

环境效应与防护

# 风力机叶片防除冰技术研究现状

汪根胜<sup>1</sup>, 石阳春<sup>2</sup>, 蒋立波<sup>2</sup>, 刘亮<sup>2</sup>

(1. 江西中电投新能源发电有限公司, 南昌 330096;  
2. 长沙理工大学 可再生能源电力技术湖南省重点实验室, 长沙 410076)

**摘要:** 提出了风力机防除冰的关键部件是叶片, 并介绍了风力机叶片覆冰的影响, 叶片防冰的主动与被动型方法及其各自的优缺点。重点阐述了憎水涂料防冰法的研究现状, 并总结了憎水性涂料防冰的三大主要效果。对目前风力机叶片防除冰技术的主流方法进行了综合评价, 并指出了其日后的发展方向。

**关键词:** 风力机叶片; 覆冰; 憎水性涂料; 防除冰技术

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2016.02.019

**中图分类号:** TJ07; TM315      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2016)02-0103-07

## Research Status of Wind Turbine Blade Deicing Technology

WANG Gen-sheng<sup>1</sup>, SHI Yang-chun<sup>2</sup>, JIANG Li-bo<sup>2</sup>, LIU Liang<sup>2</sup>

(1. China Power Investment of Jiangxi New Energy Power Generation Company, Nanchang 330096, China;  
2. Key Laboratory of Renewable Energy Electric-Technology of Hunan Province, Changsha 410076, China)

**ABSTRACT:** This paper put forward that the key components of wind turbine deicing was the blade, and introduced the effect of ice covering of the blade, the active and passive methods for wind turbine blade deicing together with their merits and defects. The review focused on the research status of hydrophobic deicing coating method, and summarized three main effects of the hydrophobic deicing coating. Finally, a comprehensive evaluation of the current mainstream method of wind turbine blade deicing technology was conducted, and its future development direction was pointed out.

**KEY WORDS:** wind turbine blades; ice coating; hydrophobic coating; deicing technology

随着PM2.5等环境污染问题的出现,传统能源已逐渐引起了人们的担忧;另一方面,传统能源也面临着日益枯竭问题,因此大力开发新能源是当今社会的发展趋势。风能作为一种清洁可再生能源,目前已成

收稿日期: 2015-10-17; 修订日期: 2015-11-17

Received: 2015-10-17; Revised: 2015-11-17

基金项目: 湖南省科技计划资助项目(2013FJ6015); 江西中电投新能源发电有限公司资助项目(CPIXNY-AS-14-01)

**Fund:** Supported by Hunan Province Science and Technology Program (2013FJ6015) and China Power Investment of Jiangxi New Energy Power Generation Company (CPIXNY-AS-14-01)

**作者简介:** 汪根胜(1969—),男,江西婺源人,硕士,高级工程师,主要研究方向为风能开发与利用。

**Biography:** WANG Gen-sheng(1969—), Male, from Wuyuan, Jiangxi, Master, Senior engineer, Research focus: development and utilization of wind energy.

**通讯作者:** 石阳春(1963—),男,博士,主要研究方向为风资源评估。

**Corresponding author:** SHI Yang-chun(1963—), Male, Ph.D., Research focus: wind resource assessment.

为新能源的主流之一。风能丰富的地区多分布在高原及山区地带,在冬季期间,这些地区通常温度低、湿度大,风电机组很容易发生结冰现象<sup>[1-4]</sup>。

机舱内部、导流罩内部通常都会安装加热器,并且机舱内齿轮箱在运行时也会释放一定热量,因而一般不会结冰,但风力机叶片、风速风向仪等部件由于长期暴露在湿度大、温度低的环境下,极可能结冰<sup>[5-6]</sup>。风速风向仪结冰后会导致机组无法正常测量风速和风向,使得机组控制系统无法接收精准的风向信号,从而影响机组的效率。当结冰严重时,风速风向仪会因冰冻而不能运行,并引起机组停机。对于该问题,一般采取的措施是安置大功率加热器来防止风速风向仪结冰,但耗能较大。目前国内有一种PC-5A型超声波气象站,该气象站表面有防冰护体,内部装有加热器,且传感器的旋转部件导热系数高。在-50℃的环境下,该气象站的测量信号仍然精准可靠,适合在严寒条件下的风电场中使用。

当叶片结冰时会影响叶片的气动特性,加强气体在叶片表面的分流,使叶片升力减小、阻力增大,从而使得叶轮获取的风能减小,导致机组出力下降。覆冰严重时会造成20%~50%的发电量损失,并且当叶片上的覆冰脱落时,还可能会造成潜在的安全隐患<sup>[7-12]</sup>。鉴于叶片结冰问题的严重性,文中将重点讨论叶片结冰的处理方法。

## 1 风力机叶片防除冰方法

风力机叶片防覆冰按处理的时机可分为被动型和主动型两大类。被动型是指待叶片覆冰到一定程度时,通过物理或化学方法将冰除去。该方法通常包括溶液除冰、机械除冰、气囊式除冰。主动型一般是通过某些方法来防止积冰的产生,常见的有热能防冰与涂料防冰。

### 1.1 溶液除冰

溶液除冰通常是将融冰液体喷洒在已结冰的表面,使冰层逐渐融化。常见的融冰液一般是氯盐融冰剂(氯化钠、氯化钙等),但这些融冰剂会造成一定的污染。胡辉等<sup>[13]</sup>总结了融雪剂性能的代表方法以及合成原材料,并提出了正交试验方法、控制变量法、对比实验法等作为新型融雪剂研发过程中的实用表征方法,给融冰技术领域提供了最基础的实验指导。东北林业大学周密<sup>[14]</sup>研制了一种以氯化钙为主要原料的显色型环保融雪剂,该融雪剂可以根据冰雪融化后溶液

的颜色变化来控制其用量,从而避免浪费,并通过实验证明了该融雪剂的融冰能力大于氯化钙,且对基底腐蚀极小。许英梅等<sup>[15]</sup>研发出了CMA(醋酸钙镁盐)环保型融冰剂,与普通的氯盐融冰剂相比,该融冰剂具有毒性低、融冰能力强、冰熔点低、绿色环保等特点。研究发现,当融冰剂中的氯化镁、醋酸镁、醋酸钙的体积比为7:2:1时,融冰剂的融冰效率可高达114%,明显高于国家标准的90%,是一种具有广阔前景的环保型融冰剂。

### 1.2 机械除冰

机械除冰一般是通过人工利用工具将冰除碎,然后利用离心力振动,或气流吹除等方法把冰除去。该方法除冰简捷彻底,但是需要耗费大量的人力。人工除冰还需要部分停机,在损失发电量的同时还可能破坏机组。陈科全等<sup>[16]</sup>通过ABAQUS软件对冲击载荷作用下导线的机械除冰过程进行了模拟。研究表明,较小的温度波动对机械式冲击除冰装置影响很小,而覆冰孔隙率、冲击载荷大小、不同档数、档距等因素对除冰效果的影响较大。王超等<sup>[17]</sup>设计了一种新型的除冰机器人,该机器人工作时通过旋转的圆柱形除冰装置在推进移动的过程中能将冰层切削成粉末,从而达到高效简便除冰的效果。目前还有一种较新颖的机械除冰法——超声波除冰。该方法是利用超声波在冰层与玻璃钢叶片基板中传播时产生的剪切力来减小冰层与叶片的粘附力,从而达到除冰目的。该方法不影响机组的运行,但需要消耗部分能量。谭海辉等<sup>[18]</sup>利用Lamb波和SH波在玻璃钢叶片中的传播特性,将超声波除冰技术成功应用在风机叶片除冰上,并总结出了超声波除冰技术在风机叶片上的最佳除冰频率和最优安装距离。

### 1.3 气囊式除冰

气囊式除冰是在叶片的表面贴一层柔性条状气囊,在未结冰时气囊处于平整的状态。当附着的冰层达到一定厚度时,通过引气装置迅速冲入大量的气体,并使之周期性地膨胀和收缩,破坏冰层与表面的结合,从而逐步使冰层爆裂,再通过气动力的作用实现除冰目的。该除冰方式最初应用在飞机叶片上,能耗较低,使用寿命长。在风电场中应用较少,主要考虑到使用时可能影响叶片的气动特性,而且会产生噪声,运行维护费用较高。目前,提供该产品技术的代表主要是美国BFGoodrich公司<sup>[19]</sup>,气囊式除冰原理如图1所示。



图1 气囊式除冰原理

Fig.1 Schematic of airbag deicing

## 1.4 热能防冰

热能防冰是利用一些装置提供热能来加热物件表面,使物件表面温度超过冰熔点,从而达到防除冰的效果,热能防冰分为电热防冰和热风防冰。电热防冰是在风机叶片制作时预埋电热防冰系统装置,或是在叶片表面贴上导电膜,通过加热叶片来防冰。电热防冰加热装置的功率通常在20~30 kW,长期使用必然消耗较多的电能。为了减少电能损失,陈棋<sup>[20]</sup>等对加热装置增设了报警及主动除冰系统。该系统通过分析实际功率与机组功率曲线的偏差来判断机组是否结冰,当确认结冰时,加热元件才开始工作。

热风防冰通常是利用机舱里的余热或是在轮毂内安装加热装置,通过鼓风机和管道将热风送入叶片内部并保持管道内暖气循环。德国Enercon公司近年开发了一套较成熟的热风除冰系统,并且在瑞典的两个地点进行了测试。经过两个冬季的试验,结果表明,该防冰系统能有效改善机组的出力<sup>[21]</sup>。Hudecz A<sup>[22]</sup>指出,近年来由于风力机叶片壁面的厚度逐渐增加,并且叶片材料导热性能欠佳,因此热风法很难达到有效的防冰效果。如果将具有高导热性能的非传统材料替代叶片材料,那么该方法的效果会大大改善。

## 1.5 涂料防冰

涂料防冰是利用涂料的物理或化学作用来达到防冰的目的。涂料防冰能耗较低,并且不会造成污染,是一种较理想的防冰方法。涂料防冰的途径主要有两种,一种是通过涂料中的某些材料获取热源来对被涂覆的物件表面进行加热,以防止过冷却水结冰;另一种思路则是最大限度地减小冰与物件衬底的粘附力,再借助气流或离心力等作用,使得冰容易脱离。从原理上讲,防冰涂料大致可分为电热型、光热型和憎水性三大类。

1) 电热型涂料。电热型涂料中包含导电物质,使得涂料层形成一种半导体材料,并通过微小的泄流电

流作用于物件表面所产生的电热来防冰<sup>[23]</sup>。现有的电热型防冰涂料通常用于绝缘体防冰,使用范围较窄。涂川俊等<sup>[24]</sup>研制出了一种具有优良电热性能的复合型无机炭系电热涂料,该涂料在温度为 $(19 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、电压为36 V时,通电18 min后,其涂层表面温度可达299 °C,解决了传统电热型涂层表面发热温度较低、升温较慢、耐热性较差等问题。艾晓龙等<sup>[25]</sup>研究了不同导电填料对电热型涂料电热性能的影响,并通过电热性能测试和SEM分析表明:对于炭系电热涂料而言,石墨是一种优良的导电填料。炭黑能有效地提高炭系电热涂料的电热性能,与碳化硅相比,炭黑对炭系电热涂料具有更重要的影响。电热涂料防冰法不够稳定,若物件表面的电流过小,则无法满足防冰需要的热量;电流较大时,又会造成较多的损失。风电机组在雷雨天气还容易受到破坏,因此电热涂料并不适用于风电机组。

2) 光热型涂料。光热型防冰涂料主要由能吸收光热的颜料及具有高疏水性的基料组成,利用吸收的光热来达到防除冰目的<sup>[26]</sup>。光热型涂料不仅需要具备稳定性与良好的光学选择性,还要具有节能环保、耐气候性强、经济性等特性。在实际应用中,光热型涂料还存在某些问题。如采用PbS作为颜料,虽然制作简单,且光学性优异,但PbS会随着使用时间的增长逐渐被氧化为 $\text{PbSO}_4$ ,从而失去吸热的功能<sup>[27-28]</sup>。胡小华等<sup>[29]</sup>以改性的硅溶胶-苯丙乳液为基料,具有优良吸光性能的 $\text{FeMnCuO}_x$ 为颜料,研制出了一种新型光热性涂料。通过实验发现,该涂料在 $-20\sim 0^\circ\text{C}$ 的环境下,对未通电的铝导线具有较好的防冰效果。吴桂初等<sup>[30]</sup>利用粉末火焰喷涂法研制出了黑铬太阳能选择性吸收涂层,该涂层在可见光谱区的吸收率可高达0.91。该涂料具有工艺简单、成本较低、稳定性较好等优点,但是对环境会造成一定污染。光热型涂料的效果主要取决于天气条件,若在光照强烈的晴天,光热型防冰涂料具有良好的防冰效果,但在阴雨天气,该涂料的效果便会大打折扣。

3) 憎水性涂料。憎水性涂料是利用憎水基团的作用(一般为C—H键),使得物件在空气中与水接触时避免被水润湿,它反映了材料被水滴浸润的难易程度,通常用接触角(CA)来衡量其憎水能力。接触角越大,水滴与表面接触面积越小。当涂料的接触角大于 $150^\circ$ 时,就认为该涂料具有憎水性能;若达到 $150^\circ$ 以上,则具有超疏水性能<sup>[31]</sup>。憎水性涂料具有优异的憎水性和迁移性,价格低廉,既无能耗也无污染,还可以实现叶片全面防冰,是目前防冰技术的主流,因此有必要着重介绍憎水性涂料防冰技术。



## 2 憎水性涂料防冰技术发展现状

### 2.1 憎水性涂料防冰原理

1997年,德国 Barthlott 和 Neinhuis 研究发现,荷叶表面上存在着许多微小的粗糙乳突,乳突的大小平均约  $10\ \mu\text{m}$ ,平均间距约为  $12\ \text{nm}$ 。每个乳突是由许多直径在  $200\ \text{nm}$  左右的突起组成的,这样使得许多空气充斥到水与固体表面之间,大大减小了水与固体的接触面积,荷叶表面结构如图2所示。普通的灰尘和雨水的尺寸远大于这种结构的间隙,只能在面上的凸顶形成很少的接触点。水在自身的表面张力作用下形成球状,水球在滚动中吸附灰尘,并滚出叶面,实现了憎水效果。有研究发现,荷叶的接触角为  $160^\circ$  时滚动角仅约为  $20^\circ$ ,这项发现揭示了荷叶憎水的奥妙,为憎水涂料的发展奠定了基础。

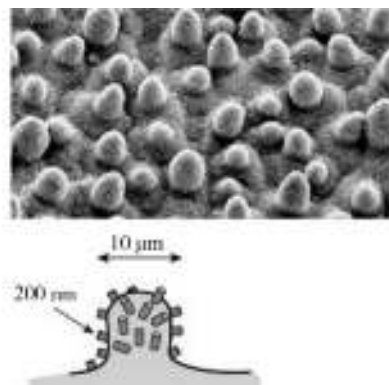


图2 荷叶表面微元结构

Fig.2 Micro cell structure of lotus leaf surface

### 2.2 国内外研究进展

憎水涂层一般都具有低表面能,表面能越低则涂层的附着力越小。目前科学所了解的表面能最低的材料是氟基聚合物和硅基聚合物。含氟材料由于碳氟键(C—F)的键能高、难极化,使得其表面能极低。马茜<sup>[27]</sup>等通过实验研究氟改性丙烯酸树脂中含氟单体量与接触角的关系。研究发现,当含氟单体量为7% (质量分数)时,F—C键接近饱和,涂层表面的接触角达到最大值  $100^\circ$ ,表现出最强的憎水性。

肖春华<sup>[32]</sup>等通过风洞实验对4种不同硅橡胶憎水涂层的防冰性能进行了研究。结果表明,憎水涂层只能降低结冰速率,无法完全阻止物件表面结冰,在高分子涂层中添加小分子材料可以增强涂层的憎水性

能。该成果对于防冰涂料的研发具有参考价值。2012年,中远关西公司研发了一种由氟碳树脂和脂肪族多异氰酸酯组成的FC面漆。该产品通过纳米防冰添加剂,降低了冰与物件表面的粘附力。试验证明,该涂料具有优异的抗冰性能、良好的柔韧性以及优异的耐磨性,并在青海风电场项目应用中取得了良好的效果。FC面漆的出现,标志着中国在风电叶片防冰涂料领域中实现了重大突破。2013年,株洲时代新材公司研发出了一种以C—H树脂为主剂的双组分新型聚氨酯涂料。通过多地的试验,结果表明,该涂料不仅具有超强的耐磨与抗疲劳性能,并且能极大地阻止水滴在叶片上的滞留,具有明显的防冰性能,在严寒环境下能够给风电叶片戴上“防冻手套”<sup>[33]</sup>。

国外学者对憎水涂料研究较多,技术相对成熟。L.Cao<sup>[34]</sup>等对憎水涂料进行了结冰实验。实验结果表明,憎水涂层的防冰性能不仅取决于表面的憎水性能,还与暴露在疏水表面上颗粒的尺寸大小有密切的关系<sup>[35]</sup>。该项研究成果进一步揭示了疏水涂层抗结冰的机理。S.A.Kulinich<sup>[36]</sup>课题组研究了4种微/纳米级粗糙憎水涂层的防冰持久性问题。研究发现,憎水涂层的防冰性能随着结冰/除冰次数的增加而逐渐降低,不同除冰次数下憎水表面的形貌如图3所示。据他们解释,这是因为结冰和除冰的过程会破坏憎水表面的粗糙度。此外,该课题组还发现憎水性涂料的防冰能力在潮湿的环境中会显著降低。这意味着在潮湿的环境下,憎水涂料的作用会受到限制。

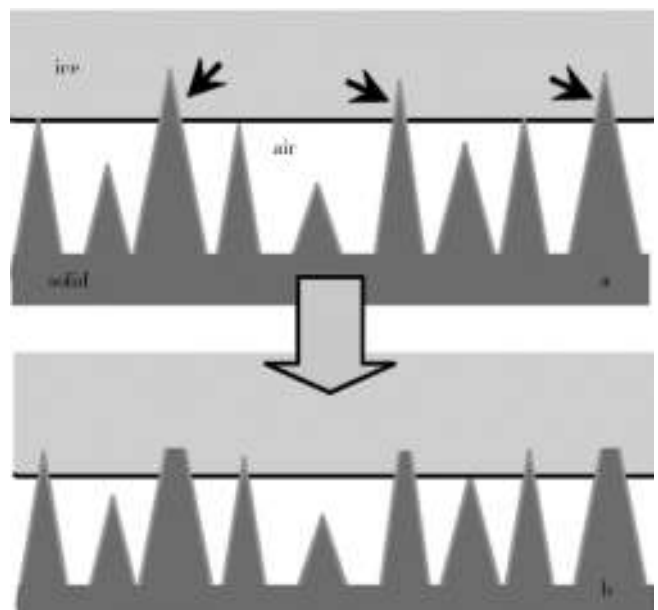


图3 冰在不同试验次数下憎水表面的形貌

Fig.3 Hydrophobic surface morphology of ice after different number of trials

Wilson P W 等<sup>[37]</sup>研发了一种光滑液体注入式多孔表面(SLIPS)。研究发现,该涂层可以降低水滴的结冰温度,且在多次结冰/融冰后其防冰性能并未降低。SLIPS憎水涂层的研发,解决了传统憎水涂料的粗糙结构易受到破坏等问题。Dou R 等<sup>[38]</sup>研制了一种具有水润滑性的防冰涂料,该防冰涂料可以直接应用于各种基板。和裸基板相比,该涂料可以大大降低基板表面与冰层的粘附强度。该课题组首次证明,在涂层表面上所形成的冰可以被给定的温度和风速条件下的风吹走。此外,该涂层的低粘附性能甚至可以在 $-53\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温下维持,有较好的稳定性和耐久性,具有广阔的应用价值。

### 2.3 憎水性涂料防冰三大效果

目前虽然有许多国内外学者致力于憎水涂料的研发,但迄今还没有一种涂料能完全防止叶片结冰。憎水性涂料具有疏水性能,从而也表现出一定的防冰特性。将憎水涂料涂覆在叶片表面,主要有三大防冰效果。

1) 延缓结冰时间。憎水涂料具有高滚动角,低表面能。水滴落在其表面,往往很容易滚落,使得水滴很难沾附在其表面,从而能大大延迟结冰时间点。如果叶片上涂有憎水涂料,那么将显著增大结冰的难度,甚至在环境不太恶劣的情况下,还可能不结冰。Wang Hong 等<sup>[39]</sup>观察了超疏水基底与原基底的过冷水滴在 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下的结冰过程。研究发现,原基底在冰冻 $220\text{ s}$ 时,水滴完全冻结,而涂覆微纳米涂层的基底在 $520\text{ s}$ 才完全结冰。该课题组研究表明,涂有微纳米的涂料能延缓水滴结冰的时间。近日,某课题组对有机硅憎水性涂料的防冰性能进行了研究。在冰冻环境下,涂覆有机硅涂料的风力机叶片与未涂涂料的原叶片结冰情况对比如图4所示。从图4可以发现,当原叶片已经完全结冰时,涂覆有机硅涂料叶片上面的过冷水珠仍未结冰,且该叶片上留滞的水珠较少,原因是具有高滚动角的有机硅憎水涂料使得过冷水珠很容易从叶片上滚落。该实验进一步验证了憎水性涂料具有延迟结冰的效果。

2) 降低冰层附着力。憎水涂料在较恶劣的环境下,并不能防止叶片结冰,但是却能大大降低冰层与基底的附着力。如果结合叶片的离心与振动,将使得冰层更容易脱落。2011年,R.Menini 等<sup>[40]</sup>研制了一种PTFE憎水涂层,并将涂覆该涂层的铝基底与原裸铝基底样品置于风速为 $9.3\text{ m/s}$ 、温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的风洞实验室中进行实验。实验结果表明,冰层在涂覆PTFE

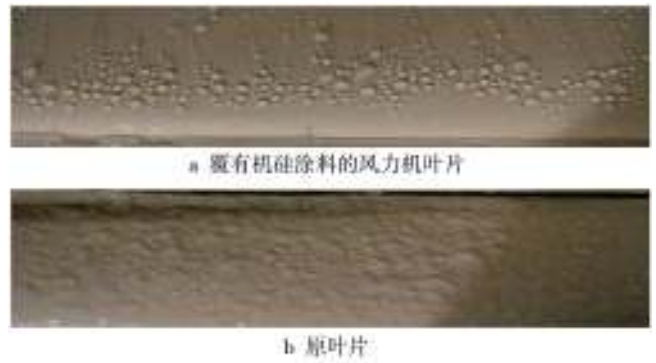


图4 有机硅涂料延迟结冰效果

Fig.4 Delay of icing by silicone coating

涂层表面上的附着力仅为原铝基底的 $1/4$ 。该课题组分析其原因是,PTFE涂层微粗糙结构中存在大量的间隙,导致结冰后冰层与涂层基底表面间存在许多小空隙,这些空隙中充满着空气,因此冰层的附着力会大大降低。为了验证憎水涂料降低冰层附着力的性能是否具有普遍性,毕茂强等<sup>[41]</sup>选用了 $A_1, A_2, B, C$ 四种憎水涂料,以及铁板、铝板、玻璃板三种不同的基底,来研究憎水涂料表面附着力的特性。该实验进一步证明,憎水性越强,冰层与基底的附着力越小。

3) 减少结冰量。憎水涂料能阻止水滴的沾附,从而能大大减少结冰量,使得覆冰对机组输出功率的影响降低到最小。胡小华<sup>[42]</sup>分别研究了裸导线、涂覆憎水涂料的导线、涂覆改进型憎水涂料(即憎水性更强)导线的结冰情况,并依次在 $-5, -10, -15, -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度环境下,分别测量三根导线的结冰质量。结果表明,裸导线在以上四个温度的结冰量分别为:2%, 4.3%, 5.3%, 5.4%;涂覆涂料的导线为:1.2%, 1.7%, 1.3%, 1.5%;涂覆改进涂料的导线为:0.8%, 1.2%, 0.79%, 1.0%。这说明憎水性越强,减少的结冰量越多。卢津强<sup>[43]</sup>分别研究了普通和涂覆氟碳涂料以及涂覆氟硅烷涂料的三种不锈钢基底的静态原位冷凝结冰量。研究发现,普通不锈钢基底表面的结冰量为 $0.026\text{ g}$ ,涂覆氟碳涂料的为 $0.018\text{ g}$ ,而涂覆氟硅烷涂料的仅为 $0.01\text{ g}$ 。其中,氟碳涂料是一种憎水涂料,而氟硅烷涂料则是一种超疏水涂料。该实验进一步证明憎水涂料具有抑制结冰的特性。

## 3 结语

文中指出了风电机组防冰的关键部件是风机叶片和风速风向仪,并提出了用PC-5A超声波气象站替换风速风向仪以防结冰的方案。阐述了目前国内外

风机叶片常用的防除冰方法,并重点介绍了憎水涂料的研究现状及三大防冰效果,主要结论有以下几点。

1) 被动型除冰法较麻烦,且耗能大,一般是起到辅助作用,不具有广阔的发展空间。

2) 主动型防冰法中的电热型涂料有一定的安全隐患,光热型涂料具有局限性,而憎水性涂料使用范围广且安全无污染,防冰能力较强,具有良好的发展前景。

3) 憎水性涂料主要有延迟表面结冰时间点、减小基底附着力、有效减少结冰量等诸多特性,但在较恶劣的条件下(如相对湿度过大时),并不能防止基底结冰。

4) 综合考虑,风机叶片防除冰方法目前最佳的还是憎水涂料法。关于叶片防除冰技术,日后主要有两个发展方向:进一步研发更具耐候性的憎水涂料,减少憎水涂料本身的局限;可以通过与热能法的有效结合,来弥补憎水涂料的缺陷,实现两者的优势互补,从而实现更好的防冰效果。

#### 参考文献:

- [1] 王伟,侯学杰,管晓颖,等. 风电叶片除冰技术的研究进展[J]. 玻璃钢/复合材料,2014(1):90—93.  
WANG Wei, HOU Xue-jie, GUAN Xiao-ying, et al. The Research Progress of Wind-power Blades De-icing Technology[J]. Glass Fiber Reinforced Plastic/Composite Materials, 2014(1):90—93.
- [2] 张礼达,张彦南. 气象灾害对风电场的影响分析[J]. 电力科学与工程,2009,25(11):28—30.  
ZHANG Li-da, ZHANG Yan-nan. Analysis of the Impact of Meteorological Disasters on Wind Farm[J]. Electric Power Science and Engineering, 2009, 25(11):28—30.
- [3] 晏波,徐燕燕. 风机叶片抗覆冰方案的研究[J]. 南方农机,2015(1):46—46.  
YAN Bo, XU Yan-yan. Study on the Anti Icing Scheme of Wind Turbine Blade[J]. Southern Agricultural Machinery, 2015(1):46—46.
- [4] 孙鹏,王峰,康智俊. 低温对风力发电机组运行影响分析[J]. 内蒙古电力技术,2008,26(5):8—10.  
SUN Peng, WANG Feng, KANG Zhi-jun. Low Temperature Impact on the Wind Turbine Operation Analysis[J]. Inner Mongolia Electric Power Technology, 2008, 26(5):8—10.
- [5] 黄治娟,胡志光,张秀丽,等. 风机叶片防覆冰技术研究[J]. 华北电力技术,2014(6):16—19.  
HUANG Zhi-juan, HU Zhi-guang, ZHANG Xiu-li, et al. Study on the Anti Icing Technology of Wind Turbine Blade[J]. North China Electric Power Technology, 2014(6):16—19.
- [6] 王晓东. 金紫山风电场冬季安全生产管理经验浅谈[J]. 红水河,2014,33(4):92—94.  
WANG Xiao-dong. The Purple Mountain Gold Field in Winter Safety Production Management Experience[J]. Red Water River, 2014, 33(4):92—94.
- [7] 杜景怡. 基于 FEVE 树脂体系的风栅叶片抗结冰涂料的设计[J]. 涂料技术与文摘,2013,34(11):36—41.  
DU Jing-yi. Based on the Blades of Wind Tent FEVE Resin System of Ice Coating Design[J]. Coatings Technology and the Abstract, 2013, 34(11):36—41.
- [8] 孙少华,徐洪雷,符鹏程,等. 叶片覆冰对风电机组的影响[J]. 风能,2014(9):100—103.  
SUN Shao-hua, XU Hong-lei, FU Peng-cheng, et al. The Influence of Ice Blades for Wind Turbines[J]. Wind Power, 2014(9):100—103.
- [9] PRYOR S C, BARTHELMIE R J. Climate Change Impacts on Wind Energy: A Review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(1):430—437.
- [10] LI Y, TAGAWA K, FENG F, et al. A Wind Tunnel Experimental Study of Icing on Wind Turbine Blade Airfoil[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 85:591—595.
- [11] PARENT O, ILINCA A. Anti-icing and De-icing Techniques for Wind Turbines: Critical Review[J]. Cold Regions Science and Technology, 2011, 65(1):88—96.
- [12] 王聪,黄洁亭,张勇,等. 风电机组叶片结冰研究现状与进展[J]. 电力建设,2014,35(2):70—75.  
WANG Cong, HUANG Jie-ting, ZHANG Yong, et al. Current Status and Progress of Research on the Ice of the Wind Turbine Blade[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(2):70—75.
- [13] 胡辉,肖娟定. 融雪剂的实用表征方法[J]. 黑龙江交通科技,2014,37(10):46—47.  
HU Hui, XIAO Juan-ding. Practical Representation Method of Snowmelt Agent[J]. Transportation Science and Technology in Heilongjiang Province, 2014, 37(10):46—47.
- [14] 周密. 显色型环保除冰融雪剂的研制及性能研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2011.  
ZHOU Mi. Color Type of Environmental Development and Performance Study of Deicing Snow Melting Agent[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2011.
- [15] 许英梅,王丽萍,祁恩云,等. 复合 CMA 环保型融雪剂的融冰能力研究[J]. 化学世界,2011,52(7):404—406.  
XU Ying-mei, WANG Li-ping, QI En-yun, et al. Composite CMA Study on Melting Ice of Environment-friendly Snowmelt Agent[J]. Chemical World, 2011, 52(7):404—406.
- [16] 陈科全,严波,刘小会,等. 覆冰导线机械式冲击除冰模拟研究[J]. 振动与冲击,2012,31(17):129—133.  
CHEN Ke-quan, YAN Bo, LIU Xiao-hui, et al. Ice Conductor Mechanical Impact Deicing Simulation[J]. Vibration and



- Shock, 2012, 31(17):129—133.
- [17] 王超,魏世民,廖启征. 高压输电线上除冰机器人的系统设计[J]. 机械工程与自动化, 2010(1):148—149.  
WANG Chao, WEI Shi-ming, LIAO Qi-zheng. On High Voltage Transmission Line Deicing Robot System Design[J]. Journal of Mechanical Engineering and Automation, 2010(1):148—149.
- [18] 谭海辉,李录平,靳攀科,等. 风力机叶片超声波除冰理论与方法[J]. 中国电机工程学报, 2010(35):112—117.  
TAN Hai-hui, LI Lu-ping, JIN Pan-ke, et al. Wind Turbine Blade Ultrasonic Deicing Theory and Method[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2010(35):112—117.
- [19] 侯彬彬. 抗冰冻低风速大型风电叶片技术[J]. 大功率变流技术, 2013(3):78—81.  
HOU Bin-bin. Resistance to Freezing Low Wind Speed of Large Wind Power Blade Technology[J]. High Power Converter Technology, 2013(3):78—81.
- [20] 陈棋,罗勇水,刘伟江,等. 风电机组抗冰冻设计[J]. 装备环境工程, 2013, 10(5):32—35.  
CHEN Qi, LUO Yong-shui, LIU Wei-jiang, et al. Anti Freezing Design of Wind Turbine[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(5):32—35.
- [21] ALBERS A. Summary of a Technical Validation of Enercon's Rotor Blade De-Icing System[R]. Varel: Deutsche Wind Guard Consulting GmbH, 2011.
- [22] HUDECZ A, KOSS H, HANSEN M O L. Ice Accretion on Wind Turbine Blades[C]/15th International Workshop on Atmospheric ICING of Structures(IWAIS XV). 2013.
- [23] 涂川俊,夏金童,张文皓. 炭系导电涂料的研究进展[J]. 炭素技术, 2004, 23(3):31—36.  
TU Chuan-jun, XIA Jin-tong, ZHANG Wen-hao. The Research Progress of Carbon Series Conductive Coatings[J]. Carbon Techniques, 2004, 23(3):31—36.
- [24] 涂川俊,夏金童,李焰,等. 复合型无机炭系电热涂料的研究[J]. 炭素技术, 2006, 25(5):16—21.  
TU Chuan-jun, XIA Jin-tong, LI Yan, et al. Research on Composite Inorganic Carbon Electric Heating Coating[J]. Carbon Techniques, 2006, 25(5):16—21.
- [25] 艾晓龙,夏金童,赵敬利,等. 导电填料对炭系电热涂料电热性能的影响[J]. 涂料工业, 2012, 42(6):37—40.  
AI Xiao-long, XIA Jin-tong, ZHAO Jing-li, et al. Conductive Filler on the Properties of Carbon Series Resistance Coatings Electrothermal Effect[J]. Coating Industry, 2012, 42(6):37—40.
- [26] 黄欢,仇伟,罗洪. 防覆冰涂料的研究进展[J]. 贵州电力技术, 2012(2):10—13.  
HUANG Huan, QIU Wei, LUO Hong. Research Progress of Ice Prevention Coatings[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2012(2):10—13.
- [27] 马茜,张宇昌,张胜寒,等. 风机叶片防覆冰涂料的进展与研究[J]. 华北电力技术, 2013(8):47—50.  
MA Qian, ZHANG Yu-chang, ZHANG Sheng-han, et al. Development and Research of the Anti Icing Coatings on the Wind Turbine Blade[J]. North China Electric Power Technology, 2013(8):47—50.
- [28] 刘胜峰. 太阳光谱选择性吸收涂层新型颜料的合成研究[J]. 太阳能学报, 1994, 15(3):300—304.  
LIU Sheng-feng. The Solar Spectral Selective Absorbing Coating the New Pigment Synthesis[J]. Journal of Solar Energy, 1994, 15(3):300—304.
- [29] 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.
- [30] 吴桂初,梁素珍. 粉末火焰喷涂法制各黑铬太阳能选择性吸收涂层的实验研究[J]. 太阳能学报, 1999, 20(2):187—189.  
WU Gui-chu, LIANG Su-zhen. Powder Flame Spraying Legal System Experimental Study of the Black Chrome Solar Selective Absorbing Coatings[J]. Solar Energy, 1999, 20(2):187—189.
- [31] 张燕,杨凯,王贤明,等. 疏水涂层的研究进展[J]. 中国涂料, 2007, 22(5):42—45.  
ZHANG Yan, YANG Kai, WANG Xian-ming, et al. Research Progress of Hydrophobic Coating[J]. China Paint, 2007, 22(5):42—45.
- [32] 肖春华,胡站伟,桂业伟,等. 疏水涂层表面防冰效果的结冰风洞实验研究[J]. 实验流体力学, 2013, 27(2):41—45.  
XIAO Chun-hua, HU Zhan-wei, GUI Ye-wei, et al. Experimental Study on Ice Wind Tunnel of the Surface of Hydrophobic Coating[J]. The Experiment of Fluid Mechanics, 2013, 27(2):41—45.
- [33] 罗启心. 给风电叶片戴上“防冻手套”[N]. 株洲日报数字报, 2013-08-11(2).  
LUO Qi-xin. Put on "Anti Freezing Gloves" to the Wind Power Blades[N]. Zhuzhou Daily Digital Newspaper, 2013-08-11(2).
- [34] CAO L, JONES A K, SIKKA V K, et al. Anti-icing Superhydrophobic Coatings[J]. Langmuir, 2009, 25(21):12444—12448.
- [35] 冯杰,卢津强,秦兆倩. 超疏水表面抗结冰性能研究进展[J]. 材料研究学报, 2012, 26(4):337—343.  
FENG Jie, LU Jin-qiang, QIN Zhao-qian. Super Hydrophobic Surface Freezing Resistance Research Progress[J]. Journal of

- Reliability Enhancement Testing in the Development of Airborne Pressure Probe[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2013, 10(6): 140—145.
- [8] 张仰平, 卓继志, 李兴林, 等. ABLT-7型带座外球面轴承寿命及可靠性强化试验机[J]. *轴承*, 2009(12): 48—50.  
ZHANG Yang-ping, ZHUO Ji-zhi, LI Xing-lin, et al. Life of ABLT-7 Insert Bearing with Housing and Reliability Enhancement Testing Machine[J]. *Bearing*, 2009(12): 48—50.
- [9] 赵帅帅, 姚军. 某型滑油温度传感器的可靠性强化试验[J]. *装备环境工程*, 2012, 9(1): 34—38.  
ZHAO Shuai-shuai, YAO Jun. Reliability Enhancement Test of Lubrication Oil Temperature Sensor[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2012, 9(1): 34—38.
- [10] 易难, 吴凤凤. 某型电源装置可靠性强化试验条件与方案研究[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2008, 26(1): 41—44.  
YI Nan, WU Feng-feng. The Research of Reliability Enhancement Test Conditions and Its Plan for a Power System[J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2008, 26(1): 41—44.
- [11] 何荣华, 张亚, 李波, 等. 军用电子元件的可靠性强化试验方案研究[J]. *科学技术与工程*, 2009, 9(18): 5460—5464.  
HE Rong-hua, ZHANG Ya, LI Bo, et al. Research Program of Reliability Enhancement Test about Military Electronic Components[J]. *Science Technology and Engineering*, 2009, 9(18): 5460—5464.
- [12] 杨艳峰, 郑坚, 狄长春, 等. 某型炮闩系统关重件可靠性强化试验仿真研究[J]. *火炮发射与控制学报*, 2011(4): 9—12  
YANG Yan-feng, ZHENG Jian, DI Chang-chun, et al. Simulation and Research of Reliability Enhancement Testing about the Key Components of the Breech System[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2011(4): 9—12.
- [13] 万龙, 马吉胜, 郝大海, 等. 某型军用履带车辆行驶强化试验仿真技术研究[J]. *军械工程学院学报*, 2008, 20(5): 22—25.  
WAN Long, MA Ji-sheng, HAO Da-hai, et al. Simulation Research on Intensified Driving Test of Tracked Vehicle[J]. *Journal of Ordnance Engineering College*, 2008, 20(5): 22—25.
- [14] 金朝, 秦俊奇, 狄长春, 等. 某输弹机疲劳失效构件可靠性强化试验仿真研究[J]. *火炮发射与控制学报*, 2011(4): 9—12.  
JIN Zhao, QIN Jun-qi, DI Chang-chun, et al. Simulation and Research on Reliability Testing of Ramming Mechanism Component[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2011(4): 9—12.
- [15] 刘加凯, 齐杏林, 范志锋. 可靠性强化试验的机理探析[J]. *装备环境工程*, 2009, 6(6): 36—38.  
LIU Jia-kai, QI Xing-lin, FAN Zhi-feng. Analysis of Reliability Enhancement Testing Mechanism[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2009, 6(6): 36—38.
- [16] 孙智, 江利, 应鹏展. 失效分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.  
SUN Zhi, JIANG Li, YING Peng-zhan. *Failure Analysis*[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.

(上接第 109 页)

- Materials Research, 2012, 26(4): 337—343.
- [36] FARHADI S, FARZANEH M, KULINICH S A. Anti-icing Performance of Superhydrophobic Surfaces[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(14): 6264—6269.
- [37] WILSON P W, LU W, XU H, et al. Inhibition of Ice Nucleation by Slippery Liquid-infused Porous Surfaces (SLIPS)[J]. *Chemical Physics*, 2013, 15(2): 581—585.
- [38] DOU R, CHEN J, ZHANG Y, et al. Anti-icing Coating with an Aqueous Lubricating Layer[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(10): 6998—7003.
- [39] WANG H, HE G, TIAN Q. Effects of Nano-fluorocarbon Coating on Icing[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(18): 7219—7224.
- [40] MENINI R, GHALMI Z, FARZANEH M. Highly Resistant Icephobic Coatings on Aluminum Alloys[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 65(1): 65—69.
- [41] 毕茂强, 蒋兴良, 巢亚锋, 等. 自然覆冰与衬垫的粘附特性及影响因素[J]. *高电压技术*, 2011, 37(4): 1050—1056.  
BI Mao-qiang, JIANG Xing-liang, CHAO Ya-feng, et al. The Adhesion Characteristics and the Influence Factors of the Natural Icing and the Liner[J]. *High Voltage Technology*, 2011, 37(4): 1050—1056.
- [42] 胡小华. 输电线路防覆冰涂料的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.  
HU Xiao-hua. *Research on Anti Icing Coatings for Transmission Lines*[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [43] 卢津强. 通过改变浸润性提高固体表面抗结冰性能[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.  
LU Jin-qiang. *By Changing the Invasive Improve Solid Surface Freezing Resistance*[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012.