

文章编号:0253-4339(2025)02-0137-08

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.02.137

不同温度下液滴撞击不同润湿性倾斜表面的动力学行为

陈孝松¹ 郑海坤^{1,2} 张培成¹ 盛伟^{1,2} 郝晓茹¹

(1 河南理工大学机械与动力工程学院 焦作 454000; 2 哈密豫新能源产业研究院有限责任公司 哈密 839000)

摘要 超疏水表面作为一种新型绿色材料在防/除冰领域展现了一定的应用前景。通过实验对比研究了不同温度(-25~16℃)、不同倾角(0~60°)以及不同润湿性表面(亲水、超疏水表面)上撞击液滴的动力学行为,分析了其液滴形态、铺展因子、铺展时间和接触时间的变化情况。结果表明:由于倾角和润湿性不同,撞击液滴在铺展之后表现出不同的动力学行为;随着倾角增大,亲水表面最大铺展因子和铺展时间随之增大,超疏水表面铺展时间变化与之相同,最大铺展因子随着倾角的增加而减小,特别是 $T_s > -25$ ℃;相比于亲水表面,液滴撞击超疏水表面具有更短的铺展时间,在 $T_s = -25$ ℃时可以达到约10倍;增大壁面倾角会打破液滴在水平超疏水表面上的对称反弹,进而缩短液滴接触时间,说明增加倾角可有效抑制水滴冻结。

关键词 液滴撞击动力学;表面润湿性;表面倾角;表面温度;防/除冰

中图分类号:TK028.8

文献标识码:A

Kinetic Behavior of Droplet Impacts on Inclined Surfaces with Different Wettability at Different Temperatures

Chen Xiaosong¹ Zheng Haikun^{1,2} Zhang Peicheng¹ Sheng Wei^{1,2} Hao Xiaoru¹

(1. College of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, 454000, China; 2. Hami Yu-Xin Energy Industry Institute Co., Ltd., Hami, 839000, China)

Abstract Superhydrophobic surfaces, a new type of green material, exhibit promising application prospects in the field of anti-/de-icing. In this paper, the kinetic behavior of impinging droplets on surfaces with different temperatures (-25~16℃), different inclination angles (0°~60°), and different wettability (hydrophilic and superhydrophobic surfaces) is investigated through experimental comparisons. The variations of the droplet morphology, spreading factor, spreading time, and contact time are analyzed. The results show that the impinging droplets exhibit different kinetic behaviors after spreading due to the different inclination angles and wettability. The maximum spreading factor and spreading time on hydrophilic surfaces increase with the inclination angle. The variation of the spreading time on superhydrophobic surfaces follows the same trend as that on hydrophilic surfaces, while the maximum spreading factor decreases with an increase in the inclination angle, especially at $T_s > -25$ ℃; Compared to hydrophilic surfaces, the impinging droplets have shorter spreading times on superhydrophobic surfaces, which can reach about 10 times at $T_s = -25$ ℃. Increasing the wall inclination angle breaks the symmetric bounce of the droplets on the horizontal superhydrophobic surface, thereby shortening the contact time of the droplets. This suggests that increasing the inclination angle can effectively inhibit the freezing of water droplets.

Keywords droplet impact kinetics; surface wettability; surface inclination; surface temperature; anti-/de-icing

液滴撞击固体壁面结冰现象广泛存在于制冷低温领域,并带来一定的负面危害:如雨滴撞击室外换热器低温壁面结冰会增大换热器热阻和气流流动阻力从而降低换热性能^[1];撞击蒸发器表面冻结形成的积冰层会降低制冷效率,增加电能消耗^[2];撞击电线、电缆结冰会引起线路或设备损坏而造成巨大的经济损失^[3]。鉴于结冰带来的危害,研究人员设计开发了主动除冰和被动防冰技术来去除积冰和抑制冰

的形成^[4]。然而,传统的除/抑冰方法大都存在能效低、费用高及使用场合受限等各种问题^[5]。近年来,具有大接触角和较小滚动角的超疏水表面因诸多优点在防/除冰领域展现了一定的应用前景,引起了广泛关注。

液滴撞击固体壁面后会表现不同的动力学行为,而其所表现出的特殊弹跳行为使界面具有一定的抗结冰能力,是预防结冰的关键。因此,缩短液滴撞击

基金项目:国家自然科学基金(52266001)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52266001).)

收稿日期:2023-11-28;修回日期:2023-12-22;录用日期:2024-02-05

超疏水表面的接触时间,加快液滴从超疏水表面弹离至关重要。相关研究^[6-8]已经证明液滴的回弹或黏附与表面特性和液滴特性等因素有关。为研究这些因素对液滴撞击接触时间的影响,Huang Liu等^[9]通过氟化颗粒涂层制备了软弹性超疏水棉并进行了水滴撞击实验,发现以弹性材料为表面基底可大幅缩短液滴接触时间。Du Jiayu等^[10]通过实验研究了具有不同润湿梯度的超疏水表面上的液滴撞击动力学,发现打破液滴的对称回弹是增强液滴弹跳能力的关键。姚一娜等^[11]发现液滴撞击CuO超疏水表面出现反弹与黏附的临界表面温度介于-25~-20℃。Tai Yaolin等^[12]对不同黏度的液滴撞击超疏水表面的反弹动力学进行了研究,发现高黏度液滴的接触时间随撞击速度的增加而增加。上述研究为了解液滴撞击行为,抑制撞击液滴的冻结提供了一定的参考。

然而,上述研究主要集中于水平和单一润湿性表面,与实际工程应用中不同倾角表面结冰有一定的差异,其结论是否仍然有效尚未可知。因此,对比研究不同润湿性倾斜表面上的液滴撞击动态行为对超疏水表面能否有效抑制冰的形成十分重要。关于倾斜表面上的液滴撞击动力学,已经有部分学者进行了相关研究,但更多的关注于液滴撞击不同温度和倾角表面后的冻结形态^[13-16]或不同速度下倾角对液滴撞击特性的影响^[17-18],而对不同温度下倾角对不同润湿性表面上液滴撞击特性的影响研究较少。

基于上述分析,本文采用飞秒激光及低表面能氟化涂层制备了方柱微结构超疏水表面。研究了水滴撞击超疏水表面和亲水表面的动态行为,对比分析了不同温度和倾角下液滴接触时间的变化规律,以及倾角和温度对液滴撞击不同润湿性表面前后铺展因子的影响规律,讨论了倾角对不同润湿性表面防冰性能的影响,为促进超疏水表面在防冰方面的潜在应用提供了指导。

1 实验方法

1.1 表面制备

实验以20 mm×20 mm×3 mm的铝合金为基底。首先用400、800、1 000目砂纸对基底进行打磨并抛光,放入去离子水中超声清洗20 min后用烘干箱对其进行干燥(80℃),然后用飞秒激光按照设定的参数(长/高/宽=100/100/200 μm)对其加工并在加工完成后重复上述清洗及烘干过程。之后,制备双层涂层并喷涂在表面用于形成低表面能层。制备方法与过程详见课题组已发表的文献^[19]。对照组为光滑铝表面,清洗烘干后无需其它加工。

1.2 样品表征

通过场发射扫描电子显微镜(Merlin Compact)对样品表面进行扫描和表征,样品表面形貌如图1所示。由图1可知,制备的表面上周期性分布着很多方柱状结构。在方柱凹槽间和表面微结构上面可以看到“沟壑”状的涂层,即低表面能涂层。进一步放大还可以看到低表面能涂层上的纳米颗粒。光滑铝表面上存在一些细小的划痕和微小的凹坑,这是在加工过程中用砂纸打磨造成。使用接触角测量仪(SDC-350)对样品进行接触角测试,在表面随机选取3个不同的位置,将体积为4 μL的水滴分别置于这些位置。每个位置重复测试3次,计算接触角和滚动角的平均值。制备的表面静态接触角和滚动角分别为160.6°和0.16°,测量误差在±3°以内,具有良好的疏水性。光滑铝表面静态接触角为76.1°,测量误差在±1.5°以内,表现出亲水性。

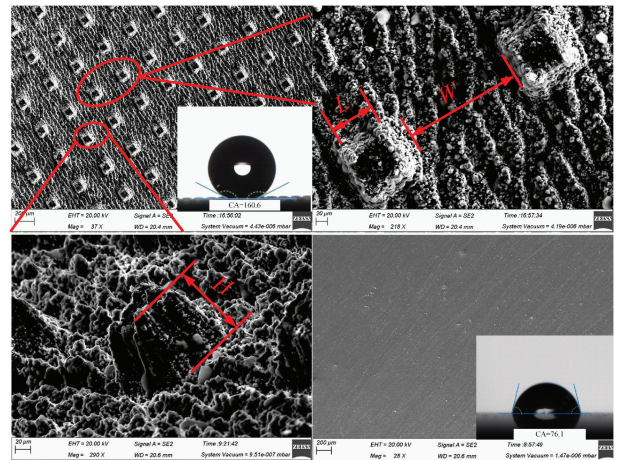


图1 方柱微结构及光滑铝表面的SEM图像
Fig.1 SEM images of square pillar and smooth aluminum surfaces

1.3 实验装置

实验装置如图2所示,主要包括5部分:环境控制系统、半导体制冷系统、水滴发生系统、数据及图像采集系统。环境控制系统用于对实验段(长×宽×高=250 mm×250 mm×250 mm)内的空间进行温度和湿度的控制和调节,主要包括氮气瓶、小风扇、换热器、低温冷却液循环泵等。半导体制冷系统用于为实验段表面提供恒定的冷壁面温度,主要包括调压直流电源、半导体制冷片(TEC-12707)、冷却水道、恒温水箱、温控器(AI-516,精度0.25)等,与实验所用冷表面共同组成了装置图中的表面部分。水滴发生系统用于产生一定大小的液滴,主要包括针筒、一定尺寸的针头、储液箱等。数据采集系统用于实时监测并采集环境温湿度和冷表面温度变化情况,主要包括

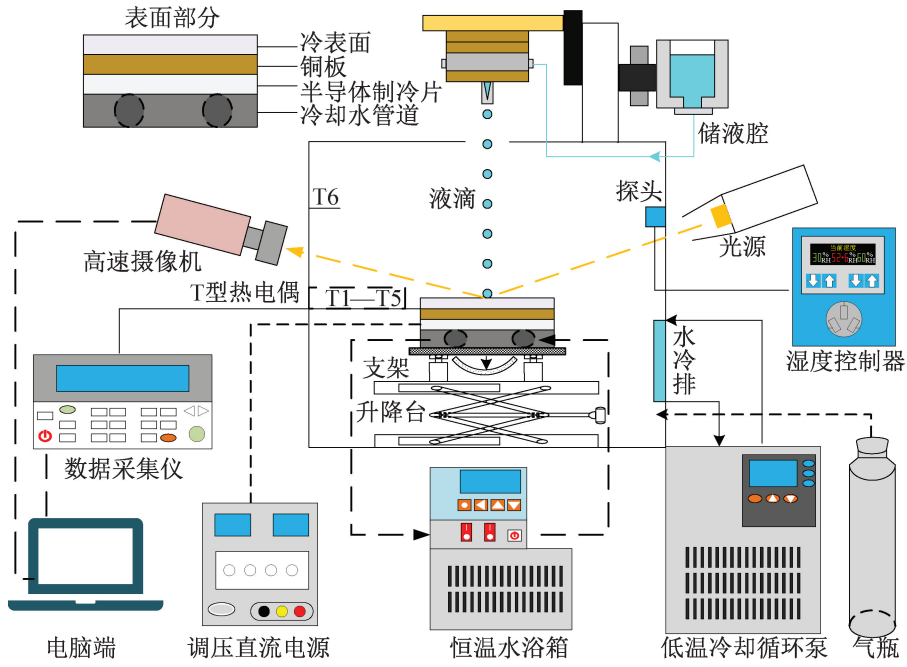


图 2 实验装置

Fig.2 Experimental equipment

T 型热电偶、湿度传感器 (HC-05B)、数据采集仪 (Agilent 34970A)。由于表面较小,为了减小实验中的温度测量误差,在实验表面下方布置 5 个均匀分布的热电偶,取其测量值的平均值作为冷表面温度,测量的温度误差在 ± 0.1 之内。图像采集系统主要包括高速相机 (phantom 配备 Nikon 200 mm 微距镜头)、冷光源、电脑端等。

实验前,通过旋转倾斜台调整表面为固定的角度 ($\theta=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$),使用氮气对玻璃箱内进行除湿 (低于 20%) 避免表面结霜干扰实验结果,调节直流电源和温控器控制表面温度 T_s 为 16、-5、-15、-25 $^\circ\text{C}$ 。在湿度达到要求后关闭氮气瓶,通过针头产生直径为 1.7 mm 的去离子水滴,从距离表面 100 mm 处自由落体撞击到表面上进行实验,排除单次结果差异较大的实验,最后取 3 组实验的平均值作为实验结果。通过高速相机进行拍摄并进行后处理,高速相机分辨率为 768×576 ,拍摄速度为 7 200 fps。

1.4 液滴撞击倾斜表面示意图

水滴撞击倾斜表面如图 3 所示。液滴初始直径为 d_0 , 竖直撞击速度为 v_0 , 液滴与表面最先接触的点为原点,沿 x 方向为正方向。引入符号 x_b 和 x_f 表示液滴撞击表面后的瞬时扩散长度,定义为从撞击点至液滴上下边缘的距离。为了消除液滴尺寸的影响,采用 x_f/d_0 和 x_b/d_0 分别表示液滴无量纲前铺展因子和后铺展因子,由于液滴最初撞击位置在撞击点后方,所以后铺展因子为负值。液滴与表面接触的总铺展

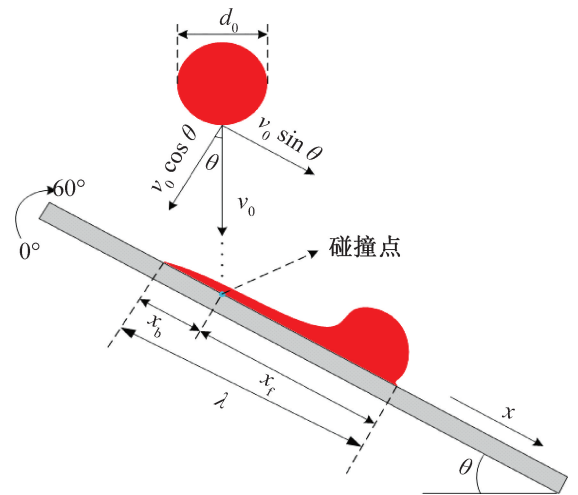


图 3 水滴撞击倾斜表面

Fig.3 Water droplets hitting an inclined surface

因子为 λ 。

2 结果与讨论

2.1 液滴撞击倾斜表面的动力学现象

图 4 所示为液滴撞击不同倾角的亲水表面、超疏水表面的动态过程。可以看出,表面润湿性和表面倾角不同会造成液滴出现不同的动力学行为。在亲水表面上,液滴经历了铺展、振荡和冻结 3 个阶段。在 0° 和 30° 的亲水表面,水滴在 0.97 ms 开始铺展并在 5.14 ms 铺展至最大,呈“薄饼状”。然后, 0° 表面上的水滴在表面张力作用下发生振荡,最终冻结在表面

上。30°表面上的液滴在切向速度作用下沿壁面向下滑动。由于分子间作用力及冷壁面的黏滞效应,液滴后沿比前沿部分滑动更快导致水滴在前沿部分汇聚(9.17 ms),呈“蝌蚪状”。然后,中间部分的液滴沿着表面向前和向后循环运动(9.17~14.72 ms)。最终,液滴冻结在表面上。随着倾角增至60°,液滴开始经历了与30°表面相似的运动过程,不同的是液滴的前沿部分会在停止前继续滑移一段距离并在停止后向上反冲造成液膜断裂,最终形成2个次液滴冻结在表面上。

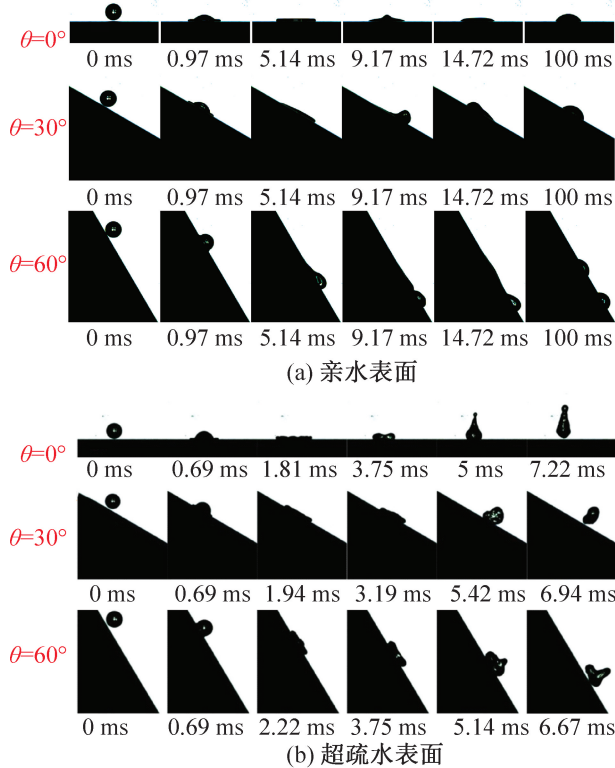


图4 液滴撞击不同倾斜表面的动力学过程 ($T_s = -15\text{ }^\circ\text{C}$)

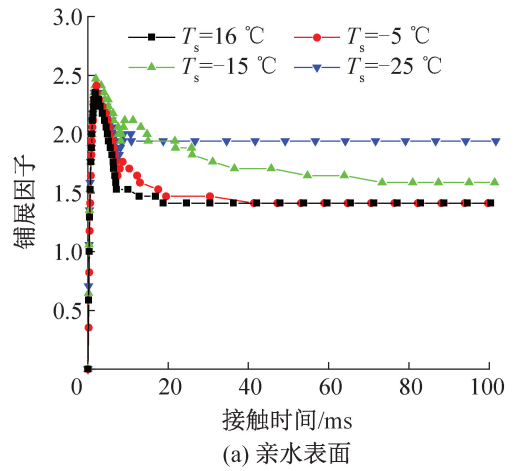
Fig.4 Dynamics of droplet impact on different inclined surfaces ($T_s = -15\text{ }^\circ\text{C}$)

在超疏水表面上,液滴经历了铺展、回缩和反弹3个阶段,并未冻结在表面上。对于0°超疏水表面,液滴在整个撞击过程中基本保持对称性,最终以“保龄球”状从表面反弹并且在颈部会形成次级液滴(5 ms)。随着倾角增大,液滴从表面弹离所需的时间逐渐减少,液滴在撞击过程中的对称性在回缩和反弹阶段也被打破,次级液滴的形成受到了抑制。原因在于撞击液滴最初在法向速度作用下向四周同性铺展,但随着液滴回缩而变得各向异性。当横向方向上的液体开始收缩时,切向方向上的液体由于切向速度继续铺展。当横向方向上的液体收缩完成时,液滴就会沿着切线方向以拉长的形状离开表面从而打破其

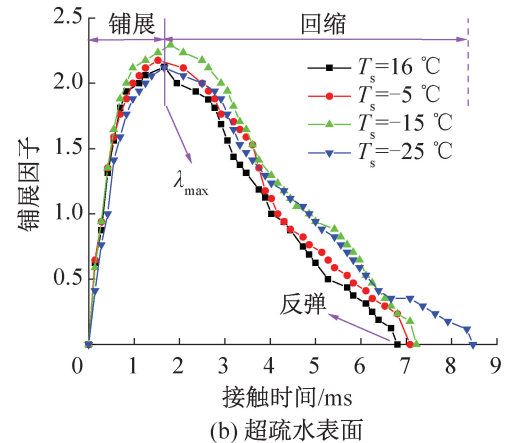
对称性。同时,法向速度分量随着倾角的增加而减少,液滴在回缩过程中转换的表面能减少使得液滴自由液面流动减慢从而抑制了次级液滴的形成。

2.2 不同温度下倾角对液滴铺展因子的影响

不同温度下0°亲水表面和超疏水表面上液滴铺展因子随时间的变化如图5所示。对于亲水表面,液滴铺展因子先增至最大值,然后逐渐减小趋于稳定,随着温度降低,液滴在回缩过程中冻结越快,即稳定时的铺展因子就越大。但液滴最大铺展因子在表面温度降至-15 °C以前随着温度的降低而增加,原因是随着壁面温度的降低,液滴温度相对冷表面温度升高造成液滴表面张力变小,增加了其铺展程度。当温度继续降至-25 °C,液滴逐渐冻结导致局部固化减小了最大铺展因子。对于超疏水表面,液滴铺展因子先增大后减小至0。最大铺展因子随温度的变化趋势与亲水表面相同,原因也相同。由于超疏水表面具有大接触角且表面上的微结构可以捕捉空气形成“气穴”降低传热效率,所以液滴不会在表面上冻结,但随着温度的降低,液滴会与表面进行热量传递导致其黏度



(a) 亲水表面



(b) 超疏水表面

图5 不同温度下0°表面上液滴铺展因子随时间的变化
Fig.5 Variation of droplet spreading factor with time on 0° surfaces at different temperatures

和表面张力发生改变,作用于液滴上的各种力之间的比率也会随之发生改变^[20],当冷表面温度降至 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$,受液滴与冷表面黏滞效应增加的影响,液滴在冷表面上的最大铺展被抑制且从冷表面弹离所需的时间被延长。

图 6 所示为不同温度下水滴在倾角为 30° 和 60° 的亲水表面和超疏水表面上前后铺展因子随接触时间的变化。无论是亲水表面还是超疏水表面,随着倾角增大,液滴前后铺展因子均增大。对于 30° 的亲水表面,液滴铺展因子的变化规律与 0° 表面相同,即液滴前后铺展因子随着时间变化先增加后减小,然后逐渐趋于稳定。液滴稳定后的前铺展因子随着温度的升高而增大 ($T_s > -15\text{ }^{\circ}\text{C}$),后铺展因子也具有同样的规律。因后铺展因子为负值,液滴的总铺展因子 λ 表示为前后铺展因子之差。当 $T_s \geq -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,液滴稳定后的总铺展因子 λ 基本不变,而 $T_s = -25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的 λ 明显大于其它温度表面的 λ ,这是由于此温度下斜面上部的水滴被更早地冻结造成的。当倾角增至 60° 时,液滴前铺展因子随着时间增大而增加,然后直接趋于稳定。后铺展因子在低温下与 30° 表面变化趋势相同。常温下,由于液滴在速度切向分量作用下沿切面滑动,所以液滴后铺展因子一直增大直到液滴稳定后保持不变。表面温度对稳定后的液滴前后铺展因子的影响呈现出相同的变化规律,均随着温度的降低而减小,液滴总铺展因子则随温度的降低而增大。相比于 30° 亲水表面, 60° 亲水表面稳定后的前后铺展因子更大,前沿点和后沿点的位移远大于 30° 亲水表面。

对于倾角为 30° 的超疏水表面,前铺展因子随接触时间的增加而增大,后铺展因子随着时间推移逐步增大从负值为正值。对于 $T_s \geq -25\text{ }^{\circ}\text{C}$,后扩展因子随着温度的降低而逐渐减小,前铺展因子受温度影响较小,基本保持不变。当倾角增至 60° 时,液滴前后铺展因子变化规律与 30° 表面基本相同,即液滴前铺展因子随时间持续增大,后铺展因子则是先减小后增大。区别是液滴前后铺展因子在铺展开始时均小于 0。此外,液滴前铺展因子几乎不受表面温度的影响,而后铺展因子的铺展速率随着表面温度的降低逐渐变慢,这是由于液滴冻结成核速率增加,水滴和表面之间的黏附限制了液滴的铺展。值得注意的是,由图 6(c) 可知, 30° 超疏水表面上液滴撞击 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷表面的后铺展因子变化趋势分别与撞击 $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷表面的后铺展因子变化趋势大致相同,而当倾角增大 60° 时,液滴撞击 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷表面的后铺展因子变化趋势则与 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冷表面上的液滴后铺展

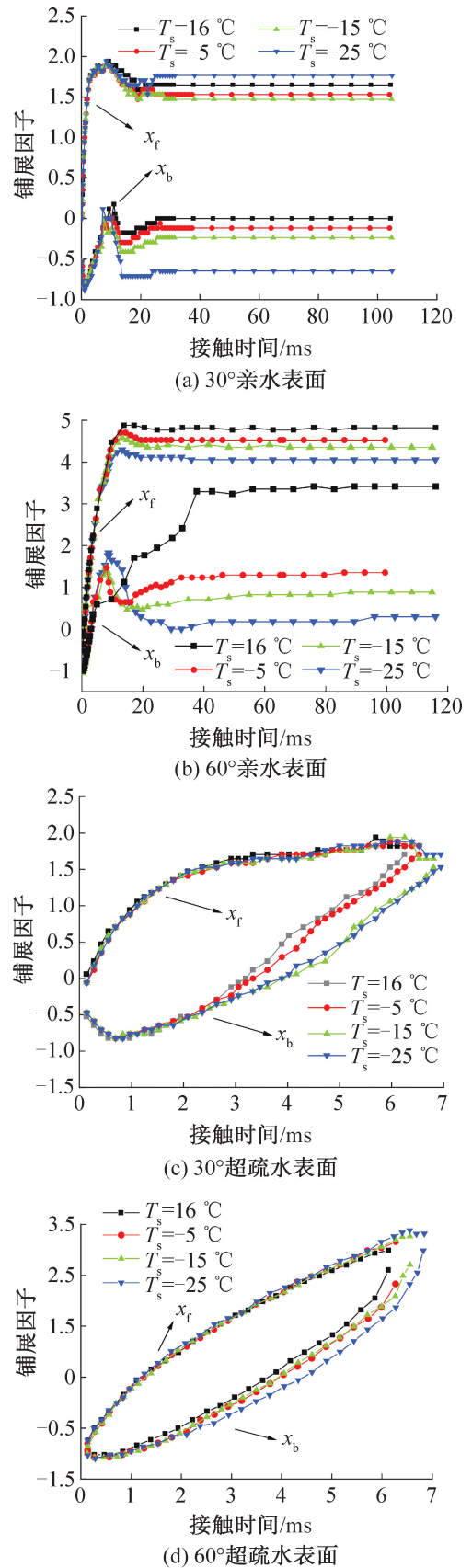


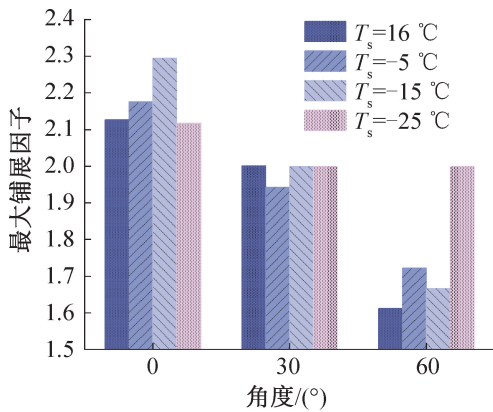
图 6 不同温度下 30° 和 60° 表面上液滴铺展因子随时间的变化

Fig.6 Variation of droplet spreading factor with time on 30° and 60° surfaces at different temperatures

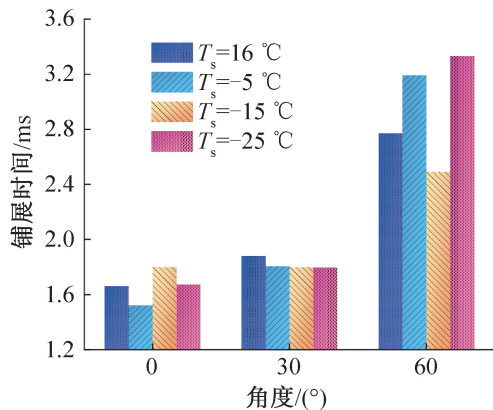
因子变化趋势大致相同且不同于 16 °C 和 -25 °C, 因此液滴后铺展因子随温度的变化情况受倾角影响较大。

2.3 液滴最大铺展因子和铺展时间随倾角的变化

减少液滴与表面的铺展面积, 缩短液滴与表面的接触时间可以减少液滴与冷表面之间的能量交换, 对于增强表面的防冰性能非常重要^[21]。图 7 和图 8 统计了液滴撞击超疏水表面和亲水表面的最大铺展因子及达到最大铺展所需的时间。可以看出, 液滴铺展时间在超疏水表面和亲水表面上具有相同的变化趋势, 均随着倾角的增大而增加。最大铺展因子变化则不同, 超疏水表面上液滴最大铺展因子随着倾角的增加而减小, 特别是当 $T_s > -25$ °C 时; 亲水表面上液滴最大铺展因子随倾角的增大而增加。对于超疏水表面, 液滴在撞击后滑动, 需要考虑切向动能。超疏水表面有很强的疏水能力, 使液滴更容易弹离表面。相比于切向速度, 法向速度占据了主导地位, 随着倾角



(a) 超疏水表面最大铺展因子

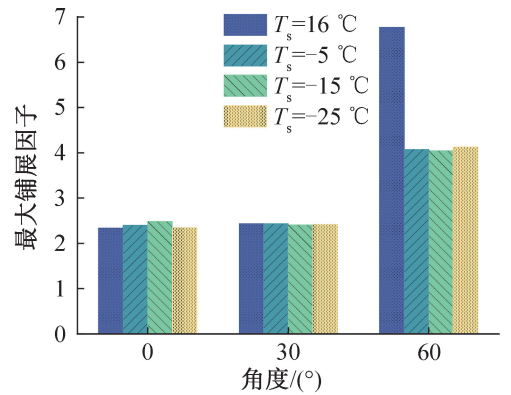


(b) 超疏水表面铺展时间

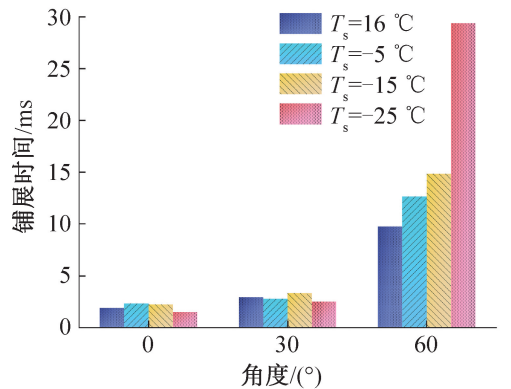
图 7 超疏水表面液滴最大铺展因子和铺展时间随倾角的变化

Fig.7 Variation of maximum spreading factor and spreading time of droplets on superhydrophobic surface with inclination angle

的增加, 法向速度逐渐减小, 液滴最大铺展因子随之变小, 液滴铺展到最大值所需的时间增加。对于亲水表面, 倾角增大导致了切向动能的增大, 使液滴更容易铺展。在液滴碰撞过程中, 液滴在亲水表面上比在超疏水表面上具有更长的铺展时间, 最长可以达到约 10 倍。此外, 纵向来看, 无论是超疏水表面还是亲水表面, 其最大铺展因子和铺展时间随着温度的降低受到倾角的影响程度变大。



(a) 亲水表面最大铺展因子



(b) 亲水表面铺展时间

图 8 亲水表面液滴最大铺展因子和铺展时间随倾角的变化

Fig.8 Variation of maximum spreading factor and spreading time of droplets on hydrophilic surface with inclination angle

2.4 不同温度下倾角对液滴接触时间的影响

图 9 所示为在不同表面温度下液滴撞击超疏水表面接触时间随倾角的变化, 由于液滴撞击低温亲水表面发生冻结, 所以并未统计其接触时间。可以看出, 表面温度和倾角均对接触时间影响显著: 当表面温度相同时, 液滴接触时间随着倾角的增加而减少; 当倾角相同时, 较低的表面温度会增强界面处的黏附性从而增加液滴从表面弹离的时间, 前文已经提到液滴撞击超疏水表面的铺展时间随着倾角的增大而增加, 而接触时间随着倾角的增大而减小, 由此推断, 增大表面倾角会减少液滴接触时间实际上减少的是水

滴的回缩时间。此外,接触时间与法向速度无关,主要受切向速度影响,增加倾角有利于液滴更早地离开表面,从而起到防除冰作用。例如,对于 $T_s = -25\text{ }^\circ\text{C}$, 当倾角从 0° 增至 60° 时,接触时间从 8.472 ms 降至 6.944 ms ,说明倾角的增加可有效抑制水滴冻结。

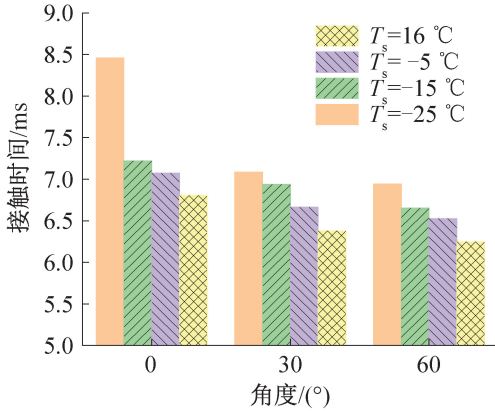


图9 液滴撞击超疏水表面的接触时间
Fig.9 Contact time of a droplet impacting a superhydrophobic surface

3 结论

本文通过实验对不同温度 ($-25\sim 16\text{ }^\circ\text{C}$)、不同倾角 ($0\sim 60^\circ$) 以及不同润湿性表面 (亲水、超疏水表面) 上撞击液滴的动力学行为进行了研究,分析了表面温度和倾角对液滴撞击不同润湿性表面的液滴形态、铺展因子、铺展时间和接触时间的影响,得到结论如下:

1) 由于倾角和润湿性不同,液滴撞击亲水表面和超疏水表面表现出不同的动力学行为,主要差异体现在回缩和反弹阶段。

2) 对于亲水表面,液滴前后铺展因子、最大铺展因子及铺展时间均随着表面倾角的增加而增大。液滴前后铺展因子受表面温度的影响相同,即随着温度的升高而增大。液滴稳定后的总铺展因子受温度的影响与倾角有很大关系:当 $\theta = 30^\circ$, $T_s \geq -15\text{ }^\circ\text{C}$ 时,总铺展因子 λ 基本不变,随着表面温度增至 $-25\text{ }^\circ\text{C}$, λ 随之增大;当 $\theta = 60^\circ$ 时,液滴总铺展因子则随温度的降低而增大。

3) 对于超疏水表面,液滴前后铺展因子和铺展时间的变化与亲水表面呈现相同的变化趋势,即随着表面倾角的增加而增大。最大铺展因子随着倾角的增加而减小,特别是当 $T_s > -25\text{ }^\circ\text{C}$ 时。此外,当倾角变化时,液滴后铺展因子受 T_s 影响较大,液滴前铺展因子几乎不受影响。

4) 受壁面润湿性和倾角等影响,相比于亲水表

面,液滴撞击超疏水表面具有更短的铺展时间,在 $T_s = -25\text{ }^\circ\text{C}$ 时可以达到约 10 倍。增大壁面倾角可以打破液滴在水平超疏水表面上的对称反弹,缩短液滴接触时间,加快液滴弹离,可有效抑制撞击液滴的冻结。

本文受河南省科技攻关计划 (232102241014);河南省高等学校重点科研项目 (22A470002) 和河南理工大学博士基金项目 (B2021-37) 资助。(The project was supported by the Science and Technology Research Project of Henan Province (No. 232102241014), the Key Scientific Research Project of Henan Province Colleges and Universities (No. 22A470002) and Doctoral Fund Project of Henan Polytechnic University (No. B2021-37).)

参考文献

[1] ZHOU Chaohui, ZARRELLA A, YAO Yang, et al. Analysis of the effect of icing on the thermal behavior of helical coil heat exchangers in surface water heat pump applications[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 183: 122074.

[2] 刘骁. 液滴撞击超疏水冷表面的行为特征及抑冰机制研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2018. (LIU Xiao. Study on behavior characteristics and ice suppression mechanism of droplets impacting on super-hydrophobic cold surface[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2018.)

[3] XU Feng, LI Danyu, GAO Peng, et al. Numerical simulation of two-dimensional transmission line icing and analysis of factors that influence icing [J]. Journal of Fluids and Structures, 2023, 118: 103858.

[4] HUANG Wei, HUANG Jinxia, GUO Zhiguang, et al. Icephobic/anti-icing properties of superhydrophobic surfaces[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2022, 304: 102658.

[5] 隋冬雨, 金哲岩, 杨志刚. 冷表面上水滴结冰问题的实验研究进展[J]. 制冷学报, 2015, 36(2): 14-20. (SUI Dongyu, JIN Zheyang, YANG Zhigang. Experimental progress of water droplet freezing on cold surface [J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(2): 14-20.)

[6] LIU Xiaolin, CHEN Huawei, ZHAO Zehui, et al. Self-jumping mechanism of melting frost on superhydrophobic surfaces[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 14722.

[7] BENGALURU SUBRAMANYAM S, KONDRASHOV V, RÜHE J, et al. Low ice adhesion on nano-textured superhydrophobic surfaces under supersaturated conditions [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(20): 12583-12587.

[8] WANG Heng, WU Qian, OKAGAKI J, et al. Bouncing behavior of a water droplet on a super-hydrophobic surface

- near freezing temperatures [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 174: 121304.
- [9] HUANG Liu, SONG Jinlong, WANG Xuyue, et al. Soft elastic superhydrophobic cotton: a new material for contact time reduction in droplet bouncing [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 347: 420–426.
- [10] DU Jiayu, LI Yanzhi, WU Xinxin, et al. Steerable directional bouncing and contact time reduction of impacting droplets on superhydrophobic stepped surfaces [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 629: 1032–1044.
- [11] 姚一娜, 刘呈, 李聪, 等. 液滴撞击超疏水冷表面的反弹/黏附特性对比研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2021, 17(1): 31–35. (YAO Yina, LIU Cheng, LI Cong, et al. Comparative study on rebound/adhesion characteristics of droplets impacting superhydrophobic cold surface [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2021, 17(1): 31–35.)
- [12] TAI Yaolin, XU Haijue, BAI Yuchuan, et al. Experimental investigation of the impact of viscous droplets on superamphiphobic surfaces [J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(2): 022101.
- [13] FANG Wenzhen, ZHU Fangqi, SHEN Faquan, et al. Freezing behaviors of impacting water droplets on cold inclined surfaces [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 219: 119562.
- [14] JIN Zheyang, SUI Dongyu, YANG Zhigang. The impact, freezing, and melting processes of a water droplet on an inclined cold surface [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 90: 439–453.
- [15] SHEN Faquan, FANG Wenzhen, ZHU Fangqi, et al. Freezing behaviors of an impacting droplet on subcooled hydrophobic surfaces [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236: 121535.
- [16] JIN Zheyang, ZHANG Huanhuan, YANG Zhigang. The impact and freezing processes of a water droplet on a cold surface with different inclined angles [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 103: 886–893.
- [17] WANG Kaimin, LIU Jiawei, YANG Xiaowei, et al. Experimental study on the droplet dynamics after impacting an inclined superhydrophobic surface [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 675: 132016.
- [18] WANG Hao, LIU Cong, ZHAN Haiyang, et al. Droplet asymmetric bouncing on inclined superhydrophobic surfaces [J]. *ACS Omega*, 2019, 4(7): 12238–12243.
- [19] ZHENG Haikun, CHANG Shinan, MA Guojia, et al. Anti-icing performance of superhydrophobic surface fabricated by femtosecond laser composited dual-layers coating [J]. *Energy and Buildings*, 2020, 223: 110175.
- [20] 高淑蓉, 金佳鑫, 魏博建, 等. 液滴撞击疏水/超疏水表面防结冰技术研究进展及未来展望 [J]. *化工学报*, 2021, 72(8): 3946–3957. (GAO Shurong, JIN Jiabin, WEI Bojian, et al. Research progress and future prospects of anti-/de-icing technology for droplets impact on hydrophobic/superhydrophobic surfaces [J]. *CIESC Journal*, 2021, 72(8): 3946–3957.)
- [21] GAO Shurong, WEI Bojian, JIN Jiabin, et al. Contact time of a droplet impacting hydrophobic surfaces [J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34(6): 067104.

通信作者简介

郑海坤, 男, 讲师, 河南理工大学机械与动力工程学院, 18810344608, E-mail: hkzheng@hpu.edu.cn。研究方向: 结冰结霜与抑霜抑冰、强化换热、制冷及低温技术在工商业制冷及航空航天领域的应用。

About the corresponding author

Zheng Haikun, male, lecturer, College of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, 86–18810344608, E-mail: hkzheng@hpu.edu.cn. Research fields: the application of ice/frost formation and ice/frost suppression, enhanced heat transfer, refrigeration, and low-temperature technology in the fields of industrial, commercial refrigeration, and aerospace.