

附件

项目公示信息

一、项目名称

废弃锂离子电池正极材料颗粒的直接回收与功能化再利用

二、提名单位（提名专家）

李峰 中国科学院金属研究所

陈成猛 中国科学院山西煤炭化学研究所

三、项目简介

随着近年来“碳中和”理念的提出，发展新能源汽车促进节能减排已经成为基本国策。2023年，中国新能源汽车销量超过850万辆，使用的动力电池绝大多数为锂离子电池。此外，锂离子电池广泛应用在消费电子、储能装置等领域，行业总产值已超过1.2万亿元。锂离子电池设计使用寿命为5-8年，预计到2026年，中国的废电池产量将达到231.2万吨。而正极材料，作为电池中价值最高的组分，占总重的30%以上。其中蕴含的锂、镍、钴、锰等金属元素，既是高价的金属资源，也是环境污染物，尤其是锂、钴等已经上升至战略资源的高度，其回收处理已成为社会关注的焦点。近年来，政府部门已经多次出台管理办法与行业标准，规范锂离子电池的溯源、回收流程，逐步推进电池回收行业的发展。在日渐高涨的原料成本与环境保护的双重压力下，发展电池回收行业对低碳经济愈发重要。据估计，目前正规途径回收的锂电池占比不足10%，这其中有多方面的原因，包括法规完善、运输体系、回收技术等，而回收技术无疑是最关键的一环。现有的火法与湿法回收方法，无论是从经济性还是环境效益上，都存在着明显的缺陷，已经无法满足日益增长的废电池处理需求，亟需提出创新的回收方法，实现锂离子电池的高效清洁回收，完成资源的循环利用，促进新能源行业的长足发展。申请团队近五年来聚焦锂电池正极材料颗粒的绿色回收及产物的功能化利用，提出了正极材料晶体结构多级调控的直接再生机制，构建了失效电极材料“从分子到分子”的直接再生新路径，实现了失效正极材料的“直接修复再利用”、“升级修复再利用”、“高值重组再利用”系列效果。具体如下：1、揭示了正极材料成分缺失导致的连续相变失效机制，提出了针对不同相转变路径的调控方法，建立了基于分子结构重构的失效正极材料直接修复体系，实现了失效材料结构与性能的恢复；2、剖析了关键元素在晶体结构中的分布规律及其对性能的影响机制，发展了基于失效材料本征结构特征的功能升级思路，赋予了再生材料高截止电压和高能量密度；3、提出了适应电极材料元素特性的应用拓展路径，开拓了基于分子结构重组跨体系应用失效电极材料的再生方法，将失效正极材料重组为下一代正极材料和新型储能体系催化剂。团队所提出的直接回收体系相比于现有的火法、湿法回收方法具有明显的优势，将基于分子结构破坏成原子后的提取、再合成思路转变为分子尺度的结构直接修复，从原理上大幅度简化电池回收流程，并且避免了强酸、碱，极端高温等条件的使用，回收产物可以直接用作正极材料，价值大幅提升，因此其不仅具有科学上的探索意义，对于实际产业的技术升级也

具有指导作用，相关成果在学术界和产业界均引起了广泛的关注与讨论，获得了 *Nature Sustainability* 的专题报道与点评。目前申请团队已经获得 2000 万投资，用于建设实际复杂正极材料直接回收中试示范线，占地面积 500 余平米，单批次处理量达到 100 kg，计划年处理量达到 10 t，2023 年 12 月已开始建设生产。所得到的再生镍锰钴三元正极材料，比容量达到 145 mAh/g 以上，循环 500 圈后容量保持率达 90% 以上，达到同类型商业正极材料水平，有望引领行业技术革新。

四、主要完成人情况（包括：排名、姓名、技术职称、工作单位、完成单位、对本项目重要科学发现的贡献）

排名	姓名	技术职务	工作单位	完成单位	对本项目重要科学发现的贡献
1	周光敏	副教授	清华大学深圳国际研究生院	清华大学深圳国际研究生院	对重要发现 1-3 有领导贡献，代表作 1-10 通讯作者
2	梁正	副教授	上海交通大学	上海交通大学	对重要发现 1-2 有突出贡献，代表作 1-6, 8-10 通讯作者
3	王俊雄	助理研究员	上海交通大学	上海交通大学	对重要发现 1-3 有重要贡献，代表作 1-6, 8-10 第一/共同第一作者
4	成会明	教授	中国科学院深圳先进技术研究院	中国科学院深圳先进技术研究院	对重要发现 1-3 有重要贡献，代表作 1-3, 5-10 通讯作者

五、主要完成单位

清华大学深圳国际研究生院

上海交通大学

中国科学院深圳先进技术研究院

六、代表性论文（专著）目录（包括：论文（专著）名称/刊名/作者）

序号	论文（著作）名称	刊名	作者
1	Sustainable upcycling of spent LiCoO ₂ to an ultra-stable battery cathode at high voltage	Nature Sustainability	王俊雄, 贾凯, 马骏, 梁正, 庄兆丰, 赵云, 李宝华, 周光敏, 成会明
2	Direct regeneration of degraded lithium-ion battery cathodes with a multifunctional organic lithium salt	Nature Communications	季冠军, 王俊雄, 梁正, 贾凯, 马骏, 庄兆丰, 周光敏, 成会明
3	Adaptable Eutectic Salt for the Direct Recycling of Highly Degraded Layer Cathodes	Journal of the American Chemical Society	马骏, 王俊雄, 贾凯, 梁正, 季冠军, 庄兆丰, 周光敏, 成会明
4	Topotactic Transformation of Surface Structure Enabling Direct Regeneration of Spent Lithium-Ion Battery Cathodes	Journal of the American Chemical Society	贾凯, 王俊雄, 庄兆丰, 朴志鸿, 张梦天, 梁正, 季冠军, 马骏, 季昊铖, 姚文娇, 周光敏, 成会明

5	Long-Life Regenerated LiFePO_4 from Spent Cathode by Elevating the d-Band Center of Fe	Advanced Materials	贾凯, 马骏, 王俊雄, 梁正, 季冠军, 朴志鸿, 高润华, 朱雁飞, 庄兆丰, 周光敏, 成会明
6	Direct and green repairing of degraded LiCoO_2 for reuse in lithium-ion batteries	National Science Review	王俊雄, 张祺, 盛进之, 梁正, 马骏, 陈源茂, 周光敏, 成会明
7	Recycling spent $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Mn}_x\text{Co}_y\text{O}_2$ cathodes to bifunctional NiMnCo catalysts for zinc-air batteries	Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America	焦妙伦, 张祺, 叶辰良, 刘志博, 钟熊伟, 王俊雄, 李闯, 戴立新, 周光敏, 成会明
8	Efficient Extraction of Lithium from Anode for Direct Regeneration of Cathode Materials of Spent Li-Ion Batteries	ACS Energy Letters	王俊雄, 马骏, 贾凯, 梁正, 季冠军, 赵云, 李宝华, 周光敏, 成会明
9	Direct conversion of degraded LiCoO_2 cathode materials into high-performance LiCoO_2 : A closed-loop green recycling strategy for spent lithium-ion batteries	Energy Storage Materials	王俊雄, 梁正, 赵云, 盛进之, 马骏, 贾凯, 李宝华, 周光敏, 成会明
10	Suppressed Lattice Oxygen Release via Ni/Mn Doping from Spent $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ toward High-Energy Layered-Oxide Cathodes	Nano Letters	贾凯, 王俊雄, 马骏, 梁正, 庄兆丰, 季冠军, 高润华, 朴志鸿, 李闯, 周光敏, 成会明