

液滴撞击超疏水—亲水混合表面的动态行为特性

刘炫麟¹, 王笑珊¹, 赵殿伟¹, 华君叶^{1,2}, 赵孝保^{1,2}, 李 栋^{1,2}

(1.南京师范大学能源与机械工程学院, 江苏 南京 210042)

(2.南京师范大学江苏省能源系统过程转化与减排技术工程实验室, 江苏 南京 210042)

[摘要] 对液滴撞击普通表面、疏水表面、疏水—亲水混合表面的行为进行可视化观测,对比研究不同撞击表面的动力学特性,分析表面润湿性以及撞击速度对撞击行为的影响。疏水部分接触角选取 115° 、 135° 和 150° 。液滴撞击不同的表面,均会发生铺展、回缩、反弹或破碎行为。液滴撞击疏水表面的速度越大,表面的铺展因子越大,但不会影响最大铺展时间(3 ms)。当液滴以 2.43 m/s 的速度撞击超疏水表面时,铺展因子可达 3.43。研究发现,液滴撞击超疏水—亲水混合表面未发生反弹,且撞击速度越大,接触角越大,液滴撞击产生的液指越多,断裂产生的次生小液滴越多。结果表明,超疏水—亲水混合条纹可以减小单个液滴的体积,减少液滴的二次回弹。

[关键词] 超疏水表面,液滴撞击,动力行为,可视化实验,接触角

[中图分类号] TK124 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2019)02-0018-07

Dynamic Behavioral Characteristics of Water Droplet Impacting on Superhydrophobic-Hydrophilic Surface

Liu Xuanlin¹, Wang Xiaoshan¹, Zhao Dianwei¹, Hua Junye^{1,2}, Zhao Xiaobao^{1,2}, Li Dong^{1,2}

(1.School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

(2.Engineering Laboratory of Energy System Process Conversion and Emission Reduction Technology of Jiangsu Province, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: The behavior of a single water droplet impacting on different surfaces is observed by high-speed camera, including bare surface, hydrophobic surface and hydrophobic-hydrophilic surface. Besides, the dynamic characteristics of droplet impacting on different surfaces are studied comparatively, so that how the impacting speed and wettability affect the behavior can be analyzed with different contact angles (115° , 135° , 150°). It is found that the water droplet spreads, retracts, rebounds or smashes in each dynamic process. The spread factor increases with the higher speed while the spreading time (3 ms) has no change. When the velocity of droplet is 2.43 m/s, the spreading factor is up to 3.43. The study shows that the rebound behavior of droplet impacting on the hydrophobic-hydrophilic surface does not happen. Moreover, more satellite droplets are produced as the contact angle becomes bigger and the speed becomes higher. In addition, the superhydrophobic-hydrophilic surfaces contribute to decreasing in volume of single droplet after retraction behavior.

Key words: superhydrophobic surface, drop impacting, dynamic behavior, visual experiment, contact angle

液滴撞击现象普遍存在于多个领域,如航空航天、化工和制冷空调等。液滴撞击固体壁面后会经过铺展、回缩、反弹及破碎等一系列复杂的动态变化过程。而超疏水表面由于其特殊的微纳二级结构,液滴更容易滚落,具有自清洁、防腐蚀、抑霜等特性。因此液滴撞击固体壁面,尤其是超疏水表面的行为过程受到了研究者的广泛关注。

液滴撞击固体壁面的铺展与回缩过程通常在几十毫秒内完成^[1]。Wirthington^[2]首次对液滴撞击固体壁面的行为进行了实验研究,引发了研究者们对这一短暂而复杂的过程的一系列探索。经过不断研究发现,液滴撞击固态壁面的行为变化过程受到很多因素共同影响,如壁面的温度^[3-4]、撞击速度^[5-7]、撞击角度^[8-9]、壁面微观结构^[10-11]等。当毫米液滴撞击速度较高时,韦伯数 We 较大,液滴会出现破碎现象^[12-13]。

收稿日期:2018-12-28.

基金项目:江苏省高校自然科学研究面上项目(16KJB47008).

通讯联系人:华君叶,博士,高级实验师,研究方向:强化传热. E-mail: yepiaoluo.101@163.com

Yan^[14]等采用分子动力学模拟的方法,系统地研究了纳米尺度下水滴对柱状石墨表面的冲击现象,发现在中等碰撞角和较大碰撞速度下,很容易发生回弹. 针对液滴撞击超疏水表面的现象,李西营等^[15]利用高速摄像技术观测了液滴撞击超疏水平壁的动力学过程,并给出了撞击液滴的最大铺展直径的关系式. 以上研究主要是关注液滴撞击超疏水表面的动力学特性. 目前有不少研究探索液滴在不同条件下撞击超疏水表面行为,但探究液滴撞击超疏水—亲水混合表面行为的相对较少.

本文对于液滴撞击普通表面、疏水表面、疏水—亲水混合表面 3 种不同的表面的行为进行对比观测,记录了撞击过程的动态行为过程,分析了速度、疏水程度以及表面不同形状对液滴撞击的影响规律,探讨了液滴撞击超疏水—亲水混合表面的液滴撞击行为与普通表面、疏水表面不同的原因.

1 实验方法及装置

1.1 表面制备

本实验涉及的表面有普通铝表面、疏水表面(图 1(a))、疏水—亲水混合表面(图 1(b)). 实验件尺寸均为 30 mm×30 mm×2 mm 的铝片,混合表面间隔条纹宽度为 3 mm. 实验所采用的双组分超疏水特种涂料(SM-supercoat-SHFC3150)由氧化石、蒙脱石等纳米原料与高性能氟碳树脂经纳米技术复配而成. 制备疏水表面时,将超疏水涂料与异氟尔酮二异氰酸脂按照 10:1 的比例混合均匀,喷涂于纯铝表面,经 100 °C 干燥固化 60 min,制备出表面静态接触角分别为 114°、135°、150°的疏水表面(如图 2 所示). 制备疏水—亲水混合表面时,将丝网印刷与喷笔相结合,喷涂步骤与疏水表面基本相同,可制备得疏水—亲水混合表面. 控制混合表面的疏水条纹接触角与疏水表面一致,分别为 114°、135°、150°. 经测量,混合表面的亲水部分接触角为 87°.

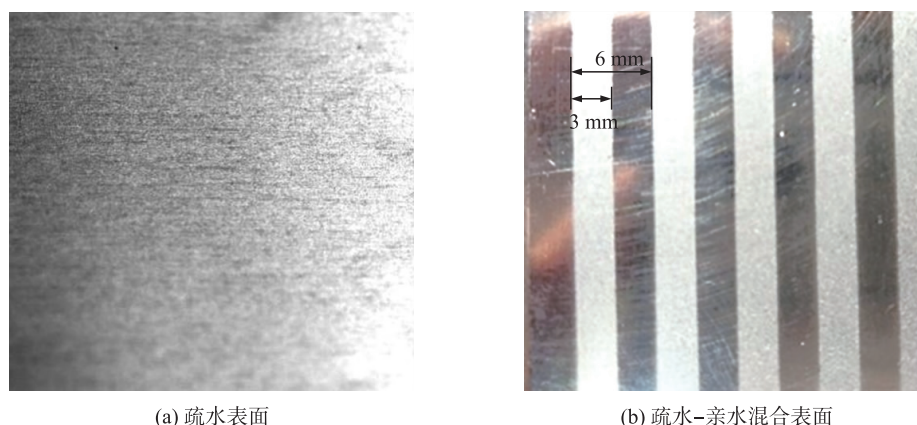


图 1 疏水表面与疏水—亲水混合表面

Fig. 1 Pictures of hydrophobic surface and hydrophobic-hydrophilic surface



图 2 3 种疏水表面静态接触角

Fig. 2 Static contact angle of three different surfaces

本实验制备表面 SEM 扫描结果如图 3 所示. 对比普通表面与超疏水表面的微观结构扫描结果可知,超疏水表面相对粗糙,具有一定的微纳结构.

1.2 实验装置

图 4 为液滴撞击表面的实验装置图,包括高速摄像机、冷光源、微量注射泵等. 微量注射泵可以产生不同体积的单个液滴. 水由注射泵注入注射器中,其中水的流速可忽略不计. 由于撞击高度远大于液滴直

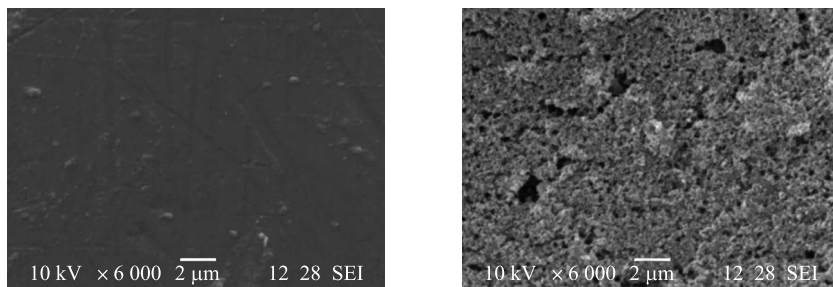


图 3 普通表面与超疏水表面扫描 SEM 图像

Fig. 3 SEM of bare surface and superhydrophobic surface

径,同时忽略空气阻力对液滴形态的影响,液滴可近似看作球形.实验用液滴体积为 $20\ \mu\text{L}$.液滴撞击表面的动态过程时间为几十毫秒.为清楚观测液滴的行为变化,采用高速摄像机捕捉液滴撞击全过程,观测液滴撞击的行为变化.高速摄像机拍摄分辨率为 $1\ 024\times 1\ 024$ 像素,拍摄速度为 $3\ 600$ 帧/s.拍摄过程中辅以冷光源调节亮度,拍摄图像更加清晰.

2 实验数据处理

液滴大小由微量注射泵控制.本实验所用液滴体积为 $20\ \mu\text{L}$,忽略空气阻力对液滴形状的影响,可将液滴视作球体.根据式(1):

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3, \quad (1)$$

计算可得液滴初始半径 $r = 1.684\ \text{mm}$,液滴初始直径为 $d_0 = 3.368\ \text{mm}$,其中 V 为液滴的体积.实验时将液滴从某一高度释放.微量注射泵推进缓慢,液滴的初始速度可忽略不计.因此液滴的撞击速率 u_0 由式(2)计算可得:

$$u_0 = \sqrt{2gl}, \quad (2)$$

式中, g 为重力加速度值; l 为液滴到撞击表面的垂直距离.同时引入无量纲参数 We ,撞击 We 数为液滴撞击惯性力与表面张力的比值,可由式(3)计算得到:

$$We = \frac{\rho u_0^2 d_0}{\sigma}, \quad (3)$$

式中, ρ 为液滴密度; u_0 为液滴撞击速率; σ 为表面张力; d_0 为液滴初始直径.为了研究液滴铺展过程,定义铺展因子为:

$$k = d/d_0, \quad (4)$$

式中, d 为某一瞬时液滴铺展过程中与固体表面接触的直径.

3 结果分析与讨论

3.1 液滴撞击铝表面的动态过程

本实验中捕捉并记录了液滴撞击普通铝表面、疏水表面、疏水—亲水混合表面的动态行为过程,撞击速率($1.98\ \text{m/s}$)、室内温湿度均保持不变.液滴具体行为过程如下.

3.1.1 普通铝表面

液滴撞击普通表面(接触角 87°)的动态过程如图 5 所示.图 5(a)~(f)分别为液滴撞击表面后的形态.从图中可以看出,液滴铺展时间为 $3.1\ \text{ms}$,此时液滴铺展直径最大. $0\sim 3.1\ \text{ms}$,液滴逐渐铺展,将表面能转化为液滴的动能. $3.1\ \text{ms}$ 后,液滴以规则的圆形从边缘逐渐回缩(如图 5(d)),往返多次,最终静止在铝

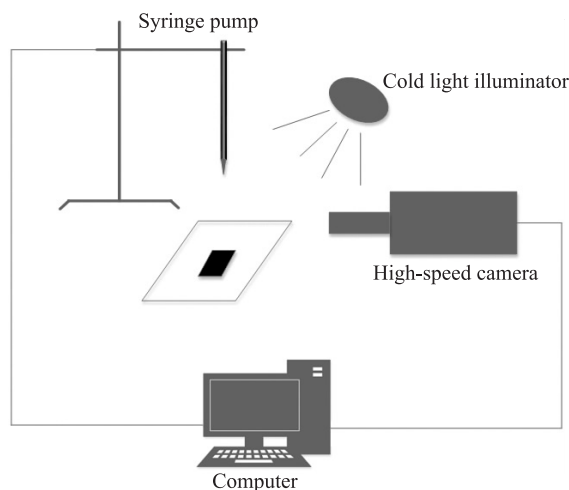


图 4 液滴撞击实验装置图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental system

表面上. 此过程中,液滴始终没有发生回弹. 由式(3)计算出 We 为 18.3. We 大于 1,此时惯性力是液滴动态过程的主导作用力.

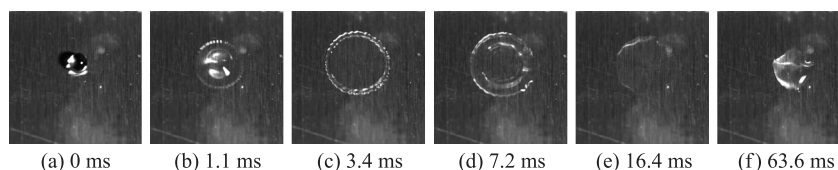


图 5 液滴撞击普通铝表面的动态过程

Fig. 5 The dynamic behavior of droplet impacting on bare aluminum surface

3.1.2 超疏水表面

如图 6 所示,液滴高速撞击超疏水表面($\theta=150^\circ$)的行为与撞击普通表面时的行为完全不同. 液滴撞击超疏水表面后,迅速向四周铺展,3.1 ms 铺展到最大,液滴边缘不是规则的圆形(图 6(b)),这是由于液滴在高速撞击时,三相接触线变化速度较快且变化速率不均,产生空气夹带,因此边缘形成液指. 随后,液滴在毛细力的作用下回缩(图 6(c)). 由于液滴中心的回缩速率大于液指的回缩速率,液指最终断裂,形成次生小液滴(图 6(d)). 主液滴全部回缩后,剩余的动能转化为势能,因此液滴出现回弹行为. 最终液滴静止时已远离撞击位置(图 6(f)).

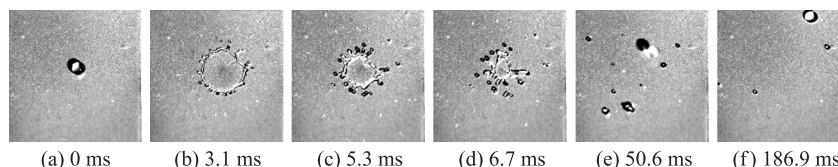


图 6 液滴撞击超疏水表面的动态过程

Fig. 6 The dynamic behavior of droplet impacting on superhydrophobic surface

3.1.3 超疏水—亲水混合表面

图 7 所示为液滴撞击超疏水—亲水混合表面(疏水条纹接触角为 $\theta=150^\circ$)的动态过程. 液滴首先发生 3 ms 左右的铺展过程(图 7(a)~(c)),3 ms 后液滴出现回缩. 液滴运动过程中,经过疏水部分的宽度越小,铺展的半径越大. 疏水部分对液滴的粘附力小,因此液滴在疏水条纹处回缩速度快,回缩过程液滴呈现不规则的形态(图 7(d)).

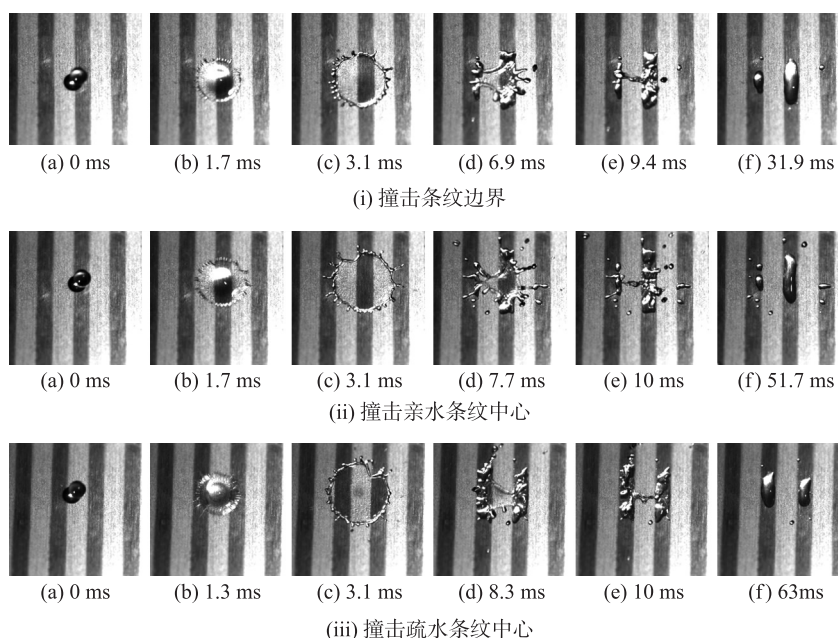


图 7 液滴撞击超疏水—亲水混合表面的动态过程对比

Fig. 7 The dynamic behavior of droplet impacting on superhydrophobic-hydrophilic surface

液滴高速撞击疏水—亲水混合表面的不同位置,主要影响液滴运动过程中产生的次生液滴数量与最终静止的液滴分布. 本实验中液滴分别撞击疏水与亲水条纹的边界(图 7(i))、亲水条纹中心(图 7(ii))、疏水条纹中心(图 7(iii)). 结果表明,液滴撞击亲水条纹中心过程中与疏水部分接触最多,运动过程产生的液滴数量最多,产生的次生液滴最多. 静止后,主液滴都回缩至撞击的亲水条纹上(图 7(ii)(f)),而液滴撞击疏水条纹中心产生的次生液滴数量小于撞击亲水条纹. 两者不同的是,撞击疏水条纹后,液滴破碎成两个体积相等的两部分,静止在疏水条纹两侧的亲水条纹上(图 7(iii)(f)). 而撞击疏水和亲水条纹边界,主液滴最终破碎成为大小不一的两个液滴,静止在相邻的亲水条纹上(图 7(i)(f)).

综上所述,韦伯数 We 在 18~25 范围内,液滴以 1.98 m/s 的速率撞击固体表面,均会发生铺展、回缩、回弹或破碎行为. 液滴在普通表面上以规则的圆形铺展回缩,且不会发生反弹. 而液滴撞击超疏水表面时,边缘出现液指,回缩过程液指断裂产生次生小液滴,最终主液滴发生回弹. 液滴撞击超疏水—亲水混合表面,超疏水条纹回缩速度快,回缩形状不规则,最终液滴静止在亲水条纹处,无液滴回弹现象.

3.2 不同接触角对液滴撞击运动特性的影响

图 8 给出了不同接触角的疏水表面($\theta=115^\circ$ 、 135° 、 150°)液滴铺展因子随着接触时间的变化($u_0=2.22$ m/s). 液滴在 3 种疏水表面铺展到最大和最终静止的形态如图 9(i) 所示,其中图 9(i) 为液滴最大铺展的形态,图 9(ii) 为液滴回缩后的形态. 从图 8 和图 9(i) 中可以看出,静态接触角越大,疏水表面的最大铺展因子越大,即最大铺展直径越大. 当疏水表面接触角为 150° 时,铺展因子最大为 3.43. 但疏水角度对液滴达到最大铺展直径的时间并未产生影响,均在 3 ms 左右.

如图 9(ii) 所示,表面不同接触角还影响液滴回缩后的动态行为. 液滴撞击静态接触角 115° 的疏水表面,回缩后未离开固体表面,以水平方向的动能释放液滴多余的能量. 撞击静态接触角为 135° 的疏水表面,液滴回缩后发生回弹,但未能完全离开固体表面. 液滴撞击接触角 150° 超疏水表面,回缩后向上弹起,呈现上粗下细的柱状,最终脱离表面.

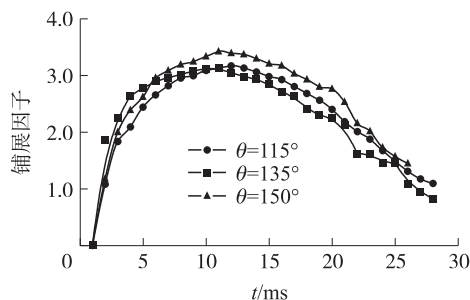


图 8 3 种疏水表面的铺展因子—时间变化曲线

Fig. 8 The relationship between spreading factor and time of three hydrophobic surfaces

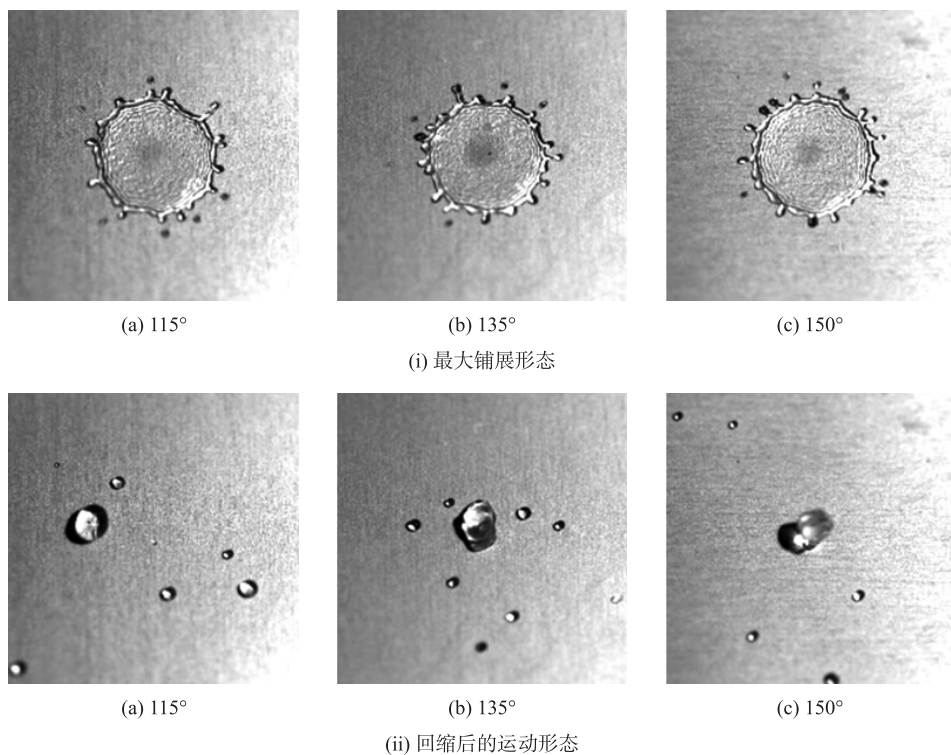


图 9 3 种疏水表面

Fig. 9 Three hydrophobic surfaces of different contact angles

3.3 速度对液滴撞击运动特性的影响

图 10 给出了液滴以不同速度撞击混合表面条纹边界的行过程,疏水条纹接触角为 135° . 液滴初始撞击速率分别为 1.98、2.22、2.43 m/s,撞击温度与室温相同. 实验表明,疏水条纹回缩产生的次生小液滴数量随着撞击速率增加而增多. 液滴速率为 1.98 m/s 时,液滴撞击表面后铺展,铺展到最大后收缩. 液滴在铺展过程中,产生多个液指,收缩过程中液指断裂,主液滴体积减小. 液滴速率增加到 2.22 m/s 时,液指数量有所增加,且由于惯性力的增加,液滴在铺展过程与收缩过程中均产生液指的断裂,以收缩过程中断裂的数量居多. 当液滴的撞击速率增加到 2.43 m/s 时,液指数量继续增加,铺展过程断裂的液指数量增加. 与撞击疏水表面不同的是,撞击疏水—亲水混合条纹的主液滴并未发生回弹.

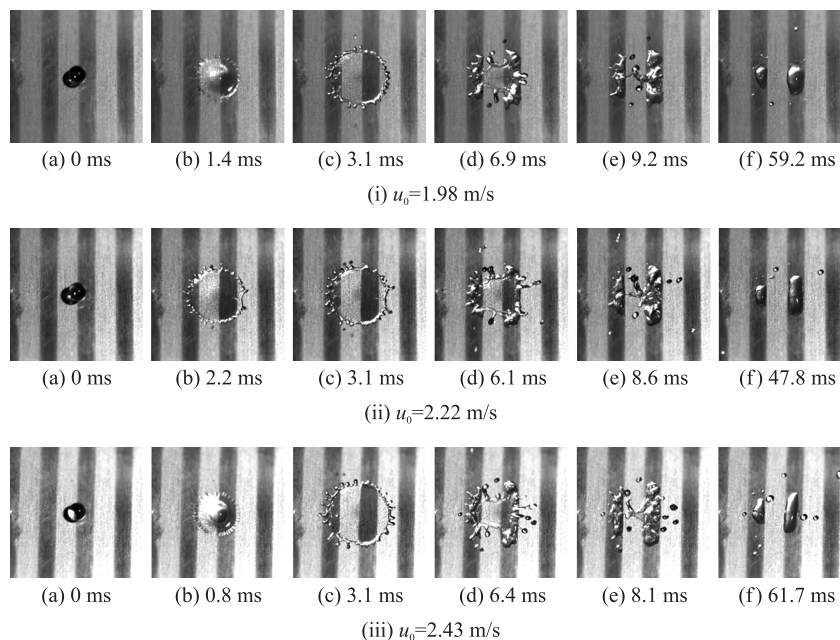


图 10 液滴以不同速度撞击疏水条纹接触角 135° 的混合表面

Fig. 10 The dynamic behavior of droplet impacting on hydrophobic-hydrophilic surface with different velocity

4 结论

本实验观测并记录了体积为 $20\ \mu\text{L}$ 的液滴撞击普通亲水表面、疏水表面、疏水—亲水混合表面的行为过程,并对疏水角度、撞击速度、不同形状的表面撞击产生的影响进行了对比分析. 实验表明:

(1) 液滴在亲水表面、疏水表面、疏水—亲水混合表面上的撞击均会产生铺展、回缩、反弹或破碎的行为. 液滴在亲水表面呈现完整规则的圆形,而在疏水表面或疏水—亲水混合表面会产生液指,最终发生断裂.

(2) 疏水表面接触角越大,铺展因子越大,最大铺展直径越大,但对达到最大铺展直径的时间无影响,均为 3 ms. 液滴撞击超疏水表面的铺展因子高达 3.43.

(3) 在相同条件下,速率分别为 1.98、2.22、2.43 m/s 的液滴撞击混合表面时,撞击速率越大,液滴回缩产生的液指越多,但主液滴无法出现回弹,只能生成弹起的次生小液滴.

[参考文献] (References)

- [1] BERTOLA V. An impact regime map for water drops impacting on heated surfaces[J]. International journal of heat and mass transfer, 2015, 85: 430–437.
- [2] WORTHINGTON A M. On the forms assumed by drops of liquids falling vertically on a horizontal plate[J]. Proceedings of the royal society of London, 1876, 25: 261–272.
- [3] 李栋,王鑫,高尚文,等. 单液滴撞击超疏水冷表面的反弹及破碎行为[J]. 化工学报, 2017, 68(6): 2473–2482.
LI D, WANG X, GAO S W, et al. Rebounding and splashing behavior of single water droplet impacting on cold superhydrophobic

- surface[J]. CIESC journal, 2017, 68(6): 2473–2482. (in Chinese)
- [4] ZHANG R, HAO P F, ZHANG X W, et al. Supercooled water droplet impact on superhydrophobic surfaces with various roughness and temperature[J]. International journal of heat and mass transfer, 2018, 122: 395–402.
- [5] 杨宝海, 王宏, 朱恂, 等. 速度对液滴撞击超疏水壁面行为特性的影响[J]. 化工学报, 2012, 63(10): 3027–3033.
YANG B H, WANG H, ZHU X, et al. Effect of velocity on behavior of droplet impacting superhydrophobic surface[J]. CIESC journal, 2012, 63: 3027–3033. (in Chinese)
- [6] PATIL N D, BHARDWAJ R, SHARMA A. Droplet impact dynamics on micropillared hydrophobic surfaces[J]. Experimental thermal and fluid science, 2016, 74: 195–206.
- [7] LIU Y, MOEVIUS L, XU X. Pancake bouncing on superhydrophobic surfaces[J]. Nature physics, 2014, 10(7): 515–519.
- [8] LECLEAR S, LECLEAR J, ABHIJEET, PARK K C, et al. Drop impact on inclined superhydrophobic surfaces[J]. Journal of colloid and interface science, 2016, 461: 114–121.
- [9] JIN Z Y, WANG Z N, SUI D Y, et al. The impact and freezing processes of a water droplet on different inclined cold surfaces[J]. International journal of heat and mass transfer, 2016, 97: 211–223.
- [10] YIN C C, WANG T Y, CHE Z Z, et al. Oblique impact of droplets on microstructured superhydrophobic surfaces[J]. International journal of heat and mass transfer, 2018, 123: 693–704.
- [11] LI X L, ZHANG L, MA X W, et al. Dynamic characteristics of droplet impacting on prepared hydrophobic/superhydrophobic silicon surfaces[J]. Surface and coatings technology, 2016, 307: 243–253.
- [12] JOSSERAND, CHRISTOPHE, THORODDSEN S T. Drop impact on a solid surface[J]. Annual review of fluid mechanics, 2016, 48: 365–391.
- [13] 刘冬薇, 宁智, 吕明, 等. 液滴撞击超疏水壁面反弹及破碎行为研究[J]. 计算力学学报, 2016, 33(1): 107–113.
LIU D W, NING Z, LÜ M, et al. Rebounding and splashing behavior of water droplet impacting on superhydrophobic surface[J]. Chinese journal of computational mechanics, 2016, 33: 107–113. (in Chinese)
- [14] YAN J H, YANG K, ZHANG X B, et al. Analysis of impact phenomenon on superhydrophobic surfaces based on molecular dynamics simulation[J]. Computational materials science, 2017, 134: 8–16.
- [15] 李西营, 高丽, 刘勇. 超疏水表面上液滴撞击动力学研究[J]. 广州化工, 2011, 39(22): 39–41.
LI X Y, GAO L, LIU Y. Study on the dynamics of water droplet impacting superhydrophobic surface[J]. Guangzhou chemical industry, 2011, 39(22): 39–41. (in Chinese).

[责任编辑: 严海琳]

(上接第 17 页)

- [16] 祝叶, 管宁, 李栋, 等. 不同截面形状超疏水微肋阵内对流换热特性[J]. 化工学报, 2017, 68(1): 74–82.
ZHU Y, GUAN N, LI D, et al. Convection heat transfer characteristics of super-hydrophobic micro pin-fins with different cross-sectional shapes[J]. CIESC journal, 2017, 68(1): 74–82. (in Chinese)
- [17] 姜桂林, 管宁, 张承武, 等. 不同截面疏水性微肋阵内减阻特性[J]. 化工学报, 2016, 67(4): 1258–1268.
JIANG G L, GUAN N, ZHANG C W, et al. Characteristics of drag reduction in different cross sections of hydrophobic micro pin fins[J]. CIESC journal, 2016, 67(4): 1258–1268. (in Chinese)
- [18] 姜桂林, 张承武, 管宁, 等. 水在不同管径超疏水性微管内的流动特性[J]. 山东科学, 2015, 28(1): 20–27.
JIANG G L, ZHANG C W, GUAN N, et al. Flow characteristics of water in super-hydrophobic micro-tubes with different diameters[J]. Shandong science, 2015, 28(1): 20–27. (in Chinese)
- [19] 王鹏伟. 多孔介质微流动特性的实验研究[D]. 杭州: 中国计量学院, 2014.
WANG P W. Experimental Study on the Micro Flow Characteristics in Porous Media [D]. Hangzhou: China Jiliang University, 2014. (in Chinese)
- [20] JOHN T J. Parametric study on the combined thermal and hydraulic performance of single phase micro pin-fin heat sinks part I: square and circle geometries[J]. International journal of thermal sciences, 2010, 49: 2177–2190.

[责任编辑: 严海琳]