

## 固相法合成 $\text{LiFePO}_4/\text{C}$ 正极材料的电化学性能

王国宝, 王先友, 舒洪波, 王英平, 杨顺毅, 刘修明, 裴 斧, 王雁生, 安红芳, 郑丽萍, 陈权启

(湘潭大学 化学学院 环境友好化学与应用教育部重点实验室, 湘潭 411105)

**摘 要:** 以廉价原材料  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  为铁源, 以蔗糖为碳源, 采用固相法合成了锂离子电池正极材料—— $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  复合材料。用 X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)和电化学测试技术对不同铁源合成的  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  复合材料的结构、形貌和电化学性能进行研究。结果表明: 合成的样品具有均一的橄榄石型结构, 以  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  为铁源合成的  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  复合材料的循环性能和高倍率放电性能均优于以  $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  为铁源合成的  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  复合材料的; 由  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  合成的  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  复合材料的 5C 倍率放电容量为 105.9 mA·h/g, 经循环 30 次后, 容量仍高达 105.2 mA·h/g。

**关键词:**  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  复合材料; 铁源; 锂离子电池; 正极材料

中图分类号: O646

文献标志码: A

## Electrochemical performance of $\text{LiFePO}_4/\text{C}$ cathode materials synthesized by solid-state reaction

WANG Guo-bao, WANG Xian-you, SHU Hong-bo, WANG Ying-ping, YANG Shun-yi, LIU Xiu-ming,  
PEI Fu, WANG Yan-sheng, AN Hong-fang, ZHENG Li-ping, CHEN Quan-qi

(Key Laboratory of Environmentally Friendly Chemistry and Applications,

Ministry of Education, School of Chemistry, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

**Abstract:** The lithium ion battery cathode material  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  composite was prepared by a solid-state method using the low cost  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  as iron source and sucrose as carbon source. The structure, morphology and electrochemical performance of the  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  samples prepared with different iron sources were investigated by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and electrochemistry techniques. The results show that the resultant  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  has homogeneous olivine structure. And the capacity and cycle ability of  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  prepared from  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  are higher than that of  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  composite synthesized by a traditional solid-state method using  $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  as iron source. The capacity is 105.9 mA·h/g at 5C rate and remained 105.2 mA·h/g after 30 cycles.

**Key words:**  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  composite; iron source; lithium ion battery; cathode material

锂离子电池以其高可逆容量、高电压、高循环性能和高能量密度等优异特性而备受世人青睐, 被称为 21 世纪的主导移动电源, 其应用领域不断扩大。在锂离子电池中, 正极材料约占电池整个成本的 40% 左右, 且正极材料对锂离子电池的安全性起着重要作用, 故正极材料已经成为制约其大规模推广应用的瓶颈, 因

而制得性能优越、价格便宜的正极材料是锂离子商业化进程中的关键性因素。已经商品化的  $\text{LiCoO}_2$  资源匮乏, 价格较高, 并且有毒性;  $\text{LiNiO}_2$  合成困难, 且电化学活性差, 循环性能也较差; 而  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  的循环性能和高温性能尚存在许多问题有待进一步解决。自从 1997 年 PADHI 等<sup>[1]</sup>首次提出以橄榄石结构的  $\text{LiFePO}_4$

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(20871101); 科技部火炬计划资助项目(2009GJD20021); 湖南省科技厅重点攻关资助项目(2009WK2007); 湖南省自然科学基金市州联合基金重点资助项目(09JJ8001)

**收稿日期:** 2009-11-01; **修订日期:** 2010-01-15

**通信作者:** 王先友, 教授, 博士; 电话: 0731-58293043; E-mail: wxianyou@yahoo.com

作为锂离子电池正极材料以来,如何改进和提高LiFePO<sub>4</sub>的性能成为研究热点。

LiFePO<sub>4</sub>具有170 mA·h/g的理论比容量,3.4 V(vs Li<sup>+</sup>/Li)的高放电电压,优异的循环性能和热稳定性,原材料来源丰富且无毒等优点,成为理想的锂离子电池正极材料之一。但橄榄石结构的LiFePO<sub>4</sub>正极材料同时也存在电子导电率和锂离子扩散速率低等缺点,导致材料在大电流充/放电时容量低,循环性能下降,阻碍了LiFePO<sub>4</sub>正极材料的商业化。所以,目前对LiFePO<sub>4</sub>的研究主要是针对这些问题进行改性研究,包括金属粉末包覆<sup>[2-4]</sup>、碳包覆<sup>[5-8]</sup>和掺杂各种金属离子<sup>[9-13]</sup>等。其中,碳包覆方法大都以有机物为碳源,有机物在惰性气氛高温下,可裂解为颗粒细小的碳微粒均匀分布在LiFePO<sub>4</sub>表面,显著提高材料的电子电导率。同时,均匀分布的碳微粒可有效抑制LiFePO<sub>4</sub>晶粒的长大,从而提高锂离子在LiFePO<sub>4</sub>固相中的扩散速率,改进材料的电化学性能<sup>[14]</sup>。以蔗糖为碳源,采用碳包覆的方式来改进LiFePO<sub>4</sub>正极材料的性能。LiFePO<sub>4</sub>正极材料的合成方法主要有固相法<sup>[15]</sup>、溶胶-凝胶法<sup>[16]</sup>、水热法<sup>[17]</sup>、液相共沉淀法<sup>[18]</sup>和微波合成法<sup>[19]</sup>等。目前,工业上大都采用操作简单且易于控制的固相合成方法,原料以昂贵的FeC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O为主。采用FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O作为铁源来合成LiFePO<sub>4</sub>正极材料的相关工作<sup>[20-21]</sup>已有报道,但基本上是通过溶液法来合成前驱体FePO<sub>4</sub>或者直接制备LiFePO<sub>4</sub>。为了改善LiFePO<sub>4</sub>的性能,降低生产成本且易于工业化,本文作者采用廉价原材料FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O为铁源,通过固相法合成电化学性能优良的碳包覆LiFePO<sub>4</sub>/C复合材料,并研究LiFePO<sub>4</sub>/C复合材料的结构、形貌和电化学性能。

## 1 实验

### 1.1 LiFePO<sub>4</sub>/C复合材料的制备

往 $n(\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}):n(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4):n(\text{Li}_2\text{CO}_3)=1:1:0.5$ 的原料混合物中加入占最终产物5%碳含量的蔗糖,将混合物置于球磨罐中,在ND2-1L型变频行星式球磨机(南京南大天尊电子有限公司)球磨3 h。将球磨后的混合物造粒,置于氩气气氛的高温管式炉中350 °C下焙烧8 h,冷却至室温,再将预焙烧产物球磨3 h,造粒,然后将其置于Ar和H<sub>2</sub>体积比为95:5的Ar和H<sub>2</sub>混合气氛的高温管式炉中,在700 °C焙烧15 h,冷至室温后,研磨,过37 μm筛,得到LiFePO<sub>4</sub>/C复合材料,记为样品A。

作为对比,以FeC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O为铁源,采用传统固相合成法<sup>[14]</sup>合成LiFePO<sub>4</sub>/C复合材料,记为样品B。

### 1.2 材料结构与形貌的表征测试

用日本理学D/max-3C型X射线衍射仪(XRD)对样品进行物相分析,使用Cu K<sub>α</sub>靶,λ=0.154 056 nm,石墨单色器,管电流100 mA,管电压50 kV,扫描角度为10°~70°(2θ);使用日本JEOL公司JSM-5600LV型扫描电子显微镜(SEM)观察样品的颗粒大小和表面形貌。

### 1.3 材料的电化学性能测试

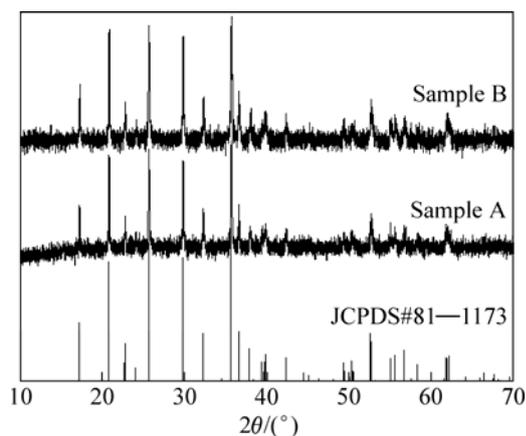
以NMP为溶剂,将LiFePO<sub>4</sub>/C、乙炔黑和PVDF按质量比85:10:5混合均匀成正极浆液,涂覆在2025不锈钢扣式电池壳上,120 °C真空干燥20 h。以Celgard2400聚丙烯多孔膜为隔膜,电解液为1 mol/L LiPF<sub>6</sub>的碳酸乙烯酯(EC)和二乙基碳酸酯(DEC)的混合液(V(EC):V(DEC)=1:1,韩国三星公司),以金属锂片为负极,在充满氩气的手套箱内组装成扣式电池。

在深圳新威尔电子有限公司生产的NEWARE电池测试系统进行充放电性能测试,电压测试范围为2.3~4.2 V;在上海辰华仪器公司生产的CHI660电化学工作站进行循环伏安和交流阻抗测试,循环伏安测试电压范围为2.3~4.2 V,扫速为0.1 mV/s;交流阻抗测试的频率范围为10 mHz~100 kHz,扰动振幅±5 mV。

## 2 结果与讨论

### 2.1 物相分析

图1所示为不同铁源合成的LiFePO<sub>4</sub>/C样品的XRD谱以及LiFePO<sub>4</sub>的标准XRD谱。表1所列的为以FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O为铁源合成的LiFePO<sub>4</sub>/C复合材料样品A与以FeC<sub>2</sub>O<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O为铁源合成的LiFePO<sub>4</sub>/C复合材料样品B的晶胞参数和晶胞体积对比,虽然前者的晶胞体积略小于后者的,但差别不大,均与LiFePO<sub>4</sub>标准值相近。并从图1中可以看出,样品A和B的特征衍射峰位置均与LiFePO<sub>4</sub>的标准图谱(PDF: 81-1173)相吻合,属简单正交晶系,Pnma空间群。样品A和B的衍射峰都很尖锐,说明这两种材料的结晶度都很高。此外,元素分析仪测出样品A和B的含碳量分别约为3.36%和3.74%,但在样品A和B的衍射峰中均没有出现碳的特征衍射峰,可能是由于碳以无定形碳存在或者碳含量较低造成的。

图1 LiFePO<sub>4</sub>/C 样品的 XRD 谱Fig.1 XRD patterns of LiFePO<sub>4</sub>/C samples表1 LiFePO<sub>4</sub>/C 样品的晶胞参数Table 1 Lattice parameters of LiFePO<sub>4</sub>/C samples

Sample	<i>a</i> /nm	<i>b</i> /nm	<i>c</i> /nm	<i>V</i> /nm <sup>3</sup>
A	1.028 5	0.599 8	0.471 3	0.290 7
B	1.028 0	0.599 8	0.471 7	0.290 8
Standard LiFePO <sub>4</sub>	1.033 0	0.601 0	0.469 2	0.291 4

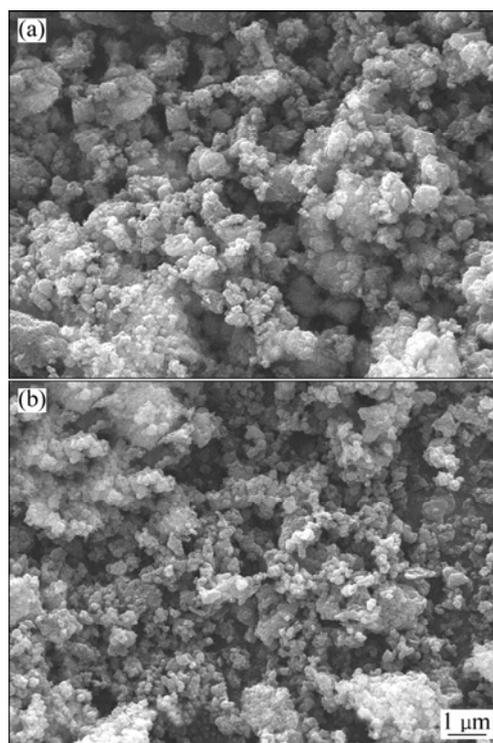
## 2.2 形貌分析

对于正极材料而言, 其粉体一次粒子和二次粒子的大小及各粒子之间的结合方式对材料的性能影响很大。为了比较各样品一次粒子的大小, 根据晶粒大小和衍射峰宽化之间的关系——Scherrer 公式可进行计算:

$$D = K\lambda / (\beta_{1/2} \cos\theta) \quad (1)$$

式中:  $D$  代表垂直于反射晶面的晶粒平均粒度;  $\beta_{1/2}$  代表衍射峰值半高宽的宽化程度;  $\theta$  为布拉格角;  $\lambda$  为入射 X 射线波长 ( $\lambda = 0.154\ 059\ 8\ \text{nm}$ );  $K$  代表 Scherrer 常数, 与晶粒形状、 $\beta$ 、 $D$  的定义有关,  $K$  取 0.9。选取各材料最强物相特征峰的晶面(311)进行计算, 可得各晶粒平均粒度  $D_A = 36\ \text{nm}$ ,  $D_B = 25\ \text{nm}$ 。

两种铁源合成的 LiFePO<sub>4</sub>/C 样品的 SEM 像如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 两种铁源合成的材料的颗粒均呈现无规则形状, 明显的有团聚发生, 大量的一次粒子聚集在一起构成粒径较大的二次粒子, 颗粒与颗粒之间的接触比较紧密, 碳分散在 LiFePO<sub>4</sub> 材料周围, 形成导电碳网, 有效地提高材料的导电性。样品 A 的一次粒子尺寸为 40~50 nm, 团聚后形成的二次粒子尺寸为 200 nm 左右; 而样品 B 颗粒的一次粒子尺寸为 30~40 nm, 团聚后形成的二次粒子粒径 100~150 nm。因此, 一次粒子的粒径与 Scherrer 公式计算得到

图2 LiFePO<sub>4</sub>/C 样品的 SEM 像Fig.2 SEM images of LiFePO<sub>4</sub>/C samples: (a) Sample A; (b) Sample B

的值基本相吻合。

## 2.3 电化学性能测试

图 3 所示为两种铁源合成的 LiFePO<sub>4</sub>/C 样品 A 和 B 在 0.1C 倍率条件下的充放电曲线。从图 3 中可以看出, 两个样品的充放电曲线都存在一对明显的充放电平台, 对应的是 LiFePO<sub>4</sub> 和 FePO<sub>4</sub> 两相之间的转换反应, 即

充电过程:



放电过程:



样品 A 的首次充电比容量和放电比容量分别为 152.2 mA·h/g 和 151.1 mA·h/g, 其库仑效率高达 99.3%。样品 B 的首次充电比容量和放电比容量分别为 156.8 mA·h/g 和 155.5 mA·h/g, 其库仑效率为 99.2%。样品 A 的首次放电比容量虽比样品 B 的稍低, 但样品 A 的放电曲线更为平坦, 放电电位平台明显比样品 B 的高, 可见样品 A 将比样品 B 具有更高的比能量。样品 A 的充电平台低于样品 B 的, 而样品 A 的放电平台高于样品 B 的, 说明样品 A 的电极极化比样品 B 的小,

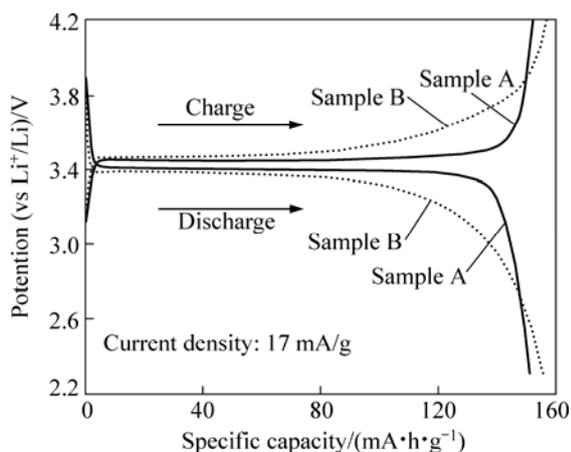


图3 样品A和B的首次充放电曲线

Fig.3 Initial charge-discharge curves of samples A and B

样品A比样品B具有更好的反应可逆性,表明样品A可能具有更好的循环性能。

样品A和B的0.1C循环性能曲线如图4所示。由图4可看出,在0.1C倍率放电条件下,样品A的首次放电比容量为151.1 mA·h/g,循环100次后,容量为148.9 mA·h/g,容量保持率为98.5%;样品B的首次放电比容量为155.5 mA·h/g,循环100次后,容量为149.6 mA·h/g,容量保持率为96.2%。同时,从不同放电倍率下的循环性能曲线(见图5)上可以看出,虽然在0.1C、0.5C和1C的放电倍率下,样品A的放电比容量比样品B的稍低,但是其循环稳定性优于样品B的。在5C高倍率放电时,样品A的放电比容量和循环稳定性均优于样品B的。样品A的5C首次放电容量为105.9 mA·h/g,循环30次后,容量仍高达105.2 mA·h/g;而样品B的5C首次放电容量为101.2 mA·h/g,循环30次后,容量仅为95.7 mA·h/g。

图6所示为样品A和B在0.1 mV/s扫速下的循环伏安曲线。从图6中可以看出,两个样品具有形状

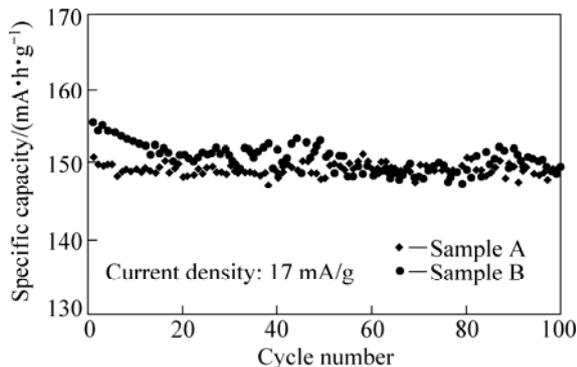


图4 样品A和B的0.1C时的循环性能曲线

Fig.4 Cycle performance curves of samples A and B at 0.1C

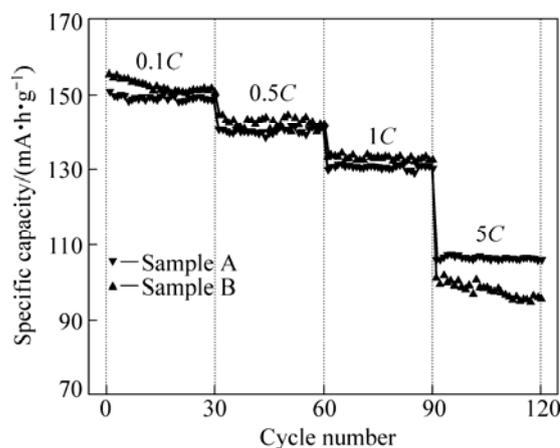


图5 样品A和B在不同放电倍率下的循环性能曲线

Fig.5 Cycle performance curves of samples A and B at different discharge rates

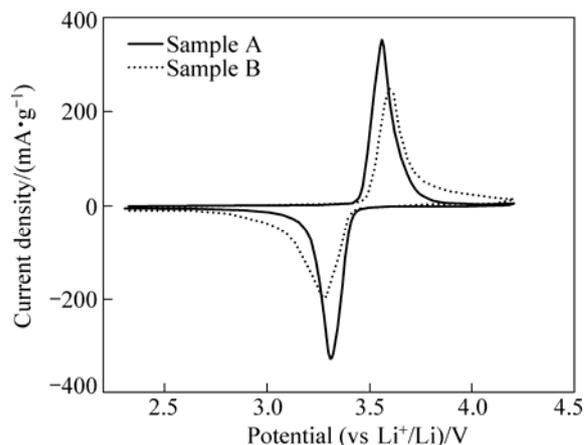


图6 样品A和B在扫描速率为0.1 mV/s时的循环伏安曲线

Fig.6 Cyclic voltammograms of samples A and B at scan rate of 0.1 mV/s

相似的循环伏安曲线,说明尽管两个不同的Fe源制备LiFePO<sub>4</sub>/C,但两个样品具有相同的电极反应机理;两个样品的循环伏安曲线上都存在一对比较对称的氧化还原峰,表现出典型的两相反应特征,其中氧化峰对应正极材料LiFePO<sub>4</sub>的脱锂过程,还原峰对应正极材料LiFePO<sub>4</sub>的嵌锂过程。但样品A的氧化峰和还原峰电位差小于样品B的,这说明样品A的反应可逆性高于样品B的,在循环过程中,样品A的循环稳定性将优于样品B的,这与图5中在不同放电倍率下的循环性能测试结果一致。

为了进一步研究材料的电化学性能,对样品A和B都进行了电化学阻抗测试。图7所示为样品A和B的电化学阻抗谱图,表2所列为通过图8的等效电路

拟合后得出的相关参数。在图 7 中, 两个谱图都是由高频区的半圆和低频区的直线组成。高频区的半圆是发生在电解质/氧化物电极界面的电荷传输反应所引起的阻抗  $R_{ct}$ , 低频区的直线则是锂离子在氧化物电极界面扩散所引起的 Warburg 阻抗( $R_w$ ), 而高频曲线与实轴的交点一般可以反映出溶液电阻  $R_s$ 、集流体及集流体与正极材料之间的欧姆电阻( $R_\Omega$ )的总和<sup>[22]</sup>。

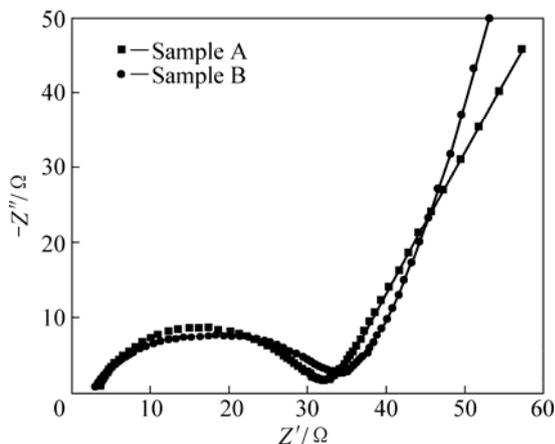


图 7 样品 A 和 B 的交流阻抗谱

Fig.7 AC impedance spectra of samples A and B

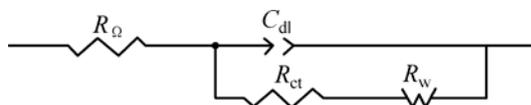


图 8 拟合电化学交流阻抗实验数据的等效电路

Fig.8 Equivalent circuit used for fitting experimental AC impedance data

表 2 拟合得出的等效电路各元件的数值

Table 2 Values of elements in equivalent circuit

Sample	$R_\Omega/\Omega$	$R_{ct}/\Omega$	$R_w/\Omega$
A	3.15	27.81	0.67
B	2.16	31.77	0.72

从表 2 中根据图 8 的等效电路拟合后的数据发现, 样品 A 和 B 两种材料的电荷转移阻抗  $R_{ct}$  分别为 27.81  $\Omega$  和 31.77  $\Omega$ , 样品 A 具有更小的电荷转移阻抗, 这有利于克服充放电过程中的动力学限制, 使 LiFePO<sub>4</sub> 的活性颗粒中脱嵌锂深度得到提高, 从而使其表现出更好的电化学性能。同时, 样品 A 的欧姆电阻  $R_\Omega$  略大于样品 B 的, 其原因可能是样品 A 的碳含量略低于样品 B 而粒径略大于样品 B 的所致。

### 3 结论

1) 以廉价的硫酸亚铁为铁源合成的 LiFePO<sub>4</sub>/C 正极材料与以价格较贵的草酸亚铁为铁源用传统固相法合成的 LiFePO<sub>4</sub>/C 正极材料均具有单一的橄榄石型结构, 颗粒为不规则形状, 结晶度高, 碳微包覆在 LiFePO<sub>4</sub> 表面形成均匀的导电网络。

2) 以硫酸亚铁为铁源合成的 LiFePO<sub>4</sub>/C 的颗粒尺寸略大于草酸亚铁为铁源合成的 LiFePO<sub>4</sub>/C 的, 但前者的放电平台较高, 电极充放电极化小, 电荷转移阻抗小。

3) 室温下, 以硫酸亚铁为铁源合成的 LiFePO<sub>4</sub>/C 在 0.1C、0.5C 和 1C 倍率的放电比容量分别稳定在 150、140 和 130 mA·h/g 左右, 容量与草酸亚铁为铁源合成的 LiFePO<sub>4</sub>/C 的相当。但前者在 5C 倍率放电时, 30 次循环后, 容量仍高达 105.2 mA·h/g, 而后者 30 次循环后, 容量仅为 95.7 mA·h/g。且前者的循环性能和大倍率放电性能均优于后者的。

### REFERENCES

- [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] CHUNG S Y, BLOKING J T, CHIANG Y M. Electronically conductive phospho-olivines as lithium storage electrodes[J]. Nature Materials, 2002, 1(2): 123-128.
- [3] MI C H, CAO Y X, ZHANG X G, ZHAO X B, LI H L. Synthesis and characterization of LiFePO<sub>4</sub>/(Ag+C) composite cathodes with nano-carbon webs[J]. Power Technology, 2008, 181(3): 301-306.
- [4] 张亚利, 高立军. LiFePO<sub>4</sub>/Cu 复合正极材料的制备及电化学性能[J]. 有色金属(冶炼部分), 2008(3): 48-50.  
ZHANG Ya-li, GAO Li-jun. Preparation and electrochemical performance of LiFePO<sub>4</sub>/Cu composite cathode material[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2008(3): 48-50.
- [5] HSU K F, TSAY S Y, HWANG B J. Physical and electrochemical properties of LiFePO<sub>4</sub>/carbon composite synthesized at various pyrolysis periods[J]. Journal of Power Sources, 2005, 146(1/2): 529-533.
- [6] ZHENG Jun-chao, LI Xin-hai, WANG Zhi-xing, GUO Hua-jun, ZHOU Shao-yun. LiFePO<sub>4</sub> with enhanced performance synthesized by a novel synthetic route[J]. Journal of Power Sources, 2008, 184(2): 574-577.
- [7] KIM J K, CHERUVALLY G, AHN J H. Electrochemical

- properties of LiFePO<sub>4</sub>/C synthesized by mechanical activation using sucrose as carbon source[J]. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2008, 12(7/8): 799–805.
- [8] 钟美娥, 周志晖, 周震涛. 三价铁源对碳热还原法制备 LiFePO<sub>4</sub>/C 结构和性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2009, 19(8): 1462–1467.  
ZHONG Mei-e, ZHOU Zhi-hui, ZHOU Zhen-tao. Effects of Fe<sup>3+</sup> sources on structure and properties of LiFePO<sub>4</sub>/C prepared by carbothermal reduction method[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2009, 19(8): 1462–1467.
- [9] WANG De-yu, LI Hong, SHI Si-qi, HUANG Xue-jie, CHEN Li-quan. Improving the rate performance of LiFePO<sub>4</sub> by Fe-site doping[J]. *Electrochimica Acta*, 2005, 50(14): 2955–2958.
- [10] LIU H, CAO Q, FU L J, LI C, WU Y P, WU H Q. Doping effects of zinc on LiFePO<sub>4</sub> cathode material for lithium ion batteries[J]. *Electrochemistry Communications*, 2006, 8(10): 1553–1557.
- [11] WANG G X, NEEDHAM S, YAO J, WANG J Z, LIU R S. A study on LiFePO<sub>4</sub> and its doped derivatives as cathode materials for lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 159(1): 282–286.
- [12] HU Guo-rong, GAO Xu-guang, PENG Zhong-dong, DU Ke, TAN Xian-yan, Liu Yan-jun. Influence of Ti<sup>4+</sup> doping on electrochemical properties of LiFePO<sub>4</sub>/C cathode material for lithium-ion batteries[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2007, 17(2): 296–300.
- [13] SHIN H C, PARK S B, JANG H, CHUNG K Y, CHO W I, KIM C S, CHO B W. Rate performance and structural change of Cr-doped LiFePO<sub>4</sub>/C during cycling[J]. *Electrochimica Acta*, 2008, 53(27): 7946–7951.
- [14] 赵连海, 李琪, 乔庆东, 梁子雷, 宋洋. 锂离子电池正极材料 LiFePO<sub>4</sub>/C 的研究进展[J]. *化工科技*, 2008, 16(4): 56–59.  
ZHAO Lian-hai, LI Qi, QIAO Qing-dong, LIANG Zi-lei, SONG Yang. Research progress of LiFePO<sub>4</sub>/C cathode material for Li-ion batteries[J]. *Science & Technology in Chemical Industry*, 2008, 16(4): 56–59.
- [15] DONG Y Z, ZHAO Y M, CHEN Y H, HE Z F, KUANG Q. Optimized carbon-coated LiFePO<sub>4</sub> cathode material for lithium-ion batteries[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2009, 115(1): 245–250.
- [16] 林燕, 高明霞, 李玉凤, 潘洪革, 李寿权. 铁源对溶胶-凝胶法制备 LiFePO<sub>4</sub>/C 的结构和电化学性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2008, 18(3): 546–550.  
LIN Yan, GAO Ming-xia, LI Yu-feng, PAN Hong-ge, LI Shou-quan. Effects of iron sources on structure and electrochemical properties of LiFePO<sub>4</sub>/C prepared by sol-gel method[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(3): 546–550.
- [17] DOKKO K, KOIZUMI S, SHARAISHI K, KANAMURA K. Electrochemical properties of LiFePO<sub>4</sub> prepared via hydrothermal route[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 165(2): 656–659.
- [18] YANG Mu-rong, KE Wei-hsin, WU She-huang. Preparation of LiFePO<sub>4</sub> powders by co-precipitation[J]. *Journal of Power Sources*, 2005, 146(1/2): 539–543.
- [19] ZHANG Yong, FENG Hui, WU Xing-bing, WANG Li-zhen, ZHANG Ai-qin, XIA Tong-chi, DONG Hui-chao, LIU Ming-hao. One-step microwave synthesis and characterization of carbon-modified nanocrystalline LiFePO<sub>4</sub>[J]. *Electrochimica Acta*, 2009, 54(11): 3206–3210.
- [20] ZHOU Bin-quan, LI Xin-hai, WANG Zhi-xing, GUO Hua-jun. Novel synthesis of LiFePO<sub>4</sub> by aqueous precipitation and carbothermal reduction[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2006, 98(2/3): 373–376.
- [21] KUWAHARA A, SUZUKI S, MIYAYAMA M. High-rate properties of LiFePO<sub>4</sub>/carbon composites as cathode materials for lithium-ion batteries[J]. *Ceramics International*, 2008, 34(4): 863–866.
- [22] SHIN H C, CHO W I, JANG H. Electrochemical properties of the carbon-coated LiFePO<sub>4</sub> as a cathode material for lithium-ion secondary batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 159(2): 1383–1388.

(编辑 李艳红)