表面活性剂协同超声分离废旧锂离子电池负极片中石墨和铜箔工艺研究①

郑志强[1,2], 杨义升[1,2], 徐子芳[1], 丁李杰[2], 邱茂琴[3], 李文明[1,2]
(1.安徽理工大学, 安徽 淮南 232001; 2.合肥综合性国家科学中心能源研究院(安徽省能源实验室), 安徽 合肥 230051; 3.合肥职业技术学院 安徽 合肥 230012)

摘 要: 以废旧锂离子电池负极片为研究对象,采用 $L_{25}(5^4)$ 正交试验,在添加 0.5%表面活性剂的体系中,考察超声温度、超声时间、超声频率、固液比对石墨和铜箔分离率的影响,并设置无表面活性剂体系作为对照。结果表明,在表面活性剂添加量0.5%、超声温度 90 ℃、超声时间 15 min、超声频率 100 kHz、固液比 1∶9 条件下,石墨分离率可达 95.75%。回收石墨的 XRD 衍射峰与标准石墨基本一致,无序结构占比较低。回收铜箔抗拉强度为 180~190 MPa,力学性能良好;载流子迁移率为 35.68 $cm^2/(V \cdot s)$,具备良好的导电性能。

关键词: 废旧锂离子电池; 超声分离; 表面活性剂; 负极片; 铜箔; 石墨
中图分类号: X773;TM912 **文献标志码**: A doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.02.024
文章编号: 0253-6099(2026)02-0150-06

Surfactant-Assisted Ultrasonic Separation Process for Copper Foil and Graphite in Anode Sheets of Spent Lithium-Ion Batteries

ZHENG Zhiqiang[1,2], YANG Yisheng[1,2], XU Zifang[1], DING Lijie[2], QIU Maoqin[3], LI Wenming[1,2]
(1.*Anhui University of Science and Technology*, *Huainan* 232001, *Anhui*, *China*; 2.*Institute of Energy*, *Hefei Comprehensive National Science Center* (*Anhui Energy Laboratory*), *Hefei* 230051, *Anhui*, *China*; 3.*Hefei Technology College*, *Hefei* 230012, *Anhui*, *China*)

Abstract: Anode sheets of spent lithium-ion batteries were taken for research, and an $L_{25}(5^4)$ orthogonal test was employed to investigate the effects of ultrasonic temperature, ultrasonic time, ultrasonic frequency and solid-liquid ratio on the separation efficiency of graphite and copper foil in a system with an addition of 0.5% surfactant. A system without surfactant was taken as the control group. The results show that the graphite separation efficiency reaches 95.75% in a system with an addition of 0.5% surfactant, by ultrasonic separation at 90 ℃ for 15 min with a frequency of 100 kHz and solid-liquid ratio of 1∶9. The recovered graphite is basically consistent with those of standard graphite in terms of the XRD diffraction peaks and has a low proportion of disordered structure. The recovered copper foil exhibits favorable mechanical properties, with a tensile strength of 180 – 190 MPa, and its carrier mobility is 35.68 $cm^2/(V \cdot s)$, indicating excellent electrical conductivity.

Key words: spent lithium-ion battery; ultrasonic separation; surfactant; anode sheet; copper foil; graphite

2024 年全球锂离子电池总产量已达 1 452 GWh,其中中国产量为 1 125 GWh,约占全球总产量的 77.5%[1]。在全球能源转型的宏观背景下,锂离子电池产业的爆发式增长同步催生了废旧电池处置行业的快速发展。商业化锂离子电池的服役寿命通常为 5~8 年[2],经多次充放电循环后,其内部活性材料会

① **收稿日期**: 2026-01-13
基金项目: 安徽省教育厅高校科研重点项目(2025AHGXZK31123)
作者简介: 郑志强(1998—),男,安徽合肥人,硕士研究生,主要研究方向为锂离子电池材料。E-mail:1971320060@qq.com
通信作者: 李文明(1986—),男,安徽亳州人,博士,副研究员,主要从事新能源材料的高值化制备与回收产业化。E-mail:milijaden@ie.ah.cn
丁李杰(1994—),男,安徽滁州人,硕士,主要从事电池回收再生资源化利用。E-mail:lijied@ie.ah.cn
邱茂琴(1986—),女,四川眉山人,博士,主要从事新能源材料的高值化制备与回收产业化。E-mail:qmqxz00018@yeah.net

发生不可逆衰减，最终进入退役阶段。目前全国锂离子电池退役规模呈高速增长：2024 年锂离子电池退役量已达 65.4 万 t，2026 年将突破 150 万 t，两年间增长率接近 130%[3-4]。锂离子电池退役后若处置不当，不仅会造成锂、钴等有价资源的浪费，更可能因电解液泄漏、重金属析出等问题引发严重环境问题，因此废旧锂离子电池的高效回收与资源化利用已成为新能源产业可持续发展的核心议题[5]。

表面活性剂协同超声分离是废旧锂离子电池负极片资源化利用的高效技术方法，但目前国内外研究多聚焦于单一超声分离或化学试剂剥离技术，鲜有研究系统揭示表面活性剂与超声场的协同界面作用机制，更缺乏对石墨与铜箔选择性分离的工艺优化[6]。石墨与铜箔的深度分离是负极片回收的关键环节，其分离效果直接影响石墨分离率、回收石墨的铜杂质含量及铜箔结构完整性，进而影响后续材料的高值化回用潜力与整体工艺经济性。针对这一技术瓶颈，本文通过表面活性剂协同超声分离工艺，实现废旧锂离子电池负极片中石墨与铜箔的高效分离，最大限度保留石墨与铜箔的结构完整性，以期为负极片关键材料的高值化回收提供技术支撑。

1　试验部分

1.1　主要试剂

主要试剂为木质素磺酸钠（分析纯）和去离子水（电导率不高于 10 μS/cm）；试验所用废旧锂离子电池来源于安徽巡鹰新能源集团有限公司。

1.2　试验过程

1.2.1　负极片结构

图 1 为负极片结构图。负极片经涂布、干燥、辊压、裁剪等工序制备而成，主要组分为活性材料、集流体（铜箔）、黏结剂及少量导电剂。在负极片湿法分离过程中，核心机制是破坏黏结剂与集流体、活性材料间的界面结合力，实现活性材料与集流体（铜箔）的高效分离及资源化回收。

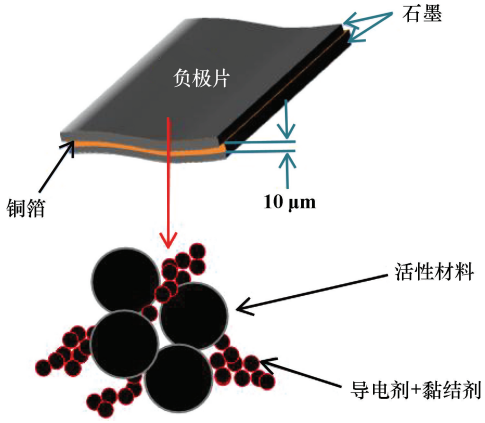
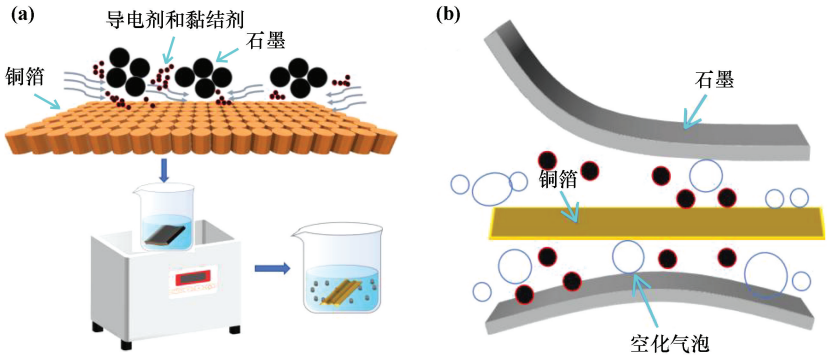


图 1　负极片结构图

Fig. 1　Schematic illustration of anode sheet structure

1.2.2　表面活性剂协同超声分离原理

图 2 为表面活性剂协同超声分离原理示意图。由图 2 可知，超声分离利用超声波强化分离负极片中的石墨与铜箔。超声波在液体介质中传播时产生高频压力波，造成局部高低压交替变化。低压区液体汽化生成微米级气泡，高压区气泡瞬间崩溃，产生时速 100 m/s 以上的微射流，冲击黏结剂与集流体界面，破坏黏结剂界面，超声分离具有高效、低损伤的特点[7-8]。加入亲水型表面活性剂（木质素磺酸钠）后，其分子在铜箔表面形成亲水性水化膜，使铜箔表面完全被水润湿，石墨颗粒更易分散于水相，铜箔则因密度差异沉降，从而实现石墨和铜箔分离。空化效应能强力清洁铜箔表面，促进表面活性剂分子在铜箔表面均匀吸附，使分离效果显著提升。



（a）超声清洗分离；（b）溶剂协同法分离

图 2　表面活性剂协同超声分离原理示意图

Fig. 2　Schematic diagram of surfactant-assisted ultrasonic separation mechanism

1.2.3 试验方法

为系统探究超声工艺参数及表面活性剂协同作用对负极片石墨分离率的影响,设计 $L_{25}(5^4)$ 多因素正交试验,具体方案如下:以 UG(untreated graphite)表示未添加表面活性剂体系;PG(processed graphite)表示添加表面活性剂体系,其中 PG 体系表面活性剂添加量为 0.5%(质量分数,下同);后续正交试验均在此基础上开展,UG 体系作为对照组,分析表面活性剂对石墨分离率的影响。将手工拆解的负极片置于超声发生器中,选取超声温度、超声时间、超声频率、固液比 4 个关键参数,各设置 5 个梯度水平,每组参数下同步开展 UG 与 PG 平行试验,通过 30 目(0.85 mm)筛初步分离铜箔,将含石墨、铜粒的混合悬浮液静置沉降后,取上清液真空抽滤分离石墨,随后将铜箔与石墨产物烘干并筛分,得到 3 个粒级产物:+1 mm 粒级主要为大片铜箔及未脱落的石墨;-0.15 mm 粒级主要为石墨粉末颗粒及部分细小铜箔颗粒;0.15~1 mm 粒级产物占比较少,不做研究。重复 3 次后取分离率均值,通过对比同一参数水平下的分离率差异量化表面活性剂协同效果,最终确定最优工艺组合。

1.3 表征与测试

采用 VEGA3 TESCAN 型扫描电子显微镜测定石墨和铜箔的形貌及元素组成;采用 MiniFlex 600 型 X 射线衍射仪测定石墨物相组成;采用拉曼光谱仪测定回收石墨结构缺陷程度;采用 CMT6104 型抗拉性能测试仪测定铜箔力学性能;采用 HL5500PC 型霍尔效应测试仪测定铜箔电化学性能。

1.4 数据分析

石墨分离率 η 的计算公式为:

$$\eta = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \tag{1}$$

式中:m_1 为超声分离并干燥后所得石墨的实际质量,g;m_2 为负极片中石墨的理论质量,g。

2 结果与讨论

2.1 试验结果分析

正交试验因试验次数少、因素覆盖全面而广泛应用于废旧电池回收工艺的参数优化[9]。采用 $L_{25}(5^4)$ 正交试验设计,在 PG 体系与 UG 体系下,系统考察超声温度、超声时间、超声频率及固液比对石墨分离率的影响。正交试验编码和结果如表 1 所示。由表 1 可知,随着超声温度升高,UG 与 PG 体系下石墨分离率均呈缓慢上升趋势,升高超声温度降低了液体黏度,促进空化气泡的形成与崩溃,从而增强对黏结剂界面的破坏作用;PG 体系下石墨分离率始终高于 UG 体系,表明表面活性剂的亲水膜效应进一步强化了石墨与铜箔的分离效果。在 5~15 min 的超声时间内,UG 和 PG 体系下石墨分离率持续提升;超声时间超过 15 min 时,石墨分离率趋于稳定。超声频率不高于 60 kHz 时,UG 体系下石墨分离率不足 45%;超声频率继续升高,UG 与 PG 体系下石墨分离率均快速提升,PG 体系下石墨分离率增幅更显著。当固液比高于 1∶9 时,UG 和 PG 体系下石墨分离率随液相占比增加而上升,当固液比不高于 1∶9 时,石墨分离率趋于稳定,此时液相过多,稀释了空化能量,继续增加固液比无显著增益[10]。

表 1 正交试验编码和结果

Table 1 Codes and results of orthogonal test

试验编号	超声温度/℃	超声时间/min	超声频率/kHz	固液比	石墨分离率/%	
					UG	PG
1	50	5	40	1∶3	19.81	38.50
2	50	10	60	1∶5	24.62	52.12
3	50	15	80	1∶7	31.20	66.31
4	50	20	100	1∶9	34.71	71.81
5	50	25	120	1∶11	37.11	75.63
6	60	5	60	1∶7	27.30	57.48
7	60	10	80	1∶9	32.84	69.51
8	60	15	100	1∶11	39.11	79.80
9	60	20	120	1∶3	34.21	63.71
10	60	25	40	1∶5	38.22	72.42
11	70	5	80	1∶11	31.78	65.21
12	70	10	100	1∶3	35.50	70.10
13	70	15	120	1∶5	42.34	83.13
14	70	20	40	1∶7	38.41	77.20
15	70	25	60	1∶9	44.80	85.31
16	80	5	100	1∶5	33.20	77.61
17	80	10	120	1∶7	39.01	81.34
18	80	15	40	1∶9	41.82	83.53
19	80	20	60	1∶11	44.51	87.25
20	80	25	80	1∶3	42.16	77.51
21	90	5	120	1∶9	35.41	70.24
22	90	10	40	1∶11	38.54	75.12
23	90	15	60	1∶3	41.61	78.41
24	90	20	80	1∶5	45.24	84.30
25	90	25	100	1∶7	49.03	90.21
最优组合	90	15	100	1∶9	52.18	95.75

通过多参数耦合分析,确定优化工艺组合为:表面活性剂添加量 0.5%、超声温度 90 ℃、超声时间 15 min、超声频率 100 kHz、固液比 1∶9。经试验验证,该工艺组合下,石墨分离率达 95.75%。后续进一步通过 SEM、XRD 与拉曼光谱(Raman)对该条件下 UG 和 PG 体系的回收石墨进行表征,并结合 SEM-EDS、抗拉性能测试及霍尔效应测试对 UG 和 PG 体系的回收铜

箔进行分析。

2.2　回收石墨形貌与表征

2.2.1　回收石墨形貌和 SEM 表征

图 3 为 UG 与 PG 体系回收石墨照片和 SEM 图像。由图 3 可知，UG 体系回收石墨中混杂大量颗粒大小不等的铜杂质，超声过程中石墨颗粒对铜箔的机械刮擦，导致铜箔破损并产生铜碎屑混入石墨产物中；UG 体系回收石墨颗粒尺寸大小不均匀，且不同石墨颗粒之间存在黏结现象，表面破损严重，结构完整性较差。相比之下，PG 体系回收石墨宏观上无可见铜杂质，颗粒比较均匀，且颗粒之间无黏结现象存在。在表面活性剂协同超声处理的作用下，相互黏结的大块石墨颗粒有效分离，石墨颗粒表面无明显破碎现象，较为完整。

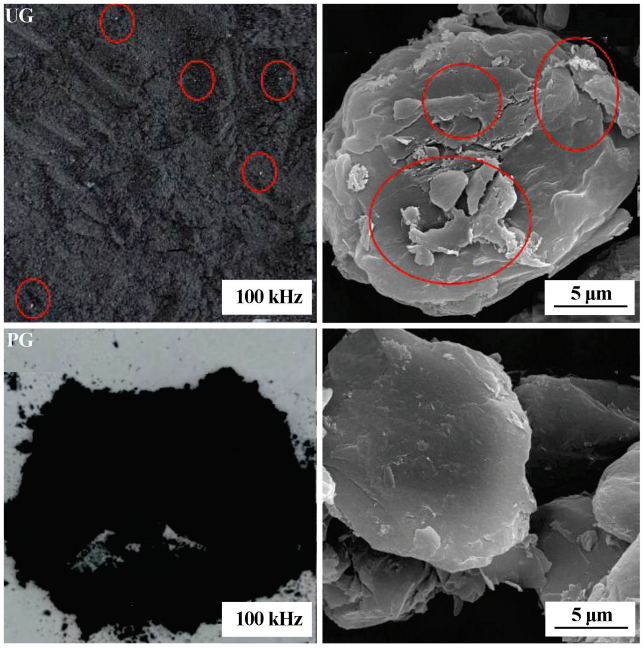


图 3　UG 与 PG 体系回收石墨照片和 SEM 图像

Fig. 3　Photographs and SEM images of recovered graphite from UG and PG systems

2.2.2　回收石墨 XRD 与 Raman 分析

图 4 为 UG 与 PG 体系回收石墨的 XRD 图谱。由图 4 可知，回收石墨衍射峰峰位和强度均与标准谱图高度吻合，表明回收工艺并未破坏石墨的晶体结构。图谱中出现微弱的 Cu(111)晶面衍射峰，表明超声过程中混入了极少量铜箔破碎产生的铜粒，除此之外无其他杂峰。这一现象说明，经过表面活性剂协同超声处理后，石墨中原本含有的黏结剂、电解液残留等杂质已被有效脱除，其纯度得到显著提升。由 PG 与 UG 体系回收石墨的 002 峰放大图可知，PG 体系回收石墨的 002 衍射峰峰形更为尖锐、对称，且半高宽更窄，反映出经表面活性剂处理后回收石墨的结晶度相较于未处理石墨有所提高，具备高纯度、高结晶度的优异特性，分离效果显著。

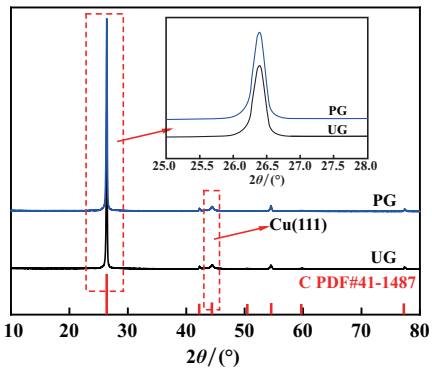


图 4　UG 与 PG 体系回收石墨的 XRD 图谱

Fig. 4　XRD patterns of recovered graphite from UG and PG systems

UG 与 PG 体系回收石墨的 Raman 图谱如图 5 所示。由图 5 可知，石墨特征 D 峰(~1 350 cm^{-1})与 G 峰(~1 580 cm^{-1})均清晰呈现，且未检测到其他杂峰。回收石墨的碳相纯度较高，未引入额外杂质。其 D 峰对应碳材料的无序结构或缺陷位点，G 峰代表石墨化碳的 sp^2 杂化碳骨架振动，二者的强度比(I_D/I_G)越高，说明碳材料的无序度与缺陷密度越大。PG 体系回收石墨的 I_D/I_G(0.422)显著低于 UG 体系回收石墨的 I_D/I_G(0.513)，表明经表面活性剂协同超声处理后，回收石墨的缺陷密度更低、杂质含量更少。

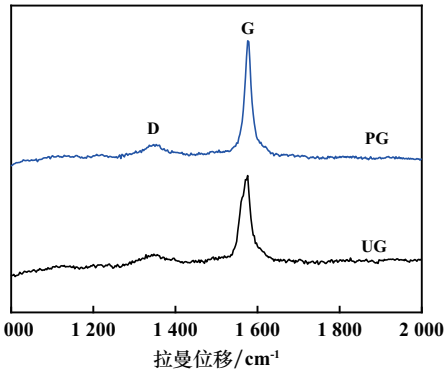


图 5　UG 与 PG 体系回收石墨的 Raman 图谱

Fig. 5　Raman patterns of recovered graphite from UG and PG systems

2.3　回收铜箔的形貌与性能

2.3.1　回收铜箔的 SEM 表征

对 UG 体系和 PG 体系回收铜箔进行 SEM 表征，结合 EDS 能谱对其微观形貌及元素分布进行分析。UG 和 PG 体系回收铜箔的 SEM-EDS 图谱见图 6。由图 6 可知，PG 体系回收铜箔表面均匀平整，无明显龟裂、褶皱或孔洞等结构损伤，且未观察到石墨颗粒的黏

附痕迹,石墨与铜箔高效脱附的同时,铜箔的微观结构被有效保护。EDS 面扫结果显示,Cu 元素信号均匀且强度高,仅存在极少量局部 Cu 元素信号微弱,无明显缺失,其主体金属铜相保持连续完整,未出现明显的结构破损;C、O、F、P 等杂质元素仅以零星分散的微量信号存在,未出现明显的局部聚集。UG 体系回收铜箔表面存在显著的颗粒聚集,且覆盖有薄膜状黏结剂残留,其石墨与铜箔的脱附过程不彻底,大量杂质残留于铜箔表面[11]。EDS 检测中 C、O、F、P 等杂质元素的信号更为显著且存在局部聚集,脱附不彻底。结果表明,添加表面活性剂协同超声分离工艺可高效去除铜箔表面的石墨,显著降低杂质含量,同时避免铜箔过度破碎或结构损伤,保证了回收铜箔的金属相连续性。

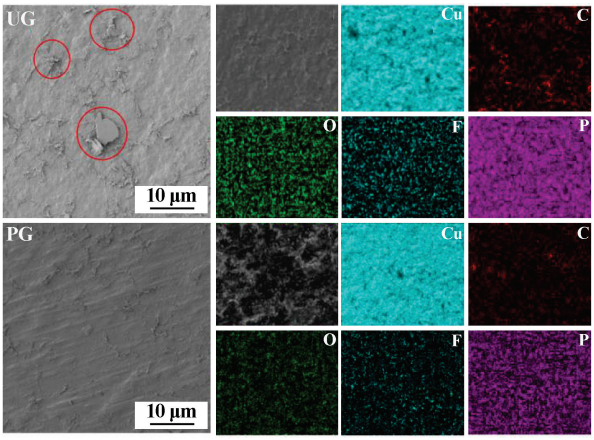


图 6 UG 和 PG 体系回收铜箔的 SEM-EDS 图谱

Fig. 6 SEM-EDS patterns of recovered copper foil from UG and PG systems

2.3.2 回收铜箔的抗拉性能测试

图 7 为 UG 和 PG 体系回收铜箔的应力-应变曲线。由图 7 可知,UG 和 PG 体系回收铜箔的应力-应变曲线均呈现连续屈服特征,无明显屈服平台,表明回收铜箔在分离回收过程中杂质得到有效控制,未出现杂质偏聚导致的屈服台阶。在弹性变形阶段,曲线呈线性快速上升,进入塑性强化阶段后,曲线上升速率放缓并趋于平缓,铜箔发生塑性变形并产生加工硬化效应。PG 体系回收铜箔在应变范围内抗拉强度可达 180~190 MPa,而 UG 体系回收铜箔的抗拉强度为 170~180 MPa,PG 体系回收铜箔的承载能力更优。UG 和 PG 体系回收铜箔的抗拉强度均略低于原生铜箔(为原生铜箔的 70%~80%[12]),但仍保持了较高的强度水平。PG 体系回收铜箔的断裂应变约为 5%,UG 体系回收铜箔的断裂应变为 4.8%,两者塑性较原生铜箔均有所下降,但未出现脆性断裂,仍具备一定的变形能力,PG 体系回收铜箔凭借更高的抗拉强度与断裂应变,展现出更好的力学性能,机械性能保持良好,具有良好的再利用价值。

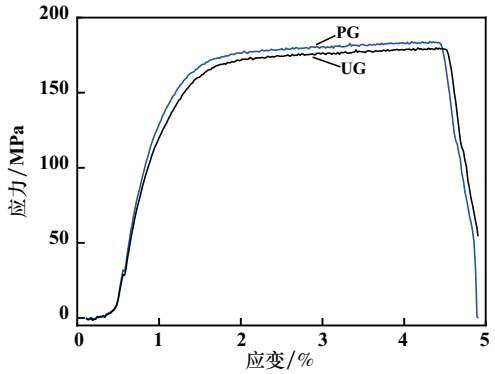


图 7 UG 和 PG 体系回收铜箔的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of recovered copper foil from UG and PG systems

2.3.3 回收铜箔的电化学性能参数

表 2 为 PG 与 UG 体系回收铜箔的电化学性能参数。由表 2 可知,2 种铜箔均表现 n 型电子导电特性,PG 体系回收铜箔的载流子面密度(8.51×10^{20} cm^{-2})与载流子体密度(8.51×10^{22} cm^{-3})较 UG 体系载流子面密度(8.50×10^{20} cm^{-2})与载流子体密度(8.50×10^{22} cm^{-3})均提升约 0.12%,为电子传输提供了更充足的载流子基础;在导电效率上,PG 体系电阻率(2.05×10^{-6} Ω·cm)较 UG 体系电阻率(2.08×10^{-6} Ω·cm)降低约1.44%,同时 PG 体系载流子迁移率[35.68 $cm^2/(V\cdot s)$]较 UG 体系载流子迁移率[35.49 $cm^2/(V\cdot s)$]提升约 0.54%,其内部电子传输的阻力更小、移动速度更快[13]。整体而言,PG 体系回收铜箔电化学导电性能更好,具有良好的再利用价值。

表 2 PG 与 UG 体系回收铜箔的电化学性能参数

Table 2 Electrochemical performance parameters of recovered copper foil from PG and UG systems

体系	载流子类型	面密度/ cm^{-2}	体密度/ cm^{-3}	电阻率/ (Ω·cm)	霍尔系数/ $(cm^3\cdot C^{-1})$	迁移率/ $(cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1})$
UG	n	8.50×10^{20}	8.50×10^{22}	2.08×10^{-6}	-7.35×10^{-5}	35.49
PG	n	8.51×10^{20}	8.51×10^{22}	2.05×10^{-6}	-7.33×10^{-5}	35.68

3 结论

1) 构建表面活性剂协同超声分离技术体系,有效解决传统超声分离中铜箔易破损、回收石墨铜杂质含量高的技术瓶颈。通过表面活性剂水化膜与超声空化效应的协同作用,可实现石墨与铜箔的高效、低损伤分离。

2) 基于 $L_{25}(5^4)$ 正交试验,在表面活性剂添加量 0.5%、超声频率 100 kHz、超声温度 90 ℃、超声时间 15 min、固液比 1∶9 条件下,石墨分离率高达 95.75%。回收的石墨结构完整、杂质少($I_D/I_G=0.422$);回收的铜箔抗拉强度达 180 ~ 190 MPa,载流子迁移率为 35.68 $cm^2/(V\cdot s)$,电阻率仅为 $2.05\times10^{-6}\ \Omega\cdot cm$,力学性能与导电性能均满足再生利用要求,可直接作为电池集流体或导电部件回用。

3) 表面活性剂协同超声分离工艺可实现废旧锂离子电池负极片中石墨与铜箔的高效分离,最大限度保留石墨与铜箔的结构完整性,可为负极片关键材料的高值化回收提供技术支撑。

参考文献(References):

[1] GAVIN B, ERIKA F. Towards the lithium-ion battery production network: Thinking beyond mineral supply chains[J]. Energy Research & Social Science, 2022,89:102659.

[2] SHAHJALAL M, ROY P K, SHAMS T, et al. A review on second-life of Li-ion batteries: Prospects, challenges, and issues[J]. Energy, 2022,241:122881.

[3] ZHANG W X, XU C J, HE W Z, et al. A review on management of spent lithium ion batteries and strategy for resource recycling of all components from them[J]. Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy, 2018,36(2):99-112.

[4] MORADI B, BOTTE G G. Recycling of graphite anodes for the next generation of lithium ion batteries[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2016,46(2):123-148.

[5] 高凯,赵春宝,冯硕,等. 废旧锂电池负极石墨粉制备石墨烯及其电化学研究[J]. 化学工程师, 2018,32(11):5-7.
GAO Kai, ZHAO Chunbao, FENG Shuo, et al. Preparation and electrochemical properties of graphene from graphite powder of spent lithium-ion batteries[J]. Chemical Engineer, 2018,32(11):5-7.

[6] 詹剑虹,杜志威,张思维,等. 废旧锂离子电池负极石墨闭环回收的基础研究[J]. 电源技术, 2020,44(2):173-175.
ZHAN Jianhong, DU Zhiwei, ZHANG Siwei, et al. Research on closed-loop recovery of graphite in cathode for spent lithium batteries[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020,44(2):173-175.

[7] 毛盼,王吉祥,柏松,等. 熔体超声处理对 Al-Cu-Mg-Ag 合金微观组织和硬度的影响[J]. 矿冶工程, 2024,44(6):139-143.
MAO Pan, WANG Jixiang, BAI Song, et al. Effect of ultrasonic melt treatment on microstructure and hardening of Al-Cu-Mg-Ag alloys[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(6):139-143.

[8] 徐尚睿,柏松,刘志义. 超声处理时间对 Al-Cu-Mg-Ag-Fe-Ni 合金组织和硬度的影响[J]. 矿冶工程, 2025,45(5):176-180.
XU Shangrui, BAI Song, LIU Zhiyi. Effect of ultrasonic melt processing time on microstructures and hardness of Al-Cu-Mg-Ag-Fe-Ni alloys[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(5):176-180.

[9] 刘晓峰,黄自力,肖骁,等. 废旧电池回收过程中磷酸铁渣的提纯[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):78-82.
LIU Xiaofeng, HUANG Zili, XIAO Xiao, et al. Purification of iron phosphate waste generated after recycling of spent batteries[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(2):78-82.

[10] DE VITA L, CALLEGARI D, BIANCHI A, et al. A green process for effective direct recycling and reuse of graphite from end-of-life Li-ion batteries black mass[J]. ChemSusChem, 2025,18(17):e202500550.

[11] 张盼阳,王庆福,李谋翠,等. 阴极辊在线抛光工艺对锂电铜箔性能的影响[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):84-89.
ZHANG Panyang, WANG Qingfu, LI Moucui, et al. Effect of online polishing of cathode roller on performance of electrolytic copper foil[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):84-89.

[12] YANG W C, TONG Z, BU X N, et al. Mechanical and ultrasonic pretreatments for efficient peeling of metal foils from spent lithium-ion batteries[J]. ACS Omega, 2025,10(11):11214-11224.

[13] 姬琳,樊斌锋,王庆福,等. 聚醚类添加剂在 5 μm 极薄电解铜箔制备中的影响[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):72-74.
JI Lin, FAN Binfeng, WANG Qingfu, et al. Effect of polyether additives in preparation of ultra-thin electrolytic copper foil (5 μm)[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):72-74.

引用本文:郑志强,杨义升,徐子芳,等. 表面活性剂协同超声分离废旧锂离子电池负极片中石墨与铜箔工艺研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):150-155.
ZHENG Zhiqiang, YANG Yisheng, XU Zifang, et al. Surfactant-assisted ultrasonic separation process for copper foil and graphite in anode sheets of spent lithium-ion batteries[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):150-155.

(上接第 149 页)

[8] 金绍祥. 化学物相分析法测定瓮福磷尾矿中钙镁磷元素形态含量[J]. 岩矿测试, 2011,30(3):357-360.
JIN Shaoxiang. Determination of occurrence states of calcium, magnesium, phosphorus in Wengfu phosphorus tailings by chemical phase analysis[J]. Rock and Mineral Analysis, 2011,30(3):357-360.

[9] 青海省市场监督管理局. 镍矿石物相分析规程:DB63/T 1728—2019[S]. 西宁:青海省市场监督管理局, 2019.
Qinghai administration for market regulation. Code for phase analysis of nickelores: DB63/T 1728—2019 [S]. Xining: Qinghai Administration for Market Regulation, 2019.

[10] 《岩石矿物分析》编委会. 岩石矿物分析第 3 分册[M]. 北京:地质出版社, 2011.
Editorial board of rock and mineral analysis. Rock and mineral analysis part 3[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011.

引用本文:漆欢,李志辉,卢美玲,等. 电感耦合等离子体发射光谱法测定红土镍矿中镍物相的研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):145-149.
QI Huan, LI Zhihui, LU Meiling, et al. Chemical phase analysis of nickel in laterite nickel ore by inductively coupled plasma emission spectroscopy[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):145-149.