

一种新型工业化制备压实密度与容量平衡型磷酸铁锂的研究

盛国臣, 罗 权*, 王 阳, 代 扬, 肖友才, 黄 超

贵州磷化开瑞科技有限责任公司, 贵州 贵阳

收稿日期: 2025年5月6日; 录用日期: 2025年6月14日; 发布日期: 2025年6月24日

摘 要

本研究通过系统调控烧结温度、体系理论Fe/P, 结合锂补偿策略, 提升传统工业化磷酸铁锂(LiFePO₄)的压实密度与电化学性能。实验表明: 在765°C烧结温度及初始Fe/P为0.968时, 材料的压实密度及电化学性能实现性能平衡, 0.1 C容量161.5 mAh/g, 烧结压实密度2.32 g/cm³。通过添加磷酸调整体系理论Fe/P, 烧结压实密度提升至2.47 g/cm³, 但过量磷酸导致非活性相生成, 界面阻抗增加, 致使容量显著下降, 选择结合补锂挥发损失, 以抑制晶格缺陷, 改善后1 C容量提升至149.1 mAh/g。在本研究中, 提出了一种工业化制备路径, 实现压实密度与高容量的兼容。该研究为高能量密度动力电池用LiFePO₄的开发提供了理论依据与工艺指导。

关键词

LiFePO₄, Fe/P, 锂补偿, 工业化制备

Research on a New Industrialized Preparation Method for Lithium Iron Phosphate with Balanced Compaction Density and Capacity

Guochen Sheng, Quan Luo*, Yang Wang, Yang Dai, Youcai Xiao, Chao Huang

Guizhou Phosphate Kairui Co., Ltd., Guiyang Guizhou

Received: May 6th, 2025; accepted: Jun. 14th, 2025; published: Jun. 24th, 2025

*通讯作者。

文章引用: 盛国臣, 罗权, 王阳, 代扬, 肖友才, 黄超. 一种新型工业化制备压实密度与容量平衡型磷酸铁锂的研究[J]. 材料科学, 2025, 15(6): 1293-1301. DOI: 10.12677/ms.2025.156137

Abstract

This study systematically regulated the sintering temperature and the theoretical Fe/P ratio of the system, combined with a lithium compensation strategy, to enhance the compaction density and electrochemical performance of traditional industrialized lithium iron phosphate (LiFePO_4). The experiments demonstrated that at a sintering temperature of 765°C and an initial Fe/P ratio of 0.968, the material achieved a balance in compaction density and electrochemical performance, with a capacity of 161.5 mAh/g at 0.1 C and a sintering compaction density of 2.32 g/cm^3 . By adjusting the theoretical Fe/P ratio of the system through the addition of phosphoric acid, the sintering compaction density was increased to 2.47 g/cm^3 . However, the excess phosphoric acid led to the formation of inactive phases, increased interface impedance, and a significant decrease in capacity. By combining lithium compensation to offset the loss due to volatilization, lattice defects were suppressed, and the 1 C capacity was improved to 149.1 mAh/g . In this study, an industrialized preparation path was proposed to achieve compatibility between compaction density and high capacity. This research provides a theoretical basis and process guidance for the development of LiFePO_4 for high-energy-density power batteries.

Keywords

Lithium Iron Phosphate, Fe/P, Lithium Compensation, Industrial Preparation

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

随着国家“碳达峰”“碳中和”等目标的提出，摆脱对化石能源的依赖和开发无污染的新型能源成为当前亟待解决的重要问题[1]。低成本、长寿命、对环境友好的锂离子电池已广泛应用于电子设备、电动汽车、航空航天等[2]。锂离子电池是一种充电电池，主要依靠锂离子在正极和负极之间的移动进行工作，被形象的称为“摇椅电池”，具有较高的比容量和较长的循环寿命，已经成为新能源汽车电池的主要选择。以混合动力、插电式混合动力、纯电动为主要动力的新能源汽车发展战略已经成为行业共识，目前各个国家、各大企业、相关配套系统都在为抢占行业的制高点而努力。具有高压实密度的 LiFePO_4 是市场及学者的主要研究及需求方向，根据压实密度的不同， LiFePO_4 产品目前分为四代，具体分类如图 1 所示。生产和研发三代半乃至第四代 LiFePO_4 产品是众多生产企业追求的目标。

磷酸铁锂技术迭代——高压实密度

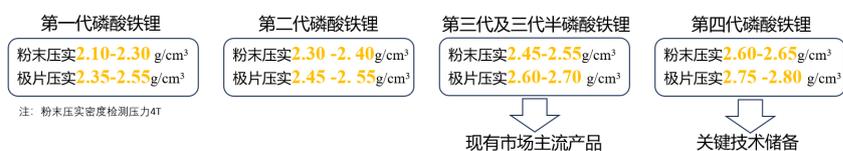


Figure 1. Classification of LiFePO_4 products

图 1. LiFePO_4 产品分类

提升 LiFePO_4 压实密度和电性能的改性方法众多，如金属离子掺杂、表面包覆、颗粒纳米化[3]和择优取向等。碳包覆是增强电子导电性的最有效方法之一，值得注意的是，市售的 LiFePO_4 材料中有很大

一部分是由碳包覆的,也有诸多研究能证明,如 Jiang 等人采用简单的两步法合成了不同碳壳厚度的纳米 LiFePO_4/C 复合材料结果表明,低碳壳厚度的 LiFePO_4/C 纳米复合材料在锂离子电池中表现出较差的电化学性能,可能是由于颗粒表层存在结构紊乱和缺陷,增加碳壳厚度可以消除结构紊乱和缺陷[4]。掺杂不同元素已被研究为增强电子和离子电导率的一种方法。添加少量掺杂元素改变了 LFP 晶体的结构,使锂离子更好地扩散并减小了能量带隙,从而提高了电子导电性和整体电化学性能[5]。插入具有不同原子半径的外来元素会改变晶体的尺寸和体积。其他研究报告称,掺杂可以扩大锂离子扩散通道,产生额外的途径,从而提高锂扩散系数[6]。通常,选择具有相似离子半径的离子,以确保在晶格中不会产生明显的应变或缺陷,并保持整体结构完整性。此外,在选择掺杂离子时应考虑电荷平衡。如果它的价态与取代离子不同,则需要考虑并减轻可能的电荷补偿机制, Kai Jiang 的 Mn、Ti 和 N 三元素掺杂证明了上述理论[7]。另外,将粒径减小到纳米级尺寸已被证明可以改善锂离子扩散, LFP 颗粒的尺寸减小,可以提高速率和循环性能,因为与微米级颗粒相比,纳米级颗粒为电子和锂离子提供了更短的路径,锂离子的扩散就越容易[8]。但是,尺寸不应太小,因为比表面积增加会导致材料堆积密度降低。研究表明,对于小于 400 nm 的颗粒,这种影响并不显著[9]。

值得注意的是,改变体系中的锂铁磷的配比也会对性能造成影响[10],说明前驱体 FePO_4 的 Fe/P 及 Li_2CO_3 加入量也是提升 LiFePO_4 性能调节的关键一环。因此,本工作以高温固相法结合碳热还原法,通过调整体系 Fe/P、 Li_2CO_3 加入量和烧结过程中的温度,在具备一定产能的生产线上探究不同条件变化对成品性能的影响,摸索出最优的 LiFePO_4 生产工艺。

2. 实验部分

以一款 Fe/P 为 0.9680 的磷酸铁作为铁源,通过与 Li_2CO_3 、葡萄糖、添加剂及纯水均匀混合后,采用高温固相法结合碳热还原法在 LiFePO_4 生产线上制备压实密度与容量平衡型 LiFePO_4 。通过调整烧结温度、改变体系铁磷比及 Li_2CO_3 用量,探究工艺变化对 LiFePO_4 理化性能和电性能的影响,具体研究内容如下:

- i) 不同烧结温度对产品性能的影响;
- ii) 体系中理论 Fe/P 的变化对产品性能的影响;
- iii) 调整 Li_2CO_3 加入量后持续降低铁磷比,探究最优磷酸加入量。

(1) LiFePO_4 正极材料生产流程

将磷酸铁、 Li_2CO_3 、添加剂、碳源、纯水按照一定的比例和顺序分别投入分散罐中,充分混合均匀后,将前驱体物料输送到砂磨工序,调整砂磨时间得到一定粒径的浆料,浆料经过喷雾干燥后通过正压运输进入窑炉上料仓,在匣钵内装入一定量的干燥物料后进入气氛辊道炉内烧结,通过烧结曲线下的温度反应后得到黑灰色的烧结物料,烧结料经过气流粉碎机粉碎及筛分后即为 LiFePO_4 成品。

(2) LiFePO_4 正极材料理化性能及电化学性能表征

扫描电子显微镜(SEM)照片:通过扫描电子显微镜对 LiFePO_4 样品的微观形貌进行表征,改变放大倍数能够得到不同尺度下的产品微观形貌。

X 射线电子衍射(XRD):通过 X 射线电子衍射确定材料的晶体结构及物相组成鉴定。

比表面积(BET):通过 N_2 吸/脱附过程测试样品的比表面积。

粒度:通过激光粒度分析仪对物料粒径进行测试,得到粒径的大小分布。粒度分布主要有 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 、 D_{100} 等,分别表示小于对应粒径的颗粒占比为 10%、50%、90%和 100%。

粉末电阻率:使用四探针电阻率测试仪对经过预压成形的粉末材料进行测试,得到材料对电流的抵抗程度。

压实密度:将一定质量的粉末放入到特定容积的容器中,施加一定的压力后计算出粉末的压实密度。

压实密度计算公式如下：

$$\text{压实密度} = \frac{1}{s * h}$$

压实密度单位为 g/cm^3 ， s 表示压片的面积，单位为 cm^2 ， h 表示压片的高度，单位为 cm 。

扣式电池与比容量：将粘结剂聚四氟乙烯(PVDF)溶解在 N-甲基吡咯烷酮(NMP)中，随后将烘干的 LiFePO_4 粉末和导电剂按照比例加入，充分混合分散后均匀涂覆到铝箔纸上，刮至合适的厚度后裁剪成特定大小的圆片，最后在手套箱中和碳负极、隔膜、电解液组合封装得到扣式电池，使用蓝电系统对电池进行充放电测试，探究不同电流密度下电极的比容量和倍率性能。

3. 结果与讨论

(1) 同一 Fe/P 下，不同烧结温度对 LiFePO_4 性能的影响

表 1 展示了当体系 Fe/P 维持在 0.9680 不变的条件下，在 755~775℃ 的烧结温度范围内，随着温度的升高， LiFePO_4 的比表面积、粉末电阻率、碳含量及压实密度的变化趋势。由表 1 可知，随着烧结温度的提高，材料出炉压实密度也随之提高，从 $2.28 \text{ g}/\text{cm}^3$ 提高到 $2.35 \text{ g}/\text{cm}^3$ ，这是因为高温烧结下加速了颗粒的 Ostwald 熟化过程，在高温的驱动力下促进了晶粒的生长，使颗粒间发生融合，晶界发生迁移，且在颗粒长大的同时，小颗粒的填充使孔隙率降低，致密度得到提高[11]。从图 2 的扫描电镜图中可直观看出随着温度升高，颗粒间的互相粘结使粒径增大。此外，高温烧结下提高了材料的结晶度，减少了晶界对电子传输的阻碍作用，促进了碳包覆层的均匀分布，导电网络的优化使粉末电阻率降低[12][13]。在表 1 数据展示中，值得注意的是，高温烧结虽然使压实密度得到提高，但同步带来的磁性异物增长面临超标风险，限制了产线烧结温度的进一步提升。

Table 1. The influence of different sintering temperatures on product performance

表 1. 不同烧结温度对产品性能的影响

烧结温度 ($^{\circ}\text{C}$)	比表面积 (m^2/g)	粉末电阻率 ($\Omega\text{-cm}$)	碳含量 (%)	出炉压实密度 (g/cm^3)	磁性异物(ppm)
755	14.21	14.38	1.41	2.28	0.351
760	13.35	13.82	1.35	2.30	0.369
765	12.23	12.10	1.32	2.32	0.482
770	11.84	11.47	1.29	2.33	0.658
775	10.97	11.13	1.27	2.35	0.831

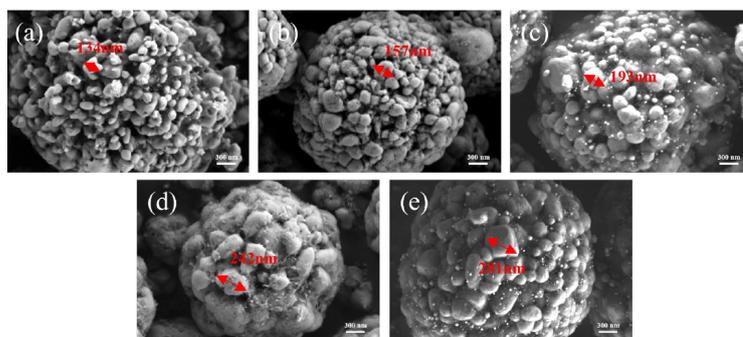


Figure 2. SEM images of the products at different sintering temperatures. (a) 755 $^{\circ}\text{C}$; (b) 760 $^{\circ}\text{C}$; (c) 765 $^{\circ}\text{C}$; (d) 770 $^{\circ}\text{C}$; (e) 775 $^{\circ}\text{C}$

图 2. 不同烧结温度下产品的 SEM 图像。(a) 755 $^{\circ}\text{C}$; (b) 760 $^{\circ}\text{C}$; (c) 765 $^{\circ}\text{C}$; (d) 770 $^{\circ}\text{C}$; (e) 775 $^{\circ}\text{C}$

图 3 是不同烧结温度下产品电性能变化的曲线图。从数据中可以看出, LiFePO_4 的 0.1 C 和 1 C 放电容量均在 765℃ 时达到最大值, 当温度继续升高, 电性能呈现下降的趋势。在 755℃~765℃ 区间内, 容量随温度的升高而提升, 结合表 1 数据可知, 粉末电阻率的减小使电子传输速率增大, 有助于提高 LiFePO_4 的电化学性能。当温度提高到 765℃ 时, 晶粒生长及颗粒融合致使晶界数量减少, 同时导电网络的均匀分布和高比表面积下电解液的充分浸润使得 1 C 容量提升显著[14][15]。在 765℃~775℃ 区间内, 电化学性能降低归因于颗粒的粗化致使离子扩散路径增长, 且压实密度的增大致使颗粒堆积密度高, 阻碍了电解液的浸透, 限制了离子的传输。此外, 高温烧结下碳含量的降低也会削弱导电网络的完整性。

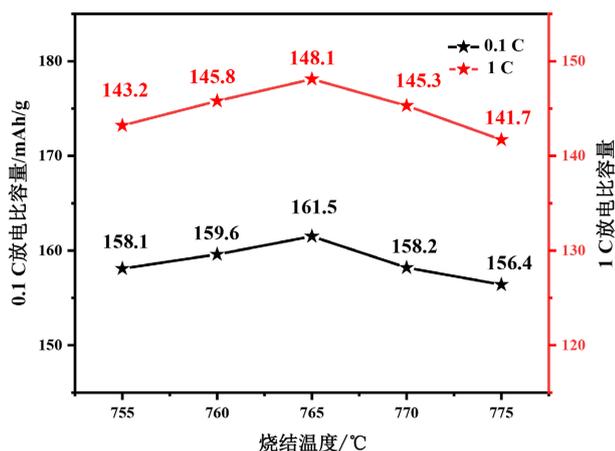


Figure 3. The effect of different sintering temperatures on the electrical properties of the product

图 3. 不同烧结温度对产品电性能的影响

综上所述, 在 Fe/P 为 0.968, 烧结温度为 765℃ 时, LiFePO_4 的电化学性能达到最佳平衡点, 且磁性异物属于合格范围内, 但仍低于市场主流产品的要求。因此, 选择在 765℃ 烧结温度下, 通过补加磷酸调整体系理论 Fe/P 进一步优化产品性能, 并对其机理进行分析。

(2) 同一烧结温度下, 体系中不同理论 Fe/P 对产品性能的影响

Table 2. The influence of different Fe/P on product performance in the system

表 2. 体系中不同 Fe/P 对产品性能的影响

磷酸加入量 (%)	体系中理论 Fe/P	比表面积 (m^2/g)	pH	出炉压实密度 (g/cm^3)	磁性异物(ppm)
0	0.9680	12.23	9.47	2.32	0.482
0.10	0.9661	12.25	9.41	2.35	0.465
0.15	0.9652	12.16	9.39	2.37	0.469
0.18	0.9647	12.18	9.35	2.40	0.473
0.20	0.9643	12.21	9.32	2.41	0.458

从表 2 中可看出, 随着磷酸加入量的提高, 比表面积基本稳定, pH 值逐渐下降, 出炉压实密度逐步提高。磷酸作为酸性添加剂, 在高温下部分分解为磷酸根离子, 残留的分解产物导致材料表面酸性增强[16], 但该添加量下未显著改变晶粒生长动力学, 颗粒尺寸与形貌保持相对稳定, 因此比表面积波动较小。

随着磷酸加入量的提高，体系理论 Fe/P 降低，反应过程中优化了前驱体的化学组成，减少因铁过量导致的晶格畸变或局部缺陷，能有效的促进颗粒重排和致密化，从而使得压实密度得到提高[17][18]。但磷酸的加入会导致电性能持续下降，如图 4 所示，当磷酸加入量为 0.20% 时，1 C 容量从 149.1 mAh/g 减小到 143.8 mAh/g。造成电性能降低的主要原因有以下三个方面：

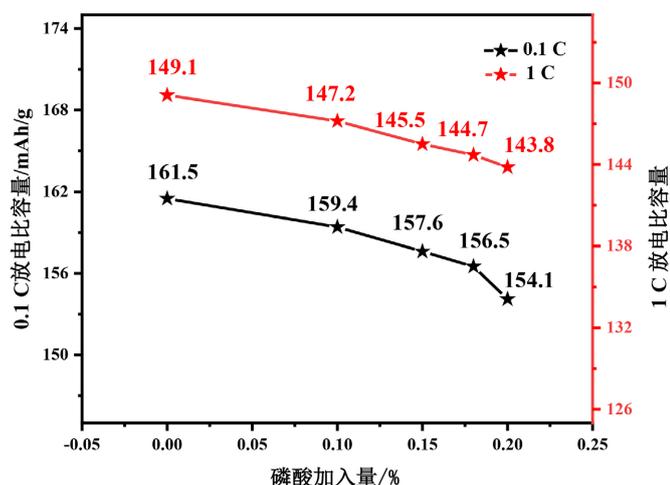


Figure 4. The influence of different Fe/P in the system on the electrical properties of products

图 4. 体系中不同 Fe/P 对产品电性能的影响

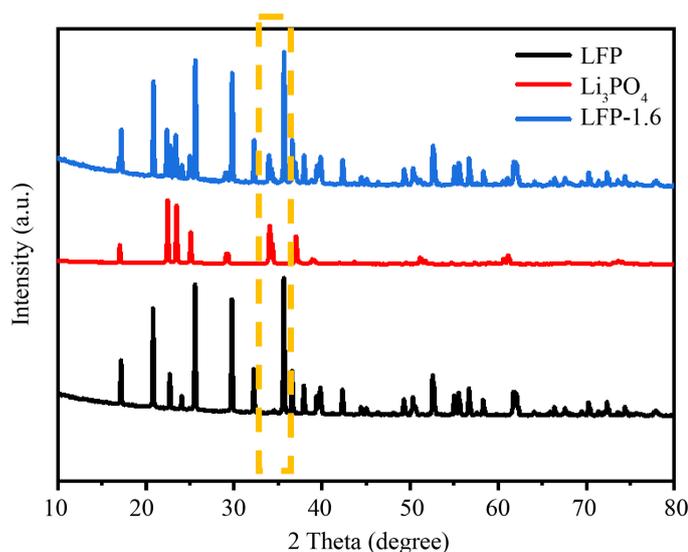


Figure 5. XRD comparison of samples with LFP and Li_3PO_4

图 5. 样品与 LFP、 Li_3PO_4 的 XRD 对比

i) 活性物质的减少及杂相的形成。磷酸的过多引入在高温条件下发生副反应，生成 Li_3PO_4 等非活性相(如图 5 XRD 衍射图所示)，减少了有效活性物质的比例，

ii) 离子扩散动力学受限。压实密度提高带来的孔隙率降低，致使电解液难以浸润颗粒内部，使锂离子传输路径受阻，并且表面残留的磷酸分解产物吸附在颗粒表面，形成离子绝缘层。

iii) 电子传导路径的劣化。表面离子绝缘层的形成阻碍了电子的传输，杂相的形成在颗粒间起到了绝

缘作用, 进一步阻碍离子传导[16][17]。

综上, 体系理论 Fe/P 的降低通过液相烧结效应与颗粒均一性优化显著提升了压实密度, 但过量补加磷酸会因非活性相生成、离子扩散受阻及电子传导劣化导致电性能下降。为避免电性能的降低, 选择通过调整 Li_2CO_3 添加量进行性能优化, 并持续探究体系理论 Fe/P 降低对产品的影响。

(3) 调整 Li_2CO_3 加入量后持续降低体系理论 Fe/P

Table 3. The effect of continuously reducing the theoretical Fe/P of the system on product performance after adjusting the amount of Li_2CO_3 added

表 3. 调整 Li_2CO_3 加入量后持续降低体系理论 Fe/P 对产品性能的影响

磷酸加入量 (%)	体系理论 Fe/P	比表面积 (m^2/g)	pH	出炉压实密度 (g/cm^3)	磁性异物(ppm)
0.20	0.9643	12.15	9.30	2.42	0.458
0.25	0.9633	12.21	9.29	2.43	0.475
0.30	0.9624	12.19	9.27	2.46	0.494
0.40	0.9606	12.20	9.26	2.47	0.596
0.50	0.9588	12.23	9.24	2.46	0.794

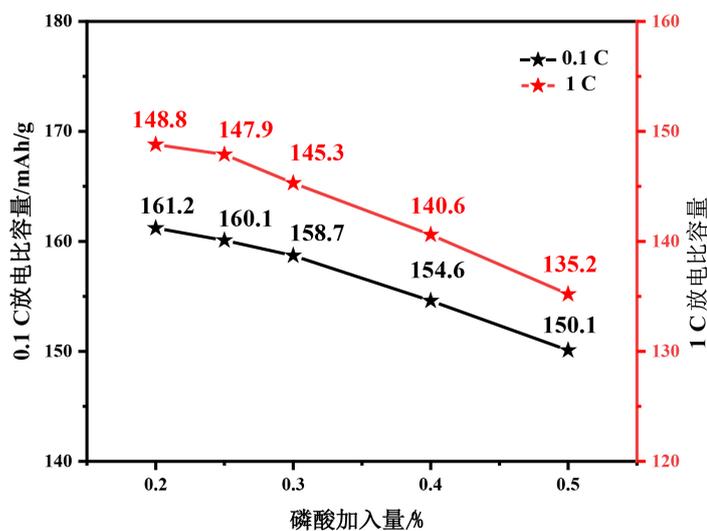


Figure 6. The effect of different amounts of phosphoric acid added on the electrical properties of the product

图 6. 不同磷酸加入量对产品电性能的影响

从表 3 中可看出, 在通过补加一定量 Li_2CO_3 后, 电性能得到明显改善, 这是由于 Li_2CO_3 的加入补充了体系中因高温烧结导致的锂元素损失, 使 Li-Fe-P 的化学计量比得到一定的平衡, 减少了缺陷的产生, 维持了高本体活性。

在此基础上, 持续提高磷酸加入量, 压实密度提高的同时, 电性能持续下降, 且在磷酸加入量为 0.5% 时, 1 C 容量与加入量为 0.2% 时相比减少了 9.1%, 趋势变化可见图 6。这是因为随着磷酸加入量的进一步提升, 尽管优化了 Li_2CO_3 的加入量, 但是 Li-Fe-P 的化学平衡遭到破坏, 产生了杂相, 降低了反应活性。在低 pH 下, 二价铁易氧化成三价铁, 会进一步促使杂相的产生, 磁性异物的提高也说明了该问题。

此外, 表面碳包覆层被磷酸分解产物覆盖, 导电网络连续性下降, 电子传输效率降低。

基于上述的优化数据, 表 4 展示了磷酸加入量为 0.3%, 体系理论 Fe/P 为 0.9624 的成品数据, 表明通过补加磷酸调整体系理论 Fe/P 的方法下制备的 LiFePO_4 产品满足当前市场主流需求。

Table 4. Display of finished product data

表 4. 成品数据展示

磷酸加入量 (%)	体系理论 Fe/P	比表面积 (m^2/g)	pH	压实密度 (g/cm^3)	首次 0.1 C 放电比容量 (mAh/g)	首次 1 C 放电比容量 (mAh/g)	首效 (%)	磁性异物 ppm
0.30	0.9624	12.03	9.13	2.53	156.9	143.7	98.5	0.483

4. 结论

基于烧结温度、Fe/P 及锂补偿的协同调控研究, 本工作提出了一种兼顾高压实密度与优异电化学性能的 LiFePO_4 工业化制备策略, 主要结论如下:

(1) 烧结温度 765°C 为该反应体系下的最优温度, 晶粒生长与致密化达到平衡, 0.1 C 容量达 $161.5 \text{ mAh}/\text{g}$, 出炉压实密度为 $2.32 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

(2) 体系理论 Fe/P 调控: 通过补加磷酸使体系 Fe/P 持续降低的情况下, 由于活性物质的减少及杂相的形成, 使离子扩散动力学受限, 电子传导路径发生劣化, 虽然压实密度得到提高, 但电性能会出现骤降现象。

(3) 锂补偿优化: 通过调整 Li_2CO_3 添加量, 补充高温锂挥发损失, 维持 Li-Fe-P 化学计量比, 减少晶格缺陷(如 Li/Fe 反位), 1 C 容量提升至 $148.8 \text{ mAh}/\text{g}$ 。

(4) 经上述优化调整后, LiFePO_4 成品压实密度为 $2.53 \text{ g}/\text{cm}^3$, 0.1 C 放电比容量为 $156.9 \text{ mAh}/\text{g}$, 1 C 放电比容量为 $143.7 \text{ mAh}/\text{g}$, 磁性异物 0.483 ppm , 满足目前市场主流需求。

在本项研究中, 提出了高压实密度的实现机制, 添加磷酸调整体系理论 Fe/P, 在高温下控制杂质的生产, 促进颗粒重排与致密化, 并针对电化学性能的衰减提出了抑制策略, 在补加磷酸调整体系理论 Fe/P 的前提下, 通过调整 Li_2CO_3 用量避免杂相的产生, 保留活性物质, 提高电性能。通过液相烧结与界面协同调控, 突破传统工艺中“高密度 - 低容量”的矛盾, 满足动力电池对高体积能量密度的需求, 为高压实 LiFePO_4 的工业化提出一种改善策略, 推动正极材料市场的高质量发展。

参考文献

- [1] 王长伟. 高压实密度磷酸铁锂正极材料的工程技术应用研究与展望[J]. 广州化工, 2024, 52(20): 160-164.
- [2] 杨斌, 樊立萍, 高迎慧, 等. 高功率锂离子电池放电倍率对容量影响的研究[J]. 机械制造, 2023, 61(8): 1-4, 17.
- [3] 李健, 刘俊才, 赵圣, 等. 磷酸铁锂不同颗粒形貌对其性能的影响[J]. 辽宁化工, 2024, 53(11): 1645-1648.
- [4] Nguyen, D.T., Kim, J. and Lee, Y. (2023) A Hybrid Carbon- $\text{Li}_{1.3}\text{Al}_{0.3}\text{Ti}_{1.7}(\text{PO}_4)_3$ Conductive Coating for High Current Rate LiFePO_4 Cathode Material. *Chemical Engineering Journal*, **461**, Article ID: 141750. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141750>
- [5] Wang, J. and Sun, X. (2012) Understanding and Recent Development of Carbon Coating on LiFePO_4 Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries. *Energy & Environmental Science*, **5**, 5163-5185. <https://doi.org/10.1039/C1EE01263K>
- [6] Li, Z., Deng, Z., Pang, W., Tong, G. and Liang, F. (2025) High Electrochemical Performance of Highly (020) Preferred Orientation LiFePO_4 for Lithium Ion Battery. *Journal of Power Sources*, **644**, Article ID: 237131. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2025.237131>
- [7] Li, L., Li, X., Wang, Z., Wu, L., Zheng, J. and Guo, H. (2009) Stable Cycle-Life Properties of Ti-Doped LiFePO_4 Compounds Synthesized by Co-Precipitation and Normal Temperature Reduction Method. *Journal of Physics and Chemistry*

- of Solids*, **70**, 238-242. <https://doi.org/10.1016/j.jpics.2008.10.012>
- [8] Lee, S.B., Jang, I.C., Lim, H.H., *et al.* (2010) Preparation and Electrochemical Characterization of LiFePO₄ Nanoparticles with High Rate Capability by a Sol-Gel Method. *Journal of Alloys and Compounds*, **491**, 668-672. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2009.11.037>
- [9] Zhang, W. (2010) Comparison of the Rate Capacities of LiFePO₄ Cathode Materials. *Journal of the Electrochemical Society*, **157**, A1040. <https://doi.org/10.1149/1.3460840>
- [10] 王帆. 锂铁磷配比对磷酸铁锂物化性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京有色金属研究总院, 2016.
- [11] Zhao, L., Wang, W., Wang, A., Yuan, K., Chen, S. and Yang, Y. (2013) A Novel Polyquinone Cathode Material for Rechargeable Lithium Batteries. *Journal of Power Sources*, **233**, 23-27. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.01.103>
- [12] Padhi, A.K., Nanjundaswamy, K.S. and Goodenough, J.B. (1997) Phospho-Olivines as Positive-Electrode Materials for Rechargeable Lithium Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, **144**, 1188-1194. <https://doi.org/10.1149/1.1837571>
- [13] Prosini, P.P., Carewska, M., Scaccia, S., Wisniewski, P., Passerini, S. and Pasquali, M. (2002) A New Synthetic Route for Preparing LiFePO₄ with Enhanced Electrochemical Performance. *Journal of the Electrochemical Society*, **149**, A886. <https://doi.org/10.1149/1.1481716>
- [14] Chen, Z. and Dahn, J.R. (2002) Reducing Carbon in LiFePO₄C Composite Electrodes to Maximize Specific Energy, Volumetric Energy, and Tap Density. *Journal of the Electrochemical Society*, **149**, A1184. <https://doi.org/10.1149/1.1498255>
- [15] Huang, H., Yin, S. and Nazar, L.F. (2001) Approaching Theoretical Capacity of LiFePO₄ at Room Temperature at High Rates. *Electro-Chemical and Solid-State Letters*, **4**, A170. <https://doi.org/10.1149/1.1396695>
- [16] Doeff, M.M., Hu, Y., McLarnon, F. and Kostecki, R. (2003) Effect of Surface Carbon Structure on the Electrochemical Performance of LiFePO₄. *Electro-Chemical and Solid-State Letters*, **6**, A207. <https://doi.org/10.1149/1.1601372>
- [17] Sun, C., Rajasekhara, S., Goodenough, J.B. and Zhou, F. (2011) Monodisperse Porous LiFePO₄ Microspheres for a High Power Li-Ion Battery Cathode. *Journal of the American Chemical Society*, **133**, 2132-2135. <https://doi.org/10.1021/ja1110464>
- [18] Chen, Z., *et al.* (2013) Liquid-Phase Sintering of LiFePO₄ Cathode Materials for Lithium-Ion Batteries. *Journal of Power Sources*, **243**, 716-723.