

煅烧温度对溶胶-凝胶法合成 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料物相结构的影响

何冀川¹ 杨小龙¹ 周天明² 喻国强² 刘树信^{1*}

(1.绵阳师范学院化学与化学工程学院,绵阳 621000;2.绵阳天明新能源科技有限公司,绵阳 622650)

摘 要 以硝酸锂、硝酸镍、硝酸钴、硝酸铝和柠檬酸为原料,采用溶胶-凝胶法合成了镍钴铝三元 ($\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$) 正极材料前驱体,经热处理后得到 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料。采用扫描电子显微镜和 X 射线衍射仪对正极材料进行了表征与分析。结果表明:随着温度的升高,正极材料的颗粒更为均匀,分散性良好,晶体杂相减少。当煅烧温度升高至 700℃ 及以上时得到了 $\alpha\text{-NaFeO}_2$ 型层状结构的 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料。随着煅烧温度的升高, $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料中的杂质相逐渐减少,纯度不断提高,层状结构性能不断改善,结晶度逐渐提高,锂离子嵌入与脱出通道畅通,材料的晶粒尺寸不断增大。当煅烧温度为 800℃ 时,正极材料的层状结构性能最佳。

关键词 溶胶-凝胶法, $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料,煅烧温度,物相结构

Influence of calcination temperature on phase structure of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ anode material by sol-gel

He Jichuan¹ Yang Xiaolong¹ Zhou Tianming² Yu Guoqiang² Liu Shuxin¹

(1.School of Chemistry and Chemical Engineering, Mianyang Teachers' College, Mianyang 621000;
2.Mianyang Tianming New Energy Science and Technology Co., Ltd., Mianyang 622650)

Abstract $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ anode materials were synthesized by sol-gel method with lithium nitrate, nickel nitrate, cobalt nitrate, aluminum nitrate and citric acid as raw materials. The materials were characterized and analyzed by SEM and XRD. The results showed that the particles of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ were more uniform, more dispersible and less impurities with increasing the temperature. The anode materials with $\alpha\text{-NaFeO}_2$ layered crystal structure can be obtained when the calcination temperature raised at 700℃ and over. With increasing the temperature, the impurity decreased, the purity increased, the layered crystal structure and crystallinity were improved, as well as the channels of lithium ion intercalation and deintercalation were optimized. When the calcination temperature raised at 800℃, the layered crystal structure of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ was the best.

Key words sol-gel method, $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ anode material, calcination temperature, phase structure

随着传统的自然能源,例如煤、石油、天然气等不可再生的化石资源面临枯竭和耗尽,人类正面临着严重的能源危机。伴随着能源危机,环境问题也日益突出,锂离子二次电池因具有较高的能量密度、较长的循环寿命、无记忆效应、较低的自放电率和环境友好等优点,已成为二次电池的主要发展趋势,并且日益受到学术界及产业界的青睐。在锂离子电池中最常用的正极材料是钴酸锂(LiCoO_2)^[1],其放电电压高、放电平稳、循环性能优良、生产工艺简单,但该材料本身存在很多问题,例如钴具有毒性,同时又

是一种战略资源且资源匮乏,这大大提高了 LiCoO_2 的生产成本^[2-3]。另外, LiCoO_2 电极稳定性较差,在过充时会产生性能下降或失效的问题^[4-11]。

镍酸锂(LiNiO_2)也具有 $\alpha\text{-NaFeO}_2$ 的晶体结构,与 LiCoO_2 相比,价格低且能量密度高(其体积能密度高 15%,质量能量密度高 20%), LiNiO_2 的理论容量为 274mAh/g,实际容量仍可达 190~210mAh/g,工作电压在 2.5~4.1V,不存在过充和过放电的限制,自放电率低,无污染,对电解液的要求较低。但 LiNiO_2 结构稳定性较差,其结构稳定

基金项目:四川省科技厅科技支撑计划(2015GZ0134)

作者简介:何冀川(1970-),女,硕士,副教授,从事功能材料研究。

联系人:刘树信(1978-),男,博士,教授,从事锂离子电池正极材料和无机非金属功能材料研究。

性主要取决于锂离子和 Ni^{3+} 在氧立方密堆积的有序程度^[12-13]。在实际合成中,由于 Ni^{2+} 的 $3d^2$ 的电子分布特征,因此很难被氧化成 Ni^{3+} ,生成化学计量比的 LiNiO_2 非常困难,通常都会有少量的 Ni^{2+} 占据 Ni^{3+} 的晶格点,同时为补充电荷平衡,等量的 Ni^{2+} 会进入锂层,导致阳离子的混排,使得电容量降低^[14-17]。解决此难题的方法有两种:一是尽可能使镍处于三价;二是掺入稳定其结构的元素(例如钴、锰、铝等)。镍钴铝三元($\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$)正极材料结合了 LiNiO_2 和 LiCoO_2 的优点,具有更高的容量和安全性能,已经成为当前锂离子电池的主流正极材料之一^[18-19]。

$\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料电化学性能的优劣与其物相结构和层状结构发育是否良好具有直接的关系。本研究采用溶胶-凝胶法合成了 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料,研究了煅烧温度对其颗粒尺寸、粒度分布及物相结构的影响。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

硝酸锂(LiNO_3),分析纯,成都市科龙化工试剂厂;硝酸镍 $[\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$,分析纯,成都市科龙化工试剂厂;硝酸钴 $[\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$,分析纯,成都市科龙化工试剂厂;硝酸铝 $[\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}]$,分析纯,成都市科龙化工试剂厂;柠檬酸($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$),分析纯,成都市科龙化工试剂厂;无水乙醇($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$),分析纯,成都市科龙化工试剂厂;高纯氧气,纯度 99.999%,四川梅塞尔气体产品有限公司。

扫描电子显微镜(SEM)(EVO-18 型),德国蔡司公司;X 射线衍射仪(XRD, X'Pert Pro),荷兰 PANalytical 公司。

1.2 材料的合成

按照 Li、Ni、Co 和 Al 摩尔比为 1.05:0.8:0.15:0.05 准确称取 LiNO_3 、 $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$,按金属离子与柠檬酸摩尔比为 2:1 称取柠檬酸,使其完全溶解在烧杯中,并置于 85℃ 水浴中搅拌直至形成溶胶,然后将溶胶干燥以形成干凝胶。将干凝胶研磨粉碎再在行星式球磨机上球磨 4h,烘干,得到三元正极材料前驱体粉末。将三元正极材料前驱体粉末置于管式气氛炉中,在高纯氧气气氛下,350℃ 预热 2h,然后将温度升至 500℃ 保温 6h,接着分别在 600,650,700,750,800,850℃ 条件下煅烧 12h,最后

得到 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料。

1.3 表征与分析

采用 SEM(钨灯丝,加速电压 20kV)对正极材料的颗粒形貌及大小进行分析与表征;采用 XRD(Cu 靶,波长 0.154nm,扫描步进 0.02°)对正极材料的物相进行分析。

2 结果与讨论

2.1 煅烧温度对 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料颗粒形貌的影响

图 1 为不同煅烧温度下所制备的 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料的 SEM 图。由图可以看出,在较低的煅烧温度下[见图 1(a),图 1(b)],材料颗粒粒径范围较大,粒径分布不均匀,团聚现象严重,这是由于在较低煅烧温度下材料晶粒较小,表面能较大而聚集在一起造成的。随着煅烧温度的升高[见图 1(c),图 1(d)],材料出现部分分散较好的颗粒,分散性有所改善,但团聚仍然严重,分散性较差。当煅烧温度升至 800℃[见图 1(e)]时,材料颗粒分散性良好,仅出现部分较大颗粒,材料粒径小于 0.5μm,团聚现象减弱。煅烧温度升至 850℃[见图 1(f)]时,材料颗粒分散性进一步提高,粒径在 0.5μm 左右,颗粒表面光滑,分散性良好,团聚现象消失,棱角清晰,说明材料的结晶度较好。

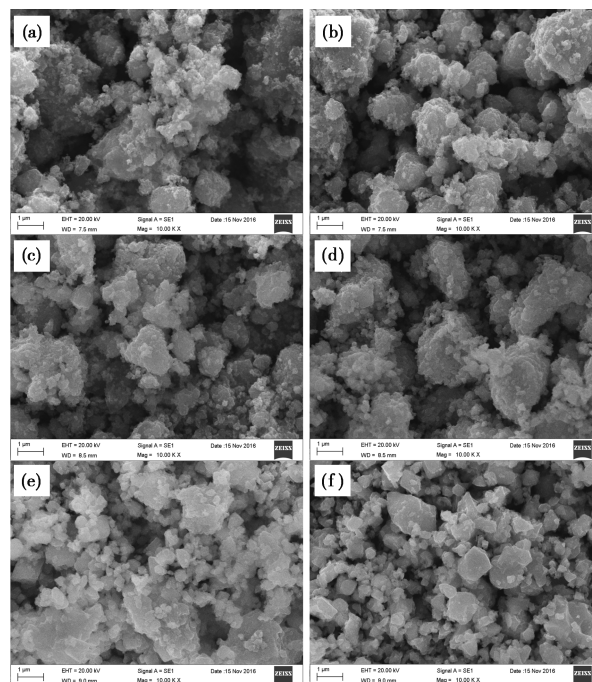


图 1 不同煅烧温度下 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料的 SEM 图

[(a) — (f) 煅烧温度分别为 600, 650, 700, 750, 800, 850℃]

2.2 煅烧温度对 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料结构的影响

图 2 为不同煅烧温度下 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料的 XRD 谱图。由图可以看出, 不同煅烧温度下合成的所有正极材料主相衍射峰的相对位置与强度均与标准卡 PDF # 09-0063 一致, 因此所合成的正极材料主相具有 $\alpha\text{-NaFeO}_2$ 型层状结构, 属于六方晶系, 空间群为 $R\bar{3}m$ 。同时可以发现, 当在较低温度 600°C 和 650°C [图 2(a) 和 2(b)] 时, 材料除了主相外, 在 21.3° , 23.2° , 30.3° 以及 31.6° 附近还存在一些杂峰, 通过分析认为这些杂峰是碳酸锂的衍射峰, 碳酸锂的存在可能是由于 LiNO_3 及其他硝酸盐与柠檬酸混合加热后, 大量的硝酸根分解, 而生成柠檬酸锂, 而柠檬酸锂在以后的煅烧过程中分解形成了碳酸锂, 其化学方程式为: $2\text{C}_6\text{H}_5\text{Li}_3\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O} \longrightarrow 3\text{Li}_2\text{CO}_3 + 9\text{C} + 9\text{H}_2\text{O}$ 。随着温度的不断升高, 碳酸锂继续与其他反应物反应而不断减少, 当煅烧温度达到 700°C 及以上时 [图 2(c) 和 2(d)], 碳酸锂的衍射峰完全消失, 说明此时碳酸锂已经反应完全, 得到的产物均为 $\alpha\text{-NaFeO}_2$ 结构, 且无杂相形成。另外, 正极材料的结晶完整程度还与衍射峰 (018) 和 (110) 的分离程度有明显关系^[20-23]。从图 2(e)

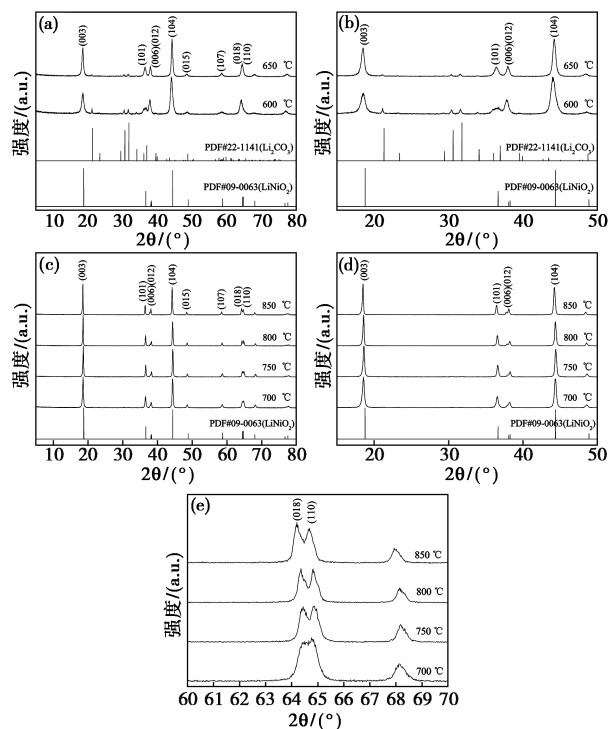


图 2 不同煅烧温度下 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$

正极材料的 XRD 谱图

[(a) 和 (b) 煅烧温度为 600°C , 650°C ; (c) 和 (d) 煅烧温度为 700°C , 750°C , 800°C , 850°C ; (e) 为 (d) 的局部放大图]

可以看出, 随着温度的升高, 衍射峰 (018) 和 (110) 的分离程度明显, 说明材料的结晶状态逐渐提高, 当达到 800°C 时, 制备的样品具有最完整的晶型结构。

$\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料的结构稳定性主要取决于锂离子和 Ni^{3+} 在氧立方密堆积的有序程度。在实际合成中, 由于 Ni^{2+} 的 $3d^2$ 的电子分布特征, 其很难被氧化成 Ni^{3+} , 生成化学计量比的 LiNiO_2 非常困难, 通常都会有少量的 Ni^{2+} 占据 Ni^{3+} 的晶格点, 同时为补充电荷平衡, 等量的 Ni^{2+} 会进入锂层, 导致阳离子的混排, 材料层状性能变差, 使得电容量降低。 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料的层状结构性能可以根据材料的衍射峰强度比值 $I_{(003)}/I_{(104)}$ 和晶胞参数 c/a 的大小进行判断。 $I_{(003)}/I_{(104)}$ 值越大, 说明层状结构性能越好; 晶胞参数 c/a 比值越大, 说明锂离子在材料中的嵌入与脱出越容易, 充放电性能越好^[20-23]。表 1 是通过计算得到的在不同煅烧温度下合成的 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料的结构参数及晶粒尺寸。

由表 1 可知: $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料结构受温度影响很大, 在 600°C 时材料的 $I_{(003)}/I_{(104)}$ 值很低, 说明 Ni-O 层间仍存在大量的 Ni^{2+} , 其层状结构性能很差; 随着温度逐渐升高, 正极材料的结晶度逐渐提高。当煅烧温度为 800°C 时, 正极材料的晶体结构最为完整, $I_{(003)}/I_{(104)}$ 最大值为 1.28, 说明 Ni-O 层间的 Ni^{2+} 最少, 其层状结构性能最好。然而当温度升高至 850°C 时, 材料的 $I_{(003)}/I_{(104)}$ 值有所降低, 这可能是由于在较高的温度下锂离子的挥发引起锂离子含量减少而导致层状结构性能有所下降。

表 1 不同煅烧温度下 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$

正极材料衍射峰 (003) 和 (104) 强度比

煅烧温度/ $^\circ\text{C}$	600	650	700	750	800	850
$I_{(003)}/I_{(104)}$	0.58	0.77	1.06	1.11	1.28	1.12

表 2 为不同煅烧温度下合成 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料的晶胞参数, 由于在 600°C 和 650°C 时含有大量的杂相物质, 在计算晶胞参数时误差较大, 因此下面仅分析 700°C , 750°C , 800°C , 850°C 时合成的正极材料晶胞参数的变化。由表 2 可以看出: 随着煅烧温度的上升, 材料的晶胞参数 c/a 值有着逐渐增大的趋势; 当煅烧温度为 800°C 时, 材料的晶胞参数 c/a 值最大, 说明此时锂离子嵌入与脱出的通道最畅通, 电化学性能最好; 当煅烧温度为 850°C 时, 材料的晶胞参数 c/a 值有所降低, 这也可能是锂离子挥发而引起的。

表 2 不同煅烧温度下合成的 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$

正极材料的晶胞参数

煅烧温度/ $^{\circ}\text{C}$	a/nm	c/nm	c/a
700	0.287724	1.420671	4.937617
750	0.287333	1.420906	4.945154
800	0.28744	1.422455	4.948702
850	0.288111	1.425684	4.948384

注: a 和 c 均代表晶胞参数。

表 3 为不同温度下合成的 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料的晶粒尺寸。当煅烧温度较低(600 $^{\circ}\text{C}$ 和 650 $^{\circ}\text{C}$)时,正极材料尚未很好地结晶,晶粒尺寸较小;随着温度的升高,晶体不断生长,材料的晶粒尺寸不断增大。

表 3 不同温度下合成 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料的晶粒尺寸

煅烧温度/ $^{\circ}\text{C}$	600	650	700	750	800	850
晶粒粒径/ nm	10.9423	15.8047	24.9738	31.4911	41.4939	42.5987

3 结论

采用溶胶-凝胶法合成了 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料,利用 SEM、XRD 分析与表征方法研究了煅烧温度对所合成的 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料颗粒形貌和物相结构的影响。

(1) 煅烧温度为 800 $^{\circ}\text{C}$ 和 850 $^{\circ}\text{C}$ 时,制备的 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料颗粒形貌均匀、分散性良好。

(2) 随着煅烧温度的升高, $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料中的杂质相逐渐减少,纯度不断提高,层状结构性能不断改善,结晶度逐渐提高,锂离子嵌入与脱出通道越容易。

(3) 随着煅烧温度的升高,晶体不断生长,材料的晶粒尺寸不断增大。

参考文献

- [1] Antolini E. LiCoO_2 : formation, structure, lithium and oxygen nonstoichiometry, electrochemical behavior and transport properties[J]. Solid State Ionics, 2004, 170: 159-171.
- [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]. Journal of Power Sources, 2003, s119-s121: 184-188.
- [3] Yaser Hamed Jouybari, Sirous Asgari. Synthesis and electrochemical properties of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ nanopowders for lithium ion battery applications[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196: 337-342.
- [4] Belov D, Yang M H. Investigation of the kinetic mechanism in overcharge process for Li-ion battery[J]. Solid State Ionics, 2008, 179: 1816-1821.
- [5] Belov D, Yang M H. Failure mechanism of Li-ion battery at overcharge conditions[J]. J. Solid State Electrochem, 2008, 12: 885-894.
- [6] Doh C H, Kim D H, Kim H S, et al. Thermal and electrochemical behaviour of $\text{C/Li}_x\text{CoO}_2$ cell during safety test[J]. Journal of Power Sources, 2008, 175: 881-885.
- [7] Takahashi Y, Tode S, Kinoshita A, et al. Development of lithium-ion batteries with a LiCoO_2 cathode toward high capacity by elevating charging potential[J]. J. Electrochem Soc, 2008, 155(7): A537-A541.
- [8] Amatucci G G, Tarascon J M, Klein L C. Cobalt dissolution in LiCoO_2 -based non-aqueous rechargeable batteries[J]. Solid State Ionics, 1996, 83: 167-173.
- [9] Amatucci G G, Tarascon J M, Klein L C. CoO_2 , the end member of the Li_xCoO_2 solid solution[J]. J. Electrochem Soc, 1996, 143(3): 1114-1123.
- [10] Ohzuku T, Ueda A. Solid-state redox reaction of LiCoO_2 ($\text{R}3\text{m}$) for 4 volt secondary lithium cells[J]. J. Electrochem Soc, 1994, 141(11): 2677-2972.
- [11] Zhou J, Notten P H L. Studies on the degradation of Li-ion batteries by the use of microreference electrodes[J]. Journal of Power Sources, 2008, 177: 553-560.
- [12] 顾惠敏, 翟玉春, 田彦文, 等. 锂离子电池正极材料 LiNiO_2 的结构和性能[J]. 材料研究学报, 2007, 21(1): 97-101.
- [13] Majumder S B, Nieto S, Katiyar R S. Synthesis and electrochemical properties of $\text{LiNi}_{0.80}(\text{Co}_{0.20-x}\text{Al}_x)\text{O}_2$ ($x = 0.00$ and 0.05) cathodes for Li ion rechargeable batteries[J]. Journal of Power Sources, 2006, 154(1): 262-267.
- [14] 刘万民, 胡国荣, 彭忠东, 等. 加压氧化法制备 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(1): 133-140.
- [15] Zhong Q M, Sacken V U. Crystal structures and electrochemical properties of $\text{LiAl}_y\text{Ni}_{1-y}\text{O}_2$ solid solution[J]. J. Power Sources, 1995, 54(2): 221-223.
- [16] Yang X Q, Sun X, McBreen J. Structural changes and thermal stability: in situ X-ray diffraction studies of a new cathode material $\text{LiMg}_{0.125}\text{Ti}_{0.125}\text{Ni}_{0.75}\text{O}_2$ [J]. Electrochem Communications, 2000, 2(10): 733-737.
- [17] Kaufmann A, Frischat G H. High temperature diffusion for the preparation of gradient index lens blanks[J]. Solid State Ionics, 1998, 109(3/4): 297-302.
- [18] 丁方, 程晓. 球形 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料的制备及其电化学性能[J]. 电源技术, 2015, 39(6): 1177-1178.
- [19] 汤宏伟, 赵付双, 常照荣, 等. 高密度锂离子正极材料前驱体 $\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.2-x}\text{Al}_x(\text{OH})_2$ 的制备[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2009, 37(1): 85-88.
- [20] 崔妍, 江卫军, 张溪, 等. 锂源及生产工艺对 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 性能的影响[J]. 电池, 2014, 44(3): 157-160.
- [21] 葛龙, 杨秀康, 余睿智, 等. 含铝富锂正极材料 $x\text{Li}_2\text{MnO}_3 \cdot (1-x)\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 的制备和电化学性能[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(5): 1236-1243.
- [22] 陶伟, 吴金花, 王燕, 等. 不同铝源制备 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料及电化学性能影响[J]. 化学研究与应用, 2015, 27(7): 1048-1052.
- [23] 夏书标, 张英杰, 董鹏, 等. 非水系溶剂溶胶-凝胶法制备高性能 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ 正极材料[J]. 无机化学学报, 2015, 30(7): 732-738.

收稿日期: 2017-11-10

修稿日期: 2018-03-18