

doi: 10.20237/j.issn.1007-7545.2026.02.009

退役风机叶片回收利用的生命周期 环境-经济效益评估

吴玉锋^{1,2}, 郁亮^{1,2}, 郇伟^{1,2}, 付玉鹏³, 翟梦瑜^{1,2}

1. 北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100124;
2. 材料循环低碳再生全国重点实验室, 北京 100124;
3. 深圳大学 物理与光电工程学院, 深圳 518060)

摘要: 随着中国风电产业的快速发展, 早期安装的风电机组正逐步进入退役期, 退役风机叶片的资源化利用已成为产业可持续发展的紧迫课题。本研究基于生命周期评价(LCA)方法, 系统比较了物理法、热解法和化学法三条主流回收路径的环境-经济效益。采用CML 2001中点法和ReCiPe 2016终点法进行双重评估, 并引入影子价格理论将环境外部性货币化。结果表明: 物理法综合环境效益相当, 热解法略优(0.34元/kg), 物理法次之(0.32元/kg); 热解法碳减排优势显著(碳收益占比76%), 总收益与物理法相当; 化学法因硝酸高环境负荷, 总收益仅有0.10元/kg, 且在富营养化方面产生负效益。研究建议通过碳市场纳入、绿色建材认证等机制实现环境价值变现, 因地制宜选择技术路线, 推动风机叶片回收产业高质量发展。

关键词: 退役风机叶片; 生命周期评价; 环境效益; 经济效益; 回收利用; 循环经济

中图分类号: F407.32; X7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-7545(2026)02-0352-12

引用格式: 吴玉锋, 郁亮, 郇伟, 等. 退役风机叶片回收利用的生命周期环境-经济效益评估[J]. 有色金属(冶炼部分), 2026(2): 352-363. DOI: 10.20237/j.issn.1007-7545.2026.02.009.

WU Yufeng, YU Liang, XUN Wei, et al. Life Cycle Environmental and Economic Benefits Assessment of End-of-Life Wind Turbine Blade Recycling[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2026(2): 352-363. DOI: 10.20237/j.issn.1007-7545.2026.02.009.

风力发电作为清洁可再生能源的重要组成部分, 在全球能源转型和应对气候变化中起着不可替代的作用^[1-3]。根据全球风能理事会(GWEC)数据, 截至2024年底, 全球风电累计装机容量已突破10亿千瓦, 风电在全球电力结构中的占比持续提升。中国风电产业经历了二十余年的高速发展, 从2005年的126万千瓦起步, 到2024年底累计装机容量已突破4.8亿千瓦, 占全球总量的近一半, 稳居世界第一^[4]。在“碳达峰、碳中和”战略目标的驱动下, 中国计划到2030年风电、太阳能发电总装机容量达到12亿千瓦以上, 风电产业将继续保持快速增长态势^[5]。

伴随风电产业的快速发展, 退役风机叶片的处置

问题正逐步显现^[6-7]。早期大规模投运的风电机组正陆续进入20至25年的设计寿命末期, 退役规模迅速扩大^[8]。据预测, 中国年退役风机叶片量将在2025年达到约0.5万t, 2030年增至50万t以上, 2040年可能超过100万t^[9]。欧洲亦面临类似问题, 到2050年累计退役叶片量预计约2500万t^[10]。如何实现退役叶片的环境友好处置与资源化利用, 已成为风电产业迈向全生命周期绿色化的关键挑战^[11-12]。

风机叶片通常由玻璃纤维增强热固性树脂(GFRP)复合材料制成, 占叶片总质量的90%以上, 兼具高强度、耐腐蚀和耐疲劳等优异性能^[13-14]。其微观结构为玻璃纤维嵌入高度交联的热固性树脂网络中, 这种

收稿日期: 2026-01-07

基金项目: 教育部人文社会科学研究青年基金项目(23YCH034)

作者简介: 吴玉锋(1980—), 男, 博士, 教授; 通信作者: 翟梦瑜(1994—), 女, 博士, 副研究员

©Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy) Editorial Department 2026. This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License.

不可逆结构使材料无法通过熔融方式再加工,导致回收利用难度显著高于热塑性塑料,只能依赖物理、热或化学方式进行处理^[15-16]。

目前,填埋仍是全球退役叶片最主要的处置方式,约60%~70%的叶片最终进入填埋场^[17]。但该方式存在明显问题:一是高比例玻璃纤维资源被浪费;二是叶片体积庞大,占用大量土地;三是涂层和黏接剂可能带来长期环境风险^[18]。近年来,欧洲部分国家已限制复合材料填埋,中国亦在相关规划中明确提出推进退役风电设备的资源化利用^[19]。

针对这一难题,现有回收技术主要分为三类^[20]。机械回收通过切割、粉碎和研磨,将叶片转化为粉末或短纤维,用于建材或填料。该方法工艺成熟、成本较低,但产品附加值有限,属于典型的降级回收^[21]。热解法在无氧或微氧条件下高温分解树脂,可回收较完整的玻璃纤维或碳纤维^[22],其力学性能可保持在原材料的80%~95%,同时副产气体和油类具有一定能源价值,但能耗较高且需后处理。化学回收通过溶剂溶解树脂基体,理论上可最大限度保持纤维性能,但目前仍处于试验或中试阶段,面临溶剂消耗大、环境负担重和经济性不足等问题^[23-24]。

此外,流化床燃烧、水泥窑协同处置和微波辅助热解等技术亦受到关注^[25],但整体仍缺乏大规模商业化应用。近年来,该领域研究快速增长,重点集中在工艺参数优化、再生材料应用开发及环境影响评价等方面。然而,现有研究普遍存在技术路线对比不足、评价指标不统一、环境与经济效益分离,以及对中国本土条件适配性不足等问题。

基于上述研究空白,本研究拟构建统一的生命周期评价框架,系统比较机械回收、热解回收和化学回收三条主流技术路径的环境影响与经济价值。创新点主要体现在:在同一方法框架下实现多技术路线的可比性分析;结合中点与终点评价方法,全面刻画环境影响;并引入影子价格将环境外部性货币化,从而揭示不同回收路径的综合社会经济效益,为技术选择与政策制定提供科学依据。

1 方法与数据

1.1 评价对象与场景设定

本研究设定了三条回收-替代路径作为评价对象。

路径一:物理法回收制备再生板材。该路径将退

役叶片经机械破碎、筛分后,与胶黏剂混合并热压成型,制成再生复合板材。再生板材可替代原生木材或混凝土填料,用于建筑隔板、道路铺设基层等场景。

路径二:热解法回收制备再生玻璃纤维。该路径将退役叶片在无氧或微氧条件下进行热分解(温度通常为450~550 °C),树脂基体分解为可燃气体和油类副产物,玻璃纤维得以回收。再生玻璃纤维可替代原生玻璃纤维,用于复合材料制造。

路径三:化学法回收制备再生玻璃纤维。该路径采用硝酸等强酸溶剂溶解树脂基体,使玻璃纤维与树脂分离,回收的玻璃纤维经洗涤、干燥后可重新利用。该方法对纤维损伤较小,但溶剂消耗量大。

对于每条路径,本研究同时评估回收产物(再生材料)和对应的被替代产物(原生材料)的环境影响,以计算替代效益(净效益)。

1.2 功能单位与系统边界

功能单位:本研究采用“1 kg再生材料产品”作为功能单位,这一设定便于不同路径之间的横向对比,也符合材料替代效益评估的需要。

系统边界:采用“摇篮到大门”(Cradle-to-Gate)边界,具体范围因路径而异。再生材料边界从退役叶片进入回收设施开始,涵盖破碎/热解/溶解过程的能源消耗、辅料投入(如胶水、溶剂)及过程排放,直至再生产品产出;叶片的收集和运输环节因地域差异较大,本研究暂不纳入评估范围。原生材料边界从原材料开采开始,涵盖加工、冶炼(如有)、成型等全部生产环节,直至产品出厂。

1.3 生命周期清单分析

本研究的清单数据基于课题组前期研究成果和文献数据整理。功能单位为处理100 kg退役风机叶片所产生的再生材料。

1.3.1 物理法回收工艺数据

物理法的核心工艺流程包括:叶片切割→机械破碎→筛分分级→与胶黏剂混合→热压成型。该工艺的生命周期清单数据如表1所示。

表1 物理法回收风机叶片制备板材数据清单
Table 1 Life cycle inventory of physical recycling for board production

类别	物质流	数量
物质输入	废弃风机叶片	100 kg
	胶水	20 kg
能源输入	电	72.4 kWh
物质输出	板材	120 kg

物理法的突出特点是工艺简单、能耗极低——仅涉及机械破碎和热压两个主要耗能环节,无需高温热处理或化学试剂。每处理100 kg叶片可产出120 kg再生板材(因添加了20 kg胶水),折合电耗约0.603 kWh/kg产品。

本研究的生命周期清单建模基于SPHERA LCA for Expert软件(版本10.9.1.17)及其集成的GaBi数据库(数据覆盖1992—2024年)。电力消耗采用中国电网平均排放因子进行计算,该因子综合考虑了中国当前的电源结构(火电、水电、风电、光伏等)及输电损耗。

1.3.2 热解法回收工艺数据

热解法的核心工艺流程包括:叶片切割→送入热解炉→无氧加热(450~550 °C)→气/液/固三相分离→玻纤后处理。该工艺的生命周期清单数据如表2所示。

表2 热解法回收处置风机叶片数据清单

Table 2 Life cycle inventory of pyrolysis recycling for glass fiber recovery

类别	物质流	数量
物质输入	废弃风机叶片	100 kg
能源输入	电	3 kWh
	热量	101.34 MJ
物质输出(气相)	CO ₂	9.082 45 kg
	CH ₄	0.046 28 kg
	CO	1.538 81 kg
	C ₂ H ₄	0.601 64 kg
	C ₂ H ₆	0.057 85 kg
	C ₃ H ₆	0.208 26 kg
	C ₃ H ₈	0.011 57 kg
物质输出(液相)	邻苯二甲酐	15.228 28 kg
	单异丁基邻苯二甲酸酯	2.795 33 kg
物质输出(固相)	邻苯二甲酸二丁酯	2.336 39 kg
	焦炭	2.07 kg
	玻璃纤维	66 kg

热解法的能耗主要来自维持高温所需的热能(101.34 MJ),电力消耗仅为3 kWh。热解过程产生的可燃气体(CO、CH₄、C₂H₄等)可部分回用于供热,降低外部能源输入。主要产物为玻璃纤维(66 kg,回收率66%)及多种有机副产物(邻苯二甲酐等),后者可作为化工原料进一步利用。热解过程直接排放CO₂约9.08 kg,CH₄约0.046 kg。对于热解产生的多种副产物(气相、液相有机物和焦炭),本研究采用系统扩展法处理:气相产物假设全部回用于系统供热,已从能源输入中扣减;液相有机副产物和焦炭因缺乏明确

的替代产品数据,暂按零负担计入,不分担环境影响。

1.3.3 化学法回收工艺数据

化学法的核心工艺流程包括:叶片切割→浸泡于硝酸溶液→树脂溶解→玻纤分离→洗涤干燥。该工艺的生命周期清单数据如表3所示。

表3 化学法回收处置风机叶片数据清单

Table 3 Life cycle inventory of chemical recycling for glass fiber recovery

类别	物质流	数量
物质输入	废弃风机叶片	100 kg
	纯硝酸	260 kg
	水	4 987 kg
能源输入	电	12 kWh
物质输出	玻璃纤维	66 kg
	树脂填料	24 kg
	NO ₂	180 kg
	废水	5 167 kg

化学法的主要环境负荷来源于硝酸的生产和消耗。硝酸生产工艺基于氨氧化法(Ostwald process),能耗和碳排放均较高。本研究假设硝酸为单次使用后排放处理,未考虑循环利用情景。该工艺需消耗大量水(约5 000 kg),产生等量废水和大量NO₂废气(180 kg),环境治理负担较重。玻璃纤维回收量为66 kg(回收率66%),与热解法相当;此外还可回收24 kg树脂填料副产物。

1.3.4 原材料生产数据

原材料的生命周期清单数据来源于SPHERA GaBi数据库,主要环境影响指标如表4所示。

表4 原材料生产的主要环境影响

Table 4 Key environmental impacts of virgin material production

材料类型	GWP/ (kg CO ₂ eq)	AP/ (kg SO ₂ eq)	EP/ (kg PO ₄ eq)	数据来源
原生板材 (木基复合材料)	3.18	0.020 2	0.002 81	SPHERA GaBi
原生玻璃纤维	3.85	0.014 5	0.001 18	SPHERA GaBi

1.4 生命周期影响评价方法

1.4.1 中点法评价

本研究采用CML 2001方法进行中点法(Midpoint)评价,选取9项环境影响指标:全球变暖潜势(GWP,单位kg CO₂ eq)、酸化潜势(AP,单位kg SO₂ eq)、富营养化潜势(EP,单位kg PO₄ eq)、光化学臭氧生成潜势(POCP,单位kg C₂H₄ eq)、人体毒性潜势(HTP,单位kg 1,4-DCB eq)、淡水水生生态毒性潜势(FAETP,单位kg DCB eq)、海洋水生生态毒

性潜势(MAETP, 单位kg DCB eq)、臭氧层消耗潜势(ODP, 单位kg R11 eq)和陆地生态毒性潜势(TETP, 单位kg DCB eq)。

1.4.2 终点法评价

为更全面地评估对人类社会和自然环境的终极影响, 本研究同时采用ReCiPe 2016终点法(Endpoint)进行综合评价。该方法将多种中点指标通过损害路径模型转化为三大保护领域的终极损害

值: 人体健康(Human Health, 单位为DALY, 即伤残调整生命年, 表征因环境恶化导致的健康损失, 包括过早死亡和疾病负担)、生态系统(Ecosystems, 单位为species.yr, 即物种灭绝当量年, 表征因环境变化导致的全球物种多样性损失)和资源消耗(Resources, 单位为USD, 即美元, 表征因资源稀缺性导致的未来开采成本上升)。本研究评价的22项终点指标详见表5。

表5 ReCiPe 2016终点法评价指标体系

Table 5 ReCiPe 2016 endpoint impact assessment indicators

保护领域	指标缩写	指标全称	单位
人体健康	CC-HH	Climate change, Human health (气候变化-人体健康)	DALY
	PM	Particulate matter formation (细颗粒物形成)	DALY
	FWC-HH	Fine particulate water consumption, Human health (水消耗-人体健康)	DALY
	HTc	Human toxicity, cancer (人体毒性-致癌)	DALY
	HTnc	Human toxicity, non-cancer (人体毒性-非致癌)	DALY
	IR	Ionizing radiation (电离辐射)	DALY
	POF-HH	Photochemical oxidant formation, Human health (光化学氧化剂-人体健康)	DALY
	SOD	Stratospheric ozone depletion (臭氧层消耗)	DALY
生态系统	CC-FE	Climate change, Freshwater ecosystems (气候变化-淡水生态)	species.yr
	CC-TE	Climate change, Terrestrial ecosystems (气候变化-陆地生态)	species.yr
	FWC-FE	Water consumption, Freshwater ecosystems (水消耗-淡水生态)	species.yr
	FWC-TE	Water consumption, Terrestrial ecosystems (水消耗-陆地生态)	species.yr
	FET	Freshwater ecotoxicity (淡水生态毒性)	species.yr
	FEu	Freshwater eutrophication (淡水富营养化)	species.yr
	LU	Land use (土地利用)	species.yr
	MET	Marine ecotoxicity (海洋生态毒性)	species.yr
	MEu	Marine eutrophication (海洋富营养化)	species.yr
	POF-E	Photochemical oxidant formation, Ecosystems (光化学氧化剂-生态系统)	species.yr
	TA	Terrestrial acidification (陆地酸化)	species.yr
TET	Terrestrial ecotoxicity (陆地生态毒性)	species.yr	
资源消耗	FD	Fossil resource scarcity (化石资源稀缺性)	USD
	MD	Mineral resource scarcity (矿物资源稀缺性)	USD

上述22项指标覆盖了环境影响的主要传导路径, 能够全面反映回收工艺对人体健康、生态系统稳定性和资源可持续利用的综合影响。其中, 气候变化指标同时体现在人体健康(通过极端天气事件、疾病传播等途径)和生态系统(通过栖息地变化、物种迁移等途径)两个领域; 毒性指标则根据暴露途径和受体差异, 细分为人体毒性(致癌/非致癌)和生态毒性(淡水/海洋/陆地)等多个子类别。

1.5 环境-经济效益评价

为将环境影响转化为可量化的经济价值, 本研究

引入影子价格(Shadow Price)理论, 将关键环境指标货币化。影子价格反映的是环境外部性的社会成本, 即污染物排放对社会造成的隐性损害。

环境效益(元/kg)计算公式:

$$\text{环境收益} = \sum_i (\text{避免的排放量}_i \times \text{社会成本单价}_i)$$

其中, 避免的排放量=原生材料排放-再生材料排放。影子价格参数设定见表6。

上述参数均基于中国当前的环境政策和市场数据, 具有较强的时效性和地域代表性。

表6 环境指标的社会成本价格

Table 6 Shadow price of the environmental indicators

环境指标	社会成本单价/(元·kg ⁻¹)	数据来源
气候变化	0.074 63	全国碳排放权交易市场2026年1月收盘价(74.63元/t) ^①
酸化	5.26	《中华人民共和国环境保护税法》污染物当量值硫化物折算
富营养化	6.5	《中华人民共和国环境保护税法》污染物当量值总磷折算

注: ①数据来源上海环境能源交易所(https://www.cneec.com)2026年1月5日收盘价。

2 结果与讨论

2.1 三条回收-替代路径的环境效益分析

本研究基于生命周期评价方法,对比分析了退役风机叶片三种回收技术路径的环境效益。三条路径

分别为:物理法回收制备再生板材(替代原生木材/混凝土填料)、热解法回收制备再生玻璃纤维(替代原生玻璃纤维)、以及化学法回收制备再生玻璃纤维(替代原生玻璃纤维)。评价结果如图 1 和图 2 所示。

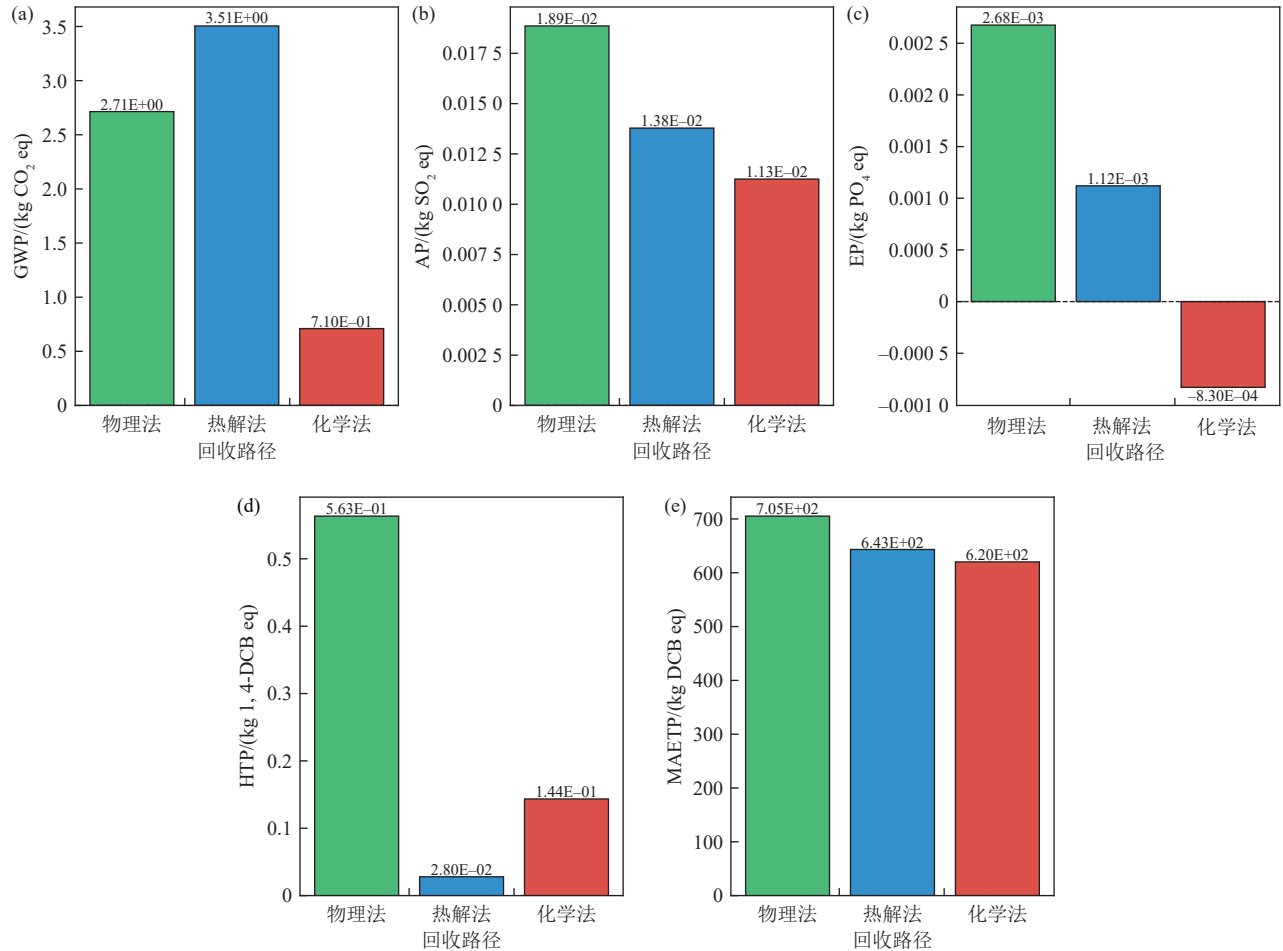


图 1 三条回收路径的环境净效益对比(注:正值表示减排收益)

Fig. 1 Comparison of net environmental benefits across three recycling pathways (Note: positive values indicate emission reduction benefits)

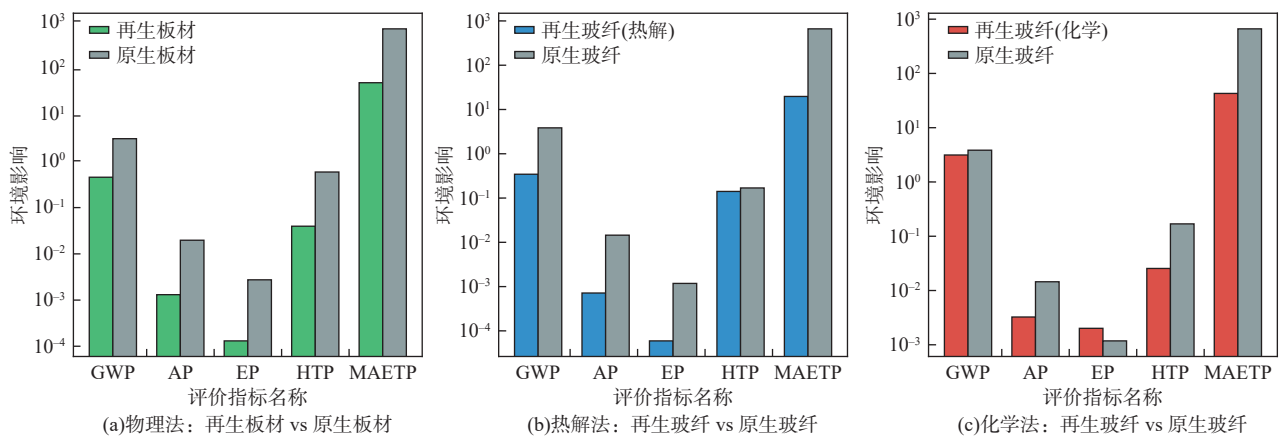


图 2 三条回收路径中再生材料与原生材料的环境影响对比

Fig. 2 Environmental impacts of recycled vs. virgin materials across three recycling pathways

2.1.1 三条路径的净环境效益

图1展示了三条回收路径在全球变暖潜势(GWP)、酸化潜势(AP)、富营养化潜势(EP)、人体毒性潜势(HTP)和海洋生态毒性潜势(MAETP)五个关键指标上的净环境效益。净效益计算方式为:被替代原生材料的环境影响减去回收过程的环境影响,正值表示环境收益(减排),负值表示环境负担(增排)。

从GWP指标来看,热解法表现出最为显著的碳减排效益,其GWP净效益达到3.51 kg CO₂ eq/kg。物理法的GWP净效益为2.71 kg CO₂ eq/kg,虽略低于热解法,但由于其回收过程能耗极低(仅需72.4 kWh 电力),在其他环境指标上表现更优。化学法的GWP净效益仅为0.71 kg CO₂ eq/kg,主要受制于硝酸生产的高碳排放(260 kg 硝酸/100 kg 叶片)。

在酸化和富营养化指标上,三条路径均表现出正向的环境效益。物理法在AP和EP指标上的优势尤为突出,这主要归因于其回收过程几乎不产生酸性气体和营养盐排放。热解法由于回收过程中会产生一定量的CO、C₂H₄等气体,其在POCP(光化学臭氧生成潜势)指标上的净效益相对较低。

在海洋生态毒性(MAETP)指标上,三条路径均表现出显著的净效益。以热解法为例,其再生玻纤MAETP仅为19.7 kg DCB eq,相较于原生玻纤(663 kg DCB eq)降低了97%以上,减排效果尤为突出。热解过程虽产生邻苯二甲酸酯类化合物(如邻苯二甲酐、邻苯二甲酸二丁酯等),但其对MAETP的贡献远小于原生玻纤生产过程中的环境负荷。

2.1.2 再生材料与原生材料的对比

图2从三个子图分别展示了物理法、热解法和化学法路径中,再生材料与对应原生材料的环境影响对比。

物理法路径中,再生板材在所有评价指标上均显著优于原生板材。以GWP为例,再生板材的碳排放仅为0.47 kg CO₂ eq/kg(电力贡献约0.45、胶水贡献约0.02),而原生板材为3.18 kg CO₂ eq/kg,减排幅度达到85%。这一显著差距主要源于物理法回收过程的低能耗特性——整个制板过程仅需电力和胶水两种投入,避免了原生木材采伐、加工等高碳排环节。

热解法和化学法路径中,再生玻纤与原生玻纤的对比呈现出更为复杂的格局。在GWP方面,热解法再生玻纤(0.35 kg CO₂ eq/kg)和化学法再生玻纤(3.14 kg CO₂ eq/kg)均低于原生玻纤(3.85 kg CO₂ eq/kg),证实了回收利用相较于原生生产的碳减排优势。然而,化学法由于需要使用大量硝酸,其在AP和EP等指标上的表现相对逊色。

综合来看,物理法以其极低的工艺能耗在各项环境指标上均表现优异,是三条路径中综合环境效益最佳的技术选择。热解法和化学法虽然能够回收高附加值的玻璃纤维,但其回收过程本身的环境负荷不可忽视。在实际应用中,应根据市场需求和环境效益的权衡,合理选择回收技术路径。

2.1.3 回收过程环境影响贡献分解

为深入解析三条回收路径环境影响的来源,本研究对各路径的主要投入进行了贡献分解分析。物理法的主要投入包括电力和胶水,热解法以电力(含热能)为主,化学法则涉及电力和硝酸两大投入。分析结果如图3所示。从GWP指标来看,三条路径呈现出截然不同的贡献结构。物理法的碳排放主要来源于电力消耗(约0.45 kg CO₂ eq/kg),胶水的贡献相对较小(约0.02 kg CO₂ eq/kg,仅占总排放的4.3%),两者合计约0.47 kg CO₂ eq/kg。热解法的总碳排放约为0.35 kg CO₂ eq/kg,其中,电力消耗约0.03 kg CO₂ eq/kg,

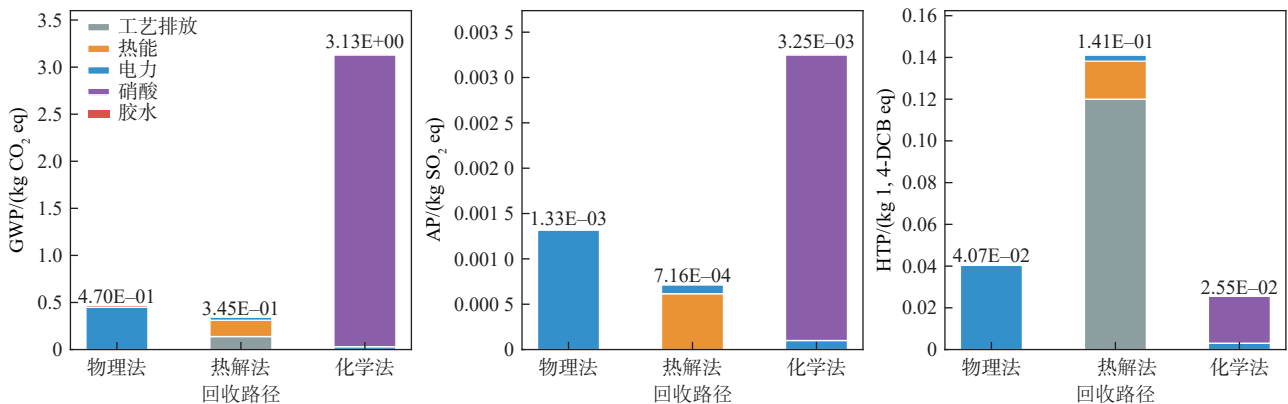


图3 三条回收路径的环境影响贡献分解

Fig. 3 Contribution analysis of environmental impacts for three recycling pathways

热能消耗约0.17 kg CO₂ eq/kg、工艺排放约0.14 kg CO₂ eq/kg, 是三条路径中碳排放最低的工艺。化学法的情况则截然不同, 其总碳排放高达3.13 kg CO₂ eq/kg, 其中硝酸的贡献占绝对主导地位(约3.10 kg CO₂ eq/kg, 占比99%), 电力仅贡献约0.03 kg CO₂ eq/kg。这一结果揭示了化学法高碳排放的根本原因——大量硝酸的生产和使用。

在酸化潜势(AP)方面, 物理法的电力消耗贡献了约 1.32×10^{-3} kg SO₂ eq/kg, 热解法电力和热能贡献之和仅为 7.16×10^{-4} kg SO₂ eq/kg, 而化学法由于硝酸使用产生的酸化贡献约为 3.15×10^{-3} kg SO₂ eq/kg。人体毒性(HTP)指标上, 热解法表现出最高的影响(0.14 kg 1, 4-DCB eq/kg), 主要与热解过程中产生的有机副产物有关; 物理法和化学法的HTP分别约为0.04和0.03 kg 1, 4-DCB eq/kg。

贡献分解分析结果表明, 不同回收技术的环境热点存在显著差异: 物理法应重点关注电力来源的清洁化, 热解法需改进尾气处理以降低毒性排放, 化学法则应着力开发硝酸的替代溶剂或实现硝酸的循环利用。这些发现为各技术路线的环境优化提供了明确的改进方向。

综合2.1节的分析, 三条回收路径在减污降碳方面均展现出显著优势, 其中物理法以其极低的工艺能耗和简单的投入结构, 在多项环境指标上表现最优。热解法虽然碳排放最低, 但需关注其毒性排放问题; 化学法则受制于硝酸的高环境负荷, 在推广应用前需重点解决溶剂问题。

2.2 终点法环境影响评估

为更全面地评估三条回收路径对人类社会和自然环境的终极影响, 本研究采用ReCiPe 2016终点法(Endpoint)进行综合评价。该方法将多种中点指标归并为三大保护领域: 人体健康(Human Health, 单位: DALY, 即伤残调整生命年)、生态系统(Ecosystems, 单位: species.yr, 即物种灭绝当量年)和资源消耗(Resources, 单位: USD, 即资源稀缺性成本)。评估结果如图4所示, 涵盖22个详细终点指标。

图4的雷达图及详细条形图展示了三条路径在三大保护领域的具体损害值。在人体健康领域, 化学法的影响最显著, 其气候变化对健康的损害(CC-HH)达到 1.28×10^{-1} DALY, 是热解法(1.71×10^{-2} DALY)的7.5倍; 同时其臭氧层消耗(SOD)高达 1.81×10^{-1} DALY, 远超物理法(5.65×10^{-4} DALY)和热解法(2.30×10^{-4} DALY)。物理法和热解法在健康指标上表现相近, 热解法

在细颗粒物形成(PM)上略优(2.29×10^{-3} vs 物理法 4.40×10^{-3} DALY)。在生态系统领域, 热解法虽整体表现优异, 但在淡水生态毒性(FET)指标上出现异常峰值, 达到1.61 species.yr, 这比物理法(8.71×10^{-5})高出4个数量级, 主要归因于热解过程释放的邻苯二甲酸酯类有机污染物。化学法则在海洋富营养化(MEu)上表现出极高的环境代价(3.41×10^1 species.yr), 反映了其废水排放的潜在风险。在资源消耗领域, 化学法的化石资源稀缺性成本(FD)高达0.173 USD/kg, 约为物理法(0.005 USD/kg)的34.6倍和热解法(0.003 USD/kg)的57.7倍, 这与其大量消耗高能耗化学试剂(硝酸)直接相关。物理法和热解法在资源耗竭方面均处于极低水平, 体现了较好的资源可持续性。

2.3 环境-经济效益分析

为揭示三条回收路径的真实社会经济价值, 本研究引入影子价格理论, 将关键环境外部性指标(全球变暖、酸化和富营养化)货币化, 评估各技术路线的综合环境-经济效益。评估结果如图5所示。

图5采用南丁格尔玫瑰图直观展示了三条回收路径的环境外部性收益构成, 图中每个扇区的面积代表相应指标的货币化收益, 中心数值为该路径的总环境收益。评估结果显示, 热解法在环境-经济综合绩效上略微领先, 其总环境收益达到0.34元/kg; 物理法紧随其后, 总收益为0.32元/kg。两者虽然在数值上相近, 但收益结构存在显著差异。热解法的环境价值高度集中于碳减排, 碳减排收益达到0.26元/kg, 占其总收益的76%, 这得益于再生玻璃纤维对高能耗原生玻璃纤维的替代效应以及相对清洁的能源结构。物理法则展现出更为均衡的收益分布, 其碳减排收益为0.20元/kg(占比62.50%), 但在酸化治理(0.10元/kg, 占比31.25%)和富营养化治理(0.02元/kg, 占比6.25%)方面贡献了显著价值, 反映了物理法全物理过程在控制酸性气体和水体污染物排放方面的天然优势。

相比之下, 化学法的总环境收益仅为0.10元/kg, 约为前两者的三分之一。其收益结构中, 碳减排收益仅为0.05元/kg, 酸化治理收益0.06元/kg, 而在富营养化指标上呈现出负收益(-0.01元/kg), 即产生了环境赔付成本。这意味着化学法每处理1 kg叶片, 不仅未能通过替代原生材料产生足够的水环境效益, 反而因硝酸流失等问题向环境输出了额外的污染负荷, 揭示了当前化学法工艺在商业化推广中面临的

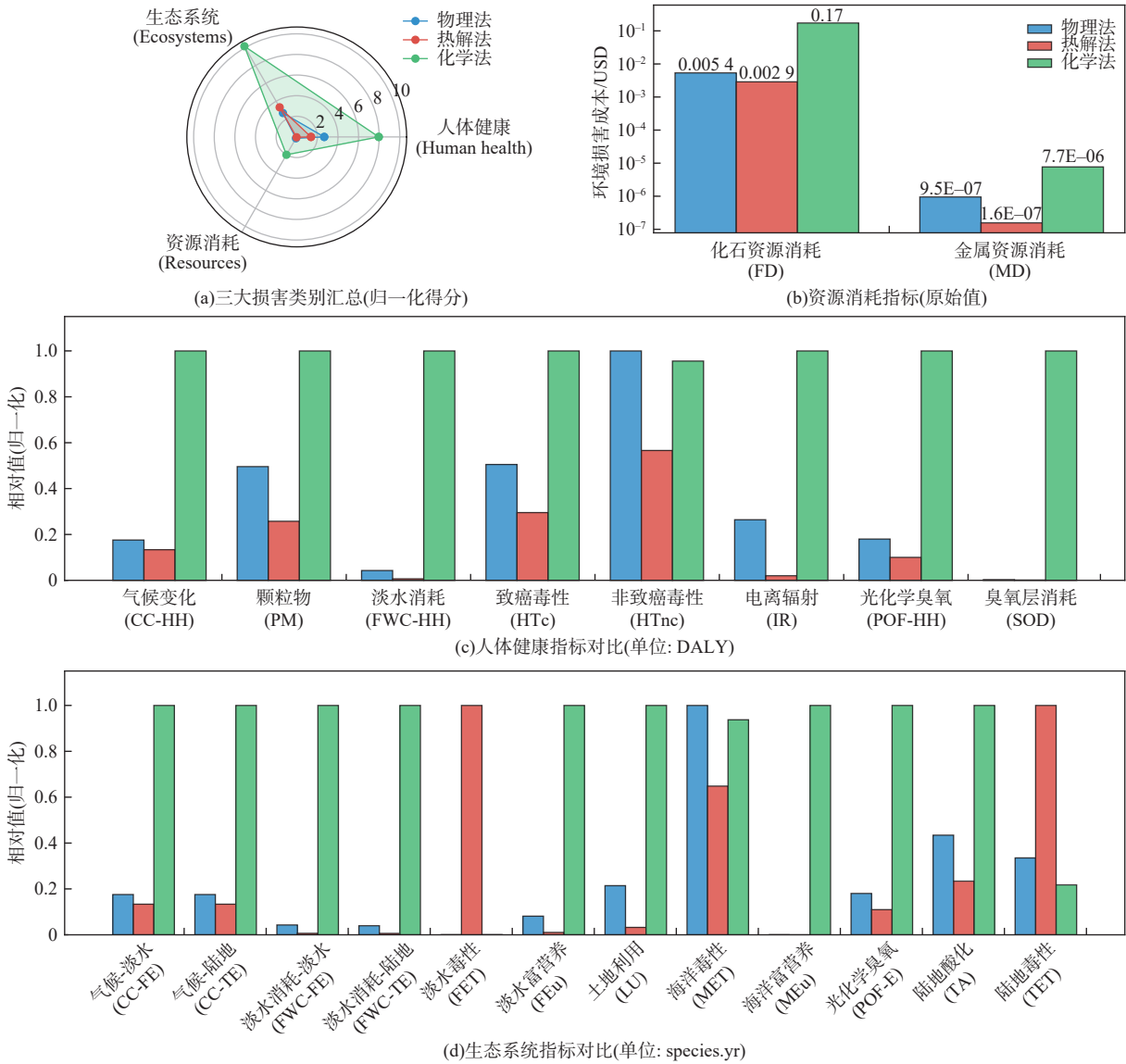


图4 三条回收路径的终点法环境损害评估(注:数值为环境损害值,值越大表示环境影响越大)

Fig. 4 ReCiPe 2016 endpoint damage assessment for three recycling pathways (Note: values indicate environmental damages; higher values indicate greater impacts)

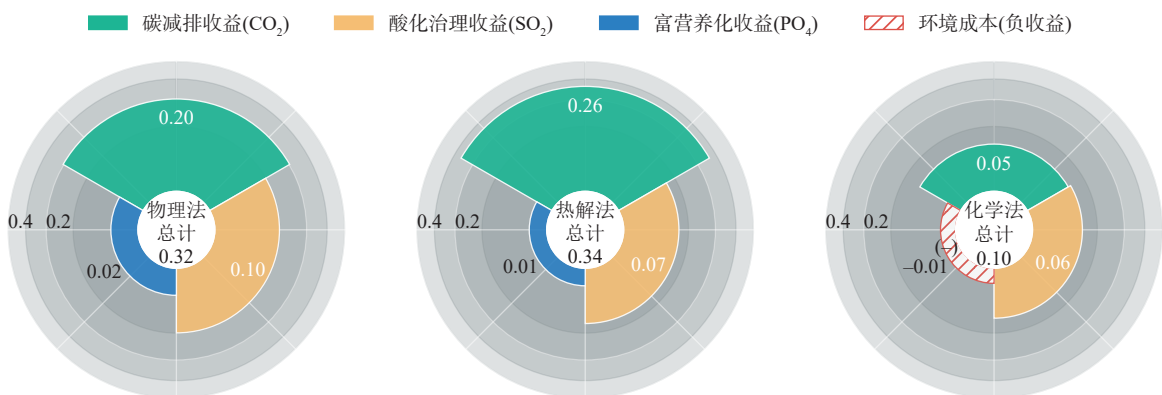


Fig. 5 Environmental-economic benefit assessment for three recycling pathway (Note: area represents revenue; unit: CNY/kg, based on China's environmental tax and carbon market price)

隐性壁垒。

将环境收益与产品市场价值进行对比,可以发现显著的价值错位现象。物理法的再生板材市场售价较低(通常约1~2元/kg),其0.32元/kg的环境收益相当于为产品附加了16%~32%的“绿色溢价”;相比之下,热解法再生玻纤售价较高(3~5元/kg),环境收益的占比相对较低(7%~11%)。这表明物理法具有更强的公共产品属性,其社会价值相对于其经济价值更为显著。在缺乏环境补偿机制的市场中,物理法往往因账面经济性不佳而被低估,但从全社会福利最大化角度看,在缺乏环境补偿机制的市场中,物理法往往因账面经济性不佳而被低估,但从全社会福利最大化角度看,它与热解法同为极具性价比的处理方案。环境-经济效益分析表明,热解法是实现“双碳”目标的排头兵,而物理法则是兼顾减污降碳、实现综合环境治理的稳健选择。

3 结论与展望

3.1 主要结论

本研究基于生命周期评价方法和ReCiPe 2016评估体系,结合影子价格理论,对退役风机叶片物理法、热解法和化学法三条回收路径进行了全方位的环境-经济效益评估。

综合评估结果表明,物理法是当前综合环境效益最优的技术路径。得益于极低的工艺能耗(每100 kg叶片能耗为72.4 kWh)和简单的投入结构,物理法在酸化、富营养化、人体健康等多项关键指标上表现最佳;尽管其产物的市场附加值较低,但环境外部性收益高达0.32元/kg,具有巨大的社会价值。热解法则具有显著的碳减排优势,其GWP净效益达到3.51 kg CO₂ eq/kg,碳减排收益贡献了0.26元/kg,占总环境收益的76%;然而,终点法评估显示其在淡水生态毒性指标上存在异常高值,提示热解过程中产生的有机污染物(如邻苯二甲酸酯类)可能对水环境构成潜在威胁。相比之下,化学法(硝酸法)面临严峻的环境可持续性挑战,总环境收益仅为0.10元/kg,且在富营养化方面产生负收益(-0.01元/kg),在未解决绿色溶剂替代或闭路循环问题前,其大规模推广受限。

3.2 政策建议

基于上述评估结果,为推动风机叶片回收产业的高质量发展,本研究从环境价值变现、技术支持、产业协同和标准建设四个维度提出政策建议。

在环境价值变现机制方面,建议将风机叶片回收产生的碳减排量纳入中国核证自愿减排量(CCER)体系,使回收企业能够通过碳市场交易实现环境收益变现;同时建立再生复合材料的绿色产品认证制度,对使用再生材料的建材产品给予税收优惠或政府采购优先权;此外,对采用环境效益优良的回收技术的企业给予财政补贴或税收减免,弥补其因产品附加值较低而面临的市场竞争劣势。

在技术支持政策方面,针对不同技术路线的特点,建议实施差异化支持措施。对于物理法,应重点拓展下游应用场景,提升再生产品的市场接受度,可考虑将物理法再生板材纳入政府绿色采购目录,或在基础设施建设中强制使用一定比例的再生材料。对于热解法,应强制配套高效的尾气和废水处理设施,严格管控有毒有害物质排放,同时鼓励余热回收以进一步降低能耗。对于化学法,应将研发重点转向温和、绿色的新型溶剂体系,如有机酸(乙酸、柠檬酸)、醇类或超临界流体,并推动硝酸的闭路循环利用。

在产业链协同方面,建议建立区域性回收处理中心,通过规模效应降低单位处理成本,提高产业集中度。考虑到物理法和热解法各有优势,可根据当地产业基础和市场需求灵活选择技术路线——在建材需求旺盛的地区优先发展物理法,在复合材料产业集聚区优先发展热解法。同时应构建全产业链合作机制,促进风电运营商、回收企业和下游用户之间的信息共享与合作,打通退役叶片从拆解到再利用的全链条。

在标准体系建设方面,应加快构建退役风机叶片回收的全产业链标准体系,包括叶片易回收性设计标准(从源头推动新型叶片采用易于拆解和回收的设计方案)、退役叶片拆解与分类规范(明确拆解流程、安全要求和材料分类标准)、以及再生产品质量分级标准(明确不同等级再生材料的性能指标和适用范围),消除下游用户的使用顾虑,打通回收产品应用的高价值通道。

3.3 研究局限与展望

本研究存在若干局限性,有待未来研究进一步完善。第一,本研究采用的LCA数据主要来源于文献和数据库,部分工艺参数可能与实际工业化生产存在差异,未来应结合实际生产线的实测数据进行验证和修正。第二,本研究的影子价格采用的是当前中国的碳市场价格和环境税标准,这些价格参数具有时效性和地域性,未来研究可开展敏感性分析以评估参

数变化对结论的影响。第三,本研究聚焦于回收过程本身的环境影响,未涉及叶片的收集、运输和预处理环节,也未考虑再生产品的使用阶段和最终处置,完整的“摇篮到坟墓”分析有待后续研究补充。

展望未来,随着风电装机容量的持续增长和早期机组的集中退役,风机叶片回收将成为一个规模庞大的新兴产业。预计到2030年,中国年退役叶片量将超过50万t,到2040年可能突破100万t。面对如此巨大的处理需求,单一技术路线难以满足,多技术协同、因地制宜的回收体系将成为主流。从技术发展趋势看,物理法有望通过产品升级(如开发高性能复合建材)突破附加值瓶颈;热解法的连续化、规模化和余热利用技术将进一步成熟;化学法若能在绿色溶剂和闭路循环方面取得突破,仍有望重新获得竞争力。从全生命周期视角看,未来的风机叶片设计应充分考虑易回收性,例如开发新型热塑性树脂叶片、采用可拆解的模块化结构设计、减少涂层和黏接剂的使用,从源头降低回收难度和环境成本,实现风电产业的闭环绿色发展。

参考文献

- [1] 黄震,谢晓敏,张庭婷,等.“双碳”背景下我国中长期能源需求预测与转型路径研究[J].中国工程科学,2022,24(6):8-18.
HUANG Z, XIE X M, ZHANG T T, et al. Medium-and long-term energy demand of China and energy transition pathway toward carbon neutrality[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 8-18.
- [2] 陈国平,董昱,梁志峰.能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5493-5505.
CHEN G P, DONG Y, LIANG Z F. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5505.
- [3] 舒印彪,张丽英,张运洲,等.我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J].中国工程科学,2021,23(6):1-14.
SHU Y B, ZHANG L Y, ZHANG Y Z, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1-14.
- [4] 国家能源局.2024年全国电力工业统计数据[EB/OL]. [2026-01-01]. <http://www.nea.gov.cn/20250121/097bfd7c1cd3498897639857d86d5dac/c.html>.
National Energy Administration. National power industry statistics for 2024[EB/OL]. [2026-01-01]. <http://www.nea.gov.cn/20250121/097bfd7c1cd3498897639857d86d5dac/c.html>.
- [5] 国家发展改革委,国家能源局,财政部,等.“十四五”可再生能源发展规划[EB/OL]. [2026-01-01]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/t20220601_1326720_ext.html.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Finance, et al. The 14th Five-Year Plan for the development of renewable energy[EB/OL]. [2026-01-01]. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202206/t20220601_1326720_ext.html.
- [6] 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 X L, YANG M H, CAO J, et al. Research progress of decommissioned wind power blade resource utilization technology[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(3): 1192-1203.
- [7] 张柏林,张生杨,邬博宇,等.废旧风力发电机叶片资源化利用研究进展[J].工程科学学报,2023,45(12):2150-2161.
ZHANG B L, ZHANG S Y, WU B Y, et al. Progress in resource utilization of waste wind turbine blades[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(12): 2150-2161.
- [8] 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[J].洁净煤技术,2023,29(10):17-26.
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[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(10): 17-26.
- [9] 许仁辞.退役风机叶片回收利用技术方法分析[J].内蒙古电力技术,2022,40(5):34-38.
XU R C. Analysis on recycling and utilization method of retired wind turbine blades[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2022, 40(5): 34-38.
- [10] European Commission. A new circular economy action plan: for a cleaner and more competitive Europe[R/OL]. [2026-01-01]. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-new-Circular-Economy-Action-Plan%3A-For-a-cleaner/fecce4394a7b8a69a23a9bbc5af14aefd0948e855>.
- [11] LIU P, MENG F R, BARLOW C Y. Wind turbine blade end-of-life options: an eco-audit comparison[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 212: 1268-1281.
- [12] MISHNAEVSKY L. Sustainable end-of-life management of wind turbine blades: overview of current and coming solutions[J]. Materials, 2021, 14(5): 1124. DOI: 10.3390/ma14051124.
- [13] 李成良,杨超,倪爱清,等.复合材料在大型风电叶片上的应用与发展[J].复合材料学报,2023,40(3):1274-1284.
LI C L, YANG C, NI A Q, et al. Application and development of composite materials in large-scale wind turbine blade[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1274-1284.
- [14] 陈煌,甄波,喻雄,等.碳中和背景下风电叶片复合材料应用

- 关键技术及可持续发展路径[J]. 纺织导报, 2025(4): 20-28.
- CHEN H, ZHEN B, YU X, et al. Key technologies and sustainable development pathways for composite materials in wind turbine blades under carbon neutrality[J]. *China Textile Leader*, 2025(4): 20-28.
- [15] KRAUKLIS A E, KARL C W, GAGANI A I, et al. Composite material recycling technology: state-of-the-art and sustainable development for the 2020s[J]. *Journal of Composites Science*, 2021, 5(1): 28. DOI: 10.3390/jcs5010028.
- [16] PAULSEN E B, ENEVOLDSEN P. A multidisciplinary review of recycling methods for end-of-life wind turbine blades[J]. *Energies*, 2021, 14(14): 4247. DOI: 10.3390/en14144247.
- [17] 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. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112269.
- [18] JOUSTRA J, FLIPSEN B, BALKENENDE R. Structural reuse of wind turbine blades through segmentation[J]. *Composites Part C: Open Access*, 2021, 5: 100137. DOI: 10.1016/j.jcomc.2021.100137.
- [19] 国家发展改革委, 国家能源局, 工业和信息化部, 等. 关于促进退役风电、光伏设备循环利用的指导意见[EB/OL]. [2026-01-01]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/jd/zctj/202308/t20230817_1359886.html.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Industry and Information Technology, et al. Guiding opinions on promoting the recycling and utilization of decommissioned wind power and photovoltaic equipment[EB/OL]. [2026-01-01]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/jd/zctj/202308/t20230817_1359886.html.
- [20] OLIVEUX G, DANDY L O, LEEKE G A. Current status of recycling of fibre reinforced polymers: review of technologies, reuse and resulting properties[J]. *Progress in Materials Science*, 2015, 72: 61-99.
- [21] MENG F R, MCKECHNIE J, TURNER T, et al. Environmental aspects of use of recycled carbon fiber composites in automotive applications[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(21): 12727-12736.
- [22] YANG Y X, BOOM R, IRION B, et al. Recycling of composite materials[J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2012, 51: 53-68.
- [23] DANG W R, KUBOUCHI 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.
- [24] PICKERING S J. Recycling technologies for thermoset composite materials: current status[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, 37(8): 1206-1215.
- [25] 马忠诚, 贾明林, 金春霞, 等. 针对水泥窑协同处置的退役风电叶片物化特性研究[J]. *水泥*, 2025(1): 13-17.
MA Z C, JIA M L, JIN C X, et al. Research on the physical and chemical characteristics of retired wind turbine blades for collaborative disposal of cement kilns[J]. *Cement*, 2025(1): 13-17.

Life Cycle Environmental and Economic Benefits Assessment of End-of-Life Wind Turbine Blade Recycling

WU Yufeng^{1,2}, YU Liang^{1,2}, HUAN Wei^{1,2}, FU Yupeng³, ZHAI Mengyu^{1,2}

(1. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. State Key Laboratory of Materials Low-Carbon Recycling, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, China)

Abstract: With the rapid expansion of China's wind power capacity—exceeding 480 GW by the end of 2024 and accounting for nearly half of the global total—the wind energy sector faces an emerging challenge: the sustainable management of end-of-life wind turbine blades. Early-installed turbines are progressively reaching the end of their 20–25 year design lifespan, with annual blade waste projected to exceed 500 000 tonnes by 2030 and potentially surpass one million tonnes by 2040. These blades, predominantly composed of glass fiber reinforced polymer (GFRP) composites, pose significant recycling challenges due to the irreversible cross-linked structure of thermoset resins. Conventional landfill disposal not only wastes valuable fiber resources but also raises environmental concerns regarding land occupation and potential leachate contamination. This study presents a comprehensive life cycle assessment (LCA) framework to systematically evaluate and compare the environmental benefits and

economic value of three mainstream recycling pathways: (1) mechanical recycling to produce recycled composite boards substituting virgin wood-based materials, (2) pyrolysis to recover glass fibers substituting virgin glass fiber production, and (3) chemical recycling using nitric acid dissolution to recover glass fibers. The functional unit was defined as 1 kg of recycled product, with system boundaries spanning from blade entry into recycling facilities to final product output ("cradle-to-gate"). Life cycle inventory data were compiled using SPHERA LCA for Expert software (version 10.9.1.17) with its integrated database covering 1992—2024. Environmental impacts were characterized using dual assessment approaches: the CML 2001 midpoint method quantifying nine impact categories (global warming potential, acidification, eutrophication, photochemical ozone creation, human toxicity, freshwater and marine ecotoxicity, ozone depletion, and terrestrial ecotoxicity), and the ReCiPe 2016 endpoint method evaluating ultimate damages across 22 indicators in three areas of protection—human health (DALY), ecosystems (species.yr), and resources (USD). To bridge environmental assessment with economic valuation, shadow pricing theory was employed to monetize key environmental externalities based on China's carbon market prices (74.63 CNY/tonne CO₂) and environmental tax standards. The results reveal distinct environmental profiles across the three pathways. Mechanical recycling emerges as the most environmentally favorable option under current technological conditions, demonstrating superior performance in acidification, eutrophication, and human health indicators due to its exceptionally low energy consumption (72.4 kWh per 100 kg blade processed) and simple input structure. Its environmental externality benefit reaches 0.32 CNY/kg, with a balanced contribution structure across carbon reduction (62.50%), acidification mitigation (31.25%), and eutrophication control (6.25%). Pyrolysis exhibits slightly higher total benefits (0.34 CNY/kg) with pronounced carbon reduction advantages, where CO₂ mitigation benefits account for 76% of its total environmental value, attributable to the high carbon intensity of virgin glass fiber production being offset. However, endpoint assessment reveals elevated freshwater ecotoxicity values, potentially linked to phthalate compounds generated during thermal decomposition, warranting further investigation and emission control measures. Chemical recycling using nitric acid demonstrates the least favorable environmental performance, with total benefits of merely 0.10 CNY/kg—less than one-third of the other pathways. More critically, it generates net environmental costs in eutrophication (−0.01 CNY/kg), reflecting the substantial environmental burden associated with nitric acid production (260 kg per 100 kg blade) and nitrogen oxide emissions. Based on these findings, this study recommends establishing environmental value realization mechanisms through carbon market integration and green building material certification to internalize environmental externalities. Technology-specific policy support should prioritize expanding downstream applications for mechanical recycling products, mandating emission control systems for pyrolysis facilities, and directing chemical recycling research toward green solvent alternatives and closed-loop acid recovery. Regional recycling centers should flexibly adopt technology routes aligned with local industrial foundations—favoring mechanical recycling in construction material markets and pyrolysis in composite manufacturing clusters. Furthermore, accelerating the development of industry standards for blade recyclability design, dismantling protocols, and recycled product quality grading will be essential for establishing a circular economy framework in the wind power sector.

Key words: end-of-life wind turbine blades; life cycle assessment; environmental benefits; economic benefits; recycling and utilization; circular economy

Received date: 2026-01-07

Foundation item: Project(23Y CZH034) supported by the Ministry of Education Humanities and Social Sciences Research Youth Fund Project

First author: WU Yufeng; Tel: +86-010-67396234; E-mail: wuyufeng3r@126.com

Corresponding author: ZHAI Mengyu; Tel: +86-010-67396234; E-mail: zhaimy00@163.com