

分类号_____

密级_____

U D C_____

编号_____

厦 门 大 学

博 士 后 研 究 工 作 报 告

锂离子高电压电解液研究

王 峰

工作完成日期 2016/1/10

报告提交日期 2016/3/7

厦门大学

2016 年 3 月

锂离子电池高电压电解液研究

Study on High-voltage Electrolytes for Lithium-ion Batteries

博 士 后 姓 名 王峰

流动站（一级学科）名称 化学

专 业（二级学科）名称 化学电源

研究工作起始时间 2014 年 1 月

研究工作期满时间 2016 年 1 月

厦 门 大 学

2016 年 3 月

厦门大学博士后研究工作报告

著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用博士后研究工作报告的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交该报告的纸质版和电子版，有权将该报告用于非赢利目的的少量复制并允许该报告进入学校图书馆被查阅，有权将该报告的内容编入有关数据库进行检索，有权将博士后研究工作报告的标题和摘要汇编出版。保密的博士后研究工作报告在解密后适用本规定。

本研究报告属于： 1、保密（）， 2、不保密（）

纸本在 2 年解密后适用本授权书；

电子版在 2 年解密后适用本授权书。

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

摘要

高电压锂离子电池体系对电极材料、电解液、隔膜以及其它组件均提出了更高的要求。电池性能的改善往往涉及多多方面因素，其中高电压环境下电极材料的结构稳定性、电解液在界面分解反应、电解液的电化学稳定性是关键问题。本论文对砷类、腈类及氟代化合物作为电解液溶剂和添加剂进行了重点研究，采用 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ /石墨全电池作为评价对象，期望通过改善电解液配方来有效改进高电压 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ 电池的电化学性能。

通过实验优化后的电解液与客户优化的 LNMO/石墨电池搭配，整个电池性能在高电压条件下有明显提升。通过使用腈类化合物、砷类化合物、氟代化合物作为高电压电解液成分，可以使电池循环性得到较大提升，在 3.50-4.85V 电压范围内能进行 1C 充放电循环 60 周以上，容量保持率超过 50%，电池的厚度及内阻变化均有明显改善。

关键词： 电解液；高电压；锂离子电池

Abstract

High-voltage lithium-ion battery system has put forward higher requirements for electrode materials, electrolyte, separator and other components. The improvement of battery performance often involves many factors, including the structural stability of electrode materials in high-voltage environment, the decomposition of electrolyte in the interface and the electrochemical stability of the electrolyte are the key problems. This essay focused on sulfones, nitriles and fluorinated compounds as electrolyte solvents and additives. The $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ /graphite batteries were adopted as the evaluation object, expecting to improve the electrochemical performance of high-voltage $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ battery by adjusting the electrolyte formula.

Through the experimental optimization of the electrolyte and the LNMO/ graphite battery, the entire battery performance in the high-voltage condition has increased significantly. By using nitrile compounds, sulfone compounds, and fluorinated compounds as high-voltage electrolyte composition, the battery cycling performance was greatly improved. In the voltage range of 3.50-4.85V, the battery capacity retention was over 50% after 60 cycles under 1C rate, the thickness expansion and the resistance increase were also improved.

Keywords: electrolyte; high-voltage; lithium-ion battery

目次

1 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 锂离子电池电解液简介.....	1
1.3 高电压电解液研究进展及产业化现状.....	5
1.4 研究目的、内容及意义.....	9
2 高电压电解液溶剂选择.....	10
2.1 实验方法.....	10
2.2 实验电池选择.....	10
2.3 高电压电解液溶剂选择.....	14
2.3.1 砒类化合物.....	14
2.3.2 腈类化合物.....	16
2.3.3 氟代溶剂.....	20
2.4 本章小结.....	24
3 高电压电解液添加剂研究.....	25
3.1 砒类化合物.....	25
3.1.1 砒类添加剂筛选.....	25
3.1.2 砒类添加剂优化.....	27
3.2 腈类化合物.....	30
3.2.1 腈类添加剂初选.....	30
3.2.2 混合腈类添加剂实验.....	38
3.3 含硼化合物.....	40
3.5 本章小结.....	43
4 结论与展望.....	44
参考文献.....	45
致谢.....	49
博士生期间发表的学术论文.....	50
博士后期间发表的学术论文及申请专利.....	51
个人简历.....	52
联系地址.....	53

1 绪论

1.1 引言

锂离子电池以其能量密度高、输出电压高、输出功率大、自放电小、工作温度宽、无记忆效应和环境友好等优点^[1-4]，自 20 世纪 90 年代由日本索尼公司实现产业化以来^[5]，被成功应用于多种便携式电子设备。为了应对日益严峻的环境污染，避免能源危机，大力发展以太阳能、风能、潮汐能和地热能等为代表的绿色能源，加大储能和能源转换体系的研发，并积极推进内燃机向电动机转换变得日益紧迫^[1-3]。锂离子电池作为一种绿色高能化学电源，其应用逐渐向动力和储能等领域延伸^[6-8]。

1.2 锂离子电池电解液简介

锂离子电池主要由正极材料（嵌锂的过渡金属氧化物）、负极材料（高度石墨化的碳）、隔膜（聚烯烃微孔膜）和电解质材料等组成^[9]。电解质作为电池中锂离子传输的媒介，连接着电池的正负极，具有较高的离子电导率和极好的电子绝缘性。电解质的选择对锂离子电池各项性能（如能量密度、循环性能、倍率性能、储存性能等）的发挥至关重要，对电池的安全性能也有很大影响^[10]。目前已商业化和在研的锂离子电池电解质主要有以下几种（按电解质存在状态分类），如图 1 所示^[11-17]。相对于液体电解质，尽管固体电解质更加安全可靠，但其面临离子电导率低、力学性能差和生产成本高等诸多问题，短时间内难以解决^[18]。

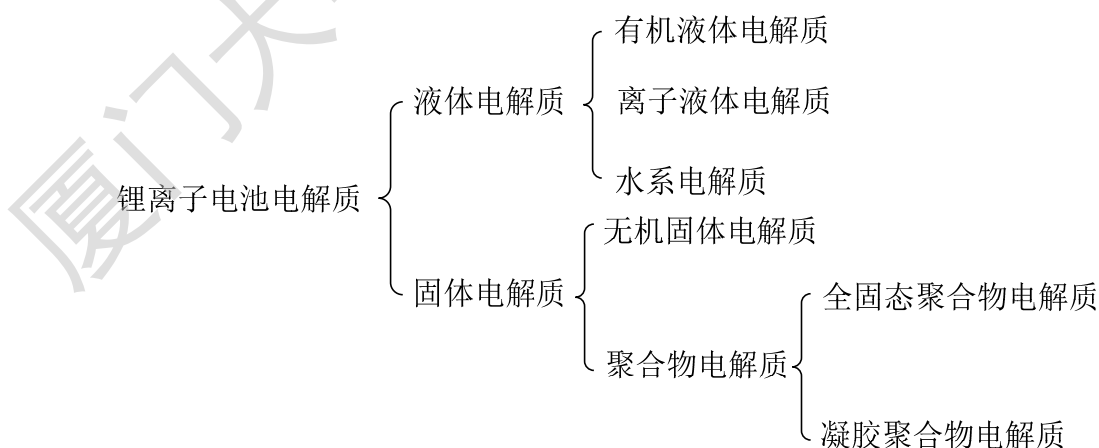


图 1 锂离子电池电解质材料分类

Fig.1 The classification of electrolytes for lithium-ion batteries

目前在各种商用锂离子电池系统（3C 电池、动力电池和储能电池）中，电解质材料仍以有机液体电解质为主。

有机液体电解质（简称电解液，本文）是由电解质锂盐完全溶解于非水、非质子性有机溶剂中得到，选择非水非质子溶剂主要是因为锂离子电池负极的电位（0~0.2 V vs. Li⁺/Li）与锂接近，比较活泼，在水溶液体系中不稳定。随着电池性能要求的提高和电解液技术的发展，添加剂（一般认为是含量低于 10%的组分）的作用日益重要，占电解液总成本的比重不断上升。表 1 列出了锂离子电池电解液各组成的常用成分。表 2 列出了常用的锂离子电池电解液添加剂及其作用 [10,12,19,20]。

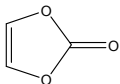
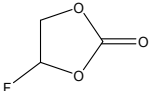
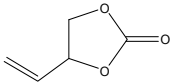
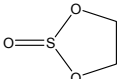
表 1 锂离子电池电解液组成

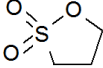
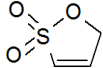
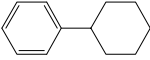
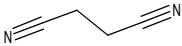
Table 1 The composition of electrolytes for lithium-ion batteries

组成	传统	新型
锂盐	LiPF ₆	LiBF ₄ , LiBOB, LiODFB, LiTFSI, LiFSI 等
有机溶剂	EC, PC, DMC, DEC, EMC 等	EA, EB, EP, FB 等
添加剂	VC, FEC, VEC, ES, PS, CHB 等	PRS, VES, MMDS, TAB, SN, ADN 等

表 2 常用电解液添加剂及其作用

Table 2 Commonly used electrolyte additives and their functions

添加剂	结构式	作用
VC		负极成膜，改善循环性能
FEC		负极成膜，改善循环性能； 改善低温性能
VEC		负极成膜，改善循环性能； 改善高温存储性能
ES		负极成膜，改善循环性能； 改善高温存储性能

PS		负极成膜，改善循环性能； 正极成膜，抑制金属溶出和高电压下电解液分解； 改善高温存储性能
PRS		负极成膜，改善循环性能； 正极成膜，抑制金属溶出和高电压下电解液分解
CHB		过充保护（电聚合型）
SN		吸附在正极表面，抑制金属溶出和高电压下电解液分解； 改善高温性能

目前商品化的锂离子电池一般采用 LiCoO_2 、 LiMn_2O_4 、 LiFePO_4 等作为正极材料，采用石墨材料作为负极（图 2），工作电压上限一般为 4.2-4.3V。电池的能量密度和工作电压、放电容量成正比。石墨负极的容量约 350mAh/g 左右，正极材料的容量约 110-150mAh/g，相比负极材料，现有的嵌锂正极材料的容量偏低，且突破难度很大。以 3C 电池为例，自锂离子电池面世以来，一直以 LiCoO_2 作为主流正极材料，替代材料迟迟没有出现。随着电子技术的发展，消费者日益依赖于便携式 3C 产品，电池容量难以满足用户期望。研究人员希望通过提高传统材料的工作电压，实现电池能量密度的提升。从近三代 iPhone 产品使用的电池来看（表 3），同样使用 LiCoO_2 正极材料，随着充电电压上限的提高，能量密度得以逐步提升^[21]。

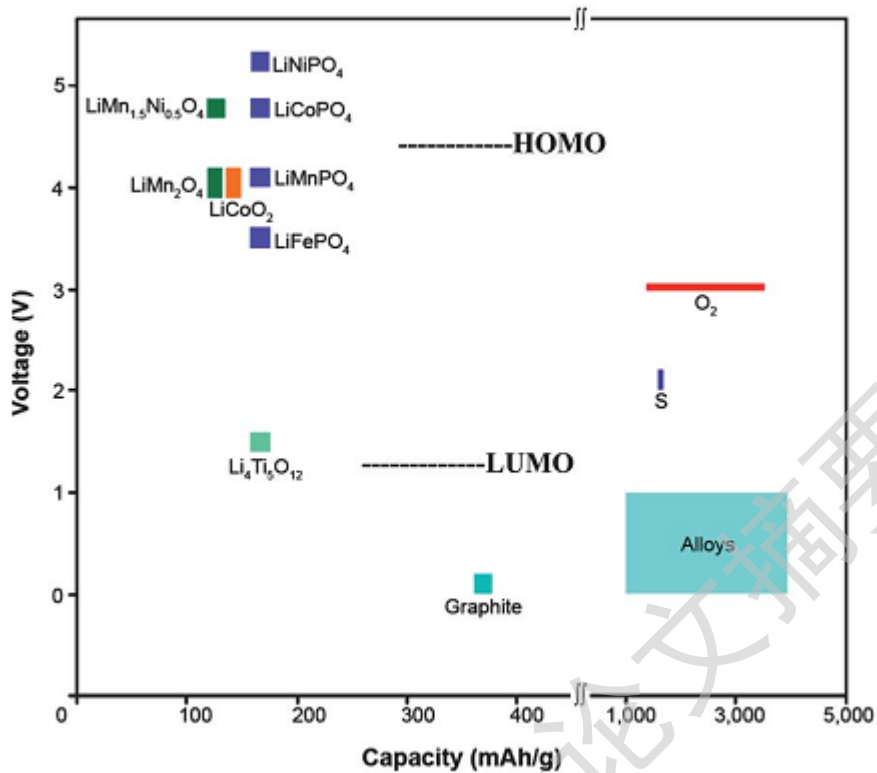


图2 锂离子电池电极材料的电压与比容量^[2]

Fig.2 Voltage versus capacity of electrode materials of LIB

表3 三代 iPhone 产品电池信息^[21]

Table 3 Battery information of iPhone products

产品	推出时间	电压上限/V	容量/mAh	体积能量密度/Wh·L ⁻¹
iPhone4	2010 年	4.2	1420	500
iPhone5	2012 年	4.3	1440	533
iPhone6	2014 年	4.35	1810	约 580

对于 LiCoO₂ 电池，一般将电压上限超过 4.3V 的电池归为高电压体系。其实现过程主要通过改善正极材料的结构稳定性和界面稳定性，常用的方法是对材料进行掺杂和包覆处理。随着电压的升高，充电过程中脱锂量增加，晶体结构的稳定性变差，一般认为 4.5V 将成为 LiCoO₂ 的耐压极限。对于电解液而言，4.5V 同样是一个分界线，目前商品化的电解液是由碳酸酯溶剂、锂盐 LiPF₆ 和添加剂组成，这种体系在 4.5V 以上会发生氧化分解，导致电池性能的快速恶化。然而，近年来一些 4.5V 以上的高电压正极材料开始成为研究热点，如尖晶石 LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄、聚阴离子型 LiCoPO₄ 及层状富锂材料等^[22-24]，其中尖晶石 LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄ 最有希望首先实现商用。LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄ 可以视作 Ni 取代了

LiMn₂O₄ 中的部分 Mn, 在 4.7V 附近有平稳的放电平台, 理论容量 146.7 mAh/g^[22]。LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄ 材料对电解液提出了更高的要求, 以常规碳酸酯 (EC、PC、DMC、DEC 及 EMC) 作为主溶剂的体系已不能满足要求, 必须大幅调整。

1.3 高电压电解液研究进展及产业化现状

开发 4.5V 以上的高电压电池, 正极材料及电解液尤为关键。常规电解液体系在 4.5V 以上即发生分解, 其解决思路是提高电解液组分的抗氧化性及电极/电解液界面的稳定性, 可从提高溶剂氧化电位和提高电解液与电极材料相容性出发。

根据前线轨道理论, 分子的最高占据轨道 (HOMO) 能量越低, 其抗氧化性越好。研究人员发现, 相比于传统的五大碳酸酯溶剂, 氟代溶剂、砜类溶剂及腈类溶剂等具有更高的抗氧化能力。

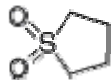

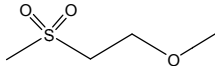
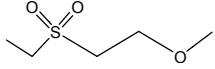
氟代溶剂具有较高的电化学稳定性, 这是由于 F 原子的强电负性和弱极性。碳酸酯溶剂被氟取代后, 抗氧化能力提高, 且有助于在负极表面形成 SEI 膜。如氟代碳酸乙烯酯 (FEC) HOMO 能量低于 EC, 因此氧化电位高于 EC。采用氟代溶剂作为共溶剂或添加剂可以提高电解液的电化学稳定性。研究还发现 FEC 亦能在正极表面形成保护膜, 这也有利于提高电极的循环稳定性^[25]。如 LiCoPO₄ 在基于 FEC/DMC 溶剂的电解液中, 循环性能优于以 EC/DMC 为溶剂的电解液; 对 LiCoPO₄ 电极的 XPS 测试表明, FEC 替代 EC 后, 电极表面的 F 增多, 但不是以 LiF 的形式, 而是以 PO_xF_y、PF_x 和 CF 的形式存在, 这种表面膜更加稳定^[25]。

砜类溶剂的热稳定性高于常规碳酸酯溶剂, 同时具有较好的电化学稳定性, 如环丁砜 (TMS) 和甲乙砜 (EMS) 的氧化电位均大于 5V; 但砜类化合物室温下一般为固体, 粘度低, 一般通过与现有碳酸酯类溶剂共同使用来降低熔点和粘度^[26-28]。砜类溶剂不能在石墨或锂负极表面形成稳定的 SEI 膜, 需要引入成膜添加剂。Watanabe 等^[26]研究发现 TMS 与锂负极的相容性较差, 但加入负极成膜添加剂 VC 便可以改善, 采用 1M LiBF₄-TMS/EA(1:1, v/v)+2%VC 的 LiCoO₂/Li 电池 (3-4.5V) 和 LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄/Li 电池 (3-5V) 表现出较好的电化学性能。Abouimrane 等^[27]报道采用 1M LiPF₆-TMS/EMC(1:1, v/v) 电解液的 LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄/Li₄Ti₅O₁₂ 电池, 循环性能优异, 2C 条件下循环 1000 次容量无明显衰减。Sun 等^[28]发现 1M LiTFSI/MEMS 的氧化电位达到 5.6V; 对于 LCO/石墨电池, 1M LiPF₆-MEMS 中添加 2%VC 后, 性能与 1M LiPF₆-EC/DMC(1:1, v/v)

相近。Shao 等^[29]发现，氟取代砜类化合物后，可进一步提高氧化电位。砜类溶剂改善与负极的相容性后，可以应用于高电压电解液。

表 4 砜类溶剂性质及含砜类溶剂电解液的电化学窗口^[29]





Table 4 Properties of sulfone solvents and electrochemical window of sulfone-based electrolytes



溶剂	结构式	熔点 (°C)	沸点 (°C)	窗口 (vs. Li/Li ⁺)
TMS		27	285	5.8
EMS		36.5	240	5.9
MEMS		15	275	5.6
EMES		2	286	5.6

一些腈类溶剂具有较高的电化学稳定性，如戊二腈 (GLN) 和己二腈 (ADN) 的电化学窗口高达 8.3V^[30]，稳定性高于大多数非质子溶剂；但与锂或石墨负极的相容性差，可以添加适量的 EC 来改善。癸二腈与 EC/DMC 组成溶剂后，以 LiBF₄ 为锂盐，在 6V 高电压下仍能保持电化学稳定，并且在此电解液中 LiNiPO₄F 可以在 5.3V 左右嵌脱锂^[31]。丁腈与 EC/EMC 组成溶剂后，与 EC/DMC 相比，LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄/MCMB 电池的常温性能基本维持不变，高温性能得到明显改善^[32]。

表 5 腈类溶剂性质及含腈类溶剂电解液的电化学窗口

Table 5 Properties of dinitrile solvents and electrochemical window of dinitrile-based electrolytes

溶剂	结构式	熔点 (°C)	沸点 (°C)	窗口 (V, vs. Li/Li ⁺)
GLN		-29	287	7.3
ADN		1	295	6.9
PMN		-31	175	7.0
SUN		-4	325	6.8

AZN		-18	209	-
SEN		8	200	7.2

碳酸酯类溶剂的理论氧化电位一般高于 5V，但由于正极材料中的过渡金属离子对电解液在正极表面的氧化反应具有催化作用，使得电解液在较低的电位（约 4.5V）即开始分解。研究发现，与负极成膜类似，电解液也可以在正极表面成膜，抑制正极对电解液的催化作用，提高电池的稳定性。但是正极表面膜形成后，在循环过程中并不稳定，尤其是在高电位和高温条件下，会发生分解，从而降低了对正极的保护作用。为了使正极表面膜更加稳定，可以引入成膜添加剂，参与表面膜的形成，获得更加稳定的正极保护层。根据前线轨道理论，分子的最高占据轨道（HOMO）能量越低，其抗氧化能力越强。正极成膜添加剂的氧化电位需低于碳酸酯溶剂，因此 HOMO 值应高于溶剂分子。

常见的正极成膜添加剂主要有芳香族化合物（联苯、呋喃、噻吩、N-甲基吡咯等）和硅烷化合物（TEOS、HMDS 等）两大类，新型锂盐如 LiBOB 等也能起到成膜添加剂的作用。表 6 列出了部分正极成膜添加剂的 HOMO 值及氧化电位^[33]。这些化合物在正极表面聚合形成的表面膜同时具有良好的导电性，可以降低界面阻抗，有利于提高电化学性能。首次充电过程中，正极成膜添加剂在正极表面分解形成保护层，使得正极表面膜更加稳定，降低了电解液在正极表面的氧化分解，减少 LiF 在正极表面的沉积，从而提高电池的循环寿命。

表 6 部分添加剂的 HOMO 值及氧化电位

Table 6 HOMO energies and oxidation potentials of additives

化合物	BP	Furan	Thiophene	EDT	EC	DMC
HOMO (eV)	-8.92	-9.38	-9.64	-8.98	-11.8	-11.6
氧化电位 (V)	4.5	4.3	4.4	4.0	5.5	5.3

Xing 等^[23]发现添加 0.1wt.% 噻吩可以提高 LiCoPO₄/Li 电池的循环性能，TEM 测试发现循环 5 周后噻吩在 LiCoPO₄/C 表面形成了 3-5nm 的保护层。Lee 等^[34]研究发现噻吩和 3,4-乙烯二氧噻吩（EDT）均能改善 LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O₂/MCMB 电池（3.0-4.5V 和 3.0-4.6V）的循环性能，交流阻抗测试表明这两种添加剂可以减小充放电循环过程中界面膜阻抗和电荷转移阻抗的增加。TEM 测试发现噻吩在 LiNi_{1/3}Co_{1/3}Mn_{1/3}O₂ 颗粒表面形成了一层约 20nm 的导电聚合物膜，从而减小

电极的阻抗，提高电极的化学稳定性和热稳定性。

一些磺酸酯类化合物和含硅、硼、磷的有机物可以改善高电压下电池的性能。Zuo 等^[35]研究发现甲烷二磺酸亚甲酯 (MMDS) 满足正极成膜的条件。线性扫描发现，在铂电极上标准电解液 (1M LiPF₆-EC:EMC (1:2, w/w)) 在 5.3V 氧化分解，而添加 MMDS 后在 5.1V 即氧化分解，说明 MMDS 的氧化电位低于溶剂。充放电测试结果表明，标准电解液中添加 0.5 wt.% MMDS，LiCoO₂/石墨电池的循环性能明显改善。XPS 测试表明 MMDS 参与了正极表面膜的形成。Liu 等^[36]通过添加三 (三甲基硅烷) 硼酸酯 (TMSB) 改善 LiMn₂O₄/Li 电池 (3-4.5V) 的常温和高温循环性能，采用的标准电解液是 1M LiPF₆-EC/DMC (1/1, w/w)。XPS 测试表明，添加 0.5wt.%TMSB 后在正极表面形成了更多的 R-CH₂OCO₂-Li 或聚碳酸酯，而未添加 TMSB 的正极表面含有更多的无机物如 Mn_xO_y 和 Li₂CO₃；另外添加 TMSB 的正极表面还发现了与 C-O-Si 键和 B-O 键有关的峰，说明 TMSB 参与了正极表面膜的形成。TMSB 作为缺电子化合物，容易与电负性强的 F 结合，从而增加 LiF 在电解液中的溶解，减少 LiF 在正极表面的沉积，降低界面阻抗。三甲基硼氧环烷 (TMB) 可以提高 LiCoPO₄/Li 电池 (3.5-5.2V) 的循环稳定性^[25]，原因可能与其缺电子化合物的特性有关。Allen 等^[37]发现三磷酸六氟异丙基酯 (HFIP) 可以提高 Li_{0.92}Co_{0.8}Fe_{0.2}PO₄/Li 电池 (2.5-5.3V) 的循环性能。

LiBOB 是近年来研究较热的一种新型锂盐，具有热稳定性高、能在石墨负极成膜、不会产生 HF 腐蚀电极材料等优点^[38,39]，但是溶解度及电导率均低于 LiPF₆。Ha 等^[40]研究发现 LiBOB 作为添加剂时也能在正极成膜，在 1.3M LiPF₆-EC/EMC/DMC(3:4:3, v/v)电解液中添加 1 wt.% LiBOB，发现 LiBOB 可以提高 LiNi_{0.5}Mn_{1.5}O₄/Li 电池的高温循环性能和库仑效率。观察电池充电后隔膜的颜色变化，发现充电至 4.6 V 隔膜颜色基本无变化，但充电至 5.0 V 时，未添加 LiBOB 的隔膜中出现棕色痕迹，而添加 LiBOB 的隔膜基本无变化，这是由于电解液在 4.6V 以上发生氧化分解，颜色变为棕色，导致隔膜颜色变化，而添加 LiBOB 后充电时正极表面生成了保护膜，抑制了电解液的分解。XPS 研究表明，F 1s 和 P 2p 谱中，与 LiF 和 Li_xPO_yF_z 相关的峰减弱，说明 LiBOB 在正极形成的表面膜阻止了的 LiPF₆ 的分解；ATR-FTIR 测试表明，与 ROCO₂Li 及 P-F 键有关的峰 (源于 LiPF₆ 的分解) 减弱，是由于 LiBOB 形成了稳定的表面膜，减少了

电解液的分解。Liu 等^[41]在 1M LiPF₆-EC/DEC(1:1, v/v)中添加 1wt.%LiBOB 作为 LiCoPO₄/Li 电池的电解液, 效果较好。Wu 等^[42]研究 LiBOB 和 LiDFOB 作为添加剂对 xLi₂MnO₃·yLiMO₂/石墨电池的影响, 发现 LiODFB 形成的界面膜更加稳定, 界面阻抗更低, 对电池循环性能的改善更佳。Hu 等^[43]向 1M LiPF₆-EC/PC/EMC(1:1:3, v/v)中添加 5wt.% LiODFB, LiCoPO₄/Li 电池的放电容量从 116.7 提高到 138.2mAh/g, 循环 40 周的容量保持率从 34%提高到 69.4%, 分析认为 CV 曲线中第一周 4.35V 处的氧化峰对应 LiODFB 的分解, XPS 测试也证实 LiODFB 在正极表面分解形成了钝化膜, 抑制了正极材料对电解液分解的催化作用。

材料制备技术的进步及电解液添加剂的应用, 使传统的 LiCoO₂/C 电池体系潜能逐渐释放, 充电电压由 4.2V 逐步提升至 4.4V。对于 4.5V 以上高电压电池, 尽管实际应用面临较大难度, 但研究热度始终不减, 技术突破可期。

1.4 研究目的、内容及意义

本论文以产业化应用为目标, 主要关注在常规电解液基础上的改善。为使常规电解液满足在高电压条件下工作的需求, 一般从溶剂和成膜添加剂两方面来改进。具体研究对象是, (1) 具有高氧化电位的氟代溶剂、砜类溶剂、腈类溶剂等; (2) 能够改善界面稳定性的添加剂。

2 高电压电解液溶剂选择

2.1 实验方法

采用三电极装置（工作电极-参比电极-对电极：Pt-Li-Pt）及辰华电化学工作站（CHI660D）测试电解液的氧化电位。

采用新威电池性能测试系统（BTS-3000）进行电池化成及循环性能测试。

采用 LNMO/石墨电池评价电解液的高电压性能表现。

2.2 实验电池选择

对三批 LNMO/石墨电池（见下表）进行了评测，电压范围是 3.50-4.85V。电芯注液前真空干燥 48h，注液后在 35℃环境下搁置 12-18h。

电池编号	正极	电池容量	注液量
1#	LNMO	645mAh 铝壳	2.8g
2#	未包覆 LNMO	1.2Ah 软包	4.8g
3#	包覆 LNMO	1.2Ah 软包	4.8g

(1) 电池化成（0.1C、4.85V）

电池编号	注液量/g	充电容量/ mAh	放电容量/ mAh	效率/%	厚度 /mm	内阻 /mΩ	电压 /V
1#-1	2.800	694.8	462.8	66.60	4.56	69	4.45
1#-2	2.837	706.7	502.5	71.10	4.42	69	4.37
1#-3	2.808	681.3	464.0	68.11	4.83	67	4.44
1#-4	2.854	684.6	456.5	66.67	4.94	69	4.44
1#-5	2.700	676.9	437.7	64.67	4.68	74	4.44
平均值	2.800	688.9	464.7	67.43	4.69	70	4.43
2#-1	/	1024.2	618.5	60.39	4.03	29	4.50
2#-2	/	933.5	599.2	64.19	3.99	27	4.49
2#-3	/	952.8	618.1	64.87	4.18	29	4.48
2#-4	/	898.3	585.7	65.20	4.05	27	4.48
2#-5	/	942.8	616.0	65.34	4.17	27	4.48
平均值	/	950.3	607.5	64.00	4.08	28	4.49
3#-1	/	906.3	559.6	61.74	3.97	27	4.47
3#-2	/	887.2	538.6	60.71	4.04	27	4.47
3#-3	/	930.3	593.9	63.84	4.01	27	4.46
3#-4	/	924.7	587.9	63.57	3.96	27	4.46

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.