

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.07.022

孔结构调控对锂电池聚乙烯隔膜性能及应用影响

薛兵¹, 陈燕², 李帅², 刘庆华¹

(1. 中国科学技术大学核科学技术学院, 合肥 230011; 2. 合肥国轩高科动力能源有限公司, 合肥 230011)

摘要:聚乙烯(PE)隔膜是锂离子电池的核心隔离材料,但其固有孔隙结构缺陷易造成离子传输、力学安全与高温稳定性能难以协同匹配,存在内阻偏高、界面稳定性差、长循环性能不均衡等问题。为解决聚烯烃隔膜多性能权衡矛盾,通过调控湿法双向拉伸与热定型工艺,制备孔隙结构差异化的超高分子量PE基膜,并结合Al₂O₃/聚偏氟乙烯复合涂覆技术,制备厚度12 μm的改性隔膜,探究孔隙参数对隔膜及电池性能的影响规律。结果表明,孔结构优化可显著降低离子传输阻力,隔膜透气度由204.83 s/100 mL降至73.53 s/100 mL,离子电导率提升至1.55 mS/cm;孔隙率是降低电池内阻的关键因素,孔径调控对内阻的优化效果影响较低。高孔隙大孔径结构虽轻微降低力学性能,但隔膜最低穿刺强度可达4.32 N,满足电池安全标准。复合涂层有效改善热稳定性,隔膜130 °C热收缩率均低于1.5%。小孔径隔膜表现出优异的高温存储性能,在55 °C下存放7 d的容量保持率达98.26%;大孔径隔膜长循环性能更佳,1 200次循环容量保持率达92.19%。该研究阐明了隔膜孔隙结构的性能权衡机制,为高性能锂电隔膜优化设计提供参考。

关键词:锂离子电池;聚乙烯隔膜;孔隙率;孔径结构;循环性能

中图分类号:TQ324.8 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2026)07-0192-07

Effects of pore structure regulation on performance and application of polyethylene separators for lithium batteries

XUE Bing¹, CHEN Yan², LI Shuai², LIU Qinghua¹

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230011, China;

2. Hefei Gotion High-Tech Power Energy Co., Ltd., Hefei 230011, China)

Abstract: Polyethylene (PE) separators are critical insulating materials of lithium-ion batteries, but their inherent porous structural defects can easily lead to the difficulty in achieving a coordinated match between ion transport, mechanical safety and high-temperature stability, resulting in issues such as high internal resistance, poor interfacial stability and uneven long-cycle performance. To address the trade-off between multiple performances of polyolefin separators, a ultra-high molecular weight PE-based membrane with differentiated pore structures was prepared by adjusting the wet-process biaxial stretching and thermal setting process. Combined with a composite coating technology of Al₂O₃/polyvinylidene fluoride, a modified separator with a thickness of 12 μm was fabricated to investigate the effect of pore parameters on separator and battery performance. The results show that optimized pore structure can significantly reduce ion transport resistance, decrease air permeability of separator from 204.83 s/100 mL to 73.53 s/100 mL, while the ionic conductivity increases to 1.55 mS/cm. Porosity is a key factor in reducing internal resistance of battery, while pore size regulation has a relatively minor effect on optimizing internal resistance. Although the high-porosity, large-pore structure slightly reduces mechanical performance, the separator's minimum puncture strength can reach 4.32 N, meeting battery safety standards. The composite coating effectively improves thermal stability, with the separator's thermal shrinkage at 130 °C below 1.5%. Separators with small pores exhibit excellent high-temperature storage performance, with a 7-day capacity retention of 98.26% at 55 °C. Separators with large pores show better long-cycle performance, with a capacity retention of 92.19% after 1 200 cycles. This study clarifies the trade-off mechanism of pore structure performance in separator and provides a reference for the optimized design of high-performance lithium battery separators.

Keywords: lithium-ion battery; polyethylene separator; porosity; pore structure; cycling performance

基金项目: 国家自然科学基金项目(22241202)

通信作者: 刘庆华, 博士, 副研究员, 博士生导师, 研究方向为先进能源与催化材料

收稿日期: 2026-05-07

引用格式: 薛兵, 陈燕, 李帅, 等. 孔结构调控对锂电池聚乙烯隔膜性能及应用影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(7): 192-198.

XUE Bing, CHEN Yan, LI Shuai, et al. Effects of pore structure regulation on performance and application of polyethylene separators for lithium batteries[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(7): 192-198.

锂离子电池凭借其能量密度高、循环使用寿命长和绿色环保等优势,现已广泛应用于便携式电子产品、新能源汽车以及大型储能设备等诸多领域^[1-3]。随着应用场景对能量密度和功率密度要求的不断提升,锂离子电池的安全性问题已成为制约其规模化应用与持续发展的重要瓶颈^[4-5]。

隔膜作为锂离子电池的核心组件之一,虽然不直接参与电化学反应,却同时承担物理隔离和离子传输两项关键功能^[6]。一方面物理隔离正负极以防止内部短路;另外一方面为锂离子迁移提供通道;以及在热失控风险升高时通过关闭孔道阻断离子传输。因此理想的隔膜应兼具高孔隙率、适宜的孔径与分布、良好的电解液润湿性、优异的力学强度以及高温尺寸稳定性^[7]。

目前,聚乙烯(PE)、聚丙烯等聚烯烃隔膜凭借化学稳定性好、力学性能优良、成本低廉等优势,在锂电隔膜市场中占据主导地位^[8-9]。然而,传统聚烯烃隔膜存在明显的性能短板:首先,这类隔膜热稳定性较差,在高温下易发生显著热收缩,导致正负极直接接触而引发短路,甚至引发热失控^[10];其次,聚烯烃材料的疏水特性导致其对极性电解液的浸润性不佳,限制了离子传输效率^[11];此外,隔膜的孔隙结构直接决定了锂离子的传输路径与阻力,进而对电池的倍率性能与循环稳定性产生重要影响^[12-13]。

陶瓷涂覆是改善聚烯烃隔膜热稳定性和电解液浸润性的常用策略^[14-15]。研究表明,在聚烯烃基膜表面涂覆 Al_2O_3 、 SiO_2 、勃姆石等无机陶瓷颗粒,能够显著提高隔膜抑制热收缩的能力和电解液保持能力^[16-17]。与此同时,基膜孔隙结构本身仍是决定隔膜综合性能的基础因素。湿法双向拉伸工艺能够通过调控拉伸比、热定型温度等参数,实现对PE基膜孔径、孔隙率及孔道连通性的调控^[18-19]。已有研究证实,孔隙率和平均孔径会显著影响透气度、离子电导率等传输性能^[20-22]。但对于涂胶、涂陶瓷PE隔膜而言,基膜孔隙结构如何与复合涂层共同影响力学性能、热稳定性及电池循环/存储行为,仍缺乏系统认识。

基于上述背景研究,本文通过湿法双向拉伸工艺及热定型工艺调控聚PE基膜孔隙结构,并进一步进行 Al_2O_3 /聚偏氟乙烯(PVDF)复合涂覆,制备具有不同孔隙率和平均孔径的涂胶陶瓷PE隔膜。结合场发射扫描电子显微镜(FESEM)、孔隙率、平均孔

径、透气度及离子电导率等多维表征手段,并结合53 Ah方壳磷酸铁锂电池的内阻、存储和循环测试,建立孔隙结构与隔膜/电池性能之间的关联,明确传输性能、界面稳定性和安全性能之间的权衡关系。

1 实验部分

1.1 主要原材料

超高分子量聚乙烯(PE-UHMW): VH150U, 黏均分子量150万, 大韩油化工业株式会社;

白油: 50#, 工业级, 浙江正信石油科技有限公司;

二氯甲烷: 分析纯, 山东恒硕化工有限公司;

Al_2O_3 : 纯度99.9%, 山东国瓷功能材料股份有限公司;

PVDF: 纯度99.9%, 阿科玛(中国)投资有限公司。

1.2 仪器及设备

上料系统、熔融挤出系统、双向拉伸系统、萃取系统、热定型系统等: 株式会社日本制钢所;

陶瓷涂覆和喷涂涂覆设备: 深圳市新嘉拓自动化技术有限公司;

FESEM: NOVA NANO SEM 450, 上海禹重实业有限公司;

测厚仪: MillimarC 1216, 德国马尔集团;

压水孔隙率仪: AAQ-3K-A-1; 美国多孔材料公司;

透气度仪: Gurley-4340, 美国格利精密仪器公司;

万能材料试验机: 3340单立柱, 英斯特朗公司;

二次元影像测量仪: XTY3020, 宁波雄鹰检测设备有限公司。

1.3 试样制备

1.3.1 基膜制备

通过计量泵分别将一定质量的白油及PE-UHMW加入双螺杆挤出机中, 设置双向拉伸倍率MD(拉伸方向) $\times$ TD(垂直方向)为 9×7 , 通过调节熔融温度、双向拉伸倍率及温度、热定型温度, 制备得到不同孔隙率和不同平均孔径的PE-UHMW隔膜; 具体工艺参数见表1。

1.3.2 成品膜制备

把固含量为35%的 Al_2O_3 和固含量为12%的PVDF分别分散在去离子水中, 得到两种涂层浆料。先用凹版辊涂覆厚度为2 μm 的陶瓷涂层, 然后利用

表1 不同隔膜的工艺参数

Tab. 1 Parameters of different separators

Sample	Porosity/%	Average pore size/ nm	w(PE)/%	Melting tempera- ture/°C	Tensile tempera- ture/°C	Heat setting ratio	Heat setting temper- ature/°C
A	36	35.6	20	220	110-120	1.5	135
B	42	36.6	18	205	110-118	1.5	135
C	53	37.9	15	200	108-115	1.5	136
D	53	42.4	16	200	109-116	1.5	135
E	53	54.4	18	205	110-118	1.7	135

旋转喷涂在陶瓷涂层表面涂覆厚度为3 μm的PVDF涂层,最后分切成相应幅宽的成品隔膜。

1.3.3 电池制备

以磷酸铁锂(LiFePO₄)为正极活性物质,石墨为负极活性物质,搭配上述成品隔膜,经过卷绕、组装、烘烤、注液、封口、分容等工序,制备成53 Ah方壳铁锂电池,用于后续电性能测试。其中,电解液为1 mol/L LiPF₆的碳酸乙烯酯(EC)/碳酸二甲酯(DMC)/碳酸甲乙酯(EMC),体积比1:1:1。

1.4 测试与表征

微观形貌测试:所有隔膜样品通过溅射喷金处理,然后采用FESEM观察样品表面微观形貌。

厚度测试:采用测厚仪对隔膜的厚度进行测试,测试方法参考GB36363-2018进行。

孔隙率测试:采用压水孔隙率仪对样品进行测试,按照GB/T 2411-2008进行测试,每个样品测试3次,取平均值作为测试结果。

透气度测试:采用透气度仪测试100 mL空气穿过隔膜所需时间(s/100 mL),每个样品测试3次,取平均值作为测试结果。

穿刺强度测试:采用万能材料试验机对样品进行测试,穿刺针直径1 mm,试验速度100 mm/min,每个样品测试5次,取平均值作为测试结果。

采用电化学工作站对样品进行离子电导率测试,测试步骤参考GB/T 36363-2018进行。具体步骤如下:裁取和电阻测试模具适配的隔膜,将隔膜样品放置于电解液中(电解液为1 mol/L LiPF₆-EC/DMC/EMC,体积比1:1:1),浸泡2 h后,测试交流阻抗电阻;频率范围为0.005~5×10⁵,奈奎斯特图中曲线斜率可以近似为隔膜的电阻值;离子电导率σ可以通过公式(1)计算得出,其中σ是离子电导率;d为隔膜的厚度;S是样品的面积;R是电阻值。每个样品测试3次,取平均值作为测试结果。

$$\sigma = \frac{d}{R \times S} \quad (1)$$

热收缩率测试:采用二次元影像测量仪测试隔

膜的热收缩率,先测试样品隔膜在横向和纵向两个方向上的尺寸L₀,将隔膜在130 °C环境下烘烤1 h后,冷却至室温,测试其尺寸L₁;热收缩率(T_s)按照公式(2)计算。

$$T_s = \frac{L_0 - L_1}{L_0} \times 100\% \quad (2)$$

本研究所有电池性能测试均按照GB/T31486-2024进行。电池采用标准化充放电制度进行测试:充电过程以1 C倍率进行恒流恒压充电,上限电压设为3.65 V,充电截止电流为0.05 C;放电过程以1 C恒流方式放电,下限截止电压为2 V。电池直流内阻选取5 C放电电流、持续放电10 s的测试条件进行测定。为保证测试数据准确可靠,所有待测电池在正式试验前均进行容量标定处理,在1 C充放电倍率下连续循环5次,取多次测试容量均值作为电池的标准额定容量。

高温存储稳定性测试:将电池置于55 °C恒温环境中静置7 d,静置完成后分别测试电池剩余容量与恢复容量,进而计算对应的容量保持率与容量恢复率。

电池循环寿命测试:在25 °C恒温条件下进行,采用1.3 C阶梯充电匹配1 C恒流放电的测试制度,持续开展循环试验,通过实时监测不同循环次数下的电池容量衰减情况,评估电池的长期循环保持能力。

2 结果与讨论

2.1 工艺参数对隔膜孔隙结构的调控

本文采用湿法双向拉伸及热定型工艺制备五款PE基膜,并进一步进行Al₂O₃/PVDF复合涂覆,获得五款7+2+3型涂胶、涂陶瓷PE隔膜(总厚度12 μm),依次记为A、B、C、D、E隔膜。通过调控基膜制备过程中的拉伸温度、热定型温度及倍率等工艺参数,实现了对隔膜孔隙结构的有效调控。A、B、C具有相近平均孔径而孔隙率逐步提高,C、D、E具有相同孔隙率而平均孔径逐步增大,可用于区分孔隙率和

孔径对隔膜性能的影响。

采用泡点法对平均孔径进行定量表征,A、B、C、D、E隔膜的平均孔径分别为35.6、36.6、37.9、42.4、54.4 nm。图1为隔膜的微观形貌图。图1结果显示,在隔膜表面出现大量圆形微孔结构,这是白油在拉伸过程中逐渐析出至表面,被二氯甲烷萃取后留下的孔结构。上述结果表明,通过湿法双向拉伸及热定型工艺的精细调控,能够有效调节PE隔膜的孔径大小与孔隙率水平,为后续建立孔结构与各项性能之间的关联奠定了材料基础。

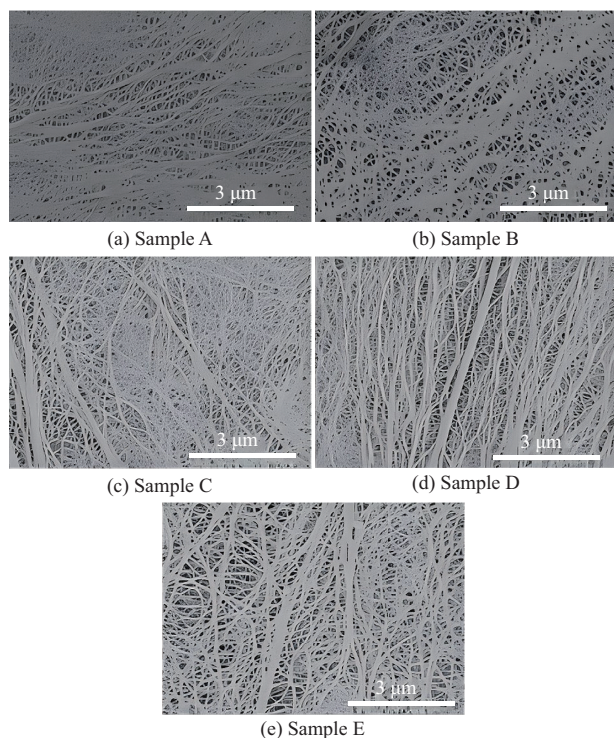


图1 不同隔膜的微观形貌图

Fig. 1 Micrograph of different separators

2.2 隔膜孔隙结构对传输通道的影响

几款隔膜厚度均为12 μm,因此孔隙结构差异是影响传输性能的主要因素。

曲折度用于表征孔道的弯曲程度,数值越低表明孔道越趋于直通,越有利于离子快速传输^[23]。如图2所示,当平均孔径相近,孔隙率逐渐增大时,曲折度明显降低;当孔隙率保持一致时,增大孔径同样可降低曲折度。这可能是因为当孔隙率和孔径增大时,传输路径趋于直通,离子在隔膜内部通道绕行的距离变小,曲折度降低。曲折度的实验结果表明,增大孔隙率或者提高平均孔径能有效降低孔道的弯曲程度,这与理论预期一致——更高的孔隙率和更大的孔径减少了离子在孔道内绕行的概率,

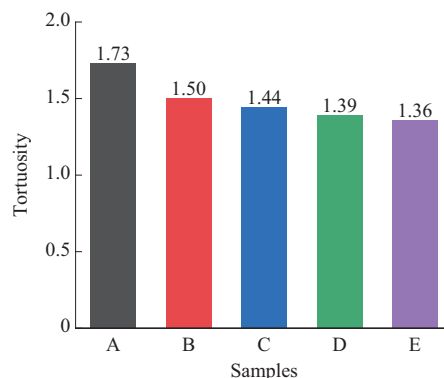


图2 不同隔膜的曲折度

Fig. 2 Tortuosity of different separators

使传输路径更趋直通。

隔膜的透气度结果如图3所示。当平均孔径相近,透气度随孔隙率升高而下降;对于孔隙率相同的C、D、E样品,Gurley值随平均孔径增大而进一步降低。由于Gurley值越低代表气体通过隔膜的阻力越小,上述结果表明孔隙率和孔径的提高均可增强孔道贯通性。良好的透气性可减少电池充放电过程中锂离子传输阻力、降低电极极化,对提升电池倍率性能具有积极意义^[24]。

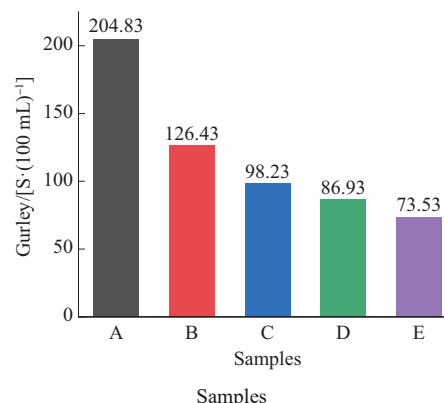


图3 不同隔膜的透气度

Fig. 3 Gurley value of different separators

离子电导率是评价隔膜离子传输能力的关键性能指标,直接反映锂离子在隔膜孔道结构内部的迁移行为^[25]。A、B、C、D和E隔膜的离子电导率见表2,分别为0.69、0.75、1.23、1.43、1.55 mS/cm。相比于纯PE隔膜和PE/Al₂O₃隔膜,成品膜的离子电导率整体提高,这是由于成品隔膜表面的Al₂O₃和PVDF涂层可以吸收大量电解液,提高隔膜的浸润性,从而降低离子传输阻力,增大离子电导率。

综上所述,提高孔隙率和增大平均孔径,均有利于构建更连续、更低阻的离子传输网络。其中,孔隙率主要决定有效传输通道数量,平均孔径则进

一步影响局部传输阻力、二者共同作用于隔膜传输性能^[26]。

表2 不同隔膜的离子电导率

Tab. 2 Ionic conductivity of different separators

Samples composition	A	B	C	D	E
PE	0.62	0.69	1.07	1.19	1.32
PE/Al ₂ O ₃	0.64	0.72	1.15	1.26	1.43
PE/Al ₂ O ₃ /PVDF	0.69	0.75	1.23	1.43	1.55

2.3 隔膜孔隙结构对力学性能的影响

隔膜的力学强度直接影响电池的组装和使用安全,在长周期循环过程中会产生锂晶枝,若锂晶枝刺穿隔膜,可能会导致正负极直接接触并引发内部短路^[27]。因此,隔膜须具有足够的抗穿刺能力,如图4所示。由图4可知,五款隔膜中E隔膜的穿刺强度最低,为4.32 N。结合孔结构结果可知,E隔膜具有较高孔隙率和较大平均孔径,局部致密性降低,从而削弱了基膜及涂覆后成品膜的抗穿刺能力。与市售商用聚烯烃类隔膜(厚度16~25 μm,绝对穿刺强度2.94~4.90 N)相比,本研究制备的12 μm隔膜穿刺强度均在440.28 gf以上,仍处于较高水平。由此可见,高孔隙率和大孔径会带来一定力学代价,但在本研究范围内,隔膜力学性能仍可满足电池装配及抵抗锂枝晶穿刺的基本要求。

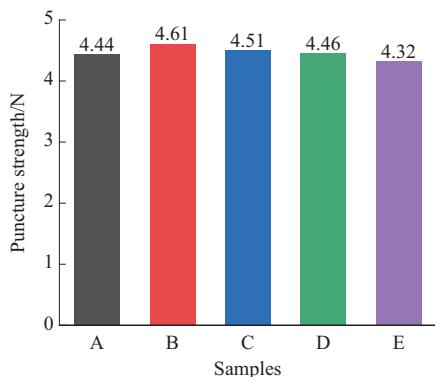


图4 不同隔膜的穿刺强度

Fig. 4 Puncture strength of different separators

2.4 隔膜孔隙结构对热稳定性的影响

热收缩率是评价高温状态下隔膜尺寸稳定性的核心指标,直接关系电池安全性。电池注液前需在高温真空环境中烘干,要求隔膜无明显收缩或起皱。图5为隔膜在TD和MD方向上的热收缩率。由图5可知,隔膜在130℃下烘烤1 h后,MD方向热收缩率为0.36%~1.21%,TD方向为0.95%~1.46%,其中E隔膜MD方向热收缩率低至0.36%。与未改

性纯PE隔膜在相同条件下通常较高的热收缩相比,涂胶涂陶瓷隔膜表现出明显改善,且与市售陶瓷涂覆隔膜的典型水平相当。这一优异的热稳定性主要归因于表面陶瓷涂层的高耐热性及PVDF胶层与PE基膜之间的界面锚定作用,二者共同抑制了高温下PE高分子链的松弛与宏观尺寸收缩。值得注意的是,在相同涂覆工艺下,不同样品的热收缩率仍存在差异,说明基膜孔隙结构可能通过影响涂层渗入、附着和应力释放行为,进一步调节成品隔膜的热稳定性。

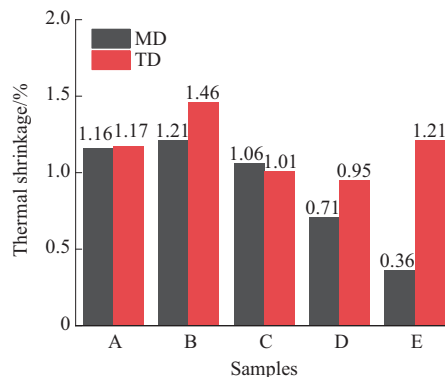


图5 隔膜在TD和MD方向上的热收缩率

Fig. 5 Thermal shrinkage rate of the separators in MD and TD directions

2.5 隔膜孔隙结构对电化学性能的影响

为进一步评价孔隙结构对电池性能的影响,选取具有代表性的A、B、C和E四款成品隔膜,制备53 Ah方壳磷酸铁锂电池,并进行后续电性能测试。

电池内阻是直接影响锂离子电池电化学性能的重要参数,其中交流内阻(ACR)主要体现电池内部的欧姆阻抗特性,直流内阻(DCR)能够综合反映电池在实际放电工况下的极化响应特征,如图6所

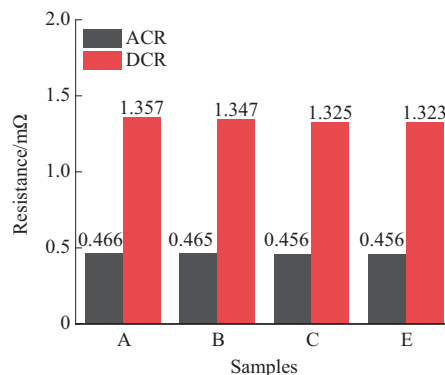


图6 由隔膜装配的锂离子电池的ACR和DCR

Fig. 6 ACR and DCR of lithium-ion batteries assembled with different separators

示。由图6可知,随着孔隙率和孔径增大,电池ACR和DCR整体降低;但在孔隙率相同而平均孔径差异较大的样品之间,ACR和DCR变化相对较小。这表明孔隙率是降低电池内阻的主导因素,平均孔径对内阻的影响相对较低。当孔隙率已达到较高水平时,继续增大孔径对内阻的边际改善有限,此时隔膜/电极界面接触、电解液浸润和涂层结构等因素对内阻的贡献相对提高。

结合离子电导率与内阻测试结果可知,提高孔隙率并适度增大孔径是改善离子传输、降低电池内阻的有效途径。对于隔膜结构设计而言,应优先保证合理较高的孔隙率,并在力学强度和热稳定性允许的范围内调控平均孔径,以实现传输性能与安全性能的协同优化。

2.6 隔膜孔隙结构对电池存储稳定性的影响

存储稳定性是评估隔膜与电解液界面兼容性的重要指标。图7为由隔膜装配所得的锂离子电池的容量。由图7可知,在55℃条件下存储7d后,A隔膜组装电池表现最优,高温下的容量保持率和容量恢复率分别为98.26%和99.17%。随着孔隙率的增大,隔膜对电子的阻碍能力变弱,容量保持率出现轻微下降。

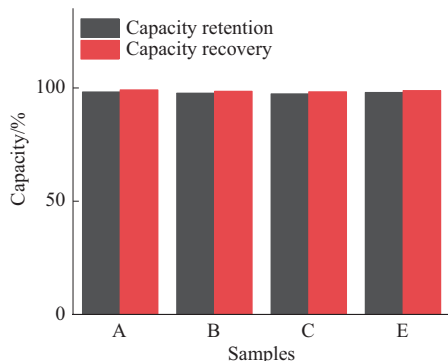


图7 由隔膜装配所得的锂离子电池的容量

Fig. 7 The capacity of lithium-ion batteries assembled with different separators

2.7 隔膜孔隙结构对电池循环性能的影响

循环性能是锂离子电池使用寿命的主要指标。图8为由隔膜装配所得的锂离子电池的循环数据图。图8显示,在1 C/1 C充放电倍率下,四款隔膜组装电池在循环初期(前30圈)均出现一定程度的容量“抬头”现象。这可能与电池定容阶段活性物质未完全浸润、电极材料未充分活化有关;随着循环进行,电解液对电极及隔膜的浸润逐步改善,电极材料的可逆容量逐渐得到充分发挥,因而容量先升

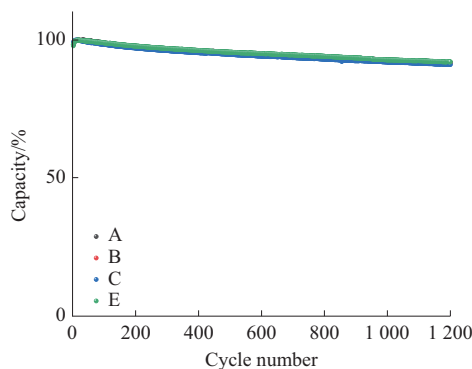


图8 由隔膜装配所得的锂离子电池的循环性能曲线

Fig. 8 Cycle performance curves of batteries assembled with different separators

高后趋于衰减。随后,电极材料结构退化、界面副反应累积以及锂源消耗等因素逐渐占主导,容量开始缓慢下降。循环1200圈后,A、B、C、E隔膜组装电池的容量保持率分别为92.01%、91.90%、91.21%和92.19%,其中E隔膜最高。结合表2可知,E隔膜具有最高离子电导率,有利于降低锂离子迁移阻力、缓解循环过程中的极化积累,从而改善长循环性能。值得注意的是,A隔膜离子电导率最低,但1200圈后容量保持率与E隔膜接近,并高于B和C隔膜,说明循环性能并非只由离子传输能力决定;较小孔径和较低孔隙率带来的界面稳定性同样有助于减缓副反应和容量衰减。四款隔膜1200圈循环后容量保持率均超过91%,且无容量急剧下降现象,说明涂胶、涂陶瓷PE隔膜在长期充放电过程中能够保持较好的结构完整性、离子传输连续性和界面稳定性,并可有效降低锂枝晶穿刺及局部内短路等失效风险。

综上所述,小孔径和相对低孔隙率结构更有利于增强界面稳定性和高温存储性能;大孔径和高孔隙率更利于离子传输效率和长循环性能,高性能隔膜设计不应单纯追求更大的孔径或更高的孔隙率,而应在保液能力、离子传输效率、界面稳定性和力学安全之间取得平衡。

3 结论

(1)通过调控湿法双向拉伸及热定型工艺参数,成功制备了五种不同孔隙结构的PE-UHMW基涂胶、涂陶瓷隔膜。

(2)提高孔隙率和增大平均孔径均可降低隔膜曲折度和透气度,并提升离子电导率;其中E隔膜的离子电导率最高,达1.55 mS/cm。

(3)所有隔膜的穿刺强度均高于4.32 N,满足抵

抗锂枝晶穿刺的基本要求;且热稳定性优异,具有应用潜力。

(4)孔隙率是降低电池内阻的主导因素,孔隙率增大会持续降低ACR和DCR,而孔隙率相同时进一步增大孔径对内阻改善有限。

(5)小孔隙结构有利于高温存储稳定性:A隔膜(平均孔径35.6 nm)在55℃存储7天后容量保持率和容量恢复率分别达到98.26%和99.17%。

(6)四款隔膜组装电池循环1 200圈后的容量保持率均超过91%,其中E隔膜最高,为92.19%。总体来看,高性能PE隔膜设计需在离子传输效率(高孔隙率、大孔径)与界面稳定性和力学安全(相对低孔隙率、小孔径)之间实现平衡。

参考文献

- [1] ARORA P, ZHANG Z J. Battery separators[J]. Chemical Reviews, 2004, 104(10):4 419–4 462.
- [2] ZHANG S S. A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2007, 164(1):351–364.
- [3] LAGADEC M F, ZAHN R, WOOD V. Characterization and performance evaluation of lithium-ion battery separators[J]. Nature Energy, 2019, 4(1):16–25.
- [4] LUO W, CHENG S L, WU M, et al. A review of advanced separators for rechargeable batteries[J]. Journal of Power Sources, 2021, 509. DOI:10.1016/j.jpowsour.2021.230372.
- [5] LEE H, YANILMAZ M, TOPRAKCI O, et al. A review of recent developments in membrane separators for rechargeable lithium-ion batteries[J]. Energy & Environmental Science, 2014, 7(12):3 857–3 886.
- [6] HUANG X S. Separator technologies for lithium-ion batteries[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2011, 15(4):649–662.
- [7] PERMATASARI A, SO M, NGUYEN V L, et al. Porosity and tortuosity dynamics and their impact on lithium-ion battery performance with different separator structures[J]. Journal of Power Sources, 2025, 647. DOI:10.1016/j.jpowsour.2025.237278.
- [8] DING L, LI D D, ZHANG Y J, et al. Separator structural-chemical features dependency on lithium-ion battery performances[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 96. DOI: 10.1016/j.est. 2024. 112656.
- [9] KIM U T, JO M H, AHN H J. Multifunctional boehmite grafting on Al₂O₃-coated polypropylene separators for fire-retardant and fast-rechargeable lithium-ion batteries[J]. International Journal of Energy Research, 2025. DOI:10.1155/er/3190008.
- [10] LI H Q, REN H P, LIN Z X, et al. Interfacial engineering of silica composited fibrous separator for high-performance lithium-ion batteries[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2025, 726. DOI:10.1016/j.colsurfa.2025.137956.
- [11] CHENG L Y, ZHANG X R, CAO Y K, et al. A high thermostability separator inhibiting the growing of Li dendrites for interfacially stable lithium-ion batteries[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2026, 703. DOI:10.1016/j.jcis.2025.139199.
- [12] HWANG Y, KIM M. Effect of a polypropylene separator with a thin electrospun ceramic/polymer coating on the thermal and electrochemical properties of lithium-ion batteries[J]. Polymers, 2024, 16(18):2 627–2 641.
- [13] JEON H, YEON D, LEE T, et al. A water-based Al₂O₃ ceramic coating for polyethylene-based microporous separators for lithium-ion batteries[J]. Journal of Power Sources, 2016, 315: 161–168.
- [14] WANG Z R, ZHANG H, YUE J K, et al. Structure and properties of biaxial stretched submicron thin UHMWPE membranes[J]. Polymer, 2023, 285. DOI:10.1016/j.polymer.2023.126393.
- [15] WANG H, YUAN H, DUAN H, et al. Porosity effect on the ion transport and electrochemical performance of lithium-ion battery separators[J]. Electrochimica Acta, 2023, 441. DOI: 10.1016/j.polymer.2023.126393.
- [16] 刘杲珺, 白耀宗, 马平川, 等. 锂电池用芳纶涂覆隔膜的制备及其性能[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(6):110–116.
LIU Gaojun, BAI Yaozong, MA Pingchuan, et al. Preparation and properties of aramid coating separator for lithium battery[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(6):110–116.
- [17] LI J P, GAO Y X, DUAN M Y, et al. Influence of the PET – PTFE separator pore structure on the performance of lithium metal batteries[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16 (27):34 902–34 912.
- [18] WU Y Q, YANG F, CAO Y, et al. Investigation on cavitation behavior of ultrahigh molecular weight polyethylene during stretching in wet process and dry process[J]. Polymer, 2021, 230. DOI:10.1016/j.polymer.2021.124081.
- [19] WU H, GUO Y. Study on the regulation of porous structure of ultra-thin ultra-high molecule weight polyethylene separation membranes through biaxial stretching[C]//Proceedings of the 39th Annual Meeting of the Polymer Processing Society (PPS39). 2023.
- [20] LIANG Y X, WU J L, CAI S Y, et al. Ionic transport regulation separator co-functionalized by conductive nanoparticles and nonconductive nanorods for high performance lithium battery[J]. Journal of Power Sources, 2025, 640. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2025.236725.
- [21] GHANI F, AN K, LEE D. A review on design parameters for the full-cell lithium-ion batteries[J]. Batteries, 2024, 10(10):340–378.
- [22] QIAN W, WU S Q, LEI C H, et al. Aging behavior of polyethylene and ceramics-coated separators under the simulated lithium-ion battery service compression and temperature field[J]. Coatings, 2024, 14(4):419–432.

(下转第216页)