

锂离子电池用 $\text{LiMn}_{0.58}\text{Fe}_{0.42}\text{PO}_4$ 前驱体 $\text{Mn}_{0.58}\text{Fe}_{0.42}\text{CO}_3$ 工艺研究

徐 斌, 席多祥, 曹玉龙, 陈 源, 杨长虹, 冯宛苒

白银时代瑞象新材料科技有限公司, 甘肃 白银

收稿日期: 2026年3月24日; 录用日期: 2026年3月31日; 发布日期: 2026年7月29日

摘 要

本文针对磷酸锰铁锂(LMFP)正极材料碳酸锰铁前驱体制备, 采用液相共沉淀法, 通过调控金属液浓度, 成功制备出锰铁元素高度均匀分布的碳酸锰铁前驱体, 并继承到了该前驱体所制备的LMFP正极材料中, 该LMFP材料压实密度达到 2.3517 g/cm^3 , 0.1C克容量为 155.25 mAh/g , 1C克容量为 146.19 mAh/g , 1C循环200周容量保持率为95.1%。

关键词

磷酸锰铁锂正极材料, 碳酸锰铁前驱体, 液相共沉淀法

Process Study on the $\text{Mn}_{0.58}\text{Fe}_{0.42}\text{CO}_3$ Precursor for Lithium-Ion Battery Cathode Material $\text{LiMn}_{0.58}\text{Fe}_{0.42}\text{PO}_4$

Bin Xu, Duoxiang Xi, Yulong Cao, Yuan Chen, Changhong Yang, Wanqian Feng

Baiyin Shidai-Ruixiang New Materials Technology Co., Ltd., Baiyin Gansu

Received: March 24, 2026; accepted: March 31, 2026; published: July 29, 2026

Abstract

This paper focuses on the preparation of manganese iron carbonate precursor for lithium manganese iron phosphate (LMFP) cathode materials. Utilizing a liquid-phase co-precipitation method and regulating the concentration of the metal salt solution, a $\text{Mn}_{0.58}\text{Fe}_{0.42}\text{CO}_3$ precursor with a highly uniform distribution of Mn and Fe elements was successfully synthesized. This elemental uniformity was effectively inherited by the resulting $\text{LiMn}_{0.58}\text{Fe}_{0.42}\text{PO}_4$ cathode material. The as-prepared LMFP

文章引用: 徐斌, 席多祥, 曹玉龙, 陈源, 杨长虹, 冯宛苒. 锂离子电池用 $\text{LiMn}_{0.58}\text{Fe}_{0.42}\text{PO}_4$ 前驱体 $\text{Mn}_{0.58}\text{Fe}_{0.42}\text{CO}_3$ 工艺研究[J]. 材料化学前沿, 2026, 14(3): 402-411. DOI: 10.12677/amc.2026.143037

material exhibited a tap density of 2.3517 g/cm³, a specific discharge capacity of 155.25 mAh/g at 0.1C, and 146.19 mAh/g at 1C. Furthermore, it demonstrated excellent cycling stability, retaining 95.1% of its initial capacity after 200 cycles at a 1C rate.

Keywords

Lithium Manganese Iron Phosphate (LMFP) Cathode Material, Manganese Iron Carbonate Precursor, Liquid-Phase Co-Precipitation Method

Copyright © 2026 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. 前言

磷酸锰铁锂(LiMn_{1-x}Fe_xPO₄)凭借其能量密度、安全性、低温性能及成本等关键维度的综合优势,正加速在动力电池、两轮车及储能等核心领域实现规模化渗透,市场需求呈现爆发式增长态势。相比磷酸铁锂(3.4 V),其高达 4.1 V 的电压平台可显著提升能量密度约 20%,为新能源汽车及储能设备的续航升级提供了关键支撑[1]-[3]。在安全性方面,其稳定的橄榄石型晶体结构在充放电及极端条件下(如过充)可有效防止结构崩塌,安全性显著优于层状结构的三元材料。同时,该材料在-20℃低温环境下仍能保持约 71%的容量,优于磷酸铁锂的 67%,有效缓解了低温续航焦虑[4]。此外,其主要元素锰与铁的资源丰富度及低廉价格,相较于依赖钴、镍的三元材料具有显著成本优势,为其大规模产业化应用奠定了坚实基础[4] [5]。综上,磷酸锰铁锂展现出广阔的发展前景。

作为磷酸锰铁锂的核心前驱体,碳酸锰铁的物化性质(如粒径、形貌、元素分布)直接决定了最终正极材料的电化学性能。不同的合成方法对碳酸锰铁结构、形貌有着非常重要的影响,进而在一定程度上决定了磷酸锰铁锂正极材料电化学性能的好坏[6] [7]。常规的碳酸锰铁合成采用碳酸氢铵作沉淀剂,通过氨水调节合成的 pH 值,存在以下问题: 1) 引入氨氮后废水处理难度大,设备投资高,现场作业环境差; 2) Mn、Fe 容易与氨根形成金属络合物,金属回收率低,且 Mn、Fe 比例不好控制; 3) Mn、Fe 在原子级别达不到均匀分布[8]-[11]。

近年来,研究者们积极探索多种无氨合成路线。重庆大学团队[12]采用水热法在 150℃~180℃、10~24 小时条件下合成了 Mn_{1-x}Fe_xPO₄/石墨烯复合材料,通过纳米化与导电网络的协同作用提升了材料倍率性能。然而,该工艺需使用高压反应釜,设备投资大、生产周期长,难以实现连续化生产。磷酸盐共沉淀法方面,Manthiram 团队[1]近期报道了一种无氨合成新型前驱体(Mn,Fe)₅(PO₄)₂(HPO₄)₂·4H₂O 的方法,以 NaOH 为沉淀剂替代 NH₄OH,所得材料在 C/3 倍率下循环 150 次后容量保持率超过 95%。该工艺虽避免了氨的使用,但相纯度对 Mn:Fe 比例和反应温度高度敏感,工艺窗口较窄。磷酸锰铁铵法是另一条代表性无氨路线,河南科隆新能源[13]公开的专利技术以 NH₄Mn_xFe_yPO₄ 为前驱体,在 30℃~80℃、pH 4.0~6.5 条件下直接沉淀,焙烧脱氨后与锂盐混合制得 LMFP。该方法虽可实现氨的回收利用,但增加的预焙烧脱氨工序增加了工艺能耗和设备复杂度。此外,草酸盐法和氢氧化物法虽能避免氨的使用,但分别存在过滤困难、Fe²⁺易氧化及碱金属离子难去除等问题[6] [14]。

本文采用液相共沉淀法,旨在系统探究碳酸钠共沉淀法合成 LMFP 前驱体的工艺参数,在还原气氛下,通过控制反应的金属盐浓度、流量、搅拌速度等参数,生成碳酸锰铁前驱体,并应用于 LMFP 正极材料,为无氨、低成本、可规模化的 LMFP 前驱体合成提供新的技术路径。

2. 实验材料与方法

2.1. 实验原料

- 1) 电池级硫酸锰
- 2) 电池级硫酸亚铁
- 3) 优级品碳酸钠

2.2. 实验设备

表 1 为 50 L 反应釜及配套实验设备。

Table 1. Experimental equipment

表 1. 实验设备

序号	名称	规格型号	作用
1	反应釜	GR-50Ex	使 $\text{Mn}^{2+}/\text{Fe}^{2+}$ 同步均匀沉淀
2	循环浴	SY-20	恒定反应釜温度
3	循环水式多用真空泵	SHB-B95	用于前驱体的过滤洗涤
4	融柏恒流泵	BT100-YZ1515	保持流速恒定
5	电阻炉	FFX160/12Q-GC	干燥
6	pH 计	PHS-2F	检测 pH 值
7	布氏漏斗	10 L	过滤

2.3. 表征手段

MFC 前驱体及 LMFP 正极材料的形貌由德国蔡司 ZEISS 扫描电镜拍摄。粒度分布由激光粒度分布仪(BT-9300S)进行检测；硫、碳含量由高频红外碳硫分析仪(HCS-802)进行检测；XRD 图谱由德国布鲁克 X 射线衍射仪获得；比表面积由比表面仪(BSD-BET400)进行检测；杂质含量由 ICP (GREEN-DSOI)直读光谱仪进行检测；主元素含量 Mn、Fe、P 由滴定法进行检测。LFMP 正极材料压实由粉末压实密度仪(元能科技)进行测量。

2.4. 实验步骤

2.4.1. MFC 前驱体制备

- 1) 配置 Mn、Fe 混合溶液，浓度在 80~120 g/L 之间，Mn/Fe 摩尔比控制在 58:42。
- 2) 配置 100 g/L 碳酸钠溶液。
- 3) 向 50 L 反应釜中加入纯水作为底液，通入 99.99%的氮气保护气体。
- 4) 用恒流泵按照恒定流量将 Mn、Fe 混合溶液、碳酸钠溶液加入双层搅拌玻璃反应釜中，反应温度 40℃~60℃下、pH 在 5.5~7.5、反应 4~6 h。
- 5) 反应结束后，保持转速不变在 50℃~70℃陈化 2 h，过滤、洗涤。
- 6) 将滤饼在 120℃下烘干得到碳酸锰铁前驱体。

2.4.2. LMFP 正极材料制备及电性能表征

- 1) 称取定量的碳酸锰铁前驱体、锂源及磷源(LiH_2PO_4)、7%碳源(蔗糖：PEG6000 为 6:4)以及降黏剂

MTC 在一定的溶剂中分散、研磨(研磨粒径 400 nm, 转速 2000 rpm, 球料比 1:1), 达到研磨粒径后进行喷雾干燥。

2) 对喷雾干燥样品在氮气气氛下进行 735℃, 8 h (升温速率 2℃/min)煅烧后, 经破碎得到磷酸锰铁锂正极材料。

3) 称取定量的 LMFP 正极材料与炭黑、PVDF 以及氮甲基吡咯烷酮进行混合, 经消泡、涂布、抽真空、组装电池等步骤, 得到纽扣电池。

4) 电解液采用 LiPF₆, 金属锂片为对电极, 电压范围为 2.5 V~4.35 V, 对其进行扣电表征。

2.5. 实验参数

本文分别在锰铁混合溶液浓度为 80、100 和 120 g/L 的工艺下采用液相共沉淀法制备了碳酸锰铁前驱体, 工艺参数见表 2。

Table 2. Preparation process parameters of manganese iron carbonate precursor
表 2. 碳酸锰铁前驱体生产工艺参数表

实验编号	锰铁浓度	碳酸钠浓度	并流比例	搅拌转速
1	80 g/L	100 g/L	5:8	500 rpm
2	100 g/L	100 g/L	1:2	500 rpm
3	120 g/L	100 g/L	5:12	500 rpm

3. 实验结果与讨论

本研究提出采用碳酸钠共沉淀法合成 LMFP 前驱体。相较于现有报道的水热法、Manthiram 磷酸盐法及磷酸锰铁铵法等无氨路线[1][11]-[13], 碳酸钠共沉淀法具有以下独特优势: 1) 反应条件温和, 在 40℃ 至 70℃、常压条件下即可进行; 2) 工艺窗口宽, pH 5.5~7.5 范围内可获得均匀沉淀, 对原料配比波动容忍度高; 3) 原料成本低, 碳酸钠来源广泛、价格低廉; 4) 生产周期短, 反应时间 4~8 h, 显著优于水热法的 10~24 h; 5) 工艺流程简单, 无需高压设备及预焙烧脱氨工序, 便于放大生产。

3.1. 金属液浓度对碳酸锰铁前驱体的影响

3.1.1. 金属液浓度对碳酸锰铁前驱体微观形貌的影响

图 1 为不同金属液浓度下所制备碳酸锰铁前驱体的微观形貌图。金属液浓度主要决定反应的成核与生长速率。可以看出, 当金属盐浓度为 80 g/L 时, 由于金属离子浓度较低时, 反应体系的过饱和度较低, 成核速率较慢, 诱导期延长。离子更倾向于在已有的晶核上生长, 而不是生成新核, 由于成核数量少, 颗粒之间容易发生团聚, 最终形成如图所示的大颗粒团聚体。当金属盐浓度为 100 g/L 时, 得到的碳酸锰铁前驱体呈颗粒呈类球形结构、颗粒分散性、一致性较好, 结晶度好, 仅有少部分较大的颗粒团聚体存在。当金属盐浓度增加到 120 g/L 时, 前驱体的形貌呈小的二次团聚体, 金属离子浓度高, 加入沉淀剂后很快达到高过饱和度, 将会在短时间内生成大量晶核, 由于晶核数量巨大, 后续离子主要消耗于在大量晶核表面的沉积, 单个颗粒的生长受到限制, 导致颗粒粒径通常细小, 且会存在如图所示的团聚现象。

3.1.2. 金属液浓度对碳酸锰铁前驱体粒径分布的影响

表 3 为不同金属液浓度下碳酸锰铁前驱体粒径分布结果, 图 2 为不同金属液浓度下所制备碳酸锰铁前驱体的粒径分布结果。可以看出, 粒径分布与扫描结果呈现出了相同的规律。当金属盐浓度为 80 g/L 时, MFC 前驱体粒径分布拟合为单峰, 表明颗粒生长均匀, 峰型左偏, D50 为 16.1 μm, 仅为 D50 的 1/3,

表明小颗粒偏多；但根据粒径大小来看，金属盐浓度为 80 g/L 时前驱体由于多为团聚的大颗粒，因此整体粒径偏大，D10 较高，为 8.859 μm 。当金属盐浓度为 100 g/L 时，得到的 MFC 前驱体粒径分布拟合为单峰，峰型较为对称，表明颗粒生长均匀；且根据表 3 的粒径分布结果可知，其颗粒粒径整体小于金属盐浓度为 80 g/L 时的 MFC 前驱体颗粒粒径，仅有少部分较大的颗粒团聚体存在，D10 仅为 3.669 μm 。当金属盐浓度增加到 120 g/L 时，前驱体的颗粒粒径整体较小，但存在小部分粒径较大的颗粒，从而导致粒径分布直方图拟合后出现双峰。

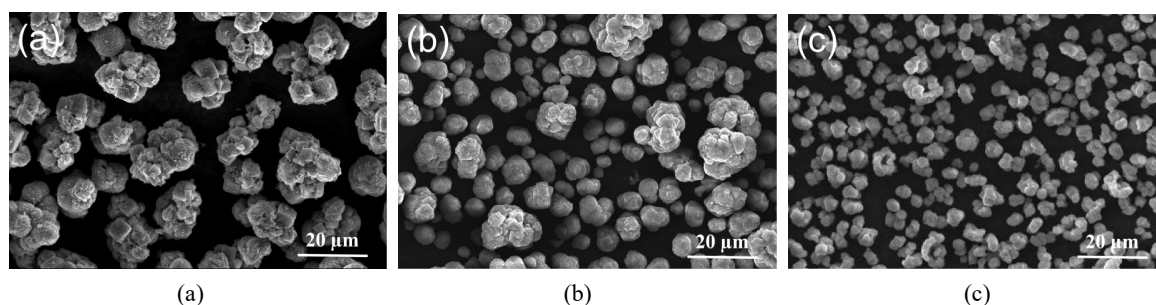


Figure 1. SEM of manganese iron carbonate precursor at different liquid metal concentrations: (a) experiment 1, (b) experiment 2, (c) experiment 3

图 1. 不同金属液浓度下碳酸锰铁前驱体的 SEM：(a) 实验 1；(b) 实验 2；(c) 实验 3

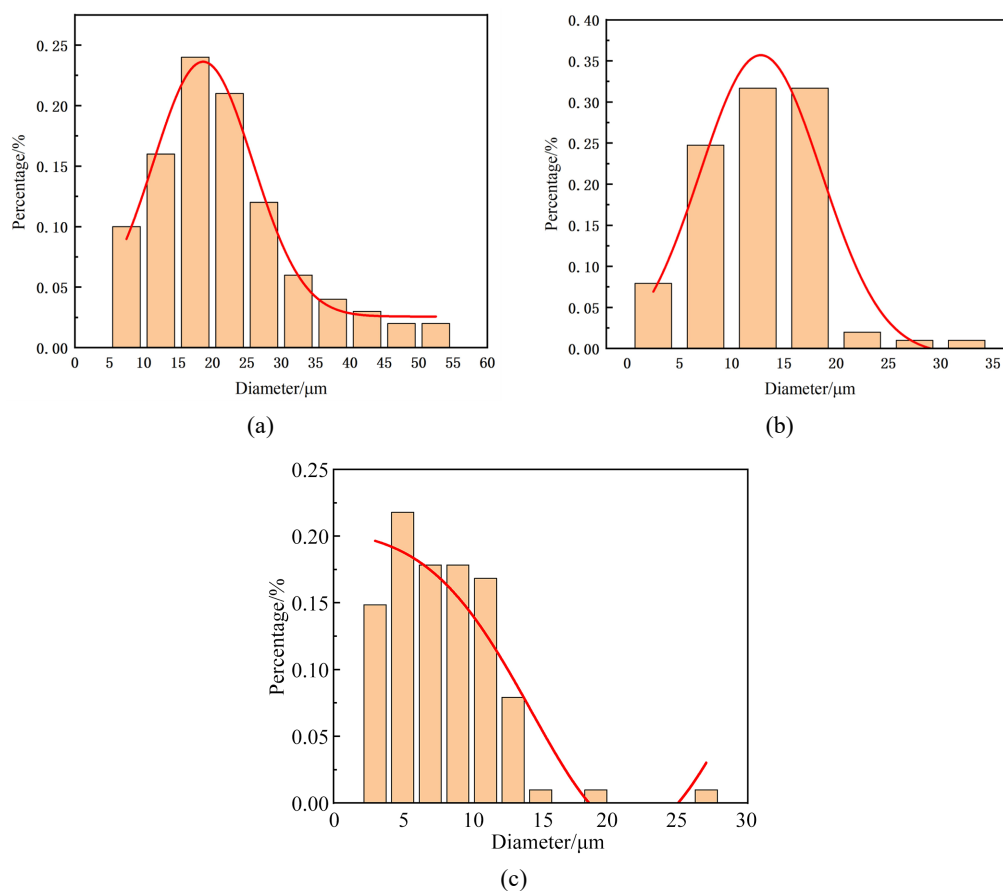


Figure 2. Particle size distribution histogram of manganese iron carbonate precursor at different liquid metal concentrations: (a) experiment 1, (b) experiment 2, (c) experiment 3

图 2. 不同金属液浓度下碳酸锰铁前驱体的粒径分布直方图：(a) 实验 1；(b) 实验 2；(c) 实验 3

Table 3. Particle size distribution results of manganese iron carbonate precursor**表 3.** 碳酸锰铁前驱体粒径分布结果

实验编号	D10 (μm)	D25 (μm)	D50 (μm)	D75 (μm)	D90 (μm)	D100 (μm)
1	8.859	11.87	16.1	21.43	26.99	53.21
2	3.669	5.796	8.16	13.58	16.71	33.8
3	3.325	4.425	5.972	8.739	12.87	26.16

3.1.3. 金属液浓度对碳酸锰铁前驱体理化性能的影响

制备的碳酸锰铁前驱体物化指标如下：

由表 4 可知，Mn、Fe 主品位满足要求，粒度 D50 与扫描结果所呈现的规律一致，在 5.5~16.5 μm 之间，BET 在 2~5 m^2/g 之间，Na 含量 <0.05%，S 含量 <0.08%，满足磷酸锰铁锂正极材料制备要求。其中发现随着锰铁溶液的浓度增加，前驱体中硫含量随之增加，这是最需要关注的负面现象，这可能是因为在高浓度、高过饱和度下，晶体生长速率极快。此时，溶液中的 SO_4^{2-} 来不及从生长界面扩散出去，就被快速沉积下来的 CO_3^{2-} 和金属离子形成的晶格“埋”在里面。这属于物理包夹，形成的缺陷较多。此外，高浓度的 SO_4^{2-} 在溶液中活度高，容易在晶体生长的活性位点上发生化学吸附，如果后续生长过快，这些吸附的 SO_4^{2-} 就会被覆盖并保留在颗粒内部。

Table 4. Physical and chemical indicators of experimental samples**表 4.** 实验样品物化指标

实验编号	Mn (%)	Fe (%)	S (%)	Na (%)	Mn/Fe	D50 (μm)	TD (g/cm^3)	BET (m^2/g)
1	27.94	20.20	0.0160	0.047	1.4061	16.10	1.44	3.9875
2	27.05	19.51	0.0421	0.041	1.4094	10.16	1.78	2.657
3	26.63	19.19	0.0743	0.035	1.4107	5.972	1.61	4.8273

3.1.4. 金属液浓度对磷酸锰铁锂正极材料电性能的影响

正极材料电性能测试数据如表 5，由表 5 可知，改变金属液浓度后电性能也随之发生变化，其中金属盐浓度为 100 g/L 时电性能最优，0.1C 克容量为 155.25 mAh/g，1C 克容量为 146.19 mAh/g，1C 循环 200 周容量保持率 95.1%，满足下游客户需求，实验 3 当金属盐浓度为 120 g/L 时电性能下降可能归因于硫元素的影响。当金属盐浓度为 100 g/L 时正极材料的压实密度最高，为 2.3517 g/cm^3 ，这可能受益于大小颗粒的级配效果。

Table 5. Electrochemical performance test data of LMFP cathode materials prepared from manganese iron carbonate precursors**表 5.** 碳酸锰铁前驱体制备的 LMFP 正极材料电性能测试数据

实验编号	0.1C (mAh/g)	0.2C (mAh/g)	0.5C (mAh/g)	1C (mAh/g)	压实密度 (g/cm^3)	循环寿命 (3000 次)	低温容量 (-20°C)
1	150.72	149.61	146.91	141.65	2.1232	>80%	>75%
2	155.25	154.28	151.37	146.19	2.3517	>80%	>75%
3	152.16	151.07	147.47	142.67	2.2904	>80%	>75%

3.2. 碳酸锰铁前驱体物相分析结果

通过图 3 对制备的碳酸锰铁前驱体的 XRD 衍射图分析, 得到的碳酸锰铁前驱体为纯相结构。

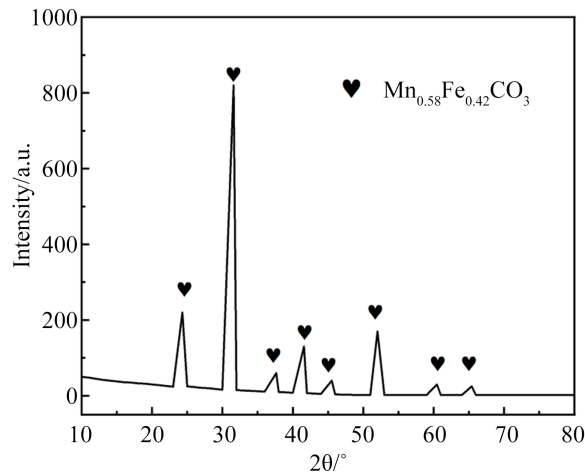


Figure 3. XRD diffraction pattern of manganese iron carbonate precursor in Experiment 2
图 3. 实验 2 碳酸锰铁前驱体的 XRD 衍射图

3.3. 制备的碳酸锰铁锂正极材料微观形貌

图 4(a)和图 4(b)分别为在金属盐浓度为 100 g/L 的条件下制备的碳酸锰铁前驱体通过进一步处理所制得的磷酸锰铁锂正极材料的低倍和高倍 SEM 图像。从图 4(a)可以看出, 材料呈现出典型的双粒径分布特征: 大量亚微米级(100~500 nm)的一次颗粒相互团聚, 形成尺寸在 1~3 μm 的多孔二次团聚体, 同时存在少量尺寸更大的孤立颗粒。这种多尺度的颗粒堆积结构, 一方面通过细小颗粒的紧密排列提高了材料的压实密度, 有利于提升电池的体积能量密度; 另一方面, 二次颗粒内部的多孔结构为电解液的浸润和锂离子的快速传输提供了充足的通道。

在图 4(b)中, 可清晰观察到一次颗粒的精细形貌。一次颗粒主要呈类球形或椭球形, 尺寸集中在 100~300 nm 之间, 表面相对光滑, 结晶度良好。部分一次颗粒之间存在明显的颈状连接, 这是高温煅烧过程中颗粒间发生固相烧结的结果, 有助于在电极内部构建连续的电子导电路径。此外, 部分颗粒表面覆盖有一层薄而均匀的无定形物质, 这应是在合成过程中引入的碳包覆层。该碳包覆层不仅能有效提高材料的电子电导率, 改善其倍率性能, 还能抑制颗粒在煅烧过程中的过度生长, 从而精确控制一次颗粒的尺寸。

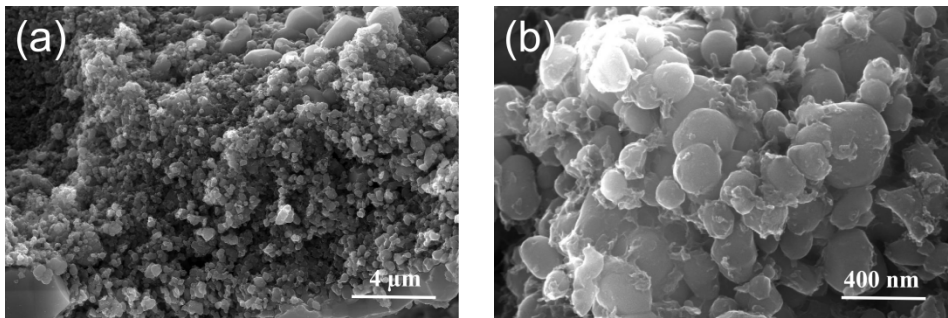


Figure 4. Microscopic morphology of lithium iron manganese carbonate prepared in Experiment 2
图 4. 实验 2 制备的碳酸锰铁锂微观形貌

综上所述,该 LMFP 材料的微观形貌特征(亚微米级一次颗粒、多孔二次团聚体以及均匀的碳包覆层)使其在能量密度、倍率性能和循环稳定性之间实现了良好的平衡,为其在高能量密度锂离子电池中的应用奠定了结构基础。

3.4. EDS 结果分析

3.4.1. 碳酸锰铁前驱体 EDS 结果

通过表 6 中 Mn、Fe 重量百分数看到,对同一批次产品碳酸锰铁前驱体不同点位(图 5 区域 1~6)进行 EDS 点扫描,得出数据 Mn 含量在 27.44%~27.60%,Fe 含量在 19.72%~19.94%之间,Mn、Fe 波动均<0.25%,实现了前驱体元素原子级的高度均匀分布。原因主要有以下几方面:1) 在并流共沉淀过程中,锰铁混合溶液与碳酸钠溶液同时、恒定地加入到反应釜中。通过精确控制加料速率、pH 值和温度,可以使反应体系始终处于高过饱和度状态,高过饱和度导致爆发式成核。瞬间生成的大量晶核迫使 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 在成核阶段就必须共同进入晶格,而不是先后沉淀。这种强制性的共成核机制是原子级混合的第一步;2) 并流加料配合高剪切力搅拌,使得每一滴锰铁溶液在进入反应釜的瞬间,就能接触到足够多的碳酸根离子,迅速发生沉淀反应。它消除了反应器内由于加料点局部过浓导致的“微观不均匀性”,确保了反应釜内任意微小区域的化学环境(离子浓度、pH)都是均一的;3) 不同金属离子与氨的络合常数不同,导致它们在溶液中的游离离子浓度不同,释放速率也不同。这就造成了沉淀不同步,且络合物残留在溶液中还会导致金属回收率低。但采用碳酸钠为沉淀剂时, Na^+ 与 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 几乎不发生络合反应。 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 在溶液中主要以水合离子形式存在,活性极高且行为一致。当遇到 CO_3^{2-} 时,两者完全遵循相同的化学热力学和动力学规律进行沉淀,没有络合-解离这一复杂过程的干扰;4) 碳酸氢铵-氨水体系需要靠氨水来调节 pH,而氨水易挥发,导致 pH 值波动大。Mn 和 Fe 的碳酸盐溶度积(K_{sp})存在差异,pH 波动会放大这种差异,导致一种离子先沉淀、另一种后沉淀(分步沉淀)。而碳酸钠本身就是一种碱,且缓冲性能良好。在并流过程中,只要控制得当,反应体系的 pH 值可以维持在极其狭窄的波动范围内。稳定的 pH 确保了 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 的沉淀速率高度同步,避免了因 pH 漂移导致的局部富 Mn 或富 Fe。基于以上原因,最终实现了碳酸锰铁前驱体元素原子级的高度均匀分布。

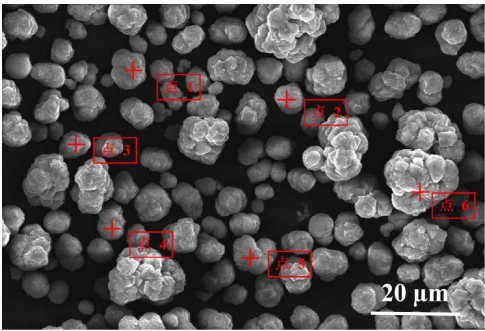


Figure 5. EDS spot analysis image of manganese iron carbonate precursor in Experiment 2
图 5. 实验 2 碳酸锰铁前驱体 EDS 点分析图像

Table 6. Experiment 2 manganese iron carbonate precursor
表 6. 实验 2 碳酸锰铁前驱体 EDS 扫描数据

元素	点 1	点 2	点 3	点 4	点 5	点 6
	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%
C	10.46	10.44	10.47	10.52	10.41	10.47

续表

O	42.12	42.15	42.12	42.23	42.10	42.11
Mn	27.53	27.57	27.50	27.44	27.60	27.48
Fe	19.89	19.84	19.91	19.81	19.72	19.94
总量	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

3.4.2. 制备的碳酸锰铁锂正极材料 EDS 结果

通过对图 6 同一批次产品磷酸锰铁锂正极材料不同点位(图 6 区域 1~6)进行 EDS 点扫, 得出数据 Mn 含量在 20.78%~21.04%, Fe 含量在 15.13%~15.33%之间, 两者波动均小于 0.3%, 这证实了前驱体在微米尺度上优异的成分均匀性充分继承到了正极材料上(表 7)。

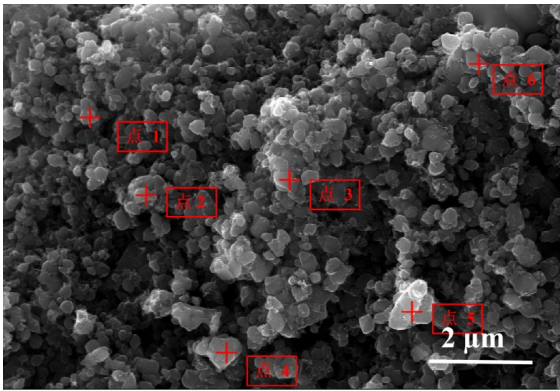


Figure 6. EDS spot analysis image of the lithium iron manganese carbonate cathode material in Experiment 2
图 6. 实验 2 碳酸锰铁锂正极材料 EDS 点分析图像

Table 7. Experiment 2 EDS point analysis of lithium iron manganese carbonate cathode material
表 7. 实验 2 碳酸锰铁锂正极材料 EDS 点扫描数据

元素	点 1	点 2	点 3	点 4	点 5	点 6
	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%
Li	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C	2.52	2.63	2.51	2.60	2.58	2.61
O	40.49	40.61	40.37	40.18	40.48	40.38
P	20.87	20.76	20.97	20.85	20.96	20.82
Mn	20.91	20.87	20.88	21.04	20.78	20.95
Fe	15.21	15.13	15.27	15.33	15.20	15.24
总量	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

4. 结论

本文以硫酸亚铁、硫酸锰、碳酸钠为原料, 通过液相共沉淀法合成了碳酸锰铁前驱体, 通过对锰、铁混合金属液浓度、Mn/Fe 摩尔比、流量、pH 值、陈化时间、温度的精准控制, 成功制备出锰铁元素高度均匀分布的碳酸锰铁前驱体, 并继承到了该前驱体所制备的 LMFP 正极材料中、该 LMFP 材料兼具高

电压平台(4.1 V)与长循环寿命, 0.1C 克容量为 155.25 mAh/g, 1C 克容量为 146.19 mAh/g, 1C 循环 200 周容量保持率 95.1%, 压实密度达到 2.3517 g/cm³, 为碳酸锰铁锂正极材料提高性能优势提供了解决方案。

参考文献

- [1] Vanaphuti, P., Scanlan, K. and Manthiram, A. (2024) Ammonia-Free Synthesis of Lithium Manganese Iron Phosphate Cathodes via a Co-Precipitation Reaction. *RSC Sustainability*, **2**, 1969-1978. <https://doi.org/10.1039/d4su00125g>
- [2] Minh, D.V., Ri, V., Lim, J., Nam, N.C., Hieu, N.M. and Kim, C. (2025) Synthesis of Highly Dense and Spherical Carbonate Mn_{0.5}Fe_{0.5}CO₃ Precursor for LiMn_{0.5}Fe_{0.5}PO₄ Cathode Material. *Electronic Materials Letters*, **21**, 590-598. <https://doi.org/10.1007/s13391-025-00575-7>
- [3] Xiong, Y., Liu, D., Li, H., Tian, S., Liu, L., Liu, X., *et al.* (2026) Development and Industrialization Prospects of Lithium Manganese Iron Phosphate Cathode Material Technology. *Journal of Energy Storage*, **166**, Article ID: 122440. <https://doi.org/10.1016/j.est.2026.122440>
- [4] Cao, Y.L., Chen, Z., Liu, P. and Xie, Y. (2026) N Doping Promotes the Multiplication Capability and Cycling Stability of Cobalt-Free Lithium-Rich Layered Cathode Materials. *Journal of Power Sources*, **661**, Article ID: 238623. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.238623>
- [5] Olivetti, E.A., Ceder, G., Gaustad, G.G. and Fu, X. (2017) Lithium-Ion Battery Supply Chain Considerations: Analysis of Potential Bottlenecks in Critical Metals. *Joule*, **1**, 229-243. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2017.08.019>
- [6] 刘德波, 张萍, 杨丁诚, 等. 具有高导电性的镁掺杂 LiMn_{0.6}Fe_{0.4}PO₄/C 复合物正极材料的性能研究[J]. 黄河科技学院学报, 2025, 27(8): 9-17.
- [7] Liu, P., Cao, Y., Chen, Z. and Xie, Y. (2025) Enhancement of Cathode Superior Kinetics and Li-Storage Properties of LiMn_{0.5}Fe_{0.5}PO₄@C Cathode Materials by Ni Doping Strategy. *Electrochimica Acta*, **524**, Article ID: 145991. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2025.145991>
- [8] 徐斌, 席多祥, 丁一娇, 冯宛苒, 杨萍. 液相共沉淀法制备磷酸锰铁前驱体工艺研究及应用[J]. 材料科学, 2026, 16(2): 193-204.
- [9] Wang, M., Wu, H., Nan, H. and Luo, J. (2026) High Rate LiMn_{0.6}Fe_{0.4}PO₄ Prepared by a Carbonate Precursor and Al₂O₃ Coating. *Electrochimica Acta*, Article ID: 149540. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2026.149540>
- [10] 袁明哲, 李天祥, 顾小玉, 等. 锂离子电池正极材料磷酸锰铁锂前驱体研究进展[J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2026, 41(3): 62-70.
- [11] 王智君, 宫东杰, 罗显明, 等. 一种复合多晶结构石墨烯磷酸锰铁锂及其制备方法和应用: CN115133025B [P]. 2025-09-19.
- [12] 贾雨, 陈慧, 刘梦娜, 等. 共沉淀法可控制备磷酸锰铁锂正极材料研究进展[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(2): 419-434.
- [13] 童功松, 李智, 梁富忠. 两步法共沉淀制备磷酸锰铁[J]. 化工管理, 2025(21): 152-154.
- [14] 唐杰峰, 王子俊, 陈奇志, 等. 磷酸锰铁锂正极材料的制备与改性策略[J]. 中国锰业, 2024, 42(4): 1-9+19.