废旧锂电池资源回收

技术路线与关键研究

第一部分 | 跨综述索引、原始研究、发展时间线与性能边界

技术路线总图：按过程与产品组织

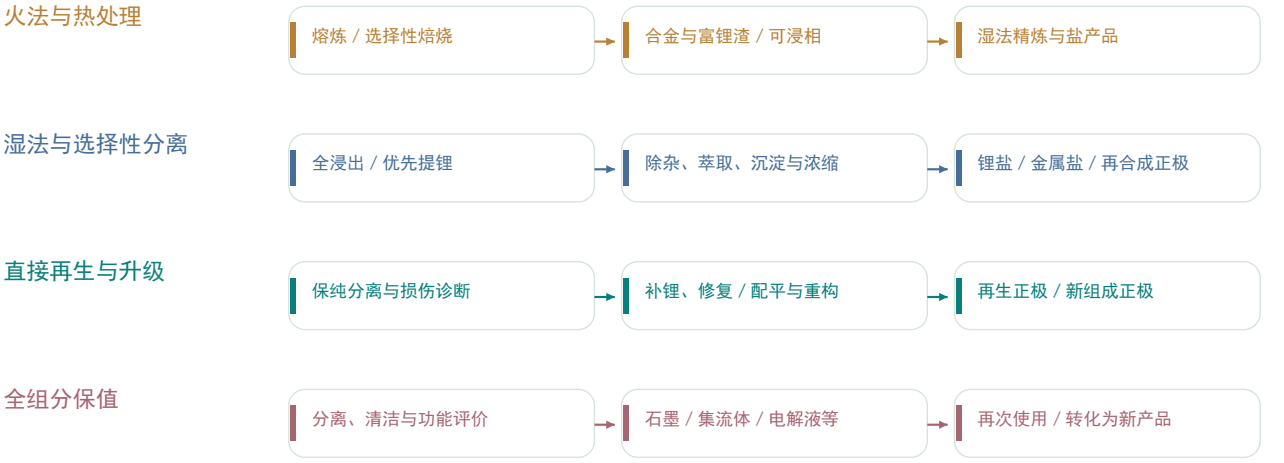
方法可以组合；同一产品目标可以通过不同反应路径实现。

整电芯 / 整极片
先判断电安全与可拆解性

制造边角料 / 分选正极粉
材料信息较清楚，仍需验杂

退役混合黑粉
来源、组分和热历史决定路线

共同入口：安全放电、拆解、剥离与分选；前处理决定后续杂质和可保留结构。



电化学可以跨环节介入
放电与剥离 · 脱锂与浸出 · 酸碱及介体再生 · 分离与成品制备 · 补锂修复

注：升级回收是产品目标；溶剂、生物与机械化学是可嵌入流程的反应手段。

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。

废旧锂电池资源回收学术调研 4

主要认识 . . . 4

检索与证据组织 . . . 4

怎样使用跨综述引用重合 . . . 5

分类与术语对照 . . . 5

各路线都必须回答的六个问题 . . . 5

全组分回收补充分析 . . . 6

对原始证据的阅读结论 . . . 6

技术关系与里程碑总览 7

跨综述阅读：分类、重合与证据 9

跨综述引用重合样本 . . . 10

火法、湿法及交叉分支 11

直接再生与升级回收 14

电化学、前处理与系统评价 19

跨路线问题与研究判断 23

直接再生与升级的问题证据矩阵 25

附录：原始研究证据卡片 28

前处理与分选 . . . 28

火法与热处理 . . . 35

湿法与选择性提锂 . . . 39

溶剂冶金 . . . 49

生物浸出 . . . 50

直接再生 . . . 51

升级回收 . . . 58

电化学与耦合 . . . 62

石墨回收 67
电解液与聚合物回收 69
集流体回收 70
技术经济与环境评价 71
资料使用与核查说明 73

废旧锂电池资源回收学术调研

调研截止日期 2026年11月4日

本报告回答两个相互关联、分别展开的问题。第一部分研究技术分支怎样形成，哪些原始工作改变了研究方式，当前证据能够支持怎样的性能和规模；第二部分研究哪些团队围绕同一问题持续推进，工作之间怎样衔接，哪些跨机构协作具有明确出处。范围包含磷酸铁锂、钴酸锂、三元和其他锂离子电池材料，覆盖前处理、火法、湿法、生物浸出、直接再生、升级回收、电化学和全组分回收。梯次利用仅作为进入材料回收前的边界，不展开运行寿命预测；盐湖直接提锂不作为废电池回收证据。

主要认识

回收技术的发展具有并行和组合特征。火法通过相分配和后续精炼回收元素，湿法通过溶解、分离和再合成组织产品，直接再生保留可用结构并修复缺陷，升级回收改变组成、结构或用途。电化学可驱动脱锂、还原浸出、分离、试剂再生和补锂，因此不是只与其他路线并列的一种孤立选择。

评价技术应同时看三个层次。材料层面看原料和反应机制；工艺层面看前处理、主反应、分离及产品形成能否连接；验证层面看真实原料、处理质量、运行方式和产品测试。某一层取得进展不自动表示另外两层已经完成。高浸出率、低起始电压和长时间循环各有意义，但必须回到同一实验工况才能组合为性能结论。

本轮检索已发现以百升级反应器和几十千克批量开展的研究，旧综述中“尚停留于实验室”的判断需要按路线和年份更新。然而，工程放大证据也不等于商业稳定运行证明。设备容积、每批进料质量、材料利用率和最终合格产品收率必须分别记录。

研究问题的重心正在从“能否把金属浸出来”扩展到“能否在原料波动下以较少损失和负担得到可用产品”。主要变化包括：选择性替代全溶解、保留结构价值、简化分离、循环试剂、真实混合料适应，以及把石墨、集流体、电解液和聚合物纳入物料平衡。发展线并非单向替代，不应预设某一方法对所有进料都优越。

检索与证据组织

采用范围性证据梳理并对关键节点深挖。以用户提供的2025年综述为起点，与2019年Nature综合综述、2023年跨机构路线图、2024年材料供应与回收综述，以及各分支综述交叉阅读。随后追溯原始论文和可获取补充材料，并向后寻找明确引用、技术承接、独立验证或放大的工作。原始研究数据优先于综述转述；出版网页、作者机构库和公开全文用于核实题名、年份、DOI与机构。

这是一份有明确截止日期的主题调研，不冒充覆盖全部数据库的系统综述或文献计量统计。没有以期刊影响因子作为排除条件。不能获取完整正文的论文仍可作为发展节点，但其摘要数据不用于填补方法条件；资料库逐篇标出访问与核查层级。“未核”表示本次未完成该具体证据核查，“未报告”仅在已读部分确实未报告时使用。二者均不解释为方法无效或没有商业应用。

团队条目采用论文发表时的机构与共同作者证据。不同中文译名、同名学者及跨校合作分别处理；两篇连续工作可以支持研究谱系，但不会由此推断全职任职、专利归属或企业实施。只有一篇明确工作的新节点单独标记，不包装成持续领军团队。

怎样使用跨综述引用重合

本报告另附八个原始研究节点的引用重合样本。每个勾选都有已核综述及PDF页码，主要用于识别值得精读的研究，而不是计算全领域重要性。2025年综述与2023年路线图共同涉及2018年钴酸锂修复、2020年磷酸铁锂靶向修复、2014年闭环再合成和2021年超声剥离等工作；2019年综述与2023年路线图共同引用2012年流程开发工作。早期综述不可能引用晚于其发表的研究，因此不能用出现次数惩罚新工作。

“同一团队后续工作”“论文明确引用前作”“同一问题上的独立发展”是三种不同关系。平台和章节尽量写出关系类型。若只有主题相似，没有看见直接引用，不把连线写成已证明的引用关系。

分类与术语对照

黑粉是经破碎分选后得到的粉体原料，组成取决于电池体系和前处理；不等同纯正极粉。制造边角料、实验室老化材料、市场采购退役正极粉和来自真实工厂的混合黑粉分别登记。

火法冶金利用高温反应和相分配回收组分。热解脱胶、还原焙烧和熔炼并非同一过程。不能把所有加热步骤都当作熔炼，也不能因为存在热处理就否定一条路线属于直接再生。

湿法冶金以液相中的溶解与分离为主体。浸出是把目标组分从固体转移到液体；提纯、沉淀、结晶与再合成是后续步骤。全浸出与选择性浸出具有不同分离负担。

直接再生重点在于保留材料可用结构，补偿组分损失并修复缺陷。补锂只是可能步骤之一。升级回收还涉及组成、形貌、晶体结构或用途变化；性能提高、回收料占比和经济增值分别评价。

氧化还原介体是可反复接受或释放电子、连接固体反应与电极反应的物质。颗粒留在外部反应罐而介体循环，与固体浆料穿过电解槽，属于不同反应器架构。

浸出率通常针对目标元素进入溶液的比例；最终产品回收率针对进入合格产品的比例；纯度针对产品中目标物质的含量；回收料利用率针对新材料中再生来源组分的占比。这四类百分比不能互换。

电流效率衡量通过电荷中有多少用于目标反应。起始电压不等于目标电流密度下的工作电压。材料比容量、倍率和容量保持率必须同时记录测试电池形式、负载量、循环次数及是否另加补锂剂。

技术经济分析是利用物料、能量、设备和价格假设估算成本；生命周期评价是按给定功能单位与系统边界评价环境影响。模型结果不自动等于运行实测。功能单位说明“为多少产品或服务核算”，系统边界说明“从哪个环节算到哪个环节”。

各路线都必须回答的六个问题

一是原料适配：组成、老化状态、杂质与批次是否清楚。二是机制证据：反应、相变或电子转移如何被证明。三是物料去向：锂、过渡金属、铁磷、碳、铜铝、氟等去了哪里。四是产品资格：是否只是元素进入溶液，还是已经得到可再使用的产品。五是工程能力：处理量、运行时长和固体进出方式是什么。六是总负担：试剂、水、电、热、分离、废物和设备损耗是否完整统计。

常被反复提出的困难可归纳为原料异质性、前处理污染、产物质量和批次一致性、后端浓缩分离负担、反应器放大、辅助材料循环与全流程评价。这些是本轮证据的综合归纳，不表示每个困难在所有路线中都同样严重。下面各技术章节会说明其具体表现和相应原始研究。

全组分回收补充分析

石墨回收已经形成独立的研究问题。2016年Rothermel等将回收石墨的电化学再使用纳入验证；2019年Ma等从湿法残渣继续去杂获得可用石墨；2023卷期Chen等利用闪速焦耳热处理回收负极。三者代表的任务分别偏向再使用证明、与湿法主流程衔接和快速热过程。石墨指标不应只看比容量，还应看初始效率、杂质、粒度、压实、全电池验证和循环负担。[C01][C02][C03]

集流体直接再利用与熔炼后再制箔是不同价值保留方式。2023年Zhu等用真实退役日产Leaf电芯研究铝铜箔。材料清洁后能否复用取决于表面组成、形貌、润湿与接触电阻；铝箔与铜箔的高倍率表现不同。这说明“看起来干净”不等于功能完全等同新箔，箔材评价需要进入新电极中的对照验证。[C04]

电解液回收可以走完整萃取、净化复配或向新添加剂转化等路径。2015年Grützke等研究二氧化碳流通式萃取；2024卷期Wang等研究低质量回收LiPF6的转化。后者净化后仍不满足直接复用要求，因而转向添加剂制备，且报道的提取比例有限。其价值是证明可利用路径，而不是证明电解液已被高比例闭环回收。[C06][C10]

黏结剂与隔膜既影响前处理，也可能成为产品。2021年Fu等的超临界萃取联系了脱胶与黏结剂回收；2020年Natarajan等提出隔膜再生节点。隔膜尤其需要考虑孔结构、机械完整性和热行为，不能用外观恢复替代功能验证。对这些支线，本库保留证据不足的位置，避免把研究方向的存在当成规模可行性的结论。[C05][C07]

超声剥离为直接回收提供了材料分离入口。2021年Lei等展示界面空化驱动的流动剥离；2025年Yamada等在水中处理制造废料，报告高分离率和低铝杂质。它们支持分离单元的推进，但原料类型不同，且都不能仅凭剥离数据推定全流程提锂或再生已经连续化。[C08][C09]

对原始证据的阅读结论

本轮不提出必须开展的实验课题，也不预设电化学必然优于其他方法。调研的可用成果是：哪些任务已有可靠解决方法、哪些条件仍未被验证、哪些性能可以比较、哪些团队已有连续积累。阅读某条路线时，应先确认它的产品与边界，再沿其关键工作和团队谱系展开。平台中的筛选、比较和批注功能服务于这个过程。

技术关系与里程碑总览

关键工作时间线：并行演进，分别跨越不同瓶颈

各行按代表事件先后排列；横向间距不表示实际时间长度，也不宣称绝对首次。

湿法与产品	1998 含钴锂材料浸出	2010—2012 有机酸反应设计	2013—2014 混合液配平再合成	2023 实际黑粉选择性	2026 百升级高压验证
热法与相设计	2012 机械—火湿联用	2016—2019 碳热与价态控制	2020 富锂渣与消解配套	2021—2024 前置提锂与放大	2026 百千克炉内验证
修复与升级	2014 磷酸铁锂功能恢复	2018—2020 结构与缺陷修复	2022—2023 混合料与高压升级	2024 低温补锂与异质料	2026 五十千克批次验证
电化学与耦合	2005 浸出后电积制金属	2019—2020 介体与浆料电解	2022—2024 整极片与反应配对	2025 试剂循环与膜电极	2026 互补材料与低电压
非正极组分	2015 电解液流通式萃取	2016—2019 石墨去杂与再使用	2021 超声剥离与脱胶	2023—2024 箔材复用与盐转化	2026 回收正负极全电池

对应原始论文和工况见资料库；不同路线没有用同一个百分数表示进步。

所列事件为本轮核实的代表节点，详细DOI见相关章节和附录。

放大与性能：四种证据不能合并成一张“最高值”

每个节点只保留其实际支持的尺度；成品资格与持续运行仍需独立验证。

研究节点	已验证尺度	可支持的结论	不能据此推断
2024 前置提锂	100升反应器	完成批次放大；几何条件影响提取	实验室最优比例就是放大值
2026 高压提锂	200升反应器	高液固比条件下高浸出；有盐产品	高浸出率等于高最终收率
2026 炉内相设计	128千克黑粉	百千克进料与渣内锂相调控	渣内富集等于成品锂盐回收
2026 直接再生	50千克每批	该批软包400次保持93. 7%	最大批量同时达到最佳长循环
2025 膜电极回收	20平方厘米电极	1000小时累计57克，含换料维护	已实现黑粉浆料连续进出料

来源：对应原始论文与补充材料核查；详细数值、分母、设备边界见报告基准表。

图中为不同维度的放大证据，数值条件与核算边界见各章表格。

跨综述阅读：分类、重合与证据

综合综述用来检查目录是否遗漏，分支综述用来辨认机制和争议，经济环境综述用来界定比较方式。本表逐条标明实际取得的证据。

编号 / 年份	综述题名与作用	核查状态
R01 / 2019	电动汽车锂离子电池的回收 全链条、拆解、机械分离与冶金路线	全文及参考文献
R02 / 2020	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	出版社题录及摘要
R03 / 2023	锂离子及未来电池可持续循环经济路线图 多专题：设计、分离、冶金、再生、系统评价	全文及参考文献
R04 / 2024	锂离子电池回收的材料供应和政策基础 供应链与回收路线、直接与间接路线划分	全文及参考文献
R05 / 2025	锂离子电池回收的演进 前处理、既有冶金、直接和升级回收、全组分与系统评价	用户提供全文，20页
R06 / 2024	面向可持续未来的废旧锂离子电池回收进展 直接、火法、湿法、生物与电冶金五分法；主体覆盖2013 – 2022	出版社摘要及检索到的正文段落；完整全文下载受限
R07 / 2024	锂离子电池回收生命周期评价综述 比较边界、功能单位和替代产品假设差异	原始摘要
HPR1 / 2020	锂离子电池及其他电池湿法与直接回收的进展和现状 区分完全溶解、选择性湿法和直接再生；早期流程发展与原始引用入口	fulltext
HPR3 / 2021	废旧锂离子电池火法回收方案综述 把热前处理与提取冶金分开，适合作为火法分支目录	abstract
DR01 / 2023	锂离子电池直接回收技术的基础、现状与挑战 直接回收机理、类型与挑战	原始题录和后续原始论文参考文献核实；本次完整全文未取得
DR02 / 2024	迈向废旧锂离子电池直接再生：新一代回收方法 直接再生的机理、方法与发展	原始题录及摘要；D10参考文献4核实
DR03 / 2024	废旧三元正极直接回收的研究进展 NMC恢复组分和结构，水热与离子热路线	ORNL原始成果库及摘要
DR04 / 2026	锂离子电池材料的直接回收：分离与再生 将分离、再生、升级与工艺集成置于同一框架	出版社摘要与检索可读的正文表格片段；完整网页403
ER01 / 2023	电化学方法对锂离子电池回收与再生路径的贡献 作为按单元操作定位文献的入口，避免只检索“electrochemical lithium extraction”漏掉前处理、分离与再生。	R：综述原文页面/元数据
ER02 / 2025	可持续磷酸铁锂电池湿法回收：电化学方法 从湿法流程内理解电化学的作用，并帮助寻找2020年前后的浆料电解原始论文。	R：完整原文10页

编号 / 年份	综述题名与作用	核查状态
ER03 / 2021	用于材料回收的电化学方法 补足电积等早期历史，防止把近年新名称误当整个电化学回收领域起点。	R：RSC完整网页/元数据

跨综述引用重合样本

以下八个节点在已读综合文献的参考文献表中定位。页码按下载PDF计数；引用重合用于发现关键工作，不是全领域文献计量排名。R01为2019 Nature，R03为2023路线图，R04为2024亚洲材料综述，R05为用户提供的2025综述。未定位不等于没有引用。

原始研究节点	已定位综述及PDF页码	DOI
湿法闭环再合成	R03第92页；R05第19页	10.1016/j.jpowsour.2014.03.126
混合正极回收	R01第11页；R03第92页；R05第19页	10.1039/C3GC40182K
LCO直接修复	R03第88页；R05第18页	10.1039/C7GC02831H
NCM缺陷修复	R01第12页；R05第18页	10.1021/acsenergylett.8b00833
LFP靶向修复	R03第92页；R05第18页	10.1016/j.joule.2020.10.008
超声剥离	R03第90页；R05第17页	10.1039/D1GC01623G
火湿法流程开发	R01第11页；R03第92页	10.1016/j.jpowsour.2012.01.152
不同回收流程评价	R01第12页；R03第95页	10.1038/s41893-019-0222-5

火法、湿法及交叉分支

检索截止 2026 年 11 月 4 日。本部分对应 25 篇原始论文、3 篇分支/综合综述及 6 条有系列原始工作证据的团队线。文献卡片见配套可视化资料库。它是经核实的代表性研究谱系，不把穷尽全部论文、数据库引用计量或 SI 全覆盖冒充已经完成。原文可访问程度逐篇标明；读到摘要和方法片段的文献与完整原文分开记录。

第一部分：路线的发展逻辑与已达到的水平

1. 分类时最容易混淆的四组概念

湿法不是“用酸泡”一个步骤。 浸出把元素从固体转移到溶液；分离纯化把目标离子与杂质分开；沉淀、结晶或电化学转化才形成可出售产品。三者可以有不同的回收率和成本。选择性湿法的重点则是“只让希望进入液相的元素进入”，不是全部溶解得更快。

热前处理、选择性焙烧、熔炼是不同单元。 热前处理主要服务于电解液、粘结剂和组分解离；选择性焙烧主动改变含锂相及金属价态，便于水浸或磁选；熔炼形成金属/合金与炉渣。把凡是加热都叫“火法”，会掩盖某篇研究真正替代或新增的步骤。2021 年 Makuza 等的火法综述可用于搭建这层目录，但其中产业状态不能外推为 2026 年状态。火法综述

机械化学是一种反应驱动方式，不必与湿法并列为排他类别。 球磨可提供接触、缺陷与局部反应驱动力，后面常常仍需水浸、过滤及盐产品制备。同样，深共熔溶剂是介质设计，微生物是浸出剂或氧化还原条件的生成途径；它们都必须回到完整流程中比较。

回收与再生不是以“有没有酸/热”为唯一分界。 完全溶解再合成、保留部分框架的选择性脱锂、完整晶体修复的结构保存程度不同。2020 年 Larouche 等综述把选择性湿法放在完全破坏与直接修复之间，适合建立这一概念轴；作者的雷达图也含主观尺度，不宜读成客观排行榜。分类依据

2. 传统湿法：从“浸得出来”到“分得干净、循环得起来”

1998 年 Zhang 等已系统研究废旧锂电池含钴锂材料的浸出与回收，是本次核实的早期原始节点。2009 年 Ferreira 等把铜的拆解分离、NaOH 除铝、硫酸/过氧化氢浸出及钴盐结晶连成流程，说明“先去掉什么”早已是湿法核心问题，而非近年的新概念。不能由早期单一材料的成功，直接推断今日混合黑粉的流程适应性。1998 原文00050-9)；2009 原文

北理工 2010 年柠檬酸工作代表有机酸路线：在 1.25 mol/L 柠檬酸、1 vol% H O 、20 g/L、90° C、30 min 下，钴浸出超过 90%、锂接近 100%。2012 年抗坏血酸工作继续探索有机分子的酸性、络合及氧化还原作用。真正的推进不是换一种“绿色名称”的酸，而是设计溶解路径并减少不必要消耗。温度、低固含、配体生产、下游除有机物与回用都可能改变环境结论。柠檬酸；抗坏血酸

这条线的成熟问题已从单个金属能否高比例浸出，转向完整物料账本：高固含的酸和还原剂需求、Al/Cu/F/P 的去向、共沉淀损失、母液盐累积以及产品纯度。对于导师关心的真实问题，能解释“为什么某批黑粉必须额外除铝、为什么锂在除杂中损失”往往比再提高一个理想粉体的浸出百分数更有价值。此处是本报告依据前述流程作出的分析，不是对行业当前全部工艺的统计结论。

3. 前置提锂：相同目标下存在不同化学机制

LFP 的选择性提锂与 NMC/LCO 不能简单套用同一反应。清华 2019 年研究机械化学同晶置换，2021 年研究过硫酸钠促进固相氧化，在保留铁磷骨架的同时释放锂。后者 600 rpm 球磨 5 min、Na S O :LFP 质量比 2:1 时报告 99.7% 提锂；后续得到的是 Li PO 。这里“5 min”“无强酸”“99.7%”分别描述时间片段、药剂特征和提取率，不能合并为五分钟得到电池级碳酸锂的结论。置换；固相氧化

在真实电动汽车黑粉上，Chalmers 2023 年草酸路线把选择性向实际原料推进：0.6 mol/L、50 g/L、60° C、60 min 时，锂浸出 98.8%，Co/Ni 各低于 0.5%，Mn 为 1.5%。但铝也进入溶液；所得液相 Li 为 1.7±0.1 g/L、Al 为 0.60±0.01 g/L。因此它解决的是锂与主要过渡金属的分流，除铝、富集和成品制备仍是后续任务。高选择性需要明确“相对于谁”。原文及全文

KIT 2023 年机械化学论文覆盖多种正极和混合料，且用最终 Li CO 质量计算锂收率，最高为约 70%。这个数字应与其他工作的最终产品收率比较，不能直接输给“99% 浸出率”。更有意义的是材料依赖：两种流程得到的 NMC 产品纯度为 99.92%/99.88%，LFP 则为 93.10%/71.81%。反应可发生在多类材料上，并不保证每类材料均能得到同等级产品。原文表 1 与方法

4. CO□ 辅助前置回收：放大揭示的限制比最高浸出率更关键

RWTH 2021 年研究热条件化黑粉、超临界 CO 与水浸，报告最高约 79% 提锂。2024 年另一工作探索常压 CO 辅助路线，但其黑粉上游已经历 600° C 真空热解和细磨；不能仅把浸出釜常压运行当成全流程温和。路线演变的一个方向是减轻高压设备负担，另一方向是继续高压路径以提高提取能力。2021；2024 常压

2024 年 100 L 放大研究尤其值得精读：实验室优化验证得 70.52±2.11% 锂提取率，但放大后因几何相似性不足而下降。这是“实验室最优工况不自动等于工程最优”的直接证据，不能把实验室的百分数挂到 100 L 装置上。其研究价值在于明确反应器设计是独立问题。100 L 原文

2026 年 Freiberg 等的 COOL 工艺进入 200 L 高压釜、kg 级实际黑粉：250° C、100 bar、2 h、液固比 L:S=120 的实验最高约 97% 锂浸出，并在后处理获得 99.82 – 99.97% 纯度的 Li CO 。另一次把液固比降至 60、延时至 4 h 的实验仅浸出 83%，暴露回收率与吞吐量的矛盾。它仍为间歇过程；LiF 可被算进浸出锂，却不全部成为碳酸锂，长时间电渗析还会出现多价杂质穿透。最高浸出率没有同时解决成品收率和生产强度。200 L 原文

5. 火湿联用：从钴镍合金转向锂相设计与真实炉渣处理

RWTH、ACCUREC 等 2012 年工艺论文已经将机械、湿法与电弧炉碳热过程组合。随后 2016 年无氧焙烧/湿磁选、2019 年真空碳热路线展示利用石墨参与还原及调控 Co/CoO 产品。这些工作提示，黑粉中的碳和集流体金属可能既是杂质，也可能是反应资源；但是原料比例波动会改变还原程度与后端产品，不能只计算“节省了外加还原剂”。组合工艺；无氧焙烧；真空路线

2020 年两篇配套研究分别处理电弧炉富锂渣的产生和下游消解。第一篇报告 Li 向渣中富集的比例 82.4%；第二篇针对硅胶造成的固液分离困难，用干式消解降低硅进入溶液的比例。这是一个完整的前后因果链：设计“含锂的渣”还不够，还要设计“容易从中取出锂的渣”。第一部分；第二部分

2026 年人工矿物工程研究采用 300 L 顶吹回转炉，处理 128 kg 黑粉，并报告两个整电芯试验合计 186.4 kg。受控冷却形成 γ-LiAlO 富锂矿物，整电芯路线约 76%的渣内锂存在于该相，黑粉路线约 44%。这不是总锂回收率，更不是成品盐收率。黑粉装料和处理共 6.9 h，能耗约 8.5 kWh/kg黑粉，或 5.4 kWh/kg含添加剂总投料；原文另列预热和清炉消耗，不能用这个数字代表全厂能耗。研究还记录送料问题，说明规模化论文应允许工程负面结果进入。百千克验证

6. 溶剂冶金：从替换介质到集成分离

Rice 2019 年深共熔溶剂论文代表非水介质的一条重要入口。深共熔溶剂是混合后熔点显著降低的溶剂体系，其离子配位和还原环境不同于水。KU Leuven 2020 年不仅浸出，还研究萃取与反萃；2022 年进一步用酸性萃取剂 D2EHPA 直接浸出，利用铜参与还原并考察五次复用。推进重点是把浸出与分离设计在一起。2019；2020；2022

这条分支要特别留意模型物料。2022 年工作使用购买的 LCO 与 Al/Cu 粉，不能自动代表真实混合黑粉中电解液、碳、氟与老化产物的影响。溶剂黏度、含水量、金属载量、再生损耗和降解决定其工程竞争力；“非水”“低挥发”“可复用五次”各自都不是完整环境评价。

7. 生物浸出：高固含比“有细菌参与”更有辨识度

2008 年 Mishra 等使用氧化亚铁硫杆菌研究含 LCO 废电池浸出，微生物通过硫和铁代谢产生酸及氧化还原介质。这个分支不等于不使用酸，也并非所有反应都需要细胞直接接触电极。金属毒性、固体耗酸和培养过程会限制处理强度。早期原始研究

NTU 2021 年系列研究推进到 100 g/L：混合黑粉在 72 h 报告 Co 94%、Li 60.3%；另一篇 NMC 工作同样在 100 g/L、72 h，得到 Ni 90%、Mn 92%、Co 82%、Li 89%，并使用三个培养液补充循环。两篇原料与体系不同，不能拼成一组“所有金属最佳值”。其关键问题已经变成供酸/供铁、培养液补充和高固含稳定性；72 h 之外的培养时间与补液总量必须计入通量和成本。混合黑粉；NMC

8. 可以直接放进综述证据表的比较边界

节点	真实达到的指标	必须一并记录的边界
2010 柠檬酸	Co >90%、Li 约100%浸出	20 g/L、90° C；不含最终盐制备
2021 LFP 固相氧化	99.7%提锂	球磨5 min；过硫酸钠:LFP=2:1；最终目标为磷酸锂
2023 草酸	Li98.8%，Co/Ni各<0.5%浸出	真实黑粉、50 g/L；Al仍共浸
2023 机械化学	最高约70%终端锂回收	以最终碳酸锂计算；不同材料纯度差异大
2024 100 L	完成百升级批次放大	实验室70.52±2.11%不能移作放大值；放大反而下降
2026 200 L COOL	最高97%浸出；碳酸锂纯度99.82–99.97%	间歇、高温高压、L:S=120；LiF使浸出与成品收率不一致
2026 300 L熔炼	128 kg黑粉；约99%Cu/Ni/Co还原	还原、渣内赋存、盐产品回收是三个不同指标
2021 NMC生物浸出	100 g/L、72 h、多金属82–92%浸出	三个培养液补充循环；未证明连续中试

表中数字的原文及条件见上述对应链接与 JSON 指标字段。没有在这张表中排序“最好路线”：决定排序所需的共同原料、共同功能单位和共同系统边界目前并不齐全。

直接再生与升级回收

检索截止：2026年11月4日。配套数据为 direct_upcycle.json，包含28篇原始研究、4篇分支综述、6个连续工作团队/合作节点。范围同时纳入与升级回收连续发展的湿法再合成。全文、补充材料、摘要和题录分别标注；没有取得的实验细节不从二手综述猜填。本文的“尚未核实”指本次证据获取范围，不代表论文没有提供。

1. 先把三个经常混在一起的概念拆开

直接再生的核心是保留已有活性材料的部分结构与制造价值，修复后再次作为电池材料。它并不要求整张电极不被拆散，也不等于完全不发生局部相变。清洁的正极粉末可以是直接再生的原料；“黑粉”与“直接回收”不是天然互斥。真正的边界是材料是否大体保留其功能骨架，还是被分解成盐后重新合成。

升级回收以产品能力或组成升级为目标，可以通过直接修复、熔盐重构、湿法溶解再合成或其组合实现。低镍转高镍、多晶转单晶、LFP/LMO混合料转LFMP均属于这一层，但各自保留原结构的程度不同。因此，“直接/湿法/火法”描述工艺机制，“修复/升级”描述产品目标，二者不应放在同一层当成互斥分类。

跨用途利用把材料转成催化剂等其他产品。催化性能改善证明功能可用，尚不能证明单位废料的经济收益更高；还要核算需求规模、产品标准、回收锂之外残渣的全部去向。2026年的机械化学—CO 耦合论文就是应同时评价资源回收与催化出口的实例。D11

可用于整个调研平台的正交标签为：**原料形态—化学体系—损伤/杂质类型—反应机制—产物用途—验证级别**。例如，D10可标为“市场异质黑粉—NCM523—缺锂/老化差异—液相预处理+热修复—原组成正极—50kg间歇批次+软包”，不应笼统标成“所有黑粉工业回收”。

2. 综述提供的目录及其证据边界

综述	最适合提取的内容	本次取得的证据
2023 CSR, Fundamentals, status and challenges…, DOI	直接回收的基础机制、方法分类、共性障碍	题录及后续原始研究引用；未取得完整全文，不能据此声称逐篇交叉引文已核
2024 Chemical Reviews, Toward Direct Regeneration…, DOI	缺陷、再生策略及直接再生整体框架	题录/摘要及原始论文参考文献核对
2024 ESM, Progress in direct recycling of spent NMC cathodes, DOI	三元材料的水热、离子热与结构修复路线	ORNL原始成果库与摘要
2026 JMCA, Direct recycling… separation and regeneration, DOI	将前端分离与后端修复连接，避免只谈补锂	出版社摘要与可检索正文表格片段；整页访问受限

这四篇可作分支目录，但不能替代原始研究。已有证据支持的交叉问题是：原料分离、结构恢复、产物可用性和流程集成必须联合评价；并不意味着每篇综述对每个观点都持相同判断。跨综述的“反复出现论文”统计应以实际参考文献表为依据，与主报告的综合综述引用审计合并。

3. 技术路线的发展，不是单一回收率不断上涨

3.1 从“补锂可恢复功能”走向“诊断缺陷再修复”

2014年Ganter等已经用循环至寿命终止的商业LFP电芯讨论化学/电化学补锂和功能恢复。因此不能把2018年的高影响力工作写成直接再生的绝对起点。D21

2018年UCSD研究分别处理LCO和NCM，将锂含量恢复与结构缺陷修复联系起来；2019年推进到常压共熔补锂。这里改变的是反应介质和设备约束，而不是彻底取消热过程。D01、D02、D03

2020年LFP“靶向修复”把缺锂和Fe占据Li位点的反位缺陷一起处理。后者会阻挡锂离子的扩散通道，解释了为何仅测Li/Fe比例恢复还不够。其原料是实验室长期循环的商业电芯，具备电芯级老化真实性，但与来源未知、成分混杂的市场黑粉不同。D04

2021—2022年UCSD连续工作进一步处理经济与温压约束：降低昂贵LiOH份额、回用溶液，以及引入氧化还原介质降低补锂温度。这里值得借鉴的研究逻辑是，先用可控原料解释机理，再修改工艺中真正昂贵或危险的步骤；不能只把温度更低作为完整工艺更优的证据。D05、D06

3.2 从同组成恢复，走向同时改变组成和形貌

应先补上WPI更早的湿法再合成谱系：2013年Zou等从混合未使用正极粉末出发，探索回收组分再合成；2014年Gratz等处理实际回收废电池，采用浸出后调配Ni/Mn/Co、共沉淀和锂化烧结。后一研究的真实电池以LCO为主，另一个混合实验是向碎料中添加其他体系粉末，不能称全部为真实混杂退役料。其贡献是避免把相近金属全部拆成单一纯盐后才制造产品，**并非保存原正极晶体**。D26、D27

2021年Ma等将这一再合成NMC111路线推向1Ah电芯与微结构机制研究，分别报告达到80%和70%保持率的4200和11600次循环。结果挑战“回收来源材料必然性能较差”的假设，却不能证明原晶体修复路线也自然获得同样寿命，更不能跨条件宣称目前最高纪录。D28

ORNL的研究线从离子热补锂NCM111发展到三元熔盐中的富镍升级，再处理退化富镍正极本身。其共同问题是介质如何提高离子输运和结构重构效率；修复与升级不是两套完全割裂的反应工具。D12、D13、D14

WPI在2022年将混合贫镍多晶料转为富镍单晶材料，试图同时解决旧组成不匹配市场、晶界损伤和分选负担；2025年进一步用升级湿法与传统湿法衔接，通过回收Ni盐配平，得到富镍多晶产品并验证Ah级电芯。这一变化说明：单晶不是所有升级路线的必然终点，保留原结构也不是处理混合料的唯一合理方式。D07、D19

2024年LFP/LMO混合废料转为LFMP提供了另一种升级方向：利用原料之间的元素互补，重新构造更高电压材料。但这项工作有溶解和再合成，应写成“混合料升级”，不能因产品仍是正极就自动归为严格保晶的直接再生。D09

LCO也不只是恢复原容量：2023年同一协作网络利用废LCO的锂空位促进Al/Mg进入材料，朝高截止电压稳定性升级。这与低镍改高镍不是同一产品逻辑，提醒调研不能只按某一种三元材料的发展替代整个正极领域。D25

3.3 从漂亮粉末，走向原料异质性和前后工序衔接

2020年的召回电池案例已将电解液移除、减少金属交叉污染、水相收集和水热修复放在一条流程中。它是商业来源物料的有价值证据，但召回料与长期正常服役退役料的老化分布不能混同。D20

Argonne发现热除胶会影响待修复材料，随后研究在涂层仍附着集流体时完成机械分离；ORNL则从乙二醇剥离发展到利用正负极在水中的不同响应进行顺序分离。这些工作说明，前处理不是附属步骤：它决定了材料在进入补锂反应器前还能保留多少价值。D15、D16、D17、D18

2024年自发补锂工作开始结合不同来源三元料和1Ah软包验证；2026年相近合作团队推进到50kg间歇批次。但后者验证的是同一NCM523体系内的来源/状态异质性，不是任意LFP、LCO和NCM的混合料。其高温后处理也不能被“柔性”“环境条件”之类措辞遮蔽。D08、D10

这条放大线中还应纳入UCSD的2023年100g/批工作：Honda提供20Ah寿命终止电芯，刀刮正极取得含黏结剂等杂质的正极黑粉，随后将纯化与补锂集成。它比模型纯粉更贴近实际，却仍不同于正负极和多种电芯共粉碎的混合商业黑粉。D22

截至2026年11月的新增前沿包括：4月发表的全干法路线，将等离子体辅助机械化学与热退火耦合，报告公斤级NCM523黑粉和2Ah软包；10月WPI进一步把混合正极重合成与回收石墨处理衔接，验证正负极均来自升级回收的全软包。两者主文/SI条件本轮未完整取得，因此作为明确存在的最新研究节点，性能数字带条件缺口呈现，不直接参与无条件冠军排名。D23、D24

4. 可以用于benchmark的数字，以及不可省略的条件

以下是**代表性可核基准，不是性能排行榜**。容量按活性材料质量、电芯总质量或设备吞吐量衡量，会回答不同问题。

研究	原料/体系	经核实结果	比较时必须保留的限定
D03，2019	退化NCM523	5C时124.4mAh/g	300℃补锂4h，随后850℃氧气4h；锂金属半电池、约3mg/cm²；常压不是室温
D04，2020	2500mAh商业LFP电芯，实验室循环6500次	补锂80℃5h；0.5C循环1000次后150mAh/g	后续600℃2h；标准测试负载约3–5mg/cm²；100mL反应器，80mL液体；不是6500次再生后寿命
D05，2021	化学脱除10%锂的NCM111	C/3循环50次保持93.1%，新料93.2%	0.1M LiOH同时含3.9M KOH；220℃2h与850℃4h；模型材料
D06，2022	化学脱锂及循环退化NCM	补锂段由220℃/约25bar降到100℃或以下/约1bar	仅指液相补锂步骤；不能直接当整个回收系统降温比例
D08，2024	再生三元材料	1Ah软包500次保持80.5%	原料电芯10Ah和产品1Ah是不同概念；电芯容量不代表粉末批质量
D09，2024	LFP/LMO→LFMP	3.68V，559Wh/kg；LFP对照3.38V，524Wh/kg	对Li/Li⁺的平均电压和正极活性材料比能量；克级，不是整电芯能量密度
D10，2026	异质来源NCM523黑粉	50kg/批；该批产品软包400次保持93.7%	1kg批的1000次93.1%另列；摘要1500次90.7%不得挪给50kg批次
D18，2024	正负极涂层与金属箔	材料/箔分离近100%；正负极分离>98%	两个不同分母；不是锂回收率、不是全流程成品率
D19，2025	混合废旧NMC111/LMO→83Ni	单层软包201.1mAh/g、500次约88%；2Ah约900次85%	比容量与整电芯容量分开；92.31mol%是再生原料使用比例，不是金属回收率
D11，2026	实际废旧层状正极	锂浸出率93.13%、浸出选择性98.84%	先机械活化2h，再25℃、CO₂ 0.5MPa反应1h；选择性=RLi/ΣRi，不是液相纯度；后续1M LiOH调pH、95℃1.5h制盐，盐收率需扣外加锂

研究	原料/体系	经核实结果	比较时必须保留的限定
D22，2023	Honda退役20Ah电芯刀刮NCM111正极黑粉	100g/批；中间材料产率91wt%	500mL釜/300mL 4M LiOH，220℃4h后再850℃4h；91%为洗涤干燥后、退火前，相对CAM质量
D23，2026	工业NCM523正极黑粉	公斤级批次；2Ah软包1000次保持97.1%	摘要已核，SI测试倍率/电压尚未核；另一4.5V结果为300次82.6%，不能混配
D24，2026	回收NMC622正极+回收石墨	全软包2590次保持70%	70%终点不同于常见80%寿命标准；原始摘要未给完整倍率，不能以次数直接判优
D28，2021	湿法再合成NMC111	1Ah电芯4200次至80%、11600次至70%	两个不同寿命终点；完整测试倍率/电压本轮未核；不是原晶体保留式修复

这些数据已足以否定两个简单判断：“直接回收只有几毫克扣电池”不符合已有Ah级、50kg批次证据；“已经验证完整工业可行性”也超出了上述证据。不同研究跨越的是**原料真实性、材料功能、电芯尺度、粉末批量、运行持续性**中的某几个维度，不能合成一个无条件的成熟度数字。

5. 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。

7. 对当前水平的判断与真正未解决的问题

第一，核心问题已经从“能不能补回锂”转向“哪些损伤能以什么代价修好”。 颗粒开裂、过渡金属迁移、表面重构、污染和锂亏损不是同一个问题。重新嵌锂后容量恢复，仍可能保留后续循环的脆弱点。应把结构证据与全电池寿命、气体产生、倍率、热安全、储存性能放在同一质量框架，而不只取最大容量。

第二，原料适应性需要分层描述。 同批电芯不同SOH、同一NCM配比不同厂家、不同NCM配比、NCM/LMO混合、LFP与层状氧化物混合，是难度不同的任务。50kg同配比异质料不能替代跨体系分离与配平研究。真实退役料也应报告来源、电池历史、粒径、碳/PVDF和Cu/Al含量的分布，而不只是平均ICP成分。

第三，前端保纯与后端容杂存在可研究的取舍。 更精细分选通常提高产品稳定性，也增加操作成本；容许少量杂质可能减轻前端负担，但应证明其浓度窗口、批次波动和客户可接受性。D10作者明确指出，某些Al效应即便对性能有利，实际商业原料仍偏好严格杂质控制。这使“利用杂质掺杂”不能直接替代质量标准。

第四，低温步骤的创新尚需转化为全流程收益。 对D03/D04/D05/D10，后续高温处理均不可忽略；盐和溶剂回收、洗涤水量、干燥、气氛、废液以及新Li/Ni补料需要进入物料与能量平衡。用能耗模型比较时，必须统一到同一终产品和质量要求，才能避免“再生粉末”与“回收金属盐”跨边界比较。

第五，批次扩大与连续化是不同里程碑。 50kg/批证明批量容纳与材料均一性取得进展，仍需连续进出料、设备停留时间分布、数周运行、杂质积累、介质循环衰减、维护/清洗和稳定成品率。现有高质量工作已超越单颗扣电池，但本轮没有取得可将整条直接再生产线判为长期连续商业运行的学术证据。

第六，升级必须同时做产品市场与材料守恒判断。 Ni比例提高可提升某些性能，也需额外Ni源；新组成是否适合目标市场不能一概而论。LFMP、高镍单晶、高镍多晶和催化剂是不同产品路线，没有一个普遍最优。回收料占比、元素回收率、最终合格品收率和每吨原料收入四个数必须分开。

D11特别说明计算分母的重要性：论文的93.13%是锂进入浸出液的比例，98.84%按各元素浸出率归一化，均不能直接理解为最终锂盐收率或溶液锂纯度；后续使用LiOH调pH，最终碳酸锂中的锂必须区分原料回收与外部加入。

这些不是要求立即选题。对当前前期调研更有价值的产出是：给每条路线建立“它已经在什么原料和规模下解决了什么—剩余哪一环尚缺证据”的记录。接下来与导师、师姐或企业交流时，就能围绕可检验的原料波动、质量指标、流程代价和运行方式讨论，避免只比较论文中的一个漂亮数字。

电化学、前处理与系统评价

检索与核验截止日期：2026年11月4日。本稿用于拼接宽范围锂电池回收学术图谱，覆盖20篇技术原始研究、3篇原始评价研究和3篇综述。逐篇完整题名、DOI、工况和出处见原始研究资料库。这些文献构成有代表性的证据骨架，不意味着穷尽全部文献。

证据分级：A为原始全文与补充信息（SI）已核读；B为原始全文可读但SI未取得或未核全；C为一手摘要/出版社元数据，尚不能重建完整实验；R为综述或Concept，只作索引。本轮未核的含义是本次证据不足，不能据此声称作者没有报告。本文明确区分原文结果、由原文直接得出的判断以及需要后续验证的问题。

一、技术路线的演变：电化学改变了哪个环节

1. 分类应先确定转化目标，再定位电化学的工作

“火法、湿法、电化学、直接回收、升级回收”不能简单列成五个互斥选项。火法、湿法、电化学主要描述处理手段；直接回收描述尽量保留活性材料结构/功能的转化深度；升级回收还描述产品性能或用途的改变。对本组论文，最清楚的表达是同时写三件事：使用什么手段、把原料变成什么、处于哪个单元操作。比如，水电解气泡剥离是电化学前处理，可以接湿法浸出，也可以接直接再生；电化学补锂属于直接回收；熔盐电解同时包含高温和电化学；电化学再生酸碱可以改进既有湿法流程。

这也解释了为什么只追踪“电化学提锂”会漏掉有价值的工作。前处理的贡献可能不是多提取锂，而是少引入Cu/Al杂质、保留材料结构、减少后续酸用量；分离单元的贡献可能是把Li盐直接变成LiOH；评价研究则决定这些改进能否抵消膜、试剂、能量和设备成本。学术图谱应允许一篇论文同时占据多个位置。

2. 历史底座：从浸出液中电积金属，不是从2019年才开始

电积是让溶液中的金属离子在电极上还原成金属。Lupi、Pasquali和Dell’Era在2005年已报道从锂电池浸出液分离并电积Ni、Co：先浸出和萃取，再分别电解。Ni和Co的电积电耗分别为2.96和2.8 kWh/kg金属，对应电流效率87%和96%；电流密度250 A/m² 应换算为25 mA/cm²，而不是250 mA/cm²。这些数值只描述电积步骤，不能与后来的每kg黑粉“总能耗”直接比较。原始研究

这个历史节点的意义，是明确电化学与湿法可以形成分工关系：化学浸出解决固体溶出，萃取解决组分分离，电积决定最终金属形态。后续创新并不一定要替换整条流程，也可能是省掉萃取、减少药剂、再生酸碱，或提高某个关键金属的产品纯度。

3. 2019—2020年出现两个重要分支：固体直接接触与介体传递电子

一类问题是：废正极颗粒如何把电子传给电极，或从电极获得电子？直接接触的浆料电解让固体悬浮在电解液中，依靠颗粒与电极接触、导电网络或溶液内反应进行转化。Li/He/Zhao团队2019年在$LiMn_2O_4$浆料中回收Li和Mn，90° C条件下报告Li浸出率>99%、Mn>92%，同时形成MnO_2；但MnO_2纯度为92.33 wt%，不能直接写作“电池级产品”。该研究已足以否定“浆料电解用于废电池回收尚无先例”。2019原始研究

2020年同一研究谱系转向LFP，采用阴离子交换膜浆料电解，报告Li浸出率98%、Fe以$FePO_4$/C形式回收>96%，再合成LFP容量143.6 mAh/g（1 C）。同年又通过悬浮电解与电渗析组合生产LiOH，Li浸出率>95%、电流效率85.81%。这里的科学问题逐步从“固体能不能反应”推进到“怎样把锂选择性送到所需产品中”。但两篇本次主要核到一手摘要，原料来源、固液比、面积和真实处理通量仍应列本轮未核，不能凭综述推定已经连续化。2020浆料脱锂，2020 LiOH制备

另一类办法用氧化还原介体：可溶分子/离子在电极上获得或失去电子，再在另一个位置与固体反应，完成电子“接力”。Qing Wang团队2019年的redox targeting工作以铁氰化物介体氧化LFP，基本反应可写成 LiFePO4→FePO4+Li +e ，报告锂脱除99.8%、LiOH纯度99.90%、FePO4纯度99.97%。其意义不只是高百分比，而是允许电极反应区和固体反应区分开，为外置储罐、循环液和后来的双侧配对反应提供结构基础。相应代价也改变了：研究必须关注介体稳定性、补充量、跨膜与产品残留，而不仅是颗粒接触。2019原始研究

这两个分支不是先后替代关系。直接接触省去介体但面临电子接触、局部反应和电极装载问题；介体减少固体接触限制但引入新的化学品、选择性和稳定性问题。比较时必须用相近原料、固体浓度、产品目标和完整边界，不能仅按最高浸出率判胜负。

4. 整极片与膜分离：把产品选择性和材料完整性放到中心

2022年两种整极片路线说明“避免混成黑粉”可以服务不同目标。Zhao/Yin/Wang的阴极电解把极片还原浸出与组分分离耦合起来：真实回收电池拆出的LCO极片，在0.5 M H2SO4、2 V、70° C下处理4 h，6×20 cm极片获得Li浸出99%、Co浸出97%、电流效率97.8%。铝箔和碳/PVDF可分别回收；四张大极片依次使用同一酸液，酸利用率92.3%。这是顺序批处理，不能写成连续生产。该方法主要依赖电化学还原浸出，优化工况下没有明显气泡，不应与纯气泡剥离混为一谈。原始研究

Xu等在Science Advances报道的路线则用LLZTO陶瓷锂离子导体选择迁移Li ，配合保护层缓解水侵蚀，制备LiOH。文中“97%”主要包括选择性/法拉第效率指标，不是可以随意改写的总锂回收率。法拉第效率是所通过电荷中用于目标反应的比例；它与投入原料最终回收多少是两个问题。其50轮卷对卷实验每轮更换极片和阴极液：新片标称800 mAh，每轮只处理500 mAh。该试验证明重复操作可行，却不能单独证明全部锂被提取，也不能证明高浓产品液下连续稳定运行。2022原始研究

整极片路线应研究电极损伤、弯折、涂层脱落和导电接触的影响。上述研究证明其有技术可能性，但并未证明供应链会稳定提供规则、完整、化学组成一致的极片。供应链可得性属于后续工业调查问题，应与学术性能分开记录。

5. 2024—2026年，重点扩展为“两极怎么配”和“试剂怎么循环”

普通电解槽一极进行有用回收反应，另一极可能主要进行耗能较高的析氧或析氢。配对电解尝试让两极都服务产物或利用互补化学势。2020年Yin/Wang已在高温熔盐中用LFP配对电解，产生Fe/Fe3O4等并回收锂。该工作提醒我们：低酸耗不意味着低总能耗，熔盐升温、保温和后处理必须进入比较边界。熔盐配对原始研究

2024年Jia等将FeCN介体LFP回收与制氢耦合，在300 mA/cm² 报告3.6 kWh/m³ H2，比作者的常规水电解对照低43%。这不是每kg电池回收电耗；介体氧化起始电位0.87 V也不是整个槽的运行电压。其真正的问题是同一装置如何同时满足回收和制氢，以及氢气收集、纯化、用途和销售假设能否支持所计的收益。2024原始研究

Rice团队2025年NCE论文走另一条路线：以氢气氧化/析氢和膜结构将Li2SO4分解为LiOH与H2SO4，再把酸、碱接回湿法浸出和沉淀。电化学在这里服务整个湿法流程的试剂循环。4 cm² 装置在100 mA/cm² 时实际槽压约1.8 V，0.36 V仅为1 mA/cm² 定义的起始值；26个批次累计超过500 h，不是固体连续进料。Li回收91.2%、Co回收97%，产品纯度分别>99.7%和>99.8%。SI还揭示重要边界：部分“spent LCO”是购买LCO人工脱锂制成，经济评价1000 kg LiOH • H2O/day是模型产能；实验每轮约2%物料泄漏/转移损失，200 mL与500 mL循环分别额外补4 mL与10 mL的1 M Li2SO4。加上外加H2O2，不能把“自循环”理解为无外源试剂、无补料的封闭体系。2025 NCE原始研究及SI p31

同年Rice团队Joule论文则采用零间隙膜电极组件，把工业来源LFP黑粉涂到Ti集流体上直接脱锂。真实退役原料是TotalEnergies提供的黑粉；整极片则购买自MTI/MSE，不能把卷对卷示范称为真实退役整极片验证。零间隙意味着电极与离子交换膜紧密组装以缩短离子路径，绝不意味着浆料可以直接连续穿过板框。氧还原配对小试电耗低至103 kJ/kg黑粉，但其条件为0.1 C、6 mg/cm²、约0.18 V，边界是电解单元；C倍率描述相对于所定义容量的充放电速率，比较不同原料时还应核实容量基准。千小时实验使用20 cm² 装置，累计只处理57 g黑粉，并周期更换物料

和再生膜。浓缩至0.98 M时，末轮法拉第效率下降到64.1%，不能与低浓度下96.6%效率拼成同一个性能点。2025 Joule原始研究及Methods Materials

2025年Wei Chen团队用NO2捕集/反应配对废电极提锂，报告最高97%锂回收、>99% LiNO3及66 Wh/kg电极电能输出。它显示回收可以利用外部反应物的化学能，但产品是硝酸锂而非氢氧化锂/碳酸锂，NO2供给和气体处理也属于系统物料。不能据发电量推断全流程净能为正。NO2耦合原始研究

2026年Qing Wang团队进一步让两类正极互补：LFP侧氧化、NMC/LCO侧还原，以两种介体将反应连接起来，使回收反应阶段可自发并输出电能。主全电池约67%利用率；NMC浓度约77 g/L时利用率为55%–61%，降到5.1 g/L可达92%。六电池堆是实验演示，按年处理1万吨黑粉，BQDS/H2SO4回收反应发电246.4 MWh是模型情景；THBDS小试实测外推仅62.8 MWh。更关键的是，完整闭路的氢循环酸碱再生仍需0.494 kWh/kg黑粉，远大于246.4 MWh/万吨对应的0.02464 kWh/kg回收反应发电量。因此，“自驱动”描述局部回收反应，不能解释为整个闭路净发电或能源自给。1066吨CO2化学消耗同样为模型上限，按67%利用率约714吨。CO2与LiOH形成Li2CO3是碳酸化，不是CO2电还原，更不是已证明的生命周期负排放。作者明确把复杂杂质问题留在本文范围之外。2026原始研究及SI，主文p8、方法、SI表S5/S7

同年Zhong等的混合NCM–LFP悬浮电解，在40° C、1.2 V、40 g/L条件下报告Li/Ni/Co/Mn/Fe均>98%浸出，不外加还原剂。其0.006 kWh/kg黑粉是直流电解能耗；40 g/L是固体浓度，不是生产通量。该研究可作为混料互补反应的近期节点，但本次未获全文/SI，酸耗、处理时间、原料真实性及全流程成本应保持本轮未核。2026 Green Chemistry原始研究

这些工作共同提出了值得调研的系统问题：配对物料在实际原料流中的比例是否匹配？低槽压是否以稀溶液、长停留时间或复杂后处理为代价？介体、膜和酸碱循环的损失需要多少补充？应保留这些问题作为证据清单，现阶段不必急于转化成某一个已确定的实验课题。

6. 前处理并非附属：它决定后续还剩多少材料价值

2024年Garg等研究Fe(II)/Fe(III)浸没放电，关注电压回弹、腐蚀、气体及周期操作。2026年同一谱系进一步比较NCA电极完整性：0.2 C电连接放电到2 V约4 h，而5 wt%介体浸没约50 h。试验使用新NCA电芯以隔离放电方式影响，因此适合机制比较，却不能视为多来源老化电芯工业结论。2 V只是论文协议终点，不能当作普遍破碎安全阈值。2024放电研究，2026材料完整性研究

2026年LFP深度过放研究用三电极区分电芯内部正、负极电位，指出铜溶解起始约为负极3.42 V vs Li/Li⁺。这个数字绝不是全电池应设置的截止电压。优化方案91 min；正文§3.3报告正极Cu由基线Sta的33 ppm升至NCu的39 ppm，即增加6 ppm，不能把结论中的简写解读成总Cu<6 ppm。净回收181.1 kJ/kg电芯来自电芯原有残余电能，随初始荷电状态改变，不能视为某方法恒定“发电能力”。其研究价值是把放电操作与锂分布、铜污染及下游材料质量相连接。2026 LFP原始研究

剥离路线的评价同样需要追踪后续材料状态。2025年WES利用界面水电解气泡，LFP在10 mA/cm² 下34 s剥离，石墨3 s；材料收集率99.5%，金属杂质<40 ppm。SI表明11和1.1 kJ/kg电芯是由2×2 cm² 电极、电压积分、面载量及EverBatt组成外推，并非实际1 kg处理的能量计量。NCM/LCO在相同中性电解液约需20 min，加入少量NaOH可缩短到4 min以内，所以34 s不能泛化到所有正极。后续ACS工作拓展真实LMO、LFP、NCM和石墨极片，但降排/降成本比例仍来自特定比较模型。WES原始研究，ACS剥离研究

最后，电化学并不必然以“提取”为目标。2024年Chen/Ji等在200 g/L废LFP浆料中、25° C补锂2 h，再生材料达到151.5 mAh/g（0.1 C），1 C下400圈保持96.6%。这应放在“直接再生—电化学补锂”的交叉位置，与脱锂反应目标相反。容量保持率也不能代替原料适用范围、物料收率或商业全电池认证。浆料补锂原始研究

7. 评价方法的独立时间线：从路线模型到工业清单

2019年Ciez/Whitacre比较不同化学体系下的火法、湿法和直接回收，2021年Lander等把工资、运输、拆解与地理因素纳入财务模型。后者利润范围 21.43至+21.91 USD/kWh，分母是电池包额定容量，不是kg废料，也不是消耗电能。它说明供应链和产品价值足以改变工艺经济性，不能当作2026年的市场报价。2019评价，2021财务评价

2025年Machala等使用Redwood 2021年工业运行清单，把还原煅烧—机械—湿法组合与原生矿产供应比较。其功能单位是制备1 kg LiNi0.80Co0.15Al0.05O2正极材料所需的电池级原料（NCA-eq），按所需元素量归一，而非1 kg金属盐或1 kg废电池。在一致的厂门到厂门精炼边界，原生、生产废料回收、退役料回收能耗分别为193.9、22.0、44.4 MJ/功能单位；相应排放为14.5、2.8、6.1 kg CO2-eq/功能单位。该证据比单纯小试放大模型更贴近工业，但仍是特定企业、年份、电网和原料组合；电力结构可使排放显著改变。它提供的是需要对齐的评价方式，而非所有回收企业的统一数值。工业清单原始研究

三、代表性基准及比较边界

研究节点	可以报告的已达水平	必须同时报告的限制
2019介体LFP	Li脱除99.8%，LiOH纯度99.90%	本次仅核原始摘要，实际进料与全流程条件不足
2020 LFP浆料	Li浸出98%，保留FePO4/C	浆料不等于连续固体处理；固液比/规模待全文
2022整极片阴极电解	6×20 cm，Li 99%、Co 97%	70° C、0.5 M酸、4 h；顺序批处理
2022陶瓷膜	高Li选择性、50轮重复操作	每轮更换片与阴极液；选择性不是总回收率
2025 WES	LFP 34 s、石墨3 s，收集99.5%	小片与特定电解液；kg电芯电耗为外推
2025 NCE闭路	4 cm²、100 mA/cm²约1.8 V、26批>500 h	0.36 V不是操作电压；模型废料与模型产能
2025 Joule直接脱锂	工业来源黑粉，20 cm²、1000 h、总57 g	批次更换与膜维护；高浓产品效率下降
2026互补配对	5 cm²、六电池堆、主条件约67%利用率	完整闭路氢循环仍耗0.494 kWh/kg；发电仅局部反应且万吨量为模型
2026混合浆料	40 g/L、40° C、1.2 V、金属浸出>98%	0.006 kWh/kg仅直流电耗；全流程及通量本轮未核
2025工业LCA	运行清单支撑组合流程的资源/排放比较	制备1 kg NCA正极所需电池级原料的功能单位；单企业和特定年份

没有一个数值可以独立代表“当前领域最高水平”。主报告宜将同一原料类型、同一产品目标、同一系统边界放在同一表内，再比较回收率、纯度、浓度、通量、能耗、药耗和稳定性。若条件不齐，保留本轮未核比强行排名更有研究价值。

跨路线问题与研究判断

里程碑应分成四类

概念里程碑说明新的反应或流程可以发生，例如介体把固体反应与电极反应分开。原料里程碑说明方法面对了更复杂的进料，例如从购买纯粉走向真实退役正极或工业混合黑粉。尺度里程碑说明处理量或装置结构跨越了一个台阶，例如100 g、50 kg或百升级反应器。运行里程碑则要求反复运行、持续进出料、维护及产品稳定性的证据。这四类可以由不同论文分别完成，不必强行寻找一篇同时实现所有目标的“首次”。

本轮核实的尺度节点包括：2023年UCSD真实正极黑粉100 g/批，2024年CO 辅助前置提锂100 L放大，2026年NCM523直接再生50 kg/批、高压提锂200 L与熔炼百千克进料。它们各自推进了不同的尺度问题；设备容积、粉末质量和电芯容量不作同单位比较。100 g、100 L、50 kg、200 L、百千克熔炼

运行时间也有不同含义。2025年NCE的500 h是多批次循环；同年Joule的1000 h包括换料与膜维护，累计黑粉57 g。它们提供持续运行的有价值证据，却不等于已经证明高通量固体连续处理。时间、累计处理量、停机维护与合格产物应一起呈现。NCE、Joule

六组横跨技术分支的真实问题

第一组：原料的异质性怎样传到产物。 直接修复面对损伤和组成差异；湿法面对杂质和酸耗变化；火法面对碳、铝等还原性组分改变相分配。2014年混合正极再合成包含向真实碎料添加购买粉末的实验，2026年50 kg直接再生则限于同一NCM523体系内的来源异质性。两者分别推进了混合化学组成和批次差异，不能都简化成“能处理任意黑粉”。2014、2026

第二组：反应选择性怎样兑现为产品收率。 草酸路线把Li与主要过渡金属分开，但铝仍共浸；高压CO 路线可有较高浸出率，但LiF及后处理使它不能直接等于碳酸锂回收率。电化学路线的法拉第效率又是第三个分母。应沿每个元素的去向逐段计算，而不是让一个“99%”代表整条流程。草酸、高压回收、膜电极

第三组：提高固含或产品浓度后，性能还能否保持。 200 L高压提锂在降低液固比时浸出下降；互补介体体系提高固含后材料利用率下降；膜电极浓缩LiOH时电流效率下降。共同问题是实验室稀体系优势能否转成足够的生产强度。它可能来自传质、沉淀、膜选择性、反应平衡或粒子接触，具体根因需由各论文证据分别识别。高压、互补体系、浓缩

第四组：前处理是保值还是把困难移到后面。 电极安全放电、热去胶、液相剥离和粉碎分选会改变铜铝污染、材料结构与可回收组分。2020年热去胶对直接再生的影响、2026年放电后的电极完整性研究，都支持将前处理与目标产品联动评价。追求剥离更快或放电更深，并非自动改善后端回收。热去胶、放电影响

第五组：省掉的投入是否以另一种负担返回。 低温补锂可能仍接高温退火；非水溶剂需要再生和控水；低槽压可能伴随膜维护、浓缩或气体处理。应比较同一终产品和质量要求下的完整流程，而不是比较被挑选出来的单元。工业运行清单的价值正是在于暴露流程组合与电网条件，而不只是给出路线名称。常压补锂、溶剂集成、工业评价

第六组：再生材料的合格标准如何建立。 容量恢复、半电池长循环、Ah级软包和批次一致性各有证明力。2021年回收NCM111在1 Ah电芯中的表现，以及2026年50 kg产品软包验证，已说明不能笼统说回收材料只能做低水平验证；但对新组成、杂质窗口、热安全、产气、储存与批次认证，仍要单独留出证据位置。1 Ah材料验证、50 kg批次

这些问题由多条路线共同遇到，但根因并不相同。因此，现阶段适合形成“问题—原料—机制—已有证据—尚缺证据”的地图；不应预先假定答案一定是电化学、整极片或浆料流。

对综述组织方式的启发

一篇有辨识度的综述可以用“从原料到合格产品”作为骨架：先讲原料与前处理如何决定路线，再讲元素分流、结构保留和产品升级，最后比较放大、持续运行与评价边界。火法、湿法、电化学、机械化学及生物途径分别落在它们真正解决的问题上。这样能容纳跨路线耦合，也能避免各方法章节只是反复排列回收率。

团队则作为证据链的第二个维度：同一团队在哪个问题上持续改变原料、反应条件、产品或规模；不同团队是否独立验证同一机制；合作是否把材料研究推进到工程或产品测试。引用次数和期刊档次可以帮助找到候选工作，却不能替代这些判断。

直接再生与升级的问题证据矩阵

用途：将综述中的共性议题，落到原始研究能够证明的具体范围。这里的“反复出现”指不同综述讨论同一问题，**不是已完成全部四篇分支综述参考文献的逐条共引统计**。本轮调研的DR01/DR02全文访问受限；DR03已核机构原始摘要，DR04已核摘要与部分表格。正式报告可将本矩阵与主任务的综合综述全文交叉审计配对。不要将“值得关注”转写成“学界一致认为已解决”。

1. 原料异质性：一个平均元素比例代表不了回收原料

综述层面的问题： 直接回收依赖入料识别、分选和材料状态；分离与再生不能分开评价。这与DR03的NMC结构/组分恢复框架、DR04的分离—再生框架相符。

原始证据： D22使用Honda的20Ah退役方形电芯，手工拆解、刀刮得到100g正极黑粉；D10则处理市场不同来源的NCM523黑粉，做到50kg/批。前者强化了真实电芯来源，后者扩大了同化学体系内的状态/来源范围。

能支持： “真实退役料”和“同体系来源异质料”已有实证研究，不能说全都只是新料脱锂模拟。**不能支持：** 两者均未证明任意混入LFP、LCO、不同三元配比后仍无需分选；正极刀刮黑粉也不能等同正负极共粉碎商业黑粉。

应形成的调研问题： 已验证原料窗口是什么？批次间的配比、碳/黏结剂、Cu/Al和健康状态分布是否被记录？该窗口之外是要分选、调配还是改用湿法？

2. 杂质与前处理：去杂可能制造新损伤，容杂也需要边界

综述层面的问题： DR04把分离与再生并列，DR01/DR02则将材料修复的条件与障碍作为核心；“先拿到纯粉再谈性能”会掩盖一部分流程难题。

原始证据： D15专门研究热除黏结剂对后续直接回收的影响；D22明确引用该工作，设计纯化—补锂集成；D23进一步提出将微量Al/Na转为有益掺杂。

能支持： 杂质形态与去除方法会影响结构修复，部分杂质可在受控条件下利用。**不能支持：** 任意杂质浓度都“变废为宝”，或省去去杂一定降低总成本。D23的浓度窗口、均一性和SI工艺条件本次未完整核，不能扩写成普适容杂结论。

应形成的调研问题： 区分“杂质总量、化学形态、空间分布”；同时核最终产品标准和波动容限，而非只判断平均容量升降。

3. 锂恢复不等于结构恢复，更不等于寿命完全恢复

综述层面的问题： DR03明确把恢复结构和组分作为直接回收目标；DR01/DR02的缺陷与再生框架也要求把不同损伤分开。

原始证据： D04以LFP的缺锂和Fe/Li反位缺陷解释靶向修复，液相补锂之后仍需要退火稳定材料；D05在可控脱锂NCM111上完成工艺优化；D06将氧化还原介质引入补锂动力学。

能支持： 元素补回、缺陷重排和稳定循环是相互关联但不相同的目标。**不能支持：** ICP锂含量回到标称值便说明裂纹、表面岩盐相、氧损失等全部恢复；LFP机理也不能不加验证外推高镍层状氧化物。

应形成的调研问题： 每篇论文针对哪个损伤，使用什么证据确认修复，仍有哪些损伤没有被测量？不要把所有直接再生都称为同一种“补锂”。

4. 温和条件：局部步骤优化容易遮蔽全流程负担

综述层面的问题： DR03/DR04关注不同介质及再生方法的条件和实际实施障碍；需要将反应步骤与整个制造流程区分。

原始证据： D03取消水热压力，但采用300℃补锂及850℃退火；D10虽有液相柔性处理，仍有550℃、900℃及洗涤后500℃处理；D05把LiOH降到0.1M，同时保留3.9M KOH。

能支持： 降温、降压或减少特定昂贵试剂可能解决真实设备/成本约束。**不能支持：** 常压即低能耗，低LiOH即低总碱耗，液相室温即整条路线室温，或反应段能耗即全生命周期能耗。

应形成的调研问题： 将预处理、溶剂/盐制备与循环、洗涤干燥、气氛和后退火逐项展开，再比较相同终产品的资源投入。

5. 产品迭代：修回旧材料可能不等于得到目标市场需要的材料

综述层面的问题： DR04把升级纳入分离与再生流程；DR03所关注的NMC组成变化使“恢复原样”和“升级下一代组成”有不同价值。

原始证据： D07将混合贫镍多晶变为富镍单晶；D19发展湿法配平后的83Ni多晶与2Ah验证；D25通过Al/Mg掺杂把旧LCO升级为高电压材料。

能支持： 产品升级有组成、形貌和工作电压多条分支，不限于同组成补锂。**不能支持：** 单晶必优于多晶、高镍必优于所有其他体系，或增加Ni/掺杂元素后仍可忽略新增原料成本；也不能把湿法升级一律称为保晶直接回收。

应形成的调研问题： 目标客户需要哪一种材料规格？每吨原料中多少旧材料进入合格产品，新加Li/Ni/其他元素分别有多少？

6. 测试可比性：循环次数不是脱离条件的等级分数

综述层面的问题： 方法综述常需汇总容量、保持率，但DR04的实用化视角要求把材料测试与可用产品衔接；数字表格若省略条件会失真。

原始证据： D08报告1Ah软包500次80.5%；D23报告2Ah软包1000次97.1%，并单独报告4.5V下300次82.6%；D24报告回收正负极全软包2590次70%。

能支持： 已有Ah级和回收正负极全电池验证，不应把直接回收概括成只有锂金属扣式半电池。**不能支持：** 按2590、1000、500直接排优劣；终止保持率、截止电压、倍率、面负载、N/P比和电解液量等可能不同。D23的4.5V不能自动赋给其2Ah测试。

应形成的调研问题： 将“半/全电池、活性物质量/面积、容量、截止电压、循环倍率、终点标准”做成强制字段；缺条件的记录保留，不进入横向冠军排序。

7. 放大与连续运行：物料批量、电芯容量和设备产能互不等同

综述层面的问题： DR04的可实施性框架与DR01挑战框架均要求区别实验室再生和流程放大。

原始证据： D22明确100g正极黑粉批处理及反应器容积；D10明确50kg/批；D18给出分离效率，但未由此证明整条直接再生线连续运行。

能支持： 从百克到数十公斤的批量验证已经存在，前端选择性分离也有量化结果。**不能支持：** 50kg/批即数万吨/年稳定产线，回用一次溶液即闭环长期运行，或1Ah/2Ah电池验证等于公斤级原料处理。

应形成的调研问题： 区分单批质量、单位时间进料、连续运行时长、合格品收率与停机清洗频率；检索“规模”时必须同时检查其单位和分母。

8. 经济和环境优势：统一系统边界比列出最大降幅更重要

综述层面的问题： 直接再生综述常讨论保存制造价值带来的优势，但需要与综合综述中的技术经济评价和生命周期评价边界审计结合。

原始证据： D04明确EverBatt按年处理1万吨建模，并说明不能不经真实操作检验就作即时工业经济结论；D19报告回收料利用比例、产品验证及经济模型；D11把锂产品与催化残渣出口结合。

能支持： 系统模型能识别潜在昂贵步骤、比较特定假设下的收益；升级可产生多个产品出口。**不能支持：** 模型利润就是当前实际利润，年处理1万吨假设就是已建工厂，催化活性好就是残渣可按高价全部销售，或92.31mol%再生料使用率就是92.31%元素回收率。

应形成的调研问题： 标明原料采购/处置费用、产品质量和价格、回收料占比、补料、能耗与物流边界，并用敏感性分析寻找结论是否会随锂价和利用率反转。此项是后续产业访谈的直接接口，而不是现在就要求开始实验。

使用这些问题时的限制

上述8项均有至少两项已核原始研究作为具体锚点。它们可以支持“仍需解决或界定的真实问题”清单，不能单独证明每个问题尚无人研究；相关论文恰恰说明很多团队已在解决其中一部分。正式选题的新颖性应落在尚未覆盖的原料窗口、质量指标、机制或运行边界上，不能只把综述中的笼统挑战换一个试剂重做。

附录：原始研究证据卡片

卡片采用相同字段，便于核对原料、过程、产品和尺度。没有核实的数值不补猜；“题录 / 摘要”与“正文 / 补充材料”分别呈现。更完整的前后引文关系和出处链接保留在可视化平台与数据文件。

前处理与分选

D15 · 2020 · 减轻热法除黏结剂对锂离子电池直接回收的影响

Mitigating the Impact of Thermal Binder Removal for Direct Li-Ion Battery Recycling

原始论文：10.1021/acssuschemeng.0c03424

证据字段	D15	减轻热法除黏结剂对锂离子电池直接回收的影响
原料与处理	含黏结剂的正极材料；详细老化范围未复核 研究热除胶引入的材料变化与缓解措施
产品与推进	适用于后续直接回收的正极 揭示前处理自身会改变修复对象，不能被视为中性步骤
规模与局限	本次未核实批处理活性材料质量 具体气氛、元素损失与最终性能须按原文条件解释；本条不填数字
核查与团队	原始作者稿题录和摘要 Argonne Albert Lipson / Jessica Durham / Bradley Ross

D17 · 2020 · 通过溶剂分离电极材料实现可持续直接回收

Sustainable Direct Recycling of Lithium-Ion Batteries via Solvent Recovery of Electrode Materials

原始论文：10.1002/cssc.202001479

证据字段	D17	通过溶剂分离电极材料实现可持续直接回收
原料与处理	电极涂层/集流体；本条未核全部原料来源 乙二醇中竞争性氢键作用快速剥离电极材料
产品与推进	保持晶体/形貌的活性材料及完整金属箔 将溶剂分离选择与保留材料功能相联系
规模与局限	本次未核实批处理活性材料质量 仅快速剥离不代表整个回收流程时间；溶剂循环损失和残留需量化
核查与团队	出版社摘要 ORNL Yaocai Bai / Ilias Belharouak / Jianlin Li

C08 · 2021 · 利用高强度超声实现锂离子电池回收

Lithium ion battery recycling using high-intensity ultrasonication

原始论文：10.1039/D1GC01623G

证据字段	C08	利用高强度超声实现锂离子电池回收
原料与处理	复合电极极片 界面空化快速破坏黏附，展示流动处理中的剥离
产品与推进	分开的活性材料与集流体 界面空化快速破坏黏附，展示流动处理中的剥离
指标 1	剥离时间：秒级。原始摘要；具体极片与操作条件应与正文对应，非整包处理时间
规模与局限	见指标与证据说明 剥离高通量不自动证明后续材料修复与产品制备连续化；单位时间/体积提升的对照边界不能外推全厂。
核查与团队	摘要 莱斯特大学 Abbott / Ryder 与伯明翰 ReLiB

HP10 · 2021 · 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

Comparison of the effects of incineration, vacuum pyrolysis and dynamic pyrolysis on the composition of NMC-lithium battery cathode-material production scraps and separation of the current collector

原始论文：10.1016/j.resconrec.2020.105142

证据字段	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
原料与处理	NMC 正极生产废料，不能等同老化报废混合黑粉 比较氧化、真空和流动惰性气氛下热处理
产品与推进	脱离集流体的正极物料及热转化物 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
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 生产废料代表性边界；不同热处理不能仅以脱粉率排序
核查与团队	partial-fulltext Chalmers / Gabriele Lombardo / Burçak Ebin / Martina Petranikova；Northvolt 合作者

E06 · 2022 · 通过阴极电解实现废旧锂离子电池的综合回收

Cathode electrolysis for the comprehensive recycling of spent lithium-ion batteries

原始论文：10.1039/D2GC02118H

证据字段	E06	通过阴极电解实现废旧锂离子电池的综合回收
原料与处理	从武汉回收中心取得的废电池，1 M NaCl放电12 h后拆解；主要研究LCO极片，另验证LMO、NCM523。 整片正极作为电解阴极，在酸性溶液中还原高价过渡金属并溶出，分离铝箔与碳/黏结剂；沉淀、焙烧再制正极材料。

证据字段	E06	通过阴极电解实现废旧锂离子电池的综合回收
产品与推进	含Li/Co溶液、完整Al箔、碳/PVDF；再生LCO等 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”。	
指标 1	放大极片Li浸出率：99 %。	
指标 2	放大极片Co浸出率：97 %。	
指标 3	放大极片电流效率：97.8 %。	
指标 4	重复使用酸液后的酸利用率：92.3 %。	
指标 5	使用回收碳/PVDF的LCO容量：140 mAh/g at 0.5 C。	
指标 6	该LCO 100圈容量保持率：93 %。	
共用条件	6×20 cm极片；0.5 M H2SO4、2 V、70° C、4 h。四片大极片在同一溶液中依次处理；并非固体连续进出。小片常规为2×4 cm。高电流效率工况没有明显气泡，因此不宜概括为纯气泡剥离。	
规模与局限	最大已核实单片6×20 cm；四批依次处理。 酸性和70° C运行仍有化学品与加热负担。；极片完整性、接触和来源差异影响处理；未给出工业通量。；再生材料半电池性能不能直接代替商业全电池寿命与安全认证。	
核查与团队	B：原始全文，本地PDF已提取；SI未获得 作者：Jingjing Zhao; Jiakang Qu; Xin Qu; Shuaibo Gao; Dihua Wang; Huayi Yin；发表时机构：Wuhan University	

D18 · 2024 · 水介质中电极材料与金属箔的顺序分离

Sequential separation of battery electrode materials and metal foils in aqueous media

原始论文：10.1016/j.jpowsour.2023.233954

证据字段	D18	水介质中电极材料与金属箔的顺序分离
原料与处理	正负极材料与对应金属箔 利用负极水中易脱落和正极响应差异；缓冲液/表面活性剂避免铝腐蚀并改善润湿	
产品与推进	按顺序分开的正负极材料及箔材 从单极片剥离推进到正负极选择性分离	
指标 1	材料/金属箔分离效率：近100%。原始摘要；分母是材料与箔的分离	
指标 2	正负极分离效率：>98%。独立于上一个分离率，不是金属回收率	
共用条件	未核实的条件不补猜	
规模与局限	本次未核实批处理活性材料质量 分离效率分母不同；未证实适用于任意碎裂粒径、粘结体系和混杂黑粉	
核查与团队	原始机构摘要及作者稿摘要 ORNL Yaocai Bai / Lu Yu / Ilias Belharouak	

E09 · 2024 · 面向安全回收的强化锂离子电池电化学放电

Enhanced electrochemical discharge of Li-ion batteries for safe recycling

原始论文：10.1039/D4SE00125G

证据字段	E09	面向安全回收的强化锂离子电池电化学放电
原料与处理	商业18650电芯，化学体系、壳体材质及保护电路不同。 利用Fe(II)/Fe(III)溶液介导外部放电，比较周期式浸没与连续浸没、静置电压回弹及腐蚀。
产品与推进	完成规定放电状态的电芯；含铁放电液 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。
指标 1	报告的静置回弹后目标电压：2 V。
指标 2	周期放电示例总时长：约100 h。
指标 3	连续浸没比较时长：167/218 h，不同测试。
共用条件	Fe(II)/Fe(III)盐溶液，部分实验5 wt%；电池材质和结构影响腐蚀及放电。周期/连续测试时间不能跨电芯条件直接比较。
规模与局限	单体18650实验；不等于电池包放电或规模化产线。 无腐蚀结果针对适当耐腐蚀壳体；不能推广所有钢壳、铝壳或破损电池。；静止溶液不自动避免气体，存在普鲁士蓝等副产物。；2 V是本文协议终点，不能据此定义通用破碎安全阈值。
核查与团队	B：RSC原始全文HTML；未获得SI 作者：Neha Garg; Simo Pekkinen; Eduardo Martínez González; Rodrigo Serna-Guerrero; Pekka Peljo; Annukka Santasalo-Aarnio；发表时机构：Aalto University; University of Turku

C09 · 2025 · 水介质超声分离电极制造废料

Ultrasonic separation of electrode scrap in water: a sustainable method for Li-ion battery recycling

原始论文：10.1016/j.wasman.2025.114969

证据字段	C09	水介质超声分离电极制造废料
原料与处理	锂离子电池制造过程电极废料 高频超声与周期频率扫描在水中分离涂层
产品与推进	高纯正极粉与保留铝箔 高频超声与周期频率扫描在水中分离涂层
指标 1	涂层分离率：>99%。制造废料；非复杂退役黑粉
指标 2	铝杂质：<0.02 wt%。回收正极粉；出版社原始摘要和亮点
规模与局限	见指标与证据说明 水接触时间需要控制；生产废料的结果不能直接外推老化、污染或粘结体系不同的退役极片。
核查与团队	摘要 Yuka Yamada / Yasuhito Kondo / Hiroki Kondo

D16 · 2025 · 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

Cost-Effective and Scalable Approach for the Separation and Direct Cathode Recovery from End-of-Life Li-Ion Batteries

原始论文：10.1002/aenm.202405430

证据字段	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
原料与处理	真实寿命终止电芯；逐电芯处理 涂层仍附于集流体时机械分离；回收清洁正极和LiPF6等组分
产品与推进	再生NMC622及其他组分 把整电芯分离与直接正极回收衔接
指标 1	再生正极测试：约160mAh/g，>250次。0.33C；摘要未确认半/全电池，不能作为商业寿命基准
共用条件	未核实的条件不补猜
规模与局限	以电芯分离为对象；未核实连续处理量 可放大表述不是连续量产证据；摘要未充分交代电化学测试电芯构型，本条保留未知
核查与团队	出版社摘要 Argonne Albert Lipson / Michael LeResche / Jeffrey Spangenberger 等

E11 · 2025 · 通过水电解实现可持续电池回收中的电极分离

Electrode separation via water electrolysis for sustainable battery recycling

原始论文：10.1038/s41893-025-01539-3

证据字段	E11	通过水电解实现可持续电池回收中的电极分离
原料与处理	电极片；LFP和石墨为主要快速剥离示范，NCM/LCO扩展。 通过集流体界面水电解气泡促进活性层剥离，之后可接干法电极再制造、补锂及直接再生。
产品与推进	活性材料粉体、Al/Cu集流体；下游可再生电极 把界面机械脱落、材料完整性与后续直接再生联系起来，提供可作为其他主路线前处理的独立单元。
指标 1	LFP剥离时间：34 s。
指标 2	石墨剥离时间：3 s。
指标 3	材料收集率：99.5 %。
指标 4	金属杂质：<40 ppm。
指标 5	LFP剥离电耗外推值：11 kJ/kg cell。
指标 6	石墨剥离电耗外推值：1.1 kJ/kg cell。
共用条件	主要快速结果10 mA/cm²。11/1.1 kJ/kg cell由2×2 cm²电极电压积分，按EverBatt 457 g LFP/kg cell、19.3 mg/cm²面载量外推，非实际处理1 kg电池计量。NCM/LCO在中性0.5 M(NH4)2SO4约20 min；0.5 M Na2SO4+0.01 M NaOH可<4 min，不能套用LFP 34 s。

证据字段	E11	通过水电解实现可持续电池回收中的电极分离
规模与局限	厘米级实验及较大极片展示；质量/时间工业通量本轮未核。EverBatt 10 kt/y情景属于模型。 不同材料需要不同电解液；碱性促进也可能伴随Al蚀刻。；11 kJ/kg仅剥离步骤；模型全路线1.81 MJ/kg cell是另一个系统边界。；剥离收集率不是锂资源总回收率。	
核查与团队	A：原始全文+33页SI 作者：Fangzhou Yang; Xinlong Chen; Ge Qu; Quan Nie; Ganxiong Liu; Wang Wan; Tanyuan Wang; Sa Li; Yunhui Huang; Ju Li; Chao Wang；发表时机构：Tongji University; Huazhong University of Science and Technology; MIT	

E12 · 2025 · 通过电化学剥离实现废锂离子电池回收中的超快速材料分离

Ultrafast Material Separation by Electrochemical Delamination for Spent Lithium-Ion Batteries Recycling

原始论文：10.1021/acssuschemeng.5c06070

证据字段	E12	通过电化学剥离实现废锂离子电池回收中的超快速材料分离
原料与处理	废LMO 18650、LFP 20 Ah软包、NCM 8 Ah软包的极片及石墨。 集流体界面析氢形成剥离作用，水系Na2SO4电解液分离活性材料和金属集流体。	
产品与推进	活性粉体、Al/Cu集流体 扩充气泡剥离对多种真实电芯极片的适用证据，可与WES对照材料来源、速度和后续产品去向。	
指标 1	材料分离率：约100 %。	
指标 2	金属回收率：>97 %。	
指标 3	LCA温室气体降幅：23 – 98 %，相对所选比较工艺，模型。	
指标 4	运行成本降幅：28 – 98 %，相对所选比较工艺，模型。	
共用条件	典型1 M Na2SO4、5 V、约0.2 A，秒级至约1 min，依材料而异。经济/环境模型使用过7.88 g正极材料/1 min的台架数据，不能称为已运行工业产能。	
规模与局限	实验室克级及真实电芯拆出极片；没有持续进出料产线验证。 模型降幅依比较基准、规模、设备假设而变；运行成本不等于含所有成本的总成本。；长时间循环电解液杂质累积、机械进料与规模化气体管理需验证。	
核查与团队	B：原始全文；SI未取得 作者：Erkang Feng; Peng Li; Ziyu Huang; Wenyan Zan; Teng Wang; Zhenyu Ren; Mingyue Xu; Hao Bi; Yanze Liu; Guoyong Huang; Wenjing Lu; Sidian Li; Dongbei Yue; Bing Deng；发表时机构：Bing Deng/Dongbei Yue：Tsinghua University School of Environment；合作含UC Irvine、山东理工大学、山西大学、中国石油大学（北京）	

E17 · 2026 · 阐明LiFePO4电池深度过放的电化学路径：优化前处理与材料保全的指导

Elucidating the electrochemical pathway of deep over-discharge in LiFePO4 batteries: A guideline for optimized pretreatment and material preservation

原始论文：10.1016/j.jpowsour.2025.239240

证据字段	E17	阐明LiFePO4电池深度过放的电化学路径：优化前处理与材料保全的指导
原料与处理	循环至初始容量80%以下的LFP软包电池；以三电极原位分析分辨正负极电位。 辨认深度过放时负极铜溶解与锂迁移路径，据此设计电学强制放电协议。
产品与推进	达到前处理放电状态、材料损伤较小的电芯 把前处理目标从仅降电压转向保留正极锂并避免铜污染，使放电条件与下游价值相连接。
指标 1	优化放电时间：91 min。
指标 2	负极Cu溶解起始电位：3.42 V vs Li/Li+。
指标 3	正极Li含量相对改善：3.47→3.63 wt%（相对+4.6%） ICP-MS；不是增加4.6个百分点。
指标 4	可逆容量保持：99 %。
指标 5	示例净回收电能：181.1 kJ/kg cell。
指标 6	正极Cu总含量：Sta→NCu：33→39 ppm。
指标 7	优化协议引起的Cu增加量：6 ppm。
共用条件	3.42 V是负极相对于Li/Li+的电位，绝非全电池截止电压。能量示例182 kJ/kg回收、0.9 kJ/kg输入，取决于初始残余电能；盐浸比较214.2 kJ/kg残能及54 kJ/kg废水处理项包含估算，不能当作固定通用能耗。 原文§3.3明确Cu从Sta 33 ppm增至NCu 39 ppm，6 ppm是增加量；结论段的“<6 ppm contamination”表述含糊，不应读成总Cu<6 ppm。
规模与局限	单一LFP软包体系的实验室协议；电池包、不同老化模式及真实混批适应性本轮未核。 材料保全不等于放电后任意破碎条件均安全。；电芯化学体系、状态及结构变化后需要重新验证协议。；净能回收主要来自电池原有电能，不是回收过程自身发电潜力。；摘要/结论对Cu污染量的简写与结果段口径容易混淆，必须同时报告基线、总量和增量。
核查与团队	B：12页原始全文；SI未取得 作者：Minhao Shi; Chuntao Fu; Zengyu Kuang; Hongrui Zhao; Kechen Long; Jianyun Cao; Jianye Yi; Kexin Li; Hui Xie; Yinghui Ren；发表时机构：Hunan/Yunnan/Xiangtan相关单位；逐作者对应NR

E18 · 2026 · 放电方式对锂离子电池回收中电极完整性的影响

Impact of Discharging Methods on Electrode Integrity in Recycling of Lithium-Ion Batteries

原始论文：10.1002/aenm.202505938

证据字段	E18	放电方式对锂离子电池回收中电极完整性的影响
原料与处理	Cameron Sino/Panasonic NCR18650B 3400 mAh NCA新电芯，单循环处理以隔离放电方式影响；不是多来源真实老化电芯。 比较电连接放电与Fe(II)/Fe(III)介体浸没放电，分析正负极结构、元素及锂状态。

证据字段	E18	放电方式对锂离子电池回收中电极完整性的影响
产品与推进	不同前处理后的NCA和石墨电极 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。	
指标 1	电连接放电时间：约4 h at 0.2 C。	
指标 2	介体浸没放电时间：约50 h。	
指标 3	终点电压：2 V。	
共用条件	浸没为室温5 wt% Fe(II)/Fe(III)体系。不同放电路线达到同样电压但经历不同时间和反应，终点电压相同不保证电极状态相同。	
规模与局限	18650单体对照；没有再生商业全电池长期认证。 新电芯的受控试验便于因果分析，但老化/破损/异构废电芯外推有限。；处理时间不同，是解释材料变化时必须考虑的因素。；介体体系存在外部普鲁士蓝等副产物，需计入维护。	
核查与团队	B：12页原始全文；SI未取得 作者：Neha Garg; Viorica-Alina Oltean; Daniel Brandell; Annukka Santasalo-Aarnio；发表时机构：Aalto University; Uppsala University	

火法与热处理

HP05 · 2012 · 锂离子电池回收工艺的开发

Development of a recycling process for Li-ion batteries

原始论文：10.1016/j.jpowsour.2012.01.152

证据字段	HP05	锂离子电池回收工艺的开发
原料与处理	废旧电池机械处理后的含钴锂细料 机械预处理、湿法及电弧炉碳热还原组合	
产品与推进	钴合金与碳酸锂等目标物流 学术与企业共同开发整条组合工艺的重要早期节点	
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 提出工艺不等于各节点均已连续工业化；本次不报告未经核实的全流程回收率	
核查与团队	abstract RWTH IME / Bernd Friedrich；ACCUREC / R. Weyhe；UVR-FIA	

HP06 · 2016 · 无氧焙烧与湿式磁选回收废旧钴酸锂/石墨电池中的钴、碳酸锂和石墨

Environmentally-friendly oxygen-free roasting/wet magnetic separation technology for in situ recycling cobalt, lithium carbonate and graphite from spent LiCoO2/graphite lithium batteries

原始论文：10.1016/j.jhazmat.2015.09.050

证据字段	HP06	无氧焙烧与湿式磁选回收废旧钴酸锂/石墨电池中的钴、碳酸锂和石墨
原料与处理	LiCoO2/石墨电池正负极物料 利用石墨参与无氧焙烧，后接湿式磁选
产品与推进	钴、碳酸锂、石墨 将电池原有石墨转化为反应资源并进行物相分离
指标 1	Co 回收率：95.72 %。无氧焙烧后湿式磁选；温度及质量本次未核实；核算边界：作者摘要报告回收率
指标 2	Li 回收率：98.93 %。同一技术体系；核算边界：作者摘要报告回收率
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 摘要给出的回收率不能代表石墨品质及全厂能耗；具体温度未从原始方法完整核验
核查与团队	abstract Jia Li / Guangxu Wang / Zhenming Xu

HP07 · 2019 · 通过碳热还原真空热解回收再生废旧钴酸锂电池：调控 CoO 或 Co 的回收

Recovery and regeneration of LiCoO2-based spent lithium-ion batteries by a carbothermic reduction vacuum pyrolysis approach: Controlling the recovery of CoO or Co

原始论文：10.1016/j.wasman.2019.08.004

证据字段	HP07	通过碳热还原真空热解回收再生废旧钴酸锂电池：调控 CoO 或 Co 的回收
原料与处理	LiCoO2 电池正负极物料 真空脱离集流体后，用石墨碳热还原；水浸分离锂盐
产品与推进	Li2CO3、CoO 或 Co；再合成 LCO 把还原程度与下游产品形态联系起来
指标 1	Li 回收率：>93 %。真空热解—碳热还原—水浸体系；不是单一最优温度下所有指标的拼接；核算边界：作者报告回收
指标 2	Co 回收率：>99 %。同一研究技术体系；核算边界：作者报告回收
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 多温区、多步骤；摘要与 highlights 的再生容量倍率存在差异，本库不选用该容量数字
核查与团队	abstract Yiqi Tang / Hongwei Xie / Huayi Yin 等

HP11 · 2020 · 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

A Combined Pyro- and Hydrometallurgical Approach to Recycle Pyrolyzed Lithium-Ion Battery Black Mass Part 1: Production of Lithium Concentrates in an Electric Arc Furnace

原始论文：10.3390/met10081069

证据字段	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
原料与处理	热解后的黑粉造球料，另配 CuO、石英等 电弧炉熔炼，将过渡金属与含锂炉渣分离
产品与推进	Cu-Co-Ni 合金和富锂炉渣 设计渣相承接锂，而非仅把锂视为熔炼损失
指标 1	Li 进入渣相比例：82.4 %。实验室电弧炉，作者选定实验；核算边界：元素向中间物流的分配
指标 2	Co/Ni/Cu 合金回收比例：81.6 / 93.3 / 90.7 %。同研究报告；核算边界：合金中间产品，不是单金属电池级盐
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 进入渣相不是最终锂盐回收；下游处理与夹带损失仍需评价
核查与团队	partial-fulltext RWTH / Marcus Sommerfeld / Bernd Friedrich；TU Košice

HP12 · 2020 · 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

A Combined Pyro- and Hydrometallurgical Approach to Recycle Pyrolyzed Lithium-Ion Battery Black Mass Part 2: Lithium Recovery from Li Enriched Slag—Thermodynamic Study, Kinetic Study, and Dry Digestion

原始论文：10.3390/met10111558

证据字段	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
原料与处理	前篇工艺得到的富锂硅酸盐炉渣 以硫酸干式消解后水溶，降低硅溶出和胶凝问题
产品与推进	含锂溶液与低溶硅残渣 证明熔炼渣后处理必须考虑过滤性，不能只看锂能否溶出
指标 1	Si 浸出率变化：约50 → 约5 %。直接浸出与干式消解后溶解对比；核算边界：降低硅进入溶液，非锂回收率
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 仍是中间浸出液；需计酸、过滤、最终盐生产
核查与团队	partial-fulltext TU Košice / Jakub Klimko / Tomáš Havlík；RWTH / Bernd Friedrich

HP13 · 2021 · 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

Early-Stage Recovery of Lithium from Tailored Thermal Conditioned Black Mass Part I: Mobilizing Lithium via Supercritical CO2-Carbonation

原始论文：10.3390/met11020177

证据字段	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
原料与处理	热条件化的 NCM 电池黑粉 热处理后水浸，与高压 CO2 碳酸化比较
产品与推进	含锂溶液/碳酸盐物流 把锂回收前移，避免在复杂后端稀释和损失
指标 1	Li 提取率：最高79 %。热条件化与超临界 CO2 工艺；最高点具体组合本库不重构；核算边界：前置提锂步骤
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 效果取决于上游热历史、洗涤和固液比；高压设备与热预处理不能漏计
核查与团队	fulltext RWTH / Lilian Schwich / Tom Schubert / Bernd Friedrich

HP22 · 2026 · 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

Large-Scale Feasibility of the EnAM-Concept Demonstrated in the Pyrometallurgical Treatment of NMC Lithium-Ion Battery Black Mass and Full Cells

原始论文：10.1007/s40831-026-01488-x

证据字段	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
原料与处理	ACCUREC 来源 NMC 黑粉与热解整电芯 顶吹回转炉熔炼，受控冷却形成 γ-LiAlO2 富锂人工矿物
产品与推进	Cu-Ni-Co 合金与含人工富锂矿物的渣 把锂赋存相设计推进至百千克实际物料实验
指标 1	黑粉试验处理质量：128 kg。300 L 炉、约 100 L 工作容积、1450–1550° C；核算边界：单项黑粉试验
指标 2	整电芯试验合计物料：186.4 kg。两个整电芯试验合计；核算边界：不是单批质量
指标 3	Cu/Ni/Co 还原效率：约99 %。研究熔炼工况；核算边界：还原到金属相，非电池级盐总收率
指标 4	渣中 Li 固定于 γ-LiAlO2 比例：整电芯76；黑粉44 %。受控冷却；分母为渣中 Li；核算边界：不是投料 Li 总回收率
指标 5	研究报告比能耗：约8.5 kWh/kg 黑粉。黑粉装料与处理共 6.9 h；含添加剂的总投料 200 kg；相当于 5.4 kWh/kg 总投料，62%由燃烧器提供；核算边界：该黑粉熔炼阶段；原文另列炉体预热和清炉消耗，不能当全厂完整能耗
规模与局限	300 L 炉；百千克批次物料 富锂矿物形成不等于完成分选或 Li2CO3 生产；自动送料受电路板干扰；冷却及后处理要纳入能耗
核查与团队	fulltext RWTH / Hugo Lucas / Bernd Friedrich，与 TU Freiberg、HZDR、BGR 等合作

湿法与选择性提锂

HP01 · 1998 · 废旧锂离子二次电池有价金属回收的湿法工艺

Hydrometallurgical process for recovery of metal values from spent lithium-ion secondary batteries

原始论文：10.1016/S0304-386X(97)00050-900050-9)

证据字段	HP01	废旧锂离子二次电池有价金属回收的湿法工艺
原料与处理	废旧含钴、锂电池电极材料 比较亚硫酸、盐酸羟胺、盐酸等浸出体系及操作变量，随后分离回收	
产品与推进	含钴、锂回收物流 早期把浸出与分离联系起来的原始节点，不仅验证酸能溶解电极	
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 本次取得摘要，不能从后来综述的汇总数字推断本研究的全流程收率	
核查与团队	abstract Pingwei Zhang / Toshiro Yokoyama / Katsutoshi Inoue 等	

E00 · 2005 · 通过电化学过程从锂离子电池中回收镍和钴

Nickel and cobalt recycling from lithium-ion batteries by electrochemical processes

原始论文：10.1016/j.wasman.2004.12.012

证据字段	E00	通过电化学过程从锂离子电池中回收镍和钴
原料与处理	废正极经湿法浸出、萃取分离后形成的含镍/钴溶液。 浸出—溶剂萃取分开Ni/Co—分别电积。	
产品与推进	金属Ni、Co 证明电化学长期以来可以嵌入湿法回收；电积是产物制备单元，不等于一种与湿法互斥的整条路线。	
指标 1	Ni电流效率：87 %。	
指标 2	Ni电积电耗：2.96 kWh/kg Ni。	
指标 3	Co电流效率：96 %。	
指标 4	Co电积电耗：2.8 kWh/kg Co。	
共用条件	Ni：250 A/m²（25 mA/cm²）、pH 3–3.2、50° C；Co：250 A/m²、pH 4–4.2、50° C。电耗仅电积步骤，不能当作整个废电池回收能耗。	
规模与局限	实验室；反应器面积、批次质量及持续运行时间本轮未核。 不能证明未经分离的复杂浸出液也达到相同性能。；未覆盖前处理、浸出、萃取及后处理的全流程资源消耗。	
核查与团队	C：出版社/PubMed原始摘要 作者：C. Lupi; M. Pasquali; A. Dell’Era；发表时机构：Sapienza University of Rome	

HP02 · 2009 · 废旧锂离子电池中铝、钴、铜、锂的湿法分离

Hydrometallurgical separation of aluminium, cobalt, copper and lithium from spent Li-ion batteries

原始论文：10.1016/j.jpowsour.2008.10.077

证据字段	HP02	废旧锂离子电池中铝、钴、铜、锂的湿法分离
原料与处理	不同来源废手机电池；先人工拆解、分离铜负极 NaOH 除铝；硫酸与过氧化氢浸出钴锂；硫酸钴结晶	
产品与推进	分离的铜铝物流及钴盐、含锂溶液 把杂质去除顺序作为流程设计问题	
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 人工拆解和预先分离程度影响适用性；未核实锂最终成品回收率	
核查与团队	abstract D. A. Ferreira / M. B. Mansur 等	

HP03 · 2010 · 以有机柠檬酸浸出回收废旧锂离子电池中的钴和锂

Recovery of cobalt and lithium from spent lithium ion batteries using organic citric acid as leachant

原始论文：10.1016/j.jhazmat.2009.11.026

证据字段	HP03	以有机柠檬酸浸出回收废旧锂离子电池中的钴和锂
原料与处理	废旧 LiCoO2 正极材料 柠檬酸供酸与络合，H2O2 辅助还原浸出	
产品与推进	含钴锂浸出液 从无机酸转向有机配体体系的代表工作	
指标 1	Co 浸出率：>90 %。1.25 mol/L 柠檬酸、1.0 vol% H2O2、20 g/L、90° C、30 min、300 rpm；核算边界：浸出步骤	
指标 2	Li 浸出率：约100 %。同一浸出工况；核算边界：浸出步骤	
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 低固液比且需加热；高浸出率未直接证明电池级成品产率或全流程环境优势	
核查与团队	abstract 北理工李丽 / 陈人杰 / 吴锋	

HP04 · 2012 · 抗坏血酸辅助回收废旧锂离子电池中的钴和锂

Ascorbic-acid-assisted recovery of cobalt and lithium from spent Li-ion batteries

原始论文：10.1016/j.jpowsour.2012.06.068

证据字段	HP04	抗坏血酸辅助回收废旧锂离子电池中的钴和锂
原料与处理	经拆解、分离与预处理的含 LiCoO2 正极材料 抗坏血酸参与浸出与氧化还原过程
产品与推进	含钴锂回收物流 延续有机酸路线，关注还原作用与金属溶解
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 预处理与最终盐产品的物料账本未在本次摘要级证据中完整核实
核查与团队	abstract 北理工李丽 / 陈人杰 / 吴锋，与 Jun Lu / Khalil Amine 合作

D26 · 2013 · 混合锂离子电池正极材料回收的新方法

A novel method to recycle mixed cathode materials for lithium ion batteries

原始论文：10.1039/C3GC40182K

证据字段	D26	混合锂离子电池正极材料回收的新方法
原料与处理	混合未使用正极粉末；这一原料性质由同团队2014后续论文引言明确回顾 低温湿法分离并将回收组分重新合成为正极，调配Ni/Mn/Co而非逐一分离为纯金属盐
产品与推进	再合成三元正极 早期提出混合化学体系的金属共回收—重新配平—合成思路
规模与局限	本次未核实批处理活性材料质量 模型混粉不等于复杂真实退役料；新合成产物不是原晶体保留
核查与团队	出版社摘要；后续原始论文明确回顾原料 WPI Haiyang Zou / Eric Gratz / Diran Apelian / Yan Wang

D27 · 2014 · 废旧锂离子电池的闭环回收工艺

A closed loop process for recycling spent lithium ion batteries

原始论文：10.1016/j.jpowsour.2014.03.126

证据字段	D27	废旧锂离子电池的闭环回收工艺
原料与处理	WPI回收来源的废电池主要为LCO；另一实验是在碎料中加入LMO/NMC111/LFP粉末 破碎分离钢铜；NaOH溶铝；正极浸出后调整Ni/Mn/Co，氢氧化物共沉淀，再与Li2CO3反应
产品与推进	可调比例三元正极及回收铜/钢 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

证据字段	D27	废旧锂离子电池的闭环回收工艺
规模与局限	本次未核实批处理活性材料质量 另一混合组含外加粉末，非全部真实混合退役料；约90%整体表述不可误作每个元素均90%；历史利润不是当前实际利润
核查与团队	出版社摘要和引言 WPI Eric Gratz / Qina Sa / Diran Apelian / Yan Wang

E02 · 2019 · 通过浆料电解从废LiMn2O4中回收锂和锰

Recovery of Lithium and Manganese from Scrap LiMn2O4 by Slurry Electrolysis

原始论文：10.1021/acssuschemeng.9b04127

证据字段	E02	通过浆料电解从废LiMn2O4中回收锂和锰
原料与处理	废LiMn2O4；具体来源、杂质与颗粒尺度本轮未核。 浆料电解耦合固体溶出与阳极MnO2生成，减少外加化学氧化剂/还原剂。
产品与推进	Li2CO3、MnO2 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。
指标 1	Li浸出率：>99 %。
指标 2	Mn浸出率：>92 %。
指标 3	阴极电流效率：77 %。
指标 4	阳极电流效率：62 %。
指标 5	Li2CO3纯度：99.59 wt%。
指标 6	MnO2纯度：92.33 wt%。
共用条件	363 K（90° C）；MnO2沉积条件包含1.0 M H2SO4。不同优化实验指标不能默认同时获得。
规模与局限	实验室浆料电解；没有取得连续固体进料/排渣证据。 较高操作温度；电流效率仍有损失。；MnO2的92.33 wt%不能直接称为电池级；全流程能耗NR。
核查与团队	C：ACS原始摘要 作者：Zheng Li; Lihua He; Zhongwei Zhao et al.；发表时机构：Central South University

HP14 · 2019 · 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

Acid-Free and Selective Extraction of Lithium from Spent Lithium Iron Phosphate Batteries via a Mechanochemically Induced Isomorphic Substitution

原始论文：10.1021/acs.est.9b01919

证据字段	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
原料与处理	废旧 LFP 正极物料 机械作用驱动 Na/Li 同晶置换
产品与推进	可分离的锂物流及含铁磷残余结构 区别于全部溶解，以选择性固相反应释放锂
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 无酸并不意味着无药剂或无需后续分离；未取得全文与完整能耗
核查与团队	abstract 清华 / Kang Liu / Quanyin Tan / Lili Liu / Jinhui Li

HP09 · 2020 · 用深共熔溶剂从锂离子电池正极材料回收钴

Solvometallurgical recovery of cobalt from lithium-ion battery cathode materials using deep-eutectic solvents

原始论文：10.1039/D0GC00940G

证据字段	HP09	用深共熔溶剂从锂离子电池正极材料回收钴
原料与处理	模型 LiCoO2，加入 Al/Cu 以研究集流体成分影响 氯化胆碱:柠檬酸为 1:2，加入 35 wt% 水；结合溶剂萃取及反萃
产品与推进	钴回收产物 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
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 模型物料；不能把 DES 名称直接等同于低毒、低能耗或无限回用
核查与团队	partial-fulltext KU Leuven / Nand Peeters / Koen Binnemans / Sofía Riaño

D28 · 2021 · 再生正极材料使锂离子电池获得优异性能

Recycled cathode materials enabled superior performance for lithium-ion batteries

原始论文：10.1016/j.joule.2021.09.005

证据字段	D28	再生正极材料使锂离子电池获得优异性能
原料与处理	回收料制备NMC111；本次未完整核实全部废料批次和EOL分布 浸出除杂、调配Ni/Mn/Co、共沉淀和烧结合成；以微结构解释性能
产品与推进	再合成NMC111 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

证据字段	D28	再生正极材料使锂离子电池获得优异性能
指标 1	1Ah电芯寿命：4200次/80%；11600次/70%。NMC111；两个不同终点；完整倍率/温度/电压本次未核，拒绝无条件最高纪录	
共用条件	未核实的条件不补猜	
规模与局限	1Ah再制电芯验证；原料批量本次未核 不能与不同倍率/电压/终止容量的路线比较最高寿命；也不是原晶体保留式直接再生	
核查与团队	INL原始成果库摘要与DOE原始项目材料 WPI Xiaotu Ma / Yan Wang；INL/Argonne及企业合作	

HP15 · 2021 · 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

Selective extraction of lithium from a spent lithium iron phosphate battery by mechanochemical solid-phase oxidation

原始论文：10.1039/D0GC03683H

证据字段	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
原料与处理	废旧 LFP 正极物料 过硫酸钠辅助球磨氧化，后水浸及沉淀	
产品与推进	Li2SO4 浸出中间物流，最终 Li3PO4；FePO4 残余物 由置换转向固相氧化驱动脱锂	
指标 1	Li 提取率：99.7 %。600 rpm、5 min；Na2S2O8:LFP 质量比 2:1；核算边界：提取；未等同全流程 Li3PO4 成品收率	
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 5 min 仅是球磨步骤；氧化剂质量为 LFP 的两倍；产品不是碳酸锂	
核查与团队	abstract 清华 / Kang Liu / Lili Liu / Quanyin Tan / Jinhui Li	

HP17 · 2023 · 利用机械化学实现锂离子电池回收中的广谱高效提锂

Universal and efficient extraction of lithium for lithium-ion battery recycling using mechanochemistry

原始论文：10.1038/s42004-023-00844-2

证据字段	HP17	利用机械化学实现锂离子电池回收中的广谱高效提锂
原料与处理	LCO、NMC、LMO、LFP 及混合模型物料；Al 还原剂 机械化学还原、后续水处理等两种流程	
产品与推进	Li2CO3 扩展材料范围，并用最终碳酸锂质量计算锂收率	
指标 1	Li 最终回收率：最高70 %。论文两种流程与多类物料；最高值不可套给每种材料；核算边界：最终 Li2CO3 中 Li 相对于投料理论 Li	
指标 2	LFP 所得产品纯度：93.10 / 71.81 %。流程 1 / 流程 2，原文表 1；核算边界：Li2CO3 产品纯度	

证据字段	HP17	利用机械化学实现锂离子电池回收中的广谱高效提锂
指标 3	NMC 所得产品纯度：99.92 / 99.88 %。流程 1 / 流程 2，原文表 1；核算边界：Li2CO3 产品纯度
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 不同材料产品纯度并不一致，LFP 含磷问题明显；不能把适用多材料理解为均可直接出电池级产品
核查与团队	fulltext KIT/HIU / Oleksandr Dolotko / Michael Knapp / Helmut Ehrenberg

HP18 · 2023 · 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

Complete and selective recovery of lithium from EV lithium-ion batteries: Modeling and optimization using oxalic acid as a leaching agent

原始论文：10.1016/j.seppur.2023.124143

证据字段	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
原料与处理	工业破碎与机械分选所得电动汽车电池黑粉 草酸处理，使锂进入液相而多数过渡金属保留于固相
产品与推进	含锂浸出液；含过渡金属固体 在真实黑粉上展示选择性，明确铝随锂共浸
指标 1	Li 浸出率：98.8 %。0.6 mol/L 草酸、50 g/L、60° C、60 min；核算边界：浸出步骤
指标 2	Co/Ni/Mn 浸出率：<0.5 / <0.5 / 1.5 %。同一条件；核算边界：选择性以进入液相计
指标 3	液相 Li / Al 浓度：1.7±0.1 / 0.60±0.01 g/L。优化工况；核算边界：两者仍需分离
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 Li 高浸出率不等于高纯盐回收；溶液含 Al，后续除铝及浓缩仍必要
核查与团队	fulltext Chalmers / Léa M. J. Rouquette / Martina Petranikova / Nathalia Vieceli

HP19 · 2024 · 前置锂回收从实验室水浸到放大的挑战

Transfer of Early-Stage Lithium Recovery from Laboratory-Scale Water Leaching to Upscale Challenges

原始论文：10.3390/met14010067

证据字段	HP19	前置锂回收从实验室水浸到放大的挑战
原料与处理	热预处理黑粉 CO2 辅助水浸，从实验室放大至 100 L
产品与推进	含锂浸出液 直接暴露放大后因几何相似性不足造成性能下降
指标 1	实验室 Li 提取率：70.52±2.11 %。30 g/L、80° C、CO2 6 L/min；用于实验室优化验证；核算边界：不能当成 100 L 放大实测值

证据字段	HP19	前置锂回收从实验室水浸到放大的挑战
指标 2	放大反应器体积：100 L。批次放大，效能下降；核算边界：设备体积，不是 kg/h 处理能力
规模与局限	100 L 批次放大 最优实验室参数不能直接迁移；并非连续化生产验证
核查与团队	partial-fulltext RWTH / Daniel Dotto Munchen / Ksenija Milicevic Neumann / Bernd Friedrich

HP20 · 2024 · 经响应面优化的 CO2 辅助浸出前置回收废旧电池锂

Early-stage recovery of lithium from spent batteries via CO2-assisted leaching optimized by response surface methodology

原始论文：10.1038/s41598-024-67761-9

证据字段	HP20	经响应面优化的 CO2 辅助浸出前置回收废旧电池锂
原料与处理	先经 600° C 真空热解的 NMC 电池黑粉，再细磨 常压 CO2 辅助水浸，优化操作参数
产品与推进	含锂溶液 探索高压碳酸化之外的常压路径
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 常压浸出不等于完整流程常温低能耗，热处理与细磨仍在前端
核查与团队	partial-fulltext RWTH / Ksenija Milicevic Neumann / Muhammad Ans / Bernd Friedrich

E13 · 2025 · 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

Self-looped electrochemical recycling of lithium-ion battery cathode materials to manufacturing feedstocks

原始论文：10.1038/s44286-025-00186-x

证据字段	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
原料与处理	主要受控正极材料；SI中“spent LCO”由购买LCO电化学脱锂制得，不能等同真实工业混合黑粉。 三腔固体电解质反应器利用氢气氧化/析氢，将Li2SO4转成LiOH和H2SO4；酸浸出及氢氧化物沉淀形成硫酸盐溶液并返回。
产品与推进	LiOH、Co(OH)2等制造原料；再生酸/碱 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。
指标 1	Li回收率：91.2 %。
指标 2	Co回收率：97 %。
指标 3	LiOH纯度：>99.7 %。
指标 4	Co(OH)2纯度：>99.8 %。

证据字段	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
指标 5	循环持续时长：>500 h / 26 batches。	
指标 6	100 mA/cm² 实际槽压：约1.8 V。	
指标 7	实验循环物料泄漏/转移损失：约2 % per cycle；需补Li2SO4。	
共用条件	有效面积4 cm²；100 mA/cm²时Li迁移效率约90%，长期>80%。0.36 V仅1 mA/cm²起始电压，不能代替操作槽压。初10轮200 mL、后16轮500 mL，属批次循环。1 M Li2SO4、流量0.36 mL/min产生pH约0.85酸液；约0.65 M LiOH与最高4.8 M属不同条件。 SI p31承认每循环约2%泄漏/液体转移损失：200 mL循环额外补约4 mL 1 M Li2SO4，500 mL循环补约10 mL 1 M Li2SO4。	
规模与局限	4 cm² 实验室反应器；26批>500 h。TEA 1000 kg LiOH•H2O/day是假设产能，非中试规模。 仍使用外加H2O2等试剂；自循环不代表整个系统无外源物料。；真实黑粉杂质、膜寿命、H2处理及高浓产物条件需要进一步验证。；SI经济模型100 mA/cm²、85%迁移、1.9 V、设备10年等是假设，不能混同主文实测1.8 V。；实验闭路存在约2%/轮的泄漏或转移损失并补充Li2SO4；作者认为工程改进可降低，但本文未证明无补料运行。；Co(OH)2纯度为作者报告值，补充材料中的杂质形态假设影响纯度折算，不能直接当作完整杂质谱认证。	
核查与团队	A：原始全文+56页SI 作者：Zhiwei Fang; Peng Zhu; Xiao Zhang; Yuge Feng; Haotian Wang；发表时机构：Rice University	

E15 · 2025 · 伴随发电的废电池电化学锂回收

Electrochemical lithium recycling from spent batteries with electricity generation

原始论文：10.1038/s41893-024-01505-5

证据字段	E15	伴随发电的废电池电化学锂回收
原料与处理	废电极；具体材料化学及原料真实性边界本次未从全文核实。 以NO2捕集/反应作为配对化学过程，利用固体锂离子传导膜实现提锂并输出电能。	
产品与推进	LiNO3、电能 展示利用其他化学势为回收供能的配对策略；需评价可获得的实际配对物料，而非只比较槽电压。	
指标 1	Li回收率：最高97 %。	
指标 2	LiNO3纯度：>99 %。	
指标 3	输出电能：66 Wh/kg electrode。	
共用条件	66 Wh/kg的分母为电极质量，非电芯质量；NO2供给、膜制备、气体处理、后续盐转换不能排除于全系统评价之外。	
规模与局限	实验室；具体面积、质量与连续性本轮未核。 NO2来源、浓度和气体净化边界决定实际应用场景。；LiNO3未直接等同Li2CO3/LiOH；目标下游规格不同。；输出电能不是全生命周期净能收益。	
核查与团队	C：Nature原始摘要/网页，未获全文SI 作者：Weiping Wang; Zaichun Liu; Zhengxin Zhu; Yirui Ma; Kai Zhang; Yahan Meng; Touqeer Ahmad; Nawab Ali Khan; Qia Peng; Zehui Xie; Zuodong Zhang; Wei Chen；发表时机构：University of Science and Technology of China	

E19 · 2026 · 低电压悬浮电解实现氧化还原耦合协同浸出以闭环回收混合NCM–LFP正极

Low-voltage suspension electrolysis enables redox-coupled synergistic leaching for closed-loop recycling of mixed NCM-LFP cathodes

原始论文：10.1039/D6GC01668E

证据字段	E19	低电压悬浮电解实现氧化还原耦合协同浸出以闭环回收混合NCM－LFP正极
原料与处理	混合NCM－LFP正极粉体；实际工业黑粉来源、石墨含量及杂质谱本轮未核。 悬浮电解利用铁价态变化介导互补氧化还原浸出，无外加还原剂；分离锂、磷酸铁和三元前驱体后再制材料。
产品与推进	Li2CO3、FePO4、NCM前驱体及再生正极 将混料视为可耦合的氧化还原反应物，提供浆料体系降低外加还原剂的近期节点；不是首个浆料电解工作。
指标 1	Li/Ni/Co/Mn/Fe浸出率：>98 %。
指标 2	电解直流电耗：0.006 kWh/kg black powder。
指标 3	模型利润：3.1 USD/kg，模型假设条件。
共用条件	40° C、1.2 V、40 g/L（25 mL/g）。0.006 kWh/kg仅电解直流能耗，不能覆盖升温、搅拌和分离；40 g/L是固体浓度，不是kg/h通量。时间、酸浓度、电流及批次处理质量NR。
规模与局限	实验室悬浮电解；没有持续固体进出料证据。 极低电耗必须连同系统边界、原料配比和浸出时间解读。；利润来自模型，不能当2026市场实际毛利或企业利润。；混合比例与杂质波动的适应范围需全文验证。
核查与团队	C：RSC原始摘要，全文/SI未取得 作者：Kenan Zhong; Fucheng Wang; Wenke Liu; Zhuo Ye; Xueyang Hou; Kai Yang; Zhao Fang；发表时机构：本次未核实逐作者单位

HP21 · 2026 · 利用超临界 CO2 在中试规模前置回收锂电池黑粉中的锂

Early-Stage Recovery of Lithium from Lithium-Ion Battery Black Mass in Pilot Scale Using Supercritical CO2

原始论文：10.1021/acssusresmgt.5c00663

证据字段	HP21	利用超临界 CO2 在中试规模前置回收锂电池黑粉中的锂
原料与处理	实际黑粉，比较热预处理与残留氟的影响 CO2 碳酸化、水浸、电渗析富集、除杂与碳酸锂制备
产品与推进	Li2CO3 中试给出成品纯度，也揭示 LiF 与膜处理带来的浸出/成品收率差距
指标 1	Li 浸出率：最高97 %。250° C、100 bar、2 h，实验 D2-1；液固比 L:S=120（原文表 4）；核算边界：浸出率，不是 Li2CO3 成品收率
指标 2	Li2CO3 纯度：99.82－99.97 %。经富集与分离，样品/后处理条件不同；核算边界：成品纯度，不代表全部原料均达到相同值
指标 3	中试高压釜体积：200 L。kg 级黑粉、批次；核算边界：不是连续处理能力
指标 4	液固比 L:S：120 原文比值。97% 提锂实验；降低为 60 并延时至 4 h 的另一实验仅 83%；核算边界：高液固比与吞吐量的权衡；不能拼作相同批次

证据字段	HP21	利用超临界 CO2 在中试规模前置回收锂电池黑粉中的锂
规模与局限	200 L 高压釜、kg 级物料、间歇处理 LiF 可溶入并被计为浸出锂，但不全部转成 Li2CO3；长期电渗析选择性衰减与杂质积累；作者明确为间歇工艺；高液固比降低物料吞吐量，升温至超临界条件另需数小时；作者估计分析不确定性约 10%，不应把百分点差异过度解释	
核查与团队	fulltext TU Bergakademie Freiberg / Bastian Hansel / Martin Bertau；HZDR 与 Fraunhofer 合作	

溶剂冶金

HP08 · 2019 · 用于锂离子电池正极回收的深共熔溶剂

Deep eutectic solvents for cathode recycling of Li-ion batteries

原始论文：10.1038/s41560-019-0368-4

证据字段	HP08	用于锂离子电池正极回收的深共熔溶剂
原料与处理	LCO 与 NMC 正极材料 氯化胆碱与乙二醇构成深共熔介质浸出	
产品与推进	含锂、钴等金属的溶剂物流及分离集流体 使非水溶剂成为正极回收介质的代表性高关注节点	
指标 1	LCO 中 Li 与 Co 浸出率：≥90 %。氯化胆碱/乙二醇体系；本次未完整读取 SI 工况表；核算边界：浸出，非最终盐产率	
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 部分处理需高温；浸出与溶剂闭路、产品分离、真实杂质耐受性是不同证据层级	
核查与团队	abstract Rice / Mai K. Tran / Ganguli Babu / Pulickel M. Ajayan	

HP16 · 2022 · 结合溶剂浸出与溶剂萃取从锂电池正极材料回收钴

Recovery of cobalt from lithium-ion battery cathode material by combining solvoleaching and solvent extraction

原始论文：10.1039/D1GC03776E

证据字段	HP16	结合溶剂浸出与溶剂萃取从锂电池正极材料回收钴
原料与处理	购买的 LiCoO2 模型粉体与 Al、Cu 粉末 酸性萃取剂 D2EHPA 直接浸出；Cu 参与还原；后选择性反萃	
产品与推进	分离的钴物流 使浸出与萃取共享介质，减少流程转换	
指标 1	溶剂复用验证：5 循环。实验室模型体系；核算边界：循环次数，不等同连续运行或无溶剂损耗	
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 不是工业黑粉验证；溶剂载量与长期杂质积累仍待评估	

证据字段	HP16	结合溶剂浸出与溶剂萃取从锂电池正极材料回收钴
核查与团队	fulltext KU Leuven / Nand Peeters / Koen Binnemans / Sofía Riaño

生物浸出

HP23 · 2008 · 用氧化亚铁硫杆菌生物浸出废旧锂离子二次电池金属

Bioleaching of metals from spent lithium ion secondary batteries using Acidithiobacillus ferrooxidans

原始论文：10.1016/j.wasman.2007.01.010

证据字段	HP23	用氧化亚铁硫杆菌生物浸出废旧锂离子二次电池金属
原料与处理	含 LiCoO2 废旧电池物料 嗜酸化能自养细菌以硫及 Fe(II) 为能量来源，产生酸与铁离子体系
产品与推进	含钴锂浸出液 把微生物产生浸出剂用于锂电池回收的早期节点
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 本次仅核读原始摘要，不把综述转述的回收率和天数当作原始已核实参数
核查与团队	abstract Debaraj Mishra / Dong-Jin Kim / D. E. Ralph / Jong-Gwan Ahn / Young-Ha Rhee

HP24 · 2021 · 高浆浓度下用生物浸出从废旧锂电池提取金属

Metal extraction from spent lithium-ion batteries (LIBs) at high pulp density by environmentally friendly bioleaching process

原始论文：10.1016/j.jclepro.2020.124242

证据字段	HP24	高浆浓度下用生物浸出从废旧锂电池提取金属
原料与处理	模拟工业回收异质性的混合黑粉，含钴 222.5 g/kg 使用含生物酸与铁离子的培养液，进行多轮补充
产品与推进	含钴锂浸出液 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
指标 1	Co / Li 浸出率：94 / 60.3 %。100 g/L、72 h、培养液补充策略；核算边界：浸出液中的金属，非成品
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 72 h 是浸出阶段；培养和反复补充的水、营养、铁盐消耗应另计；非连续中试
核查与团队	abstract NTU / Joseph Jegan Roy / Madhavi Srinivasan / Bin Cao

HP25 · 2021 · 高浆浓度下生物浸出回收废旧 NMC 锂电池金属

Bioleaching as an Eco-Friendly Approach for Metal Recovery from Spent NMC-Based Lithium-Ion Batteries at a High Pulp Density

原始论文：10.1021/acssuschemeng.0c06573

证据字段	HP25	高浆浓度下生物浸出回收废旧 NMC 锂电池金属
原料与处理	废旧 NMC 电池粉体 A. ferrooxidans 培养液供酸及铁离子，浸出期间补充培养液三个循环	
产品与推进	含 Ni、Mn、Co、Li 溶液 同团队将高固含策略扩展到 NMC 多金属体系	
指标 1	Ni / Mn / Co / Li 浸出率：90 / 92 / 82 / 89 %。100 g/L、72 h、三个培养液补充循环；核算边界：浸出步骤	
规模与局限	实验室批次；具体处理质量未核实 100 g/L 不等于高通量中试；回补培养液造成的总液固比需单独核算	
核查与团队	abstract NTU / Joseph Jegan Roy / Madhavi Srinivasan / Bin Cao	

直接再生

D21 · 2014 · 将正极功能恢复作为锂离子电池回收的另一条路径

Cathode refunctionalization as a lithium ion battery recycling alternative

原始论文：10.1016/j.jpowsour.2014.01.078

证据字段	D21	将正极功能恢复作为锂离子电池回收的另一条路径
原料与处理	商业LFP电芯实验室循环至EOL 化学补锂和电化学补锂比较，联系材料恢复与能量投入	
产品与推进	功能恢复LFP 说明直接修复思想早于2018年，且早期已结合能耗评价	
规模与局限	本次未核实批处理活性材料质量 未复核全文方法，不把二手综述容量数字转填为本次核实基准；不声称绝对首创	
核查与团队	原始出版社题录及摘要 Rochester Institute of Technology Matthew Ganter / Brian Landi / Callie Babbitt 等	

D01 · 2018 · 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

Effective regeneration of LiCoO2 from spent lithium-ion batteries: a direct approach towards high-performance active particles

原始论文：10.1039/C7GC02831H

证据字段	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
原料与处理	废旧LCO；本条未复核老化来源与退役历史 水热补锂与短时退火相结合	
产品与推进	再生LCO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	
规模与局限	本次未核实批处理活性材料质量 本条未获得充分方法细节，不填最高容量或规模；不是直接回收最早起点	
核查与团队	题录及作者机构说明 UCSD Zheng Chen / Yang Shi	

D02 · 2018 · 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

Resolving the Compositional and Structural Defects of Degraded LiNixCoyMnzO2 Particles to Directly Regenerate High-Performance Lithium-Ion Battery Cathodes

原始论文：10.1021/acsenergylett.8b00833

证据字段	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
原料与处理	退化NCM颗粒；本条未重新核对全部原料批次 补锂与热处理协同消除缺锂和结构缺陷	
产品与推进	再生NCM 将修复从补足元素推进到结构缺陷诊断	
规模与局限	本次未核实批处理活性材料质量 模型退化和实际市场退役料需分开；不据此宣称复杂黑粉通用	
核查与团队	题录及作者机构说明 UCSD Zheng Chen / Yang Shi	

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

Ambient-Pressure Relithiation of Degraded LixNi0.5Co0.2Mn0.3O2 (0<x<1) via Eutectic Solutions for Direct Regeneration of Lithium-Ion Battery Cathodes

原始论文：10.1002/aenm.201900454

证据字段	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
原料与处理	退化NCM523；需区分不同脱锂样品 LiNO3/LiOH摩尔比3:2；300℃熔盐补锂后洗涤，加入5%过量Li2CO3于氧气850℃退火4h	
产品与推进	再生NCM523 解除水热高压约束，建立常压熔盐路径	

证据字段	D03丨通过共熔体系在常压下为退化NCM523补锂，实现正极直接再生
指标 1	5C放电比容量：124.4 mAh/g。补锂4h样品；2h样品108.4mAh/g；锂金属半电池
共用条件	300℃补锂2或4h；850℃4h退火；约3mg/cm²。
规模与局限	本次未核实批处理活性材料质量 常压不等于室温，850℃后处理仍存在；锂金属半电池不能直接当商业寿命
核查与团队	作者全文 UCSD Zheng Chen / Ying Shirley Meng

D04 · 2020 · 通过靶向缺陷修复高效直接回收锂离子电池正极

Efficient Direct Recycling of Lithium-Ion Battery Cathodes by Targeted Healing

原始论文：10.1016/j.joule.2020.10.008

证据字段	D04丨通过靶向缺陷修复高效直接回收锂离子电池正极
原料与处理	Tenergy 2500mAh商业电芯在实验室循环6500次至约50%容量衰减；不是随机市场退役料 DMC洗涤、NMP剥离；0.2M LiOH+0.08M柠檬酸溶液补锂，洗涤干燥，4%额外Li2CO3、600℃氮气2h
产品与推进	再生LFP 把Fe/Li反位缺陷与缺锂共同纳入修复机理
指标 1	补锂条件：80℃，5h。低温溶液步骤，不含600℃退火
指标 2	循环性能：1000次后150 mAh/g。0.5C；锂金属半电池；正文标准负载约3–5mg/cm²
指标 3	较高负载全电池示范：28.6mAh软包，0.1C循环100次无明显衰减。3cm×3cm，约19mg/cm²正极，石墨负极；区别于1000次半电池测试
共用条件	0.5C=85mA/g；数据来自正文对补锂并退火样品描述。
规模与局限	100mL反应器、80mL反应液；活性粉末批质量本次未核实 水相补锂后仍需高温；模型经济性不能等于产业利润；作者指出物流、分离仍需改进
核查与团队	作者全文 UCSD Zheng Chen；Argonne / ORNL合作

D12 · 2020 · 通过离子热补锂直接回收废旧三元正极

Direct Recycling of Spent NCM Cathodes through Ionothermal Lithiation

原始论文：10.1002/aenm.202001204

证据字段	D12丨通过离子热补锂直接回收废旧三元正极
原料与处理	废旧NCM111；老化类型本条未完整复核 可循环离子液体辅助补锂
产品与推进	再生NCM111 扩展液相补锂介质，强调颗粒形貌保留

证据字段	D12丨通过离子热补锂直接回收废旧三元正极
规模与局限	本次未核实批处理活性材料质量 离子液体回用的次数、杂质累积和全流程质量损失需单独验证
核查与团队	原始摘要 ORNL Tao Wang / Huimin Luo / Sheng Dai；Bai/Belharouak合作

D20 · 2020 · 一项锂离子电池召回物料的直接回收案例

A direct recycling case study from a lithium-ion battery recall

原始论文：10.1016/j.susmat.2020.e00152

证据字段	D20丨一项锂离子电池召回物料的直接回收案例
原料与处理	商业召回电芯；召回料不能一律称正常长期服役退役料 电解液萃取、拆解降低污染、水相收集、一锅水热处理、分离和后处理
产品与推进	再生正负极/电解液与再制全电池 以真实商业召回料呈现贯穿分离与再制的流程
规模与局限	本次未核实批处理活性材料质量 作者工业可放大主张不等于已达到持续商用生产；需核批质量与收率
核查与团队	原始出版社摘要和可读正文片段 Onto Technology Steven Sloop；Argonne / Oregon State合作

D05 · 2021 · 废旧锂离子电池正极直接回收工艺的设计与优化

Design and Optimization of the Direct Recycling of Spent Li-Ion Battery Cathode Materials

原始论文：10.1021/acssuschemeng.0c09017

证据字段	D05丨废旧锂离子电池正极直接回收工艺的设计与优化
原料与处理	主要机理优化使用化学脱除10%锂的NCM111，不能直接等同真实退役黑粉 0.1M LiOH+3.9M KOH替代4M LiOH；220℃2h；5mol%额外Li2CO3、850℃4h
产品与推进	再生NCM111 把锂盐浓度与溶液循环引入工艺成本控制
指标 1	C/3容量保持率：93.1%，50次。150.4→140.1mAh/g；新料对照93.2%；不可跨不同电芯条件排名
共用条件	模型脱锂NCM111；总碱浓度仍约4M。
规模与局限	本次未核实批处理活性材料质量 锂盐下降不代表总碱度下降；溶液复用不等于固体连续进料
核查与团队	作者全文 UCSD Zheng Chen / Ping Liu；Argonne合作

D06 · 2022 · 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

Achieving low-temperature hydrothermal relithiation by redox mediation for direct recycling of spent lithium-ion battery cathodes

原始论文：10.1016/j.ensm.2022.06.017

证据字段	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
原料与处理	化学脱锂NCM111、循环NCM111及循环NCM622三类 引入低浓度氧化还原介质促进补锂，随后结构修复热处理
产品与推进	再生NCM 把电子供给和补锂动力学结合，降低液相反应温压
指标 1	补锂温压：220℃/~25bar降至100℃或以下/~1bar。作者摘要的对应比较；非全流程能耗实测
共用条件	未核实的条件不补猜
规模与局限	本次未核实批处理活性材料质量 低温指标只针对补锂段；不同原料三类不可合并成市场黑粉验证
核查与团队	作者全文摘要及部分正文 UCSD Zheng Chen / Ping Liu；Honda与Argonne合作

D22 · 2023 · 废旧锂离子电池正极黑粉的可放大直接回收

Scalable Direct Recycling of Cathode Black Mass from Spent Lithium-Ion Batteries

原始论文：10.1002/aenm.202203093

证据字段	D22	废旧锂离子电池正极黑粉的可放大直接回收
原料与处理	Honda提供20Ah寿命终止方形电芯；手工剥离并刀刮取得NCM111正极黑粉，非正负极混合商业黑粉 100g黑粉加入500mL反应器/300mL 4M LiOH，220℃4h；水洗、80℃过夜干燥；5mol%额外Li2CO3、850℃4h
产品与推进	再生NCM111并扩展NCM622 将纯化和补锂集成，使真实退役正极黑粉达到100g批次
指标 1	单批黑粉：100g。NCM111；500mL釜，300mL反应液
指标 2	中间产率：91wt%。相对CAM质量；水洗干燥后、退火前
共用条件	EOL20Ah电芯是原料，不是再生产品电芯容量。
规模与局限	100g/批 91wt%为洗涤干燥后、退火前基于CAM质量的产率；非整电池成品率；原料保晶、保持形貌仍是前提
核查与团队	作者全文 UCSD Zheng Chen / Weikang Li / Varun Gupta；Honda合作

D08 · 2024 · 通过自发补锂在环境条件下直接回收废旧正极材料

Direct recycling of spent cathode material at ambient conditions via spontaneous lithiation

原始论文：10.1038/s41893-024-01412-9

证据字段	D08	通过自发补锂在环境条件下直接回收废旧正极材料
原料与处理	实验室拆解10Ah NCM622软包；另有工业拆解NCM523黑粉 表面自吸附含锂有机试剂促进自发补锂，接后续材料处理
产品与推进	再生三元正极 利用界面反应降低补锂门槛并向软包验证推进
指标 1	软包循环保持率：80.5%，500次。以再生NCM523组装的1Ah软包；不等同NCM622原料电芯或粉末批处理质量
共用条件	未核实的条件不补猜
规模与局限	1Ah产品电芯验证；原料电芯10Ah；两者不是反应器规模 环境条件补锂不自动代表整个制造流程室温；主文付费导致部分条件仅可通过SI核查
核查与团队	出版社摘要和参考文献；SI已取得并读部分 清华周光敏/成会明；上海交大梁正等合作

D14 · 2024 · 在互易三元熔盐中直接回收废旧富镍正极

Direct recycling of spent nickel-rich cathodes in reciprocal ternary molten salts

原始论文：10.1016/j.jpowsour.2023.233798

证据字段	D14	在互易三元熔盐中直接回收废旧富镍正极
原料与处理	废旧NMC622 互易三元熔盐补锂与结构恢复，配合技术经济评价
产品与推进	再生富镍正极 把熔盐工艺推进到富镍材料并纳入经济性
规模与局限	本次未核实批处理活性材料质量 模型经济收益不等于实际工厂利润；年份按2024卷期，DOI含2023
核查与团队	原始机构摘要/作者稿链接 ORNL Tao Wang / Huimin Luo / Sheng Dai；Argonne合作

E10 · 2024 · 通过废LiFePO4浆料电化学补锂再生锂离子电池正极

Electrochemical Relithiation in Spent LiFePO4 Slurry for Regeneration of Lithium-Ion Battery Cathode

原始论文：10.1021/acs.inorgchem.4c02844

证据字段	E10	通过废LiFePO4浆料电化学补锂再生锂离子电池正极
原料与处理	废LFP浆料；是否未经净化的黑粉及杂质分布本轮未核。 LiCl作为补锂试剂，在浆料中电化学补锂并修复结构。

证据字段	E10	通过废LiFePO4浆料电化学补锂再生锂离子电池正极
产品与推进	再生LFP 证明电化学同时可服务直接再生；提锂和补锂目标相反，不能混在同一回收率榜单中。	
指标 1	固体浓度：200 g/L。	
指标 2	处理时间：2 h。	
指标 3	再生材料容量：151.5 mAh/g at 0.1 C。	
指标 4	400圈容量保持率：96.6 % at 1 C。	
共用条件	25° C；200 g/L、2 h是本研究条件。电流、槽压、物料收率及电池测试面载量NR。	
规模与局限	实验室浆料补锂；没有固体连续进出证据。 半电池容量与循环保持率不能代替全电池质量认证。；“LiCl为唯一试剂”仍需核实所有前后处理及洗涤边界。	
核查与团队	C：ACS原始摘要 作者：Shuo Chen; Baichao Zhang; Lu Yang; Xinyu Hu; Ningyun Hong; Haoji Wang; Jiangnan Huang; Wentao Deng; Guoqiang Zou; Hongshuai Hou; Xiaobo Ji；发表时机构：Central South University	

D10 · 2026 · 面向工业尺度的异质废旧正极材料柔性直接再生

Flexible direct regeneration of heterogeneous cathode materials of spent lithium-ion batteries at industrial scale

原始论文：10.1093/nsr/nwag017

证据字段	D10	面向工业尺度的异质废旧正极材料柔性直接再生
原料与处理	市场回收、来源/老化不同但仍属NCM523化学体系的异质黑粉 1M NaOH去Al；LiOH－NMP接触4h、60℃干燥；3wt%Li2CO3；550℃2h→900℃2h；水/乙醇洗；500℃2h	
产品与推进	再生NCM523 从配方控制转向异质退役料和50kg批次验证	
指标 1	批处理质量：50kg/批。主文报告；间歇示范	
指标 2	1kg批产品软包：93.1%，1000次。图4d对应1kg制备产品	
指标 3	50kg批产品软包：93.7%，400次。图4e对应50kg制备产品；不能写成该批产品1500次	
共用条件	低温液相预处理不代表全流程低温；主文多级550/900/500℃处理。	
规模与局限	分别有1kg与50kg批处理 50kg/批不等于连续工业生产；作者承认杂质控制和商业实施尚需完善；同化学体系异质性不是任意混化学体系	
核查与团队	公开全文；SI下载遇验证码未完整读 清华周光敏/成会明；上海交大梁正等合作	

D23 · 2026 · 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

All-Dry and Scalable Direct Recycling of Spent Ternary Black Mass Toward Long-Life Ah-Level Pouch Cell

原始论文：10.1002/adma.73177

证据字段	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
原料与处理	工业来源废旧NCM523正极黑粉 等离子体辅助机械化学结合热退火，调整形貌、脱氟及将微量Al/Na均匀掺杂
产品与推进	单晶形貌再生NCM523 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
指标 1	软包循环：2Ah，1000次保持97.1%。原始摘要；软包电压/倍率/面负载尚未核实，不与D10直接排名
指标 2	高截止电压测试：4.5V，300次保持82.6%。与2Ah软包是分别报告的结果
共用条件	未核实的条件不补猜
规模与局限	公斤级批处理，摘要未给精确公斤数 本次只核原始摘要和引文，未核SI的温度/能耗/杂质浓度窗口；摘要4.5V测试结果不能挪给软包
核查与团队	出版社摘要与参考文献；SI未取得 梁正/周光敏/成会明；Guanjun Ji等

升级回收

D07 · 2022 · 混合贫镍多晶正极直接升级为富镍单晶正极

Direct upcycling of mixed Ni-lean polycrystals to single-crystal Ni-rich cathode materials

原始论文：10.1016/j.chempr.2022.03.007

证据字段	D07	混合贫镍多晶正极直接升级为富镍单晶正极
原料与处理	论文研究选定的混合贫镍正极流；本次未完整复核所有原料真实老化程度 一步熔盐中补锂、补镍和晶体重构
产品与推进	富镍单晶正极 将混合料处理、成分升级和多晶转单晶连接
规模与局限	本次未核实批处理活性材料质量 可处理所选混合料不能外推任意LFP/LCO/NCM混合；原料纯度及新增Ni份额须计入
核查与团队	出版社摘要、引言及声明 WPI Yan Wang / Xiaotu Ma

D13 · 2022 · 在互易三元熔盐中将废旧NMC111助熔升级为富镍正极

Flux upcycling of spent NMC 111 to nickel-rich NMC cathodes in reciprocal ternary molten salts

原始论文：10.1016/j.isci.2022.103801

证据字段	D13	在互易三元熔盐中将废旧NMC111助熔升级为富镍正极
原料与处理	废旧NMC111；本条未核全部模型/真实废料比例 三元熔盐中补锂和Ni组成调整
产品与推进	富镍NMC 将离子/熔盐介质由原组成修复推进到组分升级
规模与局限	本次未核实批处理活性材料质量 盐洗涤和新增Ni投入决定净资源收益；会议报告重复出现不当作新论文
核查与团队	原始全文页面及摘要 ORNL Tao Wang / Huimin Luo / Sheng Dai

D25 · 2023 · 将废旧钴酸锂可持续升级为高电压稳定正极

Sustainable upcycling of spent LiCoO2 to an ultra-stable battery cathode at high voltage

原始论文：10.1038/s41893-023-01094-9

证据字段	D25	将废旧钴酸锂可持续升级为高电压稳定正极
原料与处理	废旧LCO；本条未核原料退役历史与批量 添加Al2O3、MgO、Li2CO3进行直接反应，利用Li空位促进Al/Mg扩散
产品与推进	Al/Mg双掺杂LCO 把原本的缺锂缺陷变成升级掺杂的反应通道
指标 1	高压循环：4.6V，300次保持79.7%。原始摘要；半/全电池构型与完整测试条件本次未核
共用条件	未核实的条件不补猜
规模与局限	本次未核实批处理活性材料质量 高压循环改善不代表全电芯安全与量产合格；摘要未确认半/全电池，不能当产业寿命
核查与团队	出版社摘要、图题、引文和致谢；主文付费 清华周光敏/成会明；上海交大梁正；Junxiong Wang/Kai Jia/Jun Ma

D09 · 2024 · 将混合废旧正极可持续升级为高电压聚阴离子正极

Sustainable upcycling of mixed spent cathodes to a high-voltage polyanionic cathode material

原始论文：10.1038/s41467-024-48181-9

证据字段	D09	将混合废旧正极可持续升级为高电压聚阴离子正极
原料与处理	废旧LFP和LMO黑粉配料；另示范LFP/LCO体系 氯化胆碱/草酸深共熔溶剂中解构、均匀混合再合成

证据字段	D09丨将混合废旧正极可持续升级为高电压聚阴离子正极
产品与推进	LiFe0.5Mn0.5PO4；扩展Fe/Co磷酸盐 为混合材料找到新的多阴离子组成出口
指标 1	平均放电电压：3.68V。对Li/Li+；LFP对照3.38V
指标 2	比能量：559Wh/kg。正极活性材料质量基准；LFP对照524Wh/kg，不能当软包比能量
共用条件	关键混合反应110℃；原料配比与额外盐输入决定组分平衡。
规模与局限	克级示范 存在溶解再合成，应归混合料升级而非严格保晶直接修复；活性材料能量不等于整电芯能量
核查与团队	公开全文；SI已取得并读部分 清华周光敏/成会明；梁正等合作

D19 · 2025 · 将混合废旧贫镍正极升级为富镍多晶正极

Upcycling Mixed Spent Ni-Lean Cathodes into Ni-Rich Polycrystalline Cathodes

原始论文：10.1016/j.ensm.2025.104386

证据字段	D19丨将混合废旧贫镍正极升级为富镍多晶正极
原料与处理	混合废旧NMC111和LMO，强调区别于仅新料模拟 升级湿法与传统湿法相结合，回收NiSO4回调配比，合成83Ni多晶正极
产品与推进	LiNi0.83Mn0.06Co0.11O2 把混合料、再生盐配平、多晶产品与Ah级验证连接
指标 1	单层软包：201.1mAh/g，500次约88%。正极比容量；倍率/电压等完整条件本轮未核
指标 2	2Ah电芯：约900次后85%。摘要表述约900次；亮点精确值867次，不以两者制造矛盾
指标 3	回收原料利用：92.31mol%。含锂/过渡金属的总回收料比例；另文中95mol%是回收过渡金属比例，分母不同
共用条件	未核实的条件不补猜
规模与局限	单层及2Ah产品电芯；不等于处理吨位 92.31mol%回收料使用比例不是金属回收率；成本优势依赖模型假设
核查与团队	出版社摘要与引言；作者稿摘要 WPI Yan Wang / Jiahui Hou；Argonne与Farasis Energy USA合作

D11 · 2026 · 锂回收与废旧正极升级利用的三合一策略

A three-in-one strategy for lithium recovery and upcycling of spent cathode materials

原始论文：10.1038/s41467-025-67912-0

证据字段	D11	锂回收与废旧正极升级利用的三合一策略
原料与处理	新制NCM811模型与真实废旧层状正极分别测试；LFP/LMO相同条件不适用 机械化学活化2h后CO2加压浸出；用1.0M LiOH调pH，再95℃1.5h制Li2CO3；残余过渡金属材料作析氧催化剂
产品与推进	Li2CO3与析氧催化材料 把提锂和残渣功能化耦合
指标 1	真实废料锂浸出率/浸出选择性：93.13% / 98.84%。机械活化2h，CO2 0.5MPa、25℃1h；选择性按式7为RLi/ΣRi（各元素浸出率之和），不是液相锂纯度；新制NCM811为95.43%/94.63%
共用条件	高浸出率条件为0.5MPa，非常压；后续LiOH调pH和95℃成盐须计物料能耗；原始式7选择性定义已核。
规模与局限	本次未核实批处理活性材料质量 浸出率不等于最终锂盐收率；LiOH调pH引入外源锂，产盐需扣除；选择性不是液相锂纯度；催化性能不证明消纳规模或经济高值；球磨、压缩和95℃后处理须计能耗；>98.5%纯度不直接称电池级
核查与团队	公开全文；SI未完整核查 Zhi Sun / Hongbin Cao / Li Li 等

D24 · 2026 · 混合废旧电池升级为NMC622与石墨全电池的策略

Upcycling Strategy for Mixed Spent Batteries to Enable NMC622 & Graphite Full Batteries

原始论文：10.1002/aenm.71680

证据字段	D24	混合废旧电池升级为NMC622与石墨全电池的策略
原料与处理	混合废旧正极与协同回收石墨 可调成分正极再合成与石墨纯化/表面改性相结合
产品与推进	NMC622正极和回收石墨组装全软包 从单正极升级扩展到正负极共同回收后的全电池验证
指标 1	全软包循环：2590次保持70%。回收正负极；摘要未给完整倍率与电压条件
共用条件	未核实的条件不补猜
规模与局限	本次未核实批处理活性材料质量 摘要2590次是70%保持率终点，不与80%终点直接比较；>95%是再生原料利用而非全组分回收率；SI未核全流程条件
核查与团队	出版社摘要、作者机构、专利声明及参考文献 WPI Yan Wang / Zeyi Yao / Jiahui Hou / Xiaotu Ma；Argonne等

电化学与耦合

E01 · 2019 · 基于氧化还原靶向作用的废旧锂离子电池材料回收策略

A redox targeting-based material recycling strategy for spent lithium ion batteries

原始论文：10.1039/C9EE01478K

证据字段	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
原料与处理	废LFP正极材料；摘要未充分交代来源、老化程度及杂质谱。 铁氰化物介体化学氧化LFP并释放Li+，介体在电极再生；锂进入产物侧，保留FePO4。
产品与推进	LiOH、FePO4 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。
指标 1	锂脱除率：99.8 %。
指标 2	LiOH纯度：99.9 %。
指标 3	FePO4纯度：99.97 %。
共用条件	室温；0.20 M铁氰化物体系。电流、处理时间、固液比、全流程能耗NR；不能据纯度推断全流程收率。
规模与局限	实验室；质量与电极面积本轮未核。 介体稳定性、损失、杂质耐受性及产品介体残留需要另查。；本次没有取得全文/SI；未将这些指标视为工业黑粉已验证指标。
核查与团队	C：RSC原始摘要及元数据 作者：Juezhi Yu; Xun Wang; Mingyue Zhou; Qing Wang；发表时机构：National University of Singapore

E03 · 2020 · 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

Selective recovery of lithium and iron phosphate/carbon from spent lithium iron phosphate cathode material by anionic membrane slurry electrolysis

原始论文：10.1016/j.wasman.2020.03.017

证据字段	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
原料与处理	废LFP正极材料；是否工业混合黑粉及杂质分布本轮未核。 阴离子交换膜分隔的浆料电解；保留FePO4/C，回收锂并可再制LFP。
产品与推进	锂盐、FePO4/C；再合成LFP 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。
指标 1	Li浸出率：98 %。
指标 2	Fe以FePO4/C回收率：>96 %。
指标 3	再合成LFP放电容量：143.6 mAh/g at 1 C。
共用条件	8 h、Ru/Ti及NaCl等条件见2025 ChemSusChem综述转述，本次未取得原文全文交叉核对，因此不将其列为已确认原始条件。原始摘要确认主要回收/电池性能指标。

证据字段	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
规模与局限	实验室搅拌悬浮体系；质量、面积本轮未核；不能将slurry自动译成连续流生产。 颗粒—电极电子接触、浆料沉降与传质可能限制放大，应由原文及后续工作确认。；没有固体连续进出及长期运行证据。
核查与团队	C：原始摘要；局部工况仅综述线索 作者：Zheng Li; Dongfu Liu; Jiachun Xiong; Lihua He; Zhongwei Zhao; Dezhi Wang；发表时机构：Central South University

E04 · 2020 · 由废LiFePO4生产LiOH的绿色低成本方法

A Green and Cost-Effective Method for Production of LiOH from Spent LiFePO4

原始论文：10.1021/acssuschemeng.0c04960

证据字段	E04	由废LiFePO4生产LiOH的绿色低成本方法
原料与处理	废LiFePO4；实际来源、批间差异本轮未核。 悬浮电解与电渗析相结合，用膜迁移和选择性控制将锂导向LiOH产品。
产品与推进	LiOH • H2O 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。
指标 1	Li浸出率：>95 %。
指标 2	电流效率：85.81 %。
共用条件	原始摘要未充分披露电压、电流、固液比、温度及能耗。本次不采用二手资料误配的4.2 V、70° C、13 g/L参数。
规模与局限	实验室；面积和批次质量本轮未核。 膜选择性、离子竞争、产物浓度与结晶费用需要原始全文再核实。；成本结论不能脱离原料、膜寿命及系统边界外推。
核查与团队	C：ACS原始摘要 作者：Zheng Li; Lihua He; Yunfei Zhu; Chao Yang；发表时机构：Central South University; Jiangsu Central South Lithium; Anhui Polytechnic University

E05 · 2020 · 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

A paired electrolysis approach for recycling spent lithium iron phosphate batteries in an undivided molten salt cell

原始论文：10.1039/D0GC01782E

证据字段	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
原料与处理	废LFP；原始摘要未充分交代真实废料来源。 在熔融碳酸盐中分别利用含LFP的阴、阳极，生成不同价态铁产物并释放锂与磷酸根。
产品与推进	Fe、Fe3O4、回收锂及磷资源 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”。
指标 1	锂回收率：>95.2 %。

证据字段	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
共用条件	熔盐体系；具体温度、电流、电压和计入加热的总能耗NR，不能以无酸等同于低总能耗。
规模与局限	实验室无隔膜熔盐电解池；规模本轮未核。 需要把保温、升温、熔盐维护及后处理纳入能耗评价。；没有连续运行及真实混合杂质适应性证据。
核查与团队	C：RSC原始摘要 作者：Beilei Zhang; Xin Qu; Jiakang Qu; Xiang Chen; Hongwei Xie; Pengfei Xing; Dihua Wang; Huayi Yin；发表时机构：Northeastern University（Yin当时单位）; Wuhan University（Dihua Wang）

E07 · 2022 · 面向废电池锂资源回收的绿色可持续策略

A green and sustainable strategy toward lithium resources recycling from spent batteries

原始论文：10.1126/sciadv.abq7948

证据字段	E07	面向废电池锂资源回收的绿色可持续策略
原料与处理	回收正极片；不同化学体系验证。各测试是否均真实老化废片需逐实验区分。 利用LLZTO锂离子导体膜选择迁移Li+，以LiTFSI/P3HT保护层降低水侵蚀与H+/Li+交换；配合电化学脱锂和阴极反应生产LiOH。
产品与推进	LiOH、H2、脱锂固体 将整极片直接脱锂与高选择性膜和LiOH产品制备结合，是后续膜隔离电化学回收的重要参照。
指标 1	Li选择性：97 %。
指标 2	法拉第效率：>=97 %。
指标 3	LiOH纯度：99 %。
指标 4	50轮后的法拉第效率：97.12 %。
指标 5	50轮后的Li选择性：98.11 %。
共用条件	卷对卷试验：初始1 M LiOH阴极液，新鲜LFP极片标称800 mAh；1 mA/cm²，每轮提取500 mAh后更换极片和阴极液，共50轮。选择性97%不是总锂提取率97%。
规模与局限	整片实验及50轮步进更换；没有连续黑粉进料/排渣示范。 陶瓷膜成本、脆性、大面积制造及保护层稳定性需纳入放大评价。；周期更换电解液的测试不能证明浓缩条件下的长期运行。；膜选择性不能替代物料总回收率。
核查与团队	B：完整原文13页；本次未取得SI 作者：Jing Xu; Yang Jin; Kai Liu et al.; Hui Wu; Michel Armand; Guoxiu Wang；发表时机构：Zhengzhou University; North China Electric Power University; Tsinghua University; University of Technology Sydney; CIC energiGUNE等

E08 · 2024 · 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

Coupling Ferricyanide/Ferrocyanide Redox Mediated Recycling Spent LiFePO4 with Hydrogen Production

原始论文：10.1002/anie.202318248

证据字段	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
原料与处理	废LiFePO4；复杂工业黑粉来源、杂质谱本轮未核。 铁氰化物/亚铁氰化物介体回收LFP，介体氧化替代常规析氧反应，并与析氢配对。
产品与推进	LiOH • H2O、FePO4、H2 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。
指标 1	电耗（按产氢体积）：3.6 kWh/m³ H2。
指标 2	相对作者水电解基准降幅：43 %。
指标 3	介体氧化起始电位：0.87 V，半反应电位，参比需核全文。
共用条件	300 mA/cm²时的产氢电耗；该值不是每kg锂、每kg电池回收电耗。0.87 V不得记为完整电解槽槽压。
规模与局限	实验室；电极面积、废料质量及持续运行本轮未核。 氢气收益取决于收集、纯化、压缩及实际用途，不能无条件计作成本抵扣。；需检查介体残留、循环稳定性及膜/电解液维护。
核查与团队	C：原始摘要和期刊元数据；全文下载未成功 作者：Xin Jia; Hongjun Kang; Guangyao Hou; Weiran Wu; Songtao Lu; Yang Li; Qing Wang; Wei Qin; Xiaohong Wu；发表时机构：Harbin Institute of Technology; National University of Singapore

E14 · 2025 · 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

A direct electrochemical Li recovery from spent Li-ion battery cathode for high-purity lithium hydroxide feedstock

原始论文：10.1016/j.joule.2025.102197

证据字段	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
原料与处理	实际退役原料证据是TotalEnergies提供的使用过的圆柱/方形电池黑粉。LFP/LMO单面涂覆整极片购买自MTI，NCM523极片购买自MSE Supplies；整片/卷对卷示范不能称为真实退役极片验证。黑粉涂于Ti集流体，非浆料直接穿过板框电解槽。 零间隙膜电极组件直接脱锂，阳离子膜迁移Li+；阴极析氢或氧还原；浓缩生成LiOH。
产品与推进	LiOH • H2O、FePO4残渣；不同阴极配置可产H2 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。
指标 1	优化法拉第效率（正文）：96.6 %。
指标 2	优化Li回收率（正文）：96.4 %。
指标 3	ORR小试电耗：103 kJ/kg black mass。
指标 4	HER小试电耗：536 kJ/kg black mass。
指标 5	长时试验处理量：57 g black mass / 1000 h。

证据字段	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
指标 6	长时平均Li回收率：89.8 %。	
指标 7	LiOH纯度：99 wt%。	
共用条件	ORR：0.1 C、6 mg/cm²、0.18 V；HER同类小试0.93 V，均为电解步骤电耗，未包含原料预处理及结晶。20 cm² 长时：前500 h 12 mg/cm²、0.21 C、6.2 mA、5 h/批；后500 h约30 mg/cm²、0.11 C、7.5 mA、10 h/批、约1.5 V。0–600 h每10轮膜再生。0.22 M时最佳效率不可与0.98 M时指标拼接：26轮浓缩到0.98 M时FE降至64.1%，平均回收75.5%。	
规模与局限	20 cm²、1000 h、57 g总处理量；周期更换黑粉电极。卷对卷为步进式半连续演示：0.5 mA/cm²、20 cm²、截止2.2 V，平均FE83.4%、回收90%、槽压约1.3 V。 高浓LiOH带来反向迁移和效率下降；需将浓缩/结晶能耗纳入整体。；膜需要周期再生；1000 h不等于无维护连续处理。；正文与摘要FE/回收率数字顺序存在轻微差别，本表采用正文96.6/96.4。；工业黑粉来源增加可信度，但单一来源不代表混杂退役流普适性。；卷对卷整极片来自购买的新电极；真实工业退役黑粉与新极片演示是两组不同证据。	
核查与团队	B：15页原始全文；SI未取得 作者：Yuge Feng; Yoon Park; Shaoyun Hao; Chang Qiu; Shoukun Zhang; Zhou Yu; Zhiwei Fang; Tanguy Terlier; Chase Sellers; Khalid Mateen; Frank Despinois; Moussa Kane; Sibani Lisa Biswal; Haotian Wang；发表时机构：Rice University; TotalEnergies	

E16 · 2026 · 通过自驱动过程回收废锂离子电池材料并发电

Self-driven recycling of spent Li-ion battery materials with electricity generation

原始论文：10.1038/s41467-026-69868-1

证据字段	E16	通过自驱动过程回收废锂离子电池材料并发电
原料与处理	核心电池实验采用购买的正极粉末并加碳/PVDF造粒；另有真实黑粉离线试验，不能说完全未用真实料，但其来源和复杂杂质体系研究有限。 两侧分别利用LFP氧化和NMC/LCO还原，FeCN与有机介体分别传递电子；外置储罐反应，液体回流。联用酸碱再生与CO2碳酸化，得到Li2CO3及金属产物。	
产品与推进	Li2CO3、FePO4、过渡金属氢氧化物、电能 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。	
指标 1	主全电池材料利用率：约67 %。	
指标 2	低NMC浓度条件利用率：92 % at 5.1 g/L。	
指标 3	LFP利用率示例：95 %。	
指标 4	优化LCO单轮利用率：87 %。	
指标 5	BQDS/H2SO4回收反应年发电模型：246.4 MWh/y at assumed 10 kt black mass/y；不含闭路再生耗电。	
指标 6	CO2化学消耗模型上限：1066 t/y at assumed 100% utilization。	
指标 7	THBDS实测反应外推的年发电：62.8 MWh/y at assumed 10 kt black mass/y；非工业实测。	
指标 8	酸碱再生氢循环耗电：0.494 kWh/kg black mass，流程模型输入。	

证据字段	E16	通过自驱动过程回收废锂离子电池材料并发电
指标 9	BQDS反应模型发电折算：0.02464 kWh/kg black mass；246.4 MWh/10000 t算术换算。
共用条件	主装置5 cm²、25±1° C、10 mA/cm²；NMC811 1.15 g/15 mL、30 mM THBDS、5 M HAc、1 M KCl；LFP 1.99 g/25 mL、0.2 M Li4FeCN、3 M LiAc。77 g/L NMC时1/10 mA/cm²利用率约55/61%；低浓度5.1 g/L可92%。Fig.4f的>95%涉及离线浸出/容量基础等条件，不是主装置同工况。246 MWh/y为BQDS/H2SO4等规模化模型；按67%利用率CO2消耗模型约714 t/y。 完整闭路还需氢循环再生H+/OH ，耗电0.494 kWh/kg黑粉（主文p8、方法和SI表S5/S7），远大于回收反应模型发电0.02464 kWh/kg。THBDS实测小试外推年发电仅62.8 MWh。回收反应自发并不等于全流程净发电或能源自给。
规模与局限	克级、5 cm²、六电池堆演示；外循环液体与固体储罐不等于持续固体进出料。10 kt/y为模型规模。 完整闭路仍需外部供电：酸碱再生氢循环耗电0.494 kWh/kg，不能以回收反应发电替代全流程能耗评价。；作者明确复杂杂质研究不在本文范围。；NMC/LCO侧动力学及质子供给限制利用率；有机介体长期稳定性和损失需评估。；单独稳定性试验FeCN/THBDS衰减0.0083/0.024%每圈，不能直接当全工艺多年寿命。；CO2碳酸化是酸碱反应，不是CO2电还原；化学捕集量不能等同生命周期负排放。
核查与团队	A：13页原始全文+36页SI 作者：Shiqiang Huang; Songpeng Huang; Mengxiao Li; Hang Zhang; Xun Wang; Manohar Salla; Qing Wang ；发表时机构：National University of Singapore

石墨回收

C01 · 2016 · 废旧锂离子电池中的石墨回收

Graphite Recycling from Spent Lithium-Ion Batteries

原始论文：10.1002/cssc.201601062

证据字段	C01	废旧锂离子电池中的石墨回收
原料与处理	废旧电池石墨 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
产品与推进	再生石墨，并与回收正极配对验证 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
规模与局限	见指标与证据说明 本记录未取得足够方法细节，不填处理规模或寿命最高值。
核查与团队	摘要 明斯特大学 Winter / Nowak

C02 · 2019 · 从废旧锂离子电池回收高性能石墨

High-Performance Graphite Recovered from Spent Lithium-Ion Batteries

原始论文：10.1021/acssuschemeng.9b05003

证据字段	C02	从废旧锂离子电池回收高性能石墨
原料与处理	湿法浸出后含杂石墨残渣 过滤回收石墨，进一步浸出和熔融处理去除残留活性材料、金属、黏结剂与氧化铝
产品与推进	再生石墨 过滤回收石墨，进一步浸出和熔融处理去除残留活性材料、金属、黏结剂与氧化铝
指标 1	放电比容量：377.3 mAh/g。0.1 C；原始摘要报告；不能据此认定工程规模或完整电芯寿命
规模与局限	见指标与证据说明 标题与摘要中的可放大表述不等于已报告工业处理量。
核查与团队	摘要 伍斯特理工学院 王岩

C03 · 2023 · 石墨负极的闪速回收

Flash Recycling of Graphite Anodes

原始论文：10.1002/adma.202207303

证据字段	C03	石墨负极的闪速回收
原料与处理	废旧负极材料 秒级焦耳热处理结合稀酸回收无机盐，保留石墨并利用界面残余碳层
产品与推进	再生石墨及含金属溶液 秒级焦耳热处理结合稀酸回收无机盐，保留石墨并利用界面残余碳层
指标 1	洗涤酸浓度：0.1 mol/L HCl。论文摘要所述无机盐收集步骤；闪速加热只是流程一部分
规模与局限	见指标与证据说明 不能把秒级加热时间当作全流程时间；成本和环境优势来自模型，需含预处理、洗涤与后处理边界。
核查与团队	摘要 莱斯大学 James Tour

电解液与聚合物回收

C10 · 2015 · 液态及超临界二氧化碳与助溶剂萃取锂离子电池电解液

Extraction of lithium-ion battery electrolytes with liquid and supercritical carbon dioxide and additional solvents

原始论文：10.1039/C5RA04451K

证据字段	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
原料与处理	商业NMC111/石墨18650电芯 建立流通式二氧化碳与助溶剂萃取，研究萃取随时间变化
产品与推进	回收电解液 建立流通式二氧化碳与助溶剂萃取，研究萃取随时间变化
规模与局限	见指标与证据说明 流通式溶剂萃取不等于整电芯持续进料生产；回收量、盐完整性和再配液性能需分开验证。
核查与团队	正文 明斯特大学 Winter / Nowak

C07 · 2020 · 废旧锂离子电池聚烯烃隔膜的再生利用

Regeneration of polyolefin separators from spent Li-Ion battery for second life

原始论文：10.1002/batt.202000024

证据字段	C07	废旧锂离子电池聚烯烃隔膜的再生利用
原料与处理	废旧电池聚烯烃隔膜 以隔膜为独立回收对象开展再生与再使用研究
产品与推进	再生隔膜 以隔膜为独立回收对象开展再生与再使用研究
规模与局限	见指标与证据说明 本次仅核原始题录；不据此声称热收缩、机械强度或长期安全已满足商业标准。
核查与团队	题录 印度蒂鲁帕蒂科学教育研究所 Aravindan

C05 · 2021 · 利用超临界二氧化碳萃取回收电动汽车电池有机黏结剂

Innovative recycling of organic binders from electric vehicle lithium-ion batteries by supercritical carbon dioxide extraction

原始论文：10.1016/j.resconrec.2021.105666

证据字段	C05	利用超临界二氧化碳萃取回收电动汽车电池有机黏结剂
原料与处理	电动汽车废旧电极 超临界二氧化碳结合助溶剂去除并回收黏结剂，使活性材料与铝基底分离

证据字段	C05	利用超临界二氧化碳萃取回收电动汽车电池有机黏结剂
产品与推进	回收黏结剂及分离电极材料 超临界二氧化碳结合助溶剂去除并回收黏结剂，使活性材料与铝基底分离	
规模与局限	见指标与证据说明 高压萃取、助溶剂循环及聚合物再次成膜/黏结性能应分别验证；不能把溶解除胶等同功能完全恢复。	
核查与团队	摘要 查尔姆斯理工大学 Ebin / Petranikova	

C06 · 2024 · 退役锂离子电池回收六氟磷酸锂的高值利用

High-value utilization of recovered LiPF6 from retired lithium-ion batteries

原始论文：10.1039/D3GC03997H

证据字段	C06	退役锂离子电池回收六氟磷酸锂的高值利用
原料与处理	退役电池中含水和氟化氢杂质的回收电解液 提取并净化后，转化为新的含锂电解液添加剂	
产品与推进	二氟双草酸磷酸锂添加剂 提取并净化后，转化为新的含锂电解液添加剂	
指标 1	电解质盐浸出效率：最高29%。相对新电池初始LiPF6含量；二甲基碳酸酯与CHClF2混合体系	
指标 2	添加剂合成条件：75° C，27 h。LiPF6与双三甲基硅基草酸酯摩尔比1:3	
规模与局限	见指标与证据说明 净化后的电解液仍不满足直接复用要求；低回收率及原料/溶剂负担要与添加剂性能同时评价。	
核查与团队	摘要及补充材料部分 兰州理工大学 李世友	

集流体回收

C04 · 2023 · 废旧锂离子电池铝铜集流体的直接再利用

Direct reuse of aluminium and copper current collectors from spent lithium-ion batteries

原始论文：10.1039/D2GC03940K

证据字段	C04	废旧锂离子电池铝铜集流体的直接再利用
原料与处理	第一代日产Leaf退役软包；原正极为LMO/NCA混合 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	
产品与推进	用于新NMC622正极和石墨负极的回收铝铜箔 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	
指标 1	铜箔验证倍率：0.1 – 10 C。石墨半电池与新铜箔比较；不是原电池直接复用	

证据字段	C04	废旧锂离子电池铝铜集流体的直接再利用
指标 2	循环测试：100圈。0.2 C；不同处理箔材对照
规模与局限	见指标与证据说明 铝箔高倍率接触导电性可能下降；回收铜箔的结果不能外推铝箔；未验证全年生产或多次箔材再循环。
核查与团队	正文 伯明翰大学 Slater / Kendrick 与 ReLiB 合作

技术经济与环境评价

T01 · 2019 · 考察锂离子电池的不同回收过程

Examining different recycling processes for lithium-ion batteries

原始论文：10.1038/s41893-019-0222-5

证据字段	T01	考察锂离子电池的不同回收过程
原料与处理	模型化电池材料与结构，比较不同化学体系及回收路线。 对火法、湿法、直接回收进行工艺、成本、能耗和排放情景评价。
产品与推进	评价结果；不生产实物产品 为跨路线比较提供共同问题：收回了什么功能/价值，而不只是收回了多少质量。
规模与局限	模型，不是工业产线实测。 结果受产品替代假设、电力和材料组成等条件影响。；2019价格及流程假设不能直接用于当前商业判断。
核查与团队	C：Nature原始摘要及元数据 作者：Rebecca E. Ciez; J. F. Whitacre；发表时机构：Carnegie Mellon University

T02 · 2021 · 电动汽车锂离子电池回收的财务可行性

Financial viability of electric vehicle lithium-ion battery recycling

原始论文：10.1016/j.isci.2021.102787

证据字段	T02	电动汽车锂离子电池回收的财务可行性
原料与处理	Tesla Model S式电池包设计模型，240 Wh/kg；英国收集原料运输至不同国家处理等情景。 比较英国、美国、比利时、中国、韩国以及不同火法/湿法/直接回收路径；分析工资、运输、拆解、材料价格。
产品与推进	模型化成本、利润与敏感性 证明物流、拆包、原料设计和地理条件可能改变工艺排序，应把供应链纳入benchmark。
指标 1	情景利润范围： 21.43至+21.91 USD/kWh pack capacity。
共用条件	分母为电池包额定容量kWh，不是回收电耗或kg原料。基于2019 EverBatt等假设及论文设定；不是2026报价。
规模与局限	财务情景模型。 不同国家结果是设定的工资、距离、流程和价格共同作用，不能简化为国家固有排名。；原料购置价、回收责任费用及市场周期改变结果。

证据字段	T02	电动汽车锂离子电池回收的财务可行性
核查与团队	B：原始全文网页可读；PDF未下载成功 作者：Laura Lander; Tom Cleaver; Mohammad Ali Rajaeifar; Viet Nguyen-Tien; Robert J. R. Elliott; Oliver Heidrich; Emma Kendrick; Jacqueline S. Edge; Gregory Offer；发表时机构：英国ReLiB相关跨校合作网络	

T03 · 2025 · 工业规模锂离子电池回收与矿产供应链的生命周期比较

Life cycle comparison of industrial-scale lithium-ion battery recycling and mining supply chains

原始论文：10.1038/s41467-025-56063-x

证据字段	T03	工业规模锂离子电池回收与矿产供应链的生命周期比较
原料与处理	分别评价生产边角料与退役混合电池；工业数据来自2021年Redwood运行。 还原性煅烧（600 – 1000° C）—机械处理—湿法精炼，与GREET 2021原生矿产供应模型比较。	
产品与推进	制备NCA正极所需的电池级原料；按元素需求折算到NCA-eq功能单位 将评价从实验室比例放大推进到真实工业清单；说明能源结构、原料类型及产品目标会显著影响结论。	
指标 1	原生精炼能耗：193.9 MJ/kg NCA-eq cathode requirement, gate-to-gate。	
指标 2	生产废料回收精炼能耗：22.0 MJ/kg NCA-eq cathode requirement, gate-to-gate。	
指标 3	退役料回收精炼能耗：44.4 MJ/kg NCA-eq cathode requirement, gate-to-gate。	
指标 4	原生/废料/退役料精炼GHG：14.5 / 2.8 / 6.1 kg CO2-eq/kg NCA-eq cathode requirement, gate-to-gate。	
共用条件	功能单位是制备1 kg LiNi0.80Co0.15Al0.05O2正极材料所需的电池级原料（1 kg NCA-eq），不是1 kg金属盐或1 kg废电池。此处193.9/22.0/44.4 MJ及14.5/2.8/6.1 kg CO2-eq均为同一gate-to-gate精炼边界、按该功能单位计。原生精炼用水77.3 L/NCA-eq功能单位。电力结构可使排放变化约5倍；全链比较另有不同边界。	
规模与局限	工业规模运行清单+生命周期模型；并非所有企业的实测平均。 单一企业、特定年份、特定组合流程的数据，外推受原料和电网限制。；部分比较对象仍依赖数据库模型；商业数据可公开程度限制复算。；较低分离纯化负担的混合产品和独立高纯盐不是相同产品，应保持功能等效。	
核查与团队	B：14页原始全文，SI未取得 作者：Michael L. Machala; Xi Chen; Samantha P. Bunke; Gregory Forbes; Akarys Yegizbay; Jacques A. de Chalendar; Inês L. Azevedo; Sally Benson; William A. Tarpeh；发表时机构：Stanford University及合作单位；使用Redwood Materials工业数据	

资料使用与核查说明

这份报告是有截止日期的广泛范围性调研，已完成所选关键节点的筛选、关系整理和能获取证据的深入核查。它不冒充数据库穷尽式检索，也不声称对每篇论文的全部补充材料都已读完。访问限制逐篇公开，与作者原文本身的局限分开。

在线平台与离线版本包含相同核心资料，可按路线、材料、年份和证据状态筛选，最多并排比较四篇论文。个人批注保存在浏览器，支持导出。原始事实不因个人批注而改变。

参考文献管理文件采用经核题名、年份、DOI和链接；未逐一核对完整作者表的条目不猜填作者。报告中有原文题名的英文，所有原创图示的解释文字使用中文。