

三氟甲磺酸镁电解液添加剂对 高压锂离子电池的影响

尹偲硕, 吴显明*, 吴秀婷, 张梦凡, 孟雪梅

(吉首大学 化学化工学院, 湖南 吉首 416000)

摘要: 以三氟甲磺酸镁 (MFS) 作为高电压双功能电解液添加剂, 用于提高 Li/LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄ (Li/LNMO) 电池的性能。采用线性扫描伏安法 (LSV)、循环伏安法 (CV)、充放电和交流阻抗 (EIS) 进行电化学性能测试, 通过 SEM、XPS、FTIR 对含不同电解液的 Li/LNMO 电池循环前后的电极表面进行了表征。结果表明, MFS 在充放电过程中优先于电解液溶剂氧化分解, 在两个电极上形成电解液界面膜, 对电极提供保护, 抑制了电解液的分解。在 MFS 添加量 (以基础电解液质量为基准, 下同) 为 0.3% 的电解液中, Li/LNMO 电池在 1 C 倍率下循环 300 次后, 放电比容量从初始时的 135.12 mA·h/g 降至 123.86 mA·h/g, 容量保持率高达 91.67%。与电解液中未添加 MFS 的电池相比, 其循环后阻抗明显减小, 表现出较好的循环性能。

关键词: 三氟甲磺酸镁; 电解液添加剂; LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄; 锂负极; 电化学性能

中图分类号: TM912 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214 (2023) 04-0887-07

Effect of magnesium trifluoromethanesulfonate as electrolyte additive on high voltage lithium-ion battery

YIN Caishuo, WU Xianming*, WU Xiuting, ZHANG Mengfan, MENG Xuemei

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Jishou University, Jishou 416000, Hunan, China)

Abstract: Magnesium trifluoromethanesulfonate (MFS) was used as bifunctional electrolyte additive to improve the cycle performances of Li/LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄(Li/LNMO) cells. The electrochemical performance was evaluated by linear sweep voltammetry (LSV), cyclic voltammetry (CV), charge-discharge, and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The electrode surface of Li/LNMO cells containing different electrolytes before and after cycling were characterized by SEM, XPS, and FTIR. The results indicated that MFS was preferably oxidized over solvents during the charge-discharge process, which led to electrolyte interface films formed simultaneously on both electrodes, thus suppressing the decomposition of electrolytes and providing protection for the electrodes. The discharge-specific capacity of Li/LNMO cell in electrolyte containing 0.3% (based on the mass of base electrolyte, the same below) MFS decreased from 135.12 mA·h/g to 123.86 mA·h/g at 1 C rate after 300 cycles, and the capacity retention rate was as high as 91.67%. Compared with the cell in the electrolyte without MFS, the increase of charge transfer resistance was restrained, and the electrochemical properties were improved significantly.

Key words: magnesium trifluoromethanesulfonate; electrolyte additives; LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄; lithium anode; electrochemical properties

锂离子电池因能量密度高、循环寿命长、环境污染小等优点, 广泛应用于电子设备和电动汽车。但随着电动汽车、储能电站等领域对高能量密度电池的需求不断增加, 传统锂离子电池已不能满足要

求^[1-2]。然而, 具有超高能量密度的新型电池 (如锂硫电池、锂空气电池等) 无法在短期内实现大规模的商业应用^[3-5]。因此, 在现有电池系统的基础上开发高能量密度电池非常重要, 其中最简单有效的方

法是将高压正极材料与锂金属负极相匹配, 如 Li/LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄ (Li/LNMO) 电池。

虽然高压正极材料与锂负极的结合可以提高电池的能量密度, 但也存在一些严重的问题。其中最突出的是电极/电解液界面的不稳定性, 导致电解液不断氧化、锂枝晶生长、过渡金属溶解和电池极化增大, 电池性能急剧恶化^[6]。使用电解液添加剂提高电极/电解液界面的稳定性被认为是最简单和经济的方法。近年来, 开发了各种电解液添加剂, 如磺酸盐^[7]、硼酸盐^[8]、氟化物^[9]、腈^[10]等。YU 等^[11]以丁基磺酸内酯作电解液添加剂, 探讨其对 Li/LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O₂ 的影响, 丁基磺酸内酯能优先发生氧化还原反应生成负极电解液界面 (SEI) 膜, 抑制电解液分解, 防止电极材料结构崩塌, 提高了电池的电化学性能。ZHAO 等^[12]在 Li/LiNi_{0.76}Mn_{0.14}Co_{0.10}O₂ 电池体系中加入双草酸硼酸锂作为电解液添加剂, 在正负极表面形成了致密的保护层, 有效地防止了电极的腐蚀, 缓解了循环后无序岩盐相的形成, 从而提升了高能量密度电池系统的长循环寿命。

研究表明, Mg²⁺通过锂金属表面的自发化学反应还原为 Mg, 形成亲脂锂-镁合金, 抑制锂枝晶的生长^[13]。带有一SO₃基团的添加剂可作为正极成膜添加剂, 其中硫有利于提高正极电解液界面 (CEI) 层的锂离子电导率^[4]。基于此, 本研究以三氟甲磺酸镁 (MFS) 作为电解液添加剂, 通过电化学性能测试及非原位表征分析, 探讨其对 Li/LNMO 电池的影响。为高压锂离子电池电解液添加剂的研究提供参考。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

基础电解液 (Base) 为浓度 1.0 mol/L 的 LiPF₆ 溶液 [溶剂为体积比为 1:1:1 的碳酸乙烯酯 (EC)、碳酸二甲酯 (DMC) 和碳酸甲乙酯 (EMC)], 电池级, 广东烛光新能源科技有限公司; MFS, AR, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄ (LNMO), 电池级, 四川兴能新材料有限公司; *N*-甲基吡咯烷酮、乙炔黑、聚偏氟乙烯 (PVDF)、隔膜 Celgard 2400, 电池级, 山西力之源电池材料有限公司; 锂片, 电池级, 天津中能锂业有限公司。

ZKX 型真空手套箱, 米开罗那 (中国) 有限公司; CHI660E 型电化学工作站, 上海辰华仪器有限公司; CT-4000 型电池测试系统, 深圳市新威尔电子有限公司; Nicolet iS10 型傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR), 美国尼高力公司; Thermo K-Alpha X 射线光电子能谱仪 (XPS), 美国赛默飞世尔公司; MIRA4 型扫描电子显微镜 (SEM), 捷克泰思肯公

司; Avio 200 型电感耦合等离子体原子发射光谱仪 (ICP), 美国珀金埃默公司。

1.2 实验方法

1.2.1 电解液的配制

将添加量分别为 0.1%、0.3%、0.5% (以基础电解液质量为基准, 下同) 的 MFS 加入到基础电解液中制得含有 MFS 的电解液。

1.2.2 电极制备和电池组装

电极的制备: 按质量比 8:1:1 称取总质量为 1.0 g 的 LNMO、乙炔黑、PVDF 溶解在 4 mL *N*-甲基吡咯烷酮溶剂中搅拌均匀形成浆料, 将浆料均匀涂敷在铝箔上, 80 °C 干燥 4 h, 烘干后裁剪成直径为 14 mm 电极片, 称取并记录每个 LNMO 极片质量。

电池的组装: 在氩气保护的手套箱内, 以 LNMO 为正极, 锂片为负极, Celgard 2400 膜为隔膜, 采用基础电解液和含有 MFS 的电解液 (MFS 添加量分别为 0.1%、0.3%、0.5%) 分别组装成 CR2032 型扣式电池。

1.3 电化学性能测试及表征

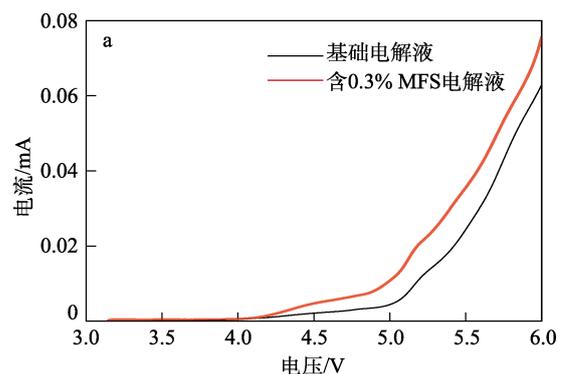
采用电化学工作站测试电池的电化学阻抗谱 (0.01~1×10⁵ Hz, 5 mV)、线性扫描伏安曲线 (扫速 1 mV/s) 和循环伏安曲线 (电压范围 3.50~4.95 V, 扫速 0.1 mV/s)。采用电池性能测试系统测试电池的充放电性能, 以 0.2 C 倍率活化 3 圈, 再以 1 C 倍率在室温下循环, 电压范围为 3.50~4.95 V。

用 SEM 和 XPS 分析电池循环前和循环 300 次后电极的形貌和表面成分。采用 ICP 测试循环后锂负极的过渡金属元素含量。

2 结果与讨论

2.1 电化学性能测试

图 1a 是以 Pt 电极为工作电极、锂片为对电极组装成 V 型电池, 对有无 MFS 添加剂的两种电解液进行线性扫描伏安曲线测试的结果。图 1b 为 Li/LNMO 电池在基础电解液与含 0.3% MFS 电解液中的循环扫描伏安曲线。



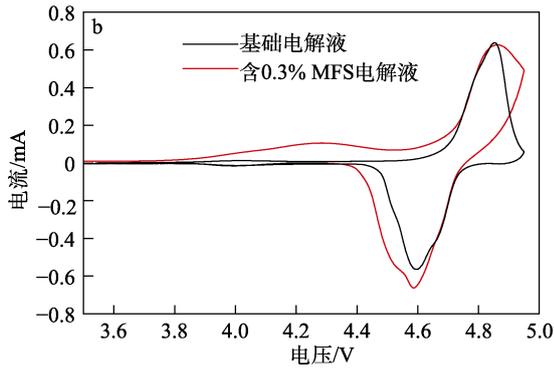


图1 基础电解液与含MFS电解液的LSV(a)和CV(b)曲线

Fig. 1 LSV (a) and CV (b) curves of base electrolyte and MFS-containing electrolyte

如图1a所示,含0.3% MFS电解液的氧化电流出现的电位低于基础电解液,说明MFS氧化活性较高,优先于溶剂分子发生氧化反应。

如图1b所示,在4.0 V左右时出现一对氧化还原峰,对应于 Mn^{4+}/Mn^{3+} 的反应。在4.5~4.9 V之间有一对氧化还原峰,对应 Ni^{3+}/Ni^{2+} 和 Ni^{4+}/Ni^{3+} 的反应。与基础电解液不同的是,在含MFS电解液中可以观察到一个4.2 V左右的额外氧化峰,对应于MFS的电化学氧化信号。

图2a为Li/LNMO电池在基础电解液和含MFS电解液中的循环性能。可以看出,基础电解液经过300次的充放电循环后电池放电比容量发生严重衰减,从初始放电比容量的132.28 mA·h/g降低至77.19 mA·h/g,容量保持率仅为58.35%。MFS添加量为0.1%的电解液可能不足以在LNMO表面形成致密的界面膜,对电池循环稳定性的提高不够理想;MFS添加量为0.5%的电解液中,电池放电比容量减小,电池能量密度降低;MFS添加量为0.3%的电解液中,电池表现出更高的循环稳定性,经过300次循环后,电池的放电比容量从135.12 mA·h/g降至123.86 mA·h/g,容量保持率为91.67%,与基础电解液相比提高33.32%。图2b为在含和不含MFS添加剂电解液中Li/LNMO电池的库仑效率,可以发现,添加MFS的电解液中电池首圈库仑效率低于基础电解液。其原因可能是添加剂MFS发生了氧化反应所致^[14]。因此,在后续实验中,以MFS添加量为0.3%作为最优条件进行研究。

Li/LMNO电池在基础电解液与含0.3% MFS电解液中不同循环圈数的充放电曲线如图2c和d所示。可以看出,随着循环次数的增加,电池在基础电解液中充电平台逐渐上升,放电平台逐渐下降。这说明基础电解液使电池在循环过程中产生了严重的极化,这可能是由于电极/电解液间界面不稳定造成的。而在含0.3% MFS电解液中电池充放电平台相

对稳定。这很可能是MFS在电极上形成的保护层有效地抑制了电解质的分解。

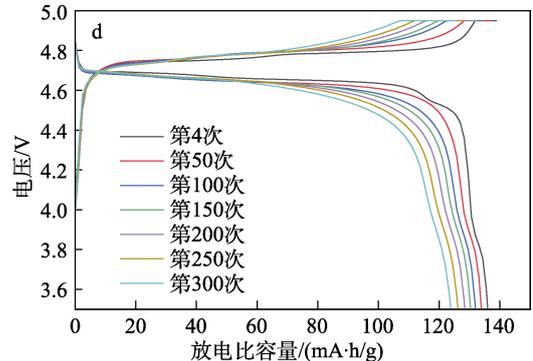
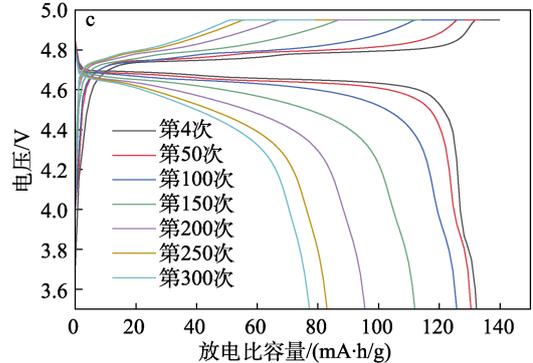
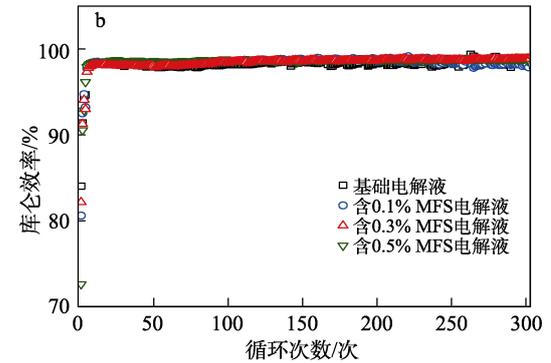
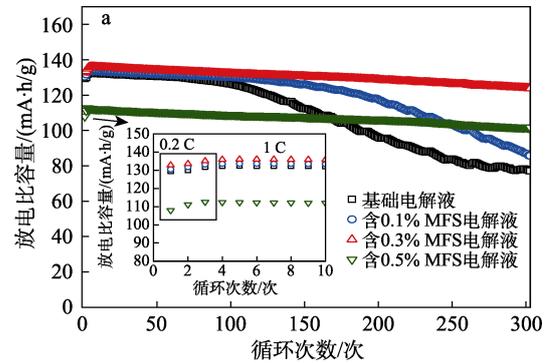


图2 在含和不含MFS添加剂电解液中Li/LNMO电池的循环性能(a)和库仑效率(b),不含(c)和含0.3% MFS(d)电解液中Li/LNMO电池充放电曲线

Fig. 2 Cyclic performances (a) and coulombic efficiencies (b) of Li/LNMO cells in electrolytes with and without MFS, charge/discharge curves of Li/LNMO cells in electrolytes without (c) and with 0.3% MFS (d)

图3a为Li/LNMO电池在基础电解液和含0.3%

MFS 电解液中循环 3 次后电压保持在 4.95 V 的计时电流响应。基础电解液中 LNMO 电极的残留电流大于含 MFS 添加剂电解液中的残留电流,证实了 MFS 能够抑制电解液的氧化分解。

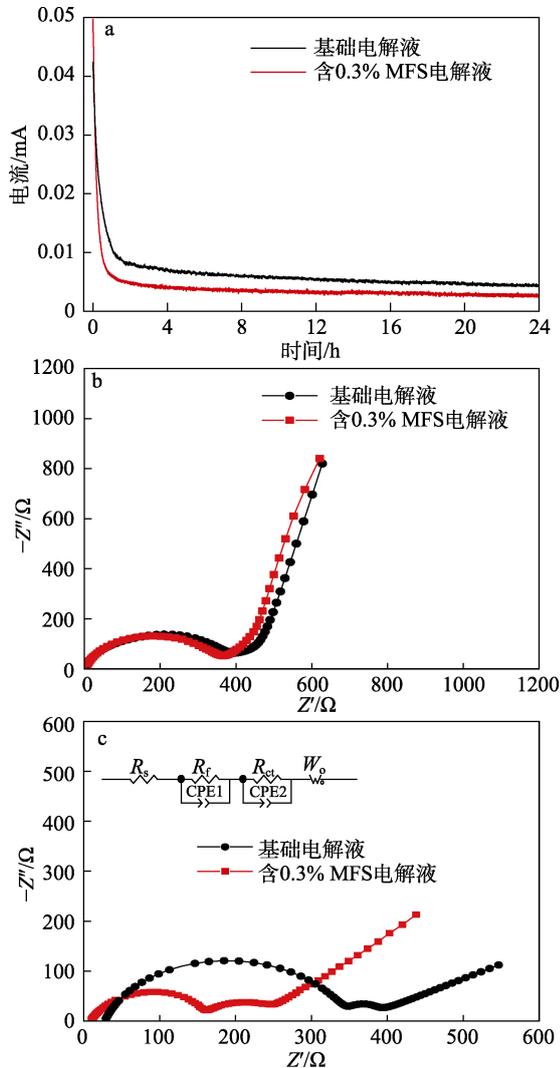


图 3 不同电解液下的计时电流响应曲线 (a), 在基础电解液和含 0.3% MFS 的电解液中循环前 (b) 和 300 次后 (c) 的电化学交流阻抗谱

Fig. 3 Chronoamperometric responses (a), electrochemical impedance spectra of Li/LNMO in base and 0.3% MFS-containing electrolytes before (b) and after 300 cycles (c)

图 3b 和 c 为 Li/LNMO 电池在基础电解液和含 0.3% MFS 电解液中循环前后的交流阻抗谱。可以看出, 所有曲线都是由高频区的半圆和低频区的斜线组成。高频半圆与锂离子通过界面膜的传递过程和电极界面电荷转移过程相关, 涉及界面膜电阻 (R_f) 和电荷转移电阻 (R_{ct}), 低频部分的一条直线为韦伯阻抗 (W_0)^[15]。如图 3b 和 c 所示, 循环前, 含与不含 0.3% MFS 电解液的电极界面电阻相似, 且比循环后的电极界面电阻大, 这可能是由于电极与电

解质的界面未完全湿润所致^[16]。经过 300 次循环后, 在基础电解液中循环后的电池阻抗大于含 MFS 电解液的电池。在基础电解液中循环后产生的巨大界面电阻是由于电解液分解和 LNMO 材料破坏导致电极/电解液界面阻抗增加。而在含 MFS 的电解液中循环的电池阻抗较小, 是由于 MFS 在 LNMO 表面形成了稳定的界面层, 从而改善了电极的电化学性能。

2.2 电极材料循环前后的表征

LNMO 电极在循环 300 次前后的 XRD 谱图如图 4a 所示。

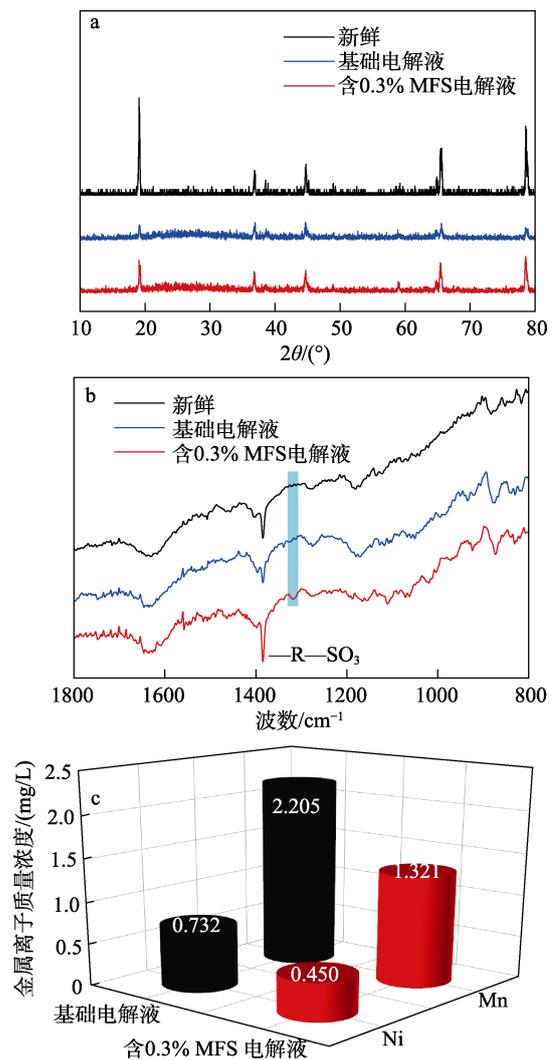


图 4 在基础电解液和含有 0.3% MFS 电解液循环 300 次前后 LNMO 电极的 XRD 谱图 (a)、FTIR 谱图 (b) 及循环后锂负极上沉积的过渡金属的含量 (c)

Fig. 4 XRD patterns (a) and FTIR spectra (b) of LNMO electrode before and after 300 cycles in base and 0.3% MFS-containing electrolytes as well as contents of deposited transition metals on Li electrode after 300 cycles (c)

可以看出, 所有电极都表现出典型的 LNMO 尖晶石衍射。然而, 在基础电解液中循环后电极的峰

值强度和位置发生了变化, 循环后电极的衍射峰强度明显变弱, 峰值位置向更高的角度移动。这表明, LNMO 在基础电解液中循环后结构遭到破坏。而在含 0.3% MFS 电解液中循环 300 次后, LNMO 与循环前的 XRD 图相比变化较小, 可能是 MFS 分解产物在 LNMO 上形成了一层 CEI 保护膜, 防止 LNMO 结构的恶化。

图 4b 为 LNMO 电极循环 300 次前后的 FTIR 谱图。只有含 0.3% MFS 电解液中循环后的极片在 1318 cm^{-1} 处出现 $-\text{SO}_3^-$ 吸收峰, 说明 MFS 在电池循环过程中发生了分解, 并且分解产物沉积在 LNMO 电极表面参与电解液界面膜的形成^[17]。

将循环 300 次后的锂负极用 DMC 冲洗, 并溶解在 5 mL 质量分数为 3% 的 HNO_3 中, 用去离子水定容至 25 mL, 进行 ICP 测试, 结果如图 4c 所示。结果表明, 在基础电解液中循环 300 次后锂负极表面沉积的

Mn 和 Ni 元素含量高于含 0.3% MFS 电解液中循环的锂片。进一步确认 MFS 在电池循环过程中对 LNMO 的保护作用。这种保护是建立在 MFS 在电极/电解液界面形成的有效保护膜上。

图 5a~c 为 LNMO 电极在基础电解液和含 0.3% MFS 电解液中循环 300 次前后的表面形貌。由图 5 可见, 循环前的 LNMO 颗粒晶体结构完整、表面平滑。在基础电解液中循环使用后, LNMO 颗粒被厚厚的沉积物所覆盖, 这归因于电解液的分解产物。不同的是, 在含 MFS 的电解液中循环的电极 LNMO 颗粒表面有一层致密平整的沉积物。结果证明, MFS 对 LNMO 具有保护作用, 其原因是 MFS 通过优先氧化而形成一层保护膜覆盖在 LNMO 电极表面。

运用 XPS 表征了循环 300 次前后 LNMO 电极表面组分, 结果见图 6a~d。在 C 1s 谱图中, C—F 来源于 PVDF, C—C 来源于乙炔黑。

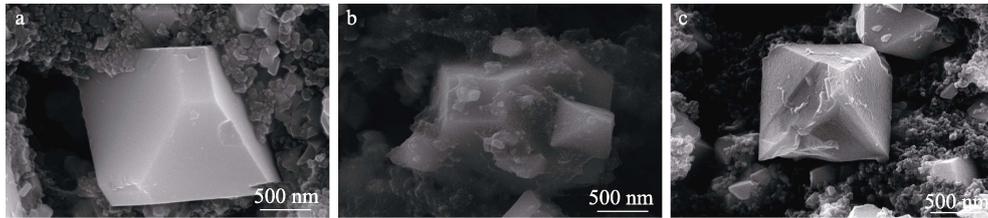


图 5 循环前 LNMO 电极 (a)、在基础电解液 (b) 和含 0.3% MFS 电解液 (c) 中循环 300 次后的 SEM 图
Fig. 5 SEM images of LNMO particles before cycling (a) and after 300 cycles in base (b) and 0.3% MFS-containing electrolytes (c)

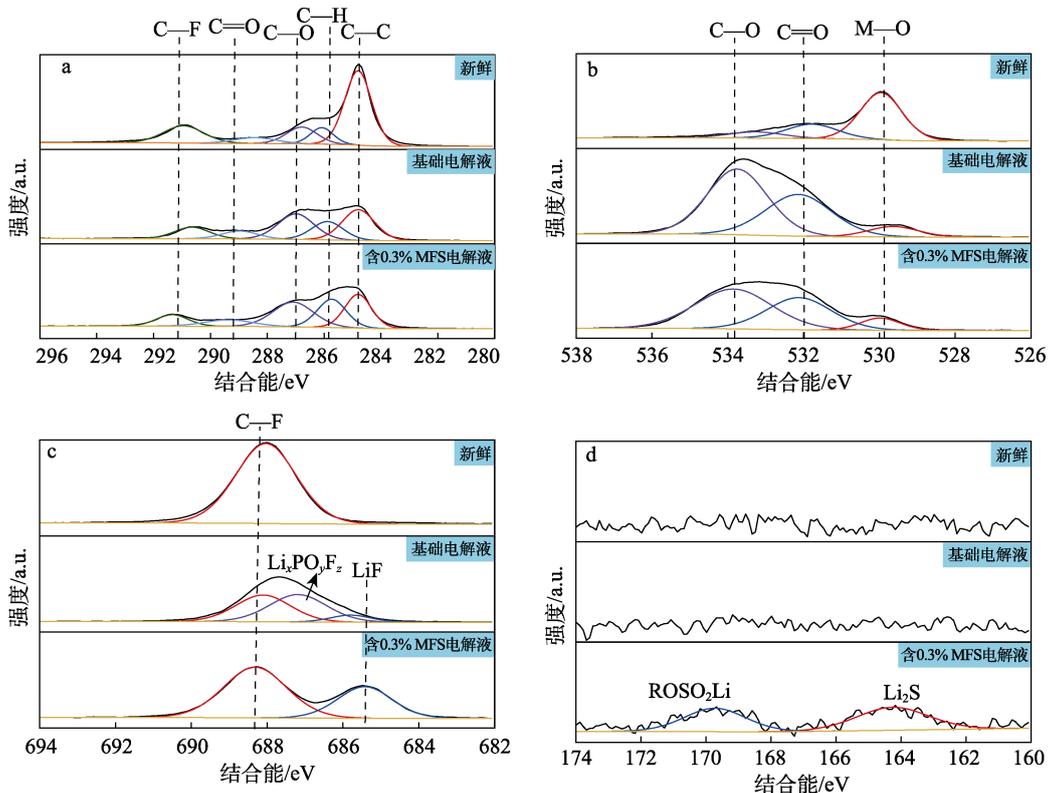


图 6 LNMO 电极循环 300 次前后的 XPS 谱图: C 1s (a), O 1s (b), F 1s (c) 和 S 2p (d)
Fig. 6 XPS spectra of LNMO electrode before and after 300 cycles: C 1s (a), O 1s (b), F 1s (c) and S 2p (d)

从 C 1s 谱中发现,基础电解液中循环的 LNMO 电极检测到的 C—F 和 C—C 信号较弱;而 O 1s 谱中,在基础电解液中循环后的 LNMO 电极表面检测到的 C—O 和 C=O 的峰强度比在含 MFS 添加剂的电解液中更强,表明 LNMO 在基础电解液中循环时电解液分解严重,分解产物覆盖在电极表面。在 F 1s 谱中则发现, $\text{Li}_x\text{PO}_3\text{F}_z$ 在基础电解液中循环的 LNMO 电极表面检测到的信号峰强于含 MFS 添加剂的电解液,这再次说明 MFS 添加剂有效地抑制了电解液的分解。而 S 2p 谱中,只在含 MFS 添加剂的电解液中循环的 LNMO 电极表面检测到 ROSO_2Li (R 通常为 C、H) 和 Li_2S 。由此证明, MFS 添加剂参与了正极电解液界面膜的形成,稳定了电极/电解液界面,从而提高了电池的电化学性能^[18]。

图 7a~c 为在基础电解液和含 0.3% MFS 电解液中循环 300 次前后锂负极表面的 SEM 图。可以看出,

循环前锂负极表面光滑、干净。在基础电解液中循环 300 次后锂负极表面有明显的裂纹。而在含 0.3% MFS 电解液中循环后,锂表面较平整、致密,且 EDS 结果显示,表面存在镁元素。这是因为, Mg^{2+} 与金属锂反应可自发生成亲脂锂-镁合金,抑制锂枝晶的生长^[11,19]。

通过 XPS 测试循环 300 次后锂负极的界面成分,结果如图 8a~e 所示。在基础电解液中循环 300 次后的锂负极表面检测到的 C—O、C=O、 $\text{Li}_x\text{PO}_3\text{F}_z$ 和聚碳酸酯峰强高于含 MFS 电解液,表明锂负极在与基础电解液循环时的相间稳定性很差,电解液分解情况严重。只有在含 MFS 添加剂的电解液中循环的锂负极表面检测到— SO_2 、— SO_3 和 Li-Mg 峰,表明 MFS 在锂负极表面分解,参与了负极电解液界面膜的形成,从而提高了界面性质,有效抑制了电解液的分解^[20]。



图 7 锂电电极循环前 (a)、在基础电解液 (b) 和含 0.3% MFS 电解液 (c) 循环 300 次后的 SEM 图 (插图为 EDS 分析)
Fig. 7 SEM images of Li electrode before cycling (a) and in base (b) and 0.3% MFS-containing electrolytes (c) after 300 cycles (Insert is EDS)

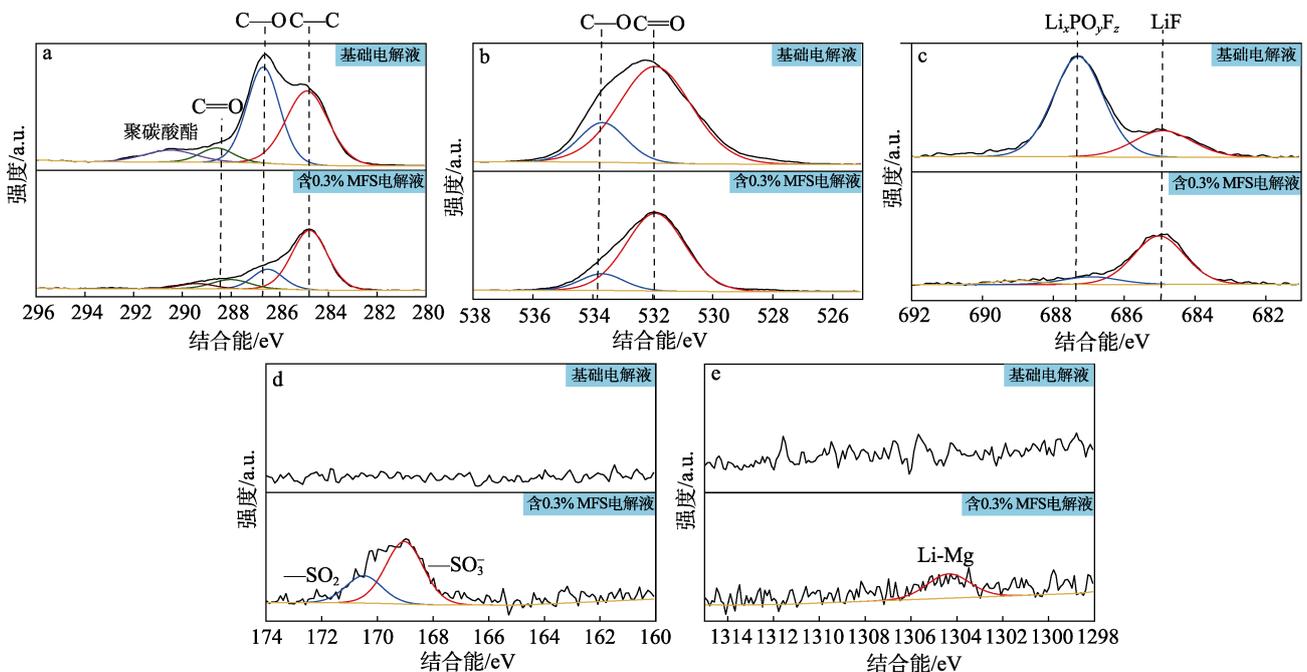


图 8 锂电电极在基础电解液和含 0.3% MFS 电解液中循环 300 次后的 XPS 谱图: C 1s (a)、O 1s (b)、F 1s (c)、S 2p (d) 和 Mg 1s (e)
Fig. 8 XPS spectra of Li electrode in base and 0.3% MFS-containing electrolytes after 300 cycles: C 1s (a), O 1s (b), F 1s (c), S 2p (d) and Mg 1s (e)

表1为MFS添加剂与文献中各种添加剂对Li/LNMO电池电化学性能的影响对比。与磺酸类等其他添加剂相比, MFS中 Mg^{2+} 和 $-SO_3$ 基团同时在

正负极表面形成保护膜, 抑制了电解液的分解, 大大提高了Li/LNMO电池循环性能。

表1 不同添加剂Li/LNMO电池的循环性能
Table 1 Cyclig performances of LNMO/Li cells with different additives

添加剂	电压区间/V	循环圈数/圈	电流倍率/C	容量保持率/%	文献
丙酸酐	3.5~4.9	300	1	65.90	[21]
N-甲基吡咯	3.5~5.0	200	0.5	89.50	[22]
丁酸酐	3.5~4.9	200	1	88.40	[23]
五氟苯基二苯基膦	3.0~5.0	300	2	71.00	[14]
1,3-丙磺酸内酯	3.5~4.9	100	0.5	93.80	[24]
1,4-丁磺酸内酯	3.5~4.9	100	0.5	97.84	
MFS	3.50~4.95	300	1	91.67	本文

3 结论

将MFS作为双功能电解液添加剂引入Li/LNMO电池中, 可以在传统碳酸盐电解液中稳定LNMO正极和锂负极, 明显提高电池的电化学性能。通过SEM、XPS、FTIR等表征及相关电化学性能研究证明, MFS优先于电解液溶剂氧化, 在电极表面形成电解液界面膜, 可稳定电极/电解液界面, 保护电极材料, 抑制电解液的分解。添加0.3% MFS的Li/LNMO电池在1C倍率下经300次循环后, 放电比容量从135.12 mA·h/g降低至123.86 mA·h/g, 容量保持率高达91.67%, 与基础电解液相比提高33.32%。

参考文献:

- [1] LI S, LUO Z, LI L, *et al.* Recent progress on electrolyte additives for stable lithium metal anode[J]. *Energy Storage Materials*, 2020, 32: 306-319.
- [2] XU J K (徐继开), LIU Y S (刘元生), SHAN Z Q (单忠强). A dual-function electrolyte additive for wettability improvement and dendrites suppression in lithium metal batteries[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2021, 38(10): 2103-2110, 2124.
- [3] LIU Y C, HONG L, JIANG R, *et al.* Multifunctional electrolyte additive stabilizes electrode-electrolyte interface layers for high-voltage lithium metal batteries[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(48): 57430-57441.
- [4] FAN X L, WANG C S. High-voltage liquid electrolytes for Li batteries: Progress and perspectives[J]. *Chemical Society Reviews*, 2021, 50(18): 10486-10566.
- [5] ZHANG J Y (张嘉玉), LEI Y (雷英), LI Y L (李颜利). Effects of fluorinated benzonitrile additives on performance of lithium ion batteries[J]. *Fine Chemicals (精细化工)*, 2022, 39(4): 783-789.
- [6] LI F, HE J, LIU J D, *et al.* Gradient solid electrolyte interphase and lithium-ion solvation regulated by bisfluoroacetamide for stable lithium metal batteries[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2021, 60(12): 6600-6608.
- [7] HEKMATFAR M, HASA I, EGHBAL R, *et al.* Effect of electrolyte additives on the $LiNi_{0.5}Mn_{0.3}Co_{0.2}O_2$ surface film formation with lithium and graphite negative electrodes[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2020, 7(1): 1901500.
- [8] LI S Y, LI L X, LIU J L, *et al.* Using a lithium difluoro(sulfato)borate additive to improve electrochemical performance of electrolyte based on lithium bis(oxalato)borate for $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4/Li$ cells[J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 155: 321-326.
- [9] XU Y, LIU J L, ZHOU L, *et al.* FEC as the additive of 5 V electrolyte and its electrochemical performance for $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2017, 791: 109-116.

- [10] QIU Y J, LU D S, GAI Y Y, *et al.* Adiponitrile (ADN): A stabilizer for the $LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O_2$ (NCM811) electrode/electrolyte interface of a graphite/NCM811 Li-ion cell[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(9): 11398-11407.
- [11] YU X Y, WANG Y M, CAI H, *et al.* Enhancing the stability of high-voltage lithium-ion battery by using sulfur-containing electrolyte additives[J]. *Ionics*, 2019, 25(4): 1447-1457.
- [12] ZHAO W G, ZOU L F, ZHENG J M, *et al.* Simultaneous stabilization of $LiNi_{0.76}Mn_{0.14}Co_{0.10}O_2$ cathode and lithium metal anode by lithium bis(oxalato)borate as additive[J]. *ChemSusChem*, 2018, 11(13): 2211-2220.
- [13] LEE S H, HWANG J Y, MING J, *et al.* Toward the sustainable lithium metal batteries with a new electrolyte solvation chemistry[J]. *Advanced Energy Materials*, 2020, 10(20): 2000567.
- [14] BOLLOJU S, CHIOU C Y, VIKRAMADITYA T, *et al.* Pentafluorophenyl diphenylphosphine as a dual-functional electrolyte additive for $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ cathodes in high-voltage lithium-ion batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2019, 299: 663-671.
- [15] CHE Y X, LIN X Y, XING L D, *et al.* Protective electrode/electrolyte interphases for high energy lithium-ion batteries with *p*-toluenesulfonyl fluoride electrolyte additive[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2021, 52: 361-371.
- [16] HUANG W N, XING L D, WANG Y T, *et al.* 4-(Trifluoromethyl)-benzonitrile: A novel electrolyte additive for lithium nickel manganese oxide cathode of high voltage lithium ion battery[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 267: 560-565.
- [17] ZUO X X, DENG X, MA X D, *et al.* 3-(Phenylsulfonyl)propionitrile as a higher voltage bifunctional electrolyte additive to improve the performance of lithium-ion batteries[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(30): 14725-14733.
- [18] CHEN H Y, CHEN J W, ZHANG W G, *et al.* Enhanced cycling stability of high-voltage lithium metal batteries with a trifunctional electrolyte additive[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(42): 22054-22064.
- [19] KONG L L, WANG L, NI Z C, *et al.* Lithium-magnesium alloy as a stable anode for lithium-sulfur battery[J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(13): 1808756.
- [20] YANG T X, ZENG H N, WANG W L, *et al.* Lithium bisoxalato difluorophosphate (LiBODFP) as a multifunctional electrolyte additive for 5 V $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ -based lithium-ion batteries with enhanced electrochemical performance[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(14): 8292-8301.
- [21] TAN C L, YANG J, PAN Q C, *et al.* Optimizing interphase structure to enhance electrochemical performance of high voltage $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ cathode via anhydride additives[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 410: 128422.
- [22] CHEN J H, GAO Y, LI C H, *et al.* Interface modification in high voltage spinel lithium-ion battery by using *N*-methylpyrrole as an electrolyte additive[J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 178: 127-133.
- [23] TAN C L, WANG N, PAN Q C, *et al.* Enhancing the electrochemical performance of a high-voltage $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ cathode in a carbonate-based electrolyte with a novel and low-cost functional additive[J]. *Chemistry-A European Journal*, 2020, 26(53): 12233-12241.
- [24] XU D W (徐东伟). Study on reaction and mechanism of cyclic sulfonate ester as electrolyte additives in lithium-ion battery[D]. Guangzhou: South China University of Technology (华南理工大学), 2020.