

废弃光伏组件自动化回收的工艺路线研究

廖源泉, 丁杏, 谢振勇

(湖南红太阳光电科技有限公司, 湖南长沙 410000)

[摘要] 太阳能作为一种可再生的绿色清洁能源, 已经在全世界范围内得到了大规模的应用。但是, 根据研究表明太阳能电池的使用寿命周期一般为 25 年, 届时, 大量的光伏组件将面临着报废。本文针对晶硅太阳能电池组件的报废问题, 介绍了国内外对其回收利用的方法, 分析其在回收利用过程中的难点, 采用机械和高温热处理结合的技术, 提出了一种针对废旧晶硅光伏组件回收的自动化工艺路线。

[关键词] 晶硅太阳能电池; 光伏组件; 绿色能源; 回收利用; 自动化

[中图分类号] TK01 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2023)06-0012-04

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2023.06.003

0 引言

光伏能源作为世界上一种可持续发展的清洁能源, 已经越来越受到国际社会的关注和重视。据可靠计算, 光伏组件的使用寿命一般在 25 年左右, 那么, 从第一批光伏组件使用以来, 预计在 2035 年, 光伏组件的报废将迎来高峰, 预计报废组件规模将达 60~70 GW^[1]。随着光伏技术在市场上的不断进步和应用, 废旧晶硅光伏组件的处理和利用问题也逐渐成为国际社会关注的热点问题。一方面, 随着光伏组件的使用寿命的结束或出现故障, 大量的废旧光伏组件的产生给环境保护带来很大的挑战, 造成严重的资源浪费和环境污染; 另一方面, 废旧光伏组件中含有各种有价值的材料和元素, 根据有关报道, 到 2030 年, 我国可回收的废弃光伏组件大概会产生约 100 余万吨玻璃、17 万吨铜片、26 万吨铝边框、5 万吨硅料及 550 吨银等相关材料^[2]。如果将这些资源回收利用, 会产生极大的经济效益, 而且还能减轻对生态环境的破坏和减少碳排放。

废旧晶硅光伏组件的回收利用是提高光伏能源利用率和节约资源的一项重要措施。因此, 制定一

种行之有效的废旧晶硅光伏组件回收利用工艺路线, 对于促进我国光伏能源产业的可持续发展尤为重要。本文将介绍一种可行的废旧晶硅光伏组件回收利用工艺路线, 希望能够为光伏废弃物的回收和环境保护提供一定的参考。

1 晶硅光伏组件的构成

如图 1 所示, 晶硅光伏组件主要由电池片、互联条、汇流条、钢化玻璃、EVA、TPT 背板、铝合金、硅胶、接线盒等九大核心成分组成。通过正面焊接、背面串接、层压敷设、组件层压、修边、状况、焊接接线盒、高压测试、组件测试等工艺过程制造而成。根据欧盟相关机构研究显示, 一块 250 W 左右的光伏组件中玻璃占比 70% 左右, 铝边框占 18% 左右, EVA、电池片、TPT 背板、银分别占 6%、4%、1%、0.15% 左右^[3]。据此可知, 一块光伏组件的大部分材料可回收再利用, 具有很大的回收价值。为光伏组件的结构和各材料重量占比图, 如图 2 所示。

2 国内外晶硅光伏组件回收利用的方法

在对光伏组件回收时, 可以根据光伏组件中电池片的完整度可以将其分为两个方面的需求: 一是电池片已经完全被损坏或结构不完整, 这类电池片可以被硅片制造商回收, 通过粉碎提纯后再通过拉晶、切片工艺制作成硅片; 二是电池片完整或表面仅有轻微损伤, 这类电池片可以被电池片制造商或组件制造商回收再利用, 制作成新的电池片或组件。

[收稿日期] 2023-09-10

[第一作者] 廖源泉(1992—), 男, 湖北黄冈人, 工程师, 硕士, 主要从事光伏及智能制造相关工作。

[引用格式] 廖源泉, 丁杏, 谢振勇. 废弃光伏组件自动化回收的工艺路线研究[J]. 有色设备, 2023, 37(6): 12-15.

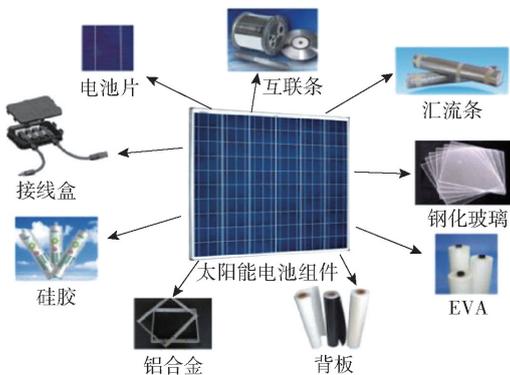


图1 晶硅光伏组件组成成分图

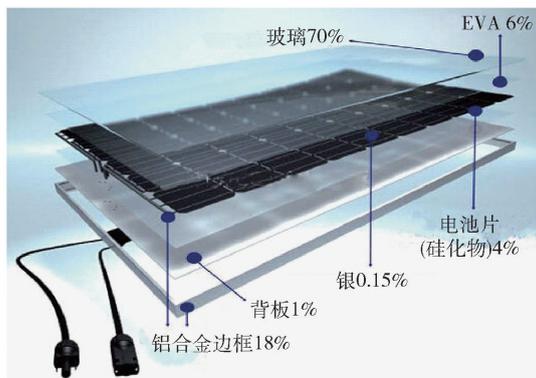


图2 晶硅光伏组件结构及重量占比图

目前,国内外对废弃晶硅光伏组件的回收处理技术方法主要有以下三种。

2.1 物理处理方法

光伏组件回收的物理处理方法是通过对破碎的方式进行分离得到相关材料。具体步骤如下:①对组件进行人工拆除,将接线盒、玻璃、铝边框等材料拆卸;②使用粉碎机等粉碎装置将剩余部分材料粉碎,得到颗粒物;③使用分离装置将颗粒物进行筛选,分离出焊带;④对带有硅片的胶状物进行研磨;⑤使用静电分离的方法得到铝、铜、银等金属材料和硅、TPT背板、EVA等非金属材料。但是此方法不能完全分离出所有材料,分离出的材料中都会含有杂质,纯度不高,该方法已经在欧洲废旧光伏组件回收工厂中得到使用。

2.2 化学处理方法

化学处理方法通过化学溶剂溶解实现各材料的分离,目前主要有无机酸和有机酸两种溶解方法。无机酸溶解法是使用无机混合酸等化学试剂与EVA反应溶解分离玻璃和电池片,但是这种方法需要消耗大量化学试剂,并且会与电池片中的金属材

料反应,不利于对金属材料的回收,另外产生的化学溶液对环境有很大危害。有机酸溶解法的原理是使用如硝酸、盐酸等有机酸溶胀EVA,达到电池片、EVA、玻璃和TPT背板的分离。该方法有一定的优点,如回收的材料多,回收效率较高,但是产生的废酸和溶解过程中产生的有毒气体会对环境造成较大的影响。

2.3 物理与化学结合的方法

这种方法是先对组件进行加热处理,EVA加热到一定的温度后会变软,便于实现电池片与TPT背板、玻璃的分离,之后采用化学方法去除电池片表面多余的杂质。根据相关文献资料,这种方法通过实验发现是可行的,但是在实际处理过程中会产生大量的废液,废液的处理问题又成为新的问题,会对环境造成危害,又为处理废酸工艺增加整体回收成本。

结合国内外已有光伏组件回收案例和技术方法分析,各有优缺点,比如无机酸和有机酸溶解法对环境影响较大,废液处理是个难题,它主要针对EVA的去除和分离,未考虑到边框的拆除和硅片的再利用,方法相对比较单一。而物理分离的方法不能将各种材料完全分离,容易产生混合材料,对分离后的物质利用率不高。综上所述,可以采取多种工艺相结合的方式,取长补短并探索出更加适合的废弃光伏组件回收工艺路线。

3 光伏组件回收过程中的难点

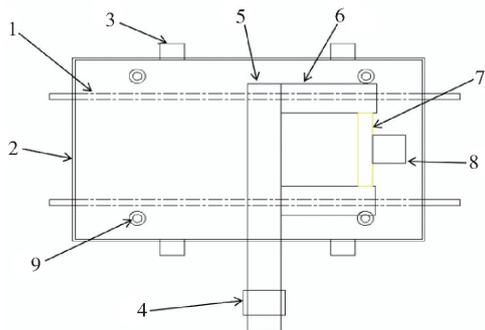
虽然目前国内外针对组件回收已形成一定的技术路线,但是把这些技术推向市场形成规模化的产业还具有一系列难题^[4]。

从技术层面上看,组件回收时所产生的废气、废液、废物等无害化处理是难题。比如含氟背板,如果通过焚烧处理会产生氟化氢等有毒气体;如果采用化学方法处理,产生的碳氟化合物具有非常牢固的化学结构,掩埋后在很长时间都无法被完全降解;从经济效益上看,组件回收的公司规模小,经济收益低,导致市场动力不大。目前只有在欧洲早期开始参与研究的少数公司能够实现盈利,而在国内,想要实现废旧组件规模化的回收,仍然有很长的路要走;从政策法规上讲,国内在光伏组件回收方面或光伏组件无害化处理方面的政策法规仍是空白,导致没有形成相应的产业链。因此,加快组件回收利用迫

切需要相关的政策法规的支持。在此基础上,探索出合适的组件回收方法,二者并行,争取早日实现组件回收量产。

4 一种晶硅光伏组件自动回收的路线

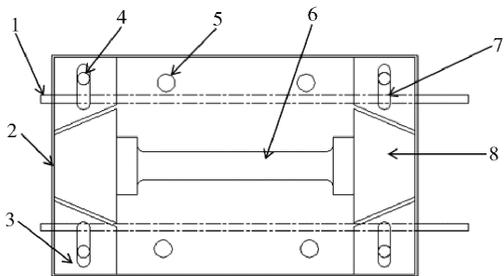
1) 去除接线盒。首先通过机器人抓取一块废弃的光伏组件放在输送线上,利用同步带传输带动晶硅光伏组件移动至接线盒拆解的中部,通过组件定装置定位并压紧组件,这时刀片切入接线盒与 TPT 背板之间,沿着铝合金长边框的方向实现接线盒的分离,将分离的接线盒通过输送线运送至接线盒回收点。接线盒拆解装置示意图如图 3 所示。



1. 升降传输带;2. 组件边框;3. 组件定位装置;4. 滑动块安装板;
5. 切刀手柄;6. 切刀固定装置;7. 刀片;8. 接线盒;9. 组件底面固定吸盘

图3 接线盒拆解装置机构平面示意图

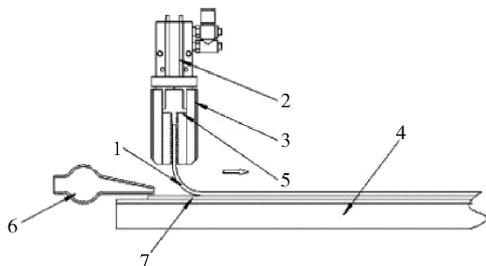
2) 拆除铝合金边框。去掉接线盒的组件传输到铝合金拆除装置,此时,组件被吸盘固定,通过中间双杆液压缸装置带动拆边框组件进行短边的拆解,边框拆除组件带动边框拆除斜面通过滚动装置实现移动进行长边铝合金边框的拆解。铝合金边框拆解装置如图 4 所示。



1. 组件传输带;2. 光伏组件;3. 边框拆除斜面;4. 滚动装置;5. 吸盘固定装置;6. 双向液压缸;7. U型槽口;8. 边框拆除组件

图4 铝合金边框拆解装置平面示意图

3) 去除 TPT 背板。有实验研究表明,在 150 °C 下将去除外框的组件加热 5 min 可实现 TPT 背板与电池板的完整分离,把分离后得到的电池板在 450 °C 下烧结 2 h 可以使 EVA 完全分解,得到干净的电池片和玻璃,EVA 分解后产生的气体为 CO 和 CO₂,稍加处理即可^[5]。因此,本文采用高温热处理方法,将去除外框的组件加热 150 °C 至 5 min,然后采



1. TPT 背板;2. 夹爪气缸;3. 夹爪本体;4. 电池组件;
5. 柔性夹爪;6. 喷嘴;7. 电池组

图5 夹爪剥离装置结构示意图

用剥离刀 + 夹爪 + 热风喷嘴等机械装置^[6-7]实现 TPT 背板与电池板的剥离。夹爪热风装置如图 5 所示。

4) 去除 EVA 和玻璃。将去除背板的电池组置于空气氛围中 450 °C 烧结 2 h 至 EVA 完全分解,最后剩下电池组和玻璃通过高温传动链传输到下一工位,这时的汇流条已经和电池片脱落,在通过吸盘装置将完整的电池片吸放在一旁的收集箱,碎片通过吹扫装置放在另一旁的碎片收集箱,最后的玻璃通过机器人抓取放置固定工位。

综上所述,一块完整的废弃光伏组件得到回收,对应各部分回收材料可以给对应的回收机构回收利用,具体的回收工艺路线如图 6 所示。

5 结语

晶硅光伏组件在不久的将来会引起大规模报废,组件回收将会作为光伏行业的另一大业务增长点,如何抓住组件回收的行业发展风口,需要在组件回收利用的技术上寻得突破。本文介绍了国内外对废弃晶硅光伏组件的回收利用的三种方法,从技术层面、经济效益、政策法规三个方向简要说明了废旧光伏组件回收的难点。并利用高温热处理、烧结及机械装置等技术,提出了一种晶硅光伏组件自动化回收的工艺路线,可实现废旧光伏组件中接线盒、铝合金边框、电池板、EVA、背板 TPT、玻璃等材料的自

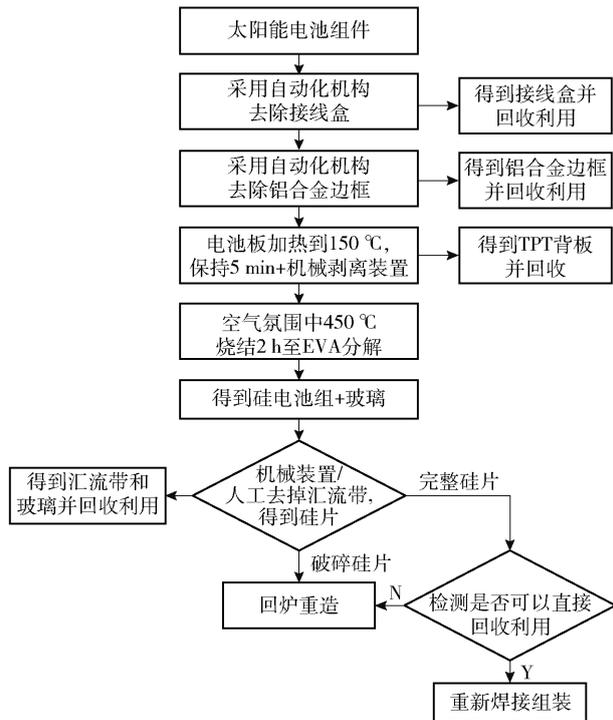


图6 晶硅光伏组件回收利用工艺路线图

动分离。此方法在经济投入、环境保护、技术实现、

回收效益等方面具有一定的意义,希望通过此方法为组件回收利用行业做出贡献。

[参考文献]

- [1] 上官炫烁,何梓瑜,唐梓鹏,等. 退役晶体硅光伏组件的回收技术综述[J]. 太阳能,2021,42(3):14-19.
- [2] 汪韬,李蕊. 光伏组件回收将有150亿美元产值,中国政府仍空白[EB/OL]. (2016-09-01). <http://solar.of-week.com/2016-09/ART-260009-8120-30033078.html>.
- [3] 罗付香,彭晓春,吴彦瑜,等. 废旧晶硅太阳能电池的回收拆解及进展研究[J]. 环境科学与管理,2014,39(12):160-164.
- [4] 殷爱鸣. 废弃光伏组件回收现状与趋势[J]. 分布式能源,2021,6(3):76-80.
- [5] 宋二晓. 废弃晶体硅太阳能电池板资源化工艺研究[D]. 上海:上海第二工业大学,2018.
- [6] 李敦信,李铁军,李义升,等. TPT背板、EVA/电池片、玻璃拆解回收方法和装置[P]. 中国专利:CN201811377292.5. 20181119.
- [7] 杨冬伟,陈正,郭键柄,等. 火法熔炼废旧印刷电路板回收有价金属的现状[J]. 中国有色冶金,2021,50(3):70-74.

Research on the process route of automatic recycling of waste photovoltaic modules

LIAO Yuanquan, DING Xing, XIE Zhenyong

Abstract: Solar energy, as a renewable green and clean energy, has been applied on a large scale all over the world. However, according to research shows that the service life cycle of solar cells is generally 25 years, by then, a large number of photovoltaic modules will face scrap. In view of the scrap of silicon solar cell modules, this paper introduces the recycling methods at home and abroad, analyzes the difficulties in the recycling process, and puts forward an automatic process route for recycling waste silicon photovoltaic modules by combining mechanical and high temperature heat treatment technology.

Key words: crystalline silicon solar cell; photovoltaic module; green energy; recycling; automation ▲