

超滑表面防冰与疏冰机理研究

蒋静^{1,2}, 唐桂华^{1,2}

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安;
2. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为解决高湿度条件下超疏水表面防冰失效问题,提出了一种新型多孔超滑表面。基于自组装技术,提出新型超滑表面(HPO-SLIP)涂层表面制备方法,即通过构建超疏水粗糙多孔基底进而涂覆润滑油制备获得超滑表面,并对其润湿特性和微观形貌进行表征,最后对其防冰与疏冰特性进行实验研究。实验结果表明:与超疏水表面相比,超滑表面冷凝液滴孤立冻结,无“冰桥”扩展,结冰扩散速度慢;超滑表面与冷凝冻结液滴接触属于固-油-固接触模型,油膜动态迁移分布影响成核结冰;对于疏冰特性,超滑表面冰黏附剪切强度比亲水表面低一个数量级。综合分析发现,与亲水表面、超疏水纳米草表面、超疏水微纳复合表面相比,超滑表面具有最优的防冰传播特性与疏冰性能,可以有效减少冰积累量。

关键词: 防冰;疏冰;超滑表面;超疏水表面;冰桥

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202108014 **文章编号:** 0253-987X(2021)08-0111-08



OSID 码

Investigation on Anti-Icing and Icephobicity Mechanism of
HPO-SLIP Surface

JIANG Jing^{1,2}, TANG Guihua^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new hydrophobic slippery liquid-infused porous surface is proposed to solve the failure problem of the superhydrophobic surface for anti-icing under high humidity condition. A novel hydrophobic slippery liquid-infused porous (HPO-SLIP) coating fabrication method is proposed based on the self-assembly technology. The HPO-SLIP coating surface is prepared by constructing a rough porous superhydrophobic substrate and then coating with lubricating oil. The wetting characteristics and microstructure of the HPO-SLIP surface are characterized. Finally, the anti-icing and icephobicity characteristics of the HPO-SLIP surface are investigated experimentally. The experimental results and a comparison with the superhydrophobic surface show that the condensation droplets on the HPO-SLIP surface freeze in isolation without ice bridging, and the ice propagation velocity of HPO-SLIP surface is lower. The contact between HPO-SLIP surface and condensation freezing droplets belongs to the solid-oil-solid contact model, and the dynamic migration distribution of the oil film affects ice nucleation and freezing. For the ice phobic properties, the ice adhesion shear strength of the HPO-SLIP surface is one order of

magnitude lower than that of the hydrophilic surface. Compared with the hydrophilic surface, the superhydrophobic nano-grass surface and the superhydrophobic micro-nano composite surface, the HPO-SLIP surface has the highest anti-icing propagation and icephobicity performance, which can effectively reduce the ice accumulation.

Keywords: anti-icing; icephobicity; hydrophobic slippery liquid-infused porous surface; superhydrophobic surface; ice bridge

表面积冰影响输电线路、航天运输、风力涡轮、高速列车和冷却系统等正常运行,严重时会引起重大灾难事故,甚至威胁生命财产安全。常规的除冰除霜方法主要包括物理法(机械剥离、加热融化)^[1-2]和化学法(利用融雪剂等电解质溶液的依数性)^[3],其中物理法能耗高且实施难,化学法具有一定的污染且不环保。因此,基于表面改性原理,设计防冰材料实现被动防冰是目前防冰研究的主流且具有重要的理论意义和实用价值。为实现高效被动防冰防霜,众多研究者致力于超疏水表面防冰应用的研究探索。冰与亲水表面接触属于传统固-固接触模型,而冰与超疏水表面接触属于固-气-固接触模型,超疏水表面通过低表面能修饰及微纳粗糙结构构建获得,微纳粗糙结构中填充的空气充当“气垫”绝热层,实现“气膜隔离”,从而延缓结冰。近年来,超疏水表面在防冰领域得到广泛应用^[4-11],但在高湿度条件下超疏水表面会出现防冰失效问题^[12-13],以猪笼草为原型的超滑表面被提出^[14-17]。美国哈佛大学 Aizenberg 团队基于猪笼草利用瓶状叶光滑的叶边缘捕食昆虫的思路,于 2011 首次提出了液体灌注表面(LIS),而后又制备了易滑液体灌注多孔表面(SLIPS),即通过将润滑油灌注于微纳结构基底,制备动态油膜覆盖的超滑表面(ultra-slippy surfaces),如图 1 所示^[14-15]。超滑表面“油膜隔离”是基于基底微纳粗糙结构产生的毛细作用力,将润滑油锁定在粗糙结构间隙中,从而在粗糙结构基底表面形成动态润滑油膜层,不溶工质与超滑表面油膜接触界面属于液油接触界面,代替了传统的液-固接触界面,其具有极低的接触角滞后致使滑动液滴以较小角度滑动而不浸入基底粗糙结构间隙,从而降低黏附力与滑动阻力。对于具有近似较小接触角滞后特性的超滑表面和超疏水表面而言,与超疏水表面粗糙结构间隙填充的空气相比,超滑表面粗糙结构间隙中填充润滑油具有很强的自修复能力与压力稳定性。冰与超滑表面接触属于固-油-固接触模型,超滑表面具有极低的接触角滞后,从而降低冰黏附强度,实现“油膜隔离”,可以实现有效疏/除冰。

目前,较少见到关于超滑表面防冰微观实验研究与理论成核分析的公开报道。

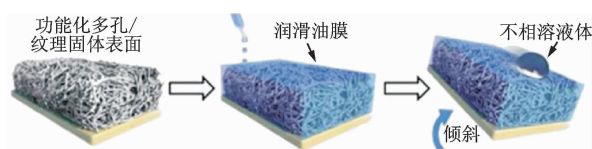


图1 超滑表面制备过程^[14-15]

Fig. 1 Fabrication process of ultra-slippy surface^[14-15]

本文提出了一种结构简单且适用于大规模加工的新型自组装超滑涂层表面制备方法,并对涂层表面开展防冰与疏冰实验研究,揭示了不同润湿特性表面冷凝冻结与防冰疏冰机制,可以为工程应用中减少冰霜积累量提供理论指导。

1 表面制备及表征

1.1 表面制备

P型硅片(尺寸 40 mm×40 mm,厚度(625±25) μm,晶向<1,0,0>)具有较好的亲水性,作为亲水表面(HPI)测试时只需将表面的有机物清除即可。超疏水表面(SHPO)制备通过低表面能修饰及表面粗糙化实现。对于超疏水微纳米复合表面(SHPO-MN),在含有掩膜版的硅基底快速刻蚀微米柱,然后采用改性 Bosch 深度反应离子刻蚀(DRIE)工艺在微米柱间制备均匀的纳米草。对于超疏水纳米草表面(SHPO-N),直接采用 DRIE 工艺制备均匀的纳米草。在 DRIE 刻蚀即将结束的时候,疏水性含氟聚合物薄膜沉积于微米柱与纳米草实现表面超疏水特性。

超滑表面 SHPO-SLIPS 的制备分为两步,即构建超疏水基底及表面涂覆润滑油,如图 2 所示,具体制备步骤为:①采用与亲水表面相同的清洗干燥步骤,去除硅片表面附着的有机物;②在清洗干燥后的硅片表面均匀喷涂商业涂层试剂(Glaco Mirror Coat “Zero”),这种试剂是含有硅纳米颗粒的乙醇悬浮液组成的气凝胶,待硅片液膜干燥后,放入真空干燥箱以 300 °C 恒温处理 90 min,经高温固化乙醇

挥发,即制备获得超疏水多孔基底,取出待用;③以 Krytox GPL105 为润滑油,在基底表面分散滴附全氟聚醚润滑油,采用氮气气流吹干,使润滑油均匀分布于基底表面,形成化学均一的润滑层,待实验测试。

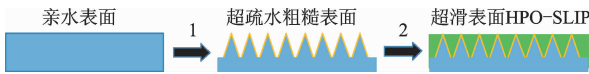


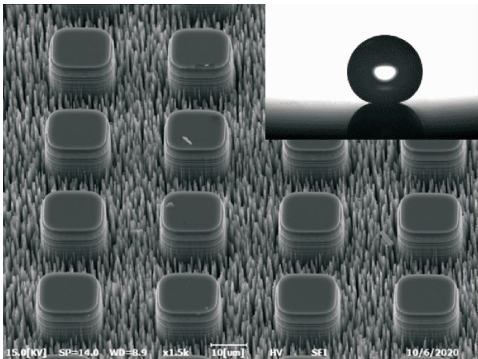
图 2 超滑表面制备工艺

Fig. 2 Fabrication process of HPO-SLIP surface

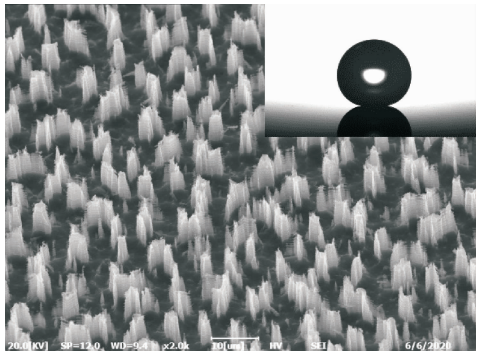
基于纳米液滴自组装与乙醇缓慢挥发,涂层形成纳米多孔结构,经高温热固化获得超疏水纳米多孔基底。超疏水多孔基底低表面能有利于润滑油在纳米多孔结构中扩散和存储。与微孔粗糙表面相比,纳米多孔粗糙表面提供了锁定润滑油的毛细力,形成更密集的突触点,能有效承受动态环境影响并增强稳定性。与传统复杂且昂贵的超滑表面基底的制备方法不同,本文提出的 HPO-SLIP 表面加工工艺相当简单,对基底无限制,且功能多样化,适合大规模工程应用。

1.2 表面润湿特性与微观形貌表征

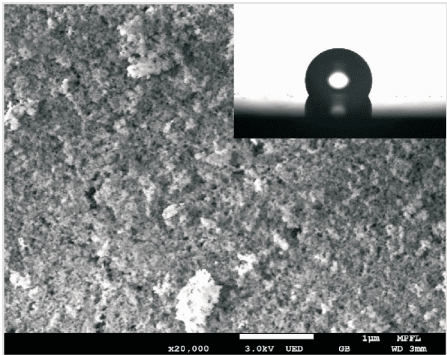
采用接触角测量仪 (Powereach JC2000D5, 中国)对具有不同润湿特性的亲水、超疏水微纳米复合、超疏水纳米草、超滑表面进行润湿特性表征。采用微量注射器吸取 5 μL 的去离子水,然后将去离子水液滴滴落至不同润湿特性的表面。为避免表面不均匀性引起测量过程中的测量误差,在同一测试表面随机选取 5 个点测量其接触角并取其平均值为最终测量结果。测量水滴在不同润湿特性表面接触角如图 3 所示,测得亲水表面、超疏水微纳米复合表面、超疏水纳米草表面、超滑表面的接触角分别为 $(42.8 \pm 0.9)^\circ$ 、 $(167.7 \pm 0.3)^\circ$ 、 $(168.3 \pm 0.1)^\circ$ 、 $(120.0 \pm 0.1)^\circ$ 。进一步采用接触角滞后表征表面黏附力,首先通过接触角测量仪微量注射器在待测表面产生标准液滴,然后以较低速度连续注入液滴,同时采集前进角并进行数据分析,当测量后退角时,



(b)超疏水微纳米复合表面



(c)超疏水纳米草表面



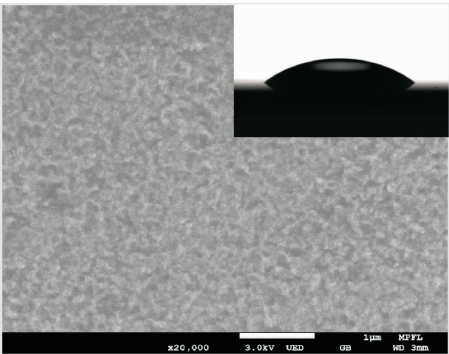
(d)超滑表面-超疏水基底

图 3 不同润湿特性表面接触角与微观形貌

Fig. 3 Contact angle and FE-SEM images of different wettability surfaces

采用注射泵执行抽吸动作,从液滴中缓慢抽水并记录图像。测得亲水、超疏水微纳米复合、超疏水纳米草、超滑表面的接触角滞后分别为 $(25.0 \pm 0.3)^\circ$ 、 $(4.0 \pm 0.2)^\circ$ 、 $(2.1 \pm 0.2)^\circ$ 、 $(1.9 \pm 0.1)^\circ$ 。

表面润滑特性调控可通过表面微观形貌实现,采用场发射扫描电镜 (JEOL 7800F, 日本)对亲水表面 (HPI)、超疏水纳米草表面 (SHPO-N)、微纳米复合超疏水表面 (SHPO-MN)、超滑表面 (HPO-SLIP) 基底微观形貌进行观测表征。场发射电子扫描显微镜扫描结果如图 3 所示,与亲水光滑表面相比,超疏



(a)亲水表面

水微纳米复合表面粗糙结构由长和宽均为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 、间距为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 、高度约为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的微米阵列柱与长和宽均约为 800 nm 、高度约 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的纳米草构成;超疏水纳米草表面粗糙结构由长和宽均约为 800 nm 、高度约 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的纳米草构成,超疏水微纳复合表面与超疏水纳米草表面的纳米草出现团聚现象;超滑表面的超疏水基底是商业涂层超疏水试剂经纳米液滴自组装与乙醇挥发后获得的由粒径约为 $50\sim 200\text{ nm}$ 的纳米颗粒团簇组成的多孔粗糙结构。

2 实验系统

2.1 被动防冰实验系统

图4为被动式防冰霜实验系统,其主要组成部分包括倒置式光学显微镜、热电制冷台、温度控制系统、冷却水循环系统和数据采集系统等。其中,热电制冷台是由温度控制系统、热电制冷片与水冷换热器组成的冷却装置。在被动防冰实验开始测试前,将各组成部件安装好并完成调试。在热电制冷片冷端安装被测试实验件,由温度控制器主要组成部件温度传感器监测被测试表面温度变化。基于换热原理,将水冷换热器与热电制冷片热端相连,利用流经水冷换热器的循环冷却去离子水对热电制冷片热端进行冷却,进一步采用风冷散热器对已被加热的流出换热器的去离子水进行冷却。为降低接触热阻,在热电制冷片热端与水冷散热器接触界面及热电制冷片冷端与被测试实验表面接触界面均匀涂抹热脂,热电制冷台由夹具进行有效固定。冷却水循环系统与热电制冷台基于温度控制器进行控温操作,其中采用 12 V 直流稳压电源为温控器供电。开启实验测试台前,在倒置光学显微镜(Leica CTR5500,德国)载物台上放置热电制冷台并进行有效固定,利用数据采集系统配套软件LASX进行实时监测与拍摄记录。实验环境中相对湿度由湿度仪监测,湿度变化通过调控加湿器实现。

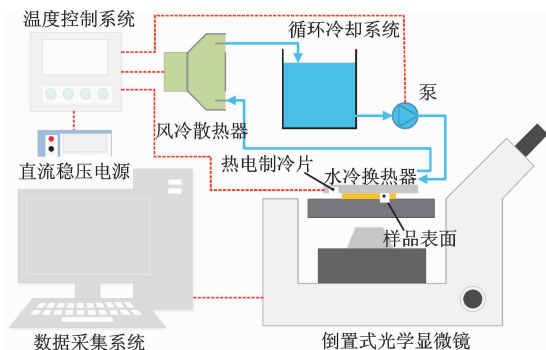


图4 实验系统图

度变化通过调控加湿器实现。

2.2 疏冰实验系统

冰黏附力是决定表面疏冰能力的关键参数,冰黏附力测试实验系统如图5所示,主要组成部件包括数字测力仪、热电制冷台、温度控制系统、循环冷却系统等。基于实验测试台测试冰层与试样表面的剪切作用力,冰层在试样表面的黏附强度 $\tau = F/A$,其中 F 为冰脱落时的瞬间剪切力, A 为冰层与试样表面接触面积。为避免表面不均匀性引起测量过程中的测量误差,在同一测试表面随机选取5个点测量其冰黏附强度并取平均值作为最终测量结果。

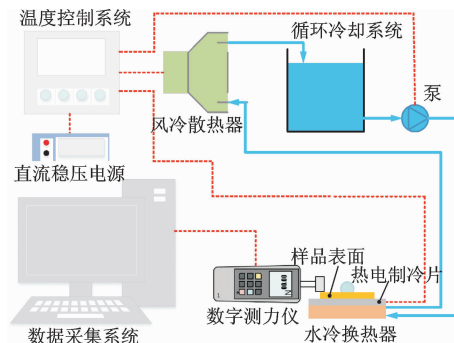


图5 冰黏附力测试系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the ice adhesion test system

3 实验结果分析

3.1 动态结冰过程分析

采用倒置光学显微镜采集不同润湿特性表面的微观冷凝冻结及霜层积累过程,进一步明晰润湿特性对冷凝冻结相变的影响机制。实验研究目标温度分别为 -5 、 -10 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$,实验环境温度为 $(26 \pm 1.0)\text{ }^{\circ}\text{C}$,环境相对湿度为 $(45 \pm 3.0)\%$,测试表面初始温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。根据壁面润湿特性的不同,冷凝冻结过程中会出现膜状冷凝模式或珠状冷凝模式,且涉及气-液、液-固、气-固、液-气相变。HPI、SHPO-MN、SHPO-N、HPO-SLIP 在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时冷凝结冰结霜动态过程如图6所示。研究发现,对于HPI,冷凝冻结过程分为两个阶段:一是膜状凝结阶段,由于亲水表面润湿性很强,液固界面接触角仅为 $(42.8 \pm 0.9)^{\circ}$,液固界面相互作用力很强,环境中的水蒸气以膜状形式凝结在过冷表面;二是冷凝液滴冻结生长及霜层积累阶段,冻结固相冰与亲水表面直接接触,属于传统的固-固接触模型,由于冷凝液滴从过冷表面散失的能量远大于从环境中获取的热量,冷凝液滴快速过冷冻结并继续生长,液滴完全冻结后气-固相变发生,并在冻结液滴上积累霜层。

Fig. 4 Schematic diagram of the experiment system

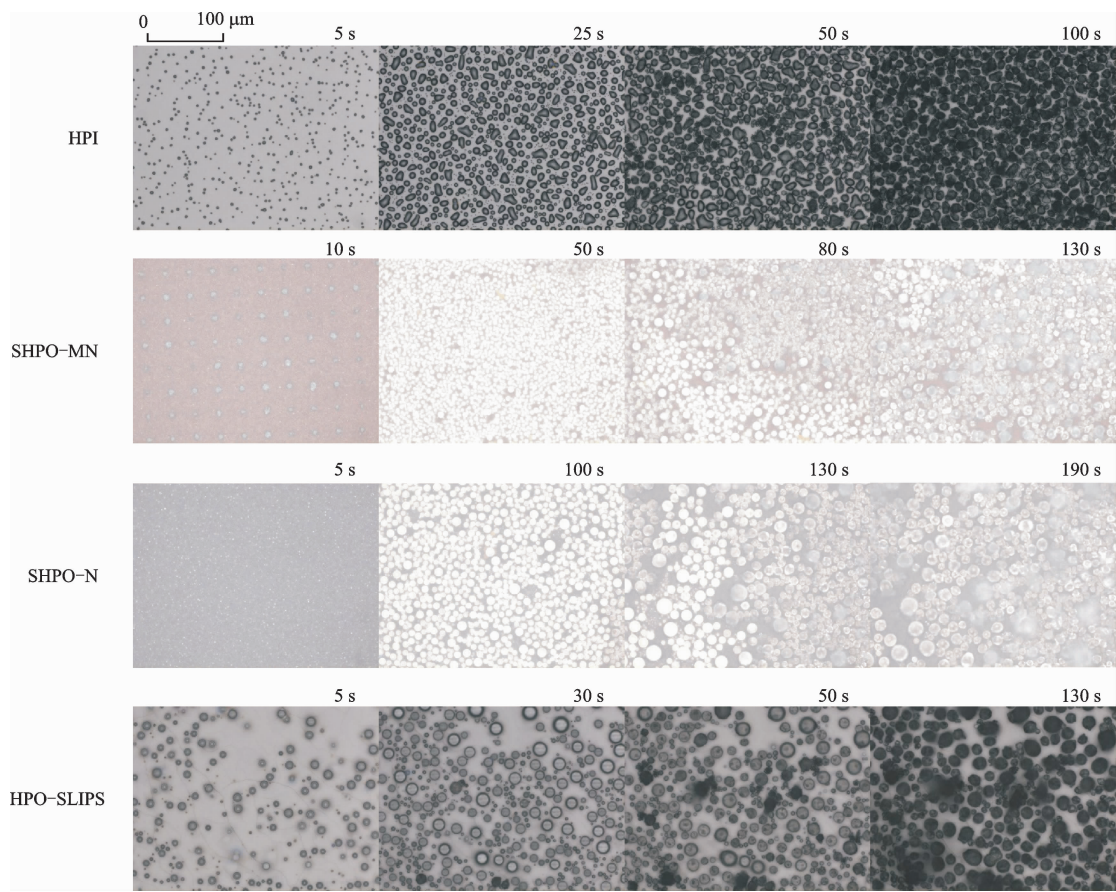


图 6 冷凝冻结微观动态过程

Fig. 6 The microscopic dynamic process of condensation icing

对于 SHPO-MN、SHPO-N,冷凝冻结过程分四个阶段:一是珠状冷凝阶段,冷凝液滴核化并分布在纳米草尖即表面高能点位置。根据经典成核理论,对于相变能垒公式 $\Delta G_c = \frac{16\pi(\sigma T_c)^3}{3(\Delta H_v \Delta T)^2} f(\theta)$,在相同温度下,接触角函数 $f(\theta)$ 越大,异相成核相变能垒 ΔG_c 越大,冷凝成核越困难,归因于液滴在亲水表面的润湿特性远大于超疏水表面,且亲水表面接触角函数远小于超疏水表面;二是冷凝液滴合并生长阶段,由于环境中水蒸气向已冷凝成核的液滴扩散使其不断生长,且相邻液滴因表面力作用聚合生长,致使液滴体积不断增大;三是冻结液滴以“冰桥”形式冻结传播阶段,由于表面修饰缺陷致使液滴按一定方向冻结传播,超疏水表面也可能因表面边缘缺陷、空气中灰尘等杂质引起液滴冻结结冰;四是冻结液滴继续生长与霜层积累阶段,蒸汽差驱动的对流扩散使环境中水蒸气在冻结液滴凝华成霜并不断积累。其中,在超疏水微纳米复合表面纳米柱顶端的冰微团比纳米草尖端的冰微团更大且按纳米柱阵列排布。对于 SHPO-MN 与 SHPO-N,冻结固相冰与

过冷表面非直接接触,超疏水表面微纳米粗糙结构间隙与纳米粗糙结构间隙都存在空气气膜,将传统的固-固接触模型转化为固-气-固接触模型,从而实现气膜绝热层隔离,进而延缓开始结冰时间。对于 HPO-SLIP,同样经历了珠状冷凝、液滴合并生长、液滴冻结传播、冻结液滴生长与霜层积累四个阶段。超滑表面冻结液滴与过冷表面非直接接触,超疏水基底表面纳米粗糙结构间隙被油膜浸润,将固-固接触模型转化为固-油-固接触模型,从而进行油膜隔离,以延缓结冰与降低冰黏附强度。本实验中超滑表面开始结冰时间与亲水表面相差无几,一方面是由于超滑表面润滑油黏附空气中的灰尘,致使液滴快速冻结结冰,从而丧失延缓结冰能力;另一方面与超滑表面与液滴接触形态及油膜动态分布有关。

3.2 开始结冰时间与结冰扩散速度分析

基于 ImageJ 图像处理软件对冷凝冻结相变过程图像进行统计处理,采用开始结冰时间与冻结传播速度对不同润湿特性表面的防冰能力进行量化分析,获得表面润湿特性对冷凝冻结与相变传热的影响机制。4 种润湿特性表面在工况为 -5、-10、

-15℃时表面开始结冰时间对比关系如图7所示。可以看出,在较大相对湿度、-5℃工况下,SHPO-N开始结冰时间约为HPI开始结冰时间的4倍,SHPO-MN开始结冰时间是HPI开始结冰时间的2倍;在工况为-10、-15℃时,SHPO-N开始结冰时间约为HPI开始结冰时间的2.5倍,SHPO-MN开始结冰时间约为HPI开始结冰时间的1.5倍,体现了超疏水表面延缓结冰的有效性与优越性。与HPI相比,冷凝液滴在超疏水表面以Cassie-Baxter态悬浮在粗糙结构,与过冷表面接触面积小,且微纳粗糙结构间隙填充的空气充当绝热层起到延缓成核结冰的作用。对于HPO-SLIP,其开始结冰时间与HPI相比相差不大,归因于超滑表面与液滴接触形态与油膜动态分布,以及润滑油黏附的杂质使表面“油膜隔离”失效,杂质作为高能成核点,使其快速成核结冰。

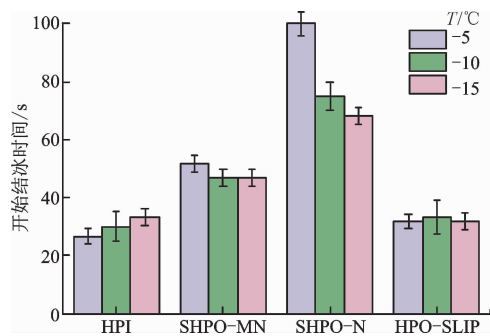


图7 不同润湿特性表面开始结冰时间

Fig. 7 The onsets of icing time for different wettability surfaces

为改善超滑表面延缓结冰性能,需要对其润滑油膜的动态分布机理进行分析。超滑表面是由气、水、油、固四组分组成的系统,其包含3个界面,分别是气-水-油界面A、水-油-固界面B、气-油-固界面C^[18]。对于气-水-油界面A,即液滴与空气之间的界面存在两种状态:包裹和未包裹。包裹指液滴被润滑油包裹,未包裹指液滴未被润滑油包裹。对于气-水-油界面A,其状态受水界面张力的影响,通过确定扩散系数 S 判断是否出现包裹状态。当 $S_{ow(a)} = \gamma_{wa} - \gamma_{oa} - \gamma_{ow} > 0$ 时,将出现包裹状态。对于润滑油 Krytox GPL105, $S_{ow(a)} > 0$,且根据图6中超滑表面珠状冷凝液滴状态,说明润滑油包裹冷凝液滴,出现包裹状态。由于水蒸气在油膜中的扩散有限及油-气界面的成核能垒低,液滴成核优先发生在超滑表面的油-气界面,受润滑油毛细力与包裹作用,液滴进入润滑油。由于液滴的生长及合并,润滑油膜

重新迁移分布,形成“富油区”和“贫油区”。与较厚的油层相比,较薄的油层因吸收和散射光更少而更亮。动态润滑油膜影响液滴成核的空间偏好,第二代液滴成核主要发生在贫油区,液滴与邻近的液滴结合,形成新的贫油区。微尺度液滴会自发地向较大的液滴移动,即向“富油区”移动。液滴冻结优先发生于“贫油区”,而后“富油区”,液滴孤立冻结,无“冰桥”传播,作用机理如图8所示,大量润滑油在液滴冻结后开始向液滴表面迁移,是由纳米冰核产生的表面粗糙结构导致的毛细力引起的,然后致使整个表面液滴全部冻结生长并开始积累霜层。这些新发现有助于全面了解润滑油膜与液滴成核结冰的相互作用,实际中可通过调整润滑油厚度与黏度来降低成核率密度。

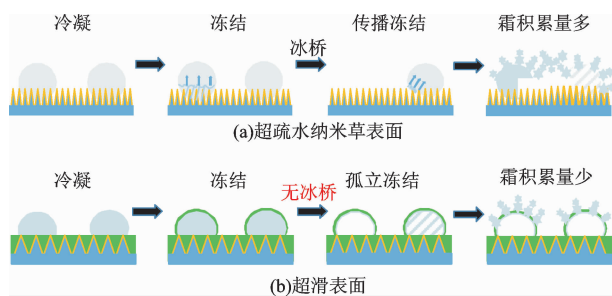


图8 不同润湿特性表面结冰机理

Fig. 8 The icing mechanism for different wettability surfaces

不同润湿特性表面结冰扩散速度根据扩散距离与扩散时间的比值关系计算获得,其中冷凝液滴在超疏水表面冻结以“冰桥”形式传播扩散。对于4种润湿特性表面,在工况为-5、-10、-15℃时,表面结冰扩散速度对比关系如图9所示。在工况为-10℃时,HPI结冰扩散速度为 $(19.1 \pm 3.8) \mu\text{m/s}$,SHPO-MN结冰扩散速度为 $(8.9 \pm 0.7) \mu\text{m/s}$,SHPO-N结冰扩散速度为 $(9.5 \pm 1.5) \mu\text{m/s}$,HPO-SLIP结冰扩散速度为 $(6.3 \pm 1.1) \mu\text{m/s}$ 。与文献[19]中-10℃工况疏水表面结冰扩散速度 $(11.2 \pm 0.9) \mu\text{m/s}$ 相比,本实验中超疏水表面与超滑表面结冰扩散速度更低。对于-5、-10、-15℃工况,随着温度的降低,结冰扩散速度逐渐增大。与HPI相比,SHPO-MN、SHPO-N以及HPO-SLIP具有更小的结冰扩散速度,其中HPO-SLIP具有最小的结冰扩散速度,归因于在润滑油上结冰相对更困难,以及结冰释放的潜热使周围液滴蒸发,从而降低了冻结扩散速度。可见超滑表面润滑油对降低结冰扩散速度具有重要影响,即结冰扩散速度越低,冰积累量

越少。

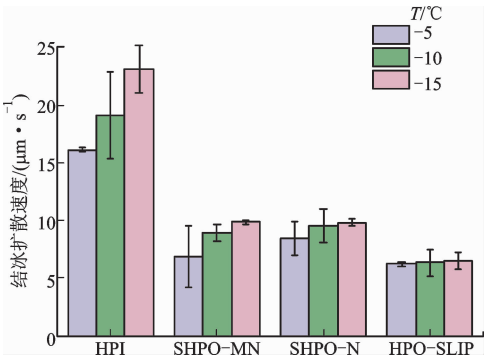


图 9 不同润湿特性表面结冰扩散速度
Fig. 9 The ice propagation velocities for different wettability surfaces

3.3 疏冰分析

结冰延缓时间与低冰黏附强度是决定表面防冰与疏冰的重要因素。从防冰角度出发,超疏水表面对液滴冻结具有高效延缓作用,但受时间与温度的影响,在大过冷度、长时间作用下最终会成核结冰。从疏冰角度出发,低冰黏附强度是冰层从表面更易脱落的量化指标。对于不同温度工况-5、-10、-15、-20 °C,体积为 20 μL 的去离子水冻结液滴在 4 种润湿特性表面的冰黏附强度测试结果如图 10 所示。对于 HPI,其冰黏附强度在-5~-20 °C 工况约为 376~442 kPa;对于 SHPO-MN,其冰黏附强度在-5~-20 °C 工况约为 109~185 kPa;对于 SHPO-N,其冰黏附强度在-5~-20 °C 工况约为 99~208 kPa;对于 HPO-SLIP,其冰黏附强度在-5~-20 °C 工况约为 30~78 kPa,远低于 100 kPa。冰层临界黏附强度 100 kPa 可作为判断冰层是否可以被自然力(如风、重力等)破坏,或使用很小力就能轻易去除的判据^[20]。研究发现,超滑表面、

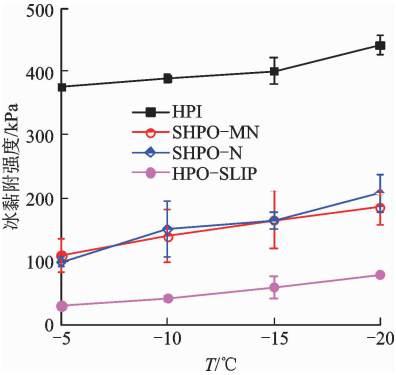


图 10 不同润湿特性表面冰黏附强度
Fig. 10 Ice adhesion strengths on different wetting surfaces

超疏水微纳米复合粗糙表面与超疏水纳米草表面的冰黏附强度显著低于亲水表面黏附强度,其中,超滑表面冰黏附强度最低且远低于 100 kPa,由于其润滑的特性使表面冰层的黏附强度下降 1 个数量级。超疏水粗糙结构表面的冰层黏附力主要取决于冰层与固体表面的界面接触形式固-气-冰及很小的接触角滞后,固-冰界面捕获的空气越多,实际固-冰接触面积就越小,冰层黏附力就越小,且空气越多越利于冰层沿空气层脱落。超滑表面极低冰层黏附强度主要归因于表面润滑油层的低表面张力和很小的接触角滞后。冰层主要沿着油膜层脱落,油膜润滑界面摩擦力很小且受很小剪切力易脱落。超滑表面与超疏水表面低冰黏附力与表面接触角滞后有关,接触角滞后越小,冰黏附力越小。

延缓结冰并不能从根本上解决冰积累问题,防冰传播能力与疏冰能力是解决冰积累问题的关键因素。若结冰扩散速度较小,则疏冰能力较强,冰积累量就会较少。超滑表面不仅具有最小结冰扩散速度,而且具有最小冰黏附剪切强度,说明其具有优越的防冰传播能力和疏冰能力。若出现润滑油自然挥发或流失问题,通过连续补涂润滑油或在涂层中添加增塑剂降低界面韧性,可实现有效疏冰。

4 结 论

本文基于仿生原理,以猪笼草为原型,提出了一种新型自组装超滑表面制备方法,并开展了防冰与疏冰实验研究,获得了超滑表面冷凝结霜机理,揭示了不同表面冷凝冻结与防冰疏冰机制,结论如下。

(1)超滑表面液滴以珠状凝结形式冷凝,液滴被润滑油包裹,冻结首先出现在“贫油区”,而后在“富油区”,冷凝液滴孤立冻结,无“冰桥”扩散传播,最后整个表面液滴冻结并积累霜层。

(2)与其他 3 种表面相比,超滑表面不仅具有最小结冰扩散速度,而且具有最强的疏冰能力。其中,超滑表面冰黏附力比亲水表面冰黏附力低一个数量级。

(3)超滑表面具有优良的防冰传播和疏冰性能,是一种很有前景的疏冰材料,可为疏冰应用提供理论指导。

参考文献:

[1] FARZANEH M, RYERSON C C. Anti-icing and de-icing techniques [J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65(1): 1-4.

- [2] PARENT O, ILINCA A. Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: critical review [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 65(1): 88-96.
- [3] MCNEILL K S, CANCELLA D A. Detection of triazole deicing additives in soil samples from airports with low, mid, and large volume aircraft deicing activities [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, 82(3): 265-269.
- [4] JIANG J, LU G Y, TANG G H. Inhibition of surface ice nucleation by combination of superhydrophobic coating and alcohol spraying [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 134: 628-633.
- [5] JIANG J, LI G X, SHENG Q, et al. Microscopic mechanism of ice nucleation: the effects of surface rough structure and wettability [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 510: 145520.
- [6] KIM A, LEE C, KIM H, et al. Simple approach to superhydrophobic nanostructured Al for practical anti-frosting application based on enhanced self-propelled jumping droplets [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, 7(13): 7206-7213.
- [7] BENGALURU S 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] MAITRA T, TIWARI M K, ANTONINI C, et al. On the nanoengineering of superhydrophobic and impalement resistant surface textures below the freezing temperature [J]. *Nano Letters*, 2014, 14(1): 172-182.
- [9] EBERLE P, TIWARI M K, MAITRA T, et al. Rational nanostructuring of surfaces for extraordinary ice-phobicity [J]. *Nanoscale*, 2014, 6(9): 4874-4881.
- [10] MURPHY K R, MCCLINTIC W T, LESTER K C, et al. Dynamic defrosting on scalable superhydrophobic surfaces [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(28): 24308-24317.
- [11] HOU Youmin, YU Miao, SHANG Yuhe, et al. Suppressing ice nucleation of supercooled condensate with biphilic topography [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(7): 075902.
- [12] JUNG S, DORRESTIJN M, RAPS D, et al. Are superhydrophobic surfaces best for icephobicity? [J]. *Langmuir*, 2011, 27(6): 3059-3066.
- [13] WIER K A, MCCARTHY T J. Condensation on ultrahydrophobic surfaces and its effect on droplet mobility: ultrahydrophobic surfaces are not always water repellant [J]. *Langmuir*, 2006, 22(6): 2433-2436.
- [14] KIM P, WONG T S, ALVARENGA J, et al. Liquid-infused nanostructured surfaces with extreme anti-ice and anti-frost performance [J]. *ACS Nano*, 2012, 6(8): 6569-6577.
- [15] WILSON P W, LU W, XU H, et al. Inhibition of ice nucleation by slippery liquid-infused porous surfaces (SLIPS) [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2013, 15(2): 581-585.
- [16] YIN Xiangyu, ZHANG Yue, WANG Daoai, et al. Integration of self-lubrication and near-infrared photothermogenesis for excellent anti-icing/deicing performance [J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(27): 4237-4245.
- [17] LIU Xiaolin, CHEN Huawei, ZHAO Zehui, et al. Slippery liquid-infused porous electric heating coating for anti-icing and de-icing applications [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 374: 889-896.
- [18] SMITH J D, DHIMAN R, ANAND S, et al. Droplet mobility on lubricant-impregnated surfaces [J]. *Soft Matter*, 2013, 9(6): 1772-1780.
- [19] ZHAO Yugang, YANG Chun. Frost spreading on microscale wettability/morphology patterned surfaces [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 121: 136-145.
- [20] BLACKBURN R R, ASHWORTH T, SCHMIDT C G, et al. Ice-pavement bond disbonding: fundamental study [EB/OL]. [1993-12-25]. <http://www.onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp/SHRP-H-643.pdf>.

(编辑 亢列梅)