

文章编号:1674-9669(2020)06-0064-07 DOI:10.13264/j.cnki.ysjskx.2020.06.009

引文格式:黄庆研,梁雅莉,王俊荣,等.烧成温度对溶胶凝胶法合成 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 材料性能的影响[J].有色金属科学与工程,2020,11(6):64-70.

烧成温度对溶胶凝胶法合成 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 材料性能的影响

黄庆研^{a,b}, 梁雅莉^{a,b}, 王俊荣^{a,b}, 谢光明^{a,b}, 王春香^{a,b}, 李之锋^{a,b}

(江西理工大学,a.材料冶金化学学部;b.江西省动力电池及材料重点实验室,江西 赣州 341000)

摘要:通过溶胶-凝胶法制备 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 正极材料,研究了烧成温度对材料结构、形貌和电化学性能的影响。采用 XRD、SEM 及恒流充放电测试对材料性能进行表征。分析结果表明,材料均呈现典型的 $\alpha\text{-NaFeO}_2$ 层状结构且阳离子有序度较好。不同烧成温度时材料形貌呈现不规则块状且粒径随着温度的增加而增大;温度低于 $780\text{ }^\circ\text{C}$ 时,材料结晶性不好,生长不完全;温度高于 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 时,材料团聚现象严重、形貌不规整。烧成温度为 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 时材料有较好的电化学性能,在 5 C 高倍率充放电下,首次放电比容量为 147.95 mAh/g ,循环 200 次后,容量保持率为 76.71% 。

关键词:锂离子电池;溶胶-凝胶法; $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$;烧成温度;高倍率

中图分类号:TM912.9;TF111.52 文献标志码:A

Effect of sintering temperature on properties of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ material synthesized by sol-gel method

HUANG Qingyan^{ab}, LIANG Yali^{ab}, WANG Junrong^{ab}, XIE Guangming^{ab},
WANG Chunxiang^{ab}, LI Zhifeng^{ab}

(a. Faculty of Materials Metallurgy and Chemistry; b. Jiangxi Key Laboratory of Power Battery and Materials,
Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ cathode materials were prepared by sol-gel method. The structure, morphology and electrochemical performance of the materials synthesized by the different sintering temperature were characterized through XRD, SEM and constant current charge and discharge tests. The results show that all the materials are characterized by a typical $\alpha\text{-NaFeO}_2$ layered structure with good cation order. The morphology of the cathode materials shows irregular block shape. The particle size increases with the higher sintering temperature. At the same time, the crystal face is not well developed with poor crystallinity when the sintering temperature is lower than $780\text{ }^\circ\text{C}$. However, the primary particles are easy to agglomerate when the sintering temperature is higher than $800\text{ }^\circ\text{C}$. The cathode materials sintered at $800\text{ }^\circ\text{C}$ has the best electrochemical performance: the first discharge specific capacity is 147.95 mAh/g at 5 C high rate charge and discharge after 200 cycles. The capacity retention rate reaches 76.71% .

Keywords: Lithium-ion battery; sol-gel method; $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$; sintering temperature; high rate

随着纯电动汽车(EVs)和混合电动汽车(HEVs)的兴起,对锂离子电池的性能有了更高的要求。因正极材料是锂离子电池的“核心”,研究一种高比容量、长循环寿命、环保且成本低的正极材料已迫在眉睫。富镍三元层状正极材料 $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ ^[1-3]可以看做 LiNiO_2 、 LiCoO_2 、 LiMnO_2 三者发生固溶而形成的,其具备了 LiNiO_2 的高比容量, LiCoO_2 的良好循环性、优良导电性及 LiMnO_2 的低成本高安全等优点,是极具发展前景的正极材料^[4-5]。

$\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ (NCM811) 正极材料是 $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ 中的一种典型代表,但其也有很多缺点,如容量衰减问题^[6];循环稳定性及热稳定性不足;材料的阳离子混排问题^[7]、首次库伦效率较低及可逆容量损失较多、存储性能较差等。优化制备工艺、包覆^[8]及掺杂^[9]改性、制备核壳结构材料^[10]等都是解决问题的方法。目前合成正极材料的主要方法是化学共沉淀法^[11-12]、固相法及溶胶-凝胶法^[13-14],但化学共沉淀法在材料合成过程中,沉淀剂的加入可能会使局部浓度过高,产生团聚或组成不够均匀;固相法在高温反应时耗能较大、效率低、易混入杂质、完全依靠机械研磨,使原料混合不均匀导致颗粒尺寸差别较大且实验可重复较差;而溶胶-凝胶法制备材料时,由于该法经过溶液反应过程,所以材料组成较均匀且实验合成温度较低、反应不易引入杂质,产品纯度较高。采用溶胶-凝胶法合成正极材料的研究有很多,但对其烧成温度的研究很少。Li 等使用溶胶-凝胶法制备 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 正极材料,以 50 ℃为一个梯度研究了烧成温度对其性能的影响^[15]。材料在 750 ℃时电化学性能较优。但高倍率下材料性能较差,5 C 时只有 108.3 mAh/g 且温度梯度跨度过大,没有细化进行研究。

烧成温度低会造成材料结晶性不好,晶体生长不完全;烧成温度高会使材料表面出现团聚且因锂挥发多而形成缺锂化合物,增加材料的阻抗值。烧成温度的细微差别可能会对晶体形貌、结晶性能、电化学性能等产生影响,因此本文以 20 ℃为温度梯度,细化研究了烧成温度对 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 正极材料结构、形貌和电化学性能的影响。

1 实验方法

1.1 正极材料的制备

实验采用溶胶-凝胶法制备 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 正极材料。所用原料为乙酸镍($\text{Ni}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)、硝酸钴($\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、乙酸锰($\text{C}_4\text{H}_6\text{MnO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)、氢氧化锂($\text{LiOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$)及柠檬酸($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$)。按照

摩尔比镍:钴:锰为 8:1:1、柠檬酸:M(总金属离子)为 1:1 及锂盐过量 5%^[15-16](弥补高温烧结过程中锂盐的挥发)称取质量,后加去离子水先把镍、钴、锰盐溶解为溶液 1,再把柠檬酸和氢氧化锂溶解成透明溶液 2。将溶液 2 缓慢滴加到溶液 1 中,水浴锅中磁力搅拌均匀后加氨水调节溶液 pH 为 3.50 左右,80 ℃蒸发溶剂数小时成湿凝胶状态,后 180 ℃干燥 12 h 成干凝胶,研磨后在空气气氛下,480 ℃预处理 6 h,冷却至室温后取出研磨,后于 O_2 气氛下,480 ℃保温 6 h,最后分别于 760、780、800、820 ℃不同温度下烧结 12 h 再研磨过筛得 NCM811 正极材料。

1.2 材料结构与形貌表征

材料使用 X 射线衍射(XRD)分析其晶体结构,采用德国 Bruker D8 Advance 型转靶衍射仪进行测试,扫描范围为 $10^\circ \sim 80^\circ$,步长为 0.02° ,扫描速率为 $8^\circ/\text{min}$ (Cu $\text{K}\alpha$ 辐射, $\lambda=0.154\ 06\ \text{nm}$, 60 kV 管电压, 50 mA 管电流)。采用德国 ZEISS SIGMA300 型扫描电子显微镜(SEM)进行表面形貌观察。

1.3 电化学性能测试

按照质量比 8:1:1 分别称取正极材料、聚偏氟乙烯(PVDF)和乙炔黑(SP),以 N-甲基吡咯烷酮(NMP)为溶剂去溶解聚偏氟乙烯成透明溶液,后分别加入正极材料和乙炔黑,于球磨机上搅拌 10 h 制成均匀浆料再涂覆于铝箔上。经干燥、辊压、裁片后真空干燥 12 h 得正极片。以锂片为负极、美国 Celgard 2300 型号的隔膜、1 mol/L LiPF_6 的碳酸乙烯酯/碳酸二乙酯(EC/DEC)溶液为电解液,在充满氩气的手套箱内制作 CR2032 型纽扣电池。在新威电池测试柜上测试其电性能,测试条件为:25 ℃,恒流充放电测试,电压范围为 2.75~4.3 V。交流阻抗及循环伏安测试在上海辰华电化学工作站进行,测试条件分别为:25 ℃,频率 $10^{-1} \sim 10^5\ \text{Hz}$,电压振幅为 5 mV;25 ℃,电压范围 2.5~4.6 V,扫描次数为 4 次,扫描速率为 0.1 mV/s。

2 实验结果分析与讨论

2.1 物相结构分析

不同烧成温度对材料物相结构有着一定的影响,探究了 760、780、800、820 ℃ 4 种烧成温度下材料的性能。图 1 所示为材料的 X 射线衍射图,从图 1 中可以看出 4 组材料的(003)面的晶面强度是随着烧成温度的增加而逐渐增强的。材料的特征峰都很明显且峰型几乎一致,与 PDF 卡片中的 LiNiO_2 (89-3601)相似,说明材料呈现 R-3m 的空间群,表现出 $\alpha\text{-NaFeO}_2$ 层状结构^[17]。随着烧成温度的提高,(006)峰

和(102)峰及(108)峰和(110)峰的分裂程度加强^[8],说明烧成温度的提高使得材料的晶型结构更加完善,层状结构更好。一般常用 c/a 值和 $I_{(003)}/I_{(104)}$ 值来表征材料的层状结构和阳离子混排度, c/a 值大于 4.9,材料层状结构较好; $I_{(003)}/I_{(104)}$ 值大于 1.2,材料阳离子混排度较小^[9-21]。对比表 1 中的 c/a 值和 $I_{(003)}/I_{(104)}$ 值可以看出随着烧成温度的提高,其值都呈现先增大后减小的趋势且 800 ℃下有较优的层状结构和较小的阳离子混排度。

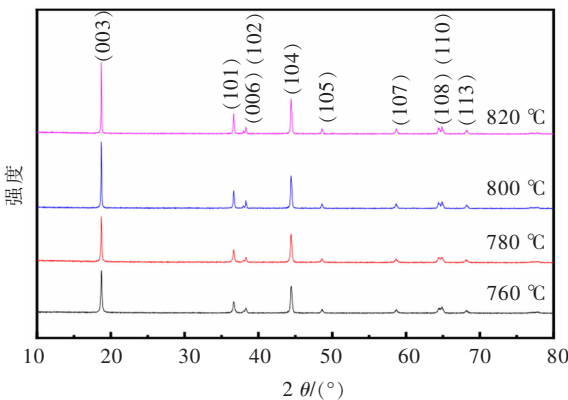


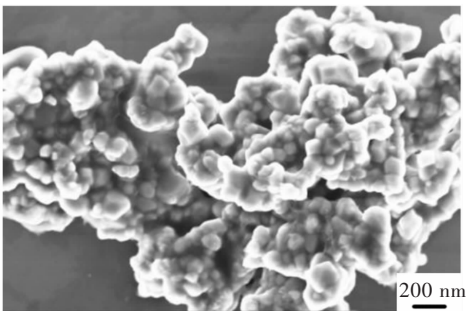
图 1 不同烧成温度下 NCM811 的 XRD 图谱
Fig. 1 XRD patterns of NCM811 at different sintering temperature

表 1 不同烧成温度下 NCM811 的晶胞参数计算值
Table 1 Lattice parameters of NCM811 calculated at different sintering temperature

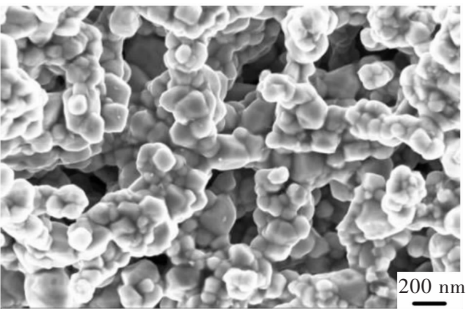
温度/℃	a/nm	c/nm	V/nm^3	c/a	$I_{(003)}/I_{(104)}$
760	0.287 20	1.421 00	0.101 51	4.948	1.543
780	0.287 23	1.421 36	0.101 56	4.949	1.567
800	0.287 19	1.421 53	0.101 54	4.950	1.977
820	0.287 19	1.420 89	0.101 50	4.947	1.970

2.2 材料形貌分析

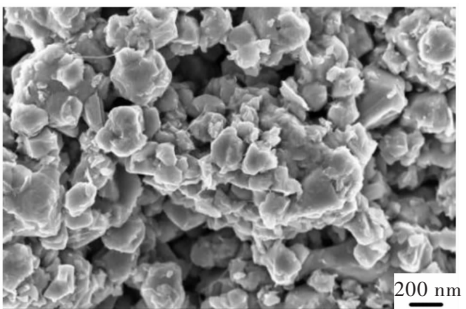
材料表面形貌如图 2 所示。从图 2 中可以看出材料形貌呈现不规则块状,随着烧成温度的增加,材料颗粒粒径逐渐增大且材料团聚现象呈现先减小后增大的趋势,780 ℃时材料的粒径约为 200~300 nm 且材料较少发生团聚,有良好的分散性和结晶性。760 ℃时材料粒径在 200 nm 左右,此时材料生长不是很完全,有部分一次颗粒尚未结晶,团聚在材料表面,影响材料的性能;而 800 ℃时材料有较好的分散性,材料中部分一次颗粒聚集,烧成时发生团聚,形成粒径较大的二次颗粒,其粒径大概在 200~500 nm 之间;820 ℃高温下锂盐挥发较多,其表面形成缺锂化合物且材料团聚现象严重,形成粒径较大的二次颗粒(600 nm 左右),阻碍 Li^+ 的扩散,致使循环稳定性下降。



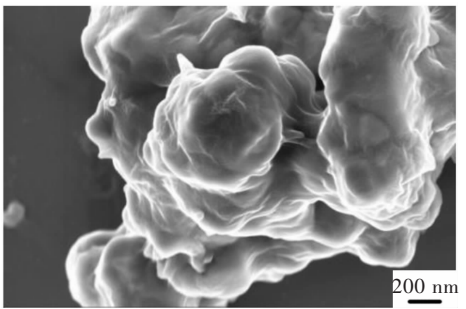
(a) $T=760\text{ }^{\circ}\text{C}$



(b) $T=780\text{ }^{\circ}\text{C}$



(c) $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$



(d) $T=820\text{ }^{\circ}\text{C}$

图 2 不同烧成温度下 NCM811 的 SEM 像
Fig. 2 SEM patterns of NCM811 at different sintering temperature

2.3 电化学性能分析

图 3 所示是材料在新威电池测试柜上测试的电性能曲线图。测试条件:电压为 2.75~4.3 V、25 ℃下,恒流充放电测试。以 0.1 C(1 C=200 mAh/g)倍率的电流进行首次充放电测试,图 3(a)中随着烧成温度的增加,材料的首次放电比容量呈现先增加后减小的趋势。800 ℃时首次充放电曲线性能最好,比容量有

203.86 mAh/g,库伦效率为 87.88%,这归因于材料有最小的阳离子混排度和良好的层状结构;而 760 °C 材料性能最差,比容量只有 179.02 mAh/g,这是因为材料表面发生团聚且阳离子混排相对较高,使电性能变差;而 820 °C 高温下,材料虽然有较小的阳离子混排度,但高温导致锂盐挥发较多,表面形成缺锂化合物且团聚现象严重,增加了电荷转移阻抗,使材料比容量降低。图 3(b)中,800 °C 下的材料表现出较好的倍率性能,在不同的倍率下其比容量都是最高的,说明该材料有着较低的极化率,其循环可逆性也较好。这归因于 800 °C 时材料最低的阳离子混排度及较好的层状结构,良好的层状结构利于 Li^+ 在其中的脱嵌,增加了材料的离子和电子电导率,使材料的电性能更好。而在低温或高温下,材料的倍率性能都明显减弱,这是因为低温下材料生长不完全,一次颗粒还未完全长大,阻碍 Li^+ 扩散,使其性能下降;而高温下锂盐挥发过多,材料表面形成缺锂化合物且团聚现象严重,使材料电性能变差。图 3(c)为材料在 0.2 C 倍率下的循环图。图 3(c)中 760 °C 烧成材料在 100 次循环后有较高的容量保持率,为 86.94%,这主要是因为此

时材料有着较小的粒径,比表面积相对较大,增加了活性物质与电解质间的界面接触面积,使材料有较好的循环稳定性,但其初始放电比容量较低,只有 167.09 mAh/g。780、800 °C 下的材料有着较高的初始放电比容量,分别为 192.34、195.23 mAh/g,在 100 次循环后其容量保持率分别为 81.65% 和 80.27%。而 820 °C 材料容量保持率最差,为 40.79%,这归因于高温烧结时材料的一次颗粒异常长大且团聚现象严重、形貌不规整,不仅增加了 Li^+ 的扩散路径,还让电荷转移阻抗增加,使电性能变差。分析图 3(d)和表 2 中数据,800 °C 烧结材料有较好的循环性能,5 C 高倍率电流下,200 次循环后材料仍有 76.71% 的容量保持率,这归因于 800 °C 烧结时材料有较好的层状结构且阳离子混排度较低,晶体生长较完整,增加了 Li^+ 脱嵌速率,利于材料电性能,这与 XRD 测试结果一致;而 820 °C 烧结的材料循环性能最差,200 次循环后只有 59.47% 的容量保持率,这主要是因为材料团聚现象严重,阻碍 Li^+ 的扩散,增加了电荷转移阻抗值,与 SEM 图测试结果相同。

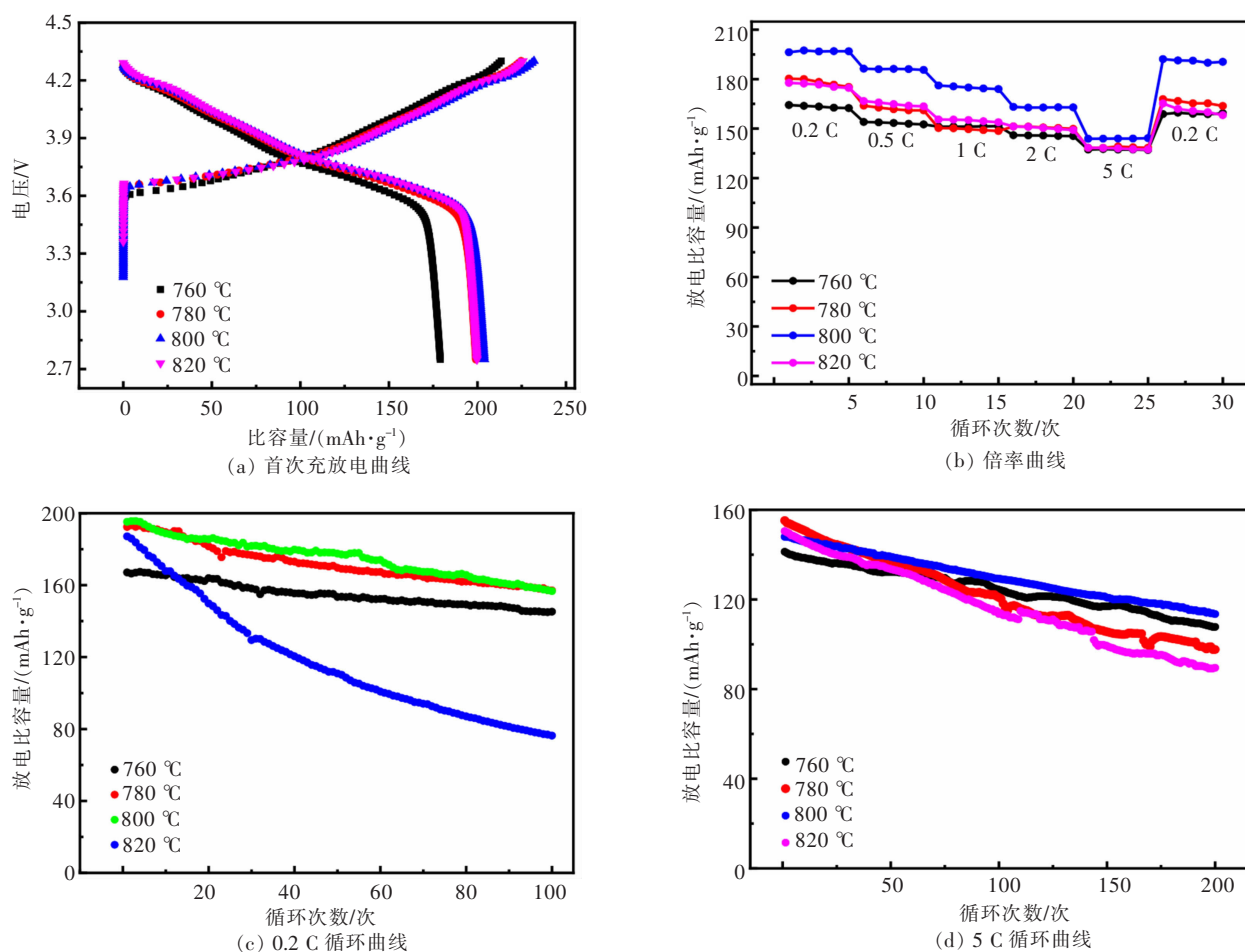


图 3 不同烧成温度下 NCM811 的电化学性能曲线

Fig. 3 Electrochemical performance curves of NCM811 at different sintering temperature

图 4 所示为材料的循环伏安曲线图。结合图 4 和表 3 可以看出,图 4 中所有样品都具有 3 对氧化还原峰且峰型完整,分别对应 H_1/M 、 M/H_2 及 H_2/H_3 相转变,在 3 V 附近没有氧化还原峰出现,说明了材料中没有 Mn^{3+}/Mn^{4+} 的变化, Mn 以 +4 价存在,只起稳定结构的作用^[2]。首次氧化还原峰的偏离是因为材料中 SEI 膜的形成及充放电时发生的一些相转变,其也导致了 4 组材料第 1 圈扫描时其氧化峰在 3.8~4.1 V 左右出现,还原峰位置与后面 3 圈相比没有太大变化。其后 3 圈

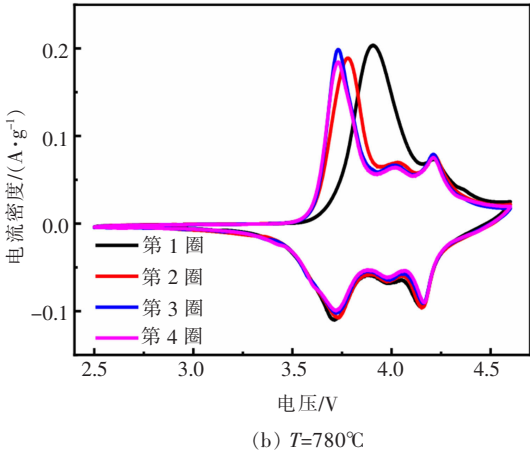
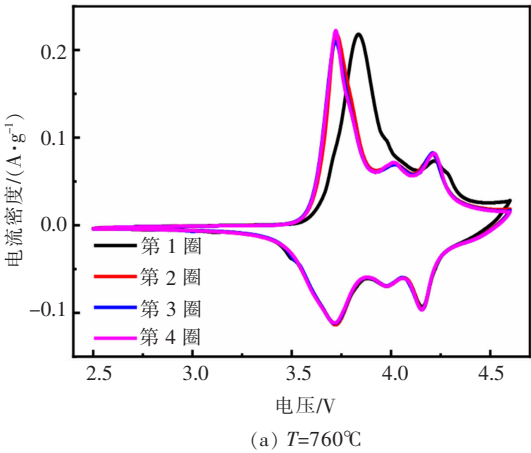
扫描时第 1 对氧化还原峰在 3.7 V 左右出现,是 Ni^{2+}/Ni^{4+} 的变化,第 2 对氧化还原峰在 4.0 V 左右出现,是 Ni^{3+}/Ni^{4+} 的变化,而第 3 对氧化还原峰在 4.2 V 左右出现,则是 Co^{3+}/Co^{4+} 的变化。对比材料第 4 圈的峰电位差值,其差值没有明显差别,说明材料的极化程度都较小,循环可逆性较好。这个结果也与前 3 组材料的循环稳定性测试相同,第 4 组材料可能是因为材料表面团聚较严重且形成了缺锂化合物,阻碍 Li^+ 扩散且增加了电荷转移阻抗值,使电性能衰减。

表 2 不同烧成温度下 NCM811 的循环性能
Table 2 Cyclic performance of NCM811 at different sintering temperature

温度/℃	首次放电比容量/(mAh·g ⁻¹)	200 次放电比容量/(mAh·g ⁻¹)	容量保持率/%
760	141.255	107.722	76.26
780	155.193	97.665	62.93
800	147.952	113.495	76.71
820	150.485	89.498	59.47

表 3 不同烧成温度下 NCM811 的第 4 圈氧化还原电位差
Table 3 The redox potential difference of NCM811 at the 4th circle at different sintering temperature

温度/℃	氧化峰位置/V	还原峰位置/V	电位差/mV
760	3.722	3.714	8
780	3.730	3.720	10
800	3.736	3.728	8
820	3.714	3.713	1



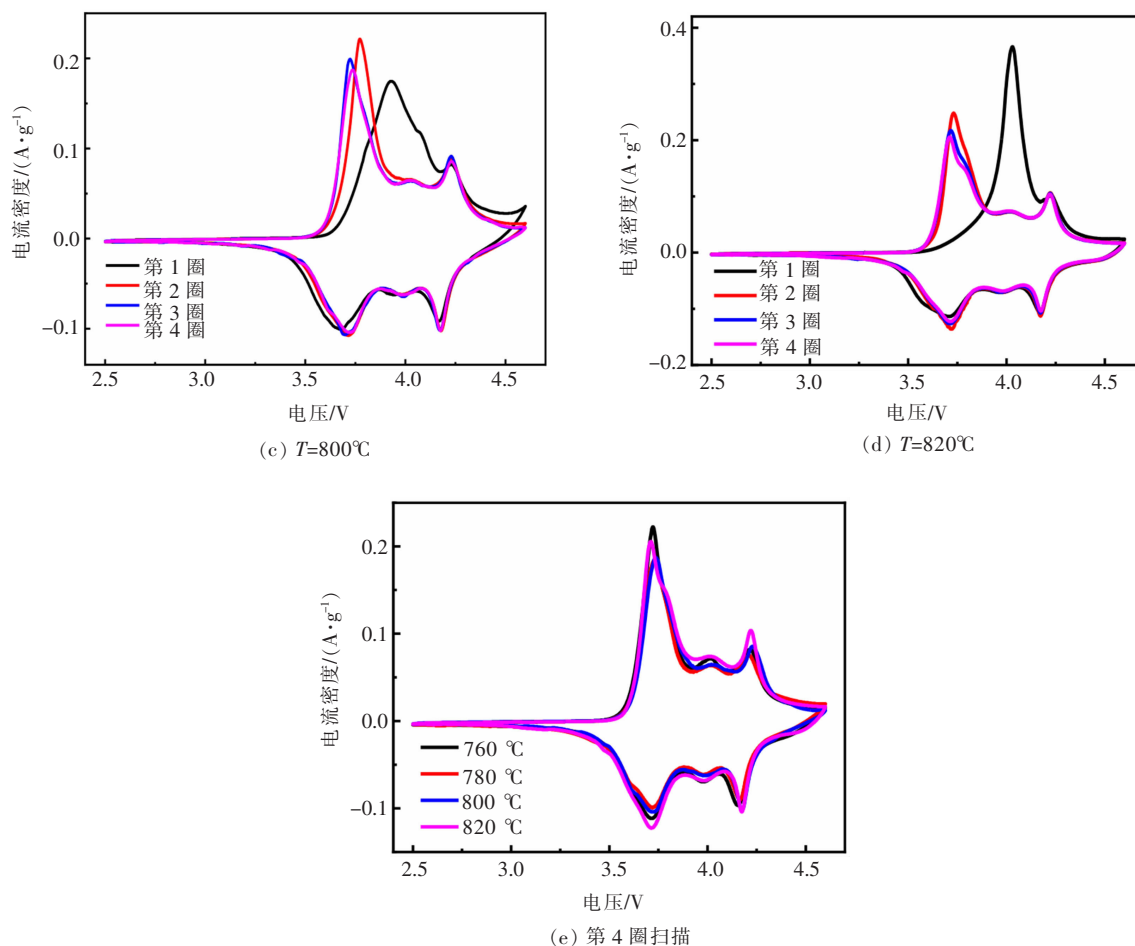


图 4 不同烧成温度下 NCM811 的 CV 曲线

Fig. 4 CV curves of NCM811 at different sintering temperature

图 5 所示为材料在 1 C 倍率下循环 50 圈后充至 3.9 V 下的 EIS 图谱。图 5 中原始数据用曲线表示,拟合数据用散点表示且颜色相同,几乎所有图谱都表现出了 2 个半圆和直线。高频区半圆弧代表 Li^+ 通过电

解质界面膜层阻抗(R_{SEI})、中频区半圆弧代表电荷转移阻抗(R_{ct})、低频区直线表示 Li^+ 扩散阻抗^[23]。50 圈循环后,材料中高频区半圆有明显差异,780,800 $^{\circ}\text{C}$ 下材料的 R_{ct} 值较小,分别为 81.69,76.88 Ω ,760 $^{\circ}\text{C}$ 的半圆直径相对较大,其 R_{ct} 值为 181.7 Ω ;而 820 $^{\circ}\text{C}$ 下半圆直径最大,表现出其 R_{ct} 值也最大,为 260.4 Ω ,这与材料的循环稳定性测试有相同的结果,表现在材料经过相同次数的循环后其容量保持率都较低。

3 结 论

1) 通过溶胶-凝胶法制备了不同烧成温度下的 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 正极材料,XRD 和电化学数据显示,材料都有良好的 $\alpha\text{-NaFeO}_2$ 型层状结构且阳离子混排度较低。800 $^{\circ}\text{C}$ 烧结的材料表现出较好的电化学性能,在 0.1 C 时其首次放电比容量为 203.86 mAh/g,库伦效率为 87.88%,5 C 高倍率下循环 200 次后,容量保持率仍有 76.71%。

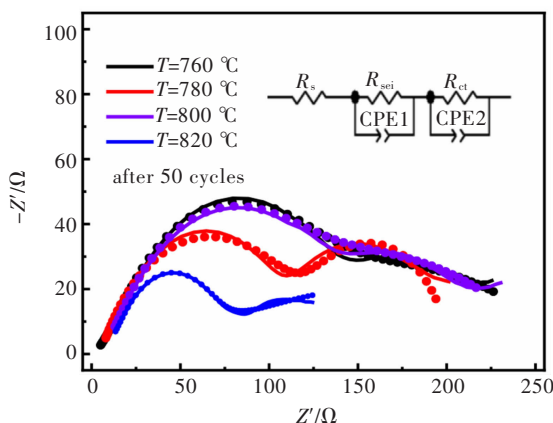


图 5 不同烧成温度下 NCM811 的 EIS 曲线及等效电路

Fig. 5 EIS curves and equivalent circuit of NCM811 at different sintering temperature

2)烧成温度对正极材料的形貌有显著影响。材料形貌呈现不规则块状,随着烧成温度的增加,材料颗粒粒径逐渐增大且团聚现象表现出先减小后增大的趋势。低温下材料生长不完全,使材料的结晶性变差,导致材料中Li⁺扩散受阻,比容量下降;而高温下锂盐挥发过多,材料表面形成缺锂化合物且表面团聚较严重,形成粒径较大的二次颗粒,使材料的循环稳定性变差。

参考文献:

- [1] DING Y, WANG R, WANG L, et al. A short review on layered $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ positive electrode material for lithium-ion batteries[J]. *Energy Procedia*, 2017, 105:2941–2952.
- [2] 刘嘉铭, 张英杰, 董鹏, 等. 锂离子电池正极材料高镍 $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ 研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2016, 44(7):931–941.
- [3] LI G Y, ZHANG Z J, HUANG Z L, et al. Understanding the accumulated cycle capacity fade caused by the secondary particle fracture of $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ cathode for lithium ion batteries[J]. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2017, 21(3):673–682.
- [4] NOH H J, YOUN S, YOON C S, et al. Comparison of the structural and electrochemical properties of layered $\text{Li}[\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Mn}_z]\text{O}_2$ ($x = 1/3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ and 0.85) cathode material for lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 233:121–130.
- [5] 钟盛文, 钟风娣, 张骞. 锂离子正极材料 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ 的合成与掺杂 Al 的性能研究[J]. *有色金属科学与工程*, 2013, 4(4):11–16.
- [6] 李想, 葛武杰, 王昊, 等. 高镍系三元层状氧化物正极材料容量衰减机理的研究进展[J]. *无机材料学报*, 2017, 32(2):113–121.
- [7] WANG T, REN K L, XIAO W, et al. Tuning the Li/Ni disorder of the NMC811 cathode by thermally driven competition between lattice ordering and structure decomposition[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2020, 124(10):1–13.
- [8] GUAN P Y, ZHOU L, YU Z L, et al. Recent progress of surface coating on cathode materials for high-performance lithium-ion batteries[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2020, 43:220–235.
- [9] 刘芝君, 彭弯弯, 李之锋, 等. 铈掺杂对镍基正极材料 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 电化学性能影响[J]. *有色金属科学与工程*, 2020, 11(2):89–95.
- [10] RAN Q, ZHAO H, HU Y, et al. Multifunctional integration of double-shell hybrid nanostructure for alleviating surface degradation of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ cathode for advanced lithium-ion batteries at high cutoff voltage [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(8):9268–9276.
- [11] DAI S C, YUAN M L, WANG L, et al. Ultrathin- Y_2O_3 -coated $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ as cathode materials for Li-ion batteries: Synthesis, performance and reversibility [J]. *Ceramics International*, 2019, 45:674–680.
- [12] XU X, HUO H, JIAN J Y, et al. Radially oriented single-crystal primary nanosheets enable ultrahigh rate and cycling properties of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ cathode material for lithium-ion batteries[J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 9(15):1803963.
- [13] JIANG D C, ZHAO L, SHAO Y B, et al. Preparation and characterization of layered $\text{LiNi}_{0.9}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_{0.025}\text{Mg}_{0.025}\text{O}_2$ cathode material by a Sol-gel method for lithium-ion batteries[J]. *RSC Advances*, 2015, (5):40779–40784.
- [14] LEE S W, KIM M S, JEONG J H, et al. Li_3PO_4 surface coating on Ni-rich $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ by a citric acid assisted Sol-gel method: Improved thermal stability and high-voltage performance [J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 360:206–214.
- [15] LI J, ZHANG M L, ZHANG D Y, et al. Effect of sintering conditions on electrochemical properties of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ as cathode material[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2020, 15: 1881–1892.
- [16] GAO S, ZHAN X W, CHENG Y T. Structural, electrochemical and Li-ion transport properties of Zr-modified $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ positive electrode materials for Li-ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 410/411:45–52.
- [17] XU X, HUO H, JIAN J Y, et al. Radially oriented single-crystal primary nanosheets enable ultrahigh rate and cycling properties of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ cathode material for lithium-ion batteries[J]. *Advanced Energy Materials*, 2019, 9(15):1803963.
- [18] LIU S Y, CHEN X, ZHAO J Y, et al. Uncovering the role of Nb modification in improving the structure stability and electrochemical performance of $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ cathode charged at higher voltage of 4.5 V[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 374:149–157.
- [19] VU D L, LEE J W. Na-doped layered $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ with improved rate capability and cycling stability[J]. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2018, 22(4):1165–1173.
- [20] WANG L, WU B R, MU D B, et al. Single-crystal $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ as high performance cathode materials for Li-ion batteries[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 674:360–367.
- [21] 赖江洪, 钟盛文, 郭进康, 等. $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ 正极材料的合成与性能[J]. *有色金属科学与工程*, 2017, 8(4):68–72.
- [22] LI Z, HONG J H, HE G, et al. Effect of FePO_4 coating on performance of $\text{Li}_{12}\text{Mn}_{0.64}\text{Ni}_{0.13}\text{Co}_{0.13}\text{O}_2$ as cathode material for Li-ion battery [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2015, 30(2): 129–134.
- [23] WANG X S, ZHENG X W, LIAO Y H, et al. Maintaining structural integrity of 4.5 V lithium cobalt oxide cathode with fumaronitrile as a novel electrolyte additive[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 338:108–116.