

退役光伏组件资源化利用关键技术及发展趋势研究综述

王艳妮, 王民杰, 胡永权, 陈延军, 祁忠琴

甘肃省建材科研设计院有限责任公司, 甘肃省绿色建筑技术重点实验室, 甘肃 兰州 730020

DOI: 10.61369/SSSD.2026060048

摘 要 : 退役光伏组件资源化利用是解决光伏产业可持续发展的重要途径。本文综合国内外文献, 系统分析了预处理、物理回收和化学回收三大关键技术的特点和未来技术发展的主要方向, 并提出相关建议, 以期为促进退役光伏产业健康发展提供思路。

关 键 词 : 退役光伏组件; 资源化利用

Review of Key Technologies and Development Trends for Resource Utilization of Discarded Photovoltaic Modules

Wang Yanni, Wang Minjie, Hu Yongquan, Chen Yanjun, Qi Zhongqin

Gansu Building Materials Design & Research Institute Co.Ltd, Lanzhou, Gansu 730020

Abstract : The resource utilization of retired photovoltaic modules is a crucial approach to achieving sustainable development in the photovoltaic industry. This paper systematically analyzes the characteristics and future technological directions of three key technologies—pretreatment, physical recycling, and chemical recycling—by synthesizing domestic and international literature. It also proposes relevant recommendations to provide insights for promoting the healthy development of the retired photovoltaic industry.

Keywords : discarded photovoltaic modules; resource utilization

引言

随着全球光伏装机规模持续扩大, 首批大规模安装的光伏组件将进入了退役高峰。退役组件若处置不当, 将造成资源浪费和环境风险。目前, 退役光伏组件资源化利用技术已成为研究热点。王敏等^[1]对退役组件解离技术进行了深入研究, 提出了新型热处理工艺。郭飞宏等^[2]系统分析了废旧组件回收路径, 为产业发展提供了技术支撑。Wang 等^[3]对晶硅光伏组件回收利用技术进行了系统评述, 指出智能化处理是未来发展方向。Khalifa 等^[4]通过动态物料流分析, 强调建立完整的循环经济体系的重要性。然而, 目前退役光伏组件资源化利用仍面临技术效率低、成本高、环境风险等问题。Curtis 等^[5]研究表明, 回收技术的经济性是制约产业发展的关键因素。因此, 系统研究退役光伏组件资源化利用关键技术, 探索高效低成本的处理方法, 对推动光伏产业可持续发展具有重要意义。本文将重点分析退役光伏组件资源化利用的技术路径, 系统总结处理关键技术, 并对未来发展趋势进行展望。

一、退役光伏组件资源化利用路径分析

退役光伏组件主要由铝边框、接线盒、光伏玻璃、EVA 胶膜、电池片和背板构成。其中玻璃占比最大 (65–75%), 铝边框约占 10–15%, 电池片含硅和银等高值材料。资源化利用路径包括

组件拆解、材料分离和资源回收三大环节。首先拆除铝边框和接线盒, 其次通过热解或机械方式分离压层结构, 最后对电池片进行深度处理提取银、硅等材料。

首先, 在铝边框及接线盒拆除阶段, 需要将光伏组件最外层的铝合金框架和接线盒进行拆解。这些部件具有较高的回收价

值，其中铝边框可直接进行金属回收利用，接线盒中的铜线等导电材料也可以实现资源再利用，回收价值约占组件回收总价值的20-25%^[6]。

其次，压层件解离是整个回收过程中最为关键的步骤。压层件主要由玻璃、EVA 胶膜、电池片和背板等多层材料复合而成。通过热处理、机械剥离等工艺，可以将这些材料逐层分离。其中，光伏玻璃约占组件总重量的65-75%，是回收利用的主要目标物质之一；电池片含有大量的硅材料和金属电极，具有较高的再生价值；背板则可作为工程塑料回收利用^[7]。

最后，在组分回收阶段，将分离出的电池片进行深度处理，可提取银和硅两种主要物质。其中，银的回收具有重要的经济价值，每块标准组件中约含有5-6克银，回收价值显著。硅料的回收则需要进行纯化处理，可作为再生硅料重新用于太阳能电池片的生产。

二、退役光伏组件资源化利用关键技术

（一）预处理技术

预处理包括完整性检测、铝边框拆解、接线盒剥离和表面清洗。完整性检测主要采用 EL（电致发光）检测、红外热成像等无损检测技术，对组件的破损情况、热斑分布等进行全面评估。

表 1 退役光伏组件预处理阶段损伤类型及处理方案

损伤类型	占比（%）	预处理方案	处理效率（片 / 小时）
裂纹损伤	40	机械剥离法	120-150
表面划痕	25	超声波清洗	100-120
层压分离	20	加热软化法	80-100
完好组件	15	标准拆解	150-180

铝边框拆解常用机械剥离法和加热软化法（180-200℃）。超声波清洗技术用于表面处理，清洗效率达99%。智能化控制系统可提升预处理效率20-30%，为后续工序提供高质量原料。

（二）物理回收技术

物理回收是实现压层结构分离的核心环节，主要包括热处理解层、机械分离、气流分选和振动筛分。热处理在450-500℃下使 EVA 胶膜分解，实现玻璃与电池片的初步分离，玻璃完整率可达95% 以上^[8]。机械破碎将物料粒度控制在2-5mm，分离效率85-90%。气流分选利用密度差异分离玻璃、硅料和背板，玻璃纯度可达93-96%^[9]。综合应用上述技术，年处理5000吨的生产线可回收玻璃3250-3500吨、硅料400-450吨、背板150-180吨。

表 2 退役光伏组件物理回收技术参数及效率分析

物理回收方法	处理温度（℃）	分离效率（%）	材料纯度（%）	能耗（kWh/t）
热处理解层	450-500	92-95	95-98	180-200
机械分离	常温	85-90	88-92	120-150
气流分选	常温	88-93	93-96	80-100
振动筛分	常温	90-95	94-97	60-80

（三）化学回收技术

化学回收技术主要针对电池片及其残余物进行化学提取和纯化，包括酸溶解、化学刻蚀、选择性沉淀和电解提纯等方法。硝酸溶解在40℃、8M 条件下处理2-3小时，银回收率达95-98%^[10]；电解提纯在2.5V、35℃条件下可将银纯度提升至99.99% 以上。

表 3 退役光伏组件化学回收工艺参数及效果分析

化学处理方法	工艺条件	回收率（%）	产品纯度（%）	处理时间（h）
硝酸溶解	40℃ ,8M	95-98	98-99	2-3
王水处理	60℃ ,3:1	97-99	99.5-99.9	1-2
氢氟酸刻蚀	25℃ ,4M	92-95	95-98	3-4
电解提纯	2.5V ,35℃	98-99	99.9-99.99	4-5

（四）高值化利用技术

高值化利用是对回收材料进行深加工，提升其经济价值。玻璃经熔融重构（1200℃）后透光率达91% 以上，可用于新型组件^[11]；硅料通过定向凝固提纯至6N 级，满足太阳能电池要求；银和铜经电解精炼后纯度达99.99% 和99.95%，可用于电子浆料和高端导线。以年处理10万片组件为例，深加工后玻璃附加值提升150-200%，硅料价值提升300-350%，金属材料增值180-220%。

表 4 退役光伏组件回收材料高值化利用途径分析

回收材料	提纯工艺	产品等级	应用领域	附加值（元 /kg）
光伏玻璃	熔融重构	一级品	新型组件	15-20
多晶硅	定向凝固	太阳能级	电池片	180-200
银材料	电解精炼	4N	电子工业	3500-4000
铜材料	火法精炼	1# 级	导线制造	45-55

三、发展趋势与展望

（一）技术发展趋势

退役光伏组件资源化利用技术正朝着智能化、绿色化和高值化方向快速发展。其中，智能化处理技术通过5G、物联网和人工智能等技术的深度融合，实现全流程自动化控制，生产效率提高50%；低碳技术包括常温解层、物理分离和绿色提取等新技术；高值化技术通过定向重构提升材料品质，全组分利用技术将整体回收率提升至98% 以上，残余物填埋量减少90%。

（二）政策建议

针对退役光伏组件资源化利用产业发展现状和技术发展趋势，主要提出一下建议：（1）完善法律法规体系，建立健全退役光伏组件回收处理的强制性要求。制定专项管理条例，明确生产者责任延伸制度，规范回收处理流程。建立组件全生命周期追溯制度，实现来源可查、去向可循。（2）加大财税政策支持力度，设立专项资金扶持退役组件处理企业发展。对规范化处理企业给予税收优惠，支持企业技术改造和设备升级。建立回收处理基金，用于补贴回收网络建设和处理设施建设。（3）强化技术创新支持，设立重点研发专项。支持企业、高校和科研院所联合攻

关,突破智能化处理、清洁回收、高值利用等关键技术。(4)建立健全标准体系,制定完善技术规范和产品标准。加快制定回收处理技术规范、再生产品质量标准、环保要求等标准,为产业发展提供技术支撑。

参考文献

[1] 王敏,胡中发,白冰,陈佩,王贵山,张乾生,薛渊,张一,王学斌. 退役晶硅光伏组件解离与资源化研究进展 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(10): 4188-4202

[2] 郭飞宏, 许贵军, 徐文胜, 李晨阳, 姜小祥, 张后虎. 废旧光伏组件回收路径及技术研究 [J]. 材料导报, 2024, 38(S01): 20-26

[3] Wang J, Feng Y, He Y. The research progress on recycling and resource utilization of waste crystalline silicon photovoltaic modules[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2024, 270: 112804.

[4] Khalifa S A, Mastrorocco B V, Au D D, et al. Dynamic material flow analysis of silicon photovoltaic modules to support a circular economy transition[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2022, 30(7): 784-805.

[5] Curtis T L, Buchanan H, Smith L, et al. A circular economy for solar photovoltaic system materials: Drivers, barriers, enablers, and US policy considerations[R]. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2021.

[6] 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(6): 2117-2128

[7] 伍宏亮, 李少航, 刘欢, 杨夯, 刁红丽. 光伏产业典型污泥处置与资源化利用技术研究进展 [J]. 应用化工, 2023, 52(6): 1855-1859

[8] Tian X, Roose B, Stranks S D, et al. Periodic module rejuvenation provides early market entry for circular all-perovskite tandem photovoltaic technologies[J]. Energy & Environmental Science, 2023, 16(12): 5551-5567.

[9] 孔慧玲, 顾卫华, 彭圣娟, 白建峰. 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(9): 22-29

[10] 余辉, 陈志聪, 郑巧, 吴丽君, 程树英, 林培杰. 利用多层感知机和 I - V 特性的光伏组件建模方法 [J]. 福州大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 336-342

[11] Zhao G. Challenges and opportunities for recycling waste photovoltaic modules[J]. Civil Engineering and Energy-Environment Vol 1, 2023: 508-516.