

“双碳”目标下铅炭电池铝基电极绿色回收技术的创新创业研究

朱富豪 臧庆堂 姚懿轩

云南经济管理学院 云南 昆明 650300

摘要: 随着世界新能源产业的蓬勃发展,废旧电池的回收利用成为实现“双碳”目标,构建循环经济的关键环节。本文针对铅炭电池中铝基复合电极的绿色高效回收难题,提出了一种物理-化学协同分选新工艺,并详细阐述了该工艺。该工艺的核心技术为多级破碎解离、梯度磁场分选和醋酸定向溶铅,实现了铅铝界面的精确分离和高值资源化利用,大大提高了铅回收率及铝基材料纯度,并降低了能耗和环境污染。本文在此基础上深入探讨该绿色回收技术在“双碳”背景下的创新创业机会,分析其商业模式、市场前景及社会效益,以期为废旧电池资源化领域的科技成果转化和产业孵化提供理论依据与实践参考。研究表明,该技术不仅解决了行业痛点,具有显著的经济和环境效益,而且蕴含着巨大的市场潜力,为相关领域的创新创业提供了新的思路 and 方向。

关键词: 铅炭电池; 绿色回收; 铝基电极; 创新创业; 双碳目标; 循环经济

DOI:10.12417/3083-5526.25.01.012

1 引言

球新能源产业的快速发展,带来了废旧电池回收处理的严峻挑战。铅炭电池作为重要储能技术,由于大规模应用导致废旧电池量激增,仅中国年产生量便达数百万吨。废旧电池中含有铅、铝等有价值金属,处理不好造成严重环境污染和资源浪费^[1]。物理分选、化学酸浸、火法冶金等传统回收工艺对铅炭电池中复杂的铝基复合电极进行回收时,都存在回收效率低、污染大、成本高昂等瓶颈。这些问题严重制约了废旧铅炭电池的绿色循环利用,这与国家日益严格的环保法规和“双碳”目标要求存在差距^[2]。

废旧电池中含有铅、铝等有价值金属,处理不好造成严重环境污染和资源浪费。物理分选、化学酸浸、火法冶金等传统回收工艺对铅炭电池中复杂的铝基复合电极进行回收时,都存在回收效率低、污染大、成本高昂等瓶颈。这些问题严重制约了废旧铅炭电池的绿色循环利用,这与国家日益严格的环保法规和“双碳”目标要求存在差距。

鉴于此,开发环境友好、经济高效的废旧铅炭电池铝基复合电极回收新工艺,不仅具有重要的技术意义,而且蕴涵着巨大的创新创业机会。本研究研究力图打破现有回收技术局限,提出一种物理-化学协同分选工艺体系,实现铅铝界面的精准分离与高值资源化利用。同时,本文将对该绿色回收技术在“双碳”目标下的创新创业潜力进行深入探讨,对其商业模式、市场前景及社会效益进行分析,为废旧电池资源化领域的科技成果转化和产业孵化提供参考。

2 废旧铅炭电池回收现状与挑战

废旧铅炭电池回收是全球环境与资源问题。铅酸电池回

收技术相对成熟,但是铅炭电池尤其是铝基复合电极以其特殊的结构和材料组成对传统的回收工艺提出新的挑战。传统的物理分选法难以有效解离微米级铅铝界面,不仅造成铅回收率低<85%,铝污染严重(>30%)。湿法冶金(化学酸浸)易使铝覆层同步溶解,导致再生铅纯度不达标(<98.5%)且废酸处理成本高昂^[3]。火法冶金则面临铝挥发损失和含铅粉尘排放超标等环保难题。

铝基复合电极回收面临的主要挑战包括:结构复杂性、界面结合强度高、材料差异性大、环境合规性要求高以及经济效益难以平衡。这些问题共同构成了废旧铅炭电池铝基复合电极绿色高效回收的技术难题,也预示着巨大的创新创业机遇。

3 核心技术方案

物理-化学协同分选工艺体系

针对传统回收工艺的局限^[4],本研究提出并开发了一种创新的物理-化学协同分选工艺体系,旨在实现铅铝界面的精准分离与资源高值化利用。该工艺核心思想是先通过物理方法充分解离和初步分离,再结合绿色化学方法实现铅的定向溶解和铝的纯化回收。

智能破碎分选系统:研发定制化双轴剪切破碎装置(破碎比1:80,刀具寿命≥5000小时),实现电池壳体与电极高效剥离。创新设计“螺旋气流分选+超导磁轭”组合设备,利用铅铝磁导率差异,在0.6T梯度磁场下实现铅铝颗粒初次筛分,纯度可达85%以上。集成机器视觉与PLC控制,确保90%以上颗粒粒径≤500μm,引入机器视觉识别系统(精度±0.05mm),实时监测破碎颗粒粒径分布,通过PLC控制系统动态调整破碎频率,确保≥90%颗粒粒径≤500μm。

醋酸溶铅法工艺优化：采用弱酸性醋酸体系（pH=4.2–4.5）进行铅的定向溶解，利用铅与醋酸生成可溶性醋酸铅，而铝表面氧化膜稳定，避免铝同步溶解。研发高效传质反应釜，将铅浸出率提升至 99.2%，反应时间缩短至 45 分钟。设计闭环再生系统，电沉积回收铅后，醋酸溶液通过真空蒸馏实现 98% 以上循环利用，单吨电池处理液耗降至 0.3m³。

铝基材料精制技术：开发超声波辅助清洗工艺（频率 40kHz，功率密度 0.8W/cm²），高效去除铝覆线表面铅微颗粒（粒径 ≤ 5μm），清洗后铝基材料铅含量 ≤ 0.01%。采用微波低温干燥技术（温度 ≤ 80℃），保持材料表面导电性能（电阻率 ≤ 2.8×10⁻⁸Ω·m），可直接作为电池电极基材回用。

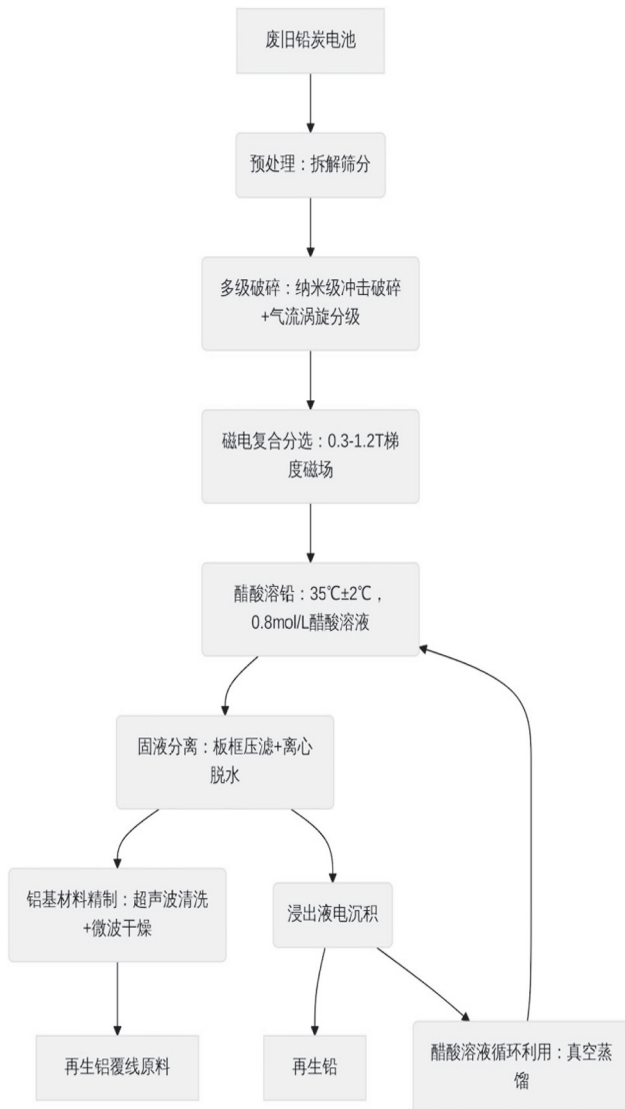


图 1 工艺流程图

4 工艺性能指标与核心优势

本物理–化学协同分选工艺在废旧铅炭电池铝基复合电极回收方面取得了显著的技术突破，性能指标远超传统工艺，

并具备多项核心优势。

表 1 本工艺与传统工艺关键技术参数对比

指标	本工艺	传统工艺	国标要求
铅回收率	≥ 99.1%	85–92%	≥ 95%
铝基材料纯度	≥ 99.9%	90–95%	≥ 98.5%
处理能耗	280kWh/ 吨	450kWh/ 吨	–
废水排放量	≤ 0.5m³/ 吨	1.5–2.0m³/ 吨	≤ 1.0m³/ 吨
处理周期	4.5 小时	8–10 小时	–

本工艺在铅回收率、铝基材料纯度、处理能耗、废水排放量和处理周期等核心指标上均表现出显著优势。铅回收率高达 99.1% 以上，铝基材料纯度达到 99.9% 以上，同时处理能耗和废水排放量大幅降低，处理周期缩短近一半。

技术创新点突破 1) 界面解离技术：纳米级冲击破碎与梯度磁场分选协同作用，从表面完全脱离“铅包铝”颗粒。2) 绿色化学工艺：用弱酸性醋酸体系来代替传统强酸浸出，废气排放量可降低 70%，废酸处理成本可降低 60%。3) 全流程智能化：集成 MES 系统实现设备联动控制，关键工序自动化率 95%，减少 40% 人工干预，提高分选精度和生产效率。这些创新点共同构筑了本工艺的核心竞争力。

5 创新创业机会与商业模式

“在“双碳”目标和循环经济理念驱动下^[5]，废旧电池回收行业迎来发展机遇。本研究提出的绿色回收新工艺，解决了行业痛点，具有巨大的创新创业潜力。

全球新能源产业发展，废旧电池存量大量增加，尤其是铅炭电池。但是现有回收技术在处理铝基复合电极时，存在效率低，污染大，成本高，回收物纯度不达标的痛点，造成资源浪费，环境风险和合规压力。本工艺正是针对这些核心痛点，提供了高效、绿色、经济的解决方案。

基于本绿色回收技术构建多元化商业模式。回收处理服务模式：建立大型回收处理工厂，为再生铅、高纯度铝覆线等产品提供专业回收服务。规模效应，技术壁垒，政策支持的优势。

废旧铅炭电池回收市场潜力巨大。预计到 2025 年，规范回收量将达 800 万吨，其中铝覆铅线关联电池对应处理市场规模超 120 亿元。以年处理 10 万吨生产线为例，经济测算显示出显著盈利能力：年收入约 21.02 亿元，年利润总额可达 2.5 亿元，投资回收期仅 3.5 年。本工艺低能耗、低废水排放、短处理周期，运营成本具显著优势。

本物理–化学协同分选工艺的推广应用，将带来显著的社会效益，助力国家“双碳”目标的实现和可持续发展战略

的推进。首先,环境保护效益。通过高效回收废旧铅炭电池中的有价金属,大幅减少了铅、铝等重金属对土壤、水体和空气的污染,有效遏制了非法回收和冶炼活动对环境造成的破坏。绿色化学工艺的应用,更是从源头上减少了废酸、废气等二次污染物的产生,实现了清洁生产,为生态文明建设贡献力量。资源循环效益。本工艺将废旧电池从环境负担转化为“城市矿产”,实现了铅、铝等关键战略资源的循环利用。高纯度再生铅和可直接回用的铝基材料,有效降低了对原生矿产资源的依赖,缓解了资源短缺的压力,提升了国家资源安全保障水平。这符合国家构建资源节约型社会的战略导向,也为全球循环经济发展提供了中国方案。

本技术的产业化应用将催生新的绿色产业,创造大量就业机会,带动相关产业链的发展,如回收物流、设备制造、再生材料加工等。显著的经济效益和投资回报率将吸引更多社会资本投入到废旧电池回收领域,形成良性循环,促进经济的绿色转型和高质量发展。

本工艺的成功研发和推广,将为其其他类型复杂复合材料的回收提供宝贵的经验和示范意义,具有重要的示范意义。它将推动整个废旧电池回收行业的技术进步和转型升级,提升我国在国际废旧电池回收领域的竞争力。

本绿色回收技术具备以下核心竞争优势:技术领先性(解决铅铝界面解离难题,回收效率和产品纯度高)、环保合规性(醋酸体系绿色工艺,废水零排放)、成本效益(高回收率、低能耗、低排放)、高值化利用(回收铝基材料可直接回用)、智能化管理(全流程自动化控制)。这些优势共同构筑了本技术在废旧铅炭电池回收领域的领先地位,为创新创业

提供了宝贵机遇。

6 结论

保障战略资源安全和推动循环经济发展的必然要求。本文针对传统回收工艺处理铝基复合电极的技术瓶颈和环境问题,提出了一种新型物理-化学协同分选工艺体系并进行了详细阐述。该工艺具有铅铝界面的精准分离与资源高值化梯度利用的关键技术模块,包括多级破碎解离、梯度磁场分选、醋酸定向溶铅、铝基材料精制。

参考文献:

- [1] 刘宜, 尚闽, 谭刚, 等. 动力锂离子电池规范回收利用的效益及对策[J]. 电池, 2023(6). DOI: 10.19535/j.1001-1579.2023.06.017.
- [2] 李飞虎, 余旭林. 江西省动力电池回收产业发展问题研究及建议[J]. 时代汽车, 2024(20). DOI: 10.3969/j.issn.1672-9668.2024.20.051.
- [3] 陈永珍, 黎华玲, 宋文吉, 等. 废旧磷酸铁锂电池回收技术研究进展[J]. 储能科学与技术, 2019(2). DOI: 10.12028/j.issn.2095-4239.2018.0183.
- [4] 王化军, 彭宇, 张强, 等. 浅谈物理分选-化学提纯全湿工艺处理我国废干电池的可行性[J]. 环境保护, 2003(2): 4. DOI: 10.3969/j.issn.0253-9705.2003.02.004.
- [5] 孟小燕, 熊小平, 王毅. 构建面向“双碳”目标的循环经济体系: 机遇, 挑战与对策[J]. 环境保护, 2022(Z1): 51-54.