

双疏水表面润湿和传热动力学研究

齐文亮¹, 刘琦², 赵海洋³

- (1. 中国航空工业集团公司西安航空计算技术研究所, 西安 710068;
2. 中国空气动力研究与发展中心空气动力学国家重点实验室, 绵阳 621000;
3. 中国航空工业空气动力研究院, 哈尔滨 150001)

摘要: 为实现润湿图案化的超疏水表面在航空电子设备散热中的应用, 本文对液滴撞击双疏水表面(具有疏水性图案的超疏水基质)的润湿行为和传热特性进行了分析. 通过使用高速相机和红外相机, 我们获取了液滴铺展和回退阶段的动力学以及表面温度和热流量的相应空间分布. 本文研究了液滴撞击超疏水、疏水和双疏水表面上的动态润湿和局部传热的差异. 此外, 本文还分析了表面温度和撞击高度对液滴撞击过程的影响. 结果表明, 所有表面在铺展阶段都具有相同的润湿特性和相似的传热行为. 表面温度变化并不能对铺展阶段表面润湿特性产生较大的影响, 液滴铺展时间与表面温度和撞击高度无关. 在回退阶段, 表面润湿特性的差异使得三个表面之间的传热特性明显不同. 双疏水表面特殊润湿特性使得回退阶段液膜的接触线速度存在跳变现象, 形成了许多小液滴, 增加了接触面积, 同时又兼具了超疏水表面的回弹特性.

关键词: 超疏水; 疏水; 双疏水; 润湿动力; 传热特性

中图分类号: TK4111 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2022.014005

Investigation of the wetting dynamic and heat transfer of bi-phobic surface

QI Wen-Liang¹, LIU Qi², ZHAO Hai-Yang³

- (1. Aeronautics Computing Technique Research Institute, AVIC, Xi'an 710068, China;
2. State Key Laboratory of Aerodynamics, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China;
3. AVIC Aerodynamics Research Institute, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to realize the application of wettability-patterned superhydrophobic surfaces in avionics cooling, the dynamic wetting behavior and heat transfer characteristics of droplets impact on bi-phobic surface (superhydrophobic matrix with hydrophobic patterns) are analyzed. The dynamics of droplets spreading and receding phases, and the corresponding spatial distribution of the surface temperature and heat flux beneath the impact droplet, are acquired by using high speed camera and infrared camera, respectively. We analyze the discrepancies of dynamic wetting and local heat transfer during single droplet impingement onto superhydrophobic, hydrophobic and bi-phobic surfaces. Furthermore, the influences of surface temperature and impact height on droplet impact process are also analyzed. The results show that all surfaces have the same wetting behavior and similar heat transfer characteristics, surface temperature has little effect on the surface wetting behavior. Furthermore, the spreading time has noth-

收稿日期: 2021-07-25

基金项目: 国家留学基金委项目

作者简介: 齐文亮(1988—), 男, 吉林延边人, 博士, 研究方向为航空电子设备散热. E-mail: wlqi_avic@163.com

ing to do with surface temperature and impact height in spreading process. Due to the difference of wetting behavior, the heat transfer characteristics between the three surfaces are significantly different in receding process. The special wetting behavior of the bi-phobic surface makes the contact line velocity of the receding liquid film drastically change, produces some small droplets, increases the contact area in receding phase, and also has the resilience properties of superhydrophobic surface.

Keywords: Superhydrophobic; Hydrophobic; Bi-phobic; Wetting dynamic; Heat transfer characteristics

1 引言

超疏水表面具有自清洁、流体减阻、防水、防结冰以及防腐蚀等特性^[1]. 研究人员对水滴在超疏水表面上的动态变化行为进行了广泛的研究, 充分讨论了超疏水表面特性对液滴撞击过程的影响^[2-5]. 飞机表面易结冰部位设计成超疏水表面, 可以大幅度减轻对防/除冰技术的依赖程度, 进而提高飞机的燃油经济性^[6]. 疏水防冰微结构表面设计、超疏水壁面湍流边界层减阻机理等研究都为超疏水表面在飞机除冰的应用提供了理论基础, 进一步推进了超疏水表面在航空领域的应用发展^[7,8].

润湿图案化的超疏水表面存在两种或多种不同的润湿性区域(超疏水, 疏水, 亲水与超亲水), 能够实现定向液体传输、定向沉积以及局部增强的相变传热等, 实现所需的润湿特性并控制结冰、换热等行为, 在航空领域应用中显示出巨大的潜力^[9-11]. 例如, 通过使用疏水微柱图案的超疏水表面能够延缓局部结霜和随后的霜生长过程^[12], 这有利于飞机局部防冰设计; 超疏水表面上的亲水通道可以传输冷却液并实现局部空间的冷却控制, 同时增强了换热能力^[13], 为航空电子设备智能化冷却设计提供思路; 射流冷却与润湿图案化的超疏水表面的结合能够在少量冷却液供应情况下有效提高冷却效率^[14], 这为冷却资源有限、减重要求严格的航空电子设备的散热提供了新的选择. 尽管人们研究报道了润湿图案化的超疏水表面对液滴撞击过程的影响, 但大多数研究都集中于接触时间和表面特性^[15,16], 润湿图案化的超疏水表面的传热机理尚不清楚, 传热行为的研究有待开展.

本文使用高速相机拍摄液滴撞击双疏水表面(具有疏水模式的超疏水基质)的顺序图像和完整液滴轮廓来深入了解液滴撞击过程, 同时通过表面热流量的空间分布分析撞击过程中的热传递.

本文通过研究不同表面温度和撞击高度下双疏水表面的液滴润湿和传热行为, 探索液滴润湿表面的动力学与传热之间的关系, 为双疏水表面在航空电子设备局部空间选择性散热的应用提供了理论基础.

2 实验方法

2.1 加热器设计和表面处理

加热器设计以及相应的表面润湿性处理过程如图 1 所示. 加热器由三部分组成:(1) 最底层为 1.18 mm 厚的氟化钙玻璃;(2) 中间层为黑漆, 通过旋涂机均匀涂抹在氟化钙玻璃上, 轮廓仪测其厚度为 12 μm ;(3) 最上层为厚度 350 nm 的金属铬层, 通过物理气相沉积在黑漆顶部. 金属铬层上均匀喷涂超疏水试剂 Glaco 使得加热器上表面变为超疏水表面^[17]. 室温下水滴在超疏水表面的静态接触角约为 162°. 加热器在通风橱中干燥 24 h 后, 用铝片(中间有 36 个 0.8 mm 的直径圆孔)覆盖在表面进行紫外线照射. 105 min 后暴露区域的静态接触角约为 90°, 此时暴露区域变为疏水表面. 覆盖区域还具有超疏水表面特性, 接触角为 162°保持不变. 移除铝片后我们获得具有疏水模式的超疏水表面, 即双疏水表面. 表 1 为金属铬、黑漆和氟化钙玻璃的物性参数.

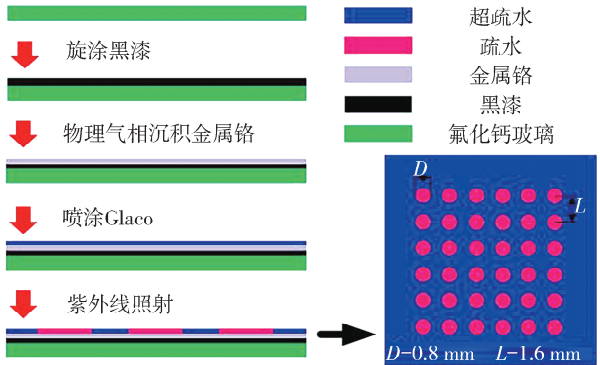


图 1 加热器和双疏水表面制作过程
Fig. 1 Schematic diagrams of heater and bi-phobic surface

表 1 热物性参数
Tab. 1 Thermo-physical parameters

材料	参数	数值
金属铬	密度/(kg/m ³)	7190
	热导率/(W/(m·K))	90.7
	比热容/(J/(kg·K))	448
黑漆	密度/(kg/m ³)	1231
	热导率/(W/(m·K))	0.095
	比热容/(J/(kg·K))	2835
氟化钙玻璃	热导率/(W/(m·K))	9.71

2.2 实验装置

实验装置的示意图如图 2 所示. 液滴的侧视图像是使用 Fastcam 高速相机和佳能 MP-E 65 mm f/2.8 1~5 倍微距镜头记录的, 其空间分辨率为 3.3 μm/像素, 10 000 帧/s. LED 灯为液滴阴影成像提供了足够的背景光. Telops 红外热像仪(分辨率为 30 μm/像素)以 5000 帧/s 的速度捕获加热器底部的温度分布. 使用连接有针头(直径为 0.16 mm)的注射泵来产生重力分离形成的撞击水滴(直径 2.23±0.05 mm), 水滴在加热器上方约 40±1 mm, 80±1 mm, 120±1 mm 的高度处. 液滴在重力作用下从针尖低落后撞击到室温下的加热表面(表面温度分别为: 45±0.5 °C, 60±0.5 °C 和 75±0.5 °C).

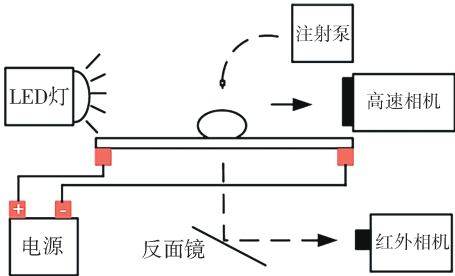


图 2 实验装置示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

2.3 传热分析

为了从双疏水表面温度分布获得热传递信息, 将瞬态能量平衡应用于每个红外像素^[17,18]. 每个红外像素的上表面对流热流量表示为:

$$q''_{\text{top}} = \frac{q_I}{A} - \frac{Q_{\text{store}}}{(\Delta t \cdot B)} - q''_{\text{side}} - q''_{\text{bottom}} \tag{1}$$

式中, q''_{top} 是每个像素上表面的热流量; q_I 是加热器中产生的焦耳热(公式 2); A 是加热面积; Q_{store} 是存储在像素中的热能(公式 3); Δt 是记录时间

间隔; B 为像素面积; q''_{side} 是与 4 个相邻像素之间的热传导(公式 4); q''_{bottom} 是通过氟化钙玻璃底部散失到环境中的热量(公式 5).

$$q_I = I^2 R \tag{2}$$

$$Q_{\text{store}} = B_{\text{pix}}^2 (\rho_{\text{Cr}} C_{\text{Cr}} \delta_{\text{Cr}} + \rho_{\text{Bp}} C_{\text{Bp}} \delta_{\text{Bp}}) \cdot (T_{x,y,\tau+1} - T_{x,y,\tau}) \tag{3}$$

$$q''_{\text{side}} = -(k_{\text{Cr}} \delta_{\text{Cr}} + k_{\text{Bp}} \delta_{\text{Bp}}) \left(\frac{\partial^2 T_{\text{S}}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{\text{S}}}{\partial y^2} \right) \tag{4}$$

$$q''_{\text{bottom}} = \left(\frac{1}{h_{\text{air}}} + \frac{\delta_{\text{CF}}}{k_{\text{CF}}} \right)^{-1} (T_{\text{S}} - T_{\text{air}}) \tag{5}$$

式中, I 为电流; R 为电阻; B_{pix} 为像素宽度; ρ 为密度; C 为比热容; δ 为厚度; T 为温度; k 为传热系数; h_{air} 为空气对流扩散系数; Cr 表示金属铬; Bp 表示黑漆; CF 表示氟化钙玻璃; air 表示空气.

2.4 数据分析与处理

本文中每个实验至少重复 3 次, 以确保结果的可重复性. 从高速相机图像比例我们得到液滴最大铺展半径并确定碰撞的时间. 已知红外相机参数, 从图像对应的时间我们得到不同时刻下热表面温度信息. 通过 Matlab 编写程序计算我们得到碰撞过程中热流密度变化情况. 用于热流量计算的所有表面温度均已通过公式校准, 此公式由红外热像仪测得的温度和热敏电偶测得的温度拟合得到. 热传导计算对输入温度场的空间信号噪声极其敏感, 本文公式(3)热传导计算仅采用 5 个不同的像素点, 容易产生噪声, 因此我们根据文献[19]的研究应用高斯滤波器对温度图像进行降噪处理, 最终计算的热流量误差大约为 5%~8%. 为了便于对比三种表面的实验数据, 分析三者的润湿和传热特征, 本文中表面平均温度、总热流量和总传热量分别采用公式(6)、公式(7)和公式(8)计算.

$$\bar{T}_{\text{S}} = \sum_{i=1}^{i=n} T_{\text{S},i} / n \tag{6}$$

$$q''_{\text{total}} = \sum_{i=1}^{i=n} q''_{\text{top},i} / n \tag{7}$$

$$Q(t) = \int_0^t q''_{\text{total}} A(t^*) dt^* \tag{8}$$

式中, n 为实验观测区域内的像素个数; $T_{\text{S},i}$ 为每个像素点的温度; $A(t^*)$ 为随时间变化的液滴接触面积.

3 实验结果及分析

图 3 所示为超疏水、疏水和双疏水表面从侧面观测液滴撞击过程的光学影像, 以及从底部观测的相应温度和计算出的局部热流量分布的图像.

液滴碰撞高度为 120 mm，表面温度为 75 ℃，图像中比例标尺为 0.8 mm。从图 3 可以清楚地看到，液滴铺展过程中的初始动态润湿部分对于所有表面没有明显不同，这主要源于此阶段液滴运动以惯性为主。撞击的液滴在三个表面散布形成最大面积的液膜后，只有超疏水表现液滴回缩并从表面反弹离开。在非常接近接触线区域，三个表面都会产生较高的温度梯度，从而得到较高的热流量，这与文献[20]观测的结果相同。在撞击后期，液滴从较小的接触区域加速离开超疏水表面，表面温度迅速升高。对于疏水表面，在铺展阶

段之后，液滴会散逸其能量并粘在表面上，冷却面积比其他表面大得多，热量传到液膜的时间也延长，因此表面温度降低得更多。对于双疏水表面，最大热流量不仅直接出现在接触线周围非常狭窄的区域，还出现在铺展阶段的疏水区域。在后退过程中，疏水区较高的润湿能力和较强的粘性耗散使得覆盖在其上的液膜动能被耗散，而超疏水区的液膜继续运动，从而导致疏水区与超疏水区不同的接触线速度，使得液膜破裂后在疏水区形成许多小卫星液滴。液滴的后退动态显然取决于表面的不同润湿特性。

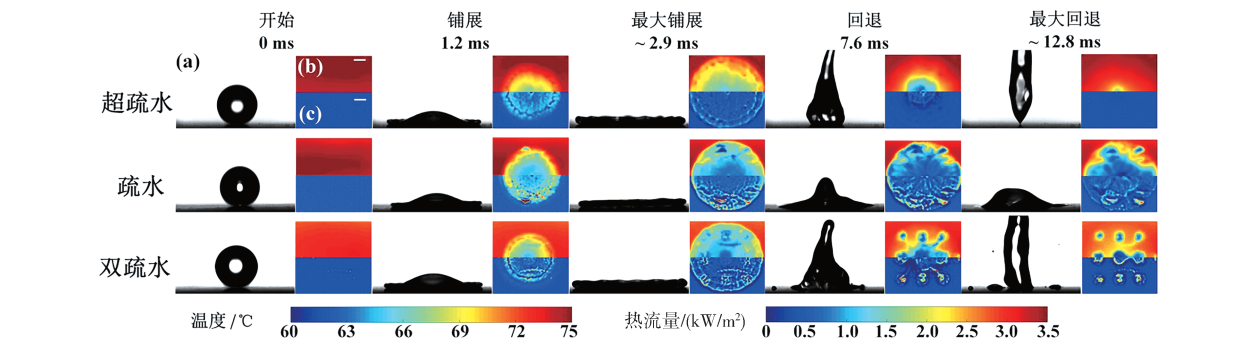


图 3 不同时刻下：(a) 液滴图像；(b) 表面温度分布；(c) 表面热流量分布

Fig. 3 (a) High-speed camera images of droplets, (b) corresponding temperature and (c) heat flux distributions at different time

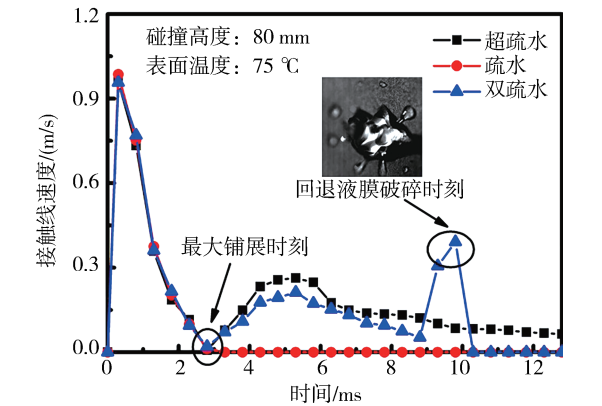


图 4 不同表面液滴接触线速度变化

Fig. 4 Transient behavior of contact line velocity for droplets with different surfaces

图 4 为不同表面液滴接触线速度变化的情况。特殊的润湿特性使得双疏水表面液滴的接触线速度变化不一致。因此，本文双疏水表面接触线速度按照经过疏水点的接触线速度计算。从图 4 可以看出，在铺展阶段，三个表面的接触线速度基本相同，这与文献[21]的实验结果相同；但是在回退阶段，三个表面之间的差异非常明显。在疏水表面，液滴铺展到最大面积后，液滴铺展成液膜并且不再回退，其接触线速度变为零。对于超

疏水，液滴铺展阶段存储的表面能转为动能，使得接触线反向运动，其速度迅速增加，达到峰值后逐渐减小。但是，双疏水表面上的液滴回退经过疏水点时，覆盖在疏水点的液膜部分动能被耗散，速度变小，而超疏水区的液膜继续运动，最后两部分液膜被扯开，接触线速度出现瞬间的跳变，随后迅速变为零。这主要与疏水和双疏水表面润湿特性不同有较大关系。本文其他实验工况下，双疏水表面都出现相同的接触线速度变化情况。

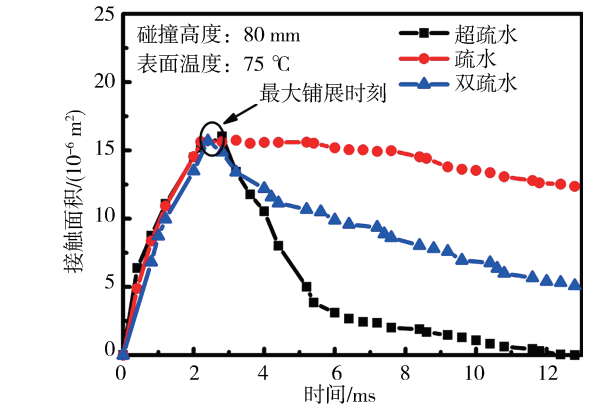


图 5 不同表面液滴接触面积变化

Fig. 5 Transient behavior of contact area for droplets with different surfaces

图 5 展示了液滴撞击三种表面时接触面积的瞬态行为. 与铺展阶段相比, 回退阶段液滴的接触面积差异很大. 在铺展到最大接触面积后, 超疏水表面液滴因受到液滴表面能和被压空气的作用逐渐回缩, 导致接触面积较小, 直至液滴完全弹起, 接触面积变为零. 这与液滴撞击疏水表面形成了鲜明对比, 疏水表面液滴保持固定在区域上, 接触面积大致恒定. 对于双疏水表面, 当液膜快速向内收缩时, 粘在疏水点上的部分液体被分离成一些较小的卫星液滴, 这就增加了双疏水表面的接触面积, 而超疏水区域液滴的其余部分继续收缩. 由于疏水点区域的能量耗散, 回退的部分液滴并不能像超疏水表面一样完全弹开, 因此在双疏水表面上形成了如图 4 所示的液柱.

表 2 为不同实验工况下不同表面的液滴最大铺展半径和对应的铺展时间. 从表 2 数据可以看出, 不同温度下三个表面最大铺展半径都在 2.6~2.8 mm 的范围内, 最大铺展时间仅相差 0.04 ms. 即表面温度升高, 每个表面的最大铺展半径和铺展时间都几乎相同, 这就表明表面温度对最大铺展半径和铺展时间的影响很小, 这与之前的研究^[21,22]非常一致. 由于液滴铺展是惯性主导的, 因此粘度和表面张力随温度的轻微变化不会影响其动力学, 表面润湿性的变化仅起次要作用. 此

结果与之前关于液滴在纹理和润湿性图案表面上的撞击和铺展的实验和数值结果^[23-25]非常一致. 实验结果表明, 在不同温度条件下, 所有表面在铺展阶段都具有相同的润湿特性. 本文所有实验样品都具有相同的表面纹理, 只是表面化学性质不同. 因此, 三个表面的最大铺展半径都随着液滴高度的增加而增加, 而最大铺展时间差异非常小, 这与文献^[26]的研究结果一致. 对比三个不同表面的实验结果可以得出, 在整个铺展阶段, 三个表面的润湿特性都相似, 表面温度并不能对表面润湿特性产生较大的影响, 铺展时间几乎与冲击高度无关, 也与表面温度无关.

表 2 不同表面的最大铺展半径和对应的时间

Tab. 2 Spreading radii and corresponding spreading time for different surfaces

实验条件		半径/mm, 时间/ms		
		超疏水	疏水	双疏水
80 mm	45 °C	2.76, 2.96	2.67, 2.98	2.63, 2.94
	60 °C	2.72, 2.96	2.62, 2.98	2.69, 2.94
	75 °C	2.74, 2.95	2.74, 2.96	2.68, 2.95
75 °C	40 mm	2.38, 2.93	2.32, 2.95	2.32, 2.95
	80 mm	2.74, 2.95	2.74, 2.96	2.68, 2.95
	120 mm	3.30, 2.96	3.27, 2.98	3.26, 2.97

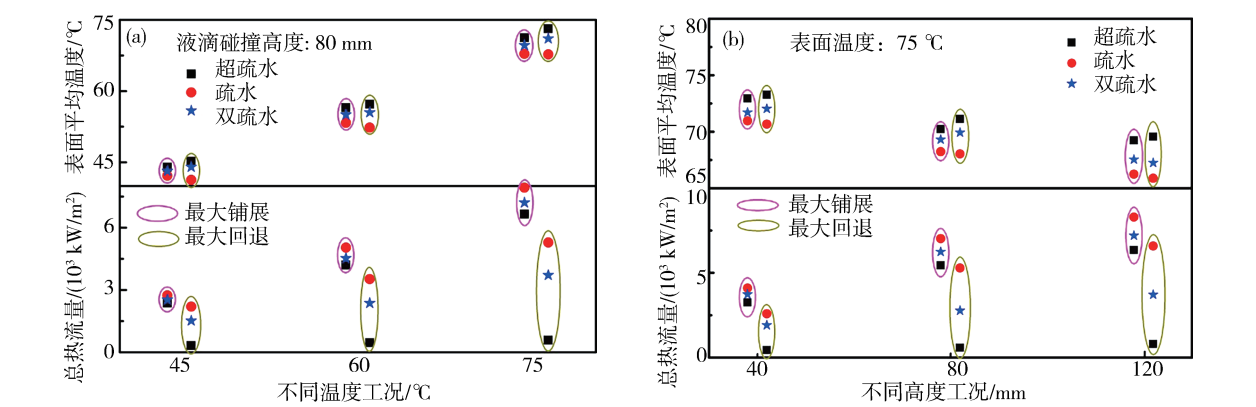


图 6 不同实验工况下表面平均温度和总热流量的变化

Fig. 6 Transient behaviors of average temperature and total heat flux for different experiment conditions

图 6 为不同实验工况下, 三种表面最大铺展和最大回退时刻表面平均温度和总热流量的变化情况. 上文的分析已经表明, 表面温度并不能对铺展阶段表面润湿特性产生较大的影响, 三种表面的铺展速度相同, 接触面积在最大铺展时刻几乎相同. 因此, 三种表面在最大铺展时刻的传热行为相似. 图 6a 的统计结果也证实了这个观点.

从图 6a 可以看出, 在不同表面温度下, 三种表面最大铺展时刻的表面平均温度、总热流量等结果之间相差很小. 但三种表面最大回退时刻的表面平均温度和总热流量, 都与最大铺展时刻有着较大的差异. 超疏水表面液滴完全弹开表面, 所以在最大回退时刻总热流量最小. 疏水表面液滴完全铺展开, 有足够的时间进行热交换, 因此表面平

均温度最低,总热流量最大.而双疏水表面有许多小卫星液滴,这些小液滴能够增加接触面积,因此,与超疏水表面相比,双疏水表面的换热效果更强.图 6b 为不同撞击高度下三种表面的瞬时换热情况.从图 6b 中数据可以得出以下两个结论:首先,随碰撞高度的增加,三个表面最大铺展和最大回退时刻的表面平均温度都降低,总热流量都增加.撞击高度增加,液体和表面之间传热的可用面积增加,因此撞击高度越高传热量越多.同时更高的撞击高度导致液膜更薄,这同样影响了表面的传热效果.其次,三个表面最大回退时

刻的传热特性差异随撞击高度的增加而逐渐增大.表 2 的数据表明碰撞高度的增加并不能影响三个表面最大铺展时刻的接触面积,同时整个铺展过程的接触时间相同,因此,三个表面在最大铺展时刻的传热特性相同.但回退阶段由于表面润湿特性的差异,使得不同碰撞高度下,三个表面存在的液体体积不同.高度越高疏水表面存在的液体越多,因此总热流量越大.尽管液滴撞击高度增加,但超疏水表面在回退阶段不会存在液滴,总热流量也就不会发生太大变化.

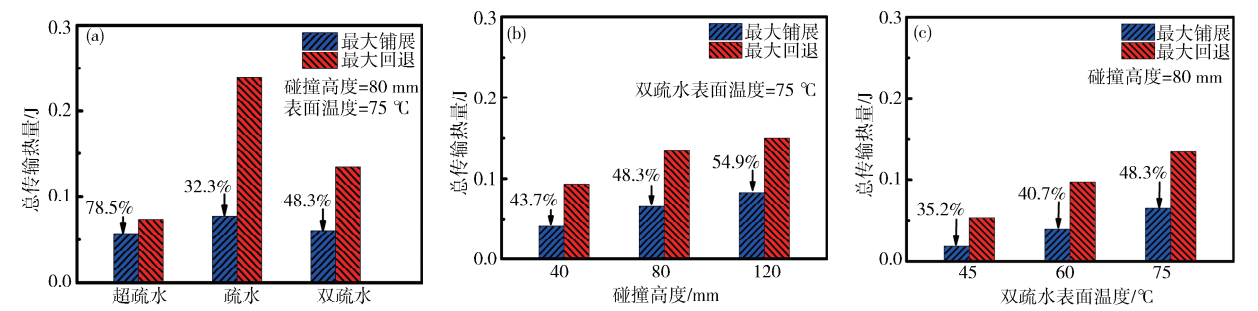


图 7 不同条件下传输的总热量变化

Fig. 7 Transient behaviors of total energy for surface under different conditions

从图 7 中可以清楚地看到不同实验条件下表面总传热量的变化,定量地显示了三个表面的总能量瞬态行为的较大差异.图 7a 为三个表面整个碰撞过程中的总传输热量对比.超疏水表面大约 78.5%的热量传递都发生在铺展阶段,而疏水和双疏水铺展阶段的热量传递只占整个碰撞过程能量传递的 32.3%和 48.3%.尽管超疏水铺展阶段的总传输热量占比较大,但数值上与疏水和双疏水表面大致相当.疏水和双疏水在回退阶段传输的热量都较多,尤其是疏水表面,其总传热量约为超疏水的 3 倍多.回退阶段由于表面特性的不同,液滴平铺在疏水表面,更多的热量用于稳态液滴的蒸发,而超疏水表面更多的热量发生于瞬态的热量传递,二者传热机理存在明显的不同.双疏水同时具有超疏水和疏水的特性,使其同时存在稳态蒸发和瞬态传热的双重传热机理,传热情况更加复杂.与超疏水表面相比,双疏水表面可以提高 1.5 倍的传热量.这主要源于双疏水表面的润湿特性导致一些小液滴留在表面上,从而导致更大的传热能量.从图 7b 可以看出,碰撞高度越高,双疏水表面的总传输热量越大,铺展阶段的传热占比越大.这主要与碰撞高度越高,液滴与双疏水表面有效接触面积越大,同时铺展的

液膜越薄越有利传热有关.但是在后退阶段,液滴向先前润湿的区域移动,这导致较低的热流量,因此总能量不会随着冲击高度的增加而增加太多.如预期的那样,图 7c 可以看出总能量随着表面温度的升高而增加,这是因为液体和表面之间进行热传递的热流量随表面温度升高而升高.

4 结 论

本文定量地给出了液滴撞击超疏水、疏水和双疏水表面润湿过程中的能量传递,对双疏水表面在航空领域中的理论与应用研究,尤其是在探索电子设备空间选择性冷却方面,具有一定的推动作用.此外,我们分析了表面温度和撞击高度对液滴撞击不同表面过程的影响.本文结论如下:

- (1) 三种表面在铺展阶段都具有相同的润湿特性,但润湿差异主要发生在回退阶段.双疏水表面的特殊润湿特性使得回退液膜产生了一些小液滴.
- (2) 三种表面液滴的接触面积在铺展阶段相同,但在回退阶段表现出完全不同的变化趋势;表面温度变化并不能对铺展阶段表面润湿特性产生较大的影响;液滴铺展时间几乎与冲击高度无关,也与表面温度无关.

(3) 三个表面在铺展阶段的传热行为相似, 最大铺展时刻的表面平均温度、总热流量等结果之间相差很小。在回退阶段, 由于表面润湿特性的差异, 使得三个表面之间的传热特性明显不同。

(4) 双疏水表面特殊润湿特性使得回退阶段液膜的接触线速度存在跳变现象, 形成了许多小液滴, 增加了接触面积, 同时又兼具了超疏水表面的回弹特性。通过控制表面润湿特性我们可以有效控制润湿行为和热量传递, 这为飞机紧凑型电子设备的空间选择性冷却提供了新的设计思路。

参考文献:

- [1] Jin M, Xing Q, Chen Z. A review: natural superhydrophobic surfaces and applications [J]. *J Biomater Nanobiotechnol*, 2020, 11: 110.
- [2] Khojasteh D, Kazerooni M, Salarian S, *et al.* Drop-let impact on superhydrophobic surfaces: a review of recent developments [J]. *J Ind Eng Chem*, 2016, 42: 1.
- [3] Shiri S, Bird J C. Heat exchange between a bouncing drop and a superhydrophobic substrate [J]. *Proc Natl Acad Sci* 2017, 114: 6930.
- [4] Guo C, Maynes D, Crockett J, *et al.* Heat transfer to bouncing droplets on superhydrophobic surfaces [J]. *Int J Heat Mass Transf*, 2019, 137: 857.
- [5] Bird J C, Dhiman R, Kwon H M, *et al.* Reducing the contact time of a bouncing drop [J]. *Nature*, 2013, 503: 385.
- [6] 刘森云, 沈一洲, 朱春玲, 等. 液滴撞击超疏水表面的能量耗散机制[J]. *航空学报*, 2017, 38: 91.
- [7] 王津, 杨辉, 王莉平, 等. 防冰疏水微结构表面的设计[J]. *航空学报*, 2017, 38: 40.
- [8] 王二丹, 田海平, 张静娴, 等. 超疏水壁面湍流边界层减阻机理的 TRPIV 实验[J]. *航空动力学报*, 2016, 31: 2870.
- [9] Sun J, Bao B, Jiang J, *et al.* Facile fabrication of a superhydrophilic-superhydrophobic patterned surface by inkjet printing a sacrificial layer on a superhydrophilic surface [J]. *RSC Adv*, 2016, 6: 31470.
- [10] Chen T, Liu H, Teng S, *et al.* Water transport control on a patterned superhydrophobic surface via laser direct writing [J]. *J Vac Sci Technol A*, 2016, 34: 61103.
- [11] Yu Z, Yun F F, Wang Y, *et al.* Desert beetle-inspired superwetable patterned surfaces for water harvesting [J]. *Small*, 2017, 13: 1701403.
- [12] Zhao Y, Wang R, Yang C. Interdroplet freezing wave propagation of condensation frosting on micropillar patterned superhydrophobic surfaces of varying pitches [J]. *Int J Heat Mass Tran*, 2017, 108: 1048.
- [13] Li H, Fang W, Li Y, *et al.* Spontaneous droplets gyrating via asymmetric self-splitting on heterogeneous surfaces [J]. *Nat Commun*, 2019, 10: 950.
- [14] Koukoravas T P, Ghosh A, Mahapatra P S, *et al.* Spatially-selective cooling by liquid jet impinging orthogonally on a wettability-patterned surface [J]. *Int J Heat Mass Tran*, 2016, 95: 142.
- [15] Gauthier A, Symon S, Clanet C, *et al.* Water impacting on superhydrophobic macrotextures [J]. *Nat Commun*, 2015, 6: 8001.
- [16] Lee M, Chang Y S, Kim H Y. Drop impact on microwetting patterned surfaces [J]. *Phys Fluids*, 2010, 22: 072101.
- [17] Gibbons M J, Marco P D, Robinson A J. Local heat transfer to an evaporating superhydrophobic droplet [J]. *Int J Heat Mass Tran*, 2018, 121: 641.
- [18] Gibbons M J, Marco P D, Robinson A J. Heat flux distribution beneath evaporating hydrophilic and superhydrophobic droplets [J]. *Int J Heat Mass Tran*, 2020, 148, 119093.
- [19] Sielaff A. Experimental investigation of single bubbles and bubble interactions in nucleate boiling [D]. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 2014.
- [20] Herbert S, Fischer S, Gambaryan-Roisman T, *et al.* Local heat transfer and phase change phenomena during single drop impingement on a hot surface [J]. *Int J Heat Mass Tran*, 2013, 61: 605.
- [21] Moon J H, Cho M, Lee S H. Dynamic contact angle and liquid displacement of a droplet impinging on heated textured surfaces [J]. *Exp Therm Fluid Sci*, 2019, 101: 128.
- [22] Moon J H, Cho M, Lee S H. Dynamic wetting and heat transfer characteristics of a liquid droplet impinging on heated textured surfaces [J]. *Int J Heat Mass Tran*, 2016, 97: 308.
- [23] Rioboo R, Marengo M, Tropea C. Time evolution of liquid drop impact onto solid, dry surfaces [J]. *Exp Fluids*, 2002, 33: 112.
- [24] Zhang R, Farokhirad S, Lee T, *et al.* Multiscale liquid drop impact on wettable and textured surfaces [J]. *Phys Fluids*, 2014, 26: 082003.
- [25] Li X, Ma X, Lan Z. Dynamic behavior of the wa-

terdroplet impact on a textured hydrophobic/super-hydrophobic surface; the effect of the remaining liquid film arising on the pillars' tops on the contact time [J]. Langmuir, 2010, 26: 4831.

droplets on different wettable surfaces; impact phenomena, the maximum spreading factor, spreading time and post-impact oscillation [J]. J Colloid Interf Sci, 2018, 516: 86.

[26] Lin S, Zhao B, Zou S, *et al.* Impact of viscous

引用本文格式:

中 文: 齐文亮, 刘琦, 赵海洋. 双疏水表面润湿和传热动力学研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2022, 59: 014005.

英 文: Qi W L, Liu Q, Zhao H Y. Investigation of the wetting dynamic and heat transfer of bi-phobic surface [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2022, 59: 014005.