

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20210127002

## 配电网线路防结冰涂层构筑及其性能评价\*

李超逸<sup>1</sup> 宋世杰<sup>1</sup> 蔡猛<sup>2</sup> 贺继樊<sup>2</sup> 樊小强<sup>1,2</sup> 彭金方<sup>3</sup> 朱旻昊<sup>1,2</sup>

(1. 西南交通大学材料科学与工程学院 成都 610031;

2. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

3. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031)

**摘要:** 随着我国电力系统的发展,配电网线路已经完成了多地域全覆盖,这其中必须承受广域多环境的不利影响,其中覆冰问题带来的负面影响尤为严重。使用疏水性涂层可以有效地预防配电网线路产生覆冰,与传统的机械、热力除冰法相比更节约人力和物力。因此,适用于线路的疏水涂层是现阶段改善配电网覆冰问题的研究重点。通过引入聚二甲基硅氧烷(PDMS)和SiO<sub>2</sub>成分到环氧树脂中,成功制备了接触角大于145°的涂层,不仅显著优化了环氧涂层疏水性能,而且适用于铝绞线表面涂装。通过模拟低温和滴水自然覆冰条件,对比分析了涂覆不同疏水性能导线样品的表面覆冰质量、厚度及形貌等数据。结果表明,在-5℃时,涂覆添加有PDMS和SiO<sub>2</sub>的环氧树脂涂层导线覆冰质量与原始导线相比降低了66.8%;如此的疏水涂层能够改变导线结冰的形貌,使总覆冰中冰挂质量的比例提升4%~6%,集中在导线下侧的冰挂更有利于配合机械法和热力融冰法进行清除。

**关键词:** 配电网; 覆冰; 疏水性; 涂层; 防结冰

**中图分类号:** TQ631

## Construction and Analysis of Anti-icing Coating for Distribution Lines

LI Chaoyi<sup>1</sup> SONG Shijie<sup>1</sup> CAI Meng<sup>2</sup> HE Jifan<sup>2</sup> FAN Xiaoqiang<sup>1,2</sup>

PENG Jinfang<sup>3</sup> ZHU Minhao<sup>1,2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

3. Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** With the development of China's power system, distribution network lines have completed the full coverage of the multi-regions and would suffer from various influence in a complex environment, especially the negative impact of icing. Compared with the traditional mechanical and thermal deicing methods, the use of hydrophobic coating can effectively prevent the distribution network lines from icing, which can save manpower and material resources. Therefore, the hydrophobic coating is the hot spot of the current research on improving the distribution network icing problem. The coating with contact angle of >145° was successfully prepared via the introduction of PDMS and SiO<sub>2</sub> into epoxy resin, which not only improved the hydrophobic property, but also easily applied to the surface coating of aluminum stranded wire. The natural icing conditions were simulated by low temperature and dripping water in an environmental simulation test box, and the surface icing mass, thickness and morphology of wire samples with different hydrophobicity have done a contrastive analysis. The results show that the icing mass of the wire coated with PDMS-SiO<sub>2</sub>-containing epoxy resin reduces by 66.8% at -5℃, with the original wire as a comparison. Meanwhile, the hydrophobic coating can change the morphology of wire icing, and increase the mass proportion of icicle by 4~6% in the total icing. The icicle accumulated on the lower side of the wire is more conducive to be removed by mechanical method and thermal ice melting method.

**Keywords:** distribution network; icing; hydrophobicity; coating; anti-icing

\* 国家自然科学基金(52075458)和四川省科技厅重点研发(2019YFG0292)资助项目。

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (52075458) and Key Project of Sichuan Department of Science and Technology (2019YFG0292).

20210127 收到初稿,20210401 收到修改稿

## 0 前言

随着我国电力系统的快速发展,配电网“村村通电”的战略落实,越来越多的配电网线路需要穿过各种恶劣的自然环境,接受着不同自然条件的考验。在这些极端气象灾害中,冰冻灾害是影响配电网线路正常运行最常见的原因之一,当线路遭受冻雨和低温天气时,大量覆冰产生在导线表面,从而影响到配电网线路的正常运行,情况严重时甚至会导致线路断裂、杆塔倒塌<sup>[1]</sup>。

而我国西南的高海拔地段正是世界上配电网线路覆冰最严重的地区之一,由覆冰造成的停电事故,长期影响了地区的经济生产和人们的正常生活<sup>[2-3]</sup>,而且在现今全球气候变暖、极端气象增多的背景下,此类冰冻灾害发生的频率也日渐升高,这对电网的危害更加显著。但配电网系统中缺少一种较为高效的除冰、防冰方式,主要通过除冰和融冰技术行进线路覆冰的防护,目前国内外研究人员已将重点放在了覆冰或冻雨气象的预防行为中,即使用疏水防冰涂层抑制电气设备表面结冰行为的发生。现阶段,重庆大学蒋兴良团队<sup>[4]</sup>已将这种疏水防护涂层应用在电网绝缘子上,在防止冰闪和污闪方面有显著效果。

因此,通过对疏水性涂层结构与性能的研究,针对配电网线路构筑一种适用于防结冰性能优异的涂层,缓解冻雨气象中覆冰对配电网的破坏。

目前在配电网领域中防冰方式有很多种,常用的几种方法可以大体分为两类:一类是在线路已产生覆冰之后,通过采取措施使导线外冰层消除的方法,其中包括热力除冰法、机械除冰法和自然除冰法;另一类则是在线路未结冰时,采取一定方式来预防处于恶劣环境中的导线外侧产生冰层,属于此类预防覆冰的措施主要有加热防冰法、防冰剂涂抹法、在线防冰法<sup>[5-7]</sup>。

### (1) 传统的电网防冰及除冰法。

在上述多种方法中,目前阶段工程实际中最常用的电网防冰除冰法主要集中在热力融冰法、机械除冰法和防冰剂涂抹法。这3种防冰手段相比较于其他方法都具有除冰效率高、防覆冰效果显著等特点,但是这些方法也存在比较明显的弊端。

1) 热力融冰法。常见的热力融冰法包括短路电流融冰法<sup>[8]</sup>、高频高压激励融冰法<sup>[9]</sup>。这种融冰方法是通过提高覆冰设备中的电流或增加额外热源来使覆冰线路或设备发热,进而用工作电流或其它

热源所产生的热量来使线路或设备自身的温度提高<sup>[10]</sup>,以防止覆冰的产生或融化冰层。

2) 机械除冰法。机械除冰法是通过操作人员或者机器人使用不同种类的工具对电网线路及设备进行敲击、铲除、振动等方式进行覆冰的清除工作<sup>[11-12]</sup>。但是,此类方法除冰效率较低,存在安全隐患,还容易对电力设施造成一定程度的机械性损伤。

3) 防冰剂涂抹法。防冰剂涂抹法是在设备和线路的表面涂抹一层具有降低冰层黏结力的特殊试剂,这种方法能在覆冰产生的开始阶段比较有效的抑制冰层的迅速增长,并且使冰层在后续的覆冰清除阶段中更容易脱落<sup>[4,14]</sup>。但防冰剂的有效防护周期通常都很短,并且在雨水的冲刷下很容易失效,因此在每次雨雪天气到来之前都需要花费人力进行涂抹。

### (2) 疏水性涂层防冰法。

上述几种传统的防冰方法虽然都能有效的缓解线路因覆冰停运的问题,但是仍然存在一些不足之处。在这其中最主要的弊端是,目前配电网使用的防冰手段都需要大量花费人力、物力,在结冰行为发生之前或之后的电网系统中进行大量工作。因此,如果按照防冰剂涂抹法的原理和思路,改进现有电网中的此类防冰手段,根据疏水性材料的防冰原理制备出一种可以在低温中长时间保存和服役的涂层改性配电网中的线路表面,可以使其具有优异的防结冰性能。

在配电网领域,使用疏水涂层进行结冰行为预防的方法还没有大量普及,在现阶段只有电网绝缘子使用过,并且能取得比较明显防冰效果,减少电网事故。但仅在电网绝缘子上装设防冰涂层还远远不够,因为清洁绝缘子表面的冰层及污秽只能预防电网电压闪络等电气相关的危害,而无法有效的抑制杆塔倒塌、线路断裂等力学问题。在配电网中,电力传输线占据电网结构的百分之九十以上,在恶劣的极端环境中,电网线路覆冰是导致电网系统整体受力过载的主要原因,因此研制一种适用于涂装在配电网线路上的涂层溶液是能够预防电网线路因覆冰产生舞动、断裂,甚至杆塔倒塌等严重问题的最有效方法之一。

### (3) 疏水性材料的防冰原理。

因此,文中就关于配电网的覆冰预防工作,提出了这种新型的线路防结冰方法<sup>[15]</sup>,即应用疏水性材料加装或涂覆在导线的表面,使线路表面的疏水性

能大幅提高<sup>[16]</sup>,从而达到减缓覆冰增长速度的效果,进而实现预防线路覆冰的目的。

以往的研究表明,相较于普通的亲水表面,疏水性材质的表面在微观视角下具有更多的突起结构<sup>[17]</sup>,这种突起结构使疏水材料的表面更为粗糙,如图1所示,同时这种特殊的粗糙结构具有较低的表面能<sup>[18]</sup>。因此,当液体分子落到固体材料表面时,如果固体表面能高于液体,根据能量最低原理,固体将吸附液体,宏观表现为液体接触角(Contact angle, EA)减小,并铺展在固体表面形成液膜;反之,如果固体的表面能低于液体,则固体表面的吸附能力减弱,液体收缩以降低系统的表面能,宏观表现为液体接触角增大,收缩形成一个饱满的液滴。这种表面能较低、结构粗糙的疏水性表面可以极大的减少固体材料在雨雪环境中的挂水量,通过延长基材表面产生覆冰时间和减小基材与冰层的粘附力两方面实行防冰行为<sup>[19]</sup>。

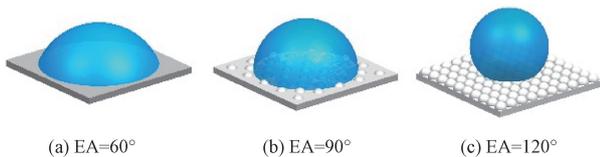


图1 亲水性表面与疏水性表面结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of hydrophilic surface and hydrophobic surface

根据上述理论,很多研究团队都基于疏水性结构进行防冰性能的测试试验。JUNG等<sup>[20]</sup>通过对多种粗糙表面结冰时间延长现象的研究,得出材料表面结冰滞后时间随疏水性增大而增加的结论;YANG等<sup>[21]</sup>在温度区间为 $-6\sim-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时进行试验,发现 $45\text{ }\mu\text{L}$ 的水滴在超疏水表面比未加处理的铝材表面结冰时间将延后 $600\sim 700\text{ s}$ ;王法军等<sup>[22]</sup>基于PFDT改性Ag/PDMS复合材料制备具有自清洁功能的超疏水表面,发现在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,水滴仍可以在带走超疏水表面活性炭污染物的同时不发生结冰现象;张庆华等<sup>[23-24]</sup>研究纳米 $\text{SiO}_2$ 表面引发的接枝含氟无规聚合物涂层的结冰过程,在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时该涂层水滴结冰时间能延长至 $10\ 054\text{ s}$ 。

从多个研究团队的成果理论中可以看到,在对复合材料中添加PDMS或 $\text{SiO}_2$ 等成分改性后,能得到具有一定防结冰性能良好的疏水性表面。但是以往的防冰研究对象主要集中在车体、机翼、路面等平面基体,如图2a所示,而配电网传输系统包括是形状不平整的悬挂式绝缘子以及钢芯铝

绞线,如图2b、2c所示,相比于以往适用于车体等平面结构的涂层,配电网线路的防冰涂料溶液在喷涂技术和与基材结合等方面均需要更高的适用性。

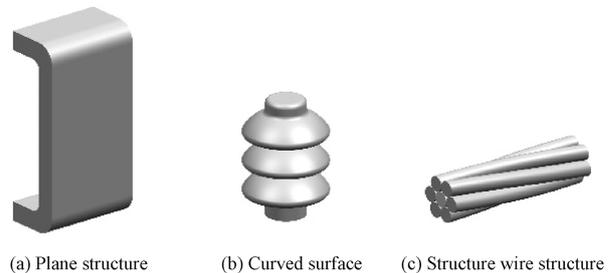


图2 疏水性涂层基材结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of structure of hydrophobic coating substrate

此外,关于配电网线路上产生覆冰的自然条件也比较特殊,通常当配电线路通过低温高湿地区时,如有伴随着雨雪等气象发生时,才会在线路上产生大量覆冰。而在国内,这种现象主要集中在湖南中西部、贵州、重庆、四川南部以及云南东北部地区,这片区域地处我国南方,常年雨水充沛、地区湿度较大,而且这里海拔较高,冬季时气温较低,1月平均气温可达零下,最低气温更能达到 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,具备冰冻灾害的条件。由此可见,研究制备适用于配电网防冰的涂层,防冰控制的温度区间并不需要非常低,只需要在 $-5\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的高湿度环境中起到良好的抑制覆冰效果,用最经济的手段制备涂料、装备线路,预防电力事故的发生。

## 1 线路疏水性涂层样品的制备

根据材料表面的结冰机理分析,以及对多种疏水性涂层材料的研究<sup>[25-26]</sup>,文中试验采用以环氧树脂为基础的有机溶剂,添加适量PDMS<sup>[27]</sup>和疏水性气相 $\text{SiO}_2$ <sup>[28]</sup>,制备适用于配电网铝绞线涂装的疏水性防结冰涂层。此外,本试验中采用6系铝合金以及LGJ型钢芯铝绞线作为疏水性溶液的基体材料进行喷涂,分别制备成铝板涂层样品和导线涂层样品<sup>[29-31]</sup>。

### 1.1 样品的预处理

铝板涂层样品选用6系铝合金板,切割成截面为 $22.5\text{ mm}\times 22.5\text{ mm}$ ,厚度为 $10\text{ mm}$ 的铝块,在一个截面做涂层喷涂处理;导线涂层样品选用型号为LGJ70/10的钢芯铝绞线,切割成长度为

120 mm 的导线段,在导线段的侧表面进行涂层喷涂处理。

在进行喷涂处理之前,样品先做表面处理工作。分别使用微粉粒型号为 400、600、800 和 1000 号的砂纸依次打磨样品待喷涂面的表层,以去除掉铝材质表面的氧化膜。再将打磨后的样品放入乙醇和丙酮溶液中各超声清洗 3 次,除去金属表面的残留物、污染物等。

## 1.2 疏水性涂层的制备与喷涂

试验将准备无涂层的裸铝板或铝绞线样品和 3 种涂层溶液进行测试。

无任何涂层的金属样品,表面只进行打磨与清洗处理,作为原始配电网导线和试验的对照组。

而所述试验涂层溶液使用环氧树脂作为基础溶剂,分别添加适量 PDMS、SiO<sub>2</sub>,制备出 3 种接触角不同的涂层溶液。

环氧树脂涂层将作为 3 种涂层样品中的对照组,其具有较好的耐磨性,尤其固化后形成的互穿网络高分子涂层还拥有极强的耐候性能和附着力,有较高的防腐耐久性,这一特点使得以此为涂料溶剂非常适合在铝绞线等复杂结构的表面涂装。但是这种涂层成淡黄色半透明状,疏水性较差,且制备搅拌时内部气泡加多,会影响喷涂效果,造成喷涂不均、基材表面收缩严重等问题。

PDMS 是一种疏水类的有机物料,其易于在气体界面中浓缩,因此一些材料可以通过 PDMS 的浸渍改变疏水性,而且适当调整其疏水主链的长度或密度,可使涂层的疏水性能大幅提高<sup>[27]</sup>。以环氧树脂为基础,另添加 PDMS 的涂层溶剂呈白色胶状,具有良好的疏水性能、附着力和耐候性,涂层易于与铝材质的绞线样品结合,形成均匀稳定的保护层。

而同时添加 PDMS 与疏水性气相二氧化硅的环氧树脂有机涂层,其表面会形成不易水解的甲基基团而呈现极高的疏水性能,可改变环氧树脂体系内的流变特性<sup>[28]</sup>。通常溶液中二氧化硅越高其疏水性能更好,含有较多二氧化硅的物体表面可以使呈现超疏水性能,但溶液中过高的含量也会使环氧树脂的耐磨性能与基材附着力明显下降,涂层丧失稳定性。而且,由于二氧化硅粉末较难溶于环氧树脂溶液中,在涂料制备搅拌时要求较高,需要添加大量的乙酸乙酯进行稀释,同时使用喷枪喷涂时也会伴随着大量的颗粒喷溅,所制涂层呈整体白色,表面具

有明显的细微凹凸结构,容易喷涂产生不均和开裂的现象。

以上 3 种涂层溶液(#1、#2、#3)的成分及质量百分数如表 1 所示。

表 1 涂层溶液的成分及质量百分数(w/%)

Table 1 Composition and mass percentage of coating solution (w/%)

Composition	#1	#2	#3
EA	65	64	81.6
EP	28	20	8
EP curing agent	7	5	2
PDMS	—	10	4
PDMS curing agent	—	1	0.4
SiO <sub>2</sub>	—	—	4

将涂层溶液配制完成后,将装有溶液的烧杯放到高速搅拌机下,以 2 000~3 000 r/min 的转速搅拌 10~15 min。将搅拌均匀的涂料从机器中拿出,静置 5~10 min,待涂料内部的气泡消失,即可进行喷涂。

喷涂时,使用空气压缩机和喷枪,对铝块样品的截面以及导线样品的侧表面进行喷涂,每个样品喷涂时间控制在 3 s 左右,防止涂层干燥后产生开裂。喷涂完毕后,将样品放置在通风良好的常温环境中晾晒 2~4 d,完成样品的制备。

## 2 疏水性涂层的表征与耐候性能

试验通过表征 4 种样品的表面接触角作为变量,观察在低温环境下疏水性能不同的表面抑制结冰产生的能力,4 种样品分别为上述制备的 3 种涂层样品(#1、#2、#3)以及未做任何处理的铝合金样品(#0,即裸铝板或裸导线)。

### 2.1 疏水涂层的形貌及表征

(1)样品接触角测量。在接触角测量仪下侧得 3 种涂层样品及裸铝板表面的水滴接触角数据,如表 2 所示。由测量结果可见,涂料中添加 PDMS 和 SiO<sub>2</sub> 成分所制成的#3 环氧树脂涂层疏水效果最好。因此试验将以#3 样品作为试验组,进行防冰等性能的考察,与其他 3 种样品进行对比分析。

表 2 样品水滴接触角(°)

Table 2 Contact angle of samples water drop (°)

Sample	Contact angle
#0	71.2
#1	74.0
#2	108.6
#3	147.0

(2)样品表面形貌。将#0样品(裸铝板)、#2样品(添加PDMS的涂层样品)和#3样品(添加PDMS和SiO<sub>2</sub>的涂层样品)分别放置在扫描电镜下观测其表面的形貌特征。

几种样品的表面形貌如图3所示,可以观察到:普通未经处理的铝板表面基本平整,只有少数机械

摩擦的痕迹;添加PDMS的有机涂层表面存在小块凸起和凹陷,但整体起伏并不明显;而在添加SiO<sub>2</sub>后的有机涂层失去了原有平齐的表面,形成了大量的球形凸起结构,将局部放大之后仍可以看到更加细小的凸起存在于这些球形结构上,使涂层表面更加粗糙。

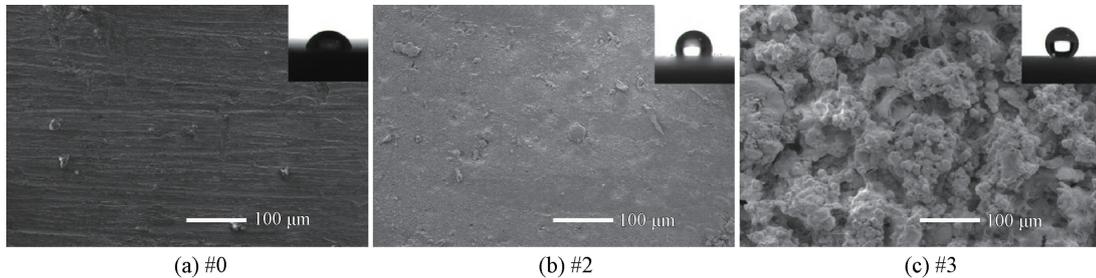


图3 裸铝板及涂层样品表面形貌

Fig. 3 Surface morphology of bare aluminum sheet and coating samples

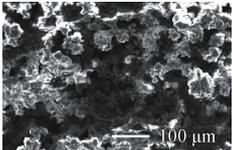
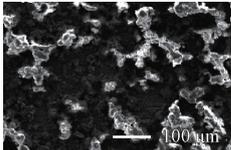
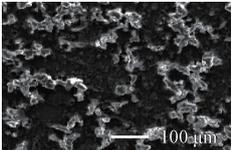
## 2.2 疏水涂层的耐候性能分析

材料的耐候性能是投入工程服役的重要指标。将疏水性能最优异的含PDMS和SiO<sub>2</sub>环氧树脂涂

层样品放入试验箱中,分别进行盐雾试验、老化试验和淋雨试验。试验条件、周期及样品形貌结果如表3所示。

表3 耐候性能试验

Table 3 Demonstration of weathering resistance test

Test name	Salt spray test	Aging test	Rain test
Cycle and parameters	NaCl, C% = 5 30 days	60 °C 30 days	1 000 μL/min 60 min/time 30 times
Morphology			
Contact angle	139.9°	136.4°	133.0°

由耐候性试验结果可以看到涂层的接触角都有着不同程度的减小。其中盐雾试验的微观形貌与原始涂层相比变化较小,涂层只出现少量裂纹,表面的球状突起依旧比较致密;老化试验中的涂层样品表面结构破坏比较明显,涂层表面的球状突起结构的致密性有所减损,且出现了基材暴露的情况;经历淋雨试验的涂层损伤也较为突出,疏水层开始脱落且变薄,表面留下冲刷的痕迹,球状的突起结构数量下降,少量基材暴露。

综合盐雾、老化、淋雨3种试验的结果来看,每种耐候性试验下的环氧树脂涂层样品整体都维持完好,材料表面仍然具有相当数量的突起结构,仅仅有少量基材暴露,材料所表现出疏水性能依旧非常优异,水滴接触角度都保持在130°以上。因此,由耐候性试验结果判断,此类含PDMS和

SiO<sub>2</sub>的环氧树脂涂层可以喷涂在铝合金线路上进行长期应用。

## 3 疏水涂层防冰性能分析

### 3.1 疏水涂层防冰性能的影响因素分析

覆冰试验将3种疏水性能不同的涂层样品和裸铝板样品放置到低于零摄氏度的高湿度环境中进行滴水淋雨模拟<sup>[32]</sup>,持续一定时间后测量样品表面累积的冰层质量,通过改变温度和淋水量等参数测试疏水性涂层的防冰性能。

将样品放入环境模拟试验箱中,环境湿度控制在80%~90%的区间内,定时10 min,分别进行不同温度及滴水速率的测试,试验结果如图4所示。从试验结果可以观察到,疏水性涂层相比于裸铝板有着明显的防结冰作用,而且随着涂层接触角度增大,

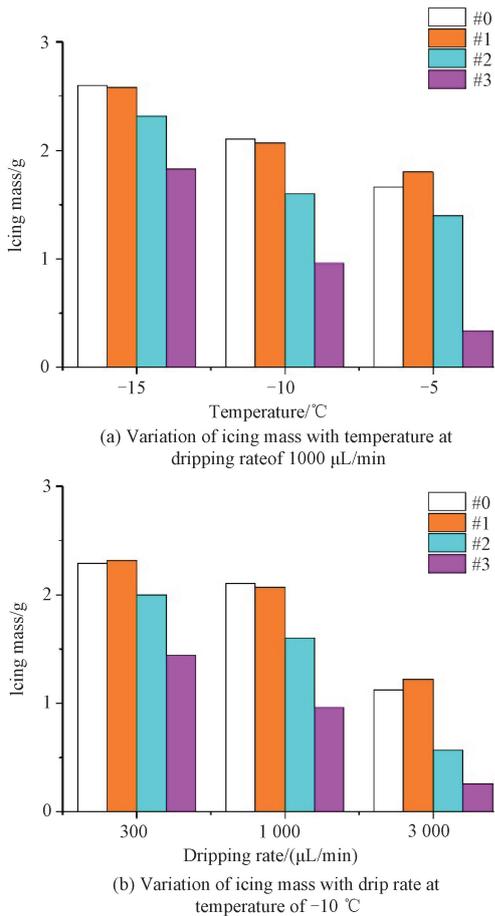


图 4 4 种样品 10 min 覆冰质量随温度和滴水速率变化  
Fig. 4 Comparison of icing mass of four samples with temperature and dripping rate in 10 min

防冰效果也越显著。在图 4a 中,滴水速率固定时,冰层质量的增长速度随温度升高而降低;图 4b 中,环境温度为-10 °C 时,冰层质量也会随着滴水速率的加快而减缓增量。这是由于水滴温度较高,当其滴落在样品表面流走时,会带走样品表层的热量,样品表面的温度升高,减缓冰层生长的速率。此外,从图 3 的结果可以发现,当温度较低或水滴速率较快时,疏水性能高的涂层材料防冰效果更加显著,而随着温度的降低或滴水速度减缓,疏水涂层与普通涂层及裸铝板相比,防冰性能优势将逐渐减弱。

### 3.2 铝绞线疏水性涂层的防冰性能分析

为进一步探究疏水性涂层对电网线路的防结冰效果,使用 3 种接触角不同的涂层导线及裸导线样品进行环境试验箱中的模拟覆冰试验。环境箱控制湿度范围 80%~90%,淋雨滴水速率 3 000 μL/min,持续时间 30 min,调节温度为-5 °C、-10 °C、-15 °C 分别进行多组试验。

不同导线样品的覆冰形貌对比如图 5 所示,覆

冰质量及厚度数据如图 6 所示。可以看到添加 PDMS 与 SiO<sub>2</sub> 的疏水性环氧树脂涂层在-5 °C 时有着优异的防结冰效果,相比于原始铝绞线,该涂层能减少线路覆冰量可达 66.8%。进一步分析,将导线覆冰分为紧密包裹在导线外侧的冰层部分以及垂落在导线下侧的冰挂部分,随着疏水性能的提高,导线冰挂质量在总覆冰质量中所占比例逐渐增大,其结果由表 4 给出。(注:#3 样品在-5 °C 时冰挂占比仅有 55.35%是由于试验中冰挂自然脱落造成的。)

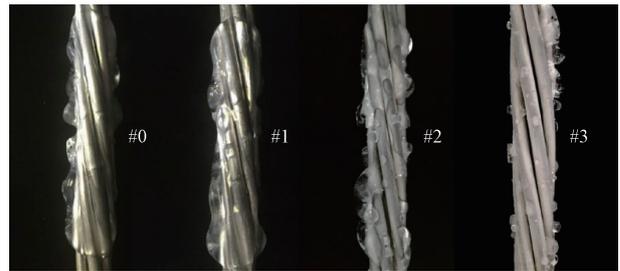


图 5 环境温度-5 °C 时 4 种样品的覆冰形貌  
Fig. 5 Icing morphologies of four wire samples at -5 °C

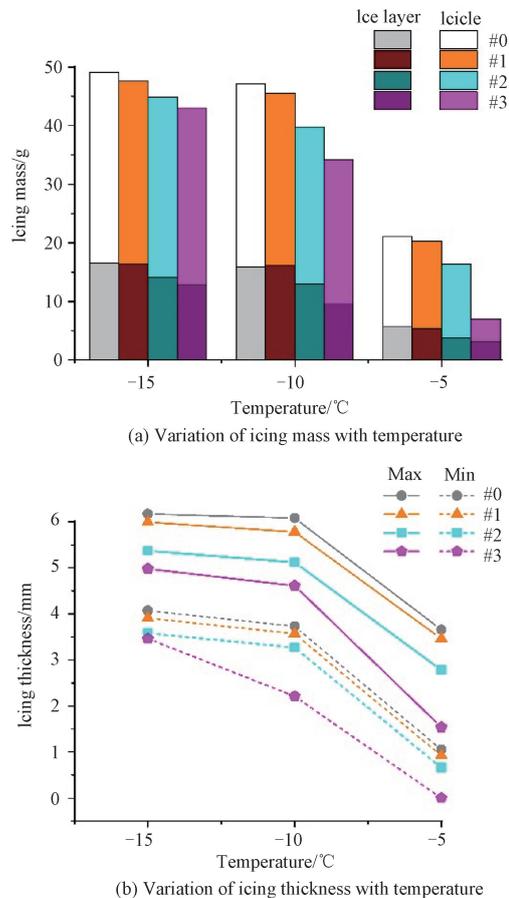


图 6 4 种导线样品 30min 覆冰质量及厚度随温度变化对比  
Fig. 6 Comparison of icing mass and thickness of four wire samples with temperature in 30 min

表4 导线覆冰试验冰挂质量比例表(%)

Table 4 Weight proportion of icicle in wire icing test (%)

Temperature	#0	#1	#2	#3
-15 °C	66.18	65.44	68.60	70.17
-10 °C	66.21	64.54	67.50	72.13
-5 °C	72.60	73.39	76.90	55.35

由于生长在导线下侧的细长冰挂非常容易因机械敲打或振动而掉落,疏水层涂覆在电网线路上后不仅能减少覆冰的总质量,而且产生的覆冰也更易于使用最简单的机械法进行有效地清除,同时在预防和除冰两个阶段发挥积极的作用。

## 4 结论

这种通过使用疏水涂层进行覆冰预防的新型的防结冰方式具备以下优势。

(1) 起到预防效果。现阶段最有效的两种防冰方法——电流融冰和机械除冰法都是在已经产生覆冰的情况再进行覆冰的消除工作,而疏水性涂层防冰法则是在覆冰发生之前对电网进行防护,使其抑制或减少结冰产生,直接从根源上杜绝或减缓线路表面覆冰的问题。

(2) 节约人力财力。热力防冰、融冰的方法存在消耗能量高的缺点,机械除冰方法则需要工人对配电系统设备进行效率较低的现场作业,使用涂层预防法抑制结冰的发生是目前电网应用中最为经济有效的手段。

(3) 免除电网的损伤。如果长时间提高电网的电流运行强度会给电路运行带来不利,利用机械手段清除电网覆冰也可能给线路本身带来机械性损伤。而使用疏水性涂层防护线路可以减少电气和机械性伤害,避免因导线严重覆冰而产生的线路运行隐患。

此外,这种适用于配电网线路涂装的疏水层具有以下防结冰性能与实际应用效果:① 疏水性涂层可以确实有效地抑制导线表面的覆冰生长,尤其在温度高于-10 °C的覆冰环境下,防结冰效果比较显著;② 疏水涂层会改变导线在低温雨水环境中产生的覆冰形貌,使覆冰累积在导线下侧形成冰挂的比例增高,可以降低清除难度;③ 通过使用疏水层涂装线路防冰的手段仅能推迟导线开始产生覆冰的时间,并不能彻底抑制结冰事件的发生,一旦冰层生长至将导线表层全部覆盖,疏水层也会失去作用;④ 疏水性涂层覆冰预防法应与传统的电流融冰、机械除冰法配合使用,在覆冰严重的地区疏水性涂层虽然无法完全抑制结冰的产生,但可以改变冰层形

貌、降低覆冰质量,使其更易被传统方法清除。

总之,疏水性涂层更适合应用于-10~0 °C范围内的较高温区间,通过减缓覆冰生长速度和提升机械清除效率进行导线结冰防护。同时,其它电网防冰方法在配合疏水涂层预防的基础上共同使用,可以更有效地节省人力、物力。最后,由于试验箱模拟环境与实际工况存在差异,而且目前关于防冰测试的研究缺少统一标准,虽然试验结果无法完全与实际情况等,但使用疏水涂层仍在配电网线路防冰方面展示了一定的潜力。

## 参 考 文 献

- [1] 李庆峰,范峥,吴穹,等. 全国输电线路覆冰情况调研及事故分析[J]. 电网技术, 2008(9): 33-36.  
LI Q F, FAN Z, WU Q, et al. Investigation of ice-covered transmission lines and analysis on transmission line failures caused by ice-coating in china[J]. Power System Technology, 2008(9): 33-36. (in Chinese)
- [2] 李鹏,范建斌,宿志一,等. 750 kV 交流输电线路覆冰区绝缘设计[J]. 电力设备, 2007(3): 24-27.  
LI P, FAN J B, SU Z Y, et al. Insulation design in icing areas for 750 kV transmission lines[J]. Electrical Equipment, 2007(3): 24-27. (in Chinese)
- [3] 李成榕,吕玉珍,崔翔,等. 冰雪灾害条件下我国电网安全运行面临的问题[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 14-22.  
LI C R, LÜ Y Z, CUI X, et al. Research issues for safe operation of power grid in china under ice-snow disasters[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 14-22. (in Chinese)
- [4] 蒋兴良,肖代波,孙才新. 憎水性涂料在输电线路防冰中的应用前景[J]. 南方电网技术, 2008, 2(2): 13-18.  
JIANG X L, XIAO D B, SUN C X. Application prospect of hydrophobic coatings on anti-icing of transmission lines[J]. Southern Power System Technology, 2008, 2(2): 13-18. (in Chinese)
- [5] 蒋兴良,易辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.  
JIANG X L, YI H. Transmission line icing and protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002. (in Chinese)
- [6] 王大兴. 电流融冰过程中导线表面温度特性及其影响因素的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.  
WANG D X. Research on temperature characteristic of conductor and its influencing factors during ice-melting[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese)
- [7] 胡杨昊,易灵芝,赵纯. 新型内嵌式地线融冰电流计算[J]. 计算技术与自动化, 2015, 34(2): 56-59.  
HU Y H, YI L Z, ZHAO C. Current calculation model embedded wire melting ice[J]. Computer Technology and

- Automation, 2015, 34(2): 56-59. (in Chinese)
- [ 8 ] 常浩, 石岩, 殷威扬, 等. 交直流线路融冰技术研究[J]. 电网技术, 2008(5): 1-6.  
CHANG H, SHI Y, YIN W Y, et al. Ice-melting technologies for HVAC and HVDC transmission line [ J ]. Power System Technology, 2008(5): 1-6. (in Chinese)
- [ 9 ] 王红斌, 王琦, 崔翔. 输电线路高频、高压激励融冰技术研究[J]. 广东电力, 2009, 22(8): 21-24.  
WANG H B, WANG Q, CUI X. Research on deicing power transmission lines with high-frequency and high-voltage excitation [ J ]. Guangdong Electric Power, 2009, 22(8): 21-24. (in Chinese)
- [ 10 ] 蒋兴良, 万启发, 吴盛麟, 等. 输电线路除冰新技术—低居里(LC)磁热线在线路除冰中的应用[J]. 高电压技术, 1992(3): 55-58.  
JIANG X L, WANG Q F, WU S L, et al. A new deicing method-application of a magnetic material wire with low curie point in the deicing of transmission lines [ J ]. High Voltage Engineering, 1992(3): 55-58. (in Chinese)
- [ 11 ] 山霞, 舒乃秋. 关于架空输电线除冰措施的研究[J]. 高电压技术, 2006, 2(4): 25-27.  
SHAN X, SHU N Q. Discussion on methods of de-icing for overhead transmission lines [ J ]. High Voltage Engineering, 2006, 2(4): 25-27. (in Chinese)
- [ 12 ] 安娜. 外激谐振式输电线路除冰系统驱动机理的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.  
AN N. The Research of the de-icing system driving mechanism for electricity transmission line based on additional resonant[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [ 13 ] YUAN Z Q, WANG X, BIN J P, et al. Anti-icing properties of superhydrophobic poly (vinyl chloride) coatings[J]. Advanced Materials Research, 2013, 634-638: 2969-2972.
- [ 14 ] VAGANOV G V, VAGANOV V V, RADCHENKO I L, et al. Highly hydrophobic anti-icing coatings [ J ]. IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2020, 539: 012038.
- [ 15 ] 胡小华. 输电线路防覆冰涂料的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.  
HU X H. Development of ice-over resistant coatings for electric transmission lines [ D ]. Chongqing: Chongqing University, 2006. (in Chinese)
- [ 16 ] RODIC P, MILOSEV I. One-step ultrasound fabrication of corrosion resistant, self-cleaning and anti-icing coatings on aluminium[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 369: 175-185.
- [ 17 ] 武壮壮, 马国佳, 崔向中, 等. 微纳结构超疏水表面的浸润性及防冰性能[J]. 复合材料学报, 2020, 37(11): 119-125.  
WU Z Z, MA G J, CUI X Z, et al. Wettability and anti-icing performance of micro-nano structure superhydrophobic surface [ J ]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(11): 119-125. (in Chinese)
- [ 18 ] 郑海坤, 常士楠, 赵媛媛. 超疏水/超润滑表面的防疏冰机理及其应用[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. (in Chinese)
- [ 19 ] 杨钦, 罗荏竹, 谭生, 等. 超疏水自清洁涂层防结冰技术的研究进展[J]. 中国表面工程, 2016, 29(4): 10-22.  
YANG Q, LUO Z Z, TAN S, et al. Research progress in anti-icing technology of superhydrophobic self-cleaning coating [ J ]. China Surface Engineering, 2016, 29(4): 10-22. (in Chinese)
- [ 20 ] JUNG S, DORRESTIJN M, RAPS D, et al. Are superhydrophobic surfaces best for icephobicity [ J ]. Langmuir, 2011, 27(6): 3059-3066.
- [ 21 ] YANG J, LI W. P repairation of superhydrophobic surfaces on Al substrates and the anti-icing behavior [ J ]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 576: 215-219.
- [ 22 ] WANG F J, SHEN T H, LI C Q, et al. Low temperature self-cleaning properties of superhydrophobic surfaces [ J ]. Applied Surface Science, 2014, 317: 1107-1112.
- [ 23 ] 阎映弟. 新型超疏水涂层的微纳结构设计及其表面防覆冰作用[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.  
YAN Y D. The micro-nano structure design of novel superhydrophobic coatings and their anti-icing & ice phobic properties [ D ]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [ 24 ] ZHAN X L, YAN Y D, ZHANG Q H, et al. A novel superhydrophobic hybrid nanocomposite material prepared by surface-initiated AGET ATRP and its anti-icing properties [ J ]. Journal of Materials Chemistry A, 2014, 2(24): 9390-9399.
- [ 25 ] 赵玉顺. 绝缘子超疏水涂层制备方法与防冰性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.  
ZHAO S Y. Preparation and anti-icing performances of superhydrophobic coating for insulators [ D ]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese)
- [ 26 ] JIANG X L, MA J, ZHANG Z J, et al. Effect of hydrophobicity coating on insulator icing and DC flashover performance of iced insulators [ J ]. Dielectrics & Electrical Insulation IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(2): 351-359.
- [ 27 ] YANG C, WANG F, LI W, et al. Anti-icing properties of superhydrophobic ZnO/PDMS composite coating [ J ]. Applied Physics A, 2015, 122(1): 1.
- [ 28 ] 李战胜. 基于纳米二氧化硅的防冰疏水涂层的制备及性能研究[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(4): 27-31.  
LI Z S. Preparation of anti-icing hydrophobic coating based on nano-silica and study on its properties [ J ]. Electroplating & Finishing, 2020, 39(4): 27-31. (in Chinese)
- [ 29 ] 徐尧. 铝基超疏水表面的制备及其防结冰性能分析[D]. 长春: 吉林大学, 2019.

- XU Y. Preparation of superhydrophobic surface and analysis of its anti-icing performance on aluminium alloy surface [ D ]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [30] RODI P, KAPUN B, PANJAN M, et al. Easy and fast fabrication of self-cleaning and anti-icing perfluoroalkyl silane film on aluminium[J]. *Coatings*, 2020, 10(3): 234.
- [31] 谢月涵. 铝基超疏水表面过冷液滴结晶过程及防冰性能研究 [ D ]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- XIE Y H. Supercooled droplet crystallization process and anti-icing mechanism of the superhydrophobic aluminum surfaces [ D ]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [32] 何凯. 铝片表面的疏水化及其稳定性研究 [ D ]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- HE K. Study on the hydrophobization of aluminum substrate and its stabilities [ D ]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- 
- 作者简介:** 李超逸, 男, 1996 年出生, 硕士。主要研究方向为表面工程。  
E-mail: chaoyi\_li@foxmail.com
- 樊小强 (通信作者), 男, 1986 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为摩擦学及表面工程。  
E-mail: fxq@home.swjtu.edu.cn