

基于光刻法的复合织构硅橡胶表面的抗冰性能

赵美云^{1,2}, 杨帆², 张小龙¹, 殷云辉², 赵彦², 赵新泽^{1*}¹三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 443002²三峡大学机械与动力学院, 湖北 宜昌 443002

摘要 制备超疏水表面是一种新型的抗冰方法。为提高硅橡胶复合绝缘子表面的抗冰性能,采用 D80M 多功能激光雕刻机进行加工,得到不同类型、不同尺寸参数的复合织构绝缘子伞裙表面。通过测试不同织构表面绝缘子的接触角,得到疏水性能最佳的表面织构类型及尺寸参数。同时,以延缓水滴在试样表面发生结冰的时间为评价标准,利用可编程恒温恒湿试验机设定环境温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,测试水滴在不同织构化试样表面的凝结时间。结果表明:表面织构化明显提升了复合绝缘子伞裙表面的疏水性,使其达到超疏水性;尺寸和间距均为 $350\text{ }\mu\text{m}$ 的正方形+圆形织构的疏水性和抗覆冰性能最优,且抗冰耐久性良好。

关键词 激光技术; 表面加工; 激光雕刻; 复合绝缘子; 复合织构; 超疏水表面; 抗覆冰

中图分类号 TG665

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL202249.1002603

1 引言

硅橡胶复合绝缘子因具有良好的电绝缘性、优异的抗污染特性以及低维护成本等优点,被广泛用于现代高压输电线路以及一些高压传动部件的机械中^[1-4]。由于输电线路经常处于寒冷、污染严重等工况下,绝缘子的抗覆冰能力影响了输电线路的安全性。超疏水表面作为一种新的抗覆冰方法,具有能耗低、质量轻、结构简单的优点^[5-6],在高压输电线路减少覆冰闪络与积污闪络以及倒塔事故等方面展现出良好的应用前景。

当前制备超疏水表面的途径主要有两种:一种是以低表面能物质为基体,在其表面进行加工形成微纳结构,采用的方法主要有光刻法^[7-8]、模板法^[9]等;另一种是采用低表面能物质对微纳结构表面进行修饰,所采用的低表面能材料主要为含氟或有机硅的高聚物,采用的处理方法主要有化学气相沉积(CVD)^[10]、电沉积^[11]、相分离^[12]、静电纺丝^[13]等。涂层法在制备超疏水表面中应用最广泛,但是涂层的机械稳定性和抗冲击性较差,在恶劣工况下,涂层

容易脱落,失去超疏水性,因此在工作条件恶劣的复合绝缘子上的应用十分有限。许多学者探索通过加工表面微织构的方法来实现超疏水性:Han 等^[14]采用超快激光和化学浴处理结合的方法先在铜板上制备出三位再入式 CuO 纳米分层表面,再通过全氟癸基三甲氧基硅烷改性,其表面的接触角可达到 157.7° ,滚动角为 6° ,所获得的材料具有超疏水性;潘瑞等^[15]先通过超快激光在铝合金表面加工三级微纳表面,再进行氟化改性处理获得超疏水表面,且通过疏冰试验发现,冰在原始铝合金表面的黏附力是其在经过处理的超疏水表面的 40 倍;Alamri 等^[16]在非平面的 Ti6Al4V 翼板上采用直接激光干涉图案方法制备出分级的微纳米结构,通过全氟聚醚化合物降低其表面能,获得超疏水表面,该表面在结冰风洞试验中与未经处理的 Ti6Al4V 翼板相比,除冰电热功率降低了 80%,保持表面无冰所需的加热功率降低了 60%。前人的研究工作中,在使用激光加工微纳结构表面后,采用化学试剂降低表面能,从而获得超疏水表面。本文使用的硅橡胶复合绝缘子伞裙材料本身具有低表面能特性,不需要经过化

收稿日期: 2021-11-24; 修回日期: 2021-12-19; 录用日期: 2021-12-27

基金项目: 国家自然科学基金(52005292)

通信作者: *xzzhao@ctgu.edu.cn

学试剂改性,且利用激光雕刻机进行尺度较大的微米级加工的效率比进行纳米级加工的效率更高,构筑的微结构同样可以得到有效的超疏水表面,因此利用激光雕刻机在硅橡胶表面制备超疏水表面具有一定的应用潜能。

本文采用激光雕刻的方法在复合绝缘子伞裙表面加工一系列不同类型和尺寸的复合织构,以延缓结冰时间为评判标准,测试了织构化试样的抗冰性及持久性。研究成果对用于高压输电线路的超疏水复合绝缘子的设计制造有一定的参考价值。

2 试 验

2.1 试样预处理

将硅橡胶复合绝缘子伞裙切成 $2.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$ 的正方形小块试样备用,并将试样在超声波清洗机中用酒精溶液清洗 10 min,置于干燥阴凉处,待其

彻底自然干燥后装好等待加工。

2.2 微结构表面制备

采用 D80M 多功能激光雕刻机(激光器参数如下:定位精度为 $100\ \mu\text{m}$,激光波长为 $10.64\ \mu\text{m}$,最大平均功率为 60 W)在试样表面加工出所设计的微结构表面。选取正方形、圆形、正三角形 3 种形状,使其两两组合,得到 3 组不同类型的复合织构,如图 1 所示。选择相等的织构尺寸(宽度或直径)和间距参数,并选取 200, 250, 300, 350, $400\ \mu\text{m}$ 5 个等级。激光雕刻机主要通过速度 v 和加工功率 P 来控制深度,本文通过控制加工功率 P 来改变深度。由前期研究^[17]可知,当加工功率为 35 W 时,硅橡胶织构表面的接触角最大。因此,本试验以 35 W 恒定功率加工表面织构,仅改变织构类型和尺寸(间距)。加工完成后,采用酒精溶液超声清洗 20 min 后用去离子水溶液清洗,自然干燥后贴上标签待用。

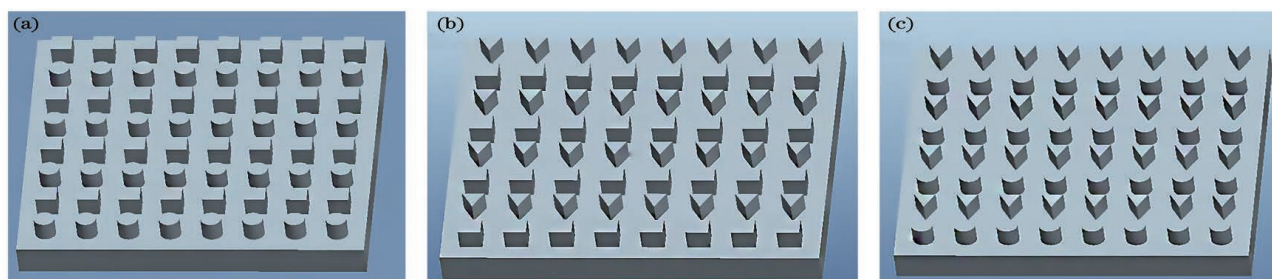


图 1 三种表面织构模型。(a)正方形+圆形;(b)正方形+三角形;(c)圆形+三角形

Fig. 1 Three surface texture models. (a) Sq+Ci; (b) Sq+Tr; (c) Ci+Tr

2.3 织构化表面形貌分析

采用 Nanovea 三维非接触式表面形貌仪(垂直分辨率为 8 nm,测量范围为 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm}$)、JSM7500F 型扫描电子显微镜观察织构表面三维形貌。图 2 所示为激光雕刻机加工后尺寸和间距都为 $350\ \mu\text{m}$ 的 3 种不同复合织构的试样表面三维形貌,图 2(a)所示为正方形+圆形(Sq+Ci)凸起结构,

图 2(b)所示为正方形+三角形(Sq+Tr)凸起结构,图 2(c)所示为三角形+圆形(Ci+Tr)凸起结构。从三维形貌图可以看到:各凸起织构高度基本相等,与设计形貌基本一致;凸起的排列很规则,且没有析出白色粉末以及烧蚀孔洞。

图 3 所示为尺寸和间距均为 $350\ \mu\text{m}$ 的正方形+圆形复合织构表面放大 500、2000 和 10000 倍后

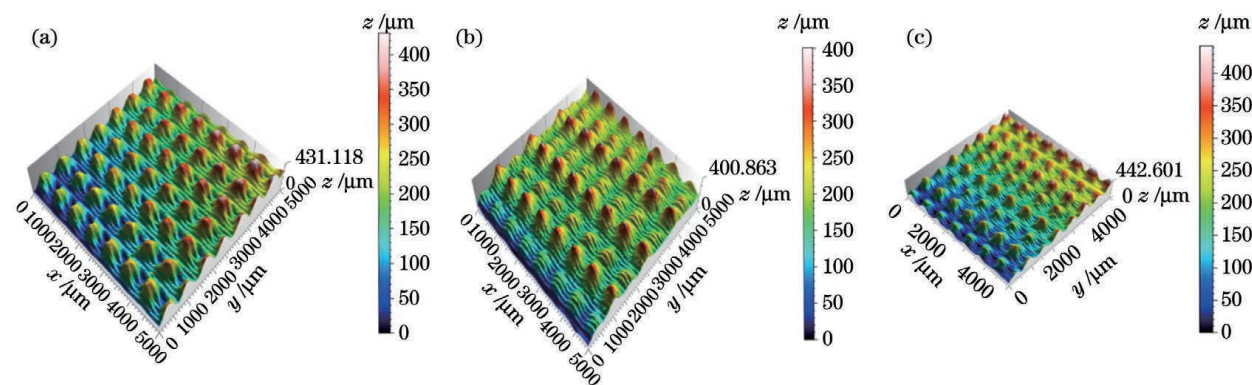


图 2 不同复合织构的表面三维形貌图。(a)正方形+圆形;(b)正方形+三角形;(c)圆形+三角形

Fig. 2 3D profiles of different complex texture surfaces. (a) Sq+Ci; (b) Sq+Tr; (c) Ci+Tr

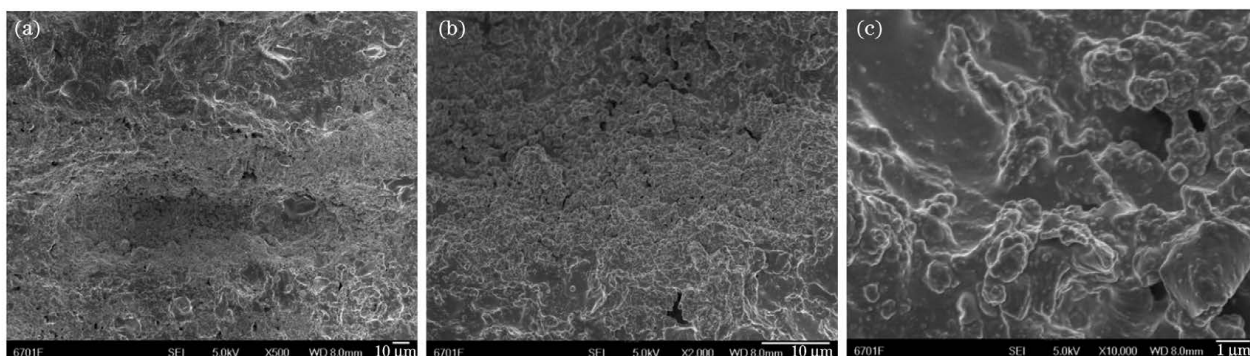


图 3 不同放大倍率下正方形+圆形织构表面 SEM 图。(a)500×;(b)2000×;(c)10000×

Fig. 3 SEM microtopographies of the textured surface of Sq+Ci under different magnifications. (a) 500×; (b) 2000×; (c) 10000×

的 SEM 微观形貌,可以清晰看到许多几百纳米尺度的凸起结构杂乱地分布在底部表面上,这是由激光加工撕碎硅橡胶产生的纳米结构,因此这些纳米凸起与微米级复合织构共同构成了微纳米复合结构。这些凸起之间充满了空气,能够撑起表面的水滴,使得水滴与织构表面的接触面积很小,且硅橡胶材料具有低表面能,使得水滴落在其表面时极易滑落,从而使加工后的试样具有较强的疏水性。当环

境温度降低时,此结构可以降低水滴与材料表面的热交换效率,在一定程度上延缓结冰进程。

3 结果与讨论

3.1 不同织构表面疏水性分析

采用 JY-PHB 型接触角测量仪测量试样表面的接触角和滚动角。图 4 所示为不同复合织构表面的接触角和滚动角的变化折线。

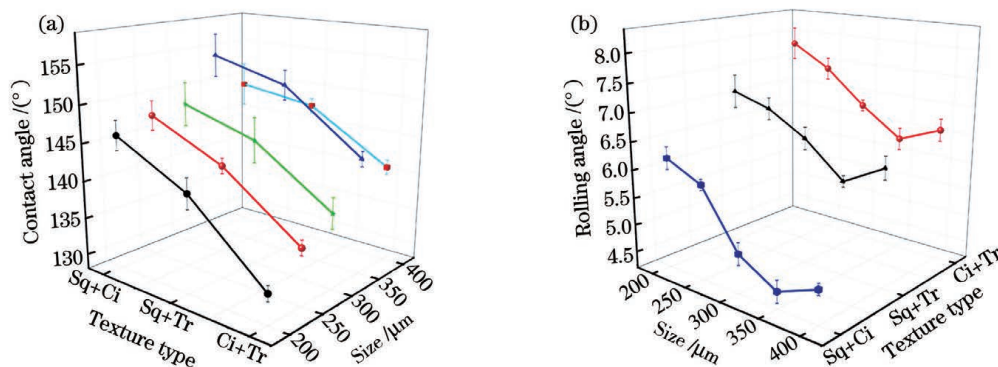


图 4 不同复合织构表面疏水性与尺寸参数的关系曲线。(a)接触角;(b)滚动角

Fig. 4 Relationships of hydrophobicity of different complex texture surfaces and size. (a) Contact angle; (b) rolling angle

由图 4 可知,3 种复合织构表面都具有较强的疏水性,不同复合织构对于每一种尺寸(间距)与织构接触角和滚动角的变化规律基本一致:无论尺寸、间距如何变化,Sq+Ci 型织构表面的接触角最大,滚动角最小;而对于不同的复合织构,当尺寸和间距为 350 μm 时接触角最大,滚动角最小,这证明其疏水性能最佳。由上述分析可知,本次试验的 3 种复合织构表面中,Sq+Ci 型织构表面在尺寸参数为 350 μm 时疏水性能最优,达到超疏水状态。

3 种表面的织构都是凸型织构,其疏水性出现细微差别主要是因为采用激光雕刻机加工的过程中 Sq+Ci 型织构更易加工,且加工效果最好。从图 3

所示织构的微观形貌可以看出,织构表面具有纳米级微小凸起,且凸起微团间距较均匀,水滴落在织构表面时,不易进入粒子之间的间隙,使得水滴基本处于浮在织构表面的状态。

疏水性随着织构尺寸和间距的增大而呈现出先增大后减小的变化趋势。由图 5 可知:当织构尺寸和间距较小时,织构间隙所储存的空气不足以支撑水滴,水滴进入织构间隙中,由于重力的作用,水滴直接坍塌在织构表面,此时织构表面对水滴产生一定的阻力,又因为水滴与织构表面之间具有黏附力,其在织构倾斜角度较大时依旧不会滑落,因此当织构尺寸和间距过小时,其接触角较小,滚动角较大;

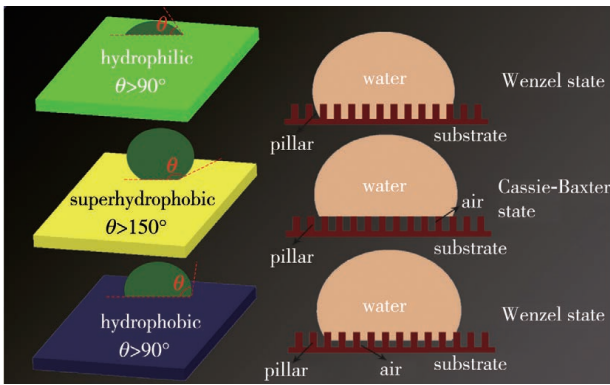


图 5 织构尺寸和间距对接触角和滚动角的影响机理
Fig. 5 Mechanism of the effects of weave size and spacing on contact angle and rolling angle

随着织构尺寸和间距慢慢增大至理想数值,织构间隙中的空气对水滴有着一定的支撑作用,表面张力使水滴能在织构表面保持完整形态,水滴和织构的接触面积较小,黏附力较小,易滑落,因此接触角会增大,滚动角减小;当织构尺寸和间距过大时,大量水滴进入织构间隙中,间隙由于液滴的密封而出现内外压差,此时水滴也会坍塌在织构表面,无法维持圆球形,接触角变小,滚动角相应增大。在本研究中,对于硅橡胶复合绝缘子伞裙材料,350 μm 是一个较为合适的尺寸和间距参数。

3.2 织构参数对试样表面覆冰特性的影响

延缓结冰是从时间尺度上延迟水滴的凝结,它是评判表面抗冰性能的一个非常重要的指标。本试验中对水滴凝结时间的判定如下:在低温下将 20 μL 水滴在试样表面,开始计时,当水滴呈完全不透明状,视为完全结冰状态,结束计时,该过程的时间即为水滴凝结时间。图 6 所示为 -10 °C 时水滴在不同尺寸、间距的 3 种复合织构表面的凝结时间。可以看到,水滴在不同类型织构表面的凝结时

间随着尺寸、间距的增大先延长再缩短,当尺寸和间距均为 350 μm 时,凝结时间最长,其中水滴在 Sq+Ci 型织构表面的凝结时间最长,达到 144 s,然后开始减小。Sq+Tr 型和 Ci+Tr 型织构也呈现相同的变化趋势,各织构参数的试样抗覆冰性能与其疏水性对应,对于疏水性优的试样,其抗覆冰性能也相对较好。

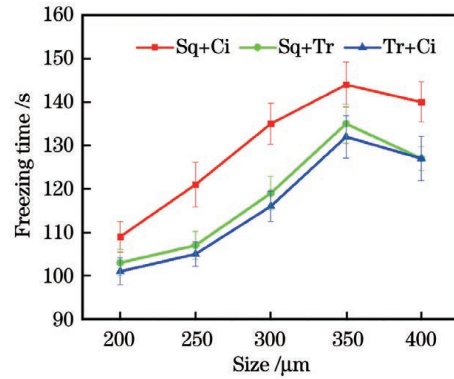


图 6 水滴在不同尺寸的 3 种复合织构表面的凝结时间
Fig. 6 Freezing time of water droplets on three complex texture surfaces with different sizes

图 7 所示为水滴在 -10 °C 下在原始无织构表面和 3 种尺寸参数均为 350 μm 的复合织构表面的凝结时间及低温接触角。原始表面的凝结时间为 72 s,而 3 种复合织构表面的凝结时间都超过 130 s,硅橡胶材料表面的覆冰性能经过激光雕刻加工后有了巨大提升。在 -10 °C 时,原始织构的接触角很小,仅为 53°,此时水滴坍塌在表面上,与表面的接触面积很大,相互之间的热交换很快,因此水滴在很短的时间内就凝结成冰。相反,3 种复合织构表面的接触角依旧在 100°左右,水滴与织构接触面积较小,凝结时间明显更长。由此可见,经过激光加工后的复合织构表面具有延缓结冰的作用。

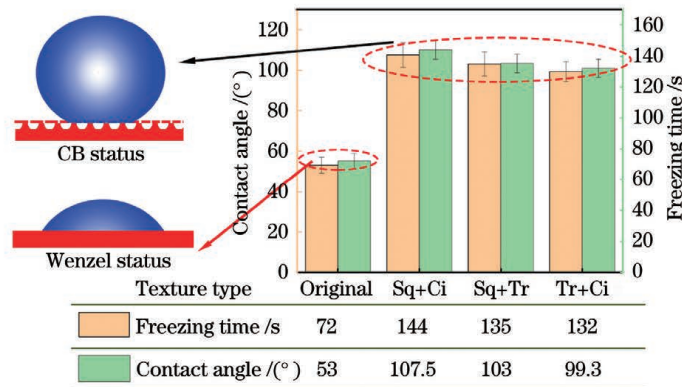


图 7 水滴在 -10 °C 下在原始表面和三种复合织构表面的凝结时间及低温接触角
Fig. 7 Freezing time and contact angle of water droplets on the original surface and three complex texture surfaces at -10 °C

覆冰黏附力的大小同样是衡量抗冰性能的关键指标,当环境温度升高时,覆冰黏附力越小,表面上的冰越容易脱落。本试验测试覆冰黏附力的过程为:首先,将加工的试样放置在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温箱中 10 min ,使其与恒温箱内温度相同;然后,将直径为 6 mm 的透明圆柱塑料薄壁容器直立放在试样上,再将 0.2 mL 水滴入容器内,在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下放置 90 min ,以保证水滴呈完全不透明的结冰状态;最后,迅速拿出试样放在冰柜中搭建好的平台上,匀速

推动测力计,直至冰块脱落,得到黏附力数据。图 8 所示为原始表面和 3 种尺寸参数均为 $350\text{ }\mu\text{m}$ 的复合织构表面的覆冰黏附力。原始表面在 72 s 后完全结冰,黏附力为 4.54 N ;而 3 种复合织构表面在完全结冰时的黏附力均在 2 N 以下。这是因为在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 3 种复合织构表面都达到了疏水状态,水滴“悬浮”在织构上,结冰时与织构表面的接触面积小,黏附力小;而水滴在原始表面的接触角小,与表面的接触面积大,导致其黏附力增加。

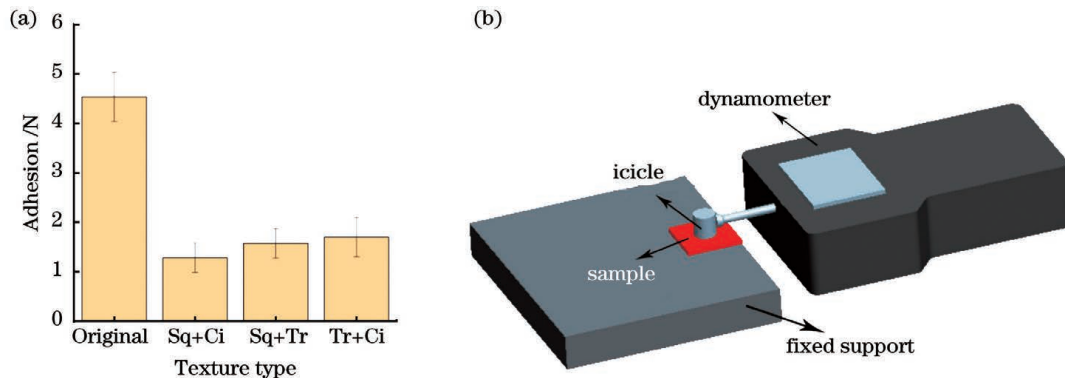


图 8 原始表面和 3 种复合织构表面在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下的黏附力及其测量装置模型。
Fig. 8 Adhesion of original surface and three complex texture surfaces at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ and adhesion measuring device model.

(a) Adhesion distribution; (b) measuring device model

3.3 温度对织构化试样表面抗冰性能的影响

环境温度是影响材料表面疏水性及抗冰特性的重要因素。图 9 所示为不同温度下液滴在原始表面和尺寸参数均为 $350\text{ }\mu\text{m}$ 的 3 种复合织构表面的接触角。由图 9 可知,不管试样表面是何种类型织构,表面接触角受环境温度影响的变化趋势大致相同:随着环境温度的升高,液滴在各表面的接触角增大,复合织构表面液滴接触角始终大于 90° ;当环境温度高于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,温度对接触角的影响不大,接触角变化较缓慢;当环境温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,温度对接触角的影响较大,接触角变化较为剧烈,此时环境温度越

低,材料表面疏水性能下降越快;同一温度下,Sq+Ci 型织构表面接触角最大,疏水性最好。从接触角测量结果可以看出,随着环境温度降低,尤其当温度低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,液滴逐渐坍塌在织构表面,液滴从 Cassie 状态向 Wenzel 状态转变,接触角变小,表观接触面积增大,从液滴重心到低温表面的距离减小,冰核形成的热力学势垒减小,从而加速了结冰过程,减弱了防冰效果。此时,相较于原始表面,复合织构试样间隙内仍保留一定的空气,接触角较大,液滴凝结成冰的时间较长,其中 Sq+Ci 型织构表面抗冰效果最好。

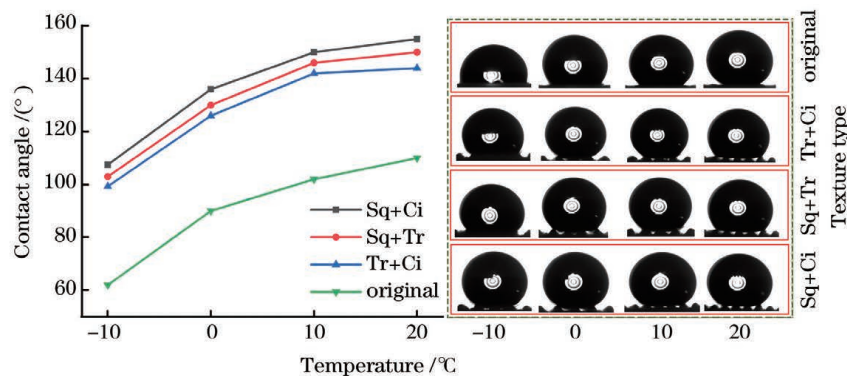


图 9 液滴在不同试样表面的接触角随温度变化曲线和光学图片

Fig. 9 Curves of contact angle on different sample surfaces changed with temperature and optical image

为了更准确地判断不同织构表面的抗冰性能,本试验测试水滴在不同温度下的各复合织构试样表面的凝结时间。选取尺寸参数均为 $350\ \mu\text{m}$ 的 3 种复合织构试样,分别测试液滴在 $-4\ ^\circ\text{C}$ 、 $-8\ ^\circ\text{C}$ 以及 $-12\ ^\circ\text{C}$ 下的凝结时间,结果如图 10 所示。可以看到,随着温度降低,水滴在不同表面的凝结时间都显著变短,其中, Sq+Ci 型织构表面相较于其他类型织构化表面有着更好的延迟结冰性能。同时,当环境温度从 $-4\ ^\circ\text{C}$ 降低到 $-8\ ^\circ\text{C}$ 时,水滴凝结时间从 355 s 降低到 187 s,凝结时间缩短了一半左右;当环境温度从 $-8\ ^\circ\text{C}$ 降低到 $-12\ ^\circ\text{C}$ 时,水滴在该试样表面的凝结时间从 187 s 降低到 129 s。上述结果说明环境温度的变化对试样表面覆冰性能的影响很大,但当温度降低到一定程度时,影响程度降低。可见,在外界温度相对较高($-4\ ^\circ\text{C}$)的情况下,3 种织构试样的覆冰性能均较优,随着温度下降,试样表面的覆冰性能急剧下降,但是在 $-12\ ^\circ\text{C}$ 时,经过织构化加工的试样表面凝结时间依然远大于原始试样表面的凝结时间,这证明经过激光雕刻加工后硅橡胶材料的覆冰性能比较优异,其在外界温度较低时仍有较好的延缓结冰的效果。

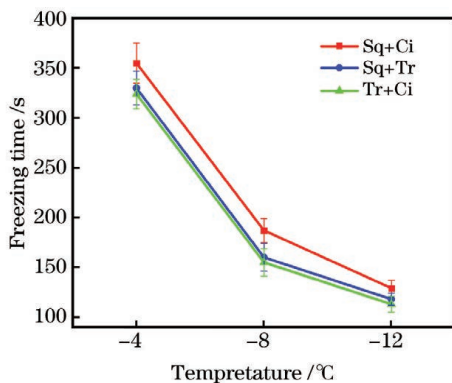


图 10 不同温度下水滴在 3 种最优织构表面上的凝结时间
Fig. 10 Freezing time of droplets on three optimal texture surfaces at different temperatures

3.4 抗冰耐久性分析

在实际工作环境中,绝缘子受到的磨损主要是由雨水在其表面流过或者覆冰脱落造成的。图 11 所示为尺寸和间距均为 $350\ \mu\text{m}$ 的 Sq+Ci 型织构试样表面在 $-10\ ^\circ\text{C}$ 的环境下经过 5、10、15、20 次覆冰除冰后的接触角及凝结时间变化曲线。可以看到,随着除冰次数的增加,试样表面的接触角有所减小,但减小幅度并不大。相较于第一次测试的接触角 154° ,20 次覆冰除冰后接触角为 150.9° ,仅减小了 3° 左右,经过多次覆冰除冰后试样表面依旧为超

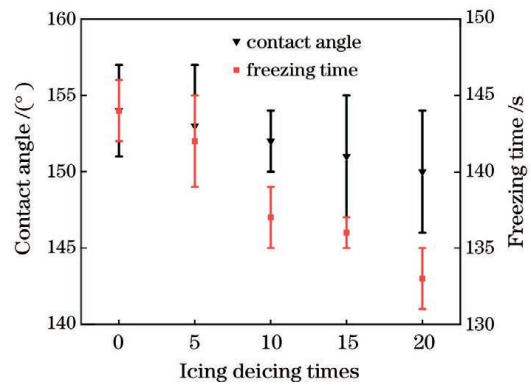


图 11 多次覆冰除冰后的接触角和凝结时间
Fig. 11 Contact angle and freezing time after multiple icing and deicing

疏水状态。液滴凝结时间的变化情况也是如此——未经过覆冰除冰的试样表面的凝结时间为 144 s,经 20 次覆冰除冰处理后,其凝结时间为 133 s,虽然减少了 11 s,但是和原始表面的 72 s 相比依旧有着较好的延迟结冰性能。因此,经过激光加工后的硅橡胶表面有着良好的抗冰耐久性,多次覆冰除冰后依旧保持很好的抗冰性能。

4 结 论

通过激光雕刻机在硅橡胶复合绝缘子伞裙试样表面构筑复合微织构,测试分析了不同尺寸参数、不同复合织构试样的疏水性、抗结冰性及耐久性,主要得到以下结论:1)激光雕刻加工能较好地硅橡胶复合绝缘子伞裙表面构筑微纳织构,提高了表面疏水性;2)3 种不同复合织构表面的疏水性都随着尺寸、间距的增大先增大后减小,尺寸和间距均为 $350\ \mu\text{m}$ 的 Sq+Ci 型织构的疏水性和抗覆冰性能最优;3)不同织构的疏水性和覆冰性能呈线性关系,织构表面的疏水性越好,水滴在结冰时的热量交换越慢,使得凝结时间延长,抗覆冰性能更好;4)织构化试样的表面耐磨性能良好,经过多次覆冰、除冰后试样的抗冰性能没有明显下降,仍能有效延缓表面结冰。

参 考 文 献

- [1] Zhao Y S, Xiang Y T, Gu S Q, et al. Effect of surface roughness on flashover characteristics of silicone rubber [J]. Journal of Electrostatics, 2019, 99: 41-48.
- [2] Wu T Y, Lai X J, Liu F J, et al. Efficiently enhancing the tracking and erosion resistance of silicone rubber by the synergism of fluorine-containing polyphenylsilsesquioxane and ureido-

- containing MQ silicone resin [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 459: 483-491.
- [3] Zhu Y. Influence of corona discharge on hydrophobicity of silicone rubber used for outdoor insulation[J]. *Polymer Testing*, 2019, 74: 14-20.
- [4] Bleszynski M, Kumosa M. Silicone rubber aging in electrolyzed aqueous salt environments [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2017, 146: 61-68.
- [5] 郑海坤, 常士楠, 赵媛媛. 超疏水/超润滑表面的防冰机理及其应用 [J]. *化学进展*, 2017, 29(1): 102-118.
- Zheng H K, Chang S N, Zhao Y Y. Anti-icing & icephobic mechanism and applications of superhydrophobic/ultra slippery surface[J]. *Progress in Chemistry*, 2017, 29(1): 102-118.
- [6] 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): 81-87.
- Wan Y L, Xi C W, Dong B, et al. Icing performance of micro-nano composite grooves on aluminum alloy surface [J]. *China Surface Engineering*, 2018, 31(4): 81-87.
- [7] 罗晓, 刘伟建, 张红军, 等. 超快激光制备金属表面可控微纳二级结构及其功能化 [J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1502002.
- Luo X, Liu W J, Zhang H J, et al. Ultrafast laser fabricating of controllable micro-nano dual-scale metallic surface structures and their functionalization [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(15): 1502002.
- [8] 王青华, 王慧鑫, 王占栋, 等. 高效纳秒激光多功能表面制备及抗腐蚀性研究 [J]. *中国激光*, 2021, 48(14): 1402018.
- Wang Q H, Wang H X, Wang Z D, et al. Highly efficient nanosecond laser-based multifunctional surface fabrication and corrosion resistance performance [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(14): 1402018.
- [9] Celia E, Darmanin T, de Givenchy E T, et al. Recent advances in designing superhydrophobic surfaces [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2013, 402: 1-18.
- [10] Liu H, Feng L, Zhai J, et al. Reversible wettability of a chemical vapor deposition prepared ZnO film between superhydrophobicity and superhydrophilicity [J]. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2004, 20(14): 5659-5661.
- [11] Xu N, Sarkar D K, Chen X G, et al. Corrosion performance of superhydrophobic nickel stearate/nickel hydroxide thin films on aluminum alloy by a simple one-step electrodeposition process [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 302: 173-184.
- [12] Wang F C, Li C R, Lü Y Z, 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.
- [13] Liu Z J, Wang H Y, Wang E Q, et al. Superhydrophobic poly(vinylidene fluoride) membranes with controllable structure and tunable wettability prepared by one-step electrospinning [J]. *Polymer*, 2016, 82: 105-113.
- [14] Han J P, Cai M Y, Lin Y, et al. 3D re-entrant nanogross on microcones for durable superamphiphobic surfaces via laser-chemical hybrid method [J]. *Applied Surface Science*, 2018, 456: 726-736.
- [15] 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.
- 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.
- [16] Alamri S, Vercillo V, Aguilar-Morales A I, et al. Self-limited ice formation and efficient de-icing on superhydrophobic micro-structured airfoils through direct laser interference patterning [J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2020, 7(22): 2001231.
- [17] 赵美云, 田森, 吴阳, 等. 结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.
- 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.

Anti-icing Performance of Complex Texture Silicone Rubber Surface Based on Laser Engraving

Zhao Meiyun^{1,2}, Yang Fan¹, Zhang Xiaolong¹, Yin Yunhui², Zhao Yan², Zhao Xinze¹

¹*Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design & Maintenance, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China*

²*College of Mechanical & Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China*

Abstract

Objective Silicon rubber composite insulators have been widely used in high-voltage transmission, distribution lines, and some high-voltage transmission parts machinery due to their good electrical insulation, excellent antipollution characteristics, and low maintenance cost. Transmission lines often work in cold and heavily polluted conditions, and the anti-icing ability of insulators affects the safety of transmission lines. As a new anti-icing method, the superhydrophobic surface has the advantages of low energy consumption, light weight, and simple structure. It also shows a good application prospect in reducing ice-covered flashover, fouling flashover, and tower collapse accidents of high-voltage transmission lines. Many domestic and foreign researchers determined that the superhydrophobic surface has a great positive effect in reducing the adhesion strength of ice on the material surface and has a certain effect of delaying icing. The most widely used method for preparing superhydrophobic silicone rubber surfaces is the coating method due to the physical and chemical properties of silicone rubber. However, the coating in harsh environments can easily fail because of the poor mechanical stability and impact resistance of the coating. In previous studies, superhydrophobic surfaces were obtained using chemical reagents to reduce surface energy after laser processing of micro-nano structures. Herein, the silicone rubber composite insulators umbrella skirt material has the characteristics of low surface energy; thus, it requires no modification through chemical reagents. The laser engraving machine is used to process micron-scale texture to obtain a superhydrophobic surface, which has a higher processing efficiency than a nanoscale machine. Therefore, using a laser engraving machine to prepare a superhydrophobic surface to shorten the icing of the silicone rubber composite insulator has a certain application prospect.

Methods Herein, the D80M multifunctional laser engraving machine is used to process different types and dimensional parameter textures on the surface of the composite insulator silicone rubber samples. The surface morphology of the specimens is observed by a three-dimensional morphometer and scanning electron microscope, and the hydrophobicity principles of the specimens are analyzed. The contact angle of the samples with different complex texture surfaces is tested using a contact angle measuring instrument. Consequently, the optimal type and size parameters of complex texture with the best hydrophobicity are obtained. The freezing time of water droplets on the specimen surface is evaluated using a high and low temperature-humidity test chamber to test the freezing time of water droplets on different texture specimen surfaces at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. The ice adhesion force on different texture surfaces is also investigated. Furthermore, the anti-icing durability of the specimens is examined by testing the change contact angle and freezing time after repeated icing and de-icing of the specimens.

Results and Discussions The textured surface of the specimens prepared by laser processing, without any chemical modification, has good hydrophobicity, and the contact angle of the square + circular texture (Sq + Ci) surface with the size of $350\text{ }\mu\text{m}$ can reach 154.1° to realize superhydrophobicity (Fig. 4). The study on the anti-icing property shows that the freezing time of the droplet on different complex texture surfaces first increases and then decreases as the size increases. The longest freezing time is reached at the Sq + Ci texture surface with the size of $350\text{ }\mu\text{m}$, which is 144 s (Fig. 5). Compared to the original surface with an icing adhesion force of 4.54 N and a freezing time of 72 s, the adhesion forces of the droplet on the three textured surfaces with the optimal size are below 2 N in the same low-temperature condition (Fig. 7). When the environmental temperature change from -4 to $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$, the freezing time of the droplet on the Sq + Ci texture surface decreases from 355 to 129 s and becomes shorter by about two-thirds, demonstrating that the anti-icing performance of the specimens decreases sharply as the environmental temperature decreases (Fig. 9). Additionally, after 20 times of icing and de-icing, the freezing time of the droplet on the sample surface remains higher than 133 s, indicating that the surface of the silicone rubber

processed by laser engraving has good anti-icing durability (Fig. 10).

Conclusions In this study, the hydrophobicity of silicone rubber can be significantly improved by constructing rough complex microtextures on the surface via laser engraving. The hydrophobicity of the three different complex textures first increases and then decreases as the size increases, and the Sq + Ci texture with the size of 350 μm has the best hydrophobicity and ice resistance. There is a linear relationship between hydrophobicity and anti-icing performance of different textures. The better the hydrophobicity of the textured surface, the longer the freezing time and better icing resistance due to the slower heat exchange. The surface wear resistance of the textured sample is good. After icing and de-icing, the ice resistance does not decrease too much, and the surface icing can still be delayed to a great extent. After the laser engraving, the textured surface wear resistance of the silicone rubber composite insulator is good, which can be seen from the change in the contact angle and freezing time after multiple icing and de-icing. The textured surface can still delay the surface icing to a large extent. This study has a certain reference value for the design of improving the anti-icing ability of equipment surfaces and provides new ideas for high-efficiency laser processing.

Key words laser technique; surface processing; laser engraving; composite insulator; complex texture; superhydrophobic surface; anti-icing