

退役风机叶片回收技术: 现状、环境风险与产业化路径

张敏¹, 白冰², 陈佩², 张乾生², 胡中发³, 周澳¹, 邓双辉¹, 谭厚章¹, 王学斌^{1*}

1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049

2. 中广核环保产业有限公司, 深圳 518031

3. 苏州大学能源学院, 苏州 215006

* 联系人, E-mail: wxb005@mail.xjtu.edu.cn

2025-10-15 收稿, 2025-12-05 修回, 2025-12-09 接受, 2025-12-11 网络版发表

国家自然科学基金(52376125, 52406154)资助

摘要 全球风电产业快速发展, 退役风机叶片回收已成为制约行业绿色可持续发展的关键瓶颈。风机叶片主要由玻璃纤维/碳纤维增强热固性复合材料构成, 具有结构复杂和难降解等特性, 现有传统填埋和焚烧方式资源利用率低, 且易造成严重的生态环境风险。本文系统梳理了退役风机叶片回收的主要技术路径, 包括机械法、热解法、化学法和水泥窑协同处置等, 并从技术成熟度、经济成本、环境影响及资源化价值等多个维度进行综合评估。研究表明, 机械回收虽具备低成本与产业化基础, 但再生纤维性能下降显著; 热解与化学回收可实现纤维的高值化利用, 但仍面临能耗高、工艺复杂及二次污染等挑战。文章进一步探讨了各类回收技术在推广应用过程中面临的环保瓶颈, 包括微塑料扩散、有毒气体排放、重金属富集及高化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)废液等问题, 并结合典型工程案例, 分析了退役叶片在建筑材料、道路交通和公共设施等领域的资源化应用潜力。最后, 本文从技术集成创新、政策机制完善和产业链协同等角度, 提出推动风机叶片回收商业化与绿色闭环发展的路径建议, 以助力风电产业全生命周期可持续发展。

关键词 退役风机叶片, 回收技术, 二次污染, 资源化利用

在全球能源低碳转型加速的背景下, 风能已成为替代化石能源的核心力量。据风能理事会(Global Wind Energy Council, GWEC)《2025全球风能报告》显示, 2024年全球风电新增装机达117 GW(陆上109 GW+海上8 GW), 累计装机突破1136 GW, 覆盖55个国家和地区, 其中中国占比高达68%(图1(a))。国际能源署(IEA)数据进一步指出, 截至2023年, 全球风电装机已达1.2 TW, 陆上风电占比85%, 海上风电以20%的年增速快速扩张。这一增长态势与全球气候治理进程深度绑定, 近200个国家在第28届联合国气候变化大会(28th Conference of the Parties, COP28)上承诺2030年将可再生能源装机容量增加三倍, 风能作为主力军被寄予厚望。GWEC

预计未来风能行业将保持8.8%的年增速, 2025~2030年间新增981 GW, 其中2029~2030年年度装机将突破180 GW(图1(b))。然而, 首批大规模投运机组已进入退役周期, 退役风机叶片数量急剧攀升: GWEC 2025年发布的《风电退役资产管理白皮书》的数据显示, 2024年全球退役总量达12万吨, 预计2030年突破100万吨, 2040年将飙升至每年500万吨以上。

风机叶片作为核心部件, 其材料特性加剧了回收难度。其以玻璃纤维增强聚合物(glass fiber reinforced plastic, GFRP)为主(占比超90%), 部分大型叶片(尤其是海上风电)采用碳纤维增强聚合物(carbon fiber reinforced plastic, CFRP), 纤维与树脂形成紧密化学结合,

引用格式: 张敏, 白冰, 陈佩, 等. 退役风机叶片回收技术: 现状、环境风险与产业化路径. 科学通报, 2026, 71: 1783–1794

Zhang M, Bai B, Chen P, et al. Recycling technologies for retired wind turbine blades: current status, environmental risks, and industrialization pathways (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 1783–1794, doi: 10.1360/CSB-2025-5655

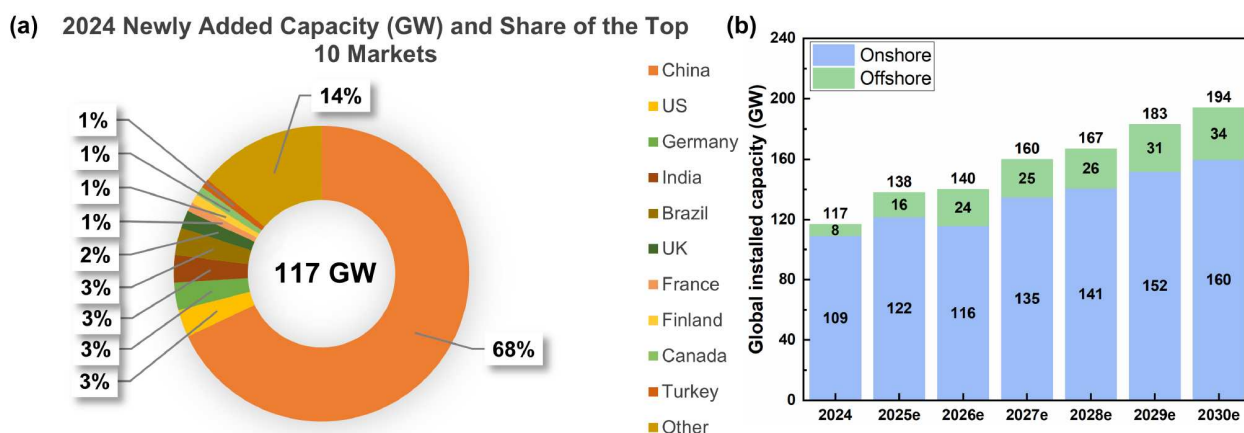


图1 (a) 2024年新增容量(GW); (b) 风力发电装机容量未来发展预测(来源: 全球风能理事会)

Figure 1 (a) 2024 new capacity (GW); (b) future development forecast of wind power installed capacity (source: GWEC)

且含聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)泡沫芯材等辅助材料, 构成复杂多层异质结构^[1-3]. 相较之下, 风机塔架、机舱回收利用率超95%, 而2024年叶片回收利用率仍不足30%.

尽管回收难度大, 退役叶片仍具高再利用价值. 英国复合材料协会2024年测算显示, 每吨GFRP可回收600~700 kg玻璃纤维, 适用于建筑、汽车等次级场景; 回收CFRP纤维在航空航天次级部件、体育器材领域应用已获验证^[4-8]. 深入剖析当前回收技术进展与瓶颈, 探索高效、低成本、低污染的回收路径, 对推动风电产业绿色闭环、为复合材料废弃物循环利用提供技术范式具有重要意义. 本文聚焦近两年最新研究成果, 系统梳理退役风机叶片回收利用的技术现状、核心挑战及未来方向, 为相关研究与实践提供参考.

1 回收技术现状

退役风机叶片的回收技术可分为传统处理方式与新型回收技术两大类. 传统方式以填埋和焚烧为主, 新型技术则包括机械回收、热解回收、化学回收, 各类技术在效率、成本与环境影响方面呈现显著差异.

1.1 传统处理方式: 填埋与焚烧

填埋是早期处理退役叶片的主要方式, 其工艺简单, 但叶片体积庞大, 占用大量土地资源, 且存在运输与填埋场空间浪费的问题. 更关键的是, 树脂基体在自然环境中的降解周期长达数百年, 外露的玻璃纤维还可能造成土壤与水体污染. 丹麦环境研究所2024年研

究显示, 退役叶片填埋场周边土壤中微塑料含量较周边区域高3~5倍. 焚烧处理通过高温氧化减少叶片体积, 其热量可用于发电或供热. 但树脂燃烧会释放CO₂、NO_x及少量有毒气体, 需严格控制排放. 德国联邦环境局2025年数据显示, 符合欧盟《工业排放指令》标准的叶片焚烧成本已达80~120欧元/吨, 远超普通工业固废处理成本, 且无法实现纤维资源的回收利用, 仅作为应急手段.

1.2 机械回收技术

机械回收凭借成本低(基础处理成本500~1000元/吨, 涵盖预处理、破碎、分选环节, 不含运输成本)、效率高、污染小的特点, 成为当前退役风机叶片规模化回收中应用最广的技术^[9-11], 其核心流程包括预处理、破碎与分选三大环节. Zhao等人^[12]提出的“机械破碎-水振动分离-二次筛分”联用技术, 进一步实现了不同尺寸纤维的精准分选, 其中大纤维(长度>10 mm)的分选纯度可达90%^[12].

在高效回收的同时, 机械回收的环境效益显著. 研究表明每千克GFRP废物通过机械回收可避免2.4 kg CO₂排放, 远优于传统填埋(0.05 kg)和焚烧(0.24 kg)方式^[13], 这得益于回收产物对原材料的高替代率, 特别是GFRP钢筋0.98:1的高替代率. 然而, 回收过程中纤维表面粗糙度增加40%, 导致界面结合性能下降20%~30%^[13]. 尽管如此, 通过合理的应用设计和配比优化, 回收纤维在建筑材料领域仍具广泛应用前景. 国内外学者对机械回收叶片在混凝土中的应用效果研究表明

(表1)^[14,15], 掺入适量回收纤维可提升混凝土抗压强度和韧性, 其具体的机械性能测试实验装置及GFRP混凝土劈裂拉伸破坏模式如图2所示^[12]. 此外, 不同纤维增强混凝土材料的性能表征如图3所示, 图3(a)^[15]和(b)^[12]分别揭示了玻璃纤维掺量、不同掺量下玻璃纤维长度与表观密度的关系, 为混凝土配比设计提供了参考; 图3(c)和(d)^[15]则对比了不同粒度纤维及不同掺量下增强材料的抗压强度, 进一步验证了掺入回收纤维对混凝土抗压性能的积极影响.

1.3 热解回收

热解回收技术利用高温使退役风机叶片中的有机材料分解, 从而实现材料的分离和回收^[16]. 在热解过程中, 风机叶片中的树脂和轻木等有机物会发生一系列复杂的化学反应, 主要包括裂解、脱氢、环化、缩聚等反应^[17].

为提升热解回收技术的效率与经济性, 近年来学界围绕热解工艺条件优化展开了系统研究. 杨等人^[18]采用微波热解反应器处理废弃叶片, 在450℃、500 W条件下, 环氧树脂热解可溶性产物产率达71%, 单酚化合物选择性为60.34%, 回收玻璃纤维结构完整. 该研究通过“产物价值-处理成本”核算得出, 每吨处理可实现1391~1606元收益, 具体测算逻辑为: 结合叶片成分构成(玻璃纤维65%~70%、树脂及有机成分30%~35%)与

实验数据, 每吨叶片可回收热解油0.21~0.245吨(2800元/吨)、热解气150~180 Nm³(1.2元/Nm³)、玻璃纤维0.585~0.63吨(1800元/吨), 单项收益合计1821~2036元; 扣除微波能耗(500 Wh/kg, 0.6元/kWh, 合计300元)、设备折旧(80元/吨)及人工成本(50元/吨), 最终得出该收益区间. Xu等人^[19]研究不同气氛对热解的影响, 发现在纯N₂气氛下热解气热值达22.53 MJ/Nm³, 热解油含丰富酚类, 固体产物经后氧化可回收清洁玻璃纤维. 张国柱等人^[20]进一步揭示了热解温度对回收玻璃纤维性能的影响机制: 当热解温度达到500℃时, 环氧树脂基本分解完全, 且高温促进了热解炭中不饱和结构的去除, 降低了其无定形程度和产率. 研究特别指出, 与热解过程本身相比, 氧化脱炭环节对最终回收纤维的力学性能影响更为显著, 优化氧化条件是提升纤维强度的关键, 不同热解条件下玻璃纤维的微观形貌及性能变化可通过图4清晰观察. 从实际应用场景来看, 微波热解因设备紧凑、产物纯度高, 更适合小批量高值纤维回收; 常规固定床热解处理能力强, 适配中大规模工业处理; 光热热解则聚焦化工原料回收. 这些工艺优化研究显著提升了热解产物的价值与资源化利用潜力. 热解气经净化可作为工业燃气或化工原料; 热解油通过分离精制获得的酚类、醛类等化学品, 可用于合成树脂、塑料等高分子材料^[21,22]; 残留炭黑与纤维经处理后, 可作为建筑材料的填充增强体或橡胶制品的性

表 1 机械回收叶片在混凝土中的应用效果

Table 1 Application effect of mechanically recycled blades in concrete

研究团队	纤维尺寸	掺量(wt%)	抗压强度提升	韧性提升
Zhao等人 ^[12]	>10 mm	1.5	12%	35%
Revilla-Guesta等人 ^[14]	3~35 mm	2.0	8%	28%
张强等人 ^[15]	多种长度	1.0~3.0	5%~10%	20%~40%

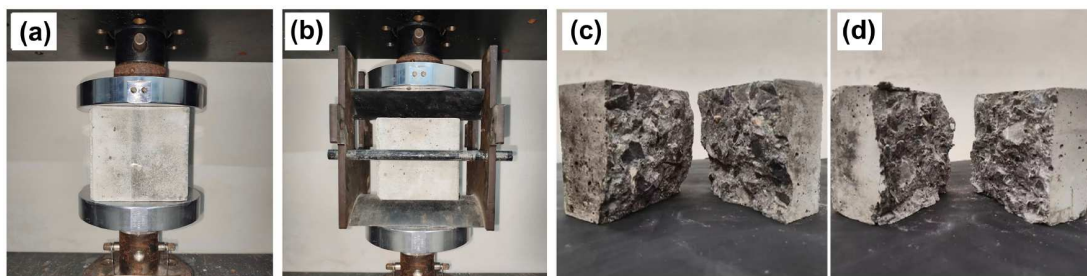


图 2 机械性能测试实验装置及GFRP混凝土劈裂拉伸破坏模式^[12]. (a) 压缩测试装置; (b) 劈裂拉伸测试装置; (c) 普通混凝土试件劈裂拉伸破坏模式; (d) 回收GFRP纤维混凝土劈裂拉伸破坏模式

Figure 2 Experimental setup for mechanical property testing and splitting tensile failure modes of GFRP concrete^[12]. (a) Compression test setup; (b) splitting tensile test setup; (c) splitting tensile failure modes of common concrete; (d) splitting tensile failure modes of concrete with recycled GFRP fibers

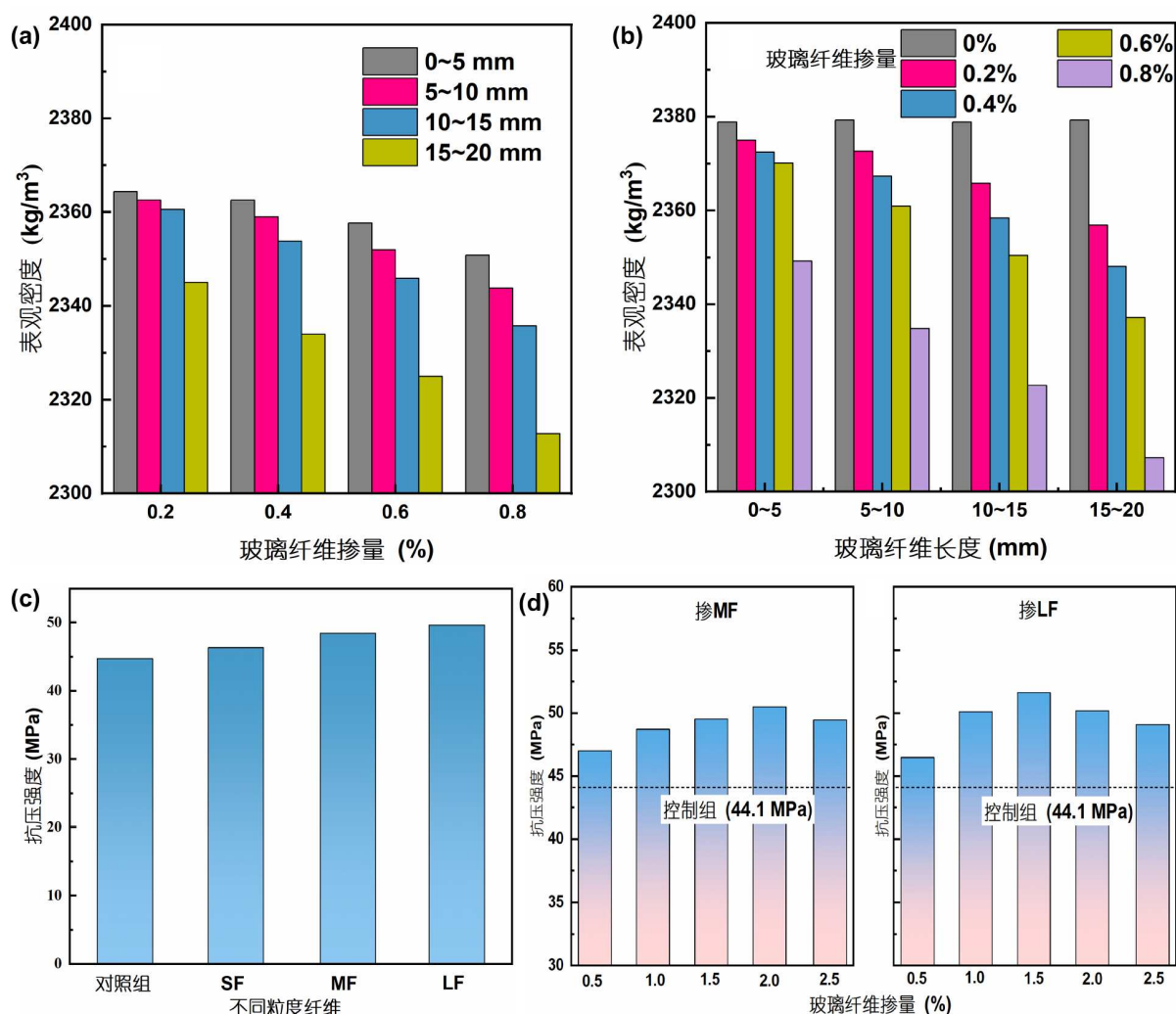


图3 不同纤维增强混凝土材料的性能表征. (a) 玻璃纤维掺量与表观密度的关系^[15]; (b) 不同掺量下玻璃纤维长度与表观密度的关系^[15]; (c) 不同粒度纤维抗压强度的对比^[12]; (d) 不同掺量下增强材料的抗压强度对比^[15]

Figure 3 Performance characterization of different fiber-reinforced concrete materials. (a) Relationship between GF content and apparent density^[15]; (b) relationship between GF size and apparent density under different contents^[15]; (c) comparison of compressive strength of fibers with different particle sizes^[12]; (d) comparison of compressive strength of reinforced materials with different contents^[15]

能改良剂^[23,24]; 此外, 为满足环保要求, 催化燃烧、吸附、冷凝等尾气处理技术被广泛应用, 可有效去除热解过程中的有害排放物, 确保达标排放^[25].

除此之外, 水泥窑协同处置将叶片作为替代燃料或原料, 在水泥生产过程中进行处理^[26]. 这种方法可以有效利用叶片中的有机成分, 但可能对水泥的性能产生影响.

1.4 化学回收技术

化学回收技术通过化学试剂将风机叶片中的树脂溶解或分解, 从而将纤维材料分离出来^[2,27]. 常用的化

学试剂包括酸、碱、溶剂等^[28,29]. 近年来, 针对传统方法的局限, 新型化学回收技术取得显著突破, 分离效率与环保性大幅提升. Li等人^[5]以氯化胆碱-尿素深共熔溶剂, 在120℃常压下处理GFRP叶片, 树脂解聚率98.5%, 玻纤强度保留92%, 溶剂成本仅为离子液体的1/5, 可循环15次以上, 并已完成10 kg级验证. Zhang等人^[6]筛选出具有环氧树脂降解活性的漆酶(来自白腐真菌), 在35℃、pH 7.0的温和条件下, 12 h内可降解30%的环氧树脂基体. 虽解聚速率较慢, 但酶可通过固定化技术重复使用20次, 且无二次污染, 适合低污染、低能耗的小规模回收场景. 各类技术的核心参数与性能对

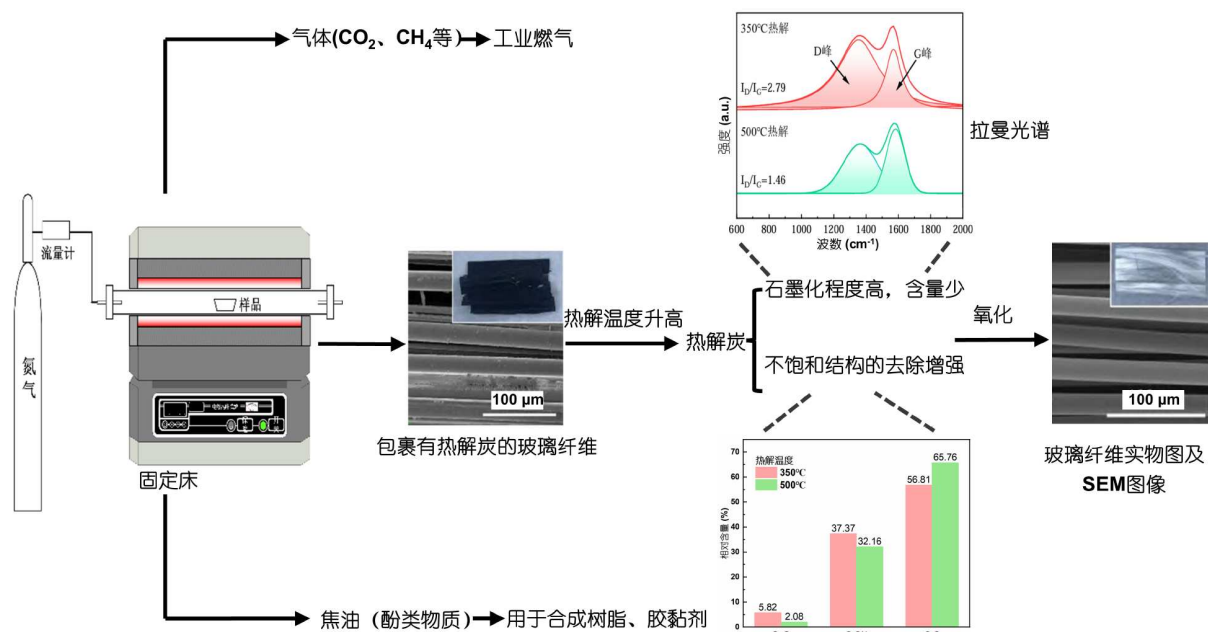


图4 退役风机叶片热解回收工艺及产物特性分析示意图^[20]

Figure 4 Schematic diagram of pyrolysis recovery process and product characteristics analysis for retired wind turbine blades^[20]

比见表2^[30~33]。

从实际应用选择来看,低污染废料(如未涂层叶片)优先选用离子液体法,其毒性低且纤维保留率高;工业批量处理场景推荐分级醇解-水解策略,该技术试剂可循环10次以上,能有效降低处理成本;硫酸溶剂解工艺因反应条件温和(常压、<100℃),更适合小规模实验室研究;乙酸解聚法虽环境效益突出,但对设备要求高,仅建议在有高端纤维回收需求且具备相应设备条件的项目中应用。

尽管化学回收技术展现出高效分离、产物高值化等优势,但其大规模应用仍面临限制:回收材料需满足高标准,仅适用于低污染的废料,且叶片废料回收前需机械处理以加速基质溶解;部分溶剂(如硝酸)可能释放NO_x气体,需配套尾气吸收系统。综合来看,三类主流回收技术的成本差异显著,具体核心成本参数对比见表3。

1.5 叶片结构再制造与延寿技术

除叶片材料的回收外,叶片结构件的再制造与延寿是风电全生命周期绿色化的重要补充路径。退役叶片需先通过无损检测技术(如超声探伤、红外热成像)评估结构完整性,对叶根裂纹、表面损伤等缺陷件,可采用碳纤维布加固、树脂灌注修复等工艺实现性能恢

复。例如,国家能源集团对服役12年的2.5 MW风机叶片(叶长48.3 m)进行检测,发现叶根区域存在0.2~0.5 mm微裂纹,采用T700级碳纤维布(单层厚度0.111 mm,粘贴层数3层)加固,经静力载荷测试验证,修复后叶片抗弯强度恢复至原性能的92%以上,延长使用寿命5~8年,减少了过早退役产生的固废量^[15]。此外,加快建立光伏、风电设备退役产品的回收标准规范,构建覆盖绿色设计、规范回收、高值利用、无害处置的回收利用体系,有助于推动再制造业务的规模化发展。拓展新能源装备的梯级利用场景,如将退役风机叶片改造为公共设施、光伏漂浮系统等,有助于构建多层次、多样化的资源循环利用体系。

2 工业应用与案例

2.1 退役风机叶片的应用

退役风机叶片的资源转化已形成以“高效利用、多元适配”为核心的多元化路径,重点聚焦材料再利用、模具与板材制造、协同焚烧及二次利用四大方向,各方向通过差异化技术工艺实现退役叶片从“固废”到“可用资源”的转化。具体应用场景及价值体现如表4所示,涵盖建筑材料改良、工业制品生产、能源回收及

表 2 各类技术的核心参数与性能对比

Table 2 Core parameters and performance comparison of various technologies

研究团队	技术方法	反应条件	主要结论	环境效益	试剂安全性
Lahive等人 ^[30]	乙酸解聚法	280℃、30 bar N ₂ 、2 h	高效降解树脂, 回收双酚A及胺类单体	温室气体排放较原生碳纤维降低约99%	中等腐蚀性, 需钛合金反应釜; 反应后废液需中和处理
Tortorici等人 ^[31]	硫酸溶剂解工艺	常压、<100℃、17 h	去除99%以上基体, 力学性能保留65%~90%	关键环境影响指标降低约一个数量级	易挥发产生酸雾, 需配套酸雾吸收装置
Liu等人 ^[32]	分级醇解-水解策略	190℃、1 h	完全降解树脂, 试剂循环10次后回收率仍超80%, 再生树脂击穿强度提升13.5%	试剂循环利用率高, 减少废液排放	毒性较低
Christoff-Tempesta等人 ^[33]	离子液体解构法	180℃、5 h, [Bmim][ZnCl ₃] 体系	聚对苯二甲酸乙二醇酯的双羟乙基对苯二甲酸酯产率达83%, 降低能耗与副反应	离子液体可循环使用, 减少化学试剂消耗	咪唑类单体具生物累积性, 再生时需严格控制蒸馏温度

表 3 退役风机叶片主流回收技术成本对比

Table 3 Cost comparison of mainstream recycling technologies for retired wind turbine blades

技术类型	单位处理成本(元/吨)	设备投资(万元/万吨)	运营成本占比(%)	成本优势	成本劣势	文献
机械回收	500~1000	800~1200	能耗35、人工25	设备投资低、运营成本可控	运输成本占比高	[13,15]
热解回收	1500~3000	3000~4500	能耗60、尾气处理20	产物高值化对冲成本	高温能耗占比高、设备折旧成本高	[18,25]
化学回收	5000~8000	8000~12000	溶剂45、设备30	纤维高值化(售价高)	溶剂成本高、设备耐腐蚀要求高	[30,32]

表 4 风机叶片后处理应用总结

Table 4 Summary of post-processing applications for wind turbine blades

应用	具体用途	文献
材料再利用	水泥和混凝土应用	混凝土增强材料 [34~36]
	土木工程应用	柱子、板材和护栏等基础设施 [37]
	道路材料	改性沥青路面 [38]
模具和板材制造	3D打印	3D打印和压缩成型, 转化为其他产品 [39]
	光伏漂浮系统	将部分组件改造成光伏漂浮系统的漂浮物 [40]
协同焚烧	铁矿石共烧结	抑制二噁英产生 [41]
二次利用	后住灾难房、艺术装置等 [42]	

创新功能复用等领域, 既覆盖传统基建与工业生产需求, 也拓展至环保与创意应用场景, 为退役风机叶片的全生命周期闭环管理提供了多样化实践方案。

2.2 实际案例

退役风机叶片的回收利用已在多个实际项目中得到系统化推进, 形成了涵盖机械回收、热解转化、化学处理及结构再利用等多路径协同的产业链雏形。作为当前主流技术, 机械回收凭借较低成本与较高处理效率率先实现规模化应用。辽宁龙源法库县项目通过“切割-撕碎-磨粉-熔融成型”工艺, 将28.3 m长的退役叶

片转化为工业托盘和户外家具, 处理成本约850元/吨, 投资回报周期3.5年, 其工业托盘抗弯极限载荷最高达4350 kg, 堆码极限载荷达6332 kg, 远超普通标准; 盐城远实公司采用“梯度粉碎+正交铺装模压”技术, 将GFRP颗粒与杨木刨花按3:7混合, 制备出静曲强度超33.8 MPa、弹性模量达4736 MPa的可循环环保托盘, 重复使用次数超过30次; 宁夏中弘年处理3万吨风机叶片生产线依托“分级分段式物理回收法”及专利除尘技术, 实现叶根玻纤的高纯度分离与叶梢混合材料的精准分选, 所产模压托盘的动载极限载荷达4100 kg, 静载极限载荷为13211 kg, 性能显著优于传统回收产品,

如图5(c)所示。其模压托盘因性能优势产品溢价30%，处理成本780元/吨，投资回报周期3.8年。

热解与化学回收技术虽处于推广初期，但已在部分项目中验证其技术可行性和产物高值化潜力。其中西安交通大学开发的无氧热解技术，凭借“能量自平衡+富余能量输出”的核心优势，为退役风机叶片热解回收提供了新的范式。该研究团队进一步与中广核研究院合作将热解系统的能量利用逻辑迁移至风机叶片回收领域(如图5(a)^[43]和(b)所示)，在不依赖外部热源的情况下，通过燃烧部分叶片热解产生的油气，为退役风机叶片干燥、热解和玻纤残炭氧化过程提供充足热源，实现洁净高品质玻纤的高效回收，且回收过程中富余的大量高热值油气可作为能源输出。以单条200 t/d处理线为例，热解油气除满足系统自热需求外，剩余油气的热值可达12.43~13.37 MJ/kg，可直接送入配套锅炉燃烧发电或用于工业供热，实现“处理-产热”的良性循环^[43]。锡林郭勒盟的年处理2000吨中试项目采用绿色精细裂解技术，虽处理成本较高(2800元/吨)，投资回报周期6.5年，但实现了有机组分无害化分解与玻璃纤维

清洁回收，纤维产品可用于塑料加工和新型建材。江苏华纳在国华洁源项目中处理19支叶片，通过“现场分解-车间破碎-挤出成型”工艺，制成弯曲强度达20.4 MPa的木塑板(如图5(d)所示)，材料利用率超过99%，充分体现了化学法在材料性能保留方面的优势。

结构级直接再利用则开创了“整型复用”的创新模式。国家能源集团将退役叶片经检测、切割和防腐处理后，直接制成交站亭(如图5(e)所示)，该结构抗压强度超过200 MPa，设计寿命达30年，远高于普通站亭的10~25年；兰州化学物理研究所开发的化学改性沥青混合料技术，将叶片材料破碎至0.01~10 mm后与沥青复配，显著提升路面性能，其动稳定度高达10000次/mm，远超传统沥青混合料(约3684次/mm)，浸水马歇尔残留稳定度达99.9%，冻融劈裂强度比达95.5%，已在G312线清傅路成功应用(如图5(f)所示)。

上述工业应用案例表明，退役风机叶片可通过多种技术路径实现资源化与高值化利用。机械回收适合大规模推广，热解技术擅长有机组分资源化，化学法具备高值纤维回收潜力，而结构级再利用则开创了低碳

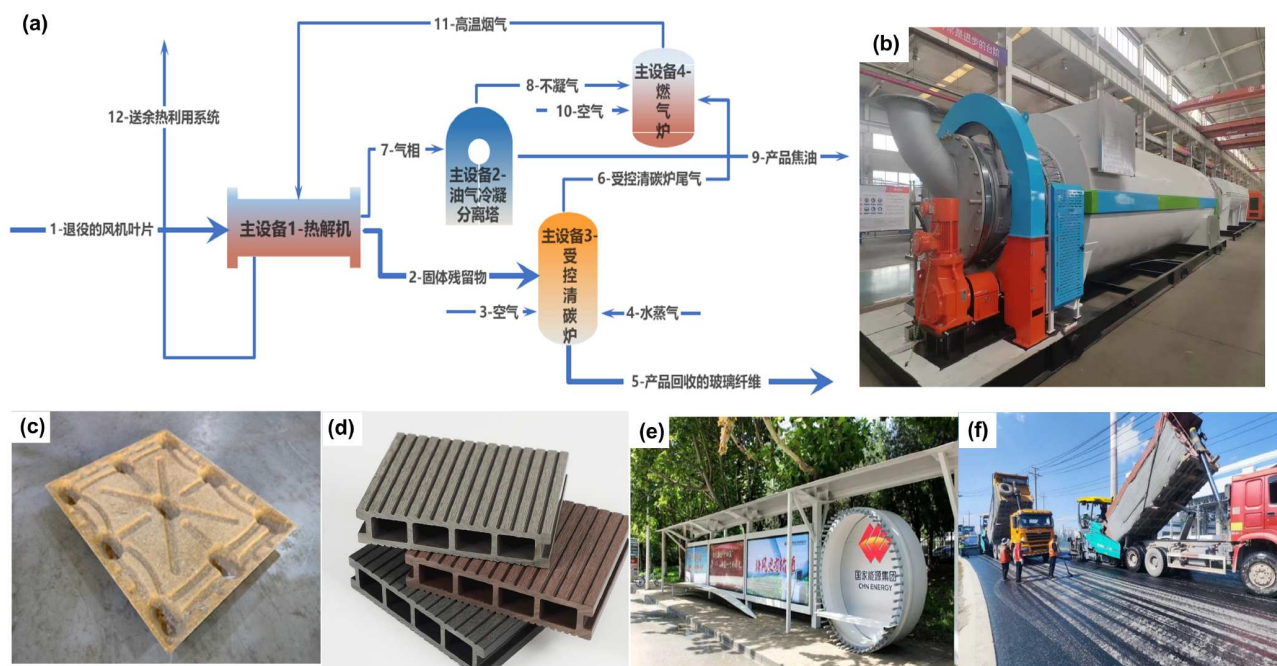


图5 退役风机叶片无氧热解回收技术及高值化利用实例。(a) 无氧热解回收工艺流程^[43]；(b) 无氧热解回收核心设备实物装置；(c) 退役叶片再生工业托盘(机械回收产品)；(d) 退役叶片制备木塑板(化学回收产品)；(e) 退役叶片改造公交站亭(结构级直接再利用)；(f) G312线清傅路铺设叶片改性沥青路面(结构级直接再利用)

Figure 5 Anaerobic pyrolysis recovery technology and high-value utilization examples of retired wind turbine blades. (a) Anaerobic pyrolysis recovery process flow^[43]; (b) physical device of core equipment for anaerobic pyrolysis recovery; (c) recycled industrial pallets made from retired blades (mechanical recycling product); (d) wood-plastic panels made from retired blades (chemical recycling product); (e) bus shelters transformed from retired blades (direct structural reuse); (f) G312 Qingfu Road paved with blade-modified asphalt pavement (direct structural reuse)

复用新模式,共同为风电产业绿色闭环发展提供了切实可行的实践基础。

3 二次污染

随着全球风电装机量激增,填埋处理不仅占用土地,更可能通过物理降解、化学溶出等途径引发二次污染^[44]。当前主流回收技术包括机械法、热解法、化学溶剂法及水泥窑协同处理,但各环节均存在污染风险。下文根据最新文献证据,按回收处理方法分类综述风机叶片回收过程中的二次污染问题,重点关注各类技术产生的污染物类型、迁移路径及环境影响。

3.1 机械回收污染

机械回收通过粉碎、研磨等物理手段将叶片处理为纤维或粉末,其污染主要表现为微塑料与粉尘污染、重金属溶出风险以及噪声与能耗污染。破碎过程产生大量<5 mm的玻璃纤维/碳纤维碎片,形成难降解的微塑料。实测数据显示,机械回收系统效率损失达5%~6%,其中约3%为散逸至环境的粉尘,这些颗粒物可通过风力扩散至周边土壤及水体,被生物摄入后沿食物链富集^[45]。同时,叶片涂层中的铅、铬等重金属在机械应力下释放,随雨水渗入地下水,当回收产物用作建材填料时,长期风化可能导致重金属持续析出^[46]。此外,大型破碎设备运行噪声超85 dB,对周边生态造成持续性声污染,其能耗达0.27 MJ/kg,间接增加燃煤电厂的碳排放^[47]。

3.2 热解回收污染

热解回收通过无氧高温分解叶片中的树脂基质,其污染主要源于气态污染物排放、液态副产物风险及能源消耗关联影响。热解过程中树脂分解产生多环芳烃、二噁英及挥发性有机化合物,其中苯乙烯浓度可达1200 ppm。微波热解因控温不均,更易导致叶片中阻燃剂分解生成溴化二噁英^[46,47]。生命周期评估数据显示^[46],单支叶片热解处理的净碳排放达20009 kg CO₂-eq,为填埋处理的10倍以上^[46]。热解油中酚类化合物占比15%~30%,若未经提纯直接排放将污染水体;固体残渣中残留焦炭(占原料8%~12%),填埋后可能析出苯系物,对土壤及地下水形成长期污染^[45]。此外,热解需维持高温,依赖化石燃料供热。每处理1吨叶片消耗天然气30 m³,间接产生SO₂及NO_x排放,形成“回收-污染”二次循环^[47]。

3.3 化学回收污染

化学溶剂回收通过酸、碱或有机溶剂溶解树脂基质实现纤维分离,污染问题集中于废液、重金属迁移及溶剂再生过程。硝酸、乙二醇等溶剂使用后形成高化学需氧量(COD>5000 mg/L)废液,含邻苯二甲酸盐等塑化剂。若未闭环处理,单叶片产生的废液可污染200 m³地下水^[44,48]。酸解过程溶出纤维中的砷、锑等金属(浓度达50~200 ppm),废液中和后形成含金属污泥,填埋后长期稳定性差^[46,48]。离子液体等“绿色溶剂”需通过蒸馏提纯再生,单位能耗达19.2 MJ/kg,且再生过程中残留的咪唑类单体具有生物累积性^[47,49]。

3.4 水泥窑协同处理污染

水泥窑协同处理将叶片作为替代燃料或原料掺入水泥生产过程,污染矛盾集中于重金属富集与污染物转移。水泥窑高温环境导致叶片中铅、铬等重金属挥发,富集于粉尘(浓度提升3~5倍)。粉尘若用作水泥掺料,将导致成品重金属超标^[46]。同时,溴系阻燃剂转化为溴化二噁英,排放浓度达0.5 ng TEQ/m³,超过欧盟限值40%^[46]。虽然因替代煤炭使净碳排放为-3375 kg CO₂-eq/blade,但重金属污染转移至建材领域,全链条环境成本被低估^[46]。

4 结论与展望

4.1 结论

退役风机叶片回收技术呈现“传统方式淘汰、新型技术差异化发展”的总体格局。传统填埋与焚烧因污染严重、资源利用率低(不足30%),仅适用于应急场景;在新型回收技术中,机械回收凭借低成本(500~1000元/吨)、高产业化成熟度成为主流,可实现GFRP在建筑、建材领域的次级应用,但纤维性能损失达20%~30%,限制其在高载荷场景复用;热解回收通过微波辅助、溶胀预处理等优化,树脂分解率可提升至70%以上,产物高值化潜力显著,但1500~3000元/吨的处理成本与高能耗制约其规模化应用;化学回收能保留纤维90%以上力学性能,但其处置成本超5000元/吨,且工艺复杂,尚处于实验室阶段;水泥窑协同处置虽能实现能源-材料协同,却存在重金属富集与碳排放转移问题。

此外,上述各类回收技术均面临不同程度的二次污染风险:机械回收的微塑料扩散、热解的有毒气体排放、化学回收的高COD废液渗漏,以及水泥窑协同

处理的重金属富集, 均需通过工艺优化与管控缓解。现有工业案例已验证了退役叶片在材料再利用与结构件重构等方面的资源化利用可行性, 但全产业链闭环仍受技术、经济与政策多重制约。

4.2 展望

未来风电叶片回收产业需围绕“技术-材料-产业”三维度寻求突破和发展, 以实现其绿色、高效与商业化发展。技术层面, 推动机械-热解耦合、微波辅助化学回收等跨技术融合, 兼顾回收效率与纤维保留率; 同时, 加强各工艺路线的污染控制, 降低微塑料扩散、有毒气体、高COD废液和重金属等二次污染风险。材料层面, 加快热塑性基体等易回收复合材料的研发, 从源头上降低回收难度, 同时推进再生纤维表面改性技术,

拓展高值化场景; 产业层面, 构建“回收-再生-应用”协同体系, 推动制定光伏、风电设备退役废弃产品的回收标准规范, 形成覆盖绿色设计、规范回收、高值利用、无害处置的闭环体系; 此外, 应积极探索退役新能源装备的梯级利用场景, 依托政策补贴与碳积分机制降低回收成本, 引导再生纤维在汽车、建材领域标准化应用。

从商业化优先级看, 机械回收因成熟度高、成本低居首, 短期内可快速推广; 热解回收次之, 需通过工艺优化突破经济性瓶颈; 水泥窑协同处置需完善污染控制标准以扩大区域应用; 化学回收因成本高、工艺复杂, 优先级靠后, 需长期技术攻关实现工业化。通过多维度协同, 有望实现叶片全材料闭环回收, 提升风电产业全生命周期绿色度。

参考文献

- Cheng X, Du B, He J, et al. A review of thermoplastic composites on wind turbine blades. *Compos Part B-Eng*, 2025, 299: 112411
- Ma W J, Zhang Y T, Yang C Z, et al. Research progress on resource recycling technology of retired wind turbine blades in bulk wind power plants (in Chinese). *Clean Coal Technol*, 2023, 29: 17–26 [马文静, 张宇彤, 杨春振, 等. 大宗风电退役风机叶片资源化回收利用技术研究进展. *洁净煤技术*, 2023, 29: 17–26]
- Huang J, Wang J, Qin Z, et al. Three-dimensional finite element analysis of the structural strength of GFRP wind turbine blade segment (in Chinese). *Acta Compos Sin*, 2019, 36: 1864–1872 [黄吉, 王继辉, 秦志文, 等. GFRP风电叶片段结构强度三维有限元分析. *复合材料学报*, 2019, 36: 1864–1872]
- Hao C, Zhao B, Guo X, et al. Mild chemical recycling of waste wind turbine blade for direct reuse in production of thermoplastic composites with enhanced performance. *Resour Conservation Recycling*, 2025, 215: 108159
- Li Z, Xing M, Zhao L, et al. Recovery of carbon fiber-reinforced polymer waste using dimethylacetamide base on the resin swelling principle. *Front Chem*, 2022, 10: 1050827
- Zhang X, Yang M, Cao J, et al. Research progress of decommissioned wind power blade resource utilization technology (in Chinese). *Acta Compos Sin*, 2024, 41: 1192–1203 [张效林, 杨梦豪, 曹靖, 等. 退役风电叶片资源化利用技术研究进展. *复合材料学报*, 2024, 41: 1192–1203]
- Hu Y, Zhang Y, Li Y, et al. Wind turbine blade recycling: a review of the recovery and high-value utilization of decommissioned wind turbine blades. *Resour Conservation Recycling*, 2024, 210: 107813
- Mishnaevsky Jr L, Tempelis A, Belahurau Y, et al. Microplastics emission from eroding wind turbine blades: preliminary estimations of volume. *Energies*, 2024, 17: 6260
- Jensen J P, Skelton K. Wind turbine blade recycling: experiences, challenges and possibilities in a circular economy. *Renew Sustain Energy Rev*, 2018, 97: 165–176
- Wang J, Wang C, Ji Y, et al. Mechanical properties and microscopic study of recycled fibre concrete based on wind turbine blades. *Materials*, 2024, 17: 3565
- Jani H K, Singh Kachhwaha S, Nagababu G, et al. A brief review on recycling and reuse of wind turbine blade materials. *Mater Today-Proc*, 2022, 62: 7124–7130
- Zhao T, Song P, Dong G, et al. Experimental research and theoretical prediction on mechanical properties for recycled GFRP fiber reinforced concrete. *J Building Eng*, 2024, 91: 109643
- Zhang Y, Van Caneghem J, Pontikes Y, et al. Environmental and economic assessment of mechanical recycling of end-of-life wind turbine blades into rebars and comparison with conventional disposal routes. *Compos Part A-Appl Sci Manufacturing*, 2025, 190: 108711
- Revilla-Cuesta V, Manso-Morato J, Hurtado-Alonso N, et al. Mechanical and environmental advantages of the revaluation of raw-crushed wind-turbine blades as a concrete component. *J Building Eng*, 2024, 82: 108383
- Zhang Q. Properties and experimental study of concrete incorporating glass fibres from waste wind turbine (in Chinese). Master Dissertation. Hefei:

- Anhui Jianzhu University, 2024 [张强. 掺入废风机叶片玻璃纤维的混凝土性能及试验研究. 硕士学位论文. 合肥: 安徽建筑大学, 2024]
- 16 Zhou Y, Qin S, Verma S, et al. Production and beneficial impact of biochar for environmental application: a comprehensive review. *Bioresour Tech*, 2021, 337: 125451
- 17 Zhang M, Xue Y, Zheng M, et al. Co-pyrolysis of lignin and polyethylene with reactive molecular dynamics: understanding tar generation and char structure transformation. *J Anal Appl Pyrolysis*, 2025, 186: 106907
- 18 Yang J L, Zhu W Q, Huhe T L, et al. Microwave pyrolysis of waste wind turbine blades to produce phenolic chemicals and recycled fibers (in Chinese). *Adv New Renewable Energy*, 2024, 12: 448–458 [杨佳亮, 朱维强, 呼和涛力, 等. 废弃风机叶片微波热解制取酚类化学品及再生纤维. *新能源进展*, 2024, 12: 448–458]
- 19 Xu M, Ji H, Wu Y, et al. The pyrolysis of end-of-life wind turbine blades under different atmospheres and their effects on the recovered glass fibers. *Compos Part B-Eng*, 2023, 251: 110493
- 20 Zhang G Z, Yang J, Peng S W, et al. Research on pyrolysis characteristics of end-of-life wind turbine blade and its effects on the recovered glass fibers' mechanical properties (in Chinese). *Clean Coal Technol*, 2025, <https://link.cnki.net/urlid/11.3676.TD.20250901.1342.014> [张国柱, 杨杰, 彭思伟, 等. 退役风机叶片热解特性及其对回收玻璃纤维性能影响研究. *洁净煤技术*, 2025, <https://link.cnki.net/urlid/11.3676.TD.20250901.1342.014>]
- 21 Kim J S. Production, separation and applications of phenolic-rich bio-oil – A review. *Bioresour Tech*, 2015, 178: 90–98
- 22 Qaisar A, Bartolucci L, Cancelliere R, et al. Selective phenolics recovery from aqueous residues of pyrolysis oil through computationally designed green solvent. *Sustainability*, 2024, 16: 7497
- 23 Jovičić M, Bera O, Stojanov S, et al. Effects of recycled carbon black generated from waste rubber on the curing process and properties of new natural rubber composites. *Polym Bull*, 2023, 80: 5047–5069
- 24 Ma Y, Zhao H, Zhang X, et al. Structure optimization of pyrolysis carbon black from waste tire and its application in natural rubber composites. *Appl Surf Sci*, 2022, 593: 153389
- 25 Zhou M T, Zhu H F, Zhu W P, et al. Study on pyrolysis and characteristic pollutant emissions of waste wind turbine blades (in Chinese). *Res Environ Sci*, 2025, 38: 1365–1372 [周梦婷, 朱宏飞, 朱卫平, 等. 废弃风机叶片热解及其特征污染物排放研究. *环境科学研究*, 2025, 38: 1365–1372]
- 26 Branfoot C, Folkvord H, Keith M, et al. Recovery of chemical recyclates from fibre-reinforced composites: a review of progress. *Polym Degradation Stability*, 2023, 215: 110447
- 27 Zhang X L, Yang M G, Cao J, et al. Research progress of decommissioned wind power blade resource utilization technology (in Chinese). *Acta Compos Sin*, 2024, 41: 1192–1203 [张效林, 杨梦豪, 曹靖, 等. 退役风电叶片资源化利用技术研究进展. *复合材料学报*, 2024, 41: 1192–1203]
- 28 Liu Y T. The effect of acid/base catalyst on degradation behavior of epoxy resin in nearcritical water (in Chinese). Master Dissertation. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011 [刘宇婷. 酸碱催化剂对近临界水中环氧树脂分解特性的影响. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011]
- 29 Zheng B, Yan C, Zhu Y D, et al. Research progress on bio-based degradable epoxy resins and their recyclable carbon fiber composites (in Chinese). *New Chem Mater*, 2024, 52: 8–12+17 [郑波, 颜春, 祝颖丹, 等. 生物基可降解环氧树脂及其可回收碳纤维复合材料的研究进展. *化工新型材料*, 2024, 52: 8–12+17]
- 30 Lahive C W, Dempsey S H, Reiber S E, et al. Acetolysis for epoxy-amine carbon fibre-reinforced polymer recycling. *Nature*, 2025, 642: 605–612
- 31 Tortorici D, Adriani A, Laurenzi S. Development of a sustainable chemical recycling process of carbon fibers from epoxy-based composites. *Compos Sci Tech*, 2025, 270: 111295
- 32 Liu H, Zou Y, Xu J, et al. Efficient recycling of anhydride-cured epoxy resins for electrical insulation: green economy and tunable performance. *Polym Testing*, 2025, 150: 108934
- 33 Christoff-Tempesta T, Epps Iii T H. Ionic-liquid-mediated deconstruction of polymers for advanced recycling and upcycling. *ACS Macro Lett*, 2023, 12: 1058–1070
- 34 Manso-Morato J, Hurtado-Alonso N, Skaf M, et al. Life cycle assessment of concrete with wind turbine blade waste: A real case study. *Environ Impact Assessment Rev*, 2025, 115: 107992
- 35 Chikha I, Bouzidi Y, Tazi N, et al. Advancing recycling of glass fiber reinforced polymers from end-of-life wind turbine blades through a novel delamination process. In: 15th International Renewable Energy Congress, 2025. 6759
- 36 Kalpokaitė-Dičkuvienė R, Snapkauskienė V. Prospects for the valorization of wind turbine blade waste: fiber recovery and recycling. *Sustainability*, 2025, 17: 4202
- 37 Buda-Ozó L, Halicka A, Broniewicz M, et al. Experimental study of used wind turbine blades for their reuse in slope and trench protection. *Materials*, 2024, 17: 4934
- 38 Li P, Wang X, Chen W, et al. Recycling of retired wind turbine blades into modifiers for composite-modified asphalt pavements: performance evaluation. *Sustainability*, 2024, 16: 2343

- 39 Rahimizadeh A, Kalman J, Fayazbakhsh K, et al. Mechanical and thermal study of 3D printing composite filaments from wind turbine waste. *Polym Compos*, 2021, 42: 2305–2316
- 40 Qin Y, Johst P, Seibert D, et al. Eco-efficient manufacturing: Transforming end-of-life wind turbine blade components into floats for PV-floating systems. *MATEC Web Conf*, 2024, 401: 5006
- 41 He H, Guo X, Jin L, et al. The effect of adjusting sinter raw mix on dioxins from iron ore co-sintering with municipal solid waste incineration fly ash. *Energies*, 2022, 15: 1136
- 42 Turhan C, Durak M, Saleh Y A S, et al. Recycling decommissioned wind turbine blades for post-disaster housing applications. *Recycling*, 2025, 10: 42
- 43 Wang X B, Zhou A, Yang M H, et al. Optimization on 200 t/d garbage co-utilization in a coal-fired power plant through air-free pyrolysis process (in Chinese). *J China Coal Soc*, 2022, 47: 3897–3905 [王学斌, 周澳, 杨明辉, 等. 燃煤电厂200 t/d生活垃圾无氧热解耦合协同处置优化. *煤炭学报*, 2022, 47: 3897–3905]
- 44 Korniejenko K, Kozub B, Bąk A, et al. Tackling the circular economy challenges—Composites recycling: used tyres, wind turbine blades, and solar panels. *J Compos Sci*, 2021, 5: 243
- 45 Rathore N, Panwar N L. Environmental impact and waste recycling technologies for modern wind turbines: an overview. *Waste Manag Res*, 2023, 41: 744–759
- 46 Zhao X, Pakuła D, Frydrych M, et al. Treatment and valorization of waste wind turbines: component identification and analysis. *Materials*, 2025, 18: 468
- 47 Liu P, Meng F, Barlow C Y. Wind turbine blade end-of-life options: an economic comparison. *Resour Conservation Recycling*, 2022, 180: 106202
- 48 Singh N, Li J, Zeng X. Solutions and challenges in recycling waste cathode-ray tubes. *J Cleaner Production*, 2016, 133: 188–200
- 49 Palmer J, Ghita O R, Savage L, et al. Successful closed-loop recycling of thermoset composites. *Compos Part A-Appl Sci Manufacturing*, 2009, 40: 490–498

Summary for “退役风机叶片回收技术: 现状、环境风险与产业化路径”

Recycling technologies for retired wind turbine blades: current status, environmental risks, and industrialization pathways

Min Zhang¹, Bing Bai², Pei Chen², Qiansheng Zhang², Zhongfa Hu³, Ao Zhou¹, Shuanghui Deng¹, Houzhang Tan¹ & Xuebin Wang^{1*}

¹ School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

² CGN Environmental Protection Industry Co., Ltd., Shenzhen 518031, China

³ College of Energy, Soochow University, Suzhou 215006, China

* Corresponding author, E-mail: wxb005@mail.xjtu.edu.cn

Over the past two decades, the global wind power industry has experienced unprecedented growth to meet the urgent demand for low-carbon energy, but this rapid expansion has also paved the way for an imminent large-scale decommissioning wave of wind turbines. Among the key challenges posed by decommissioning, the recycling of composite wind turbine blades—typically composed of glass fiber reinforced plastic (GFRP) and thermosetting resins—has emerged as a critical bottleneck that threatens to undermine the industry's long-term sustainability. To address this pressing issue, this study conducts a comprehensive investigation into the technical status, environmental risks, and industrialization pathways of decommissioned wind turbine blade recycling, adopting an integrated research methodology that combines policy document analysis, laboratory-based technical performance evaluation, and quantitative economic feasibility assessment. The research highlights urgency with data: as of 2024, China's cumulative wind turbine composite components (blades over 60%) exceed 6.2 million tons; annual decommissioning will surge from ~150000 tons in 2028 to over 500000 tons by 2035. A key constraint is that 80% of blade materials are thermosetting composites—highly stable and degradation-resistant, making traditional recycling inefficient. It then evaluates three mainstream technologies: mechanical crushing, the most mature method, processes blades into recycled fiber powders for building templates or aggregates but has 80% fiber strength loss and transportation costs over 30% of total expenses; pyrolysis generates toxic by-products, reduces glass fiber strength by 40%–60%, and emits much CO₂; chemical recycling (solvent-based depolymerization) retains 90% fiber strength but faces high costs—over 50 million CNY for medium-plant equipment and 5000 CNY/ton processing. In addition to technical and economic analysis, the study conducts an environmental risk assessment that identifies three primary hazards: improper disposal of pyrolysis by-products, which can leach toxic substances into soil and groundwater; unregulated incineration of blade scraps, which releases harmful gases such as dioxins and particulate matter; and unclassified landfilling of intact blades, which occupies permanent land resources and may cause long-term environmental pollution. The research also identifies key industrialization barriers through stakeholder interviews and policy reviews: a minimum annual collection volume of 5000 tons is required to reach the break-even point for any recycling technology, but most provinces in China will fail to meet this threshold before 2028 due to scattered decommissioning sites; unclear ownership of decommissioned blades delays centralized collection; and the lack of dedicated waste classification codes for composite blades leads to inconsistent disposal practices across regions. The research concludes that the decommissioned wind turbine blade recycling industry is still in its infancy, with significant imbalances among technical maturity, economic viability, and environmental sustainability. To address these challenges, it proposes a three-dimensional promotion system: in the short term, prioritize the application of mechanical crushing technology in regions with high decommissioning density to quickly reduce landfill pressure; in the medium term, accelerate R&D on dynamic covalent bond resin materials that enable easier recycling of composite blades; formulate mandatory national technical standards for blade recycling and issue dedicated waste codes to standardize disposal processes; and build regional recycling hubs that integrate collection, preprocessing, and recycling to minimize transportation costs. These targeted measures not only provide a systematic solution for achieving low-carbon and high-value recycling of decommissioned wind turbine blades but also offer a reference framework for other countries facing similar sustainability challenges in the wind power industry.

retired wind turbine blades, recycling technologies, secondary pollution, resource utilization

doi: [10.1360/CSB-2025-5655](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-5655)