

固相法制备锂离子电池正极材料 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4$ 及其性能研究

蔺佳明, 宋远博, 赵桃林, 王育华

(石家庄铁道大学 材料科学与工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:以 LiFePO_4 为研究对象, 通过 Mn(Mn 源为 $\text{MnC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 部分替代 Fe(Fe 源为 $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) 的同时, 采用固相法对替代材料 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}(x=0, 0.1, 0.3, 0.5)$ 进行碳包覆, 以提高其放电比容量、电导率或放电平台。通过 XRD、TEM、SEM 和充放电测试, 研究了磷酸锰铁锂的晶体结构、形貌以及电化学性能。结果表明: 包覆掺杂后的材料仍保持橄榄石形晶体结构, 碳包覆和掺杂 Mn 没有对原材料的形貌产生明显影响。制备的 $\text{LiMn}_{0.1}\text{Fe}_{0.9}\text{PO}_4/\text{C}$ 正极材料具有最佳的电化学性能, 其 0.2 C 倍率下的放电比容量为 124.8 mAh/g, 放电平台为 3.4 V, 阻抗为 43.8 Ω 。在 1 C 倍率下循环 30 周之后, 放电比容量仍有 120 mAh/g, 容量保持率为 97.71%, 具有较优的循环性能。

关键词: 锂离子电池; 正极材料; 磷酸锰铁锂

中图分类号: TM912.9 文献标志码: A 文章编号: 2095-0373(2019)02-0121-06

0 引言

随着科学技术的进步与工业化进程的不断发 展, 全球能源危机、环境污染、生态破坏等问题 愈发严重, 大众的环境保护意识不断增强, 新 能源的发展刻不容缓。锂离子电池因其比能 量高、安全性高、循环次数多、应用范围 广、材料来源丰富等诸多优点而备受科学界 的热捧, 尤其是近年公共电动公交车的普 及, 越来越走入普通家庭的视野^[1]。

作为锂离子电池正极材料, 磷酸铁锂的理 论比容量为 170 mAh/g, 其循环稳定性好, 在 高温、安全性、成本等方面具有突出优势, 但 其具有缓慢的离子扩散速率, 使用电压仅 3.4 V, 且倍率性能不足, 导电率低。近年来 很多科研人员尝试通过掺杂金属离子来改善 其性能^[2-5]。同为橄榄石型结构的 LiMnPO_4 正极材料, 具有比 LiFePO_4 更高的能量密 度, 更高的工作电位平台(4.1 V, vs. Li^+/Li) 被认为是最有希望取代 LiFePO_4 的锂离子 电池正极材料^[6]。Padhi et al^[7] 发现 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4$ 复合材料中 Fe 和 Mn 共同占据 橄榄石结构的八面体的 4c 位置, 其具有较高 的放电比容量。随着锰含量的增加, $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4$ 复合材料相对金属锂的平均电压 逐渐增高, 即随着 x 在 0~1.0 之间变化, 其 平均工作电压在 3.4~4.1 V 之间变化, 该电 压范围不会因为电压过高引起电解液的分解。 Yao et al^[8] 用 $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 作为 Mn 源, 采用溶胶-凝胶法制得 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4$, 电 化学性能测试结果表明该样品的电化学性能 随着 Mn 含量的增加而下降。

本文采用草酸锰作为 Mn 源, 通过固相法 制备了 4 种不同 Mn 含量的样品 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}(x=0, 0.1, 0.3, 0.5)$, 期望通过掺杂 Mn 元素来提 高 LiFePO_4 的放电平台和放电比容量。通过 对样品进行表征(XRD、SEM、TEM)以及电化 学性能测试(充放电循环、EIS), 寻找 Mn 元 素的 最佳掺杂比例。

收稿日期: 2018-01-04 网络出版日期: 2019-03-22 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxkxbzrb.20180004

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1402.N.20190322.1705.003.html>

作者简介: 蔺佳明(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事新能源锂电材料的研究。E-mail: 972533432@qq.com

蔺佳明, 宋远博, 赵桃林, 等. 固相法制备锂离子电池正极材料 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4$ 及其性能研究[J]. 石家庄铁道大学学报: 自然科学版, 2019, 32(2): 121-126.

1 实验

1.1 实验原料与仪器

实验原料包括碳酸锂(Li_2CO_3 , 纯度 99%)、二水合草酸锰($\text{MnC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 纯度 95%)、草酸亚铁($\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 纯度 99%)、磷酸二氢铵($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, 纯度 99%)、葡萄糖水合物($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, 纯度 99%)、无水乙醇($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, A. R.); 另外在组装电池时还需用到粘结剂(PTFE)、锂片、隔膜(Celgard2400)、电解液(1 mol/L LiPF_6 和 EC+DMC+DEC(1:1:1 体积比))。

实验设备:真空管式炉(GSL-1600X, 合肥科晶材料技术有限公司)、真空干燥箱(DZ-2BC II, 天津市泰斯特仪器有限公司)、电热恒温干燥箱(202-OA, 吴江市威信电热设备有限公司)、Etelux 手套箱(Lab2000, 北京市昌平白各庄工业园)、电化学工作站(CHI660E, 上海辰华仪器有限公司)、蓝电电池测试仪(CT2001C, 武汉市蓝电电子股份有限公司)、行星式球磨机(QM-3SPO₄, 南京南大仪器有限公司)。

1.2 制备以 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}(x=0, 0.1, 0.3, 0.5)$ 为正极材料的模拟电池

将原材料 Li_2CO_3 、 $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{MnC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 按照化学计量比精确称量^[9], 加入无水乙醇($m_{\text{固体原料}} : m_{\text{无水乙醇}} = 2 : 3$)作为分散剂, 加入葡萄糖作为包覆碳源和还原剂(15 g/1mol $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4$), 加入不锈钢碾磨球($m_{\text{不锈钢小球}} : m_{\text{固体原料}} = 10 : 1$)用以充分搅拌均匀。将上述制作好的混合物密封于不锈钢球磨罐中, 在 QM-3SPO₄ 行星式球磨机上进行球磨, 球磨时间为 8 h, 球磨转速为 600 r/min, 得到浆料, 然后从烘箱中取出浆料置于烘箱内 80 °C 烘干 12 h, 得到前驱体。将前驱体放于粉碎机中粉碎得到前驱体粉末; 然后放入 GSL-1600X 真空管式炉中, 在 N_2 保护气氛下 2 h 升温至 400 °C, 恒温 2 h, 2 h 升温至 650 °C, 恒温 10 h, 然后随炉冷却至室温, 得到材料 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}(x=0, 0.1, 0.3, 0.5)$ 。

以上述制备的 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}(x=0, 0.1, 0.3, 0.5)$ 化合物为正极活性物质, 炭黑(Super P)为导电剂, 60%的聚四氟乙烯乳液(PTFE)为粘结剂, 按照活性物质: 导电剂: 粘结剂=82:10:8 的质量比充分混合作。

用无水乙醇做分散剂, 然后反复充分研磨、在压片机上碾压成薄极片, 通过打孔器打成圆片状直径约为 7 mm, 厚度约为 0.3 mm 的正极极片。将制备的极片在真空干燥箱中 80 °C 烘干 12 h 作为正极材料。以金属锂片作为负极, 隔膜为 Celgard2400。电解液为张家港市国泰华荣化工新材料尤溪县公司生产的 1 mol/L LiPF_6 和 EC+DMC+DEC(1:1:1 体积比)。在真空手套箱中完成柱状电池的装配工作。

1.3 材料表征

用德国布鲁克公司 D8 ADVANCE 型号的 X 射线衍射仪, 工作条件为 45 kV 40 mA, 扫描速度为 4 (°)/min, 步长为 0.02°, 扫描范围(2 θ)为 10°~70°; 采用 INSPECT 850 型扫描电子显微镜, 加速电压为 5 kV; 运用日本的 JEM-2100 型透射电子显微镜(点分辨率为 0.23 nm, 晶格分辨率为 0.14 nm, 加速电压为 80~200 kV, 放大倍率为 50~1 500 000)。

1.4 材料的电化学性能测试

柱状电池的充放电测试在武汉市蓝电电子股份有限公司生产的电池测试系统(CT2001C)上进行, 定义 1 C 倍率下的充放电比容量为 170 mAh/g, 测试电压范围 2.0~4.0 V。将组装好的柱状电池静置 12 h 后, 测试几种材料在 0.1 C、0.2 C、0.5 C、1 C 倍率充放电测试, 测试流程为: 先恒流充电至 4 V, 再恒压充电, 然后恒流放电至 2 V, 进行循环充放。

交流阻抗实验是将组装好的柱状电池静置 12 h 之后以 0.1 C 充放电 2 次后, 使其开路电压稳定在 3 V 左右, 在上海辰华仪器有限公司生产的 CHI660E 电化学工作站上测试, 扰动电压为 5 mV, 频率范围为 0.01 Hz~100 kHz。

2 结果与讨论

2.1 材料的结构与形貌分析

图 1 为 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}$ ($x=0, 0.1, 0.3, 0.5$) 样品 XRD 图。由图可知, 样品在 15° 至 65° 的衍射角度 (2θ) 范围内都出现了明显的橄榄石形 (pnma 空间群) 结构的特征峰, 且每个样品的主要衍射峰位置与 LiFePO_4/C 一致, 说明 Mn 元素的加入有效取代了 LiFePO_4 晶格中 Fe 元素, 掺杂后样品仍保持橄榄石形结构。 LiFePO_4/C 、 $\text{LiMn}_{0.1}\text{Fe}_{0.9}\text{PO}_4/\text{C}$ 、 $\text{LiMn}_{0.3}\text{Fe}_{0.7}\text{PO}_4/\text{C}$ 、 $\text{LiMn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$ 所在 (111) 晶面对应的 2θ 值分别为 26.740° 、 25.619° 、 25.460° 、 25.458° 。由此可知, 随掺 Mn 量的增加, 同一晶面对应的衍射峰向低角度偏移, 这是由于 Mn^{2+} 的半径 (0.97 \AA) 比 Fe^{2+} 的半径 (0.92 \AA) 大, Mn 元素的插入使 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}$ 的晶胞有所增大。

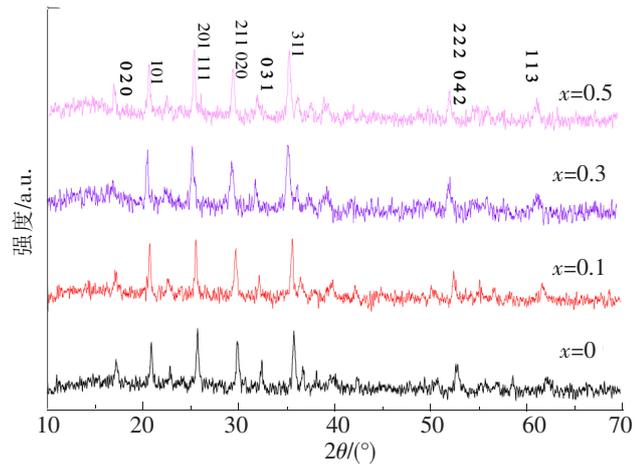


图 1 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}$ ($x=0, 0.1, 0.3, 0.5$) 样品的 XRD 对比图

图 2 为 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}$ ($x=0, 0.1, 0.3, 0.5$) 样品的 SEM 图。4 个样品材料均呈类球状, 有微孔。 LiFePO_4/C 和 $\text{LiMn}_{0.1}\text{Fe}_{0.9}\text{PO}_4/\text{C}$ 的颗粒大小为 $20\sim 50 \text{ nm}$, 分布较为均匀, 分散程度好, 且 $\text{LiMn}_{0.1}\text{Fe}_{0.9}\text{PO}_4/\text{C}$ 的颗粒稍微偏大; $\text{LiMn}_{0.3}\text{Fe}_{0.7}\text{PO}_4/\text{C}$ 和 $\text{LiMn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$ 的颗粒大小为 $20\sim 100 \text{ nm}$ 之间, 颗粒大小不均一, 分散程度不好, 出现颗粒聚集现象。纳米尺寸的颗粒缩短了锂离子在正负极之间的扩散距离, 提高了材料的导电率; 伴随着 Mn 元素的加入, LiFePO_4/C 的晶粒体积有所增大, 这可能为锂离子提供更大的传递通道, 可以有效地让电解液进入材料颗粒间隙, 但随着 Mn 元素含量的增多, 材料出现颗粒的团聚现象, 可能不利于锂离子传递。

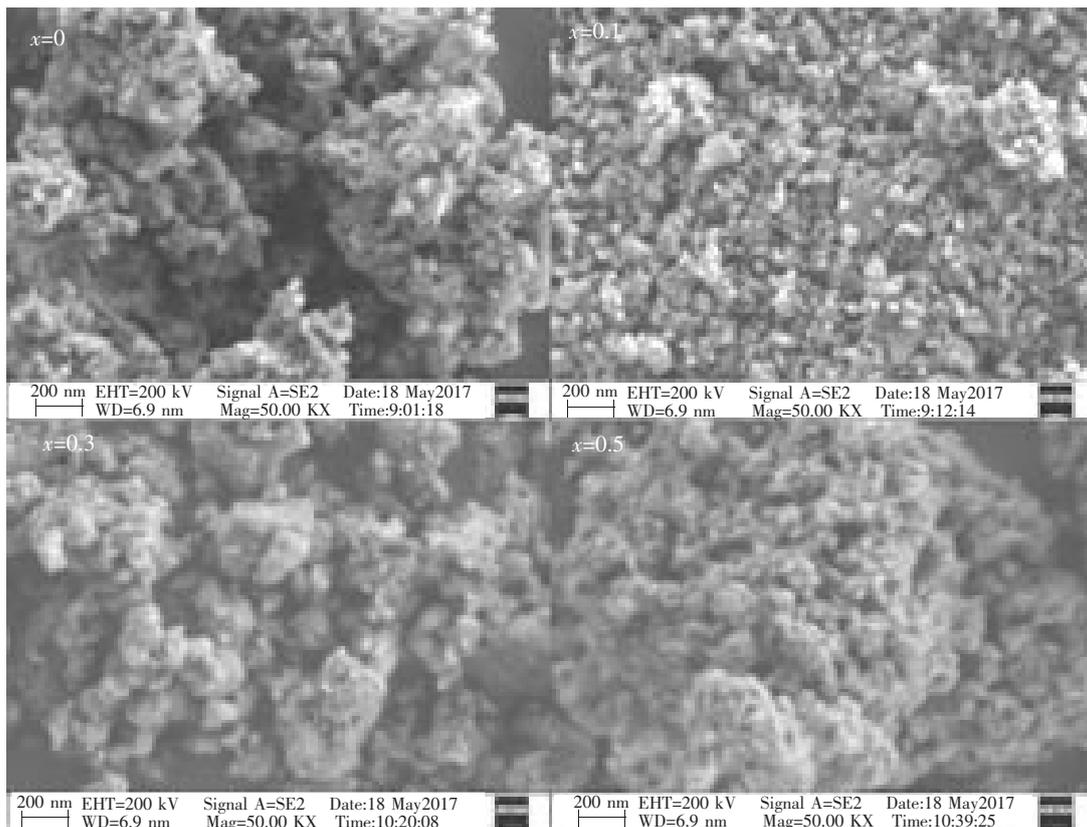


图 2 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}$ ($x=0, 0.1, 0.3, 0.5$) 样品 SEM 图

图 3 为样品的 TEM 图。从图中可以看出 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}$ 颗粒均为纳米尺寸,产物具有明显的聚集现象,颗粒大小为 20~50 nm; $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}$ 为多晶结构,根据文献记录,制备方法得出颗粒周围存在包覆碳层(图中浅色薄膜,黑色区域为 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4$),碳在材料表面包覆不均匀,其厚度为 1~2 nm,但碳层并非紧密包裹在颗粒表面,不会妨碍锂离子的嵌入和脱出,这种包覆碳的存在,不仅能细化颗粒,扩大活性物质的表面积,缩短锂离子在正负极间的扩散路径。碳层还联通了各个 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4$ 颗粒,这在一定程度上为电子转移提供了导电表面层,增加了材料的导电性。

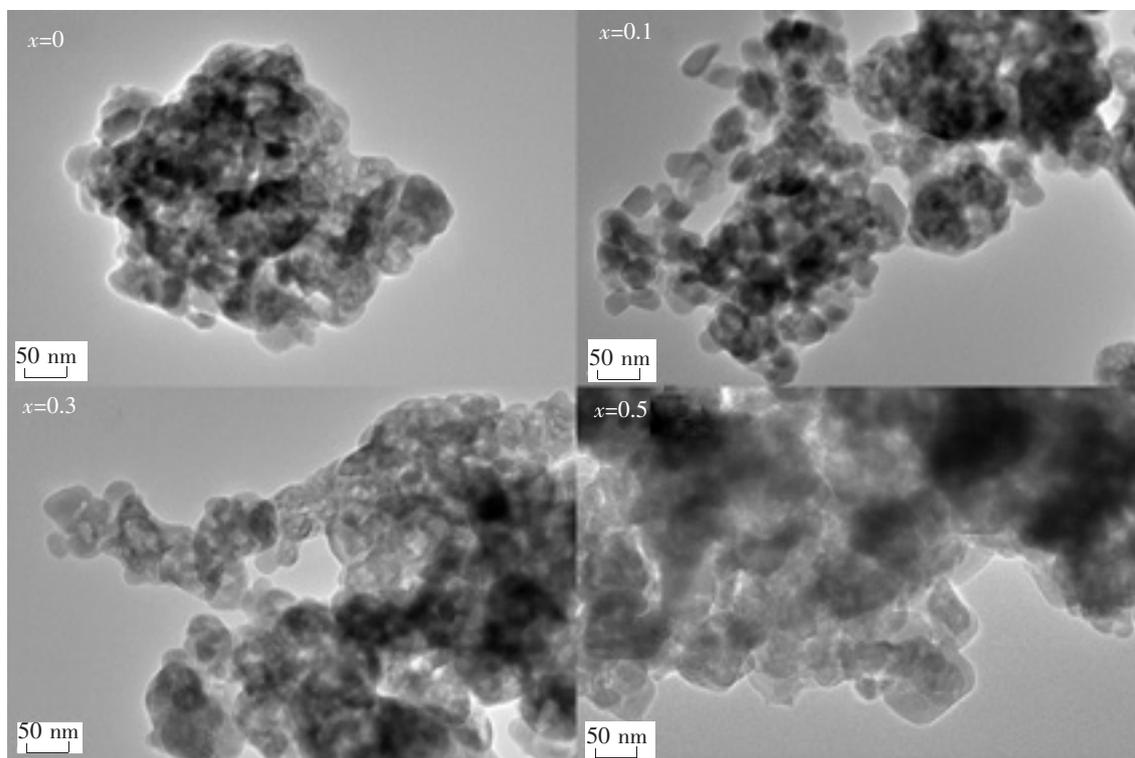


图 3 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}$ ($x=0, 0.1, 0.3, 0.5$) 样品 TEM 图

2.2 材料的电化学性能研究

图 4 为 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}$ ($x=0, 0.1, 0.3, 0.5$) 样品在 0.2 C 下的首次充放电曲线,由图可知,当 $x=0.1$ 时,材料的充放电比容量最大,分别为 124.8 mAh/g 和 123.7 mAh/g,并且其放电平台也最高达到了约 3.4 V,说明锰的掺入可以提高磷酸铁锂的放电平台和充放电比容量,但当 Mn 元素含量增加时比容量和平台都开始下降。从首次充放电比容量大小、充放平台考虑, $\text{LiMn}_{0.1}\text{Fe}_{0.9}\text{PO}_4/\text{C}$ 最优, LiFePO_4/C 次之。这是因为纳米尺寸的颗粒减小了离子的扩散路径,加快了离子的导电速率,Mn 元素的加入扩大了 LiFePO_4/C 颗粒的体积,为锂离子在电解液与电极之间的传输提供了更宽的通道,加快了电解液进入微孔的速度,增大了离子和电子电导率^[10]。

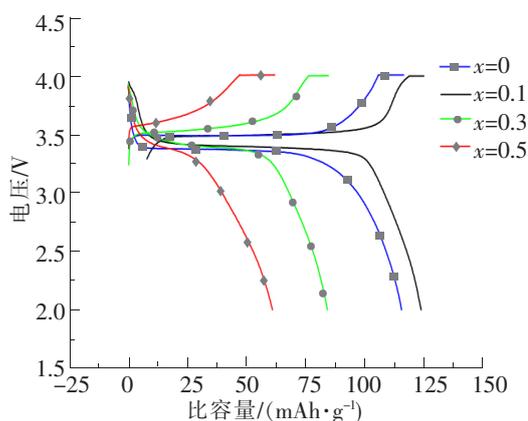


图 4 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}$ ($x=0, 0.1, 0.3, 0.5$) 样品 0.2 C 首次充放电曲线

图 5 为 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}$ ($x=0, 0.1, 0.3, 0.5$) 样品 1 C 下的循环性能图。从图 5 可知, LiFePO_4/C 初始放电比容量为 118.5 mAh/g,30 周循环之后放电比容量为 110.5 mAh/g,容量保持率为 93.24%; $\text{LiMn}_{0.1}\text{Fe}_{0.9}\text{PO}_4/\text{C}$ 初始放电比容量为 122.8 mAh/g,30 周循环之后放电比容量为 120 mAh/g,容量保持率为 97.71%; $\text{LiMn}_{0.3}\text{Fe}_{0.7}\text{PO}_4/\text{C}$ 初始放电比容量为 91.3 mAh/g,30 周循环之后放电比容量为 74.4

mAh/g ,容量保持率为 81.49%; $\text{LiMn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{PO}_4/\text{C}$ 初始放电比容量为 68.4 mAh/g ,30 周循环之后放电比容量为 71.9 mAh/g ,初始放电比容量最低。综合上述结果证明 $\text{LiMn}_{0.1}\text{Fe}_{0.9}\text{PO}_4/\text{C}$ 性能最佳,这是因为纳米颗粒缩小了离子的扩散路径,Mn 元素的掺入使电池的可逆性增加,电池循环性能得以改善。

图 6 为 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}(x=0,0.1,0.3,0.5)$ 在 0.1 C 倍率下充放电两次之后,对电池电压为 3.0 V 时的交流阻抗(EIS)图谱。 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}(x=0,0.1,0.3,0.5)$ 的 EIS 图谱由高频区的一个半圆和低频区的一条直线组成,高频区的半圆主要由材料表面的 SEI 膜和电荷在界面传递的电荷转移阻抗,低频区的直线表示锂离子在材料内部的扩散过程^[11]。相比而言, $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}(x=0,0.1,0.3,0.5)$ 这些复合物的电荷转移阻抗比纯纳米磷酸铁锂的电荷转移阻抗小。也就是说,锰的掺杂更有利于锂离子的嵌入和脱出。 $x=0.1$ 的磷酸锰铁锂电荷转移阻抗(43.8 Ω)均小于磷酸铁锂 $x=0$ (278.2 Ω)、 $x=0.3$ (53.6 Ω)、 $x=0.5$ (98.8 Ω)的电荷转移阻抗。这说明掺杂 Mn 元素可降低材料的电荷转移阻抗,降低极化程度。总之,从材料本身电荷转移阻抗大小的角度出发,当掺杂量为 $x=0.1$ 时是磷酸锰铁锂的最佳比例,这个结果与首次充放电比容量图、充放电 30 周以后的循环性能图结果吻合。

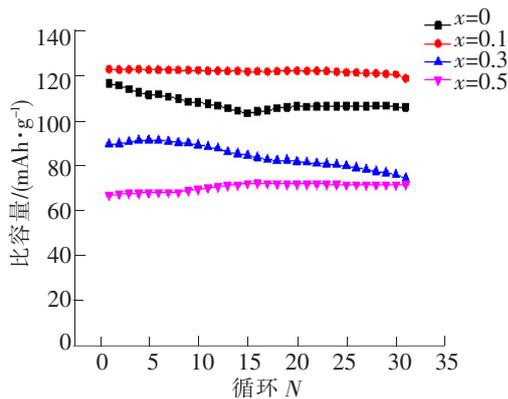


图 5 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}(x=0,0.1,0.3,0.5)$ 样品 1 C 倍率下的循环性能

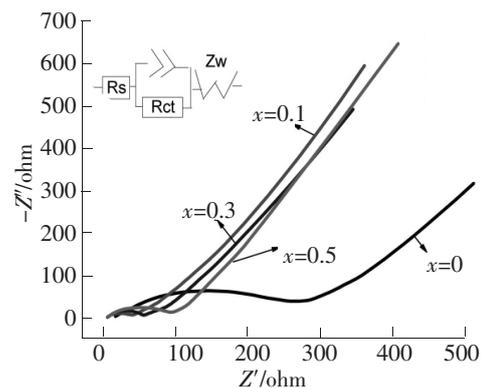


图 6 $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}(x=0,0.1,0.3,0.5)$ 样品 EIS 图

3 结论

Mn 元素的掺入不会破坏磷酸铁锂的橄榄石形结构,会扩大 LiFePO_4/C 的晶胞体积,这为锂离子在电解液与电极之间的传输提供了更通畅的通道,能加速电解液进入微孔从而增大离子和电子电导率。因此,Mn 元素的掺入使电池材料的可逆性增加,放电平台有所增加。 $x=0.1$ 时,材料在 0.2 C 倍率下的放电比容量为 124.8 mAh/g ,放电平台为 3.4 V,阻抗为 43.8 Ω 。在 1 C 倍率下循环 30 周之后,放电比容量仍有 120 mAh/g ,容量保持率为 97.71%,具有较优的循环性能。另外,Mn 的掺杂可降低电荷转移阻抗,降低了材料的极化程度,提高了材料的导电性能,因此掺杂后的材料更有利于锂离子的嵌入和脱出。因此,当掺杂量为 $x=0.1$ 时材料的电化学性能最优异,是磷酸锰铁锂的最佳比例。

参 考 文 献

- [1]张克宇,姚耀春. 锂离子电池磷酸铁锂正极材料的研究进展[J]. 化工进展,2015,34(1):166-172.
- [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]Ou Xiuqin,Liang Guangchuan,Wang Li,et al. Effects of magnesium doping on electronic conductivity and electrochemical properties of LiFePO_4 prepared via hydrothermal route[J]. Journal of Power Sources,2008,184:543-547.
- [4]谷和云,李昇,李二锐,等. 镁离子掺杂磷酸铁锂的制备及其电化学性能[J]. 无机盐工业,2016(1):64-67.
- [5]Tian Yanwen,Kang Xiaoxue,Liu Liying,et al. Research on cathode material of Li-ion battery by yttrium doping[J]. Journal Rare Earths(Xitu),2008,26(2):279-283.

- [6] Lee J W, Park M S, Anass B. Electrochemical lithiation and delithiation of LiMnPO_4 : Effect of cation substitution[J]. *Electrochim Acta*, 2010, 55: 4162-4169.
- [7] Padhi A K, Naujundaswamy K S, Goodenough J B. Phospho olivines as positive-electrode materials for rechargeable lithium batteries[J]. *J. Electrochem Soc*, 1997, 114(4): 1188-1194.
- [8] Yao J, Bewlay S, Konstantionv K, et al. Characterisation of olivine-type $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4$ cathode materials[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2006, 425(1/2): 362-366.
- [9] 袁正勇, 施立钦, 彭振博. 磷酸锰铁锂正极材料的制备和性能[J]. *材料科学与工程学报*, 2013, 31(4): 508-511.
- [10] Huang Z, Luo P, Wang D. Preparation and characterization of core-shell structured LiFePO_4/C composite using a novel carbon source for lithium-ion battery cathode[J]. *Journal of Physics & Chemistry of Solids*, 2017, 102: 115-120.
- [11] 刘树信. 磷酸铁锂正极材料表面结构的构架及其电化学性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2014.

Preparation and Properties of Lithium Ion Battery Cathode Material $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4$ by Solid State Method

Lin Jiaming, Song Yuanbo, Zhao Taolin, Wang Yuhua

(School of Materials Science and Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: This paper takes LiFePO_4 as the research object, and Fe ($\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ as Fe source) is partially substituted with Mn ($\text{MnC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ as Mn source). The carbon-coated $\text{LiMn}_x\text{Fe}_{1-x}\text{PO}_4/\text{C}$ ($x=0, 0.1, 0.3, 0.5$) is fabricated by using the solid phase method to improve the discharge capacity, conductivity, and discharge platform. The crystal structure, morphology, and electrochemical properties of lithium iron phosphate were studied by XRD, TEM, SEM, and charge/discharge test. The results show that the doped material still remains olivine-like crystal structure, and Mn doping has no obvious influence on the morphology of the raw material. The prepared $\text{LiMn}_{0.1}\text{Fe}_{0.9}\text{PO}_4$ cathode material shows the best electrochemical performance. The discharge specific capacity at 0.2 C rate is 124.8 mAh/g, the discharge platform is 3.4 V, and the impedance is 43.8 ohms. After 30 cycles at 1 C rate, the specific capacity of discharge still maintains 120 mAh/g, and the capacity retention rate is 97.71%, which has better cycle performance.

Key words: lithium ion battery; cathode material; lithium manganese iron phosphate