

新能源固废资源化与污染控制研究进展和发展趋势

邹庆芳¹, 胡 广¹, 李朝阳¹, 段华波^{1, 2, *}, 杨家宽^{1, 2, 3, *}

(1. 长江流域多介质污染协同控制湖北省重点实验室, 华中科技大学 环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 固废处理处置与资源化技术湖北省工程实验室, 湖北 武汉 430074; 3. 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 随着我国“双碳”目标的深入推进, 风电和光伏产业规模日益增长, 新能源汽车行业快速发展, 电池储能技术也渐趋成熟。近年来, 清洁能源和新能源产业技术得到了蓬勃发展, 应用市场不断拓展。新能源领域将面临大量报废和退役的产品或设备, 这类在新能源领域产生的固体废物, 是“无废城市”建设面临的新难题, 其兼具资源和环境的双重属性, 成分复杂多样, 资源化回收和污染控制难度高, 成为目前研究的热点和难点。综述了典型新能源固废的资源化回收利用技术的最新研究进展以及产业实践和污染控制技术重难点, 重点对比分析了太阳能电池、风机叶片和动力电池回收处理的不同技术特征, 针对适用不同产品回收要求的技术进行了总结, 进而提出了新能源固废资源化与污染控制技术发展方向和潜力, 以期为推动新能源行业可持续发展提供依据, 从而更好应对新能源废物管理存在的挑战。

关键词: 新能源固废; 资源化; 污染控制; 清洁能源; 无废城市

中图分类号: X705 **文献标识码:** A

Status and development trends of resource utilization and pollution control of renewable energy waste

ZOU Qingfang¹, HU Guang¹, LI Zhaoyang¹, DUAN Huabo^{1, 2, *}, YANG Jiakuan^{1, 2, 3, *}

(1. Hubei Key Laboratory of Multi-media Pollution Cooperative Control in Yangtze Basin, School of Environmental Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology (HUST), Wuhan 430074, China; 2. Hubei Provincial Engineering Laboratory for Disposal and Recycling Technology of Solid Waste, Wuhan 430074, China; 3. State Key Laboratory of Coal Combustion, Wuhan 430074, China)

Abstract: With China's "dual carbon" goals continuously deepening, the wind power and photovoltaic industries are experiencing steady growth, with the new energy vehicle sector rapidly developing. Meanwhile, battery energy storage technology is nearing maturity. Recently, clean energy and new energy technologies have seen rapid development, with the application market continuing to expand. The new energy sector will soon be confronted with a large number of retired or scrapped products and equipment, posing significant challenges to achieving "zero-waste cities". These wastes have dual characteristics: They are both resources and environmental concerns, and are composed of complex, diverse materials. Recovering resources and controlling pollution from these wastes have become key research areas and challenges. This article reviews the latest research, industry practices, and challenges in recovering and utilizing renewable energy solid waste, comparing and analyzing the technological characteristics of recycling solar panels, wind turbine blades, and electric vehicle batteries. It identifies suitable technologies for different product recovery needs and outlines directions for developing resource re-

收稿日期: 2024-07-03 修回日期: 2024-08-07 DOI: 10.20078/j.eep.20240808

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目 (52330004); 国家重点研发计划资助项目 (2023YFC3902803)

作者简介: 邹庆芳 (2001—), 女, 湖北恩施人, 硕士研究生, 主要研究方向为固废资源化与处置。E-mail: zouqf@hust.edu.cn

通讯作者: 杨家宽 (1973—), 男, 湖北鄂州人, 教授, 主要研究方向为固废资源化与处置。E-mail: jkyang@hust.edu.cn

段华波 (1981—), 男, 湖北孝感人, 副教授, 主要研究方向为固废资源循环与低碳评价。E-mail: huabo@hust.edu.cn

covery and pollution control technologies for renewable energy solid waste. The goal is to support the sustainable development of the renewable energy industry and help address the challenges of renewable energy waste management.

Keywords: Renewable energy solid waste; Resource utilization; Pollution control; Clean energy; Zero-waste cities

0 引言

随着国家“双碳”工作的持续推进,我国风电、光伏等清洁能源发展十分迅猛。预计到 2030 年,风电和光伏总装机容量将从 2022 年的 739 GW 增长到 1 200 GW^[1];在交通领域,新能源汽车的比重预计将从 2022 年的 26%增长至约 40%^[1-2];抽水蓄能装机量将从 2022 年的 46 GW 增长到 120 GW^[1, 3]。随之产生的将是大量新能源固废,如废弃光伏组件、风机叶片、废旧动力电池和储能电池等。新能源固废组分复杂,其中可能含有金、银等稀贵金属,但同时也可能含有铅、镉等重金属污染组分和其他有机污染组分(表 1~3),因此具有资源和环境双重属性。新能源固废既是建设“无废城市”面临的突出难题,也是全球清洁能源发展的共性问题。

表 1 典型晶硅太阳能电池片主要组分含量^[4-6]

Table 1 Typical crystalline silicon solar panels components ^[4-6]			
物质	含量/%	物质	含量/%
EVA	5.10	铜	1.12
TPT 背板	1.50	铝	18.53
银	0.05	锡铅	0.05
硅(太阳能电池片)	3.65	玻璃	70.00

注:EVA 为乙烯-醋酸乙烯酯共聚物(Ethylene Vinyl Acetate);TPT 为聚氟乙烯复合膜。

表 2 主梁结构为碳纤维的风机叶片主要组分含量^[4-6]

Table 2 Wind turbine blades with carbon fiber main structure components ^[4-6]	
物质	含量/%
金属(钢、铝)	1.3
碳纤维	13.6
玻璃纤维	27.4
树脂	36.1
泡沫板	21.6

基于 Web of Science 中的 Science Citation Index Expanded 数据库,分别以新能源固废(Renewable energy solid waste)、报废的光伏组件(Pho-

tovoltaic module)、晶硅太阳能电池(Crystalline silicon solar cell)、薄膜太阳能电池(Thin-film solar cell)、钙钛矿太阳能电池(Perovskite solar cells)、风机叶片(Wind turbine blade)、动力电池(Power batteries)和资源化(Recycling, reuse, recovery)作为主题检索词,论文类型包括研究性论文、综述论文和会议论文等,对 2014—2023 年之间该库收录的相关文献进行了检索分析,共查找到 896 010 篇文献(图 1)。结果表明,近十年来新能源固废相关研究在全球范围内的关注热度持续上升,发文数量排名前 5 位的国家分别是中国(393 492 篇)、美国(160 166 篇)、印度(43 507 篇)、英国(40 702 篇)和德国(36 890 篇)。进一步分析和选读部分文献,本文综述了新能源固废资源化回收利用技术的研究进展,重点总结了太阳能电池、风机叶片和动力电池回收处理的最新研究成果,并对未来发展趋势进行了展望。

表 3 锂离子动力电池主要组分含量^[4-6]

Table 3 Lithium-ion power battery components ^[4-6]			
元素	含量/%	元素	含量/%
Al	1.0	Cu	1.0
Co	22.5	Li	4.0
Fe	0.3	Mn	0.2
Ni	11.0	C+O+H	60.0

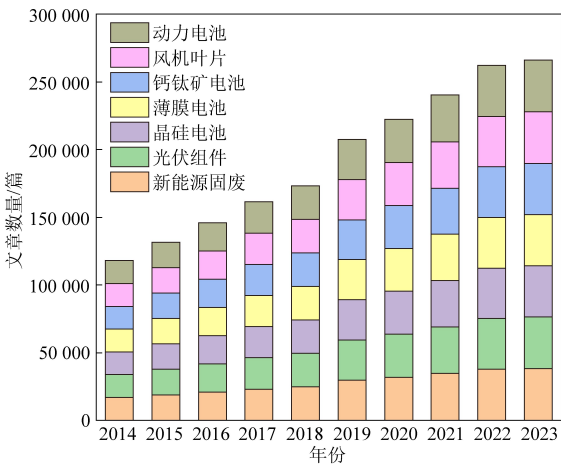


图 1 2014—2023 年新能源固废相关文章数量统计分析
Fig. 1 Statistical analysis of the number of articles related to renewable energy solid waste from 2014 to 2023

1 新能源固废产生特性

近年来我国清洁能源、新能源产业快速增长，特别是在光伏和风电方面，我国在全球市场中占

有重要地位，装机量增长快速，动力电池发展稳定，并在全球动力电池装车量份额中持续居于优势地位(表4)。

表 4 我国典型新能源产业装机量/装车量及在全球占比份额统计表^[7-9]

Table 4 Statistics table on installed capacity/loading capacity of typical new energy industries in China and their global market share^[7-9]

类别		2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	2021 年	2022 年	2023 年
光伏发电	全球/GW	5.25	40.13	217.46	709.67	945.69	1 174.19	1 549.09
	中国/GW	0.14	1.02	43.54	254.36	308.52	402.34	608.92
	中国占比/%	2.7	2.5	20.0	35.8	32.6	34.3	39.3
风力发电	全球/GW	59.32	194.40	416.42	733.57	825.66	898.85	1 021.00
	中国/GW	1.06	29.58	131.14	273.93	303.38	336.34	441.34
	中国占比/%	1.8	15.2	31.5	37.3	36.7	37.4	43.2
动力电池	全球/GW	—	—	20.00	137.00	296.50	517.90	705.50
	中国/GW	—	—	16.50	62.90	154.50	294.60	387.70
	中国占比/%	—	—	82.5	45.9	52.1	56.9	55.0

在新能源技术的生产和使用过程中,均会产生大量的报废组件,例如生产光伏组件过程中的含铅废物、不合格组件,风机设备生产使用过程中废弃的叶片以及动力电池中的锂、镍、钴等金属。随着新能源组件“退役潮”的到来,未来新能源行业的组件退役量将呈现巨大增长(表5)。这些新

能源固废存在环境风险,如果处理不当将导致严重的环境污染。为此,工信部、国家发改委等八部门在2023年2月联合发布了《关于加速推动工业资源综合利用的实施方案》,明确提出促进废弃光伏组件、风机叶片等新兴固废的综合利用技术研发和未来产业化应用,减少碳排放。

表 5 我国和全球典型新能源行业退役量预测表^[10-12]

Table 5 Forecast of retired amounts of typical new energy industries in China and globally^[10-12]

	2030 年预测退役量/万 t		2050 年预测退役量/万 t	
	中国	全球	中国	全球
光伏发电	150	800	2 000	7 800
风机发电	94.79	230.00	1 720.00	4 300.00
动力电池	350.0	657.7	—	1 056.8

2 资源化技术研究进展

2.1 报废光伏组件

目前的光伏电池市场主要包括晶硅光伏电池、薄膜电池和新型太阳能电池三类。第一代光伏电池(晶硅太阳能电池)占据90%市场;其次为薄膜太阳能电池,新型太阳能电池主要以钙钛矿太阳能电池为主。现阶段报废主要对象为晶硅光伏电池^[13],其典型回收流程如图2所示。

2.1.1 晶硅太阳能电池

晶硅光伏组件主要包括铝合金边框、玻璃、封装材料、太阳能电池、导电背板等,主要回收玻璃、铝、硅料、银等材料。例如,ESHRAHGI等^[14]尝试回收晶硅组件中的硅并应用于锂电池阳极,通过

酸碱浸出以去除铅、银等金属杂质,制得锂电池容量可达1 400 mAh·g⁻¹。ZHANG等^[15]将回收的硅粉转化成多孔硅,通过化学蚀刻法去除光伏电池上的Ag、Al电极制备LIBs,并可提供2 427.7 mA·h·g⁻¹的容量。PRASAD等^[16]利用HF和KOH两步法回收制备的高纯度硅料可用于钢铁制造行业。除了硅料的回收,晶硅组件中的银也受到了广泛关注,常用回收方法有湿法冶金和硝酸电解。利用沉淀富集的原理,通过加入Cl⁻与浸出的Ag⁺结合形成AgCl沉淀,并进行还原处理得到银初产物,再使用电解的手段获得高纯度银。为提高浸出效率,学者利用HF+HNO₃^[17]、HNO₃+KOH^[18]的模式浸出银。然而HNO₃的使用会产生含氮氧化物的有毒气体,因此学者提出利用有机

酸替代 HNO_3 , 也取得了高效的成果。如黄庆等^[19]和 YANG 等^[20] 分别将甲磺酸、甲烷磺酸和 H_2O_2 搭配提取银元素, 浸出率和电解回收率为 97.850%、99.995%。晶硅组件中的铅也具有一定的回收价值, JUNG 等^[21] 用浸出、沉淀、加热氧化

三步处理得到 PbO , 溶液中残留的 Pb 通过添加 NaS 生成 PbS 沉淀, 去除率达 93%。SAN 等^[22] 提出回收组件中铜粉的同时固定封存 Pb 和 Sn, 避免进入环境中造成污染。

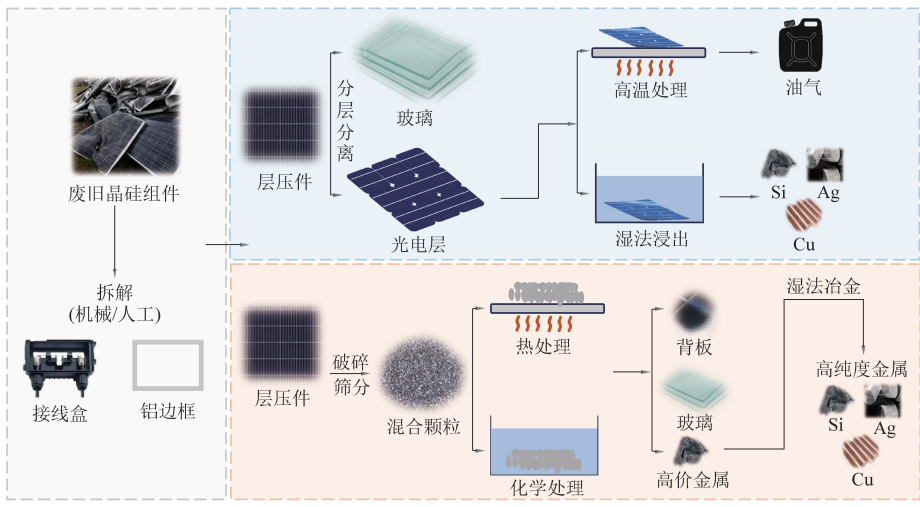


图 2 晶硅组件典型回收技术

Fig. 2 Typical recycling technologies for crystalline silicon modules

2.1.2 薄膜太阳能电池

第二代太阳能电池主要是薄膜太阳能电池, 如碲化镉 (CdTe) 和铜钢镓硒 (CIGS), 主要由玻璃板、金属层、透明导电层、电器功能盒、胶合材料、半导体层组成。除了 Si 元素的回收, 因为含有进口的贵价金属, 其回收效益要优于晶硅电池。报废的 CdTe 薄膜电池含有有毒重金属 Cd, 泄漏到环境中会对土壤、水资源等造成污染, 需妥善处理。FTHENKIS 等^[23] 利用离子交换树脂吸附 Cd, 去除率达到 99.99%。ZHANG 等^[24] 利用火法冶金以 S 和 CdTe 反应置换出 Te, 实现 Te 和 Cd 的回收率大于 90%。张琪等^[25] 通过特定条件下氧化焙烧的方法, 回收了 93.96% 的 Te 和 89.27% 的 Cd。CIGS 化合物薄膜电池的回收主要是针对其中的 Se、Cu、Ga 和 In 元素, 可通过多级工艺梯次分离^[26]、火法回收^[27]、湿法萃取^[28] 的方法高效回收, 其中 Cu 和 In 的回收率都大于 90%。GUSTAFSSON 等^[29] 发现在高温 ($800\text{ }^\circ\text{C}$) 下氧化还原能获得纯度为 99.99% 的 Se, 回收率为 99%; 对余下固渣溶解电积能获得高纯度的 Cu、In 和 Ga。HSIANG 等^[30] 利用 H_2O_2 为强氧化剂, 采用高压浸出的方式回收 CIGS, 并且回收产物回用于 CIGS 生产过程中, 节省了原料成本。

2.1.3 新型太阳能电池

新型太阳能电池主要种类为钙钛矿太阳能电

池, 利用钙钛矿材料作为光吸收层。主要结构包含透明导电基底、电子传输层、钙钛矿活性层、空穴传输层和顶电极。新型太阳能电池起步较晚但发展迅速, 目前 0.1 cm^2 铅基钙钛矿太阳能电池的光电转化效率为 26.41% (认证效率 26.21%)^[31], 刷新了钙钛矿电池的效率纪录。然而在光伏器件的使用期间, 高性能钙钛矿太阳能电池中的铅仍然存在毒性问题^[32]。近年来, 学者开始研究从废弃钙钛矿层中回收 Pb 的方法。PARK 等^[33] 利用含铁羟基磷灰石吸附回收钙钛矿溶液中的 PbI_2 。CHEN 等^[34] 利用阳离子交换树脂, 通过 RCOO^- 吸附钙钛矿电池板中的 Pb^{2+} , 回收率为 99.2%。SCHMIDT 等^[35] 以热水作为萃取剂, 沉淀浓缩 PbI_2 。与商业 PbI_2 相比, 用回收 PbI_2 所制备器件的光电性能没有明显的下降。除了对于报废钙钛矿太阳能电池中的重金属铅的资源回收、污染控制相关研究外, 也有针对其中的导电玻璃 (FTO) 循环再生相关研究。例如, BINEK 等^[36] 设计了一种逐层剥离钙钛矿层的方法, 在回收的洁净 FTO/玻璃基板上制备了一层新的电子选择性 TiO_2 层, 该 FTO 运行几个周期后表现出性能下降。CHOWDHURY 等^[37] 则选择性地去除钙钛矿层中的 MAI, 通过干燥、DMF 中浸提、干燥, 回收得到 FTO。

2.1.4 报废光伏组件回收技术比较分析

从深度资源化回收的角度分析,目前主流回收技术方法比较见表 6。热处理法高去除率和相对简便的操作特点使其广泛应用于工业中。化学处理法关键在于溶剂的选择,合适的溶剂在有利于提高去除率的同时降低环境危害。物理回收法操作简便,二次污染少,适用于对产品纯度要求低的场景;但是无法单独获得目标组分,通常需要与其他方法结合使用,一般用于预处理手段。热处理法和化学回收法需要采取措施控制废气的排放,安装废气处理设施确保排放达标。同时,针对

硅片破裂难以完整回收的问题,需进行专门的废物收集和处理。从产业实践的角度分析,欧美、日本等发达国家在光伏组件回收上起步较早。例如,2018 年法国建成了欧洲首座光伏组件回收厂;德国 Reiling Unternehmensgruppe 通过化学湿法回收晶硅光伏组件,CdTe 光伏组件的回收由 First Solar 公司负责。2021 年,我国青海光伏产业创新中心建成了首条具有自主知识产权的晶硅组件回收中试线,采用物理拆除热切割,湿法提纯的技术,综合回收率达 92%,其也是首家国家级循环经济标准化试点企业。

表 6 太阳能电池板回收工艺比较^[38]
Table 6 Comparison of solar panel recycling processes^[38]

回收方式		优点	缺点	再利用场景
热处理法		EVA 去除率高、适合大规模工业生产	产生废气,加热过程中电池破裂,难以收集完整硅片	获得回收玻璃、硅料等
化学处理法	有机溶剂溶解	过程温和,溶解效果好	时间长,EVA 溶胀使硅片破裂,大量废弃有机溶剂污染	获得回收硅料
	无机酸溶解	操作简单、流程短、能耗低,能保证硅片的完整性	产生废液、废气污染	获得完整回收硅片
物理回收法		操作简单,污染小	无法获得单一组分,纯度低,需要和其他方法结合	硅料粗组分

2.2 风机叶片

风机叶片是由玻璃纤维(GF)、碳纤维(CF)或玻璃/碳纤维混合增强的热固性树脂基复合材料(GFRP)制成的^[39],强度高,稳定性好,回收降解难度也大。现阶段风机叶片的回收处理方式主要有机械法、热回收和化学回收法。

2.2.1 机械法

机械回收是通过将废弃的叶片进行分解、粉碎、筛分和清洗等处理,然后将处理后的材料作为混凝土、填料等重新利用,以减少废弃物对环境的负面影响,并提高资源的再利用率。MA-MANPUSH 等^[40]探究了回收的风机叶片对于再生材料性能的影响,指出回收风机叶片制造高附加值高性能复合材料是可行的。RIBEIRO 等^[41]将机械回收的 GFRP 废料作为混凝土的填料替代品。KAVALIAUSKAS 等^[42]开发了一种从风机叶片中形成微米纤维的创新技术,该纤维能用于建筑材料等领域生产。

2.2.2 热回收法

热回收法包括热解、流化床回收工艺和微波热解,风机叶片典型热回收处理原理如图 3 所示。热解是一种利用惰性气体加热将复合材料中的树

脂基体分解成有机小分子,从而回收纤维的方法。GINDER 和 OZCAN^[43]证明从风机叶片中热解回收玻璃纤维产量更高。MAZZOCCHETTI 等^[44]通过热解回收 CF,并且利用木炭与环氧树脂作用促进纤维材料的黏附。HADIGHEH 等^[45]通过优化工艺变量开发出一种高效节能的热解技术,同时可以改善回收碳纤维(rCF)的表面特性,回收表面损伤较低的 rCF。流化床回收工艺是在硅砂存在情况下,使用热空气流将聚合物基体与纤维分离的技术^[46]。MENG 等^[47]对流化床工艺进行了评估,指出流化床工艺产生的 rCF 呈现蓬松形态,长度分布不均匀且强度有所降低。PENDER 和 YANG^[48]利用开发的流化床工艺再生回收了玻璃纤维,其强度和表面功能得到实质性的改善。并且指出使用流化床工艺回收复合风力涡轮机叶片减少了碳排放,具有更高的环境效益^[49]。微波热解法是利用微波辐射在微波室内对复合材料中的树脂基体进行分解。通过微波热解法能够成功回收报废风机叶片表面干净完整的 CF^[50],并且在氩气氛围里回收的纤维抗拉强度与原本相差不大^[51]。更有学者利用微波热解法开发一种新型复合材料,使得含有生物炭颗粒的 GFRP 弯曲强

度增加了 2 倍以上^[52]。

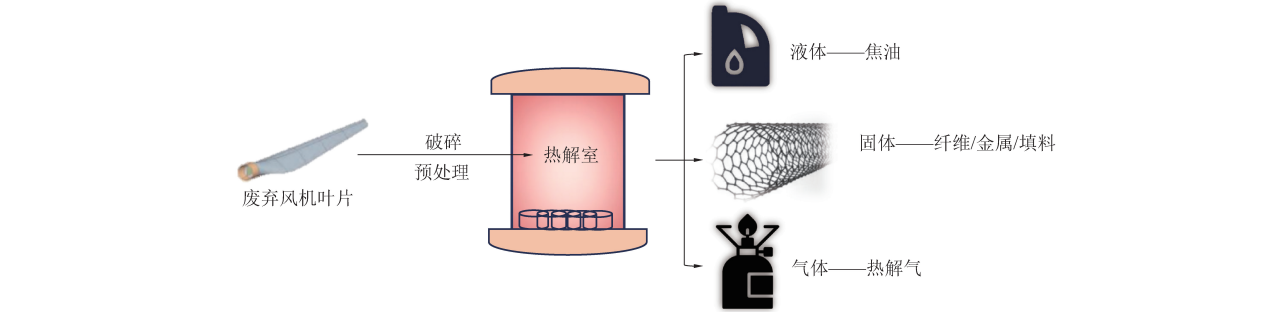


图 3 热回收法处理风机叶片典型流程

Fig. 3 Typical process for recycling wind turbine blades by pyrolysis recovery

2.2.3 化学回收法

化学回收法是采用不同溶剂在合适温度下分解叶片中的环氧树脂等热固性树脂。化学回收法能够利用不同的溶剂获得纤维与其他成分(燃油、燃气等),同时生产其他有价值的化学品。例如, OLIVEUX 等^[53]对不饱和聚酯进行亚临界(200~374 ℃)水解,纤维强度降低 35%。MATTSSON 等^[54]以亚/超临界水为原料,在催化剂(酸和碱)和助剂(醇和醇)作用下溶解风机叶片,回收玻璃纤维和碳氢化合物馏分,用作炼油厂的原料。SOKOLI 等^[55]以丙酮为有机溶剂可实现循环回收(达到 8 次以上),减少 88%的溶剂用量。

2.2.4 废弃风机叶片回收技术比较分析

对于废弃风机叶片,机械、热处理和化学等 3 种主要回收方法的优缺点对比见表 7。机械法简单易行,是使用最广泛的方法。热回收法可有效

降解有机物质,但需额外消耗能源维持高温。化学回收法能实现接近 100%的回收率,但大量化学试剂的使用存在环境污染和安全风险,寻找绿色高效的化学溶剂仍是未来发展的方向。机械法和热处理法相对较环保,但需注意处理过程中颗粒或废渣的处理;化学回收法需严格控制化学品使用量以及化学废物的排放。从产业实践的角度,废弃风机叶片的回收处理目前以机械回收和热解焚烧为主。例如,Energy Vault 公司称可用 GFRP 叶片与煤灰废料混合制成复合砖,用于重力储能;美国 GE 集团宣布和法国 Veolia 公司共同对废旧叶片进行回收,使其替代粘土、石灰等生产硅酸盐水泥。在国内,一些企业也尝试风机叶片回收技术的开发,如金风科技将粉碎后的风机叶片颗粒添加到 3D 打印材料中。国内的回收技术相较于国外仍处于起步的阶段,需要长期探索和努力。

表 7 风机叶片回收工艺比较^[49]

Table 7 Comparison of wind turbine blade recycling processes^[49]

回收方式		优点	缺点	再利用场景
机械法		操作简单,可回收不同长度的短纤维和复合颗粒	成本高,无法获得长纤维,机械性能损失严重	制作混凝土、填料等建筑领域原材料
	热解法	碳排放少,能极限降低叶片体积	设备建设投资成本高,热解过程中产物控制和分离相对困难	再利用热解产生的热能和生物燃料,产生的化学纤维可用于风机叶片、复合材料的再生产
热回收法	流化床回收	操作灵活,适用范围广泛,加热均匀	初期建设成本高,存在热损失,降低能量转换效率	回收更高级的纤维材料
	微波热解	加热快速,反应时间缩短,减少热损失	对热解对象的尺寸形状有要求,适用范围有限	更高性质的纤维材料用于电池工业等
化学回收法		纤维和树脂的回收率高	使用的溶剂大多数有毒,二次污染	获得燃油、燃气等

2.3 动力电池

目前市场上大量动力电池采用锂离子电池技

术,这种技术具有高能量密度和长循环寿命等特点^[12],在电动车辆领域得到了广泛应用。典型的

锂电池包括锂镍钴铝电池、锂镍锰钴电池和磷酸铁锂电池^[56],主要由外壳、正负极、电解液和隔膜等组成。当废旧锂电池容量低于 80% 时开始退役,退役后的电池若得不到有效处理,会对土壤、水体产生危害。电池剩余容量为 30%~80% 时可通过梯次利用进行回收,剩余容量低于 30% 可通过物理、化学方法拆解再利用,正极材料中的各种元素还可通过生化和其他方法进一步回收或完全回收。废旧锂电池典型回收技术流程如图 4 所示。

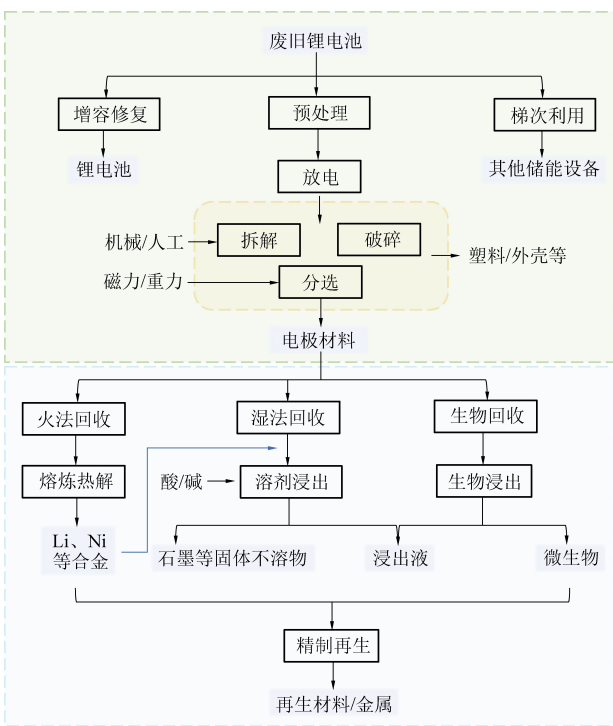


图 4 废旧锂电池回收技术流程

Fig. 4 Waste lithium battery recycling technology process

2.3.1 梯次利用

在锂电池达到设计使用寿命后,通过将其用于其他应用或进行不同程度的再加工得以再使用的过程即为梯次利用。这种梯次利用方式最大限度地延长了电池的使用寿命,提高了资源利用效率,同时也减少了废物处理的成本和环境影响。废旧锂电池梯次利用分为三个阶段。根据动力电池余能状态,电池可进行不同利用。当电池的剩余容量高于 80% 可以通过增容技术或原位修复技术重新用于动力汽车等高能量密集应用^[57]。剩余容量在 30%~80% 之间的电池则可以进行梯次利用,用于储能设备、移动电源等领域。在此过程中,这些废旧电池仍可循环利用,其寿命可达 400~1 000 次,且具有较低的成本和较高的经济价值^[58]。剩余容量低于 30% 的废旧电池无法再

次应用,通过回收有价值的材料来实现有效的废物利用。

2.3.2 火法回收

通过分解废旧电池的正极材料,去除隔膜等有机物,金属发生氧化还原反应,熔点较低的金属转化为合金,沸点较低的金属化合物通过冷凝进行回收。袁文辉等^[59]采用还原熔炼的方法进行回收,且钴和铜回收率分别达到 78.63% 和 81.54%,然而炉渣中残留的铜、钴等会造成大约 20% 亏损。DANG 等^[60]利用氯化焙烧的方法回收锂电池,采用 CaCl_2 作为给氯剂,锂的蒸发率达到 97.45%。由于火法回收工艺简单、生产率高,在工业上得到了广泛的应用,如 Umicore、Retriev Technologies 公司将废旧电池燃烧转化为合金。然而,火法冶金需要高温熔炼,产生的二噁英气体需要额外的处理。

2.3.3 湿法回收

湿法回收是指将废旧锂电池破碎后溶解,选择适当的化学试剂进行分离浸出金属元素的过程。 HCl 、 HNO_3 、 H_2SO_4 通常作为湿法的浸出剂,如 BARIK 等^[61]利用 HCl 回收钴和锰,总回收率分别为 90% 和 95%。SWAIN 等^[62]采取 H_2SO_4 - H_2O_2 体系探究了钴和锂的最佳浸出条件,得到钴和锂的浸出率分别为 93% 和 94%。LEE 等^[63]通过 HNO_3 - H_2O_2 体系使得钴和锂的浸出率都大幅提高。然而使用无机酸会产生酸雾、酸性废水,危害人体健康。因此有学者利用有机酸替代无机酸浸出剂,如 NAYAKA 等^[64]利用抗坏血酸和甘氨酸组合在 6 h 内实现了钴回收率超过 95%。GAO 等^[65]利用甲酸作为浸出剂和分离剂从阴极废料中回收锂,实现高达 99.93% 的锂浸出率并使得铝的溶解量最低。火法与湿法联合使用对于效率提高作用显著,FU 等^[66]通过火法还原结合湿法浸出使得锰、镍、钴、锂的浸出率分别达到 96.73%、97.65%、97.85% 和 99.68%。

2.3.4 生物法回收

生物法回收锂电池是一种新兴的技术,通过微生物的代谢活动,将废旧电池中的金属元素转化为可溶性形式,从而实现金属的提取和回收。例如,MISHRA 等^[67]研究了 Fe^{2+} 对于氧化亚铁硫杆菌浸出废锂电池的效果影响,发现当 Fe^{2+} 浓度为 3 g/L 时,钴、锂的浸出率最高约为 70%、80%。ZENG 等^[68]研究了 Ag^+ 对氧化亚铁硫杆菌浸出废锂电池中钴的影响,发现当 Ag^+ 浓度为 0.02 g/L 时钴的浸出率为 98.4%。HOREH 等^[69]采用黑曲

霉进行生物浸出,研究废锂电池中不同金属的浸出效果,发现锂和铜的浸出率分别达到 95%、100%,而锰的浸出率只有 65%。

2.3.5 废弃动力电池回收技术比较分析

动力电池的主要回收方法优缺点见表 8。火法简单易行,适用于处理大规模产业化的电池回收。湿法工艺成熟,可与多种工艺联合使用。生物回收法目前处于实验室发展阶段,对于微生物的挑选与驯化以及工艺条件有待进一步探究。三种方法都需要关注废气、废水和废渣的产生,控制化学试剂的使用,监测废物排放,以减少对环境和

人体健康的负面影响。从产业实践的角度,动力电池的回收较光伏电池和风机叶片的发展较为完善,国内外多家企业通过火法、湿法组合工艺可实现动力电池中多种有价金属的分离和回收。例如,美国 Retriev Technologies 公司利用酸浸分离提纯得到铜、钴等金属,并且已经开始了其第二个锂离子电池回收设施的规划和开发。德国 Accurec 公司利用热解回收,成为欧洲第一家工业规模回收锂的公司。在中国,深圳格林美、湖南邦普等公司也积极开发可持续发展的电池价值链,助力实现全球碳中和目标。

表 8 动力电池回收工艺比较^[70]
Table 8 Comparison of power battery recycling processes^[70]

回收方式	优点	缺点	再利用场景
火法	简单方便,不需要复杂前处理	分解产生有毒气体,回收成本高,物料纯度低,一般需要进一步分离	金属合金馏分,炉渣等回用于水泥行业
湿法	回收产物纯度高,回收率高	产生废液污染环境,流程长,成本高	高精度回收金属
生物法	反应条件温和,成本低,环境友好	周期长,不可控,易受环境影响	金属纳米颗粒

2.4 其他新能源固废

随着技术的不断进步,一些尚在发展的新能源技术也会被大规模应用,实现产业化,同时面临大量固废的处理,如氢能燃料电池、钠电池、金属/空气电池和储能电池等。金属/空气电池使用金属作为阳极和空气作为阴极,除了常见的锂/空气电池外,还包括锌/空气、铁/空气等类型,在相对轻量的情况下存储大量能量,但该类电池比功率低,循环寿命短^[71]。氢能燃料电池、钠电池、金属/空气电池的回收处理手段和锂电池类似,主要流程为预处理、拆解、分离回收。除电池以外,压缩空气储能、飞轮储能等新型储能技术因其长寿命和高储能性能而备受关注。这些系统由多个部件构成,在使用过程中需及时更换磨损老化的部件。同时,采用技术手段实现热能或动能的高效转化,如通过增加换热器回收系统余热^[72],控制电压阈值来回收轨道交通中的制动能量等^[73]。对于功能老化退役部分的回收,可以采用传统的处理方法。随着新能源技术的发展,对这些废弃物的处理和回收将成为重要研究领域,需要综合考虑环境友好性、经济性以及资源利用效率等因素。

3 结论与展望

新能源固废处理已成为双碳背景下“无废城市”建设过程中面临的突出难题,资源化回收处理

废旧光伏组件、风电叶片、动力电池等新能源固废是实现清洁能源、新能源领域低碳与可持续发展的“最后一公里”,开发高效的资源化技术并建立规模化工艺的迫切性日益显著。本文综述了光伏组件、风机叶片和动力电池等新能源固废的报废和资源化回收处理技术特征及其产业实践,并进行了对比分析。

光伏组件报废量大,材料组成复杂,分离难度大,对回收处理技术要求较高。风机叶片主要由复合材料构成,含有机组分多、不易降解,以热处理为主的回收处理过程中易造成二次污染。动力电池作为电动汽车的核心部件含有多种有机金属和物质,目前主要以物理拆解和湿法回收为主,但仍需提高有价金属的回收率。在新能源固废的处理过程中,污染控制是至关重要的一环。例如,对于含铅的光伏组件,必须采取有效措施以防止重金属污染。可以采用化学稳定化或固化技术,将有毒有害物质转化为不易迁移的形式。此外,对于风电叶片的回收,应考虑热解过程中产生的有害气体,采用适当的尾气净化技术以减少对环境的影响。

对于新能源固废,处理手段广泛概括为火法、湿法和机械法。火法回收成本取决于金属回收市场价格和回收率。如果能有效控制污染并降低能耗,经济效益将更显著。湿法中化学试剂的使用可能导致成本较高。特别是对于复杂的电池成

分,其中产生的大量废液需要妥善处理,从而增加额外成本。机械法避免了化学药剂和高温能耗,运行成本低,但回收的产品纯度低,限制了后续应用范围。

未来,不仅需要提高现有技术的效率和回收质量,控制废物二次污染,还需要开发多种联合技术提升回收效率,建立多元素闭环回收系统,设计环境影响评估工具,评估和优化新能源固废处理过程的环境影响。在不断提升资源化技术和水平的基础上,加强面向高效回收的生态设计与实践,推动全产业链条的绿色与可持续发展。

参考文献 (References):

[1] 国务院. 国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知 [EB/OL]. (2021-10-26) [2024-07-02]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-10/26/content_5644984.htm.

[2] 国家统计局. 2022 年新能源汽车产量比上年增长 90.5%, 年末全国民用汽车保有量达 31 903 万辆[EB/OL]. (2023-03-01) [2024-07-02]. http://www.caam.org.cn/chn/7/cate_120/con_5235728.html.

[3] 经济日报. 抽水蓄能已建在建装机规模达 1.67 亿千瓦[EB/OL]. (2023-07-17) [2024-07-02]. https://www.nea.gov.cn/2023-07/17/c_1310732786.htm.

[4] HARPER G, SOMMERVILLE R, KENDRICK E, et al. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles[J]. *Nature*, 2019, 575(7781): 75-86.

[5] JANI H K, KACHHWAHA S S, NAGABABU G, et al. A brief review on recycling and reuse of wind turbine blade materials [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 62(Part13): 7124-7130.

[6] MULAZZANI A, ELEFThERiADiS P, LEVA S. Recycling c-Si PV modules: A review, a proposed energy model and a manufacturing comparison [J]. *Energies*, 2022, 15 (22): 8419.

[7] IEA. Renewables 2023[EB/OL]. (2024-01) [2024-07-02]. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>.

[8] SNE. SNE research [EB/OL]. (2023) [2024-07-02]. https://www.sneresearch.com/en/business/report_view/177/page/0#ac_id.

[9] IEA. CO₂ emissions in 2023[EB/OL]. (2024-3) [2024-07-02]. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>.

[10] YANG W, KIM K H, LEE J. Upcycling of decommissioned-wind turbine blades through pyrolysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 376: 134292.

[11] 张钦, 傅丽芝. 中国光伏组件报废量的预测[J]. *环境工程*, 2020, 38(6): 214-220.

ZHANG Qin, FU Lizhi. Research on photovoltaic modules waste prediction in China [J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(6): 214-220.

[12] MIAO Youping, LIU Lili, ZHANG Yuping, et al. An overview

of global power lithium-ion batteries and associated critical metal recycling [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 425: 127900.

[13] LIM M S W, HE Dong, TIONG J S M, et al. Experimental, economic and life cycle assessments of recycling end-of-life monocrystalline silicon photovoltaic modules [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 340: 130796.

[14] ESHRAGHI N, BERARDO L, SCHRIJNEMAKERS A, et al. Recovery of nano-structured silicon from end-of-life photovoltaic wafers with value-added applications in lithium-ion battery[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(15): 5868-5879.

[15] ZHANG Chaofan, MA Qiang, CAI Muya, et al. Recovery of porous silicon from waste crystalline silicon solar panels for high-performance lithium-ion battery anodes[J]. *Waste Management*, 2021, 135: 182-189.

[16] PRASAD D S, SANJANA B, SAI KIRAN D, et al. A unique sustainable chemical method for the recovery of pure silicon from waste crystalline silicon solar panels[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2023, 37: e00671.

[17] LEE J K, LEE J S, AHN Y S, et al. Photovoltaic performance of c-Si wafer reclaimed from end-of-life solar cell using various mixing ratios of HF and HNO₃[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 160: 301-306.

[18] SHIN J, PARK J, PARK N. A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 162: 1-6.

[19] 黄庆, 邓毅, 郁丰善, 等. 从废旧太阳能电池板中回收银 [J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2022(2): 48-53.

HUANG Qing, DENG Yi, YU Fengshan, et al. Experimental study on silver recovery from waste solar panels [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2022(2): 48-53.

[20] YANG E H, LEE J K, LEE J S, et al. Environmentally friendly recovery of Ag from end-of-life c-Si solar cell using organic acid and its electrochemical purification[J]. *Hydrometallurgy*, 2017, 167: 129-133.

[21] JUNG B, PARK J, SEO D, et al. Sustainable system for raw-metal recovery from crystalline silicon solar panels: From noble-metal extraction to lead removal[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2016, 4(8): 4079-4083.

[22] SAH D, CHITRA, KUMAR S. Investigation and recovery of copper from waste silicon solar module [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 296: 127205.

[23] FTHENAKIS V, ATHIAS C, BLUMENTHAL A, et al. Sustainability evaluation of CdTe PV: An update[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 123: 109776.

[24] ZHANG Xiaofeng, LIU Dachun, JIANG Wenlong, et al. Application of multi-stage vacuum distillation for secondary resource recovery: Potential recovery method of cadmium telluride photovoltaic waste[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(4): 6977-6986.

[25] 张琪, 陈正. 废旧碲化镉薄膜太阳能电池中碲、镉回收的

- 实验研究[J]. 河南化工, 2022, 39(12): 32–34.
- ZHANG Qi, CHEN Zheng. Experimental research of Te and Cd recovery in waste cadmium telluride thin film solar cells [J]. Henan Chemical Industry, 2022, 39(12): 32–34.
- [26] 李胜春, 王为振, 潘勇进, 等. 从 CIGS 废料中综合回收硒铜钢镓[J]. 矿冶, 2019, 28(4): 131–134.
- LI Shengchun, WANG Weizhen, PAN Yongjin, et al. Comprehensive recovery of selenium, copper, indium and gallium from the CIGS scrap [J]. Mining and Metallurgy, 2019, 28(4): 131–134.
- [27] 阳伦庄, 黄光. 锌冶炼稀散金属富集渣综合回收的工艺设计[J]. 湖南有色金属, 2015, 31(4): 42–46.
- YANG Lunzhuang, HUANG Guang. A process design of comprehensive recovery from enriched scattered metal slag from zinc smelt [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2015, 31(4): 42–46.
- [28] LIU Fanwei, CHENG T M, CHEN Y J, et al. High-yield recycling and recovery of copper, indium, and gallium from waste copper indium gallium selenide thin-film solar panels [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2022, 241: 111691.
- [29] GUSTAFSSON A K. Recycling of CIGS solar cell waste materials [D]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2014: 33–68.
- [30] HSIANG H I, CHIANG C Y, HSU W H, et al. Leaching and re-synthesis of CIGS nanocrystallites from spent CIGS targets [J]. Advanced Powder Technology, 2016, 27(3): 914–920.
- [31] ZHOU Junjie, TAN Liguang, LIU Yue, et al. Highly efficient and stable perovskite solar cells *via* a multifunctional hole transporting material [J]. Joule, 2024, 8(6): 1691–1706.
- [32] DENG Fei, LI Siqi, SUN Xiangnan, et al. Full life-cycle lead management and recycling transparent conductors for low-cost perovskite solar cell [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(46): 52163–52172.
- [33] PARK S Y, PARK J S, KIM B J, et al. Sustainable lead management in halide perovskite solar cells [J]. Nature Sustainability, 2020, 3: 1044–1051.
- [34] CHEN Bo, FEI Chengbin, CHEN Shangshang, et al. Recycling lead and transparent conductors from perovskite solar modules [J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 5859.
- [35] SCHMIDT F, AMREIN M, HEDWIG S, et al. Organic solvent free PbI₂ recycling from perovskite solar cells using hot water [J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 447: 130829.
- [36] BINEK A, PETRUS M L, HUBER N, et al. Recycling perovskite solar cells to avoid lead waste [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8(20): 12881–12886.
- [37] CHOWDHURY M S, RAHMAN K S, SELVANATHAN V, et al. Recovery of FTO coated glass substrate *via* environment-friendly facile recycling perovskite solar cells [J]. RSC Advances, 2021, 11(24): 14534–14541.
- [38] LIN Dehai, LIU Zilin, LI Xiaoduan, et al. Development of metal-recycling technology in waste crystalline-silicon solar cells [J]. Clean Energy, 2023, 7(3): 532–546.
- [39] CHEN Junlei, WANG Jihui, NI Aiqing. Recycling and reuse of composite materials for wind turbine blades: An overview [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2019, 38(12): 567–577.
- [40] MAMANPUSH S H, LI Hui, ENGLUND K, et al. Recycled wind turbine blades as a feedstock for second generation composites [J]. Waste Management, 2018, 76: 708–714.
- [41] RIBEIRO M C S, MEIRA CASTRO A C, SILVA F G, et al. Re-use assessment of thermoset composite wastes as aggregate and filler replacement for concrete – polymer composite materials: A case study regarding GFRP pultrusion wastes [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2015, 104: 417–426.
- [42] KAVALIAUSKASŽ, KĖŽELIS R, GRIGAITIENĖ V, et al. Recycling of wind turbine blades into microfiber using plasma technology [J]. Materials, 2023, 16(8): 3089.
- [43] GINDER R S, OZCAN S. Recycling of commercial E-glass reinforced thermoset composites *via* two temperature step pyrolysis to improve recovered fiber tensile strength and failure strain [J]. Recycling, 2019, 4(2): 24.
- [44] MAZZOCCHETTI L, BENELLI T, D’ANGELO E, et al. Validation of carbon fibers recycling by pyro-gasification: The influence of oxidation conditions to obtain clean fibers and promote fiber/matrix adhesion in epoxy composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 112: 504–514.
- [45] HADIGHEH S A, WEI Y, KASHI S. Optimisation of CFRP composite recycling process based on energy consumption, kinetic behaviour and thermal degradation mechanism of recycled carbon fibre [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 292: 125994.
- [46] TURNER T A, PICKERING S J, WARRIOR N A. Development of recycled carbon fibre moulding compounds—Preparation of waste composites [J]. Composites Part B: Engineering, 2011, 42(3): 517–525.
- [47] MENG F, MCKECHNIE J, TURNER T A, et al. Energy and environmental assessment and reuse of fluidised bed recycled carbon fibres [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 100: 206–214.
- [48] PENDER K, YANG L. Regenerating performance of glass fibre recycled from wind turbine blade [J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 198: 108230.
- [49] PENDER K, YANG Liu. Glass fibre composites recycling using the fluidised bed: A comparative study into the carbon footprint in the UK [J]. Sustainability, 2024, 16(3): 1016.
- [50] HAO Siqi, HE Lizhe, LIU Jiaqi, et al. Recovery of carbon fibre from waste prepreg *via* microwave pyrolysis [J]. Polymers, 2021, 13(8): 1231.
- [51] OBUNAI K, FUKUTA T, OZAKI K. Carbon fiber extraction from waste CFRP by microwave irradiation [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2015, 78: 160–165.
- [52] BOWLBY L K, SAHA G C, AFZAL M T. Flexural strength

- behavior in pultruded GFRP composites reinforced with high specific-surface-area biochar particles synthesized *via* microwave pyrolysis[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 110: 190–196.
- [53] OLIVEUX G, BAILLEUL J L, LE GAL LA SALLE E. Chemical recycling of glass fibre reinforced composites using subcritical water[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43(11): 1809–1818.
- [54] MATSSON C, ANDRÉ A, JUNTIKKA M, et al. Chemical recycling of end-of-life wind turbine blades by solvolysis/HTL[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 942(1): 012013.
- [55] SOKOLI H U, SIMONSEN M E, SØGAARD E G. Investigation of degradation products produced by recycling the solvent during chemical degradation of fiber-reinforced composites[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2017, 36(17): 1286–1296.
- [56] 中华人民共和国工业和信息化部. 新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范条件 [EB/OL]. (2020-01-02) [2024-07-02]. https://www.miit.gov.cn/cms_files/filemanager/oldfile/miit/n1146295/n1652858/n1652930/n4509607/c7595282/part/7595808.pdf.
- [57] 王天雅, 宋端梅, 贺文智, 等. 废弃动力锂电池回收再利用技术及经济效益分析[J]. *上海节能*, 2019(10): 814–820.
WANG Tianya, SONG Duanmei, HE Wenzhi, et al. Recycling strategies and economic efficiency analysis of waste electric vehicle lithium-ion batteries[J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2019(10): 814–820.
- [58] 吴小龙, 王晨麟, 陈曦, 等. 废旧锂离子电池市场规模及回收利用技术[J]. *环境科学与技术*, 2020, 43(S2): 179–183.
WU Xiaolong, WANG Chenlin, CHEN Xi, et al. Market size and recycling technologies of waste lithium ion batteries[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(S2): 179–183.
- [59] 袁文辉, 邱定蕃, 王成彦. 还原熔炼失效锂离子电池的研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2007(4): 5–7+26.
YUAN Wenhui, QIU Dingfan, WANG Chengyan. Research on recycling of spent lithium ion battery by reducing smelting process[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2007(4): 5–7+26.
- [60] DANG Hui, WANG Benfeng, CHANG Zhidong, et al. Recycled lithium from simulated pyrometallurgical slag by chlorination roasting[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2018, 6(10): 13160–13167.
- [61] BARIK S P, PRABAHARAN G, KUMAR L. Leaching and separation of Co and Mn from electrode materials of spent lithium-ion batteries using hydrochloric acid: Laboratory and pilot scale study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 147: 37–43.
- [62] SWAIN B, JEONG J, LEE J C, et al. Hydrometallurgical process for recovery of cobalt from waste cathodic active material generated during manufacturing of lithium ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 167(2): 536–544.
- [63] LI Jiangang, ZHAO Rusong, HE Xiangming, et al. Preparation of LiCoO₂ cathode materials from spent lithium-ion batteries[J]. *Ionics*, 2009, 15(1): 111–113.
- [64] NAYAKA G P, PAI K V, SANTHOSH G, et al. Recovery of cobalt as cobalt oxalate from spent lithium ion batteries by using glycine as leaching agent[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2016, 4(2): 2378–2383.
- [65] GAO Wenfang, ZHANG Xihua, ZHENG Xiaohong, et al. Lithium carbonate recovery from cathode scrap of spent lithium-ion battery: A closed-loop process[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(3): 1662–1669.
- [66] FU Yuanpeng, HE Yaqun, YANG Yong, et al. Microwave reduction enhanced leaching of valuable metals from spent lithium-ion batteries[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 832: 154920.
- [67] MISHRA D, KIM D J, RALPH D E, et al. Bioleaching of metals from spent lithium ion secondary batteries using *Acidithiobacillus ferrooxidans*[J]. *Waste Management*, 2008, 28(2): 333–338.
- [68] ZENG Guisheng, LUO Shenglian, DENG Xiaorong, et al. Influence of silver ions on bioleaching of cobalt from spent lithium batteries[J]. *Minerals Engineering*, 2013, 49: 40–44.
- [69] HOREH N B, MOUSAVI S M, SHOJAOSADATI S A. Bioleaching of valuable metals from spent lithium-ion mobile phone batteries using *Aspergillus Niger*[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 320: 257–266.
- [70] 梅延润, 刘龙敏, 陈然, 等. 废旧锂离子电池正极材料有价金属的回收及高值化利用研究进展[J/OL]. *能源环境保护*: 1–12 [2024-07-02]. <https://doi.org/10.20078/j.eep.20240609>.
MEI Yanrun, LIU Longmin, CHEN Ran, et al. Recent advances on the recovery and high-value utilization of valuable metals from cathode materials of spent lithium-ion batteries[J/OL]. *Energy Environmental Protection*: 1–12 [2024-07-02]. <https://doi.org/10.20078/j.eep.20240609>.
- [71] WANG Haofan, XU Qiang. Materials design for rechargeable metal-air batteries[J]. *Matter*, 2019, 1(3): 565–595.
- [72] WEN Xiankui, YANG Dahui, ZHONG Jingliang, et al. Research on recovery and utilization of waste heat in advanced compressed air energy storage system[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 1436–1445.
- [73] WANG Baonan, YU Xiaowan, YANG Xiaoting, et al. Control strategy for high speed flywheel energy storage system based on voltage threshold of DC1500 V transit transportation traction grid[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 640–647.