



退役风电叶片高质回收再制造利用

杨双桥^{1,2}, 王福杰¹, 蒲志龙¹, 王琪^{1,2*}

1. 先进高分子材料全国重点实验室(四川大学), 四川大学高分子研究所, 成都 610065

2. 天府永兴实验室, 成都 610213

*通讯作者, E-mail: qiwang@scu.edu.cn

收稿日期: 2025-09-28; 接受日期: 2025-11-27; 网络版发表日期: 2026-02-25

国家自然科学基金(编号: U24A20207)和天府永兴实验室重大科技攻关项目(编号: 2023KJGG11)资助

摘要 风力发电是“双碳”目标下发展最快的绿色能源之一, 我国风力发电量世界第一. 风电叶片是风力发电机组捕获风能的核心部件, 为满足其轻质、高强高模、易加工和低成本要求, 通常采用60~70 wt.%玻璃纤维和30~40 wt.%热固性环氧树脂制造, 不熔不溶, 退役后回收利用是世界难题. 本文介绍了我们研究团队基于分子力化学基本原理发明的固相剪切碾磨加工(solid-state shear milling, S³M)装备和技术, 重点讨论了退役风电叶片的室温超细粉碎和力化学改性机理, 总结了活性叶片粉体制备高性能玻璃钢制品、粉体表面包覆阻燃剂制备高性能阻燃制品、粉体表面超支化改性制备高填充增强母粒和再生制品等的研究进展, 为突破传统技术不能回收利用退役风电叶片的局限以及实现退役风电叶片高质回收再制造利用提供技术和理论支撑.

关键词 退役风电叶片, 力化学改性, 再制造

1 引言

风力发电是“双碳”目标下发展最快的绿色能源之一, 风力发电量已占全球总发电量的16.3%, 成为仅次于水电(18.1%)的第二大清洁能源^[1], 国际能源署(IEA)预计, 到2050年, 风电技术将满足全球35%的电力需求^[2]. 我国风电装机规模位居世界第一^[3,4], 总装机容量已超5.8亿千瓦. 风电叶片是风力发电机组中实现风能转换的核心部件, 风电叶片越长, 其扫过的面积与获取风速越大, 捕获能量越高, 目前风电叶片长达120余米, 重50余吨. 风力发电机叶片的使用寿命20年左右, 我国在20世纪初开始规模化发展风力发电, 2025年前后迎来集中退役潮, 预计2030年退役叶片将达百万吨

级, 其资源化利用是我国发展风电产业和绿色低碳循环经济的重大需求^[5].

为满足轻质、高强高模、易加工和低成本要求, 风电叶片通常采用60~70 wt.%玻璃纤维增强30~40 wt.%热固性环氧树脂制造^[6], 高玻纤含量使其难焚烧处理. 热固性环氧树脂具有不可逆三维交联网络, 其化学结构稳定, 不能降解; 不溶不熔, 不能熔融再加工利用. 退役风电叶片(decommissioned wind turbine blade, DWTB)回收利用是世界难题. 目前主要问题是露天堆放, 严重污染环境. 退役风电叶片极具回收价值, 中共中央、国务院发布《关于全面推进美丽中国建设的意见》, 强调促进废旧风机叶片等新型工业废弃物的循环利用. 目前退役风电叶片回收方法主要有化学回收

引用格式: Yang S, Wang F, Pu Z, Wang Q. High-quality recycling and remanufacturing of decommissioned wind turbine blades. *Sci Sin Chim*, 2026, 56: 619–628, doi: [10.1360/SSC-2025-0246](https://doi.org/10.1360/SSC-2025-0246)

和物理回收, 化学回收通过热解或化学溶剂解聚得到低聚物或单体^[7], 其中热解法通过热能破坏环氧树脂化学键, 得到低分子热解油和再生玻璃纤维, 需解决高温热解设备投资大、运行能耗高的问题^[8]. 化学溶剂降解法是在催化剂存在下, 利用强酸强碱或双氧水等强氧化性溶剂破坏化学键, 得到低分子物和玻璃纤维, 产物复杂, 分离成本高、溶剂回收难^[9]. 物理回收通过机械切割、粉碎, 制备纤维状粉体, 用于制备塑料托盘、混凝土道路材料等^[10,11], 但粉体粒度较大, 再生制品力学性能较低, 附加值低, 应用受限^[12,13], 亟需发展退役风电叶片高质回收再制造利用新技术.

本文介绍了我们研究团队在退役风电叶片低碳高质回收再制造利用方面的一些研究工作. 针对退役风电叶片不溶不熔、难高质回收利用的世界难题, 我们建立了固相剪切碾磨新技术新装备, 实现了塑料废弃物室温超细粉碎、快速微纳分散、可控解交联和力活化, 突破了传统加工难以高质高效回收利用热固性型塑料废弃物的局限, 建立了退役风电叶片的室温超细粉碎和力化学改性新技术, 用于替代部分原料制备高性能玻璃钢制品、表面包覆制备高性能阻燃剂、表面改性制备高填充增强母粒, 并规模化制备了高质再生制品, 突破了传统技术难回收利用退役风电叶片的局限.

2 固相剪切碾磨加工技术和装备

力化学研究应力作用引起的化学反应或物理化学变化, 与热化学、电化学、光化学一起并列为四大分支化学^[14]. 高分子力化学是建立在高分子化学与力学基础上的交叉学科, 主要研究固体聚合物在应力作用下破碎、活化、生成大分子自由基以及引发力化学反应, 可为高分子材料制备、改性以及回收利用提供新方法、新途径^[15]. 常规粉碎设备主要基于冲击力, 不能室温超细粉碎黏弹性高分子材料. 我们基于高分子力化学基本原理, 研发了固相剪切碾磨加工(solid-state shear milling, S³M)装备, 建立和发展了固相剪切碾磨加工新理论和新技术^[16,17]. 固相剪切碾磨加工装备主要部件由电机传动系统和动静磨盘构成, 核心部件为镶嵌式磨面, 上下磨盘盘面结构一致, 等分为 n 个扇形, 每个扇形盘面上平行排布上窄下宽的直角梯形磨齿. 动静磨盘上下槽间交叠形成三维立体碾磨腔(图1). 通过理论分析, 建立了动静槽面二面角方程^[16].

$$\varphi = \arccos \left[\sin^2 \alpha \cos \left(\frac{2\pi}{n} - \theta \right) + \cos^2 \alpha \right] \quad (1)$$

式中, φ 为二面角, θ 为转动角, α 为斜面角. 磨面在一个周期转动中, 二面夹角 φ ($\angle BCD$)由 $\arccos \left[\sin^2 \alpha \cos \left(\frac{2\pi}{n} - \theta \right) + \cos^2 \alpha \right]$ 逐渐减小到0, 类似三维剪, 提供强大剪切力, 使物料在强烈的剪切、挤压作用下粉碎^[18]. 三维剪切力场具有粉碎、分散、混合、力化学反应等多重功能^[15]. 我们建成固相剪切碾磨加工工业化装备, 单线处理量达500 kg h⁻¹ (图1).

2.1 室温超细粉碎黏弹性高分子材料

固相剪切碾磨加工装备独特的三维剪切力场, 可突破传统粉碎设备局限, 实现韧性高分子材料室温超细粉碎, 粉体粒径可达微纳米级(图2和表1)^[19,20]. 高分子材料在剪切、挤压复合力场下发生分子链断裂、结晶重排、结晶度下降等力化学效应, 赋予高分子材料新的物理化学性质和成型加工性.

2.2 固相调控高分子共混物的相畴结构

固相剪切加工技术可室温超细粉碎共混型废弃塑料, 实现复合粉体的快速微纳米分散^[21~23]. 再生制品相畴尺寸由粉体的粒度和粒度分布决定, 制备高性能共混复合材料, 而不依赖组分相容和黏度匹配, 从而解决多组分共混物需分类分离的难题(图3).

2.3 力化学解交联和力活化

固相剪切碾磨加工强大的三维剪切力场可破坏分子间交联键实现交联高分子的力化学解交联(图4). 例如, 通过室温可控力降解选择性断裂废弃交联聚乙烯Si-O交联键, 使其具有热塑加工性^[25~27]. 对于热固性塑料, 固相剪切碾磨加工可部分破坏分子结构, 生成羟基、氨基等活性基团, 实现惰性热固性树脂粉体的力活化, 利于粉体功能化改性, 或作为部分原料再次参与固化反应, 制备高性能再生制品^[28,29].

3 退役风电叶片高质回收再制造利用

3.1 退役风电叶片室温超细粉碎

退役风电叶片复合材料中含60~70 wt.%高强玻璃纤维, 其强度高达2000 MPa, 常规粉碎技术无法实现

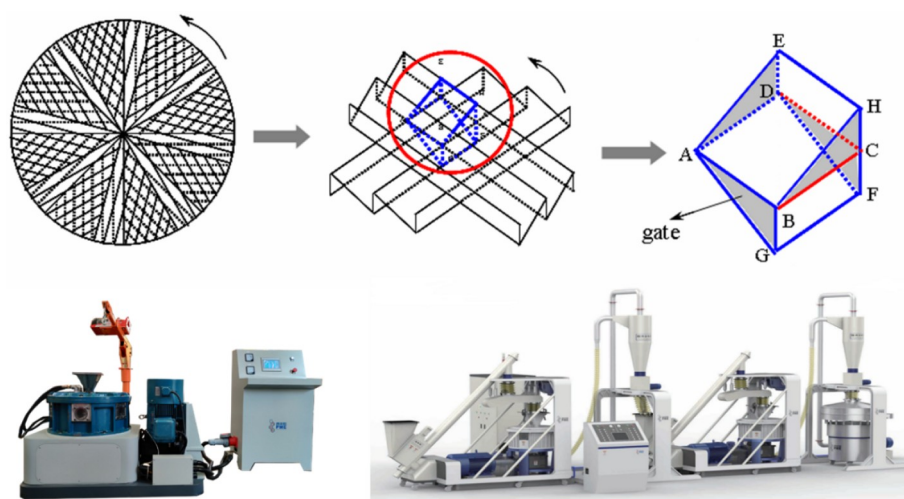


图 1 (网络版彩图) S^3M 装备磨盘盘面示意图及 S^3M 装备图

Figure 1 (Color online) Schematic of the disc surfaces in the S^3M equipment and photo of the S^3M equipment.

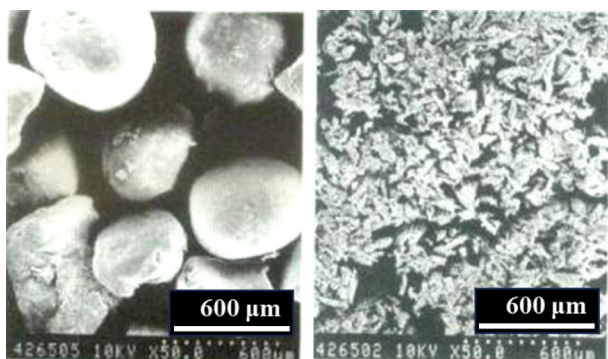


图 2 聚丙烯球磨 24 h (左) 和固相剪切碾磨 20 min (右) 比较 [16]

Figure 2 Comparison of polypropylene between ball-mill (24 h, left) and solid-state shear-milling (20 min, right) [16].

其超细粉碎并保留玻璃纤维高长径比, 如球磨是以冲击力为主, 钢球冲击力直接作用于玻璃纤维表面, 使其长径比迅速降低至 5 以下, 产生大量粒径大于 $100\ \mu\text{m}$ 的环氧树脂颗粒, 这些颗粒作为增强填料的增强效果差. 固相剪切碾磨加工以剪切力为主, 可实现退役风电叶片室温高效粉碎. 三维剪切力场使微裂纹沿玻璃纤维与环氧树脂界面破裂, 制备的叶片粉体中玻璃纤维长度大于 $250\ \mu\text{m}$, 长径比大于 10, 环氧颗粒粒径小于 $20\ \mu\text{m}$, 玻璃纤维与环氧树脂剥离程度高, 玻璃表面光滑, 这有助于暴露玻璃纤维表面的活性羟基和环氧树脂的活化改性, 用于制备高性能增强填料 (图 5).

表 1 固相剪切碾磨加工制备的聚合物微纳粉体极限粒径

Table 1 Particle size of micro/nano polymer powder prepared by solid-state shear milling [19,20]

Polymer type ^{a)}	Particle size
PA6	~80 nm
PP, PS	0.3~2 μm
PC, PPS	10~50 μm
PES, PEEK	1~10 μm
HDPE, waste rubber, SBS	micro-scale

a) 聚酰胺 6 (polyamide 6, PA6); 聚丙烯 (polypropylene, PP); 聚苯乙烯 (polystyrene, PS); 聚碳酸酯 (polycarbonate, PC); 聚苯硫醚 (polyphenylene sulfide, PPS); 聚醚砜 (polyether sulfone, PES); 聚醚醚酮 (polyether ether ketone, PEEK); 高密度聚乙烯 (high-density polyethylene, HDPE); 苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物 (styrene-butadiene-styrene block copolymer, SBS).

3.2 退役风电叶片粉体功能化改性及再制造

3.2.1 废弃环氧树脂的力化学改性

退役风电叶片中热固性环氧树脂具有三维交联结构, 这是其难回收的主要根源, 环氧树脂通常采用胺类或酸酐类为固化剂制备高性能复合材料. 利用固相剪切碾磨加工的强大三维剪切力场, 可实现叶片中胺固化包衣环氧树脂的室温超细粉碎, 粉体粒径达 $17\ \mu\text{m}$, 环氧树脂凝胶含量由 97% 降至 90.6%, 核磁交联密度从 3.43×10^{-3} 下降到 $2.69 \times 10^{-3}\ \text{mol mL}^{-1}$, 局部强剪切应力大于 C-N 键 ($305\ \text{kJ mol}^{-1}$)、C-C 键 ($332\ \text{kJ mol}^{-1}$)、

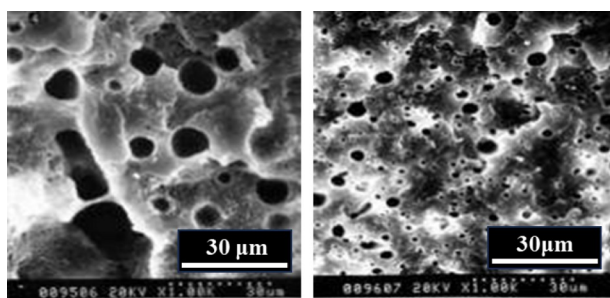


图3 PP/PA6熔融共混物(左)和固相剪切共碾磨20次(右)形貌^[24]

Figure 3 Morphology of PP/PA6 melt-blend (left) and solid-state shear co-milled (20 cycles, right) [24].

C-O-C键(360 kJ mol^{-1})键能时, 可破坏环氧树脂中C-N、C-C和C-O-C等化学结构, 部分化学键在力场诱导下重组, 在环氧粉体表面形成了大量羟基和氨基等活性基团, 力化学碾磨后环氧粉体羟基(3414 cm^{-1})、氨基(3414 cm^{-1})和羰基(1727 cm^{-1})峰强

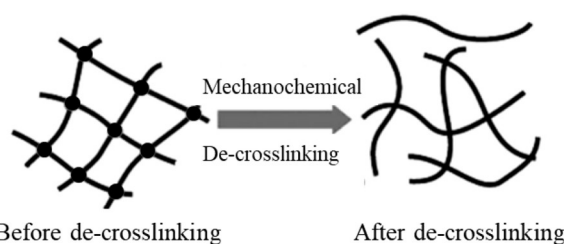


图4 力化学解交联示意图^[15]

Figure 4 Schematic illustration of mechanochemical de-crosslinking [15].

度显著增强. 活性环氧树脂粉体表面氨基与新环氧树脂的环氧基团反应, 在环氧树脂粉体表面形成新的共价键, 使环氧粉体与环氧基体界面强度大幅提升. 活性环氧粉体含量为20%时, 制备的环氧再生材料拉伸、弯曲和冲击强度分别达到42.2 MPa、73.2 MPa和 8.8 kJ m^{-2} , 相较于力化学碾磨改性前分别提高了62%、41%和109% (图6)^[28].

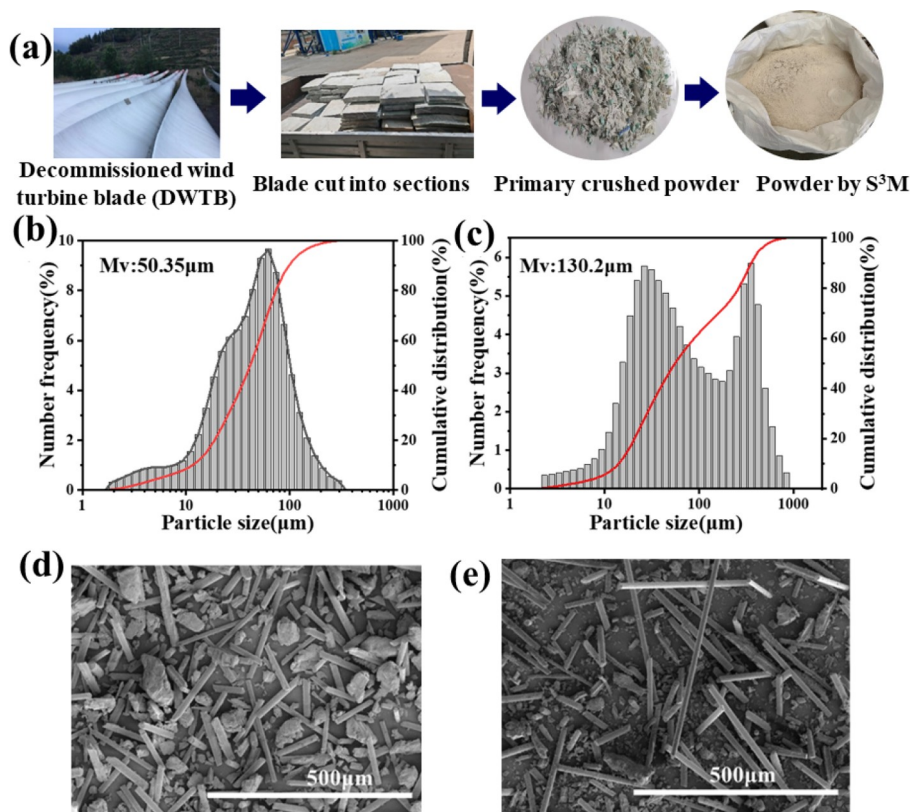


图5 (网络版彩图) (a) DWTB破碎过程; (b, d) 球磨制备和(c, e) S³M制备DWTB粉体的粒径分布与扫描电子显微镜(SEM)图像
Figure 5 (Color online) (a) Crushing process of the DWTB; Particle size distribution and scanning electron microscope (SEM) images of the DWTB powder prepared by (b, d) ball milling and (c, e) S³M.

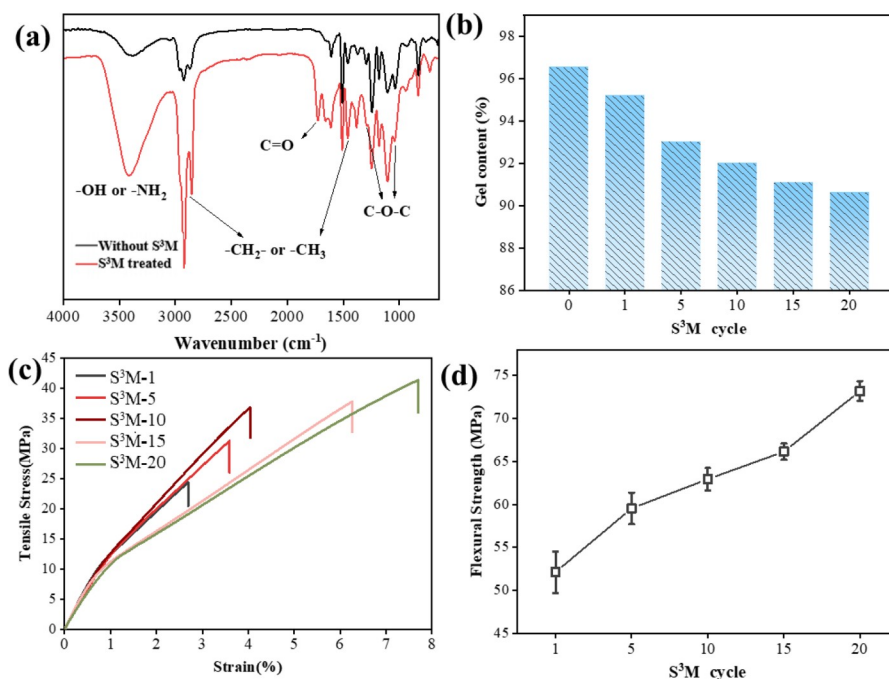


图 6 (网络版彩图)废弃胺类固化环氧树脂力化学改性. (a) 傅里叶变换红外光谱变化; (b) 凝胶含量变化; (c) 拉伸性能变化; (d) 弯曲性能变化^[28]

Figure 6 (Color online) Mechanochemical modification of waste amine-cured epoxy resins. Changes in: (a) Fourier transform infrared spectroscopy; (b) gel content; (c) tensile properties; (d) flexural properties^[28].

酸酐类固化环氧树脂比胺类固化环氧具有更高的强度和模量,多应用于挤拉生产工艺,制备超大尺寸风电叶片的主梁和连接件等关键部件.固相剪切碾磨加工可实现酸酐类固化环氧树脂的室温超细粉碎和力化学改性,制备活性环氧树脂超细粉体,粉体粒径约 10 μm,环氧树脂凝胶含量由 98.6% 降至 84.5%.力化学碾磨加工过程破坏可环氧树脂的 C-C 主链和 C-O-C 交联键,形成大量羟基并生成苯氧自由基,并导致 C=O 键含量增加,活性粉体在环氧树脂基体中均匀分散,可与新环氧树脂及固化剂发生反应,显著增强界面作用力.酸酐固化再生环氧制品在外界载荷下,裂纹沿界面的形成和扩散可吸收更多能量,弯曲强度和模量分别达到 82.3 MPa 和 2579 MPa,弯曲强度较力化学改性前提升 144%,可替代部分环氧树脂原料用于再生制品(图 7)^[29].

3.2.2 退役叶片粉体固相力化学化改性制备玻璃钢制品

固相剪切碾磨加工可实现退役叶片粉体中环氧树脂的力化学改性,三维剪切力场破坏了部分环氧分子

链交联结构,化学键发生断裂和重组,产生的新自由基在力化学作用下与空气中的水反应生成了新的羟基,力化学碾磨加工中形成的活性基团为后续叶片粉体进一步改性和活化提供重要基础.

为满足高性能玻璃钢制品对叶片粉体更高反应活性的要求,通过固相剪切共碾磨,利用环氧树脂化学键力化学键断裂形成的自由基,与亚烷基缩水甘油醚 (AGE)、乙二醇缩水甘油醚 (EGDE)、环氧大豆油 (ESO) 等改性剂接枝反应,形成高反应性环氧基团,赋予界面反应性,有效提升了复合材料的界面结合强度^[28-30].改性后叶片粉体表面环氧基团可与固化剂反应,形成化学交联键,有效提升了复合材料的界面结合强度,显著减少玻璃钢制品内部缺陷.改性风电叶片粉体含量 10% 时,再制造环氧玻璃钢制品的拉伸强度由未改性的 171.1 提升至 194.3 MPa,弯曲强度由 210 提升至 248.4 MPa,接近纯玻璃钢制品.通过模压加工进一步制备绝缘子制品,制品扭力达到 17.7 N·m,可通过 26 kV 下 1 min 的耐电压测试,满足电气绝缘件制品的性能要求,可用于高压输电工程、轨道交通、工业电器绝缘件等领域(图 8).

3.2.3 活性叶片粉体表面包覆改性制备高性能阻燃制品

环氧树脂属于易燃材料, 与玻璃纤维复合也易燃

烧, 限制了玻璃纤维增强环氧树脂复合材料的使用范围。我们以固相剪切碾磨加工制备的高长径比活性叶片粉体为增强剂, 利用多巴胺苯二酚基团与叶片粉体

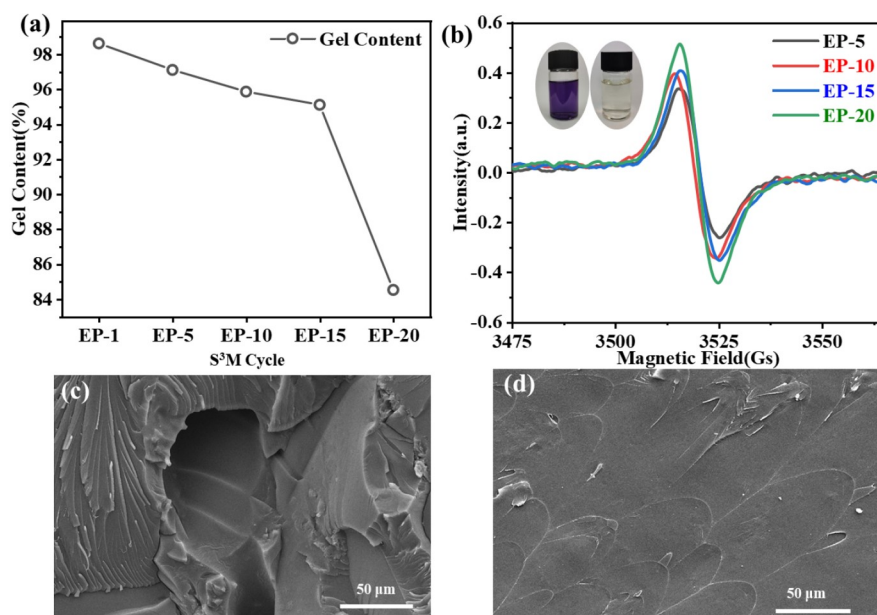


图 7 (网络版彩图) 废弃酸酐固化环氧树脂力化学改性. (a) 凝胶含量变化; (b) 电子顺磁共振自由基浓度变化; (c) 力化学改性前和(d) 改性后界面形貌^[29]

Figure 7 (Color online) Mechanochemical modification of waste anhydride-cured epoxy resins. (a) Variation in gel content; (b) changes in electron paramagnetic resonance radical concentration; (c) interfacial morphology before modification and (d) after modification [29].

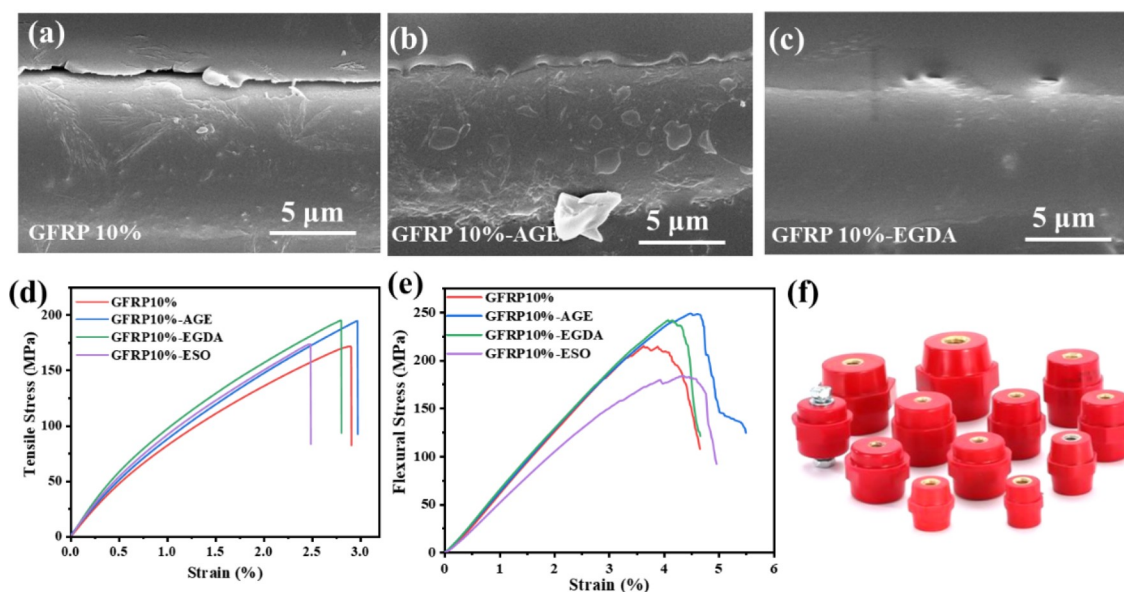


图 8 (网络版彩图) 退役风电叶片制备玻璃钢制品的(a-c) 界面微观形貌和(d, e) 力学性能; (f) 玻璃钢绝缘子制品

Figure 8 (Color online) (a-c) Interfacial micro-morphology and (d, e) mechanical performance of glass fiber reinforced plastic products prepared from decommissioned wind turbine blades; (f) glass fiber reinforced plastic insulator product.

表面羟基相互作用实现表面自组装, 形成聚多巴胺黏附层, 再利用聚多巴胺分子中的氨基/羟基与聚磷腈骨架的活性基团(P-Cl)发生取代反应, 形成稳定的聚磷腈阻燃剂接枝包覆层. 阻燃增强叶片粉体含量为20%时, 环氧复合材料力学性能良好, 拉伸强度达69.4 MPa, 极限氧指数(LOI)达到31.9%, 属难燃材料. 复合材料燃烧过程中, 聚磷腈在凝聚相中形成含磷自由基促进成炭, 分解形成CO₂和NH₃等稀释可燃气体, 实现高效阻燃, 再生制品满足UL-94V-0最高阻燃等级(图9)^[30].

3.3 活性叶片粉体制备高填充增强母粒和型材

高填充塑料制品广泛应用于建筑、水利、汽车、电子等国民经济重要领域, 我们以高长径比活性风电叶片粉体为增强剂, 结合硅烷偶联剂、超支化小分子等包覆实现粉体表面功能化改性, 改善其在聚乙烯基体中的分散和界面结合, 实现75 wt.%以上高填充挤出加工, 与市售滑石粉母粒相比, 弯曲强度和模量分别高出21.7%和26.5%, 可替代晶须、滑石粉等高填充母粒,

用于制备高刚性市政用HDPE埋地波纹管, 达到国家标准GB/T 19472.1-2019. 活性叶片粉体经界面改性剂包覆改性, 可70 wt.%高填充聚乙烯直接挤出加工, 用于制备高性能型材, 制品拉伸强度、弯曲强度和弯曲模量分别达17 MPa、31 MPa和4600 MPa, 全面优于木塑地板国家标准GB/T 24508-2020, 可用于市政工程、交通运输、园林建筑等领域(图10)^[31].

4 总结与展望

风力发电的快速发展产生大量退役风电叶片, 预计2030年达百万吨级, 亟需发展绿色低碳回收利用新装备新技术. 固相剪切碾磨加工装备和技术具有室温超细粉碎、固相相畴调控、力化学解交联和活化等多重功能, 实现了退役风电叶片室温超细粉碎和力化学改性, 制备的活性叶片环氧粉体粒径小于20 μm, 部分化学键在力场作用下断裂重组, 形成大量羟基和氨基等活性基团, 可用于制备高性能玻璃钢制品、包覆增

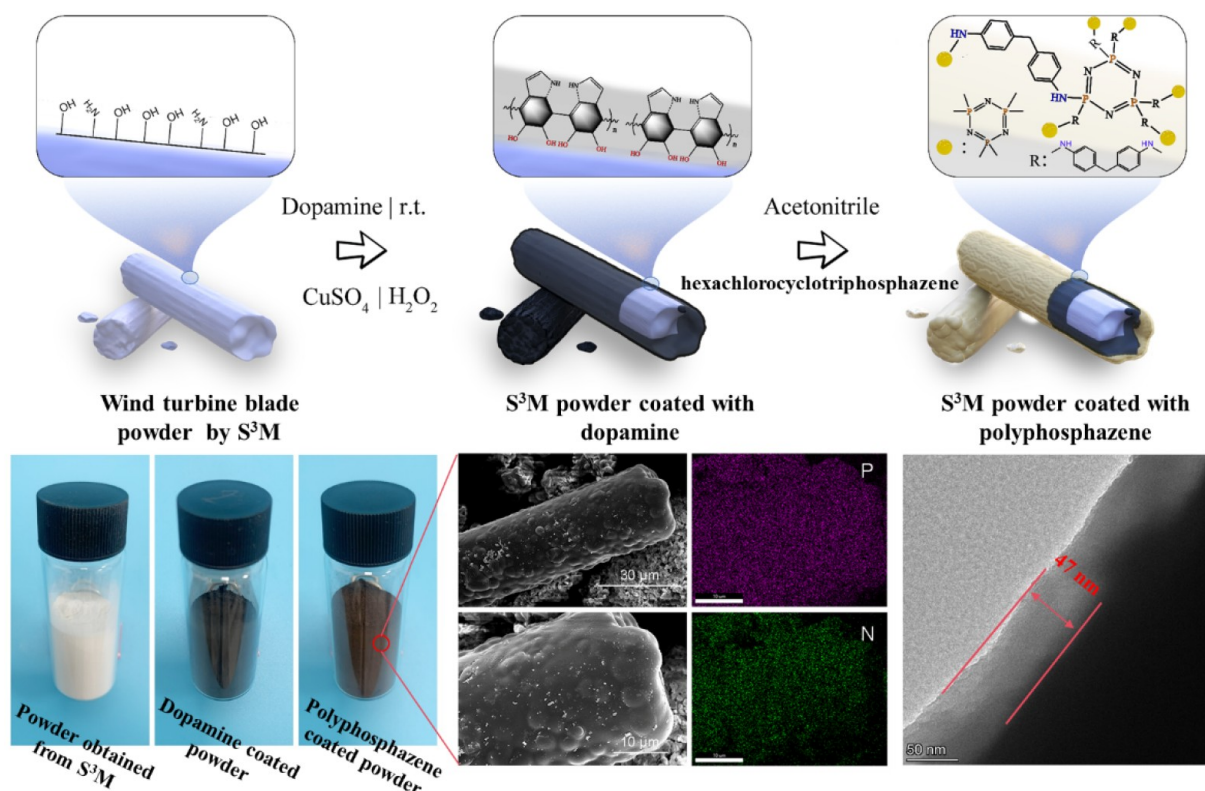


图9 (网络版彩图)退役风电叶片粉体包覆改性制备高性能阻燃剂及结构表征^[30]

Figure 9 (Color online) Preparation of high-performance flame retardants via surface modification of powdered decommissioned wind turbine blades and their structural characterization^[30].

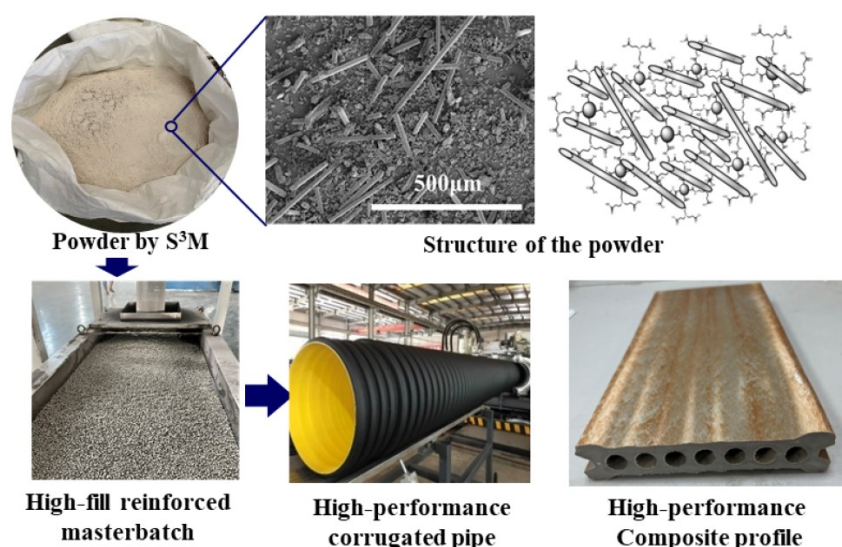


图 10 (网络版彩图)活性退役风电叶片粉体高填充母粒再制造高性能波纹管 and 型材^[31]

Figure 10 (Color online) High-filled masterbatch from decommissioned wind turbine blade recycling and remanufacturing for high-performance corrugated pipes and remanufactured profiles ^[31].

强型阻燃剂和阻燃制品以及高填充增强母粒和高质再生制品, 实现高玻纤含量、高交联退役风电叶片低碳高质回收再制造利用, 如活性叶片粉体用于制备高性能玻璃钢绝缘子制品, 满足电气绝缘件制品的性能要求; 活性叶片粉体接枝包覆聚脲脲胺制备阻燃性能优异

增强型阻燃剂, 阻燃制品达UL-94V-0; 表面功能化改性活性叶片粉体制备75 wt.%以上高填充增强母粒, 制造了力学性能优良的HDPE埋地波纹管和高性能型材等, 对我国风电产业的可持续发展和有效治理废弃塑料污染有重要作用.

参考文献

- 1 Liu T, Paraskevoulakos C, Mughal UA, Tyurkay A, Lushnikova N, Song H, Duyal C, Karnick ST, Gauvin F, Lima AT. *Mater Des*, 2025, 251: 113732
- 2 Wang H, Xiong B, Zhang Z, Zhang H, Azam A. *iScience*, 2023, 26: 107674
- 3 Liu F, Wang X, Sun F, Kleidon A. *Energy*, 2023, 263: 125727
- 4 Maheshwari Z, Kengne K, Bhat O. *Renew Sustain Energy Rev*, 2023, 180: 113297
- 5 Kaewbumrung M, Plengsa-Ard C, Pansang S, Palasai W. *Results Eng*, 2024, 22: 102383
- 6 Pu Z, Yang S, Wang Q. *J Appl Polym Sci*, 2024, 141: e55474
- 7 Shao L, Chang YC, Zhao B, Yan X, Bliss BJ, Fei M, Yu C, Zhang J. *Chem Eng J*, 2023, 464: 142735
- 8 Cousins DS, Suzuki Y, Murray RE, Samaniuk JR, Stebner AP. *J Cleaner Production*, 2019, 209: 1252–1263
- 9 Ahrens A, Bonde A, Sun H, Wittig NK, Hammershøj HCD, Batista GMF, Sommerfeldt A, Frølich S, Birkedal H, Skrydstrup T. *Nature*, 2023, 617: 730–737
- 10 Meng F, Olivetti EA, Zhao Y, Chang JC, Pickering SJ, McKechnie J. *ACS Sustain Chem Eng*, 2018, 6: 9854–9865
- 11 Rahimizadeh A, Kalman J, Fayazbakhsh K, Lessard L. *Compos Part B-Eng*, 2019, 175: 107101
- 12 Pender K, Romoli F, Fuller J. *Energies*, 2024, 17: 3008
- 13 Zhao X, Long Y, Xu S, Liu X, Chen L, Wang YZ. *Mater Today*, 2023, 64: 72–97
- 14 Caruso MM, Davis DA, Shen Q, Odom SA, Sottos NR, White SR, Moore JS. *Chem Rev*, 2009, 109: 5755–5798
- 15 Wang Q, Lu C, Xia H. *Polymer Bulletin*, 2013, 9: 35–49 (in Chinese) [王琪, 卢灿辉, 夏和生. 高分子通报, 2013, 9: 35–49]

- 16 Xu X, Wang Q, Kong X, Zhang X, Huang J. *Plast Rubber Compos Process Appl*, 1996, 25: 152–158
- 17 Wang Q, Xu X. *Chem Res Chin Univ*, 1997, 1997: 1197–1201
- 18 Wei L, Wang C, Duan R, Zhou Z, Lu C. *Materials*, 2024, 17: 4210
- 19 Shao W, Wang Q, Wang F, Chen Y. *Carbon*, 2006, 44: 2708–2714
- 20 Zhang XX, Lu CH, Liang M. *Plasts Rubber Compos*, 2007, 36: 370–376
- 21 Wang X, Yang S, Wang Q. *Polym Adv Techs*, 2023, 34: 3356–3369
- 22 Yang S, Bai S, Duan W, Wang Q. *Polym Int*, 2018, 67: 936–945
- 23 Yang S, Zhong F, Wang M, Bai S, Wang Q. *J Industrial Eng Chem*, 2018, 57: 143–153
- 24 Wang Q, Liu C, Chen Z. *Polym J*, 2001, 33: 522–527
- 25 Sun F, Bai S, Wang Q. *Vinyl Additive Tech*, 2019, 25: 149–158
- 26 Guo W, Liu Z, Yang S, Li L. *ACS Sustain Chem Eng*, 2023, 11: 13918–13927
- 27 Lai S, Cheng C, Yuan B, Liao Y, Su X, Bai S. *Waste Manage*, 2023, 158: 153–163
- 28 Kang P, Yang S, Bai S, Wang Q. *ACS Sustain Chem Eng*, 2021, 9: 11778–11789
- 29 Wang F, Wang Q, Yang S. *ACS Sustain Chem Eng*, 2025, 13: 647–657
- 30 Luo D, Yang S, Wang Q. *ACS Sustain Chem Eng*, 2025, 13: 6598–6610
- 31 Yang S, Wang F, Wang Q. A high-fill modified recycled panel from waste wind turbine blade powder and its preparation method (in Chinese). China Patent, CN202510771818.1, 2025-07-08 [杨双桥, 王福杰, 王琪. 一种高填充改性废弃风电叶片粉体的再生板材及其制备方法. 中国专利, CN202510771818.1, 2025-07-08]

High-quality recycling and remanufacturing of decommissioned wind turbine blades

Shuangqiao Yang^{1,2}, Fujie Wang¹, Zhilong Pu¹, Qi Wang^{1,2*}

¹ State Key Laboratory of Advanced Polymer Materials (Sichuan University), Polymer Research Institute of Sichuan University, Chengdu 610065, China

² Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu 610213, China

*Corresponding author (email: qiawang@scu.edu.cn)

Abstract: Wind power is among the fastest-growing renewable energy sources under the “dual-carbon” strategy, with China ranking first worldwide in wind power generation. Wind turbine blades, the core components for capturing wind energy, are typically fabricated from 60%–70% glass fiber and 30%–40% thermosetting epoxy resin to meet the requirements of light weight, high strength and modulus, low cost, and ease of processing. However, after decommissioning, these blades are neither incinerable nor landfillable, and their insoluble and infusible nature makes reprocessing and recycling extremely challenging. This issue has become a global concern as well as a critical national demand for advancing China’s wind power industry and green, low-carbon circular economy. This paper introduced solid-state shear milling (S³M) equipment and technology by our research team based on the principles of polymer mechanochemistry. The study focused on the mechanisms of room-temperature ultrafine pulverization and mechanochemical modification of decommissioned wind turbine blades. Furthermore, it comprehensively summarizes recent progress in utilizing the activated blade powders to fabricate high-performance fiberglass composites, produce flame-retardant products via surface coating with flame retardants, and prepare high-filling reinforcing masterbatches and regenerated products through hyperbranched surface modification. This work provided both theoretical and technological foundations for overcoming the limitations of conventional recycling methods and realizing high-quality recycling and remanufacturing of decommissioned wind turbine blades.

Keywords: decommissioned wind turbine blades, mechanochemical modification, remanufacturing

doi: [10.1360/SSC-2025-0246](https://doi.org/10.1360/SSC-2025-0246)