

中国电动汽车动力电池生命周期温室气体排放与零碳路径研究

高敬莞¹ 王雪² 胡凌月¹ 王君君¹ 田旻昊² 荣常如^{1*}

1. 中国第一汽车股份有限公司研发总院, 中国·吉林 长春 130013

2. 中汽信息科技(天津)有限公司, 中国·天津 300300

摘要: 作为动力电池大国, 中国迫切需要探索动力电池的零碳路径。本研究主要关注 LFP 和 NCM 电池的生命周期温室气体排放, 并计算分析不同碳减排途径的减排潜力。结果表明, 原材料的生产阶段是电池温室气体减排的关键。梯次利用比回收利用更能减少温室气体排放。不同低碳技术创新及优化组合是回收技术的主要发展方向。从全生命周期来看, 零碳仅在电池生产过程中实现, 温室气体减排应与上下游协同。本研究可以为动力电池的生命周期管理和零碳技术路线的选择提供支持。

关键词: 动力电池; 生命周期评估; GHG 排放; 电动汽车; 零碳

Research on Greenhouse Gas Emissions and Zero Carbon Pathways in the Life Cycle of Power Batteries for Chinese Electric Vehicles

Jingwan Gao¹ Xue Wang² Lingyue Hu¹ Junjun Wang¹ Minhao Tian² Changru Rong^{1*}

1. Global R & D Center, China FAW Corporation Limited, Changchun, Jilin, 130013, China

2. China Automotive Information Technology (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin, 300300, China

Abstract: As a major country of power batteries, the zero-carbon pathway of the whole power battery is urgently needed to be explored in China. This study mainly focuses on the life cycle GHG emissions of LFP and NCM batteries and calculates the emission reduction potential of different carbon reduction pathways. The results showed that the production stage of raw materials is the key to battery GHG emissions reduction. Cascade utilization reduces GHG emissions more than recycling. The optimal combination of different technologies and low-carbon technology innovation is the main development direction among recycling technologies. From the whole life cycle perspective, zero carbon is only achieved in the battery production process, and GHG emissions should be collaborative reduction with upstream and downstream. This study can provide support for life cycle management and the selection of zero-carbon technology routes for power batteries.

Keywords: power battery; life cycle assessment; GHG emissions; electric vehicles; zero-carbon

0 前言

开发新能源汽车是减少交通行业温室气体排放的重要途径之一^[1]。不同类型汽车温室气体减排的关键点不同, 而电动汽车温室气体减排需重点关注动力电池^[2,3]。目前, 不同场景中动力电池的技术路线主要集中于磷酸铁锂(LFP)和三元(NCM)电池^[4]。其中, LFP 具有高安全性能、优异的循环性能和低成本, 早期主要应用于新能源商用车, 最近用于乘用车的 LFP 出货量也快速增长。NCM 具有高能量密度、耐低温和高速率性能等优点, 主要用于新能源乘用车^[5,6]。

中国是动力电池生产大国^[7]。2022 年, 中国动力电池装机量为 294.6GWh, 约占全球装机容量的 56.9%。LFP 装机量为 183.8GWh, 占总装机容量的 62.4%; NCM 装机量为 110.4GWh, 占装机容量的 37.5%。这两条主流路线占比 99.9%。

自 2014 年以来, 中国新能源汽车市场进入快速增长阶段,

从企业质量保修期、动力电池寿命、车辆使用条件等方面综合计算, 动力电池自 2019 年起进入大规模退役期^[8]。随着新能源汽车的快速增长, 退役电池的数量也将逐年增加。截至 2022 年 6 月底, 共有 43.9 万辆新能源汽车停产或报废, 预计将产生 17.8GWh (12.3 万 t) 的退役电池, 其中 NCM、LFP 和其他类型的电池分别占 51%、47% 和 2%, 见图 1。

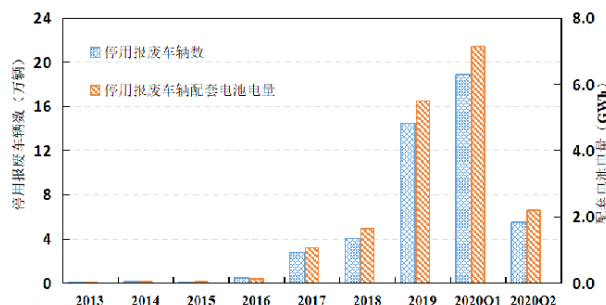


图 1 中国新能源汽车及配套动力电池报废情况

根据提取过程的分类, 电池回收方法可分为干式回收、湿式回收、生物回收和综合回收^[9]。整个回收过程由预处理、分离、回收、杂质去除和再利用组成。退役的 LFP 主要进行梯次利用。在 2019 年生产的梯级利用产品中, LFP 占 79%, NCM 占 18%。梯级利用的主要方式有: ①整包级梯级利用, 主要用于储能和工业备用电源; ②模组梯次利用, 主要用于基站备用电源、家用储能、电动三轮车或摩托车等。此外, 少数公司将拆卸的电池单体用于消费电子产品, 如便携式电源、玩具^[10-12]。从应用领域来看, 基站备份电源和储能仍是主要领域^[13]。2019 年生产的梯次利用产品中, 约 50% 用于基站备份, 30% 用于储能, 16% 用于低速电力, 4% 用于消费电子产品。

2023 年 7 月 10 日, 欧盟理事会通过了一项旨在加强电池和废旧电池管理的新法规。该法规将规范电池从生产到回收和再利用的整个生命周期, 并确保其安全、可持续和具有竞争力。法规要求电动汽车电池与可充电工业电池计算产品生产周期的碳足迹, 未满足相关碳足迹要求的, 将被禁止进入欧盟市场。这对动力电池的生命周期温室气体减排提出了挑战。作为一个动力电池生产大国, 中国的动力电池需要探

索一条零碳之路, 包括绿色电力、梯级利用、循环利用、零碳工厂/园区建设等方式^[14,15]。

使用生命周期评估 (LCA) 方法识别和评估动力电池的 GHG 排放正成为研究热点^[16]。相关学者使用生命周期评价方法来评估动力电池不同生命周期对环境的影响。现有的研究大多集中在动力电池的生产和使用上^[17-20], 一些研究集中在寿命终止阶段^[13,21,22]。大多数研究没有涵盖原材料生产、电池制造、梯次利用和回收的整个生命周期^[23]。此外, 在欧盟的背景下, 还需要进一步研究中国动力电池全生命周期零碳路径。本研究可为动力电池行业的生命周期管理和零碳技术路线选择提供支持。

1 研究方法

1.1 方法框架

在本研究中, 构建了 LFP 和 NCM 的生命周期评价模型, 以计算两种电池的原材料生产、电池生产、梯次利用和回收利用的生命周期 GHG 排放量。通过模拟梯次利用、循环利用、可再生能源发电、零碳工厂/园区等减碳路径, 分析电池的 GHG 排放源, 探索零碳路径, 如图 2 所示。

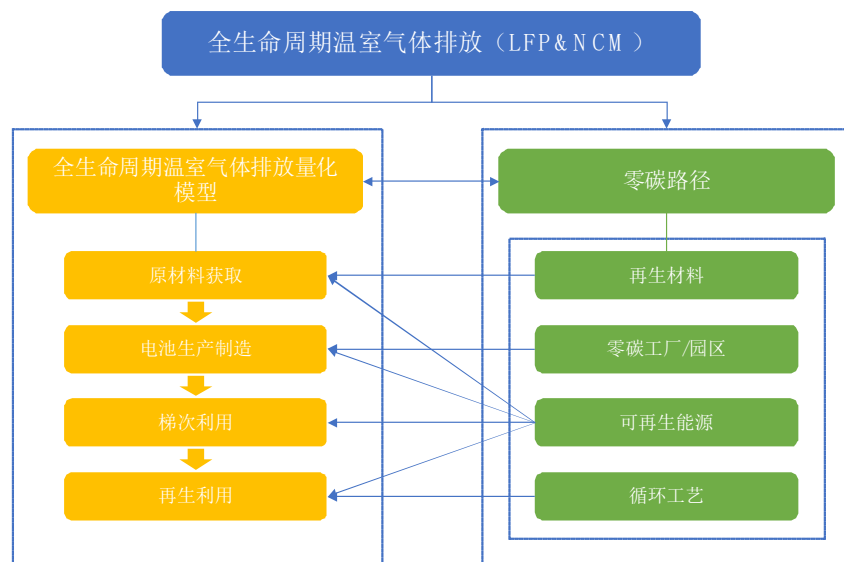


图 2 研究框架

1.2 温室气体排放评估方法

本研究的研究对象是 LFP 和 NCM 电池。本研究中电池的系统边界包括原材料获取、电池生产、梯次利用和回收的整个生命周期阶段。功能单位是一个动力电池。本研究基于 IPCC 2013 年全球升温潜能值 100a 方法, 对动力电池的生命周期进行了 GHG 排放核算。

1.2.1 原材料获取阶段

原材料获取的系统边界包括资源提取、加工、提纯、生产和制造。本研究对动力电池的主要成分进行了计算, 包括 NCM、LFP、石墨、LiPF₆、钢、铝合金、铜及铜合金、塑料、粘合剂等。原材料获取阶段的数据主要包括成分材料

的比例数据。

1.2.2 电池生产阶段

NCM 生产包括混合、涂覆、缠绕、焊接、注液、测试、模块制造、电池组组装等制造过程。LFP 生产包括混合、涂覆、轧制、电池组装、测试、电池组组装等制造过程。数据主要包括电池生产的能耗。LFP 和 NCM 在生产过程中存在差异, 但总体能耗没有太大差异。LFP 消耗较少的水, 主要是由于生产过程中的水循环利用。

1.2.3 梯次利用阶段

梯次利用阶段包括梯级产品制造和能源回收的 GHG 排放。梯级利用阶段的数据主要包括梯级产品制造过程中的能

源消耗和能源回收。

①磷酸铁锂刀片电池的梯次利用。

第一, 如果从车上退役的 LFP 能够作为一个整体进行梯次利用, 储能梯级电池产品的经济性可以显著提高。由于 LFP 仍有很长的稳定和安全使用寿命, 在容量衰减到 80% 后, 拆卸和重组的操作成本将降低。因此, 整个 LFP 的梯级利用适用于储能领域。第二, 不能作为一个整体使用的 LFP 电池包被拆解、筛选并重组为模组产品。考虑到现有行业的梯级利用产品与工艺的兼容性、废料回收的便利性和市场需求, LFP 模组产品适合在低速电力领域进行梯级利用。

在整包梯次电池的生产中, 根据不同的设计要求, 从云电池分类数据库中选择符合要求的电池。基于云数据分析结果和储能梯次产品设计指标, 制定电池配置方案。电池的重新组装和加工应按照梯次产品设计方案和工艺操作指导要求进行, 并根据产品设计指标的要求制定性能测试、出厂测试标准和方法, 以便梯次使用, 测试合格后对产品进行编码和上传。

非整包梯次 LFP 经过扫码存储、电池组剩余能量检测、电池组拆卸、单体检测与分拣、重组、产品检测、追溯与上传、包装等工艺流程后进行梯次利用。

以现有成熟的储能梯级电池产品为例, 设计了 300kWh LFP 储能包的梯级利用产品。

基于车电一体化梯次产品在低速电力领域的成熟性能, LFP 作为一个整体包, 可以在拆卸、筛选和重组后制备模块化级联利用产品, 设计了 19KWh LFP 梯级产品(假设过滤后的单体电池的整个 LFP 包拆卸可以重组为模块化产品)。

基于 300kWh LFP 梯级储能利用产品的设计, 对生产过程中各环节的能耗数据进行了实际调查。

②三元大模组电池的梯次利用。

考虑到现有梯次产品工艺线的兼容性、废料回收的便利性、市场需求、一致性、要求和市场需求, 结合低速动力领域“以租换售”梯次利用的成熟商业模式, NCM 包装拆解到单体, 筛分后, 单体电池可以重组为梯级电池模组产品, 应用于低速电力领域。

NCM 经过扫码存储、电池组剩余能量检测、电池组拆卸、单体检测和分拣、重组、产品检测、追溯和上传、包装等工艺流程后, 可作为刀片单元的梯次。基于车电一体化梯次产品在低速电力领域的成熟性能, 设计了 14kWh 的 NCM 级联产品(假设整个 NCM 包直接拆解成单体, 所有单体经过筛选后可以重新组装成模块产品)。基于低速功率场中 NCM 模块级联利用产品的设计, 研究了级联产品生产各个各个环节的能耗数据。

1.2.4 回收利用阶段

回收阶段包括回收材料的制造和回收产生的温室气体排放。回收阶段的数据主要包括回收材料生产过程中的能源消耗和材料回收。

①磷酸铁锂刀片电池的回收利用。

目前, 经济效益良好的 LFP 回收主要采用材料修复技术, 因此 LFP 再生采用相对成熟的材料修复技术。具体的技术过程主要包括电池放电、电池组拆解成单体、单体拆解、电池壳清洗和干燥、电池单体的循环清洗和干燥、正负极片的分选、极片的粉碎和筛分、LFP 材料修复、负极材料修复、“三废”处理等。

LFP 的再生利用, 是一个物理拆卸的过程, 将所有电池材料进行拆卸, 而不提取元素, 并回收 100% 的正负极材料和相关有价值的组件; 第二种 LFP 回收技术是全组分的“物理”回收技术。废旧 LFP 经放电后经过精炼并自动拆卸, 分别回收金属部件和塑料部件。通过分离、粉碎和分选电池的正负极, 获得 Cu 粉末、Al 粉末和阳极材料粉末。然后通过材料修复调整正极粉末的组成, 并在高温下合成新的正极材料。负极粉末也被修复为新的负极材料, 隔膜和电解液被回收再利用, 实现了废旧 LFP 全组分的回收。这项技术可以有效解决废旧 LFP 不适合湿法回收的问题。

LFP 材料修复再生后的产品包括: 再生 LFP 材料、再生石墨材料、Cu、Al 等贵重成分。

②三元大模组电池的回收利用。

本研究侧重于分析 A 公司最具代表性的电池材料回收工艺(湿法回收 A)和 B 公司的定向回收工艺(湿法回收 B)。在湿法回收 A 的过程中, 通过预处理、酸浸提取、萃取纯化、NCM 前体合成、NCM 电池材料合成等工艺, 可以回收电池正极材料。在湿法回收 B 的过程中, 通过拆解、干热裂解、粉碎、机械分离、酸浸提取、去除铜、铁和铝、粗提取、精细提取和碱老化等工艺, 可以获得 NCM 前体。可以看出, 两种工艺之间最大的区别在于回收产品。后者仅回收废旧 NCM 中的 Ni、Co 和 Mn, 而前者还回收 Li 并将其用于正极材料的生产。

回收技术 C 是火法回收。火法回收只需对废旧动力电池系统进行简单的拆解和放电, 直接进行高温熔炼, 无需对电池单体进行进一步拆解。同时, 将成渣剂和还原剂放入炉中, 通过控制反应条件来还原熔炼物, 得到 Co、Ni、Cu 等金属合金, 而 Al、Li 等金属元素进入炉渣中。该技术对电池类型要求低, 步骤比湿法回收简单, 但对反应条件要求高, 因进入炉渣而浪费了更多的金属元素。此外, 高温反应消耗更多的能量, 容易产生有毒气体。

回收技术 D 为火湿联合回收技术。围绕这一工艺, 电池正极材料是由废弃的 NCM 经过简单的预处理、拆卸和放电, 经过高温熔融、浸出、氧化、高温烧结等工艺制备而成。在这个过程中, 火回收技术的产品通过湿法工艺进行进一步纯化, 不仅对反应对象要求低, 而且可以减少金属元素的浪费。

回收技术 E 是 E 公司使用的一种湿法回收技术。具体工艺流程主要包括电池物流仓储环节、电池组的预处理、电

池的拆解、裂解精制（隔膜、电路板、阴极片）、正极片高温煅烧、超声波加热搅拌、筛铝、固液分离，碱性洗铝，离心洗涤，高温除碳，分散式过滤器再生和修复，碎片化分离，硫酸盐还原浸出，化学除杂，Ni、Co 和 Mn 萃取分离，从萃取废料中沉淀 Al，合成 CoCO_3 和 Co_3O_4 ，合成 Ni-Co 前体和 NCM 前体，粗 Li_2CO_3 的纯化。

NCM 大模组电池湿法再生后的产品包括 CoCO_3 、 Co_3O_4 、Ni-Co 前体、NCM 前体和碳酸锂。此外，还可以回收 Cu、Al 和其他有价值的成分。

1.3 数据来源

通过对相关企业的调查，获得了 LFP 和 NCM 生产、梯级利用和回收利用的数据。原材料和能源的生命周期背景数据来自“中国汽车生命周期数据库（CALCD）”。CALCD 由中国汽车技术研究中心有限公司开发和维护，涵盖了来自 31 个省市的 60 多种汽车材料、10 多种能源和电力数据。它是一个基于生产过程的数据库，代表了中国汽车工业的平均水平。数据来源如表 1 所示。

表 1 数据源

项目	数据来源
材料清单	CALCD
生产过程	调研数据
梯次利用	调研数据
再生利用	调研数据和文献数据 ^[24]
其他数据	CALCD
零碳数据	报告 ^[25] 和文献 ^[24]

2 结果

2.1 生命周期温室气体排放

2.1.1 “摇篮到大门”的温室气体排放

对于 NCM，从摇篮到大门的 GHG 排放量为 6678kg $\text{CO}_2\text{-eq}$ 。其中，原材料生产阶段占 80.6%，生产阶段占 19.4%。对于 LFP，从摇篮到大门的 GHG 排放量为 7031kg $\text{CO}_2\text{-eq}$ 。其中，原材料生产阶段占 72%，生产阶段占 28%。总的来说，在电池从摇篮到大门的过程中，原材料的生产阶段占比最高，电池的生产阶段所占的比例较小。

2.1.2 全生命周期温室气体排放

从生命周期的角度来看，LFP 和 NCM 的生命周期 GHG 排放量分别为 2006.9kg $\text{CO}_2\text{-eq}$ 和 687.6kg $\text{CO}_2\text{-eq}$ 。LFP 和 NCM 的梯次利用 GHG 排放分别为 -5525.2kg $\text{CO}_2\text{-eq}$ 和 -5230.0 kg $\text{CO}_2\text{-eq}$ ，可抵消“摇篮到大门”78.6%和 78.3%的温室气体排放。再生利用阶段，LFP 产生温室气体排放，而 NCM 电池则产生温室气体减排，见图 3。

2.1.3 电池材料温室气体排放

NCM 和 LFP 在原材料获取阶段的 GHG 排放量为 5382kg $\text{CO}_2\text{-eq}$ 和 5064kg $\text{CO}_2\text{-eq}$ 。图 4 和图 5 显示了 NCM 各种材料重量比例和 GHG 排放贡献。可以看出，变形铝合金、NCM、石墨和六氟磷酸锂（LiPF₆）是 NCM 中重量最高的

四种材料，它们的比例分别为 28%、25%、16% 和 11%。同样，上述四种材料对 GHG 排放的贡献也最大，贡献率分别为 35%、32%、6% 和 23%。

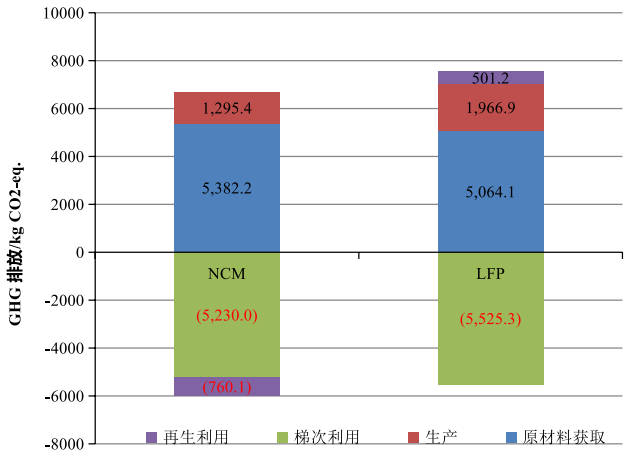


图 3 三元电池和磷酸铁锂电池全生命周期温室气体排放

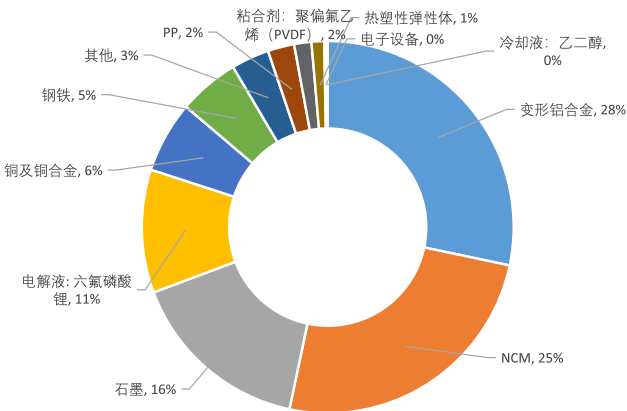


图 4 NCM 电池材料重量比例

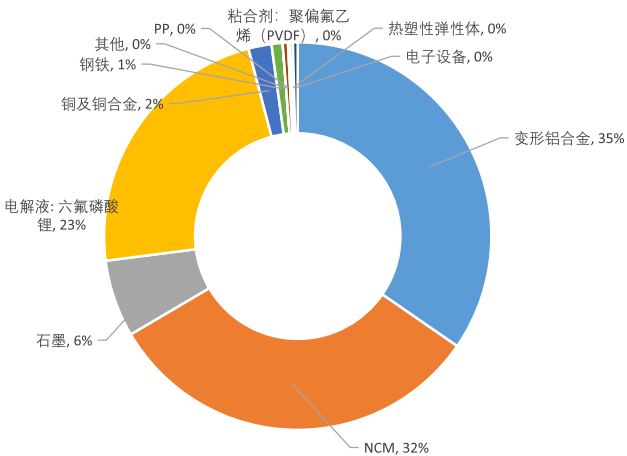


图 5 NCM 电池材料 GHG 排放贡献比例

LFP 的主要材料是 LFP、变形铝合金、石墨、Cu 和 LiPF₆，其重量占比分别为 31%、30%、15%、8% 和 7%，其温室气体排放贡献率分别为 10%、54%、9%、4% 和 22%。如图 6 和图 7 所示。

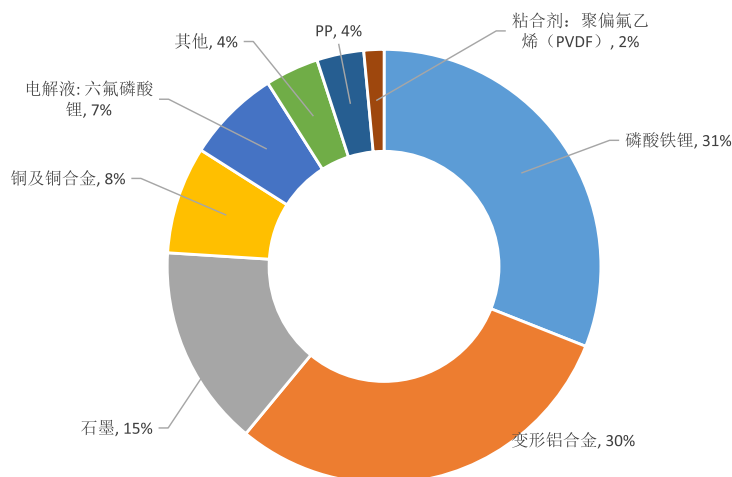


图 6 LFP 电池材料重量比例

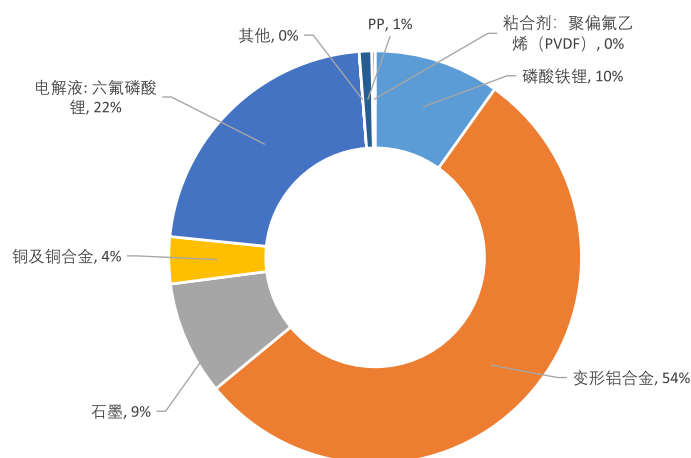


图 7 LFP 电池材料 GHG 排放贡献比例

2.2 零碳路径分析

本研究探讨了 LFP 的两种回收方法和 NCM 的五种回收方法。研究表明,不同方法的减排潜力差异很大。湿法和火湿法组合回收用于 NCM 生产的减排潜力为 11%~37%,而火法回收目前潜力较小。LFP 的全组分物理和湿法回收的减排潜力为 9%~31%。通过对生命周期阶段的分析可以看出,在电池回收过程中仍然会有 GHG 排放,但通过回收来中和电池的 GHG 排放仍然是一个挑战。仍有必要进一步发展创新的低碳技术,提高回收材料的数量、类型和质量。与回收利用相比,梯级利用在生命周期内带来约 51%~55% 的减排潜力,略高于回收利用。但梯级利用的比例和应用场景仍有待进一步拓展。

根据欧盟规定,到 2035 年,新电池中至少 20% 的 Co 和 12% 的 Ni 将来自从旧电池中回收的材料。基于这项研究,已经模拟了使用回收的 Co 和 Ni,以减少 2%~3% 的温室气体排放。少量的金属替代和少量的温室气体贡献并不能带来显著的碳效益。

随着中国新能源电力比重的提高,电力的温室气体排放量将逐渐下降。本研究发现,当电力 GHG 排放量下降

10%、20% 和 50% 时,动力电池的 GHG 排放量分别下降 8.5%、15.6% 和 37.8%。动力电池生产和使用的 GHG 排放对电力 GHG 排放高度敏感,如果单位功率 GHG 排放量减少 1%,GHG 排放量将减少 0.65%。同时,在回收技术 E 和梯级利用的场景中,需要将单位电力的温室气体排放量减少 67%,以实现动力电池整个生命周期的零温室气体排放。

随着零碳工厂和园区的创建,许多电池公司已经实现了零碳生产流程。但其上游和下游无法实现零碳。除了零碳生产、回收和级联利用外,上游供应链还需要 37% (NCM) 和 60% (CTP) 的温室气体减排,才能从生命周期角度实现零碳。在这种情况下,LFP 的上游供应商在 GHG 减排方面有很大的压力,主要是因为 LFP 使用阶段的 GHG 排放量高于 NCM。

3 讨论

3.1 数据质量

本研究中电池材料、电池生产制造、梯级利用和回收的 GHG 排放计算是基于对主流企业的数据调查,数据反映了动力电池的真实情况。它解决了动力电池生命周期评价面

临的数据质量低和二次数据使用问题^[10,26]。背景数据来自专业数据库 CALCD, 并经过研究验证^[2,27]。因此, 本研究可以反映动力电池的生命周期 GHG 排放情况。本研究中的零碳模拟是基于文献和报告的, 可以反映不同途径的潜力。因此, 各种数据源都是可靠的、高质量的, 可以反映动力电池的基本情况。

3.2 情景分析

LFP 的使用寿命比 NCM 好。在使用过程中, 假设两个电池在 150000 公里后都衰减到剩余容量的 80%, 并进入梯次利用。因此, 假设 NCM 在 150000 公里后衰减到初始容量的 80%, 而 LFP 衰减到 90%。梯级利用的 GHG 排放量将增加 12.2%, 可抵消 63.5% 的温室气体排放量。

3.3 协同

①生产过程和上下游协同作用可以达到零碳。电池工艺的零碳只是碳中和的一小部分, 材料生产过程(生产过程)的温室气体减排对电池来说是最大的。这是通过梯次利用和回收来抵消温室气体排放的重要途径。此外, 温室气体排放的一个重要来源是电力, 电力脱碳和可再生能源的使用是整个生命周期减少温室气体的基础。电池产品仍需进行全生命周期管理, 重点关注其他因素, 如寿命、电池维护等。

②要重视循环利用前的梯级利用, 加大对梯级利用的支持力度。与本研究中动力电池回收的 GHG 结果相比, 梯级利用情景比回收情景具有更高的 GHG 排放效益。因此, 循环利用前梯级利用的原则是充分合理的, 也符合循环经济中重复利用优先于循环利用的原则。

③回收技术政策应关注资源和能源消耗以及回收产品的类型和数量。本研究指出了提高零碳回收的两个方向: 减少回收过程中的资源、能源消耗和污染物排放; 提高回收产品的回收率和回收电池材料的种类, 选择能够替代更多生产工艺的回收产品。因此, 有必要在相关技术政策中对回收过程关键环节的能源和材料消耗、污染排放和预防技术, 以及回收产品的类型及其回收率提出详细规定, 为回收企业提供技术指导和规范。

4 结语

本研究基于中国动力电池的现状, 重点研究了两种主流电池 LFP 和 NCM 的全生命周期 GHG 排放量, 探索了零碳途径。从生命周期来看, 原材料的生产阶段是电池的关键。

从零碳途径的角度来看, 与再生利用相比, 梯级利用具有减排的优势。不同回收技术在减排潜力方面仍存在较大差异。电池回收的关键发展方向是不同技术的优化组合和低碳技术创新。目前大力发展的零碳工厂和园区仅在电池生产过程中实现零碳, 追溯到上游仍会产生 GHG 排放。建议采用全生命周期管理和上下游协调减排。

本研究对动力电池的生命周期 GHG 进行了研究。实际上, 动力电池的生产阶段有多种技术组合。因此, 建议未来

对动力电池全过程中不同的生产技术组合、能源组合和回收技术进行结合分析。同时应考虑成本等经济因素, 为动力电池产业链的发展方向提供依据。

参考文献:

- [1] Zhao M, Sun T. Dynamic spatial spillover effect of new energy vehicle industry policies on carbon emission of transportation sector in China[J]. Energy Policy, 2022(165):112991.
- [2] Sun X, Luo X, Zhang Z, et al. Life cycle assessment of lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) batteries for electric passenger vehicles[J]. Journal of Cleaner Production, 2020(273): 123006.
- [3] Wang F, Deng Y, Yuan C. Life cycle assessment of lithium oxygen battery for electric vehicles[J]. Journal of Cleaner Production, 2020(264):121339.
- [4] Huang Z H, Li X, Wang Q S, et al. Experimental investigation on thermal runaway propagation of large format lithium ion battery modules with two cathodes[J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF HEAT AND MASS TRANSFER, 2021(172).
- [5] Peters J F, Baumann M, Zimmermann B, et al. The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters - A review[J]. RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS, 2017(67):491-506.
- [6] Zackrisson M, Fransson K, Hildenbrand J, et al. Life cycle assessment of lithium-air battery cells[J]. JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2016(135):299-311.
- [7] Wang D. RESEARCH ON POLICIES OF POWER BATTERIES RECYCLE IN CHINA FROM THE PERSPECTIVE OF LIFE CYCLE[J]. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING AND LANDSCAPE MANAGEMENT, 2021, 29(2):135-149.
- [8] Hao H, Ji Z, Qian Z. Development Strategy of Power Battery Recycling Reverse Logistics under Circular Economy in China[J]. Ecological Economy, 2020, 36(1):86-91.
- [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] Ahmadi L, Young S B, Fowler M, et al. A cascaded life cycle: reuse of electric vehicle lithium-ion battery packs in energy storage systems[J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF LIFE CYCLE ASSESSMENT, 2017, 22(1):111-124.
- [11] Ioakimidis C S, Murillo-Marroan A, Bagheri A, et al. Life Cycle Assessment of a Lithium Iron Phosphate (LFP) Electric Vehicle Battery in Second Life Application Scenarios[J]. SUSTAINABILITY, 2019, 11(9).
- [12] Richa K, Babbitt C W, Nenadic N G, et al. Environmental trade-offs across cascading lithium-ion battery life cycles[J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF LIFE CYCLE ASSESSMENT,

- 2017,22(1):66-81.
- [13] Yang J, Gu F, Guo J. Environmental feasibility of secondary use of electric vehicle lithium-ion batteries in communication base stations[J]. Resources, Conservation and Recycling,2020(156):104713.
- [14] Li B, Wu J, Lu J. Life cycle assessment considering water-energy nexus for lithium nanofiltration extraction technique[J]. Journal of Cleaner Production,2020(261):121152.
- [15] Silvestri L, Forcina A, Arcese G, et al. Recycling technologies of nickel-metal hydride batteries: An LCA based analysis[J]. Journal of Cleaner Production,2020(273):123083.
- [16] Ambrose H, Kendall A. Understanding the future of lithium: Part 2, temporally and spatially resolved life-cycle assessment modeling[J]. JOURNAL OF INDUSTRIAL ECOLOGY,2020,24(1).
- [17] Bobba S, Mathieux F, Ardenne F, et al. Life Cycle Assessment of repurposed electric vehicle batteries: an adapted method based on modelling energy flows[J]. JOURNAL OF ENERGY STORAGE, 2018(19):213-225.
- [18] Ellingsen L A W, Majeau-Bettez G, Singh B, et al. Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack[J]. JOURNAL OF INDUSTRIAL ECOLOGY,2014,18(1):113-124.
- [19] Kallitsis E, Korre A, Kelsall G, et al. Environmental life cycle assessment of the production in China of lithium-ion batteries with nickel-cobalt-manganese cathodes utilising novel electrode chemistries[J]. JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION, 2020(254).
- [20] Kim H C, Wallington T J, Arsenault R, et al. Cradle-to-Gate Emissions from a Commercial Electric Vehicle Li-Ion Battery: A Comparative Analysis[J]. ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY,2016,50(14):7715-7722.
- [21] Lima L D, Quartier M, Buchmayr A, et al. Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems[J]. SUSTAINABLE ENERGY TECHNOLOGIES AND ASSESSMENTS,2021(46).
- [22] Wang S Y, Yu J, Okubo K. Life cycle assessment on the reuse and recycling of the nickel-metal hydride battery: Fleet-based study on hybrid vehicle batteries from Japan[J]. JOURNAL OF INDUSTRIAL ECOLOGY,2021,25(5):1236-1249.
- [23] Zhao S, You F. Comparative Life-Cycle Assessment of Li-Ion Batteries through Process-Based and Integrated Hybrid Approaches[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering,2019,7(5):5082-5094.
- [24] Zhuopu W. Potential and Life Cycle Assessment of Recycling of Power Batteries for New Energy Vehicles[M]. Tsinghua University,2018.
- [25] EU. Batteries and waste batteries[Z].2022.
- [26] Yin R S, Hu S H, Yang Y. Life cycle inventories of the commonly used materials for lithium-ion batteries in China[J]. JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION,2019(227):960-971.
- [27] Wu Z X, Wang M, Zheng J H, et al. Life cycle greenhouse gas emission reduction potential of battery electric vehicle[J]. JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION,2018(190):462-470.

作者简介: 高敬堯 (1998-), 女, 中国黑龙江齐齐哈尔人, 硕士, 助理工程师, 从事动力电池研究。

通讯作者: 荣常如 (1980-), 男, 中国吉林靖宇人, 博士, 正高级工程师, 从事动力电池研究。

基金项目: 吉林省、长春市重大科技专项 (项目编号: 20220301018GX、20220301019GX)。