

## 新能源汽车动力电池回收利用过程减碳成效测算

刘永涛, 刘永杰, 袁诗泉, 李育隆, 陈轶嵩

(长安大学汽车学院, 西安 710064)

**摘要:** 为量化评价新能源汽车动力电池回收利用过程的环境效益, 为报废动力电池管理体系和回收再利用相关标准的完善提供支撑, 助力国家“双碳”目标的实现, 以三元锂电池为研究对象, 选取典型的动力电池回收利用场景, 将三元锂电池的生命周期划分为4个阶段: 原材料获取、制造装配、使用和报废回收, 并建立相应的GaBi模型, 基于湿法回收A、湿法回收B、火法-湿法联合回收3种不同回收利用方式进行三元锂电池生命周期评价模型搭建与回收再利用过程减碳成效测算。研究表明, 三元锂电池回收再利用过程有较好的减碳成效, 基于3种不同回收工艺的三元锂电池回收再利用可以减少CO<sub>2</sub>排放量分别为: 湿法回收A为60.71 kg CO<sub>2</sub>/kWh; 湿法回收B为150.00 kg CO<sub>2</sub>/kWh; 火法-湿法联合回收为153.57 kg CO<sub>2</sub>/kWh。基于这3种不同回收工艺的CO<sub>2</sub>减排效果从优至劣依次为: 湿法-火法联合回收、湿法回收B和湿法回收A。合理的动力电池回收利用方式可以显著减少其回收利用过程中的碳排放量, 从而产生更好的环境效益。

**关键词:** 动力电池; 生命周期评价; GaBi模型; 减碳成效测算

中图分类号: U469 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2024.01.03

## Assessing Carbon Reduction Effect of New Energy Vehicles During the Power Battery Recycling Process

LIU Yongtao, LIU Yongjie, YUAN Shiquan, LI Yulong, CHEN Yisong

(School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** To quantitatively evaluate the environmental benefits of the recycling process for new energy vehicle power batteries, and to provide support for the improvement of the management system and relevant standards for end-of-life power batteries, thereby assisting in the implementation of the national “two-carbon” goal, the paper selects ternary lithium batteries as the research subject. The paper identifies typical scenarios for power battery recycling and utilization, divides the lifecycle of ternary lithium batteries into four stages: raw materials acquisition, manufacturing and assembly, usage, and scrap recovery and establishes the corresponding GaBi model. Based on different recycling methods, such as wet recycling A, wet recycling B, and fire-wet combined recovery, a life cycle evaluation model for ternary lithium batteries was built and the carbon reduction efficiency of the recycling and reuse process was calculated. The research results show that

收稿日期: 2023-08-02 改稿日期: 2023-09-24

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JC-QN-0664); 教育部人文社会科学研究青年基金项目(18YJCZH110); 陕西省重点研发计划项目(2023JBGS-13); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助(300102222113; 300102223204)

参考文献引用格式:

刘永涛, 刘永杰, 袁诗泉, 等. 新能源汽车动力电池回收利用过程减碳成效测算[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(1): 24-32.

LIU Yongtao, LIU Yongjie, YUAN Shiquan, et al. Assessing Carbon Reduction Effect of New Energy Vehicles During the Power Battery Recycling Process[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(1): 24-32. (in Chinese)



the recycling of ternary lithium batteries significantly reduces carbon reductions. Specifically, the carbon dioxide emission reductions for each recycling method are as follows: 60.71 kg CO<sub>2</sub>/kWh for wet recycling A, 150.00 kg CO<sub>2</sub>/kWh for wet recycling B, and 153.57 kg CO<sub>2</sub>/kWh for fire-wet combined recycling. The carbon dioxide emission reduction efficiency of the three different recovery processes is ranked from best to worst as follows: fire-wet combined recovery, wet recovery B and wet recovery A. Proper recycling of power batteries can significantly reduce carbon emissions during the recycling process, thus producing greater environmental benefits.

**Keywords:** power battery; life cycle assessment; GaBi model; calculation of carbon reduction effect

动力电池是电动车辆的重要组成部分，能否科学有效地回收、合理地利用，不仅直接影响我国新能源汽车产业的可持续发展，也会影响到国家“双碳”目标的实现<sup>[1]</sup>。倪飞等<sup>[2]</sup>分析了我国现阶段汽车产业和新能源汽车废旧动力电池的回收利用情况，并研究了在生产者责任延伸制度（EPR）下我国的新能源汽车动力电池报废回收途径，旨在为我国的新能源汽车产业退役动力电池回收再利用提供科学参考。苗雪丰<sup>[3]</sup>通过建立电池循环利用模型，并利用博弈论法分析各模型中某一成员对其他成员的影响机理。OLOFSSON等<sup>[4]</sup>对混合动力公交车的磷酸铁锂电池以及镍钴锰三元锂电池进行了生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA），研究表明磷酸铁锂电池会产生比三元锂电池更大的环境影响，且这种影响主要是在正极材料的生产中造成的，要减少相应的影响，可以通过火法回收技术或湿法回收技术进行回收利用。生产车用锂离子电池需消耗多种矿产资源与一次能源，并且还有大量温室气体和其他污染物生成，FARIA等<sup>[5]</sup>预计伴随而来的总体排放和能源消耗也将大量参与车辆的生产 and 处置。PETER S<sup>[6-7]</sup>根据动力电池的LCA工具，对纯电动车辆及燃油汽车的CO<sub>2</sub>及其他排放气体进行对比，发现两种汽车在生命周期内的CO<sub>2</sub>排放量受车辆运行阶段的排放影响最大。王琢璞<sup>[8]</sup>针对三元电池、磷酸铁锂电池等典型动力电池，利用全生命周期分析模型量化评估并对比分析了不同回收利用技术的综合环境影响，识别环境污染的关键环节和主要因子，评估废旧动力电池回收利用的不

同技术及其组合情景下的整体环境效益，为动力电池回收利用技术政策的制定提供一定参考。

综上所述，国内外对动力电池回收过程和生命周期的研究较多，成果丰富，但缺乏不同动力电池回收利用方法减碳效果的测算研究，其减排绩效和经济优化潜力较大。因此，在国家“双碳”目标背景下，为了量化评价新能源汽车动力电池回收利用过程的环境效益，为报废动力电池管理体系和回收利用相关标准的完善提供科学支撑，本研究以LCA为工具进行新能源汽车动力电池回收利用过程的减碳成效测算研究。

## 1 研究对象和系统边界

### 1.1 研究对象

由于三元锂电池能量密度高、低温性能好等优点，近年来在新能源乘用车上的应用十分广泛，如特斯拉、奇瑞汽车、北汽新能源、江淮汽车等国内外主流车企均选择三元锂电池作为其新能源车型的动力电池。本研究分析三元锂电池的生命周期情况，从而计算其回收利用过程中的减碳成效。

### 1.2 系统边界

以三元锂电池为研究对象，将生命周期划分为4个过程：原料投入过程、制造过程、使用过程和废弃回收过程。对以上过程分别建立特征模型，建模过程中忽略三元锂电池中质量较小的部件，优化或忽略对碳排放没有影响的废气、废固、废水排放，以保证建模过程的可操作性。参考长安大学刘

书如<sup>[9]</sup>的建模功能单位, 本研究所选三元锂电池为同类电池。系统边界如图 1 所示。

## 2 清单分析与模型建立

### 2.1 清单分析

将三元锂电池分成 8 个部分建立模型, 主要包括电池正负极、电池管理系统 (BMS) 等。该步骤存在两种生命周期, 分别是不考虑回收再利用和考虑回收再利用的三元锂电池生命周期, 二者都具有一致的原料输入渠道、生产、运行、再利用这 4 部分。其中, 原材料获取阶段将分为回收再利用原材料获取和正常生产原材料获取, 以体现报废回收过程对三元锂电池生命周期的影响, 便于计算回收再利用过程的减碳成效, 其他阶段在建模上不区分。在回收利用阶段, 将选用 3 种市场上主流的回收方法对三元锂电池的回收利用过程分别进行建模。这 3 种回收方法为湿法回收 A (赣锋锂业三元锂电池综合回收)、湿法回收 B (格林美新材料公司三元锂电池湿法回收)、火法-湿法联合回收 (Umicore 公司 VAL' EAS 废旧锂离子电池回收处理流程)。湿法回收 A 和湿法回收 B 两种工艺的最大区别是回收再生的产品不同, 前者只对废旧三元锂电池中的镍、钴、锰元素进行了回收, 而后者还对锂元素进行了回收并重新用于正极材料生产。火法-湿法联合回收则是废旧锂电池系统经过简单的预处理拆解和放电后进行高温熔炼、浸出及氧化、高温烧结等过程重新制得电池正极材料。

建模过程中所涉及的数据资料等来源于文献搜集和数据库调用, 三元锂电池的基本数据提取自湖南大学汽车生命评价机构的“常用锂电池材料基础数据库”<sup>[10]</sup>; 此外, 关于能耗等数据来自四川大学和亿科环境合作开发的“中国生命周期引用数据集成库 (Chinese Reference Life Cycle Database, CLCD)”<sup>[11]</sup>; 动力电池回收的相关清单数据来源于企业项目环境报告书<sup>[12]</sup>以及部分硕士学位论文文献<sup>[13-16]</sup>、企业专利<sup>[17-18]</sup>、期刊论文<sup>[19-20]</sup>。

通过文献搜集和数据库调用, 整理出三元锂电池各个部件所占比例及材料质量, 见表 1。

三元锂电池正极材料为镍钴锰酸锂, 通过文献搜集得到生产 1 kWh 三元锂电池正极材料所需要的原材料清单, 见表 2。其中, 质量代表生产 1 kWh 三元锂电池正极材料需要的原材料的质量, 建模质量是指模型中使用的材料的实际质量, 用于模型的输入和计算。

研究对象选取某畅销纯电动微型汽车 E100, 其电池容量为 28 kWh, NEDC 纯电续航里程为 305 km, 本文选取的装配三元锂电池整车使用阶段的相关参数见表 3。

### 2.2 数学评价模型构建

#### 2.2.1 原材料获取阶段

$$E_x = \sum p_j \cdot e_i \cdot G_j \quad (1)$$

$$P_{xk} = (\sum p_j \cdot e_i \cdot P_{jk}) + GP_{xk} \quad (2)$$

式中:  $E_x$  为原料  $x$  在制造过程中的总能耗;  $p_j$  为原料在各制造过程中需要的第  $j$  种能源的能耗在总能

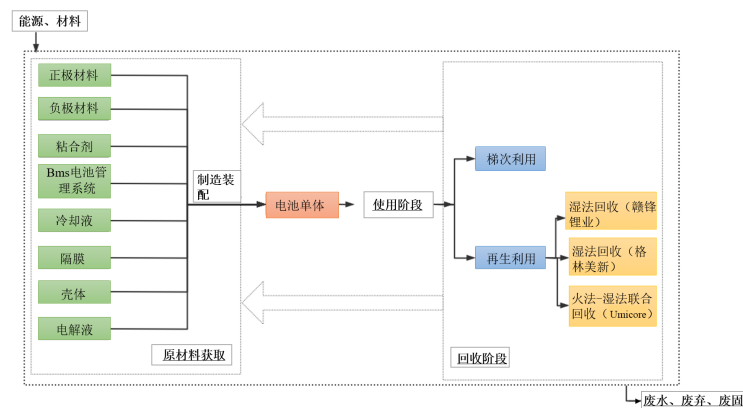


图 1 三元锂电池全生命周期评价系统边界

表 1 三元锂电池所需原料和模型质量情况

电池零件	原料	比例/%	模型质量/kg
正极	三元锂	28.200	47.940
	铝箔	19.700	33.490
负极	石墨	18.300	31.110
	铜箔	11.400	19.380
粘合剂	六氟磷酸锂	1.900	3.230
	PVDF	2.400	4.082
电解液	碳酸乙烯酯	5.400	9.180
	二甲基碳酸酯	5.400	9.180
隔膜	聚乙烯 (PP)	0.300	0.510
	聚丙烯 (PE)	1.700	2.890
	钢	1.400	2.380
壳体	玻璃纤维	0.400	0.680
	聚丙烯 (PE)	1.200	2.040
冷却液	乙二醇	1.000	1.700
BMS	晶体管	0.650	1.105
	电阻器	0.650	1.105

表 2 生产 1 kWh 三元正极材料物质清单及建模质量

物质名称	质量/kg	建模质量/kg
硫酸镍	7.580	212.240
硫酸钴	2.710	75.880
硫酸锰	1.620	45.360
碳酸锂	1.770	49.560
纳米氧化铝	0.015	0.431
氨水	2.870	80.360
液碱	14.100	394.800
天然气	1.950	54.600
氧气	0.275	7.700
氮气	0.104	2.912
水	22.410	627.480
电	7.090	198.520
二氧化碳	1.050	18.580

耗中的占比； $e_i$ 为原料在第*i*个制造过程中的直接能耗； $G_j$ 为第*j*种能源在制造环节中的总能耗； $P_{xk}$ 为原料*x*在制造过程中出现的第*k*种有害物的总质量； $P_{jk}$ 为第*j*种能源在制造环节中出现的第*k*种污染物的总质量； $GP_{xk}$ 为原料*x*在制造阶段直接生成的第*k*种有害物的总质量。

表 3 装配三元锂电池整车相关参数

参数	值
汽车总质量/kg	849
电池系统质量/kg	170
百公里电耗/(kWh/100 km)	9.18
续航里程/km	305
电池容量/kWh	28
总行驶里程/km	200 000
电池充放电效率/%	95

### 2.2.2 制造装配阶段

$$E_y = (\sum m_x \cdot E_x) + G_y \quad (3)$$

$$E_a = \sum (E_{ij} + G_j) \quad (4)$$

$$P_{yk} = (\sum m_x \cdot P_{xk}) + GM_{yk} \quad (5)$$

$$P_{ak} = \sum P_{jk} + GP_{ak} \quad (6)$$

式中： $E_y$ 为零件*y*在制造装配环节中的总能耗； $m_x$ 为零件*y*制造所需的材料*x*的总质量； $E_x$ 为材料*x*在制造环节中的能耗； $G_y$ 为零件*y*装配过程中的生产能耗； $E_a$ 为电池在制造装配环节的总能耗； $E_{ij}$ 为电池制造环节中第*i*阶段直接消耗的第*j*种能量； $G_j$ 为电池装配环节中消耗的第*j*种能量； $P_{yk}$ 为零件*y*在制造装配环节中生成的第*k*种有害物的总质量； $P_{xk}$ 为材料*x*在制造环节中生成的第*k*种有害物的质量； $GM_{yk}$ 为零件*y*在装配环节中直接生成的第*k*种有害物的总质量； $P_{ak}$ 为电池制造装配环节中生成的第*k*种有害物的总量； $P_{jk}$ 为电池制造环节中生成的第*k*种有害物的质量； $GP_{ak}$ 为电池装配环节中直接生成的第*k*种污染物的总质量。

### 2.2.3 使用阶段

$$EC_b = \frac{M_b}{M_a} \cdot 30\% \times \frac{EC_a}{E_b} + EC_a(1 - E_b) \quad (7)$$

式中： $EC_b$ 为电池使用阶段电能损耗； $M_b$ 、 $M_a$ 为电池质量、整车质量； $EC_a$ 为车辆使用阶段总耗电量； $E_b$ 为电池充放电的效率。

### 2.2.4 报废回收阶段

$$R_E = E_O - E_R \quad (8)$$

$$R_M = M_O - M_R \quad (9)$$

式中： $R_E$ 为单位重量电池节省的能量； $E_O$ 为单位重量电池的原料制造能耗； $E_R$ 为单位重量电池的再

生材料制造能耗； $R_M$ 为单位重量电池回收有害物质质量； $M_O$ 为单位重量电池的原料制造生成有害物质质量； $M_R$ 为单位重量电池的再生材料制造生成有害物质质量。

### 2.3 三元锂电池 GaBi 评价模型构建

依据 2.1 节中的三元锂电池材料及车辆数据清单，搭建三元锂电池原材料获取阶段 GaBi 模型，如图 2 所示。



图 2 三元锂电池原材料获取阶段 GaBi 模型

赣锋锂业三元锂电池湿法回收工艺（湿法回收 A）将在报废回收阶段回收获得的硫酸镍、硫酸钴、硫酸锰以及铜、铝等材料作为三元锂电池生产过程中的一部分原材料的替代品，以此为思路进行基于赣锋锂业湿法回收 A 且考虑回收再制造的三元锂电池原材料获取阶段的 GaBi 模型构建。

格林美新材料公司的三元锂电池湿法回收工艺（湿法回收 B）经过预处理、酸溶浸出、萃取提纯、三元前驱体合成、三元电池材料合成等过程回收得到三元正极材料。将回收所获得的三元正极材料作为一部分新三元锂电池生产的原料，进行基于湿法回收 B 对三元锂电池进行回收再利用的原材料获取阶段的 GaBi 模型构建。

Umicore 公司研发的 VAL’ EAS 流程处理废旧锂离子电池是废旧锂电池火法-湿法联合回收工艺的典型之一，废旧锂离子电池没有像通常流程一样经过预处理，而是直接进入冶炼炉内熔炼成合金，紧接着溶解合金，分离、净化后可获得较高纯度的以镍（Ni）和钴（Co）元素为主的化合物，熔炼过程中所产生的有害气体会经过特殊净化处理后排放。基于火法-湿法联合回收的回收工艺进行回收再利用的三元锂电池原材料获取阶段的 GaBi 模型构建。

图 3 为搭建的基于湿法回收 A 且考虑回收再利用的三元锂电池生命周期评价 GaBi 模型。

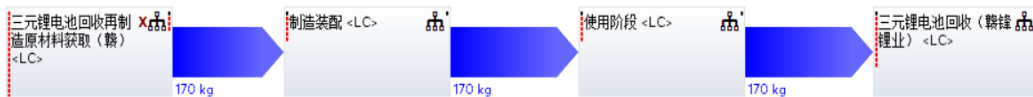


图 3 基于湿法回收 A 且考虑回收再利用的三元锂电池生命周期 GaBi 模型

同理，将三元锂电池各阶段的 GaBi 模型串联起来，可以得到不考虑回收再利用的三元锂电池生命周期评价模型和基于 3 种不同回收方法的三元锂电池回收再利用生命周期评价模型。

## 3 回收利用过程减碳成效测算

### 3.1 GWP (Global Warming Potential) 评价模型

材料周期和燃料周期是生命周期全球变暖评价模型的两个组分。

### 3.1.1 原料制造周期

原料制造过程的温室气体排放计算式为：

$$P_{mat} = \sum_i [ (m_{ij})_{l \times s} \cdot (p_{1ij})_{s \times t} ] \quad (10)$$

式中： $m_{ij}$ 为第*i*个部件所包含的第*j*种材料； $p_{1ij}$ 为制造第*i*种车用材料生成的第*j*种温室气体排量； $l$ 为动力系统零部件数量； $s$ 为材料种类数； $t$ 为温室气体排放当量类型。

装配环节中的温室气体排放计算式为：

$$P_{man} = \sum_i [ (e_{2ij})_{l \times r} \cdot (p_{2ij})_{r \times t} ] \quad (11)$$

式中： $e_{2ij}$ 为第*i*个组成部分制造装配过程所需的第*j*种能量量； $p_{2ij}$ 为制造第*i*种能源生成的第*j*种有害物质排量； $r$ 为能源种类数； $t$ 为污染物排放当量类型。

### 3.1.2 燃料周期

能源生产过程中的温室气体排放计算式为：

$$P_{fuel} = (3.5 \times K \times C / 100e) \cdot (p_{3ij})_{r \times t} \quad (12)$$

式中： $K$ 为电动汽车行驶总里程数，单位km； $C$ 为汽车百公里公称电耗，单位kWh/100 km； $e$ 为电能传输效率； $p_{3ij}$ 为制造第*i*种能源生成的第*j*种有害物质质量。

生命周期中排放废气总质量的计算式为：

$$P_{LCA} = P_{mat} + P_{man} + P_{fuel} \quad (13)$$

## 3.2 GWP对比分析

计算上述GaBi模型的平衡度，输出其生命周期中各环节能耗及废气排放值，基于GaBi软件系统生成不同回收模式的三元锂电池的GWP，GWP为全球变暖值，以CO<sub>2</sub>值作为基准当量。三元锂电池不同回收利用方式和生命周期各环节中的GWP值如图4~9所示。

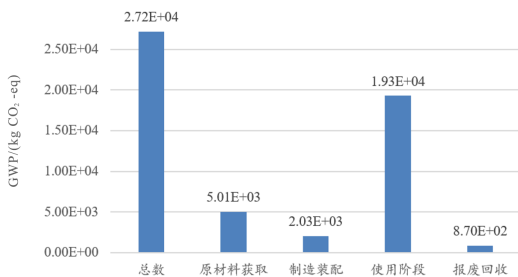


图4 基于湿法回收A且不考虑回收再利用的三元锂电池生命周期GWP值

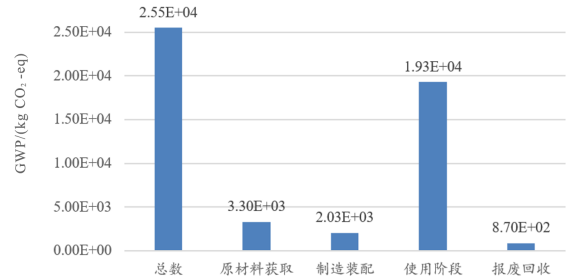


图5 基于湿法回收A且考虑回收再利用的三元锂电池生命周期GWP值

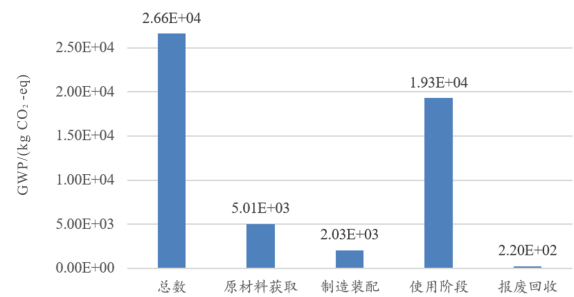


图6 基于湿法回收B且不考虑回收再利用的三元锂电池生命周期GWP值

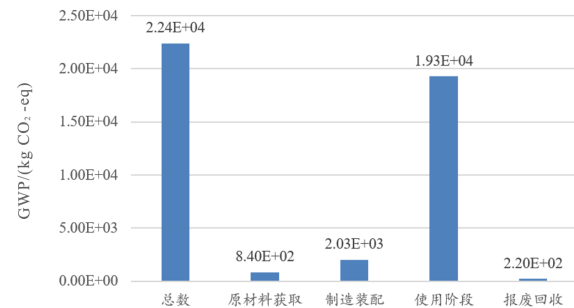


图7 基于湿法回收B且考虑回收再利用的三元锂电池生命周期GWP值

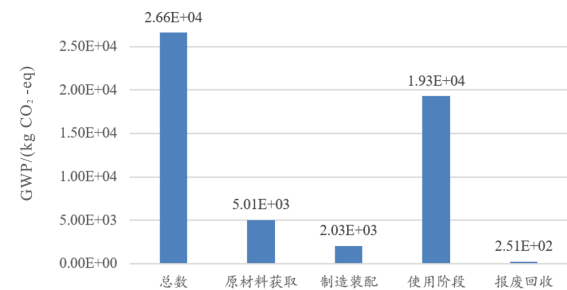


图8 基于湿法-火法联合回收且不考虑回收再利用的三元锂电池生命周期GWP值

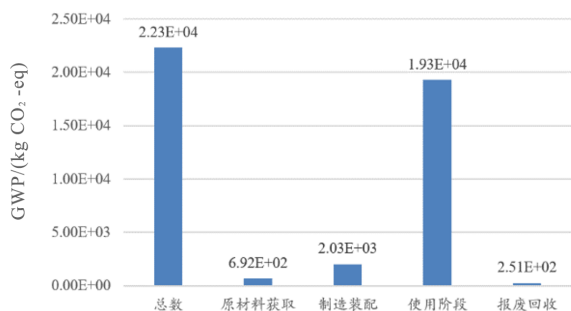


图9 基于湿法-火法联合回收且考虑回收再利用的三元锂电池生命周期 GWP 值

基于同一种回收方式的三元锂电池生命周期, 考虑回收再利用的生命周期产生的 GWP 值更小, 3 组对比对象 (湿法回收 A、湿法回收 B、湿法-火法联合回收) 的 GWP 总数差值分别为 1 700 kg CO<sub>2</sub>-eq、4 200 kg CO<sub>2</sub>-eq、4 300 kg CO<sub>2</sub>-eq, CO<sub>2</sub>-eq 为二氧化碳当量。

通过以上对比分析可知, 废旧三元锂电池的回收再利用可以有效减小三元锂电池生命周期所产生的温室效应, 且在 3 种回收再利用的方式中, 以 Umicore 公司研发的 VAL' EAS (火法-湿法联合回收) 流程为最优。

### 3.3 二氧化碳排放量对比分析

结合 GaBi 平衡表对三元锂电池各生命周期 CO<sub>2</sub> 的排放数据进行分析对比, 测算三元锂电池回收利用过程的 CO<sub>2</sub> 减排成效。各回收利用技术路线及生命周期不同阶段 CO<sub>2</sub> 排放量见表 4。表中 A-1、A-2、B-1、B-2、C-1、C-2 分别代表基于湿法回收 A 的不考虑回收再利用的三元锂电池生命周期、基于湿法回收 A 且考虑回收再利用的三元锂电池生命周期、基于湿法回收 B 且不考虑回收再利用的三元锂电池生命周期、基于湿法回收 B 且考虑回收再利用的三元锂电池生命周期、基于湿法-火法联合回收且不考虑回收再利用的三元锂电池生命周期、基于湿法-火法联合回收且考虑回收再利用的三元锂电池生命周期。

通过数据对比分析可知, 基于 3 种不同报废回收工艺的 6 类三元锂电池生命周期中, 考虑了回收再利用的三元锂电池生命周期 CO<sub>2</sub> 排放量远远小于

表 4 三元锂电池不同回收利用方法生命周期不同阶段

阶段 周期	二氧化碳排放量					单位: kg
	总量	原材料 获取	制造 装配	使用 阶段	报废 回收	
A-1	2.72E+04	5.01E+03	2.03E+03	1.93E+04	8.70E+02	
A-2	2.55E+04	3.30E+03	2.03E+03	1.93E+04	8.70E+02	
B-1	2.66E+04	5.01E+03	2.03E+03	1.93E+04	2.20E+02	
B-2	2.24E+04	8.40E+02	2.03E+03	1.93E+04	2.20E+02	
C-1	2.66E+04	5.01E+03	2.03E+03	1.93E+04	2.51E+02	
C-2	2.23E+04	6.92E+02	2.03E+03	1.93E+04	2.51E+02	

相对应的没有考虑回收再利用的三元锂电池生命周期, 其中 3 组对比对象 (A、B、C) CO<sub>2</sub> 排放总量的减少量分别为 1 700 kg、4 200 kg 和 4 300 kg。而由于 3 组对比对象在制造装配阶段、使用阶段和报废回收阶段的 CO<sub>2</sub> 排放量没有差异, 所以在原材料获取阶段产生的 CO<sub>2</sub> 排放减少量即为生命周期 CO<sub>2</sub> 排放减少总量。同时, 基于湿法-火法联合回收且考虑回收再利用的三元锂电池生命周期不仅产生的 CO<sub>2</sub> 排放量最少, 仅有 22 300 kg, 进行回收再利用可以产生最大的 CO<sub>2</sub> 减排量, 达到 4 300 kg。这表明, 报废三元锂电池的回收再利用可以显著减少三元锂电池生命周期的 CO<sub>2</sub> 排放。由于本文研究对象的电池容量为 28 kWh, 基于 3 种不同回收工艺的 CO<sub>2</sub> 减排成效依次为: 湿法回收 A (赣锋锂业锂电池综合回收技术) 减碳量为 60.71 kg CO<sub>2</sub>/kWh、湿法回收 B (格林美新材料公司废旧锂电池湿法回收技术) 减碳量为 150.00 kg CO<sub>2</sub>/kWh, 湿法-火法联合回收 (Umicore 公司研发的 VAL' EAS 工艺) 减碳量为 153.57 kg CO<sub>2</sub>/kWh。

## 4 结论

1) 退役动力电池的回收利用具有巨大的经济效益和环境效益。随着动力电池报废量逐年增加, 合理的回收利用模式变得更重要。考虑动力电池的回收再利用方式可以显著减少其生命周期碳排放量, 从而产生巨大的环境效益。

2) 本研究所选择的 3 种典型动力电池回收工

艺的CO<sub>2</sub>减排效果从优至劣依次为:湿法-火法联合回收>湿法回收B>湿法回收A。根据研究结果,湿法-火法联合回收的CO<sub>2</sub>减排效果最佳,表明该回收工艺在动力电池的生命周期评价中具有更好的环境表现。

## 参考文献 (References)

- [1] 姚海琳,王昶,黄健柏.EPR下我国新能源汽车动力电池回收利用模式研究[J].科技管理研究,2015,35(18):84-89.  
YAO Hailin, WANG Chang, HUANG Jianbo. Mode of New Energy Automotive Battery Reclamation with Restriction of Extended Producer Responsibility[J]. Science and Technology Management Research, 2015, 35(18): 84-89. (in Chinese)
- [2] 倪飞.EPR下我国新能源汽车动力电池回收利用模式研究[J].南方农机,2020,51(22):142-143.  
NI Fei. Mode of New Energy Automotive Battery Reclamation with Restriction of Extended Producer Responsibility[J]. South Agricultural Machinery, 2020, 51(22): 142-143. (in Chinese)
- [3] 苗雪丰.我国车用动力电池循环利用模式研究[D].北京:华北电力大学,2019.  
MIAO Xuefeng. Research on Recycling Mode of Vehicle Power Battery in China[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019. (in Chinese)
- [4] YLVA O M R. Life Cycle Assessment of Lithium-Ion Batteries for Plug-in Hybrid Buses [D]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2013.
- [5] FARIA R, MARQUES P, GARCIA R, et al. Primary and Secondary Use of Electric Mobility Batteries from a Life Cycle Perspective [J]. Journal of Power Sources, 2014, 262: 169-177.
- [6] STASINOPOULOS P, SHIWAKOTI N, MCDONALD S. Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of Electric and Conventional Vehicles in Australia [C]//Proceedings of the 23rd World Congress on Intelligent Transport Systems, Melbourne, Australia. 2016: 1-10
- [7] STASINOPOULOS P. Future Scenarios of Greenhouse Gas Emissions from Electric and Conventional Vehicles in Australia [C]//38th Australasian Transport Research Forum, Melbourne, Victoria, Australia, 2016.
- [8] 王琢璞.新能源汽车动力电池回收利用潜力及生命周期评价[D].北京:清华大学,2018.  
WANG Zhuopu. Potential and Life Cycle Assessment of Recycling of Power Batteries for New Energy Vehicles [D]. Beijing: Tsinghua University, 2018. (in Chinese)
- [9] 刘书如.锂离子动力电池及纯电动汽车生命周期评价对比研究[D].西安:长安大学,2021.  
LIU Shuru. Comparative Study on Life Cycle Assessment of Li-Ion Power Battery and Pure Electric Vehicle [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. (in Chinese)
- [10] 殷仁述.中国车用锂离子动力电池生命周期评价研究[D].长沙:湖南大学,2018.  
YIN Renshu. Research on the Life Cycle Assessment of Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles in China [D]. Changsha: Hunan University, 2018. (in Chinese)
- [11] 刘夏璐,王洪涛,侯萍,等.中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J].环境科学学报,2010,30(10):2136-2144.  
LIU Xiaolu, WANG Hongtao, HOU Ping, et al. Method and Basic Model for Development of Chinese Reference Life Cycle Database [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(10): 2136-2144. (in Chinese)
- [12] 江西赣锋锂业股份有限公司.废旧锂电池综合回收项目环境影响报告书[Z].20170527115740270.  
Jiangxi Ganfeng Lithium Co., Ltd. Environmental Impact Report of Comprehensive Recycling Project for Used Lithium Batteries [Z]. 20170527115740270. (in Chinese)
- [13] 李新月.废旧三元电池正极材料中镍钴锰的回收工艺研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.  
LI Xinyue. Research on Key Technologies of Partial Porous Externally Pressurized Gas Bearing [D]. Harbin:

- Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [14] 茅珈恺. 三元电池中价值金属锰、钴、镍的多元化回收体系研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- MAO Jiakai. The Study on Diversified Recovery of Valuable Metals Mn, Co, Ni from Ternary Batteries [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [15] 胡亚飞. 废旧三元锂离子电池(18650型)中有价金属湿法回收的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2020.
- HU Yafei. Study on Hydrometallurgical Recovery of Valuable Metal from Spent Ternary Lithium Ion Batteries (Type 18650) [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020. (in Chinese)
- [16] 欧阳志昭. 废旧动力电池正极材料的回收再利用技术研究[D]. 南昌: 南昌工程学院, 2020.
- OUYANG Zhizhao. Research on Recovery and Reuse Technology of Cathode Material of Waste Power Battery [D]. Nanchang: Nanchang Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [17] 齐彬伟, 王楠, 李肖肖. 一种锂离子电池正极材料的回收方法: CN106920999A [P]. 2017-07-04.
- QI Binwei, WANG Nan, LI Xiaoxiao. The Invention Relates to a Recycling Method for Positive Electrode Material of Lithium-Ion Battery: CN106920999A [P]. 2017-07-04. (in Chinese)
- [18] 荆门市格林美新材料有限公司. 从废旧锂离子电池正极片中回收钴和锂的方法: ZL201610856995.0 [P]. 2017-03-15.
- Jingmen Green Beauty New Material Co., Ltd. Method for Recovering Cobalt and Lithium from Used Lithium-Ion Batteries: ZL201610856995.0 [P]. 2017-03-15. (in Chinese)
- [19] 陈轶嵩, 郝卓, 兰利波, 等. 匹配不同动力电池的纯电动汽车全生命周期节能减碳评价研究[J]. 汽车工程学报, 2022, 12(4): 517-527.
- CHEN Yisong, HAO Zhuo, LAN Libo, et al. Research on Energy Saving and Carbon Reduction over the Life Cycle of Battery Electric Vehicles with Different Power Batteries [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2022, 12(4): 517-527. (in Chinese)
- [20] TAO Yuan, WANG Zhuopu, WU Bangle, et al. Environmental Life Cycle Assessment of Recycling Technologies for Ternary Lithium-Ion Batteries [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 389: 136008.

#### 作者简介



刘永涛 (1989-), 男, 安徽砀山人, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源汽车测试评价和智能车辆控制技术。

Tel: 029-82334478

E-mail: liuyongtao86@163.com

#### 通信作者



陈轶嵩 (1988-), 男, 陕西周至人, 博士, 教授, 主要研究方向为新能源汽车生命周期评价、汽车产业规划与政策分析。

Tel: 029-82334478

E-mail: chenysisong\_1988@163.com