

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.05.024

退役风机叶片的回收和应用技术

赵光金¹, 李雅敏^{1,2}, 李博文¹, 董锐锋¹, 张云潇¹, 胡玉霞¹

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 郑州 450052; 2. 河南九域腾龙信息工程有限公司, 郑州 450000)

摘要: 近年来, 风力发电技术因清洁、高效、可再生等优势得以蓬勃发展。分析了近几年风力发电技术的发展速度、装机规模、退役规模等数据, 表明中国将迎来风机叶片大规模退役潮。重点综述了现有主要的退役风机叶片(RWTB)回收应用技术现状, 回收技术主要包括机械法、化学法、联合法, 应用技术主要将回收产物制备为新型材料, 对比分析了各技术手段的优缺点。此外, 总结了RWTB回收行业面临的技术难题与行业挑战。最后, 详细分析了RWTB回收行业发展的趋势与方向。

关键词: 退役风机叶片; 回收; 应用; 机械法; 化学法; 联合法; 新型材料

中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)05-0169-09

Technology of recycling and application of retired wind turbine blade

ZHAO Guangjin¹, LI Yamin^{1,2}, LI Bowen¹, DONG Ruifeng¹, ZHANG Yunxiao¹, HU Yuxia¹

(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China;

2. Henan Jiuyu Tenglong Information Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract : In recent years, wind power generation technology has flourished due to its advantages of cleanliness, efficiency, and renewability. The analysis of data on the development speed, installed capacity, and retirement scale of wind power generation technology in recent years indicates that China will usher in a wave of large-scale retirement of wind turbine blades. The current status of existing and major recycling technologies and application technologies of retired wind turbine blade (RWTB) were focused on, and the recycling technologies mainly include mechanical methods, chemical methods, and combined methods, while the application technologies mainly prepare recycled products into new materials. The advantages and disadvantages of each technological means are compared and analyzed. In addition, the technical challenges and industry challenges faced by RWTB recycling industry were summarized. Finally, a detailed analysis was conducted on the development trends and directions of RWTB recycling industry.

Keywords : retired wind turbine blade ; recycling ; application ; mechanical method ; chemical method ; combined method ; new material

丹麦 Paul La Cour 于 1891 年建成全球首台风力发电机, 标志着风力发电技术正式诞生。近代以来, 由于能源需求的持续增长与环境保护和可持续发展的迫切要求, 风电技术快速发展为新型电力系统的重要成员^[1]。据统计, 2024 年, 中国风电新增并网装机量达 88 吉瓦, 累计并网装机量约 5.3 亿千瓦, 在全国发电装机容量中的占比攀升至 15.21%。据预测, 中国的风电装机容量在 2030 年将达到 8 亿千瓦, 2060 年达到 2.5 太瓦, 分别占全国发电装机总量的 21% 与 31.2%^[2]。目前, 中国的风力发电行业已经历 20 余年的发展, 将在近期迎来庞大的风机“退役潮”^[3]。据估计, 2025 年前后中国的退

役风机叶片(RWTB)量将达到约 11 400 t, 2050 年将达到全球累计退役总量(约 4 300 万 t)的 40%^[4]。故, 对 RWTB 进行高效回收与循环利用已成为风电行业发展的必经之路。

风机叶片通常由玻璃纤维(GF)、碳纤维(CF)、热固性/热塑性复合材料、胶黏剂、金属组件等组合而成, 具有体积大、强度高、结构复杂、抗腐蚀、力学性能好等特点。若对 RWTB 进行合理有效的回收处理, 不仅可避免其向环境释放有机物、重金属等有害物质而污染环境, 还可实现有价值组分回收循环, 减少资源浪费^[5-6]。因此, 对 RWTB 进行高效回收与循环利用具有重大现实意义。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2401805), 河南省科学院青年博士项目(231801030)

通信作者: 李雅敏, 硕士研究生, 研究方向为电网废弃物回收应用

收稿日期: 2025-02-27

引用格式: 赵光金, 李雅敏, 李博文, 等. 退役风机叶片的回收和应用技术[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(5): 169-177.

ZHAO Guangjin, LI Yamin, LI Bowen, et al. Technology of recycling and application of retired wind turbine blade[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(5): 169-177.

目前,国内外已发布了《废物焚烧指令》《资源保护和回收法》《中华人民共和国循环经济促进法》等多项政策法规推动RWTB的综合回收与利用。2024年以来,我国相继发布了《关于加快构建废弃物循环利用体系的意见》《绿色低碳转型产业指导目录2024年版》等多项政策促进RWTB规范化回收与资源化利用。但目前,RWTB回收与再利用行业尚处于起步阶段,产业、技术、规范、监管等体系均未成熟。鉴于此,笔者对现有的关于RWTB回收应用的技术进行梳理概括,发掘行业发展的困境与趋势,以期RWTB回收处理与循环应用提供指引。

1 风机叶片构成

风机叶片主要由前后缘壳体、主梁、腹板、夹层、胶黏剂等构成,截面图见图1,组成材料包括基体材料(如环氧树脂、乙烯基酯树脂等)、增强材料(如GF,CF等)、夹芯材料(如轻木、巴沙木、聚合物泡沫等)、胶黏剂(如环氧胶黏剂、聚氨酯胶黏剂、丙烯酸酯胶黏剂等)以及辅助材料(包括聚氨酯树脂等涂层材料、固化剂、叶根金属螺栓等)。壳体主要是GF增强的环氧树脂复合材料;后缘的夹层中填充的是轻质夹芯材料;主梁通常是CF增强环氧树脂;腹板通常是GF包覆夹芯材料形成的夹芯结构。基体材料和增强材料在风机叶片中占比通常在90%以上,二者的回收应用是风机叶片回收领域的主要研究方向。

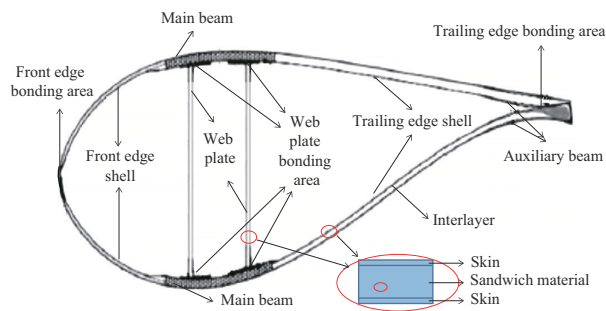


图1 风机叶片结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fan blade structure

2 回收技术现状

目前,国内外最主要的RWTB处理方法为堆积、掩埋、焚烧与回收,其中前三者为主流。然而,堆积和掩埋不仅会占用大量空间资源,且RWTB含有的有机物、金属等有毒有害组分会持续向环境释放,对土壤与水质造成污染;焚烧会产生大量有毒有害气体,增加碳排放,污染空气^[7]。三种主流处理方式均不符合绿色低碳、可持续发展的战略目标,且对资源造成严重浪费,故而回收应用是最具前景的处理方式^[8]。目前,常见的RWTB回收方式为机械回收法、化学回收法与联合回收法。

2.1 机械回收法

机械回收法采用物理手段实现RWTB杂质去除与物料分选的回收^[9],这通常是RWTB回收的第一道程序,主要用于金属组件、涂层薄膜、塑料等有价值部分分离,可降低后续组分分离难度^[10]。如韩继明等^[11]通过设置三条分割线,对风机

叶片进行切割、压扁、破碎、震荡处理,实现了RWTB中GF的回收,避免了RWTB切段过程中的封闭空腔的出现,提升了回收工艺的安全性。

机械回收法具有工艺简单、高效低耗、成本低廉、技术成熟、污染较少、土地资源使用少等优点,未改变RWTB的化学性质,可直接应用于纤维增强聚合物复合材料的回收;但机械回收所得产品纯度不足、结构受损,机械强度与界面结合性能均显著下降,应用范围受限,回收材料价值不高,同时操作过程会产生大量粉尘,危害人员健康。

2.2 化学回收法

化学回收法^[12]主要包括溶剂法与热回收法两大类,详细分类见图2。

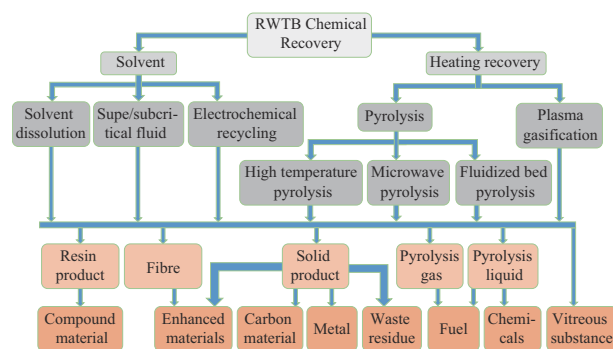


图2 RWTB化学回收方法

Fig. 2 Chemical recycling method for RWTB

2.2.1 溶剂法

①溶剂溶解法。采用溶剂(如水、酸、氨、醇等溶剂)、催化剂(酸、碱等)在特定温度和压力下破坏聚合物大分子的化学键,实现RWTB复合材料中树脂与纤维分解。单一溶剂搭配催化剂即可有效溶解去除聚合物,实现CF/GF纤维回收^[13-14]。如Ge等^[15]以0.6 mol/L H_2SO_4 催化的水热液化法实现了RWTB中树脂和GF高效回收,该工艺可通过控制反应温度调控树脂解聚效率与再生GF强度,为低温、高效的RWTB全组件回收方法创新提供宝贵的见解。近年来,大量研究表明,多组分混合溶剂体系更利于提高RWTB聚合材料的溶解效率,提升纤维材料回收效率。武俊杰等^[16]采用路易斯碱催化的乙酸— H_2O_2 混合溶剂体系实现了环氧树脂基体中C—N键和C—O键的裂解,进而通过蒸馏法回收了反应试剂及降解的环氧树脂基体。Sobek等^[17]将中等浓度的 H_2O_2 氧化剂加入RWTB水热回收体系中,实现了RWTB聚合物的基体分离与GF的高质量回收,该过程采用的氧化剂为环保型氧化剂,可降低环境污染风险。Roksana等^[18]则将RWTB样品置于乙二醇(EG)与1-甲基-2-吡咯烷酮(NMP)1:1混合体系中,在氮气气氛中利用酯交换原理加热促使树脂复合材料酯基和EG发生酯交换反应,促进树脂腐蚀与溶解,其中NMP可加速树脂溶胀与酯交换反应。该过程可从RWTB中回收树脂和纤维,且溶剂可重复使用,为树脂基组件类材料的循环使用技术提供了理论支撑。

溶剂溶解法可有效回收RWTB中的纤维类增强剂与树

脂类基体材料,但同时伴有溶剂毒性/腐蚀性大、装置性能要求高、回收成本高、产物难处理等不足,故而普适性较差,方法还需持续优化。近年来,溶剂溶解法不断创新,催化剂的加入使RWTB回收效率上升,反应条件更加温和,为工艺的产业化应用普及提供支持。另,反应试剂与回收产物的循环使用技术已有所突破,为风机行业的全流程闭环提供可能性,利于风电行业的长期可持续发展。 H_2O_2 等绿色反应试剂的应用为绿色低碳回收技术的发展提供参考,为新型RWTB绿色无害化回收技术的发展奠定基础。

②超/亚临界流体法。采用超临界或亚临界流体(主要是水或醇或酮)溶剂体系,加入催化剂来分解或降解RWTB中聚合物,实现纤维等组分回收。Mattsson等^[19]表示,以亚/超临界水为基体,复合乙二醇类物质,加入碱作添加剂,可实现GF增强复合材料75%左右的树脂去除率。Kim等^[20]研究发现,超临界水可在无催化剂工况下实现CF增强环氧树脂去除效率99.5%以上,实现CF高效回收。中石化等^[21]企业研发表示,亚临界水/正丁醇混合体系可使CF增强环氧树脂的分解率达95%,回收所得CF丝的拉伸强度与拉伸弹性模量分别只下降3.9%与7.2%。Keith等^[22]发现,超临界丙酮/水共混溶剂可在温度320℃以上、19.7~22.0 MPa环境下实现树脂材料的彻底降解与纯净CF的回收。

超/亚临界流体法是一种清洁、有效、可逆、回收率高的新型RWTB回收方法,其回收产品纯度高、性能好。尤其共混溶剂可在合适的温度压力下实现树脂材料的完全降解与纯净CF纤维的回收,这一成果显著提升了RWTB的回收效率,降低了回收CF后期纯化分离再利用的技术难度,为RWTB绿色回收技术的进步提供了助力。但,超/亚临界流体对不同增强剂的回收效果有差异,且该方法的操作难度大、安全系数低、设备技术成本高,化学试剂会对环境及人体造成一定危害,目前并未商业化应用。

③电化学回收法。将RWTB置于电解液中,利用电化学过程促进其分解。如胡侨乐等^[23]以NaCl溶液为电解液,外加4~25 mA的电流电解回收CF增强复合材料中的CF,结果表示电解液的浓度越小,外加电流越大,回收的CF的拉伸强度越大。Zhu等^[24]在Sun的基础上引入KOH作为电化学催化剂,提出了电驱动催化分解技术,发现KOH可促进树脂的降解,使树脂降解率达99%以上;同时,在40~75℃范围内,高温更有利于保持纤维性能,可使回收CF的拉伸强度保持在90%。

电化学回收法在常温、常压下进行,对反应设备的要求不高,可用于回收较大尺寸RWTB中的纤维增强复合材料,且回收所得纤维能保持良好的力学性能。但该方法的能耗较高,时间长,效率低,成本高,故而其发展仍受到较大限制。

2.2.2 热回收法

热回收法主要包括热解法与等离子气化法两大类。

①热解法。指在绝氧或少氧条件下加热RWTB,将其转化为热解气、热解液及纤维等固体产物的方法^[25]。主要分为

高温热解、微波热解、流化床热解三类。

高温热解法。如Yousef等^[26]表示,500℃高温热解可将CF增强不饱和聚酯树脂RWTB分解,富集CF,并经额外的氧化过程纯化CF。Chen、Ge等^[27-28]发现RWTB高温热解的产物与产率均与热解温度相关。Xu等^[29]将RWTB置于氮气中热解,得到气、液、固产物的详细产率。袁浩然等^[30]提出了一种RWTB真空热解工艺,工艺流程主要包括切割、预热、真空热解,固体产物分选等环节,具体回收流程见图3。该工艺是最常见的热解回收处理流程,不仅实现了风机叶片的高效回收处理,还将叶片中的纤维材料、金属、热能等资源进行了回收和再利用。

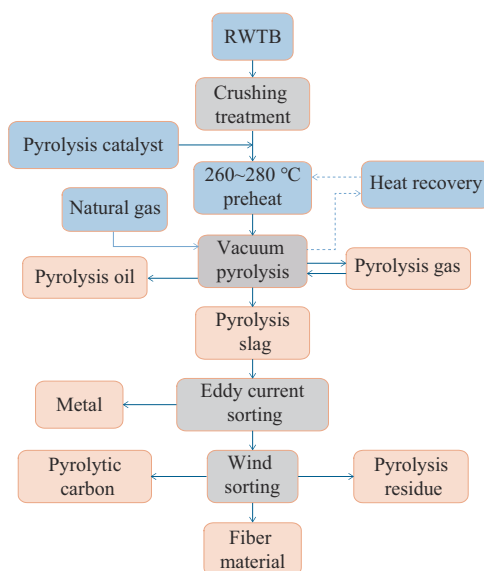


图3 RWTB真空热解回收技术流程图

Fig. 3 Flow chart of RWTB vacuum pyrolysis recovery technology

此外,徐明新等^[31]在RWTB热解反应器中添加促热解剂,优化了RWTB在惰性气氛中的热解反应,避免了树脂热解后热解炭对GF品质的影响,回收得到干净清洁、性能良好的GF,实现了RWTB的减量化、无害化、资源化处理,具有环保和经济双重效益。张声远等^[32]采用分步热解方法,将RWTB置于饱和蒸汽中一次热解,空气气氛中二次热解,可得到气相产物和固相产物,产物分离方式与文献[30]类似。Cheng等^[33]表示在电厂燃煤烟气中热解RWTB,可回收得到纯度99%、拉伸强度保持率为90%的纯净纤维材料。李良钰等^[34]还探讨了不同温度、气氛对RWTB热解产生的气、液、固产物的影响,发现热解温度气氛可改变产品的产量与占比。

高温热解过程相较于传统掩埋、焚烧等手段而言,其影响类别显著减少,具有良好的回收效益,尤其在对温度、气氛、催化剂等反应条件进行优化后,可显著提升热解效率与热解产物的质量,提升环境效益。但,高温热解所得纤维材料也会因表面附着焦炭而影响材料性能,故而,后续常通过氧化过程去除焦炭而获得干净纤维,这会降低回收纤维的力学性能。另,RWTB热解回收过程中气相和焦油相中形成的各种污染物,特别是焦油中致癌的双酚A和潜在有毒的多环

芳烃成分,会对生态系统造成一些额外环境负担,在后续的升级优化中必须克服酸化、臭氧形成和细颗粒物形成的问题^[35]。

微波热解法。通过树脂对微波辐射的不断吸收,引发材料内部升温,实现复合材料中树脂基体分解的方法。Hao 等^[36]通过微波热解法成功实现了 CF 增强环氧树脂中 CF 的低损、高纯回收,CF 的强度降低率不足 20%。Chen 等^[37]研究发现,精准控制微波条件可使 CF 增强热塑性树脂中的树脂近乎完全热解,同时还能保证回收 CF 结构不损坏。Shen 等^[38]采用改进的微波热解法回收 CF 增强 RWTB 中的 CF,实现了 CF 碳结构零破坏高效回收。

微波热解法相较于传统的高温热解法,效率更高、更易控制、更加环保、更节能,但 RWTB 基体材料的吸波性能较差,在微波场中升温速率较慢,热解效率偏低,难以满足生产应用需求。目前,研究中通常通过加入微波吸收剂增强整体的能量转化率,促进树脂的热解转化,提高微波热解效益。

流化床热解法。以一定流速的气流使 RWTB 材料颗粒在流化床反应器中悬浮,形成类似液体的流动状态,促进聚合物基质分解气化^[39],流化床热解工艺流程如图 4 所示。流化床中温度和气流流速会显著影响 RWTB 热解产物,Pender 等^[40]表示,流化床法降解 RWTB 回收的 GF 与环氧树脂的界面剪切强度均大幅下降。流化床法可有效分离回收 RWTB 复合材料中的 GF,CF 与聚合物,但聚合物的回收率较低,回收所得的纤维的长度和强度也明显受损,循环利用难度较大。

②等离子气化法。将 RWTB 置于等离子炉发生装置中无氧气分解,将树脂等有机物分解产生 CO、H₂、CH₄等物

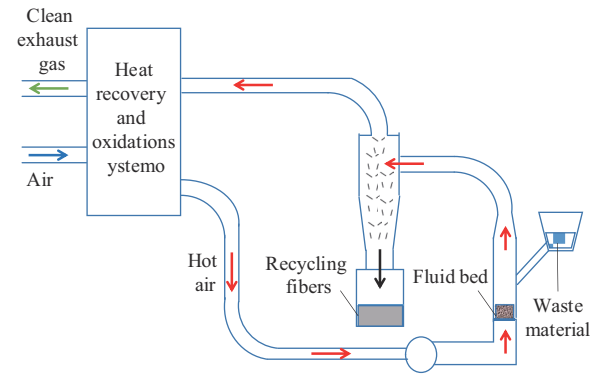


图 4 流化床热解工艺流程

Fig. 4 Fluidized bed pyrolysis process flow

质的合成气,将 GF 等无机物熔融为液体排出,并经激冷后转化为无危害的玻璃体物质;合成气可在二燃室内燃烧产热,同时实现有毒气体的无害化处理。等离子体流中的气体是空气,意味着在纤维形成过程中没有形成对环境有害的气体,所得纤维中的碳含量降低至原始粉末的 1/7,获得的纤维可作为生产催化剂、建筑材料等二次原料^[41-42]。等离子气化法可抑制二噁英等有害物质的产生,同时还提升了热能的回收利用率,是一种可实现 RWTB100% 无害化处理的方法;但同时该处理过程需要消耗大量电能,且等离子炉的寿命短,运维成本极高,难以大规模商业化。

热回收法回收的 CF 强度能够达到原来的 70%~90%^[43],回收效率高,且环保效益明显提升,但同时技术难度普遍偏大,能耗高,成本高,经济效益不容乐观。

纵观主流化学回收法,发现其可获取更清洁、性能更好的增强纤维材料,但横向对比各种方法,发现均存在一定的优势与不足,详见表 1。

表 1 各种化学回收方法的优劣对比

Tab. 1 Comparison of advantages and disadvantages of various chemical recovery methods

Chemical recycling methods		Advantages	Disadvantages
Solvent method	Solvent dissolution method	Good recycling effect, relatively mild reaction conditions	Toxic and corrosive, high installation cost, poor process sustainability and poor universality
	Supercritical/subcritical fluid method	High dissolution efficiency, environmentally friendly, high product purity and good performance	Reaction conditions and equipment requirements are strict, operation difficulty is high, cost is high, and safety is poor
	Electrochemical recycling method	Normal temperature and pressure, low equipment requirements, suitable for large sizes, good product performance	High energy consumption, long duration, low efficiency and high cost
Heat recovery method	High temperature pyrolysis	Mature technology, high pyrolysis efficiency, and good product quality	Discontinuity, low recycling efficiency, diverse processes and heavy environmental burden
	Microwave pyrolysis	Higher efficiency, easier to control, more environmentally friendly and more energy-efficient	Low pyrolysis efficiency
	Fluidized bed pyrolysis	Efficient, higher purity of fiber products, good resource utilization and economy	Product recovery rate is low, recycled fibers are easily damaged, difficulty of recycling is high, energy consumption is slightly high, and universality is insufficient
	Plasma gasification method	Environmentally friendly, heat recovery and utilization	High energy consumption and extremely high maintenance costs

2.3 联合回收处理法

联合回收法是指将两种或多种回收技术互相结合,回收

处理 RWTB 的方法。胡松等^[44]发明了一种将物理法、化学法、热解法相结合的 RWTB 回收处理方法,可实现高品质燃

料和GF的回收,回收处理流程见图5。RWTB经破碎和旋风分离后分为以树脂基体为主要成分的有机产物和以GF等为主要成分的无机产物。有机产物一方面可通过压缩制成燃料,另一方面可以直接燃烧产生高温烟气,实现热量回收,为无机组分的热解供热。无机组分经过热解后转化为固态产物,通过化学法回收分离GF。

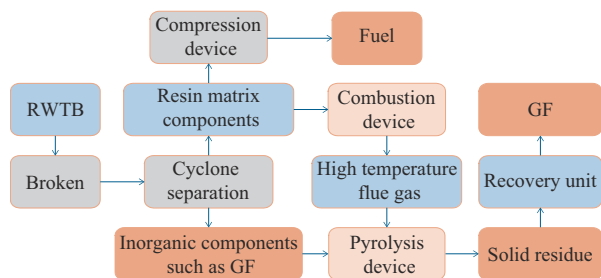


图5 RWTB综合回收流程

Fig. 5 Comprehensive recycling process for RWTB

Rani等^[45]将微波热解法与 H_2O_2 — CH_3COOH 溶剂溶解法相结合实现了RWTB复合材料97.2%的分解率,同时可获得性能良好的GF纤维。Xu等^[46]提出利用乙酸溶胀辅助低温热解方法可从RWTB中回收高质量的GF。其中,乙酸作为溶胀剂可促进树脂基体分解,增强热解传热;同时,与乙酸共热解可产生氢自由基,促进大分子低聚物裂解。这种改进的低温热解手段使固体热解产物中热解炭的形成减少,有效抑制了回收纤维表面缺陷的扩散,使其柔韧性、弹性和力学性能得到改善,拉伸强度显著提高了27.5%。陆强等^[47]采用高温热解联合高温气化手段,将切割后的RWTB置于氮气气氛中高温热解和高温气化,第一阶段加入了热解活化剂催化热解,第二阶段加入除炭剂调整反应气氛,通过两步反应可得到碳量低于0.5%且拉伸强度保留率在95%以上的优质再生GF。热解与气化技术耦合联用,有效实现了RWTB热解后纤维表面热解炭的原位脱除,同时回收得到了优质再生GF,实现了RWTB的资源化回收利用。这些发现均为从RWTB中回收高质量纤维提供了宝贵的见解。

联合回收处理法使多种回收方法优势互补,相互促进,可有效提升RWTB回收效率,但同时会增加工艺难度与投资运营成本,暂时尚处于研究阶段,尚未在市场上规模化应用。

3 再利用技术

RWTB中有价组分的高效回收、纯化及再利用技术是风电领域完整闭环的关键,目前RWTB回收产物的再利用主要包括直接应用与制备复合材料两大层面。

3.1 直接应用

RWTB拆解获得的金属部件可直接应用于其他技术组件,如输电线路^[48];经简单拆解所得的复合材料并未丧失主要性能、功能,可进行简单的切割组装,摇身一变成为公共设施的原材料^[49-52],如公共长椅、人造桥、游乐场、自行车棚、刨花板材料等基建领域。该方法能耗低、成本低、无污染,可暂缓风机叶片的退役压力,减少基建领域的投资成本,但并未

实现RWTB的完全处理,无法成为迎接RWTB大规模退役的主流方案。

3.2 制备复合材料

RWTB经过机械粉碎、研磨、筛分、纯化等手段处理之后,回收产物可充当增强剂、添加剂、填料等,用作复合材料的制备,目前主流的产品有两大类,分别是矿物聚合物基复合材料和有机聚合物基复合材料^[53]。

3.2.1 矿物聚合物基复合材料

关于RWTB回收产物制备矿物聚合物基复合材料的报道中最多的是关于复合型混凝土材料的制备。Plawecka等^[54]发现,以物理研磨所得的RWTB产物作矿物聚合物复合材料的填料,会降低其性能。Manoso-Morato^[55]、Revilla-Cuesta等^[56]也表示将RWTB机械破碎后掺入混凝土中,会使混凝土的弹性模量与压缩强度稳步下降;Baturkin等^[57]表示,只有去除了木质组分的RWTB复合型混凝土才能满足压缩强度要求。Oliveira等^[58]表示,以RWTB代替一定比例的沙子,可获得压缩与弯曲性能均符合砂浆应用标准的混凝土,且可显著降低建筑框架质量密度。但腾银见等^[59]以回收的GF增强复合材料替代6%~8%石英砂掺入活性粉末混凝土,发现混凝土虽工作性能下降了2.5%~3.8%,但压缩强度与干燥收缩性能显著改善。Wang等^[60]也表示RWTB再生粗纤维材料制备的风叶轮纤维混凝土(WIC)的压缩强度、弯曲强度分别提高了6.04%~18.12%,5.37%~18.5%,但前者与纤维含量负相关,后者与纤维含量呈正相关。金凤科技将RWTB粉碎颗粒与3D打印材料融合,制备出性能达标的常规建筑混凝土建材产品^[61]。总体而言,RWTB的使用会影响复合型混凝土的性能,RWTB材料类型、处理手段、替代组分、形态、用量等均为影响因素,且对性能的影响结果并不完全一致,需要根据实际使用需求考虑各种因素的影响。

此外,RWTB回收产物制备的矿物聚合物基复合材料还有水泥、石膏、沥青等。Schindler等^[62]表示,RWTB可用作波特兰水泥生产原料,一吨RWTB材料可替代约0.4~0.5 t煤炭,同时为水泥生产提供约0.1 t氧化钙和0.3 t氧化硅原料,具有巨大的经济价值。Nagle等^[42]将RWTB与水泥熟料协同处理,同样利用有机组分燃烧提供的高温环境,促进RWTB中GF等无机组分与水泥熟料整合,生产复合型水泥。该方法可减少水泥生产的碳排放,具有环保和经济效益,且回收快速高效、可扩大规模,但RWTB掺比会影响水泥质量,不宜高于10%,故而发展仍然受限。Yang等^[63]表示,RWTB机械研磨、筛分回收的GF经3,4-二羟基肉桂酸等复合改性剂处理后可用作废磷石膏的增强材料,显著提升废磷石膏的弯曲、压缩性能。Lan等^[64]、高闻靖等^[65]发现,RWTB粉末和复合纤维的加入可改变沥青混合料的微观结构,进而改善其抗形变性能与机械强度。

综上,RWTB回收材料可用作多种组分的替代品用于制备多种矿物聚合物基复合材料,其掺杂比例、使用方式、回收手段等多种因素均可影响复合材料的性能。其用于制备矿

物聚合物基复合材料可节约大量的原料与能耗,减少环境污染,具有巨大的经济、环境效益,为RWTB的回收应用提供了巨大的空间;但同时RWTB加入并非均对产品性能产生积极影响,制备的产品的应用具有一定的局限性。

3.2.2 有机聚合物基复合材料

大量研究报道,RWTB再生材料可与聚氯乙烯(PVC)、聚丙烯(PP)、聚乳酸(PLA)等基体材料复合^[66],制备新型有机聚合物基复合材料。吴建军^[67]研究证明,回收的GF增强复合材料(r-GFRP)可用作增强剂与秸秆纤维和PVC基材料复合制备木塑复合材料(WPC),且材料的力学强度、耐热性、防水性良好,但过量会降低WPC的加工性能。Thippanna等^[68]表示,RWTB机械回收GF可用作聚丙烯腈(PAN)材料的填料或增强材料,通过干喷湿法纺丝技术制备同轴层状纤维,其强度、模量分别提高24.4%与17.7%。张素凤等^[69]发现,粉碎研磨r-GFRP用作填料与聚丙烯材料复合,所得复合材料的弹性模量、力学强度等性能均较纯PP材料显著提升。Rahimizadeh等^[70]通过双挤出工艺,将从RWTB中机械回收所得的短GF与PLA混合,生产出可用于3D打印的GF复合原料,且RWTB组分的加入提高了3D打印部件的力学性能。Du^[71]、Smoleń^[72]、武俊杰^[16]等也印证了RWTB热解产物可作为增强剂显著提高对丁苯橡胶基柔性复合材料、环氧树脂基复合材料的拉伸性能、弯曲强度等力学性能。

此外,Mantelli等^[73]表示热解回收CF切碎后可用作3D打印油墨热固化和光固化增强材料,论证了rCF热固性复合材料3D打印的可行性。Wang等^[74]提出,RWTB通过水热法可合成用于亚甲基蓝染料降解的蓝色荧光碳点光催化剂,其可使亚甲基蓝染料在40 min光辐射条件下的降解效率达到64%。

以上研究表明,回收RWTB的加入可显著提升有机聚合物基体材料的力学性能,可用于生产新型力学组件,形成回收路线闭环,为RWTB综合回收与资源化应用的发展提供技术支持,为类似固废材料的综合利用技术的发展提供依据。同时,以RWTB为碳源可制备碳点光催化剂,为RWTB的有效利用提供了新方向。回收RWTB再利用技术为风电行业的可持续发展奠定了基础^[75]。

4 RWTB回收应用挑战

近年来,国内发布了《中华人民共和国循环经济促进法》《关于促进退役风电、光伏设备循环利用的指导意见》《加快建立新能源产业再生资源回收利用体系》等多项推动RWTB固体废弃物综合利用的相关政策,以期实现其全生命周期闭环式绿色发展。但回收应用行业长久发展仍面临诸多挑战。

4.1 技术层面

RWTB回收应用技术主要面临四大挑战。①材料方面:RWTB主要由物理化学性质稳定的热固性复合型材料组成,现有技术无法实现有价值组分的高效分离,再利用难度大;同时GFRP难以降解,废弃组分难以做无害化处理。②技术局限性:现有回收技术存在高损伤、高能耗、高污染、高成本、低

回收率、低纯度的不足,环保高效、低成本、高纯度的新型回收技术有待开发。③装备与规模方面:现有设备难以实现RWTB高效切割与自动化拆解,拆解效率低;现有工艺步骤繁杂,集成度低,污染重,成本高,难以规模化应用。④再生材料应用:回收纤维性能下降20%~50%,故而难以直接应用于风叶再生;同时由于建材等其他下游行业缺乏行业标准,回收产品也无法大量应用于相关行业。

4.2 产业层面

风机叶片回收行业仍处于初级发展阶段,主要面临以下四大挑战。①产业链结构不完善:叶片制造商(上游)未考虑可回收性,未大规模布局回收技术;回收处理企业(中游)少,处理能力有限,缺乏标准化回收流程,技术路线混乱;再生利用企业(下游)市场需求少,消纳渠道不足,对再生复合材料接受度低,尚未形成规模采购。②商业模式不成熟:RWTB回收成本通常在(3至5千元/t)远高于填埋成本(5百元/t);而再生产品售价仅为1至2千元/t,难以覆盖回收成本,经济性差^[76]。上、中、下游企业的责任划分模糊,尚未对回收责任进行明确划分。③碳市场机制不健全:中国碳市场未对回收行业量化碳减排效益,缺乏资金激励,且无再生材料应用标准,下游企业缺乏回收驱动力。④区域分布不均衡:叶片应用区域与叶片回收区域分布不一致,叶片分布分散、地处偏远、体积庞大,要实现其大规模回收、集中化处理的难度极大,回收成本高。

4.3 政策层面

RWTB回收政策主要面临以下五大挑战。①国家缺乏针对RWTB回收的专项法律法规,也未对RWTB材料分类与回收要求进行明确规定,不利于RWTB标准化回收。②市场监管机制缺失:行业内对回收指标无明确规定,对叶片全生命周期监管缺失,对涉及的能源、环保、工信等相关部门未建立健全的部门间协调管理机制。③政策激励不足:未建立完善的对回收税收优惠政策与财政补贴机制,对绿色金融企业无明确的政策支持。④标准缺乏:回收技术层面、再生材料应用层面、碳市场减排核算层面均缺乏统一的国家标准,不利于回收企业标准化回收。⑤区域发展存在较大差异:不同省市之间、城乡之间均存在较大的设施与政策差异,重点风电基地配套政策不完善。

5 结论与展望

随着风电行业的快速发展,RWTB回收处理与循环应用势在必行。目前,主流的处理手段违背了我国绿色、低碳、可持续发展的理念,回收应用将成为未来发展的主要方向。未来,RWTB经济、高效回收需从以下几个方面规划:

(1)技术层面:①发展智能化机器人切割拆解技术,并配合智能化分选系统,提升RWTB回收处理效率与产品分选效果,降低人工成本。②发展低温催化热解技术、生物酶解技术、超临界流体溶解回收技术等新型技术,提升回收处理的效率,降低污染、能耗与纤维损伤程度,攻克无害化处理技术与再利用技术。③研究更简洁的回收工艺,并研发集成度更

高的回收装备,使回收市场趋于规模化发展。

(2)产业层面:①完善产业链:鼓励制造商生产寿命更长且可回收使用的新型风机叶片,便于退役后回收分选;鼓励回收企业到风电分布集中的区域建立回收中心,降低运输成本;鼓励下游企业拓展应用市场,提升应用效率,实现再生产品高值化再利用。②创新商业模式:建立如“谁生产、谁回收”责任制度、“企业回收保证金”制度、“企业回收补贴”等制度,提升相关企业RWTB回收活力,增加回收市场规模。③健全市场机制:将RWTB回收纳入国家核证自愿减排量,允许碳交易获利;为下游企业建立“再生材料认证标签”,提升市场认可度。④加强国际合作:可从欧盟等具有先进回收技术的国家引进技术,或与其合作研发低成本、高回报率的回收工艺,进行跨境产业链协作,参与相关国际标准制定。

(3)政策层面:①健全法规体系:将RWTB回收纳入《循环经济促进法》;明确划分回收责任,制定强制回收政策,为回收企业制定《风电设备回收利用管理办法》。②健全市场监管机制:建立RWTB登记备案制度;由源头企业进行风机叶片的全生命周期管控,便于产品的溯源与回收;设置阶段性回收目标(如2030年回收率达到40%)。③经济激励政策:为回收企业提供回收优惠、专项补贴、绿色信贷、碳减排奖励等经济支持,降低回收再利用企业的成本投入,提升企业效益。④完善标准体系^[7]:制定针对现有回收技术的标准化技术规范,为下游行业制定明确的风电叶片再生材料应用标准,推动产业链各企业采信;完善并统一碳排放核算指南,可参考欧盟(碳价>80欧元/t)碳减排收益定价,制定国内碳市场定价规则,提升企业的碳减排积极性。⑤实施差异化政策:可参考欧盟较完整的回收体系,结合中国国情,制定本土化的回收政策体系。如重点风电基地建设配套回收产业园;经济发达地区搭建高端回收技术试点工程;欠发达地区参考美国《基础设施法案》提供基础设施补贴。

参考文献

- [1] 叶晓宇,等.清洗世界,2023,39(11):193-195.
YE Xiaoyu, et al. *Cleaning World*, 2023, 39(11):193-195.
- [2] 全球能源互联网发展合作组织.中国2030年能源电力发展规划研究及2060年展望[R].北京:全球能源互联网发展合作组织, 2021.
Global Energy Internet Development Cooperation Organization. *Research on China's 2030 Energy and electricity development plan and prospects for 2060*[R]. Beijing: Global Energy Internet Development Cooperation Organization, 2021.
- [3] 赵靓.风能,2022,14(3):22-24.
ZHAO Liang. *Wind Energy*, 2022, 14(3):22-24.
- [4] HASHEMINEZHAD A, et al. *J Environ Manage*, 2024, 366. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121735.
- [5] 余丹,等.南方能源建设,2023,10(4):113-121.
YU Dan, et al. *Southern Energy Construction*, 2023, 10(4):113-121.
- [6] 陈吉朋,等.太阳能学报,2023,44(5):328-335.
CHEN Jipeng, et al. *Acta Energiac Solaris Sinica*, 2023, 44(5): 328-335.
- [7] 张效林,等.复合材料学报,2024,41(3):1 192-1 203.
ZHANG Xiaolin, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41 (3):1 192-1203.
- [8] RATHORE N, et al. *Waste Manag Res*. 2023, 41(4):744-759.
- [9] 张朝祯,等.硅酸盐通报,2023,42(12):4 341-4 350.
ZHANG Chaozhen, et al. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42 (12):4 341-4 350.
- [10] 郭盼,等.东方电气评论,2022,36(4):10-14.
GUO Pan, et al. *Dongfang Electric Review*, 2022, 36(4):10-14.
- [11] 韩继明,杨伟,陆婷婷.一种退役风机叶片的回收利用方法: CN202411445213.5[P].2024-12-10.
HAN Jiming, YANG Wei, LU Tingting. A method for recycling retired wind turbine blades:CN202411445213.5[P]. 2024-12-10.
- [12] 张星楠,等.化工新型材料,2024,52(4):264-267.
ZHANG Xingnan, et al. *New Chemical Materials*, 2024, 52(4): 264-267.
- [13] RIJO B, et al. *Sustainable Materials and Technologies*, 2023, 35. DOI:10.1016/J. SUSMAT.2022. E00545.
- [14] ZHAO Q, et al. *Composites Science and Technology*, 2022, 224 (6):109461. DOI:10.1016/J. COMPSCITECH.2022.109461.
- [15] GE Z, et al. *ACS Omega*, 2024, 9(47):47 031-47 041.
- [16] 武俊杰.基于碳氮键裂解的废弃风电叶片回收及资源化利用研究[D].兰州:兰州大学,2023.
WU Junjie. *Recycling and resource utilization of waste wind turbine blades based on carbon and nitrogen bond cracking*[D]. Lanzhou:Lanzhou University, 2023.
- [17] SOBEK S, et al. *J Environ Manage*, 2024, 361. DOI: 10.1016/J. JENVMAN.2024.121241.
- [18] ROKSANA M, et al. *Sci Rep*, 2023, 13. DOI: 10.1038/S41598-023-36183-4.
- [19] MATSSON C, ANDRÉ A, JUNTIKKA M, et al. *Chemical recycling of end-of-life wind turbine blades by solvolysis/HTL*[C]// *Proceedings of the 41st Riso International Symposium on Materials Science-Materials and Design for Next Generation Wind Turbine Blades*, Roskilde: IOP Publishing, 2020. DOI: 10.1088/1757-899x/942/1/012013.
- [20] KIM Y N, et al. *Composites Science and Technology*, 2019, 173 (3):66-72.
- [21] 中国石油化工股份有限公司,上海石油化工研究院.一种亚临界流体回收碳纤维增强树脂基复合材料的方法: CN201910987507.3[P]. 2021-04-20.
China Petroleum&Chemical Corporation, Shanghai Petrochemical Research Institute. A method for subcritical fluid recovery of carbon fiber reinforced resin based composite materials: CN201910987507.3[P]. 2021-04-20.
- [22] KEITH M J, et al. *Polymer Degradation and Stability*, 2019, 161 (1):225-234.
- [23] 胡侨乐,等.复合材料学报,2022,39(1):64-76.

- HU Qiaole, et al. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(1): 64–76.
- [24] ZHU J H, et al. *Green Chemistry*, 2019, 21(7):1 635–1 647.
- [25] WU Yue, et al. *Waste Manag*, 2023, 168(8):54–62.
- [26] YOUSEF S, et al. *Environ Res*, 2024, 245. DOI: 10.1016/j.envres.2023.118016.
- [27] CHEN Wangmi, et al. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2023, 169. DOI:10.1016/j.jaap.2023.105859.
- [28] GE Lichao, et al. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2023, 170. DOI:10.1016/j.jaap.2023.105919.
- [29] XU Mingxin, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 251. DOI:10.1016/j.compositesb.2022.110493.
- [30] 袁浩然, 张书豪, 王亚琢, 等. 一种退役风机叶片真空热解处理回收方法:CN202111549094.4[P].2023-07-25.
- YUAN Haoran, ZHANG Shuhao, WANG Yazhuo, et al. A method for vacuum pyrolysis treatment and recovery of retired fan blades: CN202111549094.4[P]. 2023-07-25.
- [31] 徐明新, 陆强, 姬海雯, 等. 一种退役风机叶片热解回收玻璃纤维的方法及其得到的再生玻璃纤维: CN202211437839.2 [P].2023-03-07.
- XU Mingxin, LU Qiang, JI Haiwen, et al. A method for thermal decomposition and recovery of glass fiber from retired fan blades and the resulting regenerated glass fiber: CN202211437839.2[P]. 2023-03-07.
- [32] 张声远, 王凯亮, 刘晓立, 等. 一种退役风机叶片的处理回收方法:CN202211263862.4[P].2023-01-17.
- ZHANG Shengyuan, WANG Kailiang, LIU Xiaoli, et al. A method for processing and recycling retired wind turbine blades: CN202211263862.4[P]. 2023-01-17.
- [33] CHENG Guangwen, et al. *Journal of Engineering Research*, 2023, 11(3):13–17.
- [34] 李良钰, 等. 热力发电, 2023, 52(3):94–101.
- LI Liangyu, et al. *Thermal Power Generation*, 2023, 52 (3): 94–101.
- [35] LI Liangyu, et al. *J Environ Manage*, 2024, 371. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.123159.
- [36] HAO Siqi, et al. *Polymers*, 2021, 13(8):1 231–1 246.
- [37] CHEN Chenghao, et al. *Composites Science and Technology*, 2022, 230. DOI:10.1016/j.compscitech.2022. 109761.
- [38] SHEN Mingyuan, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 264. DOI:10.1016/j.compositesb. 2023.110878.
- [39] 陈瑞哲, 等. 化工学报, 2023, 74(3):981–994.
- CHEN Ruizhe, et al. *CIESC Journal*, 2023, 74 (3):981–994.
- [40] PENDER K, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 198. DOI:10.1016/j.compositesb.2020.108230.
- [41] KAVALIAUSKAS Ž, et al. *Materials (Basel)*. 2023, 16(8):3 089–3 101.
- [42] NAGLE A J, et al. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.123321.
- [43] 邓建英. 微波热解碳纤维/环氧树脂复合材料回收碳纤维的研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- DENG Jianying. Research on the recovery of carbon fiber from microwave pyrolysis carbon fiber/epoxy resin composite materials [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [44] 胡松, 任强强, 雷志文, 等. 废风机叶片处理回收高品质燃料和玻璃纤维的方法:CN113351620A[P].2021-09-07.
- HU Song, REN Qiangqiang, LEI Zhiwen, et al. Methods for processing and recycling high-quality fuel and fiberglass from waste fan blades:CN113351620A[P]. 2021-09-07.
- [45] RANI M, et al. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 179. DOI:10.1016/j.resconrec.2021.106107.
- [46] XU M, et al. *Waste Manag*, 2024, 187(1):179–187.
- [47] 陆强, 徐明新, 姬海雯, 等. 一种从退役风机叶片中热解回收优质玻璃纤维的方法:CN202211437838.8[P].2024-03-01.
- LU Qiang, XU Mingxin, JI Haiwen, et al. A method for thermal decomposition and recovery of high-quality glass fibers from retired wind turbine blades:CN202211437838.8[P]. 2024-03-01.
- [48] ALSHANNAQ A A, et al. *Journal of Composites for Construction*, 2021, 25. DOI:10.1061/(ASCE)CC. 1943-5614.0001136.
- [49] 王颢一, 等. 资源再生, 2024, 23(2):42–43.
- WANG Haoyi, et al. *Resource Recycling*, 2024, 23 (2):42–43.
- [50] RUANE K, et al. *Sustainability*, 2023, 15. DOI: 10.3390/su15043366.
- [51] DELANEY E L, et al. *Sustainability*, 2023, 15. DOI: 10.3390/su151612557.
- [52] DERKOWSKI A, et al. *Polymers (Basel)*. 2024, 16. DOI:10.3390/polym16091210.
- [53] ZHOU Yingwu, et al. *Polymers*, 2022, 14. DOI: 10.3390/polym14030581.
- [54] PLAWECKA K, et al. *Materials*, 2021, 14. DOI: 10.3390/ma14216539.
- [55] MANSO-MORATO J, et al. *J Environ Manage*, 2025, 373. DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.123995.
- [56] REVILLA-CUESTA V, et al. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2024, 31 (25):37 757–37 776.
- [57] BATURKIN D, et al. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 174. DOI:10.1016/j.resconrec.2021. 105807.
- [58] OLIVEIRA P S, et al. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 274. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.122948.
- [59] 腾银见. 玻璃钢再生纤维及粉末对活性粉末混凝土性能的影响研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2020.
- TENG Yinjian. Effect of GFRP recycled fiber and powder on the properties of reactive powder concrete[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020.
- [60] WANG J, et al. *Materials (Basel)*, 2024, 17. DOI: 10.3390/ma17143565.
- [61] 北极星风力发电网. 退役风机叶片, 如何变废为宝[EB/OL].

- (2022-07-07) [2023-03-03]. <https://news.bjx.com.cn/html/20220707/1239327.shtml>.
North Star wind power grid. Retired wind turbine blades, how to turn waste into treasure[EB/OL]. (2022-07-07) [2023-03-03]. <https://news.bjx.com.cn/html/20220707/1239327.shtml>.
- [62] SCHINDLER A K, et al. Waste Manag, 2024, 182. DOI:10.3390/ma17143565.
- [63] YANG L, et al. Molecules, 2022, 27. DOI: 10.3390/molecules27248668.
- [64] LAN Tianhui, et al. Frontiers in Materials, 2023, 10. DOI:10.3389/fmats.2023.1164693.
- [65] 高闻靖. 废风机叶片复合纤维改性沥青制备工艺及技术性能研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2022.
GAO Wenjing. Research on the preparation process and technical performance of modified asphalt of composite fiber of waste fan blades[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2022.
- [66] MOSLEHI A, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139. DOI:10.1002/app.51934.
- [67] 吴建军. 利用FRP废弃物与秸秆纤维制备木塑复合材料的工艺及性能研究[D]. 济南: 济南大学, 2015.
WU Jianjun. Study on preparation and properties of wood plastic composites by FRP waste and straw fiber[D]. Jinan: Jinan University, 2015:41–55.
- [68] THIPPANNA V, et al. ACS Sustain Chem Eng, 2024, 12(8): 3 243–3 255.
- [69] 张素凤, 等. 热固性树脂, 2017, 32(1):50–54.
ZHANG Sufeng, et al. Thermosetting resin, 2017, 32(1):50–54.
- [70] RAHIMIZADEH A, et al. Materials (Basel), 2019, 12. DOI: 10.3390/ma12233929.
- [71] DU C, et al. Polymers (Basel). 2022, 14. DOI: 10.3390/polym14245408.
- [72] SMOLEŇ J, et al. Polymers (Basel), 2022, 14. DOI: 10.3390/polym14142925.
- [73] MANTELLI A, et al. Polymers, 2021, 13. DOI: 10.3390/polym13050726.
- [74] WANG C, et al. Luminescence, 2024, 39. DOI:10.1002/bio.4608.
- [75] 马彦涛, 等. 材料研究与应用, 2024, 18(4):560–573.
MA Yantao, et al. Materials Research and Application, 2024, 18 (4):560–573.
- [76] 樊笑婕, 等. 节能与环保, 2024, 42(2):46–52.
FAN Xiaojie, et al. Energy Conservation & Environmental Protection, 2024, 42(2):46–52.
- [77] 许仁辞. 内蒙古电力技术, 2022, 40(5):34–38.
XU Renci. Inner Mongolia Electric Power, 2022, 40 (5):34–38.