

# 基于图像处理技术界定微纳复合织构防覆冰性能

弯艳玲, 崔普, 徐丽宁, 于化东

(长春理工大学 跨尺度微纳制造教育部重点实验室, 长春 130000)

**摘要:** **目的** 制备具有防覆冰性能的微织构表面, 准确评价微织构表面的结冰性能。**方法** 采用激光二次扫描方法, 以铝合金为基底, 构筑沟槽-凹坑型复合微织构表面, 以水滴在其表面结冰过程的图像为对象, 采用阈值法分割图像和背景, 对提取出的图像进行形态学运算, 通过分析水滴结冰过程中的轮廓变化规律, 研究水滴结冰过程的状态变化, 进一步界定水滴的结冰时间。**结果** 纳秒激光一次扫描形成的沟槽结构, 增加了试件表面的粗糙度, 使铝合金表面接触角由  $54.4^\circ$  提高到  $116.5^\circ$ , 实现了铝合金表面的疏水性能。而二次扫描构建的沟槽-凹坑复合微织构, 形成了  $C^w-C^n$  接触模型, 进一步提高了试件表面的疏水性, 试件表面接触角增大至  $154.4^\circ$ 。超疏水表面成核能垒高, 且沟槽-凹坑复合微织构捕获的空气降低了固液界面的热交换速度, 是铝合金表面结冰时间由 11 s 延长到 551 s 的原因。图像处理方法准确界定了水滴在结冰过程中的三个阶段。采用 Harris 角点检测法, 可以实现精确判断结冰完成时间, 减小了肉眼判断结冰状态所带来的主观误差。**结论** 纳秒激光二次扫描构筑的沟槽-凹坑复合微织构可以有效提高 Al7075 表面的疏水性, 并延缓水滴在其表面的结冰时间。图像法处理提取的表面轮廓, 为研究分析水滴在结冰过程中的状态变化提供了一种新思路。

**关键词:** 防覆冰; 微纳复合织构; 纳秒激光; 图像处理; 铝合金; 结冰机理

**中图分类号:** TP752 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)08-0054-05

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.08.008

## Anti-icing Performance of Micro-nano Composite Texture Based on Image Processing Technology

WAN Yan-ling, CUI Pu, XU Li-ning, YU Hua-dong

(Key Laboratory of Cross-scale Micro and Nano-manufacturing of the Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to prepare the micro-textured surface with anti-icing performance and evaluate the icing performance of the micro-textured surface accurately. The groove-pit type composite micro-textured surface was constructed with aluminum alloy as the base by laser secondary scanning method. By taking the image of water droplets on the surface of the ice as the object, the image and background were segmented by threshold method, and the extracted image was subject to morphological operation. By analyzing the contour change law during the process of water droplet icing, the change in the water

收稿日期: 2019-04-25; 修订日期: 2019-06-10

Received: 2019-04-25; Revised: 2019-06-10

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1107403); 吉林省科技发展计划资助项目 (20180101324JC); 吉林省教育厅“十三五”科学技术项目 (JJKH20190542KJ)

Fund: National Key R & D Program of China (2018YFB1107403), Jilin Province Science and Technology Development Program Funded Projects of China (20180101324JC) and Science and Technology Project of Jilin Provincial Education Department during the 13th Five-year Plan Period (JJKH20190542KJ)

作者简介: 弯艳玲 (1979—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为微纳制造。邮箱: wanyl@cust.edu.cn

Biography: WAN Yan-ling (1979—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: micro-nano manufacturing. E-mail: wanyl@cust.edu.cn

droplet icing process was studied to further define the icing time of the water droplets. The groove structure formed by the nanosecond laser scanning increased the roughness of the surface of the test piece, and increased the contact angle of the aluminum alloy surface from  $54.4^\circ$  to  $116.5^\circ$ , thus achieving the hydrophobic performance of the aluminum alloy surface. The groove-pit composite micro-texture constructed by the secondary scanning formed a  $C^w-C^n$  contact model, which further improved the hydrophobicity of the surface of the test piece, and the contact angle of the test piece increased to  $154.4^\circ$ . The nucleation energy barrier on superhydrophobic surface was high, and the air captured by the groove-pit composite micro-texture reduced the heat exchange rate of the solid-liquid interface, which was the reason that the surface icing time of the aluminum alloy surface extended from 11 s to 551 s. The image processing method accurately defined the three stages of water droplets during the icing process. Harris corner detection method could accurately determine the icing completion time and reduce the subjective error caused by the naked eye to judge the icing state. The groove-pit composite micro-texture constructed by nanosecond laser secondary scanning can effectively improve the hydrophobicity of the surface of Al7075 and delay the icing time of water droplets on the surface. Processing the extracted surface contours by image method provides a new idea for studying the state change of water droplets during icing.

**KEY WORDS:** anti-icing; micro-nano composite texture; nanosecond laser; image processing; aluminum alloy; icing mechanism

冰霜会给人们的生产生活带来很多不便,甚至造成灾难性的后果。例如,输电线路结冰会增加电线质量,导致线路折断和输电线塔弯折<sup>[1-2]</sup>;机翼结冰可能导致飞机失事<sup>[3-4]</sup>。因此研发相应的防覆冰技术,已成为一项非常紧迫的课题。近年来,超疏水表面的防覆冰特性引起了各个领域科研工作者的兴趣。现实生活中,超疏水表面展现了良好的防覆冰应用前景,但超疏水表面对抗冰霜性能的影响规律仍无定论,甚至一些报道称超疏水不一定抗结冰。此外,超疏水表面如想进入实际应用,其中一个关键问题就是如何实现大面积制备耐磨损、结构稳定的表面,即如何保持抗结冰性能的持久性。

此外,科研人员在测试超疏水表面的防覆冰性能时,并没有一个通用且准确判断结冰时间的方法,通常都是通过肉眼观察对防覆冰表面进行主观判断。例如,观察水滴是否出现“冰尖”现象<sup>[5-6]</sup>、低温下样件表面的附霜量<sup>[7-8]</sup>等。但是这些方法只能定性地判断是否完成结冰,却不能定量地确定结冰完成时间,从而影响对超疏水表面抗结冰能力的判断。

本文采用纳秒激光刻蚀技术,采用二次扫描方法在铝合金表面构建沟槽型微纳复合织构<sup>[9]</sup>,并对其防覆冰性能进行检测。基于 MATLAB 程序设计,运用图像处理技术,分析水滴在不同润湿性表面(亲水、疏水、超疏水)结冰过程中的轮廓变化,研究液滴在低温环境下的结冰规律,进而准确地确定结冰完成时间,并对微纳复合织构的防覆冰机理进行分析,为金属基表面防覆冰性能的应用奠定理论和技术保障。

## 1 试验

### 1.1 微纳复合织构的制备

实验材料为 7075 铝合金板,尺寸为  $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 。首先使用 400#、600#、1000#、2000#砂纸对

试件表面依次进行抛光,然后在乙醇溶液中超声清洗 5 min,去除表面杂物,最后在室温下风干。

采用深圳市大族激光科技股份有限公司生产的光纤激光设备(YLP-ST20E)二次扫描的加工方法,在 7075 铝合金表面构筑沟槽型微织构表面。第一次扫描速度为 500 m/s,第二次扫描速度为 1500 m/s,激光功率为 8 W,重复脉冲数为 3 次,沟槽间距为  $59\text{ }\mu\text{m}$ 。

采用德国蔡司公司生产的扫描电子显微镜(EVOMA25)对试件表面微观形貌进行观测。使用德国(Dataphysics)公司生产的OCA20 视频光学接触角测量仪对试件表面的疏水性能进行表征。采用自制的结冰性能测试装置进行防覆冰性能测试。

### 1.2 结冰过程观测及图像处理

将超声清洗过的样件放入密封箱中,滴加  $4\text{ }\mu\text{L}$  去离子水至试件表面,调整半导体制冷装置温度为  $-15\text{ }^\circ\text{C}$ ,实验时,密封箱内湿度为 40%。为获取结冰过程中超疏水表面水滴的变化过程,设定拍摄时间为 3 s。

将采集的图像导入到 MATLAB 软件中,采用图像获取、图像分割、轮廓提取、特征对比、判断决策的图像技术方案进行结果处理,得到水滴在整个结冰过程的轮廓变化图,并确定结冰完成时间。首先采用阈值法对采集到的水滴图像与背景区域进行分割,使用最大类间方差法(OSTU)<sup>[10]</sup>确定阈值。在选定阈值后,对图像进行阈值分割。阈值分割作为一种灰度图像分割方法,可以使目标边缘平滑,并且最大限度过滤掉图像中的干扰因素。

为分析水滴结冰过程中的轮廓形状变化,除对液滴和背景进行分割外,还须对液滴的边缘轮廓进行提取。对分割完成的图像进行形态学运算,填充区域的内部缺陷,消除沿边界的缺口,完成轮廓边缘的提取。最后对提取出的轮廓边缘进行骨骼化处理,以得到具

有单像素线条的图像轮廓。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试件表面微观结构及润湿性

图 1 为不同扫描方式下的铝合金表面微织构形貌。由图 1 可知,一次扫描后的沟槽结构排列较规整,沟脊表面分布大量熔融物,这是由材料熔融气化后冷凝形成。沟槽底部多是加工区域材料在有限空间内瞬间气化爆炸形成的冲蚀坑。与一次扫描相比,经二次扫描的铝合金表面沟脊的熔融物数量更多,且高度增加。沟槽底部凹坑比较光滑,凹坑和凹坑间,形成了

多尺度复合隔断,这是因为扫描速度的增加使得落在铝合金表面的激光脉冲束之间间距变大,铝合金材料气化和冷凝成的熔渣在激光束形成的凹坑间堆积而形成。整体形貌和碗状结构相似,分布着无数规则排列的四棱锥结构,且比一次扫描加工后的表面存在更多的亚微米和纳米级微结构,粗糙度增大。

采用接触角测量仪对加工前后铝合金表面的接触角进行测量发现,水滴在光滑铝合金表面的静态接触角约为 $(54.4 \pm 0.5)^\circ$ (图 2a),纳秒激光一次扫描后的接触角增大至 $(116.5 \pm 0.5)^\circ$ (图 2b),纳秒激光二次扫描后的接触角增大至 $(154.4 \pm 0.5)^\circ$ (图 2c),达到超疏水。

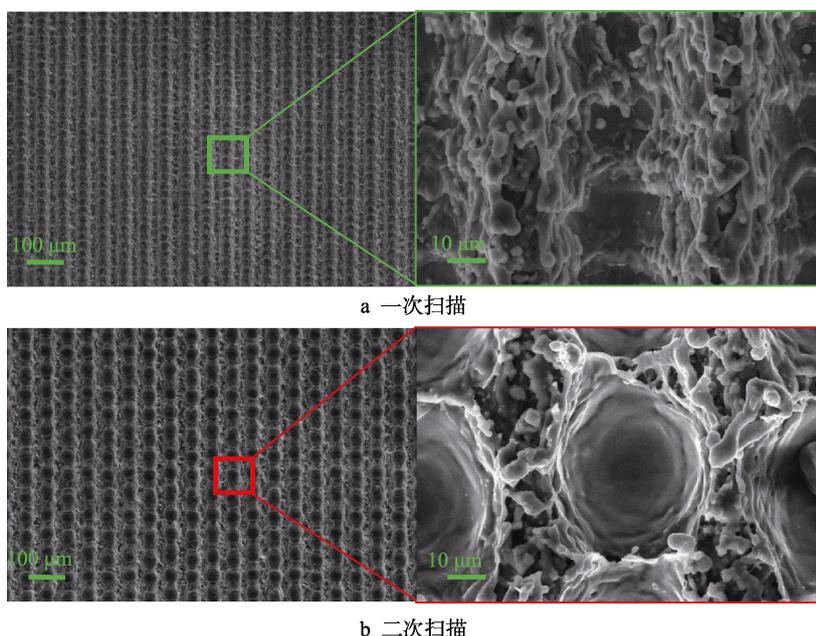


图 1 不同扫描方式下的铝合金表面微织构形貌

Fig.1 Micro-texture morphology of Al7075 under different scanning modes: a) primary scanning; b) secondary scanning

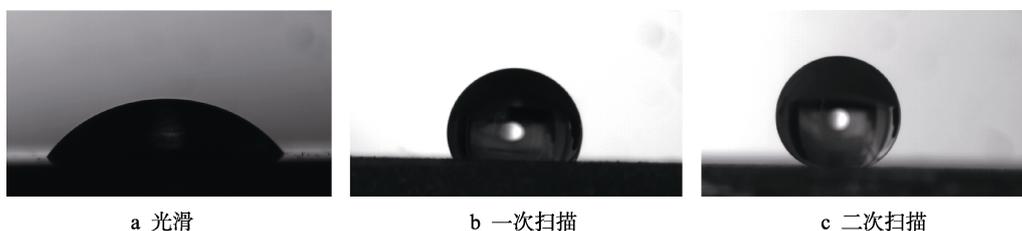


图 2 水滴在不同表面的接触角

Fig.2 Contact angle of water droplets on different surfaces: a) smooth; b) primary scanning; c) secondary scanning

测得微米级沟槽的沟槽宽度、脊宽及高度分别为 31.97、26.65、22.61  $\mu\text{m}$ 。假设液滴在微米级沟槽结构的接触状态为 Cassie 模型,则表观接触面积应为 0.455。将本征接触角  $54.4^\circ$  带入 Cassie 模型,计算得到表观接触角为  $106.27^\circ$ ,小于实测值。由此可知,加工过程中在微米级沟槽上形成的亚微米、纳米级微结构对液滴接触起增加作用。假设液滴在微米和纳米级结构试件表面都满足 Cassie 接触状态<sup>[11]</sup>,即  $C^w-C^n$

模型:

$$\cos \theta_{\text{app}}^{c-c} = \phi^m \phi^n (\cos \theta_e + 1) - 1 \quad (1)$$

假设液滴在微米级结构固体表面满足 Cassie 接触状态,在纳米级结构固体表面满足 Wenzel 接触状态,即  $C^w-W^n$  模型:

$$\cos \theta_{\text{app}}^{c-w} = R^n \{ \phi^m (\cos \theta_e + 1) - 1 \} \quad (2)$$

其中,  $\theta_{\text{app}}$  为液滴在固体表面时的表观接触角,

$\phi^m$  和  $\phi^n$  分别表示在复合接触面中微米级和纳米级固体所占面积的百分比,  $R^n$  表示纳米级固/液界面实际接触面积与固/液表观接触面积比值,  $\theta_0$  为液滴在光滑固体表面时的本征接触角。分别将数值代入公式 (1) 中得到  $\phi^n$  为 0.77, 由此证明了亚微米和纳米级微结构的二级结构对液滴在试件表面接触起增进作用。而将数值带入公式 (2) 中, 则发现  $R^n$  大于 1。由此可知, 液滴在微米、纳米级结构表面都满足 Cassie 接触状态, 即符合  $C^w-C^n$  模型。将二次扫描后的表观接触角( $154.4 \pm 0.5^\circ$ )及相应参数代入式 (1), 计算得到  $\phi^n$  为 0.14, 要比一次扫描后的值小。这可能是由于二次扫描形成了更多的亚微米和纳米级微结构, 且表面粗糙度增大。

### 2.2 防覆冰性能及机理分析

以超疏水润湿性表面为例, 阐明整个图像处理过程。图 3 为不同采集时间的水滴图像。采用自定义阈值法, 对原始图像进行分割 (图 4 所示), 然后对其进行形态学运算, 提取轮廓曲线 (图 5)。由图 3 可知, 经过图像分割处理后的图像完全将液滴与背景分割, 获得比较清晰的液滴图像。边缘提取能比较完整地提取出液滴的外轮廓。

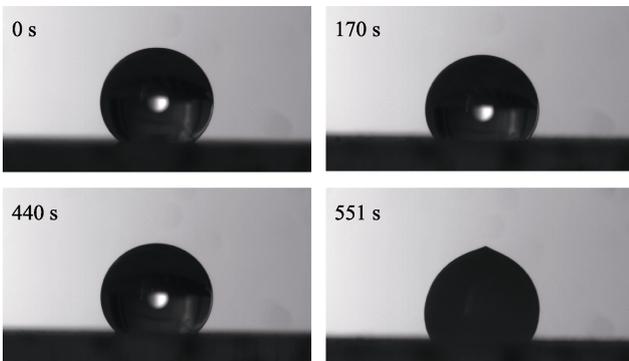


图 3 不同采样时间的水滴图像  
Fig.3 Image of water droplet obtained at different sampling time

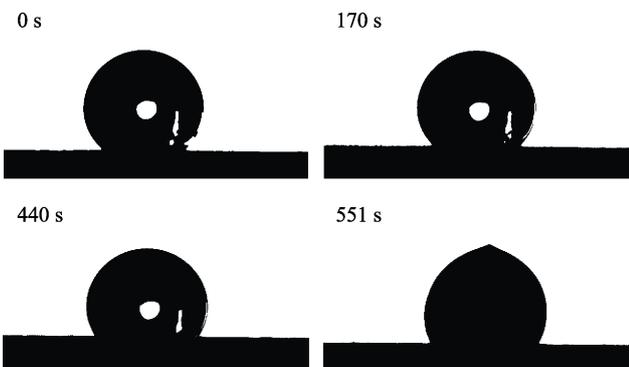


图 4 超疏水表面水滴图像的分割结果  
Fig.4 Image segmentation results of super-hydrophobic surface of water droplets

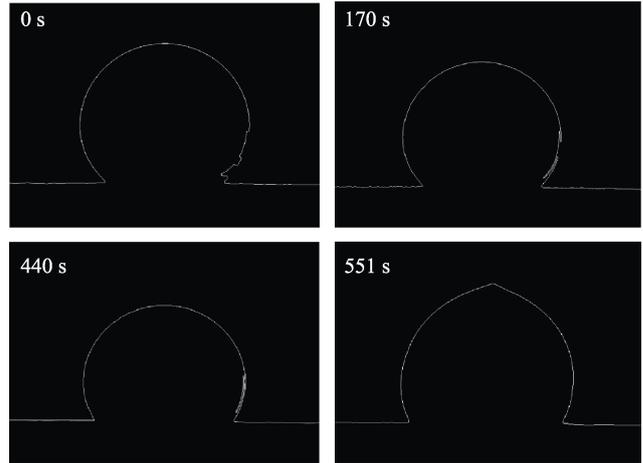


图 5 超疏水表面水滴轮廓边缘提取结果  
Fig.5 Extraction results of water droplet contour on super-hydrophobic surface

液滴固体表面的结冰过程可以分为三个阶段: (i) 水内冷, (ii) 快速动力学凝结, (iii) 等温凝固<sup>[12]</sup>。在水内冷阶段, 水滴温度在低温环境下持续下降, 直至水分子突破吉布斯自由能障<sup>[13]</sup>, 在水内冷过程中, 工件表面水滴的接触角会不断减小 (图 6 所示: 水滴轮廓由红色线标注位置降低到蓝色线标注位置)。

动力学凝结阶段, 液滴内异相成核最开始发生在三相接触线上<sup>[14]</sup>。由于液体凝结成核放热, 液滴温度呈增加状态。当液滴达到平衡结冰温度时, 快速动力学的晶体增长停止。在等温凝固阶段, 液滴温度维持在平衡结冰温度状态, 此时接触角不再变化, 冰冻锋面自液滴下端向上移动 (轮廓由紫色位置改变为蓝色位置), 直至液滴顶端形成“冰尖” (图 7)。这是由于同等质量下的固体和液体体积不同造成的, 这也是结冰完成的最终形态。将这三个阶段的液滴轮廓放在一起可明显看到其变化, 如图 6 所示, 红色轮廓为水滴初始轮廓线, 紫色为结冰过程中的轮廓线, 蓝色为结冰完成时的轮廓线。

由图 6 中可以看出, 水滴在亲水表面的水内冷过程不会有接触角变化, 水滴与试件的热交换效率很

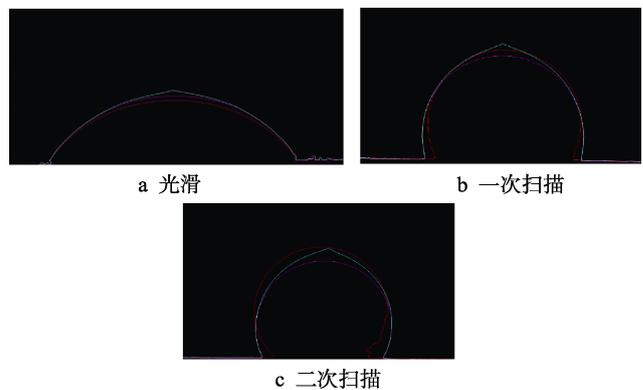


图 6 水滴轮廓对比  
Fig.6 Contrast of water droplet contour: a) smooth; b) primary scanning; c) secondary scanning

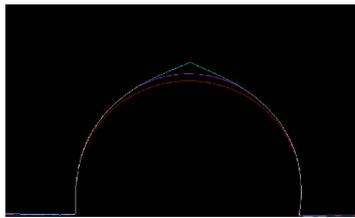
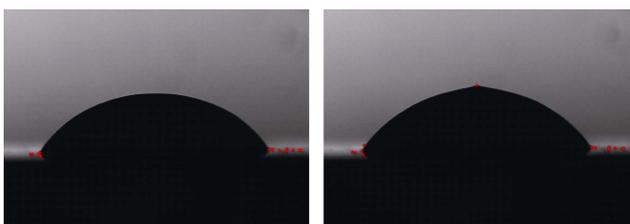


图 7 水滴结冰过程中的冰峰面移动

Fig.7 Movement of ice peaks during icing of water droplets

高。水分子会快速突破吉布斯自由能障，使水滴完成结冰。而在疏水和超疏水表面，由于水滴和试件间存在一层“空气垫”，所以水与工件的热交换效率较低。由于在降温过程中，水滴接触角不断增大，与工件间的“气垫”减少，接触面积增大，所以水滴降温速度也会越来越快，直至达到结冰临界点，水滴开始结冰。因为超疏水表面有更大的接触角，所以其表面水滴降温速度最慢，能大幅度延缓结冰时间。

从图 7 可知，结冰完成的标志是液滴顶端出现“冰尖”，因此本文采用 Harris 角点检测方法来检测“冰尖”形成。通过计算每个像素点的 Harris 响应值，求出角点，并用“\*”标出。如图 8 所示，图 8a 为未完成结冰的角点提取结果，图 8b 为已完成结冰的角点提取结果。可以看出，在冰尖上提取出了角点，而没有完成结冰的图像因为没有形成冰尖，所以在顶端不会产生角点，通过对比不同时刻所获取的样本的角点坐标来判断结冰是否完成，并输出已完成的结冰图像及结冰时间。结果显示，光滑样件完成结冰的时间为 11 s，一次扫描疏水样件结冰完成的时间为 210 s，二次扫描超疏水样件结冰完成的时间为 551 s。由此可知，超疏水表面覆冰的效果优于疏水及亲水样件。



a 初始表面                      b 结冰表面

图 8 角点提取结果对比

Fig.8 Contrast of extraction result of corner points

超疏水表面之所以能够延迟结冰的原因与固-液间捕获的空气数量有关<sup>[15]</sup>。从超疏水表面结冰过程来看，在水内冷阶段，液滴在试验环境温度不断下降的过程中，接触角不断减小，这说明液滴与试件表面间的空气逐渐减少，且接触角越大，这一过程持续的时间越长。接触角减小的同时，固液之间的接触面积变大，导致固液间的热交换增加，液滴温度下降更快。在等温凝固过程中，能够明显看到液滴面的移动，疏水性越强的表面，由于液滴与固体表面的接触面积较小，其热传导性较差，表面的结冰率就越低，这一阶

段一直持续到液滴变为零摄氏度。不难看出，结冰的第一阶段和第三阶段中，空气的存在减少了固-液界面热交换的速度，因此在同一试验条件下，超疏水表面比疏水表面和亲水表面的防覆冰效果更好。

从自由能变化的角度来看，结冰和结霜开始于异相成核，在系统活化能达到最大值时则会成核。在成核过程中，新表面形成时，表面能会增加，使得系统内的活化能增加，但是体积每增加一些，系统内的活化能就会减少。系统成核所需的活化能越大，则成核越不容易，相应的结冰和结霜则不容易形成。为了提高表面的防结霜和结冰性能，应尽可能增加成核难度，使成核所需的活化能最大。随着表面的亲水性增加，水或冰的异相成核临界活化能减小，因此相变就更容易。疏水性表面的成核临界活化能接近均匀成核的临界活化能，因此疏水表面比亲水表面需要更多的临界活化能去成核，水蒸气冷凝的过饱和和线更高，冷凝水结冰所需的过冷也更多。因此，最大化接触角是延迟从过饱和蒸气转变为水滴成核或从过饱和水变成冰的成核的理想选择，超疏水表面因为成核能垒高，起到了一定的防覆冰霜的作用。

### 3 结论

1) 纳秒激光一次扫描形成的沟槽微结构，提升了铝合金试件的疏水性能。二次纳秒激光扫描后，在试件表面生成了沟槽型复合微结构，增大了试件表面的疏水性，由于液滴与试件表面的微米和纳米级等复合微结构均形成了 Cassie 接触模型，实现了超疏水表面的制备。

2) 阈值法能清晰提取出液滴的结冰图像，通过图像处理能准确区分出液滴结冰的水内冷、快速动力学凝结和等温凝固三个过程，利用形态学运算能准确地对比水滴结冰过程的轮廓变化。利用 Harris 角点检测算法对不同结冰状态的样本进行检测，通过对比不同时刻样本的角点坐标，能精确判断结冰的完成时间。这种方法可以精确地判定水滴的结冰完成时间，避免了主观判断所带来的误差。

3) 超疏水表面实现延迟结冰的原因是增加了液滴成核所需要的系统活化能，同时，由于液滴在其表面满足  $C^w-C^n$  模型，使得液滴和材料表面间还截留了部分空气，减少了固液接触面积，从而降低了热传导速率，最终延缓了表面覆冰时间。

#### 参考文献：

[1] 彭向阳, 周华敏, 潘春平. 2008 年广东电网输电线路冰灾受损情况及关键影响因素分析[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 108-112.

(下转第 67 页)

- 2002, 20(2): 214-216.
- [20] SHIMIZU I, ANDREASEN J L, BECH J I, et al. Influence of workpiece surface topography on the mechanisms of liquid lubrication in strip drawing[J]. *Journal of tribology*, 2001, 123(2): 359-370.
- [21] DOBRICA M B, FILLON M, PASCOVICI M D, et al. Optimizing surface texture for hydrodynamic lubricated contacts using an mass-conserving numerical approach[J]. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part J: Journal of engineering tribology*, 2013, 224(J8): 737-750.
- [22] LING T D, LIU P, XIONG S, et al. Surface texturing of drill bits for adhesion reduction and tool life enhancement [J]. *Tribology letters*, 2013, 52(1): 113-122.
- [23] ENOMOTO T, SUGIHARA T, YUKINAGA S, et al. Highly wear-resistant cutting tools with textured surfaces in steel cutting[J]. *CIRP annals-manufacturing technology*, 2012, 61(1): 571-574.
- [24] 张娜, 杨发展, 刘绪超, 等. 表面织构激光加工技术研究现状分析[J]. *工具技术*, 2018, 52(11): 3-6.  
ZHANG Na, YANG Fa-zhan, LIU Xu-chao, et al. Development situation of surface micro texture with laser processing[J]. *Tool engineering*, 2018, 52(11): 3-6.
- [25] 于海武, 王晓雷, 孙造, 等. 圆柱形微凹坑表面织构对流体动压润滑性能的影响[J]. *南京航空航天大学学报*, 2010, 42(2): 209-213.  
YU Hai-wu, WANG Xiao-lei, SUN Zao, et al. Theoretical analysis on hydrodynamic lubrication of cylinder micro-dimple surface texture[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2010, 42(2): 209-213.
- [26] 张辉, 张东亚, 林平. 无限大接触面圆坑织构参数优化 [J]. *润滑与密封*, 2013, 38(8): 23-27.  
ZHANG Hui, ZHANG Dong-ya, LIN Ping. Parametric optimization of circular micro-pit textures in infinite contact area[J]. *Lubrication engineering*, 2013, 38(8): 23-27.

(上接第 58 页)

- PENG Xiang-yang, ZHOU Hua-min, PAN Chun-ping. Damage condition of overhead transmission lines in Guangdong power grid caused by icing disaster in 2008 and analysis on key impacting factors[J]. *Power system technology*, 2009, 33(9): 108-112
- [2] HU J, LAN B, KE X, et al. Artificial icing and AC flashover tests on glass insulators with silicone acrylate resin hydrophobic coatings[J]. *IEEE transactions on dielectrics & electrical insulation*, 2016, 23(2): 1038-1047.
- [3] 罗茜, 王亚莉. 飞机结冰对于飞行安全的重大危害分析[J]. *科技视界*, 2012(20): 125-126.  
LUO Qian, WANG Ya-li. Analysis of major hazards of aircraft icing on flight safety[J]. *Science & technology vision*, 2012(20): 125-126.
- [4] 周莉, 徐浩军, 龚胜科, 等. 飞机结冰特性及防除冰技术研究[J]. *中国安全科学学报*, 2010, 20(6): 105.  
ZHOU Li, XU Hao-jun, GONG Sheng-ke, et al. Research of aircraft icing characteristics and anti-icing and de-icing technology[J]. *China safety science journal*, 2010, 20(6): 105.
- [5] GUO P, ZHENG Y, WEN M, et al. Icephobic/anti-icing properties of micro/nanostructured surfaces[J]. *Advanced materials*, 2012, 24(19): 2642-2648.
- [6] GWAK Y, PARK J I, KIM M, et al. Creating anti-icing surfaces via the direct immobilization of antifreeze proteins on aluminum[J]. *Scientific reports*, 2015, 5: 12019.
- [7] NGUYEN T B, PAR S, LIM H. Effects of morphology parameters on Anti-icing performance in superhydrophobic surfaces[J]. *Applied surface science*, 2018, 435: 585-591.
- [8] RUAN M, LI W, WANG B, et al. Preparation and anti-icing behavior of superhydrophobic surfaces on aluminum alloy substrates[J]. *Langmuir the ACS journal of surfaces & colloids*, 2013, 29(27): 8482-8491.
- [9] 弯艳玲, 奚传文, 董宾, 等. 微纳复合沟槽形铝合金表面的结冰性能[J]. *中国表面工程*, 2018, 31(4): 87-93.  
WAN Yan-ling, XI Chuan-wen, DONG Bin, et al. Icing performance of micro-nano composite grooves on aluminum alloy surface[J]. *China surface engineering*, 2018, 31(4): 87-93.
- [10] 张群会, 李贵敏, 蔺宝华, 等. 基于最大熵-方差模型的图像分割方法[J]. *计算机技术与发展*, 2011, 21(6): 43-46.  
ZHANG Qun-hui, LI Gui-min, LIN Bao-hua, et al. Threshold image segmentation based on maximum entropy-variance model[J]. *Computer technology and development*, 2011, 21(6): 43-46.
- [11] MORGNER U, KÄRTNER F X, CHO S H, et al. Sub-two-cycle pulses from a kerr-lens mode-locked Ti: Sapphire laser[J]. *Optics letters*, 1999, 24(6): 411-413.
- [12] RAHMAWAN Y, MOON M W, KIM K S, et al. Wrinkled dual-scale structures of diamond-like carbon (DLC) for superhydrophobicity[J]. *Langmuir the ACS journal of surfaces & colloids*, 2010, 26(1): 484-491.
- [13] HINDMARSH J P, RUSSELL A B, CHEN X D. Experimental and numerical analysis of the temperature transition of a suspended freezing water droplet[J]. *International journal of heat & mass transfer*, 2003, 46(7): 1199-1213.
- [14] VARANASI K K, DENG T, SMITH J D, et al. Frost formation and ice adhesion on superhydrophobic surfaces [J]. *Applied physics letters*, 2010, 97(23): 234102-234104.
- [15] MOKHTARIAN F, SUOMELA R. Curvature scale space for robust image corner detection[C]//International Conference on Pattern Recognition. Barcelona: IEEE Computer Society, 1998.