

废旧晶硅光伏组件回收再利用技术研究

孙旭, 杜福临

国核电站运行服务技术有限公司, 上海 200233

DOI: 10.61369/SSSD.2025110043

摘 要 : 伴随“双碳”战略实施,我国光伏产业蓬勃发展,装机量呈现出指数级增长趋势,凭借制造成本低、运行效率高的优势,光伏组件赢得市场青睐。在光伏产品更新换代的过程中,大量废旧晶硅光伏组件走向退役,如何科学地运用回收再利用技术,提高废旧晶硅光伏材料的循环利用效率,实现资源高效配置与绿色消费升级,成为我国发展循环经济实现双碳目标的重要问题。本文立足双碳背景,简述废旧晶硅光伏组件回收的必要性与紧迫性,分析废旧晶硅光伏组件的构成与回收路线,探究物理回收、化学回收与全过程资源利用等技术方法,展望未来发展趋势,为废旧晶硅光伏组件回收产业的可持续发展参考。

关 键 词 : 废旧光伏组件; 晶硅电池; 回收再利用技术

Study on Recycling and Reutilization Technology of Waste Silicon Photovoltaic Modules

Sun Xu, Du Fulin

State Nuclear Power Plant Operation Service Technology Co., Ltd., Shanghai 200233

Abstract : With the implementation of the "dual carbon" strategy, China's photovoltaic industry has developed vigorously, and the installed capacity has shown an exponential growth trend. Relying on the advantages of low manufacturing cost and high operating efficiency, photovoltaic modules have won market favor. In the process of upgrading photovoltaic products, a large number of waste silicon photovoltaic modules are decommissioned. How to scientifically use recycling and reutilization technologies to improve the recycling efficiency of waste silicon photovoltaic materials, realize efficient resource allocation and green consumption upgrading, has become an important issue for China to develop a circular economy and achieve the dual carbon goals. Based on the dual carbon background, this paper briefly describes the necessity and urgency of recycling waste silicon photovoltaic modules, analyzes the composition and recycling routes of waste silicon photovoltaic modules, explores technical methods such as physical recycling, chemical recycling and whole-process resource utilization, looks forward to the future development trend, and provides a reference for the sustainable development of the waste silicon photovoltaic module recycling industry.

Keywords : waste photovoltaic modules; silicon solar cells; recycling and reutilization technology

引言

根据《2030年前碳达峰行动方案》《关于促进退役风电、光伏设备循环利用的指导意见》,要加快构建废弃物循环利用体系,促进退役风电、光伏设备循环利用,积极构建覆盖绿色设计、规范回收、高值利用、无害处置等环节的风电和光伏设备循环利用体系,补齐风电、光伏产业链绿色低碳循环发展最后一环,助力实现碳达峰碳中和^[1]。在深入推进“双碳”战略的进程中,作为极具潜力的可再生能源,光伏近年来实现了快速发展,新能源设备报废规模激增的现象随之出现。根据过去三十年来全球光伏装机的容量情况,2030年预计常规退役光伏组件的容量达1.5吉瓦^[2]。废旧的晶硅光伏组件中不仅有大量可循环利用资源,还有一些材料属于有害物质,长期存放会给土壤、水和空气环境带来污染^{[3][4]}。由此,加强对废旧晶硅光伏组件的回收再利用技术的研究,实现废旧部件资源的再开发和再利用,推动光伏产业绿色化、低碳化发展势在必行。

一、废旧晶硅光伏组件的构成与回收路线

(一) 组件构成

在光伏产业领域,晶体硅光伏组件应用广泛,主要包含单晶

硅和多晶硅光伏组件。按照从上到下的顺序,单晶硅光伏组件由玻璃、EVA、晶硅太阳能电池、EVA及背板等部分构成^[5]。

(二) 回收路线

根据电池硅片的完整程度,晶硅光伏组件的回收分两种路

线，分别为综合回收与电池无损回收^[6]。对于完整度低的电池硅片，采用成分综合回收路线，综合评估组件中可回收材料和资源的价值，分类拆解后进行回收，尽可能地提高回收效益；对于完整度高的电池硅片，采用热、化学或机械处理方式，然后经过清洗工艺得到高纯度的电池硅片，在经过性能指标校验后，达标的硅片可以运用于制造再生电池^[7]。

二、废旧晶硅光伏组件的回收技术方案

（一）物理回收技术

在回收处理废旧光伏组件的外层材料时，物理回收处理技术具有环保性强和处理效率高的特点，能够最大限度地保证材料的二次利用价值^[8]。在切割废旧晶硅光伏组件的环节，要合理地把控金刚石线锯的切割速度与力度，既要避免内部结构破损，又要有效地分离外层材料，保障回收材料的品质。经过切割处理后产出规格程度适中的碎片，为后续可持续利用创造条件，降低了后续工序处理成本。废旧光伏组件的初步分离需要使用锤式粉碎机，主要是利用高速旋转锤头的撞击力，冲击外层物料，使外层材料实现初步分离和破碎^[9]。为了确保材料达到预期破碎效果和回收利用价值，需要综合考虑材料的韧性、硬度等特质，设计适配性的锤式粉碎机。外层材料回收利用通常涉及复杂流程，经过初步分离的材料需要运输到其他产业区进行加工。为提高储存和运输的便捷性，要选用多种规格和口径的粉碎机，产出不同大小颗粒的材料^[10]。对于需要经过精细分离的材料，选用小口径的粉碎机；对于直接回收利用大块材料的需求，则直接使用大口径的粉碎机处理。在外层材料的处理过程中，物理回收技术能够有效地将外层材料与内部结构剥离，便于后续再处理和利用电池片、密封材料等。

（二）热解分离技术

在回收利用外部材料的基础上，热解分离技术适用于密封材料的处理^[11]。作为废旧光伏组件的关键密封材料，EVA胶膜作为关键密封材料，也具有一定利用价值，但一旦出现操作失误就会给环境带来危害。所以，要处理好热解分离技术流程，通过构建无氧高温环境，为EVA胶膜打造绿色转化通道，使其快速分解，避免生成过多有害物质^[12]。第一步是预处理，去除组件外层材料后将其切割成小块，大幅提升后续热解效率；第二步是高温无氧反应，将小块组件送入480℃高温炉，同时通入氮气构建无氧环境，促使EVA胶膜发生可控裂解，生成气体、油类、固体残渣三类产物；第三步是产物精准利用，针对不同产物特性定制处理方案——废气经乙酸净化后可达标排放，杜绝大气污染；油类产物可作为工业燃料或化工原料，实现能源再生；固体残渣则能变身建材原料或土壤改良剂，完成“废料增值”。这套氮气热解技术，不仅破解了EVA胶膜的污染难题，更实现了“污染治理+资源循环”的协同发展，为废旧光伏组件的环保处理提供了全新思路。

（三）化学回收技术

在分离废旧光伏的外层材料与热解密封材料后，会得到含三种化学元素（硅、铝、银）的电池片，这些资源也具有极大再利

用价值。基于经过热解产物的特性，创新运用化学回收技术进行处理，建立起高效提纯和循环利用的技术体系^[13]。在选择刻蚀剂时，不是直接选用单一试剂，而是设计HF与浓硝酸（HNO₃）两种试剂混合配比方案。HF作为氟化物的一种，其对硅片表面氧化物的去除能力尤为突出，能够为后续的金属浸出提供清洁的硅片表面。浓硝酸则是一种强氧化剂，可显著提升铝、银等金属的溶解速率，让整体反应效率实现质的飞跃。在化学预处理阶段，选用一款经过特别配置的HNO₃+HF无机混合酸溶液，将其加入到热解产物中，在混合酸溶液与电池片充分接触后，化学反应速度更快，有效地清理物理破碎物。增加了这一化学预处理改进步骤后，废旧晶硅光伏电池片的回收处理效率大幅提升，且最终获得的质量高，均匀程度表现良好。在化学反应后，采用固液分离技术，分离少量硅固体与酸溶液，提高酸溶液的纯净度，为后续蒸馏和纯化等工序提供保障。该步骤不仅有效降低了处理成本，还能避免宝贵材料资源被浪费。最后得到的固体硅片，按照抛光、清洗的工艺流程加以处理，实践发现最终材料品质达到了再生硅材料的应用标准，为资源的循环利用开辟了新路径^[14]。化学回收技术在废旧晶硅光伏电池片中的运用，既能够做到更完整地回收材料结构，又减少了处理工艺流程对环境的污染。

（四）废弃光伏组件的全过程资源利用技术

1. 技术定义与核心逻辑

全过程资源利用技术突破“拆解-回收”的单一环节局限，覆盖组件从“退役回收-拆解分离-材料再生-废物处置”的全生命周期，强调“无废化”与“全组分利用”，既包括主流材料（玻璃、硅、金属）的回收，也涵盖低价值组分（EVA残渣、背板碎片、接线盒塑料）的资源化，避免“二次浪费”^[15]。

2. 关键技术环节

（1）退役组件预处理优化

除常规分类筛选与表面清洁外，新增“组件健康度检测”环节，通过红外成像技术检测硅片隐裂、EVA老化程度，结合电阻测试判断电路完整性，精准划分“可修复复用”“高值化回收”“全组分拆解”三类处理路径，避免过度拆解导致的资源浪费。

（2）全组分分离与利用

对于无法通过热分层或热解回收的EVA残渣，通过熔融造粒技术制成塑料填充料，用于建筑管材、包装材料等，替代原生塑料^[16]。

含氟背板通过“脱氟-热解”工艺，先去除氟元素（转化为氟化钠，用于玻璃制造），剩余基材热解为小分子有机物，作为燃料或化工原料；非氟背板直接破碎后用于塑料再生。

通过低温粉碎与分选，去除金属触点后，塑料颗粒用于注塑新接线盒或其他工业塑料制品，实现闭环复用。

组件中含有的铅、镉等重金属，通过吸附材料（如活性炭、蒙脱石）固定后，作为无害填料用于建筑砂浆，避免直接排放造成的环境风险。

（3）再生材料闭环应用

构建“回收-再生-再制造”产业链：回收的玻璃用于新组件盖板，再生硅用于电池生产，金属用于组件结构件，低价值组分用

于关联产业，形成光伏产业内部与跨产业的资源循环，例如 EVA 再生料用于光伏电缆绝缘层，背板再生料用于组件包装盒^[17]。

三、未来发展趋势

（一）技术趋势

“零碳回收”将成为核心方向，未来将研发“太阳能驱动的回收系统”，通过光伏电站自身产生的电能为拆解、分离设备供电，结合碳捕捉技术处理热解过程中产生的二氧化碳，实现回收全流程的“零碳排放”。

（二）产业趋势

“光伏－回收－新材料”产业集群，将形成以光伏组件回收为核心，涵盖再生硅材料、金属材料、化工原料生产的产业集群，例如我国安徽正在规划建设“光伏回收产业园区”，整合回收企业、新材料企业、科研机构，实现资源共享与技术协同，预计2025年园区年产值将突破100亿元^[18]。

四、结论与建议

（一）结论

当前废旧晶硅光伏组件回收已从“单一技术应用”迈向“多

技术融合、全产业链创新”阶段。物理回收的技术复合化、化学回收的绿色高效化、生物回收的菌群协同化，以及数字技术、AI技术的跨界赋能，正在重塑回收产业格局。同时，“回收产品高值化”与“零碳回收”目标的提出，使回收产业从“环保产业”升级为“绿色制造的重要环节”，为光伏产业的可持续发展提供了关键支撑。

（二）建议

1. 在技术研发层面设立“光伏回收技术创新专项”，重点支持激光清洗、生物酶催化、数字孪生等前沿技术的研发与中试，推动实验室技术向工业化转化。

2. 在产业培育层面鼓励建设“光伏回收产业园区”，通过税收优惠、土地支持等政策，吸引上下游企业集聚，形成“回收－再生－再制造”的产业闭环。

3. 在国际合作层面参与制定全球光伏回收标准，加强与欧盟、美国等地区的技术交流与产业合作，推动我国回收技术与设备的国际化输出。

参考文献

- [1] 胡静怡，杨绍鹏. 加快建立风电和光伏机组回收利用体系促进退役设备高效循环利用[J]. 中国经贸导刊，2024，(01):27-29.
- [2] 王洁. 基于欧盟 WEEE 指令的光伏组件回收研究[J]. 中国设备工程，2024，(14):129-131.
- [3] 国家发展改革委等部门关于促进退役风电、光伏设备循环利用的指导意见[J]. 再生资源与循环经济，2023，16(09):1-2.
- [4] 工业和信息化部办公厅发布（2024年9月20日）《工业重点行业领域设备更新和技术改造指南》（续完）[J]. 生态产业科学与磷氟工程，2024，39(12):7-14.
- [5] 马俊杰. 光伏板回收过程中资源优化利用研究[J]. 清洗世界，2024，40(11):44-46.
- [6] 丁湧，李文建，陈昭宇，等. 废旧晶体硅光伏组件 EVA 有氧热解动力学与产物特性[J]. 化工学报，2024，75(09):3310-3319.
- [7] 郭飞宏，许贵军，徐文胜，等. 废旧光伏组件回收路径及技术研究[J]. 材料导报，2024，38(S1):28-34.
- [8] 何乾，范斌，宋剑飞，等. 晶硅太阳能电池制备过程中硅渣和金刚石线切割硅废料的回收利用研究进展[J]. 中南大学学报（自然科学版），2024，55(07):2456-2467.
- [9] 王魁，李金惠，刘丽丽. 退役晶硅光伏组件中材料物质回收技术现状分析与建议[J]. 中南大学学报（自然科学版），2024，55(06):2117-2128.
- [10] 张晟邈，张承龙，王瑞雪，等. 退役晶硅光伏组件接线盒和边框自动化拆解设备设计[J]. 有色金属（冶炼部分），2024，(01):98-105.
- [11] 谭宁，韩士锋，魏奎先，等. 磨矿方式对回收工业硅精炼渣中单质硅的影响[J]. 稀有金属，2023，47(12):1737-1746.
- [12] 董穆，姚雪容，张江茹，等. 太阳能电池封装胶膜技术研究进展[J]. 石油化工，2023，52(07):992-999.
- [13] 李炜垚，焦芬，陈琛，等. 全因子实验设计废弃光伏组件中铝和银的浸出[J]. 中国有色金属学报，2023，33(03):898-911.
- [14] 孔慧玲，顾卫华，彭圣娟，等. 废旧光伏组件回收及高值化利用研究进展[J]. 有色金属（冶炼部分），2023，(09):22-29.
- [15] 孙泽洋. 废旧晶体硅光伏组件回收方式浅析[J]. 太阳能，2021，(09):9-12.
- [16] 李淳伟，胡露，樊阳波，等. 光伏组件回收利用现状研究及标准探讨[J]. 中国标准化，2020，(S1):163-168.
- [17] 陈小卉，段啸天，周星誉，等. 废旧晶硅光伏电池组件的处理及回收[J]. 能源与环境，2020，(02):101-102.
- [18] 朱煌武，徐宏耀，吴邦勇. 安徽打造具有全球影响力的先进光伏产业集群的优势、问题与对策[J]. 今日科苑，2024，(01):34-43+93.