

## 一种废旧电池高效除铝实验

李作敏, 吕振福, 张博冉, 刘航涛, 丁国峰

(中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 国家非金属矿资源综合利用工程技术研究中心, 自然资源部多金属矿综合利用评价重点实验室, 河南省黄金资源综合利用重点实验室, 河南 郑州 450006)

**摘要:** 高效回收废旧电池中的金属元素不仅使废物资源化, 还有利于电池行业制造、使用和回收形成动态可持续的循环, 并且可降低对生态环境的危害。研究发现废旧电池回收再利用过程中镍盐、钴盐或正极材料中存在一定量的铝离子, 影响了稀缺金属元素的纯度, 高价金属的二次利用需将铝含量降低至 0.2%。本文在电池预处理阶段采用超声波分离—色选—摇床重选联合工艺除去废旧电池中的铝金属。实验结果表明, 此方法可将原料的铝含量由 1.75% 降至 0.18%, 有效去除废旧电池中的铝, 提高废旧电池回收流程效率。

**关键词:** 废旧电池; 铝金属; 正极组分; 分离

doi:10.12476/kczhly.202405300191

中图分类号: TD982;C33; 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 05-0114-05

**引用格式:** 李作敏, 吕振福, 张博冉, 等. 一种废旧电池高效除铝实验[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(5): 114-118.

LI Zuomin, LYU Zhenfu, ZHANG Boran, et al. Experiment on efficient aluminum removal from waste batteries[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(5): 114-118.

锂电池广泛应用于电子信息产品和新能源汽车, 目前锂电池的正极材料应用较多的有磷酸铁锂、镍钴锰酸锂等, 由于其结构大致相同<sup>[1]</sup>, 统称为锂电池。随着新能源产品的广泛应用, 锂电池的产量和消耗量不断增大, 相应电池折旧量也逐年攀升, 根据估算, 从 2017—2030 年, 全球将产生 1 100 余万吨废旧锂离子电池<sup>[2]</sup>。若得不到有效回收, 形成废物堆存环境污染, 危害人类身体健康, 同时造成大量的资源浪费。

废旧电池中含有大量的 Ni、Co、Li、Mn、Al、Fe 等金属, 这些金属大部分聚集在正极, 其以粉末的形式利用黏结剂与铝箔紧紧连接在一起, 实现废旧电池的高效回收关键在于正极材料的回收, 有两种常见的技术思路: (1) 放电—拆解—富集浸出—除铝—新材料合成; (2) 放电—拆解—正极材料和铝箔分离—富集浸出—新材料合成。思路 1 和思路 2 主要是除铝顺序的

不同, 思路 1 正极材料和铝箔直接破碎后, 大量的铝箔进入正极粉料, 在金属富集过程中铝箔进入酸性溶液成为铝离子, 而新电池对正极材料的纯度要求极高, 需对镍、钴、锰等酸性溶液进行分离净化, 部分研究者对溶液进行碱浸, 得到  $Al(OH)_3$  溶液, 一般能够分离出 92% 的铝<sup>[3-6]</sup>。思路 2 拆解后通过溶解黏结剂聚偏二氟乙烯 (PVDF) 将正极材料和铝箔分离, 其方法主要分为 3 种: (1) 应用高温加热正极片溶解 PVDF<sup>[5]</sup>, 此方法可有效溶解 97% 的黏结剂, 但在加热过程中会产生二噁英等有毒气体, 且温度过高时铝箔易熔化, 熔融物将正极材料包裹, 影响镍、钴等金属的浸出<sup>[7]</sup>; (2) 将粉碎后的正极片直接进行碱浸出, 铝的浸出率一般为 90%<sup>[8]</sup>, 其余部分随后续的工艺段进入酸性溶液中, 此方法易操作, 但消耗大量的酸碱溶液, 部分研究者尝试利用二级逆流和碱循环等方式降低酸碱溶液的使

收稿日期: 2024-05-30

基金项目: 中国地质调查项目 (DD20221699)

作者简介: 李作敏 (1988-), 女, 工程师, 主要从事综合利用研究、标准研制工作。

用量<sup>[9]</sup>，但工艺较为复杂；（3）采用 N-甲基吡咯烷酮等有机溶剂溶解 PVDF 使铝箔和正极材料分离，此方法可有效分离铝箔和正极材料，但会产生大量有机废水，且设备投资成本较高<sup>[8]</sup>。

针对现有正极材料和铝箔分离技术存在收率低、产生有毒气体或有机废水以及成本高等缺点，本研究提出应用高频超声波振荡将黏结正极材料和铝箔的聚偏二氟乙烯松动、解散，将两者分成相互独立的个体，然后应用色选和高频摇床分离铝箔和正极材料。本方法的技术思路是高频超声波振荡器可产生高频率的超声振荡，由于正极材料和铝箔间的张力存在差异，使正极材料和铝箔产生共振，同时对水升温加速其分离，根据铝箔和正极材料颜色差异分离出 1 cm 以上的铝箔，利用其密度差异应用高频细砂摇床分离出 1 cm 以下的铝箔。本研究探讨了利用正极片的物理性质除铝的方法，得到较高纯度的正极材料。

## 1 材料及实验方法

### 1.1 废旧电池物料

本次实验研究物料是江苏某公司提供的废旧电池，正极材料为三元锂

( $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ )，首先对废旧电池进行预处理，为了防止放电过程中可能发生爆炸，充入氯化钠溶液进行短路放电并吸收放电过程中产生的热能，手动拆卸获取正极片，用纯净水冲洗后烘干。为了考量不同粒度段对分离实验的影响，切成不规则形状，粒度为 0~8 cm，正极原料经化验铝含量 1.75%。

### 1.2 实验方法

取正极原料 300 g，放入平底的不锈钢盆中，加入 400 g 水将其浸湿，将不锈钢盆放入超声波振动器中，启动超声波开关，频率调至为 40 Hz。超声波振动器同时能够产生横向和纵向的机械振动波，在传播过程中利用振动形式实现能量传输，这些能量将作用在介质质点，使其产生极强的机械振动形式的单项力学运动。能量通过超声波传输使介质中的粒子发生机械运动，在能量的不断作用下产生加速运动，使处于铝箔和正极组分边界的黏结剂（聚偏二氟乙烯）出现摩擦、裂缝，进而实现松动、解散<sup>[9-10]</sup>。经 20 min 后，铝箔与正极组分完全分离，放入烘干箱对其烘干，待下一

步实验。

色选机是根据物料颜色、光学差异，应用光电探测技术将颗粒物料中异色物料分拣的设备。目前，色选机广泛应用于粮食分拣、散装工业品分类、食品品质检测等方面，随着色选机精度越来越高，不断被应用到各行各业<sup>[11]</sup>。本次应用的色选机具有识别度高、风力可调节范围大的特点，专为分选形状不规则且质量较轻的物质研发的设备，主要由控制面板、给料器、皮带、照射检测系统、接料口等组成。皮带转速和风压是影响色选机分选的关键因素<sup>[12-13]</sup>。

在分选作业前，首先在控制面板上设定分选程序，本次实验样品中铝箔与黑色正极材料呈 1:7 的体积分布规律，基于色选机除少留多的分选原则，设置除浅色物料。以皮带转速和风压值为探索条件进行实验，实验流程见图 1。

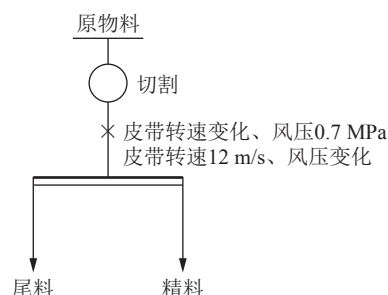


图 1 条件分选流程

Fig.1 Flow of conditional sorting

按照分选流程首先进行皮带转速条件实验，风压值设定为 0.7 MPa，实验结果见图 2。由图 2 可知，随着皮带转速的提高，精料中的 Al 品位先降低后升高，在转速为 10 m/s 时品位降到较低 0.59%；产率随着皮带转速的提高而升高，在转速

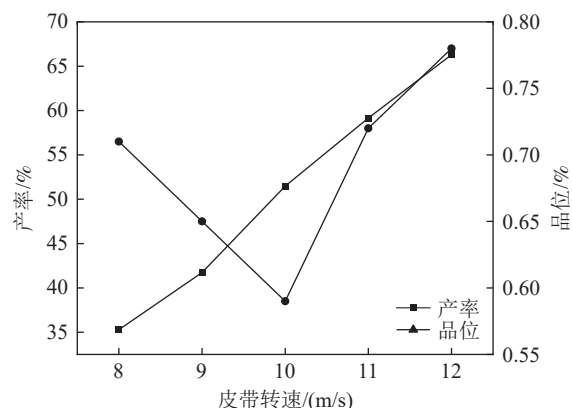


图 2 皮带转速变化条件实验结果

Fig.2 Test results of belt rotation speed change conditions

为 12 m/s 时精料产率为 66.29%，以保产率为首选，选 12 m/s 为实验条件。

由于铝箔和正极组分密度差异性小，过高的风压容易吹散铝箔不利于回收，过小风压则无足够的作用力将铝箔和正极组分分离，风压值实验流程见图 1。实验结果见图 3。由图 3 可知，随着风压值的变大，精料铝含量逐渐降低，产率也呈逐渐降低的趋势，当风压值为 0.5 MPa 时，精料的铝含量为 1.12%，产率为 72.45%，当风压值为 0.9 MPa 时，铝含量可降至 0.65%，但产率为 44.16%，产率过低。以保证产率为前提，选择风压值为 0.7 MPa 和 0.5 MPa 为实验条件进行精选实验。

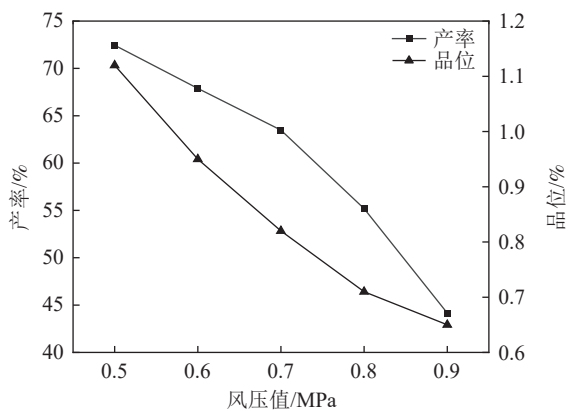


图 3 风压变化条件实验结果  
Fig.3 Test results of wind pressure change conditions

## 2 实验结果与分析

分别以皮带转速为 12 m/s、风压为 0.7 MPa 和皮带转速为 12 m/s、风压为 0.5 MPa 为实验条件进行精选实验，采用一粗两精的分选方式降低精料中的 Al 含量，两次精选的尾料和粗选尾料合并为最终尾料，实验流程见图 4，实验数据见表 1。

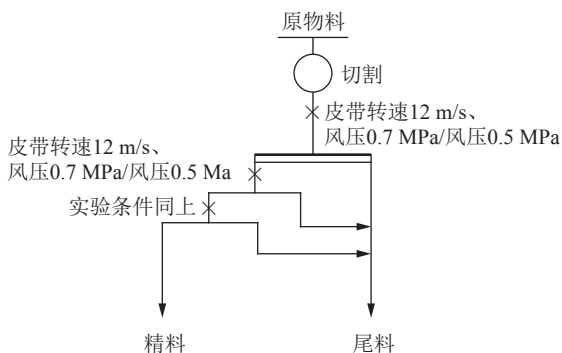


图 4 精选实验流程  
Fig.4 Cleaning test flow

表 1 精选实验结果  
Table 1 Cleaning test results

实验条件	产品名称	产率/%	Al品位/%
皮带转速12 m/s, 风压0.5 MPa	精料	37.56	0.18
	尾料	62.44	2.64
	原物料	100.00	1.72
皮带转速12 m/s, 风压0.7 MPa	精料	29.25	0.14
	尾料	70.75	2.38
	原物料	100.00	1.72

由表 1 可知，当皮带转速 12 m/s，风压 0.5 MPa 时，精料的 Al 含量降到 0.18%，产率为 37.56%，因除铝实验无法计算回收率，需要对产率和 Al 含量相互比较，取得最优值。因 Al 含量降至 0.2% 以下即可，为了提高精料产率，对两次精选尾料扫选，得到的精料和精选精料合并后再进行一次精选，实验流程见图 5，结果见表 2。

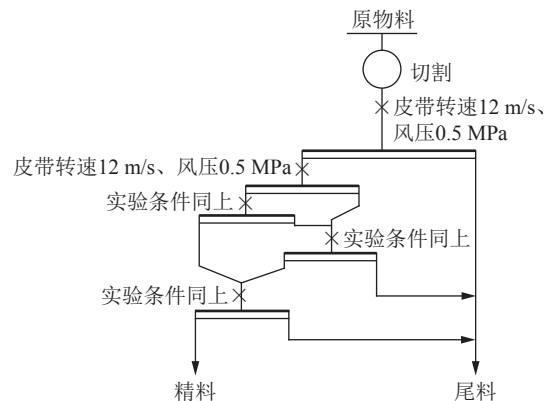


图 5 精—扫选流程  
Fig.5 Cleaning-scavenging test flow

表 2 精—扫分选实验结果  
Table 2 Cleaning-scavenging test results

产品名称	产率/%	Al品位/%
精料	42.28	0.19
尾料	57.72	2.88
原物料	100.00	1.74

由表 2 知，此流程相比于一粗二精流程，精料产率约提高 5%，铝含量增加 0.01%，总含量小于 0.20%，符合预期要求，但产率有待提高。对精料和尾料分别应用 1 cm 的标准筛进行筛分。

精料中 91.2% 的物料小于 1 cm，而尾料中 82.4% 的物料大于 1 cm，说明色选机对 1 cm 的铝箔和正极组分选效果欠佳，应用实验室 100 cm×50 cm 高频细砂振动摇床进行分选，可见明显的物

料分层带，实验结果见表 3。

表 3 高频细砂摇床实验结果  
Table 3 Test results of high-frequency fine sand shaker

产品名称	产率/%	Al品位/%
精料	62.80	0.17
中料	35.52	6.38
尾料	1.68	29.40
原物料	100.00	2.87

由表 3 知，在黑色物料粒度-1 cm 时，应用摇床可分离出铝箔，其效果明显，精料 Al 含量 0.17%，产率为 62.8%，有 35.52% 的中间物料，Al 含量为 6.38%。总实验流程见图 6，回算后实验结果见表 4。

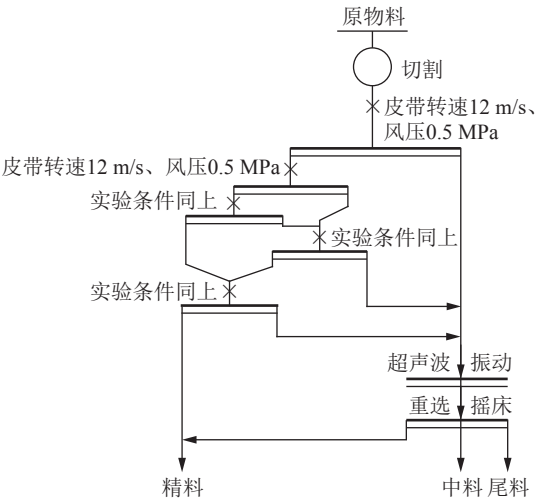


图 6 废旧电池除铝总分选流程

Fig.6 Total sorting process of aluminum removal for waste batteries

表 4 总分选流程实验结果  
Table 4 Test results of the total sorting process

产品名称	产率/%	Al品位/%
精料	78.53	0.18
中料	20.50	6.38
尾料	0.97	29.40
原物料	100.00	1.73

由图 6、表 4 知，其精料产率为 78.53%，Al 含量 0.18%。整个分选流程为物理分选，工艺流程简单，实验结果较好。

现阶段应用较多的废旧电池除铝的方法为化学法，其浸出率在 90% 左右。本研究在其他金属离子浸出提纯之前，通过超声波—色选—高频细砂摇床在预处理阶段将废旧电池中的铝去除，去

除铝率可达 90% 以上，整个实验流程中没有应用任何的化学药剂或添加剂，对环境未造成任何污染。且实验流程简单易操作，不需任何易耗品，符合经济效益。

### 3 结论

(1) 废旧电池原料的回收已形成较成熟的产业结构，但 Al 含量超标始终影响着高价金属的应用，化学方法虽能将精料中的 Al 降至 0.2% 达到高价金属利用标准，但化学药剂、浸出废液废水的排放对环境造成污染，很多厂家每年缴纳高额的污染物处理费。Al 除杂工艺革新势在必行，本研究将 Al 去除工艺提前至预处理阶段可有效提高铝的去除率，不仅减少了化学药剂的使用量也降低了铝离子对后续浸出萃取工艺的影响。经计算应用此方法每去除 10 g 铝可减少约 50 g 酸性溶液的使用量，1 g 氢气的排放量，防止资源浪费和回收工艺造成的二次污染。

(2) 色选机—高频细砂摇床的联合除铝工艺可有效将铝箔和正极组分分离，其方法简单易操作，且纯物理方式分选，适用于我国矿产资源节约集约利用的总体趋势。

### 参考文献：

[1] 张笑天,徐璐,黄斌,等. 废旧磷酸铁锂电池回收利用研究与产业化现状[J]. 矿产综合利用, 2023(4):95-102.  
ZHANG X T,XU L,HUANG B,et al. Research and industrialization status of recycling of waste lithium iron phosphate batteries[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(4):95-102.

[2] 胡程,王静,曾丽,等. 废旧动力锂离子电池正极材料资源化利用[J]. 矿产综合利用, 2023(6):53-62.  
HU C,WANG J,ZENG L,et al. Resource utilization of cathode materials of waste power lithium-ion batteries[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(6):53-62.

[3] 吴越,裴锋,贾路路,等. 从废旧磷酸铁锂电池中回收铝、铁和锂[J]. 电源技术, 2014, 38(4):629-631.  
WU Y, PEI F, JIA L L, et al. Recovery of aluminum, iron and lithium from spent lithium iron phosphate batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(4):629-631.

[4] 张旭,金士威. 废旧锂电池中金属钴和铝的回收[J]. 广州化工, 2013, 41(9):118-120.  
ZHANG X, JIN S W. Recovery of cobalt and aluminum from spent lithium-ion batteries[J]. Guangzhou Chemical Industry,



2013, 41(9):118-120.

[5] 周杰, 王景伟, 马恩. 废旧锂离子电池热处理过程中污染物的迁移转化[J]. 上海第二工业大学学报, 2023, 40(2):111-118.

ZHOU J, WANG J W, MA E. Migration and transformation of pollutants during the thermal treatment of spent lithium-ion batteries[J]. Journal of Shanghai Second Polytechnic University, 2023, 40(2):111-118.

[6] 杨改航. 超塑锌铝合金铬酸盐钝化改进工艺[J]. 电镀与涂饰, 2012, 31(7):34-36.

YANG G H. Improved chromate passivation process for superplastic zinc aluminum alloy[J]. Electroplating & Finishing, 2012, 31(7):34-36.

[7] 张文. 钴酸锂废旧电池正极材料回收实验中铝元素的分析[J]. 中国有色冶金, 2015, 44(6):74-75.

ZHANG W. Aluminum element analysis in test of anode material recycling from lithium cobalt oxide waste batteries[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2015, 44(6):74-75.

[8] 刘更好, 周汉章, 唐红辉, 等. 废旧锂离子电池中铝资源回收工艺研究[J]. 电池工业, 2012, 17(1):17-19.

LIU G H, ZHOU H Z, TANG H H, et al. Research on the technology of recovering aluminum from spent Li-ion batteries[J]. Chinese Battery Industry, 2012, 17(1):17-19.

[9] 张永禄, 尹飞, 揭晓武, 等. 碱循环浸出法分离废旧锂离子电池中铝的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(12):22-26.

ZHANG Y L, YIN F, JIE X W, et al. Study on removal of

aluminum from spent lithium-ion batteries by alkali recycling leaching process[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2018(12):22-26.

[10] COSTA C M, LIZUNDIA E, LANCEROS-MÉNDEZ S. Polymers for advanced lithium-ion batteries: State of the art and future needs on polymers for the different battery components[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2020, 79:100846.

[11] 路春辉, 饶胜利, 苏俊祥. 超声波清洗在航空航天业中的应用[J]. 清洗世界, 2024, 40(4):93-96.

LU C H, RAO S L, SU J X. The application of ultrasonic cleaning in the aerospace industry[J]. Cleaning World, 2024, 40(4):93-96.

[12] 张晓彬, 温欣, 曹伟伟, 等. 超声处理对煤泥组分沉降速度的影响[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(2):138-143.

ZHANG X B, WEN X, CAO W W, et al. Influence of ultrasonic treatment on the sedimentation performance of slime[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(2):138-143.

[13] 李艳, 余媛元, 童晓蕾, 等. X射线分选技术在磷矿选矿中的应用研究[J]. 矿产综合利用, 2023(2):100-105.

LI Y, YU Y Y, TONG X L, et al. Study on the application of X-ray separation technology in phosphate mine dressing[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(2):100-105.

## Experiment on Efficient Aluminum Removal from Waste Batteries

LI Zuomin, LYU Zhenfu, ZHANG Boran, LIU Hangtao, DING Guofeng

(Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, China National Engineering Research Center for Utilization of Industrial Minerals, Key Laboratory for Polymetallic Ores' Evaluation and Utilization, Ministry of Natural Resources, Engineering Technology Innovation Center for Development and Utilization of High Purity Quartz, Ministry of Natural Resources, Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Gold Resource in Henan Province, Zhengzhou, Henan 450006, China)

**Abstract:** The efficient recovery of metal elements from waste batteries not only makes waste resources, but also helps the battery industry to form a dynamic and sustainable cycle of manufacturing, use and recycling, and reduces the harm to the ecological environment. The study found that there was a certain amount of aluminum ions in nickel salts, cobalt salts or cathode materials during the recycling and reuse of waste batteries, which affects the purity of scarce metal elements. The secondary utilization of high priced metals requires reducing the aluminum content to 0.2%. In this paper, ultrasonic separation-color selection-shaking table re-election combined process is used in the pre-treatment stage of batteries to remove aluminum metal from waste batteries. The experimental results show that this method can reduce the aluminum content of raw materials from 1.75% to 0.18%, effectively remove aluminum from waste batteries, and improve the efficiency of waste battery recycling process.

**Keywords:** waste battery; aluminum; positive electrode component; separate