

废弃风机叶片特性与回收利用技术发展趋势

周世发, 胡 广, 李朝阳, 邹庆芳, 张志明, 段华波, 梁 莎, 杨家宽*

(长江流域多介质污染协同控制湖北省重点实验室, 华中科技大学 环境科学与工程学院,
湖北 武汉 430074)

摘要: 随着风电和光伏等可再生能源的迅速发展, 特别是大规模风电场的建设, 退役风机组件数量逐年上升, 废弃风机叶片的回收处理已成为全球性挑战。风机叶片主要由玻璃纤维、碳纤维、树脂和芯材等复合材料构成, 资源化价值高, 但分离回收技术难度大, 容易造成二次污染。通过系统分析废弃风机叶片的产生特性, 对未来废弃量的演变趋势进行了定量预测, 并从技术、经济和环境多维度综合比较现有回收处理技术, 展望其发展前景。研究显示, 按照风机叶片 20~25 年的报废周期, 预计到 2050 年, 全球废弃叶片数量将从 2025 年的约 20 万 t 增长至 260 万~600 万 t, 而我国的废弃量将达到 90 万~190 万 t。在材料回收方面, 玻璃纤维主要采用焚烧、水泥窑协同处理和机械物理回收; 碳纤维则倾向于热解和化学回收等高值化方法。资源化技术中, 热处理回收工艺相对成熟, 已实现工业化应用, 但经济效益偏低, 且二次污染控制难度大; 化学分离回收技术效率高、价值大, 但工艺复杂, 运行成本高, 尚未实现工业化推广。

关键词: 污染控制; 废弃风机叶片; 废弃量; 资源化利用; 回收技术

中图分类号: X705

文献标识码: A

Characteristics of Waste Wind Turbine Blades and Development Trends of Recycling Technologies

ZHOU Shifa, HU Guang, LI Zhaoyang, ZOU Qingfang, ZHANG Zhiming,
DUAN Huabo, LIANG Sha, YANG Jiakuan*

(Hubei Key Laboratory of Multi-media Pollution Cooperative Control in Yangtze Basin, School of
Environmental Science and Engineering, Huazhong University of
Science and Technology (HUST), Wuhan 430074, China)

Abstract: The rapid growth of renewable energy, particularly wind power, has led to the large-scale construction and operation of wind farms. By the end of 2024, the global installed wind power capacity had reached 1 136 GW, with China leading the world by contributing over 520 GW. Consequently, the number of decommissioned wind turbine blades is rising at an accelerating rate, indicating an impending surge in waste volume. This impending surge of composite waste has elevated the recycling and disposal of wind turbine blades from a niche concern to a pressing global environmental challenge. Wind turbine blades are primarily composed of high-performance composite materials, notably glass fibers, carbon fibers, polymer resins, and various core materials. These components are engineered for durability and strength, which also gives them significant resource value. The recovery and reclamation of these valuable materials are crucial for fostering a circular economy within the renewable energy sector itself. However, the technologies for separating and recycling these materials pose significant

收稿日期: 2025-08-19

修回日期: 2025-11-01

接受日期: 2025-11-04

DOI: 10.20078/j.eep.20251110

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目(52330004); 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3902802); 华中科技大学“交叉研究支持计划”(2025JCYJ011)

第一作者: 周世发(2001—), 男, 辽宁义县人, 博士研究生, 主要研究方向为固废处理处置与资源化。E-mail: sfzhou@hust.edu.cn

*通讯作者: 杨家宽(1973—), 男, 湖北鄂州人, 教授, 主要研究方向为固废处理处置与资源化。E-mail: jkyang@hust.edu.cn

challenges and risks of causing secondary pollution. This study systematically analyzes the generation characteristics of waste wind turbine blades to project future waste volumes; comprehensively compares existing recycling technologies from technical, economic, and environmental perspectives, based on the blades' structural and material properties; and discusses future technological developments. Furthermore, by reviewing national and provincial policies, this paper elucidates the current policy landscape and future directions for the recycling sector. Results indicate that, based on a 20 – 25-year blade service life, global waste blade volumes are projected to surge from approximately 200,000 tons in 2025 to 2.6 – 6.0 million tons by 2050. China's share is expected to reach 900 000 – 1.9 million tons by 2050. For the glass and carbon fibers in blades, glass fiber recycling primarily utilizes incineration, co-processing in cement kilns, and mechanical-physical recovery. In contrast, higher-value methods such as pyrolysis and chemical processing are favored for carbon fiber recycling. In terms of resource recovery technologies, thermal treatment processes are relatively mature and have achieved industrial application; however, they offer low economic returns and pose significant challenges in controlling secondary pollution. Although chemical separation technologies are highly efficient and yield valuable recovered products, their complex procedures and high operating costs have prevented widespread industrial adoption. Mechanical-physical methods, typically used as pretreatment steps, are low-cost and widely implemented in industry. However, they require integration with chemical or thermal processes to achieve efficient separation and full-scale recovery. Effectively addressing the recycling of discarded wind turbine blades is crucial for ensuring the long-term sustainability and circularity of the wind power industry itself, requiring joint efforts from both industry and research sectors.

Keywords: Pollution control; Waste wind turbine blades; Waste volume; Resource utilization; Recycling technology

0 引 言

随着清洁能源需求的日益增长,绿色可再生的风能已成为最具发展潜力的清洁能源之一。风力发电技术经过长期发展,成本显著降低,经济效益突出,因而得到了广泛应用^[1-3]。根据全球风能委员会(GWEC)的最新报告,全球风电产业持续高速扩张,截至2024年底,全球风电装机容量达到1136 GW,我国风电装机累计容量超过520 GW,稳居世界首位^[4]。风机设计寿命通常为20~25年,早期安装的风机装置逐渐退役,叠加当前装机容量的迅猛增长,可以预测未来废弃风机叶片数量将持续增长,需要对废弃叶片进行妥善回收处置^[5-7]。现有的填埋或焚烧回收方式存在明显不足:在回收效率方面,对废弃风机叶片进行填埋或焚烧,易造成回收产物的利用效率低下^[8];在处理能耗方面,部分处理方式技术能耗过高,造成资源浪费^[9];在处理难度和环境效益方面,废弃风机叶片的简易堆填处置不仅因体积庞大而占用了大量土地资源,且叶片的主要成分包含难以回收的交联树脂类有机物,在回收过程中存在环境风险^[10-11]。因

此,废弃风机叶片回收处置成为清洁能源可持续发展和“无废城市”建设面临的突出难题。

围绕废弃风机叶片的回收处置,现有研究主要聚焦于产量估算与预测,以及处理处置技术,并对回收产物的高值化利用进行了探索。然而,这些研究往往局限于单一技术或局部环节,在系统对比分析不同回收技术的特点,以及预测未来回收技术发展趋势方面仍显不足^[12-16]。同时,尽管已形成一定数量的综述类文章,总结了废弃风机叶片材料组成、各类回收技术的处理方式与优劣对比以及回收产品的工业应用,强调了相关研究的重要性与方法,但以下方面仍有待深化:对不同回收技术的核心原理、技术瓶颈进行更深刻的剖析,评估技术在实际规模化应用中的综合表现,以及基于技术成熟度、环境效益和产品价值等多维度视角,对回收技术路线的迭代升级方向 and 商业化应用前景进行更系统化的预测^[16-20]。

在废弃风机叶片数量持续增加与其复合材料回收问题的双重压力下,尽管相关回收利用技术持续创新,但仍亟须对当前技术发展现状进行系统性梳理,对比分析不同回收技术,并深入了解未

来发展的迫切需求,进而总结该产业的发展趋势。因此,本综述旨在系统梳理废弃风机叶片回收利用技术的现状,剖析关键技术特征,并对未来发展趋势进行展望,以期为该领域的综合管理、技术创新与可持续发展提供借鉴与参考。

1 废弃风机叶片文献检索分析

将风机叶片废弃物 (wind turbine blades and waste)、风机叶片回收 (wind turbine blades and recycling)、风机叶片处置 (wind turbine blades and disposal) 等关键词在中国知网和 Web of Science 进行文献检索和数据分析,结果表明,与废弃风机叶片回收和处置相关的研究数量迅速增长,已经成为新的研究热点。相关研究的出版数量和被引频次呈现指数级增长态势,该领域文献总引用量从 2020 年至 2024 年增长近 5 倍,如图 1 所示。

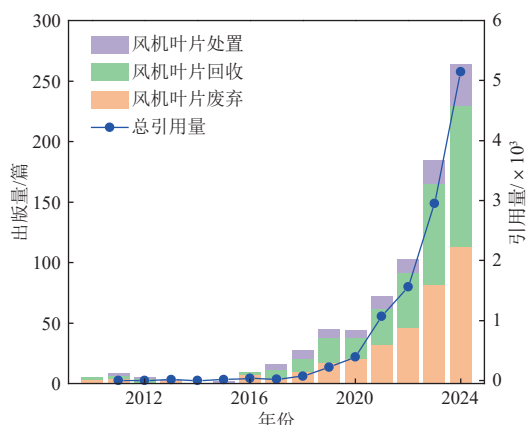


图 1 废弃风机叶片相关研究的出版量和总引用量

Fig. 1 Publication volume and total citations of research on discarded wind turbine blades

本文统计了废弃风机相关文献中的关键词,与风机叶片废弃物相关的研究主要集中在“复合材料”“废弃物”“重复利用”“循环经济”,着力于高值化利用领域,重点强调循环经济和环境保护。因此,本综述以风机废弃叶片的回收利用技术现状和发展趋势为要点,服务于相关技术的突破创新和深入研究。

风机叶片材料、废弃物回收、实践应用构成近十年的研究重点,总体研究方向由循环经济、生命周期等宏观视角逐渐转向风机叶片的材质、废弃物回收方式等微观视角。具体表现为有关叶片废弃物的研究从总体层面的回收利用转向回收的碳纤维等回收产物和催化热解等回收方式;有关风机叶片材料的侧重点从能量相关研究逐渐转

移到混凝土、玻璃纤维、碳纤维等具体材料。

2 风机叶片的材料组成及其技术发展趋势

2.1 风机叶片的结构与材料组成

风机的整体结构可分为基体系统与叶片系统 2 大类。基体部分包括轮毂、内含装有发电机的齿轮箱的机舱、塔和地基^[21],叶片的原材料为基体材料、增强纤维、芯材和涂层^[22]。其中聚合物基体材料约占 45%,增强纤维约占 40%,芯材约占 10%,涂层约占 5%^[11, 18, 20]。风机叶片由 2 个空气动力学壳体与一个或多个结构剪腹板或箱梁连接而成。

翼梁帽主要由重量轻、强度高的增强纤维聚合物构成,可以提供高强度重量比,以满足机械和空气动力学要求,减少碰撞事故的发生^[23-24]。芯材部分除最广泛使用的聚氯乙烯泡沫外,还包括天然纤维(如轻木)、泡沫等,提升了叶片的刚度和抗弯强度^[25]。表面涂层的作用是保护叶片免受紫外线降解和水渗透,主要有聚氨酯、含氟聚合物和聚丙烯酸盐 3 大类^[26-27]。

2.2 风机叶片生产技术发展趋势及其对回收处理的挑战

风机叶片中的增强纤维主要为玻璃纤维或碳纤维。玻璃纤维刚性较低,强度相对较低,密度较高,结构重量较重,成本较低。相比之下,碳纤维的刚性和强度更高,密度较低,结构重量较轻,但成本较高。研究表明,玻璃纤维在一般场景下应用较广,是风机叶片中最常采用的增强纤维材料^[28-29]。

自 1980 年以来,陆上和海上风机的功率和转子直径均逐年增大,预计到 2030 年,海上风机的功率将达到 35 MW,转子直径将达到 350 m,陆上风机的功率将达到 20 MW,转子直径将达到 300 m^[4]。风机尺寸的增大引起了风机叶片尺寸的增大,仅依靠玻璃纤维作为增强纤维难以支撑大尺寸叶片,而碳纤维在这种环境中应用较广,近年来碳纤维在风机叶片制造中占据了约 20% 的市场份额,同时这一比例保持上升趋势^[28-30]。

目前,风机叶片的主流制造技术为树脂灌注技术,所使用的树脂多为环氧树脂等热固性聚合物,在固化后形成致密的复合结构材料,提升叶片性能的同时,也增加了其回收难度^[28]。此外,风机叶片回收还面临着回收成本高、回收技术尚不成熟、回收产物价值低、环境污染显著、政策和标准不完善等问题^[17, 31-33]。

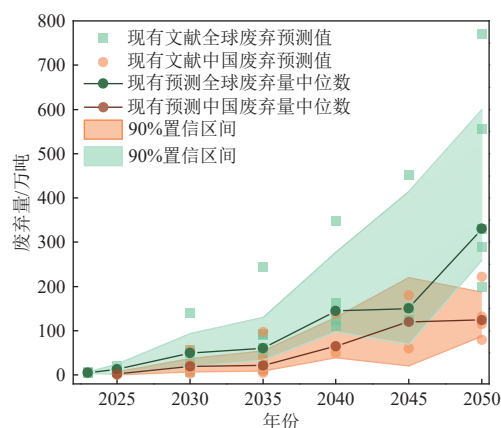
3 报废风机叶片的产生量估算和预测

随着风电产业的快速发展,风机需求逐渐扩大,需要新建大量风机以满足市场需求^[21]。风机的累计安装量在我国和全球范围内均呈现增长趋势,且增长速度逐年加快。2016年后增长速度呈指数型上升态势,预计到2050年增长至约6 000 GW,约占清洁能源装机量的30%^[34-35]。其中,我国风机累计安装量在全球占比逐年增加,对全球风机安装量的贡献逐渐显著^[36-37],预计到2050年增长至1 000 GW^[38]。

目前,早期建设运营的风机设备逐渐进入退役阶段,多个国家正在积极探索废弃风机设备的回收策略,为废弃风机回收提供技术和政策支持。我国风机安装量在2000年后呈指数型增长,风机寿命一般约为20~25年预测,我国风机“退役潮”预计将于2025~2030年期间达到高峰^[39]。

目前,已有部分研究对废弃风机叶片的报废量进行模拟预测,主要基于叶片的重量、功率、安装时间和使用寿命来预测风机叶片废弃量。一般风机叶片重量与功率呈现高度关联性,同时根据叶片安装时间和设计使用寿命,可以预测风机退役时间。综合叶片功率所对应的重量和风机退役时间即可估算未来某一时期风机叶片的废弃量^[40-42]。然而因关键参数的取值和模拟方法不同,目前对于风机叶片废弃量的估算存在较大的差异。本研究对现有的风机叶片废弃量预测数据进行了汇总整理,剔除了误差偏移过大的数据,将其余废弃量取中位数绘制中位数折线图,如图2所示。总体上可以得出,风机叶片废弃量于2025年全球将达到约20万t,预计2035年全球将达到30万~130万t,我国将达到10万~60万t;2050年全球将达到260万~600万t,我国将达到90万~190万t。

现有风机叶片废弃量的预测方法主要如下:一是基于固定寿命和装机量的简单预测方法,该方法假设风机的固定运行寿命,结合装机量进行外推,操作简单,但存在忽略了风机寿命延长或提前结束等实际情况,可能导致预测结果偏差较大;二是基于多情景,通过动态物质流分析进行预测,该方法的优点在于预测结果空间分辨率高,但方法较为复杂,且依赖情景假设的准确性,结果具有不确定性;三是基于地理信息预测的方法,通过整合风电场数据,构建废弃量数据库,该方法的优点在于可以根据风电场的实际数据规划回收利用方



注:数据来源于国家能源局、GWEC's Global Wind Report 2025、多篇参考文献^[2,16,18,40-44]。

图2 全球和我国风机叶片废弃量预测

Fig. 2 Predicted waste volume of wind turbine blades worldwide and in China

案,缺点在于依赖公开数据的完整性和准确性。通过对现有预测方式的分析得出,预测方法的合理性在于寻找预测简化性和准确性的平衡,涵盖关键变量和多情景分析,以应对未来废弃量的不确定性。因此基于多情景,通过动态物质流分析进行预测是现阶段最合理的预测方案。

4 风机叶片的处理处置与回收技术

废弃风机叶片的处理方式分为简易填埋、热处理回收、机械回收、化学回收4类。作为回收废弃风机叶片的传统方式,简易填埋操作简单,同时可以减少叶片切碎时的电力和运输成本。然而填埋回收造成废弃风机叶片再利用效率低;填埋过程中会排放挥发性有机化合物,且填埋废弃物不易降解,环境污染严重。因此,填埋回收不能满足风机回收产业可持续发展的需要^[11,45]。热处理、机械回收、化学回收是处理废弃风机叶片的常用方案,分别存在不同的优势和不足,因此研究以上3类回收方式是风机回收产业可持续发展的必然要求。

风机叶片中的纤维主要为玻璃纤维或碳纤维。碳纤维在外界环境作用下的性能优于玻璃纤维,同时其回收后产物的价值高于玻璃纤维,因此分别研究玻璃纤维和碳纤维的处理处置和回收技术^[28-29]。

4.1 玻璃纤维的处理处置和回收技术

图3展示了玻璃纤维的热处理、机械处理和化学处理回收技术。热处理的步骤为将废弃风机叶片进行破碎预处理后形成碎片,随后进行焚烧、

水泥窑处理或热解处理。机械处理的原料主要为废弃风机叶片和初步处理的增强纤维复合材料,将其进行破碎、切割和研磨等处理后,以相对便捷的操作流程获取不同尺寸的产品。化学处理是将破碎后的废弃风机叶片利用溶剂浸泡法、超临界流体法 2 种化学方法分解聚合物中的化学交联键,将聚合物降解为单体或低聚物,回收出高质量再生纤维,并将分解后的基体用于制备新的树脂。

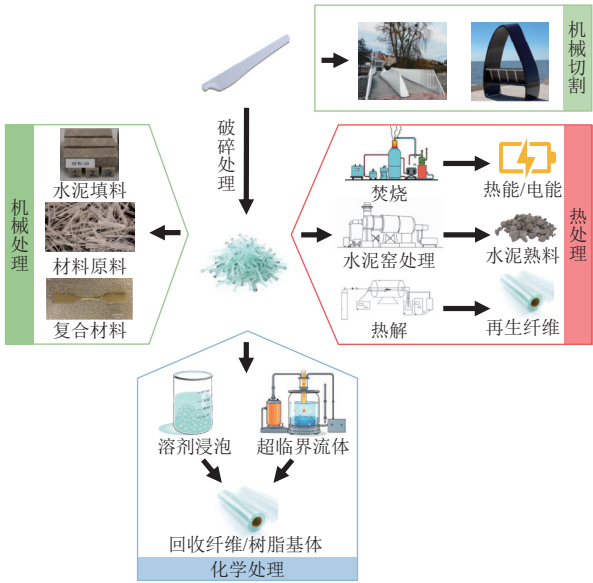


图 3 玻璃纤维热处理回收^[46-49]、机械物理回收^[6, 32, 50]、化学回收^[8, 13]技术流程

Fig. 3 Flowchart of glass fiber pyrolysis recycling^[46-49], mechanical-physical recycling^[6, 32, 50], and chemical recycling^[8, 13] technology

4.1.1 玻璃纤维的热处理回收技术

焚烧的技术流程为将预处理后的叶片在高温

条件下焚烧后,利用产生的热能和电能进行供热或供电,目前已达到量产规模^[7]。然而该技术的不足在于焚烧的热值仅来源于树脂基体材料,热值较低;为使焚烧过程达到足够的温度,往往需要添加助燃辅料,导致能源消耗大;产生有害化合物,造成环境污染^[49, 51]。水泥窑处理的技术流程为向水泥原料中添加预处理后的叶片,烧制后形成水泥熟料。将 10% 以内的破碎叶片加入水泥原料,根据破碎叶片的添加量调整水灰比,烧制为水泥熟料^[46, 52]。该技术因操作简单、原料成本低等优势同样达到了量产推广规模,但原料的添加比例需要精准控制,以更好地维护水泥熟料性能,操作难度大^[46, 53]。热解的技术流程为将预处理的叶片复合材料在一定温度和气体环境中加热,获取再生纤维。将破碎叶片在 440~800 ℃ 的温度下,加入氮气、二氧化碳、水等原料,生成 6%~14% 的热解气、7%~15% 的热解油和 79% 的固体产物^[54-55]。该技术目前处于实验室研究阶段,虽然具有产物回收效率较高、产物种类丰富等优势,但也存在一定不足:处理条件苛刻、处理成本高再生纤维强度下降等^[48, 55]。表 1 总结了玻璃纤维的热处理回收技术。

4.1.2 玻璃纤维的机械物理回收技术

按照处理目的的区别,将废弃风机叶片进行机械切割后,制造为桥梁、长椅等建筑材料;或经过机械破碎、真空灌注等处理方式后,破碎成为体积较小的碎片,经过改性复合后,形成 3D 打印材料原料、混凝土替代骨料、再生纤维复合材料等产物。机械切割技术的流程为利用手持式锯或液压驱动锯,将废弃风机叶片进行初步裁切、拼接

表 1 玻璃纤维的热处理回收技术

Table 1 Pyrolysis recycling technologies for glass fiber

回收技术	回收指标	回收效率	技术的缺点	文献来源
焚烧	—	每千克玻璃纤维含量消耗约 1.7 MJ	焚烧灰烬污染环境、废弃叶片中玻璃纤维热值低	[51]
水泥窑	向水泥原料以 1% 体积比的浓度添加废弃叶片	根据粗废弃风机叶片的含量调整加入的水的含量,呈正相关关系	操作难度大,可能造成环境污染	[46]
	向水泥原料添加体积为 0~10% 的废弃叶片	混合物中的水泥含量固定为 320 kg/m ³ , 水灰比为 0.40	原料添加比例需保持精准,操作难度大	[52]
热解	440 ℃, 氮气环境下处理 90 min	热解气 13.9~37.7 MJ/m ³ ; 热解油 33.6~37.0 MJ/kg	技术难度大,产物商业应用范围有限	[48]
	500 ℃, 引入 20% 的反应气体	热解气、油和固体产物的产率分别为 6.32%、14.88% 和 78.80%	产物拉伸强度降低	[55]

后,形成桥梁等大型建筑,这项技术操作简单、成本较低,但在切割过程中存在安全隐患^[6]。另有一种机械破碎、真空灌注处理后的废弃风机叶片,经过混合、挤出等操作工序后进行改性复合,形成直径为 1.75 mm 的 3D 打印细丝、长度为 0.1~1.0 mm 的回收纤维,占总体积 20% 的混凝土替代骨料等材料^[14, 56-59]。机械回收技术具有处理快速、操作简单的优势,能够有效地粉碎和切割叶片,将其转化为不同尺寸的纤维。这些纤维可以直接用作低

端增强材料或添加剂,也可以作为热回收和化学回收的原料,以便后续加工。目前,机械回收在废弃风机叶片玻璃纤维的回收中已经实现了广泛工业化应用^[17, 60]。然而,机械回收也存在一定问题:产物纯度低、稳定性差;为满足所需的形状,需要经过多次切割,导致粉尘污染;同时经过研磨、切割等流程,再生纤维的性能较差,只能用于设计性能要求较低的产品,因此该技术难以突破上限^[16, 19]。
表 2 总结了玻璃纤维的机械物理回收技术。

表 2 玻璃纤维的机械物理回收技术
Table 2 Mechanical-physical recycling technologies for glass fiber

回收技术	回收指标	回收效率	技术的缺点	文献来源
机械切割	手持式锯或液压驱动锯切割尺寸在 2 m 内的风机叶片	用于建造桥梁、野餐桌或路牌	切割工作存在安全隐患	[6]
机械破碎	破碎研磨,在 60 ℃ 下干燥 4 h,后送入挤出机生产再生纤维	产物为直径 1.75 mm 长丝	产物性能不稳定	[14]
机械破碎、真空灌注	将叶片切割成 2.54 mm×2.54 mm 左右的切片,研磨、挤出,用于 3D 打印	产物为直径 1.75 mm 的细丝	原料添加比例大,成本高	[56]
机械破碎	将风力涡轮机叶片废料切割成 20 cm×20 cm 的小块	得到粒径范围为 12.7、6.35、3.18、1.59 mm 的回收材料	存在树脂残留,影响复合材料的性能	[57]
机械破碎	工业级粉碎机,处理速率 1.8 kg/h,板材厚度 3.5 mm	能耗 0.37~5.53 MJ/kg	回收物为短纤维或粉末,价值较低	[58]
机械研磨、真空灌注	195 ℃,将回收玻璃纤维与聚乳酸复合,在氮气吹扫下成型	回收玻璃纤维长度为 0.1~1.0 mm	存在树脂残留,影响复合材料的性能	[61]

4.1.3 玻璃纤维的化学回收技术

超临界/亚临界流体法将破碎后的废弃叶片在 200~374 ℃、压力小于 22.1 MPa 的亚临界水中反应 5~30 min,或 250~390 ℃、压力 2~9 MPa 超临界/亚临界 D-柠檬烯中反应 45~60 min,使超临界流体渗透聚合物基体并破坏稳定的化学键,加速溶解反应,生成干净的再生纤维^[62-63]。溶剂浸泡法利用溶剂在特定温度和压力下溶解破碎后的废弃叶片。废弃叶片溶解于过氧化氢等溶剂时,树脂降解率达 98%;溶解于乙二醇和 N-甲基吡咯烷酮混合溶剂时,树脂降解率达 98%。化学回收方式存在处理难度大、处理过程复杂、反应条件苛刻、反应效率低、经济成本高等不足,部分有毒溶剂还可能造成环境污染^[8, 64-65]。表 3 总结了玻璃纤维的化学回收技术。

4.2 碳纤维的处理处置和回收技术

风机叶片中碳纤维的处理处置和回收技术分为热处理回收技术、机械物理回收技术和化学回收技术 3 类。碳纤维本身具有较高的经济价值和

性能优势,高值化回收策略能够在较大程度上保留碳纤维的结构和性能,提升纤维的回收效率,实现资源高值化利用,在碳纤维回收中应用较多,填埋、焚烧、水泥窑等低值回收方式在碳纤维回收中应用较少。

碳纤维的热处理回收方式主要为热解,将树脂和纤维的混合物加热至 500~900 ℃,可回收约 70%~80% 的碳纤维。该回收方式有效减少了废弃物的产生和环境污染,但同时存在能耗高的缺点,且难以避免纤维结构损伤的问题^[54, 67-68]。为进一步提高资源利用率,现有研究探索了热解与催化重整、机械与热压处理等联合工艺,但该方法处理流程复杂,限制了大规模工业化应用^[69-70]。机械物理回收技术主要通过机械方式将废弃复合材料破碎、切削、研磨,再利用所得短纤维或颗粒制造新产品,回收过程简单,能耗远低于原生碳纤维生产,应用广泛,但回收后的再生纤维树脂残留量大,纤维的长度和力学性能降低超过 15%^[58, 61, 71-72]。碳纤维的化学回收方式主要为超临界流体法和溶

表 3 玻璃纤维的化学回收技术
Table 3 Chemical recycling technologies for glass fiber

回收技术	回收指标	回收效率	技术的缺点	文献来源
亚临界水水解	200~374 ℃，小于22.1 MPa，亚临界水，NaOH催化剂，5~30 min	树脂去除率达到97%	纤维机械性能下降明显，需有机溶剂清洗，副反应多	[62]
亚/超临界 D-柠檬烯处理	250~390 ℃，2~9 MPa，45~60 min，D-柠檬烯溶剂	玻璃纤维回收率接近100%	高温高压、能耗高、设备要求高	[63]
溶液浸泡	微波功率700 W，溶剂为过氧化氢/乙酸，时间180 s	97.2%的环氧树脂降解率	微波设备成本高，均质加热难，操作复杂	[64]
	120 ℃加热1 h，加入5 mLH ₂ O ₂ ，冷却后溶解在N,N-二甲基甲酰胺	树脂降解率>90%，纤维强度保留>90%	处理过程复杂，反应效率低	[65]
	温度250 ℃，催化剂醋酸锌，时间5 h	83.5%的环氧树脂降解率	高温可能导致纤维机械性能下降	[66]

液浸泡法。超临界流体法使用的液体为超临界水或甲醇,处理时间一般在 90 min 内。现有研究同时利用乙二醇和丙二醇混合溶液对废弃叶片进行溶液浸泡,并利用小分子辅助溶解,以回收碳纤维。化学处理方法可以实现碳纤维约 90% 的回收率,回收率高、回收纤维表面清洁且性能较好,但也存在操作复杂、成本高等问题,需要进行工艺优化^[13, 73~75]。碳纤维的处理处置和回收技术见表 4。

表 4 碳纤维的处理处置和回收技术
Table 4 Treatment, disposal, and recycling technologies for carbon fiber

回收分类	回收方式	回收指标	回收效率	技术的缺点	文献来源
热处理回收技术	热解	10 mg叶片在50 mL/min的氮气环境下从室温加热至800 ℃。	最终失重达到39.65%。	处理条件苛刻，产物经济效益不明晰	[54]
	热解	热解温度550 ℃，热解时间60 min，热解氛围为过热蒸汽	—	损伤纤维，工艺控制要求高	[67]
	热解	500 ℃条件下热解并氧化，并在850 ℃下活化5 h	回收碳纤维70.0%~83.6%	能耗高，损伤纤维	[68]
	热解、催化重整	500 ℃热解后900 ℃催化重整，催化剂为Ni/ZSM-5	液相有机组分减少90%，H ₂ 含量>50%	催化剂成本高，处理过程复杂	[69]
机械物理回收技术	机械粉碎、热压成型	粉碎至粒径1.2~3.4 mm，热压温度为360~400 ℃	—	纤维结构破坏，力学性能下降	[70]
	机械回收、熔融颗粒制造	打印温度230 ℃，打印速度30 mm/s，喷嘴直径0.8 mm	回收材料密度提高24%，刚度提高43%，强度提高20%	回收材料性能降低	[71]
	机械研磨和注塑	机械研磨、注塑，纤维负载10%~40%	杨氏模量下降20%~30%，极限拉伸强度下降15%~25%	纤维长度和力学性能降低	[72]
	机械切削	工业级铣床，处理速率10~150 kg/h	处理能耗0.27~0.52 MJ/kg	回收纤维为短纤维束，性能低	[76]
化学回收技术	超临界流体	270 ℃，8 MPa，90 min，超临界甲醇	环氧树脂完全分解并溶解，碳纤维完全回收	操作复杂	[13]
	超临界流体	350 ℃，8 MPa，90 min，超临界甲醇	环氧树脂完全分解并溶解，碳纤维完全回收	操作复杂，成本高	[73]
	超临界流体	250~400 ℃，1~30 min，超临界水	环氧树脂去除效率达79.3%，加入KOH后提高至95.4%	机械搅拌器损害纤维的机械性能	[75]
	溶液浸泡	190 ℃，2.5~3 h，6 MPa，乙二醇和丙二醇混合溶液	树脂降解率超过80%，纤维回收率>90%	溶剂体系复杂，成本高，需优化工艺	[74]

尽管这些回收工艺在提升碳纤维回收效率和材料性能方面表现出一定优势,但回收过程本身

仍不可避免地带来纤维结构的局部损伤、力学性能的下降,以及较高的能耗和操作成本。部分工艺还需使用昂贵的催化剂或有机溶剂,进一步增加了技术推广的难度。因此,碳纤维回收技术在追求产物高值化的同时,也需要面对效率与成本的平衡问题。

4.3 不同处理处置与回收技术的比较

不同回收技术的技术成熟可以使用 Logistic 公式反映,该模型是应用较为广泛的模型之一,多用于预测发展迅速、增长趋势明显的技术生命周期,见式(1):

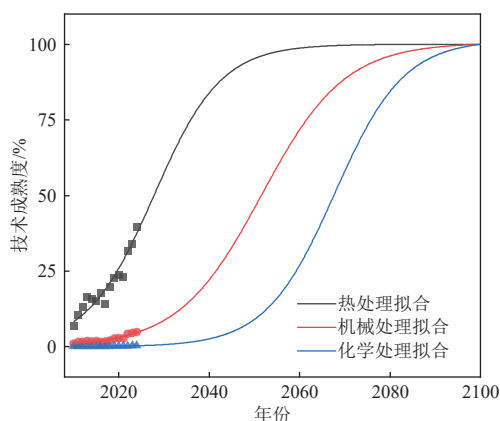
$$\text{Logistic}(t) = \frac{k}{1 + e^{-p(t-t_0)}} \quad (1)$$

式中: t 为时间; p 、 k 、 t_0 为待定参数。

根据技术生命周期理论,技术发展呈现出产生、萌芽、成熟、消亡的周期性过程,描述了技术的整体发展轨迹。根据技术生命周期的 4 阶段划分,可以将技术的发展历程分为萌芽阶段、成长阶段、成熟阶段和衰退阶段^[77]。

本研究通过 Web of Science 统计历年来风机叶片热处理、机械处理和化学处理的文献数量,使用 Logistic 函数拟合并进行归一化,其结果如图 4 所示。可以发现,机械处理处于成长阶段,热处理和化学处理处于萌芽阶段。机械处理技术发展最早,预计于 2045 年进入成熟阶段;热回收技术预计于 2030 年进入快速发展期,2075 年进入成熟阶段;化学回收技术起步发展较为缓慢,预计于 2050 年进入快速发展期,2090 年进入成熟阶段。

在产物价值方面,本研究统计废弃风机叶片的热回收、机械回收和化学回收的产物价值,如

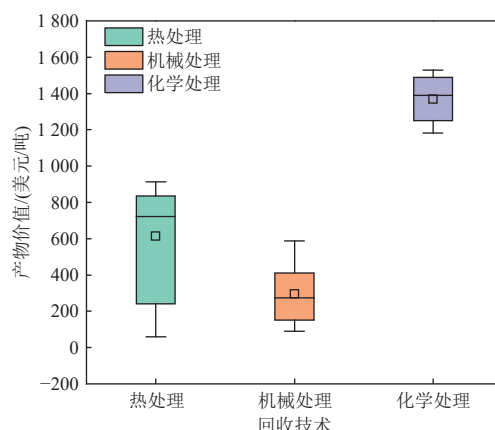


注: 图 4 数据来源于 Web of Science。

图 4 不同回收技术的技术成熟度

Fig. 4 Technical maturity of different recycling technologies

图 5 所示。3 种回收技术的产物价值集中在 200~2 000 美元/t。热处理的产物价值的均值为 600 美元/t, 主要分布于 80~900 美元/t, 数据较为离散, 表明不同回收方式间经济效益的差距较大。机械处理的产物价值的均值为 300 美元/t, 主要分布在 100~650 美元/t, 在 3 种回收方式中产物价值较低。化学回收的产物价值的均值为 1 350 美元/t, 主要分布于 1 150~1 500 美元/t, 数据分布较为集中, 在 3 种回收方式中产物价值普遍较高。

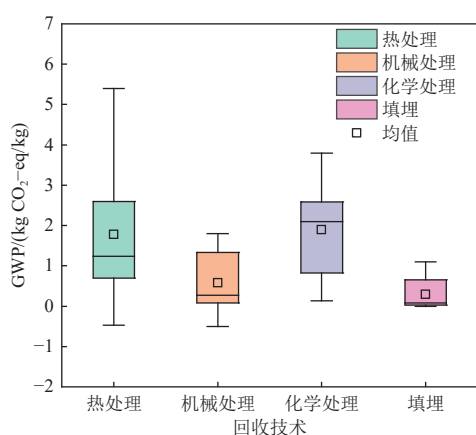


注: 图 5 数据来源于多篇参考文献^[7, 31, 78]。

图 5 不同回收技术的产物价值

Fig. 5 Product value of different recycling technologies

通过对现有风机叶片处理方式的生命周期研究,统计了能够一定程度上反映环境污染危害度的二氧化碳当量($\text{kg CO}_2\text{-eq/kg}$),如图 6 所示。热处理的二氧化碳当量均值为 $1.8 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$, 结果主要集中在 $-0.5 \sim 5.5 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$, 数据较为离散, 表明不同热处理方式间环境影响的差距较大。机械处理二氧化碳当量均值为 $0.5 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$, 结果主要集中在 $-0.5 \sim 1.7 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$ 。化学处理二氧化碳当量均值为 $1.9 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$, 结果主要集中在 $0.1 \sim 3.8 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$ 。填埋的二氧化碳当量均值为 $0.2 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$, 结果主要集中在 $-0.3 \sim 1.1 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$ 。对比分析可得,热处理和化学处理的环境影响较大,其中热处理的环境影响变化范围更大,需要改进技术,探索更加环保的回收方案。与热处理和化学处理相比,机械处理和填埋产生的二氧化碳当量相对较小。然而,由于填埋处置方式已在全球范围内受到严格限制,机械处理凭借其相对最小的环境影响,预计将在废弃风机叶片回收领域保持稳定增长。



注: 图 6 数据来源于多篇参考文献^[79-84]。

图 6 不同回收技术的环境影响

Fig. 6 Environmental impact of different recycling technologies

5 结论与展望

截至 2024 年底, 全球风电装机容量已达 1 136 GW, 我国以超过 520 GW 的装机容量居世界首位。按风机寿命 20~25 年测算, 早期安装机组已进入退役期, 叠加新增装机的指数级增长, 废弃叶片量将呈爆发趋势, 预计到 2050 年, 全球废弃风机叶片将达到 260 万~600 万 t, 我国废弃风机叶片将达到 90 万~190 万 t。目前, 废弃风机叶片回收面临诸多难点, 一是材料多元化, 玻璃纤维在目前的风机叶片中应用较广泛, 碳纤维的市场份额保持上升趋势。二是风机叶片制造的树脂灌注工艺增加了废弃风机叶片的回收难度。此外, 风机叶片回收还面临着回收成本高、回收技术尚不成熟、回收产物价值低、环境污染显著、政策和标准不完善等问题。现有研究聚焦于废弃风机叶片回收处理方式的回收原理、产物回收率和各类回收方式的优缺点分析。热回收、机械回收和化学回收是目前主流的废弃风机叶片处理方式, 在不同种类的纤维回收上各有侧重。玻璃纤维侧重于焚烧、水泥窑处理和机械物理回收, 碳纤维更倾向于选择热解、化学回收等高值化回收方式。在技术成熟度层面, 机械回收研究预计最早进入成熟阶段, 随后是热回收和化学回收。在产物价值和环境影响上, 化学回收产物价值集中在 1 150~1 500 美元/t, 高于热处理和机械处理, 然而化学处理主要停留在实验室阶段, 量产程度低于热处理和机械处理。热处理的二氧化碳排放当量为 -0.5~5.5 kg CO₂-eq/kg, 普遍高于机械回收和化学

回收。关于回收方式的不足, 热处理主要表现在产物性能受损和焚烧灰烬造成的环境污染; 机械处理主要表现在产物性能和利用低端, 化学处理主要表现在成本高和试剂毒性。

参考文献 (References) :

- [1] LEON M Jr. Recycling of wind turbine blades: Recent developments[J]. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 2023, 39: 100746.
- [2] LIU Pu, BARLOW C Y. Wind turbine blade waste in 2050[J]. *Waste Management*, 2017, 62: 229-240.
- [3] PERERA A T D, NIK V M, CHEN Deliang, et al. Quantifying the impacts of climate change and extreme climate events on energy systems[J]. *Nature Energy*, 2020, 5: 150-159.
- [4] GWEC. GWEC's global wind report 2025 [EB/OL]. (2025-05-29) [2025-08-18]. <https://www.gwec.net/reports/global-windreport>.
- [5] BONOU A, LAURENT A, OLSEN S I. Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy-from theory to application[J]. *Applied Energy*, 2016, 180: 327-337.
- [6] JENSEN J P, SKELTON K. Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 97: 165-176.
- [7] LIU Pu, MENG Fanran, BARLOW C Y. Wind turbine blade end-of-life options: An eco-audit comparison[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 212: 1268-1281.
- [8] COUSINS D S, SUZUKI Y, MURRAY R E, et al. Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 209: 1252-1263.
- [9] JIANG Long, ULVEN C A, GUTSCHMIDT D, et al. Recycling carbon fiber composites using microwave irradiation: Reinforcement study of the recycled fiber in new composites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, 132(41): 42658.
- [10] FENG Yu, ZHANG Zhe, YUE Dong, et al. Recent progress in degradation and recycling of epoxy resin[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2024, 32: 2891-2912.
- [11] NAGLE A J, DELANEY E L, BANK L C, et al. A comparative life cycle Assessment between landfilling and co-processing of waste from decommissioned Irish wind turbine blades[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277: 123321.
- [12] BAJRACHARYA R M, MANALO A C, KARUNASENA W, et al. An overview of mechanical properties and durability of glass-fibre reinforced recycled mixed plastic waste composites[J]. *Materials & Design(1980-2015)*, 2014, 62: 98-112.

- [13] OKAJIMA I, HIRAMATSU M, SHIMAMURA Y, et al. Chemical recycling of carbon fiber reinforced plastic using supercritical methanol[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2014, 91: 68–76.
- [14] RAHIMIZADEH A, KALMAN J, FAYAZBAKHS K, et al. Recycling of fiberglass wind turbine blades into reinforced filaments for use in additive manufacturing[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 175: 107101.
- [15] SHEN Mingyuan, GUO Z H, FENG Wanting. A study on the characteristics and thermal properties of modified regenerated carbon fiber reinforced thermoplastic composite recycled from waste wind turbine blade spar[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 264: 110878.
- [16] XU Mingxin, JI Haiwen, WU Yachang, et al. Recovering glass fibers from waste wind turbine blades: Recycling methods, fiber properties, and potential utilization[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 202: 114690.
- [17] HU Yiming, ZHANG Yunxuan, LI Yingcai, et al. Wind turbine blade recycling: A review of the recovery and high-value utilization of decommissioned wind turbine blades[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2024, 210: 107813.
- [18] SPINI F, BETTINI P. End-of-Life wind turbine blades: Review on recycling strategies[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 275: 111290.
- [19] WANG Baodong, CHEN Guoxing, DONG Yang, et al. Wind turbine blade recycling for greener and sustainable wind energy[J]. *Nature Reviews Materials*, 2025, 10: 330–331.
- [20] XU Yang, WANG Fei, LIANG Dehua, et al. A comprehensive review of waste wind turbine blades in China: Current status and resource utilization[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(3): 113077.
- [21] IREERA. International report on the recycling of wind and photovoltaic equipment industries [EB/OL]. (2025-02-06) [2025-08-18]. <https://book.yunzhan365.com/ryeb/jbnpn/mobile/index.html>.
- [22] ROMMEL D P, DI MAIO D, TINGA T. Calculating wind turbine component loads for improved life prediction[J]. *Renewable Energy*, 2020, 146: 223–241.
- [23] ÅKESSON D, FOLTYNOWICZ Z, CHRISTÉEN J, et al. Microwave pyrolysis as a method of recycling glass fibre from used blades of wind turbines[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2012, 31(17): 1136–1142.
- [24] GE Lichao, XU Chunyao, FENG Hongcui, et al. Study on isothermal pyrolysis and product characteristics of basic components of waste wind turbine blades[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2023, 171: 105964.
- [25] BRØNDSTED P, NIJSEN R. Advances in wind turbine blade design and materials [M]. Amsterdam: Woodhead Publishing Limited, 2013.
- [26] BORA M, SHARMA A V, KUMARI P, et al. Investigation of bamboo-based vertical axis wind turbine blade under static loading[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 285: 115317.
- [27] TIAN Yao, GAO Chao, ZHANG Zhengke, et al. Investigating the impact of various operating parameters on blade aeroelasticity and wake characteristics of large-scale wind turbines[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 287: 115768.
- [28] BRØNDSTED P, LILHOLT H, LYSTRUP A. Composite materials for wind power turbine blades[J]. *Annual Review of Materials Research*, 2005, 35: 505–538.
- [29] MISHNAEVSKY L, BRANNER K, PETERSEN H N, et al. Materials for wind turbine blades: An overview[J]. *Materials*, 2017, 10(11): 1285.
- [30] MARTULLI L M, DIANI M, SABETTA G, et al. Critical review of current wind turbine blades' design and materials and their influence on the end-of-life management of wind turbines[J]. *Engineering Structures*, 2025, 327: 119625.
- [31] FONTE R, XYDIS G. Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 287: 112269.
- [32] SHEN Yafei, APRAKU S E, ZHU Yupeng. Recycling and recovery of fiber-reinforced polymer composites for end-of-life wind turbine blade management[J]. *Green Chemistry*, 2023, 25(23): 9644–9658.
- [33] UPADHYAYULA V K K, GADHAMSHETTY V, ATHANASSIADIS D, et al. Wind turbine blades using recycled carbon fibers: An environmental assessment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(2): 1267–1277.
- [34] GIELEN D, GORINI R, PRAKASH G, et al. World Energy Transitions Outlook –1.5 °C Pathway[M]. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2021.
- [35] IRENA. Future of wind: deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects [M]. Abu Dhabi, United Arab Emirates: International Renewable Energy Agency, 2019.
- [36] 国家能源局. 国家能源局发布 2024 年全国电力工业统计数据 [EB/OL]. (2025-01-21) [2025-08-18]. <https://www.nea.gov.cn/20250121/097bfd7c1cd3498897639857d86d5dac/c.html>.
National Energy Administration. National Energy Administration releases 2024 national electricity industry statistics [EB/OL]. (2025-01-21) [2025-08-18]. <https://www.nea.gov.cn/20250121/097bfd7c1cd3498897639857d86d5dac/c.html>.
- [37] 人民日报海外版. 我国海上风电累计建成并网 3910 万千瓦 [EB/OL]. (2024-11-22) [2025-08-18]. https://www.nea.gov.cn/2024-11/22/c_1212407828.htm.
People's Daily Overseas Edition. China's offshore wind power has a cumulative installed capacity of 39.1 million kilowatts[EB/OL]. (2024-11-22) [2025-08-18]. https://www.nea.gov.cn/2024-11/22/c_1212407828.htm.
- [38] 国家能源局. 中国风电发展路线图 2050 发布 [EB/OL].

- (2011-12-13)[2025-08-18]. https://fjb.nea.gov.cn/dtyw/hyxx/202311/t20231113_211496.html.
- National Energy Administration. China Wind Power Development Roadmap 2050 Released[EB/OL]. (2011-12-13) [2025-08-18]. https://fjb.nea.gov.cn/dtyw/hyxx/202311/t20231113_211496.html.
- [39] DE LAURENTIS C, WINDEMER R. When the turbines stop: Unveiling the factors shaping end-of-life decisions of ageing wind infrastructure in Italy[J]. *Energy Research & Social Science*, 2024, 113: 103536.
- [40] COOPERMAN A, EBERLE A, LANTZ E. Wind turbine blade material in the United States: Quantities, costs, and end-of-life options[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 168: 105439.
- [41] DELANEY E L, MCKINLEY J M, MEGARRY W, et al. An integrated geospatial approach for repurposing wind turbine blades[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 170: 105601.
- [42] YANG Juhua, MENG Fanran, ZHANG Lixiao, et al. Solutions for recycling emerging wind turbine blade waste in China are not yet effective[J]. *Communications Earth & Environment*, 2023, 4: 466.
- [43] CONG Nan, SONG Yan, ZHANG Ming, et al. Life cycle assessment of carbon reduction potential of EoL wind turbine blades disposal scenarios in China[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 100: 107072.
- [44] LICHTENEGGER G, RENTIZELAS A A, TRIVYZA N, et al. Offshore and onshore wind turbine blade waste material forecast at a regional level in Europe until 2050[J]. *Waste Management*, 2020, 106: 120–131.
- [45] RAMOS M J Jr, MEDEIROS D L, BATISTA AZEVEDO J, et al. Wind turbine blade decommissioning in Brazil: The economic performance of energy recovery in a cement kiln compared to industrial landfill site[J]. *Sustainability*, 2025, 17(1): 365.
- [46] MANSO MORATO J, HURTADO ALONSO N, REVILLA CUESTA V, et al. Management of wind-turbine blade waste as high-content concrete addition: Mechanical performance evaluation and life cycle assessment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 373: 123995.
- [47] PENDER K, YANG L. Regenerating performance of glass fibre recycled from wind turbine blade[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 198: 108230.
- [48] YANG W, KIM K H, LEE J. Upcycling of decommissioned wind turbine blades through pyrolysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 376: 134292.
- [49] YANG Yongxiang, BOOM R, IRION B, et al. Recycling of composite materials[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2012, 51: 53–68.
- [50] MEIRA CASTRO A C, CARVALHO J P, RIBEIRO M C S, et al. An integrated recycling approach for GFRP pultrusion wastes: Recycling and reuse assessment into new composite materials using Fuzzy Boolean Nets[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 66: 420–430.
- [51] DUFLOU J R, DUFLOU J R, VAN ACKER K, et al. Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle-assessment-based study[J]. *MRS Bulletin*, 2012, 37(4): 374–382.
- [52] HURTADO ALONSO N, MANSO MORATO J, REVILLA CUESTA V, et al. Strength-based RSM optimization of concrete containing coarse recycled concrete aggregate and raw-crushed wind-turbine blade[J]. *Composite Structures*, 2025, 356: 118895.
- [53] REVILLA CUESTA V, SKAF M, ORTEGA LÓPEZ V, et al. Raw-crushed wind-turbine blade: Waste characterization and suitability for use in concrete production[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 198: 107160.
- [54] GE Lichao, LI Xi, FENG Hongcui, et al. Analysis of the pyrolysis process, kinetics and products of the base components of waste wind turbine blades (epoxy resin and carbon fiber) [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2023, 170: 105919.
- [55] XU Mingxin, JI Haiwen, WU Yachang, et al. The pyrolysis of end-of-life wind turbine blades under different atmospheres and their effects on the recovered glass fibers[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 251: 110493.
- [56] EZHILAN J J, DAMODARAN A, ASHOK K G. Decentralized approach for incorporating waste wind turbine blades into 3D printing filaments using mechanical recycling[J]. *Polymer Composites*, 2025, 46(3): 2319–2332.
- [57] MAMANPUSH S H, LI Hui, ENGLUND K, et al. Recycled wind turbine blades as a feedstock for second generation composites[J]. *Waste Management*, 2018, 76: 708–714.
- [58] SHUAIB N A, MATIVENGA P T. Energy demand in mechanical recycling of glass fibre reinforced thermoset plastic composites[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 120: 198–206.
- [59] ZHANG Yonghong, CUI Suping, WANG Xinxin, et al. Microstructure and performance of recycled wind turbine blade based 3D printed concrete[J]. *Cleaner Waste Systems*, 2025, 10: 100206.
- [60] PALMER J, GHITA O R, SAVAGE L, et al. Successful closed-loop recycling of thermoset composites[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009, 40(4): 490–498.
- [61] MOSLEHI A, AJJI A, HEUZEY M C, et al. Polylactic acid/recycled wind turbine glass fiber composites with enhanced mechanical properties and toughness[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139(15): 51934.
- [62] OLIVEUX G, BAILLEUL J L, LE GAL LA SALLE E. Chemical recycling of glass fibre reinforced composites using subcritical water[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43(11): 1809–1818.

- [63] SOUZA P R, NUNES C S, FREITAS A R, et al. Sub- and supercritical D-limonene technology as a green process to recover glass fibres from glass fibre-reinforced polyester composites[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 254: 119984.
- [64] RANI M, CHOUDHARY P, KRISHNAN V, et al. Development of sustainable microwave-based approach to recover glass fibers for wind turbine blades composite waste[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 179: 106107.
- [65] XU Xinyi, LIU Jiaming, FENG Jiachun, et al. Efficient separation and recycling of waste wind turbine blades through in situ generation of peroxyacetic acid[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2025, 222: 108490.
- [66] HAO Cheng, ZHAO Baoming, GUO Xiaolong, et al. Mild chemical recycling of waste wind turbine blade for direct reuse in production of thermoplastic composites with enhanced performance[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2025, 215: 108159.
- [67] KIM K W, LEE H M, AN J H, et al. Recycling and characterization of carbon fibers from carbon fiber reinforced epoxy matrix composites by a novel super-heated-steam method[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 203: 872–879.
- [68] NAHIL M A, WILLIAMS P T. Recycling of carbon fibre reinforced polymeric waste for the production of activated carbon fibres[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2011, 91(1): 67–75.
- [69] GASTELU N, LOPEZ URIONABARRENECHEA A, SOLAR J, et al. Thermo-catalytic treatment of vapors in the recycling process of carbon fiber-poly (benzoxazine) composite waste by pyrolysis[J]. *Catalysts*, 2018, 8(11): 523.
- [70] MAMANPUSH S H, LI Hui, TABATABAEI A T, et al. Heterogeneous thermoset/thermoplastic recycled carbon fiber composite materials for second-generation composites[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2021, 12(8) : 4653–4662.
- [71] BANDINELLI F, TITO E, PARISI E, et al. Recycling a carbon fiber-reinforced polyamide through 3D printing: A mechanical and physicochemical analysis[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 294: 112147.
- [72] LOPERA VALLE A, WILSON P, COLES S R, et al. Closed-loop recycling of reclaimed short carbon fibre reinforced polyamide composites[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 507: 145546.
- [73] MORALES IBARRA R, SASAKI M, GOTO M, et al. Carbon fiber recovery using water and benzyl alcohol in subcritical and supercritical conditions for chemical recycling of thermoset composite materials[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2015, 17(2): 369–379.
- [74] MUZYKA R, SOBEK S, KORYTKOWSKA WALACH A, et al. Recycling of both resin and fibre from wind turbine blade waste via small molecule-assisted dissolution[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 9270.
- [75] PIÑERO HERNANZ R, DODDS C, HYDE J, et al. Chemical recycling of carbon fibre reinforced composites in nearcritical and supercritical water[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008, 39(3) : 454–461.
- [76] HOWARTH J, MAREDDY S S R, MATIVENGA P T. Energy intensity and environmental analysis of mechanical recycling of carbon fibre composite[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 81: 46–50.
- [77] CHIU Y J, YING Taoming. A novel method for technology forecasting and developing R&D strategy of building integrated photovoltaic technology industry[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2012, 2012(1): 273530.
- [78] SORTE S, MARTINS N, OLIVEIRA M S A, et al. Unlocking the potential of wind turbine blade recycling: Assessing techniques and metrics for sustainability[J]. *Energies*, 2023, 16(22): 7624.
- [79] ALAVI Z, KHALILPOUR K, FLORIN N, et al. End-of-life wind turbine blade management across energy transition: A life cycle analysis[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2025, 213: 108008.
- [80] KARUPPANNAN GOPALRAJ S, DEVIATKIN I, HORTANAINEN M, et al. Life cycle assessment of a thermal recycling process as an alternative to existing CFRP and GFRP composite wastes management options[J]. *Polymers*, 2021, 13(24): 4430.
- [81] NOGAKI S, ITO L, NAKAKUBO T, et al. CO₂ emissions from blade waste treatments under wind power scenario in Japan from 2021 to 2100[J]. *Sustainability*, 2024, 16(5): 2165.
- [82] PENDER K, ROMOLI F, FULLER J. Lifecycle assessment of strategies for decarbonising wind blade recycling toward net zero 2050[J]. *Energies*, 2024, 17(12): 3008.
- [83] TYURKAY A, KIRKELUND G M, LIMA A T M. State-of-the-art circular economy practices for end-of-life wind turbine blades for use in the construction industry[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2024, 47: 17–36.
- [84] WEI Y, HADIGHEH S A. Cost benefit and life cycle analysis of CFRP and GFRP waste treatment methods[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 348: 128654.