

光伏组件回收技术经济性分析与循环利用路径研究

勾元春

华电（贵州）新能源发展有限公司 贵州 贵阳 550001

【摘要】：随着光伏产业规模化发展，组件退役浪潮如期而至，其回收处置与循环利用成为产业可持续发展的关键议题。本文聚焦光伏组件回收技术经济性与循环利用路径，分析主流回收技术的应用现状与成本收益特征，探究影响回收经济性的核心因素，揭示当前循环利用体系中存在的衔接不畅、标准缺失等问题。通过整合技术实践与产业规律，提出适配不同场景的回收技术组合方案，构建“技术优化-产业链协同-政策保障”的循环利用路径。研究为提升光伏组件回收效率、降低处置成本、推动产业绿色闭环提供思路，对促进新能源产业全生命周期可持续发展具有实践意义。

【关键词】：光伏组件；回收技术；经济性分析；循环利用；路径优化

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.015

引言

在能源转型与“双碳”目标驱动下，光伏产业实现跨越式发展，随之而来的是组件退役规模的快速增长。光伏组件含有硅、银等可回收资源，也包含铅、氟等有害物质，规范回收处置既能挖掘“城市矿产”价值，又能规避环境污染风险。然而当前回收技术面临分离难度大、成本与收益失衡等问题，循环利用体系存在产业链碎片化、回收网络不完善、标准不健全等短板，制约了产业规范化发展。面对即将到来的退役高峰，亟需厘清回收技术的经济性差异，探索高效可行的循环利用路径。基于此，本文围绕技术应用实效、经济可行性与路径优化展开研究，为破解光伏组件回收难题、推动产业绿色可持续发展提供支撑。

1 光伏组件回收现状与核心问题

1.1 回收产业发展背景与现实需求

光伏组件的设计寿命通常在 20 至 30 年，早期投运的组件已逐步进入退役阶段，叠加技术迭代与极端天气导致的损毁，退役规模持续扩大。组件中蕴含多种有价金属与可循环材料，合理回收能实现资源再利用，契合循环经济理念。但大量退役组件若缺乏规范处置，不仅造成资源浪费，其含有的有害物质还会渗入土壤和水源，破坏生态环境，影响动植物与人类健康。随着光伏产业高质量发展推进，组件回收已从选择性议题转变为必答题，构建高效回收体系成为保障产业全生命周期绿色属性的关键环节。

1.2 主流回收技术应用与局限

当前光伏组件回收形成了物理法、化学法和热解法三大技术路线。物理法以破碎和分选为主，操作简单、成本较低且环境友好，但存在材料纯度不足、金属回收率有限的问题，后续提纯难度较大^[1]。热解法通过高温分解胶膜，能实现硅和贵金属的高效回收，但面临能耗高、有害气体处理难的挑战，环保要求与投资门槛较高。化学法可精准提取高纯材料，回收效率突出，但工艺复杂、周期较长，且产生的大量酸碱废液处理成

本高昂，规模化应用受限。多数企业选择多技术组合模式开展回收，但不同技术的适配性与协同效率仍需优化，核心难题集中在 EVA 胶膜的高效分离，其交联固化特性导致传统方法难以彻底剥离。

1.3 经济性与循环体系突出问题

回收经济性不足是制约产业发展的核心瓶颈。部分回收企业处理单块组件的成本高于回收材料的价值，需依赖政策补贴维持运营。回收产能布局不均衡，优质企业多集中在东部地区，跨区域运输增加了回收成本，进一步压缩利润空间。循环利用体系存在明显短板，全国性回收网络尚未形成，回收模式单一，多依赖流量平台对接货源，信息匹配效率低。产业链各主体责任划分不清，缺乏有效的协同机制，有资质企业面临货源短缺、产能闲置的困境，而无资质小作坊的非法处置则造成资源浪费与二次污染。此外，相关标准规范仍不完善，部分退役组件未按固废进行合规处置，市场秩序亟待规范。

2 光伏组件回收技术经济性优化路径

2.1 技术组合创新与效率提升

技术组合创新是突破单一技术瓶颈、提升回收经济性的核心抓手。不同回收技术在成本、效率、环保性上各有优劣，单一技术难以兼顾资源高值化与成本可控化的双重目标^[2]。物理法虽操作简便、成本较低，但对 EVA 胶膜与玻璃、硅片的分离效果有限，难以提取高纯度材料；热解法能高效分解胶膜，但高温能耗与尾气处理成本较高；化学法可实现贵金属精准提取，却面临试剂消耗大、废液处理难的问题。基于此，技术组合创新需遵循“分环节适配、优势互补”原则，针对组件拆解的不同阶段选用最优技术。例如在预处理环节采用物理拆解技术，快速分离铝边框、接线盒等易回收部件，直接实现资源回用；在核心分离环节采用“低温热解+温和化学浸出”组合工艺，以低温热解分解大部分 EVA 胶膜，降低后续化学试剂的用量，再通过温和浸出提取硅片与银电极，既减少能耗与环保成本，又提升材料回收纯度。同时，针对 EVA 胶膜分离这一

行业共性难题，可引入超声辅助、高压水射流等强化技术，辅助传统工艺提升分离效率，缩短处理周期，降低单位组件的处理成本。通过技术组合创新，能够有效平衡回收效率与经济成本，推动回收技术从实验室走向产业化应用。

2.2 成本控制与收益优化策略

成本控制与收益优化是提升光伏组件回收经济性的关键路径，需贯穿回收全产业链的各个环节。在成本控制层面，首要任务是降低回收物流成本，当前退役组件分布分散，跨区域运输成本占比过高，压缩了企业利润空间。可通过建立区域性回收集散中心，整合周边光伏电站、分布式光伏项目的退役组件，形成规模化回收效应，减少零散运输带来的成本损耗。同时，优化回收设备的工艺流程，提升设备自动化与智能化水平，降低人工操作成本，通过规模化生产摊薄设备折旧与维护成本。在能耗控制上，可采用余热回收技术，将热解环节产生的余热用于预热原料，实现能源循环利用，降低单位产品的能耗支出。在收益优化层面，核心在于拓展回收材料的高值化利用渠道，传统回收模式多将玻璃、铝等材料降级出售，利润空间有限。需推动回收材料的精细化分选与提纯，将回收玻璃提纯至光伏级标准，直接回用至光伏组件生产环节；将回收的硅料、银电极提纯后对接半导体、光伏制造企业，提升材料附加值^[3]。此外，积极探索退役组件的梯次利用模式，对性能衰减程度较轻的组件进行检测、修复与重组，应用于光伏路灯、离网电站等低功率需求场景，实现组件价值的最大化挖掘。通过成本的精细化管理与收益的多元化拓展，能够有效扭转部分回收企业“收不抵支”的困境，推动回收产业走向市场化盈利轨道。

2.3 产业链协同与资源整合

产业链协同与资源整合是破解光伏组件回收产业碎片化困境、提升整体经济性的重要保障。当前光伏组件回收产业链存在主体割裂、责任不清、资源错配等问题，制造商、运营商、回收企业、再生利用企业之间缺乏有效的协同机制，导致有资质的回收企业面临货源短缺、产能闲置的问题，而大量退役组件流入无资质小作坊，造成资源浪费与二次污染。构建协同共生的产业链体系，首先需明确各主体的责任边界，推行生产者责任延伸制度，要求光伏组件制造商承担产品全生命周期的回收责任，在产品阶段采用易拆解的结构设计，预留回收接口，同时建立“押金制”“回收基金”等机制，为回收产业提供稳定的资金支持。其次，强化回收企业与再生利用企业的深度合作，回收企业专注于组件的拆解与初级分选，再生利用企业负责材料的精细化提纯与高值化加工，形成分工明确、优势互补的产业格局^[4]。此外，搭建全国性的光伏组件回收信息平台，整合退役组件的货源信息、回收企业的处置能力、再生材料的市场需求等资源，实现供需信息的精准对接，降低交易成本。同时，发挥龙头企业的引领作用，通过并购重组、战略合作等方式整合上下游资源，打造“制造-使用-回收-再生”的闭

环产业链。通过产业链各主体的协同联动与资源高效整合，能够提升产业整体运行效率，降低交易成本，实现光伏组件回收产业的规模化、规范化发展。

3 光伏组件循环利用长效机制构建

3.1 标准规范与政策保障体系完善

标准规范与政策保障是构建光伏组件循环利用长效机制的基础支撑，能够为产业发展提供清晰的制度指引与稳定的政策环境。当前光伏组件回收领域存在标准缺失、政策碎片化等问题，缺乏统一的组件拆解流程标准、材料回收质量标准、环保排放标准，导致不同企业的回收产品质量参差不齐，市场交易缺乏统一的评价依据。完善标准规范体系，需加快制定覆盖组件全生命周期的标准体系，包括设计阶段的易回收性标准、退役阶段的检测评估标准、回收阶段的拆解工艺标准、再生材料的质量分级标准等，明确各环节的技术要求与操作规范，推动产业标准化发展。同时，健全政策保障体系，出台针对性的财政与税收优惠政策，对回收企业给予设备购置补贴、运营补贴，对再生材料生产企业实施税收减免，降低企业的运营成本。建立回收企业资质认定制度，严格市场准入门槛，取缔无资质的非法回收作坊，规范市场竞争秩序。优化退役组件跨省转移审批流程，简化审批手续，降低流通成本，保障回收渠道的畅通。此外，将光伏组件回收纳入“双碳”目标考核体系，要求光伏电站、制造企业落实回收责任，形成政策倒逼机制。通过完善的标准规范与政策保障，能够为光伏组件循环利用产业营造良好的发展环境，引导产业走向规范化、高质量发展轨道。

3.2 多元化循环利用模式构建

多元化循环利用模式是提升光伏组件资源利用率、拓展产业发展空间的核心路径，能够实现退役组件价值的最大化挖掘^[5]。单一的“拆解-再生”模式难以适应不同类型、不同性能退役组件的回收需求，需构建“梯次利用+材料再生+高值化应用”的多元化循环利用体系。针对性能衰减程度较轻、仍具备使用价值的退役组件，建立科学的分级评估体系，通过专业检测评估组件的功率、衰减率、安全性等指标，对符合要求的组件进行修复、翻新与重组，应用于分布式光伏、光伏建筑一体化、农业光伏等低功率需求场景，延长组件的生命周期，减少原生资源的开采。针对无法梯次利用的组件，采用全材料再生技术，实现玻璃、铝、硅、银等资源的高效提取与回用，其中玻璃可加工为光伏玻璃、建筑玻璃等产品，金属材料可回用于光伏制造、电子行业，EVA胶膜可裂解为化工原料，实现资源的闭环循环。此外，探索退役组件的高值化创新应用，将拆解后的硅片加工为光伏发热板、光伏充电宝等消费级产品，将铝边框加工为建筑装饰材料，拓展回收产品的应用场景。通过多元化循环利用模式的构建，能够有效提升资源的综合利用率，拓宽产业的盈利渠道，推动光伏组件回收产业从单一的资源再生向多

元化价值创造转型。

3.3 产业生态与监督管理强化

产业生态与监督管理强化是保障光伏组件循环利用长效机制稳定运行的关键举措，能够形成政府、企业、社会协同推进的良好格局。构建良性的产业生态，需强化政府、行业协会、企业之间的协同联动，政府发挥宏观调控与政策引导作用，行业协会承担技术交流、标准制定、行业自律等职能，企业作为市场主体，加大技术研发与创新投入，积极履行社会责任。鼓励高校、科研院所与企业开展产学研合作，聚焦回收技术瓶颈问题开展联合攻关，推动先进技术的产业化转化，同时加强专业人才培养，为产业发展提供人才支撑。在监督管理层面，建立退役组件全生命周期溯源系统，利用物联网、区块链等技术，记录组件从生产、销售、使用到退役、回收、再生的全过程信息，实现组件流向的可追溯、可监管，杜绝非法处置行为。加强环保执法力度，对违规排放、非法拆解的企业依法予以处罚，倒逼企业落实环保责任。此外，强化社会宣传引导，通过媒体、

行业展会等渠道普及光伏组件回收的重要性，提升公众与企业的环保意识，鼓励社会资本参与回收产业，形成全社会共同参与的良好氛围。通过产业生态的优化与监督管理的强化，能够保障光伏组件循环利用产业的健康可持续发展，为能源转型与“双碳”目标实现提供坚实支撑。

4 结语

光伏组件回收与循环利用是保障新能源产业可持续发展的重要支撑，既是破解环境风险的必然要求，也是挖掘“城市矿产”价值的战略选择。当前回收技术已具备一定基础，产业发展潜力巨大，但仍面临经济性不足、体系不完善等挑战。未来需以技术创新为核心，持续优化技术组合方案，提升回收效率与资源价值；以产业链协同为纽带，构建全国性回收网络，完善利益共享机制；以标准政策为保障，规范市场秩序，营造良好发展环境。通过多维度发力，推动光伏组件回收产业从政策驱动向市场驱动转型，实现环境效益、经济效益与社会效益的统一，为能源转型与“双碳”目标实现提供坚实保障。

参考文献：

- [1] 曾庆,尚闽,坤欣,等.废弃光伏组件回收利用技术发展趋势分析[J].中国资源综合利用,2025,43(10):156-159.
- [2] 胡子豪.光伏组件回收处理标准化路径研究[J].中国标准化,2025,(20):108-112.
- [3] 杨若婷,张嘉宸,牛力同,等.退役光伏组件回收技术进展及环境影响分析[J].动力工程学报,2025,45(10):1586-1599.
- [4] 秦文明,陈震.废旧晶硅光伏组件回收再利用技术研究[J].中国新技术新产品,2025,(15):115-117.
- [5] 赵文婧,张雅鑫,周皓然,等.废旧光伏组件回收利用技术现状[J].再生资源与循环经济,2025,18(04):33-37.