

引用格式:沈进冉,周淑琴,赵佳顺,等.电压区间对 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2/\text{MCMB}$ 全电池性能的影响[J].北京化工大学学报(自然科学版),2020,47(2):67-73.

SHEN JinRan, ZHOU ShuQin, ZHAO JiaShun, et al. Effect of the voltage range on the electrochemical performance of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2/\text{MCMB}$ full cells[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2020, 47(2):67-73.

电压区间对 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2/\text{MCMB}$ 全电池性能的影响

沈进冉¹ 周淑琴¹ 赵佳顺² 官亦标^{3*}

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 北京化工大学 材料科学与工程学院, 北京 100029;

3. 中国电力科学研究院有限公司, 新能源与储能运行控制国家重点实验室, 北京 100192)

摘要:以 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ (NCM811)为正极、中间相碳微球(MCMB)为负极构建锂离子全电池,研究了充放电电压区间对NCM811/MCMB全电池电化学性能的影响。研究表明:以4.3 V为充电截止电压,降低放电截止电压可提高全电池的容量,但高放电截止电压下全电池的循环性能更加稳定;在2.8~4.3 V电压区间下,NCM811/MCMB全电池不但具有高的比容量,同时还具有良好的循环性能和充放电可逆性。

关键词:三元材料;中间相碳微球;全电池;电压区间;电化学性能

中图分类号: TM9129 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2020.02.010

引言

锂离子电池由于具有高的能量密度、长的循环寿命和较高的功率,是当前综合性能最佳的二次电池^[1-2]。近年来电动汽车的快速发展对动力电池的能量密度提出了更高的要求^[1,3],开发高比能的锂离子电池是动力电池研发的主要方向。三元材料($\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_{1-x-y}\text{O}_2$, $0 < x < 1$, $0 < y < 1$, $0 < 1-x-y < 1$)因其高容量、低成本的特性而成为目前主流的锂离子电池正极材料, $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ (NCM111)、 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ (NCM523)和 $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ (NCM622)等三元材料已相继投入量产应用^[4-5]。相比于NCM111、NCM523、NCM622等三元材料, $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ (NCM811)中Ni含量更高,可以提供更高的比容量,有关其使用的研究目前也正在研发过程中。

对于锂离子全电池而言,正负极材料体系的选择、正负极材料的性能对于全电池的性能均具有显著的影响^[6-8]。石墨具有良好的层状结构,有利于锂离子在层间的可逆脱嵌,其理论比容量为372 mA·h/g。此外,石墨的充放电电压平台低(~0.2 V vs. Li^+/Li),组装成的电池平均输出电压高,是目前商业锂离子电池使用最多的负极材料。中间相碳微球(MCMB)作为石墨材料的一种,除了具有石墨炭负极的一般特征外,还具有比表面积小、堆积密度大等优点,有利于减少不可逆反应,提高电池的体积比容量。

除了正负极材料外,充放电电压区间也是影响锂离子全电池性能的关键因素之一。通过提高电池的充电截止电压,可以进一步增加材料中可逆脱嵌的锂离子数量,进而获得更高的放电比容量。但是过高的电压会使得锂离子脱出数目过多,导致晶格结构不稳定,表层出现不可逆相变,进而随着循环的深入出现深层材料结构破碎、崩塌的现象,严重阻碍锂离子后续的脱嵌过程,使得电池电化学性能迅速恶化;同时过高的电压会使得过渡金属价态升高,催化电解液的氧化分解,增加电池阻抗。因此,研究充放电电压区间对全电池性能的影响并进行调控对于优化电池性能具有重要意义。

收稿日期:2019-07-15

基金项目:国家电网公司科技项目(DG71-16-024)

第一作者:女,1989年生,硕士生

*通信联系人

E-mail: guanyb@epri.sgcc.com.cn

本文以高比容量的三元材料 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 为正极、中间相碳微球为负极构建锂离子全电池,研究了充放电电压区间对 NCM811/MCMB 全电池电化学性能的影响。

1 实验部分

1.1 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 的合成

以合肥科晶公司提供的三元前驱体 $\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}(\text{OH})_2$ 为原料, Li_2CO_3 (阿拉丁试剂,分析纯) 为锂源,按照 $n(\text{Li})/n(\text{TM}) = 1.05$ (TM 代表过渡金属 Ni/Co/Mn) 将 $\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}(\text{OH})_2$ 与 Li_2CO_3 混合。将混合物置于马弗炉中于 480°C 下热处理 5 h (升温速率 $2^\circ\text{C}/\text{min}$), 750°C 下热处理 15 h (升温速率 $2^\circ\text{C}/\text{min}$), 结束后随炉冷却至室温。

其他试剂信息: 中间相碳微球 (MCMB), 合肥科晶公司; Celgard 2400 隔膜, 美国 Whatman 公司; LiPF_6 (EC/EMC 体积比 3:7), 多多试剂。

1.2 表征方法

使用 X' PertPro MPD 型 X 射线衍射仪 (XRD, 荷兰 PANalytical 公司) 对 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 和 MCMB 进行物相分析, $\text{Cu K}\alpha$ 为辐射源, 扫描范围 $10^\circ \sim 80^\circ$, 扫描步长 $2^\circ/\text{min}$ 。采用日本电子株式会社生产的 JEOL-6701F 型扫描电子显微镜 (SEM) 对 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 和 MCMB 的微观形貌及颗粒大小进行观察。

1.3 电化学性能测试

以 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 为正极活性物质, 与粘结剂聚偏氟乙烯 (PVDF)、导电炭黑 Super P 按质量比 8:1:1 在匀浆机内高速混合均匀, 加入适量 N-甲基吡咯烷酮 (NMP) 调整浆料黏度, 涂覆在铝箔上。将电极在 120°C 下真空干燥 12 h, 然后冲切成 $\Phi 10\text{ mm}$ 的极片。负极的制作与正极相似, 将 MCMB、导电炭黑 Super P 和粘结剂 PVDF 按质量比 8:1:1 混合调浆, 涂覆在铜箔上, 干燥、切片。在半电池装配中, NCM811 极片的活性物质负载量约为 $1.6\text{ mg}/\text{cm}^2$, 测试电压范围 $2.8 \sim 4.3\text{ V}$; MCMB 极片的活性物质负载量为 $0.8 \sim 1.0\text{ mg}/\text{cm}^2$, 测试电压范围 $0.01 \sim 3\text{ V}$, NCM811 和 MCMB 电极的测试电流均为 1 C ($1\text{ C} = 170\text{ mA}/\text{g}$)。在全电池装配中, 控制负极和正极的容量比 (NP 比) 为 1.10 ± 0.01 , 正极活性物质负载量为 $1.6 \sim 2.1\text{ mg}/\text{cm}^2$, 负极活性物质负载量为 $0.8 \sim 1.0\text{ mg}/\text{cm}^2$ 。将 NCM811 正极、Celgard 2400 隔膜和 MCMB 负极通过叠片组装成电芯, 采用防滑

胶确保正负极片对准, 电解液为 $1\text{ mol}/\text{L}$ LiPF_6 , 在 80°C 下真空干燥 10 h, 再进行注液和封装处理。纽扣电池在室温下静置 12 h 后, 采用 CT2001A 型电池测试仪 (武汉蓝电) 进行电化学阻抗谱 (EIS) 测试, 测试电压范围分别为 $2.0 \sim 4.3\text{ V}$ 、 $2.4 \sim 4.3\text{ V}$ 、 $2.8 \sim 4.3\text{ V}$ 和 $3.2 \sim 4.3\text{ V}$, 在充放电测试前先以 0.25 C 的电流将全电池激活 3 圈后进行后续测试。全电池的循环伏安 (CV) 测试电压范围为 $0 \sim 4.3\text{ V}$, 扫描速率 $0.1\text{ mV}/\text{s}$ 。

2 结果与讨论

2.1 电极材料的 XRD 谱图

图 1 显示了 MCMB 和 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 的 XRD 图谱, 可以看出两者的 XRD 谱图中均未出现杂质峰。其中 MCMB 样品在 $2\theta = 26.46^\circ$ 处观察到尖锐的 (002) 衍射峰^[9], 为典型的石墨类炭结构。 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 样品为 $\alpha\text{-NaFeO}_2$ 结构, 常用 (006)/(102) 及 (108)/(110) 晶面的分裂程度 (强度比) 来衡量层状二维结构的有序程度。图 1 中 (006)/(102) 及 (108)/(110) 两组峰分裂较明显, 表明样品具有结晶程度良好的层状结构。

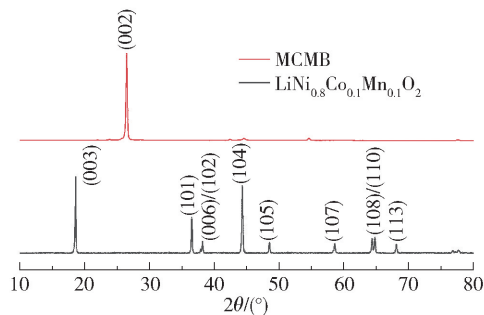


图 1 MCMB 和 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 的 XRD 谱图

Fig. 1 XRD patterns of MCMB and $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$

2.2 电极材料的微观结构

采用 SEM 观察 MCMB 和 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 的微观形貌, 结果如图 2 所示。可以看出, 两者均为球形形貌, 其中 MCMB 颗粒大小为 $5 \sim 20\text{ }\mu\text{m}$, $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 颗粒大小为 $8 \sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 。

2.3 电压区间对材料电化学性能的影响

分别以 MCMB 和 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 为工作电极、金属锂片为参比和对电极组装成纽扣半电池, 评价 MCMB 和 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 的电化学性能。图 3(a) 和 3(b) 分别为 MCMB 和 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 半电池在 1 C 电流密度下的循环性能。MCMB 首次放、充电容量分别为 $428.5\text{ mA}\cdot\text{h}/\text{g}$ 和 $365.5\text{ mA}\cdot\text{h}/\text{g}$, 首次充

放电效率 85.3%。 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 在 1C 下的可逆容量为 $159.6\text{ mA}\cdot\text{h}/\text{g}$ 。MCMB 和 NCM811 均具有良好的循环稳定性,循环 50 次容量未见明显衰减。

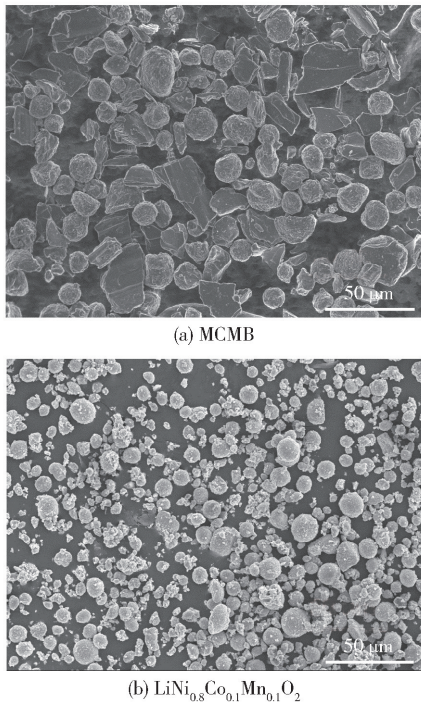


图 2 MCMB 和 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 的 SEM 图
Fig. 2 SEM images of MCMB and $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$

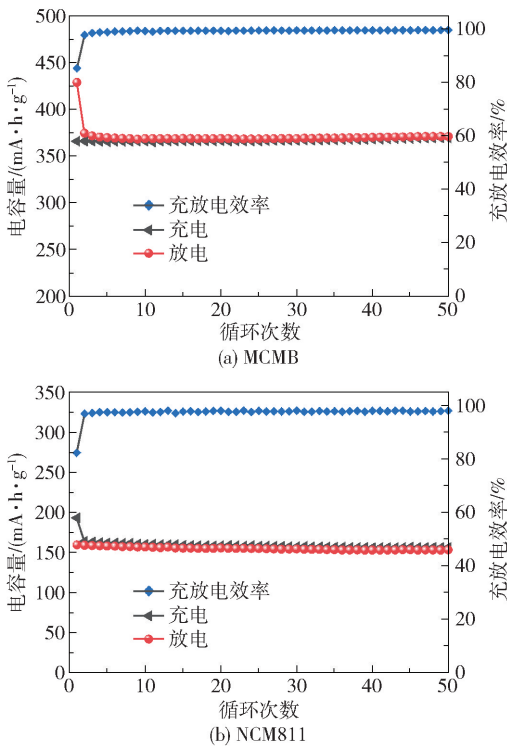


图 3 半电池在 1C 下的循环性能
Fig. 3 Cycle performance of half cells at 1C

图 4 为 MCMB 和 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 在 1C 电流密度下前 10 周的充放电曲线(为了对比将其可逆容量统一归一至 $1\text{ mA}\cdot\text{h}$),可以发现 MCMB 具有稳定的平台电压(约 0.1 V);而在 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 的充放电曲线中可以发现材料的容量与其电压上限具有一定的关联。NCM811/MCMB 全电池的平台电压可以达到 3.6 V 左右,这在一定程度上保证了该体系的高能量密度。

对该体系全电池进行循环伏安曲线测试(图 5),可以看出氧化、还原峰分别在 3.7 V 和 3.5 V ,进一步验证了该体系全电池的高电压特性。

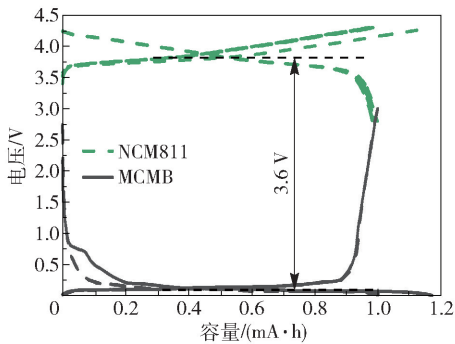


图 4 NCM811 与 MCMB 半电池在 1C 下前 10 圈充放电曲线
Fig. 4 Charge/discharge curves of MCMB and NCM811 for the first ten cycles at 1C

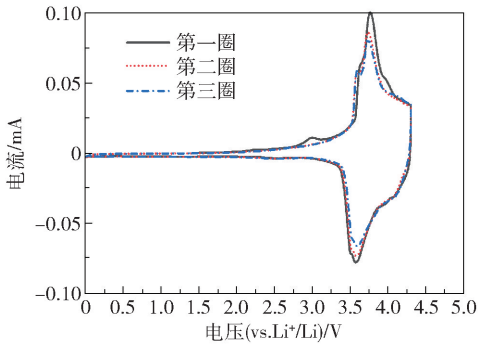


图 5 NCM811-MCMB 全电池在 $0\sim4.3\text{ V}$ 范围内 $0.1\text{ mV}/\text{s}$ 扫描速率下的 CV 曲线
Fig. 5 CV curves of the NCM811-MCMB full cell at a scan rate of $0.1\text{ mV}/\text{s}$ in the voltage range of $0\sim4.3\text{ V}$

为研究充放电电压区间对 NCM811/MCMB 全电池性能的影响(全电池的比容量基于正极材料的活性物质质量计算),分别设置充放电电压区间为 $2.0\sim4.3\text{ V}$ 、 $2.4\sim4.3\text{ V}$ 、 $2.8\sim4.3\text{ V}$ 和 $3.2\sim4.3\text{ V}$,测试全电池在不同电压区间下的循环性能如图 6 所示。各个电压区间下的全电池均经 0.25C 电流密度激活后再进行 1C 电流密度下的循环性能测试。不同电压区间的全电池性能数据列于表 1,可以看

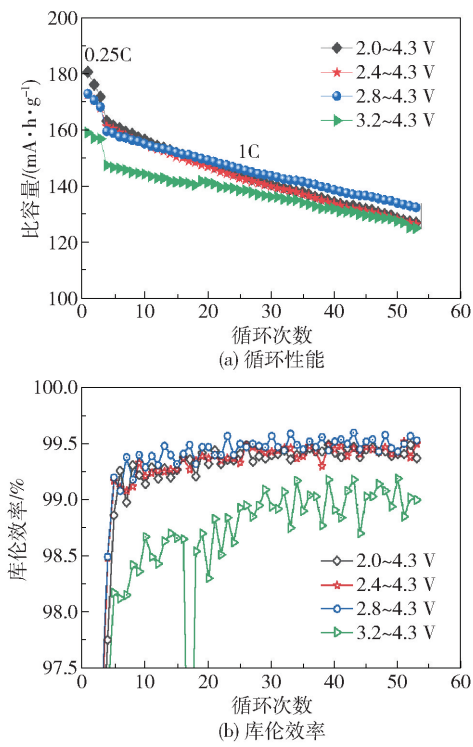


图6 NCM811-MCMB 全电池在不同电压区间下的循环性能和库伦效率

Fig. 6 Cycle performance and Coulombic efficiency of NCM811-MCMB full-cell in various voltage ranges

表1 NCM811/MCMB 全电池在不同电压区间下的电化学性能

Table 1 Electrochemical performance of NCM811/MCMB full-cell in various voltage ranges				
电压 区间/ V	1C 下首次放 电比容量/ (mA·h·g ⁻¹)	1C 下 50 次 放电比容量/ (mA·h·g ⁻¹)	50 次循环后 的容量保 持率/%	平均库伦 效率/%
2.0 ~ 4.3	163.1	126.8	77.7	99.32
2.4 ~ 4.3	161.2	126.2	78.3	99.35
2.8 ~ 4.3	159.5	132.3	82.9	99.43
3.2 ~ 4.3	147.3	124.9	84.8	98.70

出经小电流激活后的 NCM811/MCMB 全电池在 2.0~4.3 V 的充放电电压范围下具有最高的首次放电比容量(163.1 mA·h/g)。随放电截止电压升高,首次放电比容量降低,在 3.2~4.3 V 的电压区间下全电池的容量只有 147.3 mA·h/g,这说明充放电电压区间确实对 NCM811/MCMB 全电池体系存在影响。在 2.0~4.3 V、2.4~4.3 V、2.8~4.3 V 和 3.2~4.3 V 4 个电压区间下,NCM811/MCMB 全电池经 50 次循环后的容量保持率分别为 77.7%、78.3%、82.9% 和 84.8%,说明电压区间的减小(提高放电截

止电压)有利于容量保持率的提高。然而对比 4 个电压区间下的库伦效率(图 6(b))可以发现,过小的电压区间下全电池的库伦效率相对较低,3.2~4.3 V 电压区间下库伦效率只有 98.70%,而其他 3 个电压区间下的库伦效率均大于 99%。综合以上结果,可见在 2.8~4.3 V 电压区间下 NCM811/MCMB 全电池不但有高的容量,同时还具有良好的循环性能。

为了进一步了解全电池的电化学行为,图 7 给出了全电池在充放电电压区间 2.0~4.3 V、2.4~4.3 V、2.8~4.3 V 和 3.2~4.3 V 下的充放电曲线。从图中可知,在 4 个充放电电压区间内,全电池具有相似的电化学行为,但比容量有差别。

对首次充放电过程中不同荷电状态下的全电池进行了 EIS 测试,结果如图 8 所示。选取充电至 3.8 V、4.3 V 和放电至 2.8 V 作为首次充放电过程中的不同荷电状态。从图 8 可以看出,不同荷电状态的 EIS 谱图均由两个半圆和 1 条直线组成,谱图中的左边第一个半圆代表锂离子通过固体电解质界面膜的阻抗(R_{SEI}),后一个半圆代表电荷转移阻抗(R_{ct}),直线代表离子在固相中的扩散速率(Z_w)。根据插图中的等效电路图,得到的 R_{SEI} 和 R_{ct} 值如表 2 所示。全电池在 3 种不同荷电状态下的 R_{SEI} 分别为 8.2 Ω 、9 Ω 和 8.8 Ω 。在首次充电过程中,随着反应的进行, R_{SEI} 增大,说明在首次充电过程中 SEI 膜的形成是持续的;首次放电过程中,SEI 膜的阻抗变化不大。对比 3 种不同荷电状态的 R_{ct} 值可知,首次充放电完成后,电荷转移阻抗最大,为 232.3 Ω ,说明荷电状态对电荷转移阻抗有很大的影响。

图 9 为相同荷电状态(放电至 2.8 V)下不同循环周数的全电池 EIS 谱图。可以看出其均由两个半圆和 1 条直线组成。根据插图中的等效电路图,得到的 R_{SEI} 和 R_{ct} 值如表 3 所示。由表 3 可知,循环 3 周后的 R_{SEI} 和 R_{ct} 值分别为 12.6 Ω 和 210.1 Ω ;循环 10 周后的 R_{SEI} 和 R_{ct} 分别为 13.8 Ω 和 216.3 Ω ,说明随着循环次数的增加,SEI 膜持续加厚,电化学阻抗逐渐增大。

分析全电池容量和循环性能随充放电电压区间变化的原因为,电压区间的变化主要影响着锂离子的嵌脱数量,对于层状结构的 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 而言,锂离子的脱嵌数量与其充放电电压有较大的关联,随着电压区间的增大(放电截止电压的降低),层状结构中锂离子脱出数量增多(图 10(a)),在电化学中表现出更高的容量。然而随着锂离子深度脱

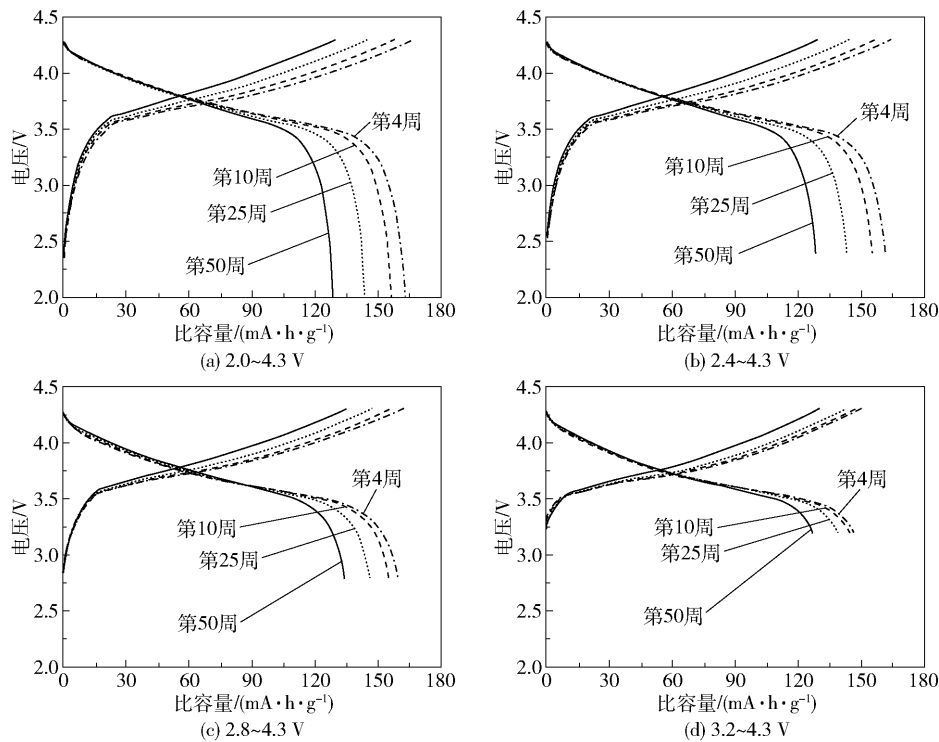


图 7 全电池在不同电压区间下的充放电曲线

Fig. 7 Charge-discharge curves of the full-cell for different voltage ranges

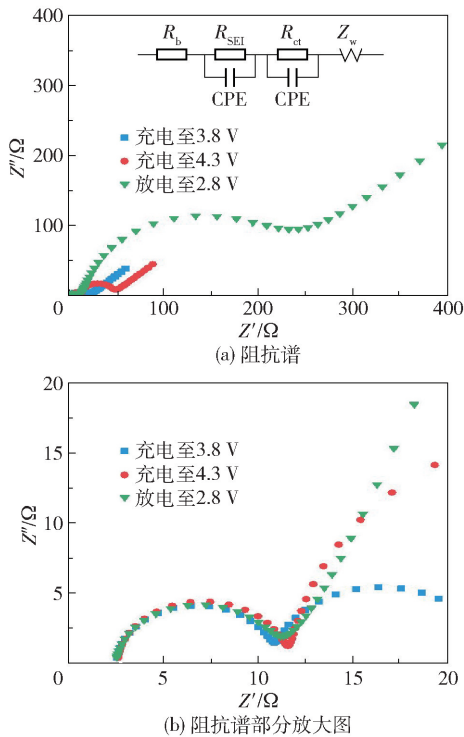


图 8 首次充放电过程中不同荷电状态的 EIS 谱图
Fig. 8 EIS of different charge states during the first charge and discharge process

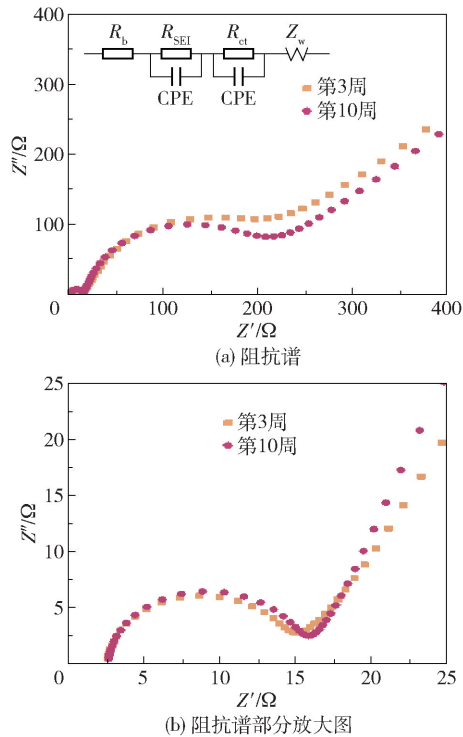


图 9 相同荷电状态(放电至 2.8 V),不同循环次数下的 EIS 谱图
Fig. 9 EIS of the same charge state (discharge to 2.8 V) for different cycles

表2 根据等效电路模拟得到的阻抗值
Table 2 Fitted parameters of the EIS based on the equivalent circuit

状态	R_{SEI}/Ω	R_{ct}/Ω
充电至 3.8 V	8.2	11.73
充电至 4.3 V	9	37.3
放电至 2.8 V	8.8	232.3

表3 等效电路模拟得到的阻抗值
Table 3 Fitted parameters of the EIS based on the equivalent circuit

状态	R_{SEI}/Ω	R_{ct}/Ω
循环 3 周	12.6	210.1
循环 10 周	13.8	216.3

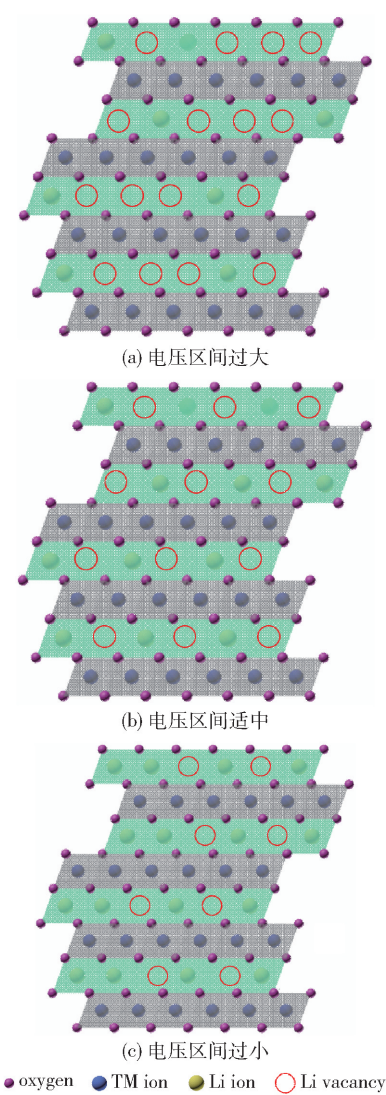


图10 不同充放电区间 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 材料脱锂状态下的结构模型
Fig. 10 Structural model of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ for different voltage ranges during lithium extraction

嵌的反复进行,则导致层状结构破坏较为显著,致使其循环性能变差^[10];而在过小的电压区间下锂离子脱嵌数量不足(图 10(c)),则表现出较低的比容量;在适中的电压区间下层状结构中脱嵌的锂离子不但对结构破坏小,同时还能表现出较高的容量。

3 结论

本文以 $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ 和 MCMB 分别为正极和负极组装了 NCM811/MCMB 锂离子全电池,研究了充放电电压区间对于 NCM811/MCMB 全电池性能的影响,结果表明扩大充放电电压区间能够提高全电池的容量,而适当的缩小充放电电压区间则能提升全电池的循环稳定性。在本文的实验条件下,2.8~4.3 V 的充放电电压区间可使全电池兼有较高的容量、较好的循环稳定性和高的库伦效率。

参考文献:

[1] ETACHERI V, MAROM R, ELAZARI R, et al. Challenges in the development of advanced Li-ion batteries: a review[J]. Energy & Environmental Science, 2011, 4 (9): 3243-3262.

[2] 刘亚飞, 陈彦彬. 锂离子电池正极材料标准解读[J]. 储能科学与技术, 2018, 7(2): 314-326.

LIU Y F, CHEN Y B. Interpretation of cathode material standards for lithium ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2018, 7(2): 314-326. (in Chinese)

[3] 安富强, 赵洪量, 程志, 等. 纯电动车用锂离子电池发展现状与研究进展[J]. 工程科学学报, 2019, 41 (1): 22-42.

AN F Q, ZHAO H L, CHENG Z, et al. Development status and research progress of power battery for pure electric vehicles[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(1): 22-42. (in Chinese)

[4] BJÖRKLUND E, BRANDELL D, HÄHLIN M, et al. How the negative electrode influences interfacial and electrochemical properties of $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ cathodes in Li-ion batteries[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2017, 164(13): A3054-A3059.

[5] AN S J, LI J, MOHANTY D, et al. Correlation of electrolyte volume and electrochemical performance in lithium-ion pouch cells with graphite anodes and NMC532 cathodes[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2017, 164(6): A1195-A1202.

[6] YOO H D, MARKEVICH E, SALITRA G, et al. On the

- challenge of developing advanced technologies for electrochemical energy storage and conversion [J]. *Materials Today*, 2014, 17(3): 110–121.
- [7] 徐东, 钱国强. 涂碳铝箔材料正极配比对锂电池循环性能影响[J]. *电源技术*, 2018, 42(4): 504–505.
- XU D, QIAN G Q. Effect of cathode ratio of carbon coated aluminum foil material on cycle performance of lithium ion batteries [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2018, 42(4): 504–505. (in Chinese)
- [8] 刘斌斌, 杜晓钟, 闫时建, 等. 制片工艺对动力锂离子电池性能的影响[J]. *电源技术*, 2018, 42(6): 788–791.
- LIU B B, DU X Z, YAN S J, et al. Effect of electrode preparation technology on the performance of power lithium ion batteries [J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2018, 42(6): 788–791. (in Chinese)
- [9] YAO J, WANG G X, AHN J, et al. Electrochemical studies of graphitized mesocarbon microbeads as an anode in lithium-ion cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2003, 114(2): 292–297.
- [10] LIU W, OH P, LIU X, et al. Nickel-rich layered lithium transition-metal oxide for high-energy lithium-ion batteries [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2015, 54(15): 4440–4457.

Effect of the voltage range on the electrochemical performance of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2/\text{MCMB}$ full cells

SHEN JinRan¹ ZHOU ShuQin¹ ZHAO JiaShun² GUAN YiBiao^{3*}

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192;

2. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

3. State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems,

China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: NCM811/MCMB lithium ion batteries have been constructed using $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ (NCM811) and mesocarbon microbeads (MCMB) as cathode and anode, respectively. The effects of varying the voltage range on the electrochemical performance of NCM811/MCMB cells were investigated. The results indicate lower discharge cut-off voltages can increase the capacity of the full cell when fixing the cut-off voltage of charging at 4.3 V, while higher cut-off discharge voltages can improve the cycle durability of the cells. In the voltage range 2.8–4.3 V, the NCM811/MCMB full cell not only has high capacity, but also good cycling performance and charge–discharge reversibility.

Key words: ternary cathode; mesocarbon microbeads; full cell; voltage range; electrochemical performance