废旧锂电池资源回收

# 关键团队与连续工作

## 第二部分 | 长期问题、研究序列、实际贡献与转化证据

### 团队地图：沿着持续研究的问题识别贡献

合作网络与单一课题组分开；下面是代表性问题簇，完整团队卡片另列。

#### 反应与物料分流

北京理工大学：有机酸体系
鲁汶大学：溶剂浸出与分离
清华环境团队：磷酸铁锂选择性
查尔姆斯：实际原料与杂质

#### 结构保留与产品升级

加州大学圣迭戈分校：损伤修复
伍斯特理工学院：混合料升级
周光敏等协作：异质料与批量
橡树岭：熔盐与分离

#### 电反应与反应器

新加坡国立大学：介体与配对
中南大学：浆料电解与锂产品
莱斯大学：试剂循环与膜电极
东北—武汉协作：配对电解

#### 工程、前处理与全组分

亚琛工业大学：相分配与放大
英国跨机构协作：分离与箔材
阿尔托协作：放电与材料完整性
明斯特：电解液与石墨

#### 连续贡献的证据链

长期问题 → 代表工作先后 → 机制或工程推进 → 合作与转化证据 → 尚未跨越的边界

中文原创关系图；根据本轮多篇原始研究综合绘制。

2026年11月4日 • 86项原始研究与评价 • 16篇综述入口 • 19个团队及合作网络

两份报告分别对应“关键工作与技术演进”和“团队持续贡献”。平台保留逐篇完整条件、出处、筛选与批注功能。

# 阅读导航

标题可在PDF书签中跳转。原始研究记录以编号和DOI追溯；同一工作可能同时属于多个技术分支。


团队识别原则与总体判断 3

团队—问题索引 . . . . . 4

逐团队研究卡片 5

1. 英国 ReLiB 跨机构前处理与材料保值协作 . . . . . 5
2. 明斯特大学电解液与石墨回收节点 . . . . . 6
3. 北理工李丽—陈人杰—吴锋研究线 . . . . . 6
4. RWTH IME / Bernd Friedrich 及合作网络 . . . . . 7
5. KU Leuven / Koen Binnemans—Sofía Riaño—Nand Peeters . . . . . 8
6. 清华 / Jinhui Li—Quanyin Tan—Kang Liu 等 . . . . . 8
7. Chalmers / Martina Petranikova 及合作团队 . . . . . 9
8. NTU / Madhavi Srinivasan—Bin Cao—Joseph Jegan Roy . . . . . 9
9. UCSD 陈政（Zheng Chen）正极缺陷修复与工艺优化团队 . . . . . 10
10. 伍斯特理工学院王岩（Yan Wang）混合料与产品升级团队 . . . . . 11
11. 周光敏—梁正—成会明直接再生协作网络 . . . . . 12
12. ORNL 离子介质与熔盐补锂协作节点 . . . . . 13
13. Argonne 前处理与正极直接回收节点 . . . . . 13
14. ORNL 电极选择性分离节点 . . . . . 14
15. Qing Wang（NUS）及HIT合作网络 . . . . . 15
16. Lihua He / Zhongwei Zhao / Zheng Li（中南大学及产业合作） . . . . . 16
17. Haotian Wang / Zhiwei Fang / Yuge Feng（Rice，含Biswal及TotalEnergies合作） . . . . . 16
18. Huayi Yin / Dihua Wang（东北大学—武汉大学合作谱系） . . . . . 17
19. Annukka Santasalo-Aarnio / Neha Garg（Aalto及Turku/Uppsala合作） . . . . . 18

怎样判断研究继承与独立验证 19

电化学团队谱系的进一步分析 20

单篇前沿节点与转化证据边界 22

# 团队识别原则与总体判断

团队以共同问题和原始研究序列识别。机构采用发表时署名；同一机构内不同研究群分开，同一问题的跨校合作保留网络身份。至少两篇关联研究支持本报告的主要团队卡片；只核到一个节点的团队另列，不按期刊档次或单篇影响力判定长期贡献。

本轮梳理的19个团队或网络并非“19个互相独立实验室”。ReCell相关研究、橡树岭不同作者群、跨校直接再生协作等存在交叉。这种重叠本身说明材料、分离、评价与放大需要协作；不能将共同作者论文重复当成独立验证。

持续研究不要求每篇都改善同一个数字。研究可能更换原料、扩大产品目标或进入更复杂反应器，从而牺牲局部性能但暴露更真实的问题。团队的贡献应写成改变了哪一个约束，而不是简单累计高分论文数量。

## 团队地图：沿着持续研究的问题识别贡献

合作网络与单一课题组分开；下面是代表性问题簇，完整团队卡片另列。

### 反应与物料分流

北京理工大学：有机酸体系
鲁汶大学：溶剂浸出与分离
清华环境团队：磷酸铁锂选择性
查尔姆斯：实际原料与杂质

### 结构保留与产品升级

加州大学圣迭戈分校：损伤修复
伍斯特理工学院：混合料升级
周光敏等协作：异质料与批量
橡树岭：熔盐与分离

### 电反应与反应器

新加坡国立大学：介体与配对
中南大学：浆料电解与锂产品
莱斯大学：试剂循环与膜电极
东北—武汉协作：配对电解

### 工程、前处理与全组分

亚琛工业大学：相分配与放大
英国跨机构协作：分离与箔材
阿尔托协作：放电与材料完整性
明斯特：电解液与石墨

### 连续贡献的证据链

长期问题 → 代表工作先后 → 机制或工程推进 → 合作与转化证据 → 尚未跨越的边界

问题簇示意。名称及工作均以对应卡片原始文献为据，未将合作等同于商业采用。

# 团队—问题索引

| 团队 / 网络 | 持续问题 | 所纳入序列 |
| --- | --- | --- |
| 英国 ReLiB 跨机构前处理与材料保值协作 | 在分离阶段保持组分纯度和原有功能，使直接回收有可用原料 | 2021 C08 → 2023 C04 |
| 明斯特大学电解液与石墨回收节点 | 电解液和石墨等非正极组分回收与再使用 | 2015 C10 → 2016 C01 |
| 北理工李丽—陈人杰—吴锋研究线 | 在保持浸出效率的同时改进药剂体系与回收可持续性 | 2010 HP03 → 2012 HP04 |
| RWTH IME / Bernd Friedrich 及合作网络 | 热处理、元素相分配、前置锂回收和反应器放大如何构成可运行流程 | 2012 HP05 → 2020 HP11 → 2020 HP12 → 2021 HP13 → 2024 HP19 → 2024 HP20 → 2026 HP22 |
| KU Leuven / Koen Binnemans—Sofía Riaño—Nand Peeters | 非水浸出之后如何实现可分离、可复用的金属回收流程 | 2020 HP09 → 2022 HP16 |
| 清华 / Jinhui Li—Quanyin Tan—Kang Liu 等 | LFP 中只释放高价值锂，降低大量铁磷完全溶解的负担 | 2019 HP14 → 2021 HP15 |
| Chalmers / Martina Petranikova 及合作团队 | 实际原料预处理历史、杂质与选择性浸出之间的关系 | 2021 HP10 → 2023 HP18 |
| NTU / Madhavi Srinivasan—Bin Cao—Joseph Jegan Roy | 生物浸出如何在高固含和多金属毒性下保持提取能力 | 2021 HP24 → 2021 HP25 |
| UCSD 陈政（Zheng Chen）正极缺陷修复与工艺优化团队 | 如何匹配材料损伤、同时恢复锂库存和结构，并降低补锂工艺成本 | 2018 D01 → 2018 D02 → 2019 D03 → 2020 D04 → 2021 D05 → 2022 D06 → 2023 D22 |
| 伍斯特理工学院王岩（Yan Wang）混合料与产品升级团队 | 旧组成和混合正极如何变成符合下一代需求的新材料 | 2013 D26 → 2014 D27 → 2021 D28 → 2022 D07 → 2025 D19 → 2026 D24 |
| 周光敏—梁正—成会明直接再生协作网络 | 低门槛补锂、混合物组分升级与异质退役料放大 | 2023 D25 → 2024 D08 → 2024 D09 → 2026 D10 → 2026 D23 |
| ORNL 离子介质与熔盐补锂协作节点 | 怎样用介质促进锂和过渡金属传输，实现直接修复或组成升级 | 2020 D12 → 2022 D13 → 2024 D14 |
| Argonne 前处理与正极直接回收节点 | 如何避免分离/除胶损伤，并由电芯获得可直接再生的清洁物料 | 2020 D15 → 2025 D16 |
| ORNL 电极选择性分离节点 | 如何分离正负极和集流体，同时保持颗粒结构与金属箔完整 | 2020 D17 → 2024 D18 |
| Qing Wang（NUS）及HIT合作网络 | 如何让固体正极在无需直接接触电极时选择性转化，并用可再生介体将回收与其他两极反应配对。 | 2019 E01 → 2024 E08 → 2026 E16 |
| Lihua He / Zhongwei Zhao / Zheng Li（中南大学及产业合作） | 如何在悬浮废正极中实现电化学转化，并把离子迁移/膜分离连接到Li、Mn或Fe资源及LiOH产品。 | 2019 E02 → 2020 E03 → 2020 E04 |

| 团队 / 网络 | 持续问题 | 所纳入序列 |
| --- | --- | --- |
| Haotian Wang / Zhiwei Fang / Yuge Feng（Rice，含Biswal及TotalEnergies合作） | 如何使电化学回收同时满足高纯制造原料、试剂循环、产品浓度和较长运行时间。 | 2025 E13 → 2025 E14 |
| Huayi Yin / Dihua Wang（东北大学—武汉大学合作谱系） | 如何利用两极反应实现正极和其他组分的综合回收，并让分离、浸出与再利用形成较短流程。 | 2020 E05 → 2022 E06 |
| Annukka Santasalo-Aarnio / Neha Garg（Aalto及Turku/Uppsala合作） | 如何在回收前充分放电，同时控制回弹、腐蚀、气体及电极材料损伤。 | 2024 E09 → 2026 E18 |

# 逐团队研究卡片

## 1．英国 ReLiB 跨机构前处理与材料保值协作

Abbott / Ryder / Kendrick / Slater / Anderson

发表时机构：莱斯特大学、伯明翰大学及法拉第研究院项目合作网络；按论文发表时机构

### 长期问题

在分离阶段保持组分纯度和原有功能，使直接回收有可用原料

### 工作次序及其意义

2021 · C08 利用高强度超声实现锂离子电池回收

界面空化快速破坏黏附，展示流动处理中的剥离

2023 · C04 废旧锂离子电池铝铜集流体的直接再利用

通过洗涤或表面刻蚀去除涂层，比较润湿、黏附与接触导电性

### 主要推进

从超声界面剥离到铜铝箔直接再使用；不同分工共同研究前处理对后续价值的影响。

### 边界与尚缺证据

这是合作网络，不应简化成一位PI的全部工作；单元操作连续性与全流程连续性分开。

### 项目、专利与企业联系

C04明确列出ReLiB、Nextrode和CATMAT资助；C08为跨校共同作者。

身份与出处：两篇论文作者机构及致谢

# 2．明斯特大学电解液与石墨回收节点

Martin Winter / Sascha Nowak

发表时机构：明斯特大学及亥姆霍兹明斯特研究机构，按发表时署名

## 长期问题

电解液和石墨等非正极组分回收与再使用

## 工作次序及其意义

2015 · C10 液态及超临界二氧化碳与助溶剂萃取锂离子电池电解液

建立流通式二氧化碳与助溶剂萃取，研究萃取随时间变化

2016 · C01 废旧锂离子电池中的石墨回收

将石墨回收及电化学再使用作为独立任务，比较处理对材料行为的影响

## 主要推进

从电解液流通式萃取到石墨再使用，将非正极组分的分析与再利用连接；代表工作已核实，完整团队历史不作穷尽声明。

## 边界与尚缺证据

跨组分研究谱系，并非同一反应器的直接放大；论文发表时机构不自动等于2026年任职状态。

## 项目、专利与企业联系

未在本轮核实具体产业转化。

身份与出处：C01作者机构与原始摘要

# 3．北理工李丽—陈人杰—吴锋研究线

发表时机构：北京理工大学；部分工作与美国阿贡国家实验室作者合作

## 长期问题

在保持浸出效率的同时改进药剂体系与回收可持续性

## 工作次序及其意义

2010 · HP03 以有机柠檬酸浸出回收废旧锂离子电池中的钴和锂

从无机酸转向有机配体体系的代表工作

2012 · HP04 抗坏血酸辅助回收废旧锂离子电池中的钴和锂

延续有机酸路线，关注还原作用与金属溶解

2020 · R02 锂离子电池及其他电池的可持续回收技术

反应与材料体系的综合综述入口

## 主要推进

从柠檬酸到抗坏血酸，再将回收路线纳入经济、环境、安全框架

### 边界与尚缺证据

两篇原始研究加一篇综合综述；不把跨年份不同酸体系强行当作线性性能提升

### 项目、专利与企业联系

2012 共同作者 Jun Lu、Khalil Amine；未核实本路线对应专利族或量产项目

身份与出处：来源链接；来源链接；来源链接

## 4. RWTH IME / Bernd Friedrich 及合作网络

发表时机构：德国亚琛工业大学 IME；各工作包括 ACCUREC、TU Košice、TU Freiberg、HZDR、BGR 合作者

### 长期问题

热处理、元素相分配、前置锂回收和反应器放大如何构成可运行流程

### 工作次序及其意义

2012 · HP05 锂离子电池回收工艺的开发

学术与企业共同开发整条组合工艺的重要早期节点

2020 · HP11 热解锂电池黑粉的火湿联合回收（第一部分）：电弧炉制备富锂物料

设计渣相承接锂，而非仅把锂视为熔炼损失

2020 · HP12 热解锂电池黑粉的火湿联合回收（第二部分）：富锂炉渣的热力学、动力学与干式消解

证明熔炼渣后处理必须考虑过滤性，不能只看锂能否溶出

2021 · HP13 定向热处理黑粉的前置锂回收（第一部分）：超临界二氧化碳碳酸化活化锂

把锂回收前移，避免在复杂后端稀释和损失

2024 · HP19 前置锂回收从实验室水浸到放大的挑战

直接暴露放大后因几何相似性不足造成性能下降

2024 · HP20 经响应面优化的 CO2 辅助浸出前置回收废旧电池锂

探索高压碳酸化之外的常压路径

2026 · HP22 在 NMC 黑粉与整电芯火法处理中验证人工矿物工程概念的大规模可行性

把锂赋存相设计推进至百千克实际物料实验

### 主要推进

兼有熔炼渣后处理和前置提锂两条并行线，并公开放大失败原因和百千克尺度数据

### 边界与尚缺证据

跨 2012—2026 的连续原始论文；技术并行演变，不是单一一条线

### 项目、专利与企业联系

2012 企业共同作者；2026 ACCUREC 提供原料；2024 greenBatt 项目 03XP0332C

身份与出处：来源链接；来源链接；来源链接；来源链接

# 5．KU Leuven / Koen Binnemans—Sofía Riaño—Nand Peeters

发表时机构：比利时 KU Leuven

## 长期问题

非水浸出之后如何实现可分离、可复用的金属回收流程

## 工作次序及其意义

2020 · HP09 用深共熔溶剂从锂离子电池正极材料回收钴

从能溶解推进到金属分离；利用体系内金属的氧化还原作用

2022 · HP16 结合溶剂浸出与溶剂萃取从锂电池正极材料回收钴

使浸出与萃取共享介质，减少流程转换

## 主要推进

从 DES 浸出—萃取转向酸性萃取剂直接浸出与反萃集成

## 边界与尚缺证据

2022 原文直接讨论 2020 前期工作；模型体系边界清楚

## 项目、专利与企业联系

本组论文讨论集流体金属作为还原资源；未核实相关企业实施或专利归属

身份与出处：来源链接；来源链接

# 6．清华 / Jinhui Li—Quanyin Tan—Kang Liu 等

发表时机构：清华大学环境学院

## 长期问题

LFP 中只释放高价值锂，降低大量铁磷完全溶解的负担

## 工作次序及其意义

2019 · HP14 通过机械化学诱导同晶置换实现废旧磷酸铁锂无酸选择性提锂

区别于全部溶解，以选择性固相反应释放锂

2021 · HP15 通过机械化学固相氧化从废旧磷酸铁锂电池中选择性提锂

由置换转向固相氧化驱动脱锂

## 主要推进

机械化学同晶置换与固相氧化两种反应策略

## 边界与尚缺证据

2019 与 2021 两篇同团队原始研究；分别研究置换和氧化

### 项目、专利与企业联系

本子任务未核实专利或企业合作；不由通讯作者地位推断产业化

身份与出处：来源链接；来源链接

## 7．Chalmers / Martina Petranikova 及合作团队

发表时机构：瑞典查尔姆斯理工大学；2021 论文有 Northvolt AB 作者

### 长期问题

实际原料预处理历史、杂质与选择性浸出之间的关系

### 工作次序及其意义

2021 · HP10 比较焚烧、真空热解和动态热解对 NMC 正极生产废料组成与集流体分离的影响

证明去粘结剂并非化学中性步骤，气氛影响后续物相与浸出

2023 · HP18 以草酸为浸出剂实现电动汽车锂电池锂的选择性回收：建模与优化

在真实黑粉上展示选择性，明确铝随锂共浸

### 主要推进

热气氛改变物相的比较实验，推进到工业来源黑粉草酸选择性提锂

### 边界与尚缺证据

2021 生产废料与 2023 工业黑粉的材料边界不同，适合研究原料依赖性

### 项目、专利与企业联系

2021 署名明确 Northvolt 合作；不能延伸声称 2026 仍按同方式合作

身份与出处：来源链接；来源链接

## 8．NTU / Madhavi Srinivasan—Bin Cao—Joseph Jegan Roy

发表时机构：新加坡南洋理工大学 ERI@N、SCARCE、SCELSE 等

### 长期问题

生物浸出如何在高固含和多金属毒性下保持提取能力

### 工作次序及其意义

2021 · HP24 高浆浓度下用生物浸出从废旧锂电池提取金属

把生物浸出评价推进到 100 g/L 固含，直面金属毒性与供酸不足

2021 · HP25 高浆浓度下生物浸出回收废旧 NMC 锂电池金属

同团队将高固含策略扩展到 NMC 多金属体系

### 主要推进

100 g/L 条件与培养液补充策略，在混合物料及 NMC 上分别验证

### 边界与尚缺证据

2021 两篇互补原始研究，只能证明系列工作，不能冒充多年持续放大

### 项目、专利与企业联系

跨材料与环境生物团队；未据此认定工业中试

身份与出处：来源链接；来源链接

## 9．UCSD 陈政（Zheng Chen）正极缺陷修复与工艺优化团队

Zheng Chen; Ping Liu; Ying Shirley Meng and collaborators

发表时机构：加州大学圣迭戈分校，按论文发表时机构；Argonne/ORNL合作

### 长期问题

如何匹配材料损伤、同时恢复锂库存和结构，并降低补锂工艺成本

### 工作次序及其意义

2018 · D01 废旧锂离子电池钴酸锂的有效再生：直接获得高性能活性颗粒

将组分恢复和结构恢复连接，成为后续直接修复研究的重要节点

2018 · D02 消除退化三元正极颗粒的组分和结构缺陷以直接再生高性能正极

将修复从补足元素推进到结构缺陷诊断

2019 · D03 通过共熔体系在常压下为退化NCM523补锂，实现正极直接再生

解除水热高压约束，建立常压熔盐路径

2020 · D04 通过靶向缺陷修复高效直接回收锂离子电池正极

把Fe/Li反位缺陷与缺锂共同纳入修复机理

2021 · D05 废旧锂离子电池正极直接回收工艺的设计与优化

把锂盐浓度与溶液循环引入工艺成本控制

2022 · D06 利用氧化还原介质降低水热补锂温度以直接回收废旧正极

把电子供给和补锂动力学结合，降低液相反应温压

2023 · D22 废旧锂离子电池正极黑粉的可放大直接回收

将纯化和补锂集成，使真实退役正极黑粉达到100g批次

### 主要推进

LCO/NCM修复→常压共熔→LFP靶向修复→溶液成本与低温氧化还原介质；材料机理、工艺与模型评价连续积累。2023年进一步将真实EOL正极黑粉纯化与再生集成到100g批处理。

### 边界与尚缺证据

多篇代表性数据来自可控老化/化学脱锂材料；不同体系修复机制不可通用；长期工业连续运行仍需单列。

### 项目、专利与企业联系

D04署名Argonne/ORNL、ReCell支持；D06作者机构含Honda，证明合作，不证明Honda商业采用。

身份与出处：来源链接；D04/D06作者机构与致谢；中文名核实：来源链接

## 10．伍斯特理工学院王岩（Yan Wang）混合料与产品升级团队

Yan Wang; Xiaotu Ma; Jiahui Hou and collaborators

发表时机构：Worcester Polytechnic Institute；Argonne与Farasis合作（论文署名）

### 长期问题

旧组成和混合正极如何变成符合下一代需求的新材料

### 工作次序及其意义

2013 · D26 混合锂离子电池正极材料回收的新方法

早期提出混合化学体系的金属共回收—重新配平—合成思路

2014 · D27 废旧锂离子电池的闭环回收工艺

从未使用混合粉末推向真实废电芯并联接材料平衡及经济分析

2021 · D28 再生正极材料使锂离子电池获得优异性能

把再生材料并非必然低性能的判断推进到1Ah电芯和微结构机制验证

2022 · D07 混合贫镍多晶正极直接升级为富镍单晶正极

将混合料处理、成分升级和多晶转单晶连接

2025 · D19 将混合废旧贫镍正极升级为富镍多晶正极

把混合料、再生盐配平、多晶产品与Ah级验证连接

2026 · D24 混合废旧电池升级为NMC622与石墨全电池的策略

从单正极升级扩展到正负极共同回收后的全电池验证

### 主要推进

2013模型混合料→2014真实LCO废电池并掺入其他体系粉末的闭环湿法→2021再合成NMC111的1Ah验证→2022直接熔盐升级→2025湿法高镍升级→2026回收正负极全软包；湿法和保晶/重构路径并行，不混为一种直接再生。

### 边界与尚缺证据

升级并不保证保留原晶体；高镍目标依赖原料和Ni补料平衡；性能与经济性需分开。

### 项目、专利与企业联系

D07专利申请/Ascend Elements利益声明；D19原始作者机构有Farasis Energy USA。均为研究/人员关联证据，非企业量产采用证明。 D28明确DOE/USABC支持，Yan Wang当时为Battery Resourcers联合创始人/首席科学家，并声明专利申请；不能据此认定所有后续升级配方已商业实施。；WPI官方2022年报道确认技术许可、与Eric Gratz创业及专利许可历史；此为历史转化证据，不代表2026年企业产能状态。

身份与出处：来源链接；D07声明：来源链接；中文名核实：来源链接；转化历史：来源链接

# 11. 周光敏—梁正—成会明直接再生协作网络

Guangmin Zhou; Zheng Liang; Hui-Ming Cheng and collaborators

发表时机构：清华大学深圳国际研究生院、上海交通大学等，按各论文作者机构

## 长期问题

低门槛补锂、混合物组分升级与异质退役料放大

## 工作次序及其意义

2023 · D25 将废旧钴酸锂可持续升级为高电压稳定正极

把原本的缺锂缺陷变成升级掺杂的反应通道

2024 · D09 将混合废旧正极可持续升级为高电压聚阴离子正极

为混合材料找到新的多阴离子组成出口

2024 · D08 通过自发补锂在环境条件下直接回收废旧正极材料

利用界面反应降低补锂门槛并向软包验证推进

2026 · D10 面向工业尺度的异质废旧正极材料柔性直接再生

从配方控制转向异质退役料和50kg批次验证

2026 · D23 废旧三元黑粉的全干法可放大直接回收及长寿命安时级软包验证

将杂质转化、形貌调整与干法流程集成；拓展同团队50kg湿处理之外的技术分支

## 主要推进

2024年两条并行线：混合料转磷酸盐、自发补锂；2026年同类三元异质料50kg/批。 2023年LCO高压双掺杂升级；2026年4月追加公斤级全干法、2Ah软包验证。

## 边界与尚缺证据

团队网络不等于单PI；同NCM523异质批量验证不等于跨化学体系通吃；高温后处理和杂质问题仍存在。

## 项目、专利与企业联系

D08/D09/D10共同作者和机构可核；本子任务未核专利家族或实际产业许可，不作转化断言。 D25致谢Qinhe Energy Conservation and Environmental Protection Group Co.,Ltd支持（QHHB-20210405）；是经费合作证据，非商业量产证明。

身份与出处：三篇Nature/NSR原始论文的作者信息及D10全文

# 12．ORNL 离子介质与熔盐补锂协作节点

Tao Wang; Huimin Luo; Sheng Dai and collaborators

发表时机构：Oak Ridge National Laboratory，与Argonne等合作

## 长期问题

怎样用介质促进锂和过渡金属传输，实现直接修复或组成升级

## 工作次序及其意义

2020 · D12 通过离子热补锂直接回收废旧三元正极

扩展液相补锂介质，强调颗粒形貌保留

2022 · D13 在互易三元熔盐中将废旧NMC111助熔升级为富镍正极

将离子/熔盐介质由原组成修复推进到组分升级

2024 · D14 在互易三元熔盐中直接回收废旧富镍正极

把熔盐工艺推进到富镍材料并纳入经济性

## 主要推进

离子热修复NMC111→三元熔盐富镍升级→富镍正极熔盐再生；2024分支综述总结。

## 边界与尚缺证据

上述连续性为作者和研究问题轨迹，不把未核直接引用关系画为必然继承；洗盐、介质回用和污染累积仍需核。

## 项目、专利与企业联系

D14署名ORNL与Argonne人员；与Bai/Belharouak分离节点有共同作者，应作为重叠网络而非完全独立团队。

身份与出处：来源链接；ORNL综述成果库

# 13．Argonne 前处理与正极直接回收节点

Albert Lipson; Jessica Durham; Michael LeResche; Jeffrey Spangenberger and collaborators

发表时机构：Argonne National Laboratory / ReCell合作网络

## 长期问题

如何避免分离/除胶损伤，并由电芯获得可直接再生的清洁物料

## 工作次序及其意义

2020 · D15 减轻热法除黏结剂对锂离子电池直接回收的影响

揭示前处理自身会改变修复对象，不能被视为中性步骤

2025 · D16 废旧锂离子电池分离与正极直接回收的低成本可放大方法

把整电芯分离与直接正极回收衔接

## 主要推进

热除胶副作用辨识→保持涂层附着的整电芯分离流程；强调前处理决定后续价值。

### 边界与尚缺证据

ReCell是跨机构项目不能等于某位PI全部成果；尚不能由摘要推算产线吨位。

### 项目、专利与企业联系

论文作者署名与ReCell网络；本次不将可放大、经济模型当成已许可商业工艺。

身份与出处：来源链接；来源链接

## 14. ORNL 电极选择性分离节点

Yaocai Bai; Ilias Belharouak; Jianlin Li; Lu Yu and collaborators

发表时机构：Oak Ridge National Laboratory

### 长期问题

如何分离正负极和集流体，同时保持颗粒结构与金属箔完整

### 工作次序及其意义

2020 · D17 通过溶剂分离电极材料实现可持续直接回收

将溶剂分离选择与保留材料功能相联系

2024 · D18 水介质中电极材料与金属箔的顺序分离

从单极片剥离推进到正负极选择性分离

### 主要推进

2020乙二醇竞争氢键剥离→2024水相顺序分离；从单界面脱落转向混合流中选择性。

### 边界与尚缺证据

与TD04有作者重叠，不重复计算成两个完全独立机构；混合料组成和粘结剂影响适用性。

### 项目、专利与企业联系

ORNL原始机构成果记录；本轮未核商业许可或连续产线。

身份与出处：来源链接；D17出版社作者信息

# 15．Qing Wang（NUS）及HIT合作网络

发表时机构：2019：National University of Singapore；2024：Harbin Institute of Technology与National University of Singapore跨校合作；2026：National University of Singapore

## 长期问题

如何让固体正极在无需直接接触电极时选择性转化，并用可再生介体将回收与其他两极反应配对。

## 工作次序及其意义

2019 · E01 基于氧化还原靶向作用的废旧锂离子电池材料回收策略

将固体颗粒的脱锂与电极上的电子转移解耦，使固体可在外置储罐反应，奠定后来介体流动体系的关键思路。

2024 · E08 将铁氰化物/亚铁氰化物氧化还原介导的废LiFePO4回收与制氢耦合

把能耗问题从单一脱锂步骤扩展到两极反应匹配，讨论高价值副产物能否改善综合经济性。

2026 · E16 通过自驱动过程回收废锂离子电池材料并发电

把LFP与高价过渡金属正极视作互补反应物，使回收反应阶段可自发并输出少量电能；通过氢循环再生酸碱闭合物料，但闭路仍需外部电能。供料比例、实际利用率及全流程能源平衡是评价关键。

## 主要推进

以FeCN介体靶向回收LFP为起点，形成外置固体反应区、介体电再生、配对制氢及互补正极回收的连续问题谱系。

## 边界与尚缺证据

2026闭路氢循环再生耗电0.494 kWh/kg，回收反应发电不能证明全流程自供能。；2026主装置材料利用率约67%；不同实验的>95%不能合并。；核心实验以受控粉末/造粒材料为主，复杂杂质研究被作者留在范围之外。；外循环液体不等于持续固体进出。

## 项目、专利与企业联系

2024与HIT的Xiaohong Wu、Wei Qin等合作；该合作仅证明共同科研工作，不能据此判断中试或产业化。

身份与出处：DOI：10.1039/C9EE01478K；basis：作者署名与单位：Qing Wang、Xun Wang、NUS。；DOI：10.1002/anie.202318248；basis：Qing Wang、Wei Qin、Xiaohong Wu及NUS/HIT作者单位。；DOI：10.1038/s41467-026-69868-1；basis：Qing Wang、Xun Wang共同作者及原文引用2019工作。

# 16．Lihua He / Zhongwei Zhao / Zheng Li（中南大学及产业合作）

发表时机构：2019：Central South University为主要研究机构；2020 WMan：Central South University；2020 ACS：Central South University，另含Jiangsu Central South Lithium和Anhui Polytechnic University署名单位

## 长期问题

如何在悬浮废正极中实现电化学转化，并把离子迁移/膜分离连接到Li、Mn或Fe资源及LiOH产品。

## 工作次序及其意义

2019 · E02 通过浆料电解从废LiMn2O4中回收锂和锰

说明浆料电解并非近年的空白方向；锰系与铁系正极具有不同的配对氧化还原要求。

2020 · E03 采用阴离子交换膜浆料电解从废磷酸铁锂正极中选择性回收锂及磷酸铁/碳

将浆料电解扩展至LFP选择性脱锂，并连接残余FePO4/C的再利用。

2020 · E04 由废LiFePO4生产LiOH的绿色低成本方法

由“把锂浸出来”进一步转向直接制备LiOH，使膜分离与产品规格成为路线组成部分。

## 主要推进

提供早期浆料电解LMO、LFP选择性脱锂及电渗析制LiOH的连续证据，使研究对象由浸出扩展到锂产品制备。

## 边界与尚缺证据

本轮多数论文仅取得原始摘要，通量、面积、物料来源等NR是核验缺口。；未取得固体持续进出料证据。；不应与同属中南大学的Ji/Hou补锂团队混为一个实验室。

## 项目、专利与企业联系

2020 LiOH论文有企业署名单位；仅证明论文合作，未找到可据此确认的商业装置运行证据。

身份与出处：DOI：10.1021/acssuschemeng.9b04127；basis：Li/He/Zhao等作者署名。；DOI：10.1016/j.wasman.2020.03.017；basis：Li/He/Zhao共同作者及中南大学单位。；DOI：10.1021/acssuschemeng.0c04960；basis：Li/He共同作者及跨机构单位。

# 17．Haotian Wang / Zhiwei Fang / Yuge Feng（Rice，含Biswal及TotalEnergies合作）

发表时机构：2025 NCE：Rice University；2025 Joule：Rice University及TotalEnergies合作

## 长期问题

如何使电化学回收同时满足高纯制造原料、试剂循环、产品浓度和较长运行时间。

## 工作次序及其意义

2025 · E13 通过自循环电化学过程将锂离子电池正极材料回收为制造原料

电化学的主要价值是给湿法流程再生酸碱并产出可用LiOH，强调流程闭合而非仅降低单次浸出能耗。

2025 · E14 从废锂离子电池正极直接电化学回收锂以制备高纯氢氧化锂原料

把工业来源黑粉、千小时台架寿命、产物浓度及卷对卷引入同一研究，暴露“低电耗—高负载—浓产品—长期稳定”之间的权衡。

### 主要推进

一支以膜反应器再生酸碱并嵌入湿法闭路，另一支直接处理涂覆黑粉/极片形成LiOH；两者共同推动产品和系统边界评价。

### 边界与尚缺证据

NCE部分退役LCO为人工脱锂模拟样品；Joule的工业来源黑粉也仅证明该来源条件。；500/1000 h均不等于无维护固体连续产线；Joule总处理57 g且需要周期膜维护。；高LiOH浓度下效率损失明显。；NCE每轮约2%物料泄漏/转移损失，实验需额外补Li2SO4。；Joule真实退役黑粉与MTI/MSE新极片卷对卷是不同证据；不能称工业废旧整片连续验证。

### 项目、专利与企业联系

Joule与Sibani Lisa Biswal及TotalEnergies作者合作，并使用TotalEnergies提供的黑粉；企业供料与共同署名不等于装置商业部署。

身份与出处：DOI：10.1038/s44286-025-00186-x；basis：Haotian Wang、Zhiwei Fang、Yuge Feng署名及Rice单位。；DOI：10.1016/j.joule.2025.102197；basis：同名作者跨篇重叠；Biswal、TotalEnergies共同作者与原料说明。

## 18．Huayi Yin / Dihua Wang（东北大学—武汉大学合作谱系）

发表时机构：2020：Huayi Yin当时署名Northeastern University；Dihua Wang署名Wuhan University；2022：Wuhan University

### 长期问题

如何利用两极反应实现正极和其他组分的综合回收，并让分离、浸出与再利用形成较短流程。

### 工作次序及其意义

2020 · E05 在无隔膜熔盐电解池中通过配对电解回收废磷酸铁锂电池

展示电化学可以与高温过程组合，且配对利用两极，不能简单归入“湿法的替代路线”。

2022 · E06 通过阴极电解实现废旧锂离子电池的综合回收

把极片分离、金属浸出、铝回收及碳/黏结剂利用串成流程，适合研究“单元耦合是否真正减少步骤”。

### 主要推进

熔盐配对电解和水系整极片阴极还原浸出分别展示热—电化学、湿法—电化学的耦合；同时关注Fe、Al、碳/黏结剂等组分去向。

### 边界与尚缺证据

两篇使用不同介质和材料，不能按单一数字线性排名。；热耗、酸耗和后续材料制备应纳入全流程。；2022大极片依次处理仍为批式。

### 项目、专利与企业联系

2020体现东北大学与武汉大学合作；2022体现武汉大学相关作者延续。本轮没有以此确认产业化合作。

身份与出处：DOI：10.1039/D0GC01782E；basis：Yin/Wang及Qu共同作者；按2020论文署名单位。；DOI：10.1039/D2GC02118H；basis：Yin/Wang及Qu作者连续，武汉大学原文单位。

# 19. Annukka Santasalo-Aarnio / Neha Garg（Aalto及Turku/Uppsala合作）

发表时机构：2024：Aalto University与University of Turku合作；2026：Aalto University与Uppsala University合作

## 长期问题

如何在回收前充分放电，同时控制回弹、腐蚀、气体及电极材料损伤。

## 工作次序及其意义

2024 · E09 面向安全回收的强化锂离子电池电化学放电

把放电是否充分与电压回弹、壳体腐蚀和工艺操作联系起来，为后续研究材料完整性提供前处理基础。

2026 · E18 放电方式对锂离子电池回收中电极完整性的影响

从放电效率进一步转向“放电留下什么样的材料”，补足以电压为唯一前处理指标的不足。

## 主要推进

将介体浸没放电从电压和壳体行为研究扩展到NCA/负极材料完整性，建立前处理条件与后续材料价值的连接。

## 边界与尚缺证据

2026使用受控新NCA电芯，不能直接代表退役混批。；2 V是论文操作终点而非普适安全阈值。；不同处理时间及外部副产物须进入评价。

## 项目、专利与企业联系

2024含Pekka Peljo等Turku合作，2026含Daniel Brandell等Uppsala合作；仅确认学术合作。

身份与出处：DOI：10.1039/D4SE00125G；basis：Neha Garg第一作者、Annukka Santasalo-Aarnio等作者及单位。；DOI：10.1002/aenm.202505938；basis：Garg/Santasalo-Aarnio署名连续；参考文献41明确引用2024前作。

# 怎样判断研究继承与独立验证

明确引用表示后一篇把前一篇纳入研究背景，不等于复现实验；相同作者与相同问题支持持续研究轨迹，不必意味着直接派生；不同团队在相近工况得到相同机制证据，才更接近独立验证。当前资料库在“前后工作”字段分别记录这些关系。

## 已明确看到的引用链，与仅能称为研究轨迹的关系

实读参考文献或引言后可以确认：

1. D08的ref33引用D03，ref10引用D06：从常压/低温补锂到环境条件自发补锂的相关技术背景。

2. D10的ref7引用D08，ref8引用D06：异质料放大研究明确继承了这组补锂问题。

3. D19引言回顾本团队混合NMC111/LMO熔盐升级，ref18对应D07：后续方案从直接熔盐升级转向湿法耦合配平和富镍多晶。

4. D22方法直接指向D05作为工艺优化来源，同时引用D15说明热去胶问题；D23又引用D22与D10，连接百克正极黑粉、异质料批量与全干法分支。

5. D24原始引文同时纳入D07和D19，支持同一混合料升级研究线继续向回收正负极全电池延伸；D25引用D01，体现LCO修复与高压升级的关联。

这是引文关系与研究问题延续，不自动等于独立重复验证。UCSD六项工作、ORNL三项熔盐工作可以根据共同作者、机构和研究问题建立持续贡献轨迹，但未逐条核对的引用边不应画成确定的继承箭头。

# 电化学团队谱系的进一步分析

## 二、持续团队谱系：跟踪什么问题，而不仅记住谁发过高分论文

以下五个团队/合作网络均有至少两篇原始研究支撑。直接引用关系与“共同作者、共同问题”的连续性分开记录；未核实引用时，不绘制强因果箭头。成员单位随时间变化，也不能把后来的单位回填到早期论文。

### 1. Qing Wang（NUS）及HIT合作：以介体把固体回收与电极反应解耦

2019 EES建立FeCN介体LFP脱锂；2024 Angew与HIT的Xiaohong Wu、Wei Qin等合作，把介体回收与制氢配对；2026 Nature Communications把另一侧也变成正极回收反应，以LFP与NMC/LCO互补实现发电。三篇对应DOI为2019、2024、2026。2026明确在参考文献41引用2019，是较强的知识关系证据；2024与2019的具体引用尚未全文核查，应标为共享研究框架和作者的连续性。

该谱系适合按“介体的电位与反应选择性—固体反应速率—两侧反应平衡—介体与电解液循环”追踪。2026并不是简单把2019的99.8%提高，而是换成更复杂系统后暴露浓度和利用率权衡。阅读时尤其应把高浓进料下的利用率、介体衰减、杂质反应和物料配比独立列出。

### 2. Lihua He / Zhongwei Zhao / Zheng Li：浆料反应与锂产品制备

2019 LMO浆料电解、2020 LFP膜分隔浆料电解、2020 LiOH制备，构成材料对象与产品目标逐步扩展的明确研究群。原始论文分别为LMO、LFP、LiOH。与其笼统说“中南大学做电化学回收”，更有价值的是区分该群对浆料、膜、离子迁移和产品的持续关注。

这组文献是判断板框浆料设想究竟继承什么、还缺什么的必要前置证据。但目前没有从本组原始摘要得到连续进料/排渣证据。调研应追踪其后续是否解决高固含、电子接触、隔膜堵塞和长期维护，并记录结果是否从理想正极粉扩展到工业黑粉。不能因为另一篇同属中南大学就并入此团队；Ji/Hou/Deng的补锂工作应独立建节点。

### 3. Haotian Wang / Zhiwei Fang / Yuge Feng（Rice）：流程闭路与高纯产品

2025 NCE和Joule论文共享Haotian Wang、Zhiwei Fang、Yuge Feng等作者，后者还与Biswal、TotalEnergies合作。两篇不是同一装置的简单升级：前者重点是电化学再生酸碱、支撑湿法闭路；后者重点是固体直接脱锂、膜电极组件与高纯LiOH。NCE，Joule

该团队值得追踪的共同问题是如何从实验反应走向制造原料：溶液浓度、产物纯度、膜迁移、循环维护以及工业来源原料。NCE中模型退役料与Joule中工业黑粉的差别，500 h批次循环与1000 h周期更换的差别，都应明确。最有价值的阅读方式是画完整物料流，给每个循环标补充物料、排放和失效，而不是只摘录“自循环”“低电压”和“千小时”。

### 4. Huayi Yin / Dihua Wang：两极反应与组分综合利用

2020熔盐配对电解LFP和2022整极片阴极电解LCO等，共同体现利用电化学反应处理多组分的思路。2020，2022。前者结合高温，后者结合酸性浸出和材料分离；不能将团队概括为只研究某种低温提锂设备。2020年Huayi Yin与Dihua Wang的单位归属不同，合作谱系应按当时署名记录。

这一谱系适合用“除了锂之外，其余物质去了哪里”阅读。Fe、Fe3O4、FePO4、Al、碳/PVDF等产品对流程价值各不相同；综合回收并不自动等于所有组分都达到可销售规格。后续研究应检查产品质量、组分复用和累计物料平衡，而不只总浸出率。

## 5. Annukka Santasalo-Aarnio / Neha Garg（Aalto及合作）：放电如何影响后续回收

2024 Sustainable Energy & Fuels研究介体放电的回弹和腐蚀，2026 AEM研究NCA电极完整性，形成从操作有效性到材料后果的连续问题链。2024，2026。后者参考文献41明确引用前者，第一作者Garg与末位作者Santasalo-Aarnio连续；2026论文标示通讯人为Neha Garg，不能把资深/末位作者自动记作通讯作者。

这个谱系说明前处理研究的基准不能只有“放完用了多久”。还要问残余可释放能量、静置回弹、气体、壳体腐蚀，以及正负极化学状态如何影响后续分选、直接再生或浸出。不同化学体系和电芯结构需要分开记录。实验受控程度高有利于机制分析，但不应被误解为已覆盖复杂回收现场。

## 6. 新节点应保留，不应虚构为长期团队

本次还识别出WES的Chao Wang/Yunhui Huang/Ju Li等合作网络、Bing Deng/Dongbei Yue的剥离工作、Hui Xie等LFP过放工作、Wei Chen等NO2耦合工作、Zhao Fang等混合浆料工作，以及LLZTO膜与浆料补锂团队。它们值得追踪，但在当前证据集中每个只有一篇对应研究，不能仅凭一次高水平发表宣称“持续领军团队”。后续团队检索应从对应作者机构主页、原始论文参考文献与被引文献补充第二篇以上研究，再讨论持续方向。

# 单篇前沿节点与转化证据边界

本轮还纳入Freiberg高压提锂、KIT跨体系机械化学、气泡剥离、NO 耦合、LFP深度过放等前沿节点。它们的原始研究卡片已完整保留，但不因一次发表就推断为多年持续的团队线。这里限制的是本次取得的谱系证据，不能理解为这些团队没有其他成果。

专利申请、授权、许可、合作研发、企业供料、中试运行与工厂产销是不同证据。WPI官方披露了许可和创业历史；一些论文只披露共同作者、企业经费、原料或专利申请。报告只保留已核层级，未用企业名字替代实施证明。

WPI技术许可与创业历史的机构报道

## 对当前调研阶段的意义

先建立团队与问题的关联，再比较同一问题如何被不同路线解决，可以减少重复检索和对热点单篇的依赖。这里的结果足以支撑与导师、师姐讨论技术成熟度、重要证据和瓶颈位置；不以马上开展实验或锁定唯一方向作为调研终点。