

基于固废的锂离子电池 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 正极材料及其电化学性能研究

史婉钰, 李思南*, 陈云飞, 王 涵, 张德琛, 邱煜洛

辽宁科技学院, 冶金与材料工程学院, 辽宁 本溪

收稿日期: 2025年10月5日; 录用日期: 2025年10月26日; 发布日期: 2025年11月6日

摘 要

随着钢铁工业的快速发展, 铁尾矿排放量日益增加, 大量的铁尾矿一般采用直接堆填处置, 既浪费资源, 又挤占耕地, 需要支付土地征用费、运费和填埋费等, 不仅增加钢铁企业的生产成本, 还造成环境污染与安全问题。因此, 铁尾矿的资源化利用亟待解决。本文以铁尾矿为原料, 采用酸浸法、碱浸法、水热和固相烧结法, 利用制备的 $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 和含水率22.44%的白炭黑为前驱体, 合成了 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 锂离子电池正极材料, 具有较好的电化学性能。在0.1C电流密度下, 经过100次充电循环, 比容量保持 $32 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$; 5C高电流密度下, 比容量仍能保持 $20 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ 。本研究充分利用铁尾矿中铁源和硅源, 为铁尾矿资源高附加值利用提供一条的新思路。

关键词

铁尾矿, $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$, 锂离子电池, 正极, 电化学性能

Research on $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ Cathodes for Lithium-Ion Batteries Based on Solid Wastes and Electrochemical Performances

Wanyu Shi, Sinan Li*, Yunfei Chen, Han Wang, Dechen Zhang, Yuluo Qiu

School of Metallurgy and Materials Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi Liaoning

Received: October 5, 2025; accepted: October 26, 2025; published: November 6, 2025

*通讯作者。

文章引用: 史婉钰, 李思南, 陈云飞, 王涵, 张德琛, 邱煜洛. 基于固废的锂离子电池 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 正极材料及其电化学性能研究[J]. 分析化学进展, 2025, 15(4): 361-369. DOI: 10.12677/aac.2025.154035

Abstract

With the rapid development of the iron and steel industry, the annual discharge of iron tailings continues to soar. At present, most of these tailings are simply dumped into landfills—an approach that not only squanders valuable resources and encroaches on arable land, but also obliges steelmakers to pay land-acquisition, transportation and tipping fees, pushing up production costs while creating environmental and safety hazards. Therefore, the resource utilization of iron tailings needs to be solved urgently. In this paper, $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ cathode material for lithium-ion battery was synthesized from iron tailings by acid leaching, alkali leaching, hydrothermal and solid-state sintering, using $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ and silica precursor with water content of 22.44%, which has good electrochemical performance. At 0.1C, after 100 charging cycles, the specific capacity remained $32 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$; At 5C high current density, the specific capacity can still maintain $20 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$. The research content makes full use of iron source and silicon source of iron tailings, and provides a new idea for the utilization of high added value of iron tailings resources.

Keywords

Iron Tailings, $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$, Lithium-Ion Batteries, Cathodes, Electrochemical Performances

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

我国工业化进程的快速发展,促进了钢铁产量整体增长,伴随着富矿资源的逐渐枯竭,贫矿资源开采比重增大,造成铁尾矿的堆积数量急剧攀升。尾矿堆存不仅占用大量的土地资源,而且还会造成严重的环境污染。近年来,随着我国对生态环境保护力度的不断加强,铁尾矿资源的综合利用也越来越被人们所关注,铁尾矿的综合利用技术方面得到快速发展,尤其是在尾矿再选与有价元素的回收及建筑材料原料方面的应用与研究较多,但其产品附加值低,经济效益不高。此外,还有用作采空区的充填材料、改良土壤性质、使用其中的微量元素作为肥料等方面的应用研究。尽管如此,全国每年铁尾矿的处理远未达到对铁尾矿的全面利用,亟待开发铁尾矿利用的新策略。

铁尾矿中富含 Fe、Si、Al、Ca、Mg 等有价元素,可以作为制备新型功能材料和电化学储能材料的原料,这些材料具有更高的技术含量和产品附加值,更具市场应用前景。Sakthivel 等[1]采用酸浸法从铁尾矿中提取 Fe^{2+} 溶液,并用 NaBH_4 为还原剂首先制备出单质铁,再用来合成 Fe_3O_4 纳米颗粒;Giri 等[2]对尾矿采用酸浸、沉淀、还原焙烧的方法,合成了磁性纳米 Fe_3O_4 颗粒。于洪浩等人[3]采用酸碱联合法利用铁尾矿生产出粒径为 150 nm 以下的高纯 SiO_2 。汪应玲等[4][5]以低浓度铁尾矿酸浸出液为原料,通过控制溶液 pH 值进行选择性的沉铁,制备出多元金属掺杂的 $\text{FePO}_4 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 。并以其为前驱体,通过固相-碳热还原法成功制备出 LiFePO_4 。在 0.1C 和 5C 倍率下首次放电比容量分别为 $144.9 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $115.6 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ 。这种以铁尾矿为主要原料制备锂离子电池正极材料的方法,为铁尾矿的综合利用提供了一条新思路。

锂离子电池(LIBs)作为电化学储能和转换设备,具有高能量密度、高放电电压、比容量大和无污染等优点,能够缓解煤炭和化石燃料等传统能源面临的资源枯竭、环境污染和全球变暖等问题,因此受到了世界各国的广泛关注。富锂聚阴离子正硅酸盐材料 Li_2MSiO_4 ($\text{M} = \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Co}, \text{Ni}$)是一种重要的锂电

池正极材料,且理论比容量($332 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$)较高,约是传统磷酸铁锂(LiFePO_4)正极材料($170 \text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$)的2倍,还具有氧化还原电压($3.0\sim 4.6 \text{ V}$)高的优点(对应较高的能量密度),而且该类材料晶体结构中包含 Si-O 共价键,具有稳定的微观结构[6][7]。其中 $\text{Li}_2\text{MnSiO}_4$ 具有高的可逆容量,但循环性能差;而 Co 和 Ni 资源丰度低,成本较高。硅酸铁锂($\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$)具有原料资源丰富、无吸湿性、无毒、环境友好、安全性能高且易于合成等优点,是极具发展潜力的锂离子电池正极材料之一,在需要特别关注成本的电动汽车、混合动力汽车和电网蓄电池等领域,具有广阔的应用前景[8][9]。然而, $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 正极材料存在电子和离子导电性差的问题,以往的研究表明,金属离子掺杂可以改善颗粒内部的导电性,但是对提高颗粒与颗粒之间的导电能力作用并不明显,因此对 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 进行碳复合,能够进一步改善其循环和倍率性能[10][11]。

2. 实验方法

2.1. 实验内容

本实验以铁尾矿为原料,先酸浸制备硫酸亚铁($\text{FeSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$),再用酸洗滤渣制白炭黑;随后以 $\text{FeSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ 和氢氧化锂(LiOH)为原料,利用水热法合成 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$,将其作为锂离子电池正极材料,开展电化学性能研究。

2.2. 实验材料及方法

实验使用的铁尾矿取自辽宁某地选矿企业,并经过 200 目筛分后使用;酸浸过程采用体积比为 $V_{(\text{H}_2\text{SO}_4)}:V_{(\text{H}_2\text{O})}=1:2$ 的稀硫酸溶液;还原剂采用纯度为 99.99% 的高纯铁粉,购买自南京市鑫盾合金焊材喷涂有限公司;乙二醇、二水合草酸和 LiOH 均为分析纯,购买自国药集团化学试剂有限公司;蒸馏水为实验室自制。利用德国布鲁克公司生产的 S8 TIGER 型 X 射线荧光光谱仪(XRF)检测了铁尾矿的主要成分和含量;利用德国布鲁克生产的 D8 ADVANCE 型 X 射线粉末衍射仪(XRD)分析了铁尾矿、硫酸亚铁和氧化铁的物相构成;利用英国卡尔蔡司公司 EVO 生产的扫描电子显微镜(SEM)分析样品的形貌。

电化学性能测试采用 2032 纽扣电池,以金属锂片为对电极,隔膜为 Celgard 2500,电解液为 1.0 mol/L LiPF_6 的碳酸乙烯酯(EC)和碳酸二乙酯(DEC)的混合液(EC:DEC 的体积比为 1:1),粘结剂采用聚偏二氟乙烯(PVDF),导电剂为 Super-P。活性物质、Super-P 和 PVDF 按照质量比 8:1:1 制备浆料。采用深圳新威尔电子有限公司的 CT-4008T 型电池测试系统,对电池进行恒流充放电测试,电压范围为 $1.5\sim 4.6 \text{ V}$,电流密度为 $0.1\text{C}\sim 10\text{C}$ ($1\text{C}=33.3 \text{ mA}\cdot\text{g}^{-1}$)。

2.2.1. FeSO_4 的酸浸

取 10 g 铁尾矿,加入 10 mL 蒸馏水润湿,再加 40 mL 稀硫酸,在 100°C 下油浴搅拌加热 2.5 h。将上述溶液趁热抽滤固液分离得到酸洗滤渣和滤液,在滤液中加入 3 g 铁粉和 20 mL 蒸馏水, 50°C 水浴加热 2 h,使溶液中的铁全部以 Fe^{2+} 的形式存在,制得含铁溶液(以 FeSO_4 为主)。含铁溶液在 80°C 水浴条件下边通入氩气边加热蒸发结晶,直至 FeSO_4 完全析出,抽滤后 80°C 真空干燥 10 h。

2.2.2. 白炭黑的制备

取 10 g NaOH 加入至 40 mL 蒸馏水中,500 r/min 磁力搅拌至完全溶解。称取 5 g 酸洗滤渣,缓慢加入至上述溶液,500 r/min 磁力搅拌 10 min。将悬浮液转移到 50 mL 反应釜内衬中, 250°C 加热,保温 2 h。趁热抽滤除去不溶物,将收集的滤液转移至烧杯中,加入 0.50 g PEG400,在 70°C 水浴中 500 r/min 磁力搅拌 10 min。冷却至室温后,600 r/min 磁力搅拌,缓慢滴入稀硫酸溶液至 $\text{pH}\approx 3$,陈化 2 h。抽滤获得凝胶状物质, 80°C 鼓风干燥 10 h。

2.2.3. $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 的制备

将 12.8 mL 去离子水倒入 50 mL 烧杯中, 加入 1.2 g LiOH , 300 r/min 磁力搅拌至完全溶解。称取 0.72 g 白炭黑加入 LiOH 溶液中, 在 40°C 水浴条件下 300 r/min 磁力搅拌至白炭黑完全溶解, 此溶液为 L_1 。将 3.8 mL 去离子水和 7.5 mL 乙二醇倒入 100 mL 锥形瓶中, 加入 2.5 g FeSO_4 , 在 40°C 水浴条件下 500 r/min 搅拌 20 min, 此液体为 L_2 。在 Ar 气氛保护下, 将 L_1 滴入 L_2 中混合均匀后, 快速将混合液移至反应釜内衬中, 240°C 反应 24 h。最后, 经过多次蒸馏水和无水乙醇离心清洗, 80°C 真空干 12 h, 即得到 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 。将 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 与蔗糖按照质量比 1:1 在玛瑙研钵中混合, 然后, 在管式炉中氩气保护状态下, $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 1000°C 煅烧 2 h, 获得 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 复合材料。

3. 实验结果与讨论

3.1. 铁尾矿和酸洗滤渣的组成分析

通过 XRF 检测获得铁尾矿和酸洗滤渣的成分占比, 见表 1。铁尾矿的主要成分为 68.40% SiO_2 、9.60% Fe_2O_3 、10.25% Al_2O_3 等; 酸洗滤渣中 Fe_2O_3 含量降低至 0.64%, 主要包含 80.99% SiO_2 、6.08% Al_2O_3 等。

Table 1. Chemical compositions of iron tailings and acid-washing filter residue (wt%)

表 1. 铁尾矿和酸洗滤渣的主要化学组成(wt%)

	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	CaO	K_2O	Na_2O	TiO_2	其他
铁尾矿	68.40	9.60	10.25	3.19	2.93	2.42	2.36	0.30	0.54
酸洗滤渣	80.99	0.64	6.08	0.18	1.97	1.45	2.22	0.01	3.19

3.2. 前驱体的组成分析

图 1 为硫酸亚铁和白炭黑($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$)的 XRD 图谱, 由图 1(a), 利用铁尾矿制备的硫酸亚铁与一水合硫酸亚铁($\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)的 PDF#01-083-0078 特征峰相符, 且无多余杂峰。由图 1(b), 白炭黑未出现尖锐的晶态衍射峰, 仅在 25° 左右的低衍射角区出现一个非晶衍射峰, 不含其它结晶相, 为无定型非晶体结构。图 2 为 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 的 TG-DSC 曲线, 结果表明 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 在 62.5°C 开始明显失重, 总失重率为 22.44%, 即白炭黑的含水率为 22.44%。

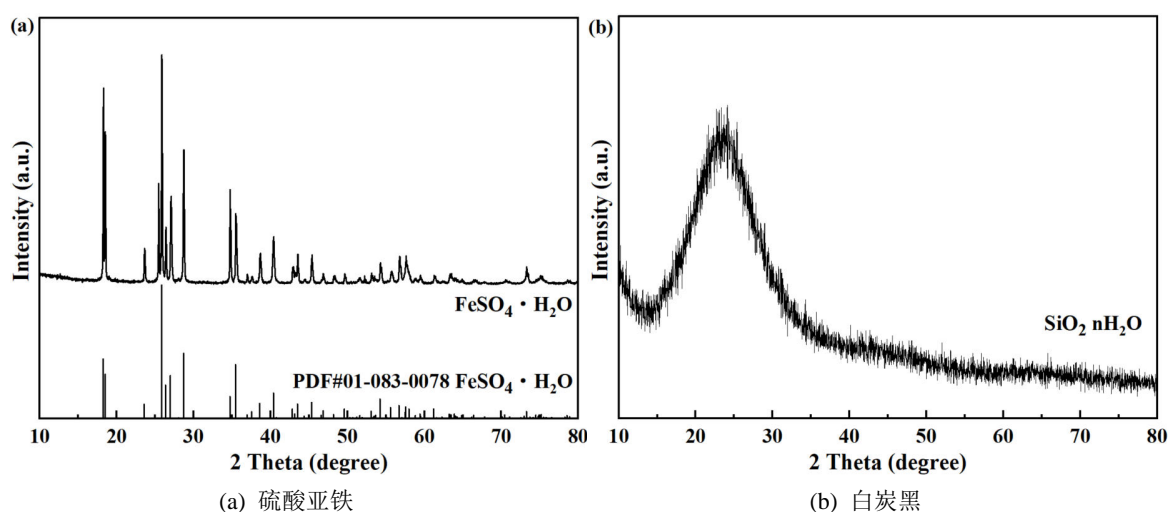


Figure 1. XRD patterns of ferrous sulfate and silica

图 1. 硫酸亚铁和白炭黑的 XRD 图谱

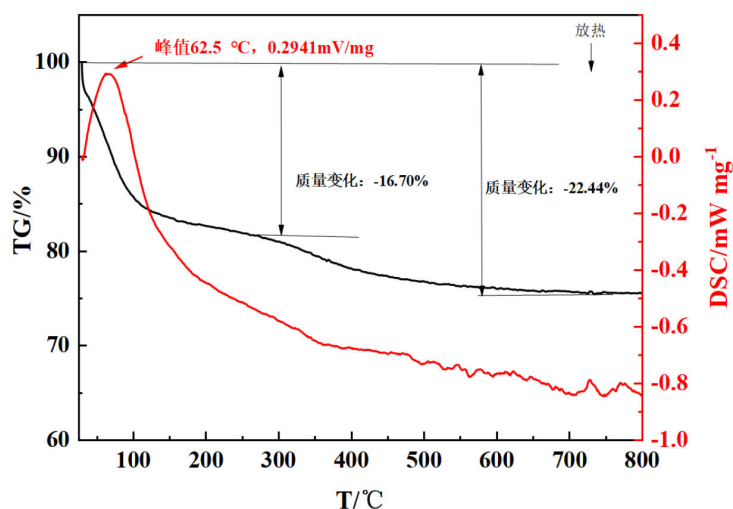


Figure 2. TG-DSC curves of silica
图 2. 白炭黑的 TG-DSC 曲线图谱

3.3. $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 的物相分析

图 3 给出了 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 和 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 的 XRD 图谱。从图中可以看出，水热制备的 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 与 PDF#01-080-7252 卡片特征峰相符，且杂峰较少，结晶化程度较高。碳包覆后，无序碳的特征峰掩盖了 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 的尖锐衍射峰， $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 复合材料的结晶化程度减弱。

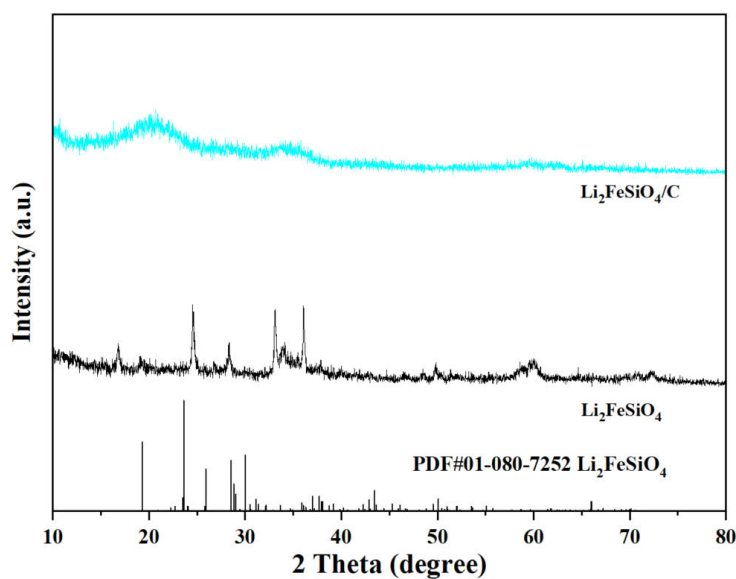


Figure 3. XRD patterns of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ and $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$
图 3. $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 和 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 的 XRD 图谱

3.4. SEM 分析结果

图 4 为铁尾矿与酸洗滤渣的 SEM 图。从图中可以看出，样品的总体形状为不规则的块状，而较少部分的形状为不规则的片状。但总体来说，它们的大小都不超过 $50\ \mu\text{m}$ 。酸洗滤渣中保留下了较多粒径较大的颗粒，表明粒度较大的铁尾矿粉末不利于提高浸出率。

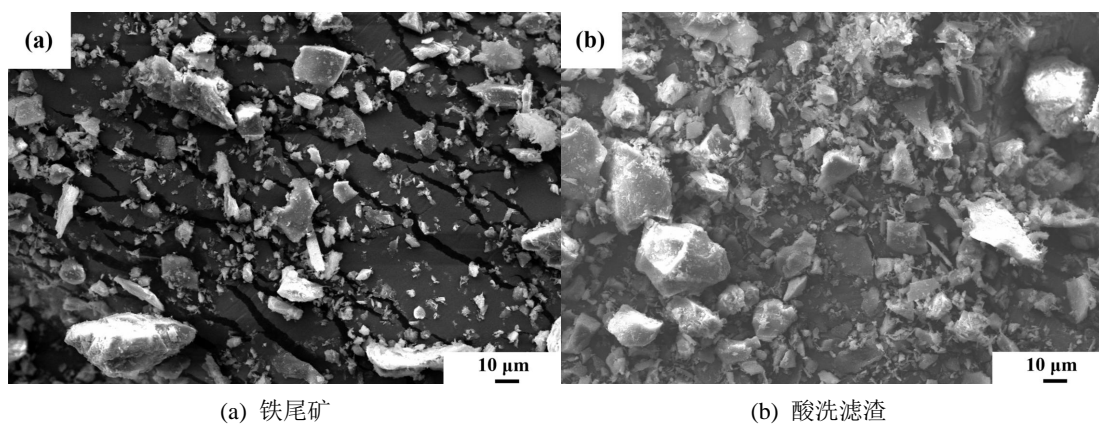


Figure 4. SEM images of iron tailings and acid-washing filter residue

图 4. 铁尾矿与酸洗滤渣的 SEM 照片

图 5 为白炭黑的 SEM 图。从图 4(a)中可以看出，一次颗粒明显团聚。图 6(b)可以看出白炭黑颗粒呈近似球形，粒径在 1 μm 以下，由于样品为非晶态，部分二次颗粒微结构呈絮状和网状的准颗粒结构。

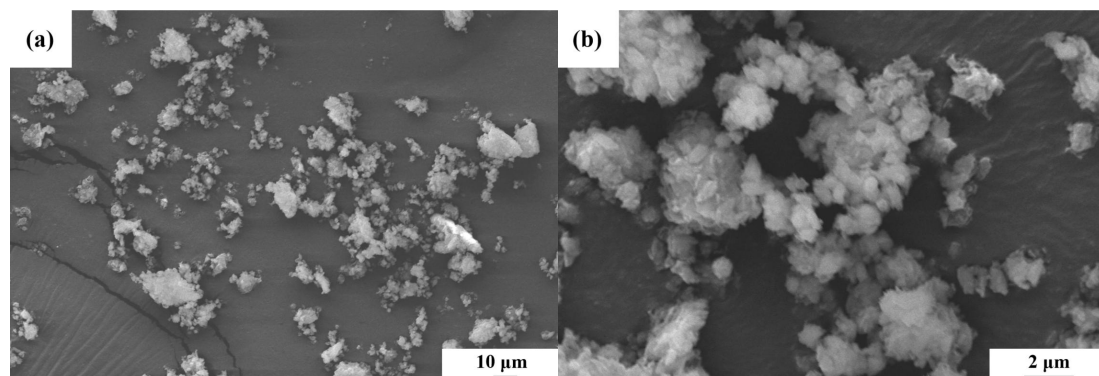


Figure 5. SEM images of silica

图 5. 白炭黑的 SEM 照片

图 6 为 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 和 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 的 SEM 图。从图 6(a)中可以看出 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 材料明显团聚，形状不规则。从图 6(b)中可以看出经过煅烧碳化后，二次颗粒表面可见絮状薄碳层，包覆碳的无序化程度增加。

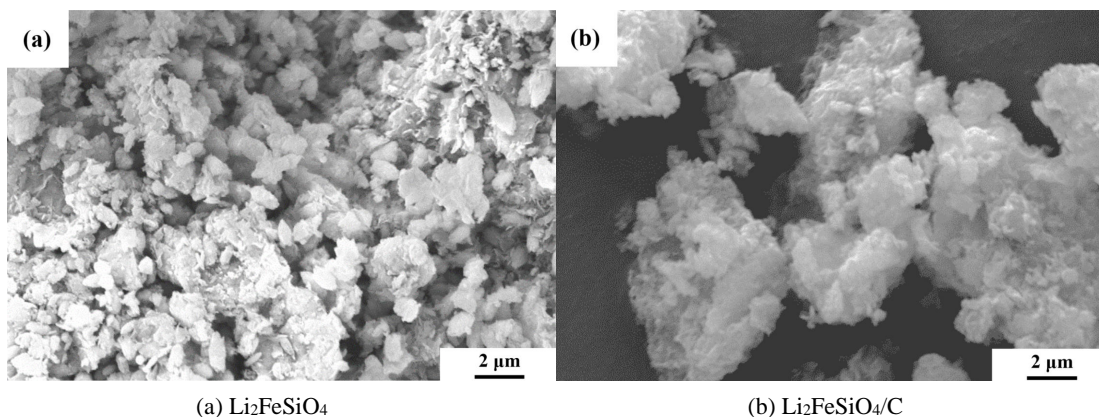


Figure 6. SEM images of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ and $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$

图 6. $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 和 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 的 SEM 照片

3.5. 电化学性能测试结果与分析

图 7 为 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 和 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 在电流密度为 0.1C ($33.3\text{ mA}\cdot\text{g}^{-1}$) 下的第 1、2、3、4、5 以及第 10 次的充放电曲线, 结果表明, 首次放电比容量分别为 $44\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $30\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$, 经过 10 次充放电循环后, 比容量都稳定在 $30\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$, 表明碳复合对 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 比容量的提高不显著。

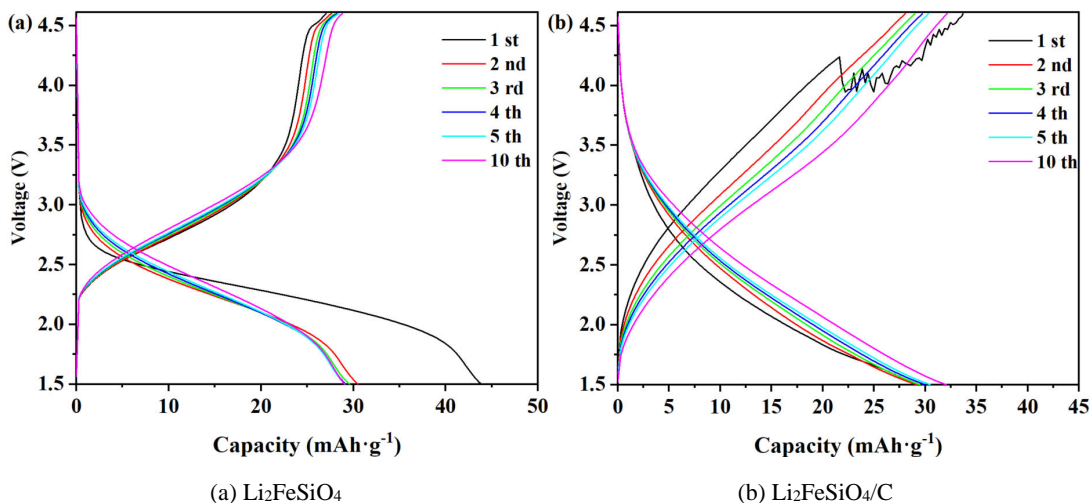


Figure 7. Charge-discharge curves of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ and $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ cathodes

图 7. $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 和 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 正极材料的充放电曲线

图 8 为 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 和 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 在电流密度为 0.1C 的循环性能曲线, 结果表明, $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 和 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 经过 100 次的充放电循环后, 比容量分别为 $30\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $32\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。碳复合能够提高 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 的循环性能。如图 8(b) 所示, $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 在前 15 次循环过程中比容量逐渐增加, 随后缓慢减少, 可能是由于充放电过程电解液逐步润湿 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$, 起到活化作用。

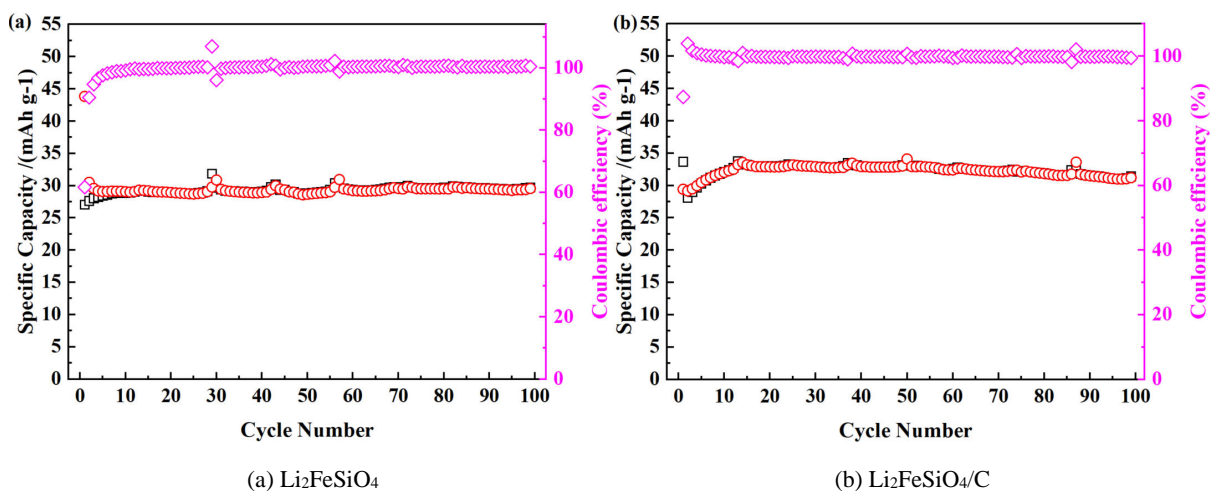


Figure 8. Cycling performance curves of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ and $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ cathodes

图 8. $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 和 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 正极材料的循环性能曲线

图 9 为 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 和 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 正极材料的倍率性能, 在 5C 高电流密度下, $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 和 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 比容量分别为, $6\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $20\text{ mAh}\cdot\text{g}^{-1}$, 表明经过煅烧碳化的 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 复合材料的倍率性能提高,

可能是由于碳化获得的薄碳层结构提高了 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 颗粒间的导电性[12]。

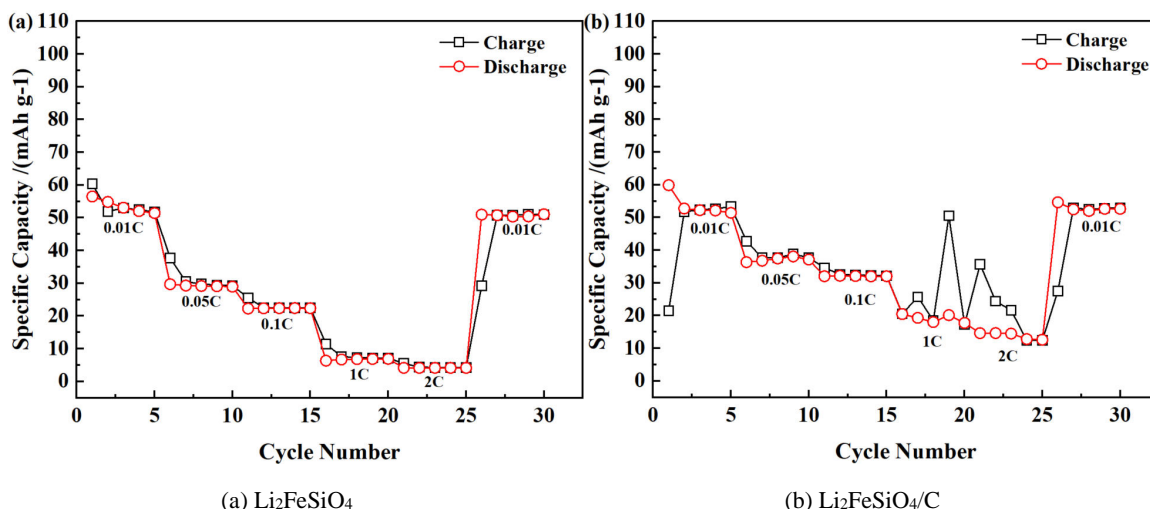


Figure 9. Rate-performance curves of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ and $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ cathode materials

图9. $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 和 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 正极材料的倍率性能曲线

4. 结论

(1) 以铁尾矿为原料，分别利用酸浸法和碱浸法制备的硫酸亚铁和白炭黑前驱体，具有较高的纯度，硫酸亚铁的物相主要为 $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ，所制备的白炭黑含水率为 22.44%。

(2) 与 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ 相比，经过煅烧碳化的 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 具有较好的循环稳定性和倍率性能。

基金项目

2025 年度辽宁省教育厅基本科研项目面上项目“基于铁尾矿的多孔 $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ 正极材料性能及掺杂机理研究”(LJ212511430005)；2026 年辽宁科技学院大学生创新创业训练计划资助项目“基于冶金固废的铁氧化物和石墨资源高值化利用”(202611430091)。

参考文献

- [1] Sakthivel, R., Vasumathi, N., Sahu, D. and Mishra, B.K. (2010) Synthesis of Magnetite Powder from Iron Ore Tailings. *Powder Technology*, **201**, 187-190. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.03.005>
- [2] Giri, S.K., Das, N.N. and Pradhan, G.C. (2011) Magnetite Powder and Kaolinite Derived from Waste Iron Ore Tailings for Environmental Applications. *Powder Technology*, **214**, 513-518. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.09.017>
- [3] 苏琳, 刘双, 程煜昊, 等. 以铁尾矿为原料制备微/纳米结构白炭黑和氧化铁[J]. 沈阳理工大学学报, 2016, 35(2): 90-95.
- [4] 汪应玲, 姜茂发, 刘承军, 等. 低浓度铁尾矿酸浸出液选择性沉铁及制备 LiFePO_4 的研究[J]. 陶瓷学报, 2017, 38(5): 730-734.
- [5] Wang, Y., Wang, Y., Luo, S., Jiang, M., Liu, C., Teng, F., et al. (2020) Preparation of High Performance LiFePO_4/C by Extracting Iron Element from Iron Tailings by Concentrated Sulfuric Acid Hot Dip Method. *Ionics*, **26**, 1645-1655. <https://doi.org/10.1007/s11581-019-03297-7>
- [6] Bi, X.L., Chang, L.J., Luo, S.H., et al. (2021) The Recent Progress of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$ as a Poly-Anionic Cathode Material for Lithium-Ion Batteries. *International Journal of Energy Research*, **46**, 5373-5398. <https://doi.org/10.1002/er.7534>
- [7] Zhang, L., Cao, X., Wu, S., Hou, Z. and Zhu, Z. (2025) Influences of La, Ce, and Pr Doping on the Electronic Structures and Li Ion Migrations in Orthosilicate $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4$: First-Principles Calculations. *Materials Today Communications*, **46**, Article 112633. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.112633>

-
- [8] Cui, J., Chen, D., Xie, M., Zhou, Y., Dong, S. and Wei, W. (2025) Efficient Preparation of $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ with High Purity and Excellent Electrochemical Performance in Li-Ion Batteries. *Molecules*, **30**, Article 808. <https://doi.org/10.3390/molecules30040808>
- [9] Liu, T., Liu, Y., Yu, Y., Ren, Y., Sun, C., Liu, Y., *et al.* (2022) Approaching Theoretical Specific Capacity of Iron-Rich Lithium Iron Silicate Using Graphene-Incorporation and Fluorine-Doping. *Journal of Materials Chemistry A*, **10**, 4006-4014. <https://doi.org/10.1039/d1ta09417c>
- [10] 高媛, 熊昆. 新型锂离子电池正极材料硅酸铁锂改性研究进展[J]. 化工新型材料, 2020, 48(1): 26-30.
- [11] Zuo, Y., Hua, L., Huang, D., *et al.* (2025) Sulfur-Doped Graphene-Decorated $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ Nanocomposite: A Novel Cathode Material for Lithium Energy Storage. *Solid State Ionics*, **420**, Article 116780. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2024.116780>
- [12] Zhang, Q., Wu, X., Shu, Q.Q., *et al.* (2024) KOH Selective Etching Synthesis and Electrochemical Performance of Nano Porous $\text{Li}_2\text{FeSiO}_4/\text{C}$ Composite. *Chemical Engineering Journal*, **480**, Article 148257. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.148257>