

甲基三甲氧基硅烷对 Li/NCM811 电池性能提升的影响

李婧,徐航,吕佳琦,纪敏*
(大连理工大学化学学院,辽宁大连 116024)

摘要:LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂(NCM811)是一种高镍锂电池的正极材料,比容量高,但在应用中存在阳离子混排、表面结构不稳定等问题。采用金属锂片为负极,1 mol/L LiPF₆-EC:DEC(体积比为 1:1)为电解液,研究了甲基三甲氧基硅烷(MTMS)作电解液添加剂对 Li/NCM811 电池电化学性能及正极表面性质的影响。研究发现,在电解液中加入质量分数 4%的 MTMS,0.5 C 的电流下充放电循环 100 圈后,电池容量保持率增加 131.95%。电化学测试及反应前后电极表面性质表征结果表明,MTMS 添加剂有助于 NCM811 表面形成稳定致密的 CEI 膜,抑制电解液分解,有效保护了活性位点的化学稳定性,抑制了电极材料不可逆相变的进行。

关键词:锂电池;电解液添加剂;LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂;甲基三甲氧基硅烷;电化学性能

中图分类号:TQ150

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2024)S2-0330-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S2.058

Impact of methyltrimethoxysilane addition on electrochemical performance improvement of Li/NCM811 battery

LI Jing, XU Hang, LV Jia-qi, JI Min*

(School of Chemistry, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract:LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂(NCM811) is a cathode material with a high specific capacity for high nickel lithium battery, but exists a few problems in the application, such as cationic mixing and surface structure instability. The impact of methyl trimethoxy-silane (MTMS) as an electrolyte additive on the electrochemical performance and cathode surface properties of Li/NCM811 battery are examined through using a lithium metal sheet as negative electrode and 1M LiPF₆-EC:DEC (1:1) as electrolyte. It is found through study that the capacity retention rate of battery increases by 131.95% after adding 4 wt.% MTMS into the electrolyte, and charging and discharging 100 cycles at 0.5 C current. It is verified through electrochemical testing, and the characterization of electrode surface properties before and after the reaction that MTMS additive agent is beneficial to form the stable and dense CEI film on the surface of NCM811 and can inhibit the decomposition of the electrolyte, which protects the chemical stability of the active sites and inhibits the irreversible phase transition of electrode material.

Key words:lithium battery; electrolyte additive agent; LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂; methyltrimethoxysilane; electrochemical performance

可充电锂电池包括锂离子电池和锂金属电池,由于高比能量、工作温度范围宽等优点而成为应用范围越来越多元化的产品。锂离子电池常用于消费电子,例如手机、笔记本、计算机和数码相机、电动工具、电动自行车和摩托车、电动汽车以及军事装备等。锂金属电池常用于高空无人机等动力装置,为电子设备、存储介质和其他备用电源提供动力等。

对于锂电池,三元材料(LiNi_xCo_yMn_zO₂, NCM)由于具有循环性能良好、比容量高、安全性高、成本低等优势被认为是最有前景的正极材料。LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O₂(NCM811)具有岩盐型结构,Ni 含量高,因此比容量高、能量密度大、成本低。但在实际应用中,NCM811 存在阳离子混排和表面结构不稳

定的问题。由于 Li⁺ 和 Ni²⁺ 离子半径相近,在脱锂时, Ni²⁺ 容易迁移到 Li 空位上,使材料结构发生不可逆相变,层状结构会逐渐向尖晶石结构或惰性岩盐结构转变,而且随着充电过程进行,电极材料表面会出现过度脱锂现象,造成电池极化作用增强、容量快速衰减、降低电池循环性能。此外,目前最常用的电解质六氟磷酸锂(LiPF₆)对水敏感,能够水解并产生 HF 和 PF₅,加速电极材料过渡金属离子溶解,进一步造成电池容量衰减^[1-5]。

解决上述问题的有效方法之一是在电解液体系中加入少量添加剂,包括锂盐添加剂、含氟类添加剂、酸酐类添加剂、硅烷类添加剂等,该方法简单有效、可调性大、成本低、易于产业化。其中,硅烷类添

收稿日期:2024-03-08;修回日期:2024-08-11

作者简介:李婧(1998-),女,硕士生,研究方向为锂电池电解液添加剂,13662083189@163.com;纪敏(1968-),女,博士,教授,研究方向为新型固体酸催化材料的设计合成及其基础与应用,通讯联系人,jimin@dlut.edu.cn。

加剂不易燃、毒性低、对环境友好,可以优先于电解液中其他组分氧化,在电极材料表面形成 CEI 膜,从而抑制材料相变和电解质的水解,受到广泛关注^[6]。Wang 等^[7]针对 NCM622 正极材料,在电解液中加入质量分数 0.5% 的异氰酸丙基三乙氧基硅烷 (IPTS) 作添加剂,发现 Li/NCM622 电池充放电循环 150 圈以后,与空白电池相比,容量保持率从 55.4% 提高到 73.1%,经过表征后在电极表面发现了 Si—O 键和 Si—F 键的存在,推测是由于 IPTS 与电解液中的微量水反应生成了 $(\text{Si—O—Si})_n$ 聚合物,而且与电解质的分解产物 PF_5 反应后产生 Si—F 键,有利于在电极表面形成均匀致密的 CEI 膜,并且可以抑制电解质分解。

本文中针对 Li/NCM811 电池,在电解液中加入甲基三甲氧基硅烷 (MTMS),研究了其对 NCM811 表面结构及性质的影响。研究发现,MTMS 有助于 NCM811 表面形成稳定致密的 CEI 膜,对电极起到保护作用,有效抑制电解质的水解,显著提升电池的 electrochemical 性能。

1 材料与设备

1.1 材料试剂

商用 NCM811 正极,锂片,Celgard2400 隔膜,商用基础电解液 [1 mol/L LiPF_6 作电解质、碳酸乙烯酯 (EC) 和碳酸二乙酯 (DEC) 体积比为 1:1], 广东烛光新能源科技有限公司生产;甲基三甲氧基硅烷 (MTMS),上海阿拉丁生化科技股份有限公司生产。

1.2 仪器设备

CHI660E 电化学工作站,上海辰华仪器有限公司生产;蓝电,武汉市蓝电电子股份有限公司生产;SU5000 场发射扫描电镜,日立 HITACHI 生产;X 射线衍射仪,布鲁克 (北京) 科技有限公司生产;X 射线光电子谱仪,赛默飞世尔公司生产。

2 实验方法

2.1 电解液的配制

实验中电解液为商用基础电解液 [1 mol/L LiPF_6 作电解质、碳酸乙烯酯 (EC) 和碳酸二乙酯 (DEC) 体积比为 1:1], 添加剂为质量分数 98% 的 MTMS,将不同质量分数 (0%、2%、4%、6%) 的 MTMS 加入基础电解液中配制成不同的电解液体系,静置 12 h 后用于电池的组装。电解液的配制在氩气氛围的手套箱中进行,手套箱水氧含量均小于 0.5 mg/L。

2.2 电池的组装

以商用 NCM811 为正极,锂片为负极,采用 Celgard 2400 隔膜以及 30 μL 电解液在手套箱中进行 CR2032 型号纽扣电池的组装,静置 6 h 后进行 electrochemical 性能的测试。

2.3 电化学性能测试

线性扫描伏安测试 (LSV) 和循环伏安测试 (CV) 在 CHI660E 电化学工作站上进行,扫描电压范围为 3.0~4.5 V,扫描速率为 0.05 mV/s。

电化学阻抗测试 (EIS) 同样在 CHI660E 电化学工作站上进行,频率范围为 0.01 Hz~100 kHz,振幅为 5 mV。

循环性能采用蓝电进行测试,首先以 0.1 C (1 C=2.27 mA) 的电流在 3.0~4.3 V 的电压范围内循环 3 圈化成,随后以 0.5 C 的电流充放电循环 100 圈进行测试。

倍率性能同样采用蓝电进行测试,以 0.1、0.3、0.5、1、3 C 的电流各充放电循环 5 圈进行测试。

2.4 电极材料表征

对新鲜正极片以及循环前后的正极片进行表征。将循环前后的电池在手套箱中进行拆解并取出正极片,采用碳酸二甲酯 (DMC) 浸泡正极片 4 h,之后倒掉 DMC,将正极片静置于手套箱中自然晾干后取出进行表征。

扫描电镜 (SEM) 采用的是日立 HITACHI 生产的 SU5000 场发射扫描电镜,对未经循环的新鲜 NCM811、不含添加剂循环后以及含质量分数 4% MTMS 添加剂循环后的 NCM811 进行不同放大倍数的表征来观察电极材料的形貌变化。

X 射线衍射 (XRD) 采用的是布鲁克 (北京) 科技有限公司生产的 X 射线衍射仪,型号为 D8 Advance,扫描角度 $10^\circ \sim 90^\circ$,扫描速度为 $4^\circ/\text{min}$ 。

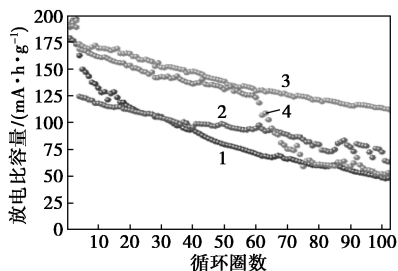
X 射线光电子谱 (XPS) 采用赛默飞世尔公司生产的仪器,型号为 ESCALAB250Xi。

3 结果与分析

3.1 电化学性能测试

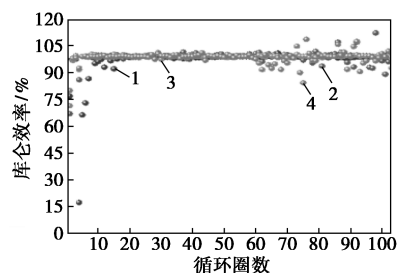
首先考察了 MTMS 质量分数 (0%、2%、4% 和 6%) 对 Li/NCM811 电池循环性能的影响。在测试过程中,首先电池以 0.1 C 的电流在 3.0~4.3 V 的电压范围内循环 3 圈以保证电解液和添加剂在电极材料表面充分反应,随后再以 0.5 C 的电流进行充放电循环 100 圈。结果如图 1(a)、1(b) 所示。与不添加 MTMS 相比,MTMS 质量分数为 2%、4%、6% 时,电池

的容量保持率均有所提高,分别增加了 52.63%、131.95%、6.78%,其中质量分数为 4% 时效果最佳,电池的库伦效率较高且波动较小,可能与电极表面形成了相对稳定的 CEI 膜有关。当添加剂含量较低时,在电极表面可能不足以形成稳定的 CEI 膜,在循环过程中难以抑制材料相变和电解液分解,而含量较高时,形成的 CEI 膜可能太厚,阻碍 Li^+ 的传导,影响电池电化学性能的提升^[8-10]。图 1(c)、1(d) 分别为 MTMS 质量分数为 0、4% 时充放电循环第 1、50、100 圈时的充放电曲线。对比研究可以发现,电解液中加入质量分数 4% MTMS 时,随着循环次数的增加,曲线偏移初始状态的程度较小,充放电平台保持得更好,变化速度更慢,说明电池极化程度较小,这可能是由于加入质量分数 4% MTMS 作添加剂后形成了 CEI 膜能够保护 NCM811,抑制材料相变和电解液的分解。相应的容量电压微分曲线如图 1(e)、1(f) 所示。放电过程中,电解液不含添加剂时,相变峰向低电压方向偏移,说明放电电压平台的



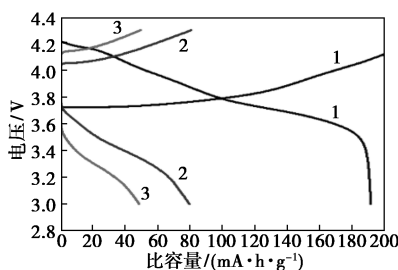
1—无 MTMS;2—2% MTMS;3—4% MTMS;4—6% MTMS

(a) 不同量 MTMS 的 Li/NCM811 电池的放电比容量



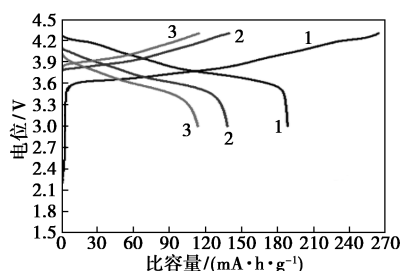
1—无 MTMS;2—2% MTMS;3—4% MTMS;4—6% MTMS

(b) 不同量 MTMS 的 Li/NCM811 电池的库伦效率



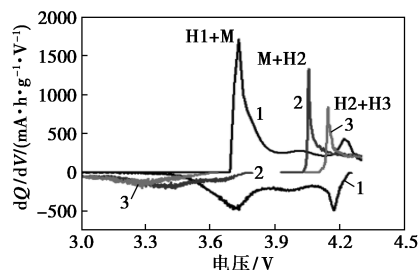
1—1 st;2—50 th;3—100 th

(c) 不含 MTMS 的 Li/NCM811 电池的充放电曲线



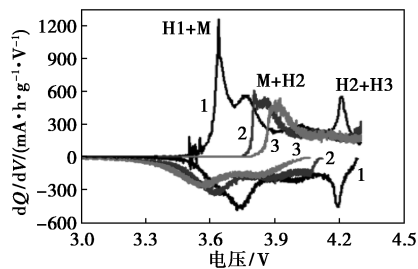
1—1 st;2—50 th;3—100 th

(d) 含质量分数 4% MTMS 的 Li/NCM811 电池的充放电曲线



1—1 st;2—50 th;3—100 th

(e) 不含 MTMS 的 Li/NCM811 电池的 dQ/dV 曲线



1—1 st;2—50 th;3—100 th

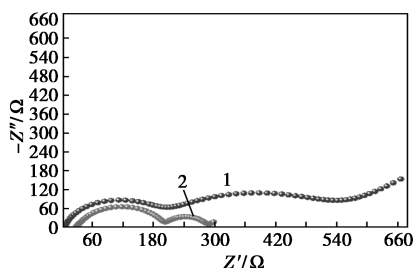
(f) 含质量分数 4% MTMS 的 Li/NCM811 电池的 dQ/dV 曲线

图 1 不同量 MTMS 的 Li/NCM811 电池的
电化学性能

衰减是由于材料本身阻抗增加导致极化增加以及材料晶体结构的变化,也说明电极材料的反应活性位点丢失现象严重,而且极化迅速增大。加入 MTMS 后的电池,这些现象有所改善,说明 CEI 膜有效抑制了电极材料的不可逆相变,保护了活性位点,减小了极化^[6-9]。

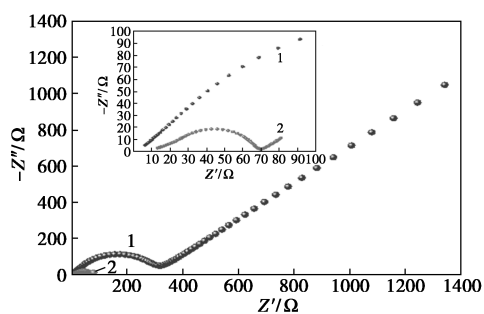
循环前后,电池不含 MTMS 和含质量分数 4% MTMS 的阻抗测试结果如图 2(a)、2(b) 所示。不含添加剂的电池,在循环前,开路电压下测试得到了膜电阻(179.2 Ω),对应的是电池内部自发形成的 CEI 膜的电阻,加入添加剂后膜电阻(258.2 Ω)增大可能是因为形成了致密的 CEI 膜。循环后,空白电池膜电阻为 175.3 Ω ,而加入 MTMS 的电池的膜电阻降低为 29.7 Ω 。表明形成的 CEI 膜稳定,因此加入添加剂后电池的循环性能有所提升^[11-13]。倍率测试结果如图 2(c) 所示,加入添加剂后,电池的倍率

性能提升,可能是因为加入 MTMS 后生成的 CEI 膜有利于抑制电池的阻抗增加。图 2(d) 所示为线性扫描测试结果。3.0~4.5 V 电压范围内,加入质量分数 4% MTMS 后,电解液从 3.6 V 开始氧化分解,而不含添加剂时从 3.7 V 开始分解,说明 MTMS 的氧化电位低于电解液溶剂,先一步发生氧化分解从而有利于形成 CEI 膜,保护 NCM811。图 2(e)、2(f) 所示为循环前后 2 种电池的 CV 测试结果,其中的氧化还原峰代表 NCM811 材料在循环过程中发



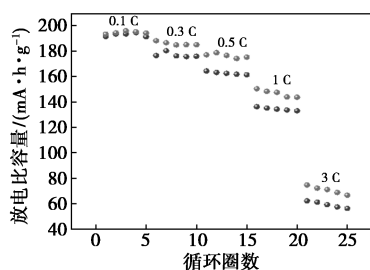
1—循环前;2—循环后

(a) 不含 MTMS 的 Li/NCM811 电池的 Nyquist 图



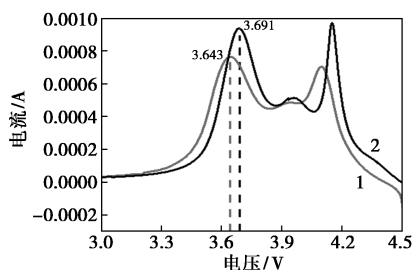
1—循环前;2—循环后

(b) 含质量分数 4% MTMS 的 Li/NCM811 电池的 Nyquist 图



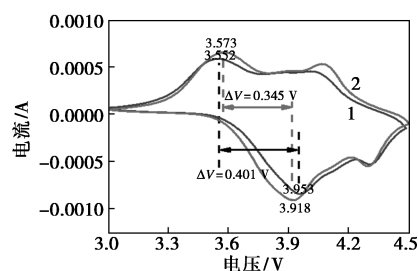
1—无 MTMS;2—4% MTMS

(c) MTMS 质量分数为 0、4% 时 Li/NCM811 电池的倍率测试



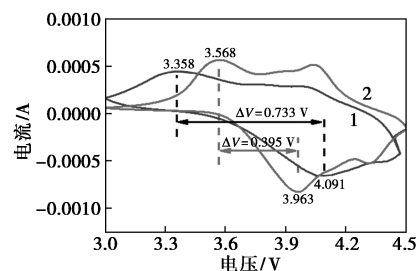
1—无 MTMS;2—4% MTMS

(d) MTMS 质量分数为 0、4% 时 Li/NCM811 电池的 LSV 曲线



1—无 MTMS;2—4% MTMS

(e) Li/NCM811 电池循环前的 CV 曲线



1—无 MTMS;2—4% MTMS

(f) Li/NCM811 电池循环后的 CV 曲线

图 2 MTMS 质量分数为 0、4% 时的 Li/NCM811 电池的电化学性能

生的相变。可以看出,100 圈循环后,不含添加剂的电池的峰形发生明显变化,而含有质量分数 4% MTMS 的电池的峰形几乎不变,表明 MTMS 加入后抑制了材料相变的发生。此外,无论循环前后,加入质量分数 4% MTMS 后的电池的氧化峰与还原峰之间的电势差更小,说明 MTMS 的加入可以有效降低电池的极化^[14-17]。

3.2 电极表面及体相性质表征

为了研究 MTMS 对 NCM811 电极稳定作用机制,对未经循环的新鲜 NCM811、不含添加剂循环后以及含质量分数 4% MTMS 添加剂循环后的 NCM811 进行了扫描电镜的表征,结果如图 3 所示。从图 3(a)、3(b) 可以看出,新鲜的 NCM811 材料呈现球形团聚体,这与制备 NCM 材料时采用的前驱体有关,由共沉淀法得到的前驱体形成球形团聚体,使表面粗糙化,而球形与粗糙表面会在 NCM 上保留下来^[8,11,16]。在 0.5 C 的电流循环 100 圈后,从图 3(c)、3(d) 可以看出,不含添加剂的电池的 NCM811 出现明显的裂纹,球形结构不再完整,这是由 H2→H3 相变过程中颗粒的各向异性引起的,锂离子提取和插入过程中,晶格会发生各向异性的膨胀和收缩,不同相的相邻颗粒会在相界面产生应力集中,在 2 个原生颗粒的晶界处产生作用力,导致沿晶界产生裂纹^[8,13-15]。而从图 3(e)、3(f) 可以看出,加入质

量分数 4% MTMS 作添加剂后,电极材料结构相对完整且覆盖有一层均匀的薄膜,减少了裂纹的产生,抑制了材料相变的发生,有利于提升电池的电化学性能,很好地验证了前述的容量电压微分曲线和循环伏安曲线的测试结果以及循环性能、阻抗等的测试结果。

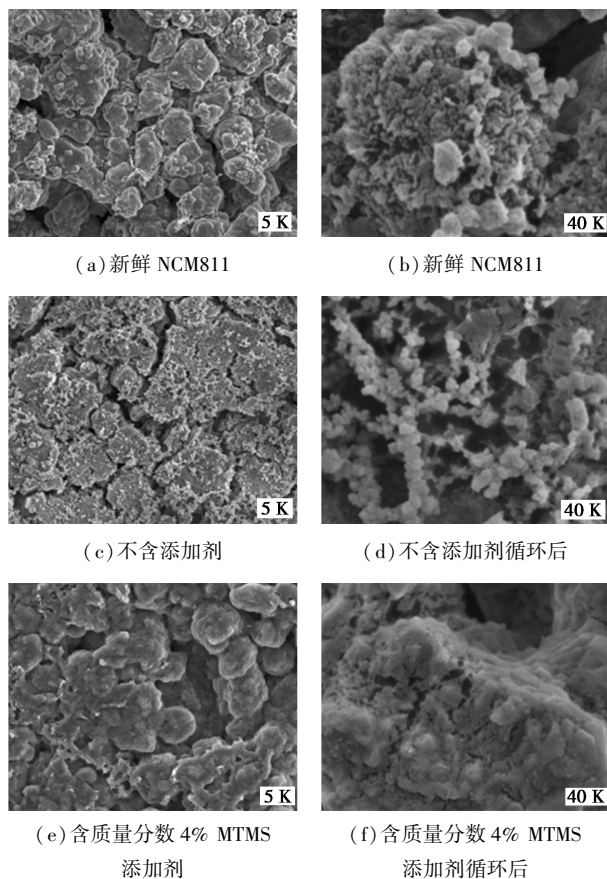
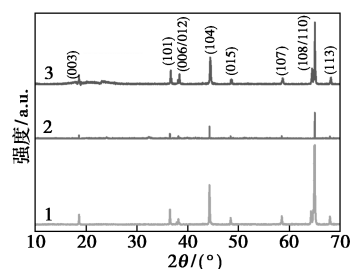


图 3 充放电循环后 NCM811 电极 SEM 图

对新鲜 NCM811、不含添加剂循环后以及含质量分数 4% MTMS 添加剂循环后的 NCM811 进行了 XRD 表征,结果如图 4、表 1 所示。可以看出,循环之后,属于层状六方结构的峰在加入 MTMS 后保持良好。新鲜的 NCM811 的晶胞参数 a 、 c 分别为 2.879、14.222 Å (1 Å=0.1 nm), c/a 为 4.941,晶胞体积为 102.07 Å³。不含添加剂时, a 值减小,说明电极材料过渡金属发生了溶解,而且 c 值增大,是由于 NCM811 中氧原子层间的静电排斥作用增强^[6,13-14]。加入质量分数 4% MTMS 后,晶格参数变化不明显,表明材料的不可逆相变和过渡金属离子溶解得到了抑制^[6],从而提升了电池的电化学性能,为解释充放电曲线、容量电压微分曲线、循环伏安曲线以及循环性能、倍率、阻抗的测试结果提供了有力证据。



1—新鲜 NCM811;2—不含添加剂;3—质量分数 4% MTMS

图 4 新鲜 NCM811、不含添加剂循环后和含质量分数 4% MTMS 添加剂循环后的 NCM811 XRD 图

表 1 新鲜 NCM811、不含添加剂循环后和含质量分数 4% MTMS 添加剂循环后的 NCM811 的晶格参数

样品	$a/\text{Å}$	$c/\text{Å}$	$V/\text{Å}^3$	c/a
新鲜	2.879	14.222	102.07	4.941
不含添加剂	2.872	14.250	101.82	4.961
质量分数 4% MTMS	2.877	14.223	101.89	4.944

图 5 为新鲜 NCM811、不含添加剂循环后以及含质量分数 4% MTMS 添加剂循环后的 NCM811 的 XPS 表征结果。如图 5(a)~5(c) 所示的 C 1s 谱图,C—C/C—H (284.8 eV)、C=O (288.7 eV) 及 C—F (290.0 eV) 来自于制作电极材料的原材料导电碳以及黏合剂 PVDF。不含添加剂循环后,出现了 C—O (286.5 eV),来自于电解液分解的产物^[8,17]。在 Li 1s 谱图[图 5(d)~5(f)]中,结合能 52.7 eV 处的峰归属于金属 Li 物种,不含添加剂时,在 54.2 eV 处的峰来自于 Li_xPO_yF_z,以及 P 2p 谱图[图 5(j)~5(l)]中,结合能 134.2 eV 左右处的峰同样来自于 Li_xPO_yF_z 中 P 物种,这均是由于电解质发生了分解所致^[9-10,18]。在图 5(g)~5(i) 所示的 F 1s 谱图,C—F (688.0 eV) 来自于黏合剂 PVDF,不含添加剂时出现了来自于 Li—F (684.4 eV) 的峰,也是由于电解质六氟磷酸锂发生了分解^[1,9,19]。加入质量分数 4% MTMS 后,上述元素能谱中不再存在来自于电解液分解产物的峰,而且在 Si 2p 能谱[图 5(m)]中出现了归属于 Si—O (103.0 eV) 键和 Si—F (103.8 eV) 键的 Si 物种的峰,表明 NCM811 表面存在含硅物质,即添加剂 MTMS 可能与电解液中的微量水发生反应生成了含有 Si—O 键的聚合物^[7,20],从而附着于电极材料表面,同时与六氟磷酸锂的分解产物 PF₅ 发生反应,降低其活性,抑制了电解质的分解^[6,14,21],从而提升了电池的电化学性能,很好地解释了其循环性能良好的测试结果。

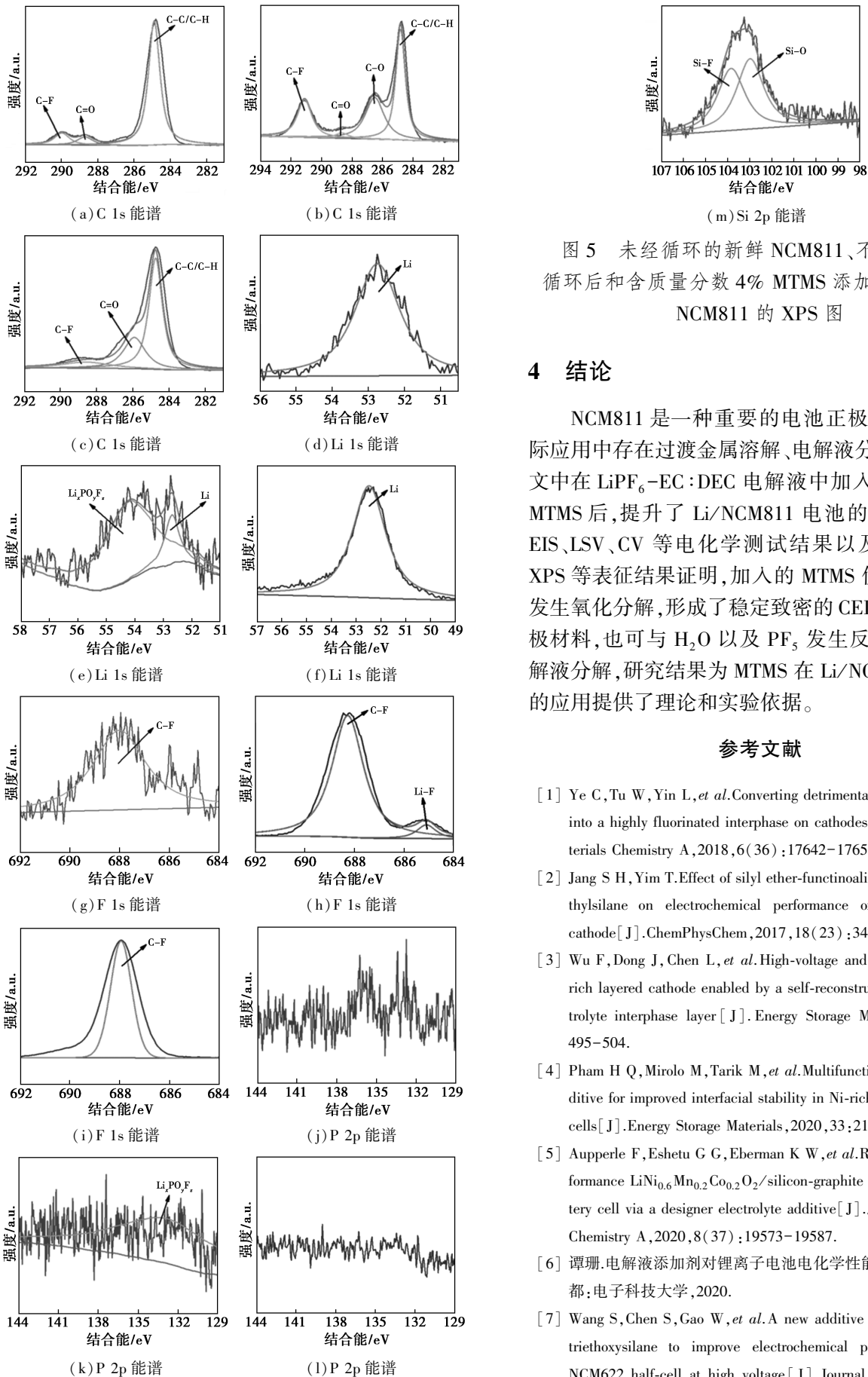


图 5 未经循环的新鲜 NCM811、不含添加剂循环后和含质量分数 4% MTMS 添加剂循环后的 NCM811 的 XPS 图

4 结论

NCM811 是一种重要的电池正极材料,但在实际应用中存在过渡金属溶解、电解液分解的问题,本文中在 $\text{LiPF}_6\text{-EC:DEC}$ 电解液中加入质量分数 4% MTMS 后,提升了 Li/NCM811 电池的电化学性能。EIS、LSV、CV 等电化学测试结果以及 SEM、XRD、XPS 等表征结果证明,加入的 MTMS 优先于电解液发生氧化分解,形成了稳定致密的 CEI 膜,保护了电极材料,也可与 H_2O 以及 PF_5 发生反应,抑制了电解液分解,研究结果为 MTMS 在 Li/NCM811 电池中的应用提供了理论和实验依据。

参考文献

- [1] Ye C, Tu W, Yin L, *et al.* Converting detrimental HF in electrolytes into a highly fluorinated interphase on cathodes [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(36): 17642–17652.
- [2] Jang S H, Yim T. Effect of silyl ether-functionalized dimethoxydimethylsilane on electrochemical performance of a Ni-rich NCM cathode [J]. *ChemPhysChem*, 2017, 18(23): 3402–3406.
- [3] Wu F, Dong J, Chen L, *et al.* High-voltage and high-safety nickel-rich layered cathode enabled by a self-reconstructive cathode/electrolyte interphase layer [J]. *Energy Storage Materials*, 2021, 41: 495–504.
- [4] Pham H Q, Mirolo M, Tarik M, *et al.* Multifunctional electrolyte additive for improved interfacial stability in Ni-rich layered oxide full-cells [J]. *Energy Storage Materials*, 2020, 33: 216–229.
- [5] Aupperle F, Eshetu G G, Eberman K W, *et al.* Realizing a high-performance $\text{LiNi}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2/\text{silicon-graphite}$ full lithium ion battery cell via a designer electrolyte additive [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(37): 19573–19587.
- [6] 谭珊. 电解液添加剂对锂离子电池电化学性能影响研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [7] Wang S, Chen S, Gao W, *et al.* A new additive 3-Isocyanatopropyltriethoxysilane to improve electrochemical performance of Li/NCM622 half-cell at high voltage [J]. *Journal of Power Sources*,

- 2019, 423: 90–97.
- [8] Shi C G, Shen C H, Peng X X, *et al.* A special enabler for boosting cyclic life and rate capability of $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$: Green and simple additive[J]. *Nano Energy*, 2019, 65: 104084.
- [9] Jiang S, Wu H, Yin J, *et al.* Benzoic anhydride as a bifunctional electrolyte additive for hydrogen fluoride capture and robust film construction over high-voltage Li-ion batteries[J]. *ChemSusChem*, 2021, 14(9): 2067–2075.
- [10] Jiang S, Xu X, Yin J, *et al.* Tailoring electrode-electrolyte interphases to enable the cycling stability of lithium metal batteries with $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ cathode[J]. *Journal of Power Sources*, 2022, 529: 231195.
- [11] Chen J, Zhang H, Wang M, *et al.* Improving the electrochemical performance of high voltage spinel cathode at elevated temperature by a novel electrolyte additive[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 303: 41–48.
- [12] Peebles C, He M, Feng Z, *et al.* Investigation of glutaric anhydride as an electrolyte additive for graphite/ $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ full cells[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2017, 164(2): A173–A179.
- [13] Lin H B, Huang W Z, Rong H B, *et al.* Improving cyclic stability and rate capability of $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ cathode via protective film and conductive polymer formed from thiophene[J]. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2015, 19(4): 1123–1132.
- [14] Dong P, Wang D, Yao Y, *et al.* Stabilizing interface layer of $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ cathode materials under high voltage using *p*-toluenesulfonyl isocyanate as film forming additive[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 344: 111–118.
- [15] Li H, Zhou P, Liu F, *et al.* Stabilizing nickel-rich layered oxide cathodes by magnesium doping for rechargeable lithium-ion batteries[J]. *Chemical Science*, 2019, 10(5): 1374–1379.
- [16] 托马斯 B. 雷迪, 戴维·林登. 电池手册[M]. 汪继强, 刘兴江, 译. 4 版. 北京: 化学工业出版社, 2013: 612–621.
- [17] Luo X, Jiang S, Yan X, *et al.* Aminoalkyldisiloxane compound as efficient high-temperature electrolyte additive for LiMn_2O_4 /graphite batteries[J]. *Ionics*, 2023, 29(1): 87–96.
- [18] Wu F, Dong J, Chen L, *et al.* High-voltage and high-safety nickel-rich layered cathode enabled by a self-reconstructive cathode/electrolyte interphase layer[J]. *Energy Storage Materials*, 2021, 41: 495–504.
- [19] Zou Y, Liu G, Zhou K, *et al.* Enhanced interfacial stability of a $\text{LiNi}_{0.9}\text{Co}_{0.05}\text{Mn}_{0.05}\text{O}_2$ cathode by a diboron additive[J]. *ACS Applied Energy Materials*, 2021, 4(10): 11051–11061.
- [20] Deng B, Wang H, Ge W, *et al.* Investigating the influence of high temperatures on the cycling stability of a $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ cathode using an innovative electrolyte additive[J]. *Electrochimica Acta*, 2017, 236: 61–71.
- [21] Qin Y, Chen Z, Lu W, *et al.* Electrolyte additive to improve performance of MCMB/ $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ Li-ion cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2010, 195(19): 6888–6892. ■

(上接第 329 页)

- [6] Sun P, Zhu Y, Yang H L, *et al.* The ligand and base-free Pd-catalyzed oxidative Heck reaction of arylboronic acids and olefins[J]. *Organic & Biomolecular Chemistry*, 2012, 10(23): 4512–4515.
- [7] Sun Z M, Zhang J, Zhao P J, *et al.* Rh(I)-catalyzed decarboxylative transformations of arenecarboxylic acids; Ligand and reagent-controlled selectivity toward hydrodecarboxylation of Heck-Mizoroki products[J]. *Organic Letters*, 2010, 12(5): 992–995.
- [8] Moro A V, Cardoso F S P, Cerreia C R D. Highly regio- and stereoselective Heck reaction of allylic esters with arenediazonium salts: Application to the synthesis of kavalactones[J]. *Organic Letters*, 2009, 11(16): 3642–3645.
- [9] Kusunuru A K, Yousuf S K, Tatina M, *et al.* Desulfative *c*-arylation of glycals by using benzenesulfonyl chlorides[J]. *European Journal of Organic Chemistry*, 2015, 2015(3): 459–462.
- [10] Li J, Liu L, Zhou Y Y, *et al.* Palladium-catalyzed heck-type arylation of acrylate with diaryliodonium salts[J]. *RSC Advances*, 2012, 2(8): 3207–3209.
- [11] Wang G W, Miao T. Palladium-catalyzed desulfative Heck-type reaction of aryl sulfinic acids with alkenes[J]. *Chemistry-A European Journal*, 2011, 17(21): 5787–5790.
- [12] Hu S, Xia P, Cheng K, *et al.* Pd-catalyzed ligand-free desulfative Heck reaction with arenedisulfinic acid salts under air[J]. *Applied Organometallic Chemistry*, 2013, 27(3): 188–190.
- [13] 张胤琳, 李超逸, 李惠静, 等. 钯催化的芳基亚磺酸钠的脱硫 Heck 偶联反应[J]. *精细化工*, 2021, 38(1): 124–129.
- [14] Jeevanandam A, Narkunan K, Ling Y C. Palladium-catalyzed tandem dimerization and cyclization of acetylenic ketones: A convenient method for 3,3'-bifurans using $\text{PdCl}_2(\text{PPh}_3)_2$ [J]. *Journal of Organic Chemistry*, 2001, 66(18): 6014–6020.
- [15] Liu G Y, Han F W, Liu C X, *et al.* A highly active catalyst system for Suzuki-Miyaura coupling of aryl chlorides[J]. *Organometallics*, 2019, 38(7): 1459–1467.
- [16] Sanjeeva K K A, Nagahawatta D P, Yang H W, *et al.* Octomycin inhibits LPS-induced chemokine and pro-inflammatory cytokine secretion from RAW 264.7 macrophages via blocking TLRs/NF- κ B signal transduction[J]. *Biomolecules*, 2020, 10(4): 511–526. ■