



移动扫码阅读

王增, 夏然, 王嘉庆, 等. 锂离子电池工业化回收技术环境影响评价研究[J]. 能源环境保护, 2026, 40(1): 186-200.

WANG Zeng, XIA Ran, WANG Jiaqing, et al. Environmental Impact Assessment of Industrial Recycling Technologies for Lithium-Ion Batteries[J]. Energy Environmental Protection, 2026, 40(1): 186-200.

锂离子电池工业化回收技术环境影响评价研究

王增¹, 夏然¹, 王嘉庆¹, 王慧佳¹, 王兆龙^{2,3}, 任芝军^{1,*}, 高文芳^{1,*}

(1. 河北工业大学 能源与环境工程学院, 天津 300401; 2. 中国科学院过程工程研究所 北京过程污染控制工程研究中心, 北京 100190; 3. 生态环境部固体废物与化学品管理技术中心, 北京 100029)

摘要: 随着锂离子电池在电动汽车和储能领域的广泛应用, 退役电池规模化回收需求日益迫切。然而, 目前关于不同回收路径的产生特征尚缺乏系统深入的分析, 且回收过程中产生的废水、废气及固废对生态环境的潜在影响尚未被定量评估。聚焦于废旧钴酸锂电池和镍钴锰酸锂电池的回收工艺, 系统梳理了2种电池的回收流程及其废弃物产生路径, 结合综合环境影响评价、生命周期评价及经济性分析, 量化了各工艺的环境和经济效应。产废路径分析表明, 2种电池回收过程中废水的重金属离子和化学需氧量是主要污染物, 主要缘于二者均采用湿法处理工艺。综合环境影响评价结果显示, 废旧钴酸锂电池的回收环境影响低于废旧镍钴锰酸锂电池; 生命周期评价结果与环境影响评价一致, 且指出海洋生态毒性是2种电池总体环境影响中最显著的因素, 分别占钴酸锂电池和镍钴锰酸锂电池总环境影响的93.8%和86.3%。进一步生命周期评价显示, 在钴酸锂和镍钴锰酸锂电池的回收过程中, 过氧化氢和煤油分别对总环境影响贡献最大, 比例分别为78.3%和59.9%, 凸显关键物料对环境负担的重要作用; 经济性分析表明, 钴酸锂电池的环保投资占比相对较高, 说明其末端治理压力较小; 而镍钴锰酸锂电池的总运营成本较高, 反映其金属成分复杂且分离难度较大。敏感性分析结果显示, 过氧化氢和煤油对环境的影响最为显著, 敏感系数分别为3.91%和3.79%。综合各项评价可见, 钴酸锂电池回收在环境友好性方面更具优势, 而镍钴锰酸锂电池在回收资源价值上更具潜力。

关键词: 锂离子电池回收; 产废路径分析; 环境影响评价; 生命周期评价; 敏感性分析

中图分类号: X705; X820.3 文献标识码: A 文章编号: 2097-4183(2026)01-0186-15

Environmental Impact Assessment of Industrial Recycling Technologies for Lithium-Ion Batteries

WANG Zeng¹, XIA Ran¹, WANG Jiaqing¹, WANG Huijia¹,
WANG Zhaolong^{2,3}, REN Zhijun^{1,*}, GAO Wenfang^{1,*}

(1. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. Beijing Engineering Research Centre of Process Pollution Control, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Solid Waste and Chemicals Management Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100029, China)

Abstract: With the widespread application of lithium-ion batteries in electric vehicles and the energy

收稿日期: 2025-09-10

修回日期: 2025-10-22

接受日期: 2025-10-24

DOI: 10.20078/j.eep.20251103

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52300232); 天津市科技计划资助项目(23JCQNJC00970)

第一作者: 王增(2005—), 男, 河北武邑县人, 主要研究方向为锂离子电池回收过程环境影响评价。E-mail: 3612924530@qq.com

*通讯作者: 高文芳(1990—), 河北唐山人, 副教授, 主要研究方向为碳排放核算与评估、绿色制造评价。E-mail: wfgao@hebut.edu.cn

任芝军(1978—), 山东茌平人, 研究员, 主要研究方向为物化法和生物法水污染控制技术与理论研究工作。

E-mail: renzhijun2003@126.com

storage sector, the large-scale retirement of these batteries has created an urgent demand for effective recycling solutions. However, there is a lack of in-depth analysis regarding the waste generation characteristics associated with different recycling paths, and the potential environmental threats posed by wastewater, waste gas, and solid waste generated during the recycling process have not been quantitatively evaluated. This study investigates the recycling processes of spent lithium cobalt oxide (LCO) and nickel-cobalt-manganese (NCM) batteries. It provides a detailed overview of the recycling methods and waste generation pathways for these two types of batteries. Comprehensive environmental impact assessments (EIA), life cycle assessments (LCA), and economic analyses were conducted to quantify both environmental and economic impacts. Based on the analysis of the waste generation pathways, waste produced during the recycling process of both types of batteries consists mainly of heavy metal ions and substances contributing to chemical oxygen demand (COD) in the wastewater. This is primarily due to the use of hydrometallurgical treatment processes. The results of the environmental impact assessments indicate that the recycling of LCO batteries has a lower impact than that of NCM batteries. The LCA results are consistent with the EIA findings and reveal that marine ecotoxicity represents the most significant environmental impact, accounting for 93.8% and 86.3% of the total environmental impact for LCO and NCM batteries, respectively. Furthermore, the LCA shows that hydrogen peroxide and kerosene contribute 78.3% and 59.9% to the total environmental impact for LCO and NCM battery recycling, respectively, highlighting the substantial impact of key input materials. Economic analysis indicates that the proportion of environmental investment is higher for LCO batteries, suggesting a relatively lower burden for end-of-pipe treatment. In contrast, the total operating cost of NCM battery recycling is higher, reflecting the complexity and difficulty in separating their metal components. Sensitivity analysis results show that hydrogen peroxide and kerosene have the most significant influence on the environmental performance of LCO and NCM battery recycling, with sensitivity coefficients of 3.91% and 3.79%, respectively. In conclusion, the comprehensive evaluation reveals that LCO battery recycling is more environmentally friendly, while NCM battery recycling offers higher resource recovery value.

Keywords: Lithium-ion battery recycling; Waste generation pathway analysis; Environmental impact assessment; Life cycle assessment; Sensitivity analysis

0 引 言

随着可持续能源需求的不断增长以及人们对高品质生活的追求,锂离子电池(Lithium-Ion Batteries, LIBs)的生产和使用量持续攀升^[1]。锂离子电池因其能量密度高^[2]、自放电率低^[3]等优点,在电子产品、电动汽车和储能装置中得到了广泛的应用^[4-5],成为目前发展最快的电池技术之一^[6]。据预测,到2030年,锂离子电池的年需求量将增长到1 200~3 500 GW·h^[7],全球将产生1 100万t废锂离子电池^[8]。废锂离子电池中含有锂、钴、镍、锰等高价金属,是战略金属资源再生的重要来源。同时废锂离子电池也含一些有毒物质,若未能妥善处理,将对公众健康和生态环境造成严重威胁^[9-10]。该问题对不可再生资源合理利用

带来严峻挑战,同时也对废旧电池的回收技术提出了更高要求^[11]。因此,科学高效地回收废旧锂离子电池对环境保护和实现资源的可持续利用具有重要意义,是当前亟须解决的关键问题^[12]。

废旧锂离子电池回收过程的产废路径解析是实现资源高效利用、减少环境负担的关键环节^[13-15]。TONG等^[16]对预处理、火法冶金和湿法冶金工艺进行了总结,对锂离子电池的分选、拆解、破碎等产污环节进行研究,分析了各技术的优缺点。MROZIK等^[14]系统评述了废旧锂离子电池的处置过程,识别了其潜在污染源、环境排放路径及全生命周期环境影响。RICHA等^[17]根据电动汽车使用情况对未来的锂离子电池废物流进行分析,并结合经济分析,发现锂离子电池废物流潜在经济价值的高度可变性可能对基础回收设施的

发展构成挑战。精准梳理产废路径是环境影响评价从模糊定性转向定量决策的核心前提,不仅为污染防治提供理论框架,而且可以通过数据量化推动回收工艺的绿色升级,支撑锂电产业链的可持续发展闭环。

目前关于锂离子电池回收的研究主要集中于不同回收技术及关键环节、材料对环境产生的影响^[18-19]。ALI RAJAEIFAR 等^[20]通过生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)方法比较了 3 种火法冶金技术回收锂离子电池的环境影响。研究发现,从超高温炉技术转向直流等离子体技术可以将回收过程的全球变暖潜势(Global Warming Potential, GWP)降低 80%,但研究仅局限于 GWP 和累计能源需求(Cumulative Energy Demand, CED),未涉及其他关键环境影响指标,限制了结论的全面性。KALLITSIS 等^[21]采用 LCA 全面评估了电动汽车锂离子电池回收的环境影响,发现湿法冶金技术因额外回收锂而展现出更高的环境效益,同时揭示了铝和铜的回收对降低 GWP 等关键指标的显著贡献,但未进行综合环境影响评价(Comprehensive Environmental Impact Assessment, CEA),无法从污染物排放合规角度综合考量,难以全面评估回收过程环境风险。RAUGEI 等^[22]采用 LCA 方法,选取 CED 和 GWP 作为影响指标,将 MARS-EV 研究项目中开发的磷酸钴锂作为阴极,证明了湿法冶金回收工艺的优越性能,但该研究仅针对一种新型锂电池,样本单一,缺乏不同类型锂电池间的广泛对比,且未进行 CEA,难以全面反映锂电池回收的环境影响情况。YOO 等^[23]提出一种新的湿法回收技术,系统评估了其生命周期温室气体及常规大气污染物的排放水平,研究发现从废电池中回收 $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ 和镍钴锰硫酸盐用于新电池的 NCM 阴极活性材料具有显著的环境效益,但该研究未开展 CEA,无法依据国家或地方环境保护标准,对回收过程各阶段污染物排放进行合规性分析与综合评价,难以全面把握其环境风险与影响程度。建立整合 CEA 与 LCA 的环境影响评价方法,有助于定位重点环节、识别关键污染物,为废旧锂离子电池优化回收技术提供依据。

基于废旧锂离子电池回收工艺现状,本文聚焦电池工业化回收的可持续性研究,通过系统梳理与量化评价,构建了涵盖产废路径与环境影响的研究体系。首先基于 ISO 14040/14044 国际标

准对选用的评价方法和系统边界进行了说明。其次,对废旧钴酸锂(Lithium Cobalt Oxide, LCO)电池和镍钴锰酸锂(Nickel Cobalt Manganese, NCM)电池的回收过程进行对比,分析其产废路径,详细梳理 2 种电池回收各环节产生的废气、废水和固废的种类及产量。利用 CEA 和 LCA 全面量化废旧 LCO 与 NCM 电池回收工艺的环境影响,对比资源消耗和排放,总结在工业生产中更具有环境效益的锂离子电池回收路径。最后,基于当前研究进展对 LIBs 的发展方向进行了展望。

1 研究方法

1.1 功能单元与系统边界

本研究基于 ISO 14040/14044 国际标准^[24]构建 LCA 框架,旨在系统比较废旧 LCO 和 NCM 电池回收工艺的环境效益。研究通过建立详细的生命周期清单,使用 GaBi 软件^[25]对废旧 LCO 和 NCM 电池回收进行了环境影响评估,重点分析 2 种电池回收工艺的产废特征与环境负荷分布。以 CEA、LCA、敏感性分析及综合对比分析等方法作为调查工具^[26],量化评估 2 种电池回收路径的资源消耗与生态环境影响,最终为锂离子电池回收产业的绿色工艺选择提供科学依据。

本研究的系统边界涵盖电池放电、破碎拆解、冶金回收等核心工序,直至产出再生材料,能够准确识别和量化回收工艺本身的环境负荷。本研究不包括电池生产、使用阶段及再生产品的后续利用,确保研究结果更具针对性和可比性。废旧 LCO 和 NCM 回收过程的系统边界如图 1 所示。

本研究以年处理 1 500 t 废旧 LCO 或 NCM 为功能单元,系统量化分析 2 种电池回收工艺在资源消耗、能源投入以及污染物排放等方面的差异,生命周期清单分析是基于从企业获取的完整工业化生产线年运行数据。NCM 回收过程的详细数据涵盖了 14 种主要输入物料与 20 种输出物料(包括产品、副产物及各类废弃物)。为清晰呈现工艺的总体物料流向,表 1 概括了 NCM 回收过程的物料分析,仅列出了其中最具代表性的 12 种主要输入与 11 种主要输出数据;表 2 为 LCO 回收过程的物料分析。

1.2 综合环境影响评价方法

工业生产过程中污染物对环境的影响及风险通常来自可能含有有毒、有害或危险成分的废水、废气和固体废弃物^[27-29],是评价生产过程必须

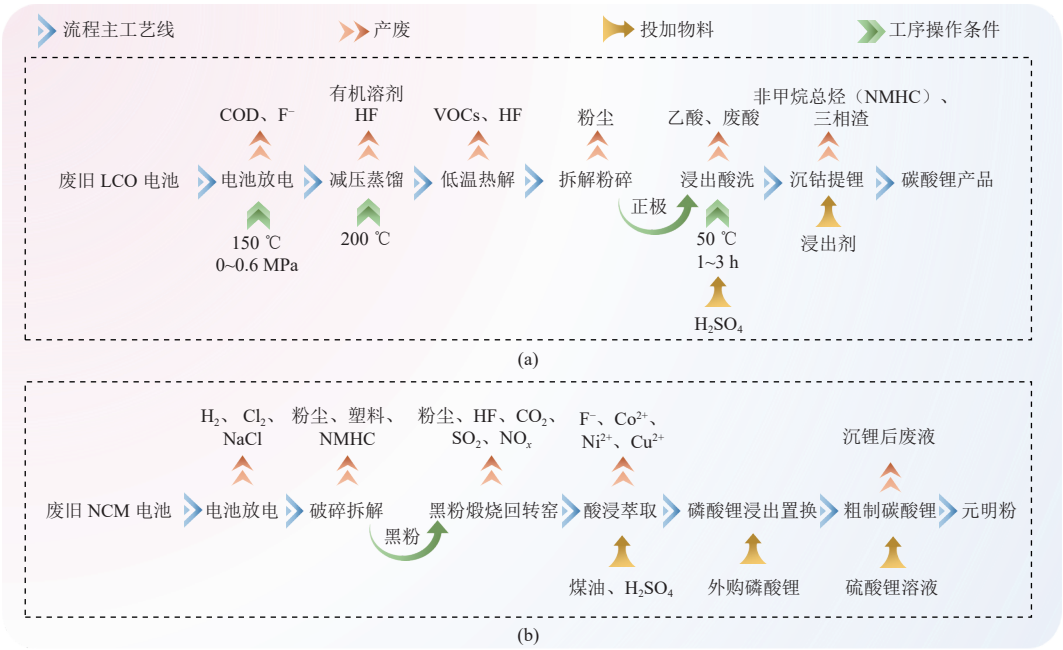


图 1 (a) LCO 回收系统边界, (b) NCM 回收系统边界

Fig. 1 (a) LCO recovery system boundary. (b) NCM recovery system boundary

表 1 NCM 回收生产线物料平衡表
Table 1 Material balance of NCM recycling
production process

输入		输出	
组分	质量/ (t·a ⁻¹)	组分	质量/ (t·a ⁻¹)
NCM	1 500.0	硫酸锰溶液	1 655.5
98% H ₂ SO ₄	990.0	硫酸钴溶液	1 645.9
35% H ₂ O ₂	696.5	硫酸镍溶液	4 065.5
新水	3 629.0	电积铜	46.5
LIX 973萃取剂	752.4	三元浸出渣	177.0
煤油	2 257.2	洗氯水排放	990.7
蒸汽	28.9	皂化水排放	1 235.5
二(2, 4, 4-三甲基戊基)膦酸	1 030.9	铜萃取残液	647.3
二(2-乙基己基)磷酸	1 926.6	开路电积贫液	321.7
2-乙基己基磷酸-2-乙基己基酯	1 555.7	P507萃镍余液	4 761.9
HCl	762.5	高酸浸出滤液及洗后水	1 655.5
液碱	2 470.7	—	—

注: LIX 973萃取剂为2-羟基-5-壬基苯乙酮肟和5-壬基水杨醛肟的复合型萃取剂。

考虑的因素。综合环境影响评价方法充分考虑了国家的环境保护标准^[30],通过废水、废气的排放量和排放浓度计算污染物的权重^[31],计算公式如下:

表 2 LCO 回收生产线物料平衡表
Table 2 Material balance of LCO recycling
production process

输入		输出	
组分	质量/(t·a ⁻¹)	组分	质量/(t·a ⁻¹)
LCO	1 500.0	碳酸锂	107.3
H ₂ SO ₄	1 386.3	Al	135.0
液碱	218.1	铜箔	105.0
纯碱	168.2	负极石墨	240.0
洗涤酸	1.2	塑料	75.0
新增浸出剂	12.0	隔膜	22.5
—	—	浸出渣	330.0
—	—	氟化物	70.0
—	—	VOCs	2.2
—	—	非甲烷总烃(NMHC)	2.3
—	—	酸雾	0.7
—	—	粉尘	0.1
—	—	废酸	1.2

$$\begin{cases} R_x = 0 & S_{\max,x,y} \leq S_x^* \\ R_x = \frac{1}{y} \sum y \left(\frac{S_{\max,x,y}}{S_x^*} \right) & S_{\max,x,y} \geq S_x^* \end{cases} \quad (1)$$

$$W_x = \frac{R_x}{\sum_x R_x} \quad (2)$$

式中: x 是废水/废气/固废中的污染物类型(如 COD、氟化物、 NH_4^+-N), y 是废弃物(如某工段后的废水)的类型, S_x^* 为污染物 x 的排放标准^[32]。 $S_{\max,x,y}$ 为废弃物 y 中污染物 x 的最高浓度, R_x 为污染物 x 的相关比率^[33]。

锂离子电池回收过程中产生的固体废弃物种类分为危险废物、一般废物和生活垃圾,除危险固废外,其他的固废种类例如废渣、粉煤灰等对环境的影响较小,可以直接堆放或者再利用等,因此在计算过程中只考虑了危险废物的环境影响,其他固废的环境影响暂不考虑。废水、废气和固废的综合环境影响值按以下公式计算:

$$C_w/C_G = \sum_x W_x C_x = \sum_x W_x \left[\sum_y m_{x,y} (S_{\max,x,y} - S_x^*) \right] \quad (3)$$

$$W'_x = \begin{cases} 0.5, & \text{危险固体废物} \\ 0.4, & \text{一般固体废物} \\ 0.1, & \text{生活垃圾} \end{cases} \quad (4)$$

$$C_s = \sum_x W'_x m_x \quad (5)$$

式中: C_w 、 C_G 、 C_s 分别为废水、废气和固废的综合环境评价指标, W_x 和 W'_x 是污染因子 x 在所有污染物中的权重。对于污染物 x , $m_{x,y}$ 为废弃物 y 中危险化合物的量。

整个生产流程的综合环境影响评价指标基于废水、废气和固废的环境影响评价结果计算得出:

$$C_T = C_w + C_G + C_s \quad (6)$$

式中: C_T 为整个生产流程的综合环境影响评价指标。

CEA 方法的合理性在于其计算逻辑是基于污染物排放浓度与国家标准限值的比值 R_x , 结合排放量加权, 将废水、废气、固废的环境影响归一化为综合指数, 从而实现对复杂工艺环境风险的定量比较。该方法避免了单一介质或单一污染物评价的局限性, 符合多污染协同控制的现实需求, 并已被广泛应用于金属生产、绿色制造、资源循环等领域的项目环评与工艺比选。GAO 等^[34] 运用 CEA 分析 LED 制造全流程, 发现芯片制备环节废水的 CEA 指数最高, 且与后续 LCA 的酸化潜能、富营养化潜能及全球变暖潜势结果一致, 验证了该方法用于定位电子制造业高污染环节的有效性。WANG 等^[35] 采用 CEA 对中国 31 种典型工业金属生产过程进行评估, 分析废水、废气、固废中 39 种污染物的环境影响, 发现锂、铜、铬、钾、汞的 CEA 指数显著高于其他金属, 验证了该方法在跨金属品类环境影响排序中的可靠性。在锂离子

子电池回收领域, 尽管关于 CEA 直接应用的研究尚不多见, 但该方法学基础与锂电回收的产污特征高度契合, 尤其适用于湿法冶金工艺中重金属、氟化物、COD 等多类污染物的协同评估。

首先, 相比于关注全球性影响的 LCA, CEA 以国家排放标准为基准, 更贴近我国环境管理的合规性要求。其次, LCA 虽然也考虑了三废, 但 CEA 能更清晰地揭示对环境的即时与直接风险, 指向性更强, 且能够辅助识别出 LCA 结果中被弱化的关键污染物。本研究采用 CEA 方法, 旨在从合规性和多污染协同影响的角度, 系统识别锂离子电池回收工艺中的关键环境风险物质, 并为工艺优化提供直接依据。

1.3 生命周期评价方法

LCA 是一种系统化的环境管理工具, 用于评估产品、过程或服务在整个生命周期中对环境影响的方法。根据国际标准化组织的定义, LCA 涵盖了从原材料获取、生产、使用到最终处置的各个阶段, 旨在全面量化环境负荷, 并为决策提供科学依据^[36]。LCA 的核心在于通过清单分析量化资源消耗和环境排放, 并通过影响评价将其转化为具体的环境影响指标, 包括酸化潜能值 (Acidification Potential, AP)、富营养化潜能值 (Eutrophication Potential, EP)、淡水水生生态毒性潜能值 (Freshwater Aquatic Ecotoxicity Toxicity Potential, FAETP)、GWP、人类毒性潜能值 (Human Toxicity Potential, HTP)、MAETP、臭氧层消耗潜能值 (Ozone Depletion Potential, ODP)、光化学氧化潜能值 (Photochemical Ozone Creation Potential, POCP) 和陆地生态毒性潜能值 (Terrestrial Ecotoxicity Toxicity Potential, TETP)^[37]。常见的 LCA 评价方法体系包括 EPS 2000、EDIP 97、CML 2001 和 EDIP 2003 等, 上述方法可分为面向问题 (中间点) 和损害为主 (终结点) 2 类^[21, 38]。前者关注具体环境影响类别, 后者则评估对人类健康、生态系统和资源的最终损害。该研究中, LCA 方法被应用于锂离子电池回收过程的环境效益评估。研究以废旧 LCO 和 NCM 回收过程为基础, 对比不同回收路径的环境影响。通过 LCA 的清单分析, 量化各回收路径在大气、水、土壤等方面的资源消耗和污染物排放, 并利用影响评价方法计算关键环境影响指标。例如 GWP 用于评估温室气体排放, AP 用于评估酸性物质对环境的潜在影响, EP 用于评估氮、磷等营养物质对水体的影响。通过对比分

析,识别环境负荷较高的环节,并提出优化建议,得出更具环保性的锂离子电池回收方法。

本研究首先获取各影响类别的LCA结果,随后通过叠加计算得到研究对象的综合结果 L_{Σ} ,以量化其全生命周期内的环境影响水平。LCA的应用为锂离子电池回收行业的可持续发展提供了科学依据,同时也为相关政策制定和技术改进提供了重要参考。

2 结果与讨论

2.1 锂离子电池工业化回收技术产废路径研究

2.1.1 废旧锂离子电池结构

废旧锂离子电池的回收过程首先通过切割、减压蒸馏从中分离提取并回收有机物,再通过拆解操作,利用酸浸和萃取工艺回收内部的有价金属。该原料构成决定了后续回收工艺的技术方向与产废控制重点——正极材料中的有价金属(钴、镍、锰、锂)是回收核心目标,导电剂、黏结剂、电解液等成分则是产废主要来源,为后续工艺产废分析及污染控制技术研发提供了明确依据。

锂离子电池作为一种典型的电化学储能装置,其核心结构由正极、负极、隔膜和电解液4大关键组分构成^[39]。正极材料体系包含正极活性物质、导电添加剂(乙炔黑)、黏结剂(PVDF)以及集流体(铝箔)等^[40];负极体系则由负极活性物质和集流体组成。其中,隔膜作为重要的安全组件,通过物理隔离正负极,防止短路,同时允许锂离子自由通过^[41];电解液在充放电过程中起到电解质传递的作用,促进正负极之间的离子迁移,从而实现

电池的充放电过程^[42]。

在锂离子电池体系中,LCO的正极活性材料由 LiCoO_2 组成^[43],负极活性材料由石墨构成,其电解液体系主要包括碳酸乙烯酯、碳酸二乙酯、碳酸二甲酯、碳酸乙甲酯等特定有机溶剂和锂盐等。值得注意的是,LCO和NCM电池在电池结构上具有一致性,二者仅在正极材料成分上有所不同,其他基本一致。NCM电池的正极材料由镍钴锰组成^[44]。

2.1.2 废旧LCO回收利用项目产废

在废旧LCO电池的回收流程中,首先通过盐水浸泡对电池进行预处理,将电池完全浸入盐水中充分放电,并定期更换盐水以促进锂离子向正极迁移,同时有效消除残余电量,避免短路。充分放电后进入切割工序,将废旧电池横切以暴露电芯,后送至减压蒸馏工段。在减压蒸馏工段,电池内的电解液充分气化;在低温热解工序中,电解液中的 LiPF_6 转变成氟化物,废气经密闭管道收集,并经过二级冷凝和二级碱液喷淋处理,确保废气达标排放。在拆解和粉碎工序中,产生的粉尘通过集尘系统回收并返回重选;在酸洗工序中,将拆解分离的铝粉送入反应槽进行酸洗处理,此过程会产生少量甲酸和乙酸酸雾,洗涤酸液循环使用直至失效后作为废酸液排放;最后,正极材料与浸出剂反应提取钴锂,浸出剩余少量残留碳、黏结剂等不溶物浸出渣。富钴液采用液碱处理沉淀钴化合物,富锂钴浸出液则与纯碱反应生成碳酸锂,通过离心分离技术最终获得碳酸锂产品。

废旧LCO回收利用流程的产废情况见表3。

表3 废旧LCO回收产废情况

Table 3 Waste generation from spent LCO recycling

污染类型	污染物	产生环节	产生量/(t·a ⁻¹)
废气	HF	热解、减压蒸馏	140.030
	粉尘	粉碎分级	10.553
	乙酸	浸出酸洗铝	0.018
	硫酸	正极材料浸出	2.764
	NMHC	提锂、沉钴	9.002
废水	COD、F ⁻	放电盐水	253.47
	COD、F ⁻ 、Co、Ni、Mn	沉钴锂后废水	5 407.61
	F ⁻	废气喷淋废水	3 960.00
固废	废酸	酸洗	2.37
	浸出渣	压滤洗涤	1 320.00
	第三相残渣	钴锂等的有机相循环使用	1.50

对产生的固体废弃物按其成分进行分类汇总,其处理过程产生的废气、废水与固废的最终排放量如图 2 所示。从图中可以看出废气中 VOCs 排放较多,废水中 COD_{Cr} 的排放量较大并且会随之排放少量的重金属离子,危险固废主要为废酸和三相渣。

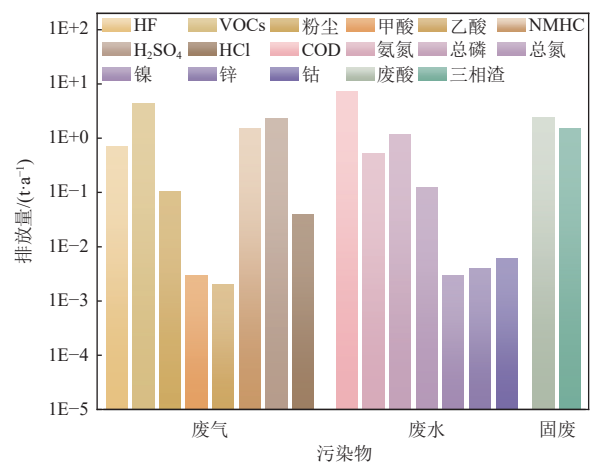


图 2 LCO 回收过程废气、废水、固废排放情况
Fig. 2 Emissions of exhaust gas, wastewater, and solid waste during the LCO recycling process

2.1.3 废旧 NCM 资源化项目产废

在废旧 NCM 电池的资源化回收过程中,首先对电池模组进行系统性检测,评估其剩余容量和

健康状况,以判断是否具备梯次利用价值。符合要求的电池进入梯次利用环节,延长使用寿命,完全失效的电池则被拆解,收集其中的电芯和极片材料,进入废电池预处理流程。在预处理阶段,黑粉等可回收组分通过浸出萃取工艺进行处理,该过程会产生一定量废水,部分废水经过适当处理后回用于二(2-乙基己基)磷酸酯萃取工序,以高效提取电池中的有价金属,并用于生产电池级硫酸锰;随后,通过 2-乙基己基膦酸单 2-乙基己基酯处理后的萃余液可得到硫酸锂溶液。此外,锂提取过程中还可能产生磷酸锂浸出液、卤水等副产品;最后,利用上述材料可以制备粗制碳酸锂,进一步通过电子级碳酸锂制备工艺,将粗制碳酸锂转化为高品质的碳酸锂产品。根据废旧 NCM 梯次利用工艺流程分析,电池梯次利用过程中产生的废气量很少,因而处置方式主要为车间排放,此过程不产生废水,在电池组外壳拆解时,会产生塑料和废电路板,部分电池包拆解时,会产生防冻液,具体产生情况见表 4。废旧 NCM 资源化过程中产生的废气、废水排放量及固体废物排放量如图 3 所示。从图中可知,气体污染物中 NO_x 及粉尘的排放量较多,污水中 COD_{Cr} 的排放量最大,其次是总氮,而固体废物中拆解锂离子电池产生的防冻液是对环境影响较大的危险废物。

表 4 废旧 NCM 回收产废情况
Table 4 Waste generation from spent NCM recycling

污染类型	污染物名称	产污环节	产生量/(t·a ⁻¹)
废气	粉尘	破碎、拆解、回转窑	441.690
	HF	黑粉煅烧回转窑	416.418
	CO ₂	黑粉煅烧回转窑	1 678.03
	SO ₂	黑粉煅烧回转窑	2.227
	NO _x	黑粉煅烧回转窑	20.827
	H ₂	电池放电线	0.025
	Cl ₂	电池放电线	0.907
	NMHC	电池破碎后煅烧炉	2 217.600
废水	NaCl	离子交换树脂反冲洗水、放电废水	7 008.00
	Ca、Mg	离子交换反冲洗水	66 760.98
	COD _{Cr} 、TP	蒸发母液	35 789.74
	SS、F、Co、Ni、Cu	洗渣废水、沉锂后废水	83 260.15
固废	塑料		1 000
	电路板	动力电池组(包)拆解	200
	防冻液		20

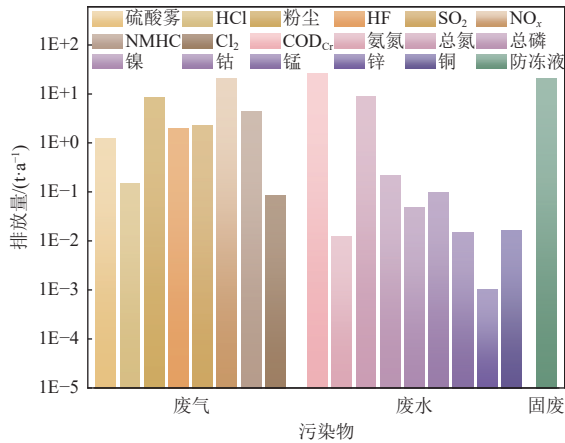


图3 NCM回收过程废气、废水、固废排放情况

Fig. 3 Generation of waste gas, waste water, and solid waste during the NCM recycling process

2.2 综合环境影响评价

废旧 LCO 和 NCM 回收过程中排放的废水及废气污染物浓度明显低于国家相关标准中的限值,符合排放标准。对现有排放的所有污染物的环境影响进行评估,充分考虑微量环境污染物对环境的影响,废水和废气的综合环境影响结果如图 4 所示。整体分析,废旧 LCO 循环利用项目的环境影响小于废旧 NCM 资源化项目,且废旧 NCM 资源化项目排放的污染物种类相比含钴废料循环利用项目更多。

在废气的环境影响中,废旧 LCO 回收过程中排放的硫酸雾、NMHC 及乙酸对环境的影响值均略大于 NCM。其中硫酸雾的影响值最大,这是由于硫酸需要用于浸取锂、镍、锰金属,在镍氢正极



图4 废旧 LCO 循环利用项目中 (a) 废气、(b) 废水 CEA 的相关参数与结果比较,
废旧 NCM 资源化项目中 (c) 废气、(d) 废水 CEA 的相关参数与结果比较

Fig. 4 Comparison of CEA parameters and results for (a) exhaust gas and (b) wastewater in the spent LCO recycling project.
Comparison of CEA parameters and results for (c) exhaust gas and (d) wastewater in the spent NCM recycling project

材料回收时也需要进行酸溶,废催化剂的浸取、溶解,含锆合金低酸浸出和氧化浸出的过程中均会产生硫酸雾。然而废旧 NCM 回收过程中硫酸雾主要产生于磷酸锂的置换浸出以及沉锂后调 pH,产生硫酸雾的环节要更少一些,但 NCM 回收会产生更多的 SO_2 、 NO_x 和 Cl_2 ,这些气体主要产生于回转窑和煅烧窑中,而 LCO 回收过程产生 SO_2 和 NO_x 主要是由于天然气的燃烧,回收过程本身并不新增 SO_2 和 NO_x ,对环境的影响较小。对于废水排放,废旧 LCO 和 NCM 电池回收过程中 COD_{Cr} 的影响最为显著,高浓度的 COD_{Cr} 意味着废水中含有大量有机污染物,会消耗水体中的溶解氧,影响水生生物的生存。在重金属对废水的影响中,2 种废电池回收过程有较大的差别,钴酸锂回收过程中锌产生的影响较大,而在 NCM 电池回收过程中钴产生的影响更大,镍的影响次之。在固体废物方面,废旧 NCM 回收产生的危险废物更多,对环境的影响更大。各类废物的 CEA 结果如图 5 所示。

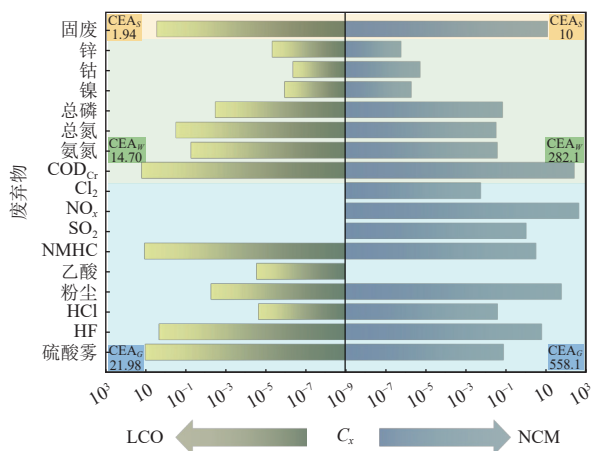


图 5 废旧 LCO 和 NCM 回收过程 CEA 对比

Fig. 5 CEA comparison for spent LCO and NCM recycling processes

综上所述,废旧 LCO 和 NCM 电池回收过程都存在一定的环境风险,但各有侧重。LCO 回收在废气处理上需重点关注硫酸雾的排放控制,而 NCM 回收则在废气中 NO_x 排放、废水中 COD_{Cr} 浓度高以及大量固废处理方面均面临较大挑战。为降低这些环境影响,在未来的回收工艺改进中,针对 LCO 可优化含硫物质处理流程,减少硫酸雾产生;对于 NCM,应研发降低 NO_x 排放的技术,改进废水处理工艺以降低 COD_{Cr} 浓度,并探索更有效的固废处理和资源回收方法。

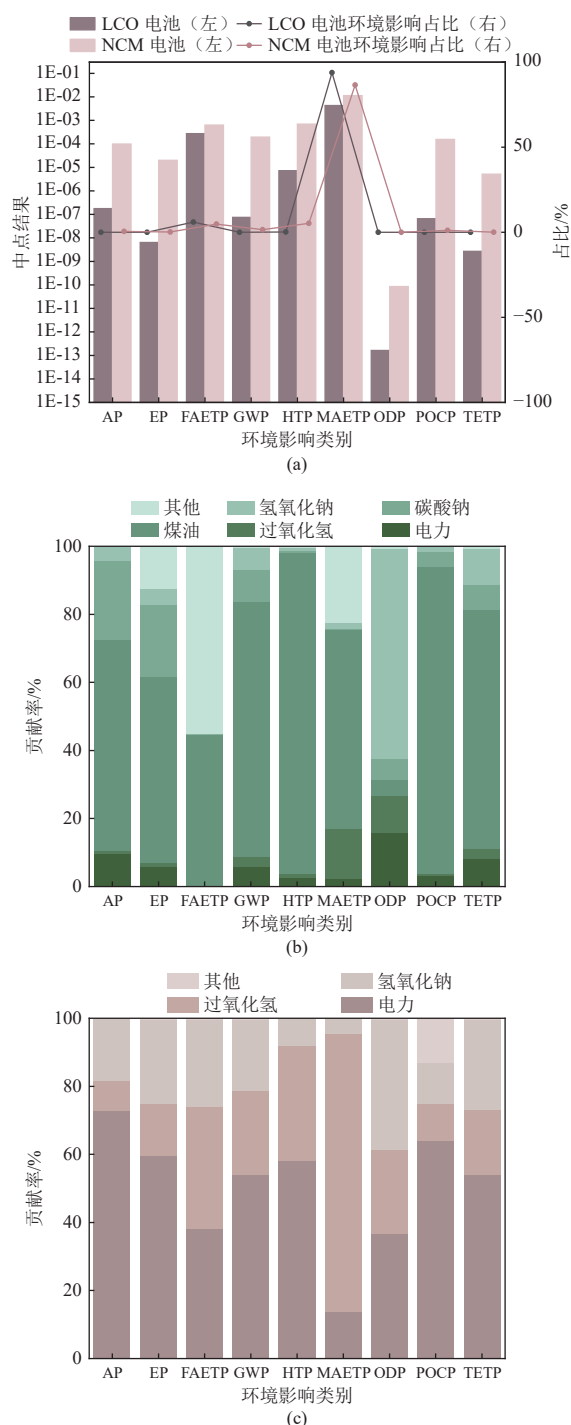
2.3 生命周期评价

总体来看,在一定条件下,废旧 LCO 回收过程在整个生命周期中显示出更低的环境影响,这主要是由于 LCO 的金属成分相对简单,钴含量高且易于分离提纯,减少了化学试剂的使用和能耗。然而 NCM 电池含有镍、钴、锰等多种金属,分离工艺更复杂,需要更多能源和化学处理,导致更高的污染排放和资源消耗。

除了成分相对简单,LCO 电池回收的低环境影响还可归因于较好的回收条件。LCO 电池的正极材料 LiCoO_2 在高温煅烧回收时,钴的还原和提取过程相对高效,所需温度和处理时间较低,从而减少了能源消耗和温室气体排放。NCM 电池含有镍、锰等元素,在回收过程中需要更高的温度和更复杂的还原条件,导致能耗显著增加,并可能产生更多的 NO_x 或氟化物,进一步加剧环境影响。

废旧 LCO 和 NCM 回收过程的 LCA 归一化结果如图 6(a)所示。由图可知,废旧 LCO 和 NCM 回收过程中 MAETP 指标最高,分别占总环境影响的 93.8%、86.3%。该指标与金属物质的泄漏有关,这主要因为 NCM 和 LCO 的正极材料中含有重金属物质,所以在回收过程中对水生环境的影响最大。此外,FAETP 指标也相对较高,2 组电池回收过程均需要溶解正极材料中的有价金属,其中会产生含重金属离子的酸性废水,处理 NCM 的酸性废水成分更复杂,需额外添加溶剂萃取剂,而 LCO 回收中钴的高浓度会加剧毒性物质负荷,导致回收过程对淡水生态系统构成长期潜在风险,所以 2 组电池回收过程的 FAETP 指标也相对较高。

关键材料对各指标的贡献率如图 6(b)(c)所示。在 LCO 回收的 LCA 分析中,发现 H_2O_2 的使用对环境的影响更大,占总环境影响的 78.3%。根本原因在于 H_2O_2 作为还原剂,需用于将高价钴还原为可溶性 Co^{2+} ,其生产本身属于高能耗过程,伴随显著的碳排放;在 NCM 回收的 LCA 分析中,煤油作为溶剂萃取剂对环境的影响较大,占总环境影响的 59.9%。这主要与煤油的化学性质有关,煤油属于挥发性有机化合物,在萃取和回收过程中易挥发至大气,促进臭氧和二次有机气溶胶的形成,加剧光化学污染;此外,煤油具有较高的碳足迹,其使用过程会消耗大量能源并排放温室气体,这些因素综合作用,使煤油成为 NCM 回收工艺中不可忽视的主要环境负担。



注: AP 单位为 kg SO₂ eq.; EP 单位为 kg Phosphate eq.; FAETP 单位为 kg DCB eq.; GWP 单位为 kg CO₂ eq.; HTP 单位为 kg DCB eq.; MAETP 单位为 kg DCB eq.; ODP 单位为 kg R11 eq.; POCP 单位为 kg Ethene eq.; TETP 单位为 kg DCB eq.。

图 6 (a) LCO、NCM 回收过程中点影响比较分析, 关键材料对环境影响指标的贡献率; (b) NCM; (c) LCO
Fig. 6 (a) Comparative analysis of key impact points in LCO and NCM recycling process. Contribution rates of key materials to environmental impact indicators: (b) NCM; (c) LCO

2.4 经济性分析

从经济角度分析, 废旧 LCO 电池回收项目与废旧 NCM 电池回收项目在成本、收益及整体可行性上存在显著差异, 且同种电池内部成本占比也各有侧重。

NCM 电池回收线的总投资为 7 899.9 万元, 其中环保投资为 373.3 万元, 环保投资比为 4.73%。在 LCO 回收项目的投资中, 总投资为 6 762.0 万元, 其中环保投资为 460 万元, 环保投资比为 6.8%。LCO 电池的环保投资比相对较高, 表明其工艺流程相对简单, 末端治理压力较小, 与 CEA、LCA 结果显示其环境影响较小的结论一致。

运营成本方面, NCM 全年总成本达 5 133.4 万元, 比 LCO 的 3 714.5 万元高约 38%。其中, NCM 的化学品成本比 LCO 高 42%, 能源消耗成本也高 22%, 这与其金属成分复杂、分离难度大的工艺特点直接相关。

总体而言, NCM 回收项目在设备投入和运营成本方面均高于 LCO, 特别是在化学品消耗和能源使用上差距显著, 这为优化工艺路线、降低处理成本指明了方向。为协调环境目标与经济收益, 必须聚焦于湿法冶金工艺的优化, 核心在于减少化学试剂用量并降低生产能耗, 从而实现降本增效。

2.5 敏感性分析

敏感性分析方法可以通过改变 2 种电池回收过程前不同物料的输入值和回收后废物的输出值来分析环境影响敏感程度。敏感性分析基于关键变量减少 5% 计算, 以找到对环境最敏感、影响最显著的物质。

废旧 LCO 回收过程中, 关键材料对 LCA 结果的敏感性分析如图 7(a) 所示, H₂O₂ 的使用对环境的敏感性更高, 敏感系数约为 3.91%。而电力、NaOH、H₂SO₄ 的敏感性系数约为 0.75%、0.24%、0.10%。这主要是因为 LCO 回收的浸出等环节中, H₂O₂ 作为氧化剂, 用于提高金属浸出率, 其使用量和反应条件会显著影响回收过程的污染物产生情况。其次, H₂O₂ 的投入量还会影响回收过程的能耗和环境影响, H₂O₂ 的分解反应是放热反应, 过量的 H₂O₂ 会导致反应体系温度升高, 增加冷却系统的负担, 进而增加能耗。相比其他投入物质, H₂O₂ 化学性质活泼, 风险防控要求更高。

在 NCM 回收过程中, 关键材料对 LCA 结果的敏感性分析如图 7(b) 所示, 煤油展现出较高的

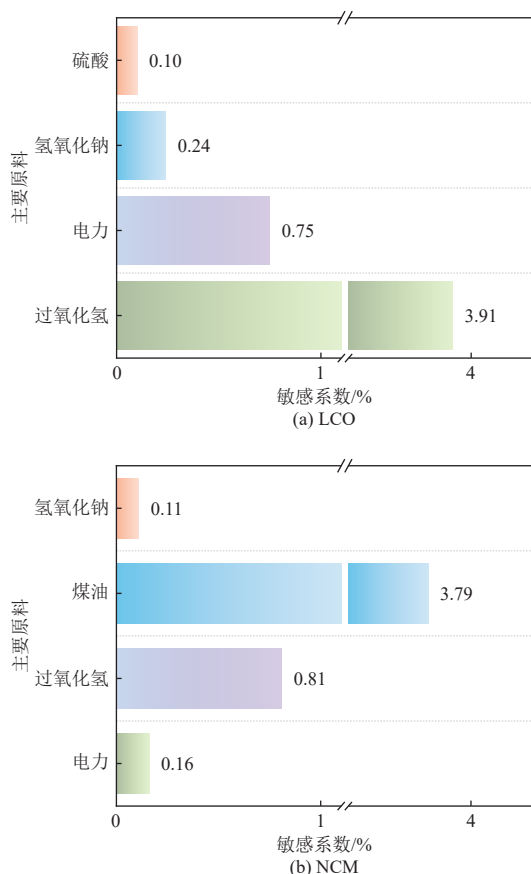


图 7 关键材料对 LCA 结果的敏感性分析

Fig. 7 Sensitivity analysis of key materials on the LCA results

敏感性,其敏感性系数约为 3.79%;而 H_2O_2 、电力、NaOH 的敏感性系数约为 0.81%、0.16%、0.11%。从回收工艺角度来看,NCM 的正极材料包含镍、钴、锰等金属,为了高效分离有价金属,通常需要使用煤油等有机溶剂来溶解或剥离黏结剂,从而实现正极活性物质与集流体的分离。从工艺稳定性角度看,NCM 回收流程中需要使用大量煤油,煤油的用量过多可能导致溶剂残留,影响后续金属提取的纯度。因此,煤油在 NCM 回收过程中的关键作用、对环境和工艺稳定性的影响,共同导致其在敏感性分析中表现出较高的敏感性。

关键材料对各环境指标的影响进行敏感性分析结果如图 8 所示,LCO 回收过程中, H_2SO_4 对 AP 的影响最大,敏感度为 3.96%;电力对 EP、GWP、HTP、TETP 的影响最大,敏感度分别为 3.14%、3.45%、2.90%、3.49%; H_2O_2 对 MAETP 的影响最大,敏感度为 4.07%。NCM 回收过程中,煤油对 AP、EP、FAETP、GWP、HTP、MAETP、POCP、TETP 的影响最大,敏感度分别为 2.06%、3.15%、4.98%、3.84%、4.75%、3.69%、4.28%、

3.64%;NaOH 对 ODP 的影响最大,敏感度为 3.00%。其他关键物质对各环境影响指标的敏感性如图 7 所示。废旧 LCO 回收过程产废对 CEA 结果的敏感性分析如图 9(a)(b)所示,废水中 COD_{Cr} 以及废气中 NHMC、硫酸雾对环境的影响最为显著,敏感度分别为 3.01%、2.19%、1.81%。这与回收工艺的各个环节紧密相关。废水方面,拆解、酸浸和沉钴提锂等工序排放的工业废水含有重金属、无机盐和有机物,导致 COD_{Cr} 升高,处理难度大且危害水生态系统。废气方面,在蒸馏和热解阶段,电解液挥发产生 NHMC 污染物;而酸浸和洗铝工序则会产生硫酸雾,这些酸性气溶胶易形成酸雨,破坏土壤和水体环境,对区域生态造成长期危害。

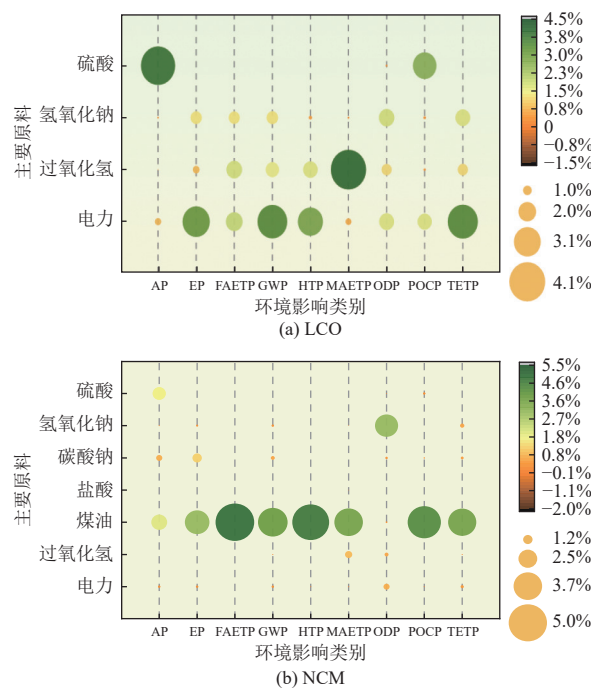


图 8 关键材料对各指标的敏感性分析

Fig. 8 Sensitivity analysis of key materials on various indicators

废旧 NCM 回收过程产废对 CEA 结果的敏感性分析如图 9(c)(d)所示,废水中 COD_{Cr} 以及废气中 NO_x 对环境的影响最为显著,敏感度分别为 3.06%、7.70%。这与工艺特点、原料特性以及能源利用方式紧密相关。在浸出、萃取等工序中,大量化学药剂的使用导致电池中的有机物质和添加剂进入废水,显著增加了废水中的 COD_{Cr} 含量。此外,回收过程中产生的废水成分复杂,含有多种金属离子,这些金属离子会抑制微生物的活性,影响废水处理效果,使得 COD_{Cr} 难以有效去除。从

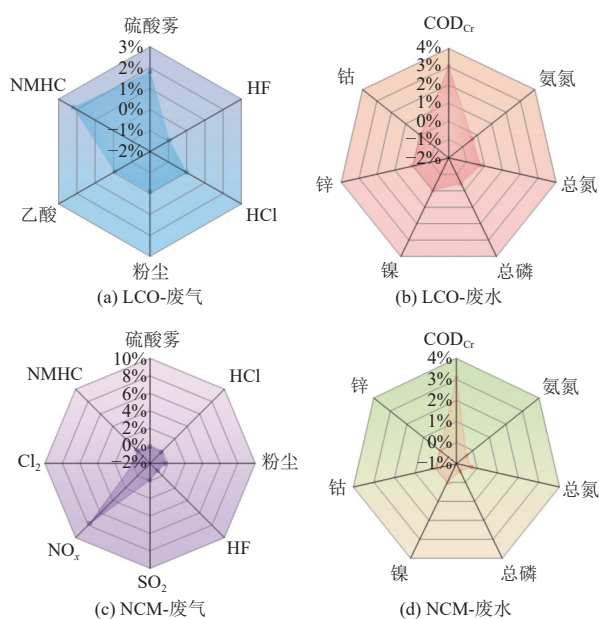


图 9 排放废物对 CEA 结果敏感性分析

Fig. 9 Sensitivity analysis of waste emissions on the CEA results

废气层面看, NO_x 主要源于能源消耗环节。在电池回收的高温处理工序中, 需要燃烧大量的化石燃料来提供热量, 而燃料燃烧过程中, 空气中的氮气和氧气在高温条件下反应生成大量 NO_x 。根据图 5 数据, 2 种电池回收过程中产生的固体废弃物排放量远低于废气和废水, 因此本研究未将固废纳入 CEA 敏感性分析范围。

2.6 综合评价

对锂离子电池回收进行环境影响评价是推动其可持续发展的关键环节。通过 CEA 和 LCA 的对比分析, 从多维度评估了不同锂电池回收过程的环境效益与潜在风险。如图 10 所示, CEA 和 LCA 结果表明, 废旧 LCO 回收过程的环境影响显著低于 NCM 回收过程。

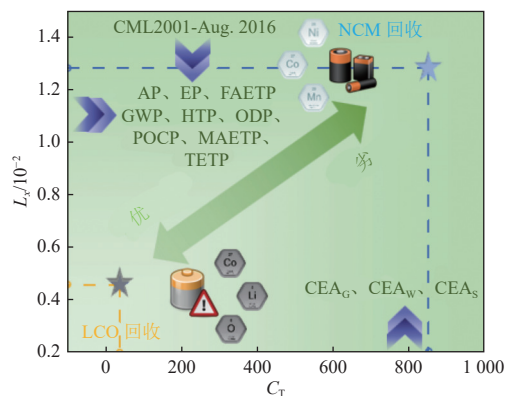


图 10 综合性分析

Fig. 10 Comprehensive analysis

从 CEA 结果来看, 废旧 NCM 回收过程中污染物的环境影响远大于 LCO 回收过程, 主要的环境影响来自废气中氮氧化物的排放, 由于 NCM 的正极材料为镍、钴、锰的氢氧化物, 石墨碳粉的主要成分是碳, 电解液溶剂为碳酸酯类物质, 均不含有氮元素, 所以煅烧炉烟气中的氮氧化物主要来自天然气的燃烧, 而钴酸锂回收过程实施了氮氧化物污染物排放减量替代, 对环境的影响更小。

LCA 与 CEA 的评估结果相同, NCM 回收过程在多个环境影响类别中表现较差, 尤其是 MAETP 和 GWP 方面。MAETP 的高值反映了 NCM 正极材料中镍、钴、锰等重金属对水生生态系统的潜在危害, 而 GWP 的高值则与煅烧工艺的高能耗和二氧化碳排放直接相关。废旧 NCM 回收过程中污染物的排放对环境的影响也更显著, 主要是由于重金属等的排放对水生环境和人体健康产生的毒性以及废气污染物的排放对大气环境质量的影响。

综上所述, 废旧 NCM 资源化回收对环境的影响大于废旧 LCO 回收过程。LCO 回收在环境友好性上更具优势, 但其工艺中硫酸雾和 HF 的处理仍需加强; NCM 回收的资源价值更高, 但面临更复杂的环境挑战。

3 结 论

本文通过对废旧 LCO 及 NCM 回收在生产工艺中产生的污染物质进行综合环境影响评价, 量化其对环境的影响并进行比较, 通过对 2 种不同的锂离子电池回收工艺进行全过程生命周期评价, 对比了 2 种废旧电池回收过程的环境影响并分别对其生产过程的各个环节进行对比评价, 得出以下结论。

(1) 通过对 LCO 和 NCM 电池回收过程的产废路径进行系统分析, 研究发现废旧锂离子电池回收过程中废气以 VOCs、硫酸雾及含氟废气为主, 废水中富含 COD_{Cr} 、 F^- 及重金属离子, 固体废弃物则主要涉及废酸、浸出渣及三相残渣等。因为 2 种电池均讨论的是湿法处理工艺, 所以其回收过程的产废主要集中于废水的重金属离子和 COD_{Cr} 。

(2) 根据 CEA 结果, 废旧 NCM 循环利用过程中 COD_{Cr} 、硫酸雾对环境产生的影响更显著, 废旧 NCM 资源化利用项目则在 NO_x 、 COD_{Cr} 排放方面问题更突出。二者均需进行针对性优化: NCM

应改进酸浸工艺以减少硫酸雾, NCM 需加强 NO_x 治理、废水净化和固废资源化, 以降低整体环境风险。

(3) LCA 结果显示, 由于金属物质的泄漏, 回收废旧锂离子电池对环境的影响中 MAETP 的环境指标值最大, 分别占 LCO、NCM 总环境影响的 93.8%、86.3%。在 GWP 及 AP 上的影响也不容忽视, 因此要进一步管理回收废旧锂离子电池过程中的酸性排放物。

(4) 经济性分析显示, LCO 电池的环保投资相对较高, 末端治理压力较小, 与 CEA、LCA 结果显示其环境影响较小的结论一致。

(5) 敏感性分析结果显示, 在入料层面, LCO 中的化学品 H_2O_2 敏感性最高, 为 3.91%; NCM 中的化学品煤油敏感性最高, 为 3.79%, 主要原因是二者在回收过程中的用量大、难控制。在废物排放层面, LCO 回收过程中 COD_{Cr} 的敏感性最高, 为 3.01%; NCM 回收过程中 COD_{Cr} 的敏感性最高, 为 7.70%。

(6) 综合评价结果显示, LCO 回收具有更好的环保性能, 但需要加强硫酸雾和 HF 处理; NCM 回收虽然资源价值更高, 但面临更大的环境管控挑战。

对废旧的锂离子电池进行回收利用, 对动力电池进行梯次利用释放其剩余储能, 回收电池中的金属材料再利用, 不仅可以减少废电池的影响, 更为锂离子电池的生产减少了原材料的开发, 减轻了对生态环境的破坏, 提高了资源利用率。废旧锂离子电池的回收处理对降低总体的环境影响起到了积极的作用, 综合利用了有价资源如镍、锰、钴等, 但仍需要对锂电池回收阶段的各种工艺进行改善。

参考文献 (References):

- [1] LEI Shuya, SUN Wei, YANG Yue. Comprehensive technology for recycling and regenerating materials from spent lithium iron phosphate battery[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58(8): 3609–3628.
- [2] XIAO Chunwu, WANG Bin, ZHAO Dan, et al. Comprehensive investigation on Lithium batteries for electric and hybrid-electric unmanned aerial vehicle applications[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023, 38: 101677.
- [3] BAIS A R, SUBHEDAR D G, PANCHAL S. Critical thickness of nano-enhanced RT-42 paraffin based battery thermal management system for electric vehicles: A numerical study[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 52: 104757.
- [4] LI Pengwei, LUO Shaohua, ZHANG Lin, et al. Progress, challenges, and prospects of spent lithium-ion batteries recycling: A review[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2024, 89: 144–171.
- [5] SANG Pengfei, CHEN Qiliang, WANG Danyang, et al. Organosulfur materials for rechargeable batteries: Structure, mechanism, and application[J]. *Chemical Reviews*, 2023, 123(4): 1262–1326.
- [6] MOHR M, PETERS J F, BAUMANN M, et al. Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling processes[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2020, 24(6): 1310–1322.
- [7] GUTSCH M, LEKER J. Costs, carbon footprint, and environmental impacts of lithium-ion batteries—From cathode active material synthesis to cell manufacturing and recycling[J]. *Applied Energy*, 2024, 353: 122132.
- [8] ZHOU Zhiwen, LAI Yiming, PENG Qin, et al. Comparative life cycle assessment of merging recycling methods for spent lithium ion batteries[J]. *Energies*, 2021, 14(19): 6263.
- [9] DU Kaidi, ANG E H, WU Xinglong, et al. Progresses in sustainable recycling technology of spent lithium-ion batteries[J]. *Energy & Environmental Materials*, 2022, 5(4): 1012–1036.
- [10] ASADI DALINI E, KARIMI G, ZANDEVAKILI S, et al. A review on environmental, economic and hydrometallurgical processes of recycling spent lithium-ion batteries[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2021, 42(7): 451–472.
- [11] REY I, VALLEJO C, SANTIAGO G, et al. Environmental impacts of graphite recycling from spent lithium-ion batteries based on life cycle assessment[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2021, 9(43): 14488–14501.
- [12] LOGANATHAN M K, ANANDARAJAH G, TAN C M, et al. Review and selection of recycling technology for lithium-ion batteries made for EV application—A life cycle perspective[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022, 1100(1): 012011.
- [13] KARAGOZ S, DEVECI M, SIMIC V, et al. A novel intuitionistic fuzzy MCDM-based CODAS approach for locating an authorized dismantling center: A case study of Istanbul[J]. *Waste Management & Research: the Journal for a Sustainable Circular Economy*, 2020, 38(6): 660–672.
- [14] MROZIK W, ALI RAJAEIFAR M, HEIDRICH O, et al. Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries[J]. *Energy & Environmental Science*, 2021, 14(12): 6099–6121.
- [15] CONG Liang, LIU Weiwei, KONG Shuai, et al. End-of-

- use management of spent lithium-ion batteries from sustainability perspective: A review[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2021, 143(10): 100801.
- [16] TONG Ziwei, WANG Mingyue, BAI Zhongchao, et al. Advances in lithium-ion battery recycling: Strategies, pathways, and technologies[J]. *ChemPhysMater*, 2025, 4(1): 30–47.
- [17] RICHA K, BABBITT C W, GAUSTAD G, et al. A future perspective on lithium-ion battery waste flows from electric vehicles[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, 83: 63–76.
- [18] LI Jing, ZHOU Jiefeng, WANG Wei, et al. LCA for lithium battery recycling technology-recent progress[J]. *Ionics*, 2024, 30(8): 4417–4428.
- [19] QUAN Jiawei, ZHAO Siqi, SONG Duanmei, et al. Comparative life cycle assessment of LFP and NCM batteries including the secondary use and different recycling technologies[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 819: 153105.
- [20] ALI RAJAEIFAR M, RAUGEI M, STEUBING B, et al. Life cycle assessment of lithium-ion battery recycling using pyrometallurgical technologies[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2021, 25(6): 1560–1571.
- [21] KALLITSIS E, KORRE A, KELSALL G H. Life cycle assessment of recycling options for automotive Li-ion battery packs[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 371: 133636.
- [22] RAUGEI M, WINFIELD P. Prospective LCA of the production and EoL recycling of a novel type of Li-ion battery for electric vehicles[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 213: 926–932.
- [23] YOO E, LEE U, KELLY J C, et al. Life-cycle analysis of battery metal recycling with lithium recovery from a spent lithium-ion battery[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2023, 196: 107040.
- [24] KLÖPFER W. The critical review of life cycle assessment studies according to ISO 14040 and 14044[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2012, 17(9): 1087–1093.
- [25] ZHANG Yaning, CAO Ziqiang, ZHANG Chunmei, et al. Life cycle assessment of plug-In hybrid electric vehicles considering different vehicle working conditions and battery degradation scenarios[J]. *Energies*, 2024, 17(17): 4283.
- [26] DUARTE CASTRO F, MEHNER E, CUTAIA L, et al. Life cycle assessment of an innovative lithium-ion battery recycling route: A feasibility study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 368: 133130.
- [27] HAN Shengjie, XU Lei, CHEN Chen, et al. Recovery of graphite from spent lithium-ion batteries and its wastewater treatment application: A review[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 330: 125289.
- [28] ZHANG Qingsong, NIU Jianghao, ZHAO Ziheng, et al. Research on the effect of thermal runaway gas components and explosion limits of lithium-ion batteries under different charge states[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 45: 103759.
- [29] KAYLA KILGO M, ANCTIL A, KENNEDY M S, et al. Metal leaching from Lithium-ion and Nickel-metal hydride batteries and photovoltaic modules in simulated landfill leachates and municipal solid waste materials[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 431: 133825.
- [30] REN Zhijun, LI Huajie, YAN Wenyi, et al. Comprehensive evaluation on production and recycling of lithium-ion batteries: A critical review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 185: 113585.
- [31] GAO Wenfang, SUN Zhi, CAO Hongbin, et al. Economic evaluation of typical metal production process: A case study of vanadium oxide production in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120217.
- [32] ZHANG Guangming, WANG Yvting, MENG Xianhao, et al. Life cycle assessment on the vanadium production process: A multi-objective assessment under environmental and economic perspectives[J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2023, 192: 106926.
- [33] 关云鹏. 利用内梅罗指数法模型评价地下水水质的探讨[J]. *山西水利科技*, 2012(1): 81–84.
- GUAN Yunpeng. A discussion on evaluating groundwater quality by nemerow index method[J]. *Shanxi Hydrotechnics*, 2012(1): 81–84.
- [34] GAO Wenfang, CHEN Fangfang, YAN Wenyi, et al. Toward green manufacturing evaluation of light-emitting diodes (LED) production—A case study in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 368: 133149.
- [35] WANG Zhaolong, CUI Han, YAN Wenyi, et al. Comprehensive environmental assessment of typical Chinese industrial metal production processes[J]. *iScience*, 2025, 28(8): 113011.
- [36] 杨丽丽, 郭加会, 李培欣, 等. 三元锂动力电池回收利用技术的全生命周期评价[J]. *广东化工*, 2023, 50(13): 59–61.
- YANG Lili, GUO Jiahui, LI Peixin, et al. Life cycle assessment of ternary lithium power battery recycling technology[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2023, 50(13): 59–61.
- [37] XIA Jinsong, GHAREMAN A. Platinum group metals recycling from spent automotive catalysts: Metallurgical extraction and recovery technologies[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 311: 123357.

- [38] 段宁, 程胜高. 生命周期评价方法体系及其对比分析 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(32): 13923–13925+14049.
DUAN Ning, CHENG Shenggao. Outline and contrast analysis of life cycle assessment methodologies[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(32) : 13923–13925+14049.
- [39] ZHANG Hailin, ZHAO Hongbin, KHAN M A, et al. Recent progress in advanced electrode materials, separators and electrolytes for lithium batteries[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2018, 6(42): 20564–20620.
- [40] 米雪. 退役三元锂电正极材料有机质热解无害化去除及选择性提锂研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2023: 15–17.
MI Xue. Harmless organic matter and selective lithium extraction from cathode materials of Spent Lithium Batteries[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2023: 15–17.
- [41] FRANCIS C F J, KYRATZIS I L, BEST A S. Lithium-ion battery separators for ionic-liquid electrolytes: A review[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(18): 1904205.
- [42] LIU Yukun, ZHAO Chenzi, DU Juan, et al. Research progresses of liquid electrolytes in lithium-ion batteries[J]. *Small*, 2023, 19(8): 2205315.
- [43] 童启林. 镍钴锰酸锂(NCM811)正极材料的结构设计及性能研究 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2022: 12–13.
TONG Qilin. Structure Design and Performance Study of $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_{1-x-y}\text{O}_2$ (NCM811) Cathode Material[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2022: 12–13.
- [44] ZHANG Jianhua, JIN Yuhong, LIU Jingbing, et al. Recent advances in understanding and relieving capacity decay of lithium ion batteries with layered ternary cathodes[J]. *Sustainable Energy & Fuels*, 2021, 5(20) : 5114–5138.