研究论文

乙二醇醚分子链对电解液物化性质及电化学性能的影响研究

柴鸿权[1], 郑金刚[1], 黄　浩[1], 赵依洋[1], 吴秋萍[1], 狄　方[1], 孙呈郭[1,2,*]

(1. 辽宁科技大学 化学工程学院, 鞍山 114051; 2. 南京理工大学 化学与化工学院, 南京 210094)

摘要: 以碳酸乙烯酯(ethylene carbonate, EC)/碳酸甲乙酯(ethyl methyl carbonate, EMC)为代表的碳酸酯基电解液凭借其良好的综合性能以及与电极材料相匹配的高电化学稳定性, 在传统锂离子电池中得到了长期且广泛的应用。然而, 随着高能量密度、高安全性锂电池需求的日益增长, 碳酸酯基电解液在宽温适应性、阻燃性以及与高电压正极、锂金属负极的兼容性等方面逐渐暴露出局限性。醚基电解液作为锂电池电解液的另一重要体系, 因其低黏度、高离子电导率以及与锂金属负极良好的界面相容性, 在改善宽温性能与安全性方面展现出应用潜力, 但较差的氧化稳定性(<4.0 V vs Li^+/Li)制约了其在高电压正极材料中的应用。为此, 本研究系统探究聚乙二醇醚分子链结构对电解液物化性质及界面行为的影响, 通过对比 7 种不同链长的醚类溶剂, 筛选出综合性能优异的二乙二醇二甲醚基电解液。在此基础上, 引入功能性锂盐与成膜添加剂, 进一步提升该电解液在高电压下的界面稳定性。优化后的二乙二醇二甲醚基电解液室温离子电导率达 5.9 mS·cm^{-1}, 电化学窗口达 5.8 V, 并具备良好的阻燃特性。电化学测试结果表明, 该电解液在 Li||Cu 电池中实现了 92.6% 的平均库仑效率, 在 NCM811||Li 电池中, 3C 倍率下循环 500 次后容量保持率仍高达 75.2%。上述结果表明, 通过合理优化, 聚乙二醇醚基电解液可作为潜在的高性能电解液方案之一。

关键词: 乙二醇醚; 锂离子电池; 液态电解液; 高电压稳定性; 阻燃性

中图分类号: TM912.9　　**文献标志码:** A

DOI: 10.3724/jfmd.2601004　　CSTR: 32180.14.jfmd.2601004

The influence of ethylene glycol ether molecular chains on the solvation structure of electrolyte and its electrochemical performance

CHAI Hongquan[1], ZHENG Jingang[1], HUANG Hao[1], ZHAO Yiyang[1], WU Qiuping[1], DI Fang[1], SUN Chengguo[1,2,*]

(1. School of Chemical Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China; 2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Carbonate-based electrolytes, represented by ethylene carbonate (EC)/ethyl methyl carbonate (EMC), have been widely and chronically utilized in conventional lithium-ion batteries, primarily due to their excellent overall performance and high electrochemical stability compatible with electrode materials.

收稿日期: 2026-01-09;　　**修订日期:** 2026-02-08

基金项目: 国家自然基金(No. 22578219)

作者简介: 柴鸿权(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为醚基电解液设计(E-mail: aa8940197@163.com)

通信作者: 孙呈郭(1983—), 男, 教授, 研究方向为含能材料合成及电化学储能器件设计(E-mail: sunyangguo2004@163.com)

However, with the increasing demand for high-energy-density and high-safety lithium batteries, carbonate-based electrolytes gradually reveal shortcomings in terms of wide-temperature adaptability, flame retardancy, and compatibility with high-voltage cathodes and lithium metal anodes. Ether-based electrolytes, as another important system for lithium batteries, demonstrate potential in wide-temperature performance and safety owing to their low viscosity, high ionic conductivity, and favorable interfacial compatibility with lithium metal anodes. Nevertheless, their poor oxidation stability (<4.0 V vs Li^+/Li) limits their application in high-voltage cathode materials. To address this issue, this study systematically investigated the influence of polyethylene glycol ether molecular chain structures on electrolyte physicochemical properties and interfacial behavior by comparing seven ether solvents with varying chain lengths, ultimately identifying a diethylene glycol dimethyl ether-based electrolyte with outstanding comprehensive performance. Building on this, functional lithium salts and film-forming additives were introduced to further enhance the interfacial stability of the electrolyte under high-voltage conditions. The optimized diethylene glycol dimethyl ether-based electrolyte achieved an ionic conductivity of 5.9 $mS \cdot cm^{-1}$ at room temperature, an electrochemical window of 5.8 V, and excellent flame retardancy. Electrochemical tests showed that the electrolyte achieved an average Coulombic efficiency of 92.6% in Li||Cu cells and maintained a capacity retention of 75.2% after 500 cycles at a 3C rate in NCM811||Li cells. These results indicate that, through rational optimization, polyethylene glycol ether-based electrolytes can serve as a promising high-performance electrolyte solution.

Key words: ethylene glycol ether; lithium-ion battery; liquid electrolyte; high voltage stability; flame retardancy

0 引言

电解液作为锂离子电池的核心组件之一，其发展历程与锂离子电池的研发进程紧密相连。早在20世纪80年代，为平衡电解液的电导率与黏度，并提升其与正负极材料的适配性，线性碳酸酯被引入电解液体系，由此开启了以六氟磷酸锂（$LiPF_6$）为主要锂盐的碳酸酯基电解液的新时代[1]。时至今日，以碳酸乙烯酯（ethylene carbonate, EC）/碳酸甲乙酯（ethyl methyl carbonate, EMC）为混合溶剂的碳酸酯基电解液仍在锂离子电池中占据主导地位[2]。然而，尽管碳酸酯基电解液应用广泛，但较差的高电压稳定性和低温适应性限制了其在下一代高能量密度电池中的应用，尤其是采用高电压正极和锂金属负极的体系。因此，对碳酸酯基电解液进行综合性能优化，并开发新型电解液体系，已成为当前锂离子电池电解液研究的重点方向[3]。

作为另一类重要的电解液体系，醚基电解液凭借其优异的低温性能和低黏度优势，在极端条件下仍能维持稳定的离子传导与较高的电化学反应活性[4]。然而，醚类溶剂也存在显著缺陷，如氧化稳定性较差（＜4.0 V vs. Li^+/Li）。过去数十年间，研究人员尝试通过引入电解液添加剂、提高盐浓度或设计溶剂分子结构等策略，来提升醚基电解液与高电压正极的兼容性以及锂金属负极界面的稳定性，从而实现优异的循环寿命。然而，关于醚类溶剂分子结构如何影响电解液的溶剂化结构、阻燃性及电化学稳定性，目前仍缺乏系统性研究。而这些方面对于开发高安全性、高稳定性的醚基电解液体系是至关重要的[5]。

基于此，本文系统对比7种不同链长的醚类溶剂的物化与电化学性能，筛选出具有优异热稳定性及电化学性能的二乙二醇二甲醚基电解液，并通过添加剂工程进一步优化其在高电压下的循环稳定性，实现了对醚基电解液溶剂结构的筛选与综合电化学性能的提升。

1 实验部分

1.1 电解液配制

在本实验中，首先配制1,3-磺酸内酯（1,3-propane sultone, PS）分别与二乙二醇二甲醚（diethylene glycol dimethyl ether, DEGME）、四乙二

醇二甲醚、三乙二醇二甲醚、乙二醇二乙醚、乙二醇二丁醚、二乙二醇二乙醚和二乙二醇二丁醚的混合溶液。其中, PS 与上述醚类溶剂的体积比均为 3∶7。然后, 将双三氟甲烷磺酰亚胺锂(lithium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide, LiTFSI)和二氟草酸硼酸锂(lithium difluoro(oxalato)borate, LiDFOB)按 29∶3 的质量比依次加入到上述的 7 种混合溶液中。所得溶液的锂盐总浓度为 1.22 mol·L^{-1}, 并引入体积分数均为 5% 的 1,3-二氧戊环(1,3-dioxolane, DOL)和氟代碳酸乙烯酯(fluoroethylene carbonate, FEC)作为基础添加剂。由此得到的一系列分别对应上述 7 种醚类溶剂的醚基电解液分别被命名为 EDP1~EDP7。

为最大限度排除添加剂的影响, 确保不同体系间的性能差异主要源于醚类溶剂分子链结构的变化, 本研究在所有电解液体系中均保持 DOL 与 FEC 的添加比例一致。所用溶剂、锂盐及添加剂均购自 Adamas-beta 化学试剂有限公司。

1.2 电极制备

将镍钴锰酸锂($LiNi_{0.8}Co_{0.1}Mn_{0.1}O_2$, NCM811)、乙炔黑(acetylene black, SP)和聚偏氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF)按 8∶1∶1 的质量比在 N-甲基吡咯烷酮(N-methyl-2-pyrrolidone, NMP)中搅拌 6 h, 使其均匀混合, 随后涂覆于铝箔上, 并在 80 ℃ 下真空干燥 8 h。将干燥后的电极裁切成直径为 12 mm 的圆片, 并转移至手套箱中备用。NCM811 电极的活性物质负载量为 2.5~3.0 mg·cm^{-2}。

1.3 电池组装

在氩气氛围的手套箱中(水、氧气体积分数 $<10^{-7}$)组装 CR-2025 型扣式电池。其中, 隔膜为聚丙烯(polypropylene, PP)隔膜, 电解液体积为 60 μL。组装的电池类型包括: Li||Li、Li||Cu、NCM811||Li、SS||SS(不锈钢||不锈钢)。以 NCM811||Li 为例, 电池组装顺序如下: 将正极片居中置于正极壳内, 滴加 30 μL 电解液, 平铺隔膜, 再滴加 30 μL 电解液, 将锂片与正极对齐放置, 随后依次放置不锈钢片和弹簧片, 扣上负极壳, 使用电池封装机密封。其他类型电池的组装步骤与此一致。

1.4 电化学测试

组装 NCM811||Li 电池进行倍率性能、长循环稳定性及循环前后阻抗测试。充放电电压范围为 2.8~4.5 V, 阻抗测试频率范围为 10 Hz~1 MHz。组装 SS||SS 电池, 通过电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)测试电池体相电阻, 并利用式(1)计算离子电导率(σ):

$$\sigma = \frac{d}{RS} \tag{1}$$

式中, d 为电解质(隔膜)厚度, R 为 EIS 测试得到的本体电阻, S 为电极接触面积。组装 Li||Cu 电池进行锂沉积/剥离库仑效率测试。组装 Li||Li 对称电池, 进行塔菲尔(Tafel)曲线测试(电压扫描范围为 −0.3~0.3 V, 扫描速率为 5 mV·s^{-1})及锂沉积/剥离稳定性测试。

电解液的电化学稳定窗口通过线性扫描伏安法(linear sweep voltammetry, LSV)进行表征, 以不锈钢为工作电极、金属锂为对电极/参比电极, 测试电压范围为 0~7 V, 扫描速率为 5 mV·s^{-1}。为准确获取并对比 7 种电解液的基础物理性质, 本研究对其密度和黏度进行了测试。所有测试均在恒温(25.0 ℃±0.5 ℃)条件下进行, 密度采用数字密度计测量。仪器经超纯水校准后, 将约 1.5 mL 样品注入 U 形振荡管, 待温度稳定后读取密度值(ρ, g·mL^{-1}), 每种电解液平行测量 3 次, 结果取平均值。黏度采用数字旋转黏度计测量, 经校准后, 在 100 s^{-1} 剪切速率下读取 0.5 mL 样品的稳定黏度值(η, mPa·s), 并平行测量 3 次, 结果取平均值。阻燃性测试方法如下: 将 30 μL 电解液滴加于 CR-2025 型正极壳表面, 随后用点火器点燃, 观察并记录持续燃烧时间及自熄现象。

将循环 50 次的 NCM811||Li 电池在氩气气氛保护的手套箱中拆解, 分别取出 NCM811 正极片与锂金属负极片, 使用 1,2-二甲氧基乙烷溶剂反复清洗以去除残留电解液, 随后置于 60 ℃ 真空干燥箱中干燥 2 h。将处理后的极片分别进行扫描电子显微镜(scanning electron microscopy, SEM)形貌表征与 X 射线光电子能谱(X-ray photoelectron spectroscopy, XPS)表面成分分析。此外, 为定性比较不同分子组分的氧化/还原倾向, 采用基于密度泛函理论(density functional theory, DFT)的量子化学计算, 得到关键组分的前线分子轨道能级——

最高占据分子轨道(highest occupied molecular orbital, HOMO)和最低未占分子轨道(lowest unoccupied molecular orbital, LUMO)。

2 结果和讨论

2.1 物化性质对比

图 1 对比了 7 种电解液的外观状态与可燃性。由图 1(a) 可以看出，所有电解液均澄清透明，表明其对锂盐具有良好的溶解性。图 1(b) 为明火点燃实验结果：第 1 排图片为点火器刚点燃电解液时的初始状态，第 2 排图片为持续点燃 5 s 后的燃烧状态。对比可知，7 种电解液的可燃性存在显著差异。EDP1 体系在点火条件下未产生明显火焰，并表现出良好的自熄特性。该体系优异的阻燃性能可归因于：(1)其较长的碳链及分子结构中的醚氧原子增强了氢键作用，提升了分子结构的热稳定性，从而抑制了热分解与燃烧反应[6]；(2)较高的闪点(约 57 ℃)使其在常规温度下不易挥发，进而延长了点燃时间；(3)分子间的极性相互作用抑制了自由基链式反应的发生，进一步降低了可燃性[7]。



图 1 7 种电解液的(a)数码照片及(b)可燃性测试

Fig. 1 (a) Digital photographs and (b) flammability test of the seven electrolytes

通过表 1 中 7 种醚类电解液的密度、黏度、离子电导率与电化学窗口的对比可知，EDP1 体系在多方面表现均衡：其适中的黏度有利于锂离子迁移与隔膜浸润，较高的电化学窗口(5.8 V)可匹配富镍或富锂锰基材料等高电压正极[8]。相比之下，其他溶剂(如 EDP2)的性能难以同时兼顾上述各方面。

表 1 电解液的物理及电化学性质对比

Table 1 Comparison of physical and electrochemical properties of seven electrolytes

电解液类型	密度/($g·mL^{-1}$)	黏度/(mPa·s)	离子电导率/($ms·cm^{-1}$)	电化学窗口/V
EDP1	1.230	4.48	5.9	5.8
EDP2	1.221	6.48	4.1	5.6
EDP3	1.177	6.48	2.8	6.4
EDP4	1.155	3.99	6.4	5.4
EDP5	1.242	5.98	4.6	5.7
EDP6	1.117	5.98	3.0	5.5
EDP7	1.185	4.98	5.7	5.5

2.2 电化学性能分析

为评估不同电解液的性能差异，将组装的 NCM811||Li 电池在室温下进行 3C 倍率长循环测试，并分别测试其循环前及循环 50 次后的电化学阻抗。如图 2(a) 所示。7 种电解液(EDP1~EDP7)的初始放电容量分别为 175、159、75、173、127、179 和 164 $mAh·g^{-1}$，对应 500 次循环后的容量保持率分别为 75.2%、55%、50%、19.6%、27.5%、55% 和 0%。其中，EDP1 不仅具有较高的初始容量(175 $mAh·g^{-1}$)，而且在长循环中展现出最优的容量保持

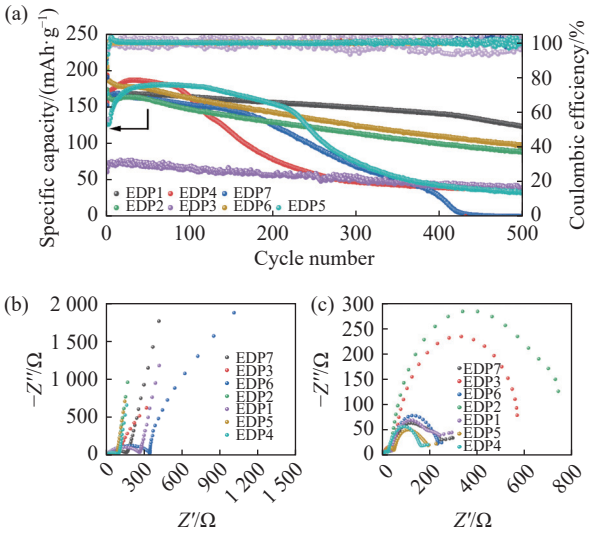


图 2 (a)7 种电解液在室温、3C 倍率下的长循环性能；(b)7 种电解液在循环前的阻抗曲线；(c)7 种电解液在循环 50 圈后的阻抗曲线

Fig. 2 (a) Long-term cycling performance of seven electrolytes at room temperature under a 3C rate; (b) impedance curves of seven electrolytes before cycling; (c) impedance curves of seven electrolytes after 50 cycles

率(75.2%)。图 2(b)~(c) 的阻抗谱(*Z*′表示阻抗实部, −*Z*″表示负阻抗虚部)进一步显示, EDP1 体系在 50 次循环前后均具有较低的界面电阻与电荷转移电阻, 表明其在循环过程中能够快速与电极形成界面钝化层, 并在此后的循环中维持界面稳定性, 从而实现良好的界面保护效果与更优的反应动力学特性[9]。对比 7 种电解液的长循环性能与电化学阻抗, 值得注意的是: EDP4 体系虽然表现出最高的体相离子电导率(6.4 mS·cm^{-1})和最低的界面阻抗(循环 50 次后), 但其长循环容量保持率(19.6%)却远低于 EDP1 体系(75.2%)。

这一看似矛盾的结果表明, 电池性能是由体相传输动力学与界面化学稳定性共同作用的复杂体系决定的。EDP4 体系较高的初始放电容量(173 mAh·g^{-1})表明其能够快速形成有效的电化学反应界面。但其容量的快速衰减揭示了长循环性能的决定性因素为界面在长期循环过程中的稳定性。EDP1 体系实现了最高的容量保持率, 表明其在电极界面处形成了更致密、稳定且阻抗增长缓慢的钝化层。这一结论可由 EDP1 体系在测试中展现出的最高库仑效率(92.6%)以及循环后负极呈现的更均匀的沉积形貌加以佐证。相反, EDP4 体系所形成的界面化学稳定性较差, 在长期循环中持续发生分解与重构, 不断消耗活性锂和电解液, 导致容量快速衰减。因此, EDP1 体系的优异性能可归因于其高离子电导率与卓越长期界面稳定性的协同作用。

基于上述电化学性能的筛选结果, 进一步分析 EDP1 电解液的室温倍率性能、锂剥离/沉积电流密度及沉积效率。如图 3(a)~(b) 所示, 采用 EDP1 电解液组装的 NCM811||Li 电池在 0.1C、0.5C、1C、3C 和 5C 倍率下的放电容量分别为 198、180、168、140 和 114 mAh·g^{-1}。当倍率恢复至 0.1C 时, 该电池仍能提供高达 197 mAh·g^{-1} 的放电容量, 展现出优异的倍率恢复能力。相比之下, EDP4 体系在各倍率下的表现均不如 EDP1 优异。为进一步探究 EDP1 电解液对锂沉积/剥离行为的影响, 本研究分别组装了 Li||Li 对称电池和 Li||Cu 电池: 前者用于测试其临界电流密度, 评估高电流密度下的界面稳定性; 后者用于测试锂在实际沉积/剥离过程中的库仑效率, 评估循环可逆性。如图 3(c) 所示,

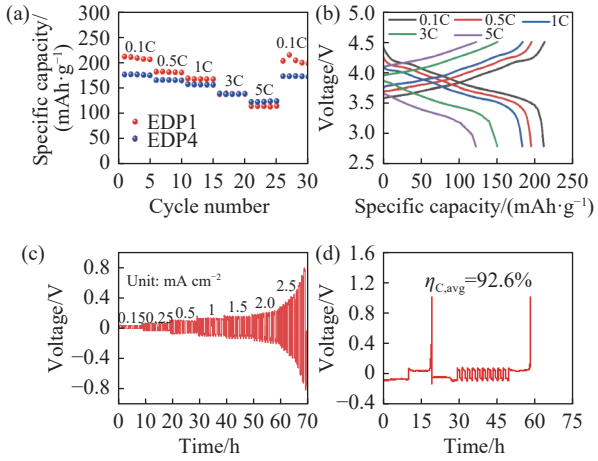


图 3 (a)EDP1 和 EDP4 体系的 NCM811||Li 倍率性能; (b) NCM811||Li 电池在不同倍率下的充放电曲线; (c)Li||Li 电池的临界电流密度测试; (d)Li||Cu 电池的库仑效率测试

Fig. 3 (a) Rate performance of EDP1 and EDP4 in NCM811||Li cell; (b) charge-discharge curves of NCM811||Li cell at different rates; (c) critical current density test of Li||Li cell; (d) coulombic efficiency test of Li||Cu cell

当电流密度达到 1.5 mA·cm^{-2} 时, 对称电池的电压曲线出现标志性拐点: 先呈现出短暂的稳定平台, 随后迅速下降, 表明电池在此电流密度下已无法维持稳定循环。因此, 该体系的临界电流密度确定为 1.5 mA·cm^{-2}, 而如此高的临界电流密度表明该电解液体系具有优异的离子传输能力[10]。图 3(d) 所示的库仑效率测试结果表明, 使用 EDP1 电解液的锂沉积/剥离平均库仑效率(average Coulombic efficiency, $\eta_{C,avg}$)高达 92.6%。优异的锂沉积/剥离能力一方面源于电解液体系快速的离子扩散动力学, 另一方面源于电解液组分在循环过程中与电极界面形成的稳定钝化层, 确保了离子在界面的稳定快速迁移, 从而显著提升了与锂金属匹配时的离子脱嵌可逆性[11]。

2.3 微观表征分析

为深入探究 EDP1 电解液优异电化学性能的成因, 对循环后的 NCM811 正极及锂负极进行了 SEM 分析。如图 4(a) 所示, 采用 EDP1 电解液时, NCM811 正极颗粒在循环 50 次后结构保持完整, 未出现明显破裂或严重形变, 表明电解液与正极材料之间形成了稳定的界面钝化层, 有效抑制了循环过程中的结构降解与副反应, 从而提升了材料的循环稳定性与电化学性能。同样, 与 EDP1 电解液匹

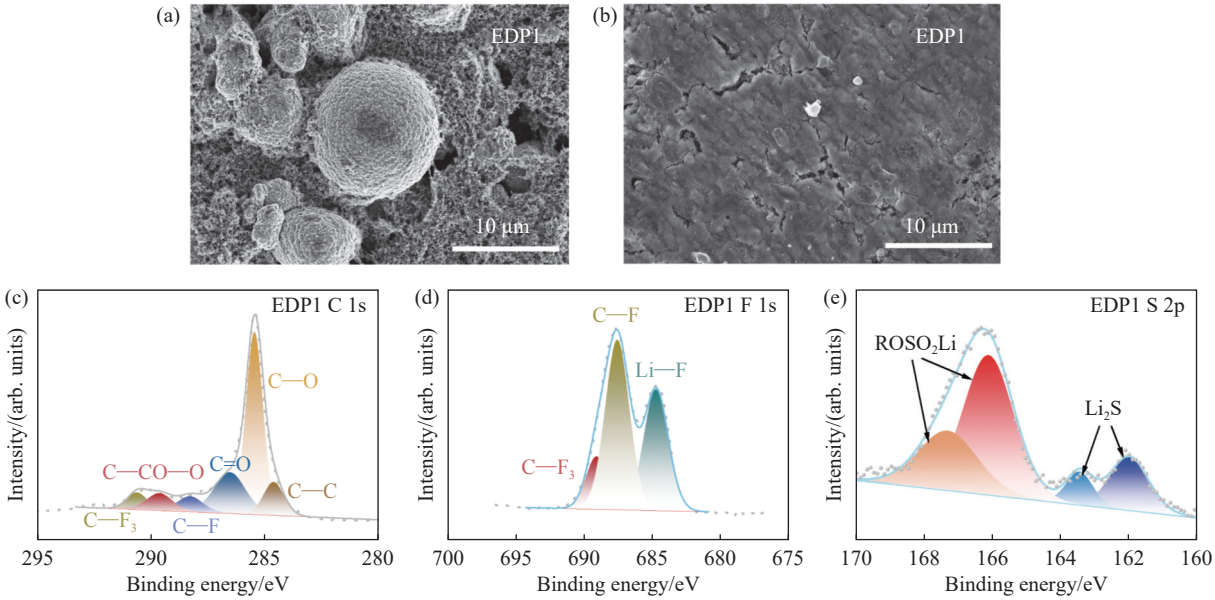


图 4　NCM811||Li 电池循环 50 次后(a)正极和(b)锂金属表面的 SEM 图像;(c)~(e)NCM811||Li 电池循环后锂金属的 XPS 谱图

Fig. 4 SEM images of (a) the cathode and (b) the lithium metal surface after 50 cycles of NCM811||Li cell; (c) - (e) XPS spectras of the lithium metal in NCM811||Li cell after cycling

配循环后的锂金属负极表面形成了致密均匀的沉积层,未观察到明显枝晶,说明 EDP1 电解液与锂金属具有良好的电化学稳定性(图 4(b))。进一步对循环后锂负极表面进行 XPS 分析,结果如图 4(c)~(e)所示:C 1s 谱经分峰拟合后,识别出 C—C/C—H(约 284.8 eV)、C—O(约 286 eV)和 C═O(约 288~289 eV)等特征峰,表明锂负极表面存在有机化合物;F 1s 谱精细拟合后得到 LiF(约 685 eV)、C—F(约 687.57 eV)和 CF_3(约 689 eV)的特征峰;S 2p 谱拟合结果显示,在 167.31 eV 和 166.12 eV 处出现归属于 $ROSO_2Li$ 的特征峰,在 163.42 eV 和 162.02 eV 处出现归属于 Li_2S 的特征峰。上述结果表明,EDP1 电解液与锂金属匹配时,可在其表面形成致密、稳定且富含无机组分的有机-无机共存界面钝化层,这对促进锂的均匀沉积与剥离、提升电池循环稳定性至关重要[12-13]。

2.4　溶剂化结构与电子结构分析

在众多醚类电解液中,EDP1 电解液优异电化学性能的根源在于:一方面,EDP1 中二乙二醇二甲醚(DEGME)适中的分子链长度使其在黏度与介电常数等物化参数上取得了良好平衡,为离子快速传输和界面稳定性奠定了基础;另一方面,电解液中各组分的匹配性电子能级促使添加剂与锂盐优先参与界面成膜,从而构建稳定的电极/电解液界面。为进一步探究其界面稳定性的本质,计算了电解液中各组分的前线分子轨道能级,结果如图 5 所示。DEGME 的 HOMO 能级较低(−7.195 eV),而 LUMO 能级为−0.163 eV,表明其具有较高的抗氧化能力及一定的耐还原特性,为其在匹配高电压正极与锂金属负极时实现优异的稳定性提供了基础。此外,PS 和 FEC 的 LUMO 能级更低,分别为−0.402 eV 和−0.391 eV。根据“最低未占分子轨道优先还原”原则,在电池化成过程中,PS 与 FEC 作为优先还原组分在锂金属负极表面发生分解,参与构建富含

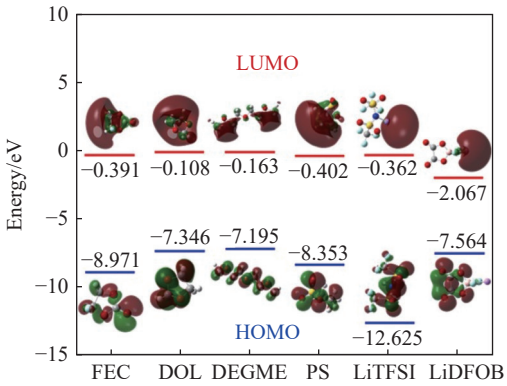


图 5　电解液关键组分的 HOMO 与 LUMO 能级对比

Fig. 5 Comparison of HOMO and LUMO energy levels of key electrolyte components

LiF 等无机物的稳定固态电解质界面层。与此同时, DOL 具有较高的 HOMO 能级(−7.346 eV), 使其能够作为优先氧化组分在正极侧参与构筑稳定的正极电解质界面层[14]。与此同时, 共溶剂 PS 的高闪点等物理性质亦对提升电解液整体安全性(阻燃性)有所贡献。作为无机组分的主要来源, LiDFOB 的 LUMO 能级较低(−2.067 eV), 也参与了添加剂协同形成界面层的过程。相比之下, LiTFSI 的 LUMO 能级为−0.362 eV, 表明其在电池循环过程中能够保持稳定的分子结构。这种基于能级判据的优先氧化/还原成膜机制构成了稳定电极/电解液界面的电子结构基础, 与图 4 中观察到的致密均匀界面形貌以及前文所述的高库仑效率、高临界电流密度和优异长循环稳定性结果相契合[15]。

3 结论

经过系统性的阻燃性对比与电化学性能筛选, EDP1 电解液在电化学稳定性和阻燃性方面显著优于其他 6 种醚基电解液。在室温 3C 倍率下, 采用 EDP1 电解液的 NCM811||Li 电池在 500 次循环后容量保持率最高(75.2%), 界面相容性与反应动力学亦表现最优。同时, 该电解液与锂金属匹配时, 临界电流密度达 1.5 $mA·cm^{-2}$, 表明其在锂金属负极侧具备优异的高电流密度下的界面稳定性, 为电池实现高倍率充放电奠定了基础。电池性能的优异表现, 一方面归因于电解液自身较高的离子电导率与宽电化学窗口等优良的物化特性, 为快速反应提供了基础; 另一方面则源于关键组分间匹配的电子能级, 促使添加剂与锂盐优先于溶剂发生界面反应, 从而协同构建出稳定的固态电解质界面。综上所述, 筛选出的 EDP1 电解液验证了其在高性能快充电池中的应用潜力, 其低阻抗、高离子电导率及长循环寿命等特性, 为后续电解液设计提供了重要参考。

参考文献:

[1] Xu K. Nonaqueous liquid electrolytes for lithium-based rechargeable batteries[J]. Chemical reviews, 2004, 104(10): 4303-4418.

[2] Ohtomo T, Hayashi A, Tatsumisago M, et al. Glass electrolytes with high ion conductivity and high chemical stability in the system LiI-Li_2O-Li_2S-P_2S_5[J]. Electrochemistry, 2013, 81(6): 428-431.

[3] Miyashiro H, Seki S, Kobayashi Y, et al. All-solid-state lithium polymer secondary battery with $LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O_4$ by mixing of Li_3PO_4[J]. Electrochemistry Communications, 2005, 7(11): 1083-1086.

[4] Paulsen J M, Dahn J R. O_2-type $Li_{2/3}$ [$Ni_{1/3}Mn_{2/3}$] O_2: a new layered cathode material for rechargeable lithium batteries II. structure, composition, and properties[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2000, 147(7): 2470-2478.

[5] Matsuda H, Kuwabara M, Yamada K I, et al. Optical absorption in sol-gel-derived crystalline barium titanium fine particles[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1998, 81(11): 3010-3012.

[6] Kim M, Park J, Lee K M, et al. Peptidomimetic wet-adhesive PEGtides with synergistic and multimodal hydrogen bonding[J]. Journal of the American Chemical Society, 2022, 144(14): 6261-6269.

[7] Natarajan S, Mahata P. Non-carboxylate based metal-organic frameworks (MOFs) and related aspects[J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2009, 13(3/4): 46-53.

[8] Li Q, Liu X, Han X, et al. Identification of the solid electrolyte interface on the Si/C composite anode with FEC as the additive[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(15): 14066-14075.

[9] Ellis L D, Allen J P, Thompson L M, et al. Quantifying, understanding and evaluating the effects of gas consumption in lithium-ion cells[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2017, 164(14): A3518-A3528.

[10] Ling Q C, Chen D C, Zhu X, et al. Probing local asymmetric site anchored anion based on multifunctional polymer electrolyte for sustainable solid-state sodium-metal battery[J]. Advanced Materials, 2026, 38(3): e14352.

[11] Sun J, Zhang S, Li J, et al. Robust transport: an artificial solid electrolyte interphase design for anode-free lithium-metal batteries[J]. Advanced Materials, 2023, 35(20): 2209404.

[12] Ree M, Shin T J, Kim S I, et al. High-temperature polyimide compositesprepared from soluble polymeric and crosslinkable oligomeric precursors: phase demixing and properties[J]. Polymer, 1998, 39(12): 2521-2529.

[13] Jiao S, Ren X, Cao R, et al. Stable cycling of high-voltage lithium metal batteries in ether electrolytes[J]. Nature Energy, 2018, 3(9): 739-746.

[14] Cui Z, Jia Z, Ruan D, et al. Molecular anchoring of free solvents for high-voltage and high-safety lithium metal

batteries[J]. Nature Communications, 2024, 15: 2033.

[15] Mao M, Gong L, Wang X, et al. Electrolyte design combining fluoro- with cyano-substitution solvents for anode-free Li metal batteries[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2024, 121(5): e2316212121.