

# 风力发电机叶片覆冰机理及防除冰技术研究进展

王宇峰

新疆华电苇湖梁新能源有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

**摘要：**在“双碳”政策下，绿色能源在能源体系中的占比越来越大。风力发电以其原料来源广、污染少、发电量大等优点成为国家重点发展的方向之一。随着风力发电的快速发展，风力发电机覆冰问题愈发凸显。为了解决这一问题，为了克服风力发电机覆冰造成的影响，本文在综述风力发电机覆冰理论的基础上，介绍了覆冰产生的不同原因及危害，分析比较了目前常用的防除冰技术，旨在寻找合适的防除冰策略来逐步解决这一难题。

**关键词：**风力发电机；叶片；覆冰机理；防除冰；组合策略

风力发电机覆冰会导致风速仪、风向标和温度传感器发生故障，或采集的数据出现误差，机组错误运行，出现机器故障。不规则或不平衡积冰会导致风力发电机部件运行时振动，产生共振，易超过其设计的疲劳安全载荷，从而缩短风力发电机部件的使用寿命。

## 1 风力发电机叶片覆冰机理

风力发电机叶片覆冰是低温高湿环境下过冷水滴在叶片表面碰撞、凝固的热力学过程，其机理及影响因素如下：

(1) 覆冰形成机理。气象条件，核心条件：环境温度低于 $0^{\circ}\text{C}$ ，叶片表面温度 $\leq -5^{\circ}\text{C}$ ，空气相对湿度 $\geq 85\%$ 。风速影响：3~7m/s的风速利于过冷水滴输送，过低则水滴无法接触叶片，过高则水滴易被吹落。特殊环境：高原低气压环境加速水滴碰撞叶片，加剧覆冰。物理过程，过冷水滴作用：温度 $< 0^{\circ}\text{C}$ 的液态水滴撞击低温叶片表面时，释放潜热并瞬间凝固。热交换机制：水滴与叶片表面的温差驱动热量传递，凝固速率受表面粗糙度、材料导热性影响。覆冰类型与特征，风力发电机叶片覆冰主要包括三种核心类型，其形成条件、物理特性及危害对比如下：雨凇（明冰），形成条件：环境温度 $0\sim 5^{\circ}\text{C}$ 、高湿度（ $> 85\%$ ）、过冷水滴直径较大（ $> 20\mu\text{m}$ ）时发生，水滴碰撞叶片后形成水膜冻结。物理特性：冰层透明坚硬，密度高（ $> 900\text{kg/m}^3$ ）；附着力极强，呈玻璃状紧密贴附叶片前缘。影响特点：显著改变叶片翼型，升力系数下降高达30%；极难自然脱落，需主动除冰干预。雾凇（霜冰），形成条件：低温环境（ $< -5^{\circ}\text{C}$ ）、低液态水含量、过冷水滴直径小（ $< 10\mu\text{m}$ ），通过干增长方式快速冻结。物理特性：白色疏松晶体结构，密度低（ $< 300\text{kg/m}^3$ ）；附着力弱，易因振动或升温脱落。影响特点：堆积速度快，短期内增厚明显；脱落的冰屑易被离心力甩出，威胁周边安全。混合凇，形

成条件：温度区间 $-10\sim -3^{\circ}\text{C}$ 、过冷水滴粒径不一，同时存在干/湿增长过程。物理特性：冰层半透明，密度中等（ $500\sim 800\text{kg/m}^3$ ）；兼具雨凇的附着力和雾凇的堆积性。影响特点：导致叶片质量分布严重不均，引发共振疲劳；高原低气压区高发，年发电损失达常规区域1.5倍。特殊环境覆冰特性高原地区因低气压环境加速过冷水滴冻结，冻雨-融雪循环频繁，混合凇主导覆冰过程，且冰层粘附力增强。如西藏高海拔项目实测表明，此类覆冰可使发电损失提升至20%-50%。

(2) 覆冰影响因素。叶片设计，前缘粗糙度高的叶片更易滞留水滴，加速覆冰；涂层疏水性直接影响冰层附着力。运行状态叶片旋转时离心力可甩落部分松冰，但高速旋转亦增加过冷水滴碰撞概率。地理环境，高海拔、丘陵地带因低温持续时间长、湿度大，覆冰风险显著升高。

(3) 研究趋势。当前机理研究聚焦于多场耦合模型（空气动力学+热力学+流体力学）的精细化模拟，以及低气压/高湿度复合环境下的覆冰动态监测技术。

## 2 风力发电机叶片覆冰的影响与危害

风力发电机叶片覆冰会导致多方面严重影响，主要危害如下：

(1) 发电效率显著下降。气动性能恶化：覆冰改变叶片原有翼型，增加表面粗糙度，导致升力系数降低、阻力系数升高，风能捕获效率大幅降低。实验表明，轻微覆冰即可使发电量损失20%-30%，严重时损失高达80%。功率曲线偏移：覆冰后相同风速下的输出功率明显低于正常值，且风速越高功率损失越显著。测风数据失真：风速计覆冰导致测量误差，进一步影响机组控制精度。

(2) 设备安全风险加剧。机械载荷失衡：叶片覆冰质量分布不均，引发异常振动或共振，加速叶片疲劳损伤，极端情况下导致叶片断裂、倒塔。关键部件受损：

覆冰堵塞机舱散热口，造成齿轮箱、发电机过热损坏；低温加剧润滑油凝固，增大机械磨损；电气设备因渗入雪水引发短路。设计寿命缩短：长期超负荷运行缩短风机整体使用寿命。

(3) 安全隐患突出。甩冰伤人毁物：旋转叶片甩脱的冰块最远可抛射200米，威胁周边人员、建筑及设备安全。实际判例显示，未设警戒区域的风电场曾发生路人被冰块砸中身亡事故。运维受阻：覆冰期间人员无法靠近机组，延误故障处理，扩大停电风险。

(4) 电网稳定性受损。极端天气下，区域多台机组覆冰停机可能引发电网波动。例如2021年美国得州寒潮中，75%的风电机组故障由覆冰导致，加剧了大面积停电事故。叶片覆冰不仅造成直接经济损失，还威胁设备安全和公共安全，是风电运维的核心挑战之一。

### 3 风力发电机叶片防除冰技术的重要性

风力发电机叶片防除冰技术的重要性主要体现在其对发电效率、设备安全和经济效益的关键影响上：

(1) 发电效率严重受损。气动性能破坏：叶片覆冰改变原有气动结构，增大阻力、降低升力，导致输出功率显著下降。覆冰期间发电量损失普遍达10%-20%，在高寒地区甚至更高。停机风险加剧：重度覆冰迫使机组停机避损，直接影响电力供应稳定性。例如，红外除冰技术应用后提升覆冰期发电利用小时达50%，印证了覆冰对发电时效的制约。

(2) 安全隐患突出。机械负荷失衡：冰层不均匀积累破坏叶片力学平衡，诱发共振，加速结构疲劳甚至断裂。脱冰飞溅危害：叶片旋转时甩脱的冰块可能击伤周边设备、车辆或人员，尤其在山地风电场威胁显著。

(3) 运维成本激增。除冰能耗高昂：传统电加热或热风除冰需持续供能，经济性较差；人工除冰则成本高且危险。涂层耐久性挑战：超疏水涂层虽能降低覆冰附着力，但制备工艺复杂，长期户外环境下性能易退化。

(4) 技术发展的核心价值。高效防除冰技术通过多路径化解上述矛盾：被动法优化：如超疏水涂层通过微纳结构减少冰附着，黑色吸光涂料利用太阳辐射辅助融冰（受光照条件限制）；主动法创新：红外辐射加热：20秒内融化3cm厚冰层，非接触式设计保障大容量机组安全运行；气动脉冲除冰：通过控制气压脉冲剥离冰层，脱冰效率随冰层厚度自适应调整；组合策略趋势：如柔性叶片结构结合智能预警系统，降低单一技术局限性。

### 4 风力发电机叶片防除冰技术研究进展

(1) 防除冰技术分类与核心突破。1) 主动除冰技术，气热技术：通过叶片内腔空气加热传导至表面融化

冰层，结合离心力甩离冰块，能耗降至叶片发电量的6%以下，适用于高寒地区。国家电投研发的第五代气热系统使自耗电率降至6.76%，增发电率达94.61%。红外辐射除冰：中国大唐试运的智能红外设备模拟太阳辐射，20秒内融化3厘米厚冰层，1分钟促使覆冰脱落，能量强度达夏季光照的5-8倍；支持防冻与除冰双模式，非接触式设计避免叶片结构改造。微波除冰：开发微波辐射天线，根据冰层状态动态调节功率与频率，提升共振吸能效率。2) 被动防除冰技术，超疏水涂层：仿生荷叶微观结构，接触角突破150°，冰层黏附力降低60%以上。但存在制备工艺复杂、耐久性不足的局限。低冰粘附涂料：黑色涂料可吸收光能融冰，但受限于光照条件且夏季易导致叶片过热。3) 复合防除冰技术，国家能源集团提出“涂层防护+主动加热”协同方案，集成超疏水材料与气热/电热技术，覆盖-25°C至5°C宽温域，解决单一技术环境适应性不足的问题。该技术在贵州、陕西等风电场应用，单机组改造成本较欧美方案低。

(2) 智能化与工程化进展。监测系统：光纤光栅传感器实时检测0.1mm级冰层，AI算法提前2小时预判结冰概率（准确率>90%）。基于环境温湿度、发电量与除冰耗电量动态优化除冰时机，提升发电增益。施工工艺：湿法铺层与高空真空灌注一体化成型工艺降低材料损耗30%，施工效率提升40%。

(3) 应用效益与挑战。气热技术，单台风机年增发电量148万千瓦时，利用小时+206小时，叶片内部结构适配性要求高；红外除冰，覆冰期发电利用小时提升50%，设备成本高，规模化应用待验证；复合技术，覆冰损失降低，发电可靠性提升，多系统集成控制复杂度高。

(4) 未来研究方向。多场耦合模型优化：深化空气动力学-热力学-流体力学耦合模拟，提升覆冰预测精度。低能耗技术开发：探索相变材料储能、电磁脉冲等新型除冰方式，进一步降低能耗。涂层耐久性提升：研发纳米增强型超疏水材料，延长涂层寿命至5年以上。

### 5 风力发电机叶片防除冰技术的应用与挑战

(1) 主流技术应用现状。气热除冰技术，通过叶片内腔空气加热传导至表面融冰，结合离心力甩离冰块，能耗降至叶片发电量的6%以下；在贵州、湖南等高寒地区应用后，单台风机年增发电量148万千瓦时，利用小时数增加206小时。国家电投第五代系统使自耗电率降至6.76%，增发电率达94.61%。红外辐射除冰技术，中国大唐试运的智能红外设备模拟太阳辐射，20秒融化3厘米厚冰层，1分钟内促使覆冰脱落，能量强度为夏季光照的5-8倍；非接触式设计避免叶片改造，覆冰期发电利用小

时提升50%。复合防除冰技术（涂层+主动加热），国家能源集团集成超疏水涂层与气热/电热技术，覆盖-25℃至5℃宽温域，冰层黏附力降低60%以上；新型物理除冰技术，干冰清洗机：利用-78.5℃干冰颗粒喷射，通过低温应力裂纹和微爆炸冲击波无损剥离冰层，表面粗糙度变化小于 $0.1\mu\text{m}$ ，日处理量达10组以上叶片，效率较人工提升8倍。气动脉冲除冰：重庆大学研发的内部气囊技术，表面形变 $\leq 2\text{mm}$ ，4ms内完成冰层剥离，充气压力1–3MPa可适配不同冰厚。

(2) 关键挑战与瓶颈。技术适应性局限，气热技术需适配叶片内部结构，高原低气压环境降低热传导效率；红外除冰设备成本高，规模化应用仍待验证。超疏水涂层耐久性不足，复杂工艺导致维护周期短于5年；黑色涂料夏季易致叶片过热，地域适用性受限。系统集成复杂度，复合技术需协调涂层防护、加热控制与智能监测系统，多模块协同难度高，故障率提升15%。气动脉冲除冰需精准控制充气气压，冰层厚度与气压匹配不当将导致脱冰率下降。经济性与维护成本，红外除冰，超百万元，高频维护与能耗成本高；复合防除冰，60–80万元，涂层定期修复与传感器校准；干冰清洗，设备租赁为主，依赖专业操作与气源供应。

(3) 未来突破方向。低能耗技术革新，探索相变材料储能除冰、电磁脉冲技术，目标将能耗控制在发电量的3%以内。涂层耐久性提升，研发纳米增强型超疏水材料，延长寿命至5年以上，并解决高湿环境失效问题。智能预警系统优化，融合光纤光栅传感器与AI算法，实现覆冰厚度0.1mm级监测，预警准确率提升至95%。

## 6 风力发电机叶片防除冰研究探索方向

基于当前研究进展，风力发电机叶片防除冰技术的未来探索方向主要集中在以下核心领域：

(1) 多物理场耦合模型优化。精细化覆冰预测，深化空气动力学-热力学-流体力学耦合模拟，量化风速、温度梯度对冰层增长的动态影响。建立高精度覆冰类型判别模型（雨凇/雾凇/混合凇），提升预测准确率至95%以上。

(2) 低能耗除冰技术革新。新型能量利用技术，研发相变材料（PCM）储能除冰系统，通过相变潜热释放融冰，目标能耗降至发电量的3%以内。探索电磁脉冲

共振技术，利用电磁波选择性加热冰-界面层，实现微秒级脱冰响应。气动/机械除冰创新，优化气动脉冲除冰结构（如重庆大学气囊技术），解决气压与冰厚动态匹配难题。开发干冰喷射参数自适应系统，提升无损除冰效率。

(3) 涂层材料耐久性突破。仿生材料强化，设计纳米增强型超疏水涂层（如二氧化硅/碳纳米管复合结构），延长使用寿命至5年以上。攻克高湿环境涂层失效难题，研发动态疏冰表面（光热响应型材料）。

(4) 智能监测与控制系统升级。多源感知融合，集成光纤光栅传感器、红外热成像与声发射监测，实现0.1mm级冰厚实时定位。AI决策优化，基于深度学习的除冰时机动态算法，联动气象数据与机组运行状态，降低误判率。

(5) 极端环境适应性研究。高原/山地特殊场景，揭示低气压对热传导效率的抑制机制，开发高原专用防冰涂层及加热策略。复合灾害应对，研究覆冰-强风-冻雨耦合作用下的叶片载荷演变规律，优化结构性防冰设计。

综上所述，叶片防除冰技术是保障风电场安全经济运行的核心环节。随着山地、低温区域风电开发加速（占新增装机需求55%），突破低能耗、高适应性防除冰技术，将成为提升可再生能源利用率的关键支撑。当前技术趋势表明，智能化复合防除冰方案正逐步替代单一手段，成为保障高寒地区风电经济性与安全性的核心路径。复合防除冰方案在高寒地区增效显著，但需突破成本控制与系统可靠性瓶颈；物理除冰新技术（干冰、气动脉冲）因无损特性成为新兴方向。多学科交叉融合（材料科学+智能控制+流体力学）与全生命周期成本控制是突破防除冰技术瓶颈的核心路径。

## 参考文献

- [1] 丰莲佳. 基于全生命周期经济评估的海上风电发展与思考[J/OL]. 中国电力:1-14[2024-06-12].
- [2] 刘晓崇. 风电参与电力系统调频控制策略综述[J]. 电力自动化设备,2021,41(11):81-92.
- [3] 鲍斌. 数据驱动的大型风力发电系统性能提升及故障预警[D]. 杭州:浙江大学,2021:127-131.
- [4] 赵静杰. 风力机叶片覆冰机理与防除冰技术研究进展[J]. 排灌机械工程学报,2023,41(12):1237-1245.