赵大明,苗 博,武 阳,等.基于全生命周期评价的典型废旧光伏板回收技术降碳潜力研究 [J]. 中国环境科学, 2026,46(3):1736-1746.
Zhao D M, Miao B, Wu Y, et al. Carbon reduction potential assessment of typical waste photovoltaic panel recycling technologies under life cycle assessment [J]. China Environmental Science, 2026,46(3):1736-1746.

基于全生命周期评价的典型废旧光伏板回收技术降碳潜力研究

赵大明[1],苗 博[1],武 阳[2,3,5],王忠强[2],崔天傲[2,4,5],刘 哲[2],吕龙义[2*],高文芳[2*] (1.中国电力科学研究院有限公司,北京 100192；2.河北工业大学能源与环境工程学院,天津 300401；3.中国科学院生态环境研究中心,北京 100085；4.中国科学院过程工程研究所,北京 100190；5.中国科学院大学,北京 100049)

摘要：建立了一套废旧光伏板回收处理技术碳足迹核算评价体系,利用生命周期评价方法(LCA),针对光伏板中核心金属的回收利用,选取典型的碱-酸电积法,改进的反电镀-碱-酸法,改进的盐蚀刻法 3 种废旧光伏板回收处理技术进行环境影响评价和碳足迹核算分析.通过 LCA 归一化分析,3 种工艺对环境的影响依次为典型的碱-酸电积法>改进的反电镀-碱-酸法>改进的盐蚀刻法.敏感性分析表明,前 2 种工艺中使用的氢氟酸与醋酸的量相对较小,导致其敏感性最高.通过物质流和碳流动分析表明盐蚀刻的化学废物产生量与碳排放量大幅减少.进一步的降碳潜力分析探讨了各工艺在减排方面的改进空间,得出 3 种工艺均在低碳能源情景下有较高的降碳潜力,其中改进的盐蚀刻法的综合降碳潜力高达 82%.碳足迹分析结果表明,改进的盐蚀刻方法处理工艺的效果最好(0.83kg CO2eq).本研究精准量化了废旧光伏板回收技术的碳足迹,并指出绿色低碳发展方向,可为政府和企业对废旧光伏板回收处理技术的选择和优化提供参考.

关键词：废旧光伏板；处理技术；碳足迹；生命周期评价；降碳潜力
中图分类号：X87 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)03-1736-11

Carbon reduction potential assessment of typical waste photovoltaic panel recycling technologies under life cycle assessment.

ZHAO Da-ming[1], MIAO Bo[1], WU Yang[2,3,5], WANG Zhong-qiang[2], CUI Tian-ao[2,4,5], LIU Zhe[2], LV Long-yi[2*] ,GAO Wen-fang[2*] (1.China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China；2.School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401,China；3.Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China；4.Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China；5.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *China Environmental Science*, 2026,46(3)：1736~1746

Abstract：The recycling of waste photovoltaic panels is of great significance for environmental protection and the realization of resource recycling. Under the national dual carbon policy, the carbon footprint assessment, evaluation of waste photovoltaic panel recycling and treatment technology have become key issues for the sustainable development of the photovoltaic industry. This paper establishes a carbon footprint evaluation system for the recycling of waste photovoltaic panels. Using the Life Cycle Assessment (LCA), the environmental impact assessment and carbon footprint analysis are conducted for three typical recycling technologies for waste photovoltaic panels (*i.e.*, the alkaline-acid electrolysis method (PI), the improved reverse electroplating-alkaline-acid method (PII), and the improved salt etching method (PIII)). Through LCA normalization analysis, the environmental impacts of the three processes are typical alkali-acid electrowinning method > improved reverse electroplating-alkali-acid method > improved salt etching method. Sensitivity analysis indicates that PI and PII use relatively small amounts of hydrofluoric acid and acetic acid, resulting in the highest sensitivity. Material flow and carbon flow analysis clearly demonstrated the sources and sinks of material consumption and carbon emissions. The results showed that the chemical waste generation and carbon emissions of PIII were significantly reduced. Further carbon reduction potential analysis explored the improvement space for each process in terms of emissions reduction, concluding that all three processes have high carbon reduction potential under a low-carbon energy scenario, with the improved salt etching method achieving a comprehensive carbon reduction potential of up to 82%. Carbon footprint analysis indicate that the improved salt etching method achieves the best performance (0.83kg CO_2eq). This study precisely quantifies the carbon footprint of waste photovoltaic panel recycling technologies and identifies directions for green and low-carbon development, providing reference for government and enterprise decision-making and optimization of waste photovoltaic panel recycling technologies.

Key words：waste photovoltaic panels；treatment technology；carbon footprint；life cycle assessment；carbon reduction potential

收稿日期：2025-08-10
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52300232);天津市科技计划项目(23JCQNJC00970)

* 责任作者：吕龙义, 副教授, lvlongyi@hebut.edu.cn; 高文芳, 副教授, wfgao@hebut.edu.cn

光伏产业作为可再生能源发展的重要方向,在全球发展迅猛,中国、印度、墨西哥等国家光伏装机量持续上升[1].然而,光伏板的使用寿命一般为 25~30a[2],大量光伏板的退役必定会产生废弃物.中国预计在 2030 年面临大规模光伏退役造成的废弃物问题,印度到 2040 年面临光伏废弃物也将显著增加[3].废旧光伏板的不当处理会带来严重的环境风险.例如,填埋可能导致有害物质泄漏,污染土壤和水源[4].并且光伏板中含有玻璃、铝、硅、铜、银等可回收利用的材料,对废旧组件进行回收处理可实现资源循环利用,减少原生材料生产产生的碳排放[5],能够有效应对我国即将面临的退役潮[6-7].

近年来,报废的废旧光伏组件处理过程潜在问题成为研究重点[8].目前已有多个研究采用综合评价,生命周期评价(LCA),碳足迹评价等方法对废旧光伏板的回收技术进行了评价.Sharma 等[9]运用 LCA 方法对比了填埋报废晶硅组件与通过材料回收实现的“避免负担法”对环境的影响,研究表明太阳能光伏组件回收及材料再利用可使后续生产阶段的环境影响降低高达 70%.Faircloth 等[10]使用 LCA 比较了晶体硅板直接报废填埋与两种不同处理方法回收对环境的影响,研究指出回收可避免贵重金属浪费,相比填埋更具有环境优势. Bartie 等[11]基于可扩展确定性模拟模型进行生命周期系统分析,发现多种循环利用可提升产能,降低能耗并减少碳足迹.An 等[12]从产品全生命周期角度出发,发现先进的生产技术和彻底的废物处理可减少大量碳排放.他们的研究结果均得出废旧光伏板回收可以减少碳排放,但对具体回收技术的降碳潜力研究有所欠缺.Santoyo-Castelaz 等[13]利用 LCA 对一套多晶硅并网光伏系统进行评估,发现与 3 种传统光伏系统相比,该系统在回收过程中的多数影响类别负担最低,全球变暖潜能值(GWP)最低.Chen 等[14]研究发现全球标准和政策的制定对太阳能光伏板的长期可持续运行,光伏组件废物的有效管理以及减少碳足迹至关重要.Preet 等[15]批判性评估了一系列光伏板回收解决方案的成本和环境影响,发现硅基光伏板在发电中起着至关重要的作用,可显著减少碳足迹.Mazzi 等[16]用 LCA 重点分析了 9-Tech 公司开发的创新性晶体硅光伏组件回收工艺,结果显示,材料回收率最高的工艺环节在所有影响类别中均带来最大环境效益.尽管上述研究取得了重要进展,在全球大力推进可持续能源发展的背景下,当前针对废旧光伏板回收过程中碳足迹核算的研究仍存在不足.一方面,受功能单元设定,系统边界划定以及影响分析方法差异的影响,研究间结果可比性较差,缺乏统一评价标准;另一方面,对回收过程的评估也有欠缺,有害副产品的产生机制,成分及长期环境影响探究不深,运输环节的能源消耗,排放及成本影响常被忽视.因此,亟需基于 LCA 方法开展废旧光伏板回收碳足迹核算研究,对实现"双碳"目标具有重要的战略意义[17-18].

本研究利用 LCA 方法进行碳足迹核算,围绕废旧光伏板回收处理中的典型技术进行碳足迹核算与降碳潜力研究,对传统碱-酸电积法,改进的反电镀-碱-酸法和改进的盐蚀刻法 3 种典型回收工艺进行归一化分析与敏感性分析,量化 3 种工艺中药品消耗与电力使用对环境的影响,重点评估全球变暖潜能值.同时,基于物质流分析,定量分析不同工艺流程中输入流与输出流投入物质量的大小,并聚焦于流程中碳的产生,流动与去向进行讨论;通过降碳潜力分析,对工艺中可能的降碳减排作出假设,旨在为优化废旧光伏板回收工艺提供参考.

1　研究方法

1.1　方法建立

本研究从技术,环境的角度对典型的 3 种光伏板回收技术(典型的碱-酸电积法,改进的反电镀-碱-酸法,改进的盐蚀刻法)进行定量分析,运用 LCA 方法针对不同处理工艺和工艺不同阶段(银回收阶段,硅回收阶段),对光伏板回收处理技术进行碳足迹核算.利用 Gabi 软件中的 CML2001-Aug.2016 方法进行 LCA 计算,选择 10 种影响类别进行分析,包括非生物耗竭潜能(ADP),酸化潜能(AP),富营养化潜能(EP),淡水水生生态毒性潜能(FAETP),全球变暖潜能(GWP)和人类毒性潜能(HTP),臭氧层消耗潜能(ODP),海洋水生生态毒性潜能(MAETP)光化学臭氧生成潜能(POCP)和陆地生态毒性潜能(TETP).针对全生命周期进行碳足迹评价研究从而确定最佳废旧光伏板回收工艺.通过归一化分析将不同量纲,数量级的环境指标转换为统一的无量纲数值,进而对不同工艺的同一环境指标进行对比;并通过敏感

性分析,控制变化量为 5%,确定最敏感的主要变量因素.碳足迹评价[19]主要通过运行 Gabi 软件,计算具体药品与电力消耗产生的碳排放量,分析对比 3 种工艺总的碳排量与每个工艺单独环节中产生的碳排量结果,确定最佳的工艺方案.

1.2 系统边界

废旧光伏板回收链包括铝框架和接线盒的机械拆卸;玻璃,焊料和硅片的分离;银,铝等金属的回收[20].传统方法中银的回收,通常将经过预处理的废旧光伏板溶解在硝酸中,通过电积法从溶液中回收[21].在此过程中酸性溶液对银的溶解会导致氮氧化物和废弃溶液等有毒的物质产生,并且电积法回收银需要较为稳定的贵金属做阳极,进一步提高了回收过程的成本.本文研究了典型的碱-酸电积法(M1),改进的反电镀-碱-酸法(M2),改进的盐蚀刻法(NaOH-KOH 蚀刻体系,M3)3 种废旧光伏板回收处理技术.如图 1 所示,系统边界从废旧光伏板物理拆解开始,到资源回收以及废物排放结束,包括回收过程的所有输入和输出.研究时将整个过程分为银,硅等金属回收和预处理两部分.回收过程由预处理阶段的物理反应和金属回收阶段的化学反应组成.

在 M1 中,通过 KOH 进行有控制的沥滤处理去除晶片底面的铝,然后清洗碎片去除残余的 KOH.接着使用 HNO_3 溶液去除晶圆顶面的银铝通道和薄 Si_3N_4 层.HNO_3 具有强氧化性,如果在 KOH 处理之前进行此步骤,则会在背面形成氧化铝钝化层.在预研磨步骤中,使用滚动球磨机将大的硅晶片碎屑转化为粗粉.接着使用行星球磨机进一步研磨,获得细硅粉,用作锂离子电池的阳极材料.在 pH 值为 3 的缓冲溶液中按 1:1:1 的比例加入硅粉,炭黑和羧甲基纤维素的干混合物,然后涂在铜箔上,制备硅基阳极.

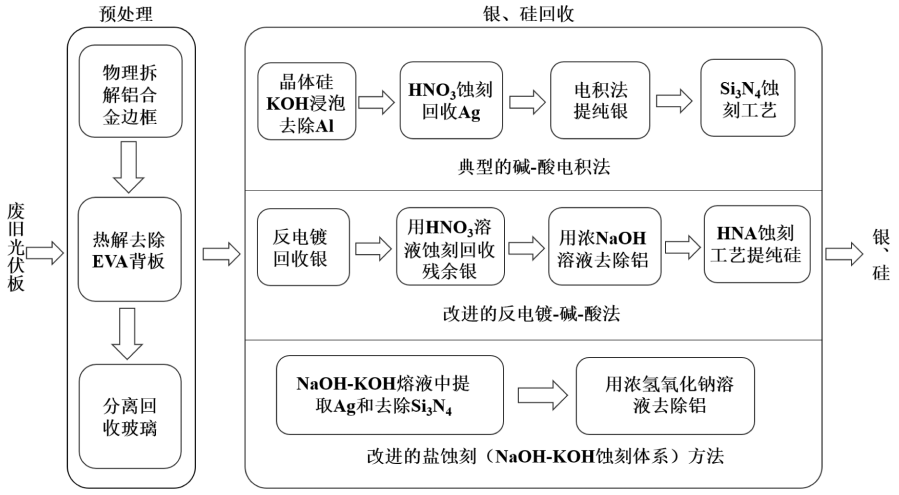


图 1 三种典型光伏板回收技术的系统边界

Fig.1 System boundary of three typical waste photovoltaic panel recycling technologies

M2 采用稀释的镀银溶液作为回收电解液来回收光伏板中的银.其主要成分是 $AgNO_3$ 和 KNO_3,在去离子水中按 1:5 的比例稀释,得到浓度约为 5.0g/L,pH 值为 7 的最终电解质溶液,使用 20%氢氧化钠溶液有效去除铝背场并生成不溶于水的硅铝酸钠残渣;随后通过氢氟酸/硝酸/醋酸(HNA)混合溶液短时浸泡,进一步去除表面杂质.泵提供物理循环以提供太阳能板表面的溶液.外部电源提供恒定的直流电来驱动电化学反应.电流驱动银金属从阳极溶解,并在阴极上沉积银离子.实验结束时收集溶液,其溶液可以重复使用[22],确保了资源的高效利用,循环化学过程在回收过程中最大限度地减少了化学品的消耗.所有实验均在室温下进行.

M3 的工艺流程与 M2 大致相同,但使用了一种简单的盐蚀刻方法从报废的光伏板中回收重要金属资源银和硅,其工艺的优势在于利用熔融氢氧化物的高腐蚀性,通过自顶向下的方向与硅片表面的 SiN_x,SiO_2,Al_2O_3 和 Al 自发反应,从而直接将银从硅片中分离出来,回收过程不使用有毒矿物酸,不产生二次污染.且过程只需要 180s 就可以从报废的硅太阳能板中回收>99.0%的银和>98.0%的硅.此外,还可以通过氧化,碱浸和电沉积相结合的方法回收硅太

阳能板中的 Cu,Pb,Sn 和 Al.

废旧光伏板回收处理时的输入为经预处理后的光伏板,电能和化学品,输出为银,硅等金属和化学废物.其中化学废物有固液气 3 种形态,其中废气如氟化氢,盐酸气体和有机挥发组分等;废液成分有强酸溶液和含有重金属离子的废液;危险固体废物包括含重金属的化学污泥和废弃 EVA 胶膜和背板残渣.为方便计算,对 3 种废旧光伏板处理工艺进行如下假设:(1)整个废旧光伏板回收处理系统保持稳定;(2)回收处理过程中,外部环境的变化不影响处理过程;(3)处理过程中的各个阶段均符合污染物处理和环境保护法律法规的安全管理要求;(4)在计算评价时仅考虑废旧光伏板处理过程,废物运输,物理过程未纳入评价.

1.3　功能单位

研究旨在定量分析和比较 3 种废旧光伏板回收处理技术的碳足迹,环境影响,包括不同的原料输入,成本投加,资源消耗和污染物排放,将功能单位定义为处理 1kg 废旧光伏板,所有成本,能耗,排放均以该单元为基准.

1.4　数据来源

为确保数据真实可信,本研究基于实验室规模,收集整理了文献中材料,能源输入和废物排放的原始数据[23-24],如表 1 所示.为使评价结果更加准确,通过查找废旧光伏板处理工艺的相关文献[25-29],进一步补充各个处理环节中间产物的数据.

表 1　3 种典型光伏板回收技术的原始数据

Table 1　Raw data of three typical photovoltaic panel recycling technologies

项目	材料	M1	M2	M3	单位
输入	c−Si 电池	1000	1000	1000	g
	KOH	896	0	58	g
	HNO_3	1711	1111.5	0	g
	HF	136	136	0	g
	CH_3COOH	79	79	0	g
	NaOH	0	580	492	g
	电能	2.65	2.14	0.813	kWh
输出	银	10.73	13.78	13.78	g
	硅	910	918	910	g
	化学废物	2635	1794.9	550	g
	有害气体	15.7	13.33	0	g

通过确定研究方法,划定系统边界和功能单元,对以上 3 种工艺进行环境影响评价与碳足迹核算,对其工艺优点与不足进行对比,最后分析出最优的工艺并为工艺的优化提供指导.

上游和下游过程的背景数据来自 GaBi 数据库,如能源和化学品的生产等.电力消耗相关的环境影响是根据数据库(CN: Electricity grid mix)估计,中国的能源结构大概由 77.0%的煤炭,17.6%的水力发电和 5.4%的其他能源组成,包括核能,生物质燃料和天然气等[30].因 GaBi 中缺少 KOH 在生产,使用,废弃过程中造成环境影响的数据,所以使用数据库中于其化学性质相近的 NaOH 代替,用于光伏板蚀刻和溶解.

2　结果与讨论

2.1　废旧光伏板回收技术的生命周期评价

2.1.1　归一化分析　通过归一化分析将不同量纲,数量级的环境指标(如污染物浓度,生态指数等)转换为统一的无量纲数值(通常在 0~1 范围内),将 3 种工艺一起进行归一化,不同工艺的同一环境指标的归一化数值就有了可比性.对比发现处理工艺的环境影响分布主要集中在 MAETP 中,AP,GWP,HTP 也是水处理系统的主要影响类别.与其他影响相比,ODP 的影响潜力可以忽略不计.在废旧光伏板回收处理时,除了药品投加,对环境产生影响的主要因素还有电力输入.

如图 2(a)所示,在 M1 的影响类别中,MAETP 的值最高,其次是 GWP,ADP 的值,ODP 的值最低.排序依次为 MAETP > GWP > HTP > ADP > AP >POCP >EP> TETP > FAETP >ODP.主要由于传统的太阳能板回收技术利用强酸对银的高溶解性,通常选用浓硝酸溶解银,而浓硝酸的使用对环境的影响很大,并且对人体健康有很大的影响.除此之外,HF 酸对环境产生的影响也不能忽视,尽管 HF 酸在处理过程中的使用量相对小很多,但是其产生的影响却与其他药品相当,因此对于 HF 酸的使用要慎重.

M2 与 M1 之间的区别在于改进后的工艺结合了传统的两步银回收(即去除和回收),成为一个独立的循环过程.虽然此循环过程消耗的电能相对多,但化学试剂的消耗更少,化学废物的处理更加简易,可以显著减少环境影响.此外,银的回收率大幅度提高,减轻了 MAETP 和 HTP 的影响(图 2(b)),并减少了温室气体的排放.改进后工艺虽然可以回收更高纯度

的硅,但同时也消耗了过量的硝酸和 HF 酸,并在 AP, POCP 等方面造成较为严重的影响.与传统方法类似,本处理过程也使用了 HF 酸.因此,同样不能因为使用剂量不高而忽视这一部分药剂对环境产生的影响.另外,使用外部电流驱动银溶解的反向电镀技术也实现了高银溶解效率(95%),避免了使用浓酸带来的环境影响.而且,电解液的循环使用减少了化学品的消耗和回收过程中化学废物的产生,从而降低了环境影响.

M3 的创新点在于,实现了直接将废旧光伏板中银提取利用,而非常规地从碳硅光伏板中进行 Ag^{+}–Ag 转化,还可以高效率地回收硅.该方法在盐蚀刻和焊料回收都使用碱性溶液来驱动分离,显著减少了二次废物,因此该回收过程避免了更多试剂药品的消耗,环境影响各项指标与碳足迹相对前 2 种工艺均有所下降.如图 2(c),在所有的影响类别中,MAETP 的值最高,其次是 HTP,GWP,ADP 的值.同样地,与前 2 种工艺相同,ODP 的值是最低的,可以忽略不计.除此之外,该方法对其他微量金属的回收也有极大提升,为太阳能板的可持续发展奠定了基础.并且,此方法没有使用大量的硝酸与 HF 酸等药剂,极大的减少了各项环境影响指标.

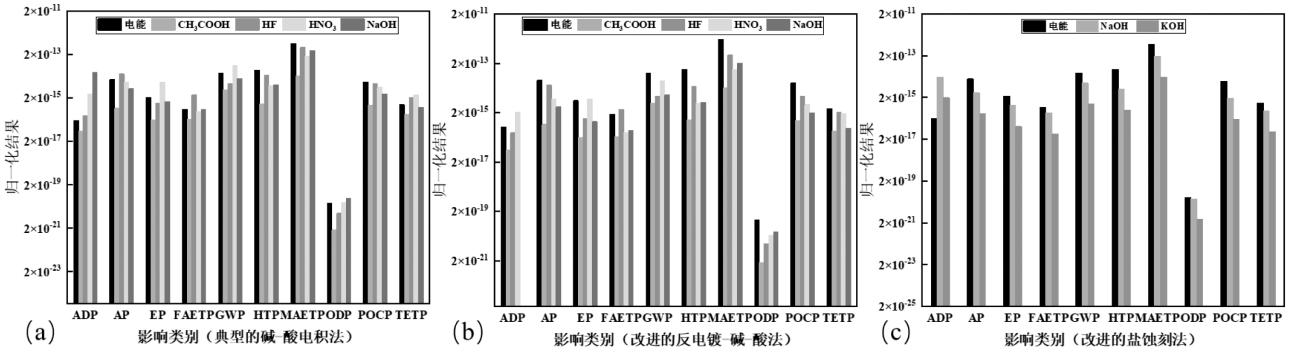


图 2 3 种典型光伏板回收技术的环境影响归一化结果

Fig.2 Normalized environmental impact results of three typical photovoltaic panel recycling technologies

2.1.2 敏感性分析 敏感性分析对于检测重要变量,强化结果解释是非常必要的[31].在本研究中,控制其他条件不变将物质与能源的投入量增加了 5%,观察经过此变化后其各自的环境影响变化量,通过敏感性分析来评估不同技术中物料投入对结果影响最显著的输入变量[32],便于进行横向比较与风险评估.

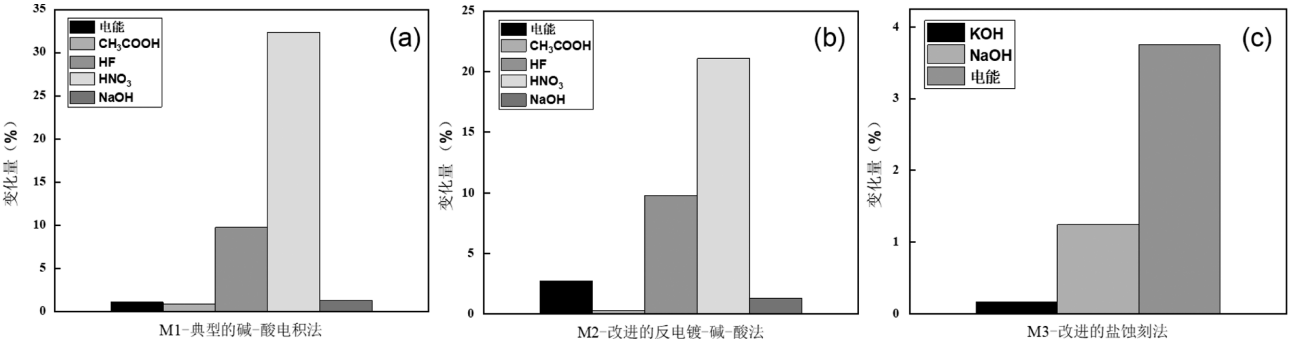


图 3 3 种典型光伏板回收技术的敏感性分析

Fig.3 Sensitivity analysis of three typical photovoltaic panel recycling technologies

如图 3 所示,电力消耗与硝酸投加是影响环境评价结果的主要因素.废旧光伏板回收 3 种工艺(M1, M2,M3)的环境影响关键因素分别为:M1 主要集中于电力(32%);M2 通过优化使各变量(电力,乙酸等)的敏感性均低于 22%;M3 则大幅简化流程,仅依赖电力和碱性试剂(NaOH/KOH),其敏感性均控制在 4%以下.在 M1,M2 中,HF 酸对整个处理流程有着较高的敏感性.整体来看,M1 的强敏感性暴露了传统工艺的缺陷,而 M2/M3 通过分散敏感节点或精简流程降低了环境风险,这些都表明了未来应聚焦高贡献变量(如电力,

强酸)的低碳替代,推动工艺向低毒,低耗的循环模式转型.可以提高其竞争力,并最大限度地减少对社会生活的负面影响.通过上述分析可见,M1 对环境的影响较大,且此流程中所使用的药品敏感性都较高,而后 2 种改进后的工艺均有一定程度的降低.

2.2　各处理阶段物质流和碳足迹分析

作为光伏产业链的末端关键环节,废旧光伏板的回收处理不仅涉及资源的高效循环,更对全生命周期的碳减排有着重要影响.本节基于物质流分析,系统追踪硅,银等高价值材料在回收过程中的流向;同时结合碳足迹分析,量化该过程中因废旧光伏板回收处理所产生的碳排放,以及具体到哪一环节的碳排放,再针对其中的高碳排阶段,对其可能的降碳潜力进行探讨.

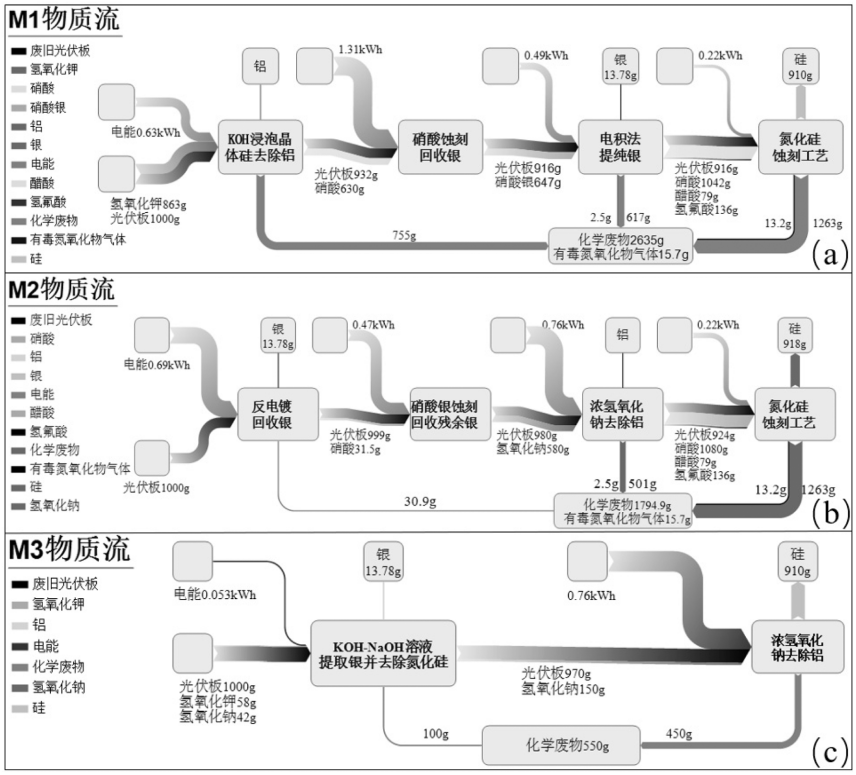


图 4　3 种典型光伏板回收技术的物质流分析

Fig.4　Material flow analysis of three typical photovoltaic panel recycling technologies

2.2.1　工艺回收过程的物质流分析　由图 4(a)所示,M1 化学废物的产出占比较大,且功能单元数量的原料回收处理对资源的消耗数量(硝酸,电能等)较大.另外.在整个回收处理过程中,没有物质的循环利用,全部都是物质的单向投加消耗,这导致了物质与电能的消耗量较高,且单向的物质消耗还会导致大量化学废物的产生.虽然 M2 相对 M1 之间有一定的差异(图 4(b)),整个流程所用的药品都属于酸碱,但改变了投加顺序,使药品在不同阶段能更好地发挥作用,M2 的步骤一与步骤二之间有电解液的循环利用,在一定程度上提高了药品的使用效率,并且最后一个步骤中均有 HF 酸的投加使用,而 HF 酸是对水,大气以及土壤环境均有较大影响的物质,甚至在很大程度上会危害到人体健康,应该通过严格的工业管理,技术升级和应急措施,减少 HF 酸的使用,及其对生态和健康的影响.M3 与前 2 种工艺相比(图 4(c)),其流程大大简化,且所用药品也更精简,尤其是省去了 HF 酸的消耗,电能的消耗与化学废物的产出均有明显减少.通过回收过程中使用的水和碱溶液可以进行回收以减少环境影响.而且盐蚀过程中生成的盐类 Na_2SiO_3 和 $NaAlO_2$,可以通过沉淀和过滤从洗涤水中分离 Na_2SiO 和 $NaAlO_2$,然后用残余的 NaOH 溶液进一步蚀刻 Al−BSF−Si 电池中的 Al;或者通过蒸馏从 Na_2SiO_3 和 $NaAlO_2$ 中分离氢氧化物,在 900 ℃下进行真空蒸馏来回收循环利用盐.

2.2.2　各工艺的碳足迹分析　通过对每种工艺各

阶段产生的碳排放量进行比较,进一步探讨具体某种物质的碳排放量大小,为工艺降碳减排提供依据.

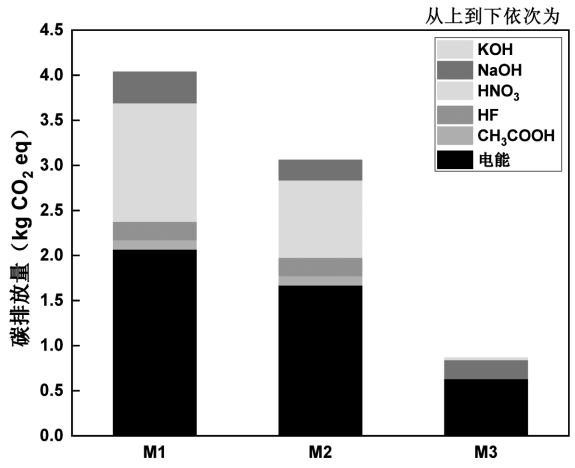


图 5 各工艺中化学药品与电力消耗的 GWP 对比

Fig.5 GWP Comparison of chemicals and electricity consumption in various processes

在废旧光伏板回收过程中,碳排放产生的主要因素有电力消耗和药品的投加.如图 5 所示,电能消耗和 HNO_3 投加对 3 种废旧光伏板回收处理技术产生的环境影响均占总碳排放的 75%以上.因此,在工艺运行时应重点关注能源的消耗,尽量减少电力的过渡使用,提高清洁能源使用的占比.相对 M1,M2 由于硝酸投加和电能消耗均有所减少,其碳排放有所降低,同时技术的改进还提高了金属资源的回收效率,使整个回收过程的操作步骤更加简洁.而 M3 相对 M1,M2 的碳排放有大幅度的减少,这是因为此工艺中没有硝酸的消耗,而是选用 NaOH−KOH 蚀刻体系,没有了酸性气体的排放,且无有毒矿物酸与二污染物的产生,并且回收过程中电力的消耗也有较大的改善,大大的减少了碳的排放.

2.2.3 回收阶段的碳流动分析 碳流动分析是一种通过追踪碳元素在系统内的流动路径,从而可以量化其在不同环节的排放,吸收,储存与转化过程.通过碳流动分析结合 LCA 可以揭示高耗能,高排放的关键节点,帮助研究人员优化碳管理,提供数据支撑.

如图 6(a)所示,M1 的 4 个阶段中均有 CO_2 的产生,由于电力的消耗导致了大量的碳流动,药品的使用也导致大量的碳排放.其中碳排放量通过流动图中路径的粗细程度判断.M2 在回收过程中电解,氢氧化钠处理,硝酸使用,乙酸和 HF 酸的处理均都有二氧化碳的产生(图 6(b)),且由于蚀刻工艺阶段消耗的物质与能源较为复杂,产生的二氧化碳排放也较多,还伴随有毒气体的排放.若将废酸合理循环,或使用清洁能源,均能够削减碳排放.M3 相对前 2 个工艺的流程简化为碳排放的减少带来的贡献(图 6(c)),一方面产生碳排放的物质变少了,另一方面电力消耗的减少使该工艺比前 2 个工艺碳排放也减少了许多.总而言之,对于前 2 个工艺,碳排放量都较高,相应的对策可以考虑替代硝酸的使用,使用低碳蚀刻酸液,减少对硝酸依赖.

2.2.4 降碳潜力分析 对于降碳潜力的分析旨在改变处理流程中所使用的药品与电力,将流程中的消耗品改换为每种品类中对环境影响最小的药品,然后再重新对这一流程中的各项环境影响指标进行核算,观察通过以上改变能使以上处理流程对环境产生影响的减少率;同样的,将消耗品均改为对环境影响最大的药品,再对其进行一次核算.通过以上工作,可以明晰本研究中 3 种处理方法对环境产生的碳排放和影响指标程度[33],从而可以进一步对整体回收过程的降碳潜力进行分析.

(1)低碳能源情景分析:由于本文研究的 3 种工艺涉及到的能源消耗仅是电能,因此在低碳能源情景之下,可替代的方法为改变不同发电系统提供的电能[32],通过对比生物质能,煤气发电,硬煤发电,天然气供电,重油供电,核能发电,光伏发电以及水力风力发电等来探究不同能源类型的碳排放.由于硬煤发电具有最高的碳排放,而核能是碳排放最低的供电方式,将 3 种工艺输入端的电能全部改为核能供电,其碳排放量如图 7 所示.

将回收处理工艺中原本使用的电力系统改为核能发电,M1 和 M2 的降碳潜力相当,均有半数的碳排放减少量,M3 降碳潜力相对更大.其主要原因是 M1,M2 中药品的消耗量较大,改变能源消耗系统对整体流程的影响较小,而 M3 中药品使用种类少,工艺流程简单,导致电力在整个过程中所占的权重相对前 2 种工艺更大,敏感性更高,对系统的影响也更大,因此拥有更高的降碳潜力.由此可以得出,电力能源系统的使用对于降碳减排有较大的影响,而减少化学试剂的使用同样具有较大的降碳减排潜力.另外,硬煤发电具有断层领先的极高的碳排放,这是因为硬煤(无烟煤)的碳含量高达 80~95%,燃烧时每单

位能量释放的 CO_2 显著高于其他化石燃料,因此应该尽量避免使用这种能源类型.

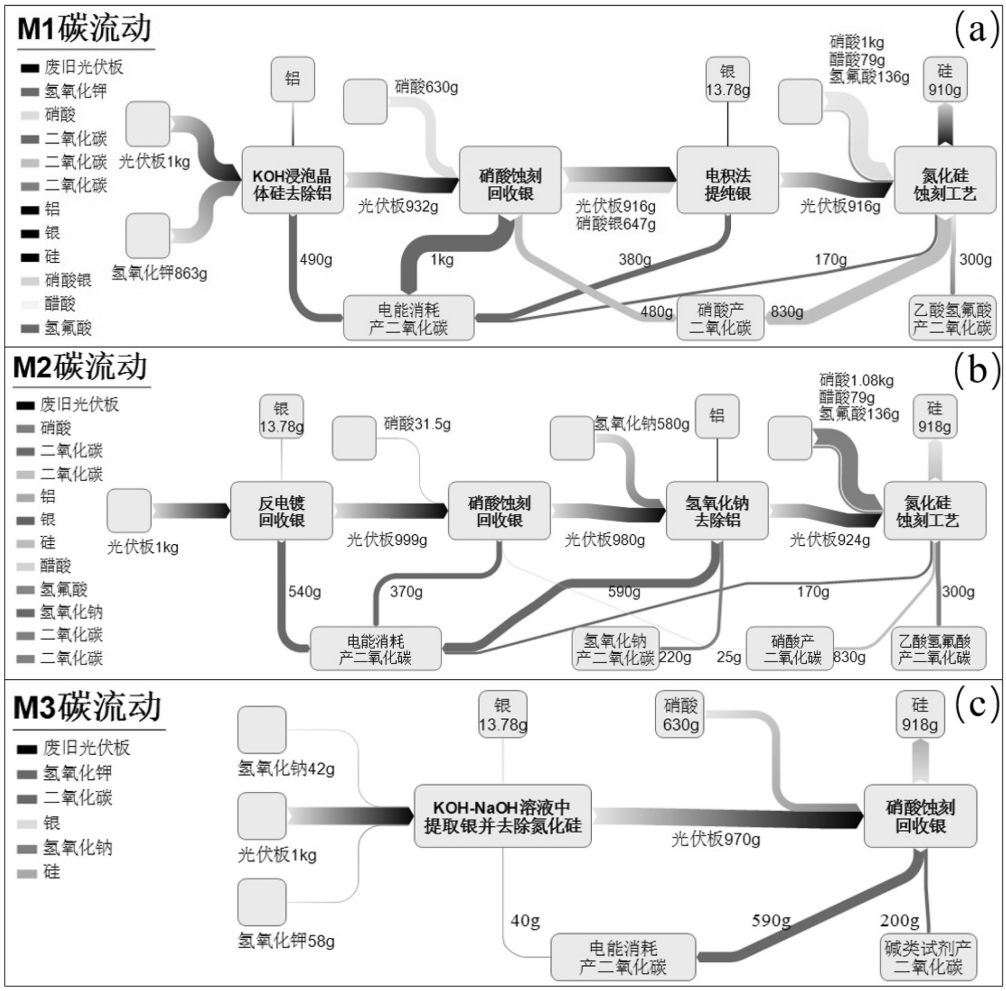


图 6　3 种典型光伏板回收技术的碳流动分析

Fig.6　Carbon flow analysis of three typical photovoltaic panel recycling technologies

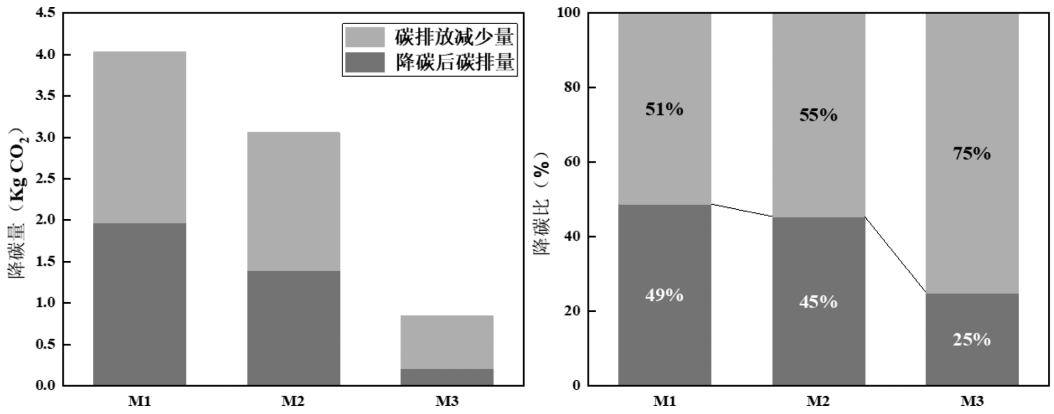


图 7　低碳能源情景下的降碳潜力分析

Fig.7　Analysis of carbon reduction potential under low carbon energy scenarios

(2)低碳物质情景分析:低碳物质情景是指在保证物质种类能够正常满足工艺流程的前提下,在碳排放因子数据库中选择低碳生产流程产出的相同物质,以实现本工艺的低碳物质情景.本研究 3 种工艺中涉及到的药品试剂包含酸类试剂(硝酸,HF 酸,乙酸等),碱类试剂(氢氧化钾,氢氧化钠等),其中

HF 酸和乙酸由于用量权重较低,且 M3 中不涉及这两种酸类的消耗,因此本研究在低碳物质情景下选择改变碱类试剂与硝酸等主要物质的消耗来源,提高工业所用氢氧化钠的精度,将含粗产品的硝酸改为纯度更高的硝酸,高纯度试剂反应精准高效,能够节省原料,能源和处理次数,以此改变回收过程的碳排放量.通过探究以上变化对处理过程碳排放量产生的影响,进一步分析工艺的降碳潜力,结果如图 8.

与低碳能源情景下的降碳潜力相比,低碳物质的替代无法大幅度降低碳排放.主要由于药品可改变的种类有限,且药品投加的改变与原本使用的药品之间碳排放差距较小;3 种工艺所使用的药品类型相对简单,且投加剂量不高.总之,在低碳物质情境下,3 种工艺均无显著的降碳潜力,但不能忽略这种方式在降碳方面产生的影响.

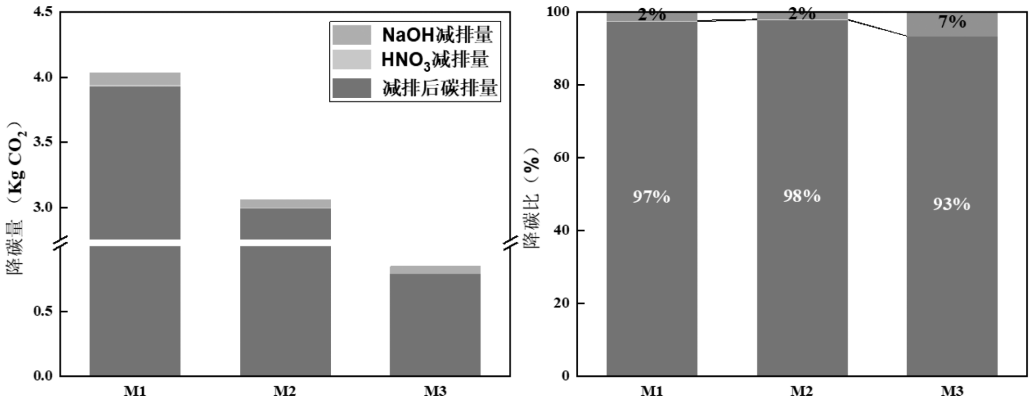


图 8 低碳物质情景下的降碳潜力分析

Fig.8 Analysis of carbon reduction potential under low carbon material scenarios

(3)低碳综合情景分析:通过低碳能源和低碳物质替换两个情景的共同作用,同时发挥两种情景下的优势,通过二者相辅相成的有机结合,可以实现深度降碳.发现 3 种工艺的降碳潜力主要集中在能源系统的优化.值得注意的是,除核能发电外,生物质能和光伏发电产生的碳排放也相对较低,也可以作为低碳能源的平替应用,并能达到较好的减排效果.

对于电力消耗和药品投加的减排降碳,可以考虑这种模式对工艺进行优化.由于 M2 相对 M1 进行了简化与资源循环利用,因此在低碳综合场景下的降碳潜力相较 M1 有 3%的提升,但受限于工艺本身流程与能源物质消耗的复杂性,其综合降碳潜力分别为 54%和 57%;M3 较大的降碳潜力是流程简化和低碳能源协同作用的结果,M3 工艺降碳后剩余碳排放占比仅为 18%,远低于 M1(46%)和 M2(43%),使这一工艺对于环境的影响进一步减小.

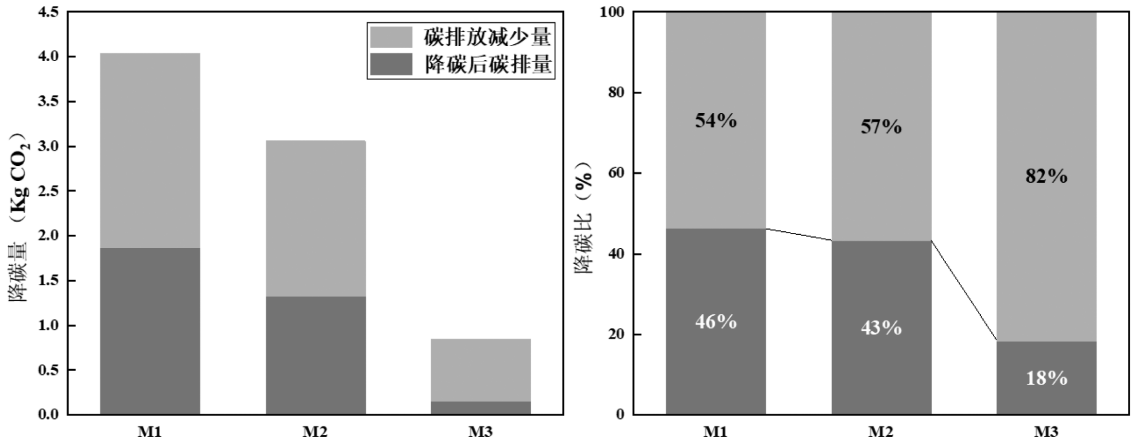


图 9 综合场景下的降碳潜力分析

Fig.9 Analysis of carbon reduction potential in comprehensive scenarios

3　结论

3.1　针对典型废旧光伏板回收技术做了碳足迹核算和降碳潜力分析,通过 LCA 归一化分析,物质流分析和碳流动分析表明了改进的盐蚀刻方法的化学废物和碳排放量均最低,但仍然有 82%的降碳潜力.

3.2　通过 LCA 方法的评价结果表明:M1 处理工艺对环境的影响最大,其次是 M2 处理工艺,M3 处理工艺对环境的影响最小.在各个影响类别中造成污染的严重程度依次为 MAETP > GWP > HTP > ADP > AP > POCP > EP > TETP > FAETP > ODP.对其进行敏感性分析发现 MAETP,HTP,GWP 是影响环境评价结果的主要因素.对环境产生影响的主要因素为电力输入和药品投加.

3.3　物质流和碳足迹综合分析表明,在对废旧光伏板进行回收处理时,3 种回收工艺对环境产生碳排放的主要因素为电力消耗和药品的投加,均占总碳排放的 75%以上.在工艺运行时应重点关注能源的消耗,尽量减少电力的过渡使用,提高清洁能源使用的占比.

3.4　降碳潜力分析结果表明,低碳能源替换能够实现较大幅度的降碳减排,但受限于核能发电技术的普及率,这种替换存在一定的局限性,但依然可以选择光伏发电和生物质能作为备选,也能在一定程度上实现降碳.

3.5　改进的盐蚀刻法(M3)为最优工艺,其碳足迹较传统方法降低 50%以上,为光伏产业绿色转型提供了低碳回收路径.

参考文献：

[1] Seo B, Kim J Y, Chung J. Overview of global status and challenges for end-of-life crystalline silicon photovoltaic panels: A focus on environmental impacts [J]. Waste Management, 2021,128:45-54.

[2] Hocine L, Samira K M. Optimal PV panel's end-life assessment based on the supervision of their own aging evolution and waste management forecasting. [J]. Solar Energy, 2019,191:227-234.

[3] Marcuzzo R, De Araujo W C, Maldonado M U, et al. A multi-country simulation-based study for end-of-life solar PV panel destination estimations [J]. Sustainable Production and Consumption, 2022,33: 531-542.

[4] Tammaro M, Salluzzo A, Rimauro J, et al. Experimental investigation to evaluate the potential environmental hazards of photovoltaic panels [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016,306:395-405.

[5] 张　凡,王树众,李艳辉,等.中国制造业碳排放问题分析与减排对策建议 [J]. 化工进展, 2022,41(3):1645-1653.
Zhang F, Wang S Zh, Li Y H, et al. Analysis of CO_2 emission and countermeasures and suggestions foremission reduction in Chinese manufacturing. [J]. Journal Chemical Industry and Engineering Progress, 2022,41(3):1645-1653.

[6] Calì M, Hajji B, Nitto G, et al. The design value for recycling end-of-life photovoltaic panels [J]. Applied Sciences-Basel, 2022,12(18).

[7] Artas S B, Kocaman E, Bilgiç H H, et al. Why PV panels must be recycled at the end of their economic life span? A case study on recycling together with the global situation [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2023,174:63-78.

[8] 侯思雨,庄绪宁,杨　凡,等.我国退役动力电池及关键金属资源时空分布特征与处理需求解析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(8):4727-4736.
Hou S Y, Zhuang X N, Yang F, et al. Analysis of the temporal and spatial distribution characteristics and processing requirements of retired power batteries andcritical metal resources in China [J]. China Environmental Science, 2025,45(8):4727-4736.

[9] Sharma A, Mahajan P, Garg R. End-of-life solar photovoltaic panel waste management in India: forecasting and environmental impact assessment [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2024,21(2):1961-1980.

[10] Faircloth C C, Wagner K H, Woodward K E, et al. The environmental and economic impacts of photovoltaic waste management in Thailand [J]. Resources Conservation and Recycling, 2019,143:260-272.

[11] Bartie N J, Cobos-Becerra Y L, Fröhling M, et al. The resources, exergetic and environmental footprint of the silicon photovoltaic circular economy: Assessment and opportunities [J]. Resources Conservation and Recycling, 2021,169.

[12] An M R, Sun X L. Carbon footprints of solar panels in China provinces based on different production and waste treatment scenarios [J]. Journal of Cleaner Production, 2024,435.

[13] Santoyo-Castelazo E, Solano-Olivares K, Martinez E, et al. Life cycle assessment for a grid-connected multi-crystalline silicon photovoltaic system of 3kWp: A case study for Mexico [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,316.

[14] Chen P H, Chen W S, Lee C H, et al. Comprehensive review of crystalline silicon solar panel recycling: from historical context to advanced techniques [J]. Sustainability, 2024,16(1).

[15] Preet S, Smith S T. A comprehensive review on the recycling technology of silicon based photovoltaic solar panels: challenges and future outlook [J]. Journal of Cleaner Production, 2024,448.

[16] Mazzi A, Barbiero C, Miserocchi F, et al. Life cycle assessment of Al-Cu-Ag-Si recycling process from photovoltaic waste [J]. Resources Conservation and Recycling, 2024,211.

[17] Wu J, Wang S, Gong Q, et al. Impacts and response of solar energy utilization projects on ecosystem, Biodiversity and Environment [J]. Research of Environmental Sciences, 2024,37(5):1055-1070.

[18] Ansanelli G, Fiorentino G, Tammaro M, et al. A life cycle assessment of a recovery process from end-of-life photovoltaic panels [J]. Applied Energy, 2021,290.

[19] 刘含笑,吴黎明,林青阳,等.碳足迹评估技术及其在重点工业行业的应用 [J]. 化工进展, 2023,42(5):2201.

Liu H X, Wu L M, Lin Q Y, et al. Carbon footprint assessment technology and its application in key industries. [J]. Journal Chemical Industry and Engineering Progress, 2023,42(5):2201.

[20] 王志豪,郭少青,卫贤贤,等.光伏组件硅回收的现状与展望 [J]. 应用化工, 2025,54(4):1049-1053.
Wang Z H, Guo S Q, Wei X X, et al. Current status and prospect of silicon recovery from decommissioned photovoltaic modules. [J]. Applied Chemical Industry, 2025,54(4):1049-1053.

[21] 汪启飞,李 宾,袁 晓,等.废旧光伏组件的现场快速分离回收及响应面优化浸出提取银的工艺 [J]. 环境工程学报, 2025,19(4):948-956.
Wang Q F, Li B, Yuan X, et al. On-site rapid separation and recovery of waste photovoltaic modules andresponse surface optimisation for silver extraction by leaching [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2025,19(4):948-956.

[22] 郭飞宏,许贵军,徐文胜,等.废旧光伏组件回收路径及技术研究 [J]. 材料导报, 2024,38(z1):20-26.
Gou F H, Xu G J, Xu W S, et al. Reserch on the recycling path and technology of waste photovoltaic modules. [J]. Materials Reports, 2024,38(z1):20-26.

[23] Deng R, Dias P R, Lunardi M M, et al. A sustainable chemical process to recycle end-of-life silicon solar cells [J]. Green Chemistry, 2021, 23(24):10157-10167.

[24] Gao S, Chen X, Qu J, et al. Recycling of silicon solar panels through a salt-etching approach [J]. Nature Sustainability, 2024,7(7):920-930.

[25] 徐 创,李 宾,袁 晓,等.废旧晶体硅光伏组件的回收利用 [J]. 环境工程学报, 2019,6.
Xu C, Li B, Yuan X,et al.Recycling of waste crystalline silicon photovoltaic modules [J]. Chinese Journal ofEnvironmental Engineering, 2019,6.

[26] 刘 波,李佳怡,丁云集,等.报废光伏板回收利用的研究现状 [J]. 稀有金属, 2019,43(9):987-996.
Liu B, Li J Y, Ding Y J, et al. Recycling status of scrap photovoltaic panels. [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2019,43(9):987-996.

[27] 张 钤,崔敏华,陈 蕾,等.生物电化学技术降解疏水性新兴污染物的研究进展 [J]. 化工进展, 2021,40(12):6846.
Zhang Q, Cui M H, Chen L, et al. A review of bioelectrochemical system in the degradation ofhydrophobic emerging contaminants. [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021,40(12):6846.

[28] 赵新美,张子生,赖伟东,等.高效分选废旧光伏电池板中铜与硅 [J]. 河北大学学报(自然科学版), 2020,40(4):365.
Zhao X M, Zhang Z S, Lai W D, et al. Efficient separation of copper and silicon from waste photovoltaic panels. [J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2020,40(4):365.

[29] 陈晓玉,张子生,赖伟东,等.废旧光伏电池板中银和铝的高压静电分选 [J]. 环境科学与技术, 2020,43(8):145-151.
Chen X Y, Zhang Z S, Lai W D, et al. High voltage electrostatic separation of argentum and aluminumfrom waste photovoltaic panels [J]. Environmental Science & Technology, 2020,43(8):145-151.

[30] 苏 健,梁英波,丁 麟,等.碳中和目标下我国能源发展战略探讨 [J]. 中国科学院院刊, 2021,36(9):1001-1009.
Su J, Liang Y B, Ding L, et al. Research on China's energy development strategy under carbon neutrality. [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021,36(9):1001-1009.

[31] 蔡 毅,邢 岩,胡 丹.敏感性分析综述 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2008,44(1):9-16.
Cai Y, Xing Y, Hu D, et al. On sensitivity analysis [J]. Journal of Beijing Normal U niversity (Nat ural Science), 2008,44(1):9-16.

[32] 豆咏琪,宋小龙,庄绪宁,等.退役磷酸铁锂电池梯次利用生命周期评价与碳减排情景分析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(7):4091-4100.
Dou Y Q, Song X L, Zhuang X N, et al. Life cycle assessment and carbon reduction scenario analysis of retired lithium iron phosphate batteries for cascadeutilization [J]. China Environmental Science, 2024,44(7):4091-4100.

[33] 王小虎,楚春礼,曹 植,等.分布式光伏-储能系统经济-碳排放-能源效益实证分析——以山东省胶州光伏及其储能系统为例 [J]. 中国环境科学, 2022,42(1):402-414.
Wang X H, Chu C L, Cao Z, et al. Empirical analysis of cost-CO_2-energy benefits of distributed photovoltaic-battery storage system-taking (PV-BSS) in a casestudy in rural Jiaozhou Shandong. [J]. China Environmental Science, 2022,42(1):402-414.

作者简介：赵大明(1982-),男,山西晋城人,高级工程师,硕士,研究方向为电力产品碳足迹核算.发表论文 9 篇.zhaodaming@epri.sgcc.com.cn.