DOI：10.19789/j.1004-9398.2023.05.007
文献引用：陈倩，李斌．粘弹性液滴撞击加热超疏水表面现象研究[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2023，44(5)：41-45. CHEN Q，LI B. Viscoelastic droplet impact phenomena on heated superhydrophobic surfaces[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2023，44(5)：41-45.

粘弹性液滴撞击加热超疏水表面现象研究*

陈　倩，李　斌**

（四川文理学院智能制造学院，四川 达州　635000）

摘要：液滴与超疏水固体表面碰撞的反弹现象是自然界与工程领域中常见的流动现象，也是流体力学研究的前沿问题。本文利用高速摄像和图像处理技术研究了加热超疏水表面上粘弹性液滴撞击过程的铺展变形、反弹、及振动现象，探索不同撞击速度和高温条件下对应的撞击现象，总结了液滴反弹的相图，论证了速度、温度与液滴反弹的关系。揭示了超疏水表面温度对粘弹性液滴振动的重要影响，实验结果可为液滴控制技术研究提供参考。

关键词：粘弹性液滴；撞击力学；超疏水
中图分类号：O35　　**文献标识码**：A

Viscoelastic droplet impact phenomena on heated superhydrophobic surfaces*

CHEN Qian，LI Bin**

（School of Intelligent Manufacturing，Sichuan University of Arts and Science，Dazhou Sichuan　635000）

Abstract：The rebound phenomenon of droplet impacting on super-hydrophobic surfaces is a common flow phenomenon in nature and engineering fields，and is also a frontier research in fluid mechanics. In this paper，the spread deformation，rebound and vibration of viscoelastic droplets on a heated superhydrophobic surface are studied by using high-speed camera and image processing technology. The corresponding impact phenomena of droplets with different impact velocities on various temperature surfaces are explored. The phase diagram of droplet rebound is summarized，and the relationship between velocity，temperature and droplet rebound is demonstrated. The important influence of superhydrophobic surface temperature on the vibration of viscoelastic droplets is revealed. The experimental results can provide a reference for the research of droplet control technology.

Keywords：viscoelastic droplet；impact dynamics；superhydrophobicity
CLC：O35　　**DC**：A

0　引　言

微液滴在固体表面的润湿行为是自然界中普遍存在的物理现象，其机理广泛应用于材料科学[1]、医疗器械[2]、农业生产[3]和航空航天等领域[4]。如：在材料科学方面，建筑的楼板、吊顶、窗户和玻璃隔

收稿日期：2022-10-25
* 四川省自然科学基金项目（2022NSFSC1989）；四川文理学院智能制造产业技术研究院项目（ZNZZ2207）
** 通信作者：libin@sasu.edu.cn

断等围护结构不可避免地会与雨水、雪水和地下水接触,产生不同程度的渗透、渗漏和侵蚀,降低建筑的寿命;在医疗器械应用中,飞沫传播是病毒传播的主要途径之一,在疫情防控和救治过程中,人体咳嗽、呼吸、说话产生的飞沫可能会附着在医用护目镜表面,增加感染概率,影响救援工作的正常进行,这也是微液滴与固体表面的相互作用现象;在农业生产中,为了防治沙漠蝗、草原夜蛾等害虫,往往需要对农作物喷洒特定的农药,液滴与作物表面的相互作用影响喷洒效果;在航空航天中,当飞机穿越云层时,过冷水滴撞击机身表面容易出现结冰现象,从而改变飞机的气动形状,甚至干扰飞机的控制系统。以上这些都是微液滴与固体表面的相互作用现象。因此,精确控制微液滴在固体表面的沉积或反弹是必要的,开展液滴碰撞力学的相关研究也具有重要的意义和应用潜力。

液滴静止在表面上,气液相界面通过接触点的切线与固液相界面的夹角为平衡接触角[5],当平衡接触角>150°时,通常认为该固体表面为超疏水表面[6]。自然界中的某些生物表面本身具有超疏水性质,如植物叶片[7-8]、昆虫翅膀[9]和动物羽毛[10-11],最典型的便是荷叶表面形成的“荷叶自洁效应”[7]。液滴撞击超疏水固体表面时,抑制液滴在表面上的反弹往往是困难的,因为这与超疏水的本质恰恰相反。已有研究结果表明,在水溶液中添加微量聚合物,如聚氧化乙烯(Polyethyleneoxide,PEO)可以抑制液滴在疏水表面[12]和超疏水表面[13]的反弹。其抑制反弹的原因一直备受学者争议:Bartolo等[14]研究认为较强的拉伸粘度是抑制液滴反弹的根本原因,因为添加PEO材料使得液滴的粘弹性比水显著增加;Smith和Bertola[15]、Smith和Sharp[16]表明聚合物在固液界面上的拉伸和粘附而产生的接触线摩擦是抑制液滴反弹的主要原因,产生的接触线摩擦增加了液滴与固体表面间的相互作用强度,增加了接触时间,从而抑制液滴在超疏水表面上的反弹;Chen等[13]研究证实,添加PEO高分子聚合物形成的粘弹性液滴,撞击超疏水固体表面后在回缩过程中在固液表面形成高分子链,高分子链链接于液滴与超疏水纳米柱间,抑制了液滴的反弹;Li等[17]研究随着超疏水表面温度升高,纳米级的高分子液链在高温表面上迅速蒸发,粘弹性液滴与固体表面间的相互摩擦作用减弱,加快了液滴的反弹,其研究结果表明表面温度不只影响粘弹性液滴在表面的回缩、反弹阈值,还可能影响液滴的能量恢复系数和振动。因此,粘弹性液滴撞击超疏水表面后的相关现象是复杂而值得研究的,特别是在不同温度表面的情况。

本文基于上述情况,搭建实验平台进一步系统地研究粘弹性液滴撞击超疏水表面的力学性能和行为现象。通过液体配制、超疏水表面制备、流体物性表征和表面结构表征,利用高速摄像采集图像,依托Matlab软件自建程序进行图像处理,探索不同撞击速度和表面温度对应的撞击现象,并通过相图的形式总结分类,揭示表面温度对液滴在超疏水表面上振动的影响情况。

1 实 验

1.1 试剂及超疏水表面制备

本文研究的粘弹性液体是指自主配制质量浓度为2.0 g/L的聚(环氧乙烷)水溶液(PEO,平均分子摩尔质量为4×10^6 g/mol,购自Sigma Aldrich)。通过流变仪(Physica MCR 301,Anton Paar)对水溶液的流变性进行表征,得到水的粘度约为0.9 mPa·s,而PEO水溶液的粘度平均值约为4.0 mPa·s,二者之间相差约4倍,质量浓度为2.0 g/L的聚(环氧乙烷)PEO水溶液剪切粘度如图1所示。

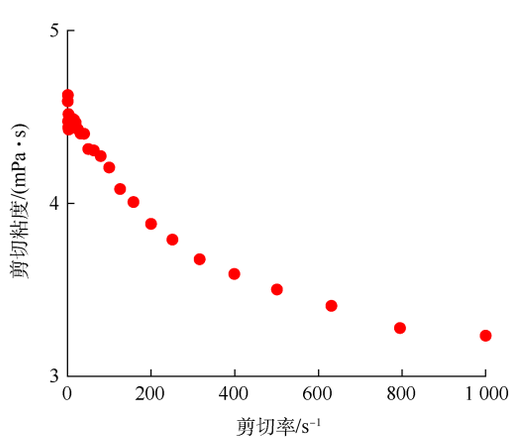


图1 聚(环氧乙烷)水溶液(PEO)剪切粘度

超疏水表面的制备则是通过在洗净的硅片表面喷涂超疏水纳米颗粒,并用加热器对多次喷涂的硅片进行后烘,使得最终在硅片表面得到一层薄而均匀的超疏水涂层。硅片基底的超疏水涂层形貌由均匀的微纳米结构组成,超疏水硅片表面的微纳米结构扫描电子显微镜结果如图2所示。超疏水表面制备完成后,将直径约为2 mm的液滴静置在该超疏水表面上,通过接触角测量仪(OCA 20,Dataphysics,Germany)测得的静态接触角约为150°(图2插图)。

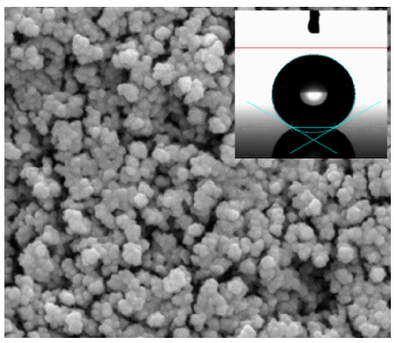


图 2　超疏水硅片表面的微纳米结构和超疏水性

1.2　实验过程

液滴撞击及振动过程由高速摄像机(V2012, Phantom, USA)以 60 000 fps 的速率面对光源进行图像捕捉,并使用 Matlab 软件和自编程序进行图像处理和数据分析,实验装置示意如图 3 所示。液滴由注射系统生成,通过注射针头连接可精密控制的注射泵,在重力的作用下液滴从针尖释放,并通过改变针头的高度改变液滴撞击超疏水表面前的初始速度(V_0)。通过公式 $V_0=\sqrt{2g(h-D_0)}$ 计算可得液滴的初始速度,其中 h 表示液滴的初始重心高度,g 表示重力加速度,D_0 表示液滴的初始直径,测得 D_0 约为 2 mm。为了探索表面温度对液滴撞击力学的影响规律,本文对不同初始动能的液滴,撞击不同温度的超疏水表面过程进行了研究和分析。作为比较研究的条件,表面控制为 4 种温度,分别是 30、130、180和240 ℃。表面温度为 30 ℃ 时,可认为超疏水表面未进行加温操作。

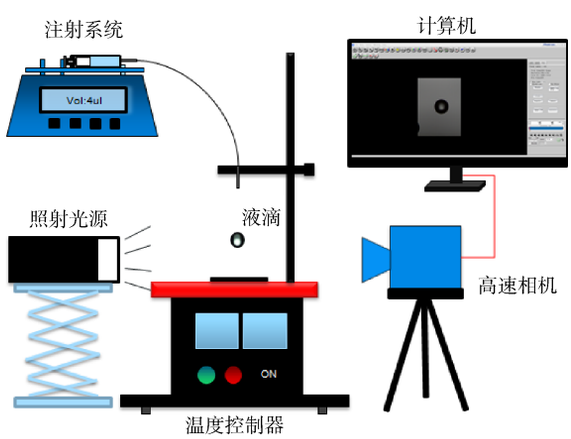
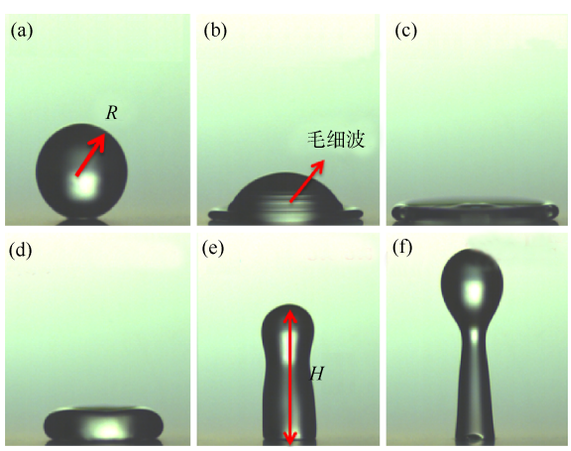


图 3　实验装置示意

据早期研究所知[13],当液滴以一定的 V_0 撞击超疏水表面,可能会出现液滴铺展、回缩和反弹等现象,其原因主要在于液滴初始速度、固体表面浸润性和液滴本身物性的不同[17]。如果液滴的 V_0 过大,即使固体表面为超疏水,也可能造成液滴不能反弹的现象。这是因为超疏水微纳米结构间的气层可能被冲破,导致液滴底部钉扎在超疏水微纳米结构上,不能反弹。为了探索超疏水表面与液滴间的相互作用规律,探索相关因素与液滴撞击现象的关系,本文开展了液滴在不同 V_0 条件下,撞击不同温度的超疏水表面过程的研究,揭示相关因素对液滴撞击表面后的运动影响。

2　结果与讨论

不同时刻大韦伯数下液滴撞击超疏水表面过程如图 4 所示。粘弹性液滴 V_0 约为 1.1 m/s 时,撞击温度为 240 ℃。文中定义液滴自由落体接触表面瞬间为 0 时刻,即 0 ms;当液滴接触表面后,液滴伴随着剧烈的毛细波铺展;在几个 ms 的时间内产生剧烈变形,在最大延伸处形成了一个煎饼状结构;液滴铺展结束后开始回缩,当液滴准备离开固体表面时,由于液滴底部钉扎在微纳米结构中,从而抑制了液滴的反弹,且液滴整体形貌呈现被拉长的状态。这是由于液滴初始动能足够大,液滴的水锤压力大于微纳米结构所承受的毛细压力,液滴从 Cassie-Baxter 状态过渡到 Wenzel 状态,这种状态下液体底部通常会粘附在固体表面上[19]。



注:R 表示液滴的原始半径;H 表示液滴形貌变化过程中的实际高度。

图 4　不同时刻大韦伯数下液滴撞击超疏水表面过程
(a)t=0;(b)t=0.8 ms;(c)t=2.0 ms;(d)t=5.3 ms;
(e)t=8.8 ms;(f)t=15.3 ms

除了较大的撞击 V_0 会抑制液滴反弹外,最近的研究结果[17,20]证明,液滴密度也是影响粘弹性液滴运动的重要因素,液滴在超疏水表面上铺展过程中,会形成大量的高分子链,较大的摩擦力阻止液滴回缩最后不能反弹。为了进一步研究表面温度对液滴反弹的影响,本实验中将超疏水硅片放置恒温加热台

上,对硅片表面进行加温,并以环境温度 T = 30 ℃作为数据对比条件,将温度升高至130、180和240 ℃。

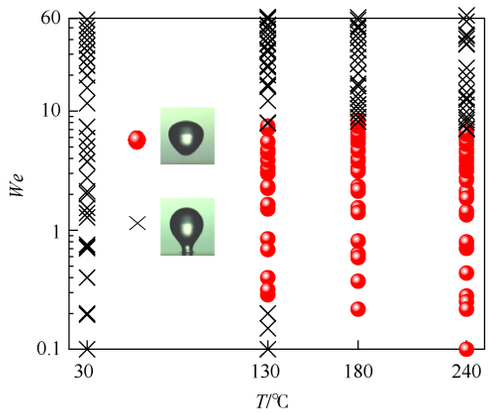
为了清晰地显示超疏水表面温度对液滴反弹的影响,实验中通过改变液滴 V_0来得到液滴反弹与不反弹间的临界值,并通过计算得到无量纲化速度[13],韦伯数(Weber number,We)

$$We = \frac{\rho V_0}{\gamma}, \tag{1}$$

式中:ρ为液滴密度;γ为表面张力。液滴反弹及不反弹的阈值情况通过速度无量纲(We)和表面温度(T)2个因素表示。

不同温度下We阈值如图5所示。研究结果显示,随着超疏水表面温度升高,液滴反弹的趋势增大。当 T = 30 ℃的条件下,由于粘弹性液滴密度较高,随意改变液滴的撞击速度均不能使液滴弹起。随着表面温度升高至130 ℃,液滴在较小的 V_0条件下也能反弹。这是由于较高的表面温度在铺展过程中蒸发液态高分子链,降低了固-液表面间的相互作用力。当表面温度继续升高至180和240 ℃时,可反弹的速度阈值逐渐降低,这表明更低的初始动能也足以支撑液滴在高温固体表面弹起。原因在于当表面温度升高至莱顿弗罗斯特点(Leidenfrost point)时,液滴底部形成一层水蒸气[21],阻止液滴与固体表面的接触,促进液滴反弹。

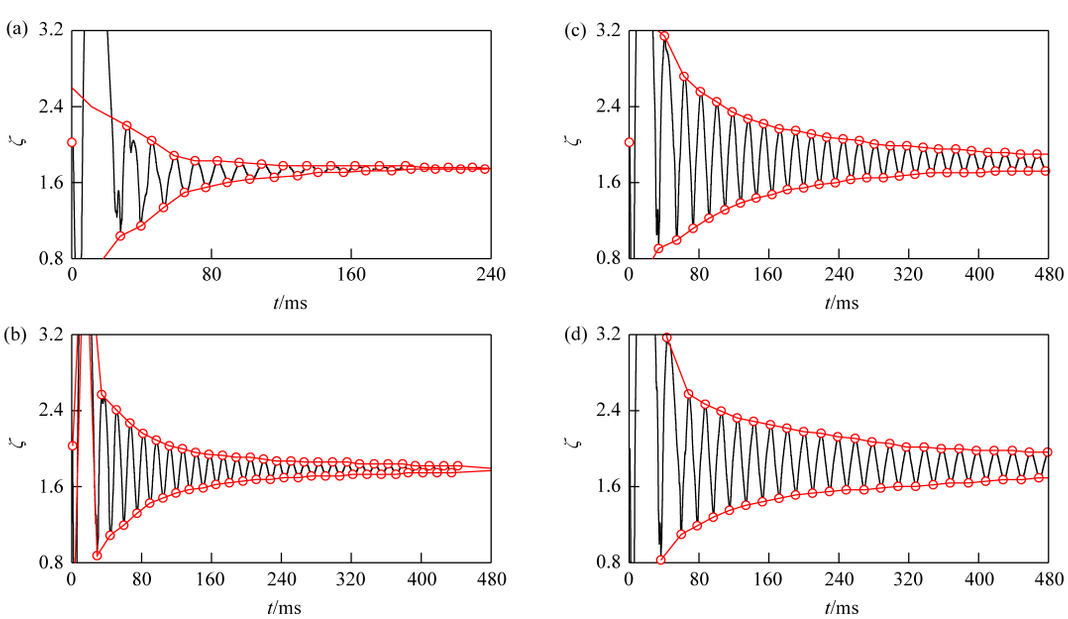
为了探索表面温度对液滴振动力学的影响,本文对液滴撞击超疏水表面后的运动行为进一步分析。通过高速相机捕捉液滴运动现象显示,液滴以较大的初始动能撞击固体表面后开始振动,即液滴在表面上反复铺展和回缩,当残余动能受到粘性耗散和固液相互作用的抵制后,液滴最终会停留在固体表面。通过碰撞后液滴的运动轨迹分析,可得到超疏水表面温度对液滴振动轨迹和形貌变化的影响。



注:红色球表示液滴可反弹时的韦伯数分布情况;黑色叉表示不可反弹的情况。

图5　不同温度下韦伯数(We)阈值

本文设环境温度 T = 30 ℃作为参考,对比其余3个高温条件下(T = 130、180和240 ℃)表面温度对液滴变形因子$\zeta = H/R$的影响情况。通过Matlab软件对图像和数据进行处理[14],得到相关的实验结果,不同表面温度对液滴振动的影响如图6所示。



注:黑色线表示实验的真实数据;红色圆圈为变形因子的极值;红色线为极值的拟合线。

图6　不同表面温度对液滴振动(变形因子)的影响

(a)T=30 ℃;(b)T=130 ℃;T=180 ℃;(d)T=240 ℃

当表面温度为常温,即 T = 30 ℃时,液滴撞击固体表面后开始振动,约200 ms后振动消失,振动频率约为77 Hz;当表面温度升高至130 ℃时,液滴的振动幅度大于常温时的振幅,直到450 ms后振动逐渐减弱到停止,振动频率从常温情况下的77下降到65 Hz;当温度升高至180 和240 ℃时,液滴振动幅度更大,振动频率分别减小到54和51 Hz,液滴振动消失需要更长的时间,液滴的振动在600 ms后依然没有消失。因此,实验数据表明超疏水表面温度对液滴的振动影响较大,随着表面温度的升高,液滴振动的幅值和存活时间增大,振动频率减小。

3　结　论

本文探索性地研究了粘弹性液滴撞击加热超疏水表面的运动现象。将环境温度作为参考,对比了3个高温条件下粘弹性液滴撞击超疏水表面的反弹、变形和振动情况。通过无量纲化,证实了液滴 V_0 和 T 对液滴反弹的影响。实验结果表明,高密度的粘弹性液滴在常温情况下无法反弹,随着表面温度升高,粘弹性液滴可反弹且可反弹的 We 范围增大。此外,超疏水表面温度对粘弹性液滴的振动也有重要影响。结果表明,表面温度增加可增大液滴振动的振幅和存活时间,减小振动频率。

参 考 文 献

[1] KIM J. Spray cooling heat transfer: the state of the art [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2007, 28(4): 753-767.

[2] UEDA E, LEVKIN P A. Emerging applications of superhydrophilic-superhydrophobic micropatterns [J]. Advanced Materials, 2013, 25(9): 1234-1247.

[3] BERGERON V, BONN D, MARTIN J Y, et al. Controlling droplet deposition with polymer additives [J]. Nature, 2000, 405(6788): 772-775.

[4] ANTONINI C, INNOCENTI M, HORN T, et al. Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy reduction in anti-icing systems [J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 67(1/2): 58-67.

[5] 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):106-112.

[6] 梁超,王宏,朱恂,等.液滴撞击不同浸润性壁面动态过程的数值模拟[J].化工学报,2013,64(8):2745-2751.

[7] NEINHUIS C, BARTHLOTT W. Characterization and distribution of water-repellent, self-cleaning plant surfaces[J]. Annals of Botany, 1997, 79(6): 667-677.

[8] BIXLER G D, BHUSHAN B. Rice and butterfly-wing effect inspired self-cleaning and low drag micro/nanopatterned surfaces in water, oil, and air flow [J]. Nanoscale, 2014, 6(1): 76-96.

[9] WATSON G S, MYHRA S, CRIBB B W, et al. Putative functions and functlona efficiency of ordered cuticular nanoarrays on insect wings [J]. Biophysical Journal, 2008, 94(8): 3352-3360.

[10] SRINIVASAN S, CHHATRE S S, GUARDADO J O, et al. Quantification of feather structure, wettability and resistance to liquid penetration[J]. Journal of The Royal Society Interface, 2014, 11(96): 20140287.

[11] CASSIE A B D, BAXTER S. Large contact angles of plant and animal surfaces[J]. Nature, 1945, 155: 21-22.

[12] WANG Y L, MINH D Q, AMBERG G. Dynamic wetting of viscoelastic droplets[J]. Physical Review E, 2015, 92: 043002.

[13] CHEN L Q, WANG Y G, PENG X Y, et al. Impact dynamics of aqueous polymer droplets on superhydrophobic surfaces [J]. Macromolecules, 2018, 51(19): 7817-7827.

[14] BARTOLO D, BOUDAOUD A, NARCY G, et al. Dynamics of non-Newtonian droplets [J]. Physical Review Letters, 2007, 99: 174502.

[15] SMITH M I, BERTOLA V. Effect of polymer additives on the wetting of impacting droplets [J]. Physical Review Letters, 2010, 104: 154502.

[16] SMITH M I, SHARP J S. Origin of contact line forces during the retraction of dilute polymer solution drops [J]. Langmuir, 2014, 30(19): 5455.

[17] LI B, LIN S J, WANG Y L, et al. Promoting rebound of impinging viscoelastic droplets on heated superhydrophobic surfaces[J]. New Journal of Physics, 2020, 22(12): 123001.

[18] LIN S J, ZHAO B Y, ZOU S, et al. Impact of viscous droplets on different wettable surfaces: impact phenomena, the maximum spreading factor, spreading time and post-impact oscillation [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2018, 516: 86-97.

[19] WANG L, WANG R X, et al. Compact nanoscale textures reduce contact time of bouncing droplets [J]. Science Advances, 2020, 6(29): eabb2307.

[20] PACK M Y, YANG A, PERAZZO A, et al. Role of extensional rheology on droplet bouncing [J]. Physical Review Fluids, 2019, 4: 123603.

[21] BERTOLA V. Effect of polymer concentration on the dynamics of dilute polymer solution drops impacting on heated surfaces in the Leidenfrost regime[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 52: 259-269.

(责任编辑:兰丽丽)