

文章编号: 1004-0609(2004)02-0157-05

锂离子电池正极材料 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ 的合成及其电化学性能^①

钟 辉^{1, 2}, 许 惠¹

(1. 成都理工大学 材料与生物工程学院, 成都 610059; 2. 成都雷雳高科技公司, 成都 610045)

摘 要: 在空气气氛中合成了 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ 二元掺杂锂离子电池正极材料, 研究了不同掺 Sr^{2+} 量对材料的结构与电化学性能的影响, 用 XRD、SEM 及电性能测试考察了材料的结构、形貌及其电化学性能。结果表明: Sr^{2+} 的掺入量对材料的结构与电化学性能影响较大, 随着掺 Sr^{2+} 量的增加, X 射线衍射图中材料的特征峰向低角度飘移, 晶胞参数 a 和 c 增大, 晶胞体积增大; 电性能测试结果表明: 适量的掺 Sr^{2+} 有利于提高材料中 Li^+ 的扩散能力, 抑制 Jahn-Teller 效应, 降低阳离子混排现象, 提高材料的电化学稳定性, 当 $x = 0.003$, $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.697}\text{Sr}_{0.003}\text{O}_2$ 显示出较优的电化学性能, 首次放电容量为 $162 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$, 首次放电效率为 90.6%; 40 次循环后其放电容量仍为 $153 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$, 容量损失为 7%, 显示出较好的循环稳定性。

关键词: 锂离子电池; 正极材料; $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$; 合成

中图分类号: TM 912.9

文献标识码: A

Preparation and electrochemical properties of $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ cathode material for lithium ion batteries

ZHONG Hui^{1, 2}, XU Hui¹

(1. School of Material and Bioengineering, Chengdu University of Technology,
Chengdu 610059, China;

2. LeiLi High-tech. Development Ltd Co., Chengdu 610045, China)

Abstract: The layered $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ cathode materials for lithium ion batteries were synthesized in air. The influence on the structure and electrochemical properties of the materials caused by different contents of Sr^{2+} was investigated, and XRD analysis, SEM and electrochemical tests were used to study the physical and the electrochemical performances of the materials. With increasing value of x , the characteristic peaks of $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ shift to a lower degree and the lattice parameters increase. The results of electrochemical tests indicate that small content of Sr^{2+} can stabilize the structure of the material and make the electrochemical properties of the material better. The sample $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.697}\text{Sr}_{0.003}\text{O}_2$ with doping Sr^{2+} ($x = 0.003$) has the best electrochemical properties, which has an initial discharge capacity of $162 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ and an initial discharge efficiency of 90.6%. After 40 cycles, this sample remains $153 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ of discharge capacity and the loss ratio of capacity is just 7%, showing perfect cyclic stability.

Key words: lithium-ion battery; cathode material; $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$; synthesis

锂离子二次电池以其高能量密度、低自放电率
和高电压, 自 20 世纪 90 年代问世以来, 被广泛用

于现代通讯、空间技术、信息技术、国防等高科技
领域, 被誉为高效的“绿色能源”。目前市场广泛使

① 收稿日期: 2003-06-04; 修订日期: 2003-08-27

作者简介: 钟 辉(1959-), 男, 副教授, 博士。

通讯作者: 钟 辉, 副教授; 电话: 13980534090; E-mail: zhongh@lib.cdut.edu.cn

用的锂离子电池正极材料 LiCoO_2 价格贵、容量低 ($130 \sim 140 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$)、污染大, 难以满足日益增长的二次电池的要求, 因此提高锂离子电池正极材料的比容量和稳定性, 降低成本, 是目前改善锂离子电池性能的重要研究方向。 LiNiO_2 与 LiCoO_2 均为层状结构, 其理论容量与 LiCoO_2 相当, 但实际容量可达 $170 \text{ mA} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上, 且价格便宜, 污染小, 因而 LiNiO_2 及其掺杂化合物作为一种目前商用的 LiCoO_2 正极材料的替代材料, 正逐渐成为锂离子电池研究与开发的热点^[1-5]。由于 Ni^{3+} 极不稳定, 在合成过程中易占据锂镍氧化物八面体中 Li^+ 的 $3a$ 位, 发生阳离子混排, 生成非计量比产物, 导致材料的稳定性下降; 且 LiNiO_2 合成条件苛刻, 需严格控制合成中的氧气气氛, 循环稳定性差, 易引起安全问题等^[6-8], 其商业化应用进程一直较缓慢。掺杂改性, 是改善正极材料结构和稳定性极有效途径之一。近年来, 国内外均集中研究了掺杂型 $\text{LiM}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}_2$ 正极材料 ($M = \text{Co}, \text{Mn}, \text{Al}, \text{Mg}$), 使 LiNiO_2 正极材料的稳定性有较大的提高, 合成技术日趋简化, 推进了 LiNiO_2 正极材料的研究进展^[9-12]。本文作者在掺 Co^{3+} 型 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7}\text{O}_2$ 研究基础上, 掺入 Sr^{2+} 进行二元掺杂研究, 在空气气氛中合成了 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ 正极材料, 以改善 LiNiO_2 层状的结构, 减少阳离子混排及非计量比产物的生成, 提高材料的循环稳定性。

1 实验

1.1 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ 的制备

称取一定量的 $\text{Co}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x(\text{OH})_2$ (由共沉淀法自制) 以及 $\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$, 用类溶胶凝胶法制备前驱体混合物, 并将前驱体混合物置于程序控温的马弗炉中按一定的煅烧制度于 750°C 煅烧 12 h, 仔细研磨后即得到正极材料 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ 。

1.2 分析测试

用日本理学 D/MAC-3B 仪对材料进行 X 射线衍射分析。在 AMRAY-1000B 型扫描电镜上分析材料的微观组织。

将制备好的正极材料与乙炔黑、粘结剂 (PTFE) 按质量比 84: 8: 8 混合, 加入适量有机溶剂后, 搅拌为均匀糊状, 均匀涂在铝箔集流体上, 压制成 0.635 cm^2 的圆形电极片, 经 120°C 真空干燥后作为正极; 以金属锂为负极, 电解液为 1 mol/L

$\text{LiPF}_6/\text{EC} + \text{DEC} (1: 1)$ 溶液, 以 Celgard2400 为隔膜, 装配成扣式模拟电池, 用武汉蓝电电池测试仪进行充放电测试, 充放电电流密度为 0.25 A/cm^2 , 充放电电压控制在 $2.80 \sim 4.25 \text{ V}$ 。

2 结果与讨论

2.1 材料的 X 射线衍射分析

图 1 所示为不同掺 Sr^{2+} 量时合成的正极材料 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ 的 X 射线衍射图。由图可见, 所有样品的 X 射线衍射峰与理想的 LiNiO_2 (六方晶系, $R3m$ 空间群) 衍射峰相吻合, 未出现掺杂元素 Sr 及其氧化物的衍射峰, 且峰形尖锐, 表明掺入的 Sr^{2+} 部分取代了 Ni^{3+} 位, 形成结晶度较好的层状结构, 同时, 随着 x 值的增加, 特征峰 (003) 向低角度飘移, (110) 峰与 (108) 峰分裂程度增强。表 1 列出了不同掺 Sr^{2+} 量时样品 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ 的晶胞参数和特征峰 (003) 和 (104) 的强度比。由表 1 可见, 掺 Sr^{2+} 量 x 增大, 晶胞参数 a 值和 c 值增大, c/a 值减小, 晶胞体积增大。这可能是 Sr^{2+} 的半径大于 Ni^{3+} 离子半径所致 ($r_{\text{Sr}^{2+}} = 0.126 \text{ nm}$, $r_{\text{Ni}^{3+}} = 0.0106 \text{ nm}$), 一方面由于晶胞体积增大, 增大了锂离子在八面体 $3a$ 位和 $3b$ 位所构成通道的扩散能

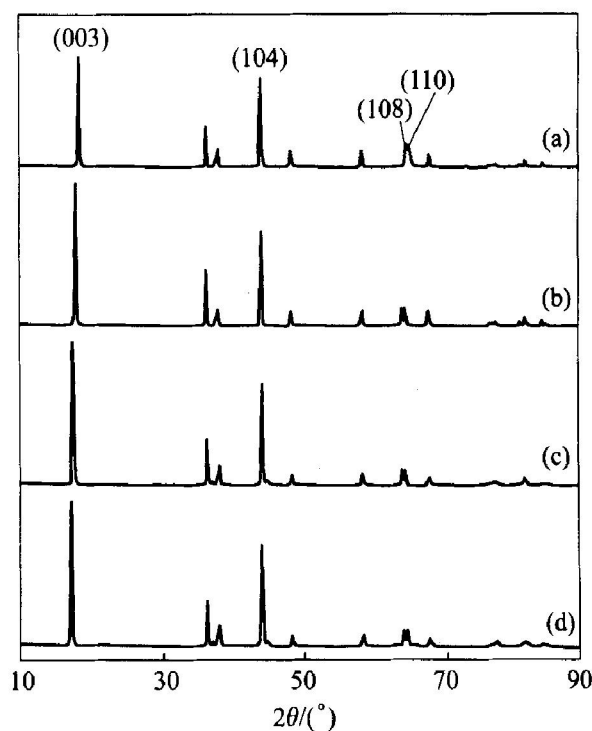


图 1 不同掺 Sr^{2+} 量时样品的 XRD 图

Fig. 1 XRD patterns of samples at different Sr^{2+} content

(a) $x = 0$; (b) $x = 0.003$;
(c) $x = 0.006$; (d) $x = 0.010$

表 1 不同掺 Sr^{2+} 量时样品 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ 的晶体结构参数

Table 1 Crystal parameters of $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ at different Sr^{2+} contents

x	a/nm	c/nm	c/a	$V/(10^{-3}\text{nm}^3)$	$I(003)/I(104)$
0	0.285 7	1.412 0	4.942	99.77	1.42
0.003	0.287 0	1.415 4	4.945	100.92	1.48
0.006	0.287 6	1.419 3	4.935	101.62	1.43
0.010	0.289 0	1.423 0	4.927	102.89	1.41

力,进而增大了 Li^+ 扩散系数,降低了扩散阻抗,因此 Sr^{2+} 的掺入对提高材料的电化学容量有利;另一方面,由于 Sr^{2+} 的离子半径远大于 Ni^{3+} 、 Co^{3+} 的离子半径,掺 Sr^{2+} 量太大时,晶胞体积将变得过大,晶体内部结合能减小,将导致材料稳定性下降。同时表征阳离子混排程度的 $I(003)$ 和 $I(104)$ 强度比均大于 1.40,且在 $x=0.003$ 时,该值最大,(110) 峰与(108) 峰分裂明显,表明其阳离子混排程度最低,层状特征最为显著。

2.2 材料的微观组织分析

图 2 所示是 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ 正极材料在不

同掺 Sr^{2+} 量时的 SEM 照片。由图 2 可知: $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ 正极材料颗粒呈球形,分布均匀,表面光滑、清晰,颗粒粒径随掺 Sr^{2+} 量 x 的增大而增大, $x=0$ 时,粒径仅为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 左右;当 $x=0.003$ 时,粒径为 $0.8\sim 1.0\text{ }\mu\text{m}$; $x=0.006$ 时,粒径为 $2.0\sim 2.5\text{ }\mu\text{m}$; $x=0.010$ 时,粒径为 $8.0\sim 10.0\text{ }\mu\text{m}$,颗粒表面趋于光滑透明,且晶体生长取向作用增强,表明 Sr^{2+} 对材料的粒径增大有较大的促进作用。

2.3 材料的电化学性能

图 3 所示为不同掺 Sr^{2+} 量时材料 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ 在常温下的首次充放电电压-容量曲线。图 3 表明:掺入 Sr^{2+} 后材料的充放电曲线光滑,平台均较理想,层状 LiNiO_2 充放电特征显著;且随着掺 Sr^{2+} 量的增加,样品的充电电压相对升高,充电电压起始有一个较快的上升过程,但随后就趋于平缓,而放电电压则变化趋势相反。表 2 列出了不同掺 Sr^{2+} 量时样品 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ 的充放电循环数据。可见材料在 $2.80\sim 4.25\text{ V}$ 时具有较高的充放电比容量,且随着 Sr^{2+} 含量的增加,样品的首次充电比容量下降,首次放电容量及放电效率差别较大。

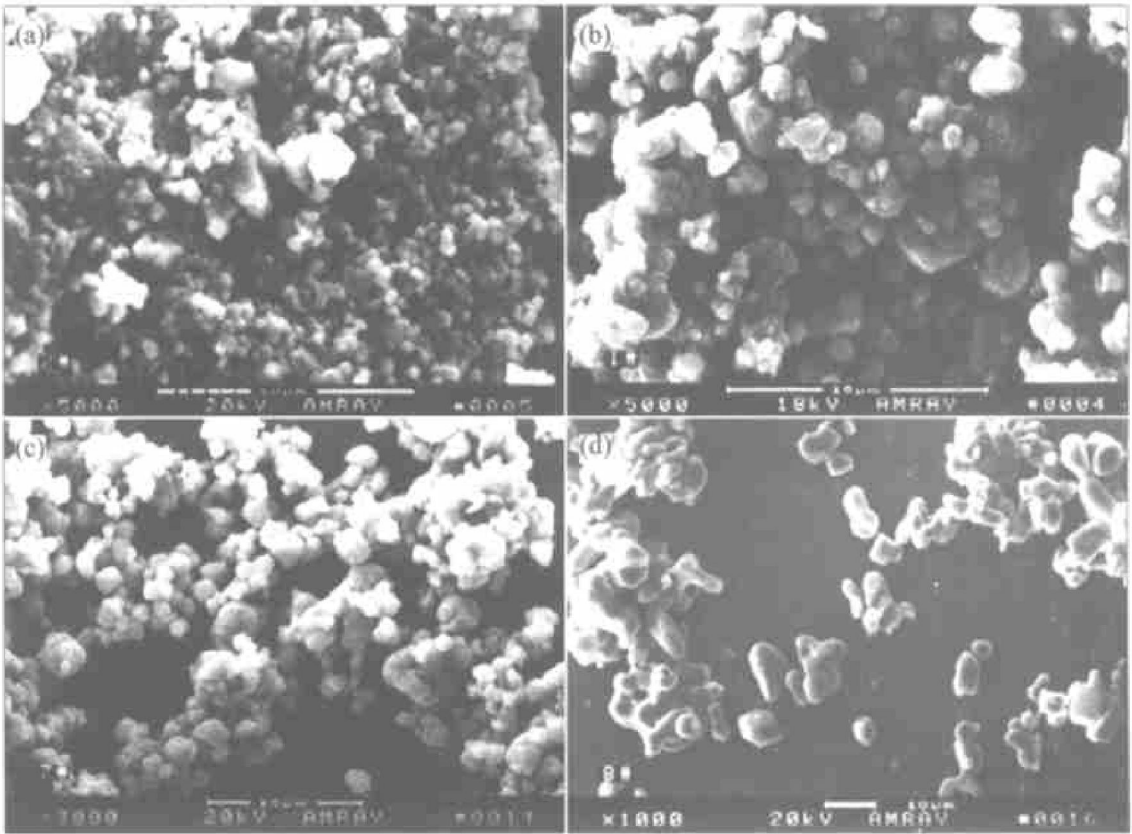
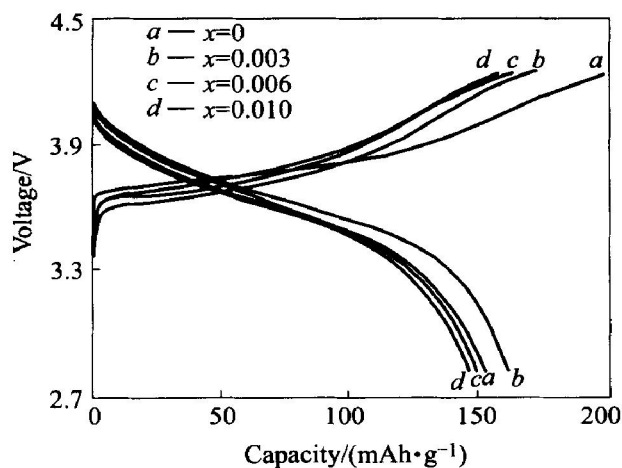


图 2 不同掺 Sr^{2+} 量时样品的 SEM 照片

Fig. 2 SEM images of sample at different Sr^{2+} contents
(a) $-x=0$; (b) $-x=0.003$; (c) $-x=0.006$; (d) $-x=0.010$

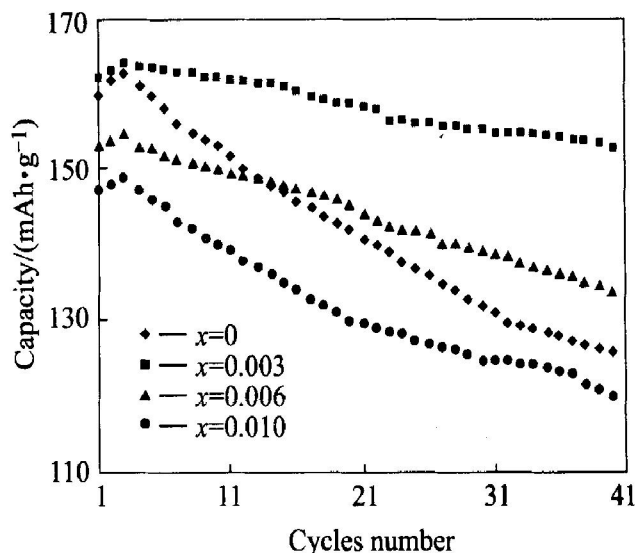
表 2 不同掺 Sr^{2+} 量时样品 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ 的充放电容量Table 2 Charge-discharge capacity of $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ at different Sr^{2+} contents

x	First charge capacity/($\text{mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$)	First discharge capacity/($\text{mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$)	First discharge efficiency/%	3rd discharge capacity/($\text{mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$)	10th discharge capacity/($\text{mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$)
0	196.7	160.3	81.3	163.2	153.0
0.003	178.8	162.1	90.6	164.8	160.5
0.006	176.4	152.5	86.4	155.2	148.7
0.010	175.2	147.3	84.1	149.3	140.1

图 3 不同掺 Sr^{2+} 量时样品的首次充放电曲线Fig. 3 First charge-discharge curves of $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ at different Sr^{2+} contents

Delmas 等^[5, 13]认为, LiNiO_2 正极材料首次循环容量损失大的主要原因是合成产物中出现非化学计量比产物, 即阳离子混排所导致。结合本研究结果, 当掺 Sr^{2+} 量为 0 时, 材料 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7}\text{O}_2$ 有较高的首次充放电容量, 但首次不可逆容量大, 放电效率仅 81.3%; 当掺 Sr^{2+} 量在 $x = 0.003$ 时, 样品 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.697}\text{Sr}_{0.003}\text{O}_2$ 表现出较优的电化学性能, 其首次充放电容量效率超过 90%; 随着掺 Sr^{2+} 量的进一步增加, 样品的首次充放电容量及首次放电效率均有所下降。这表明掺杂适量的 Sr^{2+} 可有效抑制非化学计量比产物的生成和阳离子混排现象, 有效地提高掺杂型材料的可逆性, 但掺 Sr^{2+} 量不宜过大。

图 4 示出了不同掺 Sr^{2+} 量时样品充放电循环性能测试数据。由图 4 可以看出, 掺 Sr^{2+} 量的多少对材料的电化学循环稳定性影响较大。当 $x = 0$ 时, 样品 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7}\text{O}_2$ 尽管首次放电比容量较高, 但其循环性能差, 衰减相对较快; 而 $x = 0.003$ 时样品 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.697}\text{Sr}_{0.003}\text{O}_2$ 的循环性能最好, 在 40 次充放电循环后, 仍保持 $153 \text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$ 的放电容量, 容量损失率仅为 6%, 显示出极好的循环稳定

图 4 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ 的循环次数与稳定性的关系曲线Fig. 4 Curves of cycle number vs cyclic stability for $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$

性; 当 $x = 0.006$ 时, 样品 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.694}\text{Sr}_{0.006}\text{O}_2$ 的放电容量在 $140 \text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$ 左右, 循环性能一般; 当 $x = 0.010$ 时, 样品 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.69}\text{Sr}_{0.01}\text{O}_2$ 的放电容量最低, 且容量衰减最快。以上结果表明, 随着掺 Sr^{2+} 量 x 的增加, 除了体积效应外, 由于 Sr^{2+} 的掺入以二价态离子存在, 当其取代 Ni^{3+} 的 3b 位时, 影响了晶格中阳离子的分布。为维持整个体系的电性平衡, 过渡态金属阳离子必须以相对较高的氧化态形式存在, 从而减弱了 Jahn-Teller 效应的影响, 改善了材料的充放电循环可逆性^[14]。因此, 适量的掺 Sr^{2+} 量对提高材料的稳定性有利; 但 Sr^{2+} 含量过大时, 局部区域 2 个三价钴离子或镍离子由 1 个二价锶离子和 1 个四价钴离子或镍离子替代, 有可能使晶格产生畸变, 影响材料的结构稳定, 从而影响材料的循环稳定性^[15]。因此, 适量的 Sr^{2+} 的掺入 ($x \leq 0.003$) 能有效地与 Co 元素协同作用, 从而增强材料 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$ 在充放电过程

中的稳定性, 提高材料的循环稳定性。

3 结论

1) 采用类溶胶凝胶法于 $750\text{ }^\circ\text{C}$ 在空气中煅烧 12 h, 合成了具有层状结构的二元掺杂型正极材料 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.7-x}\text{Sr}_x\text{O}_2$;

2) 适量 Sr^{2+} 的掺入将使材料的晶胞体积增大, 有利于 Li^+ 的嵌入与脱出, 可有效抑制阳离子混排和非化学计量比产物的生成, 降低 Jahn-Teller 效应, 大幅提高材料首次放电效率, 降低首次不可逆放电容量, 提高材料的循环稳定性;

3) 当掺 Sr^{2+} 量在 0.003 时, 样品 $\text{LiCo}_{0.3}\text{Ni}_{0.697}\text{Sr}_{0.003}\text{O}_2$ 表现出较优的电化学性能, 首次放电容量 $162\text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$, 首次放电效率可达 90.6%, 第 40 次充放电循环保持 $153\text{ mA}\cdot\text{h}\cdot\text{g}^{-1}$ 的放电容量, 容量损失率仅为 7%。

REFERENCES

- [1] Suresh P, Rodrigues S, Shukla A K, et al. Synthesis of $\text{LiCo}_{1-x}\text{Ni}_x\text{O}_2$ from a low temperature solution combustion route and characterization [J]. J Power Source, 2002, 112: 665 - 670.
- [2] Chen Y, Wang G X, Konstantinov K, et al. Synthesis and characterization of $\text{LiCo}_x\text{Mn}_y\text{Ni}_{1-x-y}\text{O}_2$ as a cathode material for secondary lithium batteries [J]. J Power Source, 2003, 119 - 121: 184 - 188.
- [3] Johnson C S, Kropf A J. In situ XAFS analysis of the $\text{Li}_x\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ cathode during cycling in lithium batteries [J]. Electrochimica Acta, 2002, 47: 3187 - 3194.
- [4] George Ting-Kuo Fey, Subramanian V. Tartaric acid assisted sol-gel synthesis of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ and its electrochemical properties as a cathode material for lithium batteries [J]. Solid State Ionics, 2002, 152 - 153: 83 - 90.
- [5] Kyung-keun L. Electrochemical and structure characterization in $\text{LiNi}_{1-y}\text{Co}_y\text{O}_2$ ($0 \leq y \leq 0.2$) positive electrodes during initial cycling [J]. J Electrochem Soc, 2000, 147 (5): 1715 - 1723.
- [6] Delmas C. On the behavior of the Li_xNiO_2 system: an electrochemical and structure overview [J]. J Power Source, 1997, 68: 120 - 125.
- [7] Yang H X. Preparation and characterization of LiNiO_2 synthesized from $\text{Ni}(\text{OH})_2$ and $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ [J]. J Power Source, 1999, 79: 261 - 265.
- [8] Julien C, Letraochant C, Rongan S, et al. Layered $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.5}\text{O}_2$ cathode material from soft-chemistry by various method [J]. Materials Science and Engineering, 2000, B76: 145 - 155.
- [9] 应皆荣, 万春荣, 姜长印. 用溶胶凝胶法在 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ 表面包覆 SiO_2 [J]. 电源技术, 2001, 25(6): 102 - 104.
- YING Jie-rong, WANG Chun-rong, JIAN Chang-yin. Surface modification of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ by overcoating with SiO_2 via sol-gel method [J]. Chinese Journal of Power Source, 2001, 25(6): 102 - 104.
- [10] Julien C, Michael S S, Zielkiewicz S. Structure and electrochemical properties of $\text{LiNi}_{0.3}\text{Co}_{0.7}\text{O}_2$ synthesized by different low-temperature techniques [J]. International Journal of Inorganic Materials, 1999, 29 - 37.
- [11] Subramanian V, George Ting-Kuo Fey. Preparation and characterization of $\text{LiNi}_{0.7}\text{Co}_{0.2}\text{Ti}_{0.05}\text{M}_{0.05}\text{O}_2$ ($\text{M} = \text{Mg}, \text{Al}$ and Zn) systems as cathode materials for lithium batteries [J]. Solid State Ionics, 2002, 148: 351 - 358.
- [12] Kim Woosong, Chung Kwang-il. Synthesis and charge-discharge properties of $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{M}_y\text{O}_2$ ($\text{M} = \text{Al}, \text{Ga}$) compounds [J]. J Power Source, 2003, 115: 101 - 109.
- [13] Peres J P, Delmas C, Rougier, et al. The relationship between the composition of lithium nickel oxide and the loss of reversibility during the first cycle [J]. J Electrochem Solids, 1996, 57(6-8): 1057 - 1060.
- [14] 袁忠荣, 瞿美臻, 于作龙. $\text{Li}_x\text{Ni}_{0.8-y}\text{Co}_{0.2}\text{Zn}_y\text{O}_p$ 的合成及电化学性能研究 [J]. 无机化学学报, 2003, 19(4): 423 - 427.
- YUAN Zhong-rong, QU Mei-zheng, YU Zuo-Long. Synthesis and electrochemical performance study of $\text{Li}_x\text{Ni}_{0.8-y}\text{Co}_{0.2}\text{Zn}_y\text{O}_p$ [J]. Chinese Journal of inorganic chemistry, 2003, 19(4): 423 - 427.
- [15] 李 畅, 徐晓光, 孟 醒, 等. 高电导率 $\text{LiAl}_{0.3}\text{Co}_{0.7-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ 的制备与表征 [J]. 高等学校化学学报, 2003, 24(3): 462 - 464.
- LI Chang, XU Xiao-guang, MENG Xing, et al. Synthesis and characterization of $\text{LiAl}_{0.3}\text{Co}_{0.7-x}\text{Mg}_x\text{O}_2$ with high electrochemical conductivity [J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2003, 24(3): 462 - 464.

(编辑 龙怀中)