

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20210915003

硅橡胶粉末 / 环氧树脂超疏水涂层的制备及其在架空导线抗结冰中的应用*

赵美云 康萌 何钱 杨帆 赵彦 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 宜昌 443000)

摘要: 架空输电线路导线在服役过程中经常会受到覆冰影响, 引发安全事故, 我国是发生输电线路覆冰事故较多的国家之一, 为此针对架空导线开展抗结冰工作对保障电力系统安全运行具有重要意义。利用废旧硅橡胶复合绝缘子伞裙制备一种超疏水粉末, 与环氧树脂按一定比例喷涂在玻璃基底上制备超疏水表面, 其水接触角可达 154° 。将制备的粉末喷涂在钢芯铝绞线表面上, 对其自清洁、抗结冰及表面耐久性进行测试。研究结果表明: 在低温环境下具有硅橡胶粉末 / 环氧树脂超疏水涂层的导线相比原始导线具有更好的抗结冰性能, 在相同环境温度下, 相同时间内其结冰量只有原始导线的一半, 可以有效延缓结冰, 且在光照、腐蚀、反复除冰的环境下, 也具有抗冰耐久性。该制备方法简单可行、效率高, 能够实现废旧材料的循环利用, 可进一步应用于生产实践。

关键词: 架空导线; 超疏水; 硅橡胶粉末; 抗结冰

中图分类号: TG174

Preparation of Silicone Rubber Powder / epoxy Resin Superhydrophobic Coating and Its Application in Anti-icing of Overhead Wires

ZHAO Meiyun KANG Meng HE Qian YANG Fan ZHAO Yan ZHAO Xinze
(Hubei Key Laboratory of Hydroelectric Machinery Design & Maintenance,
China Three Gorges University, Yichang 443000, China)

Abstract: The wires of overhead transmission lines are often affected by icing during use, leading to safety accidents. China is one of the countries with more icing accidents on transmission lines. Therefore, the anti-icing work for overhead wires is of great significance to ensure the safe operation of the power system. A kind of super-hydrophobic powder is prepared by using waste silicone rubber composite insulator skirt. The powder and epoxy resin are sprayed on a glass substrate in a certain proportion to prepare a super-hydrophobic surface with a contact angle of 154° with water. The prepared powder is sprayed on the surface of the steel core aluminum stranded wire to test its self-cleaning property, anti-icing property and surface durability. The research results show that the wire with silicone rubber powder / epoxy resin superhydrophobic coating has better anti-icing performance than the original wire in low temperature environment. Under the same ambient temperature and the same time, the amount of icing is only half of the original wire, which can effectively delay icing, and it also has anti-icing durability under the environment of light, corrosion, and repeated deicing. The preparation method is simple, feasible and efficient, and the recycling of waste materials is realized. The research results can be further applied to production practice.

Keywords: overhead wire; superhydrophobic; silicone rubber powder; anti-icing

0 前言

输电架空导线覆冰将导致线路机械负荷增加, 易引发断线、跳闸、倒塔、导线舞动等事故, 不仅

影响电力系统的安全运行, 还将影响到我国的国民生活与工业生产, 造成巨大经济损失^[1]。目前, 输电线路抗结冰方法主要分为两种^[2]: 主动除冰和被动除冰方法。主动除冰方法主要包括热力除冰、机

* 国家自然科学基金资助项目 (52005292)。

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China(52005292).

20210915 收到初稿, 20211125 收到修改稿

械除冰等。但这些主动除冰方法能耗高、效率低，且机械除冰过程中还会因外力作用对导线造成破坏。因此，被动除冰方法，尤其是仿生功能表面抗结冰方法吸引了广大研究者的关注^[3-7]。

受荷叶效应启发，超疏水表面是一种新型的功能性表面，具有较低的表面能，对水有很强的排斥作用，在自清洁^[8]、防腐^[9]、抗结冰^[10]、流体减阻^[11]、油水分离^[12]等领域具有巨大的潜在应用价值。ANTONINI等^[13]通过机翼结冰试验，证明了超疏水涂层是一种有效抗冰方法。超疏水涂层改变了表面的润湿性，使液体更易从表面脱落，不仅减少了机翼上的积冰，还可以使机翼抗积冰所需的能量减少80%。ZHU等^[14]先蒸发PDMS在基底表面沉积一层微米颗粒，再将PDMS/TiO₂混合分散液喷涂至表面形成微纳粗糙结构，制备了超疏水涂层。结冰试验表明，该涂层可延缓水滴在表面的结冰时间，具有良好的抗结冰性能。JIN等^[15]先将铝导线在盐酸中刻蚀，形成表面微纳粗糙结构，再放入硬脂酸中修饰，最后获得具有超疏水涂层的铝导线，然后用高速摄像机观察结冰过程。结果表明，在低温环境下结冰150 min，该涂层导线冰锥长度仅为原始导线的三分之一，具有明显的抗结冰作用，但这种刻蚀方法可能会降低铝导线强度，引发断裂事故。上述研究证明了超疏水表面抗结冰的可行性，但在实际应用中如何经济可靠的获得超疏水表面还是需要进一步研究。

复合绝缘子因具有优良的力学性能及优异的表面憎水性而被广泛应用于电力系统，但因加工缺陷、材料老化等原因每年有大量复合绝缘子退役，其后处理也是较大问题。硅橡胶复合绝缘子伞裙本身就是一种低表面能材料，本文利用其制备一种超疏水涂层，应用于架空导线抗污染及抗结冰，对保护环境、节约资源以实现可持续发展有着重要的意义。

1 试验部分

1.1 材料及仪器

试验采用的主要材料：110 kV 架空线路常用的钢芯铝绞线和硅橡胶复合绝缘子（国网湖北省电力公司提供）；环氧树脂 E44 和固化剂 T31（北京东方雨虹防水技术股份有限公司）；乙酸乙酯和无水乙醇（国药集团化学试剂有限公司）。

使用的主要仪器：接触角测量仪（JY-PHB），扫描电子显微镜（SEM，JSM-7500F，日本），扫描电镜自带的EDS和傅里叶变换红外光谱仪（FTIR，

Nexus 870），程式恒温恒湿试验机（TEMI880型，东莞市石排昊然机械设备厂）。

1.2 粉末的制备

将硅橡胶复合绝缘子伞裙切成小块，先后使用无水乙醇和去离子水在超声波清洗机中清洗10 min，然后干燥。将干燥后的试块放置在酒精灯上方燃烧至完全没有白烟产生，得到的燃烧产物放置在研钵中研磨粉粹，然后采用160目的筛网对粉末进行筛选，得到红褐色粉末。

1.3 硅橡胶粉末/环氧树脂超疏水涂层的制备

将环氧树脂（E44）和乙酸乙酯以质量比1:1.5混合，磁力搅拌20 min使环氧树脂完全溶解形成透明低黏度溶液，然后再向溶液中加入三分之一环氧树脂质量的固化剂（T31），然后继续磁力搅拌10 min使其充分混合。同时取硅橡胶粉末和乙酸乙酯以质量比1:2混合后磁力搅拌，得到硅橡胶粉末溶液。将载玻片和导线完全浸泡在制备的环氧树脂溶液中，使表面完全均匀覆盖环氧树脂，然后放入60℃干燥箱中使乙酸乙酯完全挥发后取出。将硅橡胶粉末溶液倒入喷枪中，设定喷枪压力为0.7 MPa，喷涂距离为400 mm，均匀喷涂在覆盖有环氧树脂的载玻片和导线表面，然后放入60℃干燥箱中干燥24 h，最后得到具有涂层的载玻片和导线，具体流程如图1所示。

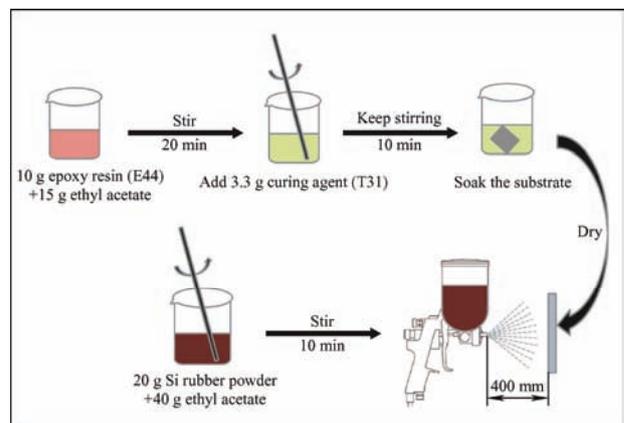


图1 硅橡胶粉末 / 环氧树脂超疏水涂层制备流程图

Fig. 1 Flow chart of preparation of silicone rubber powder / epoxy superhydrophobic coating

1.4 性能表征

使用傅里叶变换红外光谱仪和扫描电镜自带的EDS分析硅橡胶绝缘子燃烧产物的元素组成和官能团，使用场发射扫描电子显微镜观察涂层表面的形貌。使用接触角测量仪，测量5 μL水滴在涂层表面的接触角，测量5个不同点取平均值。使用恒温恒湿控制箱，进行导线抗结冰试验。

2 结果与讨论

2.1 红外光谱和 EDS 分析

图 2a 为硅橡胶粉末及 SiO_2 纳米颗粒的红外光谱图, 2985 cm^{-1} 处吸收峰为甲基基团, 甲基基团属于疏水基团, 这是该粉末具有疏水性的主要原因。 1096 cm^{-1} 处吸收峰对应于 Si-O-Si 不对称伸缩振动, 803 cm^{-1} 处吸收峰为 Si-O-Si

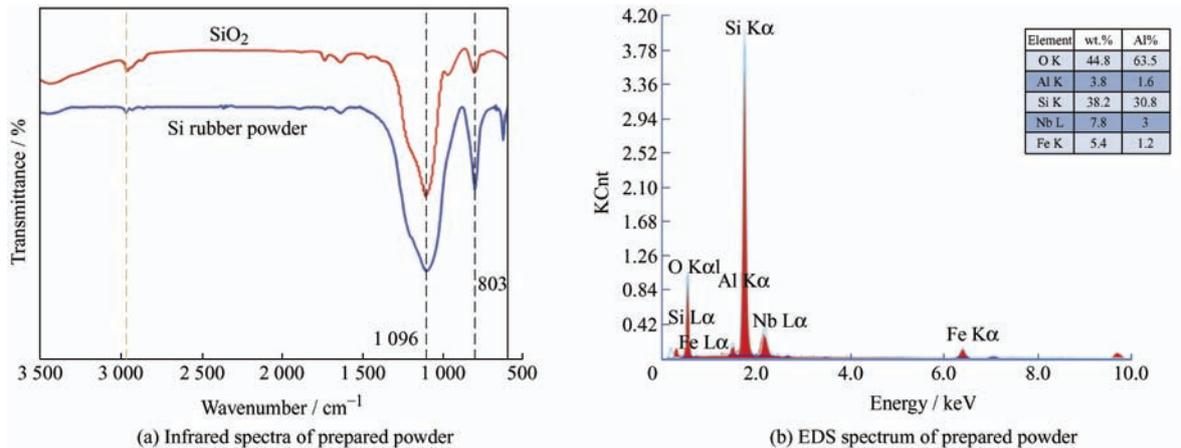


图 2 制备粉末的红外光谱和 EDS 能谱

Fig. 2 Infrared spectra and EDS spectrum of prepared powder

2.2 涂层疏水性及 SEM 分析

图 3a 为硅橡胶粉末 / 环氧树脂涂层表面 4 个不同位置的润湿效果, 液滴在其表面的平均接触角为 154° , 呈现为超疏水球型状态。图 3b 为该涂层 SEM 图, 从图中可以发现硅橡胶粉末较均匀地分布在涂层表面, 表面存在大量的微米级块状物, 在这些块状物之间存在大量的凹槽, 液滴与涂层接触时这些凹槽内充满空气形成了气垫, 减少了液滴与涂

层表面的接触面积。同时在表面发现一些纳米级且光滑的球状小颗粒, 与微米级的块状物形成微纳粗糙结构, 这种结构之间将形成更多的气垫来支撑水滴, 进而使涂层表现出超疏水特性。图 3c 为涂层的断面 SEM 图, 可以发现硅橡胶粉末 / 环氧树脂所形成的涂层厚度有 $105\ \mu\text{m}$ 左右, 这表明所形成的环氧树脂有一定厚度, 进而保证了基底和超疏水粉末之间有较强的结合力。

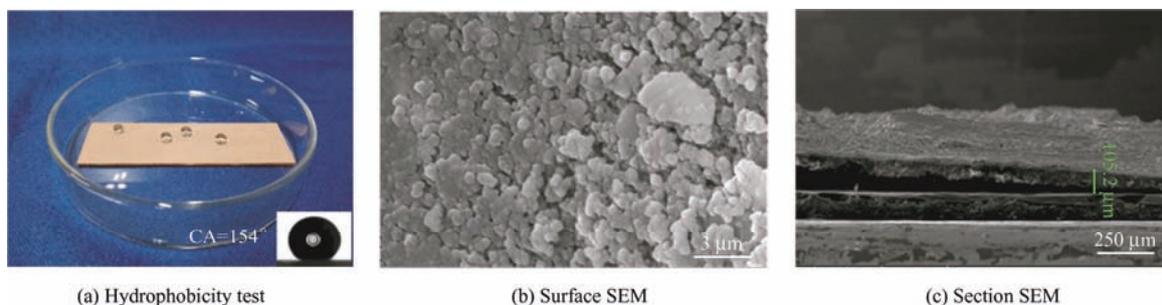


图 3 制备涂层疏水性测试及 SEM 图

Fig. 3 Hydrophobicity test and SEM image of prepared coating

2.3 涂层导线的自清洁性

实际运行中的架空导线会面临着各种各样的污

染, 如空气中的尘土、汽车排出的尾气等。当遇到雨雪天气, 这些污染物被润湿后, 会附着在输电导

线表面,可能影响其疏水性能,所以导线表面的自清洁特性十分重要。为研究架空导线涂层表面的自清洁特性,分别将相同质量的泥土撒在原始导线和带有超疏水涂层的导线表面,然后用适量的水冲洗表面,测试过程如图4所示。从图4a中可以发现原始导线表面依然会有很多泥土残留,部分泥土颗粒

被水润湿后成团附着在其表面或进入缝隙中,更难以冲刷掉。而从图4b可以发现,具有超疏水涂层的导线,当水滴经过其表面时,会把表面的泥土颗粒一并带走,基本无残留,表现出优异的自清洁效果。这种自清洁性能对运行中的架空导线非常有益,还可有效防止污染物在表面堆积而造成的污闪事故。

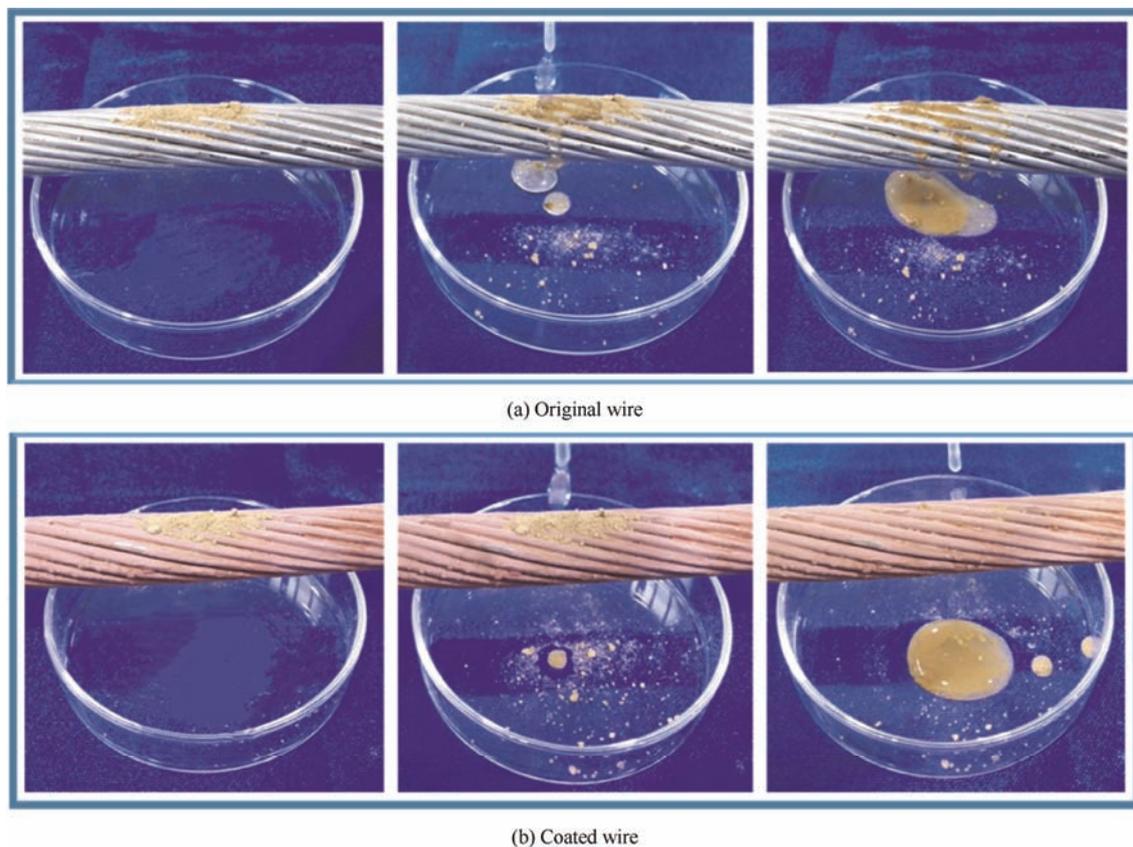


图4 自清洁试验

Fig. 4 Self-cleaning experiment

2.4 涂层导线的抗结冰性

覆冰是一种综合的物理现象,其形成既是一个流体力学的过程,也是一个热力学的过程。从流体力学的角度看,输电线路覆冰是捕获气流中过度冷却的水滴而发生的物理现象^[16]。从热力学角度看,覆冰是液态过冷却水滴释放热量而固化的物理过程,与热量的交换和传递密切相关^[17-18]。覆冰的质量、厚度和密度都取决于覆冰表面流体碰撞过程和热平衡过程^[19]。根据覆冰形成的机理及形成过程,覆冰的增长过程可分为干增长和湿增长,由于湿增长覆冰的密度较大,其对输电线路的危害也较大。因此,本文也通过湿增长覆冰试验研究制备涂层的抗冰性。

在温度 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行导线结冰模拟试验,试验

步骤如下:将原始导线和超疏水涂层导线分别放置在精密天平上称重,然后一起放入 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温恒湿控制箱中,待导线温度基本达到 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,然后每隔 30 min 持续喷雾 30 s ,每次取出分别称重,通过前后重量对比,测定结冰的质量。

图5所示为初始冷冻 10 min 后的导线覆冰图,从图中可以发现涂层导线表面还存在透明的液态水滴,已完全结冰的液滴呈固态颗粒状分布在导线表面。而原始导线表面只在下部附着一较大固态冰滴,大部分水滴已进入到导线缝隙之间凝结。这表明制备涂层可以有效延缓导线表面结冰,这是由于水滴与涂层表面微纳结构间的空气接触面积较大,可以有效延缓导线表面的热传递。

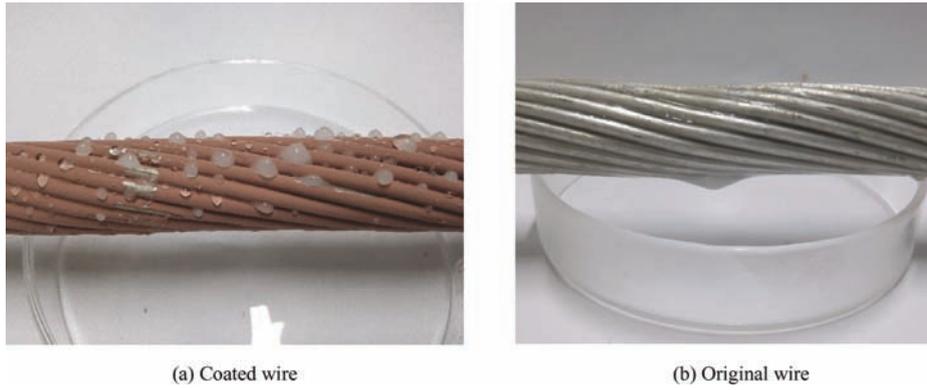
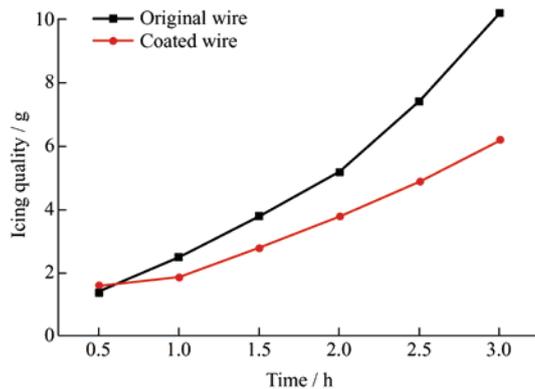


图 5 导线结覆冰 10 min 后的对比

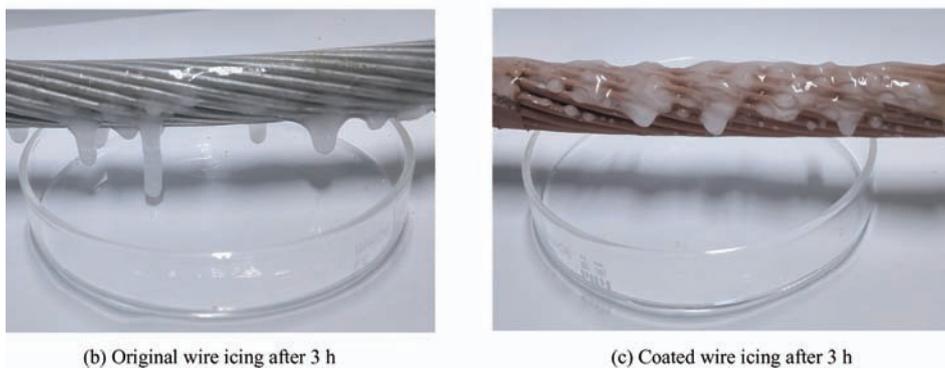
Fig. 5 Comparison of wire after 10 minutes of icing

图 6 所示为两种导线覆冰试验的结果。图 6a 为在温度 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下原始导线和超疏水涂层导线覆冰质量随时间变化图。从图中可以看出, 两种导线的结冰量随着时间的增加而增加, 但有涂层的导线结冰量明显低于原始导线, 且随着时间的增加差距越明显, 经过 3 h 试验后, 超疏水涂层导线表面的结

冰量基本是原始导线表面结冰量的一半。图 6b 和 6c 为 3 h 后两种导线覆冰实物图, 从图中可以看出, 原始导线整个表面上覆盖冰层, 且由于重力作用在下部形成较长冰溜; 涂层导线仅在导线上半部覆盖一些冰层, 下半部分由于水滴在超疏水表面无法附着而没有覆冰。



(a) Change of the icing quality on the surface of wires with time at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$



(b) Original wire icing after 3 h

(c) Coated wire icing after 3 h

图 6 导线结冰试验

Fig. 6 Wire icing test

为研究涂层导线在不同环境温度下的抗冰性, 进行了两种导线在不同环境温度下的抗冰试验。如图 7 所示是两种导线分别在环境温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 1 h 结冰量的对比图。从图中可以发现, 随着环境温度的降低, 两种导线

表面的结冰量不断增加。因为随着温度的降低, 液滴在表面的凝结时间越来越短, 相同的时间内, 会有更多的水滴凝结成冰, 因此结冰量会增加; 相同环境温度下, 超疏水涂层导线表面的结冰质量明显低于原始导线, 且环境温度越低, 两种导线的覆冰

质量差距越大,涂层可以起到抑制结冰的作用。试验结果说明,制备的涂层导线表面在低温下仍具有较好的抗结冰性能,从而证实了该涂层在低温下应用的可行性。

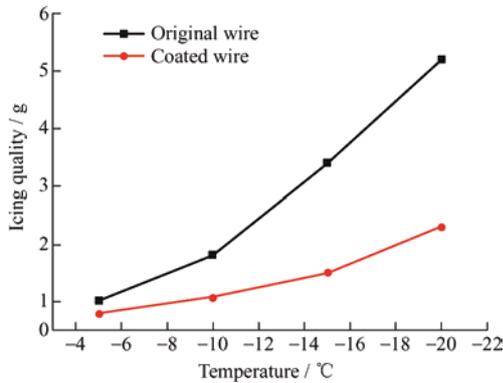


图7 导线表面结冰量随环境温度变化关系

Fig. 7 Relationship between the amount of icing on the wire surface and the temperature

2.5 涂层导线的耐久稳定性

由于天气变化,输电导线经常结冰融化后再结冰,因此有必要对涂层导线在反复融冰结冰后的抗结冰性能进行试验研究。将涂层导线放入温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温恒湿控制箱中喷雾30 s,冷冻1 h后取出,再放入 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 干燥箱中融化干燥,重复融化结冰过程,每重复5次测量一次结冰重量。图8a为涂层导线结冰量随融冰次数的变化曲线图。由图可知,在前20次融冰结冰过程中,结冰量变化不大,结冰量在 $0.1\sim 0.2\text{ g}$ 范围内变化,融冰次数在超过20次后,其结冰量明显增加,第35次后,其结冰量比刚开始增加了60%,但也少于无涂层时的覆冰量 2.5 g 。这表明制备涂层的导线在经过多次结冰融冰后能保持一定的抗结冰性能,且喷涂法制备超疏水涂层操作简单,不受场合的限制,可以再次对导线表面进行喷涂,使

其恢复抗结冰性能。

输电导线在室外工作经常受阳光照射,受到紫外线辐射较强,可能会损坏涂层的抗冰性能。本文采用加速模拟试验方法来研究涂层表面的抗紫外线性能,将涂层导线放置在高强度紫外线试验装置下,然后放入温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温恒湿控制箱中喷雾30 s,测量完全结冰后的质量。图8b所示为涂层导线结冰量随辐射时间变化关系曲线图。从图中可以发现,紫外线辐射对涂层表面的抗结冰性有一定影响,但总体来说影响不大,连续强光辐射时间30 d后,表面结冰的质量比初始时增加了40%,远小于无涂层原始导线同温度下的 2.5 g 覆冰,试验过程中导线经过了反复融冰结冰,与图8a相比较,紫外光辐射的影响可以忽略不计。因此,硅橡胶粉末的涂层具有良好的抗紫外线辐射性能。

架空输电导线有可能暴露在酸碱腐蚀环境中,使得涂层表面化学组成成分发生一定的变化,影响涂层表面的抗冰性能,因此,需要对涂层导线进行耐腐蚀试验。将制备的涂层导线浸泡在 1 mol/L 的 H_2SO_4 和 NaOH 溶液中,然后进行覆冰试验。图8c所示为制备的涂层导线结冰量随腐蚀时间的变化曲线图。从图中可以发现,酸碱腐蚀对涂层导线的影响基本一致,在腐蚀时间12 d内,涂层导线表面结冰的质量都变化很小,之后随腐蚀时间增加结冰质量增加,在32 d后仍小于无涂层导线的结冰量。实际工况下酸碱腐蚀环境远弱于试验条件,试验过程中导线也会经过多次融冰结冰,加速了涂层导线抗冰性能的下降,与图8a比较可知,酸碱腐蚀对涂层导线抗冰性能有一定影响,但在一年的工作周期内可以满足工作需要,因此制备的硅橡胶粉末涂层导线具有较好的抗酸碱腐蚀性能。

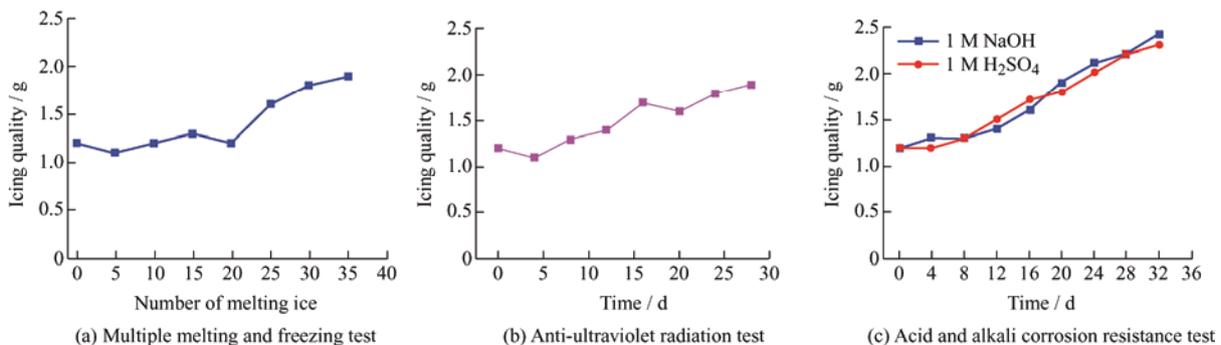


图8 导线涂层耐久稳定性试验

Fig. 8 Durability and stability test of coated wire

3 结论

针对架空导线的覆冰问题, 利用废旧复合绝缘子伞裙材料本身的低表面能特性, 制备了微纳米级超疏水粉末。通过较优的喷涂方法在玻璃平面及导线凹凸表面制备了硅橡胶粉末 / 环氧树脂超疏水涂层。该涂层具有良好的抗污自清洁性, 能有效延缓结冰及减少覆冰, 且具有良好的化学及机械稳定性。该涂层制备方法简单可行、效率高, 且适合量产, 因此在输电线路及其他装备的防冰抗冰中具有较好的应用潜力。

后续研究将致力于快捷高效地实现在役架空导线等装备的超疏水涂层的制备, 提高涂层抗覆冰效率, 进一步将涂层应用于生产实践。

参 考 文 献

- [1] 王勇, 苗虹, 莫思特, 等. 高压架空输电线路防冰、融冰、除冰技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 178-187.
WANG Yong, MIAO Hong, MO Site, et al. Summary of research on anti-ice, ice melting and de-icing of high voltage overhead transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 178-187. (in Chinese)
- [2] SUNDEN B, WU Z. On Icing and icing mitigation of wind turbine blades in cold climate[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2015, 137(5): 51203.
- [3] 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 Yanling, XI Chuanwen, DONG Bin, et al. Icing performance of micro-nano composite grooves on aluminum alloy surface[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(4): 81-87. (in Chinese)
- [4] 周翠平, 刘启明, 赵绚, 等. 柔性抗结冰表面的制备及其性能[J]. 化学进展, 2019, 31(7): 1056-1066.
ZHOU Cuiping, LIU Qiming, ZHAO Xu, et al. The preparation and anti-icing properties of flexible surfaces[J]. Progress in Chemistry, 2019, 31(7): 1056-1066. (in Chinese)
- [5] 刘媛. 抗结冰高耐磨涂层研究进展[J]. 现代涂料与涂装, 2019, 22(10): 15-18.
LIU Yuan. Research progress on the coating with anti-icing and high wear-resistance[J]. Modern Paint & Finishing, 2019, 22(10): 15-18. (in Chinese)
- [6] 齐春红. 基于低表面能二氧化硅超疏水表面的制备及其防结冰性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
QI Chunhong. Fabrication and anti-icing properties of superhydrophobic surfaces based on silica with low surface energy[D]. Taiyuan: North University of China, 2020. (in Chinese)
- [7] 李鑫林. 仿生超疏水表面的构建及其防冰特性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
LI Xinlin. Fabrication of bionic superhydrophobic surface and its anti-icing performance[D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)
- [8] TIAN D, SONG Y, JIANG L. Patterning of controllable surface wettability for printing techniques[J]. Chemical Society Reviews, 2013, 42(12): 5184-5209.
- [9] 李玉峰, 高文博, 史凌志, 等. 超疏水涂层的制备及其对 Mg-Li 合金的防腐蚀性能[J]. 中国表面工程, 2020, 33(5): 1-9.
LI Yufeng, GAO Wenbo, SHI Lingzhi, et al. Preparation of superhydrophobic coating and its corrosion resistance to Mg-Li alloy[J]. China Surface Engineering, 2020, 33(5): 1-9. (in Chinese)
- [10] NGUYEN T B, PARK S, LIM H. Effects of morphology parameters on anti-icing performance in superhydrophobic surfaces[J]. Applied Surface Science, 2018, 435: 585-591.
- [11] 李小磊, 张会臣. 超疏水表面减阻特性的研究进展[J]. 润滑与密封, 2016, 41(10): 116-122.
LI Xiaolei, ZHANG Huichen. Research progress in drag reduction of superhydrophobic surfaces[J]. Lubrication Engineering, 2016, 41(10): 116-122. (in Chinese)
- [12] 张东光, 李陵汉, 吴亚丽, 等. 超疏水 / 超亲油铜网表面的一步法制备及其油水分离应用[J]. 中国表面工程, 2019, 32(1): 31-37.
ZHANG Dongguang, LI Linghan, WU Yali, et al. Preparation of superhydrophobic and superoleophilic surface on Cu mesh by one-step method and its application in oil-water separation[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(1): 31-37. (in Chinese)
- [13] ANTONINI C, INNOCENTI M, HORN T, et al. Understanding the effect of superhydrophobic coatings on energy reduction in anti-icing systems[J]. Cold Regions

- Science and Technology, 2011, 67(1-2): 58-67.
- [14] ZHU T, CHENG Y, HUANG J, et al. A transparent superhydrophobic coating with mechanochemical robustness for anti-icing, photocatalysis and self-cleaning [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 399: 125746.
- [15] JIN H, NIE S, LI Z, et al. Investigation on preparation and anti-icing performance of super-hydrophobic surface on aluminum conductor[J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2018, 31(2): 216-222.
- [16] FU P, FARZANEH M. Simulation of the ice accretion process on a transmission line cable with differential twisting[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2007, 34(2): 147-155.
- [17] IEEE. IEEE Standard for calculating the current-temperature of bare overhead conductors: 738-2006[S]. New York: IEEE, 2007: 1-58.
- [18] NATERER G F. Coupled liquid film and solidified layer growth with impinging supercooled droplets and Joule heating[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2003, 24(2): 223-235.
- [19] 蒋兴良, 申强, 舒立春, 等. 利用旋转多圆柱导体覆冰质量预测湿增长过程覆冰参数[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 3071-3076.
- JIANG Xingliang, SHEN Qiang, SHU Lichun, et al. Prediction of wet growth icing parameters by icing quantity of rotating multi-cylindrical conductors[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 3071-3076. (in Chinese)

作者简介: 赵新泽 (通信作者), 男, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为摩擦学及表面工程。

E-mail: xzzhao@ctgu.edu.cn