

# 高速剪切混合法制备均匀 $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$ 及其性能研究

宗 军<sup>1,2\*</sup>, 栗 煜<sup>1</sup>, 肖滢春<sup>1</sup>, 曹宇奇<sup>1</sup>, 汪天洋<sup>2\*</sup>

(1. 天津职业大学生物与环境工程学院, 天津 300410;

2. 天津大学理学院, 天津市分子光电科学重点实验室, 天津 300072)

**摘要:**针对固相法制备  $\text{LiFe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}$  材料过程中, 传统球磨混合法存在混合时间长、能耗高的问题, 探索了一种高速剪切混合法的高效替代工艺, 并系统研究了由其制备的  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  材料的理化性质与电化学性能。通过 X 射线衍射 (XRD)、扫描电镜结合能谱仪 (SEM-EDS) 和透射电镜 (TEM) 等表征手段, 证实高速剪切混合法可在极短时间 (15 min) 内实现反应物元素的均匀分散, 且所得材料在 650°C 下烧结后结晶良好, 形成厚度约 2~3 nm 的均匀无定形碳包覆层。电化学性能测试表明, 该材料在 0.05 C 倍率下放电比容量达 139 mAh/g, 且循环稳定性优异 (200 次循环后容量保持率约 92%), 其综合性能与传统球磨 12 h 制备的样品相当。结果证明, 高速剪切混合法是一种高效、可靠的固相合成工艺, 为高性能锂离子电池正极材料的快速、低能耗制备提供了新的可行方案。

**关键词:** 高速剪切; 球磨; 正极材料;  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$

中图分类号: TM912.9; O646.2

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)06-0158-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.06.026

## Study on preparation of uniform $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$ via high-speed shear mixing and its electrochemical performance

ZONG Jun<sup>1,2\*</sup>, LI Yu<sup>1</sup>, XIAO Ying-chun<sup>1</sup>, CAO Yu-qi<sup>1</sup>, WANG Tian-yang<sup>2\*</sup>

(1. School of Biological and Environmental Engineering, Tianjin Vocational Institute, Tianjin 300410, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Molecular Optoelectronic Sciences, School of Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Addressing the issues of long mixing time and high energy consumption associated with the traditional ball-milling method in the solid-state synthesis of  $\text{LiFe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}$  materials, this study explores a high-speed shear mixing process as an efficient alternative. The physicochemical properties and electrochemical performance of the  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  material prepared via this route are systematically investigated. Characterization techniques including X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy with energy-dispersive spectroscopy (SEM-EDS), and transmission electron microscopy (TEM) confirmed that high-speed shear mixing enables uniform dispersion of reactant elements within a significantly shorter time (15 minutes). The material sintered at 650°C exhibited good crystallinity and a uniform amorphous carbon coating layer with a thickness of approximately 2–3 nm. Electrochemical tests revealed that the material delivered a discharge specific capacity of 139 mAh·g<sup>-1</sup> at 0.05 C rate and demonstrated excellent cycling stability (~92% capacity retention after 200 cycles). Its overall performance was comparable to that of the sample prepared via traditional ball-milling for 12 hours. It demonstrates that high-speed shear mixing is an efficient and reliable solid-state synthesis process, offering a new feasible strategy for the rapid and low-energy-consumption preparation of high-performance lithium-ion battery cathode materials.

**Key words:** high-speed shear mixing; ball-milling; cathode material;  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$ .

锂离子电池因其高能量密度、长循环寿命、低自放电率以及无记忆效应等优点, 自 20 世纪 90 年代商业化以来, 迅速成为便携式电子设备、电动汽车 (EV) 和储能系统 (ESS) 的核心动力源<sup>[1-4]</sup>。根据国际能源署 (IEA) 于 2024 年发布的《电池和能源安全转型》报告, 2023 年全球电动汽车销量达 1 400 万辆, 动力电池部署规模同比增长超 40%, 成为了电

池消费的绝对主力<sup>[5]</sup>。目前, 全球范围内, 锂离子电池在电动汽车与储能领域均占据主导地位; 值得注意的是, 2023 年磷酸铁锂 ( $\text{LiFePO}_4$ ) 电池在动力电池市场的份额已攀升至 40%, 在储能电池市场更是高达 80%<sup>[5]</sup>。

$\text{LiFePO}_4$  之所以能获得如此高的市场占比, 主要源于其优异的热稳定性及循环性能。然而, 其较

收稿日期: 2026-01-22; 修回日期: 2026-03-31

基金项目: 天津市企业科技特派员项目 (25YDTPJC00300)

作者简介: 宗军 (1987-), 男, 博士, 高级工程师、副教授, 研究方向为储能材料及相关储能体系研究, 通讯联系人, zongjun2007@126.com; 汪天洋 (1988-), 男, 博士, 教授, 研究方向为有机功能材料及储能材料研究, 通讯联系人, tianyangwang@tju.edu.cn。

低的工作电压平台 ( $\sim 3.4 \text{ V vs. Li}^+/\text{Li}$ ) 导致能量密度受限,这成为制约其进一步发展的关键瓶颈<sup>[6]</sup>。为突破此限制,研究者们通过引入锰(Mn)元素进行改性,开发出  $\text{LiFe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{PO}_4$  固溶体材料。该材料在保持  $\text{LiFePO}_4$  高安全、低成本、环境友好等优点的同时,凭借更高的电压平台,可实现更高的能量密度,已成为当前锂离子电池正极材料的研究热点之一。材料的性能与成本在很大程度上取决于其制备方法,这也直接关系到其商业化应用前景。 $\text{LiFe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{PO}_4$  材料的制备方法主要包括:固相法、共沉淀法、溶胶-凝胶法、水热/溶剂热法<sup>[6-11]</sup>。其中,固相法工艺简单、适合规模化生产,因其高效、低成本的特点,成为大批量制备  $\text{LiFe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{PO}_4$  材料的首选方法。在固相法工艺中,球磨是实现原料均匀混合的关键步骤,但传统球磨工艺通常存在混合时间长、能耗高、效率偏低等问题。因此,开发一种高效、快速的均匀混合替代工艺具有重要意义。

与传统球磨法相比,高速剪切混合法通过高强度剪切与冲击力的协同作用,可在更短时间内实现物料的统一分散。基于此,本研究探索采用高速剪切混合法制备  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  材料,并对其进行了系统的理化表征。而后对球磨法所得材料进行了电化学性能比较。研究发现,高速剪切混合法制备  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  材料中元素分布均匀;在混合

时间显著缩短的条件下,其电化学性能与球磨法样品相当。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

磷酸二氢铵 ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ )、醋酸锰四水合物 [ $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ]、草酸铁(II)二水合物 ( $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )、乙酸锂二水合物 ( $\text{LiCH}_3\text{COO} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )、蔗糖、无水乙醇等,均为分析纯,西格玛奥德里奇(Sigma-Aldrich)试剂有限公司生产;导电炭黑、聚四氟乙烯、电解液等,均为电池级,阿拉丁试剂有限公司生产;锂片购自天津中能锂业,厚度  $0.45 \text{ mm}$ ,纯度  $99.9\%$ 。

高速剪切分散机为德国 IKA T25 型数显型分散机;球磨机为 QM-3SP4 型行星式球磨机,南京南大仪器有限公司生产;X 射线衍射分析仪器(XRD, D/max 2400 V 型, Rigaku);扫描电子显微镜(SEM, S480 型,日本 Hitachi);透射电子显微镜(HRTEM, Tecnai G2 F20 型,美国 FEI 公司);充放电测试仪器(LAND-CT2001A 型,武汉市蓝电电子股份有限公司)。

### 1.2 $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$ 材料的制备

高速剪切与球磨工艺制备  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  材料的总体方案如图 1 所示。

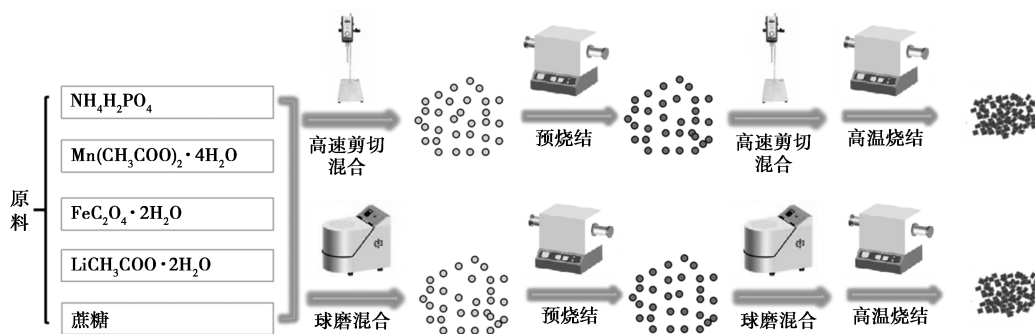


图 1 高速剪切和球磨工艺制备  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  材料的流程图

高速剪切工艺:取  $0.04 \text{ mol}$   $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、 $0.04 \text{ mol}$   $\text{Mn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $0.04 \text{ mol}$   $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $0.04 \text{ mol}$   $\text{LiCH}_3\text{COO} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  以及  $2.8 \text{ g}$  蔗糖,放入  $300 \text{ mL}$  烧杯中,加入  $80 \text{ mL}$  无水乙醇,在冰浴中利用高速剪切分散机分散  $10 \text{ min}$  (转速为  $10\,000 \text{ r/min}$ ),分散完成后在  $80^\circ\text{C}$  鼓风干燥箱中将乙醇去除后得前驱体;将前驱体在  $\text{N}_2/\text{H}_2$  ( $92\% \text{ N}_2 + 8\% \text{ H}_2$ ) 气氛下,  $350^\circ\text{C}$  预烧结  $4 \text{ h}$  得粉体;将粉体置于  $250 \text{ mL}$  烧杯中,并加入  $40 \text{ mL}$  无水乙醇,在冰浴中利用高速剪切分散机分散  $5 \text{ min}$  (转速为  $10\,000 \text{ r/min}$ ),分散完成后在  $80^\circ\text{C}$  鼓风干燥箱中将乙醇去除后得初产物;将初产

物在  $\text{N}_2/\text{H}_2$  ( $92\% \text{ N}_2 + 8\% \text{ H}_2$ ) 气氛下,高温 ( $500$ 、 $550$ 、 $600$ 、 $650$ 、 $700^\circ\text{C}$ ) 烧结  $6 \text{ h}$  得最终样品(样品中碳的质量分数约为  $10\%$ ),分别标记为 S500、S550、S600、S650、S700。

球磨工艺:物料量、烧结条件、气氛等均与高速剪切工艺保持一致,区别在于高速剪切混合步骤均换成球磨混合,球磨条件为:球磨转速为  $400 \text{ r/min}$ ,球磨时间  $6 \text{ h}$ 。将  $650^\circ\text{C}$  的烧结产物标记为 M650。

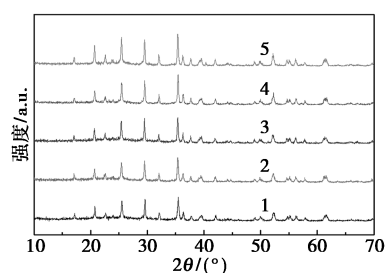
### 1.3 电化学性能测试

利用 2430 扣式电池对  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  材料的电化学性能进行表征。将不同碳材料、导电炭黑

与聚偏二氟乙烯 (PVDF) 以质量比 9:0.5:0.5 的比例搅拌成均匀浆料,而后将其涂布在铝箔上,经过干燥、滚压、冲片、干燥后得到正极。负极则采用金属锂片,电解液是  $\text{LiPF}_6$  溶解于体积比为 1:1:1 的碳酸乙烯酯、碳酸二甲酯与碳酸二乙酯 (浓度为 1 mol/L)。充放电测试电压范围为 2.2~4.5 V (vs.  $\text{Li}/\text{Li}^+$ ); 测试温度为 25℃。

## 2 结果与讨论

为确定  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  材料的最优合成温度,将经 350℃ 预烧结的前驱体分别在 500、550、600、650℃ 及 700℃ 下进行烧结。图 2 展示了所得样品 (标记为 S500-S700) 的 X 射线衍射 (XRD) 图谱。所有衍射峰均能检索为斜方晶系 Pnma 空间群,且未观察到  $\text{Li}_3\text{PO}_4$ 、 $\text{Fe}_2\text{P}_2\text{O}_7$  和  $\text{Mn}_2\text{P}_2\text{O}_7$  等常见杂质的衍射峰<sup>[6,8,12-13]</sup>。这表明采用的高速剪切混合法能够实现反应物的均匀分散,该结论在后续的能谱仪 (EDS) 元素分析中得到了进一步验证。此外,所有图谱中均未出现碳的结晶衍射峰,说明蔗糖热解生成的碳以非晶态形式存在。随着烧结温度升高,衍射峰的半峰宽逐渐变窄,这主要源于材料晶粒尺寸的增大以及结晶完整性的提高<sup>[13]</sup>。因此,材料的电化学性能 (如结构稳定性和锂离子扩散动力学) 将受到直接影响。

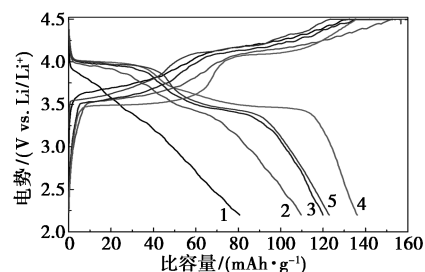


1—S500;2—S550;3—S600;4—S650;5—S700

图 2 不同温度烧结条件所得  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  材料的 XRD 谱图

对样品 S500-S700 进行了恒流充放电测试 (充/放电倍率:0.05 C,即 8.5 mA/g)。图 3 展示了它们的首圈充/放电曲线。S500 的充电曲线在约 4.2 V 和 3.6 V (vs.  $\text{Li}/\text{Li}^+$ ) 处分别出现了  $\text{Mn}^{2+}/\text{Mn}^{3+}$  和  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  的氧化平台,但其放电曲线平台不明显,这归因于过低的烧结温度导致材料结晶性差、结构不稳定,从而使得电化学反应可逆性低。样品 S550 至 S700 的放电曲线均出现了对应的还原平台 (约 4.0 V 和 3.5 V)。然而,S550 的平台仍不显著,

且容量较低,表明其结晶完整性和结构稳定性依然不足。当烧结温度升至 600℃ 时,材料的结构稳定性显著改善,充放电平台变得平坦。但 S600 的放电比容量 (124 mAh/g) 却低于 S650 (139 mAh/g)。这可能是由于 600℃ 下热解碳的石墨化程度或导电性仍不理想,限制了材料的性能<sup>[6,12-13]</sup>。值得注意的是,当温度进一步升至 700℃ 时,S700 的可逆容量下降至 120 mAh/g。这主要是因为过高的温度导致晶粒过度生长和颗粒团聚,增大了锂离子和电子的传输阻力<sup>[10,13-15]</sup>。综合来看,S650 在结构稳定性、碳导电性及颗粒形貌之间取得了最佳平衡,因而表现出最高的可逆容量。因此,将 650℃ 确定为最优的烧结温度。



1—S500;2—S550;3—S600;4—S650;5—S700

图 3 不同温度烧结条件所得  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  材料的充放电曲线

反应物元素 (Mn、Fe、P、C 等) 的分布均匀性是评估高速剪切混合工艺能否有效替代传统球磨法制备  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  材料的关键。图 4 展示了 S650 样品某一典型区域的 SEM-EDS 元素面分布图。

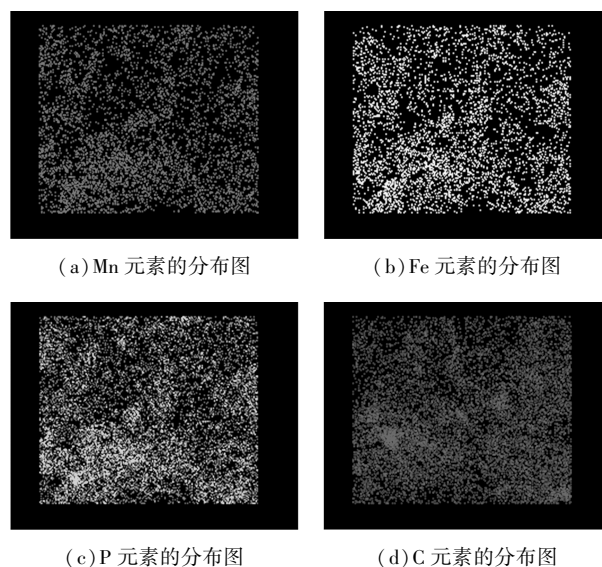


图 4 最优的  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  材料 S650 的任选区域的元素分布图

各元素的信号分布均一,这直接证明了高速剪切混合能够实现反应物在微观尺度上的均匀分散。

进一步,对该区域进行了EDS能谱分析(图5)。谱图仅显示出Mn、Fe、P、O和C的特征峰,在仪器检测限内未发现其他杂质元素,表明制备过程未引入外来杂质。谱中未出现Li的特征峰,这主要是因为扫描电镜的电子束能量通常不足以激发锂元素的特征X射线<sup>[16-17]</sup>。表1列出了各元素的定量结果(重量百分比与原子百分比)。其中,Fe与Mn的原子比接近1:1,且P的原子百分比与(Fe+Mn)之和基本相当,这与材料的理论化学计量比相符。然而,C与O的测量含量与理论值偏差较大,这是由于EDS对轻元素(C、O)的定量分析通常存在较大误差<sup>[16-17]</sup>,因此其定量结果仅作参考。

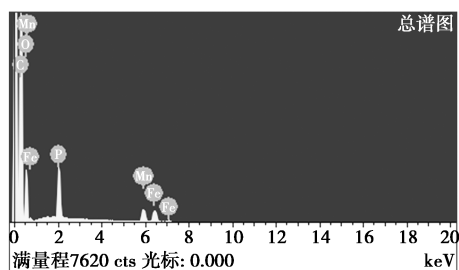


图5 最优的  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  材料 S650 的  
任选区域的元素分析谱图

表1 最优的  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  材料 S650 的  
任选区域的元素含量汇总

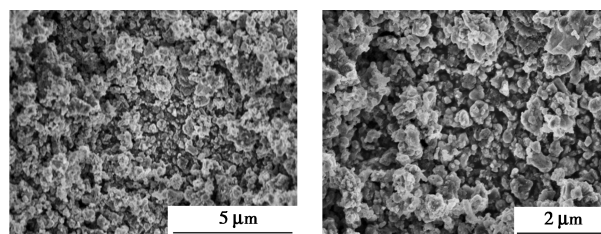
元素	重量百分比	原子百分比
C	67.78	76.89
O	24.12	20.54
P	3.00	1.32
Mn	2.57	0.64
Fe	2.53	0.62
总量	100.00	

综上所述,EDS分析结果从元素分布和种类两方面证实:采用高速剪切混合工艺,能够在避免引入杂质的前提下,实现反应物的均匀混合。因此,在制备  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  材料时,高速剪切混合可以作为一种有效的替代方案,以取代传统的球磨工艺。

图6展示了最优样品S650的扫描电镜(SEM)与透射电镜(TEM)图像。SEM图像[图6(a)、(b)]显示,材料颗粒的形貌与尺寸分布存在一定范围,这可能与固相反应过程的局部不均匀性有关。较高放

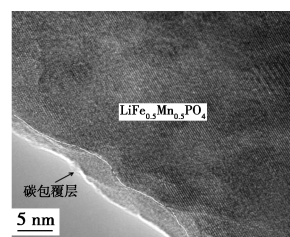
大倍率的图像表明,颗粒尺寸主要分布在100~400 nm。这种亚微米尺度的颗粒有助于缩短锂离子和电子的传输路径,从而对提升材料的电化学性能有利<sup>[6,10,13,15,18]</sup>。

从TEM图像[图6(c)]可以观察到,材料呈现出清晰的核/壳结构(图中以红线为分界线)。内部  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$  晶核可见明显的晶格条纹,而外部的蔗糖热解碳层则为无定形结构,这与XRD未检测到结晶碳的结论一致。此外,测得碳包覆层的厚度约为2~3 nm。如此薄且均匀的碳层能够在颗粒表面形成有效的导电网络,同时因其厚度极小,几乎不会阻碍锂离子的嵌入与脱出,从而显著改善材料的倍率性能和循环稳定性等<sup>[6,13,19]</sup>。



(a) 材料的扫描电镜图

(b) 材料的扫描电镜图



(c) 材料透射电镜图

图6 最优的  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  材料 S650 的  
电镜照片

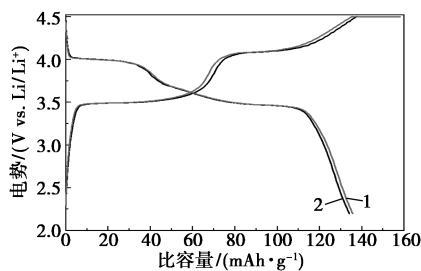
综合前述表征结果,在制备  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  材料时,采用高速剪切混合工艺可在避免引入杂质的同时实现反应物的均匀混合。这表明该工艺具备替代传统球磨法的潜力。为直接验证其可行性,对2种工艺所制备的样品(S650与M650)进行了系统的电化学性能对比。

图7(a)展示了二者在0.05 C倍率下的首圈充放电曲线。二者均在约4.0 V和3.5 V(vs.  $\text{Li}/\text{Li}^+$ )处呈现出平坦的  $\text{Mn}^{2+}/\text{Mn}^{3+}$  与  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  氧化还原平台,表明材料均具有良好的结构稳定性。S650的放电比容量(139 mAh/g)与M650(137 mAh/g)相当。

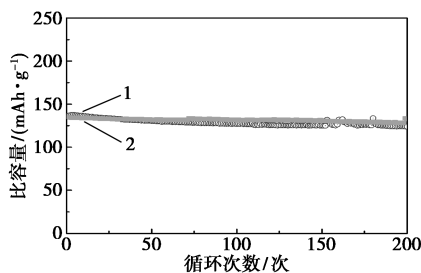
图7(b)对比了二者在0.1 C倍率下的循环性能。经过200次循环后,S650与M650的容量保持率均约为92%,表现出优异的循环稳定性。这主要得益于材料本身稳定的晶体结构以及均匀的碳包覆

层所提供的保护<sup>[6,13,19-20]</sup>。

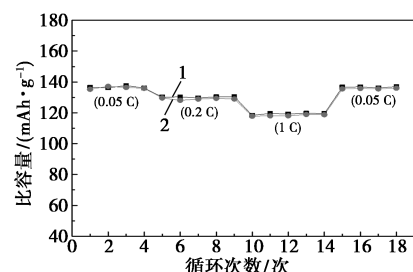
图 7(c) 的倍率性能测试进一步显示, 在 0.05~1 C 的不同电流密度下, 2 种材料的放电比容量均无明显差异: 在 0.2 C 和 1 C 倍率下, 比容量分别为 131、120 mAh/g。当倍率从 1 C 恢复到 0.05 C 时, 容量均可完全恢复, 表明二者均具有良好的结构可逆性和动力学性能<sup>[6,13,19-20]</sup>。



(a) 2 种样品的恒流充/放电曲线



(b) 2 种样品的循环性能曲线



(c) 2 种样品的倍率性能曲线

1—S650; 2—M650

图 7 高速剪切和球磨所得  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  材料的电化学性能测试结果

综上所述, 电化学测试结果表明, 采用高速剪切混合工艺 (仅 15 min) 所制备的 S650, 在可逆容量、循环稳定性及倍率性能方面, 均与采用传统球磨工艺 (12 h) 所制备的 M650 表现相当。结合元素分布均匀且无杂质引入的结构表征, 本研究证实, 高速剪切混合是一种高效且可靠的替代方案, 可用于制备高性能的  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  材料。该方法有望为其他锂/钠离子电池电极材料的固相法合成提供一种新的高效混合策略, 对推动材料的规模化制备与应用具有积极意义。

### 3 结论

本研究成功将高速剪切混合法应用于  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  正极材料的固相合成中。结果表明, 该工艺能够显著缩短前驱体的混合时间 (从球磨法的数小时缩短至 15 min), 并实现反应物在微观尺度上的均匀分散, 且未引入外来杂质。系统表征确定 650℃ 为最优烧结温度, 此时材料结晶完整, 并形成均匀的薄层无定形碳包覆, 有利于锂离子和电子的传输。电化学性能对比分析证实, 高速剪切混合法制备的样品在可逆容量、循环稳定性和倍率性能方面均与传统球磨法制备的样品相当, 验证了该替代工艺在保证材料性能前提下的高效性与可行性。因此, 高速剪切混合法作为一种快速、低能耗的均匀化混合策略, 不仅为  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  材料的制备提供了新的有效途径, 也为其他锂/钠离子电池电极材料的固相法合成工艺优化与规模化生产提供了有价值的参考。

### 参考文献

- [1] Goodenough J B, Park K S. The Li-ion rechargeable battery: A perspective [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2013, 135 (4): 1167-1176.
- [2] Martin C. Driving change in the battery industry [J]. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9 (5): 327-328.
- [3] Nitta N, Wu F, Lee J T, et al. Li-ion battery materials: Present and future [J]. *Materials Today*, 2015, 18 (5): 252-264.
- [4] Beard K W. *Linden's handbook of batteries* [M]. New York: McGraw-Hill Education, 2019.
- [5] *Batteries and Secure Energy Transition. World Energy Outlook Special Report* [R]. Paris: International Energy Agency, 2024.
- [6] Julien C M, Mauger A, Vijn A, et al. *Lithium batteries: Science and technology* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018.
- [7] Zong J, Peng Q, Yu J, et al. Novel precursor of  $\text{Mn}(\text{PO}_3(\text{OH})) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  for synthesizing  $\text{LiMn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{PO}_4$  cathode material [J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 228: 214-219.
- [8] Fredj E B, Rousselot S, Danis L, et al. Synthesis and characterization of  $\text{LiFe}_{1-x}\text{Mn}_x\text{PO}_4$  ( $x = 0.25, 0.50, 0.75$ ) lithium ion battery cathode synthesized via a melting process [J]. *Journal of Energy Storage*, 2020, 27: 101116.
- [9] Jiang X, Li L, Wang X, et al. Concentration-gradient structural  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  prepared via Co-precipitation reaction for advanced lithium-ion batteries [J]. *ChemPhysChem*, 2024, 25 (11): e202300930.
- [10] Zou S, Qin X, Yuan W, et al. Structural evolution and cycling performance enhancement of  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4$  nanofibers as cathode materials for aqueous lithium-ion batteries [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2025, 46 (13): 39953-39959.

(下转第 169 页)

- [10] Chen X, Chen C, Zang J, *et al.* Construction of B-doped  $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{MoO}_3$  photocatalyst to promote light absorption and Z-scheme charge transfer [J]. *Diamond and Related Materials*, 2023, 132: 109606.
- [11] 韦迪哲, 翟文磊, 王渊, 等.  $\text{Au/g-C}_3\text{N}_4$  复合材料的制备及其可见光催化降解赭曲霉毒素 A 的性能 [J]. *食品工业科技*, 2025, 46(22): 291-297.
- [12] 马小帅, 陈范云, 余长林, 等.  $\text{Pt}^{2+}/\text{Pt}^0$  掺杂  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  光催化降解环丙沙星和偶氮染料 [J]. *无机化学学报*, 2020, 36(2): 217-225.
- [13] Khatun A, Suhag M H, Tateishi I, *et al.* Facile fabrication of  $\text{Ag/g-C}_3\text{N}_4$  photocatalyst with visible light responsive efficiency for Cr (VI) reduction in presence of EDTA [J]. *Environmental Processes*, 2024, 11(2): 1-22.
- [14] 杨忠雪, 陈建军, 王荣荣, 等.  $\text{Ag/}$ 多孔  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  复合光催化剂的制备及其降解四环素性能 [J]. *化学研究与应用*, 2022, 34(2): 335-340.
- [15] 高艳, 吴先应, 熊卓, 等.  $\text{Ag}$  负载  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  及其光催化还原  $\text{CO}_2$  研究 [J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(2): 5.
- [16] Mane S M, Teli A M, Beknalkar S A, *et al.* Cationic-surfactant (CTAB) pacitive performance [J]. *Crystals*, 2024, 14(4): 312.
- [17] 殷广明, 王杯尧, 郑建华, 等.  $\text{Ag/}$ 质子化  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  纳米棒材料的制备及其光催化降解性能 [J]. *无机化学学报*, 2024, 40(8): 1491-1500.
- [18] Nisha V, Sasi S C, Krishnan R, *et al.* S-doped  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  for fluorescence sensing of  $\text{Fe}^{3+}$  and photocatalytic dye degradation under solar light [J]. *Next Materials*, 2024, 2: 100082.
- [19] Cui Y, Wang Z, Li B, *et al.* Fluid-induced piezoelectric field enhancing photocatalytic hydrogen evolution reaction on  $\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{LiNbO}_3/\text{PVDF}$  membrane [J]. *Nano Energy*, 2022, 99: 107429.
- [20] Hou J, Zhang X, Wang K, *et al.* Synthesis of silver nanoparticles-modified graphitic carbon nitride nanosheets for highly efficient photocatalytic hydrogen peroxide evolution [J]. *Molecules*, 2022, 27(17): 5535.
- [21] El-Sabban H A, Mady A H, Diab M A, *et al.* Construction of novel dual Z-scheme heterojunction of ternary  $\text{CdS/g-C}_3\text{N}_4/\text{NiFe}_2\text{O}_4$  magnetically retrievable nanocomposite for boosted photocatalytic and energy storage applications [J]. *Surfaces and Interfaces*, 2024, 44: 103798.
- [22] Zhou M, Dong G, Yu F, *et al.* The deep oxidation of NO was realized by Sr multi-site doped  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  via photocatalytic method [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2024, 256: 117825.
- [23] Zhou A, Yang J, Zhu X, *et al.* Self-assembly construction of NiCo LDH/ultrathin  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  nanosheets photocatalyst for enhanced  $\text{CO}_2$  reduction and charge separation mechanism study [J]. *Rare Metals*, 2019, 41(6): 2118-2128.
- [24] Hou S, Gao X, Lv X, *et al.* Decade milestone advancement of defect-engineered  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  for solar catalytic applications [J]. *Nano-Micro Letters*, 2024, 16(4): 153-218.
- [25] Yan C, Zhao Z, Jin W, *et al.* Carbon quantum dots-doped  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  nanocomposites with enhanced piezoelectric catalytic performance [J]. *Composites Communications*, 2023, 37: 101466.
- [26] Mohapatra L, Paramanik L, Choi D, *et al.* Advancing photocatalytic performance for enhanced visible-light-driven  $\text{H}_2$  evolution and Cr (VI) reduction of  $\text{g-C}_3\text{N}_4$  through defect engineering via electron beam irradiation [J]. *Applied Surface Science*, 2025, 685: 161996.
- [27] Hussain A, Maqsood S, Ji R, *et al.* Investigation of transition metal-doped graphitic carbon nitride for MO dye degradation [J]. *Diamond and Related Materials*, 2023, 132: 109648.
- [28] Kong Y, Li D, Zhang C, *et al.* Synergistic silver doping and N vacancy promoting photocatalytic performances of carbon nitride for pollutant oxidation and hydrogen production [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 479: 147676.
- [29] Yu H, Xiao H, Yu Z, *et al.* Optimization of Ag single atom dispersed graphitic carbon nitride for enhanced catalytic performance in the degradation of rhodamine B and tetracycline [J]. *Materials Research Bulletin*, 2024, 170: 112553.
- [30] Wang Y, Yang W, Ding K. Synergistic  $\text{Ag/g-C}_3\text{N}_4/\text{H}_2\text{O}_2$  system for photocatalytic degradation of azo dyes [J]. *Molecules*, 2024, 29(16): 3871. ■

(上接第 162 页)

- [11] Mei Y, Liu J, Cui T, *et al.* Defect chemistry in high-voltage cathode materials for lithium-ion batteries [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(23): 2411311.
- [12] Oh S M, Oh S W, Yoon C S, *et al.* High-performance carbon-LiMnPO<sub>4</sub> nanocomposite cathode for lithium batteries [J]. *Advanced Functional Materials*, 2010, 20(19): 3260-3265.
- [13] Zong J, Liu X. Graphene nanoplates structured  $\text{LiMnPO}_4/\text{C}$  composite for lithium-ion battery [J]. *Electrochimica Acta*, 2014, 116(10): 9-18.
- [14] Oh S M, Myung S T, Choi Y S, *et al.* Co-precipitation synthesis of micro-sized spherical  $\text{LiMn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{PO}_4$  cathode material for lithium batteries [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2011, 21(48): 19368-19374.
- [15] Choi D, Wang D, Bae I T, *et al.*  $\text{LiMnPO}_4$  nanoplate grown via solid-state reaction in molten hydrocarbon for Li-ion battery cathode [J]. *Nano Letters*, 2010, 10(8): 2799-2805.
- [16] 翟和生. SEM-EDS 在元素分析应用中可能存在的一些问题的分析 [J]. *福建分析测试*, 2012, 21(3): 52-54.
- [17] 刘英, 张勋高. 能谱定量分析的不确定度评估 [J]. *分析仪器*, 2021(1): 23-32.
- [18] Xie J, Xiao S, Liu D, *et al.* Recovery of lithium from spent  $\text{LiFe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{PO}_4$  batteries through a leaching-precipitation method using  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2\text{-Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$  [J]. *Hydrometallurgy*, 2025, (13): 106518.
- [19] Ma S, Song S, Guan Q, *et al.* Three-dimensional through-hole aluminum foam for enhancing the electrochemical performance of  $\text{LiFe}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$  cathode [J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 138: 118771.
- [20] Ouakhou S, Maymoun M, Elomrani A, *et al.* Enhancing the electrochemical performance of olivine  $\text{LiMnPO}_4$  as cathode materials for Li-ion batteries by Ni-Fe codoping [J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2022, 5(9): 10591-10603. ■