# 具有优异高倍率性能$LiFePO_4$正极材料的制备

陈成凯,刘慧玲,周运发,肖杨*
(中南民族大学 化学与材料科学学院,湖北 武汉 430074)

**摘 要** 磷酸铁锂是常见的锂离子电池正极材料,由于其本征电导率较低,导致高倍率性能不足,限制了其应用范围,以1,3-丁二醇为溶剂制备了高倍率性能优异的磷酸铁锂.利用X射线粉末衍射(XRD)、无机碳硫分析、扫描电子显微镜(SEM)和透射电子显微镜(TEM)等方法进行了结构表征.结果表明:所制备的磷酸铁锂具有棒状形貌,有助于缩短锂离子扩散路径,从而提升其电化学性能.作为锂离子电池正极材料进行倍率充放电测试,其在5C放电容量达到120.2 $mAh\cdot g^{-1}$,300圈循环后容量保持率为82.7%.电化学性能测试结果显示,采用1,3-丁二醇作为有机溶剂的溶剂热法所合成的磷酸铁锂材料,具备在高倍率条件下锂离子电池应用的潜力.

**关键词** 锂离子电池;磷酸铁锂;正极材料;溶剂热法
**中图分类号** O646.21 **文献标志码** A **文章编号** 1672-4321(2026)04-0438-07
**doi**:10.20056/j.cnki.ZNMDZK.20260402

# Preparation of $LiFePO_4$ cathode materials with excellent high-rate performance

Chen Chengkai, Liu Huiling, Zhou Yunfa, Xiao Yang*
(College of Chemistry and Materials Science, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, Hubei China)

**Abstract** Lithium iron phosphate ($LiFePO_4$) is a widely used cathode material for lithium-ion batteries, but its practical application is hindered by intrinsically low electronic conductivity, particularly under high-rate conditions. A solvothermal method employing 1,3-butanediol as the solvent was developed to synthesize $LiFePO_4$ with exceptional high-rate performance. The structure was characterized through X-ray powder diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and transmission electron microscopy (TEM). The results revealed that the as-prepared $LiFePO_4$ displayed a nanorod morphology, which facilitated efficient lithium-ion transport by shortening diffusion pathways. When evaluated as a cathode material in lithium-ion batteries, it delivered a discharge capacity of 120.2 $mAh\cdot g^{-1}$ at 5C, with a capacity retention rate of 82.7% after 300 cycles. These results indicate that the nano-sized $LiFePO_4$ synthesized via the solvothermal route using 1, 3-butanediol as the solvent holds promising potential for high-rate lithium-ion battery applications.

**Keywords** lithium ion batteries; lithium iron phosphate; cathode materials; solvothermal method

磷酸铁锂($LiFePO_4$)作为聚阴离子型正极材料的典型代表[1],因其具有良好的循环稳定性、化学稳定性、热稳定性及环境稳定性,被广泛应用于新能源汽车等领域[2],然而,较低的电子电导率和锂离子扩散系数严重限制了材料的高倍率性能[3].目前,提升$LiFePO_4$电化学性能的常见方法主要包括表面包覆、离子掺杂和纳米化[4-6].例如,通过在颗粒表面原位生长碳层的可改善颗粒间的电子传导,提高电子电导率;在$Fe^{2+}$位引入少量其他过渡金属离子,有助于提升材料的本征电导率;或在$Li^+$位引入$Na^+$、$Mg^{2+}$等杂原子,以拓宽锂离子传输通道[7].本文主要采用通过调控合成方法以优化$LiFePO_4$材料的形貌,从

**收稿日期** 2026-01-23
* **通信作者** 肖杨(1974-),男,教授,博士,研究方向:无机功能材料,E-mail: xiaoyang@scuec.edu.cn.
**基金项目** 企业委托横向研发项目(HZY25091)

而提高其比表面积，目前 $LiFePO_4$ 的制备方法主要有固相法、共沉淀法、水热法、溶胶-凝胶法、化学气相沉积法和喷雾干燥法等[8]. 溶剂热法作为水热法的拓展，除具备水热法合成温度低、产物结晶度高、粒度易于控制等优点之[21]，还具有以下特点：(1)在制备过程中，有机溶剂的加入可有效抑制可溶性亚铁盐[$FeSO_4$、$FeCl_2$、$Fe(CH_3COO)_2$等]的氧化[9]；(2)溶剂热环境能提供更强的成核驱动力，有利于获得更小的颗粒[10]；(3)有机溶剂的种类丰富，可根据需求进行选择或设计，利用其在极性、粘度和配位能力等方面的多样性，为调控产物形貌和晶型提供更多可能.

1,3-丁二醇含有两个羟基，能与水良好互溶，构建溶剂中的氢键网络，其羟基的配位能力可在材料成核与生长过程中发挥结构导向作用，影响成核速率与晶体生长取向. 此外，一定长度的碳链赋予 1,3-丁二醇较低的极性和较高的黏度，可在一定程度上降低 $LiFePO_4$ 在溶剂中的溶解平衡常数及离子扩散速率，从而延缓奥斯特瓦尔德熟化过程，有助于形成颗粒更小的晶体材料.

综上所述，本文选用溶剂热法制备样品. 由于有机溶剂极性较低，水溶性锂盐与亚铁盐在其中溶解度有限，因此实验过程中以去离子水作为辅助溶剂，1,3-丁二醇作为形貌调控溶剂，成功制备出具有特定形貌的 $LiFePO_4$ 颗粒. 后续表征结果表明，该方法合成的 $LiFePO_4$ 材料具有优异的高倍率性能.

## 1　实验部分

### 1.1　试剂和仪器

1,3-丁二醇(化学纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司)；七水合硫酸亚铁、一水合氢氧化锂、聚偏二氟乙烯(pvdf)、葡萄糖、磷酸、*N*-甲基吡咯烷酮(分析纯，上海沪试实验室器材股份有限公司)；科琴黑 EC-300J、电解液($LiPF_6$ 溶于 EC、DMC 和 EMC 体积比为 1∶1∶1 的混合溶剂)锂片[电池级，科路德化工科技(上海)有限公司].

(1)X 射线衍射：晶体结构采用 X 射线衍射仪(XRD, Bruker D8，德国布鲁克公司)进行测试，使用铜靶，波长为 $\lambda$=1.5406 Å，管电压 40 kV，管电流 40 mA，广角扫描模式，范围 $10°\leqslant 2\theta \leqslant 80°$.

(2)倍率充放电测试采用蓝电测试系统(CT3002A，武汉市蓝电电子股份有限公司)，测试电压范围 2.0~3.8 V，测试倍率为 0.1C、1C、2C、5C、10 C(本文所涉及的充放电倍率均以 C 率表示. 1C 为电池在 1 h 内以其额定容量完全充/放电的速率，对于 $LiFePO_4$，取 170 $mAh\cdot g^{-1}$).

(3)交流阻抗谱(EIS)与循环伏安测试(CV)采用电化学工作站(CHI660E，上海辰华仪器有限公司)，EIS 的测试电压为开路电压，频率范围 0.01~100 kHz，振幅 5 mV；CV 的测试扫速为 0.2、0.4、0.6、0.8、1 $mV\cdot s^{-1}$，电压范围 2.0~3.8 V.

(4)无机碳硫分析采用碳硫分析仪(CS744，美国力可公司)进行测试.

### 1.2　$LiFePO_4$ 的制备

溶剂热合成 $LiFePO_4$ 的步骤：称取 1.2588 g 的一水合氢氧化锂，放入 100 mL 聚四氟乙烯内胆中，加入 15 mL 去离子水溶解，得到溶液 A；称取 2.7801 g 七水合硫酸亚铁于锥形瓶中，用 15 mL 去离子水溶解，得到溶液 B. 向溶液 A 中加入 30 mL 的 1,3-丁二醇后，缓慢滴加 680 μL 磷酸，得到悬浊液 C；将溶液 B 缓慢滴加入悬浊液 C 中，室温搅拌 2 h. 随后将体系转入在高压反应釜，于 180 ℃反应 12 h. 反应结束后，离心分离，并用工业乙醇与蒸馏水反复洗涤 6 次；加入 2 mL 由 0.4 g 葡萄糖和去离子水配制的浓度为 0.2 $g\cdot mL^{-1}$ 的葡萄糖溶液作为还原剂，混合均匀后烘干，再将样品转移至充满氩气的管式炉中进行煅烧：以 5 ℃·$min^{-1}$ 的升温速率升至 350 ℃，保温 180 min；再以 5 ℃·$min^{-1}$ 的升温速率升至 700 ℃保温 8 h，冷却后得到黑色的粉末状 $LiFePO_4$.

### 1.3　扣式电池的制作

称取制得的 $LiFePO_4$ 粉末 200 mg 与科琴黑 25 mg，置于玛瑙研钵中混合并研磨；研磨均匀后，加入 900 μL 的 PVDF 溶液(由 500 mg 的 PVDF 和 18 mL 的 *N*-甲基吡咯烷酮配制而成，PVDF 实际添加量为 25 mg)研磨成均匀浆料，以单面涂炭铝箔为集流体，在涂覆烘干机涂覆成膜，烘干后于切片机上冲压成直径 12 mm 的电极片.

将所得电极片作为正极，金属锂片为负极，以 1.0 $mol\cdot L^{-1}$ $LiPF_6$ 溶液为电解液[溶剂体积 $V$(EC)∶$V$(DMC)∶$V$(EMC)=1∶1∶1]，以 Celgard2400 为隔膜，在充满干燥氩气的手套箱内(水、氧气指标≤$0.1\times 10^{-6}$)进行扣式电池组装. 组装完成后，在蓝电测试系统中进行倍率性能充放电测试，在电化学工作站中进行交流阻抗测试.

## 2 结果与讨论

### 2.1 物相结构与形貌分析

采用X射线衍射(XRD)对制备的$LiFePO_4$的晶体结构进行了系统的表征,图1为XRD衍射谱图.由图可知,将样品衍射峰与标准物质$LiFePO_4$(PDF#81-1173)对比发现,$LiFePO_4$的衍射峰位置与标准特征峰高度吻合,且未出现其他杂质相的衍射信号,表明制备的$LiFePO_4$纯度极高,无明显杂质混入[11].此外,样品衍射峰峰形尖锐、对称性良好,说明其结晶度、晶粒发育完善.结合标准卡片进一步确认,合成材料具有典型的正交晶系橄榄石结构(空间群Pnma)[12].综合XRD表征结果可以证实,成功制备出高纯度、高结晶性的$LiFePO_4$材料,在溶剂热的反应过程中,1,3-丁二醇未与样品发生副反应,未导致样品变质.

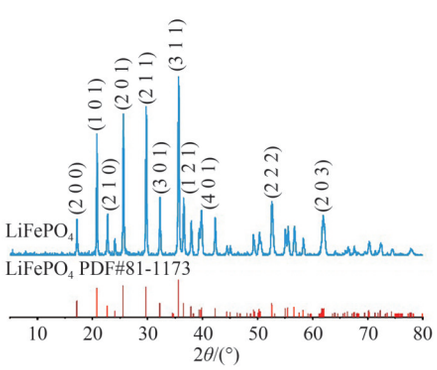


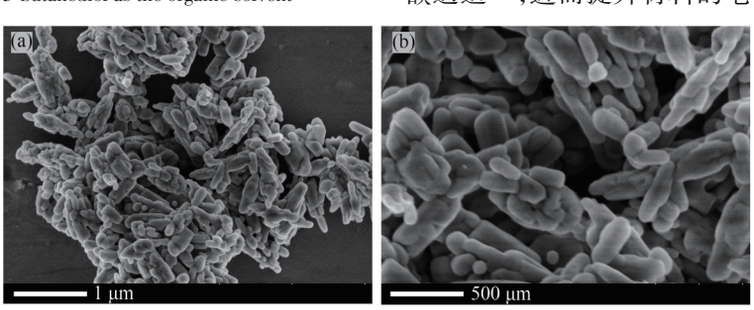

图1 以1,3-丁二醇为有机溶剂的溶剂热法制备的$LiFePO_4$的X射线衍射谱图

Fig. 1 X-ray diffraction spectrum of $LiFePO_4$ prepared by solvent thermal method using 1,3-butanediol as the organic solvent

采用无机碳硫分测定样品煅后残留的碳含量,测得由葡萄糖碳化产生的残留碳含量仅占样品总质量的2.89%,该现象主要归因于葡萄糖在高温煅烧过程中兼具还原剂作用,消耗了炉膛内的微量氧气,有效抑制了$Fe^{3+}$的生成,促使反应向生成纯相$LiFePO_4$的方向进行,进而保障了最终产物的高纯度.

此外,葡萄糖在煅烧过程中大量消耗,导致最终残留碳含量极低,这也与XRD谱图中未观察到明显无定形碳衍射峰的结果相一致,进一步印证了样品中残碳量极少的结论.

图2为$LiFePO_4$样品在不同放大倍数下的扫描电子显微镜图像,如图所示,样品整体形貌较为均一,主要呈规则的纳米棒状结构,且尺寸分布相对集中.该均匀的纳米棒形貌,主要由溶剂热合成过程中所使用的1,3-丁二醇的极性和配位能力等物化性质诱导形成.1,3-丁二醇具有较强的配位能力,在反应过程中可选择性吸附于$LiFePO_4$的特定晶面,调控不同晶面的生长速率,从而引导晶体生长为纳米棒状结构[13].这种独特的纳米棒结构赋予材料显著的结构优:棒状结构具有更大的比表面积和更短的锂离子扩散通道,有利于提升材料在电解液中的浸润性,增大与电解液的接触面积;而更大的电极/电解质相界面可显著增加$Li^+$在$LiFePO_4$中脱嵌通道[14],进而提升材料的电化学性能.




(a)以1,3-丁二醇为有机溶剂的溶剂热法制备的$LiFePO_4$的在1 μm倍数下的SEM图;(b)以1,3-丁二醇为有机溶剂的溶剂热法制备的$LiFePO_4$在500 nm倍数下的SEM图

图2 产物$LiFePO_4$的SEM图

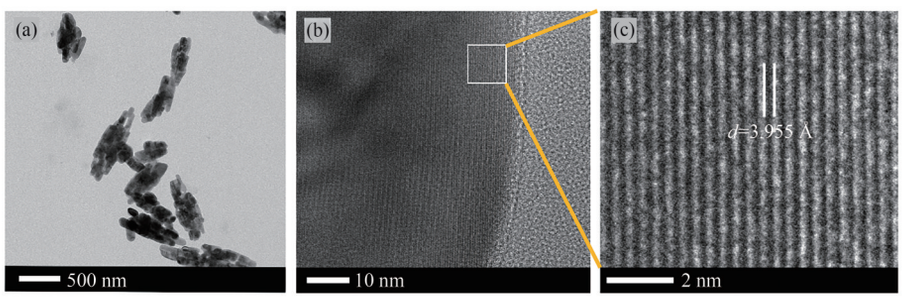
Fig. 2 SEM images of the as-synthesized $LiFePO_4$.

由图还可以观察到,纳米棒之间存在一定的团聚现象,这主要与后续煅烧处理有关:为提高材料电子电导率而引入葡萄糖,在惰性气氛及高温条件下发生碳化,在$LiFePO_4$颗粒表面形成连续的无定形碳连接层.该碳层可将相邻纳米棒物理连接,形成局部团聚[15].此外,材料具有较高比表面积,表面能较大,高温煅烧也会促进颗粒间的生长与团聚[16].由于样品残碳量极低,材料表面难以形成足量且连续的碳层,因此在煅烧过程中,高表面能引发的颗粒生长是造成材料团聚的主导因素.

为进一步明确样品的精细结构特征,图3显示了$LiFePO_4$的TEM和HRTEM图像.由图3(a)中可

见，材料团聚程度较低，主要呈现为纳米棒状形貌，与SEM的表征结果一致，且纳米棒尺寸较为均一，体现了1,3-丁二醇在溶剂热合成中对材料粒径上的调控优势.从图3(b)可察到清晰且连续性良好的晶格条纹，直观反映出材料具有高度完整的晶体结构和优异的结晶度.此外，样品表面未观测到明显的无定形碳层，进一步印证了其残碳量极低，与XRD和无机碳硫分析结果相吻合.

为进一步确定其晶体结构，对图3(b)中框选的区域进行快速傅里叶变换(FFT)，结果如图3(c)所示.经测算，晶面间距 $d$ 约为 3.955 Å，将该值与 $LiFePO_4$ 标准卡片(PDF#81-1173)比对可知，其与(210)晶面的晶面间距(3.918 Å)基本吻合，该结果与XRD的表征相互印证.




(a) 以1,3-丁二醇为有机溶剂的溶剂热法制备的 $LiFePO_4$ 的TEM图；(b) 以1,3-丁二醇为有机溶剂的溶剂热法制备的 $LiFePO_4$ 的HRTEM图；(c) 对应于(b) 白色框选区域HRTEM图像的FFT图谱($d$ 值为 $LiFePO_4$ 的晶面间距)

图3　产物 $LiFePO_4$ 的TEM和HRTEM图

Fig. 3　TEM and HRTEM images of the as-synthesized $LiFePO_4$

## 2.2　电化学性能分析

对合成的样品进行了充放电测试，测试结果如图4所示.图4(a)为 $LiFePO_4$ 在不同放电倍率下的放电曲线，其在0.1C，1C，2C，5C，10C下的放电比容量分别为 156.4、146.2、137.7、123.0、108.3 $mAh\cdot g^{-1}$；在经过0.1C，1C，2C，5C，10C不同倍率循环5圈后回到0.1C，仍保持 153.1 $mAh\cdot g^{-1}$ 的可逆放电比容量.这表明在循环过程中结构仍能保持稳定，未因充放电的应力发生崩毁[17]，且在更高的倍率下依旧展现出较高的比容量.这一性能优势得益于材料的纳米棒状结构所具有的高比表面积，该结构提升了充放电过程中的反应动力学，彰显了 $LiFePO_4$ 在高倍率场景下的应用潜力.

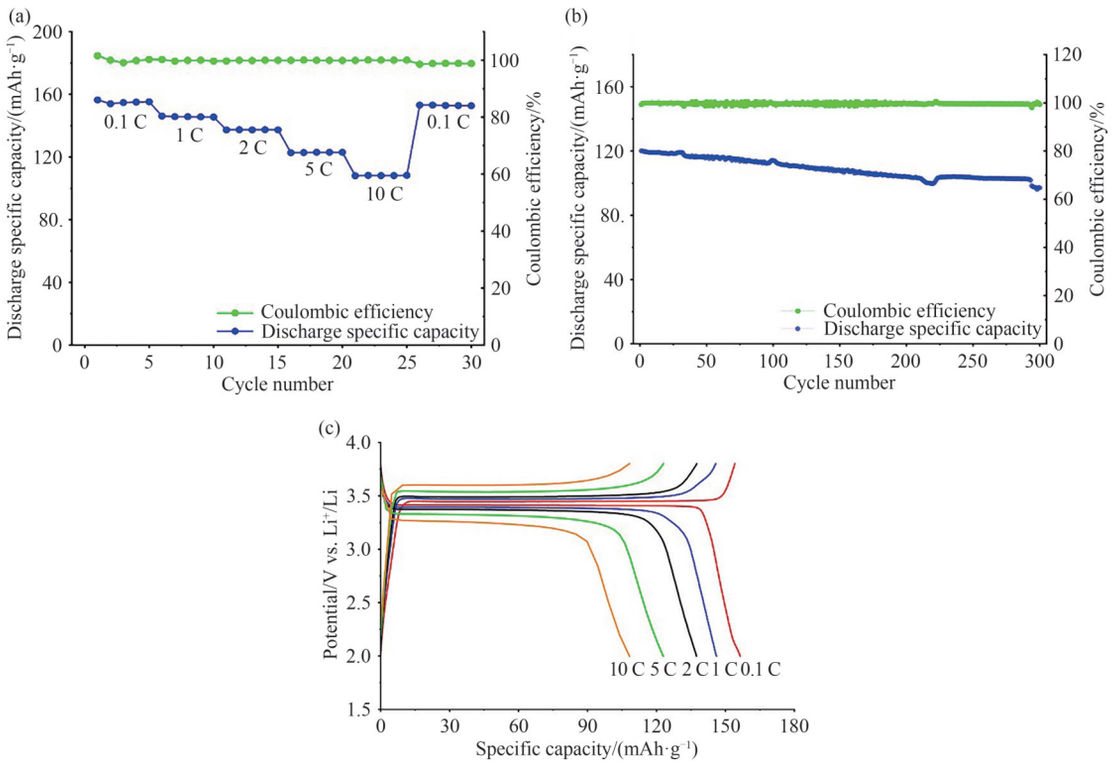
为进一步考察材料的长循环稳定性，测试了其在5C倍率下的循环性能，如图4(b)所示，在5C倍率下的首轮放电比容量为 120.2 $mAh\cdot g^{-1}$，循环300圈后的放电比容量为 99.39 $mAh\cdot g^{-1}$，容量保持率达到82.7%，证实 $LiFePO_4$ 在5C的高倍率下仍具备优良的循环稳定性.图4(c)为 $LiFePO_4$ 在不同倍率下的充放电曲线对比图，可见其在各倍率下的放电平台均稳定在3.4 V左右，且高倍率下充电曲线与放电曲线的电压平台间距增长有限.这说明较高倍率循环时电池极化现象仍可维持在较低水平，而低极化特性意味着电极在锂离子高速脱嵌过程中仍保持较低内阻[18]，直接证实了独特的纳米棒形貌对降低电池极化具有显著促进作用，进而提升了电池在高倍率应用环境下的充放电反应的可逆性.

为深入探究所合成材料的反应动力学特性，通过电化学工作站测试了 $LiFePO_4$ 的交流阻抗谱，并采用Zview软件对测试数据进行等效电路拟合分析，得到其Nyquist曲线和拟合曲线.如图5(a)所示，该Nyquist曲线由两部分组成：其一为高频区(1~100 kHz)的半圆形容抗弧，反映电极/电解质界面的电荷转移阻抗[19]，根据拟合结果可知材料的阻抗为150.1Ω；其二为低频区(通常≤1Hz)的斜线，对应 $Li^+$ 在 $LiFePO_4$ 材料中的扩散行为引起的Warburg阻抗，表明该过程由锂离子体相扩散为主导[20-21].

为进一步量化 $Li^+$ 在材料中的扩散能力，对低频区斜线数据进行处理，将实部阻抗($Z'$)与角频率的负二分之一次方($\omega^{-1/2}$)进行线性拟合，得到如图5(b)所示的阻抗-频率特性曲线.拟合后的曲线斜率为 23.8 $\Omega\cdot s^{-1/2}$，锂离子扩散系数 $D_{Li^+}$ 按以下公式计算：

$$D_{Li^+}=\frac{1}{2}\times\left(\frac{RT}{An^2F^2C\sigma}\right)^2, \qquad (1)$$

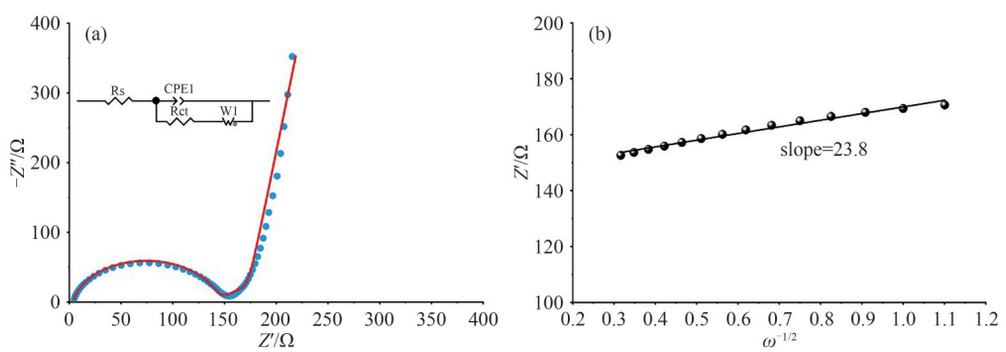
式中：$R$ 为气体常数，8.314 $J\cdot mol^{-1}\cdot K^{-1}$；$T$ 为绝对温度，K；$A$ 为极片表面积，$cm^2$；$n$ 为氧化还原反应中转移的电子数；$F$ 为法拉第常数，96485 $C\cdot mol^{-1}$；$C$ 为电极中 $Li^+$ 的浓度，$mol\cdot cm^{-3}$[22]．将实验测得的 $\sigma$ 值及相关常数代入公式(1)，计算得到锂离子扩散系数为 $1.83\times10^{-14}$ $cm^2\cdot s^{-1}$.较低的电荷转移阻抗和高 $Li^+$ 电导率，确保了 $LiFePO_4$ 在高倍率充放电的应用环境




(a)以1,3-丁二醇为有机溶剂的溶剂热法制备的$LiFePO_4$的倍率放电曲线;(b)5 C循环曲线;(c)倍率测试中的充放电曲线

图4 $LiFePO_4$的电化学性能图

Fig. 4 Electrochemical performance of $LiFePO_4$




(a) 以1,3-丁二醇为有机溶剂的溶剂热法制备的$LiFePO_4$的交流阻抗谱和拟合曲线;(b) 阻抗频率特性拟合曲线

图5 $LiFePO_4$的阻抗图

Fig. 5 Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) plot of $LiFePO_4$

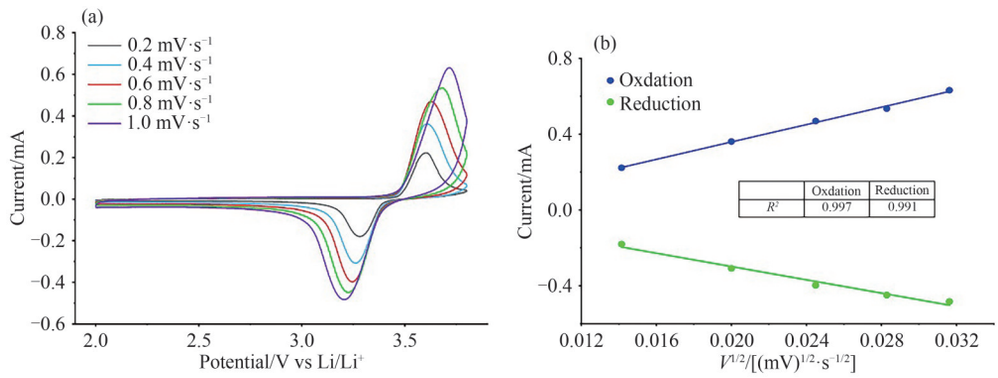
下仍保持较高的放电比容量,这一结果证实了通过1,3-丁二醇合成出的样品在极低的碳含量下仍具优异的电化学性能,而独特的纳米棒形貌对锂离子在材料体相中的扩散起到了显著的促进作用.

为进一步验证材料的离子传输动力学特性,采用循环伏安法(CV)对材料进行电性能测试,如图6(a)所示,图中五条曲线分别对应0.2、0.4、0.6、0.8、1 $mV\cdot s^{-1}$的扫速速率,其中上半部分为氧化峰,下半部分为还原峰,两类峰均对应于$Fe^{2+}/Fe^{3+}$的可逆氧化还原转变.所有CV曲线均呈现高度对称且相似的形貌,氧化峰与还原峰的峰值电流比乎一致,表明电化学过程中几乎没有副反应发生,且反应具有优异的可逆性.此外,图6(b)显示出峰值电流与扫描速率的平方根呈现出极佳的线性关系.根据锂离子扩散公式:

$$D_{Li^+}=\left(\frac{\sigma}{269000n^{3/2}AC}\right)^2, \tag{2}$$

代入实验数据计算得出,锂离子扩散系数为$1.16\times10^{-14}$ $cm^2\cdot s^{-1}$,该结果与通过电化学阻抗谱(EIS)独立测得的锂离子扩散系数数值处于同一数量级.两种不同动力学测试方法所得结果相互印证,共同证实了该材料具备较为理想的锂离子迁移动力学特性.

这一优异的离子传输性能，可归因于前期结构表征所揭示的材料独特的纳米棒状结构，其为锂离子扩散提供了丰富的表面通道，有效降低了离子传输阻力.




（a）以 1,3-丁二醇为有机溶剂的溶剂热法制备的 $LiFePO_4$ 在不同扫描速率 CV 图；（b）峰值电流 $I_p$ 与扫描速率平方根 $V^{1/2}$ 特性拟合曲线

图 6　$LiFePO_4$ 的 CV 图

Fig. 6　Cyclic voltammogram of $LiFePO_4$

## 3　结语

选用 1,3-丁二醇作为溶剂热法的有机溶剂，成功合成出了具有优异高倍率性能的纳米棒状 $LiFePO_4$，所制得的材料具有典型橄榄石结构，晶型完整且结晶度高. 充放电测试结果显示，样品在 0.1C、1C、2C、5C、10C 倍率下的放电比容量分别为 156.4、146.2、137.7、123、108.3 $mAh·g^{-1}$，在 5C 高倍率下循环 300 圈后容量保持率仍达 82.7%. 结合无机碳硫分析与透射电镜（TEM）表征结果可知，即便在极低碳含量条件下，纳米棒状 $LiFePO_4$ 仍展现出优异的高倍率电化学性能. 交流阻抗谱（EIS）和循环伏安法（CV）测试分析证实，该材料的电导率和锂离子扩散系数均得到有效提升. 综上所述，1,3-丁二醇在溶剂热合成过程中可有效调控 $LiFePO_4$ 的形貌，促使其形成有利于离子传输的纳米棒结构，进而获得综合电化学性能更优异的 $LiFePO_4$ 电极材料，为高倍率锂离子电池正极材料的制备提供了可行的工艺参考.

### 参　考　文　献


[1] Padhi A K, Nanjundaswamy K S, Goodenough J B. Phospho-olivines as positive-electrode materials for rechargeable lithium batteries [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1997, 144(4): 1188-1194.

[2] Wu H, Liu Q, Guo S. Composites of graphene and $LiFePO_4$ as cathode materials for lithium-ion battery: A mini-review[J]. Nano-Micro Letters, 2014, 6(4): 316-326.

[3] Tang X C, Li L X, Lai Q L, et al. Investigation on diffusion behavior of $Li^+$ in $LiFePO_4$ by capacity intermittent titration technique (CITT)[J]. Electrochimica Acta, 2009, 54(8): 2329-2334.

[4] Fan R Z, Fan C L, Hu Z, et al. Construction of high performance N-doped carbon coated $LiMn_{0.8}Fe_{0.2}PO_4$ nanocrystal cathode for lithium-ion batteries[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 876: 160090.

[5] Zhou X, Xie Y, Deng Y, et al. The enhanced rate performance of $LiFe_{0.5}Mn_{0.5}PO_4$/C cathode material *via* synergistic strategies of surfactant-assisted solid state method and carbon coating [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(3): 996-1004.

[6] Liu S, Fang H, Dai E, et al. Effect of carbon content on properties of $LiMn_{0.8}Fe_{0.19}Mg_{0.01}PO_4$/C composite cathode for lithium ion batteries[J]. Electrochimica Acta, 2014, 116: 97-102.

[7] Akhmetova K, Sultanov F, Mentbayeva A, et al. Advances in multi-element doping of $LiFePO_4$ cathode material for capacity enhancement in Li-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2024, 624: 235531.

[8] 刘浩文，汪晋. 水热法合成高容量的纳米级锂离子电池负极材料钴酸盐[J]. 中南民族大学学报（自然科学版），2011, 30(4): 11-15.

[9] Wang X, Miao C, Zhou J, et al. A novel synthesis of spherical $LiFePO_4$ nanoparticles [J]. Materials Letters, 2011, 65(14): 2096-2099.

[10] 罗子怡，查坐统，马航，等. 磷酸铁锂正极材料的合成工艺、改性及应用研究进展[J]. 生态产业科学与磷氟工程，2025, 40(5): 62-70.

[11] Sehrawat R, Mittal R, Tyagi D K, et al. Electrochemical behavior of emeraldine salt polymer coated $Li_xFePO_4$ cathode materials with excess lithium doping [J].

Macromolecular Symposia, 2023, 407(1): 2100496.

[12] Thongam V, Tarique H, Radheshyam, et al. Preparation and structural investigation of olivine structured $LiFePO_4$ [C]//Recent Advances in Functional Materials and Devices. Singapore: Springer, 2023: 245-255.

[13] Song J, Wang L, Shao G, et al. Controllable synthesis, morphology evolution and electrochemical properties of $LiFePO_4$ cathode materials for Li-ion batteries [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2014, 16(17): 7728-7733.

[14] Zhao L, Li Y, Yu M, et al. Electrolyte-wettability issues and challenges of electrode materials in electrochemical energy storage, energy conversion, and beyond [J]. Advanced Science, 2023, 10(17): 2300283.

[15] Yu J, Hu J, Li J. One-pot synthesis and electrochemical reactivity of carbon coated $LiFePO_4$ spindles [J]. Applied Surface Science, 2012, 263: 277-283.

[16] Chen Z L, Shen P. Thermally activated sintering-coarsening-coalescence-polymerization of amorphous silica nanoparticles[J]. Ceramics International, 2013, 39(3): 2365-2373.

[17] Tang R, Dong J, Wang C, et al. Rate-dependent failure behavior regulation of $LiFePO_4$ cathode *via* functional interface engineering[J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(22): 2421284.

[18] Xie W, Guo P, Gao X. Elucidating the rate limitation of lithium-ion batteries under different charging conditions through polarization analysis [J]. Journal of Energy Storage, 2024, 82: 110554.

[19] Ju H, Wu J, Xu Y. Revisiting the electrochemical impedance behaviour of the $LiFePO_4$/C cathode [J]. Journal of Chemical Sciences, 2013, 125(3): 687-693.

[20] Cruz-Manzo S, Greenwood P. An impedance model based on a transmission line circuit and a frequency dispersion Warburg component for the study of EIS in Li-ion batteries[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2020, 871: 114305.

[21] Gabano J D, Poinot T, Huard B. Bounded diffusion impedance characterization of battery electrodes using fractional modeling [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2017, 47: 164-177.

[22] Prosini P P, Lisi M, Zane D, et al. Determination of the chemical diffusion coefficient of lithium in $LiFePO_4$[J]. Solid State Ionics, 2002, 148(1/2): 45-51.

(责编&校对 刘钊)