



表面技术

Surface Technology

ISSN 1001-3660, CN 50-1083/TG

## 《表面技术》网络首发论文

题目： 防冰涂层材料及电力材料防覆冰应用的研究进展  
作者： 郑奇凯，孙阔腾，黄松强，周经中，何学敏，刘奕，吴双杰，周平  
网络首发日期： 2021-08-02  
引用格式： 郑奇凯，孙阔腾，黄松强，周经中，何学敏，刘奕，吴双杰，周平. 防冰涂层材料及电力材料防覆冰应用的研究进展. 表面技术.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1083.tg.20210802.0931.006.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

## 防冰涂层材料及电力材料防覆冰应用的研究进展

郑奇凯<sup>1</sup>, 孙阔腾<sup>1</sup>, 黄松强<sup>1</sup>, 周经中<sup>1</sup>, 何学敏<sup>1</sup>, 刘奕<sup>2\*</sup>, 吴双杰<sup>2</sup>, 周平<sup>2</sup>

(1.中国南方电网有限责任公司超高压输电公司柳州局, 柳州 545006; 2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201)

**摘要:** 防冰涂层材料可有效减轻自然界结冰现象的影响, 其通过防冰材料低表面能或高润滑性的特点, 降低在低温严寒天气条件下物体表面冰的黏附强度、延迟材料覆冰时间、减少表面覆冰量, 在保护电力材料免受冰冻灾害影响方面有着重要应用价值。基于热喷涂法制备的复合型表面防冰涂层材料, 以及主被动相结合的防覆冰方法是未来电力材料防覆冰应用发展的重要方向。然而截止目前, 有关复合型表面防冰涂层材料热喷涂制备, 以及涂层在电力材料防冰应用研究的进展综述鲜见报道。本文从超疏水材料与光热、电热除冰相结合的除冰方式, 或超疏水-超润滑复合材料实现防冰除冰的角度出发, 对近年来国内外复合方式防冰涂层的制备及性能的研究进展进行了综述, 并重点讨论了适合于热喷涂制备的复合型涂层的防冰除冰效果。最后, 本文讨论了超疏水防冰涂层、复合型防冰涂层在电力材料表面防覆冰方面应用研究的进展, 并对热喷涂法制备防冰涂层的应用前景和存在的局限性进行了展望, 希望在复合型防冰方法方面进一步开展研究, 为电力材料表面防冰涂层的未来发展提供指导。

中图分类号: TG147 文献标识码: A

### Research progress of anti-icing and deicing coating materials and its applications in the protection of electrical materials

ZHENG Qi-kai<sup>1</sup>, SUN Kuo-teng<sup>1</sup>, HUANG Song-qiang<sup>1</sup>, ZHOU Jing-zhong<sup>1</sup>, HE Xue-min<sup>1</sup>, LIU Yi<sup>2\*</sup>, WU Shuang-jie<sup>2</sup>, ZHOU Ping<sup>2</sup>

1. Liuzhou Bureau, UHV Transmission Company, China Southern Power Grid Co., Ltd, Liuzhou 545006; 2. Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201

**Abstract:** Anti icing coating materials can effectively reduce the impact of natural icing phenomenon. Due to the low surface energy or high lubricity of anti icing

materials, it can weaken the adhesion strength of ice on the surface of objects under severe cold weather conditions, delay the icing time and reduce the surface icing amount, which has important practical value in protecting electric power materials from freezing disaster. Composite surface anti icing coating materials prepared by the thermal spraying method and active-passive anti icing methods are the important research focuses of anti icing application of power materials in the future. However, up to now, the research progresses of preparation methods of thermal sprayed composite anti icing coatings, as well as the protection applications of electrical materials were seldom reported. In this paper, from the point of view of the combination of superhydrophobic materials and photothermal/electrothermal deicing method, and the composite coatings of super-hydrophobic and superlubricating materials for anti icing and deicing, domestic and international research works about the preparation and performance of composite anti icing coatings in recent years were reviewed, and the anti icing and deicing effects of the composite coatings suitable for thermal spraying were also discussed. Finally, the research progress of superhydrophobic anti icing coating and composite anti-icing coating on the surface of electric power materials was discussed, and the application prospects and limitations of thermal spraying anti-icing coatings are also prospected. It is hoped that further research on composite anti icing methods can provide guidance for the future development of surface anti icing coating of electric power materials.

**关键词:** 电力材料; 防冰; 除冰; 涂层; 热喷涂

**Key Words:** power materials; anti icing; deicing; coatings; thermal spray

**作者简介:** 郑奇凯(1992-), 男, 本科, 助理工程师, 主要研究方向是超高压电力材料运维与防护技术。

**Biography:** Zheng Qi-kai(1992-), Male, Bachelor, Assistant Engineer, Research focus: operation, maintenance, and protection techniques of extra-high voltage power transmission line or power grid material.

**通讯作者:** 刘奕 (1985-), 女, 博士, 副研究员, 主要研究方向是表面防覆冰/除冰技术与应用。邮箱: liuyi@nimte.ac.cn

**Corresponding Author:** Liu Yi (1985-), Female, Doctor, Associate Professor, Research focus: Surface anti-icing/deicing technology and application. Email: liuyi@nimte.ac.cn.

为解决我国电力资源空间分布不均衡的难题,我国提出了煤电、水电的西电东送工程,建设覆盖全国的超级电网<sup>[1-4]</sup>,以及惠及全球的能源互联网发展战略<sup>[5-7]</sup>,从而实现电能的远距离输送和电力资源与需求的优化配置。在我国电力战略的发展建设中,电力材料表面覆冰问题是电力系统最严重的威胁之一<sup>[8]</sup>。在地理上,远距离超、特高压输电线路将必须经过高海拔、重覆冰地区;而在季节因素方面,持续性的雨雪、严寒冰冻天气,也将给风力发电机叶片、输变电设施、输电线路带来大面积覆冰问题<sup>[9]</sup>。其中,风力发电机叶片覆冰将导致机组停转,绝缘子覆冰将造成冰闪跳闸甚至线路停运,而线路停运更加剧导线覆冰,继而引发倒塔断线等事故;情况严重者可造成电力设施大范围损毁,从而使电网遭到严重破坏,影响国家电力安全,以及工业生产和居民生活。2008年年初,我国湘、黔、鄂、赣、皖等南部地区发生的大面积低温雨雪冰冻灾害对缺少抗覆冰设计的输电线路产生严重影响,并造成重大损失<sup>[10-12]</sup>。2021年2月份,美国南部的得克萨斯州遭遇极端严寒天气,该州大量风电机组由于缺少表面防覆冰措施而导致大量设备停转<sup>[13]</sup>。因此,为保障电力运行安全,对风力发电机叶片、输电线路、塔架、绝缘子等电力材料采取适当的防冰除冰等措施显得非常重要<sup>[14-15]</sup>。

防冰材料是重要的防止或延缓物体表面结冰现象的功能材料,在减轻自然界结冰现象的灾害性影响方面有着广泛应用和重要价值。人们通常利用防冰材料低表面能或高润滑性的特点,以在低温严寒条件下,降低物体表面冰的黏附强度、延迟覆冰时间、减少材料表面覆冰量<sup>[16]</sup>。表面防冰材料可广泛应用于电力、航空、化工等领域,包括风力发电机、舰船、飞行器、建筑物,以及高压输电线路电力材料在内的防冰措施等等<sup>[17]</sup>。

表面防冰涂层是重要的防冰材料之一,可应用于电力材料表面防冰除冰等应用。目前电力材料表面防冰涂层的制备方法主要有气相沉积<sup>[18]</sup>、热喷涂<sup>[19-21]</sup>、

模板法<sup>[22]</sup>、静电纺丝<sup>[23]</sup>、溶胶凝胶<sup>[24]</sup>等等。其中，热喷涂法是一种重要的表面防冰涂层材料制备方法，具有经济、高效、灵活的优势，可在金属、非金属等基底表面制备高性能防冰涂层等<sup>[25]</sup>。该方法通过将涂层材料高温熔化，以高速喷射沉积到待制备基底表面，以实现 0.01 毫米到数毫米的功能材料层，具有可选涂层材料种类多样、适应性强等诸多优点，在物体表面防冰涂层材料的制备方面有重要应用前景。因此，基于热喷涂法制备的复合型表面防冰涂层材料，以及主被动结合防覆冰方法是未来电力材料防覆冰应用发展的重要方向。然而截止目前，相关研究进展的综述尚未见报道。本文主要调研了复合型超疏水表面防冰涂层、主被动结合的防冰涂层的国内外最新研究工作进展；对不同涂层材料的制备条件，涂料结构组成及其防冰效果进行了详细综述；最后对热喷涂法制备防冰涂层材料在电力材料防覆冰应用及未来发展进行了展望。

## 1 表面防冰涂层材料简介

物体表面防冰的重要环节是减少水滴在其表面的附着。固体、液滴、大气三个界面间存在表面张力，而固-液-气三相体系为了达到最小能量，需达到平衡状态。固-液界面和液-气界面间的夹角即液滴在固体上的接触角。当此接触角不超过 90°时，液滴可平铺开，可认为该固体表面为亲水表面；而当此接触角不超过 5°则被称为超亲水表面。反之，当此接触角超过 90°时，相应的界面润湿性差，液滴在界面上为水珠状。而当接触角超过 150°时，该固体表面则为超疏水表面<sup>[26]</sup>。而较大的接触角将使液滴更容易从物体表面滚落，避免结冰现象的发生。因此，通常可基于超疏水表面的思路，使用以下三种方法实现物体表面防冰：

(1) 制作疏水表面层。即通过构筑表面微纳结构、制备化学涂层两种方式实现低表面能的疏水-超疏水表面（Hydrophobic-Superhydrophobic Surfaces: HS and SHS）；通过减小液体与物体表面接触面积，以使液滴从物体表面迅速脱落，从而避免冰核形成，以使得物体表面覆冰量减少；

(2) 构筑与超疏水表面层相结合的超润滑表面层。即通过将防冻剂、润滑剂等物质注入具有超疏水特性的微纳结构层，以大大降低冰层与物体表面的黏附程度，从而使冰层脱落或抑制材料表面积冰；

(3) 构筑超疏水性的复合性防冰涂层结构。基于超疏水材料表面被动防冰方

法，结合主动的电热型（Electrothermal Deicing），光热型防冰（Photothermal Deicing）手段，可更好地发挥防冰效能<sup>[27]</sup>。基于超疏水表面-超润滑层-光热除冰相结合的方式，也可实现更高效的复合方法防冰除冰。

在电力材料防冰应用方面，考虑防护材料的超疏水性、机械稳定性、化学稳定性等综合因素，传统应用的材料包括有机氟聚合物、有机硅聚合物等多种<sup>[28]</sup>。其中，有机氟聚合物中，氟原子呈现出很强的电负性，在其与有机物碳原子相互之间的排斥作用下，氟原子将向外层迁移并聚集在聚合物材料表层，从而使得材料的表面能降低；有机硅聚合物结构中，既存在着有机基团，又含有无机结构，因此其表面疏水性良好<sup>[29]</sup>，所具有的支链易于转变成表面能较低的结构，其表面能略高于有机氟材料，但材料成本远低于前者<sup>[30]</sup>。

近年来，在被动防冰材料方面，人们通过以有机氟、有机硅材料为基料，构筑与其他有机物、无机物微纳材料的共混体系，如环氧树脂-有机硅共混体系；或者制备有机氟、有机硅与其他带活性基团的有机物嵌段或者共聚物材料，提高超疏水防冰材料的机械耐磨和防冰除冰性能<sup>[31, 32]</sup>。而在复合防冰材料方面，人们通过将超疏水表面材料与光热、电热、超润滑等手段相结合，发展复合的防冰除冰方法，以大幅提高涂层的防冰除冰效能。

## 2 热喷涂防冰涂层材料研究及应用进展

为实现电力材料防冰涂层的制备，研究人员主要通过超疏水涂层和复合方法防冰涂层两种途径实现。表 1 所列为几种典型的制备超疏水涂层的方法与相应的优缺点。如表 1 可知，热喷涂法在超疏水涂层的制备方面具有工艺简单、可大面积快速制备等优势，有利于实际应用的推广。

**表 1** 典型超疏水表面（SHS）涂层的制备方法及其优缺点

**Table 1.** Advantages and drawbacks of typical fabrication methods of SHS surfaces

	Methods	Advantages	Drawbacks
Physical Approach	Plasma Etching	Tunable and Simple	Equipments too expensive
	Thermal Spray	Simple, feasible for large and complex surface	Microstructure difficult to control
	Templates	Simple and repeatable	Inapplicable for large scale use
Chemical Approach	Sol-Gel	Tunable and simple	Eco-unfriendly, inapplicable for complex surface

Dip Coating	Simple	Feasible for special materials
CVD	Feasible for complex surface	Equipments too expensive

超疏水表面涂层具有表面能低、疏水性强的特点。人们通常采用选取特定成分的材料表面基团或人为构筑微纳粗糙结构的方法,以实现材料表面的超疏水性质,达到延缓材料表面结冰覆冰过程、提高输电线路抗覆冰能力的作用;进一步的,利用超疏水性基料和吸光填料制备的光热型复合防冰材料,则可同时利用超疏水性和光热、电热、超润滑作用相结合,进一步提升防冰除冰效能。由于热喷涂法在实现这两种类型的防冰涂层的制备方面具有重要应用优势,下面将对热喷涂超疏水表面涂层及其在电力材料防覆冰应用进行综述介绍。

## 2.1 热喷涂方法制备超疏水被动防冰涂层材料及其应用

超疏水防冰涂层的重要设计思路是在物体表面制作可将水分子中的氧原子隔开的惰性原子或原子团。因此,在廉价、超疏水、机械耐磨等综合应用需求的考量下,可行选择是富含碳氢或碳氟等低表面能基团的聚合有机物材料<sup>[31-32]</sup>。其中包括典型的低密度聚乙烯材料、有机氟化物等;为进一步提高材料的超疏水性、与基底间的附着性、耐磨性等综合性能,可以有有机氟、有机硅等低表面能材料为基料,通过结构调节和加入无机物填料以制备聚合物防冰层或涂料<sup>[33]</sup>。下面对近年来国内外超疏水被动防冰涂层的热喷涂制备,涂层超疏水特性研究及应用的进展的典型工作进行系统综述。

低密度聚乙烯是一种典型的具有超疏水特性的材料。芬兰的 V. Donadei 等人研究了不同参数条件对火焰喷涂法制备低密度聚乙烯 (LPDE) 防冰涂层的影响<sup>[36]</sup>。通过对火焰喷涂过程中的热输入控制,改变横向移动速度和喷涂距离开展了比较研究。结果表明,涂层材料的质量,包括厚度、粗糙度、化学组分、热稳定性和结晶度等参数都在较大程度上受到这些制备参数的影响;而包括粗糙度在内的参数将可调节 LPDE 材料的防冰性能。然而,研究人员发现,包括低密度聚乙烯在内的有机物超疏水表面的力学性能不佳,其表面的微纳粗糙结构机械强度差,容易在外部冲击或摩擦作用下损坏,造成粗糙特性退化与表面疏水性能变差<sup>[37]</sup>。为解决此问题,一种可行思路为:选用有机氟、有机硅等基料,通过加入有机物、无机物填料,在提高材料表面的超疏水性的同时,改善其耐磨性能。

国内在改性有机氟、有机硅聚合物超疏水涂层的制备方面开展了多项研究工作。哈尔滨工业大学的 R. Weng 等人采用热喷涂法实现了聚四氟乙烯 (PTFE) /

聚苯硫醚（PPS）超疏水涂层制备<sup>[38]</sup>。研究发现，当聚四氟乙烯的含量为 4% 时，涂层材料表面接触角为 158°；加入纳米二氧化硅后涂层材料表面接触角将逐渐增加；而当聚四氟乙烯：聚苯硫醚：二氧化硅的质量比为 1:1:1 时，接触角最大为 164°，具有较强的超疏水性，同时涂层与基底间的附着力、耐磨性能也得到了提高<sup>[36]</sup>。复合材料表面水滴接触角随聚四氟乙烯（PTFE）、聚苯硫醚（PPS）、二氧化硅组分比例的变化规律如图 1 所示。这将有利于超疏水防冰涂层的制备。

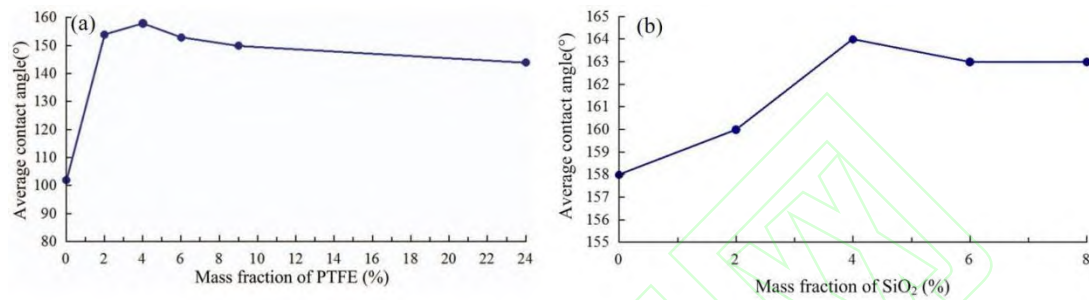


图 1 表面水滴接触角随 PTFE 组分(a)以及 SiO<sub>2</sub> 组分(b)比例的变化规律

Fig.1 The surface contact angle variation depending on the ratio of PTFE(a) and SiO<sub>2</sub>(b)

在有机硅聚合物超疏水涂层制备方面，重庆大学的黄正勇等人通过大气电弧喷涂法制备出具有超疏水性的微/纳米硅橡胶复合填料；在此基础上，采用移动喷涂方法制备出新型超疏水涂层<sup>[39]</sup>。研究人员通过改变喷涂气压、变化喷涂距离，对涂层表面和涂层内部的有机硅基料和微纳米硅橡胶填料的分布情况进行调节，从而实现梯度分布结构的耐磨超疏水涂层。对涂层材料表面疏水性的测试结果表明，其疏水性随着喷涂距离增加而增强，并同时具备了良好的耐磨性能<sup>[39]</sup>。而材料防冰效能的实验结果表明，在低温、高湿环境下，超疏水涂层表面凝露、结霜是防冰失效的原因，其表面微纳粗糙结构对霜晶生长有空间位阻作用，能限制霜晶生长速度和尺寸<sup>[28]</sup>。

在有机-无机共修饰的超疏水涂层研制方面，国外在近年来开展了多项研究。英国诺丁汉大学的 Liu, J. P. 等人比较研究了硅纳米颗粒修饰表面和经过全氟辛基三乙氧基硅烷（perfluorooctyltriethoxysilane: POTS）材料改性硅纳米颗粒的防冰特性<sup>[40]</sup>。结果表明，仅使用硅纳米颗粒的低表面能特性就可以实现较好的抗冰能力，但其抗腐蚀性不佳。然而，若在制备硅纳米颗粒后将 POTS 材料喷涂于硅纳米颗粒表面，则可以同时提高抗冰性、抗腐蚀性及其耐久性，处理后的静态



接触角由 13° 增加到 163°。涂层结构示意图、微观形貌和疏水效果如图 2 所示。

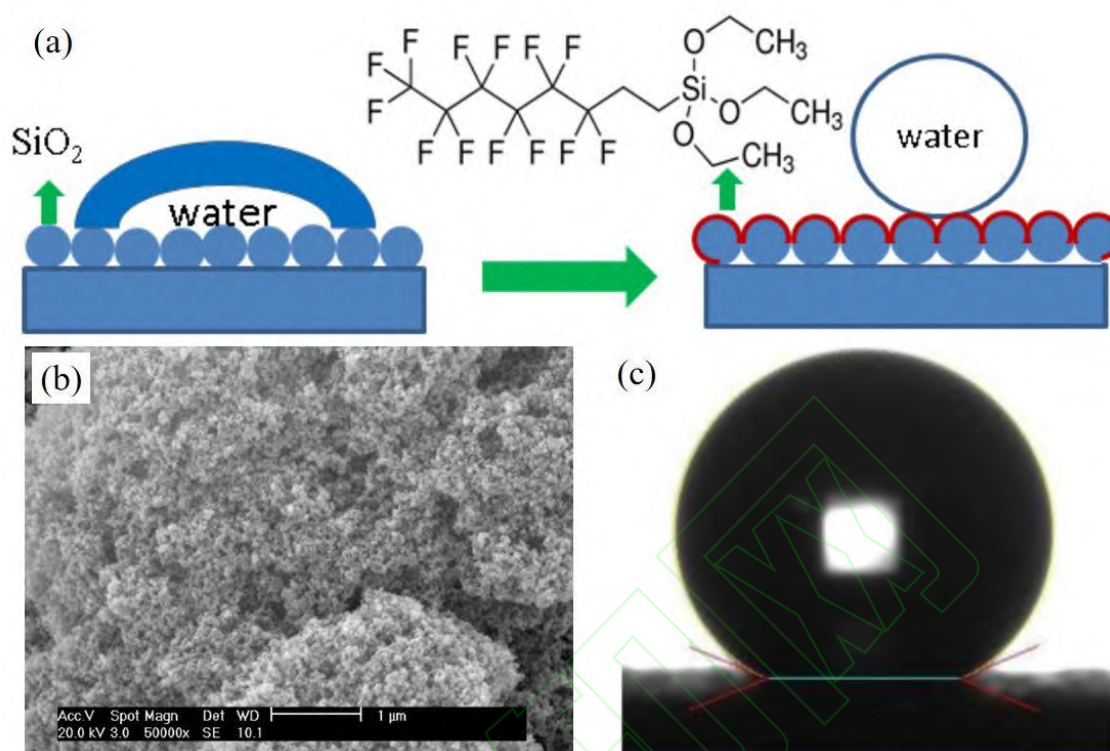


图 2 POTS-硅纳米颗粒复合材料结构示意图(a)、微观形貌(b)和疏水效果(c)<sup>[40]</sup>

Fig. 2 The structure illustration of POTS-Si nano material, its microstructure and hydrophobic properties

美国的 E. B. Caldona 等人将二氧化硅纳米颗粒掺杂到橡胶改性聚苯并恶嗪 (PBZ: polybenzoxazine) 基料中, 通过喷涂法制备得到新型的超疏水材料<sup>[41]</sup>。选择 PBZ 的原因在于材料多方面的优异特性, 包括材料体积在聚合物化后基本不变, 优良的化学电阻性、节点性、热学和力学特性。结果表明, 改进后的复合材料在最优二氧化硅纳米颗粒掺杂量的条件下, 在强腐蚀环境中具备较强的超疏水性和抗污性, 接触角为 158°, 因而具备了较好的防冰性能, 如图 3 所示。作者比较研究了零下 3 摄氏度的户外寒冷天气下, 涂覆有防冰涂层和无涂层的载玻片暴露于雪地 1.5 小时, 发现前者表面明显无雪堆积。另外, 将滴有液滴的涂覆防冰涂层的载玻片放置于液氮上方直至水滴自然结冰, 发现 2-3 秒后冰粒即被室外流动空气吹走。这表明材料同时具备超疏水性和很低的附着力。作者解释到, 在涂层的粗糙表面, 水只会渗透到微米尺度沟槽, 而不会渗透到纳米尺度褶皱中。因此, 这些纳米级褶皱空洞中存在着被困住的气穴, 即使低温结冰下这些气穴依然存在。这些被困的“空气囊”将大大减少冰/雪与基片表面的接触, 从而大大

降低冰的粘附强度，从而实现防冰除冰的效果<sup>[41]</sup>。

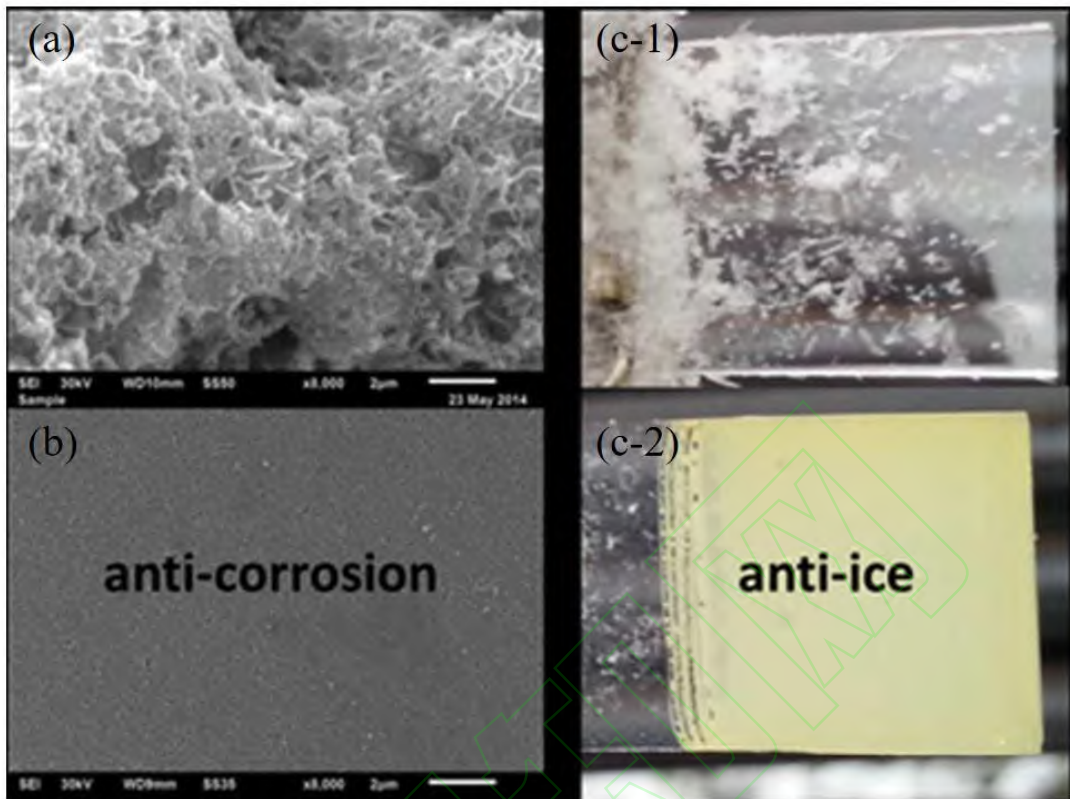


图 3 二氧化硅掺杂的 PBZ 材料形貌和防冰性能<sup>[41]</sup> (a) PBZ-SiO<sub>2</sub> 材料表面形貌，(b) 材料抗腐蚀效果，(c-1) 无复合材料的表面防冰性能，(c-2) 有复合材料的表面防冰性能

Fig. 3 The microstructure and anti-icing performance of SiO<sub>2</sub>modified PBZ (a) Surface morphology of PBZ-SiO<sub>2</sub> material, (b) anti-corrosion performance of PBZ-SiO<sub>2</sub>, (c-1) anti-corrosion performance of the substrate without PBZ-SiO<sub>2</sub> (c-1) and withPBZ-SiO<sub>2</sub>(c-2)

## 2.2 基于复合方式的防冰涂层材料研究进展

基于复合方式的防冰涂层是未来电力材料防覆冰应用的重要发展方向之一<sup>[42]</sup>。通过研制兼具超疏水性与电热、光热、超润滑等功能特性的复合材料，能够更好的提高涂层材料表面的防覆冰性能。

在超疏水-电热复合方式防冰涂层材料的研究方面，人们在近年来取得了一定进展，获得了较高的防覆冰效率。例如，在防冰涂料内添加导电物质，制备得到半导体性质的复合涂层材料，涂覆在高压线路绝缘子表面以增大其表面泄漏电流，利用冰水通路作为开关的“开关效应”的焦耳热效应防止覆冰生成，进而导致

超疏水表面水滴或积冰的脱落，最终达到防冰及除冰的目的<sup>[43]</sup>。清华大学的韦晓星等人利用添加了合适导电物质的室温硫化硅橡胶涂料，实现了超疏水-电热相结合的新型防冰涂层，可依靠电热效应散发的热量在寒冷天气下使绝缘子表面温度保持在 0 °C 以上，从而避免绝缘子覆冰的发生<sup>[44]</sup>。陕西科技大学的 X. M. Luo 等人首次报道了一种利用喷涂法制备的环境友好型三明治结构导电超疏水涂层<sup>[45]</sup>。首先，将氨基乙基氨基丙基-聚二甲基硅氧烷改性的水性聚氨酯(SiWPU)分散体喷涂在玻片上并彻底干燥；然后将多壁碳纳米管(MWCNTs)的乙醇分散喷涂到 SiWPU 涂层上，使其完全干燥；接着将 SiWPU 分散体喷涂到 MWCNTs 涂层上并彻底干燥。最后通过对复合涂层进行热处理，得到超疏水-导电涂层。该工作通过逐步喷涂 MWCNTs 分散体和树脂乳液，使得 MWCNTs 之间连接更紧密，更容易形成三维导电电路。实验结果表明，该新型超疏水-电热复合涂层方块电阻仅为 $(1.1 \pm 0.1)$  k $\Omega$ /sq，且具有较大的接触角（158.1°）和低于 1°的低滑移角，在 72 V 的偏压下，材料表面温度达到 113°C，实现了较好的电热除冰效果。

超疏水-光热型复合防冰材料利用超疏水防冰材料为基料，以高吸光特性的有机、无机物材料作为填料，利用涂料的光热特性，吸收太阳光的热能以提高电力材料表面温度，结合低表面能材料的超疏水性实现防冰除冰。该类材料在白天晴朗天气下将有良好的防冰性能，在夜晚以及持续阴雨天气下除冰效果则将大打折扣<sup>[46]</sup>。而基料的超疏水性则可弥补光热型防冰材料在天气影响以及夜晚无光照条件下除冰性能下降的不足。重庆大学的胡小华等人采用氟硅酸盐改性的硅溶胶-苯丙乳液为基料和具有优良吸光性能的铁锰铜氧尖晶石氧化物颜料，研制出了一种新型的有较强疏水性能的光热性涂料<sup>[47]</sup>。其中，氟硅酸盐改性的作用是降低涂料的表面能，提高其表面疏水性和防冰能力；而尖晶石氧化物的作用是增大材料的光吸收，提高基底温度，抑制表面结冰<sup>[47]</sup>。而在华南理工大学的 G. Jiang 等人的工作中，碘被用作光吸收颜料以提高复合除冰材料的光热性能。作者利用掺杂碘的有机聚合物衬底的吸光特性，使得其具有光热除冰特性；而后采用喷涂方法在掺碘衬底上制备了具有被动防冰性能的超疏水 SiO<sub>2</sub>/SiC 涂层。扫描电镜显微形貌表征结果证明，微尺度 SiC 和纳米尺度 SiO<sub>2</sub> 结合后形成了能够捕获气穴的孔洞，并具有良好的疏水性能，接触角可达 162°。近红外照射的实验结果表明，材料表面将快速升温使冰融化。在照射 10 s 后，涂层表面温度迅速升高

至 200°C 左右，证明衬底中碘的光热效应能有效实现除冰<sup>[48]</sup>。

同样是 G. Jiang 等人所在课题小组，利用碳纳米管的吸光特性实现新型复合防冰材料。作者采用喷涂法将碳化硅粉体-碳纳米管复合涂层制备在乙酸乙烯酯共聚物 (EVA) 衬底上，实现了超疏水-光热复合型防冰涂层<sup>[49]</sup>。平均粒径 7.5 微米的 SiC 粉末与直径 100 nm 的多壁碳纳米管 (CNT) 按照质量比 1:2, 1:1, 2:1, 5:1, 10:1 混合，以喷涂法在 EVA 衬底上制备防冰涂层。涂层表面粗糙度在 1.7-5.3  $\mu\text{m}$  之间，而微米尺寸的 SiC 粗糙结构上复合有纳米尺度的 CNT 材料。微纳复合粗糙结构使复合材料表面具备超疏水特性。如图 4 所示，改变 SiC 粉末和碳纳米管的质量比，材料表面接触角呈现出先增大后减小的规律。在 SiC/CNT 比例为 2:1 时，材料表面具有最大接触角和最优的防冰效果：冷冻实验中，EVA 表面水滴的完全结冰时间由无防冰层的 15 秒延长到有防冰层的 66 秒，而且利用 CNT 的高吸光特性，可通过 808 nm 的近红外光照射使冰粒快速融化，如图 5 所示。

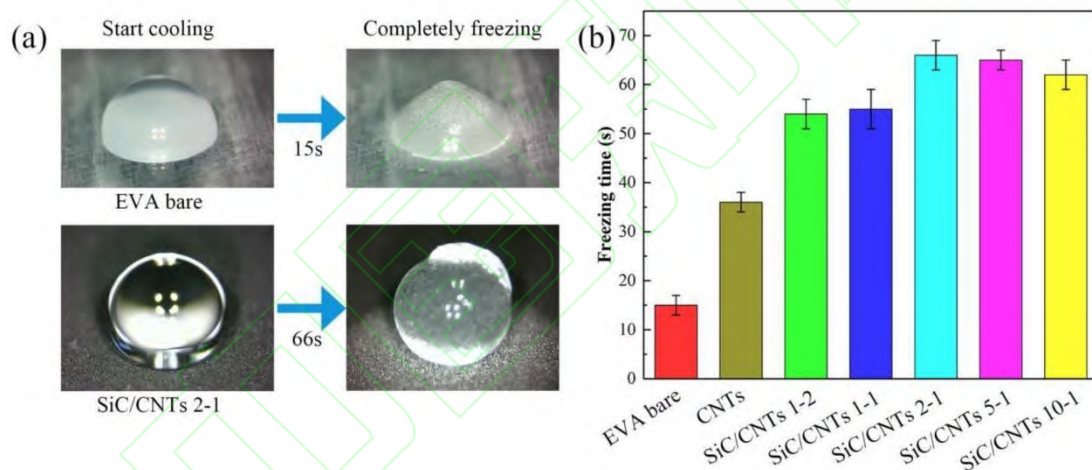


图 4(a) 裸露的 EVA 衬底结冰效果与碳化硅-碳纳米管防冰涂层表面结冰效果比较，(b) 复合防冰材料表面接触角与 SiC-CNT 的质量比之间的关系

Fig. 4 (a) The comparison of the freezing phenomena of bare EVA substrate and the substrate with SiC/CNT coatings, (b) The contact angle of the composite anti-icing material versus the ratio of SiC-CNT dependency

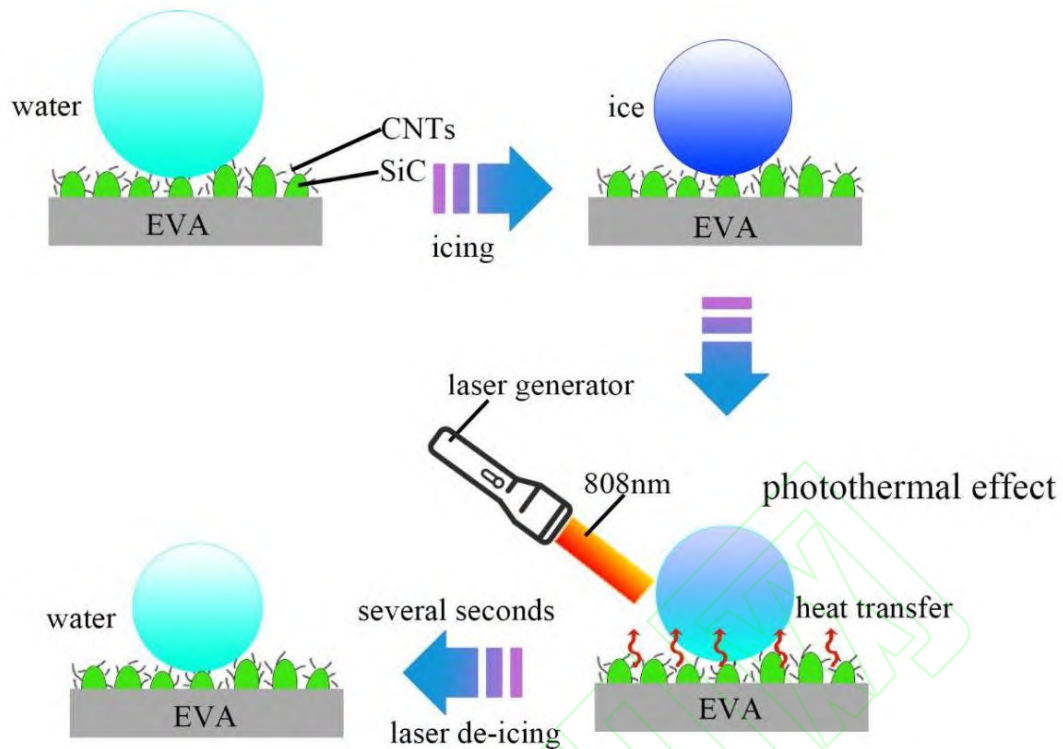


图 5 SiC-CNT 改性复合防冰材料的工作机理示意图

Fig. 5 The working mechanisms of the composite anti-icing coating modified by SiC-CNT

在高湿度、长时间低温环境下，粗糙微纳结构超疏水表面缝隙将发生冻结，从而显著加速了冰的形成，后续凝结的冰具有比光滑表面的冰层具有更强的附着力，反而不利于积冰去除<sup>[50-51]</sup>。为此，人们发展了同时具备超疏水-润滑功效的新型复合防冰材料，能够通过改善超疏水材料表面在低温下的水滴附着特性，提高其表面防冰能力。此种表面被称为润滑液体注入型粗糙表面（slippery liquid-infused porous surfaces: SLIPS）。清华大学 Qi Liu 等人利用单步电喷涂法制备了十七氟化三甲氧基硅烷（FAS-17）修饰的分级微结构高温硫化硅橡胶材料（DMF-HTV）<sup>[52]</sup>。其中，FAS-17 为一种润滑油亲和剂。涂层基质分别设置为 DMF-HTV，SiO<sub>2</sub> 修饰的 DMF-HTV，SiO<sub>2</sub> 修饰的添加 FAS-17 的 DMF-HTV。第一种基质制备的喷涂薄膜分别具有 10-30 微米乳突状微结构，后两种基质具有 1-6 微米乳突状微结构和表面纳米结构。另选用第三种基质旋涂得到光滑薄膜作为参考样品。作者随后将四种样品浸泡润滑油处理获得超疏水-润滑复合型涂层，比较研究了在多次结冰/除冰条件下，基质不同的分级微结构形貌和表面化学成分对于润滑油保持能力和防结冰性能的影响。结果表明，各种超疏水-润滑复合

涂层在测试前粘接力仅为~60 kPa，比干燥超疏水涂层数千 kPa 的粘接力低两个数量级。添加有 FAS-17 亲和剂的微纳结构涂层在加入润滑剂之前，表面粘接力最大，约为 3300 kPa；但该样品却具有最优的润滑油保持特性与耐久性能，浸油处理后的样品在经历 20 次循环的结/除冰测试后，粘接力缓慢增加到 700 kPa。此种分级纳米/微结构超疏水-润滑复合涂层，能够有效降低非均相成核和结霜传播速度。V. Donadei 等人选用廉价聚乙烯为基体，固体棉籽油为润滑添加剂，采用混合原料喷射火焰喷涂法制备了润滑-疏冰复合涂层<sup>[53]</sup>。复合涂层的基体材料由燃烧火焰喷枪喷涂，而润滑添加剂同时从火焰外部的喷油器注入，此种方式可以避免后者被火焰热分解。离心式冰粘接试验测定冰粘接度实验表明，润滑剂的加入使得提高了涂层的疏冰性能。与普通聚乙烯涂层相比，润滑-疏水复合涂层具有更强的疏水性。作者通过混合进料和改变工艺参数，成功优化了材料附着力性能，使其表面冰粘接强度由原位沉积涂层的约 50 kPa 降低到 $(23 \pm 6)$  kPa。兰州化学物理研究所提出了一种超疏水-润滑材料-纳米光热粉体的新型防冰方法<sup>[54]</sup>。如图 6 所示，其具体实现思路为，首先构筑聚苯乙烯（PS）微球颗粒模板，以聚二甲基硅氧烷（PDMS）与纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  颗粒的混合材料为填充物涂敷于模板上，然后除去 PS 微球薄板，最后对 PDMS 进行氟化处理并填充以全氟聚醚润滑剂得到防冰表面。其中，润滑剂的使用可降低冰与材料表面之间的附着力，而纳米  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  颗粒具有优异的吸光性能，可以通过光热效应的温升作用提高除冰效能。作者还指出，这种超疏水-润滑-光热复合的新型防冰新方法可以利用喷涂法代替模板法从而简便、大面积实现，便于拓展到实际应用上。

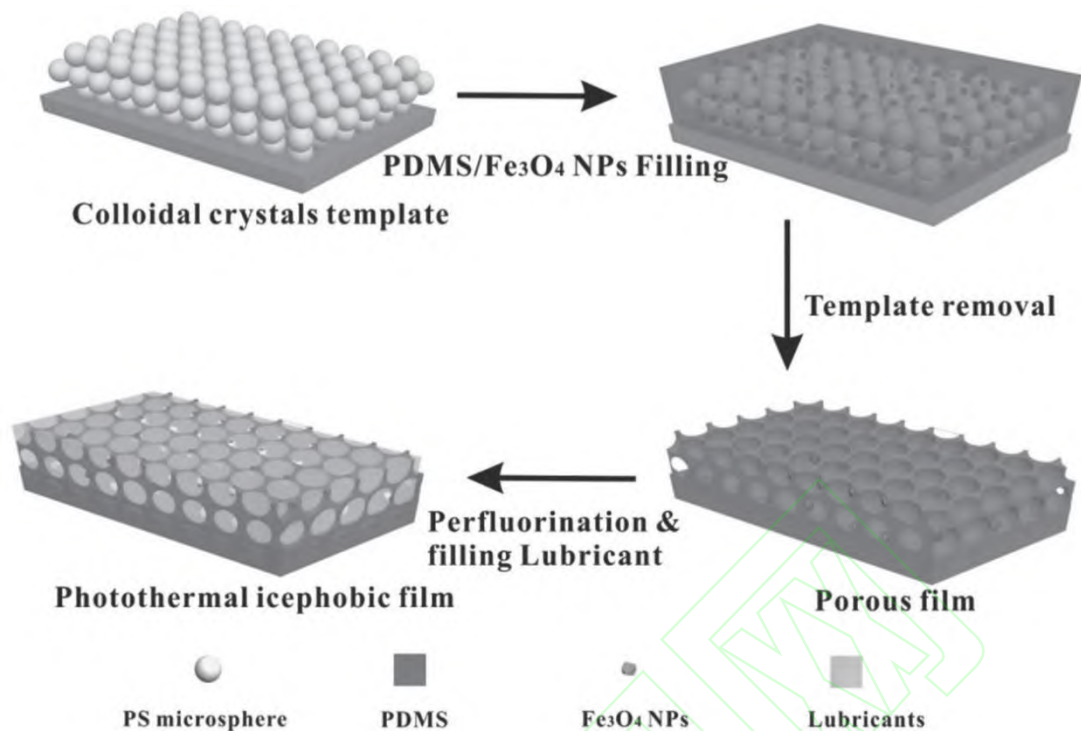


图 6 超疏水-润滑-光热复合薄膜材料的新型防冰方法的材料制备思路<sup>[54]</sup>

Fig. 6 The fabrication method of a new anti-icing technique by using a SHS-Lubricant-Photothermal ice-phobic composite film

### 2.3 防冰涂层材料在电力材料防覆冰方面的应用

近年来，人们对新材料、新结构的防覆冰涂层的制备和防冰性能方面开展了大量研究，并将新型材料应用于电力材料表面后的综合理化性质进行了探索研究，并开展了覆冰、融冰实验，验证了其实际应用于防冰除冰的可行性<sup>[55]</sup>。根据本文所调研的相关工作报告，防冰涂层的制作通常采用喷涂或手工涂覆的方式完成，但未来大多数均能够采用热喷涂方法实现推广应用，而基于该方法制备功能层的均匀性和表面疏水特性也能够得到保证。下面将对近年来国内外超疏水涂层、复合防覆冰涂层电力材料防护应用的典型案例进行综述。

研究人员将改性的超疏水被动防冰涂层应用于输电线、绝缘子、风力发电机叶片的防冰除冰应用，证明可以利用有机氟或改性有机聚合物实现对电力材料的覆冰防护。

在输电线的防冰应用方面，华北电力大学的汪佛池等人采用高疏水性氟硅烷为涂料，结合化学刻蚀方法制备铝绞线的微结构表面，研究了涂料涂覆于不同微

结构的超疏水性铝导线表面的防冰性能<sup>[56]</sup>。作者通过覆冰试验研究证明，铝绞线缝隙处过冷水滴的粘附和冻结是造成表面覆冰形成和增长的根本原因；而通过铝单丝和铝绞线表面构造双重微结构，可大大减少缝隙处过冷水滴粘附，抑制铝绞线表面覆冰形成。在绝缘子的防冰应用方面，重庆大学的廖瑞金等人采用纳米粒子填充的方法，在应用于高压输电系统的玻璃绝缘子上通过喷涂方法制备出超疏水涂层<sup>[57]</sup>。喷涂制备的有机树脂/SiO<sub>2</sub>超疏水防覆冰涂层中，纳米 SiO<sub>2</sub> 粒子与有机树脂形成微纳米尺度的表面粗糙结构，实现材料表面接触角~161°，达到超疏水效果。复合结构的超疏水涂层具有较好的粘附特性和抗磨损力学特性，在雨淞条件下能够避免连续水膜的形成，减缓覆冰过程，从而有效提高交流闪络电压<sup>[57]</sup>。涂层对玻璃绝缘子的防覆冰效果如图 7 所示。

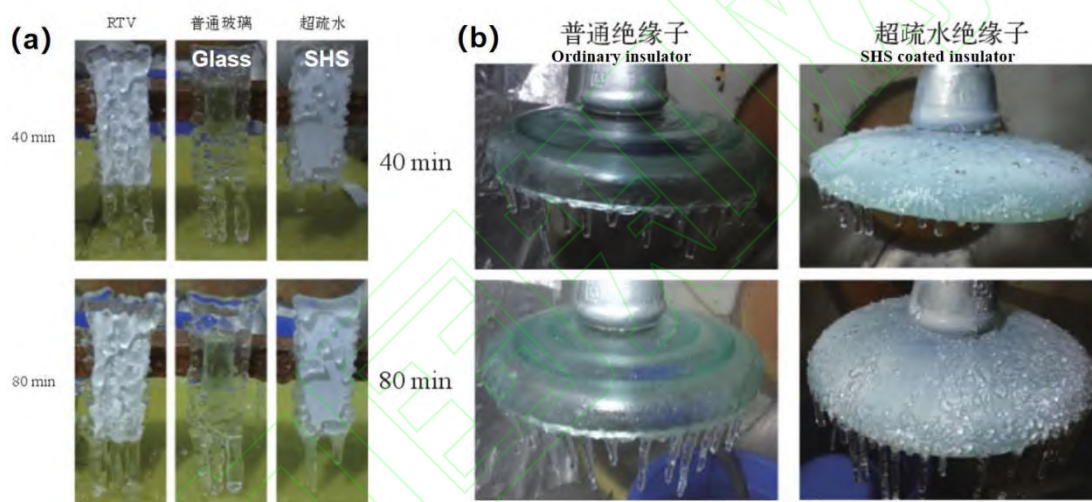


图 7(a) RTV 材料, 普通玻璃和有机树脂/SiO<sub>2</sub> 超疏水喷涂涂层的防覆冰效果比较, (b) 玻璃绝缘子和超疏水绝缘子的防覆冰效果比较<sup>[57]</sup>

Fig. 7 (a) The comparison of anti-icing performance by using RTV, bare glass, and SHS coating of nano SiO<sub>2</sub>modified RTV on glass, (b) The comparison of anti-icing performance of glass insulators and insulators with nano SiO<sub>2</sub>modified RTV coatings.

喷涂法制备的聚四氟乙烯-环氧树脂涂层被证明可应用于风力发电机叶片防冰应用。风机叶片表面积冰将会导致叶片重量分布不平衡，造成更大的机械振和涡轮效率损失，严重者可能导致机组停转或损坏<sup>[58]</sup>。为此，需要发展成本可控、低重量的高效防冰涂层材料，以减少叶片表面积冰现象或缩短积冰时间。人们曾尝试采用激光烧蚀的方法金属表面制作微纳结构纹理，然后采用热压工艺将微纹理复制到低表面能材料诸如氟化乙烯丙烯(FEP)、聚碳酸酯或聚二甲基硅氧烷等



材料上, 以将具备纹理结构的低表面能材料制备于叶片表面<sup>[59-60]</sup>。Mool C. Gupta 等人指出此方法不容易应用于大表面积或曲面, 而利用聚四氟乙烯(特氟龙)微纳颗粒, 以喷涂法制备疏水涂层, 可以克服以上缺点<sup>[61]</sup>。考虑到商用风机叶片表面通常具有环氧树脂层保护, 作者采用制备有硬化环氧树脂保护层的铝板模拟风机叶片, 选用平均 300 nm 粒径的特氟龙颗粒, 使用喷涂法在基底表面制备具有表面微纳结构的疏水层, 而后在 315℃ 下后退火 15 分钟以增强粒子与环氧树脂层的结合力。随后作者通过实验证明, 涂层材料具备超疏水性, 水滴接触角 154° 而滚落角仅为 2°; 在温度 -10℃, 相对湿度 16% 条件下, 反复应用 12 次, 测得表面的冰剥离强度平均约为 30 kPa, 约为铝基板冰剥离强度的 2.5%, 普通环氧树脂冰附着强度的 20%, 适合于风机叶片表面防冰应用<sup>[61]</sup>。

在复合方法防冰涂层的应用方面, 科研人员针对绝缘子防覆冰问题, 分别采用疏水-光热和疏水-电热两种方式实现了电力材料的防覆冰应用研究。

重庆大学的李雪源等人开展了疏水-光热型涂料应用于绝缘子的防冰除冰效果研究<sup>[62]</sup>。作者采用共沉淀法制成铁锰铜氧( $\text{FeMnCuO}_4$ )、铁镍铜氧( $\text{FeNiCuO}_4$ )、铜锰铬氧( $\text{CuMnCrO}_4$ ) 等多种尖晶石型复合金属氧化物吸光粉末, 利用硅橡胶(RTV) 作为基料, 将多种复合吸光粉末加入其中, 制成疏水-光热型复合涂料并涂覆于绝缘子材料表面, 对其应用于绝缘子表面防冰的可行性进行了研究。实验研究结果表明, 在覆冰起始阶段, 光热涂层能够在一定程度上提高绝缘子伞裙表面温度, 从而延缓覆冰的形成; 在升温融冰阶段, 绝缘子表面的温升速率和融冰速率均随太阳光照强度增大、环境温度上升而提升<sup>[62]</sup>。

清华大学的周朋等人采用具有疏水性能的半导体涂料进行了电热型涂层的防覆冰应用的研究<sup>[63]</sup>。作者对交流 500 kV 线路用绝缘子涂敷半导体电热防冰涂料后的抗覆冰性能开展了实验研究。作者在绝缘子表面采用具有所谓“开关效应”涂敷的结构设计, 选用具有半导体特性的室温硫化硅橡胶, 以气枪喷涂方式进行表面涂层制备。如图 8 所示。覆冰喷淋实验的结果表明, 喷涂制备防冰涂层的绝缘子串的泄漏电流为普通绝缘子串的泄露电流的 7.5 倍 (9 mA: 1.2 mA), 这使得防冰涂层绝缘子表面的焦耳发热功率大于普通绝缘子的发热功率, 从而提高绝缘子表面温度并降低其覆冰桥接度; 另一方面, 降低了绝缘子形状尖端电场强度, 提高了覆冰闪络电压<sup>[63]</sup>。其部分实验结果如图 9 所示。

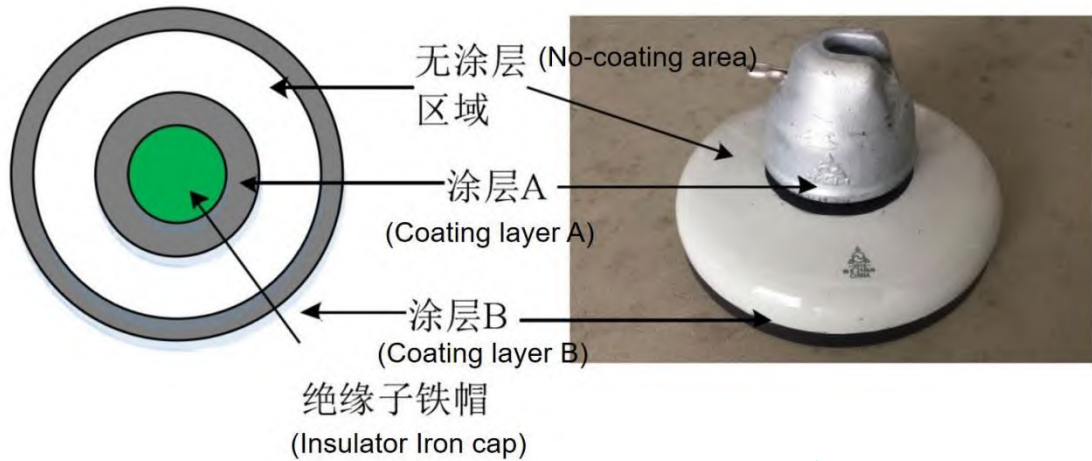


图 8 基于半导体硅橡胶“开关效应”的结构涂覆设计<sup>[63]</sup>

Fig. 8 The design of “switching effect” structure by using semiconducting RTV.

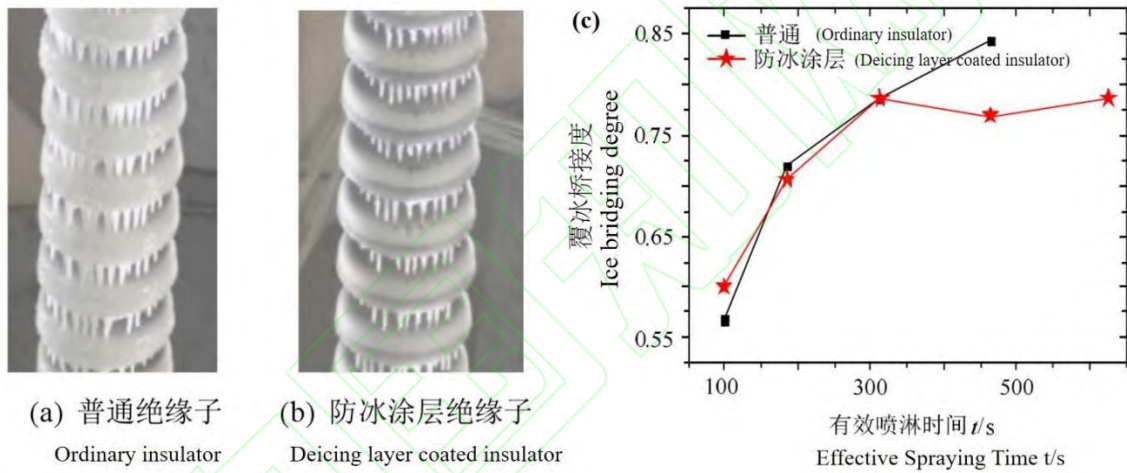


图 9 喷涂法制备电热效应材料(a-b)的防冰效果与覆冰桥接度下降规律(c)

Fig. 9 The ice-phobic performance of sprayed electro-thermal material and the change law of the reduction of bridge degree of icing.

### 3 结论与展望

国内外科研人员近年来实现了许多性能优异的超疏水表面以及光热材料防冰涂层。针对复合方式除冰方法的优势与潜力、热喷涂制备电力材料防冰涂层的未来应用中所需深入研究的关键科学问题，可总结展望如下：

(1) 复合方式防冰方法在未来有更大发展潜力。光热型、电热型除冰方式在与超疏水表面相结合时，可在利用超疏水表面被动防冰的同时，结合外界光能、电热的方式提高基底表面温度主动除冰，或者利用超润滑材料减小冰层与超疏水

表面间的黏附力以使其自然脱落，两者的防冰性能优于仅采用超疏水表面防冰，因而在未来应用上有更大的潜力。

(2) 热喷涂法兼具经济性和实用性，是制备电力材料表面防冰涂层的重要可行方案，未来研究焦点在于如何利用热喷涂法实现复合型、智能型防冰涂层。热喷涂方法同时具备可大面积制备、可使用混合原料、对基底材质形状适应性强等诸多优势，便于制备复合型防冰涂层，是将科研级防冰材料推广到实际生产应用的重要可选方案。热喷涂法制备防冰涂层的局限性在于：涂层由高速运动的颗粒撞击基底而形成，因而扁平化的粒子之间必然存在间隙与缺陷，且在使用过程中一旦出现局部损坏将难以修复。这些间隙与缺陷如何影响涂层防冰效果？如何实现自修复（self healing）智能型热喷涂防冰涂层？解决这些问题，对于优化热喷涂材料防冰性能，实现其在电力材料防冰应用方面起到重要作用。

(3) 影响复合方式防冰涂层综合性能的关键因素和涂层实际应用研究有待进一步深入。大量研究报道指出，复合方式防冰材料相比单纯超疏水表面具有更优越的防冰除冰性能，然而这些研究较多在实验室阶段。为实现电力材料防冰应用，单方面防冰性能的突出是不够的，还需根据实际需求，研究影响防冰材料耐冲击磨损特性、与基材（如线路、绝缘子）附着特性、非覆冰条件下的能量损耗特性（绝缘子电热防冰）等综合性能的关键因素。另外，将新型涂层实际应用于电力材料表面防护，以及实际防冰除冰性能的研究还十分缺乏，尚有待深入探索。

## 参考文献

[1] 柳文轩,梁高琪,赵俊华,吕哲,马博.基于多代理的“西电东送”对广东电力现货市场的影响仿真分析[J].南方电网技术, 2018, 12(12):30-35.

LIU Wen-xuan, LIANG Gao-qi, ZHAO Jun-hua, L. Zhe, MA Bo, Multi-Agent Based Simulation for the Impact of “West-to-East Power Transmission” on Guangdong Spot[J]. Southern Power System Technology, 2018,12(12):30-35.

[2] 杨玺,张明宇,黄孟阳,苏丹,石皓元. 云南能源现状问题分析及改革发展对策[J]. 能源与节能, 2018,(12):7-8+163.

YANG Xi, ZHANG Ming-yu, HUANG Meng-yang, SU Dan, SHI Hao-yuan. Analysis on the Current Situation of Energy in Yunnan and the Countermeasures of Reform and Development [J].

Energy and Energy Conservation,2018,(12):7-8+163.

[3] 吴鸿亮,刘羽霄,张宁,卢斯煜,董楠,康重庆. 南方电网西电东送中的碳交易模型及其效益分析[J]. 电网技术, 2017,41(03):745-751.

WU Hong-liang, LIU Yu-xiao, ZHANG Ning, LU Si-yu, DONG Nan, KANG Chong-qing. Carbon Trading Models and Benefit Analysis in CSG West-to-East Power Transmission [J]. Power System Technology, 2017,41(03):745-751.

[4] 黄欣,左郑敏,孙雁斌,程鑫,卢洵.“十三五”广东可接纳西电能力研究[J].广东电力,2017,30(07):18-23.

Huang Xin, Zuo Zheng-min, Sun Yan-bin, Cheng Xin, Lu Xun. Research on Ability of Guangdong Province Accepting Western Electricity in 13<sup>th</sup> Five-year Plan [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(07) : 18-23.

[5] 张化冰. 能源互联网支撑能源转型--访国家电网全球能源互联网研究院院长、中国工程院院士汤广福[J]. 电力设备管理,2020,(02):25-28.

Zhang Hua-bing, Energy Internet supports energy transformation--interview with Tang Guangfu, President of State Grid Global Energy Internet Research Institute, and Academician of Chinese Academy of Engineering [J]. Electric Power Equipment Management, 2020, (02):25-28.

[6] 王晓辉,刘鹏,季知祥,彭国政,能源互联网共享运营平台关键技术及应用 [J]. 电力信息与通信技术, 2020,18(01),46-53.

WANG Xiaohui LIU Peng JI Zhixiang PENG Guozheng, Key Technology and Application of Sharing Operation Platform for Energy Internet [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2020,18(01),46-53.

[7] 孙利,陈武,蒋晓剑,潘鹏鹏,张珂. 能源互联网框架下多端口能量路由器的多工况协调控制[J]. 电力系统自动化, 2020,44(03),32-45.

SUN Li, CHEN Wu, JIANG Xiao-jian, PAN Peng-peng, ZHANG Ke. Coordinated Control of Multiple Operation Conditions for Multi-port Energy Router in Energy Internet Framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020,44(03),32-45.

[8] 孙可,张全明,郑朝明,任志伟,周丹. 能源互联网视角下的未来配电网发展[J]. 浙江电力, 2020,39(01),1-8.

SUN Ke, ZHANG Quan-ming, ZHENG Zhao-ming, REN Zhi-wei, ZHOU Dan. Development of Distribution Network in the Future from the Perspective of Energy Internet [J]. Zhejiang Electric

Power, 2020,39(01),1-8.

[9] 晏鸣宇,周志宇,文劲宇,郭创新,陆佳政,姚伟.基于短期覆冰预测的电网覆冰灾害风险评估方法[J].电力系统自动化,2016,40(21):168-175.

YAN Ming-yu, ZHOU Zhi-yu, WEN Jin-yu, GUO Chuang-xin, LU Jia-zheng, YAO Wei. Assessment Method for Power Grid Icing Risk Based on Short-term Icing Forecasting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016,40(21):168-175.

[10] 吴向东,张国威. 冰雪灾害对电网的影响及防范措施[J]. 中国电力,2008,41(12):14-18.

Wu Xiang-dong, Zhang Guo-wei. Ice and snow disaster on the electric power grid and preventive measures [J]. Electric Power,2008,41(12):14-18.

[11] 侯慧,李元晟,杨小玲,方华亮. 冰雪灾害下的电力系统安全风险评估综述[J].武汉大学学报(工学版),2014,47(03):414-419.

HOU Hui, LI Yuan-sheng, YANG Xiao-ling, FANG Hua-liang. An overview of power system risk assessment under ice disaster [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014,47(03):414-419.

[12] 王守相,黄仁山,潘志新,王建明.极端冰雪天气下配电网弹性恢复力指标的构建及评估方法[J].高电压技术, 2020,46(01):123-132.

WANG Shou-Xiang , HUANG Ren-Shan , PAN Zhi-Xin , WANG Jian-Ming. Construction and Evaluation of Resilience Restoration Capability Indices for Distribution Network Under Extreme Ice and Snow Weather [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(01): 123-132.

[13]田思奇.美国大断电对电网改革有何启示[J].电力设备管理,2021(02):26-28.

[14] L L Cao, A K Jones, V K Sikka, J Z Wu, D Gao. Anti-icing superhydrophobic coatings[J]. Langmuir, 2009, 25,12444-12448.

[15] J Y Lv, Y L Song, L Jiang, J J Wang. Bio-inspired strategies for anti-icing[J]. ACS Nano, 2014, 8 (4), 3152-3169.

[16] 徐玉坤,朱宝,孙林峰,何洋. 超疏水和超润滑防冰表面的制备技术概述[J]. 航空制造技术, 2017,(14):44-48.

XU Yu-kun, ZHU bao, SUN Lin-feng, HE Yang. Preparation of Superhydrophobic and SLIPS Anti-Icing Surfaces [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, (14): 44-48.

[17] 陈茜. 沉淀法二氧化硅的超疏水化原位改性及其在紫外光固化涂料中的应用[D].华南理工大学,2013.

CHEN Xi. Study on the Superhydrophobic In-situ Modification of Precipitated Silica and Its

Application in UV-curable coatings [D]. South China University of Technology, 2013.

[18] 彭向阳, 许志海, 毛先胤, 贾志东. 绝缘子新型防冰涂料施工工艺及应用效果[J]. 中国电力, 2012, 45(3):23-27.

PENG Xiang-yang, XU Zhi-hai, MAO Xian-yin, JIA Zhi-dong. Construction technology and application effects of a novel anti-icing coating for insulator[J]. Electric Power, 2012, 45(3):23-27.

[19] 潘赛. 金属表面喷涂 PMMA/SiO<sub>2</sub> 超疏水涂层及其性能研究[D].南京理工大学, 2017.

PAN Sai. Spraying PMMA/SiO<sub>2</sub> superhydrophobic coating on the metal surface and its properties research [D]. Nanjing University of Science and Technology, 2017.

[20] 迟来俊, 樊自拴, 肖旭东, 等. 热喷涂高温抗氧化耐磨损涂层的研究[J]. 表面技术, 2009, 38(2):37-41.

CHI Lai-ju, FAN Zi-shuan, XIAO Xu-dong, et al. Study on Thermal Sprayed Coating with High temperature Oxidation Resistance and Wear Resistance[J]. Surface Technology, 2009, 38(2):37-41.

[21] 严细锋, 王海滨, 仇庆凡, 宋晓艳. 超音速火焰喷涂制备的 WC-WCoB 涂层在熔锌中的腐蚀行为及其耐蚀机理[J]. 表面技术, 2019, 48(04):48-54.

YAN Xi-feng, WANG Hai-bin, QIU Qing-fan, SONG Xiao-yan. Corrosion Behavior and Corrosion Resistance Mechanism of HVOF Sprayed WC-WCoB Coating in Molten Zinc[J]. Surface Technology, 2019, 48(4):48-54.

[22] 谢永元, 周勇亮, 俞小春, 等. 以砂纸为模板制作聚合物超疏水表面[J]. 高等学校化学学报. 28(8): 1577-1580.

XIE Yong-yuan, ZHOU Yong-liang, YU Xiao-chun, et al. Replication of superhydrophobic surfaces of polymer from abrasive papers[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2007, 28(8): 1577-1580.

[23] SHANG H M, WANG Y, TAKAHASHI K, et al. Nanostructured superhydrophobic surfaces[J]. Journal of Materials Science, 2005, 40(13): 3587-3591.

[24] HUANG W H, LIN C S. Robust superhydrophobic transparent coatings fabricated by a low-temperature sol-gel process[J]. Applied Surface Science, 2014, 305(3): 702-709.

[25] 李长久. 热喷涂技术应用及研究进展与挑战[J]. 热喷涂技术, 2018, 10(04):1-22.

LI Chang-jiu. Applications, Research Progresses and Future Challenges of Thermal Spray Technology[J]. Thermal Spray Technology, 2018, 10(04):1-22.

[26] Chavan S, Carpenter J, Nallapaneni M, Chen J Y, Miljkovic N. Bulk water freezing dynamics

- on superhydrophobic surfaces[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110 (4): 041604.
- [27] 胡小华, 魏锡文, 陈蓓, 等. 输电线路防覆冰涂料[J]. *涂料工业*, 2006, 36 (3) : 8—10.  
HU Xiao-hua, WEI Xi-wen, CHEN Pei, et al. Transmission Lines Ice Prevention Coatings[J]. *Journal of Coating Industry*, 2006,36(3): 8-10.
- [28] 李剑,王湘雯,黄正勇,赵学童,王飞鹏. 超疏水绝缘涂层制备与防冰、防污研究现状[J]. *电工技术学报*,2017,32(16):61-75. Li Jian, Wang Xiangwen, Huang Zhengyong, Zhao Xuotong, WANG Fei-peng. Research of Preparation, Anti-icing and Anti-pollution of Super Hydrophobic Insulation Coatings[J]. *Transactions Of China Electrotechnical Society*, 2017,32(16):61-75.
- [29] 吴宏博,丁新静,于敬晖,刘在阳. 有机硅树脂的种类、性能及应用[J]. *纤维复合材料*, 2006, (02):55-59.  
WU Hong-bo, DING Xin-jing, YU Jing-hui, LIU Zai-yang. Varieties, Properties and Application of Organic Silicone Resin[J]. *Fiber Composites*, 2006, (02):55-59.
- [30] Kostov G, Ameduri B, Boutevin B. New approaches to the synthesis of functionalized fluorine-containing polymers[J]. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2002, 114(2): 171-176.
- [31] Huang Z, Li J, Wang F, et al. Fabrication of superhydrophobic surface with discarded silicone under arc exposure[J]. *Rsc Advances*, 2015, 5(125): 103739-103743.
- [32] LI J, HUANG Z, WANG F, et al. One-step preparation of transparent superhydrophobic coatings using atmospheric arc discharge[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 30(5): 093118.
- [33] 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 Xing-liang, XIAO Dai-bo, SUN Cai-xin. Application prospect of hydrophobic coatings on anti-icing of transmission lines[J]. *Southern Power System*, 2008, 2(2): 13-18.
- [34] 范永康. 水性含氟环氧涂料的制备及其防冰性能研究[D].武汉理工大学, 2016.  
FAN Yong-kang. Study on Synthesis and Anti-icing Properties of Waterborne Fluorine-containing Epoxy Coating[D]. Wuhan University of Technology, 2016.
- [35] 李金龙,沈一洲,王文涛,陶杰,刘森云. 纳米 SiO<sub>2</sub>/有机硅聚丙烯酸复合防冰涂层的制备及性能研究[J]. *材料开发与应用*,2016,31(04):88-94.  
LI Jin-long, SHEN Yi-zhou, WANG Wen-tao, TAO Jie, LIU Senyun. Fabrication and Performance of Nano-silica / Silicone-modified Polyacrylic Acid Anti-icing Coating[J].*Development and Application of Materials*. 2016,31(04):88-94.

[36] Donadei V, Koivuluoto H, Sarlin E, Vuoristo P. Icephobic Behaviour and Thermal Stability of Flame-Sprayed Polyethylene Coating: The Effect of Process Parameters[J]. Journal of Thermal Spray Technology,2020, 29 (1-2):241-254.

[37] 徐文华, 张丽东, 赵利, 等. 耐久性超疏水表面研究进展[J]. 化工进展, 2012, 31(10): 2260-2264.

XU Wen-hua, ZHANG Li-dong, ZHAO Li, et al. Research progress of durable super-hydrophobic surface[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(10): 2260-2264.

[38] WENG R, ZHANG H F, LIU X W. Spray-coating process in preparing PTFE-PPS composite super-hydrophobic coating[J]. Aip Advances,2014, 4 (3).

[39] 黄正勇. 耐磨超疏水半导体硅橡胶复合涂层制备方法与防冰性能研究[D].重庆大学, 2016.

HUANG Zheng-yong. Prepatation and Anti-Icing Performances of Durable Superhydrophobic/Semiconducting Composite Silicone Rubber Coatings [D]. ChongQing University, 2016.

[40] LIU J P, JANJUA Z A, ROE M, XU F, TURNBULL B, CHOI K S, HOU X H. Super-Hydrophobic/Icephobic Coatings Based on Silica Nanoparticles Modified by Self-Assembled Monolayers [J]. Nanomaterials, 2016, 6 (12).

[41] EUGENE B Caldana, AI Christopher C de Leon, PATRICK G Thomas, DOUGLAS F Naylor III, BRYAN B Pajarito, and RIGOBERTO C Advincula. Superhydrophobic rubber-modified polybenzoxazine/SiO<sub>2</sub> nanocomposite coating with anti-corrosion, anti-ice, and superoleophilicity properties[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2017, 56(6): 1485-1497.

[42] L WANG, J LUO, Y CHEN, L LIN, X HUANG, H XUE, et al. Fluorine-free Superhydrophobic and Conductive Rubber Composite with Outstanding Deicing Performance for Highly Sensitive and Stretchable Strain Sensors, Acs Applied Materials & Interfaces[J]. 2019, 11(19): 17774-83.

[43] 许志海,贾志东,关志成,李智宁,韦晓星,王黎明. 输电线路绝缘子湿增长覆冰特性及防冰涂料试验研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(03):562-569.

XU Zhi-hai, JIA Zhi-dong, GUAN Zhi-cheng, LI Zhi-ning, WEI Xiao-xing, WANG Li-ming. Characteristics of Wet Growth Icing and Eperimental Investigation of Anti-icing Material of Transmission Line Insulators[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(03):562-569.



[44] 韦晓星, 贾志东, 孙振庭等. 具有开断效应的绝缘子雨淞防覆冰方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (4): 186-192.

WEI Xiao-xing, JIA Zhi-dong, SUN Zhen-ting, et al. An Anti-icing Method with Switch-off Effect for Glazed Ice on Insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 186-192.

[45] X Luo, W Hu, M Cao, H Ren, J Feng, M Wei. An Environmentally Friendly Approach for the Fabrication of Conductive Superhydrophobic Coatings with Sandwich-Like Structures. Polymers[J]. 2018, 10(4).

[46] 汪根胜, 石阳春, 蒋立波, 刘亮. 风力机叶片防除冰技术研究现状[J]. 装备环境工程, 2016, 13(02): 103-109+138.

WANG Gen-sheng, SHI Yang-chun, JIANG Li-bo, LIU Liang. Research Status of Wind Turbine Blade Deicing Technology [J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(02): 103-109+138.

[47] 胡小华. 输电线路防覆冰涂料的研究[D]. 重庆大学, 2006.

HU Xiao-hua. Research on Anti Icing Coatings for Transmission Lines[D]. Chongqing University, 2006.

[48] J Hu, G Jiang. Superhydrophobic coatings on iodine doped substrate with photothermal deicing and passive anti-icing properties[J]. Surface & Coatings Technology, 2020, 402.

[49] Jiang G, Chen L, Zhang S D, Huang H X. Superhydrophobic SiC/CNTs Coatings with Photothermal Deicing and Passive Anti-Icing Properties[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10 (42): 36505-36511.

[50] SA Kulinich, S Farhadi, K Nose, XW Du. Superhydrophobic surfaces are they really ice-repellent?[J] Langmuir 27 (2011) 25–29.

[51] KK Varanasi, T Deng, JD Smith, M Hsu, N Bhate. Frost formation and ice adhesion on superhydrophobic surfaces[J]. Appl. Phys. Lett. 97 (2010) 234102.

[52] Q Liu, Y Yang, M Huang, Y Zhou, Y Liu, X Liang. Durability of a lubricant-infused Electro spray Silicon Rubber surface as an anti-icing coating[J]. Applied Surface Science, 2015, 346: 68-76.

[53] V Donadei, H Koivuluoto, E Sarlin, P Vuoristo. Lubricated icephobic coatings prepared by flame spraying with hybrid feedstock injection[J]. Surface & Coatings Technology, 2020, 403.

- [54] Yin X Y, Zhang Y, Wang D A, Liu Z L, Liu Y P, Pei X W, Yu B, Zhou F. Integration of Self-Lubrication and Near-Infrared Photothermogenesis for Excellent Anti-Icing/Deicing Performance[J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25 (27):4237-4245.
- [55] 吴亚平,李辛庚,米春旭,宗立君,王晓明,郭凯,宋福如. 输电线路超疏水防覆冰涂层研究进展[J]. *表面技术*, 2018, 47(1):51-59.
- WU Ya-ping, LI Xin-geng, MI Chun-xu, ZONG Li-jun, WANG Xiao-ming, GUO Kai, SONG Fu-ru. Progress in Superhydrophobic Anti-icing Coating for Transmission Line[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(1):51-59.
- [56] 汪佛池. 输电线路铝导线憎水性防覆冰涂层的研究[D]. 华北电力大学(北京), 2011.
- Wang Fu-chi. Research on Ice-Phobic Coating with Hydrophobicity Used for Transmission Aluminum Line[D]. North China Electric Power University, 2011.
- [57] 左志平,廖瑞金,郭超,庄奥运. 玻璃绝缘子超疏水复合涂层的制备及其防冰性能研究[J]. *电气工程学报*, 2015, 10(04):99-105.
- ZUO Zhi-ping, LIAO Rui-jin, GUO Chao, et al. Fabrication of Superhydrophobic Surface on Insulator and Its Anti-icing Properties[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2015, 10(4): 99-105.
- [58] PARENT O and ILINCA A. Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review[J]. *Cold regions science and technology*, 2011, 65(1), 88-96.
- [59] Yeong Y H, Wang C, Wynne K J and Gupta M C. Oil-infused superhydrophobic silicone material for low ice adhesion with long-term infusion stability[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2016, 8(46), 32050-32059
- [60] Nayak B K, Caffrey P O, Speck C R and Gupta M C. Superhydrophobic surfaces by replication of micro/nano-structures fabricated by ultrafast-laser-microtexturing[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 266, 27-32.
- [61] C QIN, A T Mulroney, M C Gupta. Anti-icing epoxy resin surface modified by spray coating of PTFE Teflon particles for wind turbine blades. *Materials Today Communications*[J]. 2020, 22.
- [62] 李雪源. 光热型涂料应用于复合绝缘子的防/融冰效果研究[D]. 重庆大学, 2018.
- LI Xue-yuan. Study on Anti-ice/ Ice Melting Effect of Photo-thermal Coatings Applied to Composite Insulators [D]. Chongqing University, 2018.
- [63] 周朋,于昕哲,周军,贾志东,柳顺楠,胥经纬. 具有开断效应的半导体防冰涂层绝缘子外绝缘性能的试验研究[J]. *电网技术*, 2018, 42(02):673-680.

ZHOU Peng, YU Xin-zhe , ZHOU Jun, JIA Zhi-dong, LIU Shun-nan, XU Jing-wei. Experimental Research on External Insulation Performance of Semiconductive Anti-Icing[J]. Coated Insulators With Switch-Off Effect. Power System Technology, 2018,42(02):673-680.

