

锂离子电池磷酸锰铁锂正极材料的制备及改性研究进展

和 宁^{1,2}, 崔孝玲^{1,2,3*}, 李世友^{1,2,3}, 王 鹏^{1,2,3}

(1. 兰州理工大学石油化工学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 甘肃省低碳能源化工重点实验室, 甘肃 兰州 730050;

3. 甘肃省锂离子电池正极材料工程实验室, 甘肃 白银 730900)

摘要:综述了 LiMnFePO_4 (LMFP) 正极材料的晶体结构、合成方法、导电性/离子性提升策略以及抑制 Jahn-Teller 效应的研究进展。重点聚焦于表面包覆、离子掺杂以及形貌控制和纳米化等改性方法。最后, 探讨了 LMFP 未来的发展趋势和方向, 旨在为 LMFP 正极材料及更广泛的锂离子电池领域的研究和应用提供有价值的参考。

关键词: 锂离子电池; LMFP 正极材料; 表面包覆; 离子掺杂; 形貌控制和纳米化

中图分类号: TM912

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)09-0052-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.09.010

Recent advances in synthesis and modification of $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4$ cathode materials for lithium-ion batteries

HE Ning^{1,2}, CUI Xiao-ling^{1,2,3*}, LI Shi-you^{1,2,3}, WANG Peng^{1,2,3}

(1. School of Petrochemical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. Gansu Provincial Key Laboratory of Low Carbon Energy and Chemical Industry, Lanzhou 730050, China;

3. Gansu Province Lithium-ion Battery Positive Electrode Material Engineering Laboratory, Baiyin 730900, China)

Abstract: This review systematically summarizes recent advances in the crystal structure, synthesis methods, strategies for enhancing electronic/ionic conductivity, and suppression of Jahn-Teller effects in LiMnFePO_4 (LMFP) cathode materials. Particular focus is placed on modification approaches including surface coating, ion doping, morphology control and nanostructuring. Finally, future development trends and research directions of LMFP are discussed, aiming to provide valuable references for the investigation and application of LMFP cathode materials and the broader lithium-ion battery field.

Key words: lithium-ion batteries; LMFP cathode materials; surface coating; ion doping; morphology control and nanostructuring

随着全球对清洁能源需求的不断增长, 锂离子电池作为一种高效、清洁的储能设备, 在电动汽车、储能系统等领域得到了广泛应用^[1]。正极材料是锂离子电池的关键组成部分, 其性能直接影响电池的能量密度、循环寿命和安全性等。 LiFePO_4 (LFP) 作为一种橄榄石结构的正极材料, 具有安全性好、循环稳定性好、热稳定性好、毒性低、成本低等显著优势^[2]。但 LFP 较低的工作电压 (3.4 V vs. Li/Li^+) 和理论容量 (170 mAh/g) 限制了其在高能量密度锂离子电池中的应用。这促使研究人员将注意力转向具有更高工作电压的橄榄石磷酸盐类似物。用 Mn^{2+} 完全取代 Fe^{2+} 可以实现具有接近理论比容量但具有更高能量密度的 LiMnPO_4 (LMP) 正极材料 (比 LFP

高出 21%), 这主要是由于正极材料的高工作电压 (Mn : 4.1 V vs. Li^+/Li ; Fe : 3.4 V vs. Li^+/Li)。不幸的是, LMP 存在低电子电导率和锂离子扩散系数的固有缺点, 这限制了它表现出其理论容量 (170 mAh/g)^[3]。一种可行的方法是用 Mn^{2+} 部分取代 Fe^{2+} 以形成 LiMnFePO_4 (LMFP) 复合材料。LMFP 结合了 LFP 和 LMP 二者的优势, 从而具有成本低廉、安全稳定和能量密度高等特点, 成为了一类极具市场前景的新兴锂离子电池正极材料。然而, LMFP 也存在橄榄石型正极材料固有的缺陷, 如本征电子电导率和锂离子扩散速率较低, 以及 Mn^{3+} 引发的 Jahn-Teller 畸变加速表面和体相结构不稳定性等问题, 极大影响了其储能容量、倍率性能和循环稳定性, 阻碍了其

收稿日期: 2025-11-17; 修回日期: 2026-07-11

基金项目: 甘肃科技专员项目 (25CXGA071); 甘肃省重点研发计划项目 (24YFGA025)

作者简介: 和宁 (1999-), 女, 硕士, 研究方向为电化学储能技术与工程, hening12123@163.com; 崔孝玲 (1980-), 女, 博士, 正高级工程师, 研究方向为电化学储能技术与工程, 通讯联系人, xlcuilw@163.com。

在高性能锂离子电池中的大规模应用^[4]。因此,深入研究 LMFP 的结构、性能及改性方法,对于推动其实际应用具有重要意义。

1 磷酸锰铁锂的结构与性能

磷酸锰铁锂具有与磷酸铁锂相同的正交晶系橄榄石型结构(空间群 Pnma)。如图 1 所示^[5],在该结构中,锂(Li)原子和铁/锰(Fe/Mn)原子分别占据八面体的 4a 和 4c 位点,而磷(P)原子占据四面体的 4c 位点。LMFP 结构中的 FeO_6 (或 MnO_6)八面体通过 PO_4 四面体相互连接,形成稳定的三维网络结构,即使在充电过程中所有锂离子脱出时,该结构仍能保持优异的稳定性。这种结构特征也源于构成 PO_4 四面体的磷原子间形成的强共价键,能有效阻止氧原子逸出,从而赋予材料高安全性^[5]。

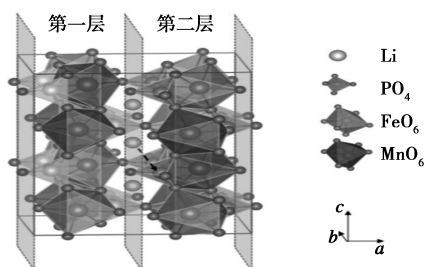
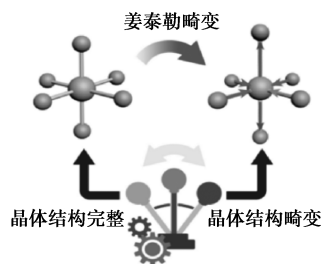
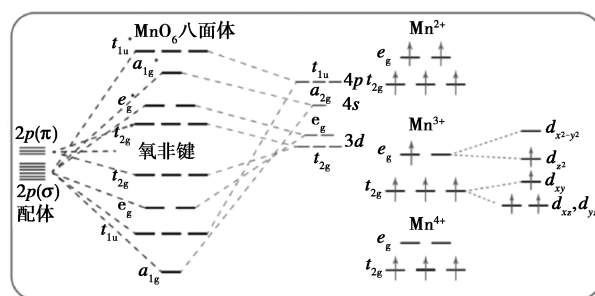


图 1 LiFeMnPO_4 的晶体结构示意图

然而,该结构也具有一定的局限性,由于 FeO_6 / MnO_6 八面体被 PO_4 四面体隔离开来,强 P—O 共价键阻止了 Li^+ 穿过 PO_4^{3-} 四面体位点,因此 Li^+ 只能沿 b 轴进行一维扩散。此外,LFMP/FMP 的脱锂和嵌锂过程经历两相反应机制,其中 LFMP 相和 FMP 相之间较大的晶格失配,不仅为 Li^+ 跨越相界扩散设置了巨大的能垒,同时也增加了电子跃迁的能垒。如图 2 所示,这归因于 Mn^{3+} 离子周围的电子-晶格相互作用,强烈的 Jahn-Teller 效应会强烈束缚极化子空穴,并迅速增加极化子的有效质量。 Mn^{3+} 位点周围极化子的大有效质量,加上大的局部晶格畸变,无论是在块体晶体中还是在失配的 LFMP/FMP 两相

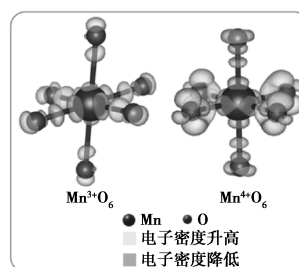


(a) MnO_6 八面体在 J-T 畸变前后的示意图



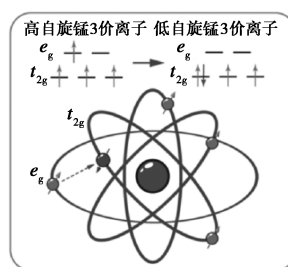
(b) MnO_6 八面体的分子轨道能量图和

$\text{Mn}^{2+}/\text{Mn}^{3+}/\text{Mn}^{4+}$ 的电子轨道



(c) Mn^{3+}O_6 和 Mn^{4+}O_6

八面体的微分电荷密度



(d) 高/低自旋 Mn^{3+} 的

$\text{Mn} 3d$ 轨道示意图

图 2 Jahn-Teller 效应

界面处,都会导致缓慢的动力学和内部摩擦,这很容易阻塞一维的锂离子传输路径^[6]。

2 磷酸锰铁锂正极材料的制备方法

磷酸锰铁锂的合成工艺与磷酸铁锂高度相似,制备通常采用高温固相法、溶胶-凝胶法、水热/溶剂热法及共沉淀法等多种技术路线。上述方法各具独特优势,在实际应用中需针对性地考量其工艺特性以实现 LMFP 的有效制备。

2.1 高温固相法

高温固相法通过将反应物料混合后进行煅烧以获得目标产物。基本原理是将锂离子电池正极材料的主要原料(包括 Li、Mn、Fe 和 C 源)按比例混合,随后在高温条件下进行固相反应,从而制备出具有优异电化学性能的锂离子电池正极材料。该方法具有反应简单、成本低廉及制备工艺简便等优势^[7]。

高温固相法典型合成流程如图 3 所示^[7],该工艺采用固相法制备了碳包覆 LMFP/C 正极材料。对试剂混合物进行机械球磨和热处理之后,获得预制备的无碳 LFMP-400,然后与优选的碳源聚乙烯吡咯烷酮(PVP)球磨,随后在 700°C 下退火。实验结果表明,通过高温固相法 PVP 可形成与 LMFP 表面紧密键合的高度石墨化碳包覆层,兼具高导电性与优化的多孔结构,从而使 LMFP/C 复合材料获得更高的比容量、更优异的倍率性能和循环稳定性^[7]。

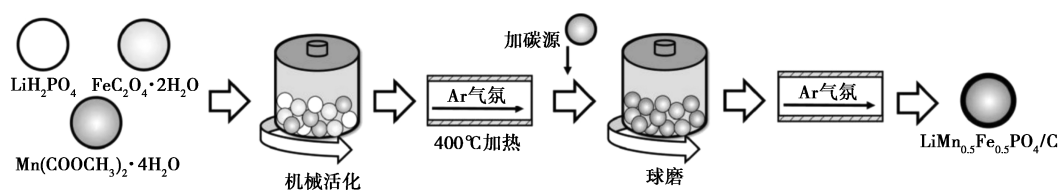


图 3 高温固相法合成 LMFP/C 的示意图

Xie 等^[8]用高温固相法成功合成了 LMFP/C@还原氧化石墨烯(rGO)复合材料。研究表明,高温固相法辅助喷雾干燥工艺可有效细化 LMFP/C 材料粒径并实现均匀分散;rGO 与碳包覆层的纳米级均匀复合显著降低了电极材料的电荷转移阻抗,同步提升了材料的导电性与电化学性能。

2.2 溶胶-凝胶法

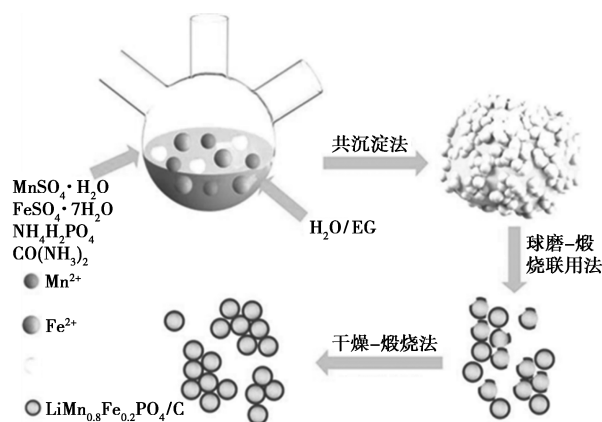
溶胶-凝胶法是将金属醇盐或无机金属盐在液相中水解缩合形成溶胶-凝胶体系,然后缓慢聚合,通过加入适当的胶凝剂,使形成的溶胶-凝胶老化,然后干燥,形成凝胶状前驱体材料,最后经高温处理得到最终产品^[9]。这种制备方法的优点是反应温度低,反应过程容易控制,但缺点是凝胶化所需的实验周期长,不适合工业化生产。

Liu 等^[10]采用冷冻干燥辅助溶胶-凝胶法成功合成了 LMFP/C 纳米复合材料。所有样品均由纳米棒与纳米颗粒构成,表面均匀包覆着高度有序的碳层,具有优异的倍率性能和循环性能。Dai^[9]采用溶胶-凝胶法制备了磷酸锰铁锂材料,有效解决了传统干燥过程产生的团聚问题,所制得的磷酸锰铁锂具有更小的粒径以及更为均匀的孔道结构,展现出更优的循环性能与更低的阻抗。

2.3 共沉淀法

共沉淀法通常将可溶性亚铁盐、锰盐、锂盐、磷酸盐和其他原材料溶解在溶剂中。然后调整反应体系的 pH、反应物浓度或添加沉淀剂以促进沉淀从溶液中分离。随后将该沉淀过滤、干燥和煅烧以获得所需的 LMFP 正极材料。该方法的优势在于制备工

艺相对简单(图 4)、能有效调控产物粒径、产物组分分布均匀;然而,此方法亦存在一些不足之处,例如对原料选择条件较为苛刻,且要求各组分在水相中具有相近的水解沉淀特性,这在一定程度上制约了该技术的工业化应用^[11]。

图 4 通过共沉淀法制备 CP₁-LMFP/C 的示意图

Ding 等^[12]通过共沉淀法制备了 LMFP·H₂O,与传统的固相合成方法相比,该方法可以使 Mn、Fe 在纳米颗粒中更均匀地分散,是提高其能量密度的关键。

2.4 水热/溶剂热法

水热/溶剂热法通常采用可溶性物质作为原料,使用水或有机溶剂作为介质。在此过程中,可溶性前驱体与溶剂结合并置于高温高压环境中,使化学反应得以完成。经过洗涤和干燥后得到最终产品,特点是纳米颗粒尺寸均匀且杂质极少(图 5)。水热/溶剂热法是目前实验室研究电池材料最重要的

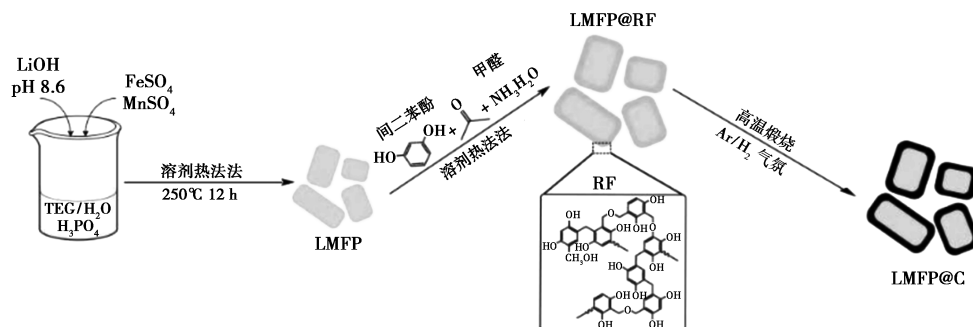


图 5 水热-溶剂热法合成 LMFP/C 的示意图

方法之一,但制备条件较为严格,且难以应用于大规模生产^[13]。

Trinh 等^[14]采用水热法成功合成了橄榄石结构 LMFP 纳米正极材料。场发射扫描电子显微镜 (SEM) 与能量色散 X 射线光谱 (EDS) 分析表明,所制备的 LMFP 样品具有类球形纳米结构,粒径分布相对均匀,集中在 100~200 nm 范围内。

3 磷酸锰铁锂正极材料的改性方法

LMFP 的固有缺陷显著影响其电化学性能,限制了工业应用。除了基本的合成方法外,研究人员通过各种改性策略增强电化学性能和结构稳定性,包括表面包覆、离子掺杂、形貌控制和纳米化等改性^[15]。

3.1 表面包覆

表面包覆是最常用的改性方法,其中碳包覆能够显著提高材料的导电性,并控制颗粒尺寸、提升材料循环稳定性。它还能阻止颗粒间的接触,从而抑制颗粒生长,易于获得纳米尺寸的正极材料^[16]。

Tang 等^[16]通过在合成过程中引入葡萄糖、PEG2000 和油酸作为复合碳源,成功构建了嵌入超细 LMFP/C 纳米颗粒的三维连续介孔碳骨架 (LMFP/C@MC)。三维连续碳骨架不仅为颗粒间电子传输提供了快速通道,提升电子传导动力学,还能适应充放电循环过程中的体积变化,防止 LMFP 纳米颗粒团聚。基于结构优势,LMFP/C@MC 在 20 C 高倍率下仍保持 139.79 mAh/g 的优异倍率性能。Wu 等^[17]提出双碳协同改性策略,通过快速原位共沉淀法创新性地制备出 $\text{Fe}_{0.4}\text{Mn}_{0.6}\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}/\text{GO}$ 前驱体,进而构建了碳包覆 LMFP 嵌入三维石墨烯框架的复合结构 (LMFP/C/rGO)。如图 6(a)、(b) 所示,在该结构中,亚微米级 LMFP 颗粒经均匀碳包覆形成 LMFP/C 单元,这些单元被牢固锚定并嵌入三维石墨烯网络,确保了 3 组分间充分的“面对面”紧密接触。得益于精心构建的三维导电网络、快速的锂离子传输通道及独特的电解液渗透结构,该 LMFP/C/rGO 复合材料展现出卓越的电化学性能:在 0.05 C 倍率下具有 159.5 mAh/g 的高放电容量,10 C 倍率下仍保持 118.7 mAh/g 的优异倍率容量 [图 6(c)],且在 2 C 倍率下循环 200 次后容量保持率高达 96.4% [图 6(d)]。

3.2 离子掺杂

离子掺杂是将其他元素掺杂到 LMFP 晶格中。与表面包覆不同的是,掺杂是从晶格内部改变物质

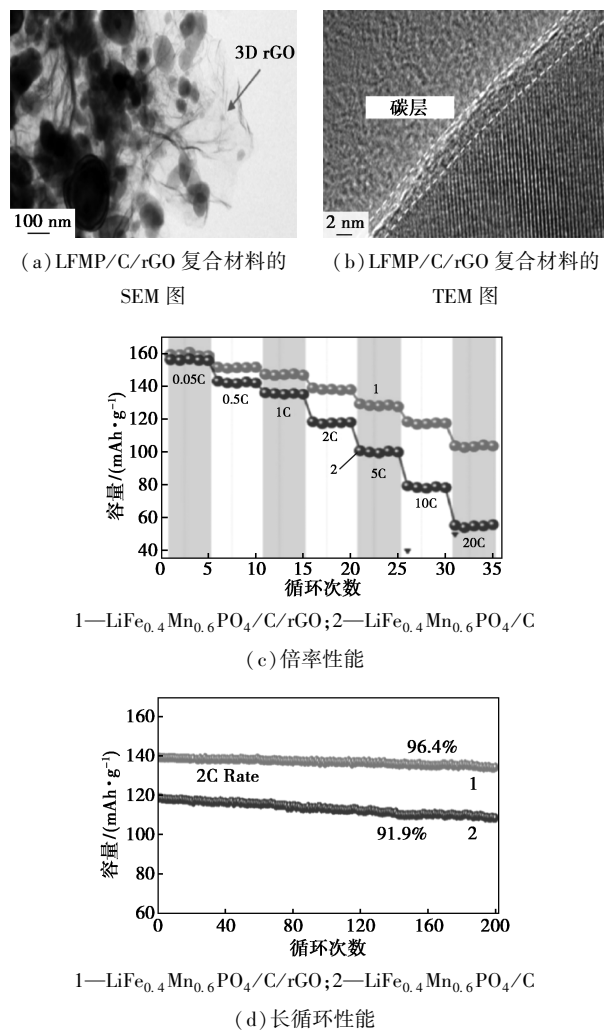


图 6 材料的 SEM、TEM 谱图以及电化学性能

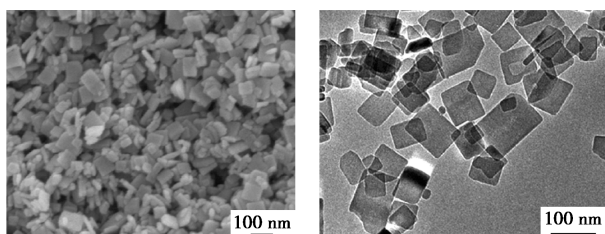
的导电性和离子扩散的一种方式,从而改善电化学性能^[18]。

Zheng 等^[18]将 Y^{3+} 离子成功掺杂到橄榄石结构中,导致晶格参数减小、晶胞体积收缩,并将 4.1 V 附近的锂离子扩散系数提升至较高水平。 Y^{3+} 掺杂能够减小 LMFP 与 MFP 两相界面的晶格应变,从而增强充放电循环过程中材料的结构稳定性,使得该材料在 1 C 倍率下循环 300 次后容量保持率为 87.74%。Jin 等^[19]将铌掺杂成功应用于提升 LMFP 正极材料的电化学性能。强 Nb—O 配位键不仅能加速纳米颗粒内部的离子扩散与电子传输,同时可抑制 Jahn-Teller 效应以提升倍率性能。这种双重改性策略协同作用,使 LMFP 正极材料在 1 C 倍率下循环 1 000 次后仍保持 95.4% 的超高容量保持率,展现出卓越的循环稳定性。

3.3 形貌控制和纳米化

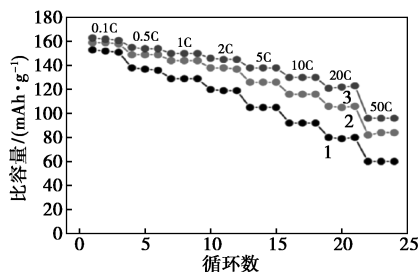
控制颗粒尺寸和设计形态结构长期以来一直是橄榄石型磷酸盐正极材料研究的焦点^[19-20]。Du

等^[21]向体系中引入了多种添加剂以调控材料生长。这些优选添加剂显著影响了磷酸盐颗粒的结晶过程,其中 CTAB 通过抑制颗粒生长发挥积极作用,而维生素 C 与 β -环糊精则降低了合成样品的比表面积。得益于扩散路径的缩短与反应面积的增加,采用 CTAB 合成的 LMFP/C 材料展现出更优异的电化学性能。Liao 等^[20]通过双前驱体混合法成功合成了超薄 LMFP 纳米片,如图 7(a)、(b)所示。这种板状材料具有较小的横向尺寸(40~100 nm)和厚度(10~20 nm),具有高电化学活性、优异的倍率性能和卓越的循环稳定性。在高达 50 C 的倍率下仍能提供 96.2 mAh/g 的高放电容量[图 7(c)],在 10 C 倍率下循环 1 000 次后仍能保持接近 70% 的容量保持率[图 7(d)]。



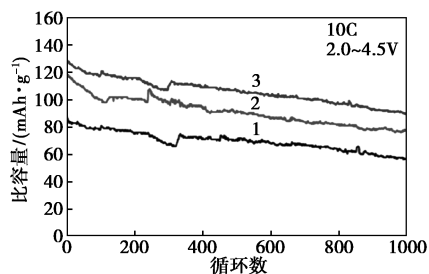
(a) LFMP 纳米片的 SEM 图

(b) LFMP 纳米片的 TEM 图



1—LFMP-0.05; 2—LFMP-0.10; 3—LFMP-0.15

(c) 倍率性能



1—LFMP-0.05; 2—LFMP-0.10; 3—LFMP-0.15

(d) 长循环性能

图7 LFMP 纳米片的 SEM 图、TEM 图以及电化学性能

尽管纳米化是改善动力学性能的一种变革性方式,但它会伴随增加材料比表面积的问题,从而导致更多的界面副反应。在此,Liu 等^[22]开发了一种多

元醇溶剂热法,用于增大 LMFP 的颗粒尺寸,降低比表面积,同时调控晶体取向,改善动力学性能。电化学测试表明,对于 $\text{Fe}^{2+/3+}$ 和 $\text{Mn}^{2+/3+}$ 电对,充电过程中 Li^+ 扩散动力学分别提高了 58.6% 和 46.1%,放电过程中分别提高了 92.0% 和 21.2%。

4 结论与展望

LMFP 作为一类极具应用前景的锂离子电池正极材料受到研究者的广泛关注。针对 LMFP 材料固有的电子导电性与离子导电性低以及存在 Jahn-Teller 效应的缺陷开展了大量研究,并取得了显著进展。综述了 LMFP 正极材料的改性方法,主要包括表面包覆、离子掺杂、形貌控制和纳米化。通过合适的合成与改性策略,可有效提升 LMFP 材料的导电性能并抑制 Jahn-Teller 效应,使其即使在高倍率下仍能保持较高的可逆放电容量。这对制备兼具高能量密度、高倍率性能、高稳定性的 LMFP 材料具有重要意义。展望未来,LMFP 电池正极材料的研究,更重要的是采用碳包覆、晶面调控与离子掺杂相结合的复合改性策略,缓解由此带来的导电性下降及严重的姜-泰勒畸变问题,实现锂离子电池能量密度、倍率性能与安全可靠性的同步提升。同时应深入研究 LMFP 导电性提升的内在机理,进一步完善晶格内及颗粒界面处锂离子传输的理论体系。

参考文献

- [1] Cabana J, Monconduit L, Larcher D, *et al.* Beyond intercalation-based Li-Ion batteries: The state of the art and challenges of electrode materials reacting through conversion reactions[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(35): 170-192.
- [2] Chen Y, Wang Z, Li M, *et al.* The high rate charge/discharge properties and diffusion dynamics of carbon-coated LiFePO_4 doped by Na-Ti synergistic effect[J]. *Nano Energy*, 2025, 144: 111396.
- [3] Zhang B, Wang L, Zhang H, *et al.* Revelation of the transition-metal doping mechanism in lithium manganese phosphate for high performance of lithium-ion batteries[J]. *Battery Energy*, 2022, 1(4): 20220020.
- [4] Li S, Zhang H, Liu Y, *et al.* Comprehensive understanding of structure transition in $\text{LiMn}_y\text{Fe}_{1-y}\text{PO}_4$ during delithiation/lithiation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(4): 2310057.
- [5] Liu Y, Gu Y, Zeng H, *et al.* Role of superexchange interactions on the arrangement of Fe and Mn in $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4$ [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2019, 123(27): 17002-17009.
- [6] Liu S, Wang B, Zhang X, *et al.* Reviving the lithium-manganese-based layered oxide cathodes for lithium-ion batteries[J]. *Matter*, 2021, 4(5): 1511-1527.

- [7] Podgornova O A, Volfkovich Y M, Sosenkin V E, *et al.* Increasing the efficiency of carbon coating on olivine-structured cathodes by choosing a carbon precursor[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2022, 907: 116059.
- [8] Xie X, Zhang B, Hu G, *et al.* A new route for green synthesis of $\text{LiFe}_{0.25}\text{Mn}_{0.75}\text{PO}_4/\text{C}@\text{rGO}$ material for lithium ion batteries[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 853: 157106.
- [9] Dai J. Effect of freeze-drying gel on properties of lithium manganese iron phosphate prepared by sol-gel method[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2025, 2954(1): 012009.
- [10] Liu L, Cao Z, Cui Y, *et al.* Nanocomposites $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}$ synthesized via freeze drying assisted sol-gel routine and their magnetic and electrochemical properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 779: 339–346.
- [11] Wang Y, Yong F, Wang Z, *et al.* $\text{LiMn}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{PO}_4/\text{C}$ Nanoparticles via polystyrene template carburizing enhance the rate capability and capacity reversibility of cathode materials[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2024, 7(4): 4024–4034.
- [12] Ding B, Ji G, Ma Y, *et al.* Increasing the high rate performance of mixed metal phospho-olivine cathodes through collective and cooperative strategies[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 247: 273–279.
- [13] Chi Z X, Zhang W, Wang X S, *et al.* Accurate surface control of core-shell structured $\text{LiMn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{PO}_4 @ \text{C}$ for improved battery performance[J]. *J Mater Chem A*, 2014, 2(41): 17359–17365.
- [14] Trinh D V, Nguyen M T T, Dang H T M, *et al.* Hydrothermally synthesized nanostructured $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4$ ($x=0-0.3$) cathode materials with enhanced properties for lithium-ion batteries[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 12280.
- [15] Vanaphuti P, Manthiram A. Enhancing the Mn Redox Kinetics of $\text{LiMn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{PO}_4$ Cathodes Through a synergistic Co-doping with niobium and magnesium for lithium-ion batteries[J]. *Small*, 2024, 20(47): 2404878.
- [16] Tang X, Huang J, Zhao F, *et al.* A 3D continuous mesoporous carbon framework enhances electronic/ionic kinetics of $\text{LiMn}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{PO}_4$ cathode for high-performance lithium-ion batteries[J]. *Carbon*, 2025, 25: 238.
- [17] Wu K, Yin S, Wang S, *et al.* Construction of submicron-sized $\text{LiFe}_{0.4}\text{Mn}_{0.6}\text{PO}_4/\text{C}$ enwrapped into graphene framework for advanced Li-storage[J]. *Carbon*, 2020, 169: 55–64.
- [18] Zheng J, Yang J, Wu J, *et al.* Y^{3+} doping and electrochemical properties of $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4 @ \text{C}$ cathode material for lithium-ion batteries[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2023, 960: 170610.
- [19] Jin H, Zhang J, Qin L, *et al.* Dual modification of olivine $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$ cathodes with accelerated kinetics for high-rate lithium-ion batteries[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, 62(2): 1029–1034.
- [20] Liao L, Wang H, Guo H, *et al.* Facile solvothermal synthesis of ultrathin $\text{LiFe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{PO}_4$ nanoplates as advanced cathodes with long cycle life and superior rate capability[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2015, 3(38): 19368–19375.
- [21] Du G, Guo X, Yang W, *et al.* Additives to disturb $\text{LiMn}_{0.8}\text{Fe}_{0.2}\text{PO}_4$ growth and their influence on performance[J]. *Journal of Nanoparticle Research*, 2015, 17(6): 272.
- [22] Liu S, Zheng J, Zhang B, *et al.* Engineering manganese-rich phospho-olivine cathode materials with exposed crystal {010} facets for practical Li-ion batteries[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 454: 139986. ■

(上接第 51 页)

- [18] Zhang Y, Tao K, Gui H, *et al.* Hydrophilic and antimicrobial properties of hydroxypropyl trimethyl ammonium chloride chitosan/graphene oxide membrane for dye rejection[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 67: 106220.
- [19] Moradi G, Heydari R, Zinadini S, *et al.* Chitosan-furosemide/pectin surface functionalized thin film nanofiltration membrane with improved antifouling behavior for pharmaceutical wastewater treatment[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2023, 124: 368–380.
- [20] 朱晓, 朱军勇, 张亚涛. 金属有机骨架/聚酰胺薄层纳米复合膜的研究进展[J]. *化工进展*, 2022, 41(8): 4314–4326.
- [21] Huang C W, Zhou S R, Hsiao W C. Multifunctional $\text{TiO}_2/\text{MIL}-100(\text{Fe})$ to conduct adsorption, photocatalytic, and heterogeneous photo-Fenton reactions for removing organic dyes[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2024, 158: 104850.
- [22] 巴立波, 陈保良, 刘一江, 等. $\text{GO}@\text{MOFs}$ 骨架纳滤膜对地表水中嗅味物质的去除效能[J]. *水处理技术*, 2024, 50(11): 61–66.
- [23] 方思源. 钴基金属有机骨架复合纳滤膜的制备及对抗生素废水的截留性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2023.
- [24] 陈若桐, 丁晓倩, 李琨, 等. 基于界面聚合技术的抗污染纳滤膜研究进展[J]. *工业水处理*, 2025, 45(11): 19–29.
- [25] Yang S M, Wang J Q, Fang L F, *et al.* Electrosprayed polyamide nanofiltration membrane with intercalated structure for controllable structure manipulation and enhanced separation performance[J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 602: 117971.
- [26] 朱德良, 何家劲, 唐雨欣, 等. 单宁酸/二乙烯三胺五乙酸酯化层修饰的聚酰胺纳滤膜的制备及性能研究[J]. *浙江理工大学学报: 自然科学*, 2025, 53(2): 166–174.
- [27] Zhu X, Lai C, Liu B, *et al.* Unveiling the role of post-treatment in thin-film composite nanofiltration membranes: Performance and mechanism[J]. *Desalination*, 2023, 556: 116579.
- [28] 陈彦睿, 张星冉, 李方. 基于层层自组装技术的抗污染膜研究进展[J]. *化工进展*, 2023, 42(11): 5956–5968.
- [29] 孙二强, 姜永健, 张环宇, 等. 相转化法制备疏松纳滤膜研究进展[J]. *石油化工高等学校学报*, 2022, 35(1): 41–47.
- [30] 周威明, 丁春香, 潘明珠. 基于动态共价交联网络自修复涂层的研究进展[J]. *复合材料学报*, 2023, 40(3): 1381–1394. ■