

# 废旧光伏组件回收方法与技术体系综述

## ——回收工艺路线、关键技术与体系化评述

张稼捷<sup>1</sup>, 高超<sup>2</sup>

<sup>1</sup>青海华汇新能源有限公司, 青海 德令哈

<sup>2</sup>昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年12月22日; 录用日期: 2026年1月20日; 发布日期: 2026年1月28日

### 摘 要

随着全球光伏装机容量的快速增长, 退役光伏组件数量在未来十年将迎来爆发式增长, 高效、绿色和经济可行的回收利用技术成为保障光伏产业链可持续发展的关键。本综述系统梳理了晶硅与薄膜光伏组件的结构特征及其退役后材料回收技术, 重点评述了当前主流的机械拆解、热解脱胶、化学溶胀、湿法冶金、物理化学联用及外场强化等技术路线的研究进展、机理基础、技术优势与瓶颈。最后提出“高效低损伤拆解-绿色化脱胶-精细化金属/硅回收-多路径高值化利用”的技术发展路线, 以期退役光伏组件回收利用的产业布局、技术研发和政策制定提供参考。

### 关键词

废旧光伏组件, 晶硅光伏回收, 拆解与分离技术, 回收工艺路线, 技术成熟度评估(TRL)

# Overview of Recycling Methods and Technological Systems for Waste Photovoltaic Modules

## —Recycling Process Routes, Key Technologies, and Systemic Evaluation

Jiajie Zhang<sup>1</sup>, Chao Gao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Qinghai Huahui New Energy Co., Ltd., Delingha Qinghai

<sup>2</sup>School of Metallurgy and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan

Received: December 22, 2025; accepted: January 20, 2026; published: January 28, 2026

## Abstract

With the rapid expansion of global photovoltaic (PV) installations, the volume of decommissioned PV modules is expected to surge dramatically over the next decade. Developing recycling technologies with efficient, environmentally benign, and economically viable has therefore become essential for ensuring the sustainable development of the PV industry chain. This review provides a systematic overview of the structural characteristics of crystalline-silicon and thin-film PV modules, along with their resource recovery requirements after end-of-life. It critically examines the research progress, underlying mechanisms, technological advantages, and existing bottlenecks of the major recycling routes, including mechanical dismantling, pyrolysis-based delamination, chemical swelling, hydrometallurgical recovery, physico-chemical combined processes, and externally enhanced methods. Finally, a prospective technology roadmap—"high-efficiency, low-damage dismantling, green delamination, refined recovery of metals and silicon, and multi-path high-value reutilization"—is proposed to guide industrial deployment, technology development, and policy formulation for large-scale PV module recycling.

## Keywords

End-of-Life Photovoltaic Modules, Crystalline Silicon PV Recycling, Dismantling and Separation Technologies, Recycling Process Routes, Technology Readiness Level (TRL)

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来, 在全球“双碳”战略与能源结构深度转型的推动下, 光伏产业持续高速增长。IEA 统计显示, 2023 年全球光伏累计装机容量已突破 1 TW, 2030 年将逐步进入规模化退役阶段, 累计报废量预计超过 8000 万吨[1]。光伏太阳能电池按基础材料、制造复杂性与商业成熟度差异, 通常分为三代: 第一代晶硅、第二代薄膜及第三代新兴高效电池(如图 1 所示) [2]; 其中晶硅组件市场份额超过 95%, 未来较长时期仍将保持主导。晶硅组件主要由铝合金边框(~11%)、钢化玻璃(~74%)、背板(~4%)与 EVA 封装电池片(~11%)组成(如图 2 所示) [3] [4]。

晶体硅(c-Si)组件全球占比超过 85%, 其结构层次多、界面黏结强、服役寿命长, 使退役后的拆解与分离更具挑战。若缺乏系统化、规范化回收路径, 大量退役组件不仅会造成硅、银、铜、铝等关键资源浪费, 还可能带来潜在环境负荷与固废处置压力。现阶段回收仍以机械拆解/破碎分选、热处理脱胶、湿法浸出与分离以及玻璃与金属回收等为主。其中, 物理法流程简单、成本较低, 但易出现材料混杂与价值损失, 化学法在金属分离与硅再生方面具有潜力, 但面临药剂消耗与二次污染控制等现实约束[5]。前期研究已在拆解、分离与材料回收等方面形成了一系列技术路径, 并在实验室与部分工程场景中获得验证。然而, 前期研究与工程实践多聚焦于某一回收对象或单一工艺环节, 导致多种方法虽并行发展却呈现分散化报道与碎片化积累的特征, 进而使方法体系的梳理与对照变得困难, 主要表现为关键环节之间的衔接关系难以直观呈现。

基于此, 本综述系统梳理了废旧晶硅光伏组件高价值回收领域的研究进展, 重点围绕去封装与拆解技术、金属分离与回收路径以及关键工艺强化策略等方面展开系统讨论。在此基础上, 结合工程实践与

技术发展趋势, 提出未来研究重点方向, 旨在构建一套系统化、工程可行且环境友好的光伏组件回收技术图谱, 为推动我国光伏产业链的绿色低碳循环发展提供理论依据与技术支持。

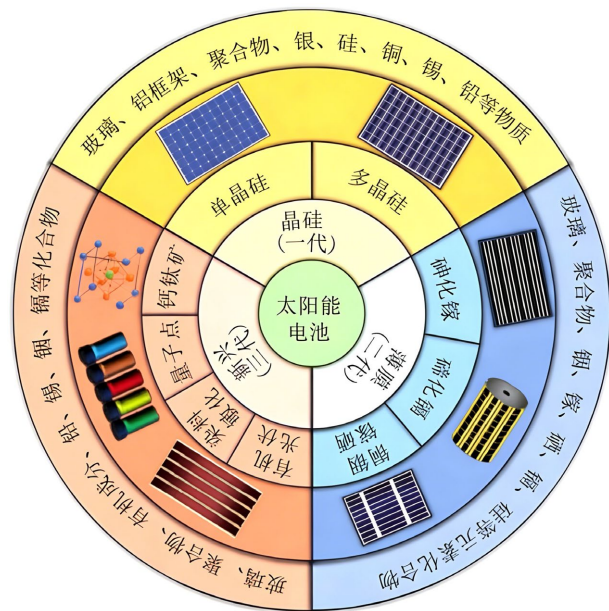


Figure 1. Classification of solar cells [2]  
图 1. 太阳能电池分类[2]

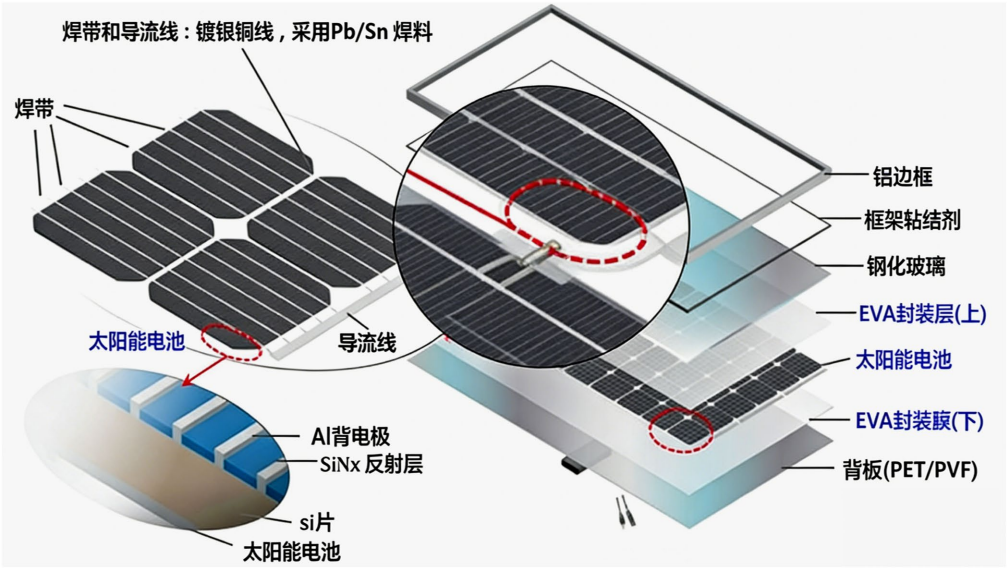


Figure 2. Schematic diagram of the structure of a discarded crystalline silicon photovoltaic module [4]  
图 2. 废旧晶硅光伏组件的结构示意图[4]

## 2. 废旧硅基光伏电池板的回收工艺概况

鉴于晶硅光伏组件在全球光伏装机中占据绝对主导地位(超过 90%), 且其回收技术体系最为复杂、研究最为系统, 本文在回收方法与技术体系的系统分析中以晶硅光伏组件为重点展开; 同时, 对 CIGS、CdTe 等薄膜光伏组件的回收技术进行必要的对比性介绍, 以保证综述在技术覆盖上的完整性。目前国内外对

退役硅基光伏电池板的回收处理技术主要有热解、物理处理方法、化学处理方法、物理处理与化学处理结合法和外场强化等方法。

本文在展开各分路线机理与研究进展之前，对上述典型回收工艺在回收率、处理时间、能耗、废液排放及技术成熟度等关键指标进行了归纳总结(如表 1 所示)，以削弱组件类型、工艺参数差异对单一数值比较的影响。在此基础上，以下各节将分别对不同技术路线的机理特征与发展趋势进行讨论。

**Table 1.** Comprehensive comparison of key indicators for different recycling technology routes  
**表 1.** 不同回收技术路线关键指标的综合对比

| 回收路线             | 主要作用环节         | Si 回收率 /%  | Ag 回收率/% | 典型处理时间   | 能耗水平  | 废液排放量    | 技术成熟度(TRL) |
|------------------|----------------|------------|----------|----------|-------|----------|------------|
| 机械法(破碎/分选)       | 预处理、初级解离与分选    | 60~85      | 30~60    | 分钟 - 小时  | 低     | 无/低      | 7~9        |
| 热解法(脱胶/去封装)      | 去封装、层间解耦       | 85~95      | ≥90      | 0.5~2 h  | 高     | 低(以尾气为主) | 6~8        |
| 有机溶剂法(溶胀/溶解 EVA) | 去封装、保持构件完整     | ≥90 (完整性高) | ≥95      | 数十小时 - 天 | 中     | 高(有机废液)  | 3~5        |
| 无机酸碱法(蚀刻/浸出)     | 金属回收、硅片再生净化    | 90~99.99   | ≥98      | 1~6 h    | 中     | 高(酸碱废液)  | 6~8        |
| 物理 - 化学联用法       | 预处理富集 + 湿法定向回收 | 85~95      | ≥95      | 数小时      | 中     | 中        | 6~7        |
| 外场强化(超声/微波/脉冲等)  | 过程强化、缩短传质/解耦时间 |            |          | 可显著缩短    | 中 - 高 | 取决于体系    | 2~4        |

2.1. 热解技术

热解技术被认为是处理有机封装材料的有效手段之一，也是当前最常见工艺处理路线[6][7]。该方法通常在密闭环境中对废旧光伏组件进行加热，使 EVA 胶膜、TPT 背板等有机组分发生热裂解或燃烧，转变为挥发性气体与少量灰渣，从而实现铝合金边框、钢化玻璃与硅基电池片等无机材料的物理分离[8]。高温热处理的主要作用在于去除 EVA 胶膜，国内外学者对其热解过程、产物特征与机理进行了大量研究。研究表明，EVA 的整体失重率受升温速率影响较小，其完全热分解需满足一定的温度条件[9]。如，徐创等[10]发现在合理控制升温速率的条件下，可以减缓热应力积累，有利于保持硅片的结构。EVA 热解可分为脱乙酰和在氧气存在下发生碳化与氧化两个主要阶段[11][12]。如，Kim 等[13]，Wang 等[7]和 Tao [14]等通过“两阶段热处理”工艺实现了退役晶硅太阳能组件的分离，进而实现了背板的回收与再生。黄智豪等[15]对退役 Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> 光伏层压件封装材料的精准控温热解路径及产物进行了研究，发现封装材料在约 490℃ 条件下即可完全去除。Theocharis 等[16]在 550℃ 下通入过量空气处理 15 min，实现了 EVA 的热解并成功将薄膜从前侧保护玻璃上剥离。Kang 等[17]，Tammaro 等[18]和 Mahmoudi S 等[19]在 600℃ 加热 1 h 实现了组件中 EVA 的完全去除。Li 等[20]发现热解温度、升温速率和气氛(氧化/惰性)对有机产物的种类与分布具有显著影响，部分工况下会生成一定比例的芳香族和含氧有机物，对后续尾气处理与环境排放提出更高要求。董莉等[21]，Zhang 等[22]比较了氧气和氮气氛围下 EVA 的热失重特性，结果显示两种气氛下 EVA 的失重温度区间分别为 300℃~520℃ 和 250℃~500℃，产生的气体产物主要为 CO<sub>2</sub> 及碳链长度小于 C5 的烷烃和烯烃，液体产物则以长链烷烃、烯烃为主，辅以少量芳香族和醇类化合物。杨迪菲[23]等发现在气速 20 mL/min 条件下，EVA 在氧气环境中的完全分解温度约为 580℃，而在氮气氛围中 500℃ 即可实现完全分解，说明惰性气氛下 EVA 的热解效率更高。



此外, 考虑到传统化学溶解与热解方法在 EVA 有效利用与环境安全方面仍存在不足, 中科院电工所 Lei Zhao 等[20]提出采用激光辐照辅助机械剥离的方法回收组件中的 EVA 层。该方法利用 1064 nm 光纤脉冲激光照射电池/EVA 界面, 使界面处迅速升温、粘接强度显著下降, 进而通过机械剥离实现 EVA 层的完整分离。但该技术对设备精度和激光控制条件要求较高, 单片处理成本较高, 短期内难以在大规模退役组件回收中推广。

总之, 热解技术在处理有机封装材料方面取得了一些成果, 但该方法仍面临若干问题: (1) 处理温度高、能耗强度大; (2) 在氧化气氛中易导致硅片表面氧化, 影响后续高纯硅再生工艺; (3) 有机物热裂解产生大量挥发性有机污染物, 需配套尾气净化以避免环境风险; (4) 高温设备投资与维护成本较高。未来拆解技术的发展趋势正逐步向低能耗、低污染、可大规模连续处理的方向演进, 以支撑光伏组件回收体系的绿色化与高价值化发展。

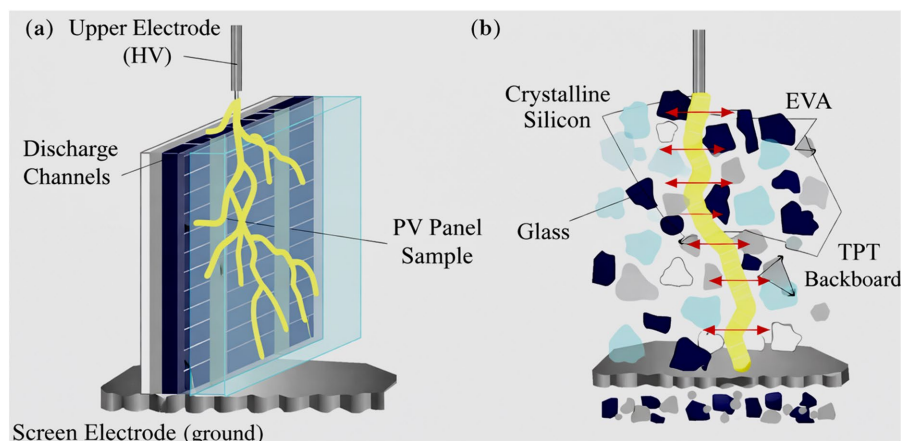
## 2.2. 物理法

### 2.2.1. 机械破碎法

机械破碎通过外力作用削弱 EVA 胶膜的黏附作用, 使组件解体为不同粒级的混合物, 是光伏组件回收中常见的预处理手段之一。

#### (1) 高压脉冲破碎技术

近年来, 高压脉冲破碎因具有更高的选择性分离能力而受到关注, 其机理如图 3 所示。当高压放电(>100 kV)作用于光伏组件时, 由于组件内部各材料(玻璃、硅、金属、聚合物等)介电常数差异显著, 电场在界面处形成优先的导电通道, 引发局部电击穿。击穿过程中会产生高温高压等离子体, 使通道迅速膨胀并沿材料界面扩展, 从而实现界面解离与选择性破碎[24][25]。TPT 背板表面出现典型的树枝状放电痕迹, 进一步证实界面优先击穿的机理。高压脉冲破碎能够使 Cu、Al、Pb、Ag、Sn 等金属更集中地分布在特定颗粒中, 相比传统机械粉碎具有更高的选择性。但其对设备要求高、电压与脉冲频率大、能耗高, 仍难在大规模工业场景中普及。



**Figure 3.** High-voltage pulse crushing mechanism [24]

**图 3.** 高压脉冲破碎机理[24]

虽然机械法具有低能耗、无污染等优势, 但破碎后得到的硅-玻璃-塑料-金属混合物颗粒较小, 导致分选难度增加, 各组分的品位难以达到完全分离。因此, 通常需要结合湿法冶金对金属进一步提纯回收。此外, 为提高选择性破碎效果, 不同设备对光伏组件结构与材料特性提出较高要求。为降低设备依赖, 可结合组件材料属性或开展材料预改性, 提高传统破碎设备的选择性分离效果; 机械破碎也可作

为预处理环节，与后续化学分离协同使用。

2.2.2. 光伏组件机械分选技术的发展

机械破碎后的混合物通常需借助多种物理分选技术实现进一步解离，包括基于密度差异的浮选法、基于导电性差异的静电分选与电涡流分选，以及基于粒度特征的机械筛分等[3] [26]-[28]。总体而言，机械筛分因流程简单、能耗低，在工程实践中应用最为广泛，在优化条件下可实现较高的硅材料回收率[29]。然而，受限于破碎后颗粒粒径分布及多组分嵌布特征，单一物理分选方法难以实现完全分离，通常需要与后续湿法冶金步骤协同使用。

2.3. 化学法

2.3.1. 有机溶剂法

为克服 EVA 胶膜强黏结性导致的光伏组件难以解体的问题，研究者通过有机溶剂法实现了废旧光伏组件的分层与材料回收。该方法以 EVA 对部分有机溶剂具有溶胀或溶解特性为基础，通过溶剂渗透破坏胶膜结构，从而实现玻璃、硅片及背板等组分的分离。EVA 的溶胀过程可分为溶解与膨胀两个阶段：溶解阶段：EVA 中未发生交联的链段可直接溶解于有机溶剂中，使胶膜局部失去结构支撑(如图 4 所示)；膨胀阶段：交联结构难以完全溶解，但在溶剂的渗透作用下体积膨胀，导致玻璃与硅片之间的缝隙逐渐增大，从而促使组件层间分离[17]。由于有机溶剂主要与 EVA 胶膜发生作用，而对玻璃、金属电极及硅片无明显腐蚀或损伤，因此该方法可较好地保持组件中价值材料的完整性，为后续高价值回收提供有利条件。然而，该方法仍面临实际应用限制。一方面，光伏组件多层结构紧密，EVA 的高交联度使溶剂难以快速渗透至界面，导致溶胀分离耗时较长(通常需数十小时至数天)；另一方面，许多具有良好溶胀能力的溶剂具有毒性强、挥发性高、可燃性强或价格较高等问题，且废液处理复杂、环境风险大，难以满足大规模工业化回收的经济性与安全性要求。因此，有机溶剂法目前多用于实验室验证或小规模应用，其工业推广仍依赖于溶剂替代、溶剂循环利用以及低毒绿色溶剂体系的进一步开发。

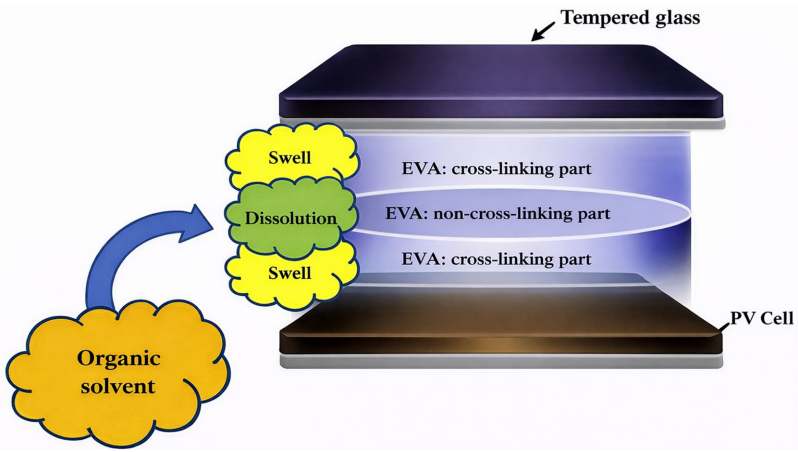


Figure 4. Swelling mechanism of EVA in organic solvents [17]  
图 4. 有机溶剂对 EVA 的溶胀机理[17]

2.3.2. 无机酸碱法

无机酸碱法是废旧硅基光伏组件回收中应用最为成熟、最具工业可行性的化学处理路径，其主要目的包括两方面：其一，通过酸性溶液溶解硅片表面的前电极和背电极，实现银、铝等金属的回收与富集；其二，通过酸碱联合蚀刻有效去除硅片表面的金属杂质、丝网印刷残留以及氮化硅(SiNx)抗反射膜层，从

而获得可重新用于光伏制造的高纯硅材料(纯度可达 99.999%)。目前,国际上已开发出多种基于混酸与碱液的化学蚀刻工艺,通过调控蚀刻剂组合、浓度、顺序和温度,实现硅片再生所需的表面净化[30]。典型的工艺路线包括以硝酸( $\text{HNO}_3$ )与氢氟酸( $\text{HF}$ )混酸作为初步脱膜剂,再配合氢氧化钾( $\text{KOH}$ )去除背面铝电极的技术路径。然而,这类强腐蚀性混酸体系对硅本体的选择性较差,在去除膜层的同时容易造成硅表面的过度腐蚀,产生微坑或粗糙化等缺陷,不利于再生硅片直接用于太阳能电池制造。针对上述问题,研究者提出了另一类具备更高选择性的“弱酸预处理 + 混酸深度脱膜”路线。例如,文献报道使用磷酸( $\text{H}_3\text{PO}_4$ )对废旧硅片进行预处理,利用磷酸对铝的选择性溶解特性,在较温和的条件下脱除背电极,同时对硅表面损伤较小[31]。随后,再使用硝酸-氢氟酸混酸体系去除银电极及其他表面金属杂质。为降低无机酸碱法中酸碱消耗量大、废液排放压力高的问题,部分国内研究者提出利用硅基太阳能电池生产环节中产生的废酸( $\text{HF}$  废液)与废碱液(如废  $\text{KOH}$ 、 $\text{NaOH}$  溶液)作为蚀刻剂,实现“以废治废”的绿色回收方案。然而,该方法的主要难题在于废酸与废碱的成分复杂、浓度不稳定,可能含有多种金属杂质、络合物、颗粒物等,使后续的金属富集、贵金属回收以及硅纯化步骤的工艺窗口更狭窄、控制难度更大,目前仍需更多系统性研究验证其大规模工业化应用的可行性[32]。

总体而言,该方法在硅片表面净化与金属回收方面具有不可替代的作用,其工程瓶颈主要集中在蚀刻选择性控制以及酸碱体系的循环再生效率上。

## 2.4. 物理 - 化学联用法

物理化学联用法是一种以机械破碎为核心预处理辅以湿法冶金进一步提取有价金属的综合回收策略[33]。与单独采用湿法冶金相比,物理化学联用法的优势主要体现在三个方面[34]。首先,机械破碎实现了对金属的富集与玻璃的初步解耦,使得湿法冶金能够“定向作用”于金属含量高的组分,大幅降低浸出剂的消耗量并减少化学废液的产生。其次,通过粒级分布的差异化处理可提高整体回收过程的资源效率,使破碎后的玻璃、硅碎片、金属富集颗粒都能进入各自最合适的处理路径,有利于构建高价值回收体系。再次,联用法中的化学步骤不再承担去除 EVA 胶膜和背板材料的任务,从而避免了有机高分子在酸性条件下可能产生的二次污染与副反应,大幅提升工艺的环境友好性。

如,在废弃铜铟镓硒( $\text{Cu(In,Ga)Se}_2$ , CIGS)光伏组件的回收利用过程中,稀散元素如铟、镓、硒的高效回收具有重要的经济价值和战略意义。然而,这些元素主要富集在电池片的功能层材料之中,并被多层有机封装材料紧密包覆,传统湿法或火法冶金工艺难以在不预处理的条件下直接作用于功能层。破碎分选技术在传统矿物加工领域已被广泛用于实现目标矿物的单体解离,并在电子废弃物处理及其他再生资源回收领域得到成功应用[35]-[37]。对于光伏组件而言,盖板玻璃、电池片及有机聚合物(EVA、背板等)在力学性能、密度、脆性和导电性方面存在显著差异[38][39]。Granata 等[40]采用双转子粉碎机联用锤式破碎机实现组件多级破碎。Azeumo 等[41]则在拆除铝框后将组件粉碎至 0.4 cm 以下,随后采用重介质分选,实现了玻璃与金属的初步高效分离。Sim 等[39]通过切割与机械破碎将废弃光伏组件粉碎后进行筛分,实现了不同粒级段对聚合物和金属组分的分离。

在工艺装备方面,Fiandra 等[42]开发了一种新型机械分离与回收工艺,该工艺首先去除背板及部分 EVA,通过施加机械应力减小 EVA 与玻璃之间的附着力,随后通过撕裂方式剥离玻璃碎片,玻璃回收率可达>99%。魏晓旭等[43]通过低温冷冻(-80℃)强化破碎过程提高了分选效率。王红雪等[44]在低温焙烧预处理后再进行机械破碎,有效提高了细粒级产品的产率,强化了材料的解离效果。张雪峰等[45]利用液氮对光伏电池板进行预处理,提高了 EVA 的脆性、降低其粘性,随后采用机械破碎实现多组分分离。Padoan 等[46]采用手工拆解、机械破碎和溶剂处理相结合的综合工艺对废弃 CIGS 组件进行了系统回收与分析。Li 等[47]通过机械破碎和研磨对 CIGS 组件进行处理,表明通过破碎与研磨的组合可以实现功能



层金属的有效解离和显著富集。

然而,该方法在处理硅材料时仍存在一定挑战:(1)机械破碎不可避免地将硅基电池片粉碎成大量硅粉碎片,这些硅粉在空气中大量暴露,极易发生氧化,导致表面形成二氧化硅层;(2)如果破碎过度或粒度过细,还可能影响硅在熔炼中的沉降行为,导致硅熔体的流动性与分布均匀性下降,使得硅的再铸锭质量不易控制。未来物理化学联用法的研究焦点可能集中在更加精细化的粒度控制、更高效的金属富集路径以及与硅材料冶金再生的深度耦合方面。将机械破碎所得的金属富集颗粒与绿色浸出体系(如深共熔溶剂、电化学浸出体系)结合,也可能成为降低化学品消耗与环境负荷的新方向。总体来看,物理化学联用法在光伏组件回收领域已展现出较好的工业适应性与资源效率,但其在硅材料高价值回收方面仍具有广阔的提升空间,是实现低能耗、高效率、绿色化光伏回收体系的重要研究方向。

## 2.5. 外场强化分离

### 2.5.1. 超声场强化

传统有机溶剂溶胀法作为光伏组件去封装的一类典型化学方法,依赖于有机溶剂对EVA胶膜的溶解与膨胀作用,使组件各层间的黏结力被削弱并最终实现玻璃、硅片和背板等构件的分离。然而,EVA胶膜具有较高的交联度和热固特性,其分子网络致密、扩散阻力大,使得溶剂难以快速渗入组件内部。在实际操作中,常规浸泡需维持数十至数百小时才能达到完全分离效果,导致该方法在规模化应用中的效率受限。随着光伏组件退役量的迅速增长,如何提升溶剂穿透速率、改善界面传质行为已经成为决定有机溶剂法能否进入工业化应用的关键因素。

在现有外场强化技术中,超声辐射由于其可在液体中产生强烈的空化作用而备受关注。超声波在液体中传播时,其周期性压力变化会导致液体中溶解气体的析出或液体自身的撕裂,从而产生大量微小气泡(空化核)。这些气泡在声压正负周期反复作用下经历膨胀、振荡与非线性增长,并在压力骤然转变时发生剧烈坍塌。在超声作用下,EVA胶膜界面处出现大量微气泡的生成和崩解,胶膜膨胀速率大幅提升,胶膜网络结构不断松动,远超过常规静态溶剂扩散速率。围绕超声强化溶胀,研究者对不同溶剂体系进行了系统探索[48]。例如,采用三氯乙烯、邻二氯苯、甲苯、苯等作为溶胀剂,通过调节溶剂浓度、超声功率、温度等变量考察其对EVA胶膜的溶胀速率和溶解程度的影响[49]。

尽管超声强化的有机溶剂法在实验室尺度表现优异,但其可工业化性仍存在明显限制,如超声波存在显著的衰减效应和方向性特征、成本高、溶剂损耗与爆炸风险等[50]。综上,外场强化的有机溶剂法通过引入物理能场改善溶剂扩散和界面分离行为,为提升光伏组件去封装效率提供了新的思路。尤其是超声强化技术,在溶胀动力学、处理速率和层间解体方面均表现出显著优势。然而,从实验室向工业化放大过程中仍存在声场均匀性、设备能耗、溶剂安全性等方面的挑战,限制了其在大规模退役组件回收中的应用潜力。未来研究需围绕外场类型优化、溶剂体系绿色化、设备结构设计与工艺集成展开,以实现高效率、低能耗、安全可控的光伏组件拆解体系。

### 2.5.2. 微波场对有机物的解聚作用

微波辐射又称超高频电磁波辐射,作为一种高效、清洁的能量形式,已在有机化学领域得到广泛应用。与传统传导-对流加热方式相比,微波加热具有升温迅速、加热均匀、显著提高反应速率和收率等优势。其加热机理主要包括两方面:(1)极性分子的介电损耗,在高频交变电磁场作用下,介质中的极性分子发生取向极化,并随外加电场周期性反转高速振荡,这一振荡过程受到分子间相互作用力的阻碍,产生类似摩擦的耗散效应,使分子获得较高能量并转化为热能。(2)离子的导电损耗,带电离子在微波场中受交变电场加速,其运动方向随电场方向不断改变,离子在运动过程中发生频繁碰撞,同样以热的形



式耗散能量。

目前, 针对 EVA 胶膜本身的微波降解或解聚研究仍相对匮乏, 但在聚酯类高分子(如 PET、PBT 等)的微波解聚、降解和合成方面已开展了一系列探索[51][52]。相关研究表明, 微波强化技术能够在较温和的条件下实现聚酯高效降解, 大幅提升回收效率; 与传统化学回收工艺相比, 微波辅助解聚不仅显著降低了化学试剂用量, 而且具有降解速度快、能耗较低、转化效率高等优点[52]。将微波技术引入 EVA 胶膜的化学解聚过程, 有望在缩短反应时间、降低能耗和优化产物分布等方面展现优势, 是退役光伏组件高效去封装与资源化利用的一条值得关注的新路径[53]。KimY 等[34]在二氯苯、三氯乙烯、苯和甲苯等有机溶剂中加入乙醇, 并辅以超声波辐照实现 EVA 的快速溶解。然而, EVA 溶胀过程中会导致电池片发生严重碎裂, 硅片难以保持完整, 从高价值再生的角度看, 不利于实现“整片硅片”的回用和保级利用。Akimoto Y 等[25]提出采用高压脉冲破碎的物理方法, 将光伏组件分为玻璃层和背板层, 再通过对玻璃层进行二次高压脉冲破碎, 实现玻璃与 EVA 胶膜的选择性解耦, 不依赖化学溶剂成功实现了较高分离度的分离。

总体而言, 外场强化技术在实验室尺度展现出显著的过程强化效应, 但其当前研究重点仍集中于作为关键步骤的辅助强化单元, 其工业化应用有赖于能耗控制、设备放大与安全性问题的进一步解决。

## 2.6. 回收材料回流光伏产业链的技术约束与新型组件适配性

废旧晶硅光伏组件回收技术的工程价值, 不仅取决于拆解与分离效率, 更关键在于分离后硅片与贵金属是否具备重新进入光伏产业链的技术可行性。因此, 对回收工艺的评价应从“是否实现分离”进一步拓展至“是否满足再制造门槛”。

在现有光伏产业体系中, 硅材料的回流应用对纯度等级具有明确要求。一般而言, 6N 级硅可作为工业硅或升级冶金级硅(UMG-Si)路线的合格硅源, 而 9N 级硅主要面向高效电池或电子级应用。通过热解-机械拆解-化学蚀刻等工艺获得的再生硅片, 其体相纯度通常可接近 5N~6N, 但受限于原始掺杂元素及服役杂质, 直接达到 9N 水平仍存在较大难度, 往往需借助后续冶金或化学提纯过程。因此, 从工程实践角度看, 将回收硅片作为“硅源”而非“即用型硅片”更具现实可行性, 这也对回收过程中硅片结构保护和氧化控制提出了更高要求。

银资源方面, 湿法冶金工艺虽可实现较高回收率, 但回收银粉在粒径分布、形貌与杂质控制方面通常难以直接满足太阳能银浆的技术要求, 仍需经过精炼与粉体重构过程方可回流至电极制备环节。因而, 银回收更合理的路径通常是先回流至冶炼或工业银体系, 再通过成熟工艺实现间接闭环。

此外, 新型组件结构的发展进一步增加了回收适配性的复杂性。双玻组件增强的层间黏结显著提高了去封装难度, 而无主栅或多主栅组件改变了银的赋存形态和分布特征, 使传统回收工艺在银富集选择性方面面临新的挑战。未来回收技术需针对不同组件结构进行差异化设计, 而非沿用单一组件模型。

总体而言, 回收技术由“拆解-分离”向“再制造适配”演进, 是退役光伏组件资源化利用走向成熟的关键方向。只有在回收阶段同步考虑材料纯度门槛、回流路径及新型组件结构特征, 才能构建真正与光伏产业链深度衔接的高效回收技术体系。

## 3. 结论

随着全球光伏装机规模的持续扩大, 晶硅光伏组件未来将进入集中退役阶段, 其资源化利用已成为光伏产业可持续发展的关键环节。国家层面已明确将光伏组件回收利用纳入循环经济重点领域, 但从实际推进情况看, 相关产业仍面临回收标准体系不完善、高价值利用技术成熟度不足以及经济性与市场驱动力偏弱等问题, 制约了其规模化、规范化发展。

从技术角度看, 废弃晶硅光伏组件高价值利用的核心难点主要体现在三个方面: 一是 EVA 胶膜等封装材料难以高效、低损伤去除, 影响硅片与金属材料的完整分离; 二是硅片及功能层材料在解离过程中易发生结构损伤, 难以兼顾分离效率与材料性能保持; 三是硅材料与有价金属的高纯度提取及高附加值利用路径尚未形成成熟、可复制的工业化方案。现有机械破碎、热解脱胶、溶剂脱胶及湿法冶金技术各具优势, 但普遍存在能耗高、环境负荷大或经济性不足等问题, 难以单独满足绿色化与规模化发展的综合要求。

近年来, 光伏组件利用技术的发展趋势逐渐由单一工艺优化转向“强化 + 绿色化 + 系统集成”的协同路径。外场强化手段(如超声、微波、电化学等)与新型绿色介质(深共熔溶剂、离子液体等)的引入, 为提升脱胶效率、降低能耗和环境成本提供了新的技术突破口; “机械预处理 + 绿色脱胶 + 精细冶金”的复合工艺路线在材料完整性保持与高效分离方面展现出较大潜力。与此同时, 硅材料利用正由传统冶金级回收向高纯溶剂精炼及跨领域高值应用转型, 其中 Al-Si 溶剂精炼技术和再生硅在储能领域(如锂离子电池负极材料)中的应用, 为构建“光伏-储能”材料闭环提供了新的发展方向。

展望未来, 晶硅光伏组件高价值利用的发展应从单一技术突破迈向全流程系统优化, 重点推进低损伤拆解、绿色高效分离、高值化材料利用以及连续化、智能化装备的协同发展。同时, 通过引入数字化管理、全生命周期评价和产业链协同机制, 有望逐步构建高效、低能耗、环境友好且具备商业可行性的光伏材料循环利用体系, 为光伏产业长期健康发展和“双碳”目标实现提供重要支撑。

## 参考文献

- [1] Allouhi, A., Rehman, S., Buker, M.S. and Said, Z. (2023) Recent Technical Approaches for Improving Energy Efficiency and Sustainability of PV and PV-T Systems: A Comprehensive Review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **56**, Article ID: 103026. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103026>
- [2] Zhang, D., Chen, J., Jia, R., Gao, Z., Tao, K., Wang, L., *et al.* (2022) Texture Engineering of Mono-Crystalline Silicon via Alcohol-Free Alkali Solution for Efficient PERC Solar Cells. *Journal of Energy Chemistry*, **71**, 104-107. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2022.03.016>
- [3] 梁振南, 秦红, 沈辉. 背板材料对太阳能电池效率影响研究的实验研究[J]. 材料研究与应用, 2008, 2(4): 432-436.
- [4] 刘景洋. 废晶体硅太阳能电池板资源回收技术研究[R]. 北京: 中国科协海峡两岸青年科学家学术活动月两岸环保高层专家论坛, 2015.
- [5] Sah, D., Chitra, and Kumar, S. (2023) Investigation and Recovery of Copper from Waste Silicon Solar Module. *Materials Chemistry and Physics*, **296**, Article ID: 127205. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.127205>
- [6] Shin, J., Park, J. and Park, N. (2017) A Method to Recycle Silicon Wafer from End-Of-Life Photovoltaic Module and Solar Panels by Using Recycled Silicon Wafers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **162**, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.12.038>
- [7] Wang, R., Song, E., Zhang, C., Zhuang, X., Ma, E., Bai, J., *et al.* (2019) Pyrolysis-Based Separation Mechanism for Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules by a Two-Stage Heating Treatment. *RSC Advances*, **9**, 18115-18123. <https://doi.org/10.1039/c9ra03582f>
- [8] Bogust, P. and Smith, Y.R. (2020) Physical Separation and Beneficiation of End-Of-Life Photovoltaic Panel Materials: Utilizing Temperature Swings and Particle Shape. *JOM*, **72**, 2615-2623. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04197-2>
- [9] Sultan, B. and Sörvik, E. (1991) Thermal Degradation of EVA and EBA—A Comparison. I. Volatile Decomposition Products. *Journal of Applied Polymer Science*, **43**, 1737-1745. <https://doi.org/10.1002/app.1991.070430917>
- [10] 徐创, 李宾, 袁晓, 柳翠, 沈春银. 废旧晶体硅光伏组件的回收利用[J]. 环境工程学报, 2019, 13(6): 1417-1424.
- [11] 董莉. 废晶体硅太阳能电池板资源化技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [12] Song, B., Zhang, M., Fan, Y., Jiang, L., Kang, J., Gou, T., *et al.* (2020) Recycling Experimental Investigation on End of Life Photovoltaic Panels by Application of High Voltage Fragmentation. *Waste Management*, **101**, 180-187. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.015>
- [13] Choi, S. and Kim, E. (2017) Analysis of Pyrolysis Products of Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer (EVA) Using Pre-Deacetylation. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, **127**, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.09.015>
- [14] Tao, R., Li, B., Wu, Y., Zhang, W., Yuan, H., Gu, J., *et al.* (2023) Pyrolysis Mechanism and Recycling Strategy of End-

- Of-Life Photovoltaic Modules Based on the Experiment and the Density Functional Theory. *Polymer Degradation and Stability*, **217**, Article ID: 110545. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110545>
- [15] 黄智豪, 巫宇森, 秦保家, 朱洁, 阮菊俊. 退役 Cu(InGa)Se<sub>2</sub> 光伏层压件封装材料精准控温热解转化路径及产物分析[J]. 环境工程学报, 2025, 19(2): 373-383.
  - [16] Theocharis, M., Tsakiridis, P.E., Kousi, P., Hatzikioseyan, A., Zarkadas, I., Remoundaki, E., *et al.* (2021) Hydrometallurgical Treatment for the Extraction and Separation of Indium and Gallium from End-Of-Life CIGS Photovoltaic Panels. *Materials Proceedings*, **5**, Article 51. <https://doi.org/10.3390/materproc2021005051>
  - [17] Kang, S., Yoo, S., Lee, J., Boo, B. and Ryu, H. (2012) Experimental Investigations for Recycling of Silicon and Glass from Waste Photovoltaic Modules. *Renewable Energy*, **47**, 152-159. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.04.030>
  - [18] Tamarro, M., Rimauro, J., Fiandra, V. and Salluzzo, A. (2015) Thermal Treatment of Waste Photovoltaic Module for Recovery and Recycling: Experimental Assessment of the Presence of Metals in the Gas Emissions and in the Ashes. *Renewable Energy*, **81**, 103-112. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.014>
  - [19] Mahmoudi, S., Huda, N., Alavi, Z., Islam, M.T. and Behnia, M. (2019) End-Of-Life Photovoltaic Modules: A Systematic Quantitative Literature Review. *Resources, Conservation and Recycling*, **146**, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.018>
  - [20] Li, X., Liu, H., You, J., Diao, H., Zhao, L. and Wang, W. (2022) Back EVA Recycling from C-Si Photovoltaic Module without Damaging Solar Cell via Laser Irradiation Followed by Mechanical Peeling. *Waste Management*, **137**, 312-318. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.024>
  - [21] 董莉, 刘景洋, 周潇云, 郭玉文, 乔琦. 废晶体硅光伏组件中乙烯-醋酸乙烯共聚物热处理及产物分析[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(10): 61-66.
  - [22] Zhang, L. and Xu, Z. (2016) Separating and Recycling Plastic, Glass, and Gallium from Waste Solar Cell Modules by Nitrogen Pyrolysis and Vacuum Decomposition. *Environmental Science & Technology*, **50**, 9242-9250. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01253>
  - [23] 杨迪菲. 废旧晶体硅太阳能电池中金属回收研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海第二工业大学, 2019.
  - [24] Nevala, S., Hamuyuni, J., Junnila, T., Sirviö, T., Eisert, S., Wilson, B.P., *et al.* (2019) Electro-Hydraulic Fragmentation vs Conventional Crushing of Photovoltaic Panels—Impact on Recycling. *Waste Management*, **87**, 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.039>
  - [25] Akimoto, Y., Iizuka, A. and Shibata, E. (2018) High-Voltage Pulse Crushing and Physical Separation of Polycrystalline Silicon Photovoltaic Panels. *Minerals Engineering*, **125**, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.015>
  - [26] Smith, Y.R., Nagel, J.R. and Rajamani, R.K. (2017) Electrodynamic Eddy Current Separation of End-Of-Life PV Materials. In: Zhang, L., *et al.*, Eds., *Energy Technology 2017*, Springer, 379-386. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-52192-3\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-319-52192-3_37)
  - [27] 赵江英. 晶硅太阳能电池片的再生循环技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西宁: 青海民族大学, 2019.
  - [28] Doi, T., Tsuda, I., Unagida, H., Murata, A., Sakuta, K. and Kurokawa, K. (2001) Experimental Study on PV Module Recycling with Organic Solvent Method. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **67**, 397-403. [https://doi.org/10.1016/s0927-0248\(00\)00308-1](https://doi.org/10.1016/s0927-0248(00)00308-1)
  - [29] Maani, T., Celik, I., Heben, M.J., Ellingson, R.J. and Apul, D. (2020) Environmental Impacts of Recycling Crystalline Silicon (C-Si) and Cadmium Telluride (CDTE) Solar Panels. *Science of the Total Environment*, **735**, Article ID: 138827. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138827>
  - [30] Lee, J., Lee, J., Ahn, Y., Kang, G., Song, H., Lee, J., *et al.* (2017) Photovoltaic Performance of C-Si Wafer Reclaimed from End-Of-Life Solar Cell Using Various Mixing Ratios of HF and HNO<sub>3</sub>. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **160**, 301-306. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.10.034>
  - [31] 刘强, 冯加保, 黄振华, 等. 晶硅太阳能电池环保回收再生利用的研究[J]. 科技经济导刊, 2016(2): 120-121.
  - [32] Pagnanelli, F., Moscardini, E., Granata, G., Abo Atia, T., Altamari, P., Havlik, T., *et al.* (2017) Physical and Chemical Treatment of End of Life Panels: An Integrated Automatic Approach Viable for Different Photovoltaic Technologies. *Waste Management*, **59**, 422-431. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.11.011>
  - [33] Dias, P., Javimczik, S., Benevit, M., Veit, H. and Bernardes, A.M. (2016) Recycling WEEE: Extraction and Concentration of Silver from Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules. *Waste Management*, **57**, 220-225. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.016>
  - [34] Kim, Y. and Lee, J. (2012) Dissolution of Ethylene Vinyl Acetate in Crystalline Silicon PV Modules Using Ultrasonic Irradiation and Organic Solvent. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **98**, 317-322. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.11.022>
  - [35] Schwarz, M.P., Koh, P.T.L., Verrelli, D.I. and Feng, Y. (2016) Sequential Multi-Scale Modelling of Mineral Processing

- Operations, with Application to Flotation Cells. *Minerals Engineering*, **90**, 2-16. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.09.021>
- [36] Liu, J., Bai, X., Hao, J., Wang, H., Zhang, T., Tang, X., *et al.* (2021) Efficient Liberation of Electrode Materials in Spent Lithium-Ion Batteries Using a Cryogenic Ball Mill. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **9**, Article ID: 106017. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106017>
- [37] Maisel, F., Chancerel, P., Dimitrova, G., Emmerich, J., Nissen, N.F. and Schneider-Ramelow, M. (2020) Preparing WEEE Plastics for Recycling—How Optimal Particle Sizes in Pre-Processing Can Improve the Separation Efficiency of High Quality Plastics. *Resources, Conservation and Recycling*, **154**, Article ID: 104619. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104619>
- [38] Zhao, P., Guo, J., Yan, G., Zhu, G., Zhu, X., Zhang, Z., *et al.* (2020) A Novel and Efficient Method for Resources Recycling in Waste Photovoltaic Panels: High Voltage Pulse Crushing. *Journal of Cleaner Production*, **257**, Article ID: 120442. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120442>
- [39] Sim, Y., Tay, Y.B., Pham, H.K. and Mathews, N. (2023) A Facile Crush-And-Sieve Treatment for Recycling End-of-Life Photovoltaics. *Waste Management*, **156**, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.11.023>
- [40] Granata, G., Pagnanelli, F., Moscardini, E., Havlik, T. and Toro, L. (2014) Recycling of Photovoltaic Panels by Physical Operations. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **123**, 239-248. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.01.012>
- [41] Azeumo, M.F., Germana, C., Ippolito, N.M., Franco, M., Luigi, P. and Settimio, S. (2019) Photovoltaic Module Recycling, a Physical and a Chemical Recovery Process. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **193**, 314-319. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.01.035>
- [42] Fiandra, V., Sannino, L. and Andreozzi, C. (2023) Photovoltaic Waste as Source of Valuable Materials: A New Recovery Mechanical Approach. *Journal of Cleaner Production*, **385**, Article ID: 135702. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135702>
- [43] 魏晓旭, 王珊, 高德东, 吴智朋. 低温条件下废旧晶硅光伏组件破碎实验研究[J]. 青海大学学报, 2024, 42(1): 17-23.
- [44] 王红雪, 付元鹏, 樊玉萍, 董宪姝. 低温焙烧改性-机械破碎分离回收废弃光伏电池[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(9): 51-57, 88.
- [45] 张雪峰, 燕阳, 王东, 王志, 伍继君. 液氮改性-机械破碎法分离回收废旧光伏电池板[J]. 矿冶, 2021, 30(3): 19-24.
- [46] dos Santos Martins Padoan, F.C., Schiavi, P.G., Belardi, G., Altimari, P., Rubino, A. and Pagnanelli, F. (2021) Material Flux through an Innovative Recycling Process Treating Different Types of End-Of-Life Photovoltaic Panels: Demonstration at Pilot Scale. *Energies*, **14**, Article 5534. <https://doi.org/10.3390/en14175534>
- [47] Li, M., Widiyatmoko, S.D., Wang, Z. and Hall, P. (2023) A Methodology to Liberate Critical Metals in Waste Solar Panel. *Applied Energy*, **337**, Article ID: 120900. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120900>
- [48] 徐雪冬, 刘斌, 吴雪, 王晶, 刘美莲. NaOH 溶液预处理结合超声制备微纤化纤维素的研究[J]. 纤维素科学与技术, 2019, 27(1): 57-64.
- [49] 罗斌, 刘全军, 余力, 江旭, 纪慧超. RSM 在超声波强化氧化铜矿浸出试验中的应用[J]. 有色金属工程, 2019, 9(2): 59-63.
- [50] 宋红玮, 许忠斌, 郑素霞. 微波辅助回收废聚酯制备粉末涂料用聚酯树脂[J]. 化工学报, 2008(8): 2141-2148.
- [51] 赵晓非, 刘立新, 李杰, 毕立娜, 张东. 聚对苯二甲酸乙二醇酯微波水解反应方式分析及机理研究[J]. 材料导报, 2007(S2): 10-12.
- [52] Ghosh, S. and Yadav, R. (2021) Future of Photovoltaic Technologies: A Comprehensive Review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, **47**, Article ID: 101410. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101410>
- [53] Ewa, R., Piotr, O., Adam, C., *et al.* (2010) Chemical, Thermal and Laser Processes in Recycling of Photovoltaic Silicon Solar Cells and Modules. *Ecological Chemistry and Engineering S*, **17**, 385-391.