

碳中和目标下废旧光伏板资源化处理技术路径研究

林子绚

香港都会大学

DOI:10.12238/eep.v8i3.2569

[摘要] 随着全球光伏产业规模的快速扩张,废旧光伏板的处置问题日益严峻,成为实现碳中和目标的潜在阻碍。本文基于循环经济与低碳发展理论,系统剖析废旧光伏板资源化处理的技术瓶颈与环境挑战。通过梳理物理处理、化学处理、材料再生等传统技术路径,结合人工智能、纳米技术等前沿手段,提出“分级拆解—元素分离—高值化利用”的全链条处理方案,旨在突破废旧光伏板资源化处理的技术壁垒,降低处理过程碳排放,推动光伏产业向绿色低碳方向转型,为实现碳中和目标提供技术支撑与实践路径。

[关键词] 碳中和目标; 废旧光伏板; 资源化处理技术

中图分类号: P964 文献标识码: A

Research on the technical path of recycling waste photovoltaic panels under the goal of carbon neutrality

Zixuan Lin

Hong Kong Metropolitan University

[Abstract] With the rapid expansion of the global photovoltaic industry, the disposal of waste photovoltaic panels has become increasingly severe, posing a potential obstacle to achieving carbon neutrality. This paper systematically analyzes the technical bottlenecks and environmental challenges in the resource recovery of waste photovoltaic panels based on the theories of circular economy and low-carbon development. By reviewing traditional technological approaches such as physical processing, chemical processing, and material regeneration, and integrating advanced methods like artificial intelligence and nanotechnology, it proposes a comprehensive chain solution of "graded disassembly—element separation—high-value utilization." The aim is to break through the technical barriers in the resource recovery of waste photovoltaic panels, reduce carbon emissions during the processing, promote the transition of the photovoltaic industry towards green and low-carbon directions, and provide technological support and practical pathways for achieving carbon neutrality.

[Key words] carbon neutral target; waste photovoltaic panels; resource treatment technology

在“双碳”目标引领下,光伏能源作为清洁能源的主力军,正迎来前所未有的发展机遇。然而,随着光伏装机容量的持续攀升,大量光伏板面临退役,预计到2030年全球废旧光伏板累计量将突破1000万吨。若处理不当,这些废旧光伏板不仅会造成资源浪费,还可能因重金属泄漏引发环境污染,其处理过程产生的碳排放更与碳中和目标背道而驰。目前,传统的填埋、焚烧等处置方式已难以满足低碳发展需求,而资源化处理技术尚存在能耗高、效率低、产品附加值不足等问题。如何通过技术创新实现废旧光伏板的高效资源化利用,成为光伏产业可持续发展亟待解决的关键问题。

1 废旧光伏板资源化处理的现状与挑战

1.1 光伏产业发展与退役潮的来临

在全球能源结构加速向可再生能源转型的背景下,光伏产

业凭借其清洁、可持续的特性,成为能源革命的核心力量。政策层面,各国相继出台补贴、上网电价优惠等激励措施,推动光伏装机容量持续攀升;技术层面,PERC、HJT等高效电池技术迭代,使光伏发电成本十年间下降超80%,进一步加速产业扩张。近十年,全球光伏累计装机容量从不足50GW激增至2023年的约1.2TW,年均增长率达25%以上,中国、欧盟、美国等经济体贡献了全球超70%的新增装机量。然而,光伏板25—30年的设计使用寿命,使得早期大规模安装的设备即将集中退役。国际可再生能源署(IRENA)预测,到2030年全球废旧光伏板年产生量将突破1000万吨,2050年累计量达7800万吨。这一规模远超当前电子废弃物处理体量,且呈指数级增长趋势。现有回收体系多依赖零散回收点与粗放处理方式,难以应对大规模退役需求。若处理技术与产业体系未能及时升级,大量废旧光伏板将成为新的“环境包袱”,

不仅造成硅、银等战略资源浪费，更可能引发重金属污染等生态危机，严重阻碍碳中和目标的实现。

1.2 传统处理方式的局限性

当前废旧光伏板处理仍以填埋、焚烧等传统方式为主，其技术路径与碳中和目标存在根本性矛盾。填埋处理虽操作简便，但仅将光伏板视为普通固体废弃物，未能回收玻璃、硅片等高价值材料，导致石英砂、金属矿产等原生资源的隐性浪费。更严峻的是，光伏板含有的铅、镉等重金属在土壤中难以降解，易通过雨水渗透进入水体，威胁生态系统安全与人类健康。焚烧处理虽能实现部分能量回收，但其高温过程不仅消耗大量化石能源，更产生二噁英等剧毒污染物，且玻璃、金属等材料在高温下熔融混杂，进一步丧失回收价值。即使部分地区采用物理破碎、酸碱溶解等资源化手段，也存在显著缺陷：物理破碎易造成材料过度粉碎，导致后续分选困难；酸碱浸出工艺需消耗大量强酸强碱，产生高盐废水，处理成本高昂且易引发二次污染。这些传统方式的单位处理碳排放高达新型资源化技术的3—5倍，与碳中和目标背道而驰，亟需向低碳、高效的新型处理模式转型。

1.3 资源化处理的技术瓶颈

废旧光伏板资源化处理的技术瓶颈源于其复杂的材料体系与严苛的低碳要求。光伏板由玻璃盖板、硅晶片、EVA胶膜、背板等多层材料复合而成，各层间通过热压、粘结等工艺紧密结合，机械拆解易导致材料破损，化学分离则面临反应选择性差、能耗高等难题。尤其在高纯硅提取方面，光伏硅片掺杂的硼、磷等微量元素需精准去除，现有冶金级提纯技术难以满足半导体级应用要求，导致回收硅多局限于低端建材领域。金属元素提取同样面临挑战，银、铜等金属以微米级颗粒分散于胶膜与硅片界面，传统浸出工艺效率低且易引入杂质。处理过程产生的废气（如胶膜热解产生的挥发性有机物）、废水（含重金属与酸碱残留）若未经妥善处理，将造成环境污染。

2 碳中和目标下资源化处理的理论基础

2.1 循环经济理论的指导作用

循环经济理论突破传统线性经济模式，以“减量化、再利用、资源化”为基本原则，构建起“资源—产品—再生资源”的闭环系统。在废旧光伏板处理领域，该理论指导建立全链条循环体系：通过优化回收网络设计，提高光伏板的收集效率，减少初始资源损耗；借助智能拆解与绿色分离技术，实现玻璃、硅晶片、金属等组件的高效分离与再利用；将回收材料重新投入生产环节，形成“原料—产品—废弃物—再生原料”的循环路径。这种模式不仅降低了对石英砂、金属矿石等原生资源的依赖，还通过减少开采、冶炼环节的能耗，间接降低碳排放。循环经济理论要求从系统层面统筹资源流动与能源消耗，在光伏板处理中需平衡各环节的碳投入与碳产出。同时，通过产业协同与生态链接，推动光伏板处理与上下游产业的资源共享，如将处理过程中产生的余热用于周边企业供热，实现能源梯级利用，使整个处理过程符合碳中和目标的系统性要求。

2.2 低碳技术的支撑作用

低碳技术作为实现碳中和目标的核心引擎，在废旧光伏板资源化处理中发挥着关键支撑作用。从能源替代角度，采用太阳能、风能等清洁能源替代传统化石能源驱动处理设备，可直接削减处理过程的碳排放；在工艺优化方面，通过研发高效节能的智能拆解设备、低温低压的绿色分离装置，降低单位处理能耗。碳捕集利用与封存(CCUS)技术的引入，能够对处理过程中产生的二氧化碳进行捕获、转化或封存，进一步实现碳减排。数字化技术与低碳技术的深度融合，为处理过程的低碳化提供了新路径。物联网传感器与大数据分析技术可实时监测设备能耗、碳排放等数据，通过智能算法优化运行参数，实现精准控制；人工智能与机器学习算法能够预测处理过程中的能耗峰值，提前调整能源分配策略。此外，区块链技术的应用可实现处理过程碳排放数据的不可篡改记录与透明化追溯，增强低碳技术实施的可信度与监管效率，推动资源化处理向智能化、低碳化方向升级^[1]。

2.3 全生命周期碳排放评估体系

全生命周期碳排放评估体系以系统性思维贯穿光伏板从生产、使用到退役处理的全过程，突破传统仅关注处理环节的局限。在废旧光伏板处理阶段，该体系不仅量化拆解、分离、再生等工序产生的直接碳排放，还通过“替代效应”评估回收材料替代原生资源开采所减少的间接碳排放。例如，每回收1吨光伏板硅材料，可减少相当于冶炼同等原生硅所产生的2.3吨二氧化碳排放。科学构建评估模型需综合考虑材料特性、工艺参数、能源结构等多维因素。采用生命周期评价(LCA)方法，结合物质流分析(MFA)技术，建立涵盖能耗、排放、资源利用效率的量化指标体系。通过该体系对不同处理技术进行碳足迹对比，能够识别高碳环节并提出优化方案。例如，发现传统酸碱浸出工艺的碳排放占比高达处理全过程的65%，从而引导研发方向转向绿色分离技术。全生命周期评估为技术选择、政策制定提供数据支撑，确保资源化处理技术在实现经济效益的同时，符合碳中和目标的环境要求。

3 废旧光伏板资源化处理的创新技术路径

3.1 智能分级拆解技术

废旧光伏板的层状复合结构由玻璃盖板、硅晶片、EVA胶膜、背板等多材料体系构成，传统机械破碎方式易造成材料混杂与元素损失，导致后续资源化难度骤增。智能分级拆解技术依托多模态感知与智能决策系统，构建起全流程自动化拆解体系。通过高光谱成像技术捕捉材料表面光谱特征，结合X射线荧光光谱(XRF)对内部元素分布进行三维建模，实现对光伏板组件的精准识别与成分分析。基于深度学习算法，建立材料特性与拆解参数的映射模型，动态生成最优拆解策略，涵盖切割路径规划、加热软化温度调控、剥离力精准控制等关键环节^[2]。

在执行层面，采用力控机械臂与视觉伺服系统协同作业，通过柔性夹具与自适应抓取技术，实现玻璃盖板的无损分离；利用激光剥离技术对EVA胶膜进行非接触式软化处理，避免高温分解产生有害气体；针对硅晶片与背板的分离，开发超声波振动辅助拆解工艺，在微米级尺度下实现材料分离。该技术体系通过智能

感知—决策—执行的闭环控制,将拆解效率提升40%以上,同时使玻璃、硅片等关键材料的完整回收率突破95%,为后续资源化利用提供优质原料基础,显著降低传统拆解过程中的高能耗与二次污染问题。

3.2 绿色元素分离技术

传统酸碱浸出工艺在光伏板金属元素提取过程中,存在药剂消耗量大、废水处理难、能耗高等问题,与碳中和目标背道而驰。绿色元素分离技术以仿生化学与纳米限域效应为理论基础,构建环境友好型分离体系。生物浸出技术利用氧化亚铁硫杆菌、嗜酸硫杆菌等微生物的代谢特性,在温和条件下($\text{pH} 1.5\text{--}3.0$,温度 $30\text{--}40^\circ\text{C}$)选择性溶解银、铜等金属,通过微生物表面的特异性吸附位点实现金属离子富集,避免传统酸浸过程中大量酸液消耗与重金属离子泄漏风险^[3]。

纳米膜分离技术则基于分子筛分与界面效应原理,设计具有纳米级精准孔径的复合膜材料。通过调控膜材料的表面电荷、亲疏水性与孔道结构,实现硅晶片与杂质离子的高效分离。例如,采用二维MXene纳米片构建层状膜结构,利用其表面官能团对金属离子的螯合作用,在截留硅颗粒的同时实现金属杂质的定向渗透。该技术将硅纯度提升至99.99%以上,金属回收率提高30%,且整个分离过程无需高温高压条件,能耗降低60%,从源头上减少了分离环节的碳排放与环境污染。

3.3 高值化再生利用技术

废旧光伏板回收材料的传统利用方式多局限于低端制品生产,附加值低且未能充分发挥材料性能优势。高值化再生利用技术以材料基因工程与智能制造为核心,构建从原料到终端产品的全链条价值提升体系。针对回收硅材料,采用区熔提纯与等离子体化学气相沉积(PECVD)联合工艺,去除硼、磷等杂质元素,制备满足半导体级应用的高纯硅锭,可直接用于集成电路芯片或高效异质结光伏电池制造。对于回收金属,通过粉末冶金与3D打印技术,将银、铜等金属制成具有复杂几何结构的光伏组件连接件,利用材料的高导电性与耐腐蚀性提升组件性能^[4]。

在玻璃再生领域,创新采用溶胶—凝胶法对回收玻璃进行表面改性,通过引入纳米二氧化钛、氧化硅等添加剂,赋予玻璃自清洁、高透光等功能特性,用于建筑幕墙与新一代光伏玻璃基板生产。该技术路径将资源利用率提升至85%以上,产品附加值较传统再生材料提高2—3倍,同时每生产1吨再生材料可减少原生资源开采产生的碳排放约1.2吨,实现资源循环增值与碳减排的双重目标,推动光伏产业向“资源—产品—再生资源”的闭环模式转型。

3.4 协同处理与能量回收技术

单一处理废旧光伏板存在能源消耗大、废弃物利用率低等问题,协同处理技术通过构建多废弃物共处置体系,实现资源与能量的梯级利用。基于热力学与物质流分析,设计光伏板与生物质废弃物的联合气化工艺,利用生物质中富含的碳氢元素与光伏板有机组分协同反应,在 $800\text{--}900^\circ\text{C}$ 高温下生成富含氢气、一氧化碳的合成气,可用于发电或作为化工原料。同时,将气化过程产生的高温烟气引入余热锅炉,驱动蒸汽轮机发电,实现热能的二次回收^[5]。

针对光伏板处理过程中的无机废弃物,开发与冶金渣协同制备建筑材料的技术路线。通过高温熔融—急冷工艺,将光伏板玻璃与冶金渣混合制成微晶玻璃,利用两者成分互补特性降低熔融温度 $150\text{--}200^\circ\text{C}$,减少能耗。该协同处理模式使废弃物综合利用率达到95%以上,单位处理过程能量自给率提升至70%,相比单一处理工艺降低碳排放40%,形成“资源共享、能量互补、产物协同”的循环经济新模式,为碳中和目标下的固废处理提供创新解决方案。

4 结语

在碳中和目标的战略指引下,废旧光伏板资源化处理已成为光伏产业可持续发展的关键环节。通过创新智能分级拆解、绿色元素分离等技术路径,能够有效突破传统处理技术的瓶颈,实现资源的高效循环利用与碳排放的显著降低。未来,随着技术的不断进步与产业体系的完善,废旧光伏板资源化处理将逐步向智能化、绿色化、高值化方向发展,为光伏产业的绿色转型与碳中和目标的实现提供坚实支撑,推动能源领域向更加清洁、低碳、可持续的方向迈进。

【参考文献】

- [1]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.
- [2]李涛,田雨涵,杨雅婷.光伏“板下经济”产业的发展与展望[J].张江科技评论,2024,(03):130–132.
- [3]曹猛.基于热力耦合模型的废旧晶硅光伏板回收关键技术研究[D].青海大学,2024.
- [4]袁磊,卓献荣.装配式民宅加装光伏板屋顶空间设计[J].科技创新与应用,2023,13(29):107–110.
- [5]张作良.光伏板表面积灰特性及无水除尘装置优化设计[D].长春工业大学,2021.

作者简介:

林子绚(1993--),女,汉族,广东人,研究生,研究方向:中国环保。