



移动扫码阅读

吕青, 刘亚, 宋庆明, 等. 退役光伏组件物理法分选技术[J]. 能源环境保护, 2026, 40(1): 122-135.
LYU Qing, LIU Ya, SONG Qingming, et al. Physical Sorting Technologies for End-of-Life Photovoltaic Modules[J]. Energy Environmental Protection, 2026, 40(1): 122-135.

退役光伏组件物理法分选技术

吕青¹, 刘亚^{1,*}, 宋庆明¹, 黄明星¹, 许振明^{1,2}

(1. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240;

2. 上海市污染控制与生态安全研究院, 上海 200092)

摘要: 全球光伏产业快速发展推动了退役光伏组件回收成为资源循环与环境保护的关键环节。预计到2030年, 全球累计退役光伏组件报废量将达800万吨。退役光伏组件中富含硅、银、铜等高价值资源, 但其中的重金属及有机物若处理不当, 会导致严重的环境污染。分选技术作为退役光伏组件回收的关键预处理环节, 目前主要包括传统物理分选与智能分选两类。传统物理分选(如高压静电分选、涡流分选、磁选、重力分选)虽然能够实现基础的物料分离, 但对于细微物理性质差异的物料分选精度有限, 主要应用于细小物料(2~20 mm)分离, 且依赖人工调节。智能分选技术通过机器视觉、深度学习算法及精准定位系统, 实现了基于物料本质特征的高精度识别, 扩展了分选物料的尺寸范围, 突破了传统技术对单一物理属性的依赖。研究表明, 智能分选与传统方法的协同应用可显著提升回收效率, 并有效降低二次污染风险。当前的技术瓶颈在于传统方法适用范围有限, 以及智能技术存在的数据积累不足与成本较高等问题。未来, 应通过传统技术的智能化升级和智能系统的模块化设计, 结合政策支持与标准化体系建设, 推动分选技术向高效化和精准化方向发展, 为退役光伏组件的绿色回收与资源高值化利用提供技术支撑。

关键词: 退役光伏组件; 分选技术; 传统物理分选; 智能分选; 资源回收

中图分类号: X705

文献标识码: A

文章编号: 2097-4183(2026)01-0122-14

Physical Sorting Technologies for End-of-Life Photovoltaic Modules

LYU Qing¹, LIU Ya^{1,*}, SONG Qingming¹, HUANG Mingxing¹, XU Zhenming^{1,2}

(1. School of Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Institute of Pollution Control and Ecological Security, Shanghai 200092, China)

Abstract: End-of-life (EOL) photovoltaic (PV) modules are becoming an important secondary resource stream, and their safe, efficient recycling strongly depends on the performance of sorting technologies during the pretreatment stage. This review examines sorting technologies for EOL PV modules with the aim of clarifying the roles, application ranges, and limitations of traditional physical sorting and intelligent sorting, and identifying technical directions for improving recycling efficiency and reducing secondary pollution. Based on recent research and engineering practice reports, the paper classifies current sorting routes into traditional physical processes—such as high-voltage electrostatic separation, eddy current separation, magnetic separation, and gravity separation—and intelligent sorting systems driven by machine vision, deep learning algorithms, and precision positioning equipment. The literature is synthesized to compare these routes in terms of separable material types, particle-size

收稿日期: 2025-08-29

修回日期: 2025-12-03

接受日期: 2025-12-05

DOI: 10.20078/j.eep.20251205

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3906100); 国家自然科学基金资助项目(52500169)

第一作者: 吕青(2002—), 女, 辽宁大连人, 硕士研究生, 主要研究方向为城市矿产开发与污染控制。E-mail: lyutsing@qq.com

*通讯作者: 刘亚(1992—), 女, 河南信阳人, 助理研究员, 主要研究方向为城市矿产开发与污染控制。E-mail: liuya62@sjtu.edu.cn

ranges, dependence on manual parameter adjustment, and the distinguishability of materials with subtle differences in properties such as conductivity, density, or surface characteristics. Reported data on recovery and purity of product streams, operating stability, and control complexity are used to summarize the typical roles of different sorting technologies within complete EOL PV recycling flowsheets. The results of the review indicate that traditional physical sorting is suitable for the basic separation of glass and metallic fractions and has advantages in process simplicity and robustness, but it is generally restricted to fragments in the range of 2–20 mm and to systems in which materials exhibit pronounced differences in physical properties. These routes have limited capacity to handle laminated structures and components with similar compositions, and they usually require frequent manual tuning to maintain stable recovery and purity. Intelligent sorting technologies can identify wafers, glass, ribbons, and backsheets at the single-particle level by analyzing intrinsic optical and morphological features, expanding the applicable size range and reducing reliance on manual operation. Studies further suggest that coupling intelligent recognition and actuation modules with electrostatic, magnetic, or gravity separation units improves overall separation precision and decreases the risk that hazardous or high-value components may enter inappropriate product streams. From the comparative analysis, the main technical bottlenecks are identified as the narrow applicability and low adaptability of traditional physical processes, along with the high equipment cost, the requirement for large, high-quality datasets, and system integration challenges associated with intelligent sorting. The review concludes that future development should focus on upgrading conventional lines through the integration of intelligent perception and control, designing modular intelligent sorting units that can be flexibly combined with different pretreatment and separation processes, and coordinating technological innovation with policy measures and standardization. These directions are expected to support higher-efficiency, lower-pollution sorting systems and promote the sustainable and high-value utilization of EOL PV modules.

Keywords: End-of-life photovoltaic modules; Sorting technologies; Conventional physical sorting; Intelligent sorting; Resource recovery

0 引言

随着全球能源结构持续向清洁化与低碳化方向转型,光伏发电凭借其可再生、零排放和可持续利用等优势,成为全球新能源发展的重要支撑。当前,市场上以晶硅光伏组件为主,占比约 90%^[1],其余为薄膜组件。得益于技术成熟度的提升和政策的驱动,全球光伏装机容量实现了快速增长,截至 2024 年累计装机容量约 2 247 GWp(GWp 为峰值装机容量),如图 1 所示,国际可再生能源署预测到 2030 年将突破 2 840 GWp^[2]。光伏组件设计寿命通常为 25~30 年^[3],早期装机组件已接近退役期。预测显示,2030 年全球累计提前报废光伏组件量将达到 800 万 t,2050 年将突破 7 500 万 t,如图 2 所示,其中中国、美国、印度及日本将成为报废光伏组件主要来源国^[4]。

退役光伏组件蕴含大量有价资源,包括硅、银、铜、铝、乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(EVA)、聚偏

氟乙烯(PVDF)、聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)等 20 余种可回收材料(表 1),据测算 2050 年累计回收金属总量可达 3 940.94 万 t^[5-6]。这些资源的循环利用不仅可以缓解矿产开采压力、降低光伏产业链制造成本,还将推动形成绿色闭环产业链,同时具有创造就业机会、增加税收等综合经济效益^[7]。

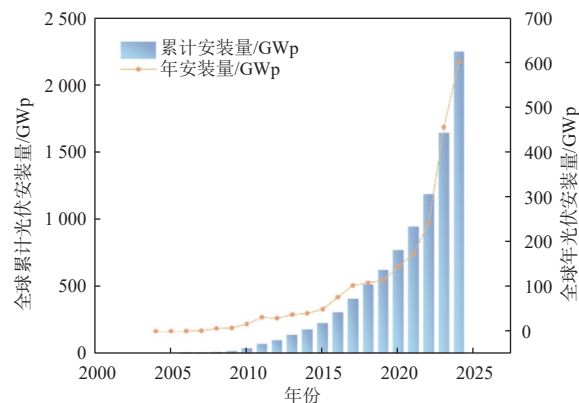


图 1 全球光伏组件累计安装量趋势^[2]

Fig. 1 Trend of global cumulative installed PV capacity^[2]

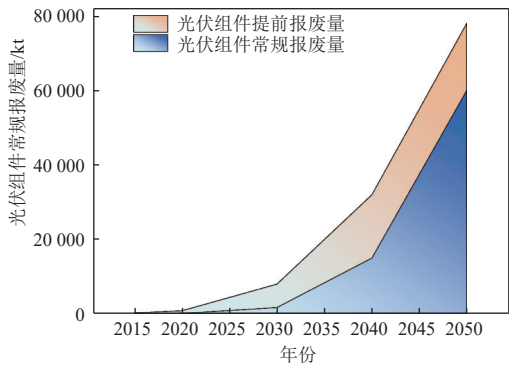


图 2 全球光伏组件报废量预测^[5]

Fig. 2 Forecast of global end-of life PV module volume^[5]

表 1 单晶硅光伏组件的各部分重量与价值组成

Table 1 Weight and value compositions of components in monocrystalline silicon PV modules

材料		质量分数/%	单价/(\$·kg ⁻¹)	价值占比/%
电池板	硅	4.40	2.70	1.30
	铝	0.30	1.50	0.05
	银	0.03	647.00	1.79
焊带	铜	0.80	4.40	0.38
	锡	0.10	16.00	0.18
	铅	0.01	2.00	0
玻璃	太阳能玻璃	67.00	0.10	0.67
塑料	EVA	6.70	—	—
	PVDF	0.80	—	—
	PET	2.60	—	—
	有机硅	0.90	—	—
铝框	铝	16.00	15.00	2.70

然而,组件中的封装胶膜、重金属及其他有害物质若处置不当将产生显著的环境风险。例如,Pb、Cd、Cr、Bi 等元素在填埋过程中易发生浸出,或在焚烧时释放至大气,对生态系统及人类健康构成潜在威胁^[1, 7-8]。因此,对退役光伏组件进行高效回收,是实现资源高效利用并降低环境风险的关键环节。通过采用科学的预处理和分选工艺,可有效解构复杂的材料体系,获取高纯度原料,进而直接用于金属提取、硅片再利用及聚合物无害化处理^[1],最终实现经济与环境效益的双重提升^[9]。

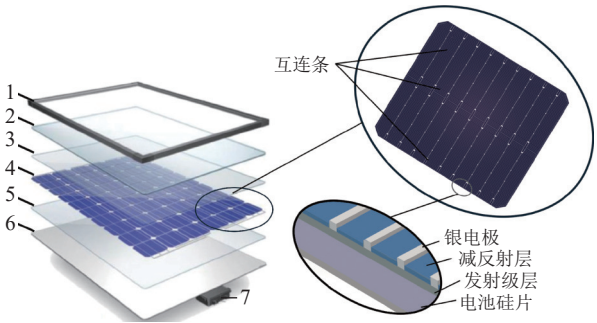
1 退役光伏组件及分选技术现状

1.1 光伏组件结构组成与回收流程

1.1.1 结构组成

晶硅太阳能电池作为目前技术最成熟且应用

最广泛的光伏产品,主要包括单晶硅单玻和双玻 2 种类型。单晶硅光伏电池典型结构由铝边框、接线盒、钢化玻璃、晶硅电池片、背板和 EVA 封装胶膜组成。其中,钢化玻璃、背板与晶硅电池片通过 EVA 胶膜层进行黏合,其结构和组成如图 3 所示。



注: 1—铝边框; 2—玻璃; 3—上层 EVA; 4—太阳能电池; 5—下层 EVA; 6—背板; 7—接线盒。

图 3 单晶硅光伏电池结构示意图

Fig. 3 Schematic structure of a monocrystalline silicon PV cell

退役光伏组件含 20 余种可回收材料,各组分质量占比从高到低依次为钢化玻璃、铝边框、EVA 胶膜、硅片、背板、涂锡焊带、电缆、接线盒、内部导体铝、硅胶、金属银。价值占比的排序为金属银、铝边框、硅片、钢化玻璃、涂锡焊带、内部导体铝、电缆、接线盒^[10-11]。

1.1.2 回收流程

退役光伏组件回收的核心目标在于高效回收硅、银、铝和玻璃等有价值的材料,同时避免有机物、重金属等造成的环境污染^[7, 10],当前主流回收工艺采用物理法与化学法结合的技术路线(图 4)。

第一步,框架拆解,将铝框架从模块中分离,可采用手动拆卸或自动化设备。日本科技公司 NPC 开发的框架隔板可在 40 s 内处理 1 个组件^[12]。

第二步,层间分离,将玻璃、硅电池和聚合物层分离。常见处理方法为热处理加热破坏黏合层^[13]、化学处理利用溶剂溶解封装材料^[14]或通过机械处理直接破碎物料分离不同层次^[15-16]等。

第三步,材料分选,根据材料的物理特性对其进行分类。该步骤对于确保硅、银和玻璃等材料高效提取和纯化至关重要。传统的材料分类方法主要包括振动筛^[17]、密度分离^[18]、静电分离^[19-20]等。未完全分离的物料可根据需求返回分层步骤,精细处理。随着技术进步,引入智能算法的分

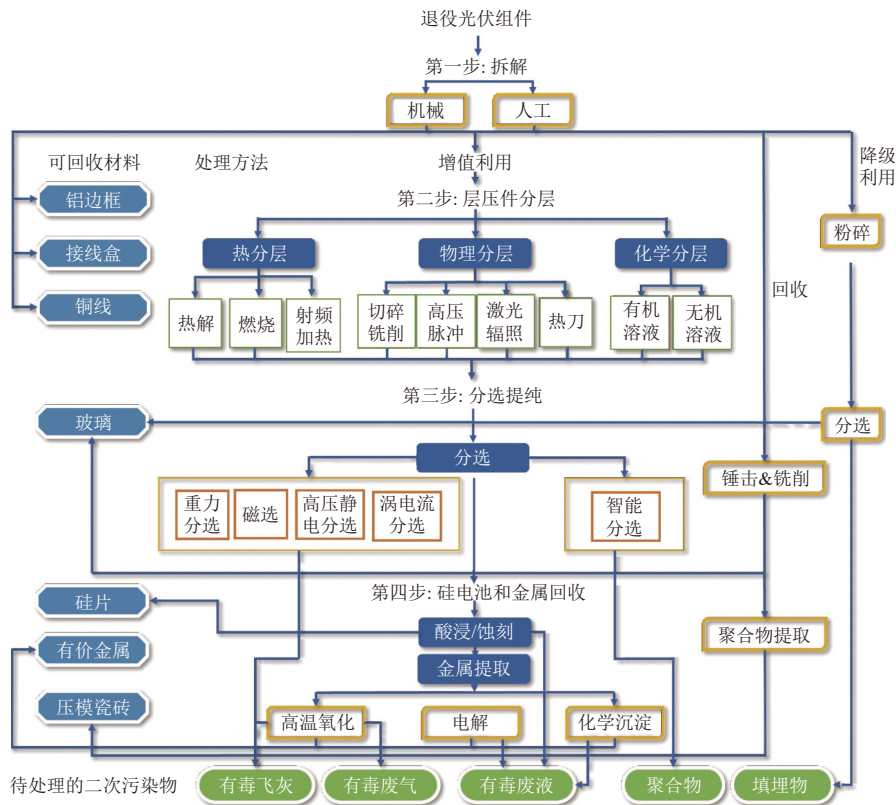


图4 退役光伏组件回收流程图

Fig. 4 Recycling flowchart for end-of-life PV components

选技术逐渐成为材料回收分选的重要手段。通过机器视觉和深度学习算法,回收系统可以实现对材料的自动识别和分类。例如,基于图像识别的分选技术能够自动识别光伏模块中的不同材料,并通过机器人控制的机械臂进行精确分类^[21]。智能分选的提出不仅有望大幅提高回收效率,还可实现更高精度的材料提取,从而降低对人工操作的依赖,减少误分类和损失^[22]。

第四步,金属提取,采用浸出法^[23]等从分离出的材料中回收银、铜等金属。该金属进一步精炼,可用于制造新太阳能电池或用于其他行业。前序分选越精准,该环节的提取回收率越高。

材料分选效果既可反映层间分离步骤的效果,也可以影响后续精炼效率,选择最优的分选策略是实现退役光伏高效回收的关键。

1.2 分选技术现状与局限

当前退役光伏组件分选技术以物理法为主,逐渐引入人工智能和深度学习等新兴技术。在传统流程中,常通过化学法和热解法完成组件拆解,使各类材料分离,便于后续处理;随后采用物理分选方法,如筛分和浮选,根据粒径或密度差异实现初步分流^[3]。然而,这类分选法难以区分密度接近

或尺寸相同的颗粒;难以区分相同粒径、密度的不同物质,导致回收效率较低。因此仅能作为前序分选步骤。

为提高分选精度和效率,发展了高压静电分选^[20]、涡流分选^[24]和磁选^[16]等技术,已成功应用于废旧电路板、废旧家电回收等领域。此外,为了克服单一技术适用性受限的问题,出现了机械-热处理联合工艺^[25]。然而,这些技术在处理细粒物料或湿润物料时仍存在一定局限,且设备成本较高。同时,其处理的物料尺寸较小,需要二次破碎与筛选,成本较高,对大尺寸物料分选效果有限^[23,26]。

为解决上述问题,基于视觉识别、图像处理和数据分析的智能分选技术被应用于光伏组件回收领域。其通过对物料的颜色、形状、尺寸等特征进行智能识别、加权分析,分类更精准,减少了光伏组件物理性质相近带来的识别误差,同时扩展了传统分选技术处理物料的尺寸范围,提升了大尺寸物料回收率,可省去二次破碎步骤,显著降低成本^[8,27]。然而,这些技术仍处于试验阶段,需要进一步优化以解决大规模工业应用中的稳定性和效率问题。

2 传统分选技术原理与应用

分选技术依据物料的物理特性差异,如导电性、磁性和密度,对复杂的混合物料进行高效分离,原理如图 5 所示。高压静电分选、涡流分选、

磁力分选和重力分选各具特点,能够处理不同类型的光伏废弃物。每种技术各有其优缺点(表 2),在实际应用中需根据其技术特点与局限进行系统集成与协同使用。相比单一技术的应用,多技术复合分选可显著提高整体分选效率和回收率。

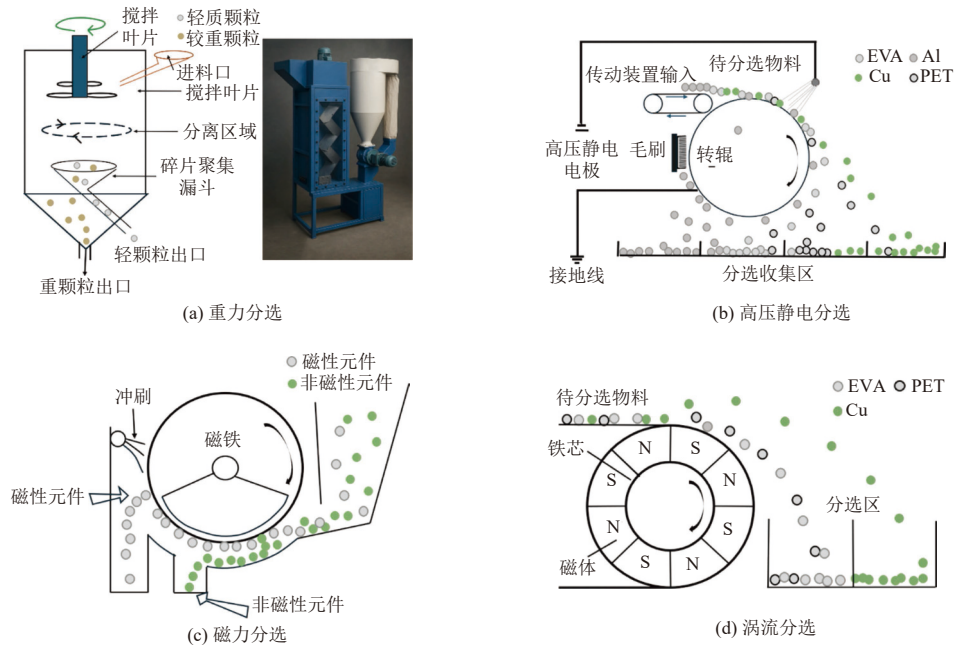


图 5 传统分选技术原理图^[8, 27]

Fig. 5 Schematic diagrams of conventional sorting technologies^[8, 27]

表 2 传统分选技术对比^[19, 28-41]

Table 2 Comparison of conventional sorting technologies^[19, 28-41]

分选技术	重力分选	磁力分选	高压静电分选	涡流分选
原理	物料密度差异, 利用沉降速度差异进行分离	磁性差异, 磁场中分离磁性与非磁性物质	物料导电性能异, 通过高压电场进行物料分选	导电性差异, 通过涡流作用分离
优点	适用于大粒径物料, 成本低, 适用于预处理和金属浓缩	简单高效, 适用于去除铁磁性杂质, 降低后续分选干扰	高效分选, 适用于金属与非金属的分离, 绿色环保, 无化学品使用	高效回收有色金属, 干式分离过程, 无二次污染
缺点	分选精度较低, 适用于粗分选, 难以精细分离	仅能分离磁性物质, 分选精度有限, 需结合其他技术	对不导电或电导率接近的物料分离效果差, 需结合其他技术	对弱导体和非金属分离效果差, 小颗粒分离精度低
分离种类	玻璃、硅片、铝框、铜导线、银浆、EVA胶膜、背板	铁杂质, 铝框中的铁, 金属杂质	金属(铝、铜、银)、硅片、玻璃、EVA胶膜	铝、铜、银等导电金属, 玻璃、聚合物等非金属
设备要求	水力分选系统、跳汰机、摇床, 或者空气介质重力分选设备	磁性分选设备、永磁滚筒、振动筛	高压静电设备、电极系统、电磁振动进料装置	永磁滚筒、高速旋转设备、颗粒输送系统

2.1 重力分选

重力分选是一种基于物料密度差异的物理分选技术,其通过在介质(如水、空气或重悬浮液)中制造沉降条件,使不同密度的物料因沉降速度不同而实现分层分离^[29],常与机械振动、离心等手段联用以强化分离效果。在废旧镍镉、镍氢电池

回收中,经破碎、分级后采用重力分离,可实现金属组分与隔膜、浆料的有效解离,颗粒粒径小于 2 mm 时金属分选效率明显提升^[19]。

晶体硅光伏组件在破碎和脱层处理后,形成的物料密度差异显著。在水介质重力分选系统(如跳汰机、摇床)中,高密度金属颗粒快速沉降于

槽底,低密度组分随水流漂浮或缓慢移动,实现初步分离^[28]。重力分选通常作为破碎与精细分选的中间环节,可在水力环境下通过调控溶液密度与粒径实现多级分流,并同时清洗颗粒表面残留胶膜和粉尘,为后续静电分选和涡流分选提供更洁净的原料^[18]。尽管其分离精度有限,但在物料预处理、金属浓缩和小粒径低黏附性颗粒的多级分选中具有成本低、稳定性好的优势^[29]。

2.2 磁选

磁选技术是利用不同物质在磁场中磁化强度的差异实现分离^[8]。当含磁性颗粒的混合物经过非均匀磁场时,铁磁性物质被磁场吸附,而非磁性或弱磁性物质在重力、离心力等机械力作用下沿不同轨迹排出,从而完成分选。磁选工艺包括湿式和干式两类:前者在液体介质中运行,适用于退役锂离子电池回收过程,可高效实现磁性组分与碳酸锂、石墨等非磁性物质的分离^[30];后者在空气介质中进行,如利用永磁滚筒对铝电容破碎料进行干式分选,运行成本较低^[31]。

退役晶体硅光伏组件破碎后形成的混合物粒径跨度大、组分复杂且含铁杂质不确定,传统仅按粒径或导电性分离的工艺难以应对,细小磁性颗粒之间的团聚和机械夹带亦会降低分选纯度^[32]。磁选可在上游环节有效剔除铁磁性颗粒,减轻对涡流分选和静电分选的干扰,减少设备磨损和金属团聚问题。该技术流程简洁、能耗低且环境友好,可与破碎、筛分等预处理单元无缝衔接,但分选效果高度依赖目标物料磁性,通常需与其他分选技术协同应用。未来结合人工智能与智能传感优化磁场分布和物料运动轨迹,有望进一步提升分离精度并拓展应用范围。

2.3 高压静电分选

高压静电分选是一种利用物料导电性能差异进行分离的干式物理方法,系统由电晕电极、静电电极和接地转辊等构成,在高压电场作用下实现颗粒荷电与分离^[33]。通过调节电极布局和电磁振动进料装置,可保证颗粒单层均匀铺展,形成稳定荷电状态^[19, 34]。该技术已广泛应用于废旧电缆、废家电塑料和废旧电路板中金属/非金属混合物的分离^[20-21],适宜处理粒径约 1~5 mm、导电率差异显著的颗粒^[35]。

退役晶体硅光伏组件经预处理后,所得混合物中的金属电极和硅材料具有良好的导电性,而玻璃和聚合物为绝缘体。基于此电性差异,高压静

电分选可在干式环境下实现导体与非导体的高效分离。与密度分选相比,该方法更易区分密度接近的硅和玻璃颗粒^[27],同时避免了浮选等湿法工艺因使用化学试剂而可能带来的二次污染问题。

凭借对电导差异敏感、工艺绿色和适应复杂混合物料的优点,高压静电分选在光伏组件回收中具有提升金属回收率和提供高纯度原料的潜力。然而,对于不导电或电导率相近的物料,其分选效果有限,仍需与其他技术联用^[36]。此外,分选性能对电压、极板间距、物料含水率等参数较为敏感,需要精细控制以避免效率和纯度下降。

2.4 涡流分选

涡流分选是一种基于导电性差异的高效干式分离技术,导电颗粒切割磁力线产生感应涡流,其内部感应磁场与外加磁场方向相反,在洛伦兹力作用下使导体颗粒偏离原路径,实现与非导体颗粒的分离^[37]。

涡流分选具有非接触、干式和对轻质有色金属回收效率高等特点,广泛应用于报废家电、废旧汽车和电路板破碎料中铝、铜等金属的回收,尤其适合处理粒径约 2~20 mm、密度相近且导电性能良好的颗粒^[38],研究报道上述部分金属颗粒分选效率可超过 95%^[39]。

退役光伏组件经破碎和初步分层后形成的混合物,在完成粒度筛选并满足涡流分选的进料要求后,即可进入涡流分选阶段。涡流分选能够高效分离出导电金属,不仅为后续高值化提纯提供了高纯度原料,也克服了高压静电分选对物料湿度的严格要求,并保证分离出的非金属部分摆脱金属的干扰。与人工分拣相比,涡流分选具备连续作业、自动化程度高、处理能力大等优势,且其干式分选方式无需液体介质,进一步提升了回收过程的环保性和操作安全性^[41]。

需指出的是,涡流分选主要依赖导电性与密度差异,对弱导体或复合材料中的金属夹杂体分离效果有限,因此通常需与静电分选、重力分选等技术组合使用^[40]。同时,设备性能对滚筒转速、皮带速度、物料粒径等参数十分敏感,控制不当易造成颗粒轨迹交叉和误投,影响最终分选纯度。

3 智能分选技术

传统物理分选技术主要依赖密度、导电性、磁性等物理属性差异实现分离,在面对组分复杂、物性差异细微的固体废弃物,常出现分选精度低、

适用物料种类有限等问题。例如,风力分选对密度相近的塑料混合物的分选效率通常低于 90%^[20],静电分选显著受物料含水率和表面状态影响,在潮湿或污染条件下精度下降^[42],且传统工艺处理粒径范围和参数自适应能力有限,系统稳定性较差,亟需新技术支撑。

智能分选技术可对传统物理分选实现智能化升级并构建新型分选体系。一方面,通过传感器与智能算法实时监测物料特性并动态优化运行参数,如在风力分选系统中结合近红外光谱检测和机器学习模型自动调整风速、风压,提高分选效率并增强对原料波动的适应性;另一方面,构建由图像识别、图像处理与执行控制三部分组成的智能分选体系。图 6 为信息采集—智能分析—精准执行的闭环系统:利用高光谱成像、激光诱导击穿光谱等技术解析物料成分和形貌,在算法层面采用深度学习与神经网络进行特征提取和模式识别。如基于卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)的垃圾分类模型可实现 95% 以上的识别准确率^[43],并通过机械臂、高速气阀等执行单元完成目标物料的精准分离。总体来看,智能分选技术推动分选过程由物理属性分选向本质特征分选转变,为固体废弃物处理与循环经济发展提供了核心技术支撑。

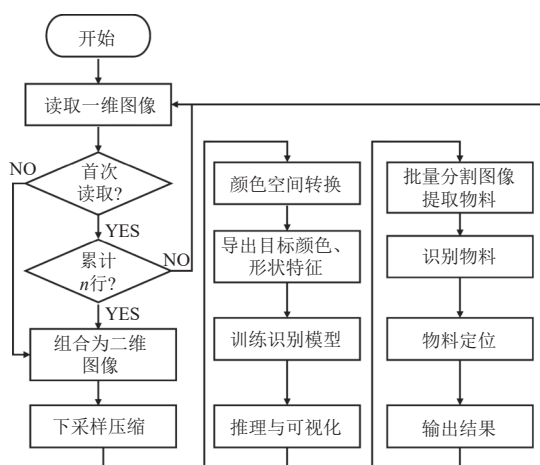


图 6 智能分选算法结构图^[43]

Fig. 6 Structural framework of intelligent sorting algorithms^[43]

3.1 物料识别技术构成

3.1.1 识别系统

识别系统是智能分选系统中的核心部分,特别是针对复杂、异质性强的物料。识别系统包含识别设备与传输系统。当前,工业摄像头(普通和

红外)、X 射线成像系统和高光谱相机等识别设备在物料分选中的应用日益广泛。传输系统包含线阵电荷耦合器件传感器(Charge-Coupled Device sensor, CCD)传感器、现场可编程门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)、数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)和组件间信号传输的外围通信接口。

(1) 摄像机: 通常采用高精度工业摄像机, 结合图像处理和模式识别技术, 通过捕捉物料表面特征以实现对其种类和特性的自动判别^[44]。光伏组件经破碎处理后, 各组分具有明显的特征差异, 可借助图像采集技术实现有效分选。此外, 红外摄像头通过检测物体辐射的热量差异, 能够识别其热特性^[45], 该技术虽在其他物料分选中有应用, 但在退役光伏组件分选领域的具体实践仍有待进一步探索。

(2) X 射线: X 射线分选技术通过探测穿透物料后的 X 射线强度差异, 生成反应物料内部密度分布图像, 进而实现精准分选。该技术已在电子废弃物回收领域得到成功应用。例如在废旧电路板、手机和计算机主板的分选过程中, 该技术能够清晰识别金属与非金属组分的分布与类别^[46], 并有效区分铜、铝、金等不同金属材料^[47]。退役光伏组件经层间分离后形成的多物质混合物料, 在物理性质上具备类似的区分特征, 因此该技术同样具备应用于退役光伏组件物料分选的潜力。

(3) 光谱: 通过捕捉物料对不同波段入射光的吸收、反射及透射响应差异, 结合特征光谱的指纹属性完成化学成分与物料品类的鉴别^[48]。常见的光谱技术包括紫外-可见光光谱、近红外光谱和拉曼光谱等。其优势在于能够提供物料的化学成分信息, 广泛用于塑料、橡胶、化学品等物料的分选。其中, 激光诱导击穿光谱技术可通过高能激光激发物料等离子体, 快速获取硅、铜、钙等特征元素的谱线信号, 能直接区分硅片的高纯硅特征、焊带的铜锡金属特征与玻璃的硅酸盐基体特征^[49]。光谱识别技术的核心优势在于非接触式检测与快速成分分析, 可在物料输送过程中完成实时识别, 适配光伏破碎料的自动化分选产线需求。但该技术也存在应用局限: 其一, 对物料粒度均匀性、表面清洁度要求较高, 光伏破碎料中的粉尘、残留封装胶会干扰光谱信号的准确性; 其二, 设备的光谱分辨率与数据分析算法直接影响识别精度, 高端检测设备的成本投入较高, 且操作人员需具备光

谱解析的专业能力;其三,在光伏物料分选应用中,需对破碎后的物料进行烘干、除杂等前处理,以保证水分、油分等杂质含量的稳定性,否则会大幅降低光谱识别的可靠性^[50]。

(4)激光识别:该技术主要基于激光扫描和激光反射原理^[51]。通过激光扫描设备对物料表面进行非接触式扫描,激光传感器实时获取物料表面形状和结构的详细信息,从而实现高精度的分选。该技术的优势在于其高速度、高精度的测量能力,特别适用于复杂、细小物料的分选^[52]。其中,激光扫描可以快速获取玻璃点云数据,通过处理点云数据分离玻璃与杂质^[49]。然而,激光识别设备的成本较高,且应用范围可能受限于具有特殊光学特性的物料分选。

3.1.2 物料识别算法技术

物料识别算法技术,特别是在色选、基于深度学习算法的图像识别和智能数控自动化方面等方向的应用,为固体废弃物分选流程提供了新的解决方案。常用的固体废弃物分选算法及其应用详见表3。

(1)色选技术

色选主要利用颜色空间模型对物料进行快速分级识别,并可结合传统机器学习算法提升分类精度^[53-55]。该技术分选速度快、结构简单,适合色差明显的物料(表3)。但在退役光伏组件中,玻璃、硅片等表面易产生强反射和过曝,色选结果容易受光照条件影响,因此需要通过布置光源和采图方式优化以减弱干扰。

表 3 算法技术对比^[53-59]

Table 3 Comparison of algorithmic technologies^[53-59]

算法技术	色选技术	深度学习技术	数控自动化
使用的算法	颜色空间模型(色相-饱和度-明度 颜色空间等)、机器学习算法(随机森林等)	CNN, 残差网络(Residual Network, ResNet)反向传播算法等	模糊逻辑控制(Fuzzy Logic Control, FLC), 比例-积分-微分控制(Proportional-Integral-Derivative control, PID)等
原理	基于颜色特征进行物料分类	通过卷积神经网络自动提取图像特征并进行分类	实时传感器数据结合优化算法调节系统参数
目标物料	玻璃(前后面板)、铝框、硅片、焊带	硅片、电池板、电池连接线、玻璃、金属夹具	硅片、背板(塑料/复合材料)、导电铜线、接线盒
优点	分选速度快,适用于色差明显的物料	特征提取能力,适应复杂背景和不稳定光照	精确控制,适用于复杂分选
缺点	对光照要求较高,容易受到反射	训练过程计算资源需求高,模型可解释性差	对设备的实时性要求高,需要较高的技术支持
设备要求	色选机,光源调节系统	高性能图形处理器,深度学习框架	数控设备、传感器、实时控制器等组成的完整数控系统

(2)深度学习技术

深度学习算法,特别是 CNN,已广泛应用于固体废弃物的图像识别。CNN 通过多层卷积层和池化层自动提取图像的多尺度特征,并对全连接层进行分类预测^[53]。CNN 优势在于其强大的自动特征提取能力,能够在无人工干预的情况下学习到物料的复杂特征,有效识别不同金属、塑料、玻璃等材料,能够在复杂背景和不稳定光照条件下保持较高识别精度。

同时,由于层压件分离时得到物料的形状特征、表面杂质附着情况各不相同,训练过程中通常使用反向传播算法与梯度下降算法优化网络参数,逐步减小误差并提高模型精度。为了应对退役光伏组件中大量高维图像数据,近年研究提出了深度残差网络(ResNet)和生成对抗网络

(Generative Adversarial Network, GAN)等新型架构,ResNet 通过引入残差连接解决了深度网络训练中的梯度消失问题^[56],而 GAN 则通过生成网络和判别网络的对抗训练,能够生成更为丰富的物料样本,从而提升模型的泛化能力^[57],适应不同分离方法得到的物料。

在退役光伏组件分选中,深度学习有利于同时利用颜色、形状及表面缺陷等多源信息,提高对不同物料和工况的适应性。其主要问题在于训练阶段对算力和数据规模依赖较大,且模型可解释性有限,因此如何降低计算成本并提升模型透明度仍是研究重点。

(3)数控自动化

智能数控自动化系统结合了多种先进算法,如数据挖掘、模式识别、机器学习等算法,能够实

现废弃物回收过程中的精确控制和高效分选^[58]。在智能数控系统中,控制算法主要通过实时采集传感器数据(如重量、尺寸、颜色、形状等),结合优化算法进行分析,动态调整系统参数。比如,基于模糊逻辑控制和比例-积分-微分控制(PID)^[59],能够实现不同工作条件下的自适应调整,确保系统的稳定性与高效性,可为传统分选技术确认最合适的运行参数,优化分选效果。

3.2 物料定位技术构成

由于退役光伏组件预处理后物料的尺寸较小,机械臂等分选设备难以高效分离,因此在物料运动过程中,常采用高速气阀喷射击打目标物料,改变其运动轨迹以实现分选。物料定位算法是智能分选系统的核心,主要会影响分选的准确性和实时性。在图像识别设备线阵 CCD 传感器识别物料后,产生一维数据,多行缓冲后组成二维数据,可供物料识别算法进行分析与分类,此后分析信息通过 DSP 设备传输至气阀控制主板,以控制气阀驱动板,完成分离,如图 7 所示。

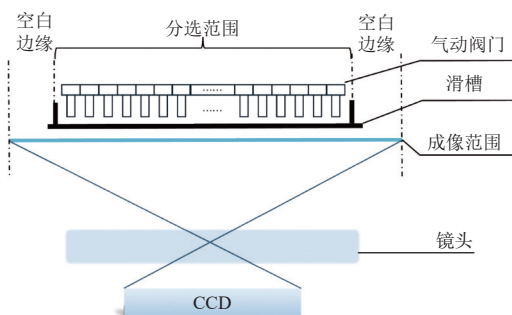
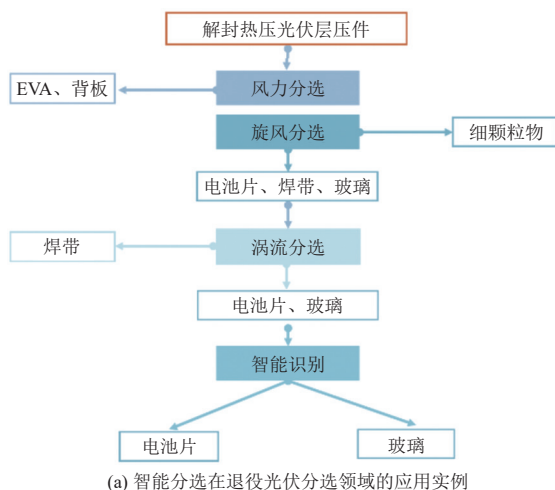


图 7 定位技术原理

Fig. 7 Principle of positioning technology



(a) 智能分选在退役光伏分选领域的应用实例

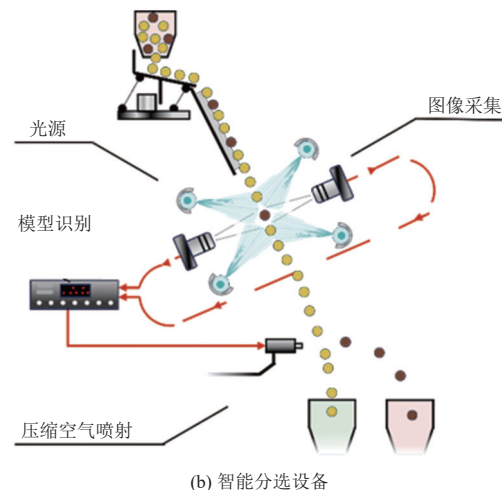
基于上述原理,常根据高速气阀的处理范围与气阀数量对图像区域进行精准划分,使分选模块的采集范围相匹配,该过程称为象元划分。然后,根据物料特性、工况要求优化气阀喷射延迟时长、照明设备流明、传送带转速等参数,实现物料与算法的交互,完成退役光伏组件的筛选。

3.3 智能分选应用与优缺点

3.3.1 应用

在退役光伏组件的资源化分选回收体系中,智能分选技术虽具备精准识别物料特征的核心优势,但受限于退役光伏组件多组分、多形态的复杂性,尚无法独立构建完整的分选流程,需与传统分选技术深度协同。如图 8(a)所示,解封后的光伏层压件(包含电池片、焊带、EVA、背板、玻璃)先进行风力分选,利用物料空气动力学特性差异,分离出 EVA 与背板;随后经旋风分离,借离心力场作用脱除细颗粒物,初步规整电池片、焊带、玻璃混合物料;再通过涡流分选,基于电磁感应原理精准分离金属属性的焊带,为智能分选环节前置“提纯”,降低物料干扰。

图 8(b)展示了退役光伏组件智能分选系统具体结构。该系统依托光源构建稳定的光照环境,利用图像采集单元获取物料的表面面貌及内部特征信息;随后将数据传输至模型识别模块,基于电池片与玻璃的光学差异进行精准识别与分类;最终由压缩空气喷射等执行机构完成分选操作。在此协同体系中,传统分选技术通过粗分、除杂、金属分离等预处理环节步骤,为智能分选提供高纯度、低干扰的物料条件;智能分选则在此基础上发



(b) 智能分选设备

图 8 智能分选在退役光伏分选领域的应用实例^[5, 58]

Fig. 8 Application example of intelligent sorting in end-of-life PV module sorting^[5, 58]

挥技术优势,实现对经预处理物料的高精度识别与细分。二者有效耦合,共同构建退役光伏组件全组分高效分选体系,推动退役光伏回收向智能化、精准化方向升级,并为后续电池片修复、玻璃再生资源化利用环节奠定坚实的物料基础。

3.3.2 优缺点

智能分选技术结合深度学习、机器视觉和先进算法,能够基于物料本质特征进行精准识别,从而提高回收效率。具体而言,CNN 算法通过图像识别技术可有效分选退役光伏组件中的金属(如银、铜、铝合金);色选技术则能有效分离玻璃与塑料;激光扫描技术则提高了分选精度。此外,智能分选不仅提高回收效率,还能减少人工操作与错误,降低系统稳定性风险,并通过智能数控系统实时调整分选参数,优化回收流程并降低设备故障率^[60]。

尽管智能分选技术具有显著优势,但也面临一些挑战。首先,该技术初期投资较高,尤其是深度学习模型训练和硬件建设,限制了其在小规模回收中的应用。其次,智能系统对数据质量要求较高,需大量标注数据进行模型训练,且在低质量图像或遮挡物料情况下,识别效果可能下降。此外,智能分选系统的操作和维护需专业技能,尤其在系统调试和算法优化方面,需要大量技术人员和时间投入^[61]。技术故障和软硬件兼容性问题也可能影响分选设备的长期稳定性。

4 退役光伏组件分选技术的挑战与趋势

4.1 现存瓶颈

随着光伏产业的快速发展,退役光伏组件的回收面临日益严峻的挑战。现有的传统物理分选技术,如磁选、静电分选、涡流分选等,虽然在某些场景有效,但在处理退役光伏组件时仍存在局限性。传统方法针对小尺寸物料的处理成本高,对大尺寸物料回收率低^[62],且无法有效分离种类繁多且物理性质差异较大的材料,如玻璃、硅片、铝合金、铜线、银和塑料等。

磁选主要适用于磁性物质,但对非磁性金属如玻璃、硅片,无法进行分选,需要结合其他技术,较为繁琐;静电分选受物料导电性影响,在湿润或污染物料中精度下降;涡流分选对低导电性、低密度物料如塑料和玻璃效果有限,且易受颗粒形状影响^[63]。尽管重力分选、筛分和人工分选常用于

初步分选,但这些方法精度较低,难以满足高精度、高效率回收的需求。

智能分选技术虽然在其他行业已被初步应用^[64],但在退役光伏组件回收中的应用仍处于探索阶段,数据积累不足和应用案例有限使得该技术无法广泛投入实际应用。

4.2 创新方向

针对退役光伏组件回收中的瓶颈,智能分选技术作为创新解决方案,展现出巨大潜力。未来创新主要集中在传统物理分选方法的智能化控制和智能方法的模块化设计,以提高回收精度、效率和降低成本。

智能化控制可通过引入深度学习、机器视觉和大数据分析优化分选过程。基于机器视觉的图像识别技术,实时分析退役光伏组件的形态、颜色、尺寸等信息,自动调节分选参数,以适应不同物料特性。

智能分选技术的模块化设计具有高度通用性,能够应用于多个回收领域。基于大数据和人工智能的模块化系统,可构建固废物料识别库,自由应用于各种电子废弃物回收场景。通过模块化设计,系统可根据不同任务灵活配置,形成广泛适用的智能分选平台。

随着工业 4.0 和物联网技术的发展,智能分选系统可实时获取传感器数据,并自动调整分选策略,形成闭环控制系统,进一步提升回收效率和质量。

4.3 政策和标准

智能分选技术的规模化落地有赖于政策与标准的配套建设。首先,应在国家层面建立基于深度学习与视觉识别的性能评价体系,明确数据集构建、误分率、实时性和能耗等核心指标,并发布权威的基准数据集与第三方比对验证制度。其次,应推动模块化设计的互操作性标准建设,统一数据与控制接口,同时结合数字产品护照和材料申报体系,推动光伏组件材料信息的数字化与机器可读化,从而增强识别库的通用性和跨行业移植能力^[3,7]。最后,应建立基于工业 4.0 与物联网的闭环控制标准,将传感数据采集、参数优化与能耗监测纳入全过程管理,并通过生产者责任延伸(Extended Producer Responsibility, EPR)^[65]、财政补贴与绿色认证等政策工具,形成工艺优化-政策激励-资源回收的闭环模式。

从国际经验来看,欧盟在废弃电气电子设备

指令^[66](Waste Electrical and Electronic Equipment Directive, WEEE)与废弃电气电子设备收集、物流和处理要求标准^[67](Collection, Logistics & Treatment Requirements for WEEE, EN50625)框架下已构建了较为系统的光伏组件处理与去污染标准,并通过数字产品护照计划推动全生命周期信息透明化。美国则依托华盛顿州 EPR 立法和加州通用废物管理制度,将生产者责任、数据报告与过程合规紧密结合^[68]。相比之下,我国生态环境部发布的《废光伏设备回收处理污染控制技术规范(征求意见稿)》^[69-70],为污染防治与过程监管提供了基础抓手,但在智能化标准、模块化接口以及闭环控制等方面仍有待进一步完善。

展望未来,我国应加快在智能分选领域的标准化与政策体系建设,重点在于系统纳入智能化控制、模块化设计与闭环控制三大核心方向的技术、指标与接口要求,并辅以绩效挂钩的激励机制、财政资金支持 and 示范工程推广。与此同时,应推动跨学科与跨产业的协同创新,建立光伏与电子废弃物协同处理的示范产线,并通过第三方核查与绩效报告制度,确保政策实施的透明性与可复制性。通过技术创新与政策标准的双轮驱动,退役光伏组件回收有望实现资源高效利用、环境影响最小化与产业可持续发展,为我国在全球能源转型与循环经济建设提供坚实支撑^[71]。更为重要的是,智能分选技术与配套政策的完善将有助于推动光伏全生命周期管理与绿色低碳发展,成为实现国家“双碳”目标的重要支撑力量。

5 结 论

本文综述了退役光伏组件物理法分选技术,结合全球光伏产业退役组件回收的迫切需求与技术发展现状,深入分析了传统物理分选技术与智能物理分选技术的应用特性、现存瓶颈及协同发展潜力,主要研究结论如下。

传统物理分选技术作为当前产业应用的基础手段,虽能实现物料的初步分类,但其技术局限性已难以适配退役光伏组件复杂的物料组成与精细分离需求。一方面,这类技术对物性差异细微的物料易出现分离不彻底的问题;另一方面,其分选效果高度依赖人工调整参数,不仅降低了分选效率,还增加了人为操作导致的二次污染风险,且对高密度与低密度、导电性与非导电性物料混合的复杂场景适应性较差,难以满足资源高值化回收

的要求。

智能物理分选技术通过融合机器视觉、深度学习算法与精准定位系统,突破了传统物理分选对物料单一物理属性的依赖,能够基于成分、结构、光谱信息等物料本质特征实现高精度识别与分选,不仅扩展了可处理物料的尺寸范围,还显著提升了金属与非金属的回收率。同时,智能系统借助大数据优化与实时自适应调整功能,有效降低了人工干预成本,提升了分选过程的稳定性与可持续性,展现出传统技术无法比拟的应用优势,成为推动物理法分选技术升级的核心方向。

然而当前物理法分选技术的发展仍面临多重困境:传统技术存在适用范围有限、自动化程度低的问题;智能技术则受限于数据积累不足、应用案例匮乏及初期投资成本较高的难题,且两类技术的协同应用机制尚未形成标准化体系,导致产业层面难以实现规模化、高效化的分选作业。

未来退役光伏组件物理法分选技术需朝着传统技术智能化升级与智能技术模块化普及的方向突破。对传统物理分选设备进行自动化改造,引入传感器与智能控制模块,提升其参数调整的精准度与响应速度,弥补传统技术的精度短板。此外,通过校企合作加大智能分选技术研发投入,建立跨领域数据共享平台以积累应用数据,同时推动智能系统的模块化设计以降低成本,并依托政策支持构建物理法分选技术的行业标准与评价体系。通过传统与智能技术的深度协同,最终实现物理法分选技术的高效化、精准化发展,为退役光伏组件的绿色回收与资源高值化利用提供坚实技术支撑,助力光伏产业形成生产-使用-退役-回收的闭环循环,推动全球循环经济与生态环境保护目标的实现。

参考文献 (References):

- [1] SICA D, MALANDRINO O, SUPINO S, et al. Management of end-of-life photovoltaic panels as a step towards a circular economy[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 2934-2945.
- [2] International Energy Agency (IEA). Snapshot of global PV markets 2025[R]. Paris: International Energy Agency (IEA), 2025.
- [3] 钟洪麟, 李丁丁, 刘茜, 等. 全球退役光伏组件回收研究热点、演化趋势与展望 [J]. *生态学报*, 2025, 45(9): 4079-4106.
ZHONG Honglin, LI Dingding, LIU Xi, et al. Global hotspots, trends, and future prospects of waste photo-

- voltaic modules recycling: A bibliometric analysis[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(9): 4079–4106.
- [4] WECKEND S, WADE A, HEATH G. End-of-life management solar photovoltaic panels[R]. Paris: IRENA and IEA-PVPS, 2016.
- [5] International Renewable Energy Agency (IRENA), International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme (IEA-PVPS). End-of-life management: Solar photovoltaic panels [R]. Abu Dhabi/Paris: IRENA & IEA-PVPS, 2016.
- [6] RONG Deng, CHANG N L, OUYANG Zi, et al. A techno-economic review of silicon photovoltaic module recycling[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 109: 532–550.
- [7] 袁玲雅, 张滢. 中国光伏产业发展及其资源环境影响[J]. *化工学报*, 2024, 75(S1): 14–24.
- YUAN Lingya, ZHANG Ying. Development of China's photovoltaic industry and its resource and environmental impacts[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2024, 75(S1): 14–24.
- [8] 许振明, 牛博. 电子废物的挑战与归趋: 废物-资源-再生材料-环境[J]. *辽宁工业大学学报(自然科学版)*, 2021, 41(4): 211–215+223.
- XU Zhenming, NIU Bo. Challenges and trends in E-waste: Waste, resources, materials and environment[J]. *Journal of Liaoning University of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 41(4): 211–215+223.
- [9] FARRELL C C, OSMAN A I, DOHERTY R, et al. Technical challenges and opportunities in realising a circular economy for waste photovoltaic modules[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 128: 109911.
- [10] SANATHI R, BANERJEE S, BHOWMIK S. A technical review of crystalline silicon photovoltaic module recycling[J]. *Solar Energy*, 2024, 281: 112869.
- [11] DENG Rong, ZHUO Yuting, SHEN Yansong. Recent progress in silicon photovoltaic module recycling processes[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 187: 106612.
- [12] HEIHO A, SUWA I, DOU Yi, et al. Prospective life cycle assessment of recycling systems for spent photovoltaic panels by combined application of physical separation technologies[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 192: 106922.
- [13] KLUGMANN RADZIEMSKA E, KUCZYŃSKA ŁAŻEWSKA A. The use of recycled semiconductor material in crystalline silicon photovoltaic modules production—A life cycle assessment of environmental impacts[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 205: 110259.
- [14] PAGNANELLI F, MOSCARDINI E, ALTIMARI P, et al. Solvent versus thermal treatment for glass recovery from end of life photovoltaic panels: Environmental and economic assessment[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 248: 109313.
- [15] LI Jia, JIANG Yiqun, XU Zhenming. Eddy current separation technology for recycling printed circuit boards from crushed cell phones[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 141: 1316–1323.
- [16] WANG Jianbo, SUN Chunxu, GUO Jie, et al. Integrated process for recycling aluminum electrolytic capacitors from waste printed circuit boards: Disassembly, heat treatment and magnetic-eddy current-electrostatic separating[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165: 334–345.
- [17] AZEUMO M F, GERMANA C, IPPOLITO N M, et al. Photovoltaic module recycling, a physical and a chemical recovery process[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2019, 193: 314–319.
- [18] SONG Baipeng, ZHANG Mengyao, FAN Yue, et al. Recycling experimental investigation on end of life photovoltaic panels by application of high voltage fragmentation[J]. *Waste Management*, 2020, 101: 180–187.
- [19] 王策, 许振明. 半导体存储介质破碎-分选系统的因子优化设计[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(2): 1111–1116.
- WANG Ce, XU Zhenming. Factor design of crushing-cyclone-electrostatic separation system for recovery of semiconductor storage medium[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(2): 1111–1116.
- [20] 薛面强, 杨义晨, 许振明. 废弃电路板破碎-风选-高压静电分选生产线的经济分析[J]. *环境污染与防治*, 2011, 33(9): 87–90+107.
- Xue Mianqiang, Yang Yichen, Xu Zhenming. Economic analysis of the production line for waste printed circuit board crushing-air separation-high-voltage electrostatic separation [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2011, 33(9): 87–90+107.
- [21] WAMBACH K, HEATH G, LIBBY C. Life cycle inventory of current photovoltaic module recycling processes in Europe: IEA PVPS Task 12: PV Sustainability[R]. Paris: International Energy Agency (IEA), 2018.
- [22] LIN Mi, WU Yusen, QIN Baojia, et al. Response to the upcoming emerging waste: Necessity and feasibility analysis of photovoltaic waste recovery in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(23): 17396–17409.
- [23] DIAS P, SCHMIDT L, MONTEIRO LUNARDI M, et al. Comprehensive recycling of silicon photovoltaic modules incorporating organic solvent delamination-technical, environmental and economic analyses[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 165: 105241.
- [24] ZENG Xianlai, ZHENG Lixia, XIE Henghua, et al. Current status and future perspective of waste printed circuit boards recycling[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 16: 590–597.
- [25] CHOWDHURY M S, RAHMAN K S, CHOWDHURY T, et al. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling[J]. *Energy Strategy Reviews*, 2020, 27: 100431.
- [26] 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 Xiaoyu, ZHANG Zisheng, LAI Weidong, et al. High voltage electrostatic separation of argentum and aluminum from waste photovoltaic panels[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(8): 145-151.
- [27] 梁蕊, 陈冠益, 颜蓓蓓, 等. 城市生活垃圾智能分类技术研究与应用进展 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(1): 227-238.
- LIANG Rui, CHEN Guanyi, YAN Beibei, et al. Advances in research and application of intelligent municipal solid waste classification technologies[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(1): 227-238.
- [28] GRANATA G, PAGNANELLI F, MOSCARDINI E, et al. Recycling of photovoltaic panels by physical operations[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014, 123: 239-248.
- [29] ZHAO Pengfei, GUO Junwei, YAN Guanghui, et al. A novel and efficient method for resources recycling in waste photovoltaic panels: High voltage pulse crushing[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 257: 120442.
- [30] 沈智超, 詹路, 谢冰, 等. 废旧汽车智能拆解技术研究进展 [J]. *环境卫生工程*, 2020, 28(5): 21-26.
- SHEN Zhichao, ZHAN Lu, XIE Bing, et al. Research progress in intelligent dismantling technology of waste automobile[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2020, 28(5): 21-26.
- [31] NIU Shengxiao, LIANG Puwu, ZHANG Zhicheng, et al. Selective leaching and magnetic separation for efficient recovery of lithium and iron phosphate from aluminum-contaminated cathode materials of spent LiFePO_4 batteries[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 372: 133350.
- [32] JIANG Dachuan, QIN Shiqiang, LI Pengting, et al. Electromagnetic separation of silicon carbide inclusions with aluminum penetration in silicon by imposition of supersonic frequency magnetic field[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 145: 45-49.
- [33] 余璐璐, 许振明. 高压静电分选技术在回收废旧电路板中的研究进展 [J]. *材料导报*, 2011, 25(11): 139-145.
- YU Lulu, XU Zhenming. Research progress of corona electrostatic separation technology in waste printed circuit boards recycling[J]. *Materials Review*, 2011, 25(11): 139-145.
- [34] 吕怀兴, 秦玉飞, 詹路, 等. 废旧冰箱混合塑料静电分选关键参数影响研究 [J]. *中国塑料*, 2021, 35(8): 131-135.
- LYU Huaixing, QIN Yufei, ZHAN Lu, et al. Study on electrostatic separation process of mixed plastics from waste refrigerators[J]. *China Plastics*, 2021, 35(8): 131-135.
- [35] SALAMA A, RICHARD G, MEDLES K, et al. Distinct recovery of copper and aluminum from waste electric wires using a roll-type electrostatic separator[J]. *Waste Management*, 2018, 76: 207-216.
- [36] 黄晨, 许振明. 废旧机电设备贵重金属回收利用技术及示范 [J]. *科技资讯*, 2016, 14(11): 173-174.
- HUANG Chen, XU Zhenming. Waste electrical and mechanical equipment precious metal recycling technology and demonstration[J]. *Science & Technology Information*, 2016, 14(11): 173-174.
- [37] 毕海军, 夏冬松, 秦宽, 等. 废旧锂离子电池涡流分选模型与影响因素 [J]. *电池*, 2024, 54(2): 276-280.
- BI Haijun, XIA Dongsong, QIN Kuan, et al. Model and influencing factors of eddy current separating of spent Li-ion battery[J]. *Battery Bimonthly*, 2024, 54(2): 276-280.
- [38] SHAN Zhicheng, YUAN Yi, YANG Lixue, et al. Key factors affecting the vertical eddy current separation efficiency between Cu and Al particles[J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 375: 124392.
- [39] SHAN Zhicheng, YUAN Yi, YANG Lixue, et al. Possibilities and difficulty levels for vertical eddy current separation between different non-ferrous metals[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, 356: 129933.
- [40] RUAN Jujun, DONG Lipeng, ZHENG Jie, et al. Key factors of eddy current separation for recovering aluminum from crushed e-waste[J]. *Waste Management*, 2017, 60: 84-90.
- [41] CAO Bin, YUAN Yi, YERBOL A, et al. Optimization of Halbach magnetic roller for eddy current separation based on the response surface method and multi-objective genetic algorithm[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 278: 123531.
- [42] LI Jia, GAO Kai, XU Zhenming. Charge-decay electrostatic separation for removing Polyvinyl chloride from mixed plastic wastes[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 157: 148-154.
- [43] 杨波, 许振明, 刘建鑫. 基于 YOLOv4 的杂质玻璃分拣检测研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(18): 322-328.
- YANG Bo, XU Zhenming, LIU Jianxin. Sorting and detection of impurity glass based on YOLOv4[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(18): 322-328.
- [44] 张磊. 基于高速工业相机实时图像处理的水果色选系统研制 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023: 4-7.
- ZHANG Lei. Development of fruit color sorting system based on real-time image processing of high-speed industrial camera[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2023: 4-7.
- [45] 李超, 李佳, 许振明. 废旧冰箱塑料的在线近红外光电识别 [J]. *塑料*, 2017, 46(5): 27-30+61.
- LI Chao, LI Jia, XU Zhenming. Online recognition of plastic from waste refrigerator with near-infrared spectroscopy[J]. *Plastics*, 2017, 46(5): 27-30+61.
- [46] ZHANG Yulai, FRANCOIS N, DEAKIN L, et al. Improved particle separation, characterisation and analysis for ore beneficiation studies using 3D X-ray micro-computed tomography[J]. *Minerals Engineering*, 2024, 216: 108835.
- 2025, 13(10): 5184-5198.
- [47] SHAO Fangtao, LIU Jing, WU Peng, et al. Exploiting foreground and background separation for prohibited item detection in overlapping X-Ray images[J]. *Pattern Recogni-*

- tion, 2022, 122: 108261.
- [48] NIU Bo, XU Zhenming, XIAO Jiefeng, et al. Recycling hazardous and valuable electrolyte in spent lithium-ion batteries: Urgency, progress, challenge, and viable approach[J]. *Chemical Reviews*, 2023, 123(13) : 8718–8735.
- [49] FARZANA S, LEE J U, TUCCITTO A V, et al. Green catalyst-laser based approach for recycling plastic waste into high-quality graphene[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 509: 161174.
- [50] XU Xinyi, LIU Jiaming, FENG Jiachun, et al. Efficient separation and recycling of waste wind turbine blades through in situ generation of peroxyacetic acid[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2025, 222: 108490.
- [51] 杨波, 许振明, 鲁瑛琦. 基于激光扫描的废弃玻璃目标分拣优化方法 [J]. *激光杂志*, 2024, 45(3): 269–273.
- YANG Bo, XU Zhenming, LU Yingqi. Optimization method of waste glass target sorting based on laser scanning[J]. *Laser Journal*, 2024, 45(3): 269–273.
- [52] KHETRI M, KANAUIA P K, GUPTA M C. Laser recycling of silver in bulk and nanoparticle form from silicon solar cells and deep learning for process automation[J]. *Renewable Energy*, 2025, 254: 123684.
- [53] LU Weisheng, CHEN Junjie. Computer vision for solid waste sorting: A critical review of academic research[J]. *Waste Management*, 2022, 142: 29–43.
- [54] BRÜNDL P, SCHECK A, NGUYEN H G, et al. Towards a circular economy for electrical products: A systematic literature review and research agenda for automated recycling[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2024, 87: 102693.
- [55] BIN ABU SOFIAN A D A, MAJID S R, KANG K, et al. Upcycling and recycling of spent battery waste for a sustainable future: Progress and perspectives[J]. *Progress in Materials Science*, 2025, 153: 101478.
- [56] LIN Kunsen, ZHAO Youcai, KUO Jiahong, et al. Toward smarter management and recovery of municipal solid waste: A critical review on deep learning approaches[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 346: 130943.
- [57] YANG Jian, XU Yupeng, CHEN Pu, et al. Combining spectroscopy and machine learning for rapid identification of plastic waste: Recent developments and future prospects[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 431: 139771.
- [58] LU Yingqi, YANG Bo, GAO Yichun, et al. An automatic sorting system for electronic components detached from waste printed circuit boards[J]. *Waste Management*, 2022, 137: 1–8.
- [59] GUO Jiuyong, GUO Jie, XU Zhenming. Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards: A review[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 168(2–3): 567–590.
- [60] BHOI N K, PATEL M, KAMARAPU S K, et al. Advancing sustainable electronic waste management: An overview of mechatronics solutions for health, environment, and recycling[J]. *Chemosphere*, 2025, 383: 144501.
- [61] XIAO Yaohong, GOYAL G K, SU Jinrong, et al. A comprehensive review of electric vehicle recycling: Processes in selective collection, element extraction, and component regeneration[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2025, 219: 108309.
- [62] 庞昇, 钱国余, 王东, 等. 废弃光伏组件循环利用综述 [J]. *绿色矿山*, 2025(2): 94–108.
- PANG Sheng, QIAN Guoyu, WANG Dong, et al. Review on recycling of valuable elements in end-of-life photovoltaic modules[J]. *Journal of Green Mine*, 2025(2): 94–108.
- [63] DASCALESCU L, ZEGHLOUL T, MEDLES K, et al. Recent advances in the electrostatic separation of particulate matter[J]. *Journal of Electrostatics*, 2025, 134: 104036.
- [64] LI Jiayan, YAN Shuang, LI Yaoyao, et al. Recycling Si in waste crystalline silicon photovoltaic panels after mechanical crushing by electrostatic separation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 415: 137908.
- [65] WANG Jie, FENG Yi, HE Yaquin. The research progress on recycling and resource utilization of waste crystalline silicon photovoltaic modules[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2024, 270: 112804.
- [66] SHITTU O S, WILLIAMS I D, SHAW P J. Global e-waste management: Can WEEE make a difference? A review of e-waste trends, legislation, contemporary issues and future challenges[J]. *Waste Management*, 2021, 120: 549–563.
- [67] MICHALAK J, STASZKIEWICZ P, WANIAK MICHALAK H. Is academic recommendation translated into the European Union corporate sustainability reporting directive proposal?[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 412: 137186.
- [68] DOMÍNGUEZ A, GEYER R. Photovoltaic waste assessment in Mexico[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 127: 29–41.
- [69] PREET S, THOR SMITH S. A comprehensive review on the recycling technology of silicon based photovoltaic solar panels: Challenges and future outlook[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 448: 141661.
- [70] SHAO Jiali, LI Jing, YAO Xilong. Net benefits change of waste photovoltaic recycling in China: Projection of waste based on multiple factors[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 417: 137984.
- [71] DE SOUZA R A, VEIT H M. Study of electrostatic separation to concentrate silver, aluminum, and silicon from solar panel scraps[J]. *Circular Economy*, 2023, 2(1): 100027.