

新能源产业纤维增强复合材料资源 循环利用技术现状与展望

焦 龙, 花 晔, 徐佳鑫, 杨郭昊, 章嘉杰, 陈欣慧, 金柔含, 胡艳军*

(浙江工业大学 能源与碳中和科教融合学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 纤维增强复合材料(Fiber-Reinforced Polymers, FRPs)由增强纤维与树脂基体复合而成,具有轻质、高强度、耐腐蚀、高力学性能等优异性能。随着 FRPs 在风电叶片(Wind Turbine Blades, WTBs)、风机壳体、光伏支架、新能源汽车配件、电池储能箱等新能源产业的大规模应用,大量 FRPs 退役的回收处置问题日益突出。由于退役 FRPs 的状态复杂、热固性树脂难分离以及回收体系尚不完善,如何实现 FRPs 高效、绿色回收,避免环境污染并实现资源循环利用,已成为亟待解决的关键问题。聚焦新能源领域 FRPs 的循环利用,系统梳理了其全流程回收技术,重点归纳了机械回收、热解回收(高温热解、流化床热解和微波辅助热解)和化学回收(化学溶胀和超临界流体法)3类主流工艺的技术创新,并讨论了纤维修复及界面改性等关键技术的发展现状与趋势,分析了再生纤维高值化利用和回收副产物的利用路径。最后,指出全链条技术集成、标准化体系建设与数字化智能管控是未来发展趋势,为攻关 FRPs 再生利用瓶颈并推动构建涵盖预处理、再生加工至高值应用的循环链生态体系提供了有益参考。

关键词: 纤维增强复合材料; 树脂; 回收技术; 改性技术; 应用路径

中图分类号: X705

文献标识码: A

Current Status and Prospects of Resource Recycling Technology for Fiber-Reinforced Polymers in the New Energy Industry

JIAO Long, HUA Ye, XU Jiaxin, YANG Guohao, ZHANG Jiajie,
CHEN Xinhui, JIN Rouhan, HU Yanjun*

(Science and Education Integration College of Energy and Carbon Neutralization,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Fiber-reinforced polymers (FRPs) are composed of reinforcing fibers and resin matrices, exhibiting excellent properties such as light weight, high strength, corrosion resistance, and superior mechanical performance. With the large-scale application of FRPs in the renewable energy industry, such as wind turbine blades (WTBs), nacelles, photovoltaic brackets, new energy vehicle components, and battery storage enclosures, the issue of large-scale FRP decommissioning and recycling has become increasingly prominent. The complex condition of decommissioned materials, the inherent difficulty in separating thermosetting resins, and the still-imperfect recycling infrastructure make it crucial to achieve efficient and environmentally friendly recycling, avoid environmental pollution, and realize resource recovery. This article focuses on recycling solutions for FRPs in the renewable energy sector, systematically reviewing the comprehensive recycling technologies and highlighting innovations in three main process types: mechanical, pyrolytic, and chemical recycling. Mechanical recycling

收稿日期: 2025-07-14

修回日期: 2025-08-15

接受日期: 2025-08-23

DOI: 10.20078/j.eep.20250901

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52170141); 智能电网国家科技重大专项资助项目(2024ZD0801700)

第一作者: 焦 龙(1992—), 男, 江苏淮安人, 副教授, 主要研究方向为新能源退役废弃物资源化利用。E-mail: jiaolong@zjut.edu.cn

*通讯作者: 胡艳军(1979—), 女, 辽宁沈阳人, 教授, 主要研究方向为新能源固废、有机固废等资源化清洁利用。E-mail: huyanjun@zjut.edu.cn

technology, through intelligent precision cutting and automatic sorting, effectively reduces fiber damage and enhances the application potential of recycled materials. Pyrolysis recycling technologies include high-temperature pyrolysis, fluidized bed pyrolysis, and microwave-assisted pyrolysis. By precisely controlling the temperature and reaction atmosphere, they significantly reduce thermal damage to fibers, achieving a fiber performance retention rate of over 90%; the resulting pyrolysis oil and gas are reused as valuable resources. Chemical recycling technologies, such as chemical swelling and supercritical fluid methods, achieve efficient fiber recovery by selectively breaking the chemical bonds at the resin-fiber interface. The research further highlights the development trends in fiber repair and interfacial modification technologies. Intermediate repair techniques such as sol-gel coating, plasma surface treatment, and electrochemical oxidation improve the interfacial performance between regenerated fibers and resin matrices by 15% to 40%, significantly enhancing the overall mechanical properties and durability of regenerated composite materials. In terms of high-value utilization pathways, regenerated fibers have been successfully applied in lightweight automotive components, aerospace structures, and components for ultra-large deep-sea wind power equipment, through innovative additive manufacturing technologies and the combined use of interfacial compatibilizers, significantly promoting the large-scale application of regenerated materials in high-end sectors. In addition, by treating by-products such as pyrolysis oil and gas through catalytic cracking, hydrodeoxygenation, and Fischer-Tropsch synthesis, high-value-added aromatic chemicals, fuel oils, and high-purity hydrogen can be obtained, further enhancing the economic benefits of resource recovery. Lastly, the article proposes recommendations for full value-chain integration, the development of standardized systems, and intelligent digital control, emphasizing the need to establish a circular ecosystem that spans front-end pretreatment, intermediate-stage repair and regeneration, and back-end high-value applications to support the sustainable development of the renewable energy industry.

Keywords: FRPs; Resins; Recycling technologies; Modification technologies; Application pathways

0 引言

FRPs 融合了增强纤维的高强度与树脂基体的易成型特性,具有轻质、高强度、耐腐蚀等优异性能以及卓越的比力学性能。因此,在风电、光伏、新能源汽车、航空航天、电子电气及建筑等多个领域得到广泛应用,且应用规模持续扩大。同时,制造技术的进步不仅降低了纤维增强复合材料生产成本,还提升了其性能,进一步加速了其在各领域的普及。然而,FRPs 应用规模的增长也直接导致了退役 FRPs 数量的同步攀升。在此背景下,退役 FRPs 的回收处理问题日益凸显。由于 FRPs 回收难度大、成本高,若处理不当,可能造成有害物质扩散、土地资源浪费、挥发性有机物(VOCs)释放,引发土壤、大气等环境污染,并将导致碳纤维、玻璃纤维、树脂高分子材料等资源浪费,给可持续发展带来严峻挑战^[1-4]。

图 1 为 2010—2050 年全球纤维增强复合材

料的累积退役量。随着风力发电、光伏新能源设备及汽车轻量化对新型复合材料需求的持续增加,FRPs 的消费量及其退役量均呈上升趋势。据华经产业研究院《2021—2026 年中国碳纤维行业发展监测及投资战略规划研究报告》统计,到 2025 年,仅碳纤维增强复合材料(CFRP)退役量将达到 20 万 t^[5]。其中,早期安装的风机叶片已陆续进入退役期,未来几年叶片退役量将呈现指数级增长,预计到 2028 年叶片退役总量将达 41.3 万 t,2029 年增至约 75.2 万 t。预测显示,到 2042 年,我国累计退役风机叶片总量将超 2 000 万 t。然而,到 2050 年,仅风电行业的碳纤维和玻璃纤维增强复合材料(GFRP)总废弃量将达到 4 340 万 t^[6]。汽车行业同样面临挑战,随着大量临近使用年限(通常为 10~15 年)的车辆报废,车用 FRPs 部件的退役量也显著增加。在航空航天领域,复合材料应用比例较高,例如波音 787、空客 A350、中国商飞 C929 等机型中,FRPs 应用占比均超过 50%^[7]。

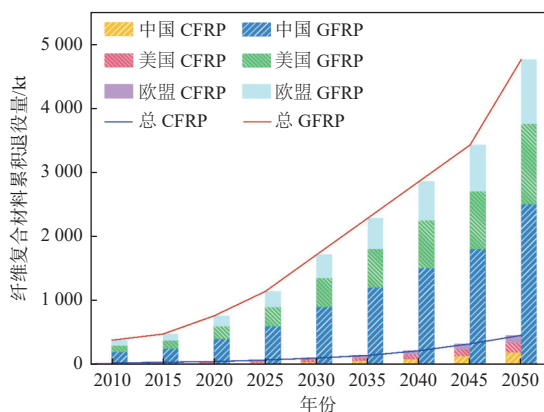


图 1 2010—2050 年全球纤维增强复合材料累积退役量

Fig. 1 Global cumulative end-of-life volume of fiber-reinforced polymers from 2010 to 2050

在风电机组构成中(图 2), FRPs 的轻量化、高强度和耐腐蚀特性使其应用于叶片、机舱罩、其他结构件等关键部件, 为风电行业的发展提供了坚实的材料基础。

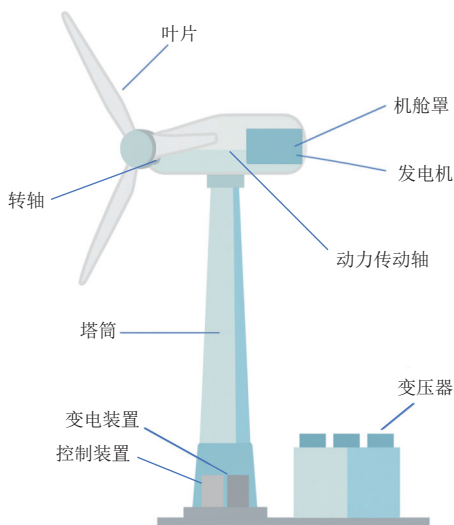


图 2 风电发电机组结构简图

Fig. 2 Schematic structure of a wind turbine generator

1 退役纤维增强复合材料资源化与标准化需求

1.1 退役 FRPs 状态

退役后的 FRPs 状态会发生诸多变化: 表面可能出现风化、磨损、划痕等现象; 内部在长期应力作用下可能产生微裂纹、分层等结构缺陷, 从而导致 FRPs 性能下降。树脂基体虽然化学结构相对稳定, 但长期暴露于自然环境也会发生老化和降解。在结合机制层面, 刘贺晨等^[8]通过实验测试

发现, 热、力、化学等多因素的长期作用可能导致纤维与树脂界面结合力逐渐弱化, 进而降低材料的力学性能和耐环境性能。

1.2 退役 FRPs 资源化利用难点

FRPs 在回收技术、环境保护等方面均面临诸多挑战。其中, 热固性树脂 (Thermosetting Resin) 基体在固化后形成的刚性三维网状交联结构^[9], 虽赋予材料优异的物理强度和化学稳定性, 但也使其难以通过熔融等方式再加工。同时, 增强纤维与树脂的紧密结合也大大增加了二者分离回收难度。

目前, FRPs 的循环利用体系尚不完善, 各环节衔接不畅, 严重影响了其回收利用的经济性和可行性, 制约了该材料在能源领域可持续应用与创新发展。退役纤维增强复合材料若处置不当, 将给环境带来巨大压力。例如, 填埋会占用大量土地, 并存在污染土壤和地下水的风险; 焚烧则可能释放二噁英、VOCs 等有毒有害气体, 影响空气质量并危害人体健康。此外, 传统回收技术在处理纤维增强复合材料时存在诸多局限性: (1) 机械回收法: 在破碎时易导致长纤维断裂为短纤维, 造成纤维机械损伤, 并使断裂纤维和树脂混合, 导致纤维强度和模量降低, 再利用范围受限^[10]; (2) 化学回收法: 常需使用强酸、强碱或强氧化性溶剂作为处理剂^[11-13]。此类溶剂腐蚀性强, 且存在溶剂回收较困难、成本较高、易造成二次污染等问题; (3) 热解回收法: 能耗较高, 并可能产生有害气体。若处理过程中纤维与氧气接触形成氧化层, 还会进一步降低纤维强度和模量^[14]。

1.3 全链条标准化亟待完善

随着我国对环境保护和资源循环利用重视程度日益加深, 以及退役 FRPs 数量呈现快速增长态势, 相关部门陆续出台了一系列政策法规, 明确限制复合材料废弃物的填埋与焚烧处置。例如, 工信部发布的建材行业标准《纤维复合材料固体废物分类管理指南》(JC/T 2736—2023) 要求企业优先采用资源化利用技术, 并把直接填埋、焚烧列为不推荐处置方式, 同时积极鼓励企业开展回收利用技术的研发。这些政策措施有效规范了退役复合材料的处理流程。

以风电行业叶片复合材料回收利用为例, 国家多部委出台的若干政策强调, 需加快构建新能源领域废弃物循环利用体系, 推动退役风电叶片 (rWTB) 及光伏设备中 FRPs 循环利用。截至目

前,相关部门已制定并发布了多项与 FRPs 回收利用相关的国家标准、地方标准和行业标准(表 1)。

表 1 纤维增强复合材料回收领域部分政策文件、国家标准、地方标准和行业标准
Table 1 Policy documents, national standards, local standards, and industry standards in the field of fiber-reinforced polymers recycling

实施时间	名称	部门	类型
2024-02-06	《关于加快构建废弃物循环利用体系的意见》	国务院办公厅	政策文件
2023-06-05	《风电场改造升级和退役管理办法》	国家能源局	政策文件
2023-07-21	《关于促进退役风电、光伏设备循环利用的指导意见》	国家发展改革委等六部委	政策文件
2022-07-07	《工业领域碳达峰实施方案》	国家发展改革委等三部委	政策文件
2024-12-31	《风能发电系统风力发电机组废弃纤维复合材料回收方法》 (GB/T 45195—2024)	全国风力发电标准化技术委员会	国家标准
2024-04-01	《碳纤维增强复合材料耐湿热性能评价方法》 (GB/T 43113—2023)	全国碳纤维标准化技术委员会、 全国纤维增强塑料标准化技术委员会	国家标准
2021-10-01	《汽车用碳纤维复合材料(CFRP)覆盖部件通用技术要求》 (GB/T 39491—2020)	全国纤维增强塑料标准化技术委员会	国家标准
2019-01-01	《超高温氧化环境下纤维复合材料拉伸强度试验方法》 (GB/T 36264—2018)	全国纤维增强塑料标准化技术委员会	国家标准
2024-12-01	《玻璃纤维增强复合材料筋基坑工程应用技术规程》 (DB32/T 4783—2024)	江苏省市场监督管理局	地方标准
2025-07-01	《废弃纤维复合材料回收技术规范》(JC/T 2827—2024)	建材工业综合标准化技术委员会	行业标准
2024-11-24	《风力发电机再利用技术规范》(NB/T 11596—2024)	能源行业风电标委会风电电器设备分标委	行业标准

然而,现有标准体系仍需进一步完善:(1)覆盖范围相对有限:当前标准主要聚焦于建筑、风电等特定领域,缺乏对纤维增强复合材料全领域、全生命周期产业链及完整技术链的系统规范;(2)回收技术规范不足:现有标准主要针对机械回收、热解回收、溶剂降解法等特定技术或处置场景提供指导,但对全链条多技术协同以及新技术应用推广方面仍较为欠缺。这些不足在一定程度上制约了产业的进一步发展和突破。

2 退役 FRPs 前端处置消纳技术

目前,针对 rWTB、光伏支架等退役 FRPs 的回收,主要包括机械处理、热解处理及化学处理等多种技术路线。表 2 概括了各类回收技术的主要特点、适用范围及典型研究案例。然而,现有技术在工艺连续性、能耗控制、纤维完整性与材料再利用价值之间仍存在难以平衡的矛盾。因此,针对不同类型复合材料的物理化学性质及其再生产物的预期用途,需选取合适的回收方法,并着重在设备自动化、污染控制以及产物高值化等方面进行综合优化。

2.1 机械处理

机械回收法通过物理外力对退役 FRPs 材料进行切割粉碎,核心流程涵盖切割、撕碎、粉碎及分离分选等环节。然而,该方法分离纤维与树脂基体难度高,且加工过程导致的纤维性能劣化,使回收得到的短纤维难以用于高负载结构件。尽管如此,机械回收技术具备大规模处理能力和较低的能耗优势。近年来,通过引入高效切割技术以及智能化分选系统,已能实现芯材(如聚氯乙烯、巴沙木)与纤维的高效分离,从而提升了再生材料的应用潜力。需注意的是,机械处置过程中会产生严重的纤维和树脂扬尘,因此必须配备抑尘系统。

切割工艺常用设备包括线锯、圆锯与水射流等。线锯结合水冷、水除尘等系统,可实现高效、低粉尘的平整切割,但设备固定性较强,应用灵活性受限。圆锯适用于复杂结构的多向切割,但需配套除尘设施^[15]。水射流技术利用高压水流进行冷态切割分离,能有效避免材料热损伤。

撕碎工艺主要采用双轴剪切式破碎机和移动式破碎站。双轴剪切式破碎机通过液压驱动,可

表 2 纤维增强复合材料回收技术对比
Table 2 Comparison of fiber-reinforced polymers recycling technologies

回收方法	特点	局限性	回收材料典型应用领域
机械处理法	物理切割与粉碎, 工艺简单, 能耗低	纤维损伤严重(强度下降40%~50%), 产物仅适用于低值应用(如填料、建材)	建筑模板、汽车内饰、低端填料等
高温热解法	在惰性气氛下热分解, 有机基体转化为油气, 纤维保留率高	表面残碳多, 高能耗, 玻璃纤维高温析晶导致性能下降	碳纤维复合材料(航空航天、汽车等)
流化床热解法	连续处理效率高, 适用混杂材料, 传热效率高	纤维摩擦导致长度缩短, 需大量惰性气体, 成本高	混凝土增强纤维、隔音板材等
微波辅助热解法	加热均匀高效, 温度可控, 纤维损伤小	设备投资高, 需微波吸收剂(如碳化硅)优化效率	高性能碳纤维回收(航空航天、军工等)
化学溶胀法	温和反应条件, 纤维强度损失小	规模化应用困难, 溶剂回收工艺复杂, 处理周期长	高价值碳纤维(航空航天、精密部件等)
超临界流体法	渗透性强, 适合交联树脂, 保留纤维结构	设备耐压要求高, 规模化成本高	热固性树脂(环氧、不饱和聚酯等)

快速处理大体积纤维复合材料;其多组切割轮能实现粗破碎,但纤维损伤较大。移动式破碎设备则显著提升了现场处理的灵活性与适应性。

粉碎工艺通过锤磨机与球磨机等协同作用,将撕碎后的物料进一步破碎,使纤维与树脂基体分离并粉碎为细小颗粒;通过调控粉碎参数可控制最终产物的粒径分布。回收得到的原料主要应用于建筑模板、汽车内饰等对再生复合材料性能要求较低的领域。

为提升机械回收技术水平,于雪梅等^[16]开发了基于金刚石绳锯的高效切割装置,采用模块化横纵切割结构及变频控制,实现了 50 m 级叶片 6 h 内分段,且切口平整误差小于 2 mm。仲秋成等^[17]针对超长叶片,提出了由挖掘机搭载金刚石圆盘锯的剪切方案,通过优化液压参数,将提升切割效率 40% 以上,同时锯片使用寿命延长了 3 倍。ZHANG 等^[18]从全生命周期角度出发,采用水射流切割技术将退役叶片转化为高长径比 GFRP,用于替代建筑结构件(替代率 98%)。该方法产生的每吨废料可减少 2.4 t CO₂ 排放,其处理成本 and 环境影响均显著低于填埋与焚烧处置。此外,EZHILAN 等^[19]将叶片机械破碎得到的短切玻璃纤维,与回收的聚丙烯(Polypropylene, PP)复合制备 3D 打印线材。通过单螺杆挤出与熔融沉积成型技术协同,实现了纤维定向与打印方向调控,使复合细丝的拉伸强度提升 30% 以上。

总体而言,机械回收法可以在切割环节提升自动化水平,实现精准切割并降低人工成本;在粉

碎阶段优化设备参数,以控制纤维损伤程度;在产物应用方面拓展高值化利用途径。同时,该技术的进一步发展需加强各环节的协同优化,建立标准化的处理流程,开发配套的除尘、降噪和污水净化技术,从而有效提升整体回收效率和环境效益。

2.2 热解处理

热解回收法是在无氧或惰性气氛下,通过高温热分解选择性降解聚合物基体,实现纤维增强复合材料的回收处置。作为当前热固性复合材料绿色回收中技术较为成熟且工业化潜力显著的路径,该工艺可通过精准调控温度(400~800 ℃)、反应气氛与保温时间,将树脂基体高效转化为气态烃、热解油和固体残炭。得益于热解反应的选择性物理分解特性,在优化工艺条件下回收的碳纤维与玻璃纤维可保留 90% 以上的原始力学性能。这为实现 FRPs 高值化再利用提供了重要的技术支撑。

2.2.1 高温热解法

高温热解法因工艺简单、设备成熟,广泛应用于回收废弃 CFRP 和 GFRP。该反应一般在 450~800 ℃ 温度范围内进行,适用于环氧树脂、不饱和聚酯等热固性树脂基体。英国 ELG Carbon Fibre 公司与美国波音公司、欧洲空中客车公司合作,将热解回收的碳纤维用于制造飞机内饰件和汽车轻量化部件。日本三菱丽阳公司与日本制钢所(Japan Steel Works, JSW)合作,将热解回收的碳纤维重新用于风电叶片主梁制造,其拉伸强度保

留率达 85% 以上。然而,该技术仍面临挑战。在 GFRP 热解回收中,玻璃纤维在高温下易发生析晶与硅羟基缩合,导致拉伸强度下降 30%~50%,且该纤维修复困难^[20]。ONWUDILI 等^[21]设计了半开放式连续流加热炉,可在可控气氛中稳定回收无焦残留的碳纤维。回收纤维用于制备低密度聚乙烯复合材料,其性能接近原生纤维复合材料。NAQVI 等^[22]优化了热解和氧化两步热处置工艺,不仅能保持碳纤维 90% 以上的原始力学性能,还能高效产出富含苯乙烯的液态油和可燃气体。此外,YOUSEF 等^[23]在处理碳纤维/不饱和聚酯体系时,在 500 °C 下使聚酯树脂分解,产物分别为生成率 15.23% 和 6.83% 的富含苯乙烯的热解油和热解气;随后在 450 °C 下氧化净化纤维表面,提升纤维力学性能。

在商业应用中,高温热解法虽然可以有效回收具有较高价值的碳纤维和玻璃纤维,但存在运行能耗较高、纤维热损伤较严重等障碍。因此,该技术亟须改进优化。

2.2.2 流化床热解法

流化床热解法在气流中快速加热进料,将废弃 FRPs 破碎料在流态化热载体(如石英砂)中加热分解,有机污染物如矿物油和饰面涂料会随聚合物基体挥发,而金属嵌件等无机固物会沉入流化床中,并在床层重新分级去除^[24]。PICKERING 等^[25]研究指出,流化床热解法适合连续处理混杂复合材料,并同步分离金属嵌件,但在该过程中颗粒间的机械摩擦会导致纤维平均长度缩减约 45%,纤维力学强度下降约 50%。KENNERLEY 等^[26]指出由于床层颗粒与纤维之间存在剧烈摩擦,玻璃纤维强度大幅下降。YIP 等^[27]发现回收的碳纤维长度显著缩短,拉伸强度保留率为 75%。尽管如此,流化床热解工艺因其连续性和高传热系数仍具有一定应用前景。MENG 等^[28]通过生命周期分析,指出碳纤维流化床回收可以显著降低能耗。此外,使用再生碳纤维(rCF)取代基于原始碳纤维(vCF)的复合材料,也能大幅降低材料制造能耗水平,处理每千克 CFRP 可节省 65~330 MJ 能量。

流化床热解法具有优异的传热效率、连续化处理能力和对混杂材料的适应性,在处理含金属嵌件或复杂结构的废弃复合材料时展现出独特优势。然而,流化过程中颗粒与纤维的剧烈摩擦会导致纤维平均长度缩减,力学强度下降,限制了再生纤维的高值化利用。未来可通过优化流化介

质、开发低摩擦床层设计及智能化控制系统来提升其技术经济性。

2.2.3 微波辅助热解法

微波辅助热解法是利用微波电磁场直接作用于 FRPs 中的化学键,使其吸收微波后高速振动并摩擦生热,进而从材料内部实现快速加热。相较于传统高温热解,该方法能精准控制热解温度,材料热解温度可相对降低 50~100 °C。JIANG 等^[29-30]证明与传统的 CFRP 热裂解相比,微波热解反应时间可缩短 56.67%,且碳纤维回收率可提高 15%,因此可有效减少高温对纤维表面的热损伤。微波穿透特性可避免传统外源加热导致的纤维-树脂界面梯度热应力,提升回收的碳纤维的拉伸强度。JULIAN 等^[31]研究表明微波热解处理温度为 183 °C,显著降低能耗 5~10 MJ/kg,并缩短处理时间,可更好地保留回收纤维的机械性能。LESTER 等^[32]在微波功率 3 kW、氮气氛围下处理碳纤维复合材料,成功将树脂含量从 40.0% 降至 2.8%,回收的纤维表面清洁,力学性能接近原始纤维,抗拉强度为 3.26 GPa。

2.3 化学处理

化学回收法通过化学解聚反应分离纤维与树脂,即用特定的化学手段把 FRPs 中的树脂基体“剪碎”,使树脂分解成小分子物质,从而释放出纤维。相对于机械回收法和热解回收法,该方法能最大限度地保留纤维的力学性能,尤其是碳纤维的拉伸强度保留率通常超过 90%,同时纤维表面化学特性更有利于二次复合、加工再利用,该方法适用于回收航空航天等领域的高价值、高品质纤维复合材料。

2.3.1 化学溶胀法

化学溶胀法利用溶剂分子渗透扩散作用破坏聚合物的交联网络,通过物理溶胀和化学键断裂协同作用实现纤维-树脂界面分离,如图 3 所示。其中,物理溶胀依靠溶剂分子渗透增大分子链间距,从而削弱界面结合;化学键断裂则通过选择性断裂交联键(C—O、C—N 等共价键)实现材料解构。化学溶胀法的关键控制参数包括溶剂类型(醇类、酸、碱、酚等)、反应温度和溶胀时间。该方法具有反应条件温和(常压、中低温)、纤维损伤小等突出优点,但也存在溶剂回收困难、二次污染风险和处理周期较长等技术瓶颈。

溶胀处理不仅可使环氧树脂形成多孔结构以改善热传递,还可通过乙酸分解产生的氧自由基加

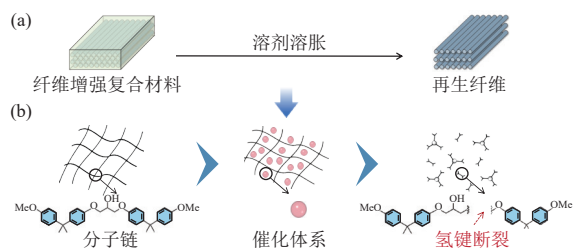


图3 (a)纤维增强复合材料溶胀示意图, (b)纤维增强复合材料溶胀微观机理图

Fig. 3 (a) Swelling process of fiber-reinforced polymers. (b) Microscopic mechanism of swelling in fiber-reinforced polymers

速苯环的开环反应,从而促进树脂降解。XU等^[33]的研究表明,在350℃下使用乙酸可实现76.8%的树脂分解率,同时有效地抑制纤维表面缺陷扩散,使得回收玻璃纤维的拉伸强度较未经处理回收纤维的拉伸强度提升27.5%。JEONG等^[34]提出了一种基于氧化剂间氯过氧苯甲酸(mCPBA)的低温化学回收技术:在40℃的温和条件下,mCPBA能高效断裂树脂的化学键,6h内实现树脂的完全降解;回收碳纤维的拉伸强度达4.4 GPa,相当于原始纤维拉伸强度的93.6%。YANG和LIU等^[35-36]分别采用聚乙二醇/氢氧化钠催化体系和氯化锌/乙醇催化体系,在常压、200℃条件下高效分解环氧树脂与纤维,回收的碳纤维表面光滑且机械性能优异。MU等^[37]开发了一种高沸点乙二醇与二甲基甲酰胺的混合溶剂体系,树脂降解率接近100%。他们还采用“减压蒸馏技术”对分解后的混合溶液进行分离,成功回收了环氧低聚物和溶剂。

化学溶胀法的关键环节是如何通过溶剂调配实现对树脂与纤维界面化学键的定向破坏。AHRENS等^[38]开发了一种钌催化的C—O键断裂方法,通过靶向断裂氢键,在160℃下选择性分解胺固化环氧树脂;回收的玻璃纤维和碳纤维表面无树脂残留,其力学性能与原始纤维相当。

随着研究的深入,化学溶胀法的技术路径不断精细化,由单一试剂向组合试剂转变,树脂溶胀效率进一步提升,并在溶剂+催化剂的协同体系下发展出了创新混合溶剂体系。

2.3.2 超临界流体法

超临界状态下流体(如H₂O、CH₃OH等)介于液相与气相的中间态,避免了一般溶剂因黏度过

大导致的渗透效率低下问题。通过外加高压使溶剂处于超临界状态,溶剂快速渗入复合材料内部,断开树脂分子链。该反应介质(水/醇类等)不仅具有极强的溶解能力,更可作为反应物或反应促进剂,直接参与解聚反应,尤其对缩聚型聚合物(如环氧树脂、不饱和聚酯等)表现出优异降解能力。

PIÑERO HERNANZ等^[39]发现超临界1-丙醇在中低温下能高效降解环氧树脂,树脂降解率达95.2%,回收碳纤维强度保留率达99%,并且通过添加碱催化剂(氢氧化钾),反应温度可降至275℃。OKAJIMA等^[40]开发了超临界甲醇选择性解聚CFRP环氧树脂的方法,通过控制反应条件(最优工况:270℃/8 MPa/90 min),实现了环氧化物和固化剂之间酯键的精准断裂以及树脂主链的完整保留,碳纤维拉伸强度损失仅7%~9%。OKAJIMA和SAKO^[41]通过调控反应压力(2~14 MPa)及温度350℃,利用超临界丙酮回收CFRP,研究发现环氧树脂的分解效率随反应时间和压力的增加而提高,最高效率可达95.6%。KHALIL^[42]对17种超临界流体在CFRP废弃物管理中的能耗进行了评估,发现超临界水作为溶剂的能耗最低(9.5 MJ/kg),而超临界1-丙醇的能耗最高(69.45 MJ/kg)。基于能耗差异,该研究进一步强调,要进一步开发更环保的超临界流体及成套装备。

3 中端纤维修饰技术

通过前端处置技术获得的再生纤维,其表面往往存在不同程度的损伤。例如,机械回收导致的纤维断裂与表面划痕;热解过程残留的焦炭层或氧化层;化学溶剂处理则可能改变纤维表面官能团。这些损伤会显著降低纤维的力学性能,并削弱其与树脂基体的界面结合力,进而劣化再生复合材料的整体性能。因此,为实现再生纤维的高值化再利用,亟须通过中端纤维修饰技术对其进行修复与功能化处理。表面粗糙化或化学修饰能够增加纤维与树脂的机械咬合和化学键合作用,从而提升复合材料的界面性能。然而,由于碳纤维和玻璃纤维等基体材料的化学性质不同,其改性策略需区别对待。对于碳纤维,改性主要针对其表面惰性等问题,常采用物理形貌调控、化学官能团引入及功能化涂层构筑等手段;对于玻璃纤维,改性则侧重于提升其表面活性,通过物理沉积改性、化学偶联剂修饰及表面纳米结构构建等

方法,在保持成本优势的同时优化性能。

3.1 碳纤维改性

相较于传统金属材料,虽然碳纤维具有轻量化、高强度的特性,但由于生产工序中的碳化等作用,其表面极性官能团匮乏,与聚合物基体的界面相容性较差,直接影响了再生 CFRP 的性能。目前物理改性方法可分为涂层法、等离子体法等,化学改性方法可分为电化学处理法、纳米管改性法等。

在物理改性方面,涂层法是通过在纤维表面构建多尺度结构。WANG 等^[43]开发了一种溶胶-凝胶工艺对碳纤维表面涂覆陶瓷涂层,改性后的碳纤维强度保持了原始碳纤维强度的 96.8%。等离子体法是采用高能粒子轰击纤维表面,并在纳米尺度进行刻蚀。SUN 等^[44]采用了一种两步法对碳纤维进行改性:首先利用常压等离子体对纤维表面进行处理,随后通过乙醇热解沉积技术进行表面修饰,改性后的碳纤维拉伸强度提升 15.7%,同时以其制备的复合材料界面剪切强度提升了 27.9%。ZHOU 等^[45]通过原位生长沸石咪唑酸盐框架-8 并结合 γ 射线辐照技术,实现了碳纤维表面与内部结构的协同修复,经 100 kGy 辐照后,由碳纤维制备的复合材料力学性能提升 19.99%。

在化学改性方面,电化学处理法是通过在碳纤维表面引入含氧官能团(如羧基、羟基和羰基等),在材料再生过程中与环氧树脂等基体中的环氧基团发生化学反应,形成稳定的共价键连接。此外,含氧官能团可以改善树脂基体在纤维表面的润湿性,加强树脂与碳纤维间的黏附结合效果。WANG 等^[46]采用芬顿试剂($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$)温和氧化法,在保持纤维强度前提下使表面羧基密度增加 3 倍,显著提高了其比表面积和亲水性。QIAN 等^[47]研究了电化学氧化法,发现当电流密度达 2.0 A/m^2 时,超高模量碳纤维表面石墨层发生交联反应,使得复合材料层间剪切强度提升 12.8%。

纳米改性技术近年展现出独特优势。HU 等^[48]采用溶胶-凝胶法在碳纤维表面沉积多壁碳纳米管,使复合材料界面剪切强度提升近 40%。TRUKHINOV 等^[49]开发的勃姆石纳米片水热生长技术,在纤维表面形成类鱼鳞状结构,其增强塑料的拉伸强度提升 56%。ZHANG 等^[50]通过 DA (Diels-Alder) 共价键可逆反应,赋予纤维界面自修复能力,经三次损伤-修复循环后,界面强度仍保持 90% 以上。

3.2 玻璃纤维改性

玻璃纤维表面富含 Si-OH , 化学活性高,但是表面光滑,缺乏可与树脂反应的活性官能团,因此,玻璃纤维与树脂的相容性较差。目前物理改性法主要为涂层法,化学改性法主要为偶联剂修饰及表面纳米结构构建等。

在物理改性领域,聚合物涂层技术通过物理包覆或物理沉积赋予纤维多功能特性。无机涂层体系近年来快速发展,碳基与陶瓷涂层成为研究热点。刘造芳等^[51]开发的水性聚氨酯涂层使玻璃纤维织物拉伸强度提升 30%,同时实现阻燃与抑尘功能。针对极端环境,周应学等^[52]通过浸渍-烧结工艺在玻璃纤维表面涂覆聚四氟乙烯 (PTFE) 层,其疏水角达 150° ,在 $-40\sim 60^\circ\text{C}$ 工况下该玻璃纤维仍保持稳定界面性能。FANG 等^[53]利用溶胶-凝胶法在玻璃纤维表面构筑石墨烯涂层,电导率提升至 24.9 S/cm ,为智能监测型叶片提供导电网络。黎鹏等^[54]研究表明氮化硼涂层可使玻璃纤维在 800°C 下强度保持率超过 50%,显著提升再生纤维的耐高温性能。

在化学改性领域,化学偶联剂改性玻璃纤维通过分子桥接实现纤维-基体键合强化。孔鹏等^[55]发现二苯基甲烷二异氰酸酯的异氰酸根基团与玻璃纤维表面羟基反应,生成氨基甲酸酯键,使复合材料层间剪切强度提升 30%,显著优于硅烷偶联剂 KH570 改性(剪切强度提升仅 9%)。此类共价键改性虽效果显著,但传统硅烷偶联剂在湿热环境下存在易水解的问题。SIDDIQUI 等^[56]通过研究碳纳米管-环氧树脂 (CNT-epoxy) 纳米复合涂层对玻璃纤维的增强效果,发现 0.3% CNT-epoxy 涂层可以使单根玻璃纤维强度提高 25%。

化学涂层由于成本低、操作简便、对基体选择范围广、镀层均匀等优点而广泛应用。XU 等^[57]通过化学镀铜工艺在玻璃纤维表面制备了高导电性铜涂层(图 4),优化了乙二胺四乙酸二钠用量(11 g)、温度($40\sim 60^\circ\text{C}$)等调控参数,获得连续且致密的铜层,体积电阻率 $0.001 \Omega\cdot\text{cm}$ 。导电纤维可作为填料制备聚合物基复合材料,并在电磁屏蔽领域、微电子封装等领域具有应用潜力。未来玻璃纤维改性发展方向将专注低温绿色工艺开发,将改性技术作为全链条回收的关键一环,推进纤维增强复合材料定制化设计制造及高值化利用。

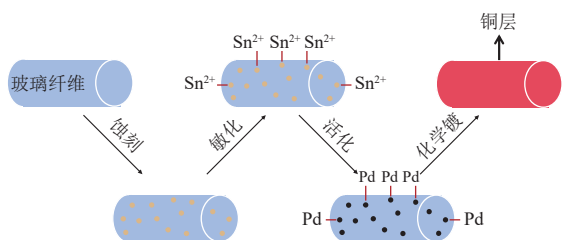


图 4 玻璃纤维表面化学镀铜示意图

Fig. 4 Schematic illustration for the electroless plating of copper on glass fibers

4 后端再生纤维高值化利用

经中端纤维修饰技术进行表面修复与功能化改性的再生纤维,其力学性能得到提升,尤其是与树脂基体的界面相容性显著增强。这为再生纤维的高值化再利用奠定了基础,并支撑了纤维增强复合材料资源循环经济的发展。当前研究主要聚焦于两大技术路径(图 5):一是通过复合材料再制备工艺创新,推动再生纤维在高端结构材料中的应用;二是开发面向建筑领域的规模化应用技术,拓展再生纤维在功能建材中的多元化应用。

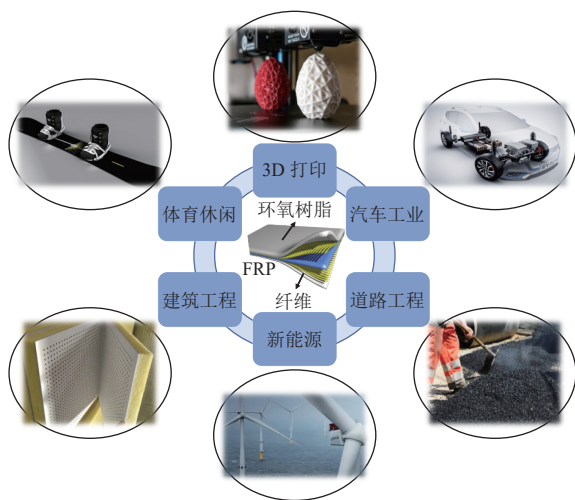


图 5 再生纤维利用路径

Fig. 5 Pathways for utilizing recycled fibers

4.1 纤维增强复合材料再制备

再生纤维制备高性能复合材料是提升资源循环效率的重要方向。研究表明,再生纤维高值化利用需结合工艺创新与界面改性,以平衡材料性能与成本。针对 rCF 因回收过程导致的纤维长度分布不均和材料表面活性降低等问题,刘威豪^[58]以聚醚醚酮为基体,开发再生碳纤维复合材料熔融沉积增材制造工艺,可有效提高 3D 打印构件强度,丰富打印构件功能。WU 等^[59]提出双复合材

料增材制造技术,将 rCF 与玻璃纤维结合,使复合材料的弯曲模量和抗弯强度分别提升 59% 和 76%。

此外,再生纤维与基体的弱界面结合性是导致纤维增强复合材料性能受限的关键因素。EDSON 等^[60]采用马来酸酐接枝的苯乙烯-(乙烯-丁烯)-苯乙烯和乙烯-丙烯-二烯作为相容剂,改善再生碳纤维与 PP 基体的界面结合效果,显著提升复合材料的冲击强度、热稳定性和弹性模量。ONWUDILI 等^[21]将热解后回收的纤维与多种相容剂混合,制备低密度 PE 再生复合材料,显著改善了复合材料的机械性能。

随着“双碳”目标的深入推进,再生纤维复合材料有望在汽车轻量化、超大型深远海风电设备部件、航空航天等高端领域实现规模化应用,为循环经济发展提供关键技术支撑。

4.2 再生纤维建材化利用

再生纤维在建筑材料中的高值化利用为废弃物资源化利用提供了关键路径。在混凝土领域, YAZDANBAKHSI 等^[61]将 WTBS 破碎为细长针状颗粒替代粗骨料,研究表明掺入体积分数为 10% 的再生纤维可显著提升混凝土韧性。在沥青路面应用方面, LI 等^[62]将退役叶片粉末与丁苯橡胶复合作为改性剂,使改性沥青混合料的残余马歇尔稳定性提升至 95.6%。LAN 等^[63]通过协同添加 rWTB 及其粉末,定向优化沥青砂浆的微观结构,显著提升了材料低温抗折性能。在石膏基材料中, GONÇALVES 等^[64]利用再生玻璃纤维增强石膏,发现添加质量分数为 6% 再生纤维可使其抗弯强度提高 66%。崔冉冉等^[65]通过硅烷偶联剂改性再生纤维,改善了其与石膏的界面黏结,从而使复合材料抗压强度提升 9.0%。综上,再生纤维在建筑材料的应用中不仅实现了废弃物资源化,还通过增强材料的韧性、耐久性等关键性能,拓展了应用边界,为低碳建筑提供了创新解决方案。

5 后端热解油和热解气回收利用

在 FRPs 的热解回收过程中,除再生纤维外,热解油与热解气作为主要副产物,其高效利用是提升资源化经济性与环保性的关键,热解油和热解气回收流程如图 6 所示。当前,制约热解油与热解气高效利用的瓶颈问题主要包括:成分波动性大、杂质干扰及经济性不足。例如,环氧树脂与聚酯树脂的热解油组分差异显著,需开发定制化精炼工艺;热解气中的硫化物需通过氧化锌吸附

等方法脱除。FRPs 热解油/气的未来发展方向包括开发智能化分离系统,利用机器学习优化工艺参数,发展热解油/气与生物质衍生油的协同处理与利用技术,以降低精炼成本^[66-67]。通过技术创

新与产业链整合,热解油与热解气有望成为 FRPs 循环经济关键资源载体,为实现该产业碳中和及资源循环利用提供有力支撑。

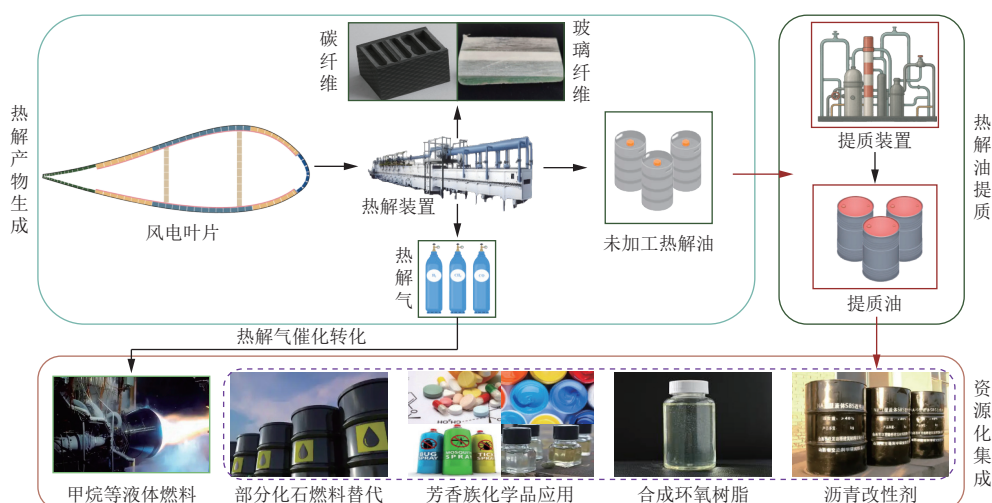


图 6 热解油和热解气回收示意图

Fig. 6 Pyrolysis oil and pyrolysis gas recovery process

5.1 热解油的资源化利用

热解油是树脂基体在高温缺氧条件下裂解生成液态有机物,其主要成分为苯酚、芳香烃、醛类及少量焦炭颗粒。热解油资源化路径可分为能源化与材料化两类。在能源化利用方面,热解油具有较高的热值(30~40 MJ/kg),可直接作为工业燃料替代柴油或重油^[68]。例如德国和丹麦等地水泥厂采用热解油替代部分化石燃料,可减少 15%~20% 的化石燃料使用量。为进一步提升热解油的利用效率,催化裂化与加氢脱氧技术受到广泛关注^[69-70]。研究表明,采用 ZSM-5 分子筛催化剂催化热解 rWTB 树脂,可将其转化为增值芳香族化学品^[71]。加氢处理可有效脱除热解油中的氧、氮等杂原子,进而提升油品稳定性^[72]。在热解油材料化利用方面,该路径聚焦于开发高附加值产物。例如日本三菱公司实验室通过蒸馏分离提取苯酚单体并重新合成环氧树脂,其再生树脂拉伸强度可达原生树脂的 85%。此外,热解油经静电纺丝与高温碳化可制备多孔碳纤维或石墨烯材料。美国橡树岭国家实验室利用该技术开发的碳材料,比表面积达 1 200 m²/g,在超级电容器领域展现出应用潜力^[73]。

5.2 热解气的综合利用

热解气主要由氢气、甲烷、CO 及少量 CO₂ 组成,其利用模式主要包括能源回用与高值转化。

在能源回用领域,氢气的高效提取是研究热点,采用变压吸附技术可使氢气纯度超 99%。在高值转化领域,热解气中的 CO 与氢气可通过费托合成转化为甲醇或液态烃类燃料。ZHANG 等^[74]研究发现,在氮气氛围下,FRPs 的热解气体产率为 6.32%,热值为 22.53 MJ/m³。该热解气经适当的净化处理和燃烧条件优化后,可作为燃料燃烧,为热解过程提供所需能量。

6 总结与展望

本文系统梳理了 FRPs 在新能源设备中的主要应用场景及结构特性,总结了当前主流回收技术路径(包括机械回收、热解处理、化学降解等),并分析了各自的优势与技术瓶颈。在实际推进过程中,FRPs 的高度交联结构与组分复杂性依然是制约资源化利用的核心难题。为突破回收技术瓶颈,亟须从以下三个方向实现关键进展:(1)基体降解路径优化:通过低能耗热解、绿色化学降解等多技术协同,提升对热固性树脂的选择性解构效率与纤维的低损回收效果;(2)再生纤维性能提升:发展面向纤维强度保持与表面改性的一体化调控策略,增强其利用价值;(3)资源高值化应用拓展:构建多场景应用体系,推动再生材料在新能源、建筑、交通等领域的规模化、清洁化、高值化再应用,为 FRPs 的闭环回收奠定基础。

未来 FRPs 回收体系的发展应聚焦推进全流程智能化、标准化管理,构建并优化从前端预处理、纤维再生到后端产品应用的全链条贯通技术体系。在政策与市场双重驱动下,需建立统一的 FRPs 资源潜力评估与分类标准,推动绿色供应链与再生材料市场的规范运行。同时,引入数字技术,优化纤维的溯源管控与回收再用流程,通过智能感知、数据挖掘与算法决策,提升纤维的分选精度与加工效率,实现回收过程的动态优化与闭环控制。

综上所述,FRPs 循环利用体系涉及产业链协同、技术集成与政策机制等多维度的系统整合。未来应以政策引领为导向,以全链条关键技术攻关与产业应用协同为支撑,构建高效、低碳、可持续发展的复合材料资源循环体系,为新能源、汽车、航空航天、建筑等行业的绿色低碳转型提供坚实支撑。

参考文献 (References):

- [1] DINIȚĂ A, RIPEANU R G, ILINȚĂ C N, et al. Advancements in fiber-reinforced polymer composites: A comprehensive analysis[J]. *Polymers (Basel)*, 2023, 16(1): 2.
- [2] 樊星. 碳纤维复合材料的应用现状与发展趋势 [J]. *化学工业*, 2019, 37(4): 12-16+25.
FAN Xing. Application status and development trend of carbon fiber reinforced plastic[J]. *Chemical Industry*, 2019, 37(4): 12-16+25.
- [3] ZHANG Jin, LIN Gang, VAIDYA U, et al. Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 250: 110463.
- [4] 罗益锋. 碳纤维及其复合材料在主要应用领域的突破方向与技术进展 [J]. *高科技纤维与应用*, 2019, 44(6): 1-12.
LUO Yifeng. Breakthrough direction and technical progress of carbon fiber and its CFRP in main application areas[J]. *Hi-Tech Fiber and Application*, 2019, 44(6): 1-12.
- [5] 华经产业研究院. 2021—2026 年中国碳纤维行业发展监测及投资战略规划研究报告 [R]. 苏州: 华经产业研究院, 2021: 35-36.
China Industry Research Institute. 2021—2026 China carbon fiber industry development monitoring and investment strategy planning research report [R]. Suzhou: China Industry Research Institute, 2021: 35-36.
- [6] 张少辉, 王艳, 牛荻涛. 废旧纤维在水泥基材料中的应用研究进展 [J]. *材料导报*, 2020, 34(23): 23042-23050.
ZHANG Shaohui, WANG Yan, NIU Ditao. Research progress of the application of waste fiber in cement-based materials[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(23): 23042-23050.
- [7] 张为军, 薛忠民, 王欣, 等. 纤维增强复合材料典型应用与前景展望 [J]. *复合材料科学与工程*, 2024(S1): 30-37.
ZHANG Weijun, XUE Zhongmin, WANG Xin, et al. Typical applications and prospects of fiber-reinforced composites[J]. *Composites Science and Engineering*, 2024(S1): 30-37.
- [8] 刘贺晨, 魏利伟, 张铭嘉, 等. 可回收玄武岩纤维增强复合材料的制备及性能 [J]. *高电压技术*, 2024, 50(11): 5087-5097.
LIU Hechen, WEI Liwei, ZHANG Mingjia, et al. Preparation and properties of recyclable basalt fiber reinforced composites[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(11): 5087-5097.
- [9] PICKERING S J. Recycling technologies for thermoset composite materials—Current status[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, 37(8): 1206-1215.
- [10] 杜晓渊, 程小全, 王志勇, 等. 碳纤维复合材料回收与再利用技术进展 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2020, 36(8): 182-190.
DU Xiaoyuan, CHENG Xiaoquan, WANG Zhiyong, et al. Recycling and reusing of carbon fiber reinforced polymer: A current technical progress[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2020, 36(8): 182-190.
- [11] DANG Weirong, KUBOUCI M, YAMAMOTO S, et al. An approach to chemical recycling of epoxy resin cured with amine using nitric acid[J]. *Polymer*, 2002, 43(10): 2953-2958.
- [12] DANG Weirong, KUBOUCI M, SEMBOKUYA H, et al. Chemical recycling of glass fiber reinforced epoxy resin cured with amine using nitric acid[J]. *Polymer*, 2005, 46(6): 1905-1912.
- [13] 李延峰, 江清潘, 武德涛, 等. 风电叶片复合材料回收再利用研究进展 [J]. *黑龙江科学*, 2024, 15(22): 108-110+114.
LI Yanfeng, JIANG Qingpan, WU Detao, et al. Research progress on recycling and reuse of wind power blade composites[J]. *Heilongjiang Science*, 2024, 15(22): 108-110+114.
- [14] 马彦涛, 孙秦宇, 张翔, 等. 纤维增强树脂基复合材料的纤维回收方法研究进展 [J]. *材料研究与应用*, 2024, 18(4): 560-573.
MA Yantao, SUN Qinyu, ZHANG Xiang, et al. Research progress on fibre recycling methods of fibre-reinforced polymer composites[J]. *Materials Research and Application*, 2024, 18(4): 560-573.
- [15] 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.
- [16] 于雪梅, 朱晓华, 刘卫生, 等. 废弃风电叶片切割装置设

- 计及破碎料的应用[J]. 工程塑料应用, 2018, 46(6): 60–64.
- YU Xuemei, ZHU Xiaohua, LIU Weisheng, et al. Design of cutting device for wasted wind turbine blades and application of debris[J]. *Engineering Plastics Application*, 2018, 46(6): 60–64.
- [17] 仲秋成, 田丰, 任飞融, 等. 新型盘锯切割废弃风电叶片研究[J]. *中国机械*, 2024(32): 29–32.
- ZHONG Qiucheng, TIAN Feng, REN Feirong, et al. Research on a new type of circular saw for cutting discarded wind turbine blades[J]. *China Machinery*, 2024(32) : 29–32.
- [18] ZHANG Yixue, 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[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2025, 190: 108711.
- [19] 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.
- [20] SPINI F, BETTINI P. End-of-life wind turbine blades: Review on recycling strategies[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2024, 275: 111290.
- [21] ONWUDILI J A, MISKOLCZIN, NAGY T, et al. Recovery of glass fibre and carbon fibres from reinforced thermosets by batch pyrolysis and investigation of fibre re-using as reinforcement in LDPE matrix[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 91: 154–161.
- [22] NAQVI S R, PRABHAKARA H M, BRAMER E A, et al. A critical review on recycling of end-of-life carbon fibre/glass fibre reinforced composites waste using pyrolysis towards a circular economy[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 136: 118–129.
- [23] YOUSEF S, EIMONTAS J, STASIULAITIENE I, et al. Recovery of energy and carbon fibre from wind turbine blades waste (carbon fibre/unsaturated polyester resin) using pyrolysis process and its life-cycle assessment[J]. *Environmental Research*, 2024, 245: 118016.
- [24] Pickering S J, et al. Developments in the fluidised bed process for fibre recovery from thermoset composites[C]//2nd Annual Composites and Advanced Materials Expo, CAMX 2015, 2015: 2384–2394.
- [25] PICKERING S J, KELLY R M, KENNERLEY J R, et al. A fluidised-bed process for the recovery of glass fibres from scrap thermoset composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2000, 60(4): 509–523.
- [26] KENNERLEY J R, KELLY R M, FENWICK N J, et al. The characterisation and reuse of glass fibres recycled from scrap composites by the action of a fluidised bed process[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1998, 29(7): 839–845.
- [27] YIP H L H, PICKERING S J, RUDD C D. Characterisation of carbon fibres recycled from scrap composites using fluidised bed process[J]. *Plastics, Rubber and Composites*, 2002, 31(6): 278–282.
- [28] MENG F, MCKECHNIE J, TURNER T A, et al. Energy and environmental assessment and reuse of fluidised bed recycled carbon fibres[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2017, 100: 206–214.
- [29] 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.
- [30] HAO Siqi, HE Lizhe, LIU Jiaqi, et al. Recovery of carbon fibre from waste prepreg via microwave pyrolysis[J]. *Polymers*, 2021, 13(8): 1231.
- [31] JULIAN I, GARCÍA JIMÉNEZ A, AGUADO A, et al. Advances in the circularity of end-of-life fibre-reinforced polymers by microwave intensification[J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2022, 178: 109015.
- [32] LESTER E, KINGMAN S, WONG K H, et al. Microwave heating as a means for carbon fibre recovery from polymer composites: A technical feasibility study[J]. *Materials Research Bulletin*, 2004, 39(10): 1549–1556.
- [33] XU Mingxin, YANG Jie, JI Haiwen, et al. Recovering high-quality glass fibers from end-of-life wind turbine blades through swelling-assisted low-temperature pyrolysis[J]. *Waste Management*, 2024, 187: 179–187.
- [34] JEONG J, OH D, JU Y, et al. Energy-efficient chemical recycling of CFRP and analysis of the interfacial shear strength on recovered carbon fiber[J]. *Waste Management*, 2024, 187: 134–144.
- [35] YANG Yongxiang, BOOM R, IRION B, et al. Recycling of composite materials[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2012, 51: 53–68.
- [36] LIU Tuan, ZHANG Meng, GUO Xiaolong, et al. Mild chemical recycling of aerospace fiber/epoxy composite wastes and utilization of the decomposed resin[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2017, 139: 20–27.
- [37] MU Quanyi, AN Le, HU Zhiqiang, et al. Fast and sustainable recycling of epoxy and composites using mixed solvents[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2022, 199: 109895.
- [38] AHRENS A, BONDE A, SUN Hongwei, et al. Catalytic disconnection of C—O bonds in epoxy resins and composites[J]. *Nature*, 2023, 617(7962): 730–737.
- [39] PIÑERO HERNANZ R, GARCÍA SERNA J, DODDS C, et al. Chemical recycling of carbon fibre composites using alcohols under subcritical and supercritical conditions[J]. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2008, 46(1): 83–92.

- [40] 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.
- [41] OKAJIMA I, SAKO T. Recycling fiber-reinforced plastic using supercritical acetone[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2019, 163: 1–6.
- [42] KHALIL Y F. Sustainability assessment of solvolysis using supercritical fluids for carbon fiber reinforced polymers waste management[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2019, 17: 74–84.
- [43] WANG Jingjing, LIN Wensong, YAN Xuezheng, et al. Preparation and microstructure of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-TiO}_2$ coating on three-dimensional braided carbon fiber by Sol-gel technology[J]. *Materials & Design*, 2016, 89: 928–932.
- [44] SUN Jingfeng, ZHAO Feng, YAO Yue, et al. High efficient and continuous surface modification of carbon fibers with improved tensile strength and interfacial adhesion[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 412: 424–435.
- [45] ZHOU Zhidong, WANG Wei, LI Wenli, et al. Synchronously repairing core/surface defects of carbon fibers by in situ growth of ZIF-8 and uniquely matched high-energy irradiation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, 16(39): 53060–53071.
- [46] WANG Le, SHEN Yan, ZHANG Yuexia, et al. A novel surface treatment of carbon fiber with Fenton reagent oxidation for improved cells immobilization and xylitol fermentation[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2021, 325: 111318.
- [47] QIAN Xin, ZHONG Junjun, ZHI Jianhai, et al. Electrochemical surface modification of polyacrylonitrile-based ultrahigh modulus carbon fibers and its effect on the interfacial properties of UHMCF/EP composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 164: 476–484.
- [48] HU Jiqiang, LI Fei, WANG Bing, et al. A two-step combination strategy for significantly enhancing the interfacial adhesion of CF/PPS composites: The liquid-phase oxidation followed by grafting of silane coupling agent[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 191: 107966.
- [49] TRUKHINOV D K, LEBEDEVA E A, ASTAF'EVA S A, et al. Seed-assisted hydrothermal fabrication of nanostructured boehmite coating on carbon fiber[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 452: 129083.
- [50] ZHANG W, DUCHET J, GÉRARD J F. Self-healable interfaces based on thermo-reversible Diels–Alder reactions in carbon fiber reinforced composites[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2014, 430: 61–68.
- [51] 刘造芳, 张得昆, 张星, 等. 玻璃纤维湿法非织造墙纸的涂层工艺研究 [J]. 西安工程大学学报, 2018, 32(1): 6–12.
- LIU Zaofang, ZHANG Dekun, ZHANG Xing, et al. Study on coating process of glass fiber wet-laid nonwoven wallpaper[J]. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 2018, 32(1): 6–12.
- [52] 周应学, 周玉善, 韩成成, 等. 聚四氟乙烯/玻璃纤维涂覆膜材的制备及性能 [J]. 西安工程大学学报, 2017, 31(2): 157–165.
- ZHOU Yingxue, ZHOU Yushan, HAN Chengcheng, et al. Preparation and properties of poly(tetra-fluoroethylene) / woven glass fibric membrane structural materials[J]. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 2017, 31(2): 157–165.
- [53] FANG Minghe, XIONG Xuhai, HAO Yabin, et al. Preparation of highly conductive graphene-coated glass fibers by Sol-gel and dip-coating method[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(9): 1989–1995.
- [54] 黎鹏, 竺林, 黄健. 有机先驱体法制备氮化硼涂层改性玻璃纤维织物 [J]. 玻璃纤维, 2013(1): 35–40.
- LI Peng, ZHU Lin, HUANG Jian. Preparation of boron nitride coated glass fabrics by precursor method[J]. *Fiber Glass*, 2013(1): 35–40.
- [55] 孔鹏, 彭周岗, 吴海兵. 玻璃纤维表面改性研究 [J]. 合成树脂及塑料, 2025, 42(1): 47–50.
- KONG Peng, PENG Zhougang, WU Haibing. Surface modification for glass fiber[J]. *China Synthetic Resin and Plastics*, 2025, 42(1): 47–50.
- [56] SIDDQUI N A, SHAM M L, TANG BEN zhong, et al. Tensile strength of glass fibres with carbon nanotube-epoxy nanocomposite coating[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2009, 40(10): 1606–1614.
- [57] XU Chunju, LIU Guilin, CHEN Huiyu, et al. Fabrication of conductive copper-coated glass fibers through electroless plating process[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2014, 25(6): 2611–2617.
- [58] 刘威豪. 面向再生碳纤维增强复合材料的增材制造成型工艺研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022: 1–102.
- LIU Weihao. Research on additive manufacturing molding processes for reclaimed carbon fiber reinforced composites[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022: 1-102.
- [59] WU Jiang, LI Anan, LYU Yahui, et al. Dual-composite additive manufacturing of glass fibre and recycled carbon fibre reinforced thermoplastic composites with customised fibre layout[J]. *Composite Structures*, 2025, 354: 118815.
- [60] EDSON F S D A, CARLOS L, DANILO S, et al. Reuse of carbon fiber waste to produce composites with polypropylene. The effect of styrene-(ethylene-butylene)-styrene grafted with maleic anhydride and ethylene-propylene-diene grafted with maleic anhydride copolymers[J]. *Polymer Composites*, 2021, 42(11): 6182–6195.
- [61] YAZDANBAKHS A, BANK C L, RIEDER K, et al. Concrete with discrete slender elements from mechanically recycled wind turbine blades[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 2018, 128: 11–21.
- [62] LI Peixin, WANG Xiaodan, CHEN Weijie, et al. Recy-

- p>cling of retired wind turbine blades into modifiers for composite-modified asphalt pavements: Performance evaluation[J].
- Sustainability*
- , 2024, 16(6): 2343.
- [63] LAN Tianhui, WANG Bingze, ZHANG Junchao, et al. Utilization of waste wind turbine blades in performance improvement of asphalt mixture[J]. *Frontiers in Materials*, 2023, 10: 1164693.
- [64] GONÇALVES R M, MARTINHO A, OLIVEIRA J P. Evaluating the potential use of recycled glass fibers for the development of gypsum-based composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 321: 126320.
- [65] 崔冉冉, 王功勋, 黄博, 等. 硅烷偶联剂改性退役风电叶片再生纤维及其对石膏基材性能的影响 [J]. *环境工程学报*, 2025, 19(5): 1166–1176.
- CUI Ranran, WANG Gongxun, HUANG Bo, et al. Characterises of recycled fiber from retired wind turbine blades modified by silane coupling agent and its effect on properties of gypsum[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2025, 19(5): 1166–1176.
- [66] ZHANG Yongnan, LIANG Yunyi, LI Suiyi, et al. A review of biomass pyrolysis gas: Forming mechanisms, influencing parameters, and product application upgrades[J]. *Fuel*, 2023, 347: 128461.
- [67] ZHANG Xing, WANG Kaige, CHEN Junhao, et al. Mild hydrogenation of bio-oil and its derived phenolic monomers over Pt-Ni bimetal-based catalysts[J]. *Applied Energy*, 2020, 275: 115154.
- [68] YAQOOB H, TEOH Y H, AHMAD JAMIL M, et al. Potential of tire pyrolysis oil as an alternate fuel for diesel engines: A review[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2021, 96: 205–221.
- [69] FOZER D, OWSIANIAK M, HAUSCHILD M Z. Prospective life cycle assessment of solid recovered fuel utilization and marine fuel production in cement plants[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2025, 55: 117–131.
- [70] ROSENDAHL L, CASTELLO D, LINDFORS C, et al. Country reports 2024: Direct thermochemical liquefaction (Denmark, Finland) [R]. Singapore: IEA Bioenergy Task 34, 2025: 1–125.
- [71] YOUSEF S, EIMONTAS J, STRIUGAS N, et al. Synthesis of value-added aromatic chemicals from catalytic pyrolysis of waste wind turbine blades and their kinetic analysis using artificial neural network[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2024, 177: 106330.
- [72] BEN Haoxi, MU Wei, DENG Yulin, et al. Production of renewable gasoline from aqueous phase hydrogenation of lignin pyrolysis oil[J]. *Fuel*, 2013, 103: 1148–1153.
- [73] OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY. New carbon material sets energy-storage record, likely to advance supercapacitors[EB/OL]. (2023-11-21)[2025-07-11]. <https://www.ornl.gov/news/new-carbon-material-sets-energy-storage-record-likely-advance-supercapacitors>.
- [74] 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 [J]. *复合材料学报*, 2024, 41(3): 1192–1203.
- ZHANG Xiaolin, YANG Menghao, CAO Jing, et al. Research progress of decommissioned wind power blade resource utilization technology[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(3): 1192–1203.