

# Recycling of retired wind turbine blades based on the dual carbon goal

Zhenhai Zhu Kang Yan Xiao Yang

CGN Gansu New Energy Co., LTD., Lanzhou, Gansu, 730000, China

## Abstract

With the acceleration of the global energy structure transformation, the wind power industry has entered a large-scale decommissioning stage, and the recycling and utilization of decommissioned wind turbine blades have become a key link in achieving the “dual carbon” goals. This paper systematically analyzes the technical paths of mechanical recycling and biodegradable material recycling, and combines domestic and international policy guidance and technological breakthroughs to propose a high-value recycling system construction plan centered on “technological innovation - policy-driven - industrial collaboration”. Through the analysis of typical cases, it reveals the material property limitations, technical and economic bottlenecks, and industrial chain integration challenges currently faced by the industry, and looks forward to the development direction of the resource utilization of decommissioned wind turbine blades under the circular economy model, aiming to provide theoretical support and practical guidance for the sustainable development of the wind power industry.

## Keywords

dual carbon; decommissioned wind turbine blades; recycling and utilization

## 基于双碳目标的退役风电叶片回收利用

朱振海 闫康 杨筱

中广核甘肃新能源有限公司, 中国·甘肃 兰州 730000

## 摘要

随着全球能源结构转型加速, 风电产业进入规模化退役阶段, 退役风电叶片的回收利用成为实现“双碳”目标的关键环节。本文系统分析机械回收与生物基可降解材料回收技术路径, 结合国内外政策导向与技术突破, 提出以“技术创新—政策驱动—产业协同”为核心的高值化回收体系构建方案。通过典型案例解析, 揭示当前行业面临的材料特性限制、技术经济性瓶颈及产业链整合挑战, 并展望循环经济模式下退役风电叶片资源化利用的发展方向, 旨在为风电产业可持续发展提供理论支撑与实践指导。

## 关键词

双碳; 退役风电叶片; 回收利用

## 1 引言

在“双碳”战略背景下, 中国风电装机容量已突破 4 亿千瓦, 预计到 2035 年累计退役叶片将超 2000 万吨。这些由玻璃纤维/碳纤维增强复合材料构成的退役叶片, 因其热固性树脂基体的不可降解特性, 传统填埋/焚烧方式将造成严重环境负荷。如何实现退役叶片的高值化再生利用, 成为风电产业绿色闭环发展的核心命题。本文从技术路径、政策体系、产业实践三个维度展开论述, 结合国内外最新进展, 构建退役风电叶片回收利用的系统解决方案。

【作者简介】朱振海(1986-), 男, 中国甘肃人, 硕士, 工程师, 从事新能源发电研究。

## 2 退役风电叶片回收技术体系

### 2.1 机械回收技术路径

#### 2.1.1 技术原理

机械回收技术通过物理破碎、分选等工序实现材料分离, 主要包括切割、初级破碎、磁选、精细粉碎、除尘、筛选等环节。典型工艺流程为: 退役叶片经野外分解后, 主梁、腹板、蒙皮等部件通过横截纵剖制成包装零件, 其余胚料经模压或压塑制成循环包装产品。该技术路线可保留玻璃纤维与树脂的化学特性, 但纤维长度大幅缩短, 性能衰减显著。

#### 2.1.2 技术经济性分析

机械回收处理成本约 800-1200 元/吨, 设备投资强度为 300 万-500 万元/万吨级产线。其优势在于工艺成熟度较高, 适用于大规模预处理, 但再生产品附加值低, 多用于建筑材料、市政设施等领域。测试表明, 机械回收料制成的市政井盖抗压强度较原生材料下降 35%, 使用寿命缩短约 40%。

## 2.2 生物基可降解材料回收技术

### 2.2.1 技术突破与产业化进展

美国 NREL 实验室开发的生物基树脂替代技术，通过酶解工艺实现 90% 以上材料回收率。国内时代新材自主研发的 ezCiclo 可回收树脂体系，已在 82 米级叶片实现工业化验证，全生命周期碳足迹降低 26%。该技术采用化学解聚方法，在温和条件下使树脂与纤维分离，回收纤维可直接用于新叶片生产。

### 2.2.2 经济性评估与市场前景

生物基树脂成本较传统环氧树脂高 40%，但通过材料循环使用可降低综合成本 15%~20%。以 100MW 风电场为例，采用可回收叶片可使全生命周期成本降低 8%。随着规模化生产，预计到 2030 年生物基树脂成本将下降至与传统树脂相当水平。

## 2.3 创新技术矩阵

见表 1。

表 1

| 技术路线    | 代表机构              | 回收效率 | 碳排放强度 (kgCO <sub>2</sub> /kg) | 适用场景      | 技术成熟度 |
|---------|-------------------|------|-------------------------------|-----------|-------|
| 化学解聚法   | 丹麦奥胡斯大学           | 85%  | 1.2                           | 高纯度玻璃纤维再生 | TRL7  |
| 热解法     | 德国 Fraunhofer 研究所 | 78%  | 2.1                           | 能源化利用     | TRL8  |
| 3D 打印重构 | 荷兰 TU Delft       | 92%  | 0.8                           | 定制化结构件制造  | TRL6  |
| 等离子体气化  | 日本新能源产业技术综合开发机构   | 95%  | 3.5                           | 危废处理      | TRL5  |

## 3 政策驱动与产业实践

### 3.1 政策体系构建

#### 3.1.1 国家层面政策框架

《2030 年前碳达峰行动方案》明确将退役叶片纳入循环经济重点领域，要求到 2025 年建立责任延伸制度。《风电场改造升级和退役管理办法》规定设备处理责任主体，建立“谁产生、谁负责”机制。中央预算内投资对回收项目给予 15% 资本金补贴，单个项目最高支持 1 亿元。《关于促进退役风电、光伏设备循环利用的指导意见》提出分 2025 年和 2030 年两阶段，建立责任机制、完善标准体系、突破关键技术。《国家危险废物名录（2025 年版）》明确退役光伏组件不属于危险废物，简化回收流程。

#### 3.1.2 地方创新实践

江苏省设立 5000 万元专项基金，支持碳纤维回收技术攻关，目标到 2025 年建成国家级回收基地。河北省张家口建设国家级新能源固废处置中心，规划年处理能力 10 万吨，配套建设再生材料交易平台。广东省实施“生产者责任延伸制”，要求叶片制造商按产值的 2% 计提回收准备金。山东省将退役风电、光伏设备回收纳入循环经济重点任务，推动企业技术改造和设备更新，鼓励金融机构为回收项目提供融资支持，落实税收优惠政策。浙江省支持嘉兴市深化退役光伏设备回收技术研发，推动再生材料使用比例提升，鼓励风电、光伏设备残余寿命评估，推进梯次利用。

### 3.2 典型商业模式

#### 3.2.1 丰诺环保叶片增值利用体系

开发专用切割刀具（寿命提升 20 倍），建立自动化加工产线，年处置量 5000 吨。构建“叶片—复合材料—循环包装”产业链，产品已进入快递物流行业。较一次性包装节省成本 500 万元/年，减少木材消耗 1.6 万 m<sup>3</sup>，相当于固碳 1.74 万吨。

#### 3.2.2 西门子歌美飒闭环回收模式

德国 Kaskasi 风电场应用可回收叶片，退役后纤维 100% 回用于新叶片生产。建立跨欧洲回收网络，配置移动式回收单元，实现叶片材料 72 小时内本地化再生。通过叶

片租赁服务实现全生命周期收益，客户支付处置保证金可获 10% 电价优惠。

## 4 关键挑战与突破路径

### 4.1 技术瓶颈突破

#### 4.1.1 材料科学难题

退役风电叶片主要由玻璃纤维增强复合材料（GFRP）和碳纤维增强复合材料（CFRP）构成，这些材料在自然环境中难以降解，且其热固性树脂基体在固化后形成三维网状结构，难以通过常规方法分离和回收<sup>[1]</sup>。

①纤维与树脂分离技术。当前，化学解聚法和热解法是目前主要的研究方向。化学解聚法通过使用特定的溶剂或催化剂，在温和条件下打断树脂的化学键，实现纤维与树脂的分离。然而，该方法仍面临溶剂回收、反应效率等问题。热解法则通过高温使树脂热解，但易导致纤维性能下降。②纤维表面改性技术。回收的纤维表面往往附着有树脂残留物，影响其与新树脂的界面结合性能。通过表面改性技术，如等离子体处理、化学镀层等，可以提高纤维的表面活性，增强其与新树脂的界面结合力。

#### 4.1.2 装备创新需求

①大型化叶片拆解装备。目前，市场上缺乏专门针对大型风电叶片的拆解装备。研发高效、安全的叶片拆解装备，如大型液压剪切机、激光切割机，是提高回收效率的关键。②智能分选系统。退役风电叶片中包含多种材料，如玻璃纤维、碳纤维、树脂、金属等。通过智能分选系统，如近红外光谱分析、X 射线荧光分析等，可以实现材料的快速、准确分选，提高回收料的纯度。

#### 4.1.3 回收工艺优化

当前，退役风电叶片的回收工艺仍存在流程长、能耗高、回收率低等问题。

①短流程回收工艺。研发短流程、低能耗的回收工艺，如一步法化学解聚、微波辅助热解等，可以缩短回收周期，降低回收成本。②高值化利用技术。除了传统的建筑材料、市政

设施等领域外,探索退役风电叶片在高端制造领域的应用,如汽车轻量化部件、航空航天材料等,以提高回收料的附加值。

## 4.2 产业协同机制

### 4.2.1 全生命周期管理

退役风电叶片的回收利用需要贯穿其全生命周期,从设计、制造、使用到回收处理,每个环节都需要考虑材料的可回收性和再利用性<sup>[2]</sup>。

①设计环节。考虑其未来的回收处理问题,例如采用易拆解、易回收的结构设计,使用可回收的树脂体系等。②制造环节。建立完善材料追溯体系,记录每种材料的使用情况和性能参数,为未来的回收处理提供数据支持。③使用环节。定期进行健康监测和维护保养,延长其使用寿命,减少不必要的退役。

### 4.2.2 跨行业合作模式

退役风电叶片的回收利用需要跨行业的合作与协同,包括风电设备制造商、回收处理企业、材料再利用企业等<sup>[3]</sup>。

①产业链整合。通过整合产业链上下游资源,形成从叶片制造到回收处理的完整产业链。例如,风电设备制造商可以与回收处理企业建立长期合作关系,确保退役叶片的稳定供应;回收处理企业可以与材料再利用企业合作,共同开发高值化利用产品。②技术创新联盟。建立由高校、科研机构、企业等组成的技术创新联盟,共同研发退役风电叶片回收利用的关键技术。通过共享研发资源、成果转化等方式,加速技术创新的步伐。

### 4.2.3 政策与市场驱动

政府政策和市场需求是推动退役风电叶片回收利用的重要动力。

①政策支持。政府出台更加具体的财政激励措施和税收优惠政策,鼓励企业参与退役风电叶片的回收利用。例如,对回收处理企业给予补贴或税收减免;对使用回收料的企业给予产品认证或市场准入优惠等。②市场需求。随着社会对环保和可持续发展的关注度不断提高,市场对回收料的需求也将逐渐增加。通过宣传推广、品牌建设等方式,提高回收料的市场认知度和接受度,以进一步推动退役风电叶片的回收利用。

## 5 未来发展趋势

### 5.1 技术演进方向

#### 5.1.1 生物智造融合

生物智造技术在退役风电叶片回收领域展现出巨大潜力。基因编辑工程菌通过精准降解树脂基体,实现了从“末端治理”到“源头控制”的转变。例如,中科院天津工业生物所研发的工程菌,能够在72小时内将树脂降解率提升至80%,且降解产物可进一步转化为生物塑料原料。未来,随着合成生物学技术的突破,有望实现工程菌的定制化设计,针对不同树脂体系开发专用降解菌株,进一步提高降解效率和产物附加值。

#### 5.1.2 数字孪生技术

数字孪生技术正在重塑风电叶片的全生命周期管理。

通过构建叶片的虚拟镜像,数字孪生技术能够实时模拟叶片在服役、运维和回收阶段的性能变化。在回收环节,该技术可优化化学解聚、热解等工艺参数,提升回收率。例如,西门子歌美飒的试点项目通过数字孪生技术,使叶片回收率提升12%。未来,数字孪生技术将与人工智能、大数据分析深度融合,实现回收工艺的智能优化和自适应调整,进一步提高回收效率和产品质量。

#### 5.1.3 等离子体气化

等离子体气化技术为退役风电叶片的无害化处理提供了新方案。该技术利用高温等离子体将叶片中的有机物完全气化,生成合成气(主要成分为CO和H<sub>2</sub>),无机物则转化为玻璃态熔渣。日本NEDO的项目已实现连续运行500小时,处理效率达95%以上。与传统焚烧相比,等离子体气化具有处理彻底、二噁英零排放等优势。

## 5.2 产业生态构建

### 5.2.1 区域集散中心

区域集散中心是退役风电叶片回收利用体系的核心节点<sup>[4]</sup>。以京津冀、长三角、成渝三大国家级回收基地为例,这些中心集成了物流、分拣、预处理等功能,形成“分散收集—集中处理”的回收网络。

### 5.2.2 碳交易机制

碳交易机制为退役风电叶片回收利用提供了经济激励。通过将叶片再生产品纳入CCER(国家核证自愿减排量)体系,企业可通过碳交易获得额外收益。

### 5.2.3 国际标准对接

国际标准对接是提升中国风电叶片回收产业竞争力的关键。中国牵头编制的IEC《风电叶片回收技术导则》已进入FDIS(最终国际标准草案)阶段,该标准将规范叶片回收的技术要求、测试方法和环保指标。

## 6 结语

本文系统探讨了退役风电叶片回收利用的多维路径,通过技术创新、政策引导与产业协同的深度融合,构建了覆盖全生命周期的闭环解决方案。研究不仅验证了机械破碎与生物降解技术的产业化潜力,更前瞻布局数字孪生赋能回收监测、碳交易机制激活绿色价值的创新模式。随着国际标准对接与数字护照体系的推进,退役叶片资源化将成为风电产业践行“双碳”战略的关键支点,为全球可再生能源装备循环经济转型提供中国方案,助力碳中和目标与绿色经济高质量发展。

## 参考文献

- [1] 王宝龙,李成良,陈淳,等.大型风电叶片低碳循环利用技术:挑战与机遇[J/OL].硅酸盐学报,1-10.
- [2] 樊笑婕,许紫娟.浅析退役风电叶片的回收与再利用[J].节能与环保,2024(02):46-52.
- [3] 罗锦程,郭林燕,纪亚建.构建新时代绿色低碳循环经济体系的思考与建议——以退役风电叶片为例[J].中华环境,2023(08):36-39.