蒸发完全的时刻由侧视辅助镜头所拍摄的图像确定,当拍摄到的液滴侧面轮廓消失且长时间无变化时,判定其蒸发完全并停止采样。采用张正友标定法获取相机参数,通过标定板的面内移动、升降和旋转获取不同的姿态。根据外参数平移矩阵和镜头光心点高度的关系,确定参数 Z_0 。以完全蒸发后的图像为 DIC 计算中的参考图,以不同时刻采集的图像为目标图。在 DIC 测量过程中,计算区域(ROI)如图5(a)所示,采样间隔为 20pixel ,子区域大小为 $81\text{pixel} \times 81\text{pixel}$,通过特征表面点折射前后图像位置变化计算得到全场位移。将全场位移代入物理模型,获取各液面折射点高度。根据平面所有坐标点对应的液面折射点高度信息,将折射点经过曲面拟合后得到液体表面形貌。

2.2 实验数据处理与分析

实验中采集到的含液滴情形下的原始图像如图5(a)所示,图中散斑图案清晰度较高,液滴轮廓明显。以无液滴的散斑基底图像为参考图,计算含液滴状态下不同时刻的全场位移,各个时刻下,测量得到的全场 ZNSSD 均小于 0.1,这表明,液滴生成前后的子区域之间具有很高的匹配度。对位移测量结果进行边缘检测,根据位移阈值分割得到液滴边缘,其中,阈值选为 3pixel ,大于该阈值的可认为是液滴覆盖的点。计算时将液滴边缘认为是液面高度为 0 的点,以此作为参考,通过物理模型递推计算其余特征点相对高度,最终得到整体高度分布。图5分别给出了0时刻(即液滴悬滴至表面的时刻)原始图像、位移大小(位移向量的模长)以及基于位移的液滴边缘检测结果。

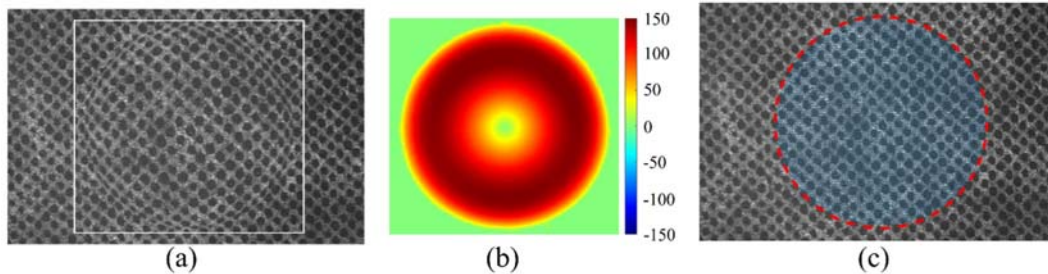


图5 (a)含液滴状态下原始图像;(b)DIC获取的图像位移分布(单位:pixel);(c)液滴边缘检测结果

Fig. 5 (a) initial image with droplet; (b) distribution of image displacements calculated by DIC(unit: pixel);

(c) results of edge detection for droplet

从图5(b)可观察到,位移分布整体光滑、连续,呈中心对称趋势。液滴中心区域的位移最小,几乎接近于0。这表明,尽管液滴中央区域的液面高度最高,但是该区域的法线方向与镜头光轴接近平行,使其位移受折射影响较小。相比而言,远离中央区域的位移较大,这是液面法线方向与镜头光轴的夹角

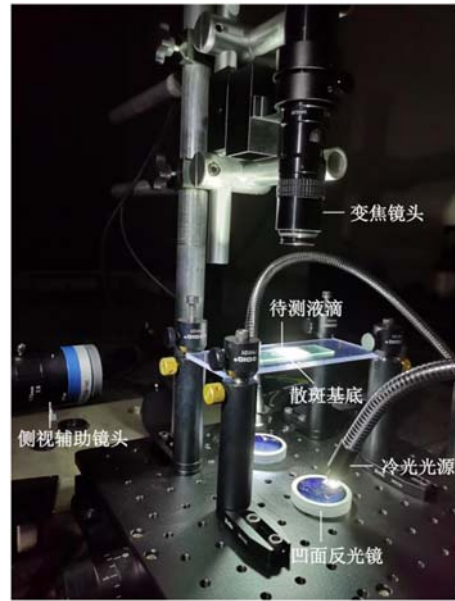


图4 测量系统示意图

Fig. 4 Measurement system

增大所导致的。尽管液滴边缘区域的液面高度趋近于 0,但是由于该区域的液面斜率较大,边缘区域的位移仍处在较高的水平,与未被液滴覆盖区域的位移存在明显的差别。此外,考虑到子区域大小的选取与液滴边缘区域的计算结果密切相关,可能影响边缘检测的结果,因此,采用 3 种不同大小的子区域(子区域宽度 61pixel、81pixel、101pixel)分别进行计算,结果表明,不同大小子区域识别得到的液滴边缘相互重合,表明子区域的选取对最终结果的影响较小,因此可以推断,由位移场来识别液滴的边缘轮廓具有很高的可行性。实验中识别得到 0 时刻液滴边缘接近于圆形,与实际情况相吻合,从而为形貌重建提供了准确的起始点信息。图 6 给出了不同时刻下的位移分布测量结果,从中可以发现,随着蒸发时间的增加,液面高度逐渐降低,液滴表面的斜率也逐渐减小,使得折射效应逐渐减弱,所诱发的位移也逐渐减小。在蒸发时间较短时($t \leq 600\text{s}$),位移在 X 及 Y 方向的分量呈反对称分布,并且液滴轮廓基本为标准圆形。然而,当蒸发时间较长时($t = 900\text{s}$),液滴形态出现显著变化,其轮廓不再是标准的圆形。这一变化与液滴表面张力、固体表面微观特性息息相关,同时,这也从另一方面表明了三维形貌测量的必要性。

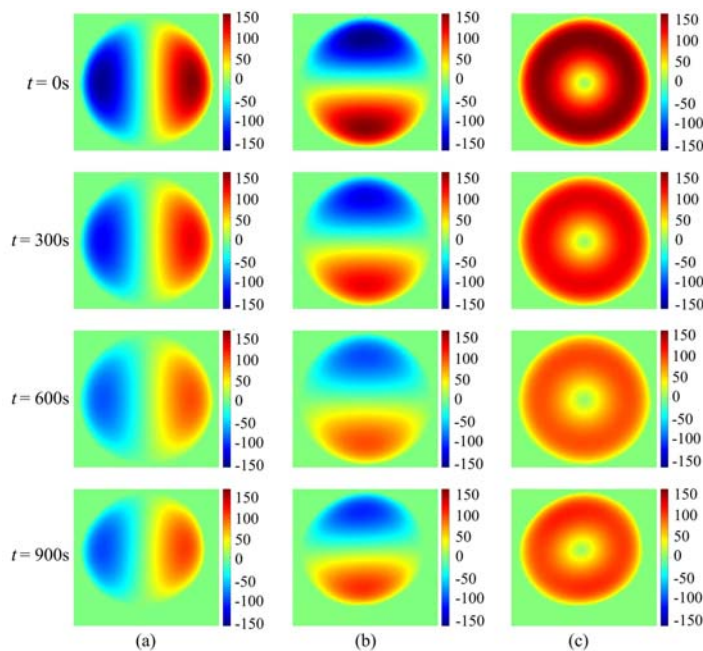


图 6 不同时刻下的位移图(单位:pixel):(a) X 方向;(b) Y 方向;(c) 位移向量模长

Fig. 6 Displacement at different times: (a) X-axis; (b) Y-axis; (c) magnitude of displacement vector

对相机内外参进行标定,以获取三维重建中的关键参数,标定过程中的部分图像如图 7 所示。图 8 给出了标定过程中 1 个姿态下的重投影误差分布。由图 8 可以发现,误差分布较为集中,并且均处在 0 附近,在 X、Y 方向的重投影误差平均值均小于 1.2pixel。这表明,采用小孔成像模型对该系统进行描述有着较高的精度。

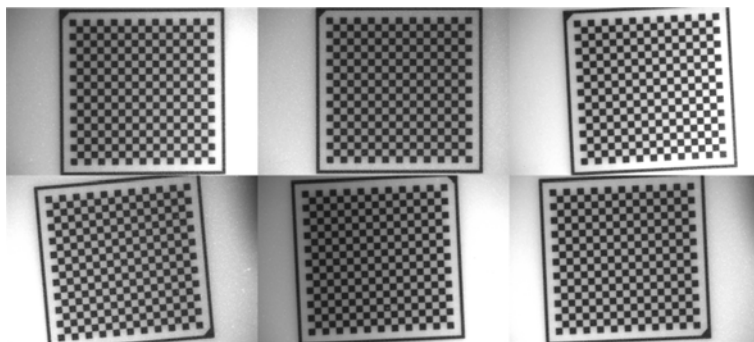


图 7 不同位姿下标定板姿态

Fig. 7 Calibration plate attitude in different positions

将标定结果和 DIC 测量得到的位移场代入所建立的物理模型重建液滴三维形貌, 得到不同时刻的形貌如图 9 所示。由图 9 可以发现, 液滴表面形貌分布较为光滑, 并且在 $t \leq 600\text{s}$ 时, 高度呈中心对称分布, 符合液滴形态的基本特点; 液滴边缘处的形貌斜率较高, 而接近于中心区域的斜率接近于 0, 这与图 6 得到的结论相吻合; 随着蒸发时间的增加, 液滴体积减小, 形状逐渐收缩, 液面各个点的高度值下降, 液滴覆盖区域逐渐减小; 在液滴蒸发过程中, 液面高度 (Z 向) 的下降速度明显大于液滴横向 (X-O-Y 平面) 的收缩速度。此外, 在 $t=900\text{s}$ 时刻, 尽管液滴的轮廓不再是圆形 (见图 6), 然而测量得到的液面形貌仍具有光滑、连续的特征, 并

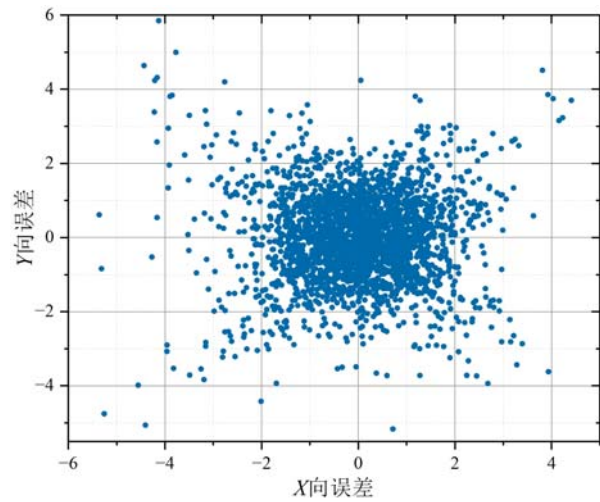


图 8 标定结果的重投影误差

Fig. 8 Reprojection error of calibration results

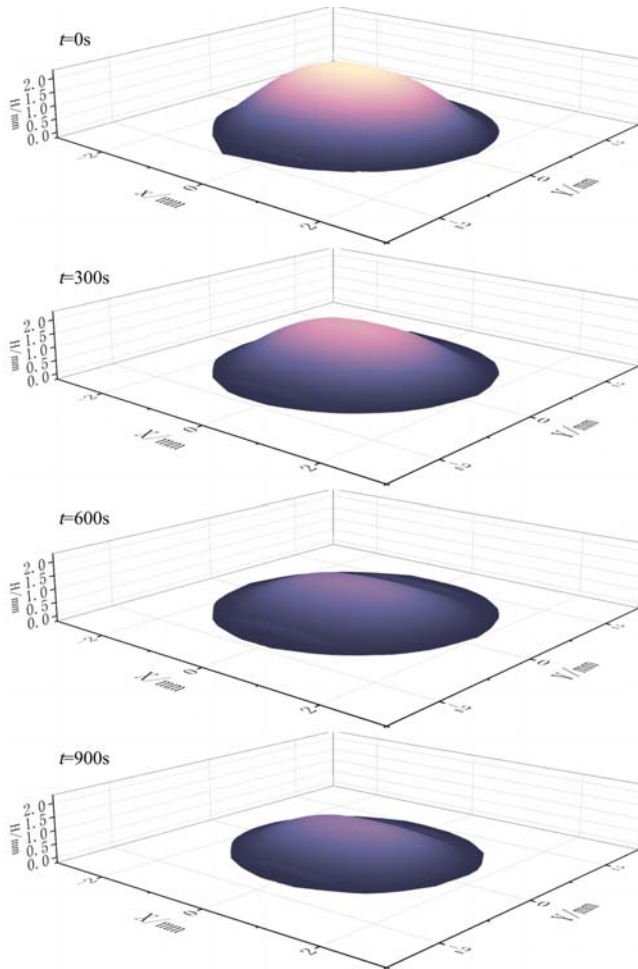


图 9 不同蒸发时刻下的液面形貌

Fig. 9 Morphologies of droplets at different evaporation times

且形貌演化规律与预期相符。这表明, 由于建模中无需对液滴的形貌进行假设, 因此, 本文方法适用于非规则形状液滴形貌的测量。

选取 $Y=0$ 截面的液面轮廓线计算不同时刻下的液面曲率, 从而分析形貌特征变化情况, 计算结果如图 10 所示。观察图中曲率曲线簇的变化规律, 在 $t=0\text{s}$ 时刻液滴液面中心处的曲率较大, 约为 0.75, 自中心向边缘处液面曲率逐渐变小, 并在靠近边缘处曲率接近于 0, 并在中心处呈现两侧对称的分布特征。在蒸发时长较短时, 液面曲率的变化较为明显, 说明初始形貌截面轮廓接近于抛物线; 随着蒸发时长的增加, 曲率的变化速率逐渐降低, 剖面上不同位置的曲率差距较小, 说明其截面轮廓接近于圆弧。

为定量描述液滴形貌的变化过程, 本文根据不同时刻下的三维形貌分布状况计算液滴的体积大小, 进而表征液滴的蒸发速率。图 11 给出了不同时刻下液滴体积大小以及蒸发速率。体积曲线的变化趋势表明, 随着蒸发时间的增加, 液滴体积逐渐减小, 并最终趋近于 0。蒸发过程中, 蒸发速率与蒸发时长呈负相关关系, 这主要取决于蒸发过程中液

滴表面积的减小。以上结论与液滴蒸发过程中的客观规律相符, 表明本方法能够较好地反映液滴形貌的动态变化。

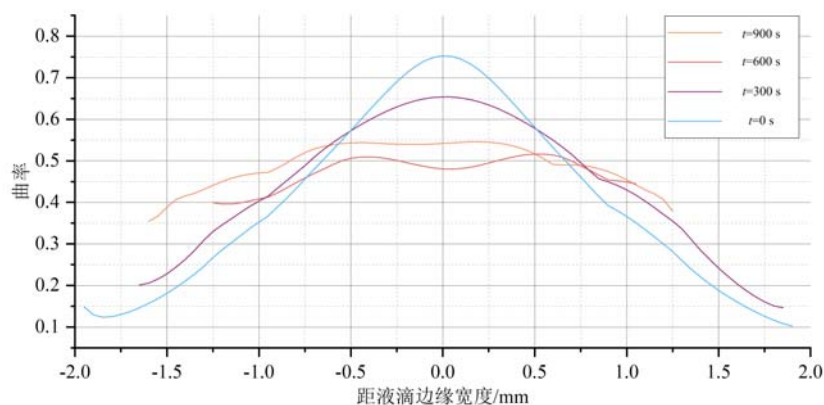


图 10 不同时刻下的液面曲率

Fig. 10 The curvatures of the surface at different moments

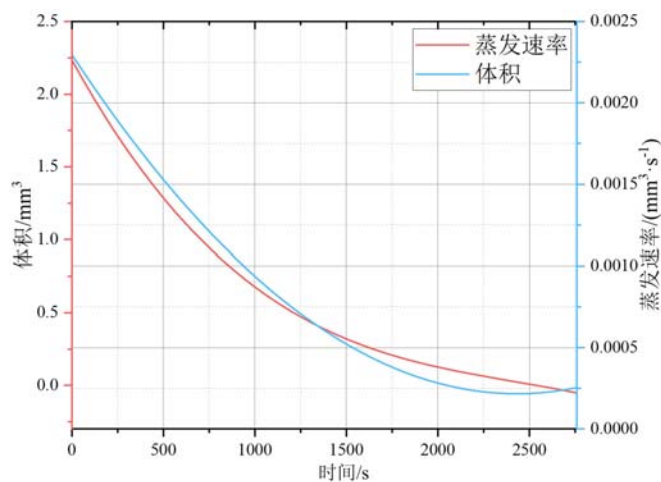


图 11 液滴体积与蒸发速率随时间的变化曲线

Fig. 11 Curve of droplet volume and evaporation rate with time

3 结论

针对液滴在固体表面流动、铺展、蒸发过程中的形貌测量需求,本文提出了一种透明液滴三维形貌测量方法。该方法首先以折射光路以及小孔成像原理为基础建立物理模型,准确描述了固体表面图像位移与液面高度之间的关系;其次,基于 DIC 测量液滴产生的图像位移,并代入物理方程求得相邻两点之间的高度差异;最后,通过递归方法逐点计算液面高度分布,实现三维形貌的重建。所建立的模型以最基本的物理定律以及成像规律为基础,具备较高的适用性。所采用的测量方法以散斑图像为原始数据,相较于相位偏折法等液面测量方法,无需预制规则图案,较大程度上简化了实验进程。因此,本文所提出的方法能够在不干扰液面状态和形貌变化进程的情况下,实现液面三维形貌的高精度测量,并且适用于非规则形貌测量以及液滴动态演化过程的表征。实验结果表明,该方法在实际应用中具有较高的可行性,能够为科研以及工程领域中的透明液滴形貌分析提供实验表征手段。

参考文献:

- [1] SEMENOV S, STAROV V M, VELARDE M G, et al. Droplets evaporation: problems and solutions[J]. European Physical Journal Special Topics, 2011, 197:265—278.
- [2] ZANG D, TARAFDAR S, TARASEVICH Y Y, et al. Evaporation of a droplet: from physics to applications[J]. Physics Reports, 2019, 804:1—56.
- [3] HSIEH S S, LEU H Y, LIU H H. Spray cooling characteristics of nanofluids for electronic power devices[J]. Nanoscale Research Letters, 2015, 10(1):139.

- [4] CAMPBELL J, CHRISTENSON H K. Dynamic measurement of low contact angles by optical microscopy[J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(19):16894–16900.
- [5] HASHEMI M R, RYZHAKOV P B, ROSSI R. Three dimensional modeling of liquid droplet spreading on solid surface: An enriched finite element/level-set approach[J]. *Journal of Computational Physics*, 2021, 442:110480.
- [6] YOO H, KIM C. Experimental studies on formation, spreading and drying of inkjet drop of colloidal suspensions [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, 468:234–245.
- [7] PARK J, MOON J. Control of colloidal particle deposit patterns within picoliter droplets ejected by ink-jet printing[J]. *Langmuir*, 2006, 22(8):3506–3513.
- [8] 胡银春, 张雪荣, 黄棣, 等. 蒸发液滴中的流动与传质行为:理论与应用[J]. *材料导报*, 2017, 31(7):1–5, 18 (HU Yinchun, ZHANG Xuerong, HUANG Di, et al. Flow and mass transfer laws in drying droplets: theory and applications[J]. *Materials Review*, 2017, 31(7):1–5, 18 (in Chinese))
- [9] YAMAZAKI M, JEMCOV A, SAKAUE H. A review on the current status of icing physics and mitigation in aviation[J]. *Aerospace*, 2021, 8(7):188.
- [10] 林世玘. 液滴碰撞过程中的跨尺度界面流动行为研究[D]. 成都:电子科技大学, 2022 (LIN Shiji. Research on cross-scale interfacial flow dynamics of impinging drops[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022 (in Chinese))
- [11] 唐颖, 姚骏, 陈巨兵. 一种基于投影云纹法的三维形貌测量技术及其标定方法[J]. *实验力学*, 2018, 33(5):665–674 (TANG Ying, YAO Jun, CHEN Jubing. A 3-D profile measurement technique and its calibration method based on projected moire method[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2018, 33(5):665–674 (in Chinese))
- [12] XU J, ZHANG S. Status, challenges, and future perspectives of fringe projection profilometry[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 135:106193.
- [13] SHAO X, DAI X, CHEN Z, et al. Real-time 3D digital image correlation method and its application in human pulse monitoring[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(4):696–704.
- [14] HU Z X, XIE H M, LU J, et al. Study of the performance of different subpixel image correlation methods in 3D digital image correlation[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(21):4044–4051.
- [15] 王高远, 胥蕊娜, 陈剑楠, 等. 微纳复合结构表面液滴铺展及蒸发特性实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2018, 39(8):1797–1802 (WANG Gaoyuan, XU Ruina, CHEN Jiannan, et al. Experimental investigation of droplet spreading and evaporation on hybrid micro and nano-structured surfaces [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2018, 39(8):1797–1802 (in Chinese))
- [16] GITTENS R A, OLIVARES-NAVARRETE R, CHENG A, et al. The roles of titanium surface micro/nanotopography and wettability on the differential response of human osteoblast lineage cells [J]. *Acta Biomaterialia*, 2013, 9(4):6268–6277.
- [17] 春江, 王瑾莹, 徐晨, 等. 液滴撞击超亲水表面的最大铺展直径预测模型[J]. *物理学报*, 2021, 70(10):248–258 (CHUN Jiang, WANG Jinxuan, XU Chen, et al. Theoretical model of maximum spreading diameter on superhydrophilic surfaces[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(10):248–258 (in Chinese))
- [18] 张舒蕾, 李冰杰, 蒋健, 等. 凸面恒温基底上固着液滴蒸发特性研究[J]. *化工学报*, 2022, 73(12):5537–5546 (ZHANG Shulei, LI Bingjie, JIANG Jian, et al. Study on evaporation characteristics of sessile droplet on a convex substrate at constant temperature[J]. *CIESC Journal*, 2022, 73(12):5537–5546 (in Chinese))
- [19] 李健, 费潇, 王腊梅, 等. 基于液滴局部轮廓的接触角测量方法[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(24):10134–10139 (LI Jian, FEI Xiao, WANG Lamei, et al. Contact angle measurement method based on droplet local profile [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(24):10134–10139 (in Chinese))
- [20] ZHANG N, CHAO D F. A new laser shadowgraphy method for measurements of dynamic contact angle and simultaneous flow visualization in a sessile drop[J]. *Optics & Laser Technology*, 2002, 34(3):243–248.
- [21] ZHANG N, CHAO D F. Caustics and caustic-diffraction in laser shadowgraphy of a sessile drop and identification of profile near contact line[J]. *Optics & Laser Technology*, 2003, 35(3):155–161.
- [22] 刘战伟, 杨晓波, 方志军, 等. 一种液面微形貌测量技术及在微浮力和表面张力研究中的应用[J]. *光学技术*, 2011, 37(6):641–646 (LIU Zhanwei, YANG Xiaobo, FANG Zhijun, et al. A measurement technology of micro-topography of liquid surface and its application to evaluating micro buoyancy and surface tension[J]. *Optical*

- Technique, 2011, 37(6):641—646 (in Chinese))
- [23] 俞立平, 潘兵. 单相机高温三维数字图像相关方法[J]. 航空学报, 2022, 43(6):292—303 (YU Liping, PAN Bing. Single-camera high-temperature three-dimensional digital image correlation method[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2022, 43(6):292—303 (in Chinese))
- [24] 赵健宇, 谢惠民. 基于数字图像相关的激光修复镍基合金疲劳损伤表征方法研究[J]. 实验力学, 2023, 38(1):1—8 (ZHAO Jianyu, XIE Huimin. Study on fatigue damage characterization method of laser repair nickel-based alloy based on digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2023, 38(1):1—8 (in Chinese))
- [25] 王永红, 朱奕磊, 高启学, 等. 基于数字图像相关法的空间目标位姿测量[J]. 光学学报, 2022, 42(8):129—137 (WANG Yonghong, ZHU Yilei, GAO Qixue, et al. Position and pose measurement of spatial object based on digital image correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8):129—137 (in Chinese))
- [26] 叶敬晨, 计宏伟. 一种基于预变形辅助前向加性高斯牛顿法的数字图像相关方法[J]. 实验力学, 2022, 37(5):621—628 (YE Jingchen, JI Hongwei. A digital image correlation method based on pre-deformation forward additive gauss-newton method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2022, 37(5):621—628 (in Chinese))
- [27] 潘兵, 吴大方, 夏勇. 数字图像相关方法中散斑图的质量评价研究[J]. 实验力学, 2010, 25(2):120—129 (PAN Bing, WU Dafang, XIA Yong. Study of spekle pattern quality assessment used in digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(2):120—129 (in Chinese))
- [28] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330—1334.
- [29] 赵海龙, 刘大顺, 陈效鹏. 一种基于数字图像的表面张力测量方法——悬滴法[J]. 实验力学, 2010, 25(1):100—105 (ZHAO Hailong, LIU Dashun, CHEN Xiaopeng. Pendant drop method for interfacial tension measurement[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(1):100—105 (in Chinese))

Transparent droplet surface morphology measurement method based on digital image correlation

TAN Xinyun, SHEN Lili, SUN Chen

(School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The measurement and analysis of the morphology of liquid droplets on solid surfaces is an important step in exploring solid-liquid interactions and characterizing surface properties. However, transparent droplets are often challenging to image in optical systems, making full-field morphology measurements difficult. This paper presented a novel method for measuring the three-dimensional (3D) morphology of transparent liquid droplets by exploiting the displacement of the droplet-induced image and the imaging principle of refraction. Specifically, the proposed method involved using digital image correlation (DIC) technology to measure the image displacement caused by the droplet on the solid surface. A physical model based on refraction imaging was then established to relate the measured image displacement to the height of the liquid surface. Finally, the height of the liquid surface was determined by solving the measured image displacement, enabling the reconstruction of the 3D morphology of the droplet. Experimental results demonstrate that the proposed method is capable of accurately measuring the 3D morphology of liquid droplets on solid surfaces, even for irregular liquid surfaces. This technique provides valuable technical support for investigating droplet spreading, evaporation, and other related behaviors.

Keywords: droplets; three-dimensional surface topography; digital image correlation; full-field measurement