

文章编号: 1001-4888(2023)06-0712-11

锂离子电池隔膜的力学性能测量*

江斌¹, 孔祥景², 施伟², 田昊¹, 郭战胜¹

(1. 上海大学 力学与工程科学学院, 上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072;

2. 深圳市新嘉拓自动化技术有限公司, 广东深圳 518118)

摘要: 隔膜是锂离子电池的重要组成部分, 其力学性能的综合表现是保证电池电化学性能的关键因素。本文通过单向拉伸实验和数字图像相关(DIC)技术来研究表面涂敷聚偏二氟乙烯的聚乙烯隔膜的基本力学性能; 结合工程应力-应变曲线, 分别确定了隔膜横轴(TD)和纵轴(MD)方向在不同拉伸速率下的弹性模量和强度; 利用 DIC 技术得到的应变-时间曲线, 确定了隔膜 TD 和 MD 方向的泊松比。单向拉伸实验表明, 隔膜 TD 和 MD 方向的弹性模量和极限强度值都与测试方向无关, 且拉伸速率越快, 弹性模量越大, 但极限强度值基本不变。DIC 测试结果表明, 隔膜 TD 和 MD 方向的泊松比也相等。研究发现, 与很多已有隔膜具有明显各向异性性质不同, 测试隔膜不但具有较高的弹性模量和极限强度, 而且具有明显的各向同性性质。

关键词: 锂离子电池; 隔膜; 弹性模量; 强度; 泊松比; 数字图像相关

中图分类号: TM911 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-004

0 引言

锂离子电池由于其能量密度高、寿命长和自放电率低而成为目前常用的移动电源。锂离子电池在我们生活中扮演着重要角色且得到了广泛的应用, 例如电动汽车、笔记本电脑和数码相机的电源^[1]。目前, 研究人员对锂离子电池材料的研究主要集中在电解质材料^[2]、电极材料^[3]、集流体材料^[4-5]等方面。隔膜作为锂离子电池的重要组成部分, 其作用是允许电解质中的离子运输, 防止阴极和阳极直接接触^[6-7], 由于隔膜在电极充放电时的变形会引起锂离子电池的性能衰退^[8-9], 因此隔膜的性能对电池的安全起着重要作用^[10]且对容量和其他电化学性能都有显著影响。

近年来, 国内外研究者对隔膜的厚度均匀性^[11-12]、孔隙率^[13-14]、热稳定性^[15]以及力学性能(拉伸强度、抗穿刺强度)^[16-18]等进行了大量研究, 发现隔膜的机械性能尤为重要。隔膜对锂枝晶的生成有抑制作用^[19], 如果隔膜机械强度不足, 会导致隔膜孔被刺穿, 引发短路问题。当电池在短路、过充或高倍率充电等情况下工作时, 容易产生大量副反应^[20-21], 导致电池不断升温以至于燃烧甚至爆炸^[22]。

隔膜的高机械性能对于保证锂离子电池安全至关重要, 在受到碰撞、跌落等意外因素以及长期电化学循环后仍需要保持较好的机械稳定性。Kalnaus 等^[23]研究了 3 层隔膜(聚丙烯(PP)/聚乙烯(PE)/聚丙烯(PP))的温度和应变率敏感性, 发现屈服应力、弹性模量不但具有显著的温度相关特性, 而且温度越高, 应变率强化的效应就越弱, 但温度软化却不受应变率的影响。Raffler 等^[24]发现表面涂敷 Al₂O₃ 的 PP 隔膜表现出高度各向异性和明显的加载速率依赖性行为, 且方向依赖性效应随加载速度的

* 收稿日期: 2023-01-04; 修回日期: 2023-05-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(11972218 和 12172206)

通信作者: 郭战胜(1974-), 男, 教授, 博导。主要从事电化学能量转换和储能材料系统的力化耦合研究。Email: davidzsguo@shu.edu.cn

增加而增加,在拉伸应变中尤为明显。Kalnaus 等^[25]通过实验确定并比较了3种商用锂离子电池隔膜(Celgard 2325、Celgard PP2075 干法聚合物隔膜和 DreamWeaver Gold 40 无纺布隔膜)的各向异性力学性能,发现聚合物隔膜表现出很强的各向异性和显著的速率敏感性;隔膜的正交方向上,弹性模量的差异可达5倍,极限强度的差异可达10倍;同时发现 DreamWeaver Gold 40 无纺布隔膜没有表现出任何应变率敏感性或力学性能的各向异性。Wang 等^[26]分别对单层 PE(Asahi Kasei Hipore)、单层 PP(Celgard 2500)以及 PP/PE/PP(Celgard 2325)等3种商用隔膜进行了单轴拉伸实验,并利用原位三维数字图像相关(DIC)技术测量了应变场,发现湿法工艺隔膜比干法工艺隔膜的泊松比明显增大。Zhang 等^[27]表征了2种干法工艺制备隔膜(PE 和 PP/PE/PP)和2种湿法工艺制备隔膜(Alumina/PE/Alumina 和 Nonwoven)的机械性能和失效机理,发现干法制备单层 PE 隔膜和 PP/PE/PP 隔膜的各向异性显著,而无纺布隔膜和陶瓷涂层隔膜的各向异性要低得多。Moghim 等^[28]对 PP 锂离子电池隔膜的拉伸和穿刺性能进行了综合研究,发现横轴(TD)和纵轴(MD)方向的拉伸强度和弹性模量可以相差1000%和500%。Moghim 等^[29]还研究了 PP 隔膜在不同温度下的热收缩现象,TD 和 MD 方向的拉伸性能依然显示了应变率相关性。Yan 等^[30]对面内正交各向异性 PP 隔膜的性质进行了表征,利用 DIC 技术计算的应变确定了 PP 隔膜的泊松比和剪切模量,发现不仅 TD 和 MD 方向的弹性模量不同而且受拉伸速率影响的程度也不相同。

分析上述文献可发现,隔膜的力学性质和其材料体系密切相关,针对具体的隔膜材料体系,需要单独确定其自身性质。为了更好地了解双面涂敷聚偏二氟乙烯(PVDF)/PE 隔膜的机械性能,本文结合单向拉伸实验和 DIC 技术确定了该 PE 隔膜 TD 和 MD 方向的弹性模量、极限强度以及泊松比,发现拉伸速率对弹性模量影响显著。本文研究结果可为该隔膜的商业应用提供数据支撑。

1 实验

1.1 材料来源和试样制备

测试隔膜由深圳市新嘉拓自动化技术有限公司提供,隔膜主材质为 PE,厚度为 $8\mu\text{m}$,双面 PVDF 涂层,单面涂层厚度约为 $1\mu\text{m}$ 。隔膜总厚度为 $10\mu\text{m}$,宽度为 1300mm。

实验样品制备和测试方法均依据 GB/T 1040.3-2006^[31]执行。以图 1 所示的 TD 和 MD 方向上的样品测试为主, $\pm 45^\circ$ 方向的测试作为补充,每种样品包含 20 个试样。取样时保证整个隔膜卷包装完好无损且去掉膜卷的表面 3 层膜,在膜卷的 MD 方向上裁取 $500\text{mm}\times 500\text{mm}$ 的正方形隔膜 10 块,切



图1 隔膜的 TD 和 MD

Fig.1 TD and MD of separator

取隔膜时保证正方形块的一条边与隔膜的纵向边缘平行,最大的偏离角小于 5° 。在平整水平试验台上对正方形隔膜块进行固定,每个正方形间隔裁取 4 个如图 2 所示的试样,每个试样的长度为 250mm,宽度为 15mm,中间 100mm 为有效测量距离。本文使用常规手术刀片切割试样,使其边缘平整、两边平行且无可见缺陷,把试样紧贴在直尺上,在蔡司显微镜(Zeiss Smartzoom 5)下对边缘和表面进行观察(图 3),以保证试样无扭曲且表面和边缘没有明显划痕、空洞、凹陷和毛刺。为确保试样环境无灰尘等污染,所有实验环境都保持在 $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ 温度和 $(50\pm 10)\%$ 相对湿度条件下,且实验人员均戴手套。

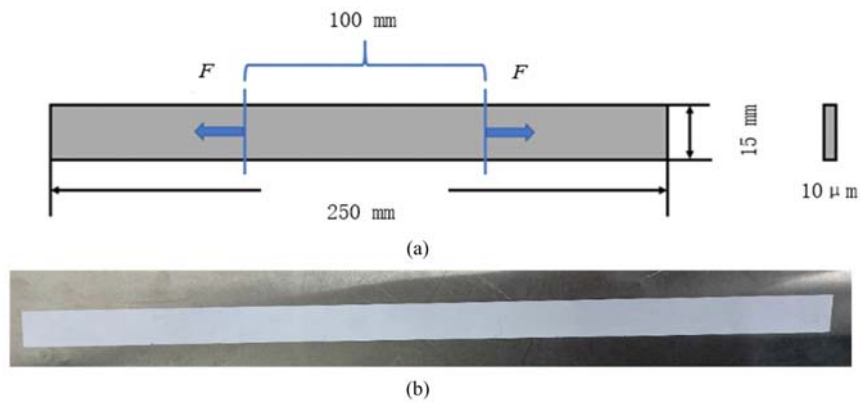


图2 (a)试样尺寸;(b)实物图

Fig. 2 (a)sample size;(b)physical picture

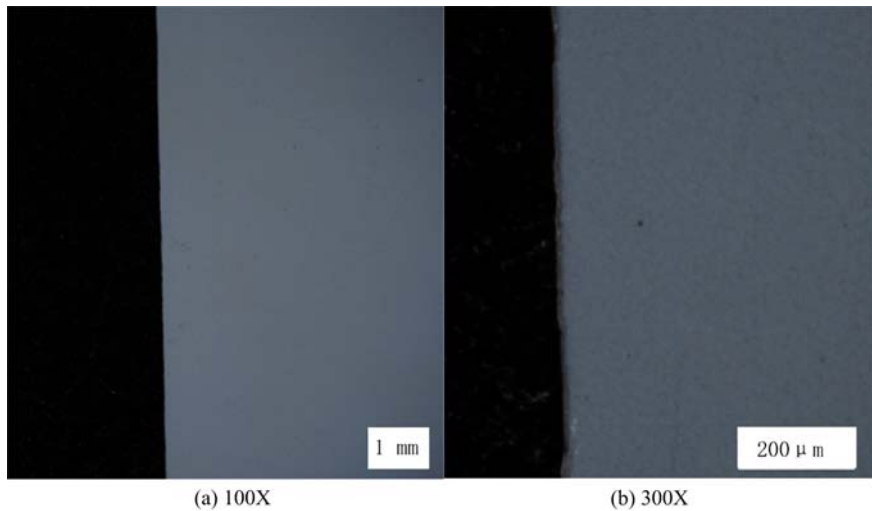


图3 隔膜边缘放大图像

Fig. 3 Edge image of separator

1.2 确定弹性模量和极限强度的单向拉伸实验

单向拉伸实验采用如图4所示的LS5万能材料试验机(美国AMETEK,额定载荷0~5000N),仪器放置在光学平台上以避免振动干扰。将试样放到夹具中,夹具间的初始距离为 (100 ± 5) mm,使试样的长轴线与试验机的轴线成一条直线。调整夹持力以确保实验中试样和夹具间没有相对滑移。根据国标GB/T 36363-2018^[32]的要求,确定弹性模量的测试速度为250mm/min。此外,依据测试电极材料和集流体材料^[3-5]的经验,还分别以100mm/min、25mm/min和1mm/min的拉伸速率进行了单向拉伸实验。

1.3 确定泊松比的试样制备和DIC系统设置

首先将裁剪好的拉伸试样进行表面清洁,然后正对试件表面喷涂一层哑光黑漆,在试样表面形成均匀的散斑,如图5所示。调整三角架上的水平仪,保证相机平行于地面且对准试样表面,打开白光灯并将相机光圈调至最大,根据计算机上图像的亮暗程度调节光圈和照相机上焦距,配合调整软件中的曝光时间,直至计算机界面上形成最清晰的明暗程度适中的图像如图6所示。图像采集系统同步采集万能拉伸试验机拉伸过程中试件的变形图像,利用软件分析可以获得试样在拉伸变形过程中的位移场与应变场。GB/T 1040.3-2006^[31]规定若应变截取区间为模量测试区域,则测试速度应尽可能使应变速率接近每分钟1%标距,因此确定泊松比的实验拉伸速率均为1mm/min。

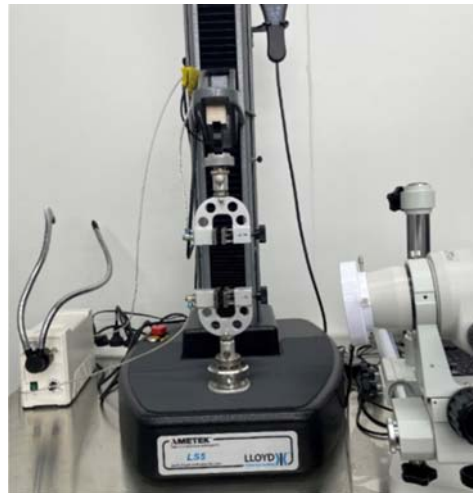


图 4 LS5 万能材料试验机

Fig. 4 LS5 universal material testing machine



图 5 隔膜散斑试样

Fig. 5 Separator speckle sample

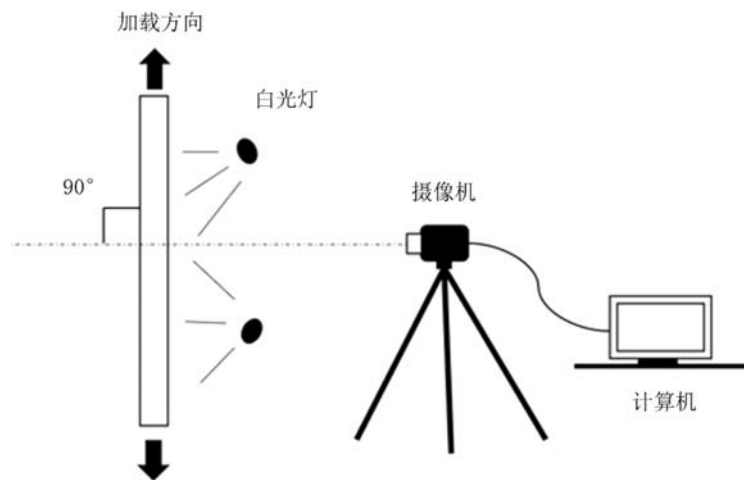


图 6 DIC 图像采集系统

Fig. 6 DIC image acquisition system

2 力学性能的计算和确定

2.1 弹性模量与极限强度的确定

首先将拉伸实验得到的载荷和位移曲线根据式(1)和式(2)进行数据处理,得到相应的工程应力和工程应变曲线。

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

式中: σ 为应力; F 为拉力; A 为截面宽度。

$$\epsilon = \frac{l}{L} \quad (2)$$

式中: ϵ 为应变; l 为夹头的位移量; L 为夹头间距。

而后根据 GB/T 1040.3—2006^[31]的要求,用最小二乘法式(3)和式(4)对弹性应变区域 0.05%~

0.25%的数据做线性拟合,其斜率即为材料的弹性模量见式(5)。

$$k = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (3)$$

$$b = \frac{\sum x^2 \sum y - \sum x \sum xy}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (4)$$

式中: k 为线性方程的斜率; b 为线性方程的截距。

$$E = \frac{d\sigma}{d\epsilon} \quad (5)$$

式中: E 为弹性模量; $d\sigma$ 为应力增量; $d\epsilon$ 为应变增量。

极限强度值的确定则比较简单,在工程应力-应变曲线中,试样断裂即拉伸实验停止时所得到的最大应力值就是极限强度值。

2.2 应变-时间曲线的 DIC 确定

在 DIC 图像处理软件上选取一个如图 7 所示的感兴趣图像区域(sign1 与 sign2 所构成的长方形区域),用来确定变形分析范围。图像在 sign1 方向被划分为 n 个正方形子区域,在 sign2 方向被划分为 m 个正方形子区域,每个子区域内包含一个中心点,中心点位置的变化代表整个子区域位置的变化。在 DIC 测试系统中^[33-35],首先通过不断迭代找到相关判据平方差的极值,确定变形前图像上任一点在变形后图像上的对应点,然后利用 DIC 图像处理软件确定 X 方向的位移分量和 Y 方向的位移分量,最后计算位移变形量与图像原始长度之比得到应变,进而输出应变-时间曲线。

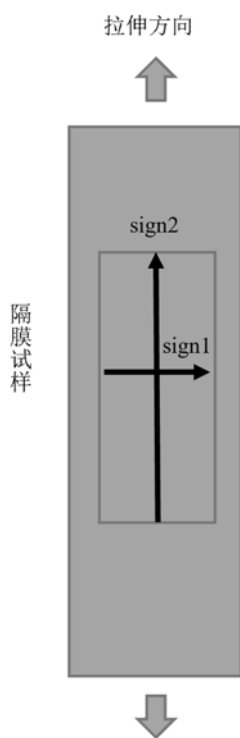


图 7 DIC 图像感兴趣区域

Fig. 7 DIC image region of interest

2.3 泊松比的确定

GB/T 1040.3-2006^[31]中推荐泊松比应变截取区间为 $0.3\% \leq \epsilon < \epsilon_y$,其中 ϵ 代表轴向应变变化, ϵ_y 代表屈服应变,因此我们取 $0.3\% \leq \epsilon < 0.8\%$ 之间曲线的斜率,结合 DIC 确定的应变-时间曲线(图 11),由式(6)计算泊松比。

$$\mu = \frac{\Delta\epsilon_1}{\Delta\epsilon_2} = -\frac{\frac{\Delta\epsilon_1}{\Delta t}}{\frac{\Delta\epsilon_2}{\Delta t}} = -\frac{K_1}{K_2} \quad (6)$$

式中: μ 为泊松比; $\Delta\epsilon_1$ 为横向应变变化; $\Delta\epsilon_2$ 为轴向应变变化; K_1 为 sign1 的应变-时间曲线的斜率; K_2 为 sign2 的应变-时间曲线的斜率。

3 结果与讨论

3.1 弹性模量与极限强度

将隔膜 TD 与 MD 方向的原始载荷-位移曲线应用式(1)和式(2)得到其工程应力-应变曲线。典型的工程应力-应变曲线如图 8 所示,由图可以看出,弹性阶段的可重复性比较好,随着应力的不断增加,应变开始出现明显的非线性特征,最终出现拉断。隔膜的弹性模量由式(5)确定,极限强度由最大应力确定。

隔膜 TD 和 MD 方向的弹性模量与极限强度值见表 1。TD 方向的弹性模量和极限强度平均值分别为 2025.7MPa 和 179.1MPa,而 MD 方向的平均值则分别为 1998.7MPa 和 169.5MPa,2 个方向的弹性模量差或极限强度差都小于 10%,可以初步认为弹性模量和极限强度都与测试方向无关。与已有文献结果相比^[18,24-25],双面涂敷 PVDF 的 PE 隔膜具有较高的弹性模量和极限强度,能够抵御不同方向上的载荷,对保证电池高倍率充电有较好的保护作用,且与 Zhang 等^[27]研究的陶瓷涂敷隔膜的性能具有相似性。

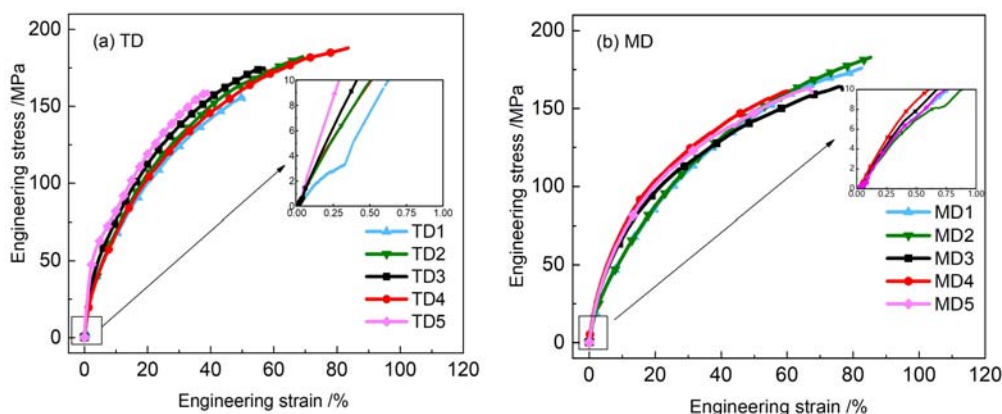


图 8 250mm/min 拉伸速率下的拉伸应力-应变曲线

Fig. 8 Tensile stress-strain curve at 250mm/min tensile rate

表 1 250mm/min 拉伸速率下隔膜 TD 与 MD 方向的弹性模量与极限强度

Tab. 1 Modulus and strength of TD and MD of separator at 250mm/min tensile rate

拉伸方向		1	2	3	4	5	平均值
TD	弹性模量/MPa	2015.4	2091.0	2073.8	2043.3	2217.0	2025.7
	极限强度/MPa	164.9	182.2	181.8	188.0	178.9	179.1
MD	弹性模量/MPa	1886.6	1894.7	2131.5	2259.7	1820.9	1998.7
	极限强度/MPa	176.0	182.8	164.1	161.3	163.2	169.5

在 TD 和 MD 方向的试样中,正常失效模式为断口处于中间位置,而非正常失效模式断口处于靠近夹头附近,如图 9 所示。实验过程中发现一个有趣的现象,当试样出现正常的失效模式时,数据结果较好且比较集中,本文统计的均为正常的失效模式数据。当试样出现非正常失效模式时,数据结果离散性大。比较不同的失效模式,发现夹头附近的边缘效应会影响整个试样拉伸情况,进而影响力学性能测量,因此在进行拉伸实验时,除了要防止夹头的滑移现象,还要避免试样在夹头附近出现应力集中。

3.2 拉伸速率对弹性模量和极限强度的影响

国标 GB/T 40933—2021^[36]指出,在进行拉伸实验时,对于断裂时出现高应变的热塑性塑料薄膜可以采用比较高的拉伸速率,对断裂时出现低应变的薄膜则需用比较低的拉伸速率。很多文献^[24-30]的研究结果也表明了不同的拉伸速率对隔膜的弹性模量和极限强度有影响。综合国标 GB/T 40933—2021^[36]和美国 ASTM D882—18^[37]标准建议的拉伸速率,为了更好地验证拉伸速率对弹性模量和极限强度的影响,本文还进行了 1mm/min、25mm/min 以及 100mm/min 拉伸速率下的测试。需要强调的是,由于在 1mm/min 的拉伸速率下试样断裂失效耗时很长,因此这里只讨论模量的变化。所有拉伸速率的数据处理方法及其他的实验条件都和拉伸速率为 250mm/min 时一致。

隔膜 TD 和 MD 方向在 100mm/min 和 25mm/min 拉伸速率下的工程应力-应变曲线如图 10 所示。比较图 8 和图 10 可以看出,不同拉伸速率下的工程应力-应变曲线趋势相同;计算得出的弹性模量与极限强度值见表 2。在 100mm/min 的拉伸速率下,TD 的弹性模量为 1702.8MPa,强度为 166.8MPa;MD 的弹性模量为 1644.8MPa,强度为 158.6MPa。在 25mm/min 的拉伸速率下,TD 的弹性模量为 1567.2MPa,强度为 162.8MPa;MD 的弹性模量为 1532.3MPa,强度为 153.0MPa。相比于 250mm/min 的结果(表 1),100mm/min 下测得的弹性模量下降了 16.8%,强度值下降了 6.6%;25mm/min 下测得的弹性模量下降了 23.1%,强度值下降了 9.4%。结果表明,拉伸速率对弹性模量影响显著,但强度值变化率小于 10%。在 1mm/min 拉伸速率下,TD 的弹性模量为 903.8MPa,MD 的弹性模量为 851.5MPa。相比于 250 mm/min 的结果(见表 1),1mm/min 下测得的弹性模量下降了 56.4%。以上结果表明,拉伸

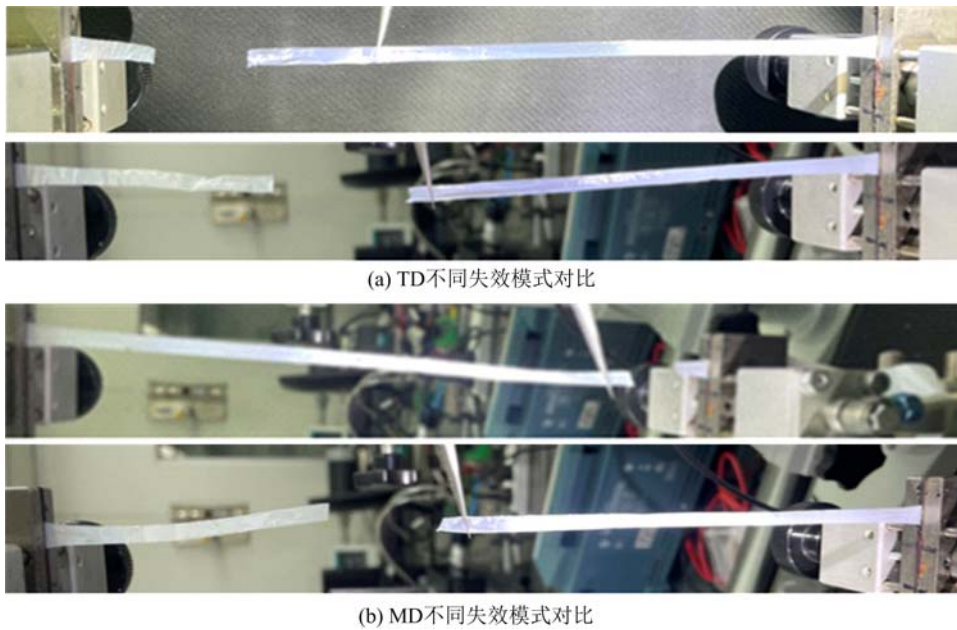


图 9 TD 与 MD 在 250mm/min 拉伸速率下的不同失效模式

Fig. 9 Different failure modes in TD and MD at the tensile rate of 250mm/min

速率对弹性模量有显著影响但是对强度值影响很小,且拉伸速率越大,其弹性模量越大。模量变化可以结合高分子材料的微观结构进行解释,拉伸速率很小时,侧链有充足的时间对主链造成影响,使其重新排列导致弹性模量降低;拉伸速率很大时,侧链来不及响应,弹性响应由主链主导,导致弹性模量增大。极限拉伸强度则是主侧链的综合效应,是一种累积过程,因此与拉伸速率的关联度不密切。为了保证隔膜的弹性模量具有可比性,GB/T 1040.3-2006^[31]将拉伸速率为 250mm/min 时的结果确定为最终的弹性模量。

表 2 不同拉伸速率下隔膜 TD 和 MD 方向的弹性模量与极限强度

Tab. 2 Modulus and strength of TD and MD of separator with different tensile rate

加载速率	拉伸方向		1	2	3	4	5	平均值
100mm/min	TD	弹性模量/MPa	1671.4	1742.6	1678.6	1904.9	1516.5	1702.8
		极限强度/MPa	181.5	148.9	175.4	158.4	169.9	166.8
	MD	弹性模量/MPa	1447.9	1738.6	1590.9	1542.2	1904.3	1644.8
		极限强度/MPa	143.9	159.1	155.2	169.9	164.9	158.6
25mm/min	TD	弹性模量/MPa	1391.0	1794.2	1538.2	1738.5	1374.5	1567.2
		极限强度/MPa	160.4	161.4	164.4	163.0	164.7	162.8
	MD	弹性模量/MPa	1630.7	1159.5	1580.8	1538.2	1752.3	1532.3
		极限强度/MPa	126.1	160.5	150.1	164.5	163.8	153.0
1mm/min	TD	弹性模量/MPa	938.3	872.1	837.4	1033.7	837.4	903.8
	MD	弹性模量/MPa	772.5	833.9	912.2	778.8	960.1	851.5

3.3 泊松比

由 DIC 测试系统输出的原始数据可以得到 sign1 与 sign2 方向上的应变-时间曲线如图 11 所示。由图可见 TD 和 MD 方向的曲线趋势一致,其中 sign2 为拉伸方向,因此方向的应变为正值。而 sign1 垂直于拉伸方向,在拉伸过程中发生紧缩导致应变为负值。随着拉伸的进行,应变的绝对值都逐渐增加。通过式(6)计算出 TD 方向泊松比为 0.441,MD 方向泊松比为 0.434,见表 3。TD 和 MD 方向的泊松比近似相等(误差小于 1.6%),且与 Wang 等^[26]研究的商业隔膜的泊松比大小具有可比性。泊松

比近似相等表明此隔膜具有各向同性性质,与弹性模量和强度的结果相对应。如果泊松比太大,在锂电池充放电循环过程中,受到一个方向外力作用,容易导致垂直于拉伸方向紧缩程度过高,使隔膜不能完全阻隔在正负极中间,导致正负极接触发生短路,产生一系列安全问题。大量文献^[27-30]研究的隔膜都为各向异性材料,但是各向异性隔膜容易在电池循环过程中遭到破坏,因此各向同性的隔膜能更好地提高电池的安全性能,使锂离子电池在工作中得到保障。

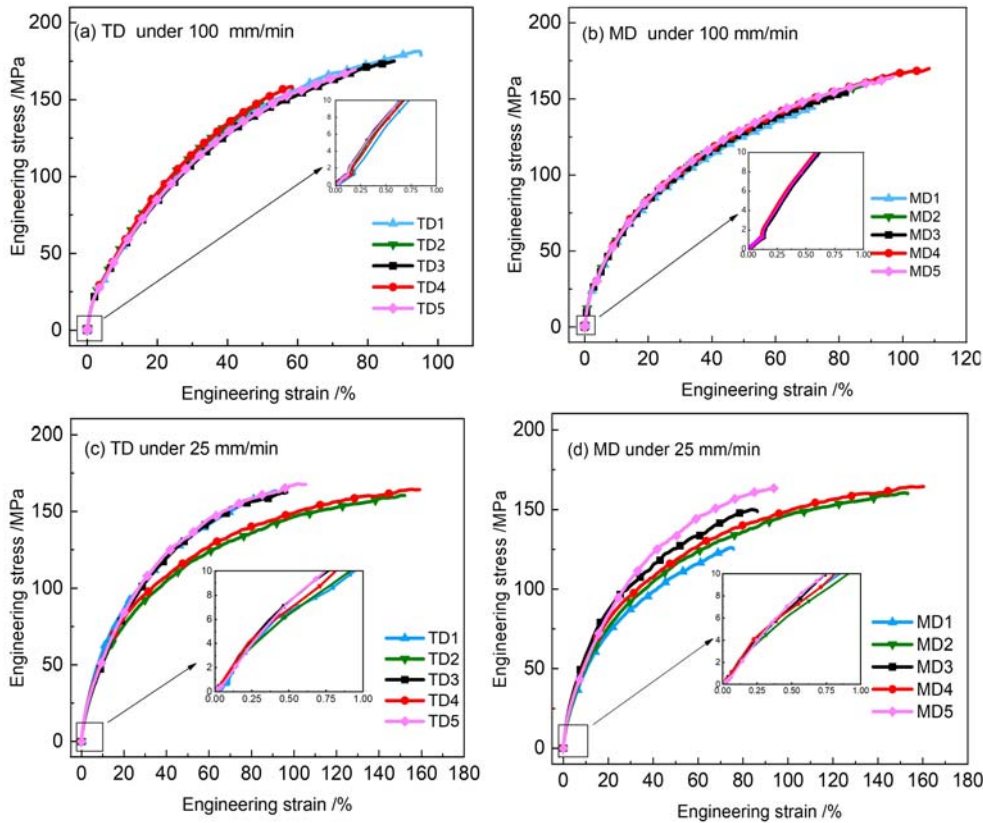


图 10 不同拉伸速率下的 TD 和 MD 方向的拉伸应力-应变曲线

Fig. 10 Tensile stress-strain curves of TD and MD under different tensile rates

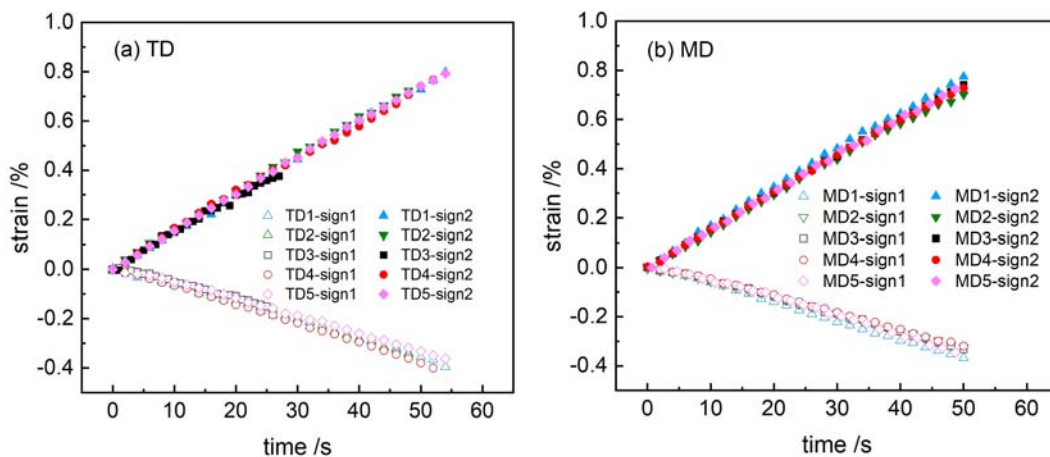


图 11 1mm/min 拉伸速率下的 sign1 与 sign2 方向上的应变-时间曲线

Fig. 11 Strain-time curves in the direction of sign1 and sign2 at a tensile rate of 1mm/min

表3 1mm/min 拉伸速率下 TD 与 MD 的泊松比
Tab.3 Poisson's ratio of TD and MD at 1mm/min tensile rate

	1	2	3	4	5	平均值
TD	0.468	0.438	0.413	0.475	0.411	0.441
MD	0.458	0.438	0.430	0.410	0.432	0.434

4 结论

本文使用单向拉伸实验和数字图像相关性(DIC)技术研究了表面涂覆 PVDF 的 PE 隔膜的基本力学性能,单向拉伸实验结果表明,无论是在隔膜的 TD 方向还是 MD 方向,其弹性模量和极限强度值都与测试方向无关,即隔膜具有各向同性性质。此外,在拉伸速率为 1mm/min、25mm/min、100mm/min 和 250mm/min 时,隔膜的弹性模量随着拉伸速率的增加而增加,但极限强度值基本保持不变。DIC 测试结果表明,隔膜的 TD 和 MD 方向的泊松比相等,这进一步证实了隔膜的各向同性性质。

参考文献:

- [1] 巫晓鑫, 吴水珠, 赵建青, 等. 锂离子电池聚烯烃隔膜改性及功能化研究[J]. 合成材料老化与应用, 2012, 41(4):43-48(WU Xiaoxin, WU Shuizhu, ZHAO Jianqing, et al. Study on modification and functionalization for lithium-ion battery polyolefin separator[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2012, 41(4):43-48 (in Chinese))
- [2] Daniel C. Handbook of battery materials(2 edition)[M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag & CO.KGaA, 2011.
- [3] 刘超, 郭战胜, 冯捷敏, 等. 石墨电极力学性能和界面剥离强度的实验研究[J]. 实验力学, 2019, 34(1):113-120 (LIU Chao, GUO Zhansheng, FENG Jiemin, et al. Experimental study of mechanical properties and interfacial peeling strength of graphite electrode[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2019, 34(1):113-120 (in Chinese))
- [4] 朱建宇, 冯捷敏, 郭战胜, 等. 锂离子电池用铜箔集流体的力学性能分析[J]. 储能科学与技术, 2014, 3(4):360-363 (ZHU Jianyu, FENG Jiemin, GUO Zhansheng, et al. Mechanical properties of copper current collection foils of Li-ion batteries[J]. Energy Storage Science and Technology, 2014, 3(4):360-363 (in Chinese))
- [5] 郭战胜, 王宇晖, 冯捷敏, 等. 铝箔力学性能的实验研究[J]. 实验力学, 2016, 31(4):451-457 (GUO Zhansheng, WANG Yuhui, FENG Jiemin, et al. Experimental research of mechanical properties for aluminum foil [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2016, 31(4):451-457 (in Chinese))
- [6] Huang X. Separator technologies for lithium-ion batteries[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2011, 15(4): 649-662.
- [7] Deimede V, Elmasides C. Separators for lithium-ion batteries: a review on the production processes and recent developments[J]. Energy Technology, 2015, 3(5):453-468.
- [8] 杨盼盼, 李凯, 冯捷敏, 等. 锂离子薄膜电极充放电变形的原位实验观测方法[J]. 实验力学, 2018, 33(5):716-724 (YANG Panpan, LI Kai, FENG Jiemin, et al. On the in-situ experimental observation method of lithium-ion thin film electrode deformation in charge-discharge process[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(5):716-724 (in Chinese))
- [9] 齐志凤, 马伟皓, 杨思源, 等. 锂离子电池硅薄膜电极充放电形态实验研究[J]. 实验力学, 2020, 35(6):1041-1048 (QI Zhifeng, MA Weihao, YANG Siyuan, et al. Experimental study on charge-discharge morphology of silicon thin film electrode for lithium-ion battery[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(6):1041-1048 (in Chinese))
- [10] 汤雁, 苏晓倩, 刘浩杰. 锂电池隔膜测试方法评述[J]. 信息记录材料, 2014, 15(2):43-50 (TANG Yan, SU Xiaolian, LIU Haojie. Review of the lithium battery separator test method[J]. Information Recording Materials, 2014, 15(2):43-50 (in Chinese))
- [11] 付雪涛, 王香, 吴怡然, 等. 锂离子电池用聚烯烃复合隔膜材质及薄膜厚度的检测[J]. 塑料工业, 2021, 49(9): 126-129, 139 (FU Xuetao, WANG Xiang, WU Yiran, et al. Measurement for the material and film thickness of

- polyolefin composite diaphragm used in lithium-ion battery[J]. *China Plastics Industry*, 2021, 49(9):126–129, 139 (in Chinese))
- [12] Yan S, Huang X, Xiao X. Measurement of the through thickness compression of a battery separator[J]. *Journal of Power Sources*, 2018, 382:13–21.
- [13] Huang B, Lai P, Hua H, et al. Application for the porous structure of cellulose separators: ionic conduction path in lithium-ion battery[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2022, 926:116937.
- [14] 尤雅芳, 茆汉军, 袁璋晶. 基于场发射扫描电镜和 Image J 的锂电池隔膜孔隙率研究[J]. *上海塑料*, 2022, 50(1):54–59 (YOU Yafang, MAO Hanjun, YUAN Zhangjing. Study on porosity of lithium battery separator based on field emission scanning electron microscope and image J[J]. *Shanghai Plastic*, 2022, 50(1): 54–59 (in Chinese))
- [15] Zhou H, Fear C, Parekh M, et al. The role of separator thermal stability in safety characteristics of lithium-ion batteries[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2022, 169(9): 090521.
- [16] 于捷, 张文龙. 锂离子电池隔膜的发展现状与进展[J]. *化工进展*, 2023, 42(4):1760–1768 (YU Jie, ZHANG Wenlong. Development status and progress of lithium ion battery separator[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, 42(4):1760–1768 (in Chinese))
- [17] Yan S, Deng J, Bae C, et al. In-plane orthotropic property characterization of a polymeric battery separator[J]. *Polymer Testing*, 2018, 72:46–54.
- [18] 李军奎, 习会峰, 赵桂成, 等. 锂离子电池的 PP 隔膜平面各向异性性能研究[J]. *实验力学*, 2021, 36(6):762–770 (LI Junkui, XI Huifeng, ZHAO Guicheng, et al. Study on the planar anisotropy characteristics of PP separators for lithium-ion batteries[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2021, 36(6):762–770 (in Chinese))
- [19] Gao L, Huang P, Guo Z. Elucidating the role of rational separator microstructures in guiding dendrite growth and reviving dead Li[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(37):41957–41968.
- [20] Liu X, Ren D, Hsu H, et al. Thermal runaway of lithium-ion batteries without internal short circuit[J]. *Joule*, 2018, 2(10):2047–2064.
- [21] Guan X, Wang A, Liu S, et al. Controlling nucleation in lithium metal anodes[J]. *Small*, 2018, 14(37): 1801423.
- [22] Lyu P, Liu X, Qu J, et al. Recent advances of thermal safety of lithium ion battery for energy storage[J]. *Energy Storage Materials*, 2020, 31:195–220.
- [23] Kalnaus S, Wang Y, Li J, et al. Temperature and strain rate dependent behavior of polymer separator for Li-ion batteries[J]. *Extreme Mechanics Letters*, 2018, 20:73–80.
- [24] Raffler M, Sinz W, Erker S, et al. Influence of loading rate and out of plane direction dependence on deformation and electro-mechanical failure behavior of a lithium-ion pouch cell[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 56: 105906.
- [25] Kalnaus S, Wang Y, Turner J A. Mechanical behavior and failure mechanisms of Li-ion battery separators[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 348:255–263.
- [26] Wang Y, Li Q M, Xing Y. Porosity variation of lithium-ion battery separators under uniaxial tension[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 174:105496.
- [27] Zhang X, Sahraei E, Wang K. Deformation and failure characteristics of four types of lithium-ion battery separators[J]. *Journal of Power Sources*, 2016, 327:693–701.
- [28] Moghim M H, Nahvibayani A, Eqra R. Strain-rate-dependent mechanical properties of polypropylene separator for lithium-ion batteries[J]. *Polymer International*, 2020, 69(6):545–551.
- [29] Moghim M H, Nahvibayani A, Eqra R. Mechanical properties of heat-treated polypropylene separators for lithium-ion batteries[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2022, 62(9):3049–3058.
- [30] Yan S, Deng J, Bae C, et al. In-plane orthotropic property characterization of a polymeric battery separator[J]. *Polymer Testing*, 2018, 72:46–54.
- [31] 塑料拉伸性能的测定:GB/T 1040.3–2006[S]. 北京:中国标准出版社, 2006 (Determination of tensile properties of plastics: GB/T 1040.3–2006[S]. Beijing: China Standard Press, 2006 (in Chinese))
- [32] 锂离子电池用聚烯烃隔膜:GB/T 36363–2018[S]. 北京:中国标准出版社, 2018 (Polyolefin separators for

- lithium-ion batteries; GB/T 36363—2018[S]. Beijing: China Standard Press, 2018 (in Chinese))
- [33] 安文雅, 王立忠, 陈晓帅, 等. 材料力学性能参数的动态视觉测量研究[J]. 机电工程, 2023, 40(5):788—796 (AN Wenya, WANG Lizhong, CHEN Xiaoshuai, et al. Dynamic visual measurement of mechanical property parameters of materials[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2023, 40(5):788—796 (in Chinese))
- [34] 白海龙, 陈南宁, 谢勇, 等. 基于数字图像相关法测定瓦楞纸板面内静态压缩泊松比[J]. 包装学报, 2020, 12(3):69—80 (BAI Hailong, CHEN Nanning, XIE Yong, et al. Poisson's ration calculation of corrugated paper board under in-plane static compression using digital image correlation[J]. Packaging Journal, 2020, 12(3):69—80 (in Chinese))
- [35] 白晓虹. 数字图像相关(DIC)测量方法在材料变形研究中的应用[D]. 沈阳:东北大学, 2011 (BAI Xiaohong. Application of digital image correlation method in study of material deformation[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011 (in Chinese))
- [36] 热塑性塑料薄膜试验指南:GB/T 40933—2021[S]. 北京:中国标准出版社, 2021 (Guidance on the testing of thermoplastic films: GB/T 40933—2021[S]. Beijing: China Standard Press, 2021 (in Chinese))
- [37] Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting: ASTM D882—18[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2018.

Mechanical properties of separator for lithium ion batteries

JIANG Bin¹, KONG Xiangjing², SHI Wei², TIAN Hao¹, GUO Zhansheng¹

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. Shenzhen Katop Automation Technology Co., Ltd., Shenzhen 518118, Guangdong, China)

Abstract: The separator is an important component of lithium ion batteries, and the comprehensive performance of its mechanical properties is an important key factor in ensuring the electrochemical performance of the battery. In this work, the basic mechanical properties of polyethylene separator coated with polyvinylidene fluoride was investigated through uniaxial tensile experiments and digital image correlation (DIC) technology. Based on the engineering stress-strain curve, the elastic modulus and strength of the separator in transverse direction (TD) and transverse direction (TD) directions were determined at different tensile rates. The Poisson's ratios in the TD and MD directions of the separator were determined using the strain-time curve obtained by DIC technology. The uniaxial tension test shows that the elastic modulus and ultimate strength of TD and MD are independent of the test direction, and the faster the tensile rate, the greater the elastic modulus but the ultimate strength is basically unchanged. DIC test results showed that the TD and MD directions of the separator were almost equal. It is found that different from many existing separators which have obvious anisotropic properties, the tested separator not only have high elastic modulus and ultimate strength, but also have obvious isotropic properties.

Keywords: lithium ion batteries; separators; elastic modulus; ultimate strength; Poisson's ratio; DIC test system