

废旧晶体硅光伏组件回收利用技术及其环境经济效益分析

赵志杰, 赵艳祥, 白柳杨*

黄淮学院能源工程学院, 河南 驻马店

收稿日期: 2022年3月16日; 录用日期: 2022年4月19日; 发布日期: 2022年4月26日

摘要

近年来, 太阳能光伏产业迎来了蓬勃的发展, 太阳能发电技术的日渐成熟, 逐渐替代了传统的火力发电, 有效缓解了目前煤炭等化石能源匮乏的局面, 且大大降低了碳排放量, 改善了城市空气污染的问题。同时, 由此产生的废旧光伏组件也给整个社会环境带来了极大威胁。回收利用废旧光伏组件并进行循环利用, 不仅可以解决上述环境问题, 同时还能弥补资源紧缺和产出可观的经济效益。本文在对晶体光伏组件的组成和结构进行解析的基础上, 分析并对比了热处理法、化学处理法和物理回收法3种主流的光伏组件回收利用技术。对我国关于废旧光伏组件回收的相关政策进行了研究, 并对光伏组件的回收再利用前景进行了展望。

关键词

废旧晶体光伏组件, 资源回收, 政策

Analysis on Recycling Technology and Environmental and Economic Benefits of Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules

Zhijie Zhao, Yanxiang Zhao, Liuyang Bai*

College of Energy Engineering, Huanghuai University, Zhumadian Henan

Received: Mar. 16th, 2022; accepted: Apr. 19th, 2022; published: Apr. 26th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 赵志杰, 赵艳祥, 白柳杨. 废旧晶体硅光伏组件回收利用技术及其环境经济效益分析[J]. 环境保护前沿, 2022, 12(2): 295-302. DOI: 10.12677/aep.2022.122040

Abstract

In recent years, the solar photovoltaic industry has ushered in vigorous development, and the solar power generation technology is becoming more and more mature, gradually replacing traditional thermal power generation, effectively alleviating the current shortage of fossil energy such as coal, greatly reducing carbon emissions, and Improving the problem of urban air pollution. At the same time, the resulting waste photovoltaic modules also bring a great threat to the entire social environment. Recycling and recycling waste photovoltaic modules can not only solve the above-mentioned environmental problems, but also make up for the shortage of resources and produce considerable economic benefits. Based on the analysis of the composition and structure of crystalline photovoltaic modules, this paper analyzes and compares three mainstream photovoltaic module recycling technologies: heat treatment, chemical treatment and physical recycling. The relevant policies on recycling of waste photovoltaic modules in China are studied, and the prospects for the recycling and reuse of photovoltaic modules are prospected.

Keywords

Waste Crystal Photovoltaic Modules, Recycle, Policy

Copyright © 2022 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

光伏发电是一种将太阳能转化为电能的新能源技术。近年来光伏产业发展迅速，具有安全、可靠、清洁高效和可持续性等优点[1]。随着能源紧张、环境污染、气候变化等问题日益突出，由清洁能源替代传统能源的能源革命正在悄然上演，而太阳能是最具潜力的清洁能源之一[2]。在各类太阳能利用技术中，光伏组件由于发电期间无噪声、无二氧化碳、操作维护简单而受到各国青睐。随着经济的不断发展以及政策的推动，我国光伏发电技术和成本控制均具有明显的竞争优势。据统计 2019 年全球光伏累计装机容量达 627 GW，其中我国光伏累计装机容量为 204.7 GW，远超“十三五”规划目标[3]。2020 年 9 月 21 日，在第 75 届联合国大会一般性辩论上，国家主席习近平做出了“3060”承诺，即“二氧化碳排放量力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”的承诺，该承诺将我国光伏产业的发展再一次推上了新的高峰[2]。随着光伏产业的迅速发展，也迎来了新的严峻的问题，光伏组件的使用寿命一般为 25 年，随着时间的推移，在未来，我国光伏组件的废弃量将剧增。而光伏组件中含有玻璃、硅、铝、EVA 胶等可利用资源，还含有少量的银、镓、碲、铟等稀有金属，具有极大的回收价值。同时，若不妥善处理废弃的光伏组件，不仅会造成大量的资源浪费，还会对环境造成巨大的危害[3]。目前，我国的废旧光伏组件回收技术仍不完善。为了光伏产业的可持续发展，节约资源，保护环境，应积极开展对废旧光伏组件回收再利用的研究，同时也需要国家出台相应的政策支持。

2. 晶体硅光伏组件的组成和回收价值

晶体硅光伏组件一般分为单晶硅光伏组件和多晶硅光伏组件，其中单晶硅光伏组件的技术最成熟，转换效率最高。两种光伏组件的主要结构是相同的，可分为五个部分：金属外框、钢化玻璃、晶体硅片、

背板、EVA。如图 1 所示。

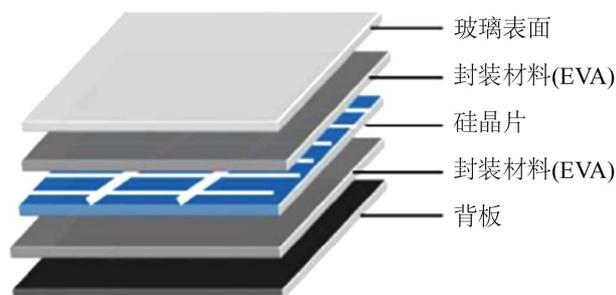


Figure 1. Basic composition diagram of crystalline silicon photovoltaic module

图 1. 晶体硅光伏组件的基本组成图

由于生产厂家不同, 采用的原料存在部分差异, 所以光伏组件的结构以及各部件重量比例也会存在一定的差异。晶体硅太阳能光伏组件的组成结构的重量占比如表 1 所示[4] [5], 玻璃占整个光伏组件质量的 68%, 铝边框占 17.74%, 硅片占 3.46%, 三者占比超过了总质量的 88%。由此可得出, 光伏组件中含有大量的潜在的可重复利用的资源[6]。玻璃、铝框架、锡铜线和银网格线经过加工均可获得新的工业产品, 而硅片中的稀有金属铟、镓、锗、碲等同样可回收利用于新设备的生产[7]。晶体硅太阳能光伏组件有超过百分之九十的材料可被再次回收利用, 具有极高的经济价值。

Table 1. Material weight distribution of crystalline silicon photovoltaic modules

表 1. 晶体硅光伏组件的物质重量分布

比较项目	铝边框	玻璃	硅片	EVA	银镀层	TPT 背板	铝镀层	合计
质量/kg	4.2	16.1	0.82	1.6	0.01	0.83	0.11	23.67
比例/%	17.74	68.02	3.46	6.76	0.05	3.51	0.46	100

在通过对国内外废旧光伏组件回收技术进行分析后发现, 回收的主要难点在于如何高效的去除晶体硅光伏组件中的 EVA 层。EVA 是乙烯和醋酸共聚而成的。一般醋酸乙烯(VA)的含量在 5%~40%, 与聚乙烯(PE)相比, EVA 由于在分子链中引入醋酸乙烯单体, 从而降低了高结晶度, 提高了韧性、抗冲击性、填料相容性和热密封性能。在晶体硅光伏组件中 EVA 充当了粘合剂, 把晶体硅片固定在玻璃板和背板之间。如果能将 EVA 层高效的破坏掉, 就可以使晶体硅片最大程度的保留完整性, 为后续的回收带来便利[8]。

3. 回收技术

废旧晶体硅光伏组件的回收一般分为: 拆卸运输、消除 EVA 层、刻蚀电池和金属提取[9]这套回收流程不仅可以回收铝边框、玻璃、晶体硅太阳电池, 以及铟、镓、锗、碲等稀有金属外, 还能最大程度上的处理掉有害物质[8]。

现今较为成熟的废旧晶体硅光伏组件回收处理技术主要包括物理法、化学法和热处理法。

3.1. 物理法

物理法俗称机械法, 指将晶体硅光伏组件中可回收再利用的部分通过机械设备将其切割成小块或研磨成小颗粒后, 通过筛分不同直径的颗粒, 对含有 EVA 的部分进行热处理再进行回收, 该方法一般需

要先将铝边框拆除后进行。

GRANATA 等[10]先在拆下框架的组件上使用转子破碎机破碎，然后用锤式破碎机破碎，最后以一种热处理方法去除有机成分，例如胶膜，最后再使用不同口径 d 的过滤网将不同的材料分离，分离出的材料如图 2 所示[8]。

图 2 中， $d > 0.008 \text{ mm}$ 的粉碎物中，基本上都是玻璃碎块，而 $d \leq 0.08 \text{ mm}$ 的粉碎物中主要是晶体硅片。部分残渣如图 2 中(d)图所示，是玻璃碎块和硅粉的混合物，很难被回收。因玻璃碎块上还掺有 EVA 等残渣，所以还需通过后续的热处理流程才能够回收[8]。这种方法回收后的玻璃重量可达到原重量的 80%~85%。据研究发现，增加对材料的粉碎次数，可以将玻璃的回收率提高到 91% [11]。



Figure 2. After crushing, the materials separated from the filter screen with different diameters d

图 2. 经过粉碎处理后，过滤网口径 d 不同时分离出的材料

机械法的优点在于回收所需的成本非常低，尤其对于玻璃的回收率极高。但缺点也同样明显，其能够回收的成分很有限，硅和稀有金属并未被有效的回收。

有研究表明，在足够低的温度环境下(-196°C)，晶体硅光伏组件“三明治”结构的边界会变得非常

脆弱[12]中国英利公司研究出来一种载低温条件下处理晶体硅光伏组件的办法——深冷研磨法。该技术是先先将废旧晶体硅光伏组件的铝框架拆除后,对其进行剪切、挤压和在低温下磨削,最后通过不同口径的滤网分离出硅、玻璃、EVA颗粒和背板颗粒。这种方法的优点在于能耗较低,且没有热处理过程,能有效的回收部分材料[13]。这种技术虽然过程较简单,无需进行化学反应,但得到的硅粉纯度不高,不能直接用于制造新的晶体硅板,所以还需对此技术加以改进。

采用物理方法对废旧晶体硅光伏组件进行回收,优势为回收过程中不使用化学试剂,污染小,能有效回收光伏组件中的玻璃、硅和部分金属。对机械设备的要求也不高,可实现自动化,大批量的回收废旧晶体硅光伏组件,这对于光伏回收企业来说,可有效的降低成本提升利润。缺点则在于回收到达玻璃、硅,金属等纯度较低,含有较多的杂质,需后续再处理才能提高产品价值。

3.2. 化学法

普通的回收方法得到的材料纯度较低,为了得到高纯度的硅和金属,一般会使用化学试剂来处理光伏组件。此方法的原理是利用了EVA在化学试剂中会氧化和分解的特点[2]。(通过将层压片浸入化学溶剂中以实现层压件的分离。同时,化学溶解法又可分为无机酸溶解法和有机酸溶解法。无机酸溶解法一般采用硝酸和过氧化氢的混合物。有机酸溶解法一般采用、甲苯、三氯乙烯、苯、邻二氯苯或丙酮等溶剂[14],利用机溶剂使EVA的膨胀,从而达到让层压件分离的目的。

在化学溶解方法中,硅的回收率和再利用率通常是可以高达90%以上,与此同时该方法可以获得完整的硅片[2]。在废旧晶体硅光伏组件的工业回收中,通常将光伏组件置于80℃的条件下的三氯乙烯中溶解10天,可达到不伤害晶体硅片的回收效果[8]。

化学法的优点在于,提取出来的硅和各种金属的纯对都很高,可直接运用到新产品的加工中,极大的提高了产品的价值。缺点是在溶解过程中,消耗的化学试剂量过多,且反应速度较慢,同时,此过程中产生的废液如果不妥善处理,将会对环境造成很大的危害。在工艺方面若控制不当,将会造成EVA的过度膨胀,从而压碎晶体硅板,因此无法做到系统化的大规模应用。

3.3. 热处理法

热处理法通常指在加热条件下,对光伏组件中的EVA进行软化、剥离或者分解从而达到分离玻璃,晶体硅板和盖板的目的的方法。热处理法又分为低温热处理法和高温热处理法。

低温热处理法是利用了EVA在达到一定的温度时会软化易剥离这一原理,如DONI等[15]把光伏组件放置于一种射频电流加热板时,在功率为400W的条件下,加热15min,可将光伏组件上的大部分碎玻璃移除。ERCOLE等[16]则是使用的红外加热器,将晶体硅光伏组件放置于平板上加热至70~150℃,使EVA软化,最终达到盖板玻璃与晶体硅板分离的目的。这种方法优点为分离盖板玻璃和EVA比较简单,缺点是EVA不能彻底被分离,会有一部分EVA残留在玻璃和晶体硅板表面,去除率不高[1]。

高温热处理法则是利用了EVA在高温下会分解的特性,从而达到去除EVA的目的。高温热处理法可分为有氧热处理法和无氧热处理法。这两种方法对EVA的去除率都非常高,都达到了99%以上,目前已被部分企业应用到了实际的处理过程中[2]。不过在使用高温热处理法时,一定要保证光伏组件受热均匀,否则若造成局部过热,将会导致光伏组件内部的晶体硅板碎裂[17],从而降低完整晶体硅板的回收率。

3.4. 三种方法适应性分析

以上三种方法各有优缺点,和适用条件。物理法适用于大规模粉碎废旧晶体硅太阳能组件。相较于另外两种方法,自动化的机械设备,使其可以高速高效的回收大量的废旧晶体硅太阳能组件。同时,简

便的处理条件大大节省了回收过程中所需的成本。但物理法的缺点也很明显,在回收过程中,纯粹的物理反应,很难将晶体硅太阳能组件中的硅和贵金属分离出来,因此大大降低了回收价值。化学法适用于资金较充足的企业使用,相较于物理法对贵金属的低回收率,化学法在回收过程中,通过多种化学试剂和晶体硅光伏组件产生化学反应,提取出来了纯度非常高的硅和各种金属,可直接运用到新产品的加工中,极大的提高了产品的价值。不过化学法的缺点同样明显,因为化学反应需要大量的时间,所以化学法消耗的时间较多,效率较低。与此同时,产生的化学试剂废液若处理不当,将会给环境带来很大的危害。热处理法兼容了物理法的低成本和化学法的高纯度回收优点,但是热处理法对于技术的要求较高,目前,热处理法的技术还不完善,存在很多的技术困难,在回收过程中也很不稳定。国内外部分相关企业正在努力攻克技术壁垒。

4. 晶体硅光伏组件回收行业发展趋势

根据国家能源局的统计,截止至 2021 年八月底,我国光伏发电装机容量为 274461 万千瓦,已达到了我国各电力结构总装机容量的 12.04%,光伏电站的寿命一般为 25 年左右。根据预测,2030 年将达到光伏组件报废的一个高峰。由此可见,光伏组件回收市场蕴含着极大的商业价值。但我国的光伏组件回收行业发展的并不理想,因为此前废旧光伏组件的回收技术并不完善,大部分仍处于实验室研发阶段,我国很多学者将目光关注于光伏组件的生产技术革新以及在生产过程中对环境有害的污染物防治,只有很少部分人关注能耗低、污染小,经济可行的光伏组件回收的技术和政策体系,致使我国对于报废光伏组件的处理方法研究较少,还没有形成完整的处理工艺。我国光伏组件的回收规模目前还较小,更没有形成相应的产业链。可以认为现阶段我国对于废旧光伏组件的回收刚刚起步,专门对光伏组件废弃处理、回收的法律政策法规更是一片空白,也没有明确规定哪些单位或者部门来承担废旧光伏组件的回收工作,这对废旧光伏组件的回收工作带来挑战[18]。与此同时,由于我国已建的光伏组件中有很大一部分都处于偏僻的西北地区,这就导致了回收过程中的运输成本提高,极大的降低了回收的性价比,国家也没出台相应的政策支持和经济补贴,这也使得相关企业的积极性不高。

从全球范围来看,目前只有欧盟从政策层面出台了针对废旧光伏组件回收的完善管理制度[19]。类似于欧盟的 WEEE 政策,此前我国也于 2009 年 2 月 25 日出台了《废弃电器电子产品回收处理管理条例》并于 2011 年 1 月 1 日起开始执行。此条例中规定处理废弃电器电子产品的企业将依照国家有关规定享受税收优惠。但按照产品[20]的结构来说,晶体硅光伏组件虽然属于电器电子产品,但回收的重点和技术与其他电子电器产品不同,回收过程复杂且补贴较少,从而导致了相关企业不愿耗费过多资源去回收光伏组件。

随着近些年来光伏产业的高速发展,我国光伏装机容量不断提高,国家已经开始重视退役后的光伏组件该如何回收的问题。2021 年 7 月 1 日,国家发改委签发的《“十四五”循环经济发展规划》(以下简称《规划》)中提到当前,我国循环经济发展仍面临重点行业资源产出效率不高,再生资源回收利用规范化水平低,回收设施缺乏用地保障,利用不充分综合利用产品附加值低等突出问题。动力电池、光伏组件等新型废旧产品产生量大幅增长,回收拆解处理难度较大。循环再利用品质与成本难以满足战略性新兴产业关键材料要求,亟需提升高质量循环利用能力。无论从全球绿色发展趋势和应对气候变化要求看,还是从国内资源需求和利用水平看,我国都必须大力发展循环经济,着力解决突出矛盾和问题,实现资源高效利用和循环利用,推动经济社会高质量发展。为响应《规划》的要求,2021 年 9 月 10 日,国家发展改革委向社会公开征集《中华人民共和国循环经济促进法》的修订意见和建议,征求意见提纲中提到,我国将开始建设废旧物资特别是废弃电子信息产品、动力电池、风机叶片、光伏组件、汽车及零部件、废塑料、废旧纺织品等回收体系。

随着“双碳”目标的提出,国家能源未来10年的重心一定会在绿色清洁能源上,光伏发电作为我国主要的新能源发电方式,将会获得更多的关注与支持,同时废旧光伏组件回收的问题,也将成为重点关注和解决的问题,国家一定会出台越来越多的支持政策和资金补贴,目前已经可以看出这样的趋势,废旧光伏组件回收产业的前景和未来定将一片大好。

5. 结论

本文针对废旧光伏组件回收的现状以及三种主要的回收方法:物理法、化学法、热处理法进行了介绍。另外从经济方面和技术方面分析了废旧光伏组件的回收难点。最后从政策层面对未来废旧光伏组件回收产业前景进行了分析。面对即将到来的光伏组件报废浪潮,目前国内的各种回收技术已经趋于成熟。但现阶段我国的回收产业规模很小,未形成相应的完善的产业链。要达到高效率、高回报、低成本的目的,不仅要在技术方面推陈出新,更需要国家相关部门出台更多的政策支持,为实现我国绿色发展共同做出努力。

6. 展望

我国光伏产业正处于上升期,回收技术在不断的革新,国家也开始将目光放在光伏组件回收方面。陆续出台的政策,为发展光伏回收产业带来了巨大的动力和信心。在不久的将来,光伏回收产业一定会形成一条完整的产业链。在保护环境的同时,产生非常可观的经济效益。

基金项目

本研究得到国家自然科学基金(11875284)、河南省科技发展计划项目(212102311155)、河南省高校科技创新人才项目(21HASTIT020)等项目的支持。

参考文献

- [1] 周哲,孙凯文,蒋良兴,贾明,刘芳洋. 废旧光伏组件回收技术研究进展[J]. 中南大学学报, 2020, 51(12): 3279-3288.
- [2] 孙泽洋. 废旧晶体硅光伏组件回收方式浅析[J]. 太阳能, 2021(9): 9-12.
- [3] 许海园,刘子靖,梁东义,张兴,郭婧滢. 浅谈光伏组件的回收再利用技术[J]. 机电信息, 2020(29): 105-108.
- [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] 李鹞. 中国晶体硅太阳能电池板的生命周期评价[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2015.
- [6] Yi, Y.K., Kim, H.S., Tran, T., et al. (2014) Ecovering Valuable Metals from Recycled Photovoltaic Modules. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **64**,797-807. <https://doi.org/10.1080/10962247.2014.891540>
- [7] 郭丹. 光伏发电现状及其环境效应分析[D]: [硕士学位论文]. 保定: 华北电力大学, 2016.
- [8] 上官炫烁,何梓瑜,唐梓彭,张骏,魏超,李岳纯. 退役晶体硅光伏组件的回收技术综述[J]. 太阳能, 2021(3): 14-19.
- [9] Deng, R., Chang, N.L., Ouyang, Z., et al. (2019) A Techno Economic Review of Silicon Photovoltaic Module Recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **109**, 532-550. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.020>
- [10] Granata, G., Pagnanelli, F., Moscardini, E., et al. (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>
- [11] Pagnanelli, F., Moscardini, E., Granata, G., et al. (2016) 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>
- [12] Dassisti, M., Florio, G., Maddalena, F., et al. (2017) Sustainable Design and Manufacturing. Springer International Publishing, Cham, 637. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57078-5_60
- [13] 王士元,王占友,周海亮,等. 一种光伏组件分解回收的方法及其装置[P]. 中国专利, CN102544239A.

- 2012-03-07.
- [14] 周哲, 孙凯文, 蒋良兴, 等. 废旧光伏组件回收技术研究进展[J]. 中南大学学报, 2020, 51(12): 3279-3288.
- [15] Doni, A. and Dughiero, F. (2012) Electrothermal Heating Process Applied to c-Si PV Recycling. 2012 38th *IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Austin, 3-8 June 2012, 757-762. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2012.6317715>
- [16] Ercole, P., Ramon, L. and Agnoletti, O. (2016) Method and Apparatus for Detaching Glass from a Mono- or Polycrystalline Silicon-Based Photovoltaic Panel. EU, 15185389.2.
- [17] Lee, J.K., Lee, J.S., Ahn, Y.S., *et al.* (2018) Simple Pretreatment Processes for Successful Reclamation and Remanufacturing of Crystalline Silicon Solar Cells. *Progress in Photovoltaics*, **26**, 179-187. <https://doi.org/10.1002/pip.2963>
- [18] 陈东坡. 废旧光伏组件回收再利用需重点关注[J]. 中国投资, 2017(3): 72-73.
- [19] 江华. 废弃光伏组件回收处理政策的研究[J]. 太阳能, 2021(3): 9-13.
- [20] 国务院. 废弃电器电子产品回收处理管理条例[EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/2020-12/27/content_5573838.htm, 2009-02-25.