

# 激光与光电子学进展

## 基于激光加工的织构化硅橡胶表面覆冰特性研究

赵美云, 杨帆, 田森, 赵彦, 康萌, 赵新泽\*

三峡大学水电机械设备设计与维护湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443000

**摘要** 硅橡胶因其良好的机械性能和电气绝缘性能而被各行各业广泛应用,但低温环境下的表面覆冰会严重影响其应用。通过激光雕刻机在复合绝缘子伞裙试样表面加工了一系列微米级尺寸的圆柱形织构,未经任何化学试剂修饰,得到了超疏水表面。采用三维形貌仪和扫描电子显微镜观察了试样表面形貌特征,采用粘附力测量装置测试了不同工况下织构化硅橡胶表面的覆冰粘附力,采用高速相机记录了液滴在不同织构化硅橡胶表面凝结-融化过程。研究表明:一定工况下,加工功率为 35 W、织构直径和间距都为 350  $\mu\text{m}$  的圆柱形织构试样表面疏水性最好且覆冰粘附力较低,防冰疏冰性能最佳。通过摩擦试验,验证了制备的织构化硅橡胶表面具有一定的疏冰耐久稳定性。

**关键词** 激光光学; 织构化硅橡胶; 超疏水; 疏冰

中图分类号 TG665

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0314005

### Icing Characteristics of Textured Silicone Rubber Surface Based on Laser Engraving

Zhao Meiyun, Yang Fan, Tian Sen, Zhao Yan, Kang Meng, Zhao Xinze\*

Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design & Maintenance, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443000, China

**Abstract** Because of its good mechanical and electrical insulation properties, silicone rubber has various applications. However, in a low-temperature environment, the ice coating on its surface severely limits its application. In this paper, a laser engraving machine was used to process a series of micron-sized cylindrical textures on the surface of a composite insulator umbrella skirt, resulting in a superhydrophobic surface that required no chemical modification. Three-dimensional topography instruments and a scanning electron microscope were used to observe the surface morphology of the samples. The adhesion measurement device was used to assess the ice adhesion of textured silicone rubber surfaces under various operating conditions. A high-speed camera was used to capture the condensation-melting process of droplets on the surfaces of various textured silicone rubber. The results show that under certain working conditions, the cylindrical texture sample with the processing power of 35 W and texture diameter and spacing of 350  $\mu\text{m}$  exhibits the best hydrophobicity and the lowest adhesion, and the best anti-icing performance. Friction tests confirm that the surface texture of the processed silicone rubber has certain ice-repellent durability and stability.

**Key words** laser optics; texture silicone rubber; superhydrophobic; ice-thinning

收稿日期: 2021-01-18; 修回日期: 2021-05-04; 录用日期: 2021-05-18

基金项目: 国家自然科学基金(51605254)

通信作者: \*xzzhao@ctgu.edu.cn

## 1 引言

覆冰现象是自然界中的一种很普遍现象,可能会对航空、运输、电力等领域造成严重的经济损失<sup>[1-2]</sup>。常用的除冰方法有加热除冰、机械除冰、化学除冰等<sup>[3-4]</sup>,但是这些方法效率较低且没有从根本上解决覆冰问题。

近年来,人们通过对大自然不断的探索,从“荷叶效应”发现超疏水现象,进而发现构成超疏水表面的两个关键因素是微纳米结构和低表面能<sup>[5]</sup>。超疏水被应用于自清洁、抗菌、油水分离、防腐和疏冰等<sup>[6-11]</sup>多个方面。一些研究表明<sup>[12]</sup>,超疏水表面可以延长结冰时间、降低冰在表面的粘附力,从而起到抗冰疏冰的作用。目前制备超疏水表面的方法主要有静电纺丝法<sup>[13]</sup>、化学刻蚀<sup>[14]</sup>、相分离<sup>[15]</sup>、层层组装法<sup>[16]</sup>、涂层法<sup>[17]</sup>、激光雕刻法<sup>[18-20]</sup>等。其中激光雕刻法因技术成熟、加工精度高、微纳米结构可控性强等优点越来越被广泛使用。Yang等<sup>[21]</sup>通过皮秒激光对碳纤维增强复合材料(CFRP)进行简单的织构加工,再用氟烷基硅烷浸泡改性获得超疏水表面。在基底倾斜 $25^\circ$ , $-6^\circ\text{C}$ 的环境下,给原始CFRP表面和修饰后的CFRP分别滴水,15 min后原始CFRP已经被厚冰覆盖,修饰后的CFRP表面水滴依旧可以在其表面滑移且没有结冰。占彦龙等<sup>[22]</sup>通过飞秒激光技术在PTFE试样表面加工了不同尺寸的微条状沟槽结构,通过结冰检测系统对制备的超疏水表面防覆冰性能进行了研究,其中超疏水性能最好的PTFE试样表面的结冰时间是普通试样的5倍。且在 $-25^\circ\text{C}$ 的环境下,用水滴撞击表面,自始至终超疏水表面没有出现覆冰。课题组在先前的工作中,验证了通过激光加工在硅橡胶表面构建织构可以改善其疏水性能<sup>[23]</sup>,这里进一步研究织构化表面的抗冰性能。

本文通过激光雕刻技术在复合绝缘子伞裙表面定向加工一系列微米级尺寸的圆柱形织构,不经过任何化学试剂进行改性修饰,得到超疏水表面。分析低温环境下水滴在不同织构参数表面的覆冰粘附力、接触角、结冰时间以及对织构表面抗冰稳定性进行探究。

## 2 试验

### 2.1 试样制备

本文采用复合绝缘子伞裙(浙江省永固集团股份有限公司生产)制作试样。切取 $25\text{ mm}\times 25\text{ mm}$

和 $25\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 两种矩形块状,然后在超声波清洗机中用乙醇清洗干净,置阴凉处自然风干,待其彻底干燥后采用D80M多功能激光加工雕刻机(定位精度为 $100\text{ }\mu\text{m}$ ,激光波长为 $10.64\text{ }\mu\text{m}$ ,最大功率为 $60\text{ W}$ )在其表面上加工一系列圆柱形织构。表面织构结构由直径、间距、深度等参数确定,如图1所示。织构的深度取决于激光加工雕刻机的速度 $V$ 和功率 $P$ ,设定加工速度恒定为 $75\text{ mm/s}$ ,通过加工功率来改变织构深度。加工功率采用 $15, 25, 35, 45, 55\text{ W}$  5个等级,直径 $\Phi$ 和间距 $b$ 相同,尺寸从 $200\text{ }\mu\text{m}$ 到 $400\text{ }\mu\text{m}$ ,每组增加 $50\text{ }\mu\text{m}$ ,共5个等级。具体织构参数如表1所示。加工完成后的试样,再次通过乙醇清洗,干燥待用。

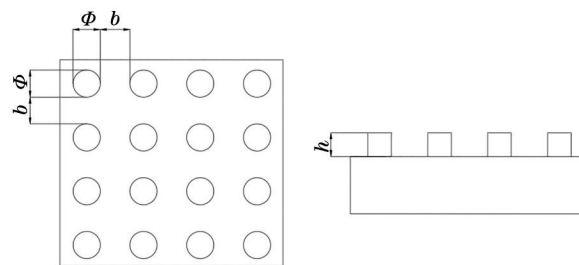


图1 圆柱形织构模型图

Fig. 1 Cylindrical texture model diagram

表1 织构表面加工参数

Table 1 Textured surface machining parameters

Width $\Phi / \mu\text{m}$	Spacing $b / \mu\text{m}$	Power $P / \text{W}$
200	200	
250	250	
300	300	15, 25, 35, 45, 55
350	350	
400	400	

### 2.2 试验设备

采用Nanovea三维非接触式表面形貌仪(美国NANOVEA公司生产)获得试样表面的三维形貌。采用场发射扫描电子显微镜(SEM, JSM-7500F, 日本)获得织构表面的形貌。织构表面的低温接触角在温度为 $0^\circ\text{C}$ 下用测量仪(JY-PHB, 河北承德金和仪器厂)测量体积为 $5\text{ }\mu\text{L}$ 的纯净水液滴获得。图2为自制粘附力测量装置,用于测试冰与试样表面的粘附力。不同温度下试样表面覆冰粘附力的测试过程为:首先将加工的试样3分别放置在 $-2\sim -18^\circ\text{C}$ 的恒温箱中 $10\text{ min}$ ,使其与恒温箱温度相同,然后取出试样平放在滑块2上,再将高 $10\text{ mm}$ 、直径 $6\text{ mm}$ 的透明圆柱塑料薄壁容器5直立放在试样上,将 $0.2\text{ mL}$ 的水滴滴入容器内,将试样与容器一起放入恒温箱,

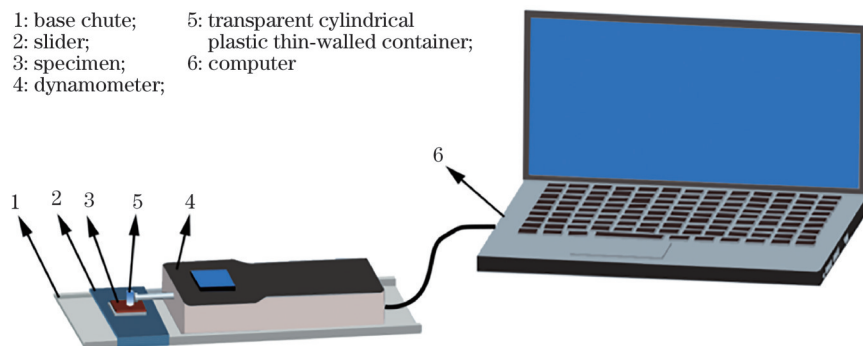


图 2 粘附力测量装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of an adhesion measuring device

在  $-2 \sim -18\text{ }^\circ\text{C}$  环境下放置 90 min, 水滴呈完全不透明状, 为完全结冰状态。之后迅速拿出试样, 放置在滑块 2 上, 滑动滑块 2, 使其与测力计 4 刚刚接触, 然后匀速慢慢滑动滑块, 直至冰块脱落。期间通过计算机 6 采集推力数据, 从而得到试样表面覆冰粘附力信息。以下试验, 若没有特指不同环境温度, 粘附力的测试均是在  $-10\text{ }^\circ\text{C}$  的环境下测量。另外, 采用

高速摄像机 (3F01-200FPS, 合肥富煌君达高科信息技术有限公司) 记录水滴的凝结-融化现象。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 结构表面形貌分析

根据前期研究可知, 织构尺寸为  $350\text{ }\mu\text{m}$  时, 硅橡胶表面接触角相对最大<sup>[24]</sup>。图 3(a)~(e) 为尺寸

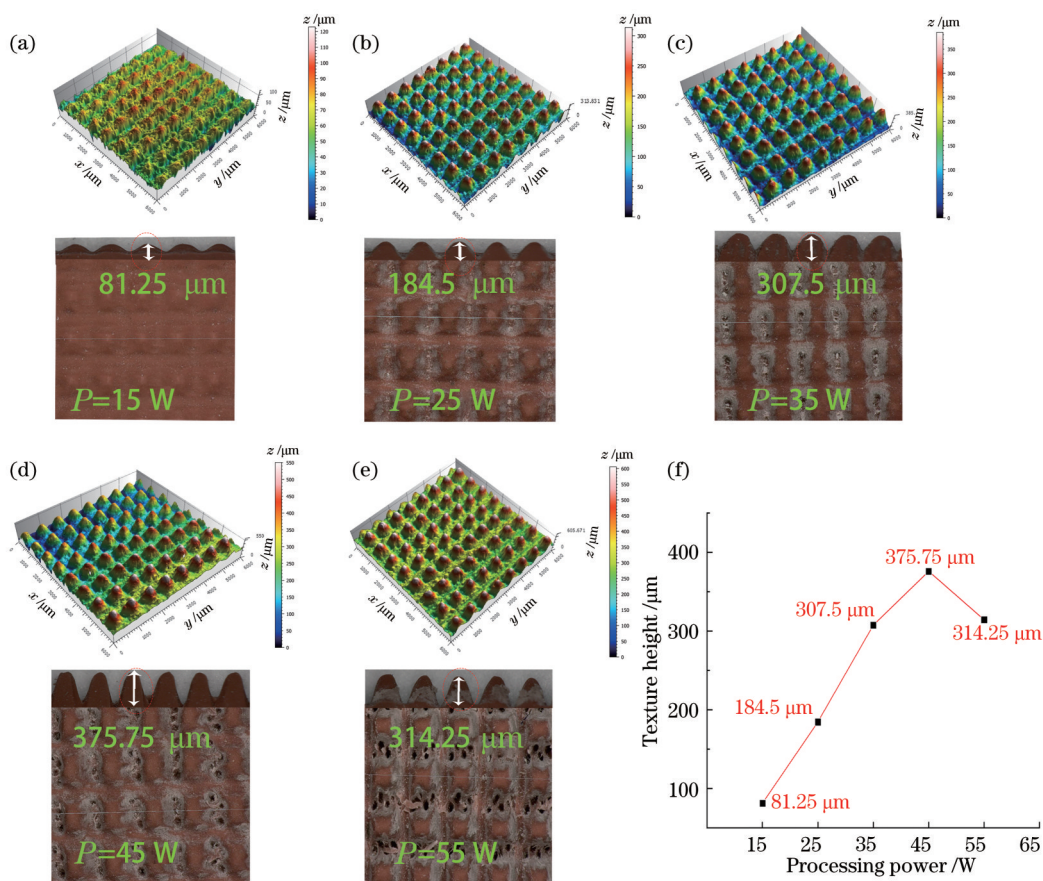


图 3 经过激光加工的硅橡胶表面三维形貌图及超景深扫描图。(a) 15 W; (b) 25 W; (c) 35 W; (d) 45 W; (e) 55 W; (f) 加工功率与织构深度的关系曲线

Fig. 3 Three-dimensional topography and ultra-depth of field scan of the surface of the silicon rubber processed by laser. (a) 15 W; (b) 25 W; (c) 35 W; (d) 45 W; (e) 55 W; (f) relationship between processing power and texture depth



参数  $\Phi=b=350\ \mu\text{m}$  时,加工功率  $P$  为 15、25、35、45、55 W 五个等级的织构化硅橡胶试样表面的三维形貌图和超景深扫描图,可以很清楚的看出加工的试样织构与设计的圆柱形织构表面基本相似,从而也验证了激光微加工的可行性。通过表面超景深扫描断面图可以观察到,初始时,随着激光功率的增大,织构深度不断增大,当加工功率超过 45 W 后,织构深度下降,具体深度如图 3(f) 所示。最开始加工功率为 15 W 时,硅橡胶表面出现规则的圆形织构,当功率增加至 25 W 后,硅橡胶表面开始出现烧结孔洞且伴随着白色粉状物质,当增加至 35 W 时,表面有着较少的烧结孔洞以及合适的织构表面,一直到功率为 45 W,织构的深度都随着功率的增加而加深,当功率为 55 W 时,由于高温烧结,表面产生大量孔洞,一些烧结产物堆积在表面上反而减小了织构深度。

图 4(a)~(e) 为尺寸参数  $\Phi=b=350\ \mu\text{m}$ ,加工功率  $P$  为 15、25、35、45、55 W 五个等级织构表面放大 5000 倍 SEM 微观形貌图。可见,通过五个不同等级的加工功率加工的表面都得到了微纳米二级结构。纳米结构的生成是由于激光加工微米结构过程中,撕裂硅橡胶而伴随产生的。随着加工功率的增加,表面的微纳米结构的个数也随之增加,几百纳米的颗粒分布在微米结构周边。微纳米结构簇拥在一起,形成“花瓣”结构,使表面粗糙度更大。不同微纳米结构之间存在微米级别的孔洞,当加工功率在 45 W 时,表面因高温产生的孔洞越来越多,“花瓣”之间的缝隙越来越大。当加工功率为 55 W 时,微纳米结构之间的缝隙达到最大,微纳米结构则变得稀疏。微纳米二级结构的缝隙可以储存空气,形成空气垫从而减少水滴与硅橡胶表面的接触面积,硅橡胶是低表面能物质,为超疏水表面提供基础。

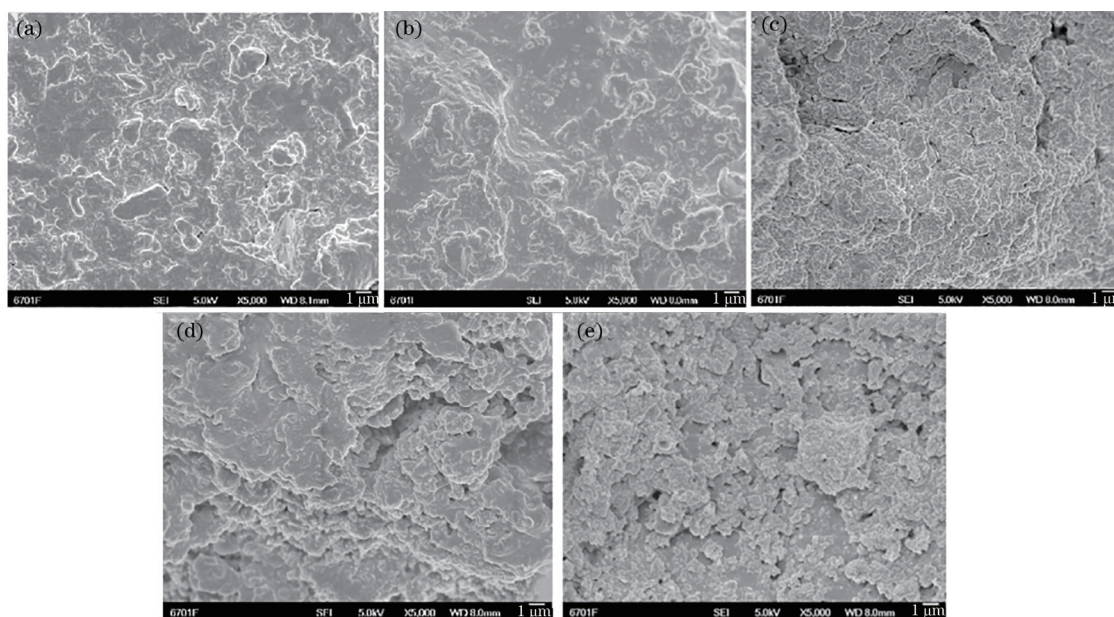


图 4 经过激光加工的硅橡胶 SEM 微观形貌图。(a) 15 W; (b) 25 W; (c) 35 W; (d) 45 W; (e) 55 W

Fig. 4 SEM microscopic images of silicon rubber processed by laser. (a) 15 W; (b) 25 W; (c) 35 W; (d) 45 W; (e) 55 W

### 3.2 织构参数对覆冰粘附力的影响

为研究表面织构参数对覆冰粘附力的影响,通过恒定加工功率( $P=35\ \text{W}$ )改变织构尺寸参数以及恒定尺寸参数( $\Phi=b=350\ \mu\text{m}$ )改变加工功率两个方面探讨了不同织构化试样表面接触角与覆冰粘附力的变化,如图 5 所示。图 5(a) 中当尺寸参数为  $\Phi=b=350\ \mu\text{m}$  时,接触角最大为  $150.5^\circ$ ,形成了超疏水表面,随后当尺寸参数达到  $400\ \mu\text{m}$  时,接触角骤减,粘附力骤增。图 5(b) 中功率为 25 W 和 35 W

的接触角相近,但是 35 W 的覆冰粘附力更低;35 W 和 55 W 有着相似的织构深度如图 3(f) 所示,且覆冰粘附力大小也相似,但是由于激光加工功率过大,导致高温烧结,孔洞过多,从而降低了其接触角。试样表面的覆冰粘附力总体上随着接触角的增大而减少。综合而言,加工功率为 35 W,尺寸参数为  $350\ \mu\text{m}$  时的圆柱形织构试样表面有最大接触角和最小覆冰粘附力,疏冰性能最佳。

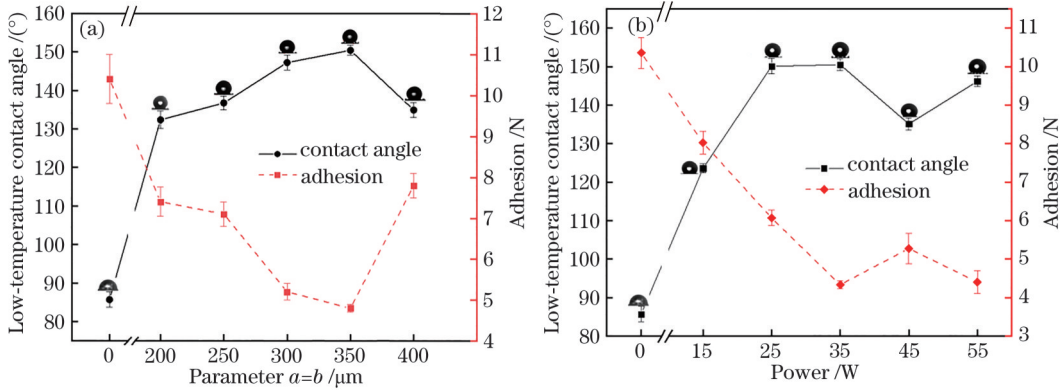


图 5 不同试样表面在 0 °C 时的接触角和覆冰粘附力的变化。(a) 改变尺寸; (b) 改变加工功率

Fig. 5 Changes of contact angle and ice coating adhesion of different sample surfaces at 0 °C. (a) Change the size; (b) change the processing power

### 3.3 覆冰工况对织构覆冰粘附力的影响

表面覆冰粘附力是除冰难易的关键指标,覆冰温度、接触面积以及覆冰厚度对粘附力都有影响。为了研究接触面积对覆冰粘附力的影响,将直径分别为 0.5 cm、1 cm 和 2 cm 的透明圆柱塑料薄壁容器分别放在加工功率为 35 W 不同织构尺寸的试样表面上,滴入液滴使所有容器内液面高度为 0.2 cm,然后在 -10 °C 的恒温箱内冷却 90 min 后,快速测量其粘附力。图 6 为不同覆冰面积下的粘附力与织构尺寸参数的关系图,由图 6 可知,随着覆冰接触面积增大,粘附力也随之增加,且经过加工的试样表面的覆冰粘附力远远低于原始表面,疏冰效果更好。

为研究环境温度对覆冰粘附力的影响,测试了不同试样在不同温度下的覆冰粘附力。图 7(a) 为织构尺寸参数为 350  $\mu\text{m}$ ,不同加工功率的试样表面的覆冰粘附力随环境温度变化图,由图 7 可知,随着环境温度的降低,覆冰粘附力随之增加;原始无织构试样表面的覆冰粘附力总是高于结构化表面,其

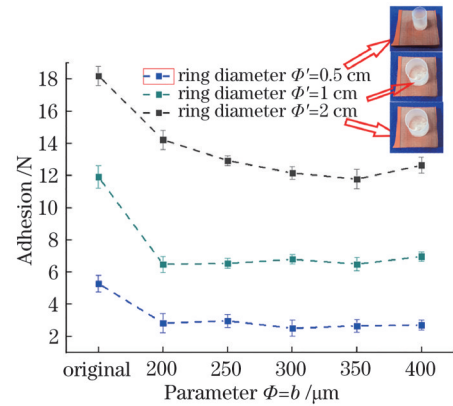


图 6 不同覆冰面积下粘附力与试样尺寸参数的关系图

Fig. 6 Relationship between adhesion force and sample size parameters under different icing areas

中当加工功率为 35 W 时的试样表面覆冰粘附力相对较低。

为研究覆冰厚度对织构表面覆冰粘附力的影响,将直径为 1 cm 的透明圆柱塑料薄壁容器分别放在织构尺寸参数为 350  $\mu\text{m}$  时不同加工功率的试样

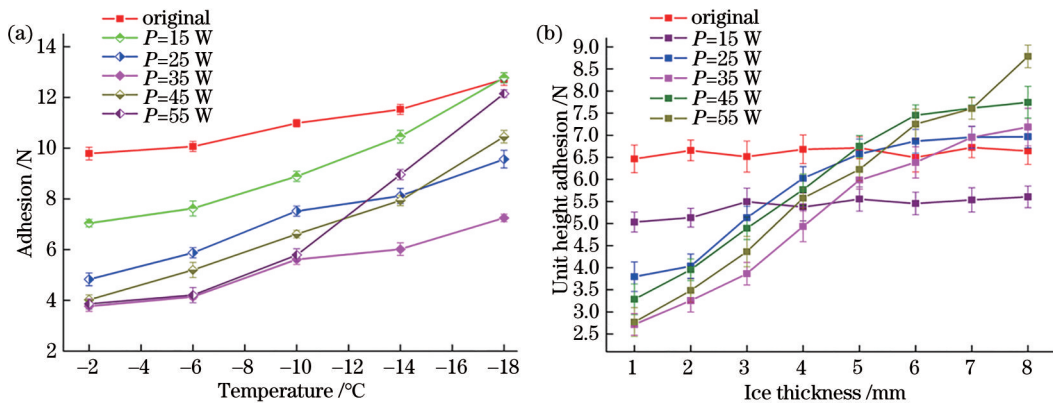


图 7 试样表面覆冰粘附力随环境温度及覆冰厚度的变化图。(a) 环境温度; (b) 覆冰厚度

Fig. 7 Change of surface ice coating force with ambient temperature and ice thickness. (a) Ambient temperature; (b) ice thickness



表面上,将水滴入容器内,使液面高度分别达到1~8 mm,间隔1 mm,得到8个不同厚度覆冰,然后在-10℃的恒温箱内放置90 min,使水滴呈完全不透明状,快速拿出后测量其覆冰粘附力,然后用测得的粘附力除以冰厚得到单位覆冰粘附力。

图7(b)为尺寸参数为350 μm时,不同加工功率织构化表面单位覆冰粘附力与覆冰厚度的关系曲线,由图可以看出,原始表面和功率为15 W的织构表面也即无织构和织构深度较浅时试样表面的覆冰粘附力变化较小。当覆冰厚度小于5 mm时各织构表面的覆冰粘附力都是小于原始表面的,但是当覆冰厚度超过5 mm以后,织构表面的覆冰粘附力逐渐大于原始表面。其原因是当初始水柱高度增加,质量增大,单位面积上承受的压力增大,从而使水滴“压入”织构的缝隙里挤出了空气,结冰时与缝隙产生“互锁”效应,从而增加了覆冰粘附力。实际应用中,若液滴在表面不积聚过多则不会影响覆冰粘附力。

### 3.4 织构化硅橡胶表面对液滴凝结-融化特性的影响

凝结和融化是水的相变过程,凝结时间越长,表面抗冰性能越强,融化滑落时间越短,疏冰性能越好。图8为水滴在加工功率为35 W时的不同尺寸参数的试样表面凝结时间随环境温度变化图。可以发现,水滴在织构化试样表面相较于原始表面有更好的延迟凝结现象。其中当织构尺寸参数为 $\Phi=b=350\ \mu\text{m}$ 时,液滴在其表面的凝结时间最长;但是随着环境温度的降低,液滴在织构化表面的凝结时间也随之缩短。当环境温度达到-20℃时,水

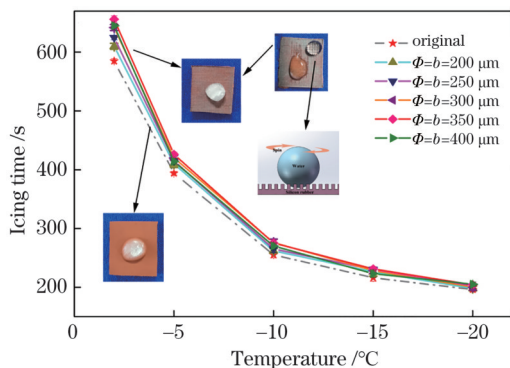


图8 水滴在不同尺寸参数的试样表面凝结时间随环境温度变化图

Fig. 8 Icing time of water droplets on surface of samples with different size parameters varies with ambient temperature

滴在织构化试样表面与原始无织构表面的凝结时间基本相同。可见,当环境温度高于-20℃时,硅橡胶表面织构化对水滴凝结有着一定的延长作用,但是当环境温度在低于-20℃时,织构化表面对延迟结冰起到的作用不大。

覆冰在材料表面上的融化滑移特性也是评判疏冰性能的一个指标,本文通过覆冰在室温下融解滑移时间来研究不同织构试样表面的疏冰性能。首先,将无织构及尺寸参数为350 μm不同加工功率的试样平放入-10℃的恒温箱内冷却10 min,然后分别在各试样表面滴0.2 mL液滴,90 min后水滴成完全不透明状,迅速拿出到7℃左右的室温下,使试样倾角为20°,通过高速相机记录冰粒的滑落过程。

图9为冰粒在不同试样表面滑移过程图,记录了冰粒从拿出至滑出试样外的时间。由图9可知,在原始表面、加工功率为15 W和25 W的试样表面,冰粒直到完全融化都未滑落,在加工功率为35 W、45 W和55 W的试样表面都可滑落。冰粒在加工功率为35 W和45 W的试样表面融化开始下滑的时间和滑落时间比较相近,开始滑落时间分别为475.1 s和463.8 s,滑落时间分别为1.5 s和1.3 s,且滑落后都只有非常微小的液滴残留。冰粒在加工功率为55 W的试样表面融化滑落时间相对较长,且覆冰滑落后残留有较多微小液滴。该试验表明,经过激光加工的织构化表面可以降低硅橡胶表面覆冰粘附力,一旦温度升高覆冰底部融化,覆冰可快速脱离试样表面,其中加工功率为35 W和45 W时融化滑移特性较好。

### 3.5 疏冰稳定性

硅橡胶织构化表面若要长时间应用于恶劣的工作环境,需要具有一定的抗磨损能力,本文对原始无织构及织构参数为 $\Phi=b=350\ \mu\text{m}$ 、 $P=35\ \text{W}$ 的试样进行了一系列摩擦试验。将试样表面在200 g砝码压力下放置在1000目砂纸上进行循环摩擦试验,然后再进行接触角和覆冰粘附力测试。图10(a)和(b)为0℃时试样表面接触角和覆冰粘附力随摩擦次数的变化图。由图可知,随着摩擦次数的增加,所有试样表面的覆冰粘附力都随之增加。原始表面和织构化表面的接触角变化趋势相反,织构化表面接触角缓慢降低,当摩擦50次以后从超疏水状态变为疏水状态,原始表面在摩擦50次后接触角逐渐增大,疏水性提高。在前50次摩擦试验期间,织构表面的覆冰粘附力只有轻微的增加;当摩

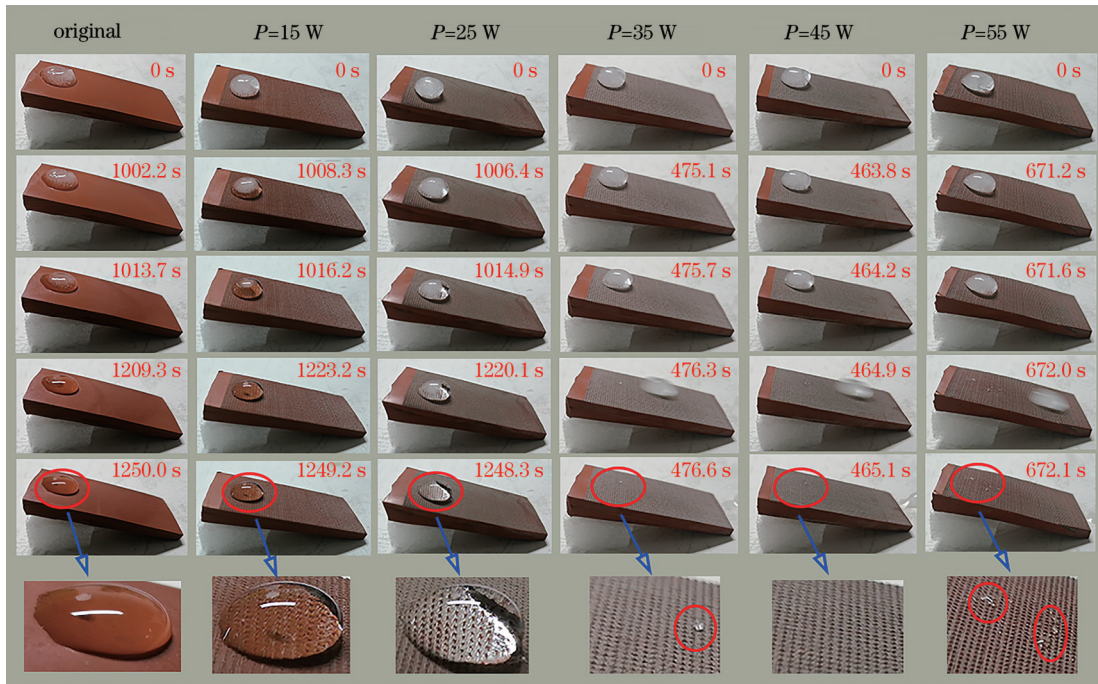


图 9 冰粒在倾斜 20° 的试样表面融化滑移过程图

Fig. 9 Melting and sliding process of ice particles on the surface of a 20° inclined sample

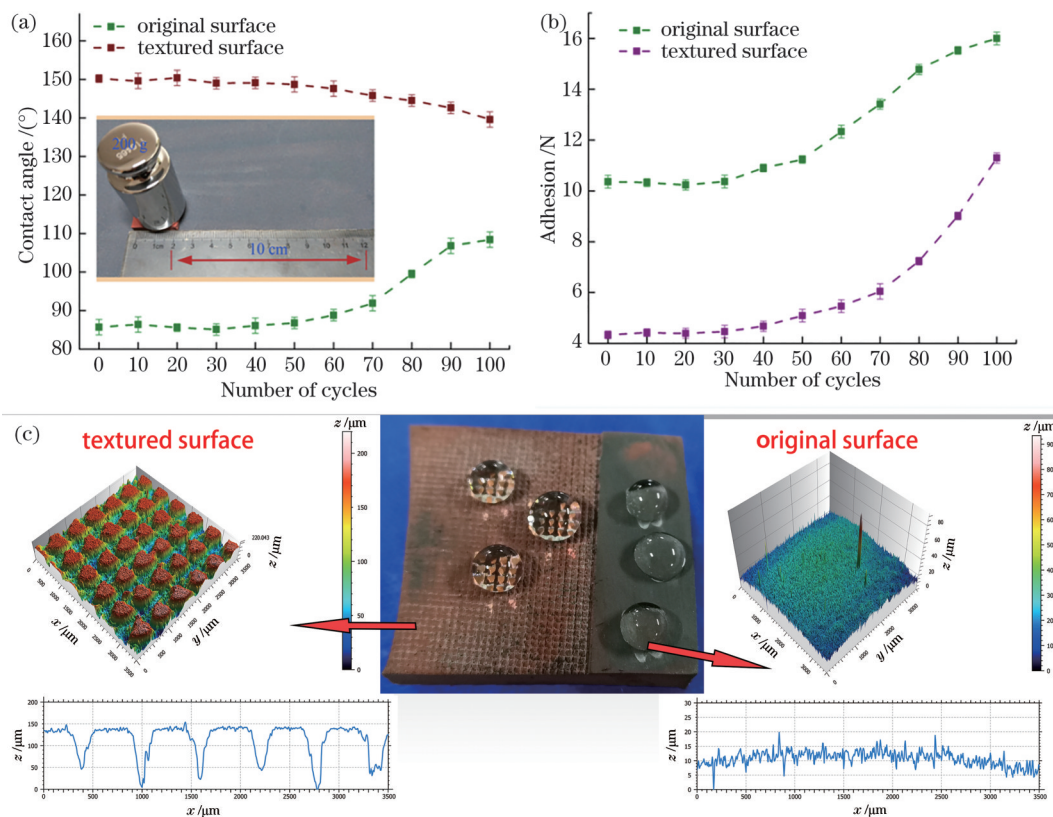


图 10 在 0 °C 时试样表面接触角和覆冰粘附力随摩擦次数的变化图及摩擦后的三维形貌图。(a) 接触角变化；(b) 粘附力变化；(c) 摩擦后的三维形貌图

Fig. 10 Variation diagram of sample surface contact angle and ice coating adhesion force with friction numbers at 0 °C and three-dimensional morphology diagram after friction. (a) Change in contact angle; (b) changes in adhesion; (c) three-dimensional topography after friction



擦次数超过 50 次后,覆冰粘附力明显增大,但依旧远远小于原始表面。图 10(c)为试样表面摩擦 100 次后的三维形貌图。由图可知,经过 100 次的摩擦后,织构试样表面的圆柱形织构仅仅被磨掉了一点点,依旧有着良好的疏水性能。原始表面增加了不规则的划痕,可容纳一定量的空气,从而提高了原始表面的接触角。

## 4 结 论

通过激光雕刻技术在硅橡胶试样表面加工不同尺寸的圆柱形微织构,与原始表面相比,织构化表面具有较大的低温接触角和较小的覆冰粘附力,其中当加工功率  $P=35\text{ W}$  且织构参数为  $\Phi=b=350\text{ }\mu\text{m}$  时,试样表面低温接触角最大,覆冰粘附力最小。

环境温度降低和覆冰接触面积的增加,都会使试样表面覆冰粘附力增加。在不同环境温度下,原始表面的覆冰粘附力总是大于织构化表面;当表面液滴积聚厚度超过 5 mm 后,织构化表面的单位覆冰粘附力大于原始表面。

当温度不低于  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,织构化表面相较于原始表面有着更好的延迟结冰性能;当加工功率超过 35 W,织构深度大于  $307.5\text{ }\mu\text{m}$  时,随着环境温度升高,冰粒底部融化后快速滑落脱离织构表面。

加工功率  $P=35\text{ W}$  且织构参数为  $\Phi=b=350\text{ }\mu\text{m}$  时的织构表面具有良好的综合特性,且在经过 50 次循环磨擦试验后,试样表面覆冰粘附力变化较小,表明该织构化表面具有一定的抗磨损能力,以及稳定的疏冰性,可反复使用,有良好的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Yuan J H, Jiang X L, Yi H, et al. The present study on conductor icing of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(1): 6-9.  
苑吉河, 蒋兴良, 易辉, 等. 输电线路导线覆冰的国内外研究现状[J]. 高电压技术, 2004, 30(1): 6-9.
- [2] Yan B, Xu Y Y. Research on ice-covering schemes of fan blades[J]. South China Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 46.  
晏波, 徐燕燕. 风机叶片抗覆冰方案的研究[J]. 南方农机, 2015, 46(1): 46.
- [3] Skrimpas G A, Kleani K, Mijatovic N, et al. Detection of icing on wind turbine blades by means of vibration and power curve analysis[J]. Wind Energy, 2016, 19(10): 1819-1832.
- [4] Jiang H, Wang H T, Liu G, et al. Light-weight, flexible, low-voltage electro-thermal film using graphite nanoplatelets for wearable/smart electronics and deicing devices[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 699: 1049-1056.
- [5] Guo Z G, Zhou F, Liu W M. Preparation of biomimetic superhydrophobic silica film by sol-gel technique[J]. Acta Chimica Sinica, 2006, 64(8): 761-766.  
郭志光, 周峰, 刘维民. 溶胶凝胶法制备仿生超疏水性薄膜[J]. 化学学报, 2006, 64(8): 761-766.
- [6] Söz C K, Yilgör E, Yilgör I. Simple processes for the preparation of superhydrophobic polymer surfaces [J]. Polymer, 2016, 99: 580-593.
- [7] Xiao F, Yuan S J, Liang B, et al. Superhydrophobic CuO nanoneedle-covered copper surfaces for anticorrosion [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(8): 4374-4388.
- [8] Si Y F, Guo Z G, Liu W M. A robust epoxy resins @ stearic acid-Mg(OH)<sub>2</sub> micronanosheet superhydrophobic omnipotent protective coating for real-life applications [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8 (25): 16511-16520.
- [9] Lee C, Kim C J. Underwater restoration and retention of gases on superhydrophobic surfaces for drag reduction[J]. Physical Review Letters, 2011, 106(1): 014502.
- [10] Amini S, Kolle S, Petrone L, et al. Preventing mussel adhesion using lubricant-infused materials[J]. Science, 2017, 357(6352): 668-673.
- [11] Yilgör E, Yilgör I. Silicone containing copolymers: synthesis, properties and applications[J]. Progress in Polymer Science, 2014, 39(6): 1165-1195.
- [12] Hong S Q, Wang R T, Huang X B, et al. Facile one-step fabrication of PHC/PDMS anti-icing coatings with mechanical properties and good durability[J]. Progress in Organic Coatings, 2019, 135: 263-269.
- [13] Wang S. Preparation of functional superhydrophobic materials by electrospinning[D]. Changchun: Jilin University, 2013.  
王帅. 静电纺丝法制备功能性超疏水材料[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
- [14] Feng L, Jiang L. Preparation and investigation of super-hydrophobic nanoscale interfacial materials[J]. Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Science, 2005, 22(1): 106-109.  
冯琳, 江雷. 超疏水性纳米界面材料的制备与研究 [J]. 中国科学院研究生院学报, 2005, 22(1):



- 106-109.
- [15] Wang F C, Li C R, Lü Y, et al. Reducing ice accumulation on aluminum conductor by applying superhydrophobic coating[C]//2009 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, October 18-21, 2009, Virginia Beach, VA, USA. New York: IEEE Press, 2009: 311-314.
- [16] Duan Z F, Zhao Z, Luo D, et al. A facial approach combining photosensitive sol-gel with self-assembly method to fabricate superhydrophobic TiO<sub>2</sub> films with patterned surface structure[J]. Applied Surface Science, 2016, 360: 1030-1035.
- [17] Huang C, Wang F Y, Wang D H, et al. Wear-resistant and robust superamphiphobic coatings with hierarchical TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> composite particles and inorganic adhesives[J]. New Journal of Chemistry, 2020, 44(4): 1194-1203.
- [18] Pan R, Zhang H J, Zhong M L. Ultrafast laser hybrid fabrication and ice-resistance performance of a triple-scale micro/nano superhydrophobic surface[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(2): 0202009.  
潘瑞, 张红军, 钟敏霖. 三级微纳超疏水表面的超快激光复合制备及防除冰性能研究[J]. 中国激光, 2021, 48(2): 0202009.
- [19] Li J C, Chen Z D, Han D D, et al. Laser processing of polyvinylidene fluoride with superhydrophobicity [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(2): 0202002.  
李纪超, 陈招弟, 韩冬冬, 等. 超疏水聚偏氟乙烯的激光加工[J]. 中国激光, 2021, 48(2): 0202002.
- [20] Dong S Y, Ji L F, Gang X. Picosecond laser etched super-hydrophobic micro/nano-structures on polymer surfaces[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111411.  
董世运, 季凌飞, 刚肖. 皮秒激光制备超疏水聚合物微纳结构[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 111411.
- [21] Yang C J, Chao J Q, Zhang J C, et al. Functionalized CFRP surface with water-repellence, self-cleaning and anti-icing properties[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 586: 124278.
- [22] Zhan Y L. Preparation of superhydrophobic surface by laser technology and research on its anti-icing performance[D]. Huangshi: Hubei Normal University, 2018.  
占彦龙. 激光技术制备超疏水表面及其防覆冰性能的研究[D]. 黄石: 湖北师范大学, 2018.
- [23] Zhao M Y, Tian S, Wu Y, et al. Effects of texture parameters on surface hydrophobicity of silicone rubber composite insulator[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(1): 12-21.  
赵美云, 田森, 吴阳, 等. 织构参数对复合绝缘子硅橡胶表面疏水性能的影响[J]. 中国表面工程, 2019, 32(1): 12-21.
- [24] Zhao M Y, Yin Y H, He Q, et al. Anti-icing capability of textured silicone rubber surfaces via laser processing[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2021, 36(8): 979-986.