

碳热还原—两步浸出法回收退役三元锂电池中的锂

张 敏¹, 吴晓倩¹, 陈 明³, 李洪博², 胡振光¹

(1. 桂林理工大学 化学与生物工程学院, 广西 桂林 541006;

2. 广西智亮新材料股份有限公司, 广西 南宁 530000;

3. 陕西有色金属技术研究院有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要:研究了采用碳热还原—两步浸出(水浸-酸浸)工艺从退役三元锂电池中选择性回收锂。分别考察了碳热还原和浸出试验条件对锂浸出效果的影响。结果表明:将电池正极粉与活性炭按碳质量分数 27% 的比例复配,在 600 °C 下恒温焙烧 90 min 后,将焙烧产物与超纯水按固液质量体积比 1/18 搅拌混合,再滴加理论用量 83% 的硫酸,之后在 65 °C 下浸出 20 min,锂浸出率达 98% 以上,而镍、钴、锰浸出率均小于 5%,锂回收效果较好。

关键词:退役三元锂电池;锂;碳热还原;硫酸;浸出;回收

中图分类号:TF803.21;TF826.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2617(2026)03-0308-09

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.03.005

随着全球新能源汽车产业的快速发展,锂离子电池作为核心动力源,其生产和消费量呈现指数级上升^[1-3]。但锂离子电池平均使用寿命仅为 5~8 年^[4],大量的退役电池若未能得到妥善处理,不仅会造成锂、镍、钴等战略金属资源的严重浪费,还可能因电解液泄漏、重金属溶出等问题引发环境污染风险^[5-6],因此对其进行合理回收处理具有重要意义。

在退役三元锂电池的回收过程中,锂的回收具有重要战略意义。当前退役锂电池的回收技术主要分为火法、湿法及直接再生法^[7]。火法是通过高温焙烧处理电池正极材料,以实现金属的富集回收。该工艺流程较为简洁,适合规模化应用,但能耗较大,且回收率低,难以富集^[8-10]。与火法相比,湿法在处理过程中产生的废气量较少,对环境更为友好,但其流程较为复杂,涉及多种化学反应,对工艺要求也相对较高^[11-13]。与火法和湿法相比,直接再生法能耗与成本最低,但技术门槛高,尚未成熟^[14-16]。

在现有的工业化回收工艺中,锂通常作为末

端产物进行回收,使其在前期处理环节中损耗率相对偏高,导致整体回收效果较差。这种现状在一定程度上限制了锂资源的高效循环利用,不利于锂在新能源领域中可持续性价值的充分发挥。考虑到活性炭具有极高的比表面积和丰富的微孔结构,能够提供大量反应接触面积,且在高温还原条件下,活性炭结构稳定性较强。因此,试验研究了采用碳热还原—两步浸出(水浸-酸浸)工艺从退役三元锂电池中优先选择性高效回收锂,以期退役电池的资源化回收提供一种高效且环境友好的新途径。

1 试验部分

1.1 试验材料

退役三元锂电池正极材料粉末:NCM523, $D_{50} \approx 45 \mu\text{m}$,由广西某公司提供。采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)测定其主要金属元素组成,结果见表 1。根据元素质量分数可确定该正极材料为 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ 。

收稿日期:2026-01-20;修订日期:2026-02-28

基金项目:广西壮族自治区科技计划项目(桂科 AB24010018)。

第一作者简介:张敏(2001—),女,硕士研究生,主要研究方向为电池回收、湿法冶金。

通信作者简介:胡振光(1975—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为稀有稀土绿色开采、分离、提取、冶金。E-mail:huzg2008@163.com。

表 1 退役三元锂电池正极粉末的主要组成

Table 1 Composition of cathode powder from retired NCM lithium-ion batteries

lithium-ion batteries					%
Ni	Co	Mn	Li	Fe	Al
30.58	12.26	17.57	4.19	0.28	1.52

活性炭:由广西某公司提供。

试剂:超纯水,实验室自制;硫酸,上海阿拉丁生化科技股份有限公司,分析纯。

设备:箱式气氛炉,电感耦合等离子体发射光谱,扫描电子显微镜,X射线衍射仪。

图 1 为 NCM523 正极粉末的 SEM 微观形貌及 EDS 面扫分析结果。图 2 为 NCM523 正极粉末的 XRD 图谱。

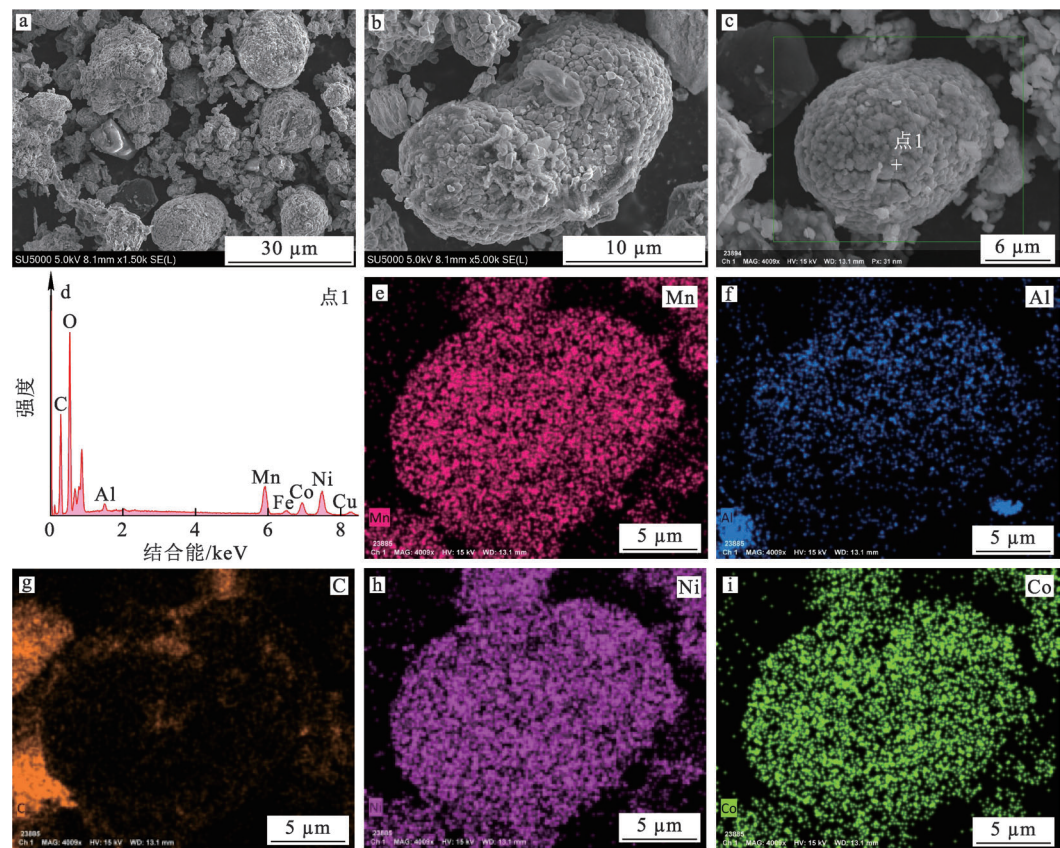


图 1 NCM523 正极粉末的 SEM 微观形貌(a)~(b)及 EDS 面扫分析结果(c)~(i)

Fig. 1 SEM micro-morphology (a)–(b) and EDS mapping analysis results (c)–(i) of NCM523 cathode powder

由图 1 可知:NCM523 正极粉末分布均匀,形态规整,表面致密,未观察到显著的团聚或缺陷现象,这表明该材料具有良好的结构稳定性;此外,EDS 分析进一步验证了材料的元素组成,主要包含镍(Ni)、钴(Co)和锰(Mn)等元素,在检测过程中未发现明显的杂质元素存在,这表明该材料具有较高的纯度,为后续的电化学性能研究提供了可靠的基础。

由图 2 可知:该材料的所有衍射峰均与 α - NaFeO_2 型层状结构(空间群:R-3m)的标准图谱高

度一致;与 NCM523 三元材料的标准卡片(PDF # 04-025-1756)对比可知,其衍射角位置精准匹配,且图谱中未观察到任何杂相峰,这进一步证实了该材料的化学组成为 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$;此外,该材料的衍射峰呈现出尖锐的形态,基线保持平稳,这些特征表明其具有优异的高结晶度和单一主相特性。同时,低阳离子混排程度及良好的层状结构有序性,均符合锂电正极材料的典型物相特征。

综上所述,通过对原料粉末系统的形貌、成分及物相表征分析,证实该电池正极粉末具有微观

结构均匀、元素组成纯净与晶体结构完整等优异特性,这为其作为试验材料提供了充分的结构依据。

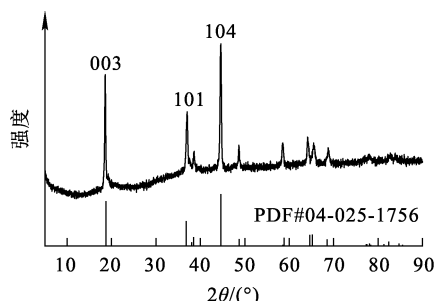


图 2 NCM523 正极粉末的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD pattern of NCM523 cathode powder

1.2 试验原理

退役电池正极粉末中的锂主要以 Li^+ 形式赋存于 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ 晶格中。在高温无氧焙烧过程中,活性炭作为还原剂,提供了强还原性碳环境,导致正极材料的晶体结构发生破坏。总反应过程如式(1)所示,各元素反应的热力学分析结果如图 3 所示。根据反应的吉布斯自由能变化可知,在高温条件下,锂元素(Li^+)转化为可溶性锂化合物(Li_2O 、 Li_2CO_3)。同时,碳源促使高价态金属元素(Ni 、 Co 、 Mn)发生还原反应,其中 Ni 与 Co 优先被还原为金属单质,而 Mn 则以氧化物(MnO)形式残留^[17-21]。

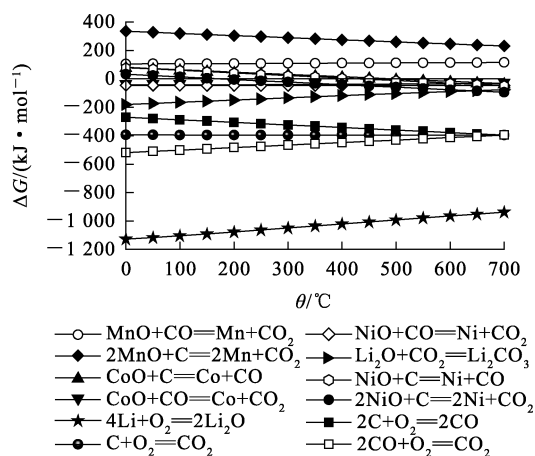
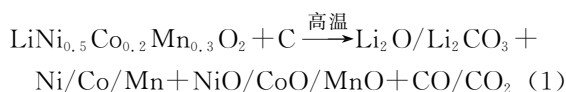
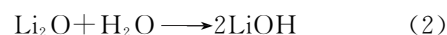


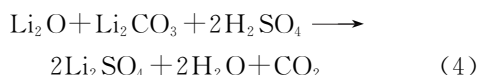
图 3 NCM523 正极粉末中各金属与碳反应的 $\Delta G-\theta$ 关系

Fig. 3 $\Delta G-\theta$ relationship of reactions between each metal in NCM523 cathode powder and carbon

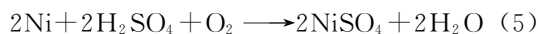
电池正极粉末经过焙烧后,镍、钴、锰等金属产物的性质决定了其不溶性,而 Li_2CO_3 在水中的溶解度(1.3 g/100 mL)有限。当溶液中的 Li^+ 浓度达到该溶解度时,反应停止,锂浸出率受固液比和溶解度严格限制。即在水浸过程中,只有 Li_2O 与部分 Li_2CO_3 参与反应。 Li_2O 与水剧烈反应生成 LiOH , LiOH 会立即与空气中 CO_2 反应生成 Li_2CO_3 , 使 Li_2O 颗粒表面生成一层致密的 Li_2CO_3 包覆层,从而进一步阻碍内部的 Li_2O 与水的进一步接触,抑制 Li_2O 有效浸出,其主要化学反应过程如式(2)、(3)所示。为确保 Li_2O 与 Li_2CO_3 全部参与浸出反应,对焙烧后电池正极粉末进行酸浸,通过破坏 Li_2CO_3 溶解平衡,在 H^+ 充足条件下,使固态 Li_2CO_3 全部转化为可溶的 Li^+ ,使其不受水中溶解度的限制。



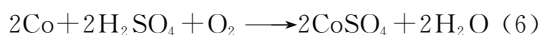
锂离子化合物与硫酸的反应具有较强的热力学驱动力和较快的动力学速率;相比之下,过渡金属的电荷比 Li^+ 的高、离子半径更小,且离子核间距更短,因而其晶格能更大,化学性质更稳定。镍、钴单质与硫酸反应受表面气体控制;反应过程中因于金属发生钝化,表面会生成一层固相氧化物^[17-19],从而阻碍金属与酸进一步反应。而锂化合物与酸的反应属于快速的离子反应,在化合物表面快速且均匀地进行,几乎没有动力学障碍。因此,在无外加还原剂条件下,镍、钴单质需在更高浓度的硫酸体系中才能发生反应^[20]。由此可见,在相同反应条件下,锂离子的开放晶格使其表现出更优的浸出特性。采用硫酸作为浸出剂进行二次浸出时, H^+ 与焙烧后电池正极粉末中的 Li_2CO_3 反应剧烈,无须电子转移,活化能极低,动力学速率常数极大,如式(4)所示。该过程迅速消耗溶液中的 H^+ , 导致体系 pH 升高。随 H^+ 浓度下降,破坏镍、钴单质及锰氧化物晶格结构的动力学驱动力显著降低,同时,镍、钴具有高析氢过电位,反应须克服能量壁垒。此外, MnO 具有特殊的岩盐结构,稳定性更高,须优先破坏晶格才能发生反应。所以,在 H^+ 浓度不够高时,这些金属的溶出受到抑制,从而实现了锂的选择性回收,具体反应如式(5)~(7)所示。综上所述,通过控制硫酸用量能使锂几乎完全溶出,而过渡金属氧化物则因热力学驱动不足且反应动力学速率过慢,得以留在固相中。



$$\Delta G = -439.952 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta G = -619.117 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta G = -659.263 \text{ kJ/mol}$$



$$\Delta G = -141.535 \text{ kJ/mol}$$

浸出结束后,通过抽滤装置实现固液分离,得到富含锂的浸出液和富集镍、钴、锰等金属的浸出渣。含锂浸出液可进一步通过沉淀进行锂的提取与纯化;而浸出渣则作为其他金属的富集载体,为后续回收其他金属提供便利。

1.3 试验方法

根据预设的质量比精确称取电池正极粉末与活性炭,将二者充分均匀混合并置于密闭的箱式炉中。炉腔内预先通入氮气以置换空气,消除氧气的影响。随后设定目标焙烧温度与恒温时间,进行高温焙烧处理,使物料发生预期的物相转化。

焙烧结束后,以水为浸出剂,对所得焙烧产物进行第 1 次浸出;为提高浸出率,再以水和硫酸为浸出剂,进行第 2 次浸出,控制硫酸用量、固液质量体积比、浸出温度与时间,使目标元素选择性浸出。浸出完成后收集浸出渣,并用超纯水反复洗涤 3 次,以去除残留酸液及可溶性杂质。洗涤后的浸出渣经干燥后,采用 ICP-OES 测定其中锂(Li)、锰(Mn)、镍(Ni)、钴(Co)含量。基于测定结果,进一步计算以浸出渣为基准的有价金属浸出率 x_B 。计算公式如下:

$$x_B = \left(1 - \frac{m_2 w_{B2}}{m_1 w_{B1}}\right) \times 100\% \quad (8)$$

式中: w_{B1} —反应混合粉料中金属质量分数,%;
 m_1 —反应混合粉料质量,g; w_{B2} —浸出渣中金属质量分数,%; m_2 —浸出渣质量,g。

2 试验结果与讨论

2.1 碳热还原

2.1.1 焙烧碳质量分数对浸出率的影响

将电池正极粉末与活性炭混合后置于箱式气氛炉中,在氮气气氛中于 600 °C 下焙烧 60 min。之后,将焙烧产物与超纯水以固液质量体积比为 1/10 (g/mL,下同)混合,并在 25 °C 下浸出

30 min。焙烧碳质量分数(活性炭添加量)对金属浸出率的影响结果如图 4 所示。

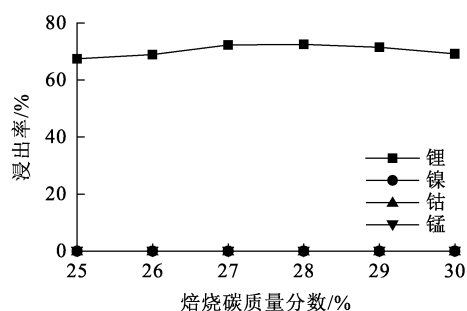


图 4 焙烧碳质量分数对金属浸出率的影响

Fig. 4 Effect of roasting carbon mass fraction on metal leaching rate

由图 4 可知:随混合粉料中碳质量分数增大,锂浸出率呈先升高后降低趋势,而镍、钴、锰浸出率始终维持在 5% 以下;当碳质量分数增至 27% 以上时,锂浸出率达 70% 以上并趋于稳定。考虑到继续增加碳质量分数可能会导致过度还原并引发金属发生烧结,从而使锂浸出率降低,此外过量的碳粉还会增加能耗,使成本增加,因此,确定混合粉料中的碳质量分数以 27% 为宜。

2.1.2 焙烧时间对浸出率的影响

活性炭与电池正极粉末均匀混合,其中碳质量分数为 27%,之后将混合粉料置于箱式气氛炉中,在氮气气氛中于 600 °C 下焙烧不同时间。将焙烧产物与超纯水以固液质量体积比为 1/10 混合,并在 25 °C 下浸出 30 min。焙烧时间对金属浸出率的影响结果如图 5 所示。

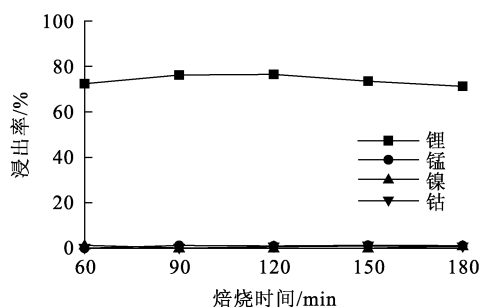


图 5 焙烧时间对金属浸出率的影响

Fig. 5 Effect of calcination time on metal leaching rate

由图 5 可知:随焙烧时间延长,锂浸出率先升高后降低,镍、钴、锰浸出率基本都稳定在 5% 以下。这是因为焙烧时间过长会导致生成的可溶性锂化合物

与金属氧化物进一步反应并形成难溶性化合物(如 LiAlO_2 或 LiFeO_2),从而使锂浸出率下降。综合考虑,确定焙烧时间以控制在 90 min 为宜。

2.1.3 焙烧温度对浸出率的影响

活性炭与正极粉料均匀混合,其中碳质量分数为 27%,之后将混合粉料置于箱式气氛炉中,在氮气气氛中于不同温度下焙烧 90 min。将焙烧产物与超纯水以固液质量体积比为 1/10 混合,并在 25 °C 下浸出 30 min。焙烧温度对金属浸出率的影响结果如图 6 所示。

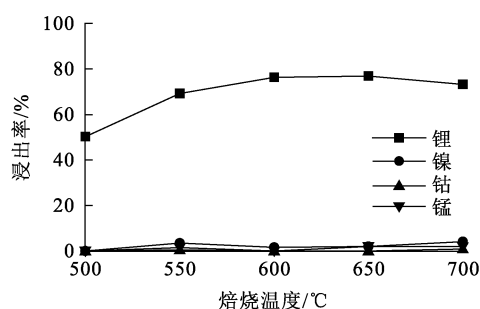


图 6 焙烧温度对金属浸出率的影响

Fig. 6 Effect of calcination temperature on metal leaching rate

由图 6 可知:随焙烧温度升高,锂浸出率先升高后降低,而镍、钴、锰浸出率稳定在 5% 以下。这是因为焙烧温度过高会使 Li_2CO_3 从固相转变为液相,可能存在烧结现象^[21],从而降低锂浸出率。综合考虑,确定焙烧温度以控制在 600 °C 为宜。

2.1.4 焙烧渣的表征

在上述优化焙烧条件下所得焙烧渣的 XRD 图谱如图 7 所示。

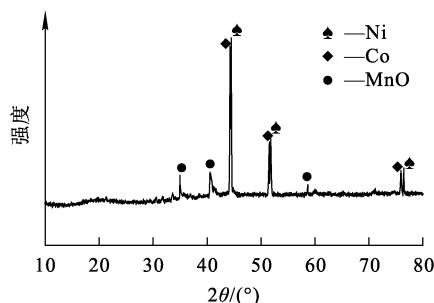


图 7 焙烧渣的 XRD 图谱

Fig. 7 XRD pattern of calcined residue

对比图 2、7 可知:电池正极粉末的 003 峰、101 峰和 104 峰在焙烧后消失,表明锂离子从层间脱出,说明在高温无氧条件下进行还原焙烧能

有效破坏正极材料的晶体结构;焙烧后,电池正极材料中的 Ni、Co 被充分还原为金属态, Mn 则被还原至二价氧化物 MnO 。

2.2 选择性浸出

电池正极材料焙烧后进行水浸对其中的锂虽有一定选择性,但锂浸出率仅为 75% 左右。为提高锂浸出率,进一步以水和硫酸为浸出剂,对焙烧后的混合粉料进行浸出。

2.2.1 硫酸用量对浸出率的影响

根据热力学可知,锂浸出是离子交换过程,动力学速率较快,需消耗 H^+ 。当酸量不足时,锂优先浸出;酸过量时,体系 pH 将无法维持在较高水平,溶液中 H^+ 浓度增至足以提供过渡金属溶解所需的热力学驱动力时,过渡金属发生溶解。因此,首先根据 ICP-OES 测定结果计算硫酸与混合粉料中的锂完全反应而不与其他金属反应的理论用量,之后分别采用理论用量的 70%、75%、80%、83%、85%、90% 的硫酸与超纯水混合进行浸出试验。

将焙烧后的混合粉料按照固液质量体积比 1/1 与超纯水搅拌混合,再分别缓慢滴加不同量的硫酸,在 25 °C 下搅拌浸出 30 min。硫酸用量(相对于理论用量)对金属浸出率的影响结果如图 8 所示。

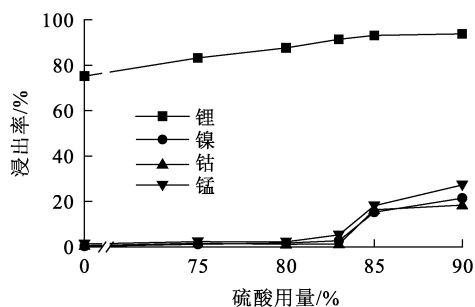


图 8 硫酸用量对金属浸出率的影响

Fig. 8 Effect of sulfuric acid dosage on metal leaching rate

由图 8 可知:随硫酸用量增加至 83% 时,锂浸出率显著升高;镍、钴、锰浸出率基本保持不变;当硫酸用量超过 83% 后,锂浸出率升幅较小,而镍、钴、锰浸出率显著上升,这是因为硫酸用量达到理论用量的 83% 时,粉料中残留的锂较少,体系中开始出现过量的酸, H^+ 更易与过渡金属结合,促使镍、钴、锰浸出反应加剧,导致相应的浸出率也相较于锂浸出率有明显提升。综合考虑,确定硫酸用量以控制在理论用量的 83% 为宜。

2.2.2 固液质量体积比对浸出率的影响

将焙烧后的混合粉料按照不同固液质量体积比与超纯水搅拌混合,再缓慢滴加理论用量 83% 的硫酸,在 25 ℃ 下搅拌浸出 30 min。固液质量体积比对金属浸出率的影响结果如图 9 所示。

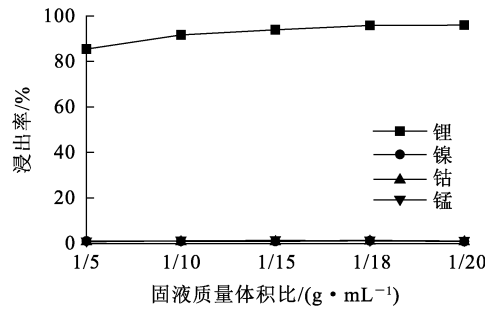


图 9 固液质量体积比对金属浸出率的影响
Fig. 9 Effect of solid mass to liquid volume ratio on metal leaching rate

由图 9 可知:随固液质量体积比减小,锂浸出率呈上升趋势,镍、钴、锰浸出率基本保持不变。这是因为在固液质量体积比较大时,浆料黏度较大,颗粒易发生团聚,导致有效固液接触面积减小;而适当减小固液质量体积比有助于改善料浆流动性,为金属离子的迁移与富集提供更充分的扩散通道,同时使搅拌效率提高,更有利于固相中有价金属充分暴露并持续溶解,避免局部反应死区,从而显著提高其浸出率;但固液质量体积比过小则会显著增加后续蒸发浓缩的能耗。综合考虑,确定固液质量体积比以 1/18 为宜。

2.2.3 浸出时间对浸出率的影响

将焙烧后的混合粉料按固液质量体积比 1/18 与超纯水混合,再缓慢滴加理论用量 83% 的硫酸,在 25 ℃ 下搅拌浸出不同时间。浸出时间对金属浸出率的影响结果如图 10 所示。

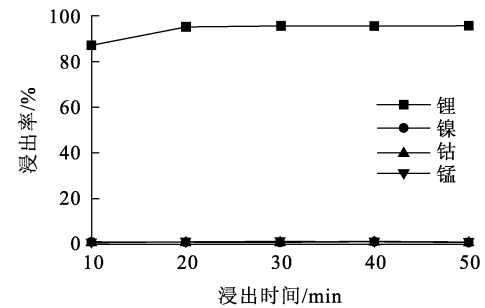


图 10 浸出时间对金属浸出率的影响
Fig. 10 Effect of leaching time on metal leaching rate

由图 10 可知:反应初期,硫酸与混合粉料接触后会迅速中和其中的碱性氧化物,发生强烈的反应,促使大量 Li_2CO_3 在短时间内(约 10 min)迅速被浸出;随反应物浓度降低,反应速率逐渐下降,待反应 20 min 时,浸出基本完成。综合考虑,确定浸出时间以控制在 20 min 为宜。

2.2.4 浸出温度对浸出率的影响

将焙烧后的混合粉料按固液质量体积比 1/18 与超纯水混合,再缓慢滴加理论用量 83% 的硫酸,在不同温度下搅拌浸出 20 min。浸出温度对金属浸出率的影响结果如图 11 所示。

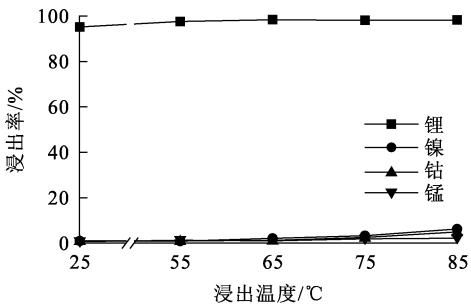


图 11 浸出温度对金属浸出率的影响
Fig. 11 Effect of leaching temperature on metal leaching rate

由图 11 可知:随温度升高,浆料黏度降低,分子的热运动加剧,锂浸出率略有提高;温度达 65 ℃ 时,锂浸出率达 98% 以上;温度超过 65 ℃ 后,锂浸出率反而略有下降,但仍保持在 90% 以上,这是因为温度升至 65 ℃ 时,有利于 Ni、Co、MnO 与硫酸反应,生成可溶性硫酸盐,从而削弱了锂的选择性浸出优势。考虑到温度过高还会增加能耗,确定浸出温度以控制在 65 ℃ 为宜。

2.2.5 浸出渣的表征

将在上述优化浸出条件下所得浸出渣烘干,并用 ICP 分析仪测定其中的主要化学组成,结果见表 2。浸出渣的 SEM 形貌如图 12 所示。由表 2 可知,浸出后,电池正极材料中 Ni、Co、Mn 基本没有损耗。根据表中数据计算得锂浸出率为 97.81%。

表 2 浸出渣的主要化学组成
Table 2 Main chemical composition of leaching residue

%					
Ni	Co	Mn	Li	Fe	Al
29.56	12.31	17.50	0.12	0.039	0.70

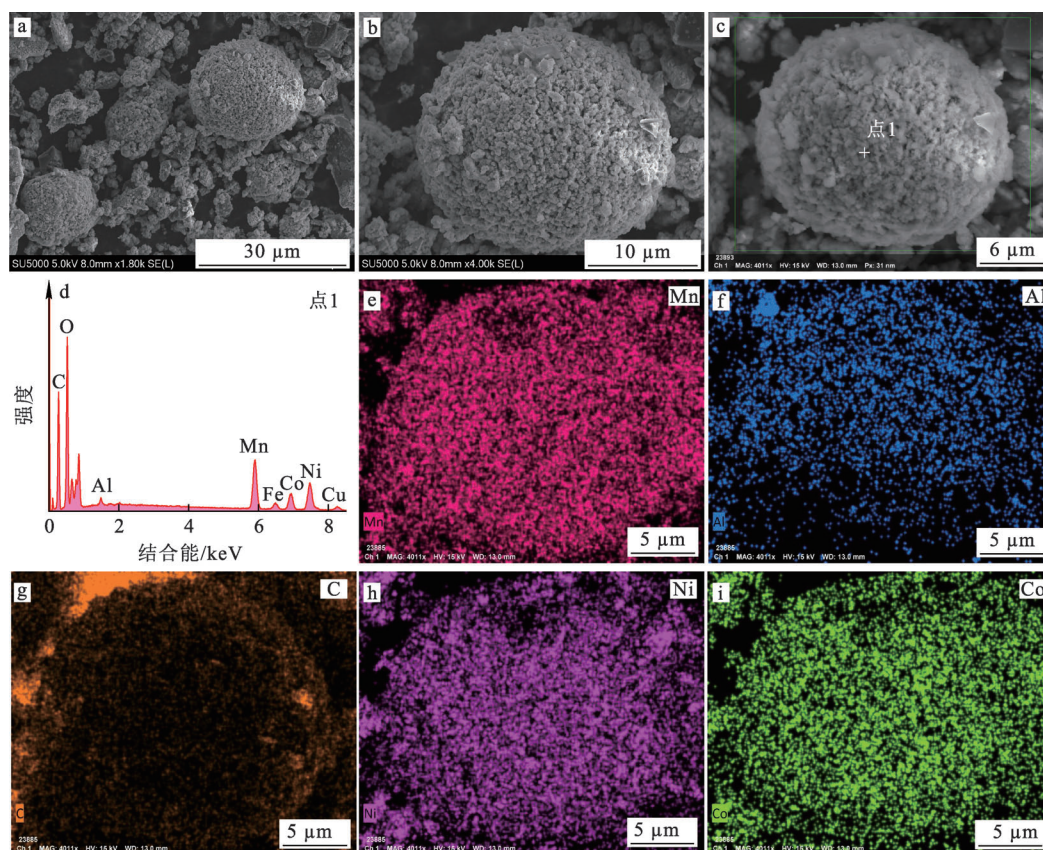


图 12 浸出渣的 SEM 微观形貌(a)~(b)及 EDS 面扫分析结果(c)~(i)

Fig. 12 SEM micro-morphology(a)~(b) and EDS mapping analysis results (c)~(i) of leaching residue

浸出渣的 XRD 图谱如图 13 所示。对比图 2、13 可知,浸出后,原料图谱中尖锐的衍射峰几乎完全消失。说明浸出有效破坏了电池正极粉末中结晶良好的锂金属氧化物。

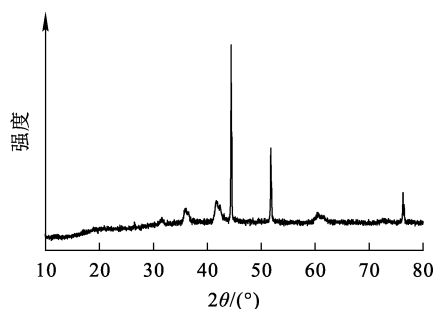


图 13 浸出渣的 XRD 图谱

Fig. 13 XRD pattern of leaching residue

3 结论

采用碳热还原—两步浸出(水浸-酸浸)工艺

从退役三元锂电池中选择性回收锂是可行的。将电池正极粉与活性炭按碳质量分数 27% 的比例复配,在 600 °C 下恒温焙烧 90 min 后,将焙烧产物与超纯水按固液质量体积比 1/18 搅拌混合,再滴加理论用量 83% 的硫酸,在 65 °C 下浸出 20 min,锂浸出率达 98% 以上,而镍、钴、锰浸出率均小于 5%。该工艺可选择性回收退役三元锂电池中的锂,能为锂资源的可持续利用提供一定技术支持。

参考文献:

- [1] LIU J H, MENG Z. Innovation model analysis of new energy vehicles: taking Toyota, tesla and BYD as an example [J]. Procedia Engineering, 2017, 174: 965-972.
- [2] ULLAH M, SHALCHIAN H, YOUNAS T, et al. Sustainable wastewater treatment in lithium-ion battery recycling: processes, challenges, and innovations [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2025, 202: 107710.
- [3] SHEN Y F, ZHANG S P. Recent advances in sustainable reductive roasting for spent lithium-ion batteries recycling

- [J]. Energy Storage Materials, 2025, 79: 104358.
- [4] LAI X, CHEN Q W, TANG X P, et al. Critical review of life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles: a lifespan perspective [J]. eTransportation, 2022, 12: 100169.
- [5] 王艺博, 郭玉文, 孙峙, 等. 我国废动力电池回收处理过程环境风险及其管理对策探讨 [J]. 环境工程技术学报, 2019, 9 (2): 207-212.
- WANG Yibo, GUO Yuwen, SUN Zhi, et al. Discussion on environmental risk analysis and management countermeasures of waste power batteries recovery in China [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9 (2): 207-212.
- [6] 李明川. 废旧三元锂离子电池多级破碎及热解预处理工艺技术研究 [J]. 有色设备, 2024, 38 (6): 22-28.
- LI Mingchuan. Research on multi-stage shredding and pyrolysis pre-treatment technology for spent ternary lithium battery [J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38 (6): 22-28.
- [7] 李舜, 张志军. 废旧三元锂电池正极材料回收技术研究进展 [J]. 电源技术, 2025, 49 (7): 1313-1323.
- LI Shun, ZHANG Zhijun. Research progress on cathode material recycling technology for waste ternary lithium batteries [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2025, 49 (7): 1313-1323.
- [8] 郑承辉, 张豪, 宋东祺, 等. 退役三元锂离子电池正极材料中有价金属回收研究进展 [J]. 化工矿物与加工, 2025, 54 (4): 37-50.
- ZHENG Chenghui, ZHANG Hao, SONG Dongqi, et al. Research progress on valuable metal recovery of cathode materials from retired ternary lithium-ion batteries [J]. Industrial Minerals & Processing, 2025, 54 (4): 37-50.
- [9] WANG Y Z, LIAO J F, ZHAO B J. Recovery of valuable metals from waste NCM523 cathode material through pyrometallurgy [J]. Jiangxi Metallurgy, 2025, 2: 112-121.
- [10] SU F Y, ZHOU X Y, LIU X J, et al. An efficient recovery process of valuable metals from spent lithium-ion batteries in acidic medium assisted with waste areca powder [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2022, 10 (6): 108711.
- [11] GUO Y, HUANG J, FENG J K. Solvent extraction separation and recovery of valuable metals from ternary cathode materials of spent lithium ion batteries [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 394: 127585.
- [12] 陈立辉, 赖文斌, 罗奋强, 等. 废旧锂离子电池正极材料的湿法回收和再生技术研究进展 [J]. 硅酸盐学报, 2025, 53 (8): 2148-2165.
- CHEN Lihui, LAI Wenbin, LUO Fenqiang, et al. A review on hydrometallurgy recycle and regeneration technology of cathode materials for spent lithium-ion batteries [J]. Journal of The Chinese Ceramic Society, 2025, 53 (8): 2148-2165.
- [13] WANG K, ZHANG G Q, LUO M Z. Recovery of valuable metals from cathode-anode mixed materials of spent lithium-ion batteries using organic acids [J]. Separations, 2022: 9090259.
- [14] 吴彦, 马恩. 报废锂离子电池资源化回收再生技术研究进展 [J]. 电源技术, 2025, 49 (7): 1337-1353.
- WU Yan, MA En. Research progress on resource recovery and recycling technology of waste lithium-ion batteries [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2025, 49 (7): 1337-1353.
- [15] 许金妹, 高彦峰. 废锂电池中有价金属的绿色回收技术研究进展 [J]. 中国科学: 技术科学, 2025, 55 (4): 630-661.
- XU Jinmei, GAO Yanfeng. Research progress on green recovery technologies of valuable metals from waste lithium batteries [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2025, 55 (4): 630-661.
- [16] 李成昱, 张佳文, 丁浩, 等. 退役锂离子电池正极材料回收再生工艺研究进展 [J]. 现代化工, 2025, 45 (11): 54-59.
- LI Chengyu, ZHANG Jiawen, DING Hao, et al. Research progress on recycling and regeneration technology for cathode materials in spent lithium-ion batteries [J]. Modern Chemical Industry, 2025, 45 (11): 54-59.
- [17] 隋琳. 电子产品镍释放机理、测试及其评价标准的研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
- [18] BRYUKVIN V A, SKRYLEVA E A, BOL'SHIKH A O, et al. Mechanism of the anodic passivation of the group VIII 3d metals in sulfuric acid solutions; I. Nickel [J]. Russian Metallurgy (Metally), 2013 (11): 830-833.
- [19] BRYUKVIN V A, SKRYLEVA E A, LEVIN A M, et al. Some features of the nickel passivation mechanism during direct current polarization in sulfuric acid solutions [J]. Russian Metallurgy (Metally), 2019 (1): 68-71.
- [20] 王变, 李国. 从废旧锂电池正极材料中回收镍钴锰锂的研究 [J]. 绿色矿冶, 2024, 40 (4): 24-31.
- WANG Bian, LI Guo. Study on the Recovery of nickel, cobalt, manganese and lithium from spent lithium battery cathode materials [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40 (4): 24-31.
- [21] 严康, 熊正阳, 刘志楼, 等. 废旧三元锂离子电池正极还原焙烧回收 Li 的研究 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2020, 51 (12): 3367-3378.
- YAN Kang, XIONG Zhengyang, LIU Zhilou, et al. Study on recycling Li of waste lithium ion batteries by reduction roasting [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2020, 51 (12): 3367-3378.

Recovery of Lithium from Retired Ternary Lithium Batteries by Carbothermal Reduction—Two-step Leaching Method

ZHANG Min¹, WU Xiaoqian¹, CHEN Ming³, LI Hongbo², HU Zhengguang¹

(1. College of Chemistry and Bioengineering, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China;

2. Guangxi Zhiliang New Materials Co., Ltd., Nanning 530000, China;

3. Shaanxi Nonferrous Metals Technology Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: The selective recovery of lithium from retired ternary lithium batteries by carbothermal reduction—two-step leaching (water leaching-acid leaching) process was studied. The effects of carbothermal reduction and leaching test conditions on lithium leaching were investigated. The results show that the cathode powder and activated carbon are compounded according to the ratio of carbon mass fraction of 27%. After roasting at 600 °C for 90 min, the roasting product is mixed with ultrapure water according to the solid-liquid mass volume ratio of 1/18, and then 83% of the theoretical amount of sulfuric acid is added dropwise. After leaching at 65 °C for 20 min, the lithium leaching rate is more than 98%, while the leaching rates of nickel, cobalt and manganese are less than 5%, and the lithium recovery effect is better.

Key words: retired ternary lithium battery; lithium; carbothermal reduction; sulfuric acid; leaching; recovery

本刊声明

本刊已加入《中国期刊全文数据库》(中国知网)、《中文科技期刊数据库》(维普网)、《中国核心期刊(遴选)数据库》(万方网)、《超星期刊数据库》(超星移动“域出版”平台)、钛学术智慧平台、中邮阅读网、博看网、美国化学文摘(CAS)、美国 EBSCO 数据库(EBSCO Information Services)、日本科学技术振兴数据库(JST)、科技核心评价数据库(CSCIED), 许可在其网站及其系列数据库产品中以数字化方式复制、发行、信息网络传播本刊全文。本刊所付稿酬包括上述各项目。作者向本刊投稿即视为同意我刊上述声明, 如有异议请在投稿时声明。