

大型风电叶片低碳循环利用技术：挑战与机遇

王宝龙^{1,2}, 李成良^{1,4}, 陈 淳^{2,4}, 徐 俊^{1,2}, 胡 桢³, 杨 斌⁴

(1. 中材科技风电叶片股份有限公司, 北京 100083; 2. 先进无机纤维与复合材料全国重点实验室, 北京 100083;
3. 哈尔滨工业大学化工与化学学院, 哈尔滨 150001; 4. 武汉理工大学材料科学与工程学院, 武汉 430070)

摘 要: 全球风电形势向好, 风电行业快速发展, 我国年新增装机量稳步增加。为应对风电行业低价时代的成本压力, 风电机组不断大型化推动叶片重量逐年递增。随着早期服役的叶片批量退役, 难以降解的废弃叶片给环境造成了巨大的压力。本文通过梳理退役风电叶片循环利用的关键问题与挑战, 列举了目前主流的风电叶片回收处理技术, 包括机械回收、热回收、化学回收及可回收叶片技术等, 系统性分析了各回收技术的差异。站在风电行业及叶片企业的角度, 提出了包括叶片延寿、部件回收和可回收技术等回收技术发展建议。

关键词: 风电叶片; 退役; 回收技术; 可回收叶片; 循环利用; 未来发展

中图分类号: X705; TM614 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)08-2184-10

网络出版时间: 2025-03-26



大力发展可再生能源, 降低化石能源消费, 构建绿色低碳的能源体系, 是控制全球变暖实现“双碳”目标的重要举措^[1]。随着各国能源结构转型和绿色电力的大力发展, 中国、欧洲和美国等主力风电市场正酝酿新一轮增长动能, 东南亚、拉丁美洲等新兴市场也呈现出爆发性需求, 全球风电市场正迈入持续高位运行的轨道^[2-3]。在全球历史装机量持续增长的情况下, 中国已发展成为全球最大的风电市场, 中国风电新增和并网装机容量已连续 13 年居全球第一, 持续引领整个风电行业的快速发展。

2006 年,《中华人民共和国可再生能源法》的颁布为中国风电产业的快速发展提供了强大动力; 在“30·60”双碳战略目标指引下, 新能源规划下的风电行业飞速发展, 发电量占比稳步提升。风能不仅成为我国实现可持续发展的基石, 更为全球气候治理贡献出“中国力量”。全球风能理事会的数据显示, 未来 5 年全球风电新增装机量为 791 GW。根据国家能源局的数据, 截至 2024 年 3 月底, 陆上风电占比超过 95%, 海上风电接近 5%。全国风电累计并

网容量达到 4.57 亿 kW, 同比增长 22%, 其中陆上风电占比接近 92%, 海上风电接近 8%。预计 2024 年, 我国风电新增装机量将超过 75 GW, 而到 2030 年这一数字将翻一番。

本文基于风电行业发展现状, 梳理出面向叶片延寿、叶片部分循环、叶片完全循环等不同回收目的下叶片材料循环利用面临的关键问题与挑战。列举了如机械回收、热回收、化学回收以及可回收叶片技术等当前主要的风电叶片回收处理技术, 并对各种回收技术的特点进行了系统性分析。从风电行业和叶片企业的视角出发, 提出了包括叶片安全延寿技术、拓展高值化部件回收利用领域、探索回收模式及未来产业布局等技术发展建议, 助力风电行业高质量发展。

1 风电叶片行业发展现状

1.1 平价上网推动叶片大型化

近年来, 随着风电去补贴政策的实施, 风机中标价格持续下降, 风电行业进入平价时代。扩大风

收稿日期: 2024-12-30。 修订日期: 2025-01-19。

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB4201400); 先进无机纤维与复合材料全国重点实验室开放课题(ZCKJ-2023-JYZH-0081-2); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BE2022008)。

第一作者: 王宝龙(1988), 男, 博士, 工程师。

通信作者: 李成良(1981), 男, 硕士, 正高级工程师;

胡 桢(1981), 男, 博士, 教授。

Received date: 2024-12-30. Revised date: 2025-01-19.

First author: WANG Baolong (1988-), male, Ph.D., Engineer.

E-mail: wangbl@sinomatech.com

Correspondent author: LI Chengliang (1981-), male, Master, Senior Engineer.

HU Zhen (1981-), male, Ph.D., Professor.

E-mail: lichl@sinomatech.com; huzhen@hit.edu.cn

发电机组的单机容量是降低度电成本的最有效手段，由此也带来风机向大功率、长叶片和高塔筒方向发展。2021~2023 年，各主机厂纷纷推出多款陆上 6.x-7.x MW 平台机组，风轮直径最大达 220 m；而海上 15~20 MW 机组的风轮直径最大超 300 m。发电效率逐年提升，1 MW 所需的叶片单位重量从 32 m 的 3.57 t 提升至 122 m 的 4.51 t。如图 1 所示，2023 年业内平均风机叶片长度增长到 89.5 m，较 2022 年增长了 8 m，2024 年最新下线陆上叶片达 131 m，海上叶片达 147 m，叶片重量也从最初 37.5 m 的 5 t 飙升至 140 m 级的 70 t。

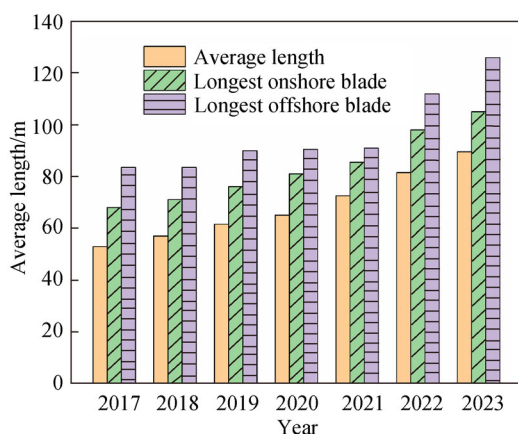


图 1 截至 2023 年风电叶片长度趋势

Fig. 1 Change trend of wind power blade length with weight until 2023

1.2 退役叶片数量日趋庞大

作为风电机组的关键部件，叶片决定了风电机组的发电效率，更长的叶片能带来更高的发电量。风电叶片主要由主梁、腹板、叶根、蒙皮等部件粘接组合而成，其中使用了大量增强纤维、芯材泡沫、树脂、结构胶等的复合材料，以满足风电叶片可设计、高比强、抗疲劳、耐腐蚀、整体易成型的应用需求。这些由复合材料制造的部件经灌注、粘接等制造工艺装配形成风电叶片^[4]。图 2 展示了整个风电叶片的重量组成，树脂基体和增强纤维的重量占比超过 90%，芯材、粘接胶和涂料等占比约为 10% 左右。目前，行业内制造 1 GW 风电叶片需要消耗约 4000 t 灌注树脂、600 t 结构胶、720 t 拉挤树脂。

随着风电装机量越来越大，早期特别是 2006 年之前装机的 1 MW 以下的叶片正逐步退役。根据中国可再生能源学会风能专业委员会的数据，2025 年全国老旧风场规模将超过 1.2 GW，2030 年退役风机规模将达到 10 GW 左右，2030—2035 年间，累计退役风机规模将超过 100 GW。按照中国复合

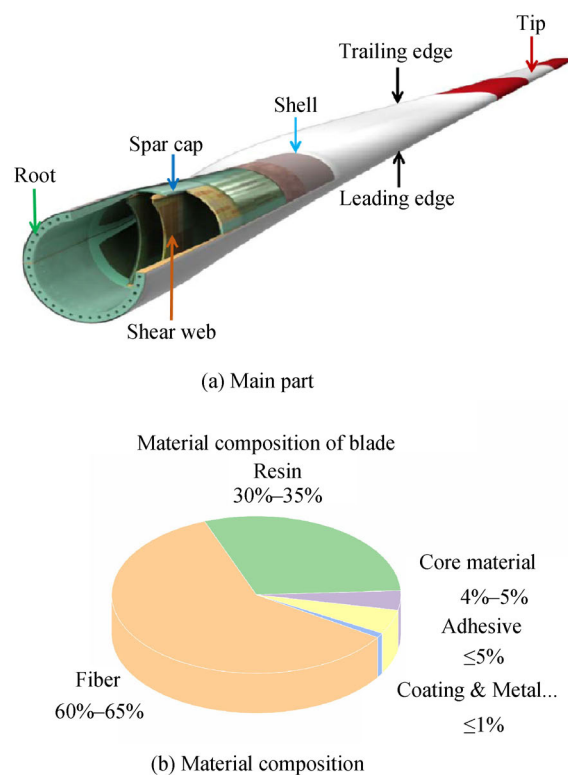


图 2 风电叶片的主要部件及材料组成

Fig. 2 Main part and material composition of wind power blade

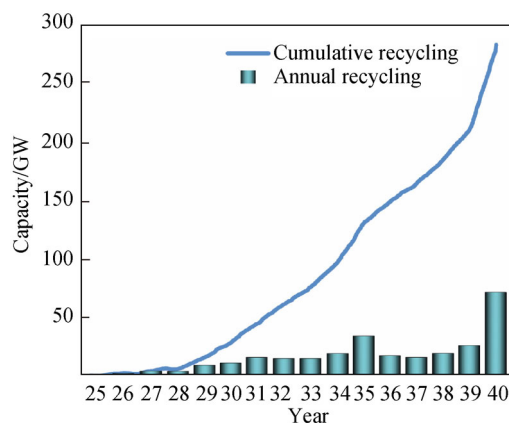


图 3 2025~2040 年退役叶片容量统计

Fig. 3 Decommissioned blade capacity statistics from 2025-2040

材料工业协会测算的数据，2023 年全国退役叶片重量约 2800 t，累计退役叶片重量为 2.4 万 t；预计到 2030 年，退役叶片重量高达 27 万 t，累计退役重量将超过 78 万 t；而到 2042 年，退役叶片重量将超过 76 万 t，累计退役叶片重量更是达到 605 万 t。

1.3 废弃叶片处理难敲响警钟

退役叶片处理不当会大幅提高碳排放量，根据中国复合材料工业协会测算的数据，1.5 MW 风电

机组的碳排放为 601.19 t 二氧化碳。大量废弃的热固性风电叶片在环境中长时间残留会占用土地、污染土壤和地下水，容易通过食物链逐步生成环境激素类似物，对人体健康造成威胁；焚烧处理还会产生大量有毒和温室气体^[5-6]。伴随着退役风电叶片数量的持续攀升，风电叶片材料的回收和再利用已经成为行业面临的痛点，严重制约了风电叶片行业的健康发展。破解叶片退役后的处理难题，突破新能源废料清洁高值化利用，已被列为中国科协 2023 年度重大工程技术难题。

1.4 退役叶片循环利用的关键问题与挑战

使用高性能复合材料制造叶片可以满足大型化、轻量化和高发电量的需求，而复合材料性能稳定、抗疲劳性好的优势，也意味着其降解回收难。退役叶片循环利用的难题与挑战涉及超期服役、低碳排材料替代及完全降解循环等方面的问题。针对叶片延寿、材料循环、材料降解等不同的回收目的，叶片材料循环利用面临的关键问题与挑战略有差异。

退役叶片材料降解循环难。从科学的角度上看，叶片使用的环氧树脂基体化学结构稳定，不溶不熔，难降解。环氧树脂化学结构稳定是叶片完全降解面临的关键难题。环氧树脂分子结构中的化学键键能较高并且相互差距较小，外部活化分子难以破坏稳定的三维交联网络结构，多因素复合造成了叶片材料降解难。从技术的角度上看，复合材料中树脂和纤维的界面键合强、废弃叶片再加工难，而且高效低成本分割破碎技术，加上回收产品高值化应用场景缺失，进一步导致了退役叶片材料循环利用难。

叶片生产过程材料低碳循环利用难。目前，叶片材料中使用了大量的高碳排放材料，业内尝试使用低碳排放可循环材料(例如 PET 等)进行替代，但是目前也面临着 2 大问题：一是温和低碳催化体系刺激下，叶片材料分子可逆重组动力学规律缺失是叶片全生命周期循环应用的关键科学问题；二是长寿命、高强度、低碳排生产材料开发与应用技术不足是当下叶片循环利用的关键技术难题。具体来讲，环氧树脂的化学结构导致其降解回收难，叶片用的树脂和环氧结构胶材料也不容易降解、回收再加工难。另外，叶片材料中的轻木无法循环，可循环的替代品 PET 性能不足，导致循环材料替代难。在生产过程中，油性脱模剂与部分防护涂料 VOC 含量高、碳排放高，叶片材料低碳循环利用难。

超期叶片延寿服役技术开发难。面向服役期满

的叶片，通过延寿技术使得机组持续运行是较好的循环利用方式，但是目前业内这方面研究较少。主要的科学问题是全生命周期叶片结构强度演变规律研究不足，技术问题是基于剩余强度延寿及二次利用技术开发不足。具体来讲，叶片监测与寿命预测技术缺失，导致目前无法预知叶片材料的剩余寿命，给叶片继续运行增加了安全风险；而服役期满叶片剩余强度评价体系不健全，叶片处置成本高，回收部件高值化利用场景开发不足，也制约着超期叶片的循环利用。

面对以上问题，需要开发相关的技术和装备，分方向、分场景解决退役叶片循环利用难题。攻克退役叶片材料回收再利用技术，推动风电行业高质量发展，对新能源产业的可持续发展具有重大意义，有助于新质生产力的快速形成，为实现“30·60”双碳目标奠定重要基础。

2 叶片回收关键技术

在叶片回收初期，往往通过填埋法来处理废弃的叶片，利用土壤中的物质对风电叶片等树脂材料进行分解，但是使用这种方法处理废弃物时间极为漫长，还会引起水土污染等问题，目前世界各国都已出台政策，禁止采用填埋的方法处理废弃复合材料^[7-8]。叶片现行回收技术主要分为 2 大类：一类是针对存量退役叶片处理，即基于常规树脂技术生产的叶片，主要是以回收再利用为主，通过机械回收、化学回收和热回收，实现叶片中金属、纤维和部分树脂的分离；另一类是未来叶片回收技术，基于可回收树脂开发应用，制造出可回收的叶片，在叶片退役后结合化学回收和热回收技术，实现纤维组分和树脂组分的彻底分离。

2.1 机械回收

机械回收是在不改变废弃复合材料化学结构的情况下，将其回收用作新材料原料的技术^[9-10]。叶片经拆解、切割、粉碎、分离等工序被分解成不同尺寸的块状颗粒、短纤维、纤维粉末和其他材料。这些材料可以用作新型复合材料的填料或增强材料，得到的再生材料也可用于建材制造，完成风机叶片材料的回收利用^[11-12]。

机械回收纤维技术作为一种发展较早且相对成熟的工艺，已经被广泛应用于再生纤维的制备。Kouparitsas 等^[13]通过将机械回收获得的再生纤维与常规商用纤维混合，按照特定比例重新制成纤维增强树脂基复合材料。经过一系列力学性能测试，结

果表明,在适当的比例和良好的分散状态下,再生纤维能够实现令人满意的增强和增韧效果。此外,再生纤维作为填料,还能有效改善水泥等建筑材料中常见的裂纹扩展和变形等问题,例如,其吸能能力可以从 1.2 J 增加到 33.3 J,从而提升水泥材料的性能,

Mamanpush 等^[14]采用了切割、粉碎和注塑的工艺流程,将废弃的玻璃纤维增强复合材料转化为新的产品。他们将适当长度的再生玻璃纤维与树脂基体混合,制造出了性能优良的再生玻璃纤维增强树脂基结构材料。这些材料中,再生玻璃纤维与树脂基体之间的界面结合非常紧密,其弹性模量可超过 5 GPa。

Yazdanbakhsh 等^[15]探讨了使用废弃玻璃钢骨料替代天然骨料来制备混凝土的技术。研究发现,当废弃玻璃钢骨料的替代比例达到 100% 时,混凝土的抗压强度和抗拉强度分别降低了 21% 和 35%。然而,通过对废弃玻璃钢骨料的表面粗糙度和几何形状进行优化处理后,当替代比例为 5% 和 10% 时,混凝土的抗拉强度分别提高了 22% 和 33%,而抗压强度则分别下降了 5% 和 9%。此外,经过这些处理的混凝土在受拉和受压破坏后的韧性也有所提高。

中材叶片也基于机械切割破碎技术,开发出关键装备和工艺,拓展回收利用场景,正在进行退役叶片粉碎回收料用于建材、井盖、鱼礁技术的开发。利用开发的粉碎装备,可以实现风电叶片材料 1 t/h 的粉碎效率及 10 mm 粒料尺寸的粉碎效果。利用纤维增强复合材料粉碎料作为添加相,获得粉碎料在建筑材料中循环再利用的方法,实现了叶片废弃材料的二次利用。相似的案例还有金风科技使用叶片固废 3D 打印出景观化应用,承德延伸风机叶片回收有限公司将叶片研磨后与石灰、石料等混合制造出砖料等,完成了废弃叶片材料的循环利用。针对材料的不同结构,山东龙能再生资源利用有限公司以退役叶片为原材料,仅需较简便的切割重组就制造出了板房、护栏、桌椅等功能性产品,拓展了废弃材料的应用场景,使得退役叶片再造产品逐渐走入大众视野。北京瑞和伟创控股有限公司及中材叶片更是直接将叶片切割后制成托盘及围板箱用于玻纤的包装箱。依托绳锯、数控水切割技术,中材叶片在连云港开发出退役风电叶片主梁部件的精准分离技术,并使用全尺寸叶片进行制造验证,可达切割断面面积 $\geq 0.7 \text{ m}^2/\text{h}$ 的切割效率,实现了废弃风电叶片向包装运输托盘商品的转化。

在机械回收的过程中,废弃的复合材料通常会经历切割和研磨,这不可避免地会影响到再生纤维的长度和清洁度,进而影响再生纤维增强复合材料的强度,使其难以与商业级纤维相媲美。Colucci 等^[16]的研究表明,经过长时间使用的纤维会出现显著的老化现象,这对其回收利用造成了一定的障碍。由于这些性能上的限制,再生纤维往往无法在原有的应用领域中继续使用,不得不转向要求较低的领域,尤其是对于成本较高的碳纤维,这无疑会导致经济效益的大幅下降。

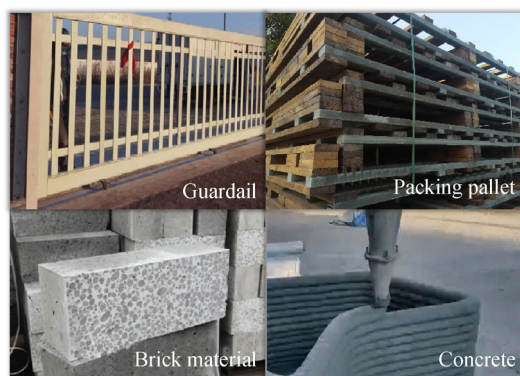


图 4 基于机械回收技术的废弃叶片产品

Fig. 4 Waste blade products based on mechanical recycling technology

2.2 热解技术

热解技术可以将风机叶片复合材料分解,生成热解气、热解油及固体,实现退役叶片的有效处理^[17-19]。在降解过程中由于复合材料中聚合物成分的存在而产生大量的能量,用于发电、供热等用途。材料中的有机大分子物质被分解为由烷烃、烯烃及合成气混合组成的热解燃气和 $\text{C}_5\text{--C}_{20}$ 混合物的热解燃油,与残留纤维、填料、金属件、焦炭等固体物。

天顺风能联合同济大学正在开发风力发电叶片热解回收技术,借助高温使风电叶片内的热固性树脂基复合材料裂解为气体、油和焦炭等产物,同时确保纤维在裂解过程中保持惰性,以便之后的回收利用。此技术不仅能高效处理风电叶片的废弃问题,还能够利用热解产生的油气作为燃料,为过程本身供能,降低燃料消耗。通过研究叶片回收后玻纤和碳纤维丝束的品质,形成回收工艺路线,旨在减少能源浪费并实现废弃物的有效利用。

热解技术处理废弃风电叶片复合材料产生的固体残渣可以用作水泥的替代原料,进一步促进废物的资源化利用。中材叶片通过水泥窑协同处理技术,将废弃叶片材料通过热解方法转换成水泥原材料,

实现了叶片材料的有效回收。废弃叶片等玻璃钢碎料在 800~1500 °C 的水泥窑炉燃烧 1 h 左右, 复合材料废弃物中的有机物转化成为能源, 无机物转化成为水泥原材料, 尾气排放满足达到国家标准, 实现了复合材料废弃物的资源化处置。其中叶片飞边废料替代燃料可节约煤量 0.5 t/h, 含胶导流网作替代

燃料可节约煤量 1 t/h, 不仅降低了运营成本, 还显著减少了工厂的废弃物堆积。不过这种方法的经济性还有提升的空间, 还无法回收高性能纤维组分。不过, 热解技术由于能耗大、回收纤维成本高、对尺寸有要求、难以获得连续纤维、经济价值不高等弊端, 目前仍有进一步的开发空间。

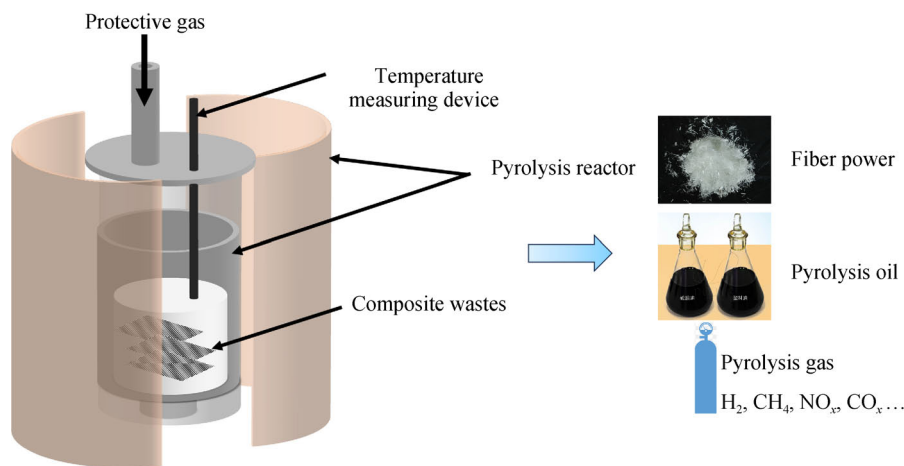


图 5 退役叶片的热解回收技术

Fig. 5 Pyrolysis recovery technology of decommissioned blade

2.3 化学回收

化学回收技术是通过化学反应将废弃叶片中的聚合物转化为小分子^[20], 将纤维材料从树脂基体中剥离回收的过程。该方法回收的增强体纤维损伤小, 甚至可实现树脂单体原料的回收, 应用前景广阔。

Ahrens 等^[21]报道了使用金属有机催化剂催化降解胺固化环氧树脂的工作。其降解路线是使用贵金属钌作为催化剂, 在热的有机溶剂中实现了环氧树脂复合材料中双酚 A 和完整纤维的回收。在有机钌催化下, 通过脱氢/键、裂解/还原级联化学反应断开了聚合物中最常见连接的 C—O 键。作者使用这种方案实现了克级废弃风电叶片中纤维组分和树脂原料的回收。

Clarke 等^[22]通过引入一种可扩展的生物衍生聚酯共价适应网络(CDN), 得到相应的纤维增强复合材料, 专用于制造可回收风力叶片, 以解决可持续能源基础设施中材料可回收性的挑战, 他们使用现有制造工艺, 制造出了基于这种新材料的 9 m 长风电叶片原型。结果表明, 该材料不仅在性能上优于传统材料, 还具备实用的化学可回收性。值得注意的是, 尽管采用了动态交联结构, 该材料的蠕变抑制能力却超越了当前最先进的热固性材料。加速老化测试证实, 这种材料比热塑性和热固性树脂更

能抵抗环境降解。该新型材料可以在 225 °C 的甲醇条件下降解, 能够从玻璃钢中回收 64.3%(质量分数)的玻璃纤维, 并通过热重分析(TGA)证实几乎不含残留树脂, 实现了生物质衍生材料叶片的制造与回收。



图 6 基于化学回收技术实现退役叶片材料中纤维的回收^[22]
Fig. 6 Fiber recovery from decommissioned blade based on chemical recovery technology^[22]

Zhang 等^[23–24]和 Zhao 等^[25]也相继开发出了相应的化学回收技术, 开发出了从废弃叶片材料中提取树脂原材料双酚 A 的技术。其中, Wang 等^[26]报道了一种使用 0.5%(摩尔分数)的两亲性十二烷基苯磺酸(DBSA)在水系统中高效降解环氧树脂(EP)及其碳纤维复合材料的新策略。研究发现, DBSA 的强亲脂性加速了其在 EP 表面的富集, 并进一步促

进了 DBSA 和 H_2O 向树脂本体相的扩散。结果表明, EP 粉末在 $190\text{ }^\circ\text{C}$ 10 h 的降解率为 100%。FT-IR 和 NMR 的表征证明了 EP 的降解机制是由 H^+ 催化的 C—N 键断裂。含有活性氢的树脂降解产物被用来制备聚氨酯, 实现了在水体系中对废弃环氧树脂复合材料的完全回收。

Liu 等^[27]则在降解产物分离方面获得了一些进展, 他们提出了一种催化氧化策略, 通过超分子相互作用实现 EP 降解以及产物的原位分离。依赖强氧化性 $\text{Fe}^{\text{IV}}=\text{O}$ 自由基, 实现 EP 的氧化降解, 当 $\text{Fe}^{\text{IV}}=\text{O}$ 自由基攻击 EP 的 C—N 键时, EP 被分解成富含活性官能团的片段。同时, $\text{Fe}^{\text{IV}}=\text{O}$ 自由基被还原为铁离子。含羧基的降解产物与催化剂配位, 实现了液态产物和固态产物的分离。山西煤化所除了能回收纤维增强体, 还开出环氧树脂降解产物转化成高值隔热碳纤维的技术, 实现了环氧树脂基复合材料的升级回收。目前化学回收技术的试剂存在环境风险, 技术成熟度还不完善, 经济性有待提高, 这些都是未来商业化过程中需要解决的关键问题。

对于常规树脂基复合材料的回收利用, 仅依靠单一技术很难实现回收产品的高值化循环利用, 需要采取多元化技术融合策略, 提升回收产品性能, 降低资源浪费, 为废弃复合材料的再利用拓展新途径。例如, 通过调节机械回收设备中的切割速度和筛网尺寸, 可以更好地控制纤维的长度和直径, 提升纤维增强产品的力学性能。在回收过程中引入偶联剂等界面增强剂, 可增强纤维与基体之间的结合力, 进一步提升再生产品的性能。此外, 利用化学溶剂或加热的惰性气体对回收纤维进行额外处理, 可以有效去除纤维表面残留的树脂和其他杂质, 有助于恢复纤维的原始性能。为了提高回收效率和降低成本, 可以创新回收设备和技术, 开发自动化的切割装置。同时, 借助 3D 打印或其他增材制造技术, 制造出性能更优的新型复合材料。此外, 探索复合材料构件的重复利用场景, 能够实现回收产品的直接再利用, 进而提高其经济价值和环境效益。

2.4 可回收叶片技术

针对未来叶片回收技术, 主要是通过开发可回收树脂, 制造出可回收叶片。叶片退役后可以通过降解液实现树脂和增强体的分离, 分离后的树脂重复用于风电、建筑等行业, 增强体通过短切毡等形式实现重复利用, 降低叶片制造过程中的碳排放, 最终可以实现叶片材料的循环使用。

法国阿科玛公司开发出可适用真空灌注成型工

艺的低黏度热塑性丙烯酸酯树脂 Elium 体系, 该树脂可在室温下反应, 具有与环氧树脂相似的强度和抗损伤性能, 可在加热情况下实现回收。国内树脂供应商先后成功研发出了可降解的环氧树脂, 通过在聚合物网络中引入动态可逆的共价键, 形成动态共价交联聚合物, 使其具备优异机械强度和可回收性质。

中材叶片于 2023 年和 2024 年先后下线了 93.2 m 的热塑性叶片和 108 m 的可回收环氧树脂叶片, 证实了可回收树脂体系在叶片上应用的可行性。其中 108 m 的可回收环氧树脂叶片的匹配材料体系、固化制度及制造工艺等与现有叶片制造工艺一致, 甚至蒙皮灌注时间较常规树脂叶片短 20 min, 试制的叶片无 A 类缺陷, 全尺寸叶片静力测试、300 万次摆振测试与 100 万次挥舞测试也顺利通过, 试制验证结果良好。可回收树脂酸性盐雾老化 720 h 拉伸模量保持率为 99.4%, $178\text{ }^\circ\text{C}$ 下在特定溶剂中的降解率为 98%, 证实了该可回收树脂的稳定性与可回收性。

国内的包括哈尔滨工业大学^[28-33]、江南大学^[34-39]等高校也在持续开发降解条件更加温和、回收产品应用附加值更高的可降解回收树脂产品, 并取得了一系列进展。根据最新的数据结果, 温和条件可控降解树脂的力学性能满足现有叶片用树脂性能需求, $80\text{ }^\circ\text{C}$ 固化 6 h 后, 拉伸强度可达 87 MPa; 耐高低温性能指标则超过风电叶片用灌注树脂要求。复合材料样板可以在常压温和的条件下实现回收, 并且液态降解组分无须处理可直接固化环氧树脂, 固化后的树脂拉伸强度超过 70 MPa; 纤维组分则用做短切纤维增强增韧, 实现了复合材料的简便闭环回收。

不过, 可回收叶片技术目前仍有一些问题没有解决。例如, 可回收树脂在 -40 、 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $50\text{ }^\circ\text{C}$ 水中浸泡 30 d 的耐湿热老化性能均能满足叶片材料使用要求, 但是性能略弱于常规树脂。百万次拉拉疲劳强度幅值(95%置信区间)和百万次拉压疲劳强度幅值(95%置信区间)较某牌号的常规树脂分别低 12.35%和 0.41%。其次, 可回收叶片挂机运行数据缺失, 对于环境适应性、技术验证、经济性分析等风电机组在实际运行过程中产生的一系列关键参数均不明确。此外, 对于全尺寸可回收叶片的回收技术和循环利用产品的大规模二次应用技术, 目前的研究还不够深入。风电叶片由多种材料构成, 这些材料的回收需要探索适宜的再利用方式。特别是液

态的树脂回收产品，如果无法实现大规模应用，可能会带来包括环境污染在内的一系列问题，将抵消

回收工作的价值。因此，在可回收叶片技术大规模推广之前，还需要有针对性地解决这些问题。

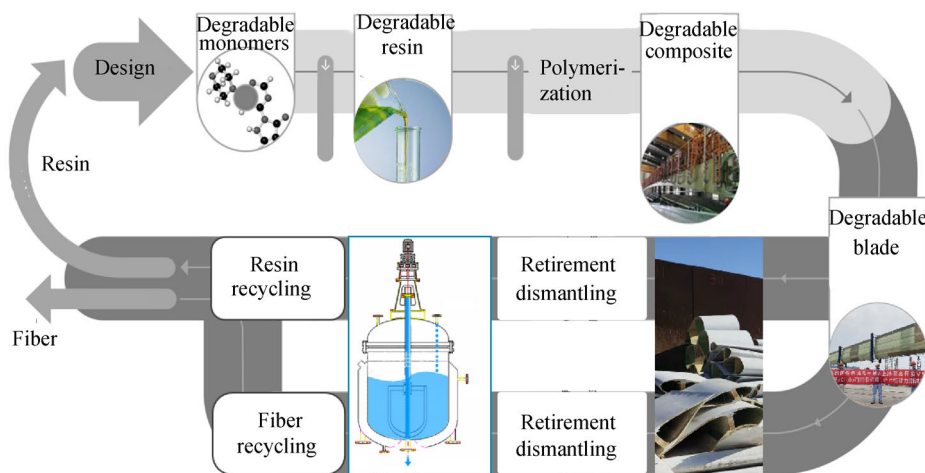


图7 可回收叶片技术

Fig. 7 Recyclable blade technology

3 叶片回收未来发展方向

面向退役风电叶片处理难的行业问题，经过多年探索，已经形成叶片回收的多条技术路线，但是由于回收复合材料性能退化，回收技术成熟度低，市场规模小，加之回收综合利用价值低，影响企业的投资积极性，导致叶片回收再利用技术产业化推广困难。为落实国家“双碳”目标战略，推动风电行业高质量发展，未来可采用多种技术协同创新，共同解决废弃风电叶片回收难题。

3.1 探索监测手段，开发延寿技术

依托区块链、物联网、大数据等现代新兴科技，开发运行叶片等部件的健康监测系统，实施掌握叶片及整机运行时的性能参数，建立风电机组健康监测系统，掌握机组运行状态；开发叶片运行变形参数监测体系，了解叶片大载荷受力位置，构建关键位置剩余强度评价预测模型，探究疲劳失效机理，建立超期叶片的剩余价值评估方法。制定超期叶片关键部位维护方案，保障叶片超期运行安全服役。

3.2 部件分级回收，拓宽应用场景

针对即将退役叶片的处理，梳理不同回收方法的技术特点，将多种回收技术有机结合，探索叶片部件高值化二次再利用技术。联合科研单位研制低成本高效分割破碎关键装备，开展低碳拆除技术应用示范。对叶片分割件进行差异化处理，开发匹配高值化下游应用场景，鼓励其他行业参与退役叶片回收技术的应用开发，建立关键回收部件在工程、市政、路桥、海洋、填料和原料等高值化应用场景，

完善叶片规范化分割破碎与能量转化标准，达到退役叶片部件高值化利用的目的。

3.3 结合材料改性，提升回收复材性能

风电叶片等复合材料结构件在达到使用寿命后，其所使用的复合材料可能会受到温度波动、湿润环境、紫外线辐射等自然因素的影响，从而引起性能的降低，并且可能出现裂纹或其他损伤。此外，在回收阶段，复合材料可能会遭受进一步的损害，这可能会影响其机械性能和整体结构的完整性，限制其在再利用设计上的可能性，进而影响其作为再利用材料的价值。

为了提升这些退役复合材料的性能，可以采取物理修复和材料改性的方法。使用偶联剂或界面增强剂重建或加强纤维与基体之间的黏合力。使用冷焊或热塑性焊接来修复缺陷，增强泡沫芯材等材料的结构完整性。通过适当地施加应力或热处理，部分恢复材料机械特性。对回收的复合材料进行涂覆处理，减少再利用过程中环境对性能的影响，增加回收复合材料的应用领域。

3.4 多方向借鉴，探索回收模式

退役叶片的物权归属为风电场业主，退役叶片的拆解费用、运输费用、处理费用目前均由业主承担。未来叶片循环利用的商业模式可将叶片退役后的处置费用包含至叶片销售费用中，由叶片厂联合第三方对退役叶片进行处理。亦可以以第三方形式运作，或以第三方与业主及叶片商联合的模式，对叶片进行处理，处理获利归处置方所有。同时，联合优势单位和行业协会，加快推动相关标准编制，

规范回收处理企业管理, 提高准入条件, 打通生产、运营、维护、回收、利用、处置全链条。

3.5 布局未来产业, 持续研发可回收技术

着眼未来叶片行业, 可回收叶片的开发是助力风电叶片低碳发展、引领技术进步的关键一环。联合国内优势单位, 发挥产学研用优势, 建立企校强强联合机制, 研发自主化可回收环氧树脂技术, 破解树脂回收产物全循环利用技术, 攻克退役叶片低成本转化原材料技术, 持续开发碳纤维等回收增强材料的高值化场景应用技术, 形成风电叶片材料的整体循环利用方案。加快叶片碳足迹算法开发, 提升国际话语权, 促进叶片低碳循环再利用良性发展。

3.6 风电整机协同处置, 助力减碳降碳

业内也在研究开发风电机组延寿技术。根据金风科技提供的资料, 风电机组整机的运行寿命视具体情况评估, 当机组达到 20 年设计寿命后, 最长还可以继续运行约 12 年。对于风电机组延寿技术, 除需要整个风电行业积极参与, 共同解决机组延寿面临的技术、标准等问题之外, 未来还需要关注机组部件生命周期结束后的处置问题。

拆除的风电机组处理方式除了核心部件再利用和整机无害化处置外, 例如用于千乡万村行动、出口国外搭配小型机组、高耗能园区绿电布局等场景, 关键部件的再利用有助于减碳降碳。以退役 4.2 MW 的风电叶片为例, 大约会产生 37.5 t 相关的废弃非金属材料。德国通过使用水泥窑协同处理技术, 将预处理后的废弃叶片作为水泥生产原料, 每回收 1000 t 玻璃纤维废料可以替代 450 t 煤、150 t 氧化铝或 200 t 沙子。每焚烧处理 1 kg 废弃风机叶片, 将导致约 3.4 kg(以 CO_2 当量计)的碳排放, 而采用水泥窑协同处理技术则能减少 0.9 kg(以 CO_2 当量计)的碳排放^[40]。按照我国 2030 年累计退役风电叶片重量 78 万 t 的数据量计算, 仅采用水泥窑协同技术处理废弃叶片的方法就可减少 70.2 万 t(以 CO_2 当量计)的碳排放, 再结合叶片其他回收利用方法, 将进一步降低碳排放。

4 结论

在全球双碳背景下, 风电行业快速发展, 面对逐年增加的退役叶片带来的环境压力, 迫切需要开发低成本高值化低碳循环技术, 解决退役叶片再利用难的问题。造成退役叶片降解回收难的关键科学问题和技术问题主要包括叶片超期服役技术欠缺、低碳排材料替代技术不足以及完全降解高值化循环

技术匮乏等。机械回收、热回收、化学回收以及可回收叶片技术是当前主要的回收技术。但是针对叶片延寿、关键部件循环利用及叶片完全循环的需求, 仅仅靠单一的回收技术是无法实现的, 有必要开发面向不同目的的循环联用技术。未来可通过开发机组和叶片的剩余寿命预计体系、拓展退役叶片组件的高值化应用领域、探索退役叶片商用循环模式、开发可回收的下一代叶片技术及探索退役风电机组回收再利用技术, 共同推进风电行业绿色低碳高质量发展, 助力中国新质生产力快速形成。

参考文献:

- [1] SPINI F, BETTINI P. End-of-Life wind turbine blades: Review on recycling strategies[J]. *Compos Part B Eng*, 2024, 275: 111290.
- [2] CHENG M, ZHU Y. The state of the art of wind energy conversion systems and technologies: A review[J]. *Energy Convers Manag*, 2014, 88: 332–347.
- [3] FENG Y, LIN H Y, HO S L, et al. Overview of wind power generation in China: Status and development[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2015, 50: 847–858.
- [4] 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(03): 1274–1284.
Li Chengliang, YANG Chao, NI Aiqing, et al. *Acta Mater Comp Sinica*, 2023, 40(03): 1274–1284.
- [5] 王宝龙, 王一凡, 黄玉东, 等. 液相化学法降解不饱和聚酯树脂及其复合材料研究进展[J]. *高校化学工程学报*, 2021, 35(2): 199–205.
WANG Baolong, WANG Yifan, HUANG Yudong, et al. *J Chem Eng Chin Univ*, 2021, 35(2): 199–205.
- [6] 张朝祯, 金晓冬, 孙诗兵, 等. 废旧风机叶片的回收利用现状分析[J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(12): 4341–4350.
ZHANG Chaozhen, JIN Xiaodong, SUN Shibing, et al. *Bull Chin Ceram Soc*, 2023, 42(12): 4341–4350.
- [8] 张元正, 吉增香. 玻璃纤维增强热固性复合材料的回收利用[J]. *玻璃纤维*, 2024(04): 40–52.
ZHANG Yuanzheng, JI Zengxiang. *Glass Fiber*, 2024(04): 40–52.
- [9] 王宝龙, 刘锦帆, 李成良. 大型复合材料风电叶片回收技术的现状与发展趋势 [J/OL]. *复合材料科学与工程*, 2024: 1–6 [2024-05-13].
<https://link.cnki.net/urlid/10.1683.TU.20240511.1759.002>.
WANG B, LIU J, LI C. *Comp Sci Eng*, 2024: 1–6 [2024-05-13].
<https://link.cnki.net/urlid/10.1683.TU.20240511.1759.002>
- [10] PIETROLUONGO M, PADOVANO E, FRACHE A, et al. Mechanical recycling of an end-of-life automotive composite component[J]. *Sustain Mater Technol*, 2020, 23: e00143.
- [11] 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. *Mater Res Appl*, 2024, 18(4): 560–573.
- [12] 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(03): 1192–1203.
ZHANG Xiaolin, YANG Menghao, CAO Jing, et al. *Acta Mater Comp Sinica*, 2024, 41(03): 1192–1203.
- [13] KOU PARITSAS C E, KARTALIS C N, VARELIDIS P C, et al. Recycling of the fibrous fraction of reinforced thermoset composites[J]. *Polym Compos*, 2002, 23(4): 682–689.
- [14] MAMANPUSH S H, LI H, ENGLUND K, et al. Recycled wind turbine

- blades as a feedstock for second generation composites[J]. *Waste Manag*, 2018, 76: 708–714.
- [15] YAZDANBAKHSI A, BANK L C, RIEDER K A, et al. Concrete with discrete slender elements from mechanically recycled wind turbine blades[J]. *Resour Conserv Recycl*, 2018, 128: 11–21.
- [16] COLUCCI G, OSTROVSKAYA O, FRACHE A, et al. The effect of mechanical recycling on the microstructure and properties of PA66 composites reinforced with carbon fibers[J]. *J Appl Polym Sci*, 2015, 132(29): 42275.
- [17] JOB S. Recycling glass fibre reinforced composites—history and progress[J]. *Reinf Plast*, 2013, 57(5): 19–23.
- [18] 丁江浩, 龚裕, 杨飞华, 等. 热固性树脂复合材料回收方法研究进展[J]. *现代化工*, 2020, 40(03): 22–25.
DING Jianghao, GONG Yu, YANG Feihua, et al. *Mod Chem Ind*, 2020, 40(03): 22–25.
- [19] PAKDEL E, KASHI S M, VARLEY R, et al. Recent progress in recycling carbon fibre reinforced composites and dry carbon fibre wastes[J]. *Resour Conserv Recycl*, 2021, 166: 105340.
- [20] SUYAMA K, KUBOTA M, SHIRAI M, et al. Degradation of crosslinked unsaturated polyesters in sub-critical water[J]. *Polym Degrad Stab*, 2007, 92(2): 317–322.
- [21] AHRENS A, BONDE A, SUN H, et al. Catalytic disconnection of C–O bonds in epoxy resins and composites[J]. *Nature*, 2023, 617(7962): 730–737.
- [22] CLARKE R W, ROGNERUD E G, PUENTE-URBINA A, et al. Manufacture and testing of biomass-derivable thermosets for wind blade recycling[J]. *Science*, 2024, 385(6711): 854–860.
- [23] ZHANG N, WU S D, WANG C Z, et al. Efficient catalytic degradation of anhydride-cured epoxy resin by amphiphilic molecule catalysts[J]. *Green Chem*, 2022, 24(19): 7395–7402.
- [24] ZHANG N, CUI X J, WANG C Z, et al. Degradation of vinyl ester resin and its composites via cleavage of ester bonds to recycle valuable chemicals and produce polyurethane[J]. *Waste Manag*, 2023, 155: 260–268.
- [25] ZHAO X, ZHAO X, AN W L, et al. Reconstruction of new high-performance epoxy thermoset based on the full utilization of the degradation products of waste epoxy thermoset[J]. *J Environ Chem Eng*, 2023, 11(3): 110032.
- [26] WANG C Z, ZHANG N, WU S D, et al. Efficient degradation of amine cured epoxy resin via the cleavage of C–N bond by amphiphilic dodecylbenzenesulfonic acid[J]. *Compos Sci Technol*, 2024, 248: 110442.
- [27] LIU L L, LIU X H, LI X H, et al. An integrative chemical recycling approach for catalytic oxidation of epoxy resin and *in situ* separation of degraded products[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2024, 63(26): e202405912.
- [28] XU N D, WANG B L, AN Z Q, et al. γ -Ray-sensitive motif-driven versatile epoxy thermoset: Highly efficient radiation degradation, intrinsic flame resistance and sustainable synthesis[J]. *Chem Eng J*, 2022, 450: 138151.
- [29] YAO Y, ZHAO F, WANG B L, et al. The designing of degradable unsaturated polyester based on selective cleavage activated hydrolysis and its application in recyclable carbon fiber composites[J]. *Compos Sci Technol*, 2022, 229: 109692.
- [30] XU N D, WANG B L, AN Z Q, et al. Complete degradation of a high-performance epoxy thermoset enabled by γ -ray-sensitive motifs based on the cascaded synergetic strategy[J]. *Chem Mater*, 2022, 34(10): 4732–4740.
- [31] YAO Y, WANG B L, ZHAO F, et al. Degradable and recyclable unsaturated polyester resin based on the selective cleavage of a hindered C–O bond[J]. *ACS Appl Polym Mater*, 2022, 4(2): 999–1009.
- [32] SHEN Y B, XU N D, ADRARO Y A, et al. Imine or secondary amine-derived degradable polyamine: Low-cost matrix resin with high performance[J]. *ACS Sustainable Chem Eng*, 2020, 8(4): 1943–1953.
- [33] LIU Y Y, LU F, WAN J J, et al. Recyclable tough thermosets with an imide-hexahydrotriazine structure[J]. *Polym Chem*, 2022, 13(21): 3063–3075.
- [34] LIU Y L, WANG B B, MA S Q, et al. Catalyst-free malleable, degradable, bio-based epoxy thermosets and its application in recyclable carbon fiber composites[J]. *Compos Part B Eng*, 2021, 211: 108654.
- [35] YU Z, MA S Q, TANG Z B, et al. Amino acids as latent curing agents and their application in fully bio-based epoxy resins[J]. *Green Chem*, 2021, 23(17): 6566–6575.
- [36] QIU J F, MA S Q, WANG S, et al. Upcycling of polyethylene terephthalate to continuously reprocessable vitrimers through reactive extrusion[J]. *Macromolecules*, 2021, 54(2): 703–712.
- [37] WANG B B, MA S Q, XU X W, et al. High-performance, biobased, degradable polyurethane thermoset and its application in readily recyclable carbon fiber composites[J]. *ACS Sustainable Chem Eng*, 2020, 8(30): 11162–11170.
- [38] LI Q, MA S Q, WANG S, et al. Green and facile preparation of readily dual-recyclable thermosetting polymers with superior stability based on asymmetric acetal[J]. *Macromolecules*, 2020, 53(4): 1474–1485.
- [39] DU S, YANG S Q, WANG B B, et al. Acetal-thiol click-like reaction: Facile and efficient synthesis of dynamic dithioacetals and recyclable polydithioacetals[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2024, 63(31): e202405653.
- [40] 蔡晓萍, 段华波, 马艺, 等. 基于生命周期分析的风机叶片环境影响评价[J]. *深圳大学学报理工版*, 2023, 40(1): 40–47.
CAI Xiaoping, DUAN Huabo, MA Yi, et al. *J Shenzhen Univ Sci Eng*, 2023, 40(1): 40–47.

Large Wind Turbine Blade Low-Carbon Recycling Technology: Challenges and Opportunities

WANG Baolong^{1,2}, LI Chengliang^{1,4}, CHEN Chun^{2,4}, XU Jun^{1,2}, HU Zhen³, YANG Bin⁴

(1. Sinoma Wind Turbine Blade Co., LTD., Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Inorganic Fibers and Composites, Beijing 100083, China; 3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Extended Abstract

With the improved global wind power situation, the wind power industry is developing rapidly. Annual newly installed capacity in China increases steadily. To cope with the cost pressure of the low-price era in the wind power industry, wind turbines are

continuously upsized, which has led to an annual increase in blade weight. As the early blades retire in large numbers, the non-degradable waste blades exert a tremendous pressure on the environment. This paper sorts out the key issues and challenges in the recycling of retired wind power blades. The current mainstream wind power blade recycling technologies are also listed, including mechanical recycling, thermal recycling, chemical recycling, and recyclable blade technologies. The differences among various recycling technology are analyzed systematically as well. From the perspective of the wind power industry and blade enterprises, it proposes development suggestions for recycling technologies, including blade extension, component recycling, and recyclable technologies.

Summary and Prospects Against the backdrop of global dual-carbon goals, the wind power industry is developing rapidly. Facing the environmental pressures brought by the increasing number of retired blades in recent years, there is an urgent need to develop low-cost, high-value, and low-carbon recycling technologies to overcome the challenge. The key scientific and technical issues causing difficulties in the degradation and recycling of retired blades mainly include a lack of technology for blades to serve beyond their designed lifespan, insufficient low-carbon material substitution technologies, and a scarcity of complete degradation and high-value recycling technologies. The key scientific and technical issues that make it difficult to degrade and recycle retired blades mainly include the lack of technology for blades to serve beyond their designed lifespan, insufficient alternatives for low-carbon emission materials, and a scarcity of fully degradable high-value recycling technologies. Mechanical recycling, thermal recycling, chemical recycling, and recyclable blade technologies are the current main recycling technologies. However, to meet the needs of blade life extension, the recycling of critical components, and complete blade recycling, relying on a single recycling technology is not sufficient. It is necessary to develop recycling technologies that can be used in combination for different purposes. In the future, the green, low-carbon, and high-quality development of the wind power industry can be promoted, and the rapid formation of new productive forces in China can be supported, through the development of systems for estimating the remaining life of turbines and blades, expanding the high-value application areas of retired blade components, exploring commercial recycling models for retired blades, developing next-generation blade technologies including recyclable technologies, and researching recycling and reuse technologies for retired wind turbines.

Keywords wind turbine blades; retirement; recycling technologies; recyclable blades; circular utilization; future development