

# 基于 LCA 的废锂电池典型回收再生工艺碳足迹分析和环境影响评价

孙杰<sup>1,2</sup> 董强<sup>1</sup> 张笛<sup>2</sup> 郭少华<sup>2</sup> 熊梅<sup>2\*</sup> 赵赫<sup>2\*</sup>

(1. 合肥学院能源材料与化工学院, 合肥 230601; 2. 中国科学院绿色过程制造创新研究院, 中国科学院化学化工科学数据中心, 中国科学院绿色过程与工程重点实验室(中国科学院过程工程研究所), 北京 100190)

**摘要:**在“双碳”目标下,废锂电池回收可通过资源循环利用实现减污降碳并缓解金属资源供应紧张,是国家重要的战略研究方向。目前国内主要采用湿法回收工艺进行废锂电池正极材料回收,但工艺流程长导致不同工艺环节的物碳足迹和三废产生尚不清晰。针对废锂电池回收再生 NCM811 三元前驱体典型湿法冶金工艺,从减污降碳的视角,对全流程各环节进行了生命周期综合评价分析。通过建立回收再生工艺中不同单元节点的投入产出模型,采用 IPCC 2013 GWP 100a 方法计算回收再生 1000 kg 高镍三元前驱体产品的碳足迹为  $2.07 \times 10^4$  kg CO<sub>2</sub> eq,并使用 Eco-indicator 99 方法对各工艺单元进行环境影响评价,结果表明:预处理、前驱体合成、除杂节点碳足迹分别贡献 42.99%、23.46%、21.66%,环境生态指数依次为 582.88、380.94、394.06 Pt,明确了预处理、前驱体合成、除杂单元是应重点关注的减污降碳环节。

**关键词:**废锂电池回收;减污降碳;生命周期评价;碳足迹;环境影响

## CARBON FOOTPRINT ANALYSIS AND ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF TYPICAL RECYCLING PROCESSES OF SPENT LITHIUM BATTERIES BASED ON LCA

Sun Jie<sup>1,2</sup> Dong Qiang<sup>1</sup> Zhang Di<sup>2</sup> Guo Shaohua<sup>2</sup> Xiong Mei<sup>2\*</sup> Zhao He<sup>2\*</sup>

(1. Department of Energy Materials and Chemical Engineering, Hefei University, Hefei 230601, China; 2. Innovation Academy for Green Manufacture, Chemistry & Chemical Engineering Data Center, Key Laboratory of Green Process and Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Under the "carbon peaking and carbon neutrality" goal, the recycling of waste lithium batteries can achieve pollution reduction and carbon reduction through resource recycling, and alleviate the tight supply of metal resources. It is an important strategic research direction of the country. Currently, hydrometallurgical recovery processes are mainly used in China to recover waste lithium battery cathode materials, but the long process flow leads to unclear material and carbon footprints and three wastes generation in different processes. This study focuses on the typical hydrometallurgical process of recycling and regenerating NCM811 ternary precursor from waste lithium batteries, and conducts a comprehensive life cycle assessment and analysis of each link of the entire process from the perspective of pollution reduction and carbon reduction. By establishing input-output models for different unit nodes in the recovery and regeneration process, then use the IPCC 2013 GWP 100a method to calculate the carbon footprint of regenerate 1000kg of rich-nickel ternary precursor products as  $2.07 \times 10^4$  kg CO<sub>2</sub> eq and the Eco-indicator 99 method was used to conduct environmental impact assessment on each process unit. The results showed that the carbon footprint of pretreatment, precursor synthesis, and removing nodes respectively contributed 42.99%, 23.46%, and 21.66%, and the environmental ecological index was 582.88Pt, 380.94Pt, and 394.06Pt, respectively. It was clear that pretreatment, precursor synthesis, and removing units should be focused on pollution reduction and carbon reduction.

**Keywords:** recycling of waste lithium-ion battery; reduction of Pollution and carbon emissions; life cycle assessment; carbon footprint; environmental impact

收稿日期:2022-12-06

基金项目:中国科学院绿色过程制造创新研究院自主部署项目(IAGM2022D05),国家自然科学基金面上项目(51978643)

第一作者:孙杰(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向为电池及组件的生命周期评价分析。sjwhx2016@163.com

\*通信作者:熊梅(1987-),女,副研究员,主要研究方向为工业污染源解析。mxiong@ipe.ac.cn

赵赫(1981-),女,研究员,主要研究方向为工业减污降碳。hzhao@ipe.ac.cn

## 0 引言

电池的发展对于实现低碳化的能源转型,助力实现“双碳”目标尤为重要。近年来,随着电动交通工具和便携式电子产品市场的蓬勃发展,锂离子电池因其优异性能,产量飞速增长。国家统计局数据表明:中国锂离子电池产量从2011年的29.7亿只上升到2021年的232.6亿只,增长了7.8倍。然而,生产锂离子电池需要消耗大量锂、镍、钴等不可再生资源,传统供应链的供需平衡正在被打破,供应可能无法满足不断上升的需求<sup>[1]</sup>。相应地,锂电池在达到使用寿命周期后可进行梯次利用直至完全报废,完全报废后的锂电池组分复杂,如果不加以回收,其中的重金属和电解液等成分会对人体和环境造成很大的危害<sup>[2,3]</sup>。我国废旧锂电池退役量自2015年起连续保持增长,并在2020年开始迎来高峰期。预计2025年回收市场规模将达到370亿元<sup>[4]</sup>。废旧锂电池回收被誉为“车轮上的矿山”,其回收意义重大,一方面可以解决废锂电池导致的环境污染问题;另一方面可以将镍、钴、锂等有价值金属元素回收<sup>[5]</sup>,实现战略金属资源绿色循环利用,缓解供应链紧张局面。目前商业化的废锂电池回收技术以火法冶金和湿法冶金及为主,国外使用火法冶金技术居多。根据工信部公布的动力电池再生利用“白名单”企业显示,国内厂家多以湿法冶金作为废锂电池回收技术。因其具有能耗低,金属回收率高等优点<sup>[6]</sup>,已经成为废锂电池回收再生的主流工艺。然而,传统湿法冶金是将废锂电池经过预处理,分离所得正极材料中有价金属浸出后进而分级萃取、沉淀分离制备成原料,最后进行材料再生的工艺,在整个回收过程会消耗大量的化学药剂<sup>[7-10]</sup>,需要进一步讨论潜在的环境问题。

生命周期评价(life cycle assessment,以下简称“LCA”)方法被广泛用于量化工程技术和产品整个生命周期的环境足迹<sup>[11-14]</sup>,通过编制某一系统的投入与产出的清单,根据清单中的数据信息汇总来分析和评估所研究系统对环境的潜在影响程度,并根据LCA的目的解释清单记录和环境影响的分析结果<sup>[15]</sup>。ISO制订了ISO 14040标准,把LCA实施步骤分为目标和范围定义、清单分析、影响评价和结果解释4个部分<sup>[16]</sup>,为以后不同国家和不同机构开展LCA工作或研究提供了基础。常见的LCA方法有CML 2001、Eco-indicator 99、ReCiPe 2016和Impact 2002+等。目前,锂电池产品的环境和经济问题收到各国和地区的广泛关注,LCA研究被广泛应用于锂电池领域。Kelly等<sup>[17]</sup>基于生命周期的方法研究在不同地区生产NCM类型电池能耗、排放、水耗存在地域性差距,清洁的能源结构可以减少生产制造的环境影响;Rebecca等<sup>[18]</sup>选取LFP、NCM和NCA材料电池为研究对象,分别采用不同回收工艺比较环境影响,发现直接回收工艺具有最优的环境效益;Xiong等<sup>[19]</sup>基于EverBatt模型定量分析了电池回收的环境和经济可行性,发现电池回收再制造可以使能源消耗减少8.55%,温室气体排放量减少6.62%,成本节约1.87\$/kg;Kallitsis等<sup>[20]</sup>使用ReCiPe 2016方法评价了13种环境影响类别,发现电池回收优秀的环境效益主要来自电池组中铝和铜金属部分的回收。总体上看,研究者不仅关注了不同正极材料类型电池生产的环境影响,也考虑到了电池组不同组分回收的环境影响,但大多都是对于产品端或不

同工艺进行的生命周期评价。而对于国内普遍使用的湿法冶金回收工艺本身在其过程各个单元过程缺乏定量的影响评价。

因此,本研究重点聚焦废锂电池湿法冶金回收工艺各单元过程,对其开展生命周期评价。定量评价废锂电池回收再生三元前驱体的碳足迹和环境影响,厘清回收工艺中造成碳排放和环境影响较大的环节,识别具有减污降碳潜力的关键工艺节点和主要影响因素,从而对指导企业做出环境友好的工艺改进提供依据。

## 1 研究方法 with 工具

本研究采用LCA思想量化评估废锂电池再生利用制备镍钴锰氢氧化物 $[Ni_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}(OH)_2]$ 三元前驱体电池正极材料整体工艺过程的碳足迹和环境影响。选用SimaPro作为LCA分析软件,SimaPro作为一款商业LCA系统分析软件工具,涵盖了能源的投入与产出以及运输、包装、化石燃料等各种类型大宗商品库,广泛应用于计算碳足迹<sup>[21,22]</sup>、产品环境影响<sup>[23,24]</sup>、关键性能指标决策<sup>[25]</sup>等。碳足迹计算方法选择IPCC 2013 GWP 100a,环境影响评价方法选择Eco-Indicator 99(生态指数法),该方法涵盖了11种环境影响特征化指标和3种归一化指标,以生态指数数量化产品或工艺的环境影响。

### 1.1 目标范围与确定

本研究以废锂电池收集到再生利用制备三元前驱体正极材料的生产工艺为研究对象,因为考虑到企业回收的废锂电池类型不同,其中各组份金属含量也存在一定的差距,很难选择回收起始端的废锂电池材料作为评价的功能单元(Functional Unit),因此选择以回收再生利用工艺终端1000 kg高镍NCM811三元前驱体产品为评价对象,同时不予考虑副产品回收带来的环境影响负效应。图1为废锂电池回收再生三元前驱体材料工艺的系统边界。

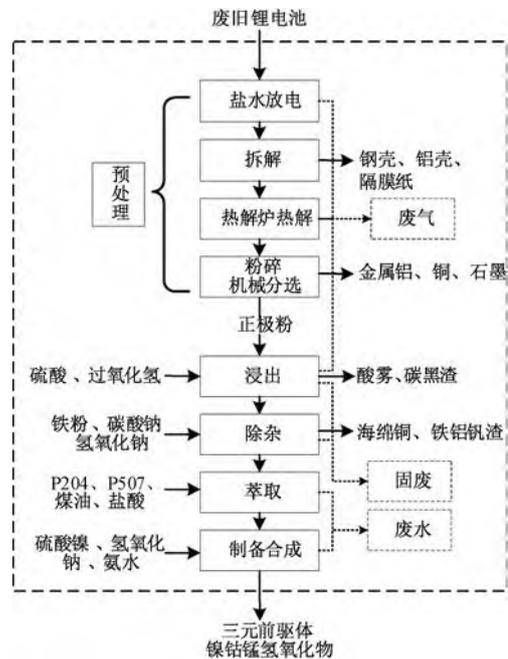


图1 废锂电池回收工艺系统边界

本研究以国内电池回收利用第三方企业的典型生产流程为研究对象,该企业具有良好的回收效率和规模效应,具有代

表未来电池回收行业平均水平的潜力。企业采用的典型湿法回收方式具体工艺流程为:

**预处理阶段:**完全放电的废锂电池进入设备进行拆解,拆解后得到钢壳或铝壳、隔膜纸、正极片和负极片。负极片和正极片则转入热解干燥工段和粉碎分选工段进行干燥热解和粉碎分选,该阶段涉及到物理回收工艺。

**酸浸阶段:**预处理后的粉状正极材料经过加水浆化后通过管道输送至酸浸反应釜进行浸出,采用硫酸和过氧化氢作为酸浸液,亚硫酸钠为还原剂,在蒸汽下加热 40 °C,酸浸后采用板框压滤机进行固液分离。

**除杂阶段:**包括除铜和除铁铝 2 个过程,压滤后的镍钴锰溶液进入除杂工序,在滤液中加入计量的铁粉反应置换出料液中铜,沉淀分离后得到副产品海绵铜;除铜后的料液中加入计量的氢氧化钠溶液、碳酸钠,蒸汽间接加热升温至 90 °C 左右,控制反应 pH 值 1.5~1.7 之间,使二价铁全部氧化成三价铁后,再加入氢氧化钠溶液调节 pH 值至 2.0~2.4,使之生成铁铝矾渣沉淀。

**萃取阶段:**杂后料液采用萃取剂 P204、P507 进行萃取,通过控制水相 pH 值,可以使水相中的锂、钙镁等物质萃取进入 P204 有机相。萃取完成后,物料分层分离水相进入下一步处理,萃取剂经过除杂再生后循环利用。水相溶液为硫酸镍钴的混合溶液,采用 P507 萃取剂进行提纯,得到含镍钴锰的金属料液。

**前驱体合成阶段:**照前驱体产品所需要的镍钴锰比例进行配料,投入一定量的镍豆/镍粉原料溶解生产的硫酸镍金属盐溶液,将配置好的金属盐溶液和碱液、氨水分别用泵抽至反应釜内,通过水蒸气碱液加热保持温度在 40~70 °C,反应釜内充分搅拌进行共沉淀生成镍钴锰氢氧化物,物料经过加热升温,碱水过滤洗涤后进入干燥系统烘干即得产品三元前驱体  $N_{10.8}C_{0.1}M_{n0.1}(OH)_2$ 。

## 1.2 清单分析与数据质量

表 1 列举了高镍三元前驱体产品具体工艺的物料和能耗清单,遵循 LCA 中“cradle-to-gate”原则将整体工艺流程分解为单元模型,通过收集每个单元的输入(物料、能源、资源的消耗量)及输出(产物和废弃物),采用静态方法评估生产工艺各阶段的物质流动。该数据清单是将原始数据统一换算成生产单位(1000 kg)三元前驱体产品的消耗及排放量,其中工艺单元数据来自企业实际生产过程调研和企业环评报告,具有较高的数据质量指标(data quality indicator, DQI),部分能源资源消耗数据来自相关文献综述收集<sup>[28]</sup>。其中运输单元数据是基于该企业官网公布的铺设在全国的一百多家废旧锂电池回收服务网点,以载重为 10 t 的柴油卡车为运输工具计算这些网点到企业的平均交通运输距离所需油耗。大宗商品材料、能源、运输和废物管理系统的数据库采用 Ecoinvent v3.6 数据库作为背景数据。

表 1 1000 kg 高镍 NCM<sub>811</sub> 前驱体生命周期清单

项目	名称	单位	收集运输	预处理	酸浸	除杂	萃取	合成制备	$\sigma_g^2$
物料	废锂离子电池	kg	—	2000	—	—	—	—	1.24
	废三元边角料	kg	—	1000	—	—	—	—	1.24
辅料	硫酸(98%)	kg	—	—	3545.36	—	—	—	1.12
	双氧水(27.5%)	kg	—	—	158.7	—	—	—	1.12
	亚硫酸钠(98%)	kg	—	—	177.6	—	—	—	1.12
	铁粉	kg	—	—	—	10.5	—	—	1.12
	碳酸钠(99%)	kg	—	—	—	240	—	—	1.12
	氢氧化钠(32%)	kg	—	—	—	1336	—	470	1.12
	氯酸钠	kg	—	—	—	3	—	—	1.12
	P204 萃取剂	kg	—	—	—	—	1.71	—	1.12
	P507 萃取剂	kg	—	—	—	—	3.25	—	1.12
	煤油	kg	—	—	—	—	24	—	1.12
	盐酸(32%)	kg	—	—	—	—	30	—	1.12
资源	镍豆/镍粉	kg	—	—	—	—	—	100	1.12
	氨水(20%)	kg	—	—	—	—	—	315	1.12
	柴油	kg	160.5	—	—	—	—	—	1.24
	天然气	Nm <sup>3</sup>	—	40.4	—	—	—	—	1.14
	水	kg	—	954.54	402.58	—	3448.3	27175	1.12
	电力	kW·h	—	8630	—	2244	—	2708	1.14
	蒸汽	0.6 Mpa/kg	—	—	400	—	—	2620	1.14
	产品	三元前驱体	kg	—	—	—	—	—	1000
副产品	钢壳	kg	—	111.6	—	—	—	—	1.12
	铝壳	kg	—	14.4	—	—	—	—	1.12
	隔膜纸	kg	—	46.8	—	—	—	—	1.12
	金属铝	kg	—	104.8	—	—	—	—	1.12
	金属铜	kg	—	29.8	—	—	—	—	1.12
	石墨	kg	—	160	—	—	—	—	1.12
	海绵铜	kg	—	—	—	22.82	—	—	1.12
三废	废气	kg	—	0.4	0.04	—	0.016	0.09	1.25
	废水	kg	—	148.8	—	—	3440	26750	1.25
	固废	kg	—	—	38.1	562.4	—	—	1.25

在 LCA 模型中建立 LCI 时,数据来源是多渠道的,结果会造成 LCA 结果缺乏可信的数据质量分析,损害了 LCA 工作的可信度和价值。因此在 LCI 工作时,为确保 LCA 研究结果的准确性与可靠性,需要对数据进行不确定性分

$$\sigma_g^2 = \exp(\sqrt{[\ln(U_1)]^2 + [\ln(U_2)]^2 + [\ln(U_3)]^2 + [\ln(U_4)]^2 + [\ln(U_5)]^2 + [\ln(U_b)]^2}) \quad (1)$$

式中: $U_1-U_5$  分别代表以数据源的 5 个特征,分别为可靠性、完整性、时间相关性、地理相关性和进一步的技术相关性, $U_b$  指代基本不确定性因子。

### 1.3 影响评价

在 LCA 中,LCIA(生命周期影响评价)被定义为评价一个产品系统潜在环境影响重要性和意义的阶段。碳足迹分析可以量化产品或工艺生命周期的温室气体排放强度;环境影响评价是从人体健康、生态系统、资源消耗等角度对清单阶段所识别的环境影响负荷进行定量或定性的表征评价<sup>[28-30]</sup>。利用物质清单数据,本研究使用 SimaPro9.0 软件建立回收工艺流程模型,使用联合国政府间气候变化专门委员会开发的 IPCC 2013 GWP 100a 方法计算碳足迹,分析各工艺节点的碳排强度。

在环境影响评价方面采用 Eco-Indicator 99,该方法是基于环境损害原理对产品生命周期进行环境影响评价的方法,考虑了 11 种不同的环境影响特征化指标:致癌物质(Carcinogens),呼吸道(有机)影响(Resp. organics),呼吸道(无机)影响(Resp. inorganics),电离辐射(Radiation),臭氧层消耗(Ozone layer),气候变化(Climate change),生态毒性(Ecotoxicity),酸化/富营养化(Acidification/ Eutrophication),土地使用(Land use),矿产资源耗竭(Minerals),化石燃料消耗(Fossil fuels)。再将 11 类环境影响做归一化处理,最终归结到对资源(Resources)、人类健康(Human Health)和生态系统质量(Ecosystem Quality)的损害,按一定的权重系数相加,得出产品的环境生态指数值(Pt),使用归一化结果展示各工艺单元的环境问题。

## 2 结果讨论

### 2.1 碳足迹分析

产品碳足迹(product carbon footprint, PCF)是指衡量某个产品在其生命周期各阶段的温室气体排放量总和。温室气体包括二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、甲烷(CH<sub>4</sub>)、氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)、氢氟碳化物(HFCs)和全氟碳化物(PFCs)等。碳足迹的计算结果为产品从原材料到工厂大门生命周期内各种温室气体排放量的加权之和,用二氧化碳当量(CO<sub>2</sub>eq)表示。计算公式为:

$$CF = \sum_{i=1, j=1}^n P_i * Q_{ij} * GWP_j \quad (1)$$

式中:CF 为碳足迹, P 为活动水平数据, Q 为排放因子, GWP 为全球变暖潜势值。采用软件内置的 IPCC 2013 GWP 100a 方法计算结果如图 2 显示,回收循环再生 1000 kg 高镍三元前驱体所产生的碳足迹为 2.07×10<sup>4</sup> kg CO<sub>2</sub> eq,其中占比最高的 3 个单元依次为预处理阶段,前驱体合成阶段和除杂阶段,碳足迹分别为 8.88×10<sup>3</sup> kg CO<sub>2</sub> eq, 4.85×10<sup>3</sup> kg CO<sub>2</sub> eq, 4.48×10<sup>3</sup> kg CO<sub>2</sub> eq。

析<sup>[26]</sup>。数据质量指标使用由 Weidema<sup>[27]</sup> 等开发的谱系矩阵来估计几何标准偏差平方  $\sigma_g^2$ ,该谱系矩阵包含五个标准不确定性因子和一个基本不确定性因子,可以用式(1)表示:

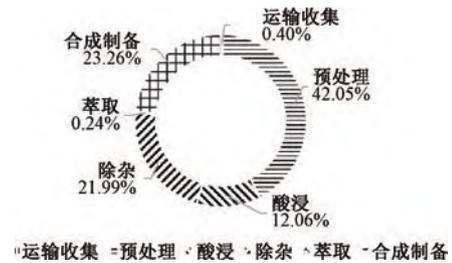


图 2 工艺碳足迹贡献占比

在预处理阶段,废锂电池经过机器拆解进入热解炉干燥热解,所得正极片经粉碎机多级破碎处理,然后通过多级旋分离器和振动筛分机进行振动筛分,最后得到粉状正极材料。通常,预处理过程不需要额外消耗化学品,因此该工序的碳足迹主要是来自热解炉天然气燃烧产生的直接排放和机械设备消耗电力产生的间接排放,碳足迹占总体工艺的 42.05%。在合成制备阶段,需要消耗大量电力和蒸汽对滤液加热升温 and 烘干,主要碳排因素以能源消耗为主,碳足迹占比 23.26%。而在酸浸除杂阶段较为复杂,该工艺阶段为大量酸碱和药剂参与的化学反应,既有来自这些化学品的固有碳足迹,也有能源消耗产生的碳足迹,碳足迹主要以物料生产上游间接排放为主,碳足迹分别贡献 12.06% 和 21.99%。从整体工艺生命周期阶段来看因直接消耗电力、蒸汽和天然气等能源产生的碳足迹为 17.76×10<sup>3</sup> kg CO<sub>2</sub>eq,贡献占比 85.80%。我国电网较高的排放因子是碳足迹贡献的主要因素。

### 2.2 环境影响分析

通过 Eco-Indicator 99 方法进行中点分析,以 11 种不同的环境影响特征化指标对再生高镍三元前驱体材料工艺进行生命周期评价,特征化结果如表 2 所示。并对 11 种环境影响类别进行过程贡献分析,由图 3 中数据可知:对环境影响贡献较大的为预处理、酸浸、除杂、合成制备工艺。预处理阶段在致癌物和气候变化这两种环境影响类别中起主要作用,分别贡献了 46.46% 和 41.73%。酸浸阶段在化石燃料消耗和矿产资源耗竭占比较高,分别为 41.19% 和 39.42%,除杂阶段由于液碱的使用对呼吸道(无机)环境影响贡献占比 24.94%,萃取阶段在臭氧层消耗影响尤为明显,贡献了 36.12%。三元前驱体的合成制备阶段对 11 类环境影响产出的贡献都较为平均。

环境生态指数单一计分值更加清晰反映各工艺阶段产生的环境影响类型,图 4 为各工艺阶段在 11 种环境影响特征化指标的单一计分值。可知:废锂电池回收再生三元前驱体工艺产生的较大环境影响指标为呼吸道(无机)影响(resp. inorganics)和化石燃料消耗(fossil fuels),分别为 1007.84Pt 和 390.67Pt。其中对呼吸道(无机)影响贡献最大的 3 个工艺阶段依次为预处理(381.65Pt)、合成制备(251.37Pt)、除杂

表 2 LCA 环境影响特征化分析结果

环境影响类别	单位	特征化标准值						
		收集运输	预处理	酸浸	除杂	萃取	合成制备	合计
致癌物	DALY <sup>[a]</sup>	4.01E-06	1.23E-03	2.15E-04	6.56E-04	1.94E-06	5.40E-04	2.65E-03
呼吸道(有机)影响	DALY	2.36E-07	1.37E-06	1.90E-06	1.18E-06	3.77E-08	1.40E-06	6.13E-06
呼吸道(无机)影响	DALY	9.07E-05	8.36E-03	3.85E-03	5.51E-03	1.62E-05	4.25E-03	2.21E-02
气候变化	DALY	1.75E-05	1.80E-03	5.27E-04	9.53E-04	9.56E-06	1.01E-03	4.32E-03
电离辐射	DALY	7.96E-07	1.11E-06	2.13E-06	2.45E-06	1.20E-07	1.81E-06	8.42E-06
臭氧层消耗	DALY	1.15E-07	6.51E-08	3.14E-07	1.81E-06	1.76E-06	8.10E-07	4.87E-06
生态毒性	PAF * m <sup>2</sup> yr <sup>[b]</sup>	1.66E+01	5.96E+02	1.08E+03	7.81E+02	3.50E+00	6.62E+02	3.14E+03
酸化/富营养化	PDF * m <sup>2</sup> yr <sup>[c]</sup>	2.31E+00	1.68E+02	8.13E+01	9.41E+01	3.75E-01	7.83E+01	4.24E+02
土地使用	PDF * m <sup>2</sup> yr	5.29E+00	8.75E+01	3.80E+01	5.79E+01	7.79E-01	4.66E+01	2.36E+02
矿产资源耗竭	MJ surplus <sup>[d]</sup>	5.29E-01	2.08E+01	8.73E+01	7.59E+01	2.18E-01	3.66E+01	2.21E+02
化石燃料消耗	MJ surplus	1.22E+03	1.51E+03	6.07E+03	1.92E+03	1.85E+02	3.83E+03	1.47E+04

注:a. DALY (Disability Adjusted Life Years): 伤残调整寿命年; b. PAF \* m<sup>2</sup>yr (Potentially Affected Fraction): 每年每平方米潜伏影响值; c. PDF \* m<sup>2</sup>yr (Potentially Decrease Fraction): 每年每平方米生物种群的潜伏减少值; d. MJ surplus: 能源开采额外需要消耗的能源。

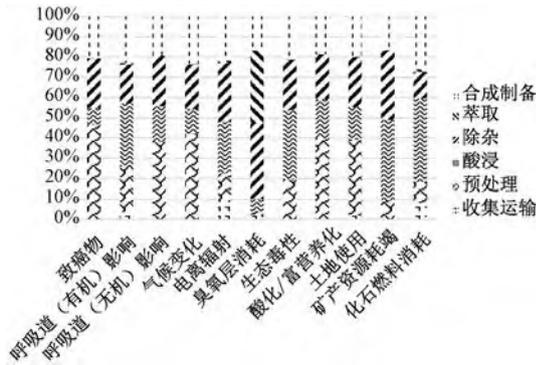


图 3 环境影响特征化结果贡献分析

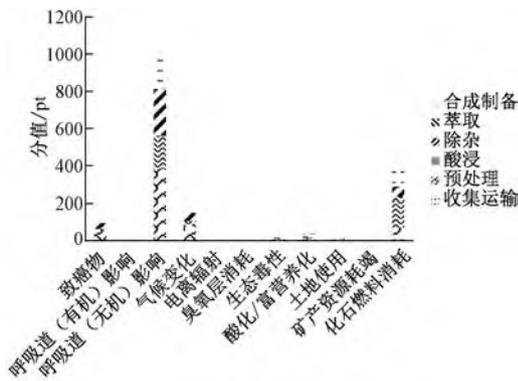


图 4 环境生态指数特征化结果计分值

(194.16Pt), 主要原因来自于电力生产过程和化学药剂使用, 我国电网以煤电机组为主, 煤炭燃烧散发烟气通过呼吸进入人体; 而湿法冶金所使用的大量的酸碱化学品使用也会造成呼吸道损害。对化石燃料消耗影响贡献最大的工艺分别为酸浸(160.91Pt)、合成制备(101.59Pt)、除杂(50.87Pt), 主要因为生产此类化学药剂生命周期上游石油、天然气和硬煤的消耗。而其它环境影响特征化指标的分数都没有超过200Pt, 表明湿法冶金回收其工艺过程对这些类别的影响总体较小。

Eco-Indicator 99 作为“终点法”表述的是产品“面向终点”产生的环境影响结果。由于不同环境影响类别特征化指标与当量因子的差异, 需进一步进行归一化处理。将各环境影响

类别的特征化指标值按一定的权重系数相加最终归结到对人类健康、生态系统质量和资源的损害。结果如图5所示, 可以看出废锂电池回收再生三元前驱体工艺在人体健康损害, 生态系统质量损害, 资源损害的环境生态指标分数为1326.68Pt, 68.14Pt, 396.53Pt。传统湿法冶金工艺回收再生正极材料的环境友好性主要表现在生态系统质量损害上, 其权重因子生态毒性(21.97Pt)、酸化/富营养化(29.67Pt)、土地使用(16.50Pt)环境影响特征化的单一积分值较低。而因其工艺流程长、试剂消耗量大且存在二次污染等问题在人类健康损害上影响较大, 主要权重因子来自于呼吸道(无机)影响(1007.84Pt)、气候变化(197.08Pt)、致癌物(120.88Pt)、其它(0.88Pt)。最后是物料使用而造成的资源损害, 主要权重因子来自于化石燃料消耗(390.67Pt)和矿产资源耗竭(5.86Pt)。

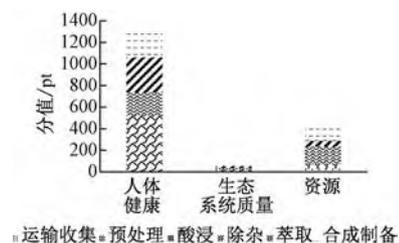


图 5 环境生态指数归一化结果计分值

废锂电池回收再生三元前驱体材料的传统湿法冶金工艺核心是对破碎电极粉加入化学试剂浸出和提取金属, 用以减少原生材料生产过程中金属盐溶液的消耗。而矿石生产原生材料通常工艺流程较长、资源能源消耗较大, 会造成大量的碳排放和环境破坏, 例如镍产品复杂的生产加工过程<sup>[31]</sup>, 从地下和露天开采、选矿到精炼会消耗大量能源, 并产生严重的环境污染。因此废锂电池回收作为生产电池正极材料的路径之一, 可以减少镍、钴、锰、锂等矿产资源的开发, 实现资源的循环利用。

### 3 结论

本研究基于生命周期评价的方法针对废锂电池循环再生高镍三元前驱体电池正极材料的工艺构建了单元流程模型,

并编制物料清单。考虑从废弃资源到产品的系统边界内收集运输、预处理、浸出、除杂、萃取,前驱体合成各单元过程,分析了该典型工艺的碳足迹和环境影响,明确了重点关注的减污降碳环节。主要结论如下:

1) 废旧锂电池回收工艺再生三元前驱体吨产品碳足迹为  $2.07 \times 10^4$  kg CO<sub>2</sub> eq, 根据生命周期碳足迹贡献比例的情况可知,该资源回收工艺温室气体排放主要来自于所消耗能源(电力,蒸汽)和物料生产上游所产生的间接排放,能源消耗碳足迹占比 85.80%。工艺过程直接产生的温室气体排放相较于间接排放较少。能源和物料辅料的使用量与碳足迹密切相关。

2) 回收工艺整体环境生态指标分数为 1791.35Pt, 影响贡献较大的 3 个工艺阶段依次为预处理 (582.88 Pt)、除杂 (394.06Pt)、浸出 (388.99Pt), 而废旧锂电池作为二次资源进行回收和循环再生可以显著减少三元前驱体材料生产中硫酸镍等金属盐的消耗, 从而降低环境影响负荷。

#### 参考文献

- [1] GREIM P, SOLOMON A A, BREYER C. Assessment of lithium criticality in the global energy transition and addressing policy gaps in transportation[J]. *Nature communications*, 2020, 11(1): 1-11.
- [2] 王艺博, 郭玉文, 孙峙, 等. 我国废动力电池回收处理过程环境风险及其管理对策探讨[J]. *环境工程技术学报*, 2019, 9(2): 207-212.
- [3] MROZIK W, RAJAEIFAR M A, HEIDRICH O, et al. Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries[J]. *Energy & Environmental Science*, 2021, 14(12): 6099-6121.
- [4] 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(增刊2): 179-183.
- [5] LV W, WANG Z, ZHENG X, et al. Selective recovery of lithium from spent lithium-ion batteries by coupling advanced oxidation processes and chemical leaching processes [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(13): 5165-5174.
- [6] ZHENG X, ZHU Z, LIN X, et al. A mini-review on metal recycling from spent lithium ion batteries[J]. *Engineering*, 2018, 4(3): 361-370.
- [7] HENDRICKSON T P, KAVVADA O, SHAH N, et al. Life-cycle implications and supply chain logistics of electric vehicle battery recycling in California[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(1): 014011.
- [8] QIAO Q, ZHAO F, LIU Z, et al. Electric vehicle recycling in China: Economic and environmental benefits [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 140: 45-53.
- [9] 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.
- [10] KALLITSIS E, KORRE A, KELSALL G. Life cycle assessment of recycling options for automotive Li-ion battery packs[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022: 133636.
- [11] PORZIO J, SCOWN C D. Life - Cycle Assessment Considerations for Batteries and Battery Materials [J]. *Advanced Energy Materials*, 2021, 11(33): 2100771.
- [12] RAJABI HAMEDANI S, KUPPENS T, MALINA R, et al. Life cycle assessment and environmental valuation of biochar production: Two case studies in Belgium[J]. *Energies*, 2019, 12(11): 2166.
- [13] HUANG C, MOHAMED B A, LI L Y. Comparative life-cycle assessment of pyrolysis processes for producing bio-oil, biochar, and activated carbon from sewage sludge [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 181: 106273.
- [14] COSSUTTA M, MCKECHNIE J, PICKERING S J. A comparative LCA of different graphene production routes[J]. *Green Chemistry*, 2017, 19(24): 5874-5884.
- [15] 马丹. 基于 SimaPro 的燃料乙醇生命周期分析[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2020.
- [16] ISO 14040 Environmental management-life cycle assessment-Principles and framework[S]. Switzerland, 2006.
- [17] KELLY J C, DAI Q, WANG M. Globally regional life cycle analysis of automotive lithium-ion nickel manganese cobalt batteries [J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2020, 25(3): 371-396.
- [18] CIEZ R E, WHITACRE J F. Examining different recycling processes for lithium-ion batteries [J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 148-156.
- [19] XIONG S, JI J, MA X. Environmental and economic evaluation of remanufacturing lithium-ion batteries from electric vehicles [J]. *Waste Management*, 2020, 102(2): 579-586.
- [20] KALLITSIS E, KORRE A, KELSALL G. Life cycle assessment of recycling options for automotive Li-ion battery packs[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022: 133636.
- [21] 胡建星, 郁亚娟, 黄凯, 等. 3 种先进新能源电池的足迹家族分析[J]. *工业安全与环保*, 2018, 44(7): 83-87.
- [22] 李慧, 邓权学, 张静晓. 面向建筑类型的钢筋混凝土构造环境排放及其材料碳足迹研究[J]. *生态经济*, 2019, 35(3): 194-200.
- [23] SANJUAN-DELMÁS D, ALVARENGA R A F, LINDBLOM M, et al. Environmental assessment of copper production in Europe: an LCA case study from Sweden conducted using two conventional software-database setups [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2022, 27(2): 255-266.
- [24] 陶明, 聂克蜜, 成诗冰, 等. 基于 LCA 方法的生态胶凝材料生产环境影响分析[J]. *安全与环境学报*, 2022, 22(4): 2176-2183.
- [25] 刘航驿, 颜蓓蓓, 林法伟, 等. 生命周期视角下 2 种餐厨垃圾资源化处理方案的对比分析[J]. *环境工程*, 2021, 39(9): 169-175.
- [26] 任丽娟, 陈莎, 张菁菁, 等. 生命周期评价中清单的不确定性分析[J]. *安全与环境学报*, 2010, 10(1): 118-121.
- [27] WEIDEMA B P, BAUER C, HISCHIER R, et al. Overview and methodology: Data quality guideline for the ecoinvent database version 3[J]. 2013.

(下转第 1263 页)

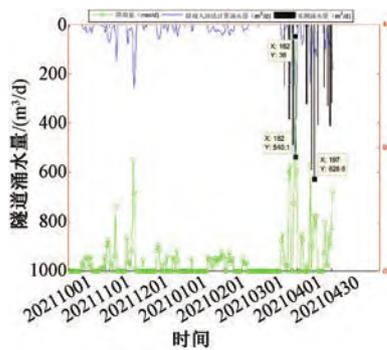


图4 降雨入渗量、涌水量对大气降雨的响应图

由下图可知,日降雨量和入渗补给量在2022年3月31日出现一个峰值,分别为38 mm/d和540.08 m<sup>3</sup>/d。监测到的隧道涌水量的峰值出现在2022年4月15日,涌水量为618.6 m<sup>3</sup>/d。因此,该隧道地下水系统水量滞后地表水系统约16 d。

#### 4 结论

本文以大气降雨入渗法、大井法、径流模数法研究中梁山大学城复线隧道涌水量,得到的结论如下:

1) 研究区地下水涌水总量为16344.40~19386.84 m<sup>3</sup>/d。隧道各岩段涌水量与地层岩性分布密切相关,以K2+518至K3+348所在飞仙关组二段为中心,东西两侧研究区呈对称分布;研究区隧道涌水量在岩层中有3个明显的波峰,最大波峰为隧道穿越地层最长的飞仙关组二段,总涌水量达到3000 m<sup>3</sup>/d。隧道穿越嘉陵江组一段、二段区域时,隧道标高处岩溶发育,渗透系数较大,在K3+583~K3+831、K1+868~K2+027形成两个波峰。

2) 研究区岩层单位延米涌水量受岩溶发育控制,总体来看是雷口坡组最大,嘉陵江组次之,飞仙关组第三,须家河组最小。雷口坡组地层因岩体破损、岩溶发育,其单位延米涌水量最大,达到11.40 m<sup>3</sup>/(m·d)。嘉陵江组岩性以灰岩为主,其单位延米涌水量主要受到岩溶发育、露头风化程度影响,嘉陵江组单位延米涌水量为5.48~9.71 m<sup>3</sup>/(m·d);飞仙关组岩性由灰岩、页岩、泥岩夹杂而成,单位延米涌水量均受岩溶程度、断裂、地表露头风化程度决定,其值为3.78~6.71 m<sup>3</sup>/(m·d)。须家河组岩性由泥岩、砂岩、花岗岩、石英岩等构成,岩性渗透性、储水性均较差,其单位延米涌水量在1.13~2.17 m<sup>3</sup>/(m·d)。

3) 通过对比分析实测日降雨量、实测隧道涌水量及通过降雨入渗补给法获得的涌水量,发现研究区地表水系统与地下水系统的滞后时间为16 d。

使用经验公式计算隧道修建过程中的涌水量,相关参数

是相对稳定的,计算结果是假设状态下多年平均涌水量。然而,隧道掘进通常是边掘进边衬砌,衬砌采取防渗或堵水措施后,隧道撑子面的渗透系数通常较勘察阶段岩层的渗透系数小,使得理论计算涌水量较实际涌水量大;同时,隧道建设前研究区的地下水位是动态变化的,且建设过程中随着地下水疏排,水位也将下降,使用大井法计算获得的涌水量也将超过实际涌水量。未来研究隧道施工期涌水过程中,应将撑子面的渗透系数及地下水位作为动态变量。

#### 参考文献

- [1] 张俊锋,李强,史永跃,等.西南某隧道岩溶水发育规律及涌水量预测[J].现代隧道技术,2021,58(2):14-21.
- [2] 黄解放,张志恩,黄明利,等.山岭隧道穿越断层破碎带突发涌水机理分析[J].市政技术,2021,39(8):55-59.
- [3] 张金林,骆茂林,张强,等.基于AHP-云模型的隧道地下水疏排对植被生态影响评价研究[J].环境科学与管理,2020,45(10):163-167.
- [4] 李志源,王维富,徐学存.岩溶隧道涌水来源及对地下水环境的影响[J].铁道建筑,2020,60(9):78-82.
- [5] 程梅,张静,向阳,等.矿山涌水预测探讨-以某铁矿为例[J].四川有色金属,2019,6(2):55-59.
- [6] 罗鉴银,傅瓦利.岩溶地区开凿隧道对地下水循环系统的破坏-以重庆市中梁山为例[J].西南农业大学学报(自然科学版),2005,27(4):422-435.
- [7] 程小勇,黄勤健.深埋隧道断裂带涌水量预测分析[J].人民长江,2021,52(8):133-136.
- [8] 陈中学,陈扬勇,李强.既有岩溶富水隧址区新建隧道涌水量预测探讨[J].公路交通技术,2019,35(5):112-118.
- [9] 曹鹏,兰吉川,麻勇,等.岩溶发育地区煤矿矿山开采对水资源的影响研究[J].四川有色金属,2022,2:58-61.
- [10] 冯升,王勇,朱兴礼,等.岩溶区反坡施工隧道涌水量计算方法[J].交通科技,2020,30(3):95-98.
- [11] ZHANG J, ZHANG J M, BING X, et al. Study on the effect of municipal solid landfills on groundwater by combining the models of variable leakage rate, leachate concentration, and contaminant solute transport[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 292:112815.
- [12] 许增荣.用地下水径流模数法预测山岭隧道涌水量的局限性分析与改进[J].地下水,2010,32(1):49-51.
- [13] 万豪杰,赵骏,张松松,等.永顺隧道岩溶涌水风险性评价及地下水流量衰减过程分析[J].安全与环境工程,2019,26(5):1-7.
- [14] ZHANG J, ZHANG L Y, XIE Q, et al. An empirical method to investigate the spatial and temporal distribution of annual average groundwater recharge intensity-a case study in Grand River, Michigan, USA [J]. Water Resources Management, 2016, 30(1):195-206.

#### (上接第1259页)

- [28] ARSHAD F, LIN J, MANURKAR N, et al. Life Cycle Assessment of Lithium-ion Batteries: A Critical Review [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 180: 106164.
- [29] DREYER L C, NIEMANN A L, HAUSCHILD M Z. Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99[J]. The international journal of life cycle assessment, 2003, 8(4): 191-200.
- [30] NOTTER D A, GAUCH M, WIDMER R, et al. Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles[J]. American Chemical Society, 2010(17).
- [31] MISTRY M, GEDIGA J, BOONZAIA S. Life cycle assessment of nickel products [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2016, 21: 1559-1572.