

覆冰-温度耦合下电热融冰升温规律

彭勃, 石行*, 凡盛, 冯学斌, 梁鹏程, 胡杰桦

(株洲时代新材料科技股份有限公司, 湖南株洲 412000)

摘要: [目的]为制定合理风电叶片电加热融冰控制策略, [方法]通过制备电加热组件样件在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境试验箱中开展试验的方法, 研究覆冰厚度(5 mm/20 mm)、加热功率(400 W~1 000 W)和环境温度对融冰过程的影响规律。[结果]结果表明: 环境温度每降低 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 需增加约40 W功率维持相同终温, 加热功率与环境温度对平板终温呈现线性耦合关系; 5 mm覆冰时融冰平缓升温期从2.5 min延长至10.0 min, 当环境温度低于 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时需采用800 W及以上功率方可有效融冰; 覆冰厚度增至20 mm后冰层本体吸热量提升3.2倍, 融冰时间同比延长55%。[结论]可见实际工程中应结合环境温度阈值和冰层厚度实时检测数据动态调整加热功率, 同时考虑冰层脱落临界条件与融冰停滞期温度突变特征优化控制逻辑。

关键词: 风电叶片; 电加热; 覆冰; 加热功率; 温度变化

中图分类号: TK83 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbge.2026.03.17

Heating Characteristics of Electrothermal De-Icing Under Ice-Temperature Coupling

PENG Bo, SHI Hang*, FAN Sheng, FENG Xuebin, LIANG Pengcheng, HU Jiehua
(Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412000, Hunan, China)

Abstract: [Purpose] In order to formulate a reasonable control strategy for electrothermal de-icing of wind turbine blades, [Method] an experimental approach utilizing electrothermal heating component prototypes has been employed to investigate the influence of factors such as ice thickness (5 mm and 20 mm), heating power (ranging from 400 W to 1 000 W), and ambient temperature on the ice-melting process within an environmental chamber set at temperatures between $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. [Result] The results show that for each $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ decrease in ambient temperature, an additional approximately 40 W of power is required to sustain the same final temperature, revealing a linear coupling relationship between heating power and ambient temperature with respect to the final temperature of the heated surface. Furthermore, when the ice thickness is 5 mm, the duration of the gradual temperature rise phase during ice melting extends from 2.5 minutes to 10.0 min, and a heating power of 800 W or higher becomes necessary for effective ice melting when the ambient temperature falls below $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. As the ice thickness increases to 20 mm, the heat absorption by the ice layer itself increases by 3.2 times, leading to a proportional extension of the ice-melting time by 55%. [Conclusion] Therefore, in practical engineering applications, it is imperative to dynamically adjust the heating power based on real-time data on ambient temperature thresholds and ice thickness, while also optimizing the control logic by taking into account the critical conditions for ice shedding and the temperature abrupt change characteristics during the ice-melting stagnation phase.

Key words: wind turbine blade; electrical heating; icing; heating power; temperature change

收稿日期: 2025-02-25; 修回日期: 2025-05-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB4202900)

作者简介: 彭勃(1990—), 男, 硕士、中级工程师。研究方向: 风力发电机叶片设计、叶片防/除冰系统设计。

通信作者: 石行(1998—), 男, 硕士、中级工程师。研究方向: 风力发电机叶片设计、叶片防/除冰系统设计。

0 引言

风能作为一种可再生能源, 具有取之不尽、用之不竭的特性, 风力发电成为实现“双碳”战略的手段之一^[1]。我国风资源丰富, 在提升风资源捕获利用的同时, 减少发电机组停机时间, 提高发电效率十分重要。相比平原和低海拔区域, 高原和山地通常具有更好的风资源条件。山地冬季具有高湿、低温的特性, 易出现覆冰灾害, 对风机的发电性能和安全运行存在挑战^[2]。因此, 风力机叶片的防/除冰问题受到业内人士和众多学者的广泛关注。

目前叶片常用的防/除冰手段为被动防/除冰方法和主动防/除冰方法, 被动防/除冰方法分为疏水涂层或疏冰涂层等形式, 涂层表面结构通过降低水滴的黏附强度^[3]或抑制冰的积累^[4]以达到防冰目的, 但涂层使用寿命时间较短, 仅为1 a~2 a。主动防/除冰方法分为人工工具、电脉冲、超声波、电加热、气加热等形式^[5]。风力发电机组安装运行环境复杂, 其叶片为玻璃钢材质, 采用脉冲^[6]等形式除冰可能损伤叶片内部结构, 因此风电叶片防/除冰领域常用加热形式除冰。气加热除冰是将热空气通过对流与导热形式将热量传导至叶片表面^[7], 但其热量传导效率较低, 仅为30%。电加热除冰^[8]通过在叶片表面铺设加热组件, 其布置形式灵活多样, 适用于大面积除冰且不会对叶片本体产生结构性损伤, 加热组件直接作用在叶片表面, 热利用率高, 因此电加热除冰为风电行业主要的防/除冰方法。国内外学者在电加热防/除冰领域也取得了一定的成果。舒立春等^[9]通过研究外界因素对电阻加热除冰时间的差异, 分析了加热功率、覆冰厚度和环境温度等因素的影响, 结果表明加热功率和环境温度对除冰时间影响较大。叶璐等^[10]研究了碳纳米管膜应用于树脂基复合材料电加热除冰技术, 其加热效果主要受热流密度和加热时间影响。谷建臻^[11]通过对电加热多层结构进行加热仿真, 研究了不同环境工况下, 不同的输入节点电流, 对不同层导热率和厚度参数变化除冰所需的能量和耗散能量。胡琴等^[12]建立了电加热融冰数值计算模型, 并对仿真结果进行试验验证, 结果表明电加热超疏水涂层用于防覆冰效果较好, 用于覆冰后融冰将耗费更多的能量。WANG等^[13]分析了疏水膜和超疏水膜在冰风洞中加热升温 and 除冰特性, 结果表明超疏水膜表面存在较少的固-冰接触点, 其除冰能耗相比疏水膜降低20.16%~40.46%。SAMAD等^[14]研究了叶片在防冰与除冰2种模式下的加热功率, 确定了保护前缘所需的最小加热功率, 并根据不同除冰模式分析气动输出与电加热消耗功率的关系。刘红祥等^[15]研究了叶片结冰机理和影响因素, 且分析了在电加热防/除冰作用下表面冰形状的变化, 结果表明温度降低使结冰形状由雨淞向雾

淞转变, 且电加热能有效减少叶片表面覆冰。

目前对于风电叶片防/除冰研究更多关注表面加热材料性能、加热终温、除冰所需能耗和除冰时间长短, 对除冰过程中叶片与覆冰接触表面升温、降温变化情况未见详细研究。除冰控制系统开启需根据加热表面温度变化情况设定, 需对覆冰与叶片接触面温度变化进行详细分析, 温度变化规律可为制定准确可靠的加热制策略提供理论支持。本文按照叶片实际生产制造流程, 将加热组件铺设于叶片内部, 制备相应的电加热试验样件。将样件放置于环境试验箱内, 在低温结冰环境下对样件表面覆一定厚度冰层, 对样件进行加热融冰试验, 查看覆冰与样件接触面温度变化情况。依据覆冰与样件接触表面升温、降温变化规律, 为制定可靠的电加热控制策略提供数据和理论支持。

1 试验装置与设备

1.1 试验设备

本文试验在广州5所环境仪器有限公司制造的高低湿湿热试验箱内进行, 其可调节温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 160\text{ }^{\circ}\text{C}$, 风速为 $3\text{ m/s}\sim 7\text{ m/s}$ 。加热电源采用东莞科联电子有限公司生产的TDP60-30型直流电源, 用于连接样件进行加热。样件内加热碳布表面温度采用热电偶读取, 并用读数记录仪进行记录, 试验装置连接见图1。为在样件表面形成一定厚度的冰层, 将亚克力模型置于样件表面指定位置, 并向模型内部注水, 以辅助覆冰过程。

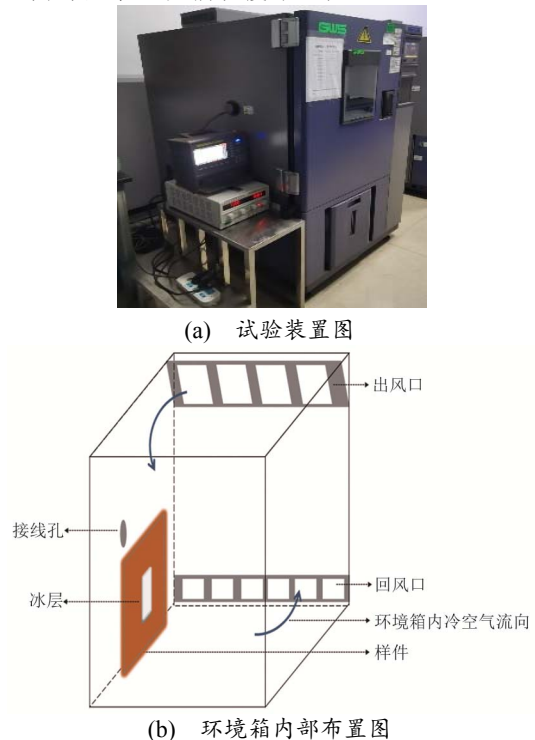


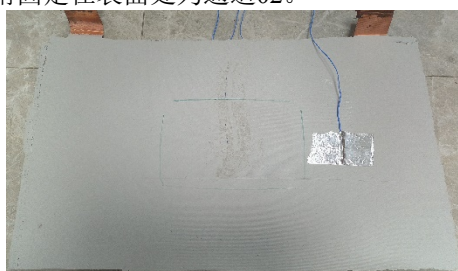
图1 试验装置

Fig. 1 Test Device

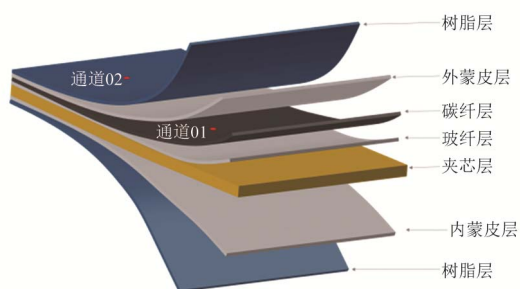
1.2 试验样件

风机叶片的主要材质为环氧树脂、玻璃纤维布和夹芯，为此本文采用常见的三明治结构制备试验样件，并在内部增加电热膜，其样件整体尺寸（长×宽×高）为500 mm×340 mm×22 mm，电加热铺设尺寸（长×宽）为380 mm×255 mm。

为更好地了解在不同环境工况下，试验样件表面与内部碳纤维加热层的温度变化情况，在其两者上方分别增加热电偶对实时温度变化进行监控。试验样件见图2。其中碳纤维上方热电偶在样件制备过程中加入处为通道01，样件表面热电偶采用铝箔胶带黏附固定在表面处为通道02。



(a) 样件实物图



(b) 样件制备示意图

图2 试验样件

Fig. 2 Test Sample

2 试验方法及步骤

风力机在-20℃~0℃为结冰环境，-20℃为标准风力机的设计极限温度，常见的风电叶片结冰领域选取-20℃~-5℃温度进行研究^[16]，为此本文也选取该温度范围。在结冰状态下风机一般为停机状态，叶片处于静止时表面各处风速与环境风速相同，且环境箱内风速在3 m/s~7 m/s与常见结冰环境风速一致，为此采取平板样件代表叶片表面局部情况进行电加热融冰试验。试验步骤如下。

- 1) 将温度传感器和加热电源线通过接线孔接入，与电源和读数记录仪连接。
- 2) 擦拭样件表面，保证样件表面无水、干净，有利于胶带粘贴。
- 3) 将矩形亚克力容器粘贴在样件表面，黏接缝隙用铝箔胶带密封，保证粘接平整无缝隙。
- 4) 样件水平放置，在亚克力容器内注入一定高

度的水（高度取决于冰层厚度），检查底部和蒙皮接触缝隙是否漏水，将样件放入低温环境试验箱冷冻直至水全部凝结成冰，再拆卸模具即可。样件表面覆冰实物图见图3。

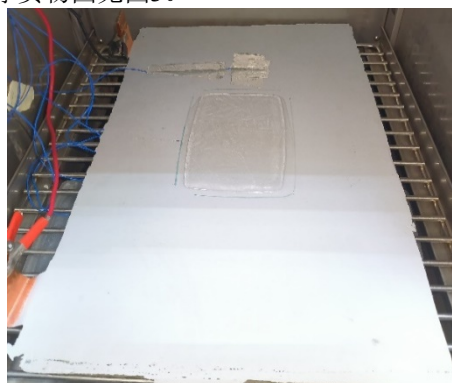


图3 样件表面覆冰实物图

Fig. 3 Physical Drawing of Icing on Sample Surface

5) 处理完毕后，将样件重新放入环境试验箱进行保冷。为使冰层能够在加热时自动脱落，样件与地面呈90°放置，并通过温度传感器监测，待样件温度稳定至环境试验箱温度即完成保冷。

6) 保冷结束后，提前设置好电源电压，并连接直流电源开始加热，加热直至冰层自动从蒙皮上脱落，即停止加热除冰步骤。

7) 重复步骤2)~步骤6)，重新根据设置条件进行试验。

加热功计算公式为

$$P = \frac{I^2 R}{S} \quad (1)$$

式中： P 为加热功率， W/m^2 ； I 为电流， A ； R 为电阻， Ω ； S 为发热表面面积， m^2 。

试验所采用的碳纤维电加热膜，采用微欧计测得电阻为0.28 Ω ；加热膜尺寸为380 mm×255 mm。为降低风电叶片防/除冰过程的能耗，行业普遍采用较低功率加热策略，典型加热功率范围为400 W~1 000 W。所需施加的电流与电压依据该功率计算确定，见表1。

表1 试验施加电流、电压

Tab. 1 Applied Current and Voltage in the Test

功率/W	施加电流/A	施加电压/V
400	11.76	3.29
600	14.40	4.03
800	16.63	4.65
1 000	18.60	5.20

3 试验结果及分析

3.1 平板升、降温分析

为了解样件表面覆冰后融冰过程的温度变化趋

势, 在未覆冰情况下将试验样品放入环境试验箱内进行升温和降温试验, 探究碳纤维加热层的升降温情况。温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 对样品分别施加 $400\text{ W}\sim 1\text{ }000\text{ W}$ 加热功率, 样品内部通道01温度变化曲线见图4。

在恒定加热功率条件下, 当环境温度由 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

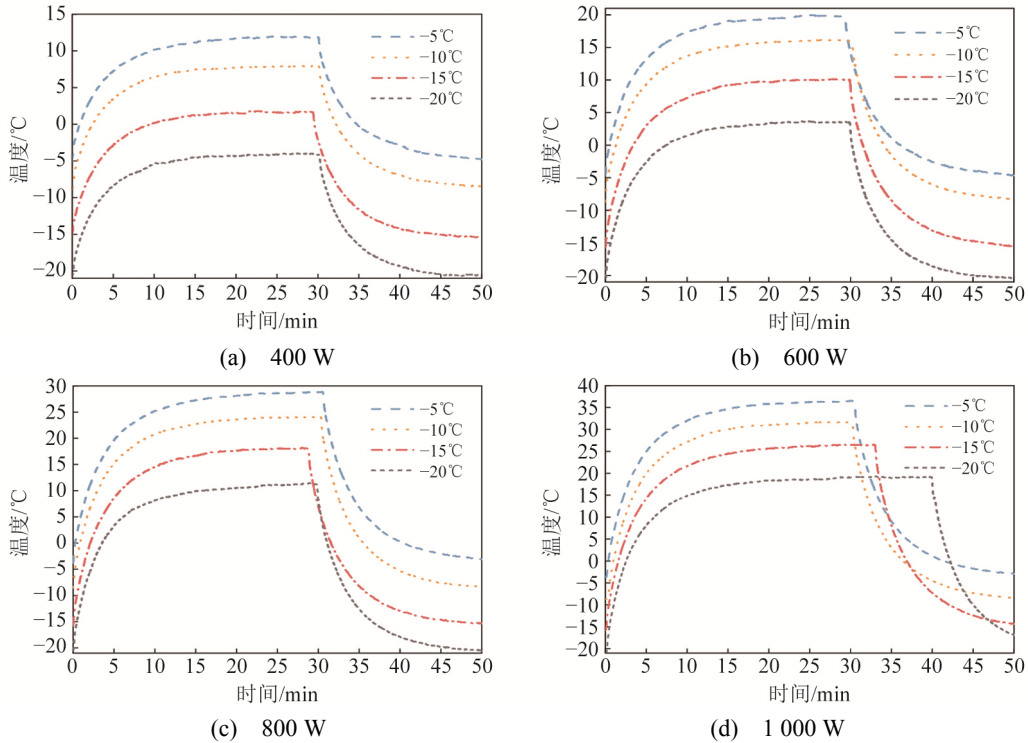


图4 不同加热功率下环境温度对样品温度变化率的影响

Fig. 4 Influence of Ambient Temperature on Rate of Temperature Change of Specimen Under Different Heating Power Levels

环境温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 使用 $400\text{ W}\sim 1\text{ }000\text{ W}$ 加热功率对样品进行加热所达到最高温度, 见图5。

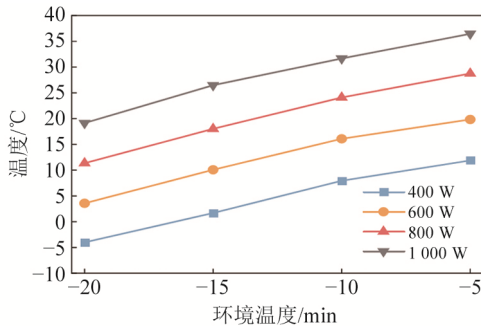


图5 不同环境温度及加热功率下平板加热升温终温变化

Fig. 5 Changes in Final Temperature of Plate Heating Under Different Ambient Temperatures and Heating Powers

环境温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 使用 400 W 加热功率, 样品表面最高温度分别为 $-4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, 说明在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工况下未能达到除冰效果, 在 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$

升高至 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 样品内部碳纤维加热层的升温速率降低。样品达到预设最高温度并维持热力学平衡后停止加热, 样品在环境温度下自然冷却至环境温度。从图4(a)与图4(b)中可知, 加热功率从 400 W 升高至 600 W , 加热终温增加, 降温初期温度下降速率更快, 这是由于温差更大使换热量增加。

工况下理论上加热时间足够长可进行除冰。加热终温随环境温度和加热功率呈线性变化。在恒定加热功率下, 环境温度每升高 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 加热终温平均升高约 $5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在恒定环境温度下, 加热功率每增加 200 W , 加热终温平均升高约 $8.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在结冰工况下, 样品表面达到的最高温度为 $36.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该温度远低于样品材料的玻璃化转变温度($T_g=60\text{ }^{\circ}\text{C}$), 表明在此条件下加热不会对样品的结构完整性造成损伤。依据不同环境下样件的升降温情况和最高温度变化, 可在间歇性加热控制系统设计时避免出现超温情况, 且避免停止加热时间过长, 出现冰再次冻结的现象。

3.2 环境温度影响

环境温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 加热功率分别为 800 W 和 $1\text{ }000\text{ W}$ 情况下, 在样品表面冻结 5 mm 厚覆冰进行电加热融冰试验, 查看内部通道01的温度变化, 详细情况见图6。样品表面融冰电加热试验过程分为4个阶段。第1阶段为试验稳定期, 目的是将样品和覆冰整体温度降低至环境温度; 第2阶段为平缓

温升期, 样件温度在加热下缓慢升高超过0 °C, 并保持稳定; 第3阶段为短暫停滯期, 该阶段热量主要用于将样件表面接触的冰层融化; 第4阶段为快速升温期, 该阶段覆冰已从样件表面脱落, 加热热量用于样件表面升温、对流换热和辐射热量散失。

图6(b)为当环境温度由-5 °C降低至-20 °C, 平缓温升期时间增加, 各温度下平缓温升期时间分别为2.5 min、5.0 min、8.3 min、10.0 min。在短暫停滯

滯期内, 样件表面温度保持在0 °C以上, 温度仅有小幅度上升。这是加热所提供热量主要用于接触面冰层相变, 融化水并未及时从样件与冰层之间流出, 使热量被传导至冰层, 导致样件表面温度基本不变。进入快速升温期时, 样件表面覆冰融化后的黏附力小于重力, 使覆冰脱落, 加热热量主要用于样件表面升温和环境之间的换热, 样件表面温度快速上升并逐渐达到稳定。

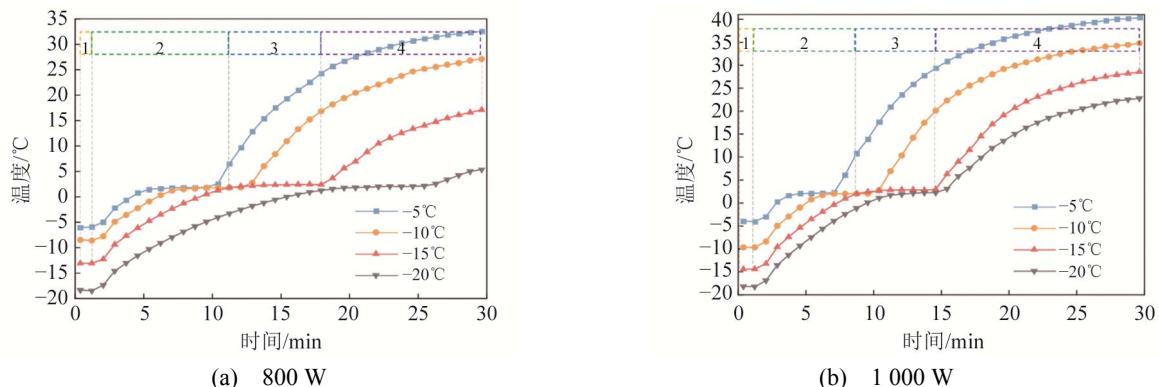


图 6 不同环境温度下覆 5 mm 冰层样件的升温曲线 (加热功率: 800 W 和 1000 W)

Fig. 6 Temperature Rise Curves of Ice-Coated Specimens (5 mm-Thick) Under Different Ambient Temperatures (at Heating Powers: 800 W and 1000 W)

3.3 加热功率影响

对样件施加400 W、600 W、800 W和1000 W的加热功率, 查看融冰过程中表面温度变化, 见图7。图7(a)为在-5 °C环境温度中, 400 W~1000 W加热功率下覆冰均脱落, 随着加热功率的增加平缓温升期和短暫停滯期时间均缩短, 平缓温升期时间由12.1 min缩短至4.5 min, 短暫停滯期时间由10.8 min缩短至3.3 min, 这是由于加热功率高使融化吸热时间缩短。图7(b)为在-10 °C环境温度中, 600 W~1000 W加热功率下覆冰脱落; 400 W加热功率下加热30 min覆冰未脱落, 接触面处有少量融化水流出; 600 W加热功率下覆冰呈缓慢滑落状态, 为此快速

升温期温度上升较为缓慢。图7(c)为在-15 °C环境温度中, 覆冰仅在800 W和1000 W加热功率下脱落; 在600 W加热功率下短暫停滯期温度逐渐上升, 是由于内部融化水大量流出, 使得接触面换热量减少。图7(d)为在-20 °C环境温度下, 仅在1000 W加热功率下覆冰脱落, 融冰时间为13.4 min。在该环境温度下使用600 W加热功率对表面覆冰加热30 min, 覆冰未融掉。当加热功率为600 W时, 经30 min加热仍处于平缓温升期, 且表面温度仍低于0 °C。为保证风电叶片表面除冰效果且节约能源, 实际应用中须控制除冰时间, 因此在实际除冰过程中应选用600 W以上的加热功率。

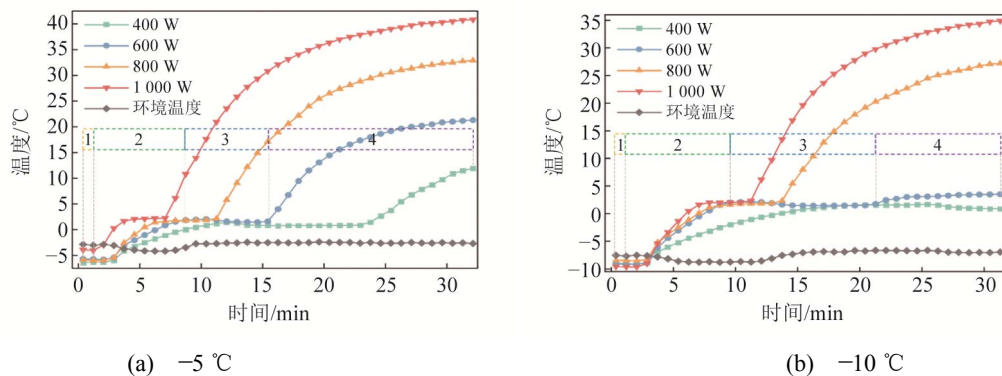


图 7 不同加热功率下覆 5 mm 冰层样件的升温曲线 (环境温度: -5 °C, -10 °C, -15 °C, -20 °C)

Fig. 7 Temperature Rise Curves of Specimens with a 5 mm-Thick Ice Layer Under Different Heating Powers (Ambient Temperatures: -5 °C, -10 °C, -15 °C, -20 °C)

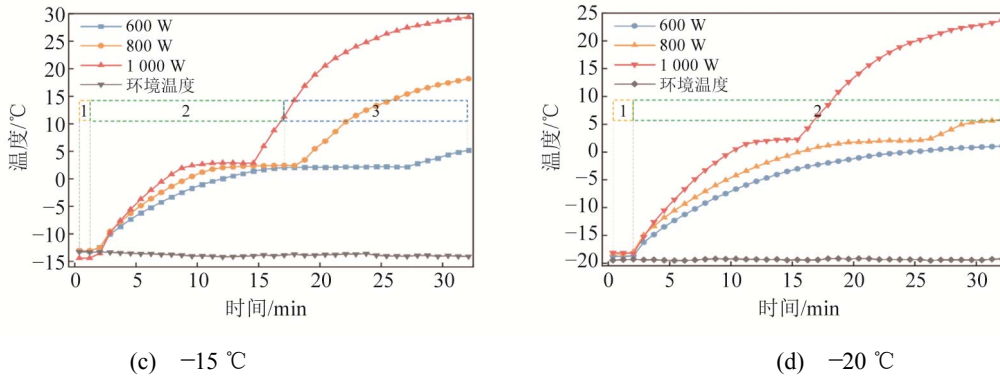


图7 不同加热功率下覆5 mm冰层样件的升温曲线(环境温度: -5 °C, -10 °C, -15 °C, -20 °C)(续)

Fig. 7 Temperature Rise Curves of Specimens with a 5 mm-Thick Ice Layer Under Different Heating Powers (Ambient Temperatures: -5 °C, -10 °C, -15 °C, -20 °C) (Continued)

3.4 覆冰厚度影响

风机运行过程会加剧表面结冰, 为了解不同结冰厚度和表面覆冰经加热后未脱落时样件表面升温速率的影响, 本文采用5 mm和20 mm厚覆冰进行试验, 升温曲线见图8。在-20 °C环境温度中, 使用800 W加热功率进行加热, 两种情况下均加热70 min覆冰未脱落, 取其通道01与通道02温度进行对比分析。在加热初期A点位置, 2种情况升温速率一致。在平缓升温期, 5 mm厚覆冰比20 mm厚覆冰升温速率更快, 且短暂停滞期时间缩短。这可能使覆冰厚度降低, 总体积减小, 冰层本身吸热量减少和冰层侧面对流换热面积减小, 使加热功率更多用于接触面升温。

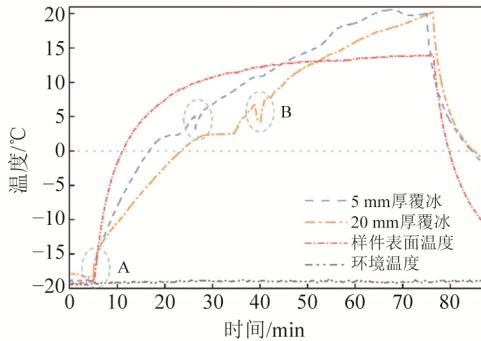


图8 -20 °C环境下使用800 W加热功率, 对5 mm和20 mm厚覆冰加热升温变化曲线

Fig. 8 Heating Curves of 5 mm and 20 mm Thick Ice at -20 °C Using 800 W Heating Power

短暂停滞期后, 温度开始出现快速上升, 在曲线B点位置温度呈现先短暂下降后平稳上升趋势。样件表面温度在加热初期快速上升, 保持在10 °C以上。在5 mm厚覆冰情况下, 当温度达到20 °C时, 温度呈波动状态。由于加热过程中融化水逐渐流出, 接触面热阻先减小后增加, 温度呈波动状态。B点之后内部融化水基本流出, 冰层与样件接触面热阻

变大, 更多热量用于样件表面升温。

在2种情况下表面温度达到20 °C时, 关闭加热电源, 使其在-20 °C时在环境试验箱中自然冷却。在5 mm和20 mm厚覆冰情况下, 从20 °C降低至0 °C分别用时9.5 min和7.2 min, 且两者从20 °C降低至10 °C仅用时2 min。覆冰区域与样件表面未覆冰区域对比, 覆冰区域降温速率明显放缓。为此, 在环境温度较低的情况下, 对风机进行除冰时可依据覆冰厚度在加热初期增加或减小加热功率, 可加快内部除冰速率。同时, 除冰控制系统设置时, 应控制停止加热时间, 避免出现停止过程中温度大幅下降的情况, 减少除冰能耗。

在不同环境温度和加热工况下, 样件表面覆5 mm厚和20 mm厚覆冰融冰时间见表2。

表2 不同加热工况下融冰时长
Tab. 2 Ice Melting Time Under Different Heating Conditions

环境 温度/°C	加热功率/ (W/m ²)	融冰时长/s	
		5 mm 厚覆冰	20 mm 厚覆冰
-5	400	1 233	1 266
	600	750	776
-10	600	1 152	1 316
	800	503	616
-5	800	645	850
	1 000	978	1 265
-5	1 000	320	365
	10	504	537
-15	1 000	760	792
	20	795	938

在-5 °C环境温度中采用1 000 W加热功率, 融冰时间最短分别为320 s和365 s, 在-5 °C环境温度中采用400 W加热功率, 融冰时间最长分别为1 233 s

和 1 266 s, 说明加热功率对融冰时长的影响更大。在相同环境温度和加热工况下, 覆冰厚度越厚融冰时长越长, 在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度下采用 800 W 加热功率融冰, 两者融冰时长相差最大为 205 s。这可能是覆冰厚度增加, 使更多热量被覆冰本体所吸收, 且覆冰总面积变大, 对流换热量增加, 热量散失较快。

4 结论

本文以风电叶片电加热样件为基础, 采用试验的方法, 探究了环境温度、加热功率和覆冰厚度等因素对样件内加热组件升温速率的影响, 得出以下结论。

1) 在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度下, 碳纤维加热层加热升温规律表明, 加热终温与环境温度及功率呈线性关系, 环境温度增加 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 或加热功率增加 200 W 时, 加热终温分别提升 $5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $8.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。降温速率与终温和环境温度间温差呈正相关, 升温速率受界面热阻调控。

2) 在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度内, 1 000 W 加热功率的平板融冰试验表明, 随着环境温度下降, 融冰过程中平缓温升阶段明显延长。短暂停滞期间, 样件表面温度因冰层相变效应而维持相对稳定, 此阶段内接触面处融化水大量流出, 覆冰黏附力逐渐小于重力加速覆冰脱落。覆冰脱落后, 进入快速升温阶段, 表面温度迅速上升并趋于稳定, 说明环境温度对融冰效率及热传递过程有显著影响。

3) 在 400 W~1 000 W 的加热功率下, 样件表面融冰过程中温度变化规律表明, 提高加热功率可显著缩短融冰过程中的平缓温升期和短暂停滞期, 缩短融冰有效时长。为确保风电叶片表面在低温环境 ($-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以下) 下实现高效除冰, 建议采用 800 W 以上的加热功率。

4) 在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境温度下, 对比 5 mm 与 20 mm 覆冰加热 70 min 的升温特性, 发现覆冰厚度显著影响热传导及融冰速度, 薄冰升温快且融冰时间短。加热功率对融冰时长的影响大于环境温度, 提高功率可大幅缩短融冰时间。

以上研究为低温环境下的除冰策略提供科学依据, 可根据覆冰厚度和环境温度调整加热功率, 优化除冰效率和能耗。

参考文献:

- [1] 黎静华, 骆怡辰, 杨舒惠, 等. 可再生能源电力不确定性预测方法综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1144-1155.
LI J H, LUO Y C, YANG S H, et al. Review of Uncertainty Forecasting Methods for Renewable Energy Power[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1144-1155.
- [2] 胡琴, 王欢, 邱刚, 等. 风力发电机叶片覆冰量化分析及其应用[J]. 电工技术学报, 2022, 37(21): 5607-5616.
HU Q, WANG X, QIU G, et al. Quantitative Analysis of Wind Turbine Blade Icing and Its Application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(21): 5607-5616.
- [3] QU B, SUN Z, FENG F, et al. Preparation and Anti-Icing of Hydrophobic Polypyrrole Coatings on Wind Turbine Blade[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2020, 2020: 8626457.
- [4] 杨馨. 风力发电机叶片耐磨性超疏水涂层的制备及防覆冰性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
YANG X. Preparation of Wear-Resistant Superhydrophobic Coatings for Wind Turbine Blades and Study on Anti-Icing Performance[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [5] 胡琴, 王欢, 舒立春, 等. 覆冰条件下风力发电机叶片防/除冰方法综述[J]. 电工技术学报, 2024, 39(17): 5482-5496.
HU Q, WANG H, SHU L C, et al. Review of Anti-/De-Icing Methods for Wind Turbine Blades Under Icing Conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17): 5482-5496.
- [6] 陈宇, 蒋兴良, 黄廷帆, 等. 飞机和风机叶片除冰用脉冲线圈结构对瞬态电磁场影响研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4221-4232.
CHEN Y, JIANG X L, HUANG T F, et al. Study of the Effect of Pulsed Coil Structures on Transient Electromagnetic Fields for Aircraft and Wind Turbine Blade De-Icing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4221-4232.
- [7] 王昭力, 刘小春, 文飞, 等. 2 MW 风机叶片气热法防除冰的传热试验研究[J]. 可再生能源, 2022, 40(3): 356-361.
WANG Z L, LIU X C, WEN F, et al. Heat Transfer Test Research on Air Heating Antiicing/Deicing of 2 MW Wind Turbine Blades[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(3): 356-361.
- [8] 胡俊军, 王守涛, 孙颖, 等. 飞机防/除冰复合材料用电加热织物力学性能和电加热性能研究[J]. 兵工学报, 2025, 46(1): 169-177.
HU J J, WANG S T, SUN Y, et al. Mechanical and Electrical Heating Properties of Electrically Heated Fabric for Aircraft Antiicing and Deicing Composites [J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(1): 169-177.

(下转第 169 页)