

风电光伏退役设备资源循环的价值分析与对策

张均成

华安基金管理有限公司 上海 200120

【摘要】：本文围绕风电光伏退役设备的资源化潜力，从政策演进、报废体量、主流工艺路线和市场态势入手，以具有代表性的1.5MW风机及同等规模光伏方阵为分析对象，对其可回收物料的构成与经济回报进行精细化核算。研究发现，退役设备蕴含较高的再生资源潜能，但产业发展阶段面临技术可行性与商业回报不匹配、制度供给不足、逆向物流网络薄弱、二次污染风险等制约因素，使得本应释放的资源效益大打折扣。针对这些制约因素，文章从制度建设、关键技术创新、回收体系构建及对外经验互鉴等方面提出整体性解决思路，助力新能源事业完成全生命周期的绿色自我闭环。

【关键词】：风电设备退役；光伏组件回收；资源循环利用；价值评估；循环发展

DOI:10.12417/3083-5526.26.02.034

1 引言

近些年，我国新能源风电光伏产业蓬勃发展，装机规模已稳居全球首位。随着技术更新及投运年限的增长，大量风电光伏设备逐步到达退役年限。退役的风电光伏设备属于新型固体废物，风电设备材料构成复杂，其中风机叶片纤维复合材料占比超过90%，塔筒含有大类可回收钢铁；光伏组件主要由玻璃、硅、重金属等组成，也具有较大的资源回收价值^[1-2]。然而，风电光伏退役设备资源循环回收行业处于破晓之前，是从无序到有序的过程，政策需要规范化，技术需要标准化，商业模式需要创新化，资源价值的变现面临多重考验：首先，技术经济性矛盾突出，风机叶片拆解梯次利用以及组件层间黏结材料的拆解分离技术不够成熟，高附加值的物质循环利用路径尚未打通，经营主体缺乏可持续且稳定的盈利收入；其次，政策标准体系尚不完善，虽然主体框架已初步建立，但回收责任主体、设定行业进入条件等实施细节尚未明确，且废弃判定及分级标准、退役设备残值评价细则等有待填补空白。再次，回收网络薄弱与商业模式缺失，我国尚未建成覆盖全国的风电光伏退役设备回收网络，特别是西北等装机规模较大区域，处理设施配套不足，且规模化、专业化的拆解再制造企业极度短缺。最后，污染防控压力不容忽视，退役设备中含有锡、铅等重金属和硅胶、含氟等有机物，经焚烧、酸洗等方式处置，易排放持久性毒性物质，造成二次污染。基于上述现状，本文拟系统整理产业情况，分析并探究资源价值兑现的关键症结，并从多个维度提出应对思路，以期政策制定者、新能源产业以及资源循环人士提供参考。

2 风电光伏退役设备资源循环利用现状

2.1 政策体系从顶层设计走向系统推进

2021年，《2030年前碳达峰行动方案》首次提出风电光

伏退役设备资源循环利用。2023年，《关于促进退役风电、光伏设备循环利用的指导意见》在退役风光设备循环方向作出整体规划部署。2026年，《关于促进光伏组件综合利用的指导意见》进一步明确各类技术路径与发展指标。同年，生态环境部发布《废光伏设备回收处理污染控制技术规范（HJ 1463—2026）》，首次对废光伏设备回收处理全过程污染控制提出技术规范要求。政策体系的加速构建，标志着风电光伏退役设备资源循环回收已从零散探索走向系统规划。

2.2 风电设备退役规模及技术工艺

我国风电自2006年前后进入规模化发展阶段，按20年设计寿命推算，2025年起迎来第一轮集中退役潮。根据2023年6月国家能源局出台的《风电场改造升级和退役管理办法》，针对并网年限超过15年或单机容量小于1.5MW的风电场，政策鼓励开展“以大代小”改造升级，进一步加速了风电设备的退役进程。

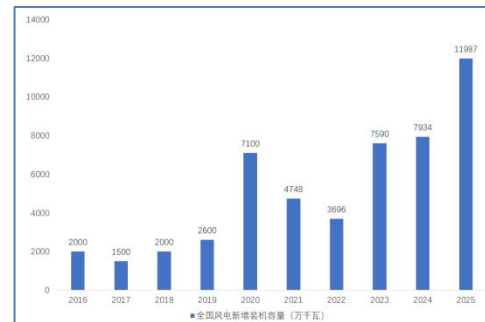


图1 2016—2025年全国风电新增装机容量（单位：万千瓦）

根据国家能源局数据，到2025年12月末，我国风电累计装机容量已增至6.4亿千瓦。据报道，预计到2030年我国将有超过3万台风机面临更新，叶片报废量达到120万吨，到2035年这一数字将超过9万台，叶片报废量预计达300万吨。从全球视角看，全球累计退役叶片约4300万吨，中国占比约40%^[3]。

风电退役设备中，叶片等复合材料部件的回收最为棘手。传统掩埋处置不仅占用土地资源，还容易造成二次污染，违背新能源产业绿色低碳循环发展理念。目前，资源循环梯次利用是处理退役叶片的最优路径，主要包括物理回收法、化学回收法和热回收法。国内主流实践有三种：一是拆解叶片后直接重复利用材料，如用于市政建设；二是将叶片破碎后作为增强材料掺入建筑材料；三是通过化学方法分解后实现资源再利用。一台退役风电机组约含 86.82%的钢铁、5.90%的玻璃纤维、2.2%的铜和 1.33%铝。若回收技术不断成熟，再生纤维、复合材料等高值化利用比例提升，市场容量有望突破千亿元，其中仅废钢、废铜等金属的回收价值预计可达 240 亿元左右。据 Straits Research 数据，2025 年全球风电叶片回收市场价值约为 9925 万美元，预计到 2033 年将达 11.46 亿美元，复合年增长率为 19.25%。

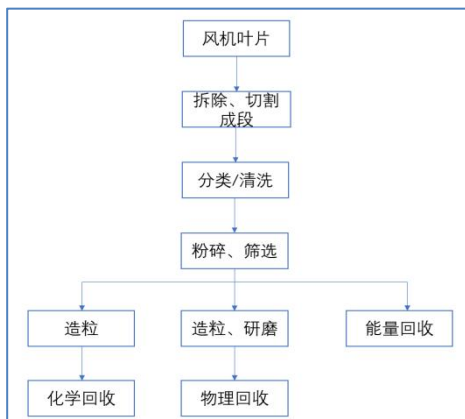


图2 风机叶片主流回收工艺

2.3 光伏组件退役规模及技术工艺

根据国家能源局数据，到 2025 年 12 月末，我国光伏累计装机容量已增至 12 亿千瓦。光伏设备的退役时间略晚于风电。根据国际可再生能源机构预测，预计到 2030 年光伏退役设备有望达到 150 万吨，2050 年有望达到 2000 万吨^[4]。从全球范围看，到 2050 年全世界光伏退役设备将达到 7800 万吨，约 43 亿块光伏退役组件需要处置^[5]。据 Straits Research 数据，2025 年全球风电叶片回收市场价值约为 9925 万美元，预计到 2033 年将达 11.46 亿美元，复合年增长率为 19.25%。

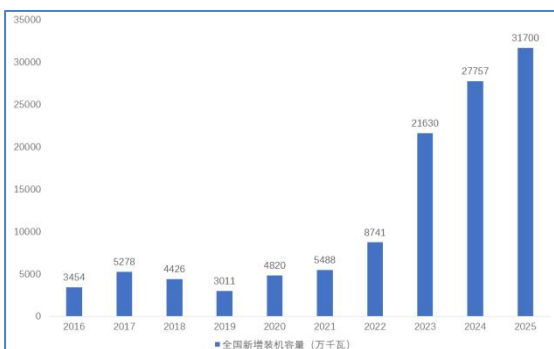


图3 2016—2025年全国光伏新增装机容量（单位：万千瓦）

光伏组件由玻璃、铝、铜、硅、银等多种材料构成，预期有价产品回收收益将在 20 万元/MW，总体减少超过 100t/MW 二氧化碳排放。在光伏组件回收技术层面，当前主要分为机械拆解、化学溶剂和热解三大类。机械法包括粉碎研磨、低温分离、氧化剂分离和热力切割等方案，优势在于节能高效，但存在分离不完全或能耗较高的问题；化学法使用无机酸或有机溶剂浸泡，可实现彻底分离，但废液处理耗时且溶剂残留难以避免；热解法在惰性气体或有氧环境中高温热解 EVA 胶膜，效率较高，但前者易导致电池片碎裂，后者则产生气体污染^[6]。总体而言，各类技术路线均面临经济性与环境性难以兼顾的困境，多技术组合是未来发展方向。据 Straits Research 数据，2025 年全球市场价值约为 3.68 亿美元，预计到 2034 年将增至 12.95 亿美元，复合年增长率 14.86%。

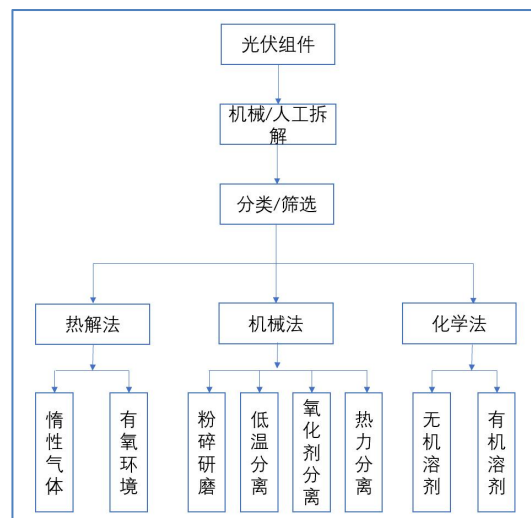


图4 组件主流回收工艺

2.4 风电光伏设备回收价值分析

根据风光设备资源循环的现状，为识别制约价值兑现的关键环节，以典型机组为研究对象，开展精细化的经济性模拟估值，为后续技术突破与政策设计提供数据基准。聚焦电价补贴时代大量投产的 1.5MW 机型，以及等效容量的 250W 单晶组件进行模拟估值。

表1 风电光伏退役设备回收价值分析案例

部件	主要可回收材料	材料重量 (kg)	预计回收价格 (元/kg)	预计可回收价格 (万元)	价值占比分析
基于 1.5MW 风机的回收价值分析					
叶片	玻璃纤维	11,550	2.5	2.89	3.45%
	树脂和胶	6,300	2.1	1.26	1.50%
塔筒及机舱	铜	4,350	91	39.59	47.27%

	钢铁	170,000	2.2	37.40	44.66%
	铝	2,600	10	2.60	3.10%
	钕磁铁	1,000	0.15	0.02	0.02%
	合计			83.75	
基于 1.5MW 组件（按 250W 单晶组件考虑）的回收价值分析					
组件	钢化玻璃	82500	0.35	2.89	2.16%
	铝边框	17100	10	17.10	12.79%
	硅片	3600	39	14.04	10.50%
	电缆	840	45	3.78	2.83%
	内部导体 铝	600	10	0.60	0.45%
	金属银	60	15,500	93.00	69.55%
	涂锡焊带	1440	16	2.30	1.72%
	合计			133.71	

从风机来看，单台退役机组的物料总重近 200 吨，不同物料的价值贡献呈现高度的不均衡：首先，传统金属类贡献主要利润，铜材尽管质量占比约 2%，却贡献了总价值 47.27%，钢铁以吨位优势带来 44.66% 的价值份额，二者合计构成收益基石的 91.93%。其次，叶片中玻璃纤维与树脂等叶片主体材料重量占比接近 9%，但合计价值贡献仅约 5%，未来若层压复合材料的解聚及增值利用得以突破，有望从“负资产”转变为最具增长弹性的板块。

关于光伏组件方面，价值集中程度更高，贵金属占据绝对主导。首先，金属银占组件总重的微乎其微（约 0.06%），却占据了回收价值的 69.55%，铝框成次要支撑，二者合计贡献价值约 82.34%，是稳定现金流的组成部分。其次，钢化玻璃重量占比超七成半，而价值贡献仅略高于 2%，这意味着如果处置半径过长，物流与加工费用很容易吞噬玻璃本身的可变现价值，布局本地化消纳至关重要。最后，硅片的材料回收价值虽然较低，但若未来硅片回收增值利用得以突破，存在较大的增长潜力。

经估算，上述 1.5MW 风机与光伏系统的理论材料可回收价值分别 83.75 万元、133.71 万元（详见表 1），当前阶段因工艺装备不完善，且未考虑材料高附加值得以回收利用，这一数字与实际回报可能会有差距。以“三北”地区一个典型 200MW 风电场（约 133 台 1.5MW 风机）计算，当前退役总价值高达约 1.7 亿元，为发电集团与回收企业组建合资公司、推行“设备拆除+就地预切割+区域集中精炼”一体化服务提供了充足的利润空间，也支撑了“按回收价值分成”而非“收取处置费”的可持续商业逻辑。

3 推动资源价值回归的对策建议

3.1 夯实制度底座，为价值实现构建规则屏障

在现有指导意见框架下，尽早出台实操管理办法，厘清发电企业与设备制造商等在退役回收中的责任边界，设定回收处置技术条件与准入资格，防止无序竞争局面蔓延。同步加速构建涵盖设计、综合利用、污染管控及再生认证的标准集群，使资源估值与流转有据可依。财政金融上，研究将退役风光设备循环项目纳入绿色投资支持范围，可考虑设立专项资金引导示范，丰富贷款贴息、绿色债券等融资工具，吸引资本向价值回收端配置。

3.2 攻克关键技术装备，疏通价值转化卡点

将退役风光设备的高效循环利用列入国家科技攻关序列，集中资源解决叶片热固性树脂与纤维的选择性分离、层压件封装介质的快速脱除，以及稀贵金属的高收率提取等核心工艺。同步推进移动式就地预切割、低温破碎分选成套产线等专用装备的工程化设计，以设备能力跃升拉低单位处置费用。在技术路线的顺序布局上，近期侧重推广应用经济门槛偏低的机械拆解与梯级复用；中长期则引导资本向热解及化学法等高产出方案倾斜，推动产业由“简单处置”向“高值制造”转型。

3.3 重构逆向物流网络与商业运营模式

利用大规模退役潮到来前的缓冲期，科学规划集散与处理中心的空间布局，优先在风电、光伏装机相对集聚的“三北”地区及东部沿海负荷中心周边完善节点设施，通过优化物流半径控制货运成本。结合“无废城市”等试点任务，率先开展区域性回收与梯级利用试验，探索可移植的商业范式。在运营层面，倡导建立大型发电集团与材料再生企业间的战略合作体，推行从拆卸、物流、分拆到精深加工的链式综合服务，打通上下游的价值通路。支持具备资本和先发优势的中央企业整合业内零散产能，培育具备规模效应的行业龙头企业，重建健康的价值流转秩序。

3.4 积极对接国际循环技术与规则

吸收欧美等国相对成熟的制度经验，如污染者付费与生产者延伸责任体系，以及企业主导的高纯硅与银闭环回收工厂实践^[7-8]。加强与 IRENA、IEA 等跨国组织的政策协调和技术互访，参与设备再生利用的国际准则编写，为我国回收工艺和再生材料参与国际流通积累资质和话语权。

4 结语

本文从制度背景、装机报废体量、主流拆解与提纯路径等维度展开叙述，以 1.5MW 风机及同等光伏系统作为价值锚点，细致解构了不同物料组分在经济贡献度，揭示了铜、银等高价值元素的决定性地位，以及叶片类玻璃钢产品等低值化环节所隐含的远期提升空间。在此基础上，凝练了引发价值流失的技术、制度与市场症结，并从法规配套、核心工艺及设备开发、

逆向流通网络重塑、内外经验对接等方面给出综合改进方案。本文在价值拆解框架设计、回收数据测算及症结梳理层面完成了主要分析工作,期盼能为管理机构制定扶持政策、为从业主

体厘清商业模式提供具有启发性的决策依据,助力新能源事业完成全生命周期的绿色自我闭环。

参考文献:

- [1] 张思索,王洪亮,等,退役风光设备资源化利用标准体系构建[J].热力发电,2026,55(1):11-19.
- [2] 李 诚,李文涛,等,退役晶硅光伏组件高效资源化回收研究进展[J]. 新能源 进展,2026,14(1):106-112.
- [3] International Renewable Energy Agency, International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme. End-of-life management: solar photovoltaic panels[R].Abu Dhabi: IRENA, 2016: 1.
- [4] 工业和信息化部,生态环境部,商务部,等.关于促进光伏组件综合利用的指导意见[EB/OL].(2026-03-03).
<https://www.cnenergynews.cn/article/4QbcCnSM6wn>.
- [5] The U.S.Department of Energy (DOE).End-of-life management for solar photovoltaics[R/OL].[2025-10-22].<https://www.energy.gov/eere/solar/end-life-management-solarphotovoltaics>,2016.
- [6] LI C X, DONG F, NIAN V. Global photovoltaic waste under ratcheting climate ambition: spatio-temporal distribution and future pathways[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2025, 221: 108388. DOI:10.1016/j.resconrec.2025.108388.
- [7] 邢政. 欧美的碳足迹管理经验和措施[J]. 生态经济,2024,40(8):1-4
- [8] Curtis T L, Buchanan H, Heath G, et al. solar photovoltaicmodule recycling: a survey of U.S. policies and initiatives[R].Colorado:National Renewable Energy Laboratory,NREL/TP6A20-74124,2021