

液滴低速撞击润湿球面现象观测分析*

梁刚涛 郭亚丽 沈胜强†

(大连理工大学能源与动力学院, 辽宁省海水淡化重点实验室, 大连 116024)

(2013年4月10日收到; 2013年6月14日收到修改稿)

采用高速摄像仪以 10000 帧/s 的拍摄速度对液滴低速撞击润湿球体表面过程进行了实验观测, 分析了液滴撞击后的反弹、局部反弹和铺展等现象, 考察了黏度对撞击过程的影响; 在此基础上, 定量讨论了液滴铺展特征参数随撞击速度、球体直径和黏度的变化规律. 观测发现: 黏度较大且撞击速度较低时, 撞击后可能出现反弹和局部反弹, 黏度较小时则不发生; 铺展面积随撞击速度的增大而增大; 黏度增大时, 铺展因子减小; 在球体直径为 4—20 mm 范围内, 随着球体直径的增加, 铺展因子呈上升趋势.

关键词: 液滴撞击, 润湿球面, 铺展, 黏度

PACS: 47.55.D-, 47.55.nd, 47.54.De

DOI: 10.7498/aps.62.184703

1 引言

液滴撞击过程广泛存在于工业设备中, 例如蒸汽透平装置中凝结水滴对叶片的冲击; 内燃机中油滴与气缸壁面的碰撞过程; 此外, 喷墨打印、等离子喷涂、喷雾冷却等都涉及液滴撞击过程^[1]. 在自然界和农业生产中, 液滴撞击也是一种常见的现象, 例如雨滴对地面和机翼的冲击, 农药喷洒装置喷射出的药剂与农作物的碰撞过程等. 因此, 深入认识液滴撞击过程对人类探索自然界具有积极意义, 同时也为工业设备中的质热交换强化提供准确的理论依据.

液滴撞击固体壁面后会在其表面覆一层液膜, 随后的撞击则属于液滴撞击液膜的范畴. 关于液滴撞击液膜的研究主要集中于对液滴撞击平面液膜的研究. Cossali 等^[2] 将液膜界定为液膜无量纲厚度 (液膜厚度与液滴直径的比值) 小于 1 的情况, 并首次区别了两种飞溅现象: 即时飞溅和延迟飞溅. Vander Wal 等^[3-5] 对液滴撞击过程进行了大量的实验研究, 归纳了发生飞溅时的临界参数. Okawa 等^[6] 和 Rioboo 等^[7] 通过实验观测发现, 液滴撞击液膜后会出现冠状水花. Yarin 和 Weiss^[8] 提出

冠状水花的形成主要是由于液膜内流体运动间断造成的, 这一理论得到了多数学者的认可. 梁刚涛等^[9] 采用高速摄像仪对液滴撞击倾斜表面液膜的过程进行了实验观测, 分析了撞击后铺展、水花形成以及飞溅等现象, 揭示了液滴撞击速度和撞击角对前、后铺展因子及初始铺展速度的影响规律. Chowdhury 等^[10] 对水滴撞击甲醇、乙醇和丙醇液膜进行了实验研究, 发现水滴撞击三种液膜后均出现铺展 - 回缩现象: 撞击甲醇液膜后液滴铺展最快, 撞击丙醇液膜后铺展最慢, 回缩速度则恰好相反. Thoroddsen^[11] 采用高速摄像仪首次拍摄到了液滴撞击液膜的颈部射流现象. 梁刚涛等^[12,13] 采用耦合的水平集 - 体积分数法数值模拟了液滴撞击液膜初期的飞溅过程, 通过分析撞击后液体内部的压力分布, 阐述了颈部射流的产生机理, 认为射流的产生主要是由于撞击后颈部区域局部较大压差造成的, 还通过分析速度场, 验证了 Yarin 和 Weiss^[8] 提出的运动间断理论的正确性. 此外, 马理强等^[14,15] 采用光滑粒子动力学方法, 汤波等^[16] 采用最小二乘粒子有限元方法均对液滴撞击现象开展了部分数值研究.

液滴撞击弯曲表面的现象也常见于工业技术中, 例如水平管降膜蒸发器中液滴对换热管表面的

* 国家自然科学基金 (批准号: 51176017) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zzbshen@dlut.edu.cn

冲击过程等. 关于液滴撞击曲面的研究主要是针对液滴撞击干燥表面的探索. Bakshi 等^[17]对液滴撞击球体表面进行了实验观测, 发现撞击后在球体表面形成液膜, 膜厚随时间的变化依次经历了液滴的变形阶段、惯性力主导阶段和黏性力主导阶段. Hardalupas 等^[18]实验发现, 球体直径的减小有助于飞溅的发生. Hung 和 Yao^[19]实验观察了液滴撞击圆柱状金属丝的现象, 发现撞击后存在两种结果: 撞击液滴的破裂和滴落液滴的形成. 当撞击速度较高或金属丝较细, 特别是金属丝直径小于液滴直径时, 撞击后液滴发生破裂现象; 当撞击速度较低或金属丝直径大于液滴直径时, 撞击后在金属丝下方形成滴落液滴, 且随着金属丝直径的增大, 滴落液滴的直径增大. Pasandideh-Fard 等^[20]认为液滴撞击大管径圆管时, 液滴附着在管子表面, 撞击小管径圆管时, 有一小部分附着在管子表面, 其余部分破裂成多个小液滴, 小液滴的数量与撞击液滴偏离管子轴心的距离紧密相关. Shen 等^[21]采用格子 Boltzmann 方法对液滴撞击圆管表面进行了二维数值计算, 发现液滴撞击后经历了运动、铺展、底部成核和滴落阶段, 撞击速度较高时在管子周向会出现飞溅现象.

虽然众多学者对液滴撞击水平液膜和弯曲固体表面进行了大量的研究, 但是几乎没有文献针对液滴撞击润湿弯曲表面的流动特性进行研究. 本文采用实验观察和像素分析相结合的方法, 利用高速摄影仪对液滴在较低速度下撞击润湿球面的行为进行观测分析, 考察撞击后出现的特殊现象, 探讨撞击速度、球体直径和黏度等因素对液滴铺展过程的影响规律.

2 实验装置和方法

液滴撞击润湿球面的实验装置如图 1 所示, 主

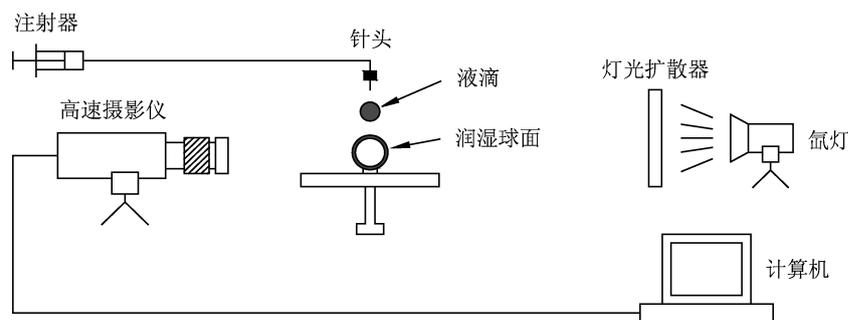


图 1 实验装置示意图

要包括产生液滴的注射器和针头、被撞击的润湿球面, 采集图像的高速摄影仪、氙灯和灯光扩散器, 对结果进行记录存储的计算机等. 针头内径为 0.5 mm, 由注射器缓慢流出的液体在针尖处形成液滴, 当液滴的重力超过表面张力时, 液滴脱离针头. 球体为不锈钢材质, 表面糙度 R_a 不大于 $0.05 \mu\text{m}$, 球体直径 d 为 4—20 mm. 实验开始前, 在球体表面覆一层很薄的液膜, 待液膜稳定后测量液膜厚度, 采用像素分析的方法, 与覆液膜前的干燥球面进行差值比较后可得到液膜平均厚度为 12—61 μm , 误差为 $\pm 4 \mu\text{m}$. 针头和球体之间的距离可以调整, 从而改变撞击速度的大小.

实验中采用 Phantom V12.1 高速摄影仪和 Tokina 微距镜头 (100 mm, f-2.8), 摄影仪保持水平. 为了得到具有足够清晰度的照片, 拍摄速度选定为 10000 帧/s, 图像分辨率为 1024×512 . 采用背光法拍摄液滴撞击过程, 光源由 350 W 的 XD-300 氙灯提供, 为了使灯光在润湿球面分布均匀, 氙灯与润湿球面之间设有灯光扩散器.

在本文中, 液滴和液膜为同种液体, 采用表面张力系数 ($0.0201 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$) 较小的丁醇和庚烷作为实验流体, 黏度分别为 2.95×10^{-3} 和 $0.409 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$. 像素分析过程采用软件 MATLAB 7.1 完成, 通过参照物对测量图像进行标定. 测量液滴直径时, 由于液滴近似椭球形, 对液滴的水平直径 D_h 和竖直直径 D_v 分别测量, 则液滴的当量直径 D 为 $(D_h^2 D_v)^{1/3}$ ^[22,23]. 丁醇液滴和庚烷液滴的当量直径分别为 1.82 mm 和 1.79 mm, 误差为 $\pm 0.03 \text{ mm}$. 根据 Mundo 等^[24]的结论, 当液滴直径与承载液膜的固体表面粗糙度在同一量级时, 必须考虑粗糙度的影响, 在本文中, 球体表面粗糙度为 $0.05 \mu\text{m}$, 远小于液滴直径, 因此可以忽略粗糙度对撞击过程带来的影响. 撞击速度 v 取撞击前 0.5 ms 的平均速度, v 的范围为 $0.23\text{—}1.07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 误差为 $\pm 0.06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

3 实验结果与分析

3.1 液滴低速撞击润湿球面的现象

图 2 为丁醇液滴撞击润湿球面后的反弹过程, 其中 $v = 0.23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $d = 20 \text{ mm}$, 0 ms 对应于液滴与液膜接触前的最后一帧图像. 可以看出, 液滴与润湿球面接触后, 伴随液滴高度的不断下降, 液滴底部出现明显变形, 形成一个“圆盘”(1.7 ms), 液滴动能和势能向表面能转化. 随着时间的增加, “圆盘”直径不断增大(4.2 ms), 在 4.8 ms 时达到最大值, 此时动能为零, 表面能最大. 随后在表面张力的作用下, “圆盘”边缘开始由外向内回缩, 表面能逐渐转化为液滴动能和势能, 液滴高度不断增加并逐渐向上运动(8.3 ms), 在 13.6 ms 时脱离润湿球面, 发生液滴反弹现象. 分析认为, 液滴与润湿球面之间存在空气夹层, 当液滴的撞击能量不足以破坏空气夹层, 同时经历动势能 - 表面能 - 动势能交替转换后, 又可以使液滴脱离润湿表面时, 则发生反弹现象.

与图 2 相同的实验条件下, 液滴撞击后还可能

发生局部反弹现象, 如图 3 所示. 当“圆盘”达到最大直径时(4.8 ms), 与图 2 所不同的是, 图 3 中“圆盘”底部边缘并未向中间回缩, 而是与球体表面的液膜开始融合, “圆盘”顶部则形成一个尖顶状突起(7.2 ms). 随着时间的增加, “圆盘”不断与液膜融合, 而突起高度则不断增加, 突起顶端形成一个有柄小液滴(9.9 ms). 由于重力的作用, 连接小液滴与液膜的柄部分变细(13.0 ms), 在 14.6 ms 时与小液滴和液膜分离, 发生局部反弹现象. 分离后的柄部分在表面张力作用下形成一个尺寸更小的液滴(20.4 ms).

在图 2 和图 3 实验条件下反复观察液滴撞击润湿球面过程, 发现液滴反弹和局部反弹现象具有一定的随机性. 即便如此, 从实验观察中仍然可以总结出一些重要结论: 反弹和局部反弹只发生在撞击速度较低的情况下, 撞击速度高时不发生; 随着液体黏度的增大, 发生反弹和局部反弹的可能性增加, 例如采用低黏度的庚烷作为实验流体时, 这两种现象在任何条件下都不发生.

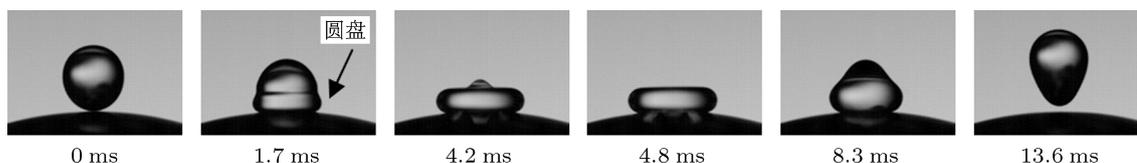


图 2 丁醇液滴撞击润湿球面的反弹现象

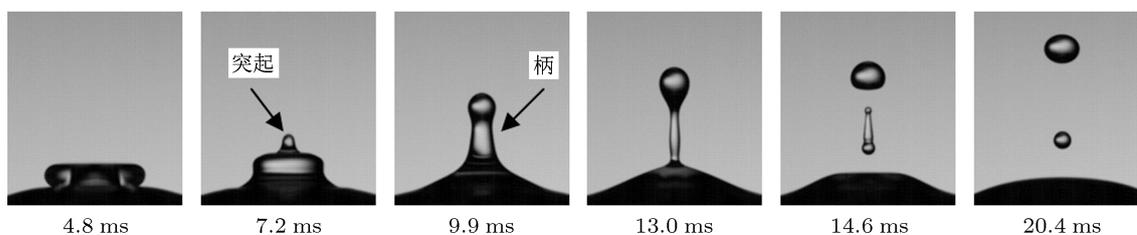


图 3 丁醇液滴撞击润湿球面的局部反弹现象

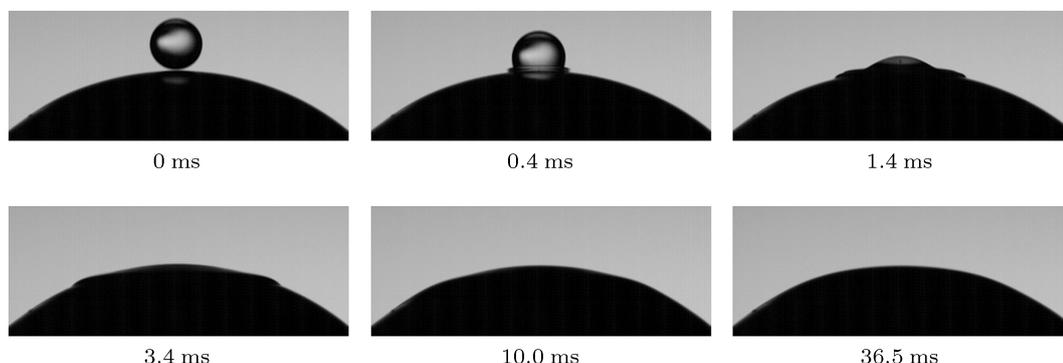


图 4 丁醇液滴铺展过程

保持图 3 的球体直径 $d = 20 \text{ mm}$ 不变, 增大撞击速度 v , 撞击后液滴则在润湿球面发生铺展现象, 如图 4 所示, 图中 $v = 1.07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 可以看出, 液滴与润湿球面接触后, 迅速在润湿球面开始铺展 (0.4 ms). 随着时间的增加, 液滴高度不断减小, 铺展液膜边缘沿球体表面向四周延伸 (1.4—3.4 ms). 10.0 ms 时, 铺展液膜边缘已变得不明显; 当时间继续增加到 36.5 ms 时, 润湿表面不再发生变化, 撞击液滴最终在润湿球面形成稳定的铺展液膜.

减小球体直径 d , 丁醇液滴撞击润湿球面后依旧出现反弹、局部反弹和铺展现象, 可见球体直径不对撞击后出现的现象产生重要影响; 在本文撞击速度范围内, 庚烷液滴撞击液膜后均出现铺展现象, 铺展过程与丁醇几乎相同.

3.2 液滴铺展过程的特征参数分析

液滴的铺展程度对质热传递过程会产生很大的影响, 因此有必要深入探讨液滴铺展过程, 对影响液滴铺展特性的参数进行分析. 当液滴撞击水平壁面时, 一般采用铺展液膜直径或铺展液膜直径与液滴直径的比值来表征液滴的铺展程度 [25]. 但是当液滴撞击润湿球面时, 由于承载铺展液膜的表面是弯曲的, 铺展液膜呈球冠状而非平面液膜, 因此采用铺展直径来描述液滴的铺展程度已不合适. 在本文中, 采用铺展面积 A_s 作为液滴铺展的特征参数, 计算 A_s 的模型如图 5 所示. 图 5 中 O 表示撞击点, A 和 B 表示撞击后铺展液膜的两侧边缘, C 是 O 在线段 AB 上的投影点, 则铺展高度 h_s 为线段 OC 的长度. 铺展面积 A_s 可表示为

$$A_s = \pi d h_s, \quad (1)$$

其中 d 表示球体直径. 引入铺展因子 Φ 表征铺展面积相对液滴表面积的大小, Φ 可表示为

$$\Phi = A_s/A_d, \quad (2)$$

其中 A_d 为液滴的表面积. 为了比较不同工况下的铺展因子, 定义无量纲时间 τ :

$$\tau = vt/D, \quad (3)$$

其中 t 表示时间, D 表示液滴当量直径.

图 6 和图 7 分别为不同撞击速度 v 下丁醇液滴和庚烷液滴铺展面积 A_s 随时间 t 的变化规律, 球体直径 d 均为 20 mm. 随着时间的增加, 铺展液膜边缘逐渐变得模糊, 因此图 6 和图 7 仅给出了边缘可以清楚辨识时铺展面积的变化曲线. 可以看出, 铺

展面积随着时间的增加不断增大, 可见液滴撞击润湿曲面时, 形成的铺展液膜并不发生回缩现象.

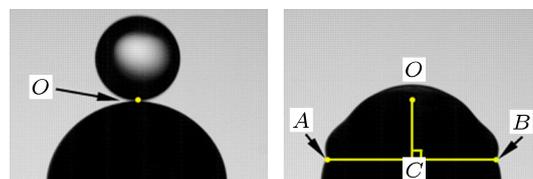


图 5 液滴铺展模型

由图 6 和图 7 还可以看出, 随着撞击速度的升高, 铺展面积在开始阶段变化较小, 但是当 $t > 1.0 \text{ ms}$ 时, 铺展面积随撞击速度的升高明显增大. 以 $t = 8.0 \text{ ms}$ 时刻庚烷液滴铺展面积为例, $v = 0.39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, $A_s = 60.1 \text{ mm}^2$; $v = 0.84 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, $A_s = 104.3 \text{ mm}^2$, 铺展面积增加了 73.5%; 当 v 进一步增加至 $1.07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, $A_s = 122.0 \text{ mm}^2$, 铺展面积增加了 103.0%. 撞击速度增大, 意味着液滴具有更高的撞击能量克服流动阻力, 铺展得更广, 铺展面积更大.

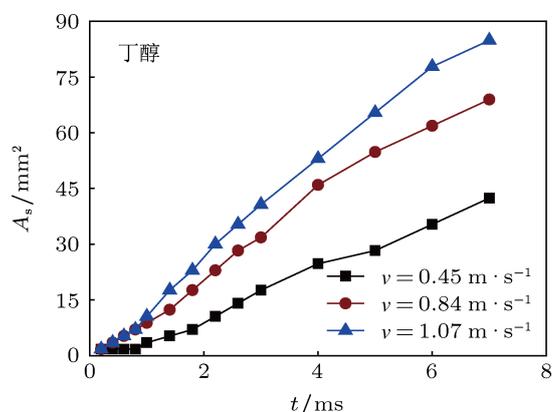


图 6 撞击速度对丁醇液滴铺展面积的影响

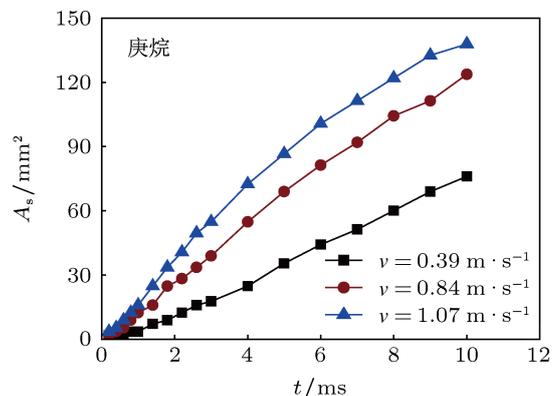


图 7 撞击速度对庚烷液滴铺展面积的影响

图 8 为黏度对液滴铺展因子 Φ 的影响规律, 其中丁醇和庚烷的表面张力系数相同, 但丁醇的黏度远大于庚烷的黏度, 图中 $v = 0.84 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $d = 20 \text{ mm}$. 由图 8 可以看出, 当无量纲时间 $\tau < 0.37$ 时, 黏度对铺展因子几乎不产生影响; 当 $\tau > 0.37$ 时, 铺展因子随黏度的减小明显增大, 并且随着时间的增加, 铺展因子增大的趋势更明显. 例如 $\tau = 1.71$ 时, 庚烷的铺展因子 Φ 相对丁醇增加了 26.0%; 但是当 $\tau = 2.98$ 时, Φ 增加了 40.7%. 黏度增大时, 液体内部分子间摩擦力增大, 铺展液膜在润湿球面的流动阻力增加, 因此铺展因子减小.

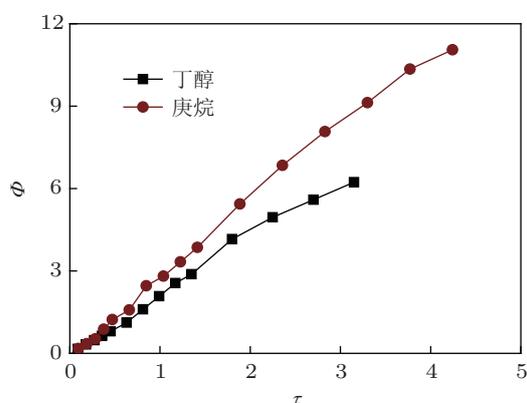


图 8 黏度对液滴铺展因子的影响

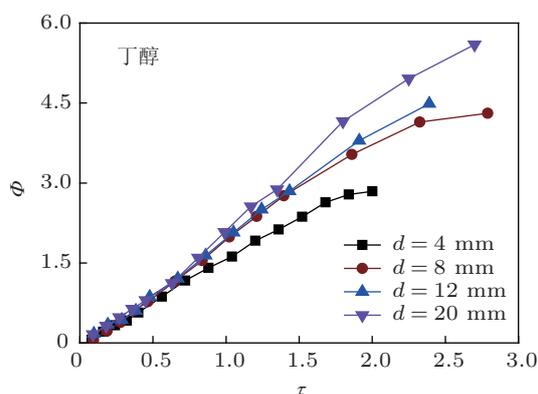


图 9 球体直径对丁醇液滴铺展因子的影响 $d = 4 \text{ mm}$ 时, $v = 0.71 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $d = 8 \text{ mm}$ 时, $v = 0.85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $d = 12 \text{ mm}$ 时, $v = 0.88 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $d = 20 \text{ mm}$ 时, $v = 0.84 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

图 9 和图 10 分别是不同球体直径 d 下丁醇液滴和庚烷液滴铺展因子随时间的变化曲线. 可以看出, 当 $\tau < 0.70$ 时, 球体直径对铺展因子的影响不明显, 但是当 $\tau > 0.70$ 时, 随着球体直径的增大, 铺展因子增大. 在实验中, 通过对铺展过程的细观测发现, 在铺展的初始阶段, 液滴仅在润湿球体表面顶部很小的区域内铺展. 这个小区域面积约为

12.5 mm^2 , 可近似认为平面, 因此铺展因子在这个区域内变化不大. 但是当铺展液膜超出这个区域时, 球体直径的影响将变得明显. 通过测量球体表面的初始液膜厚度, 发现上半球表面的膜厚小于下半球表面的膜厚. 当液滴撞击直径较大的润湿球体时, 由于球体的曲率小, 撞击后液滴主要在初始膜厚较小的上半球润湿表面铺展, 遇到的阻力较小, 铺展因子较高; 当液滴撞击直径较小的润湿球体时, 铺展边缘会快速地扩展到下半球, 继续在下半球润湿表面铺展, 由于初始液膜厚度较大, 铺展时遇到的阻力增加, 铺展因子减小. 因此, 随着球体直径的增加, 铺展因子增大.

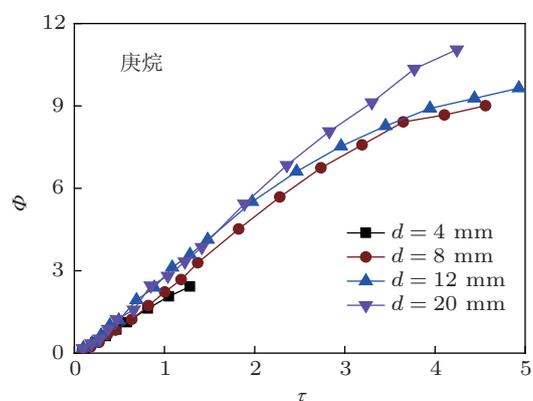


图 10 球体直径对庚烷液滴铺展因子的影响 $d = 4 \text{ mm}$ 时, $v = 1.04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $d = 8 \text{ mm}$ 时, $v = 0.83 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $d = 12 \text{ mm}$ 时, $v = 0.88 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; $d = 20 \text{ mm}$ 时, $v = 0.84 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

4 结论

本文采用高速摄像机对液滴低速撞击润湿球面后的流动过程进行了观测, 讨论了观测到的三种特殊现象, 由此对液滴在润湿球面的铺展特性进行了分析, 探讨了铺展面积和铺展因子的变化规律, 得到以下结论:

- 1) 在本文撞击速度范围内, 液滴撞击润湿球面后会出现反弹、局部反弹和铺展现象;
- 2) 反弹和局部反弹的发生具有一定的随机性, 只发生在撞击速度较低条件下, 撞击速度高时不发生; 随着液体黏度的增大, 发生反弹和局部反弹的可能性增加;
- 3) 液滴在润湿球面铺展时, 铺展液膜不发生回缩, 铺展面积随撞击速度的升高而增大;
- 4) 铺展因子随黏度的增大而减小, 球体直径增大时, 铺展因子在开始阶段变化较小, 但是随着时间的增加, 球体直径的影响趋于明显, 随着球体直径的增大, 铺展因子增大.

- [1] Sun Z H, Han R J 2008 *Chin. Phys. B* **17** 3185
- [2] Cossali G E, Coghe A, Marengo M 1997 *Exp. Fluids* **22** 463
- [3] Vander Wal R, Berger G, Mozes S 2006 *Exp. Fluids* **40** 33
- [4] Vander Wal R, Berger G, Mozes S 2006 *Exp. Fluids* **40** 53
- [5] Vander Wal R, Berger G, Mozes S 2006 *Exp. Fluids* **40** 23
- [6] Okawa T, Shiraiishi T, Mori T 2006 *Exp. Fluids* **41** 965
- [7] Rioboo R, Bauthier C, Conti J, Voué M, De Coninck J 2003 *Exp. Fluids* **35** 648
- [8] Yarin A L, Weiss D A 1995 *J. Fluid Mech.* **283** 141
- [9] Liang G T, Shen S Q, Guo Y L, Chen J X, Yu H, Li Y Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 084707 (in Chinese) [梁刚涛, 沈胜强, 郭亚丽, 陈觉先, 于欢, 李熠桥 2013 物理学报 **62** 084707]
- [10] Chowdhury D, Sarkar S P, Kalita D, Sarma T K, Paul A, Chattopadhyay A 2004 *Langmuir* **20** 1251
- [11] Thoroddsen S T 2002 *J. Fluid Mech.* **451** 373
- [12] Liang G T, Guo Y L, Shen S Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 024705 (in Chinese) [梁刚涛, 郭亚丽, 沈胜强 2013 物理学报 **62** 024705]
- [13] Liang G T, Shen S Q, Yang Y 2012 *J. Therm. Sci. Technol.* **11** 8 (in Chinese) [梁刚涛, 沈胜强, 杨勇 2012 热科学与技术 **11** 8]
- [14] Ma L Q, Chang J Z, Liu H T, Liu M B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 054701 (in Chinese) [马理强, 常建忠, 刘汉涛, 刘谋斌 2012 物理学报 **61** 054701]
- [15] Ma L Q, Liu M B, Chang J Z, Su T X, Liu H T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 244701 (in Chinese) [马理强, 刘谋斌, 常建忠, 苏铁熊, 刘汉涛 2012 物理学报 **61** 244701]
- [16] Tang B, Li J F, Wang T S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6722 (in Chinese) [汤波, 李俊峰, 王天舒 2008 物理学报 **57** 6722]
- [17] Bakshi S, Roisman I, Tropea C 2007 *Phys. Fluids* **19** 032102
- [18] Hardalupas Y, Taylor A M K P, Wilkins J H 1999 *Int. J. Heat Fluid Fl.* **20** 477
- [19] Hung L S, Yao S C 1999 *Int. J. Multiphas. Flow* **25** 1545
- [20] Pasandideh-Fard M, Bussmann M, Chandra S, Mostaghimi J 2001 *Atomization Spray.* **11** 397
- [21] Shen S, Bi F, Guo Y 2012 *Int. J. Heat Mass Trans.* **55** 6938
- [22] Rioboo R, Marengo M, Tropea C 2002 *Exp. Fluids* **33** 112
- [23] Stow C D, Hadfield M G 1981 *Proc. R. Soc. A: Math. Phys. Sci.* **373** 419
- [24] Mundo C, Sommerfeld M, Tropea C 1995 *Int. J. Multiphas. Flow* **21** 151
- [25] Bi F F, Guo Y L, Shen S Q, Chen J X, Li Y Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 184702 (in Chinese) [毕菲菲, 郭亚丽, 沈胜强, 陈觉先, 李熠桥 2012 物理学报 **61** 184702]

Observation and analysis of drop impact on wetted spherical surfaces with low velocity *

Liang Gang-Tao Guo Ya-Li Shen Sheng-Qiang[†]

(School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Key Laboratory for Desalination of Liaoning Province, Dalian 116024, China)

(Received 10 April 2013; revised manuscript received 14 June 2013)

Abstract

The phenomenon of liquid drop impact on wetted spherical surfaces with low impact velocity is observed using a high speed digital camera at 10000 frames per second. Drop rebound, partial rebound and spreading are observed and analyzed, considering the effect of viscosity. Influences of the sphere diameter, impact velocity and viscosity on the spreading characteristic parameter are discussed quantitatively. The experimental observations show that the drop rebound and partial rebound phenomena may occur at large viscosity and low impact velocity, which cannot be observed at small viscosity. The spreading area can be increased by increasing impact velocity. The results also reveal that the spreading factor increases with viscosity decreasing. At the sphere diameters ranging from 4 mm to 20 mm, it is found that with the increase of the sphere diameter, the spreading factor will be increased.

Keywords: drop impact, wetted spherical surface, spreading, viscosity

PACS: 47.55.D—, 47.55.nd, 47.54.De

DOI: 10.7498/aps.62.184703

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51176017)

[†] Corresponding author. E-mail: zzbshen@dlut.edu.cn