

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2023.12.005

磷酸铁锂正极粉选择性提锂

鲁俊雀^{1,2}, 黄宁湘³, 刘勇奇^{1,2}, 付中梦^{1,2}, 许添斌^{1,2}

(1. 湖南邦普循环科技有限公司, 长沙 410604;

2. 广东省电池循环利用企业重点实验室, 广东 佛山 528000;

3. 湖南省大学科技产业园, 长沙 410604)

摘要: 废旧磷酸铁锂电池中, Li 具有非常高的经济回收价值。采用无机盐 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 浸出体系、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 协同浸出体系从废旧磷酸铁锂极片粉中选择性回收锂, 考察了浸出剂种类、反应时间、温度、液固比、浸出剂添加量及氧化剂种类等对选择性浸出 Li 的影响。结果表明: 硫酸铁浸出体系液固比 5 mL/g, 添加 1.5 倍原料的硫酸铁, 在 20 ℃ 下浸出反应 20 min, Li 浸出率为 91.19%, P 浸出率仅为 0.02%; 硫酸铁-过氧化氢协同浸出体系液固比 5 mL/g, 反应温度 20 ℃, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 添加量为原料的 0.6 倍, 反应 20 min 后, 加过氧化氢调 pH 至 4.1~4.6, Li 浸出率可达 99.09%, P 浸出率为 0, Li 的选择性浸出效果极好。 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 协同浸出体系节约 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 用量 60%, 浸出剂易循环再生利用, 所得磷酸铁渣较纯, Fe/P 摩尔比为 0.976, 可用于制备新的 LFP 正极材料。

关键词: 废旧磷酸铁锂电池; 硫酸铁; 过氧化氢; 锂; 浸出

中图分类号: TF803.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2023)12-0032-06

Selective Extraction of Lithium from Lithium Iron Phosphate Positive Powder

LU Junque^{1,2}, HUANG Ningxiang³, LIU Yongqi^{1,2}, FU Zhongmeng^{1,2}, XU Tianbin^{1,2}

(1. Hunan Brup Recycling Technology Co., Ltd., Changsha 410604, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Battery Recycling, Foshan 528000, Guangdong, China;

3. Hunan Province University Science and Technology Industrial Park, Changsha 410604, China)

Abstract: In spent lithium iron phosphate batteries, lithium has a considerable recovery value. Inorganic salt $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ and $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3\text{-H}_2\text{O}_2$ were used as the leaching agent to extract lithium from lithium iron phosphate positive powder. The effects of the type of leaching agent, reaction time, temperature, ratio of liquid-solid(L/S), $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ dosage and type of oxidant on the selective lithium extraction process were investigated. The results show that 91.19% of lithium and only 0.02% of P were leached out under the optimal conditions including L/S = 5 mL/g, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ dosage of 1.5 times of raw material, reaction temperature of 20 ℃, and reaction time of 20 min. The leaching rate of Li is 99.09% and leaching rate of P is 0 under the conditions including L/S = 5 mL/g, temperature of 20 ℃, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ dosage of 0.6 time of raw material, reaction time of 20 min, and pH value of 4.1—4.6 adjusted with H_2O_2 , which the selective leaching effect of Li is excellent. The leaching system of $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3\text{-H}_2\text{O}_2$ saves 60% of the amount of $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, and the leaching agent is easily utilized by recycling ring. The obtained ferric phosphate slag is pure and the molar ratio of Fe/P is 0.976, which can be used to prepare new LFP cathode materials.

Key words: spent lithium iron phosphate batteries; ferric sulfate; H_2O_2 ; lithium; leaching

收稿日期: 2023-07-26

基金项目: 湖南省宁乡市科技重大专项项目(NXKJ-ZDZX-202102)

作者简介: 鲁俊雀(1985-), 女, 硕士, 工程师

在全球“碳中和”的蓝图下,我国“碳达峰方案”提出2030年新能源汽车渗透率要达到40%。在双碳目标指引下,地方政府也密集出台各项政策措施,加快推动电池新能源产业高质量发展。2022年,我国动力电池累计产量545.9 GWh,累计同比增长148.5%。其中三元电池占总产量38.9%,累计同比增长126.4%;磷酸铁锂电池占总产量60.9%,累计同比增长165.1%。磷酸铁锂电池因其安全性能优异、循环寿命长且成本低而被广泛应用,随着LiFePO₄电池市场占有率逐年增长,报废LiFePO₄电池数量提升,废旧LiFePO₄电池材料的回收利用显得尤为重要^[1-4]。锂是我国的战略金属,但由于品位较低及地域环境等因素,对于锂资源增量的贡献较小。废旧LiFePO₄电池中的锂含量1%~2%^[5-6],远高于我国开发利用的锂矿,因此从废旧磷酸铁锂电池提锂,不仅具有较高的经济效益,还能减少废旧电池和资源开采带来的环境污染。

目前,废旧LiFePO₄主要的回收方法有火法冶金、湿法冶金、直接再生、机械化学法和电化学法等^[7-11]。本文以废旧磷酸铁锂极片粉为原料,硫酸铁为浸出剂,过氧化氢为氧化剂,实现了无酸条件下选择性提锂,研究了浸出剂和还原剂的选择及用量、反应温度、反应时间、液固比等对废旧磷酸铁锂极片粉选择性提锂的影响,从而得到了适合工业生产的最佳工艺条件。

1 试验

原料:硫酸铁(工业级,Fe含量21.26%);30%过氧化氢(AR);废旧磷酸铁锂正极粉由湖南邦普循环科技有限公司提供,原料主要金属成分分析结果(%):Li 4.29、Fe 32.77、P 18.43、Al 0.36、Ni 0.28、Co 0.14、Mn 0.13。

主要仪器设备:HH-1数显恒温水浴锅;HD2025W电动搅拌机;Icap7200等离子体发射光谱仪;D/max2200PC型X射线衍射仪。

试验方法:称取50 g废旧磷酸铁锂极片粉于500 mL烧杯中,按一定液固比(体积质量比,L/S,单位为mL/g)制浆后,放入设定好温度的水浴锅中搅拌,加入一定量的浸出剂,搅拌反应一定时间后,添加氧化剂反应,过滤,洗渣,烘渣,检测浸出液及渣中金属含量,并根据浸出液中的含量计算金属浸出率。

2 结果与讨论

2.1 浸出剂的选择

L/S=5,浸出温度20℃,分别加入10 g过硫酸

钾、硫酸铝、硫酸铁、氯化铁及50 g过氧化氢,浸出反应1 h,锂和磷的浸出率如图1所示。由图1可以看出,过硫酸钾为浸出剂时锂的浸出率为24.17%,磷浸出率0.38%,表明以过硫酸钾为浸出剂时,锂的浸出率高,但选择性不强。以过氧化氢和硫酸铝为浸出剂时,锂的浸出率分别为4.59%、7.00%,磷的浸出率分别为1.40%、2.27%,表明锂的浸出率及选择性均不佳。以硫酸铁和氯化铁为浸出剂时,锂的浸出率分别为14.60%、11.41%,磷的浸出率均为0,表明两者对锂的选择性强,因氯化铁会引入氯离子,增加设备损耗,因此,最佳浸出剂为硫酸铁,反应机理如式(1)所示。

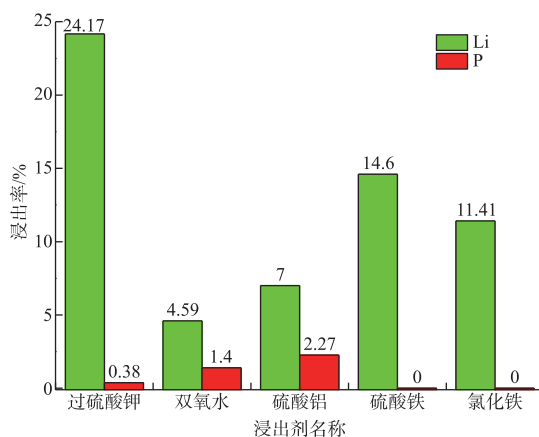
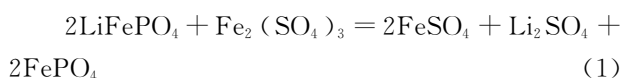


图1 浸出剂种类对Li选择性浸出的影响

Fig. 1 Effect of different leaching reagents on selective leaching of Li from LiFePO₄ powder

2.2 反应时间的影响

L/S=5,温度20℃,加入10 g硫酸铁,反应时间对Li浸出率的影响如图2所示。由图2可知,反应10 min时,Li的浸出率就达13.05%,这是因为LiFePO₄与FePO₄的结构相似,Fe³⁺和Fe²⁺之间的取代可以快速发生。反应时间增加至20 min时,Li浸出率增大到14.22%。继续延长反应时间,Li浸出率增长幅度逐渐减小,表明反应20 min时,反应基本完成。由图2还可看出,硫酸铁选择性提锂浸出率高于式(1)计算的理论浸出率(12.39%),应是少量FeSO₄被空气氧化为Fe₂(SO₄)₃所致。综合考虑Li浸出率及效率问题,确定最佳反应时间为20 min。

2.3 反应温度的影响

L/S=5,加入10 g硫酸铁,反应时间20 min,反

应温度对 Li 浸出率的影响如图 3 所示。由图 3 可知,温度从 20 ℃ 升至 60 ℃ 时, Li 的浸出率由 14.22% 缓慢升至 14.73%, 继续升温至 80 ℃ 时, Li 浸出率急剧下降至 12.76%, 原因是随着温度升高至 80 ℃, 加速了硫酸铁的水解, 不利于 Li 的浸出, 综合考虑 Li 浸出率及能耗问题, 20 ℃ 为适宜的反应温度。

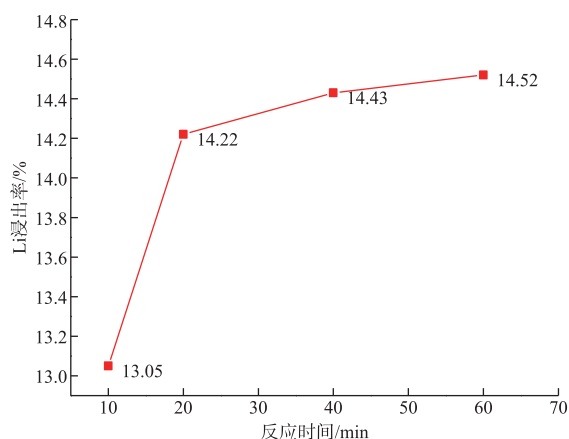


图 2 反应时间对 Li 浸出率的影响
Fig. 2 Effect of reaction time on leaching of Li from LiFePO₄ powder

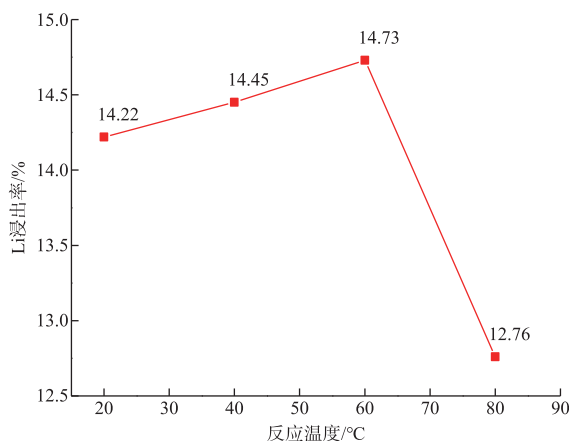


图 3 反应温度对 Li 浸出率的影响
Fig. 3 Effect of temperature on leaching of Li from LiFePO₄ powder

2.4 L/S 的影响

浸出温度 20 ℃, 反应时间 20 min, 加入 10 g 硫酸铁, 考察不同液固比对 Li 浸出率的影响如图 4 所示。由图 4 可知, 随着 L/S 增大, Li 浸出率明显升高。增大液固比, 离子扩散阻力减小, 传质效率提高, 使得 Li 浸出率随之升高。但随着液固比的增大, 引入水量也增加, 浸出液中 Li 浓度降低, 增加了后续沉锂及废水处理成本。综合考虑, 选择 L/S=5。

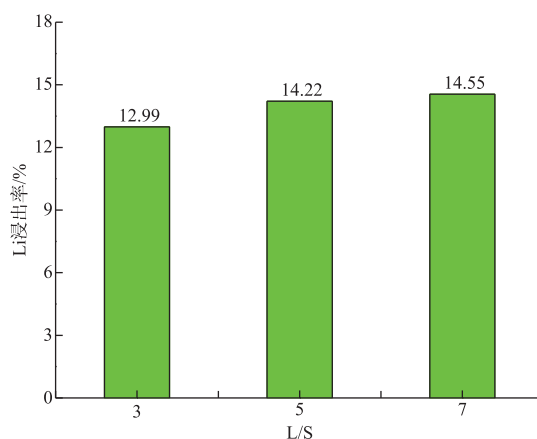


图 4 L/S 对 Li 浸出率的影响

Fig. 4 Effect of L/S on leaching of Li from LiFePO₄ powder

2.5 浸出剂添加量的影响

浸出温度 20 ℃, 反应时间 20 min, L/S=5, 不同硫酸铁添加量对 Li 及 P 浸出率的影响如图 5 所示。由图 5 可知, Li 浸出率随着硫酸铁添加量增加而逐渐升高, 当硫酸铁添加量为 80 g 时, Li 浸出率高达 92.51%, 同时浸出液 pH 降低至 2 左右, pH 降低的原因是随着溶液中 Fe³⁺ 的增加, Fe³⁺ 的水解反应向右进行。此外, 随着硫酸铁加入量增加至 80 g 时, 0.24% 的 P 被浸出。这可能是因为较低 pH 下形成微量磷酸氢^[12]。因此, 为了保证 Li 浸出率的高选择性, 选择硫酸铁加入量为 75 g, 即浸出剂的添加量为原料的 1.5 倍。

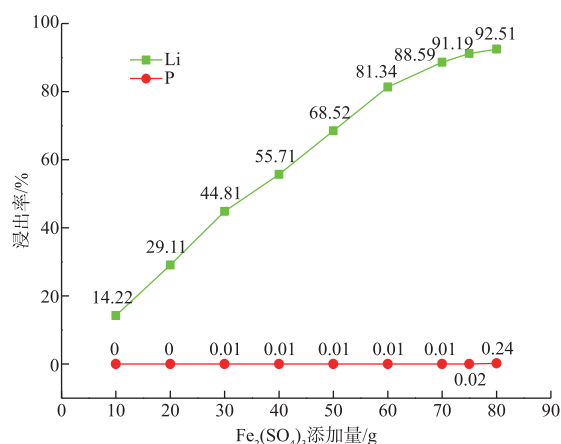


图 5 硫酸铁添加量对 Li 浸出率的影响
Fig. 5 Effect of Fe₂(SO₄)₃ dosage on leaching of Li from LiFePO₄ powder

硫酸铁加入量为 75 g 所得浸出锂溶液, 经过氧化氢氧化亚铁, 纯碱调 pH 至 4.1~4.6 除铁, 所得铁渣的 XRD 谱如图 6 所示。由图 6 可知, 所得铁渣为针铁矿, 针铁矿加酸难以溶解, 加入的硫酸铁难以

实现循环再利用。因此,单独使用硫酸铁回收废旧磷酸铁锂中 Li 辅料消耗大,成本高。

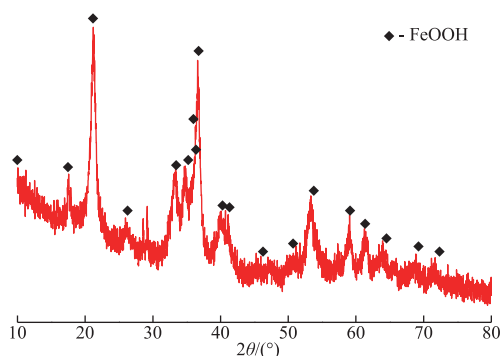


图 6 硫酸铁提锂液除铁沉淀物的 XRD 谱

Fig. 6 XRD pattern of iron removal residue from lithium leaching solution with iron sulfate

2.6 氧化剂的选择

以硫酸铁为浸出剂选择性提锂的实质为 Fe^{3+} 对 LiFePO_4 中 Fe^{2+} 和 Li^+ 同构诱导取代浸出,加入硫酸铁生成硫酸亚铁^[13]。因此,可以通过添加氧化剂将生成的 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} ,以减少硫酸铁的添加量。

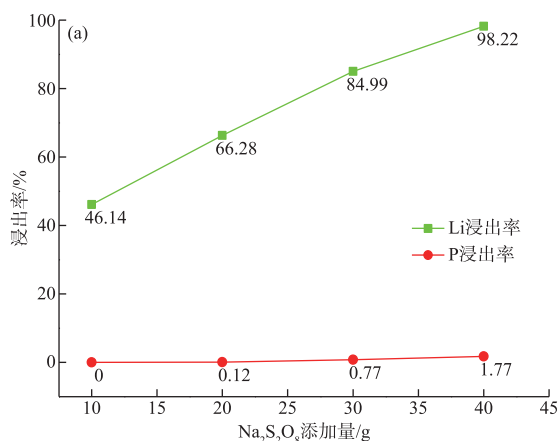


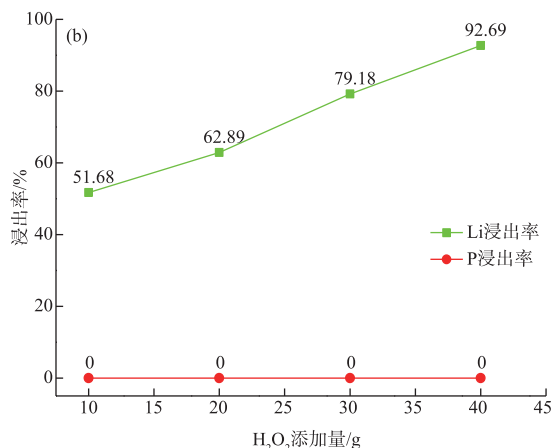
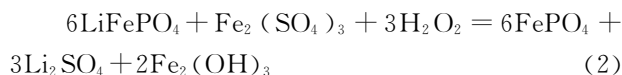
图 7 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ - $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ (a) 和 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ - H_2O_2 (b) 对 Li 选择性浸出的影响

Fig. 7 Effects of $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ - $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ (a) and $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ - H_2O_2 (b) on selective leaching of Li from LiFePO_4 powder

2.7 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ - H_2O_2 协同浸出浸出剂添加量的影响

浸出温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$, $L/S=5$, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ - H_2O_2 协同浸出,先添加硫酸铁反应 20 min,然后再添加过氧化氢至溶液 $\text{pH}=4.1\sim 4.6$, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ - H_2O_2 协同浸出时浸出剂添加量对 Li 浸出率的影响如图 8 所示。由图 8 可以看出,当浸出剂添加量从 10 g 增加至 30 g 时, Li 浸出率从 35.93% 增至 99.09%,继续增加浸出剂至 40 g 时, Li 浸出率达到 99.93%。考虑到后续提锂后渣需酸洗使铁循环利用,剩余的少量 Li 会一同洗出,为了节约辅料成本, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ - H_2O_2 协同浸出时浸出剂添加量选择 30 g 为宜,即

浸出温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 反应时间 20 min, $L/S=5$, 硫酸铁加入量 20 g, 分别以过氧化氢和过硫酸钠为氧化剂,对 Li 及 P 浸出率的影响如图 7 所示。由图 7 可知, Li 的浸出率随着氧化剂添加量的增加而升高,当过硫酸钠与过氧化氢添加量为 40 g 时, Li 浸出率分别为 98.22%、92.69%,表明过硫酸钠氧化亚铁离子提 Li 率优于过氧化氢。由图 7(a) 还可以看出,随着过硫酸钠用量从 10 g 增加至 40 g, P 的浸出率由 0 升至 1.77%,这是因为随着过硫酸钠的增加,溶液 pH 持续降低,低 pH 有利于 P 的浸出。另外,溶液 pH 降低,氧化后的三价铁难以生成氢氧化铁沉淀,后期需要加碱调 pH 沉铁。由图 7(b) 可以看出,随着过氧化氢用量的增加, P 几乎不被浸出,这是因为加过氧化氢氧化亚铁后,溶液 pH 上升,同时添加过量的过氧化氢可将 Fe 沉淀完全,不需要额外除铁,过氧化氢也不会引入其它杂质。因此,氧化剂选择过氧化氢。反应机理如式(2)所示。



$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ - H_2O_2 协同浸出时, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 的添加量为原料的 0.6 倍,节约了 60%,且 Li 浸出率更高,同时铁易于酸溶循环利用。

2.8 最优条件下 Li 的浸出率

采用 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ - H_2O_2 协同选择性浸出废旧磷酸铁锂极片粉中的 Li, $L/S=5$, 反应温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 先添加 30 g 硫酸铁搅拌反应 20 min, 然后加过氧化氢调 pH 至 $4.1\sim 4.6$, Li 浸出率为 99.09%。图 9 为废旧磷酸铁锂极片粉原料、硫酸铁浸出后残渣及 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ - H_2O_2 协同浸出后残渣的 XRD 谱。由图 9 谱线(a)可知,原废旧磷酸铁锂原料为正交晶系

橄榄石结构的 LiFePO_4 。由图 9 谱线(b)和谱线(c)可以看出,两种浸出渣的 XRD 谱与原料相似,均为结晶良好的正交 FePO_4 相。因此,仅使用硫酸铁就可以高效浸出 Li 的原因是它们具有相似的稳定正交橄榄石晶体结构。过量的 Fe^{3+} 以 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 的形式存在于残渣中,因有大量磷酸铁作为晶种的存在, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 不易形成胶体,易过滤。

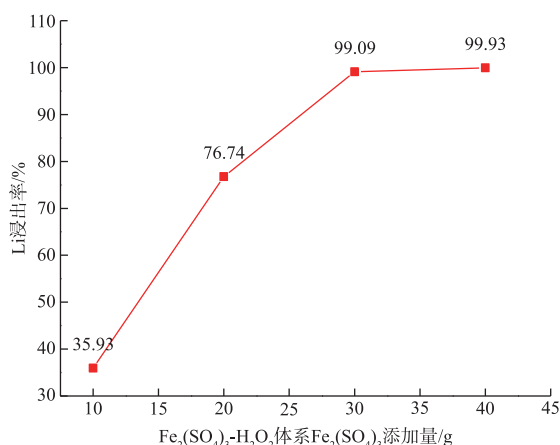


图 8 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ - H_2O_2 协同浸出 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 添加量对 Li 浸出率的影响

Fig. 8 Effect of $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ dosage in $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ - H_2O_2 system on leaching of Li from LiFePO_4 powder

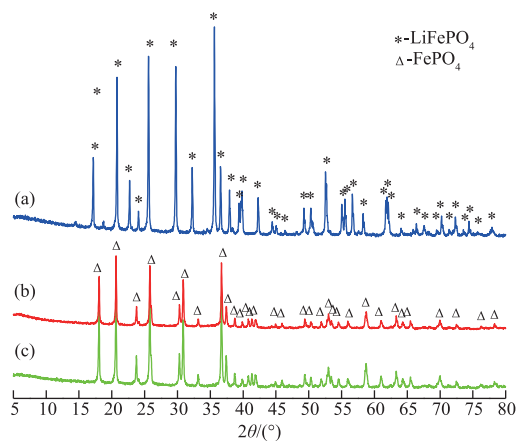


图 9 废旧磷酸铁锂(a)、硫酸铁浸出残渣(b)、 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ - H_2O_2 协同浸出残渣(c)的 XRD 谱

Fig. 9 XRD patterns of waste lithium iron phosphate (a), ferric sulfate leaching residue (b), and $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ - H_2O_2 co-leaching residue (c)

最优条件下 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ - H_2O_2 协同浸出后残渣按照 L/S=3 制浆,室温下加硫酸调 pH 至 1.0~1.5 左右酸溶氢氧化铁,得到含 Fe 23.87 g/L 的硫酸铁洗水,可循环用于废旧磷酸铁锂极片粉提锂。酸洗后所得磷铁渣水洗烘干,渣中金属成分分析结

果(%) : Li 0.03、Fe 33.79、P 19.21、Al 0.04、Ni 0.01、Co 0.01、Mn 0.02。据此计算可得磷铁渣中 Fe/P 摩尔比为 0.976,其它杂质金属含量低,所得 FePO_4 渣可以用于制备新的 LiFePO_4 正极材料。

3 结论

1)使用 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 单独选择性浸出废旧磷酸铁锂极片粉中的 Li,较优浸出条件为:反应温度 20 ℃、反应时间 20 min、液固比 5 mL/g、硫酸铁添加量为原料的 1.5 倍,Li 的浸出率为 91.19%,P 的浸出率仅为 0.02%。

2)使用 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ - H_2O_2 协同选择性浸出废旧磷酸铁锂极片粉中的 Li,较优浸出条件为:液固比 5 mL/g、反应温度 20 ℃、硫酸铁添加量为原料的 0.6 倍、搅拌反应 20 min 后,加双氧水调 pH 至 4.1~4.6,Li 浸出率为 99.09%,P 浸出率为 0,Li 选择性浸出效果极其明显。

3) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 单独选择性浸出废旧磷酸铁锂极片粉时,提锂效果较优,但辅料耗量大,除铁时易生成针铁矿, Fe^{3+} 难以循环利用;而 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ - H_2O_2 协同选择性浸出废旧磷酸铁锂极片粉时,Li 浸出率在 99%以上,P 不被浸出,硫酸铁用量节约了 60%,易再生循环利用。酸洗后所得磷铁渣较纯,可用于制备新的 LiFePO_4 正极材料。

参考文献

- [1] LI H Y, YE H, SUN M C, et al. Process for recycle of spent lithium iron phosphate battery via a selective leaching-precipitation method [J]. Journal of Central South University, 2020, 27: 3239-3248.
- [2] 牛飞,徐文彬,谭杰,等. 废旧磷酸铁锂电池再生及湿法回收技术研究进展 [J]. 矿冶工程, 2022, 42 (6): 146-152.
- NIU F, XU W B, TAN J, et al. Research progress on regeneration and hydrometallurgical recovery techniques for spent LiFePO_4 -type lithium-ion batteries [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42 (6): 146-152.
- [3] WU D Y, WANG D X, LIU Z Q, et al. Selective recovery of lithium from spent lithium iron phosphate batteries using oxidation pressure sulfuric acid leaching system [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32 (6): 2071-2079.
- [4] 朱国辉,还红先,于大伟,等. 废旧锂离子电池选择性提锂 [J]. 化学进展, 2023, 35 (2): 287-301.
- ZHU G H, HUAN H X, YU D W, et al. Selective

- recovery of lithium from spent lithium-ion batteries[J]. Progress in Chemistry, 2023, 35(2): 287-301.
- [5] 王朵朵, 荆乾坤, 张家靓, 等. 磷酸铁锂正极废料选择性提锂制备电池级碳酸锂[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(9): 63-70.
- WANG D D, JING Q K, ZHANG J L, et al. Preparation of battery grade lithium carbonate by selective extraction of lithium from waste lithium iron phosphate cathode[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(9): 63-70.
- [6] 王猛, 张家靓, 陈永强, 等. 退役磷酸铁锂电池回收技术综述[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(5): 100-110.
- WANG M, ZHANG J L, CHEN Y Q, et al. Review on recycling technology of retired LiFePO₄ batteries[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(5): 100-110.
- [7] 周伟, 符冬菊, 刘伟峰, 等. 废旧磷酸铁锂动力电池回收利用研究进展[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(6): 1854-1864.
- ZHOU W, FU D J, LIU W F, et al. Research progress on recycling technology of waste lithium iron phosphate power battery [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(6): 1854-1864.
- [8] 段金亮, 阮丁山, 陈若葵, 等. 废旧磷酸铁锂电池粉中锂的选择性浸出动力学[J]. 湿法冶金, 2022, 41(6): 518-522.
- DUAN J L, RUAN D S, CHEN R K, et al. Selective leaching kinetics of lithium from waste lithium iron phosphate battery powder [J]. Hydrometallurgy of China, 2022, 41(6): 518-522.
- [9] 靳星, 贾美丽, 杜浩, 等. 废旧磷酸铁锂正极材料回收再生研究进展[J]. 有色金属工程, 2020, 10(11): 64-72.
- JIN X, JIA M L, DU H, et al. Research progress on recovery of spent lithium iron phosphate cathode materials[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(11): 64-72.
- [10] 孙睿, 刘丽丽, 刘艳开, 等. 锂离子电池中废旧磷酸铁锂的回收[J]. 电池, 2022, 52(5): 479-483.
- SUN R, LIU L L, LIU Y K, et al. Recycling spent LiFePO₄ from Li-ion battery[J]. Battery Bimonthly, 2022, 52(5): 479-483.
- [11] 陈清, 张忠堂, 严康, 等. 废旧磷酸铁锂正极材料氯化焙烧回收锂[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(2): 44-50.
- CHEN Q, ZHANG Z T, YAN K, et al. Recovery of lithium from waste lithium iron phosphate cathode materials by chlorination roasting [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(2): 44-50.
- [12] DAI Y, XU Z D, HUA D, et al. Theoretical-molar Fe³⁺ recovering lithium from spent LiFePO₄ batteries: an acid-free, efficient, and selective process[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 396: 1-9.
- [13] 牛勇, 时东, 罗超, 等. 氯化铁对磷酸铁锂中锂浸出性能研究[J]. 盐湖研究, 2023, 31(1): 87-95.
- NIU Y, SHI D, LUO C, et al. Leaching performance of ferric chloride to lithium from lithium iron phosphate[J]. Journal of Salt Lake Research, 2023, 31(1): 87-95.