

文章编号: 1001-4888(2021)06-0762-09

# 锂离子电池的 PP 隔膜平面各向异性性能研究\*

李军奎<sup>1</sup>, 习会峰<sup>1</sup>, 赵桂成<sup>1</sup>, 何陵辉<sup>1,2</sup>

(1. 暨南大学 力学与建筑工程学院 重大工程灾害与控制教育部重点实验室, 广东广州 510632;

2. 中国科学技术大学 工程科学学院, 安徽合肥 230027)

**摘要:** 隔膜在锂电池中起着重要作用, 一是隔离正极和负极, 二是构建锂离子迁移通道。目前锂电池有限元模型大部分采用均质化模型, 导致锂电池的内短路失效时的计算结果不准确; 少部分采用精细化模型, 由于各向异性隔膜的基本力学参数不准确, 限制了锂电池精细有限元模型的建立。本文采用数字图像相关技术(Digital Image Correlation, DIC), 通过不同方向单轴拉伸实验表征了聚丙烯(PP)隔膜不同方向的弹性模量、泊松比、塑性应变比、屈服准则等关键力学参数, 结果表明隔膜具有高度的各向异性, 文中还给出了隔膜纤维方向拉伸曲线存在两个屈服点的原因。本文获得的隔膜关键力学参数可为以后构建精细化锂电池模型的仿真提供理论基础, 对其他各向异性薄膜材料的研究也有一定的参考价值。

**关键词:** 隔膜; 平面各向异性; 屈服准则; 数字图像相关技术

**中图分类号:** O34      **文献标识码:** A      **DOI:** 10.7520/1001-4888-20-146

## 0 引言

隔膜材料主要是以聚乙烯(polyethylene, PE)、聚丙烯(polypropylene, PP)为主的聚烯烃(Polyolefin)类隔膜, 其中 PE 产品主要由湿法工艺制得, PP 产品主要由干法工艺制得。置于锂电池正负极之间的聚合物多孔薄膜在锂电池中起着重要的作用: 一是隔离锂电池正负极, 防止电池内短路; 二是作为锂离子迁移通道, 使锂离子在正负极间自由穿梭, 保证了电池内电化学反应<sup>[1]</sup>。隔膜电极在充放电时的变形会引起锂离子电池的性能衰退<sup>[2]</sup>, 而且隔膜的损坏会直接导致正负极接触从而引发内短路, 因此研究隔膜的力学性能对于提高锂离子电池性能有关键的作用。干法 PP 隔膜是由聚丙烯纤维和聚偏二氟乙烯-六氟丙烯共聚物(PVDF-HFP)基体构成的, 由于聚丙烯纤维的作用, 表现出明显的各向异性, 干法 PP 隔膜的微观结构和宏观结构如图 1(a)、(b)和(c)所示。

锂电池内部结构中的应力状态复杂, 锂电池内部失效与隔膜的各向异性力学性能有密切关系。很多工程材料都具有各向异性的力学性能, 但是针对不同的材料所需要采取的实验手段各不相同<sup>[3-5]</sup>。目前, 大部分学者关注锂电池单体整体性能<sup>[6-10]</sup>, 部分学者研究了电极、外壳和正负极力学性能<sup>[11-13]</sup>, 而关于隔膜的屈服准则等关键力学性能目前仍缺乏相应的研究<sup>[14,15]</sup>。Xu 等<sup>[16]</sup>发现隔膜具有明显的应变速率效应, 指出应变速率效应是冲击下锂电池有限元模型中需要考虑的一个重要因素。此外, 隔膜具有明显的温度效应, 这对锂电池的热力学耦合模型具有重要意义<sup>[16,17]</sup>。由于隔膜作为一种薄膜材料, 厚度方向的拉伸实验无法进行, 因此难以获得完整的各向异性屈服参数。隔膜太薄容易损坏, 难以适用引伸计或应变计, 夹具夹持隔膜两端拉伸时, 经常出现滑移现象, 导致不能获得准确的拉伸位移和应变, 影

\* 收稿日期: 2020-07-25; 修回日期: 2020-10-18

通信作者: 习会峰(1980-), 女, 博士, 副教授。主要研究领域: 材料冲击动力学行为, 结构可靠性分析, 锂离子电池安全性研究。

Email: xihufeng@jnu.edu.cn

响隔膜的弹性模量、拉伸破坏应变等关键力学参数的准确性。

本文在室温和准静态条件下,结合数字图像相关技术(DIC 技术),对 PP 隔膜的平面各向异性弹性模型、泊松比及屈服参数进行了表征,表征结果可为建立隔膜各向异性参数理论模型提供参考。

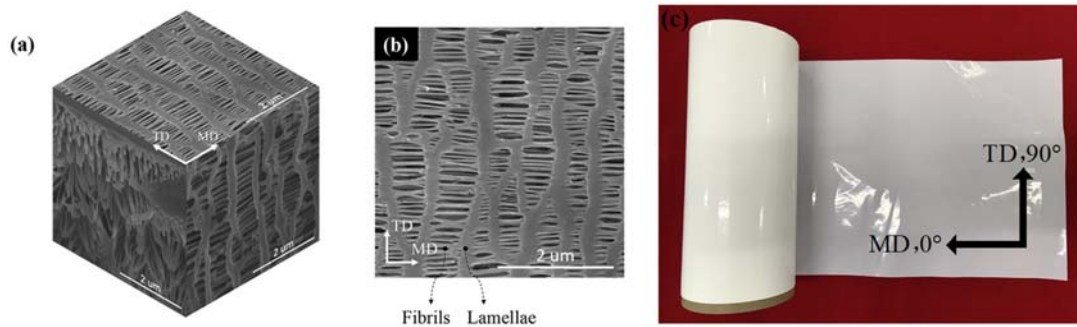


图 1 干法 PP 隔膜的微观结构和力学行为:(a)三维视图;(b)二维俯视图<sup>[18]</sup>;(c)宏观隔膜辊

Fig.1 Microstructure and mechanical behavior of separators: (a)3D view; (b)2D top view of the microstructure of a dry-processed PP separator<sup>[18]</sup>; (c)PP separator roll

## 1 隔膜实验

### 1.1 隔膜试件

干法 PP 隔膜由聚丙烯纤维和聚偏二氟乙烯-六氟丙烯共聚物(PVDF-HFP)基体构成,聚丙烯纤维的强度远高于二氟乙烯-六氟丙烯共聚物基体的强度。纤维的铺设方向如图 1 所示,纤维方向简称为 MD 方向,垂直于纤维方向简称为 TD 方向,定义平面材料三个主轴方向如图 2(a)所示。拉伸实验采用 Instron 5567 材料测试系统和 VIC-3D 非接触全场应变测量系统。

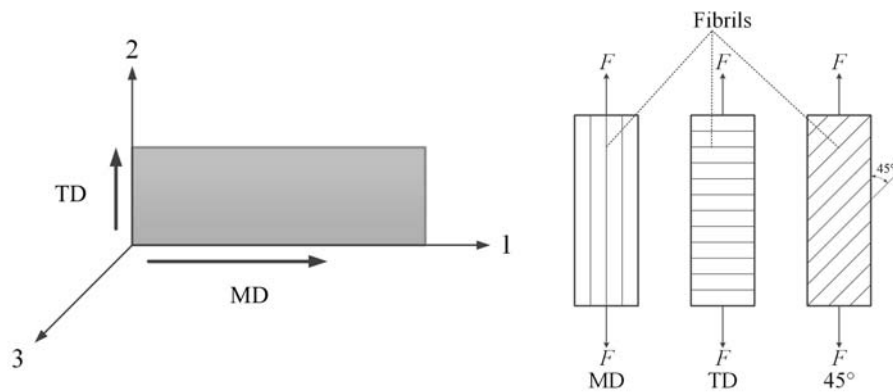


图 2 试样的各向异性:(a)材料主轴方向;(b)试样的单轴拉伸方向

Fig.2 Anisotropy of the specimen: (a)direction of the main axis of the material; (b)uniaxial tensile direction of the specimen

根据 ASTM 标准 D882-2018,裁取尺寸为 50mm×15mm 的 PP 隔膜试件进行拉伸实验。首先测量出多层隔膜的总厚度,然后除以层数得到隔膜平均厚度,厚度计算结果见表 1。

表 1 PP 隔膜厚度测量值

Tab.1 Measurement of PP separator thickness

层数	厚度/mm	单层厚度/ $\mu\text{m}$	单层厚度平均值/ $\mu\text{m}$
8	0.20	25.0	
16	0.39	24.4	
32	0.79	24.7	24.65
64	1.57	24.5	

## 1.2 试件端部处理

为了防止试件滑移和端部的应力集中,在试件的端部先覆盖 1mm 厚的橡胶垫,后覆盖 1.5mm 厚的纯铝垫片,以起到加固端部的作用(图 3)。如果只用铝片加固端部,由于薄膜和铝板软硬度差距大,容易造成薄膜端部破坏。在铝片和试样之间加橡胶垫可以保护试件端部不被夹具夹坏,同时还起到了防止隔膜在拉伸过程中出现打滑现象的作用。在试件靠近端部的表面使用黑色记号笔标注位置,以验证橡胶垫加铝片的方法是否能够防止打滑,结果显示记号笔划线位置在拉伸实验前后并无变化,由此证明采用橡胶垫加铝片的方法可以有效防止试件打滑及端部破坏。



图 3 端部加固后的试件

Fig. 3 Sample after reinforced

## 2 DIC 全场应变分析

### 2.1 散斑和 DIC 技术对隔膜材料力学性能的影响

用 DIC 技术测量试件表面应变时,需要在试件表面印涂散斑。由于隔膜试件太薄,因此先对有、无散斑的数据进行了对比分析,以此探究印涂的散斑是否会对试件力学性能造成影响。由表 2 可见,有散斑和无散斑测试的弹性模量和强度极限的误差分别为 2.08% 和 7.27%。由图 4(a)可以发现,印涂散斑对 PP 隔膜在 TD 及 MD 方向的屈服强度、强度极限及应力-应变曲线的影响较小;同时,由图 4(b)可见有、无散斑试件 TD 及 MD 方向拉伸的破坏应变不一致,呈现出随机性。基于以上两方面的分析可知,散斑对 PP 隔膜力学性能的影响效应是可以忽略的。

表 2 有、无散斑隔膜的弹性模量、强度极限测量值对比

Tab. 2 Comparison of the elastic modulus and ultimate strength for separators with and without speckle

	方向	无散斑平均值	有散斑平均值	差异
弹性模量 /MPa	MD	1187.07	1162.30	2.08%
	TD	738.58	732.01	0.89%
强度极限 /MPa	MD	129.07	128.15	0.71%
	TD	18.42	17.08	7.27%

文献[19]指出,对于高速拉伸实验,拉伸过程中由于存在滑移,导致试验机获得的应力-应变曲线、弹性模量和破坏应变等参数不准确,需要结合 DIC 技术获得更为准确的应力-应变曲线。从图 4(c)可以看出,对于薄膜这类软材料的静态拉伸实验,DIC 技术修正后的应力-应变曲线和试验机获得的曲线在 MD 方向和 TD 方向上几乎重合,表明试验机获得的应力-应变曲线的精度足以满足 PP 隔膜拉伸实验需求,因此拉伸试验机的位移数据可用于应变计算。由上述分析可知,对于刚度比较小的软材料的静态拉伸实验,试验机获得的应力-应变曲线结果足够可靠。本文后续进行仿真分析时还需要确定泊松比和屈服准则中的 Lankford 参数,这两个参数的获取需要结合 DIC 技术。

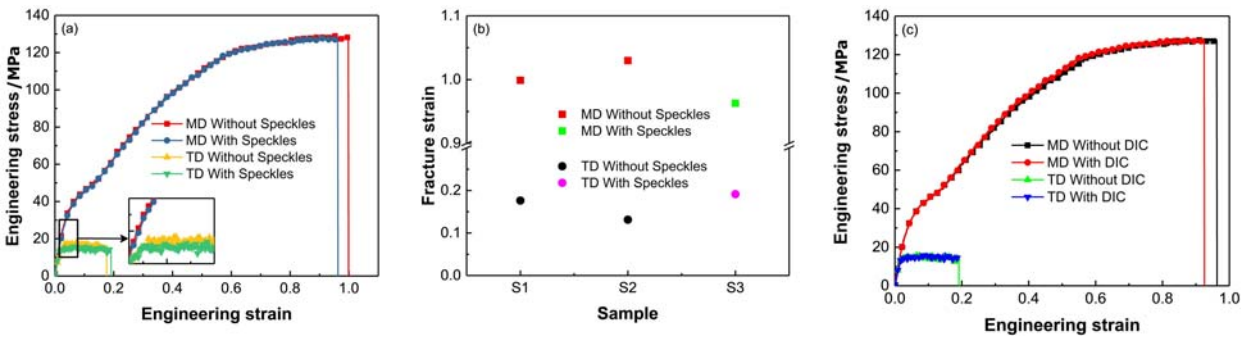


图 4 DIC 有、无散斑对比分析：(a)应力-应变曲线对比；(b)破坏应变对比；(c)DIC 和 Instron 5567 应变修正对比分析

Fig. 4 Comparative analysis of DIC speckles: (a) comparison of stress and strain curves;

(b) comparison of fracture strain; (c) comparative analysis of DIC and Instron 5567 strain correction

### 2.2 DIC 精度控制分析

DIC 精度控制有三个重要的变量：子域 (Subset)、步长 (Step) 和应变滤波 (Strain Filter)。子域是做相关计算划分的网格尺寸 (单位是 pixel, 代表正方形网格点边长)，步长是相邻两个参与计算的网格点间距 (单位是 pixel)，如图 5 所示。子域要求包括三个散斑点，对应本实验实际情况其大小为  $29\text{pixel} \times 29\text{pixel}$ ；步长一般设置为子域的  $1/4$ ，因此本文将步长大小设置为 7。根据经验法则，设置较小的步长需要使用较大的应变滤波，因此把应变滤波设置为 21，则虚拟应变片的大小为  $7 \times 21 = 147\text{pixel}$ ，这三个重要变量的合理设置能够使计算得到的应变具有更少的噪声和更高的精度。

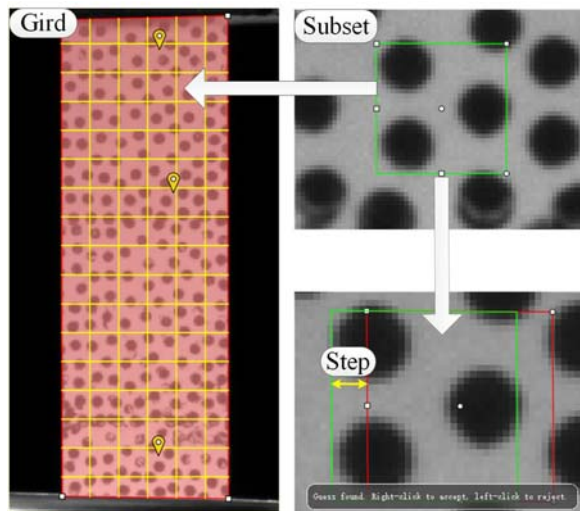


图 5 DIC 分析网格控制

Fig. 5 DIC mesh control

DIC 技术计算区域如图 6 所示，为了避免端部效应，取试件中间区域  $10\text{mm} \times 10\text{mm}$  作为计算区域。DIC 技术计算结果的误差由两个重要参数来评估：数值偏差 (Sigma) 和主应变 (简称  $E1$ )。DIC 技术的计算结果显示，MD 方向的数值偏差为  $\pm 0.178\mu\text{m}$ ，主应变误差为  $\pm 322\mu\epsilon$ ；TD 方向的数值偏差为  $\pm 0.168\mu\text{m}$ ，主应变误差为  $\pm 880\mu\epsilon$ 。数值偏差和主应变的误差均很小，表明 DIC 技术计算结果误差小，精度高。

## 3 PP 隔膜力学性能分析

### 3.1 各向异性实验表征

拉伸实验结果显示 (见图 7)，MD 方向与 TD 方向的拉伸应力-应变曲线具有明显的差异，PP 隔膜具有明显的平面正交各向异性：MD 方向和 TD 方向的弹性模量分别为  $1187\text{MPa}$  和  $738\text{MPa}$ ，MD 方向的弹性模量约是 TD 方向的 1.6 倍；MD 方向的非线性行为比 TD 方向明显，且存在两个屈服点；MD 方



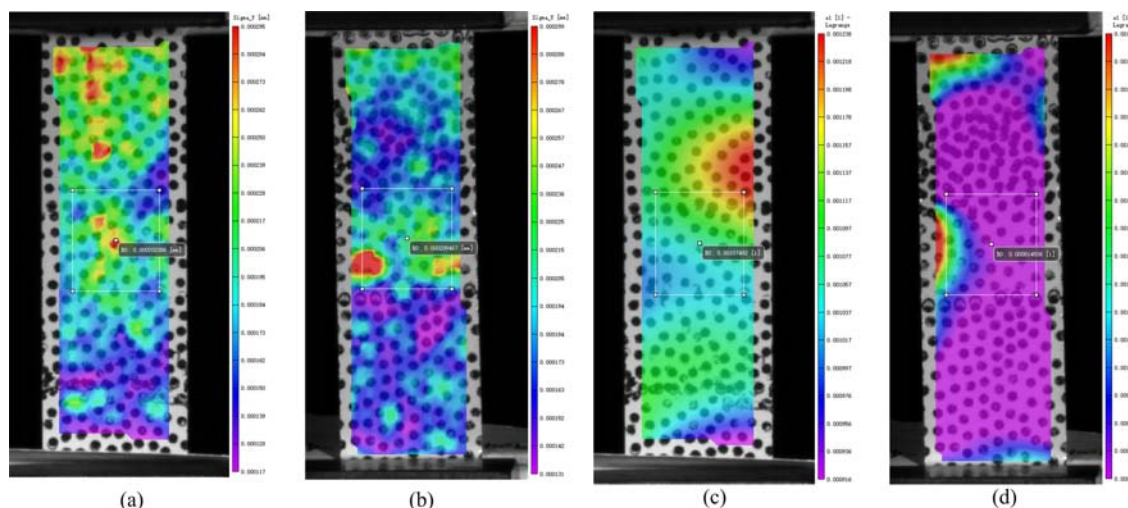


图6 数值偏差分布:(a)MD;(b)TD;应变误差分布:(c)MD;(d)TD

Fig. 6 Numerical deviation distribution: (a) MD; (b) TD; Strain error distribution: (c) MD; (d) TD

向和 TD 方向的强度极限分别为 129MPa 和 18MPa,MD 方向的强度极限约是 TD 方向的 7 倍;MD 方向和 TD 方向的断裂应变分别为 1.7 和 0.15,MD 方向的断裂应变约是 TD 方向的 11 倍;此外,MD 方向的断裂模式与 TD 的断裂模式也明显的不同(图 8),MD 方向的拉伸断口曲折、褶皱、粗糙,而 TD 方向的拉伸断口较光滑、平整、无明显的褶皱。以上差异都表明,PP 隔膜存在明显的面内各向异性。

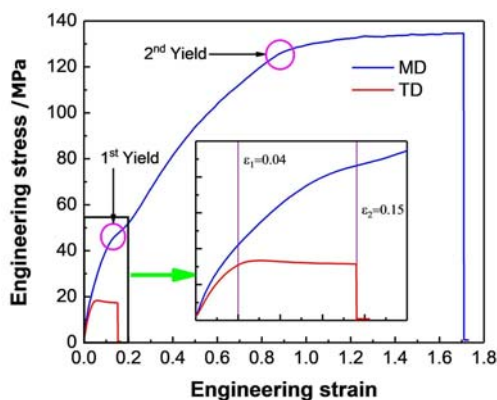


图7 隔膜不同方向的应力-应变曲线对比

Fig. 7 Comparison of stress-strain curves in different directions for separator

值得注意的是,图7中MD方向拉伸的应力-应变曲线存在两个较为明显的转折点(斜率变化较大的两个拐点)。PP隔膜是由纤维和基体构成的一种类似单向纤维铺设的复合材料,MD方向为纤维排列的方向,TD方向为垂直纤维排列的方向,因此,在MD方向进行拉伸,纤维和基体共同承受拉力;在TD方向进行拉伸,主要是基体承受拉力,纤维不能发挥承载作用。MD方向因为存在两个屈服点,分为三个阶段:第一阶段从开始到第一个屈服点,这一阶段纤维和基体共同承受拉力,故MD方向的弹性模量比TD方向大;由于纤维和基体变形协调,基体材料拉伸破坏应变比纤维小,MD方向拉伸应变到达基体破坏应变时,出现第一个屈服点,此时MD方向对应应变为0.15,正好等于TD方向破坏应变,该现象验证了MD方向的第一个屈服点处对应基体破坏。第二阶段从第一个屈服点到第二个屈服点,此阶段中由于基体已经破坏,仅由纤维承载,第二个屈服点只能是由纤维的屈服引起的。第三阶段从第二个屈服点开始到隔膜拉断,此阶段为纤维强化阶段。通过对上面三阶段的分析可知,MD方向拉伸曲线第一个屈服点的出现伴随着基体的破坏,第一个屈服点之后的阶段只有纤维承载,而第二个屈服点则是由于纤维本身屈服引起的。结合图8及上述分析可得,MD方向由基体和纤维共同承载,TD方向主要是基体承载,从材料微观结构上进一步解释了隔膜表现出各向异性的原因。

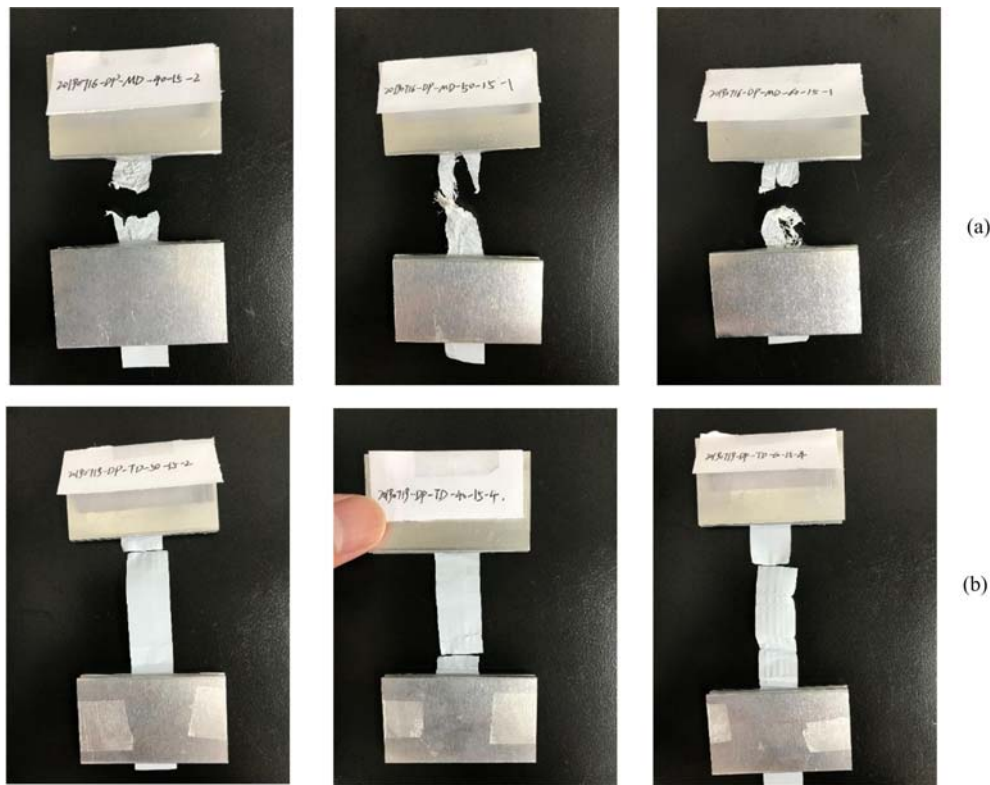


图 8 隔膜不同方向的破坏模式:(a)MD; (b)TD

Fig. 8 Failure modes of separator of different directions; (a)MD; (b)TD

### 3.2 隔膜各向异性弹性行为

本文中 PP 隔膜为正交各向异性材料,隔膜的应力状态假设为平面应力状态,即  $\sigma_3 = \sigma_{23} = \sigma_{31} = 0$ ,其弹性本构方程为

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $\epsilon_{ij}$  为应变;  $\sigma_{ij}$  为应力;  $S_{ij}$  为柔度系数,  $S_{11} = 1/E_{11}$ ,  $S_{22} = 1/E_{22}$ ,  $S_{33} = 1/G_{12}$ ,  $S_{12} = -\nu_{12(MD)}/E_{11} = -\nu_{21(TD)}/E_{22}$ 。  $E_{11}$  和  $E_{22}$  分别为材料主轴 1 和 2 方向的弹性模量;  $G_{12}$  为面内剪切模量;  $\nu_{12(MD)}$  和  $\nu_{21(TD)}$  分别为主泊松比和次泊松比。

在本文的研究中,材料主轴 1 方向和 2 方向即为 MD 和 TD 方向,即

$$E_{11} = E_{MD} \quad (2)$$

$$E_{22} = E_{TD} \quad (3)$$

另外,  $\nu_{12(MD)}$  和  $\nu_{21(TD)}$  由 MD 方向和 TD 方向的平均应变计算得出,即

$$\nu_{12(MD)} = -\frac{\epsilon_{xx}}{\epsilon_{yy}} \quad (4)$$

$$\nu_{21(TD)} = -\frac{\epsilon_{yy}}{\epsilon_{xx}} \quad (5)$$

式中:  $\epsilon_{xx}$  和  $\epsilon_{yy}$  为 DIC 技术测得的  $x$  方向(本文对应 MD 方向)和  $y$  方向(本文对应 TD 方向)的弹性段平均应变。

$G_{12}$  可通过以下方程求解,即

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{1}{E_{\theta}} - \frac{\cos^4 \theta}{E_{11}} - \frac{\sin^4 \theta}{E_{22}} + \frac{2\nu_{12(MD)}}{E_{11}} \quad (6)$$

式中:  $\theta$  为 PP 隔膜单向偏轴纤维拉伸实验纤维与试件拉伸方向的夹角,当  $\theta = 45^\circ$  时,  $E_{45^\circ}$  为  $45^\circ$  单向偏

轴纤维拉伸实验的弹性模量。通过式(6)可以计算剪切模量  $G_{12}$ 。由 Instron 5576 在 MD 方向和 TD 方向拉伸曲线弹性段的斜率可得到  $E_{11}$  和  $E_{22}$  的值,由 DIC 技术通过式(4)和式(5)可以得到  $\nu_{2(MD)}$  和  $\nu_{21(TD)}$  的值,从表 3 中计算  $(E_{11}/E_{22})/(\nu_{2(MD)}/\nu_{21(TD)})$  的结果来看,比值接近为 1,表明通过实验得出的数据和 DIC 技术测得的数据计算出的结果近似,说明由 DIC 技术测得的数据是可靠的。

表 3 剪切模量的计算参数及误差分析

Tab. 3 Calculation parameters and results error analysis of shear modulus

拉伸实验获得的三个方向 拉伸的弹性模量 /MPa			通过 DIC 技术 测得的泊松比		式(6)计算的 剪切模量 /MPa	结果对比		误差
$E_{11}$	$E_{22}$	$E_{45^\circ}$	$\nu_{2(MD)}$	$\nu_{21(TD)}$	$G_{12}$	$\frac{E_{11}}{E_{22}}$	$\frac{\nu_{2(MD)}}{\nu_{21(TD)}}$	$\frac{E_{11}}{E_{22}} \bigg/ \frac{\nu_{2(MD)}}{\nu_{21(TD)}}$
1187.07	738.58	439.61	0.211	0.131	137.76	1.607	1.616	0.994

### 3.3 薄膜的屈服行为表征

本文利用 Hill 屈服准则表征薄膜的屈服特性, Hill 正交各向异性屈服准则假定变形物体的应力状态主轴与各向异性主轴一致,屈服条件为

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \quad (7)$$

式中:  $F, G, H, L, M, N$  为各向异性特征常数;  $\sigma_{11}, \sigma_{22}$  和  $\sigma_{33}$  为正应力,  $\sigma_{12}, \sigma_{23}$  和  $\sigma_{31}$  为剪应力。在平面应力状态下  $\sigma_3 = \sigma_{23} = \sigma_{31} = 0$ , 则屈服准则简化为

$$2f(\sigma_{ij}) = (G + H)\sigma_{11}^2 - 2H\sigma_{11}\sigma_{22} + (F + H)\sigma_{22}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \quad (8)$$

设  $\bar{\sigma}_{11}, \bar{\sigma}_{22}, \bar{\sigma}_{33}$  是各向异性主轴 1、2、3 方向的单向拉伸屈服应力,  $\bar{\sigma}_{12}, \bar{\sigma}_{23}, \bar{\sigma}_{31}$  是相对于各向异性主轴 1、2、3 方向的剪切屈服应力,  $\bar{\sigma}_{45^\circ}$  是偏轴  $45^\circ$  单向拉伸的屈服应力,  $F, G, H, N$  四个特征参数可以表示为

$$\begin{cases} F = \frac{1}{\sigma_{33}^2} \cdot \frac{r_{0^\circ}}{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}} = \frac{r_{0^\circ}}{r_{0^\circ} + 2r_{0^\circ}r_{90^\circ} + r_{90^\circ}} \left( \frac{1}{\sigma_{11}^2} + \frac{1}{\sigma_{22}^2} \right) \\ G = \frac{1}{\sigma_{33}^2} \cdot \frac{r_{90^\circ}}{r_{90^\circ} + r_{0^\circ}} = \frac{r_{90^\circ}}{r_{0^\circ} + 2r_{0^\circ}r_{90^\circ} + r_{90^\circ}} \left( \frac{1}{\sigma_{11}^2} + \frac{1}{\sigma_{22}^2} \right) \\ H = \frac{1}{\sigma_{33}^2} \cdot \frac{r_{0^\circ}r_{90^\circ}}{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}} = \frac{r_{0^\circ}r_{90^\circ}}{r_{0^\circ} + 2r_{0^\circ}r_{90^\circ} + r_{90^\circ}} \left( \frac{1}{\sigma_{11}^2} + \frac{1}{\sigma_{22}^2} \right) \\ N = \frac{2}{\sigma_{45^\circ}^2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sigma_{33}^2} = \frac{2}{\sigma_{45^\circ}^2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}{r_{0^\circ} + 2r_{0^\circ}r_{90^\circ} + r_{90^\circ}} \left( \frac{1}{\sigma_{11}^2} + \frac{1}{\sigma_{22}^2} \right) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $r$  为塑性应变比, 又称为 Lankford 参数, 表征薄膜抵抗变薄的能力, 需要结合 DIC 技术来确定, 进而求得四个各向异性特征参数  $F, G, H, N$ 。

由于 PP 隔膜材料拉伸过程中厚度变化难以测量, 本文通过 DIC 技术测量隔膜试件变形后的位移场, 从而得到长度和宽度的变化。假设在隔膜材料拉伸过程中体积不变, 故可由长度和宽度的变化值求得其厚度的变化,  $r$  值的求解表达式如下:

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{l}{l_0}} = \frac{\ln \frac{b}{b_0}}{\ln \frac{l_0 b_0}{lb}} \quad (10)$$

式中:  $l_0$  为试件的初始长度;  $b_0$  为试件的初始宽度;  $t_0$  为试件的初始厚度;  $l$  为试件拉伸后的长度;  $b$  为试件拉伸后的宽度;  $t$  为试件拉伸后的厚度;  $\epsilon_w$  为试件宽度方向的应变;  $\epsilon_t$  为试件厚度方向的应变。

各向异性特征参数具体获得方法为: 通过  $0^\circ, 90^\circ, 45^\circ$  拉伸实验获得屈服应力, 并通过 DIC 技术测量试件厚度变形和长度变形, 将测得的数据代入式(10)求得塑性应变比  $r$ , 再将  $r$  代入式(9)求得 Hill 理论下的各向异性特征参数(见表 4)。

表4 PP隔膜的屈服应力、塑性应变比和 Hill 各向异性参数  
Tab.4 Yield stress,  $r$  values and Hill parameters of PP separators

单向拉伸屈服应力/MPa			塑性应变比 $r$		各向异性特征常数			
$\bar{\sigma}_{11}$	$\bar{\sigma}_{22}$	$\bar{\sigma}_{45}$	$r_{0^\circ}$	$r_{90^\circ}$	F	G	H	N
11.539	5.653	4.185	0.216	0.110	0.022	0.011	0.003	0.097

## 4 结论

建立不同部件材料的力学性能参数是锂离子电池精细化模型建立的基础,隔膜是锂离子电池内部的关键部位之一,其各向异性力学本构及关键参数在研究锂离子电池的过程中不可忽略。本文结合 DIC 技术,通过实验研究了 PP 隔膜的各向异性力学性能,得到了以下一些结果和结论。

(1) PP 隔膜 MD 方向的力学强度远大于 TD 方向,MD 方向的弹性模量、极限强度和拉伸断裂应变分别约为 TD 方向的 1.6 倍、7 倍和 11 倍。

(2) PP 隔膜中纤维的排列方式导致隔膜不同方向截然不同的破坏模式:MD 方向拉伸断裂面较粗糙,有明显的褶皱和撕裂纤维;而 TD 方向的拉伸断裂面则比较光滑、整齐,无明显褶皱。

(3) 本文根据实验结果解释了 PP 隔膜 MD 方向拉伸应力-应变曲线存在两个屈服点的机理,基体首先屈服伴随第一个屈服点出现,然后继续拉伸至纤维屈服时出现第二个屈服点,纤维屈服后进入强化阶段直至断裂对应第二个屈服点以后的阶段。

(4) 基于拉伸实验数据,结合 DIC 技术求解了隔膜的泊松比和塑性应变比  $r$ ,基于 Hill 准则建立了 PP 隔膜各向异性屈服准则,并确定了屈服准则中关键的各项异性力学参数。

### 参考文献:

- [1] 李晓菲. 纳米 SiO<sub>2</sub>/PVdF-HFP 与 PP 无纺布复合锂离子电池隔膜的制备及性能研究[D]. 江苏:苏州大学, 2014 (LI Xiaofei. Preparation and performance study of nano-SiO<sub>2</sub>/PVDF-HFP and PP non-woven composite lithium-ion battery separator[D]. Jiangsu: Suzhou University, 2014 (in Chinese))
- [2] 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))
- [3] 邓荣贵, 付小敏. 层状岩体力学特性模拟实验研究[J]. 实验力学, 2011, 26(6):721-729 (DENG Ronggui, FU Xiaomin. On the simulative experimental study of mechanical properties of stratified rock mass[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(6):721-729 (in Chinese))
- [4] 周志伟, 王志华, 赵隆茂, 等. 航空用芳纶纸蜂窝各向异性行为研究[J]. 实验力学, 2012, 27(4):440-447 (ZHOU Zhiwei, WANG Zhihua, ZHAO Longmao, et al. Anisotropic behaviors of nomex honeycombs[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(4):440-447 (in Chinese))
- [5] 石昊, 付昱凯, 周波, 等. 砂质泥岩各向异性特征试验研究[J]. 实验力学, 2017, 32(4):472-478 (SHI Hao, FU Yukai, ZHOU Bo, et al. Experimental study of sandy mudstone anisotropic properties[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(4):472-478 (in Chinese))
- [6] Liu B H, Zhang J J, Zhang C, et al. Mechanical integrity of 18650 lithium-ion battery module packing density and packing mode[J]. Engineering Failure Analysis, 2018, 91: 315-326.
- [7] Sahraei E, Campbell B J, Wierzbicki T. Modeling and short circuit detection of 18650 Li-ion cells under mechanical abuse conditions[J]. Journal of Power Sources, 2012, 220:360-372.
- [8] Zhu J E, Zhang X W, Sahraei E, et al. Deformation and failure mechanisms of 18650 battery cells under axial compression[J]. Journal of Power Sources, 2016, 336:332-340.
- [9] Xu J, Liu B H, Wang X Y, et al. Computational model of 18650 lithium-ion battery with coupled strain rate and SOC dependencies[J]. Applied Energy, 2016, 172:180-189.



- [10] Jia Y K, Yin S, Liu B H, et al. Unlocking the coupling mechanical-electrochemical behavior of lithium-ion battery upon dynamic mechanical loading[J]. *Energy*, 2019, 166:951–960.
- [11] Wang L B, Yin S, Xu J. A detailed computational model for cylindrical lithium-ion batteries under mechanical loading: from cell deformation to short-circuit onset[J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 413: 284–292.
- [12] Zhang C, Xu J, Cao L, et al. Constitutive behavior and progressive mechanical failure of electrodes in lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 357: 126–137.
- [13] Wang L B, Yin S, Yu Z X, et al. Unlocking the significant role of shell material for lithium-ion battery safety[J]. *Materials and Design*, 2018, 160:601–610.
- [14] Zhang X W, 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.
- [15] Yan S T, Deng J, Bae C, et al. In-plane orthotropic property characterization of a polymeric battery separator[J]. *Polymer Testing*, 2018, 72:46–54.
- [16] Xu J, Wang L B, Guan J, et al. Coupled effect of strain rate and solvent on dynamic mechanical behaviors of separators in lithium ion batteries[J]. *Materials and Design*, 2016, 95:319–328.
- [17] Zhang X W. Mechanical behavior of shell casing and separator of Lithium-ion battery [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2017.
- [18] Zhang X W, Sahraei E, Wang K. Li-ion battery separators, mechanical integrity and failure mechanisms leading to soft and hard internal shorts[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:32578.
- [19] 习会峰, 姚一鸣, 刘逸平, 等. 泡沫金属中高速拉伸的试验数据处理与材料力学性能测量[J]. *实验力学*, 2021, 35(6):7 (XI Huifeng, YAO Yiming, LIU Yiping, et al. Data processing and mechanical properties measurement of foamed metal in medium to high-speed tensile test[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2021, 35(6):7 (in Chinese))

## Study on the planar anisotropy characteristics of PP separators for lithium-ion batteries

LI Junkui<sup>1</sup>, XI Huifeng<sup>1</sup>, ZHAO Guicheng<sup>1</sup>, HE Linghui<sup>1,2</sup>

(1. College of Mechanics and Construction Engineering, MOE Key Lab of Disaster Forecast and Control in Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China; 2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China)

**Abstract:** The separators play an important role in lithium batteries, which can isolate the positive and negative electrodes, and form the lithium ion migration channel. At present, the study on the basic mechanical parameters of separator anisotropy such as planar anisotropic yield characteristics is still lacking. There are certain restrictions on the establishment of lithium battery models. Most of present models are homogenized, resulting in inaccurate results when simulating short-circuit failure in lithium batteries. The purpose of this work is to represent the plane anisotropy yield criterion of the separators and to lay a theoretical foundation for the establishment of detailed lithium-ion battery model in the future. In this work, the anisotropy characteristics of the separators is systematically analyzed by experimental methods, and the results show that the separators are highly anisotropic. When the PP separators are stretched, the reason for the existence of two yield points in the MD stretching curve is found, and the elasticity of the PP separators and the anisotropy parameters of the yield criterion are further characterized. A basis for the simulation of the separators in the detailed lithium-ion battery model is provided, and the research methods also have some reference value for the research of other anisotropic materials.

**Keywords:** separator; plane anisotropy; hill yield criterion; DIC technique