

高压物理学报

加载角度和线型缺口对锂离子电池隔膜拉伸性能的影响

薛鹏程 范文杰 王根伟 王彬

Effects of Loading Angle and Linear Notch on Tensile Properties of Lithium-Ion Battery Separator

XUE Pengcheng, FAN Wenjie, WANG Genwei, WANG Bin

引用本文:

薛鹏程, 范文杰, 王根伟, 等. 加载角度和线型缺口对锂离子电池隔膜拉伸性能的影响[J]. 高压物理学报, 2020, 34(1):015301.

DOI: 10.11858/gywlb.20190765

XUE Pengcheng, FAN Wenjie, WANG Genwei, et al. Effects of Loading Angle and Linear Notch on Tensile Properties of Lithium-Ion Battery Separator[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(1):015301. DOI: 10.11858/gywlb.20190765

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190765>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

压缩载荷作用下锂离子电池的安全性能

Safety Performance of Power Lithium Ion Battery under Compressive Load

高压物理学报. 2019, 33(6): 065901 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190752>

辅助药型罩材料对线型聚能射流性能影响的数值仿真

Numerical Simulation of the Effect of Auxiliary Liner Material on the Performance of Linear Shaped Charge Jet

高压物理学报. 2018, 32(6): 065106 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180542>

高压对钴酸锂的晶体结构和离子导电率的影响

High Pressure Effect on the Structure and Ionic Conductivity in Layered Cobaltite LiCoO_2

高压物理学报. 2017, 31(5): 529 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.05.004>

多层变角度反应装甲对聚能射流的干扰作用

Interference Effect of Multi-Layered Reactive Armor with a Variable Angle on Shaped Charge Jet

高压物理学报. 2017, 31(5): 566 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.05.009>

拉伸载荷下含孔复合材料层合板的力学性能及失效机理

Mechanical Property and Failure Mechanism of Composite Laminates Containing a Circular Hole under Tension

高压物理学报. 2017, 31(4): 373 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.04.004>

硅橡胶拉伸行为的应变率相关性测试和表征

Experimental Investigation and Modeling of Strain-Rate Dependence on Tensile Behavior of Silicone Rubbers

高压物理学报. 2019, 33(5): 054101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180664>

加载角度和线型缺口对锂离子电池隔膜拉伸性能的影响

薛鹏程^{1,2}, 范文杰^{1,2}, 王根伟^{1,2}, 王彬^{1,3}

(1. 太原理工大学应用力学研究所, 山西 太原 030024;

2. 太原理工大学机械与运载工程学院材料强度与结构冲击山西省重点实验室, 山西 太原 030024;

3. 布鲁内尔大学物理科学、设计与机械学院, 英国 伦敦 UB83PH)

摘要: 锂离子电池隔膜作为防止正负极接触的物理屏障, 其结构完整性对于电池安全至关重要。进行了4种商业隔膜单轴拉伸实验, 分析加载角度和线型缺口对隔膜材料拉伸强度、弹性模量、断裂模式的影响。结果表明: 无缺口试样在 0° 方向上的拉伸强度最大, 90° 方向上拉伸强度最小; 当两个无缺口试样的加载角度互为补角时, 它们的拉伸强度接近。对于缺口试样而言, 缺口方向沿着 90° 的试样有最大破坏载荷; 线型缺口试样有更高的弹性模量, 但是塑性变形大幅减少。无缺口试样和缺口试样在拉伸过程中的断裂模式相同, 即除 0° 试样沿横向断裂外, 其他加载角度的试样均沿着纵向断裂。

关键词: 锂离子电池; 隔膜; 单轴拉伸; 加载角度; 线型缺口

中图分类号: O348.3

文献标识码: A

当今社会, 日益严峻的资源消耗问题和环境污染问题使得新能源汽车取代燃油汽车成为必然趋势。锂离子动力电池作为电动汽车的核心部件, 吸引了大批科研工作者的关注。锂离子电池主要由正极、负极、隔膜、电解液和电池壳5个部分组成, 其中隔膜作为锂离子电池的重要组成部分, 起到隔离电池正负极、只允许锂离子通过同时阻断电子通过的作用。在锂离子电池结构中, 隔膜性能直接影响电池的内阻、电容量、循环寿命和安全性能等。厚度薄、孔隙率高的隔膜赋予锂离子电池低电阻、高能量密度和高功率密度等优点。为了进一步提高电池的热性能, 涂层隔膜和非织造隔膜问世了。目前, 隔膜材料为具有多孔结构的聚烯烃, 根据其制备方法可划分为3类: 拉伸膜、非织造膜和复合膜, 它们在制备工艺和性能上各有优缺点。由于拉伸膜成本较低, 目前在市场上应用较为广泛, 普遍使用的多为干法单向拉伸膜。

在提高锂离子电池性能的同时, 必须保证隔膜具备足够的力学性能避免其正负极接触。隔膜会受到外部载荷和锂离子电池循环过程中内部应力的共同影响。其中外部载荷主要包括机械载荷滥用、组装卷绕的拉伸作用以及电池制造过程中碎屑渗透引起的穿刺作用^[1-7]。在电池服役过程中, 锂化和脱锂^[8-10]、热^[11]、辐射^[12]等因素也会对隔膜的安全产生影响。Zhang等^[13]对多种隔膜材料进行拉伸、压缩和穿刺实验, 研究了隔膜材料的变形和失效特征。Halalay等^[14]通过纳米压痕实验得到不同隔膜弹性模量和硬度的变化规律。Wang等^[15]通过对不同隔膜组装成的电池进行过充电、内部短路和外部短路测试, 研究隔膜材料性能对电池的影响, 发现隔膜的抗穿刺性能、尺寸稳定性等在某些电池故障中起着关键的作用。

* 收稿日期: 2019-04-25; 修回日期: 2019-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(11872265); 山西省青年科技研究基金(201701D221142)

作者简介: 薛鹏程(1993—), 男, 硕士, 主要从事动力电池隔膜的力学性能研究. E-mail: 1014957490@qq.com

通信作者: 王根伟(1974—), 男, 博士, 副教授, 主要从事新能源汽车安全与轻量化研究.

E-mail: gwang@tyut.edu.cn

隔膜材料作为典型的高聚物,其力学性能受温度、拉伸速率和环境的影响。为了研究隔膜拉伸性能随温度升高的变化规律,Avdeev等^[1]在不同温度下对隔膜进行拉伸实验,发现温度对隔膜材料拉伸强度的影响几乎呈线性。Xu等^[16]对0°、45°和90°方向试样进行不同应变率的拉伸实验,研究了隔膜材料的各向异性特性,并且证明隔膜在不同方向上都具有高的应变率效应。Kalnaus等^[17]通过在不同应变率下对不同隔膜材料进行拉伸实验,研究了隔膜材料对应变率的灵敏度,并确定了隔膜材料的应变率强化系数。除了温度和拉伸速率之外,液体环境对隔膜性能也存在影响,Chen等^[18]发现液体电解质对隔膜材料的尺寸稳定性和机械性能具有明显的负面影响,特别是对隔膜抗裂性的影响。除此以外,还发现隔膜拉伸性能会随着电解液中锂盐浓度的增加而下降。人们不仅对不同环境下隔膜材料的拉伸性能进行研究,也对其压缩性能进行了分析,Cannarella等^[19]研究了不同应变率和不同溶液环境中隔膜材料的压缩性能,提出了一个适用于压缩试验机测量隔膜压缩性能的简单程序。

为了能够预测隔膜材料的机械性能,建立了关于隔膜的模型和准则。Zhang等^[13]在LS-DYNA中开发了PE隔膜的单元模型,由此成功预测了PE隔膜在穿刺实验中的响应;Xu等^[20]开发出基于隔膜微结构的建模方法,用于预测隔膜的机械性能;隔膜故障引起短路是造成锂离子电池起火的主要原因,Wang等^[21]基于隔膜故障建立了短路标准,从而使机械模型能够从电化学方面预测锂离子电池短路。

分析研究隔膜的变形破坏机理有助于深层次地了解隔膜性能。Chen等^[22]在原子力显微镜下观察隔膜拉伸过程,得出无缺口试样在MD(Machine direction)和TD(Transverse direction)方向拉伸断裂过程中的变形机理,并且对存在缺口的试样进行了EWF实验(Essential work of fracture testing)和TPR实验(Tear propagation resistance testing)。Drozdov等^[23]发现聚烯烃隔膜拉伸过程中的弹性和塑性阶段分别对应于非晶体区域纠缠链的对齐和结晶区域结晶面的滑移或分离。Li等^[24]对聚丙烯材料进行拉伸实验,发现材料强化阶段主要与半结晶高分子的熔融-重结晶过程有关。Rozanski等^[25]和Zuo等^[26]研究了聚丙烯材料单轴拉伸过程中屈服点前后应变的变化机理。

目前,对隔膜拉伸强度的研究主要集中在0°、45°和90°方向,很少对隔膜材料在其他方向的力学性能进行研究。以往的研究表明,干法制备的动力电池隔膜是一种各向异性材料,只有在更多方向进行力学性能测试,才能对该种材料获得足够的了解。除此以外,由于在隔膜切割制备过程、卷绕过程和使用过程中,不可避免地在隔膜材料边缘产生和留下微小缺口,因此研究隔膜存在缺口时的拉伸破坏行为是非常有必要的。本研究基于4种不同类型的隔膜,对无缺口试样和缺口试样进行多方向的单轴拉伸实验,研究拉伸强度和断裂模式随加载角度的变化规律,分析线型缺口的存在对隔膜材料力学性能的影响。该研究能够帮助隔膜制造商优化隔膜性能,也为锂离子电池隔膜的数值模拟提供参数依据。

1 隔膜材料实验

1.1 试样制备

选取4种干法单向拉伸的商业隔膜作为研究对象,分别为:25 μm厚隔膜(S-25)、16 μm厚隔膜(S-16)、16 μm厚且包含4 μm厚的单涂层隔膜(SC-16)、16 μm厚包含正反面各2 μm厚的双涂层隔膜(DC-16)。图1为单涂层隔膜SC-16的扫描电子显微镜(SEM)成像图。其中图1(a)为SC-16无涂层面的SEM图,展示了典型的干法单向拉伸隔膜的微观形貌。S-16与S-25具有类似的表面微观结构。涂层隔膜DC-16与SC-16的涂层材料为无机纳米颗粒 Al_2O_3 ,图1(b)是SC-16涂层面的SEM图,图中的颗粒物即为 Al_2O_3 。

使用锋利的手术刀对隔膜试样进行切割,每组5个试样。拉伸实验选取如图2所示的8个不同加载角度。试样尺寸均为长度60 mm、标距35 mm、宽度25 mm的长方形,如图2中0°试样所示。制备线型缺口试样,如图3所示,每个试样制备一组对称线型缺口,根据缺口位置A、B、C,可分为3种工况。图中L表示韧带长度,根据L=5、10、15和20 mm再分为4种工况。其中A位置在试样中间,A、B相距9 mm,B、C相距4.5 mm。图2和图3中的红色箭头表示拉伸方向,灰色部分表示夹持段。

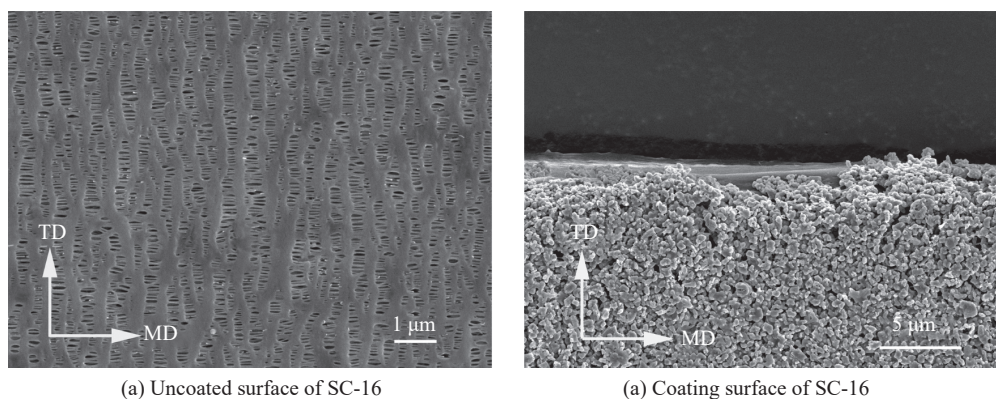


图 1 SC-16 的 SEM 图像

Fig. 1 SEM image of SC-16

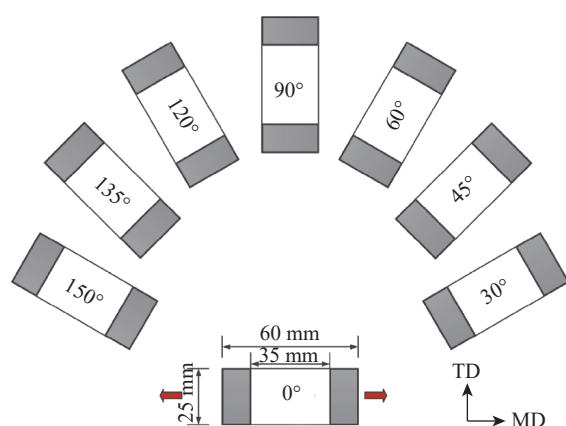


图 2 加载角度示意图

Fig. 2 Schematic of the loading angle

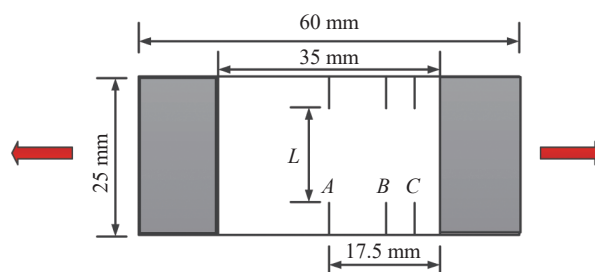


图 3 线型缺口试样示意图

Fig. 3 Schematic of the linear notched specimen

1.2 实验方法

本实验在干燥室温条件下使用 Instron 5544 试验机对隔膜试样进行单轴拉伸实验。实验过程中传感器为量程为 $0 \sim 200 \text{ N}$ 、应变率为 0.01 s^{-1} ，并且设置 0.01 N 的预载荷，保持试样笔直^[1]。实验过程中尽量保证试样和夹具共面，并选用与隔膜试样相同宽度的夹具，保持拉伸方向沿着隔膜中线^[1]，从而提高拉伸结果的准确性。在夹具里放置橡皮膏，防止试样滑脱，并降低夹具对试样夹持段的破坏^[17]。不同加载方向的隔膜试样用不同的角度来命名，断裂方向选用 MD 和 TD 表示。

2 实验结果与分析

2.1 无缺口试样拉伸试验

图 4 是不同加载角度下 4 种隔膜无缺口试样的应力-应变曲线。从图 4 中可以看出，隔膜是一种典型的弹塑性材料。4 种隔膜材料在 0° 试样的应力-应变曲线上都存在明显的屈服点。比较涂层隔膜和无涂层隔膜可以发现，涂层隔膜的 0° 无缺口试样除了有最大的拉伸强度外，还有最大的破坏应变；从图 4(c) 中 30° 无缺口试样曲线的局部放大图中可以发现，有涂层的隔膜在达到拉伸强度后不会立即断裂，而是载荷逐渐减少，表现出应力-应变曲线与垂直方向有一定的夹角。这可能是由于隔膜在达到拉伸强度以后，涂层与隔膜基体之间的黏结剂并没有完全断裂，还能承受一部分的载荷，使得载荷不会突然降为 0 N 。图 4(c)、图 4(d) 为涂层隔膜的应力-应变曲线，与无涂层隔膜比较可以发现，涂层隔膜没有明显的塑性流动阶段；除 0° 方向外，涂层隔膜其他方向试样的拉伸破坏应变均明显小于无涂层隔膜。

无缺口试样在不同加载角度的单轴拉伸实验中,除 0° 试样沿着 TD 方向断裂以外,其他方向试样均沿着 MD 方向断裂。

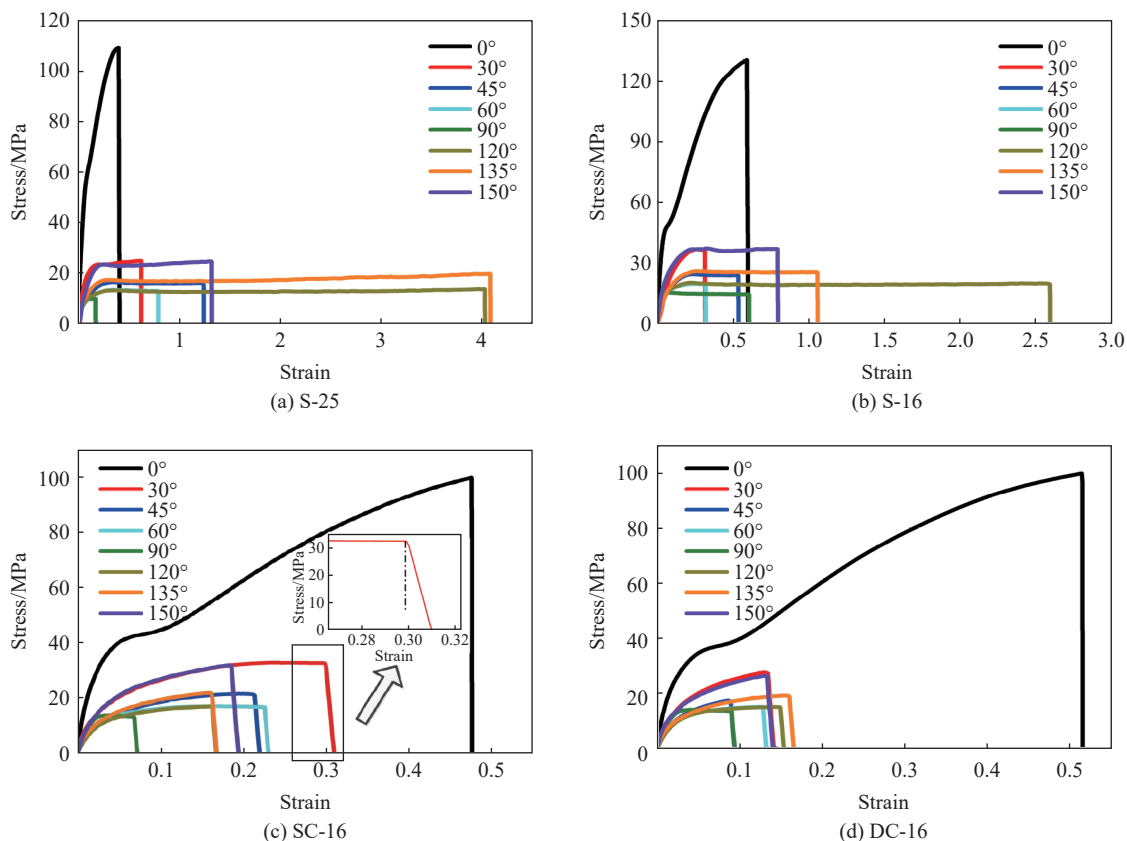


图 4 无缺口试样在 8 个加载角度上的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of unnotched specimens at 8 loading angles

表 1 列出了不同加载角度下无缺口试样的拉伸强度 σ_θ , 其中 θ 表示加载角度。可以看到,对于同一种隔膜的两个试样,当加载角度互为补角时,其拉伸强度接近,这是由于干法单向拉伸隔膜沿 MD 方向拉伸制备工艺决定的。干法拉伸隔膜结构关于 TD(90° 方向)轴对称,互为补角意味着关于 TD 对称,所以这两个方向的试样的拉伸强度接近。从图 1(a) 中的 SEM 图也可以看出,干法单向拉伸隔膜的微观结构关于 TD 对称。对于不同方向的隔膜试样来说, 0° 试样的拉伸强度 σ_0 最大, 90° 试样的拉伸强度 σ_{90} 最小。不同隔膜材料的 σ_0 与 σ_{90} 均值比可以反映隔膜材料各向异性的程度。四种隔膜材料在该比值的大小次序为 S-25 > S-16 > SC-16 > DC-16。无涂层隔膜 S-25 和 S-16 的各向异性程度大于涂层隔膜 SC-16 和 DC-16,这是因为涂层隔膜的 Al_2O_3 颗粒被均匀涂覆到基膜上,其涂层为各向同性,两种材料复合以后降低了材料的各向异性;由于 SC-16 和 DC-16 具有相同的涂层厚度,所以单涂层的 SC-16 和双涂

表 1 不同加载角度下无缺口试样的拉伸强度

Table 1 Tensile strength of unnotched specimens at different loading angles

Specimen type	σ_θ/MPa								σ_0/σ_{90}
	0°	30°	45°	60°	90°	120°	135°	150°	
S-25	107.8 ± 10.8	26.3 ± 1.7	17.3 ± 0.3	13.1 ± 0.4	10.0 ± 0.2	13.8 ± 0.5	19.1 ± 1.2	25.4 ± 1.2	10.8
S-16	127.3 ± 10.6	37.7 ± 1.5	25.4 ± 1.2	19.7 ± 0.3	15.7 ± 0.5	19.4 ± 0.5	25.7 ± 1.1	38.3 ± 0.8	8.1
SC-16	101.2 ± 4.9	30.9 ± 1.8	21.6 ± 1.1	16.9 ± 0.4	13.8 ± 0.4	17.1 ± 0.5	20.8 ± 1.7	29.5 ± 3.1	7.3
DC-16	98.7 ± 7.7	27.1 ± 2.1	18.1 ± 0.8	15.2 ± 0.4	13.8 ± 0.4	15.1 ± 0.6	19.2 ± 0.4	26.5 ± 1.7	7.2

层的 DC-16 在各向异性程度上接近。在不同方向上比较同一厂家 S-16 和 SC-16 的拉伸强度可以发现, SC-16 的拉伸强度只有 S-16 拉伸强度的 80% 左右。这是由于总共 $16\text{ }\mu\text{m}$ 厚的 SC-16 中有 25% 是涂层厚度, 涂层虽然可以提高电池的热性能, 但是承受载荷能力却远小于基膜。

2.2 线型缺口试样拉伸试验

2.2.1 缺口位置对隔膜拉伸性能的影响

图 5 显示了 S-25 的 0° 缺口试样在不同位置处的力-位移曲线, 图中 5、10、15、20 mm 分别对应韧带长度为 5、10、15、20 mm 缺口试样的力-位移曲线, A、B、C 表示缺口位置。从图 5(a)、图 5(b)、图 5(c) 中可以看出, 当线型缺口试样的韧带长度 L 不同时, 得到的力-位移曲线也不同。随着 L 的增大, 拉断缺口试样需要的力和位移也越大。图 5(d) 显示了试样缺口分别位于 A、B、C 3 个位置处所对应的力-位移曲线, 可以看出韧带长度相同的缺口试样有几乎相同的力-位移曲线。这是因为在准静态下进行拉伸实验时, 缺口试样时刻保持受力平衡, 所以表现出缺口位置对材料拉伸性能没有影响。因此, 在接下来缺口试样的拉伸实验中, 只对缺口在 A 位置处的情况进行分析研究。

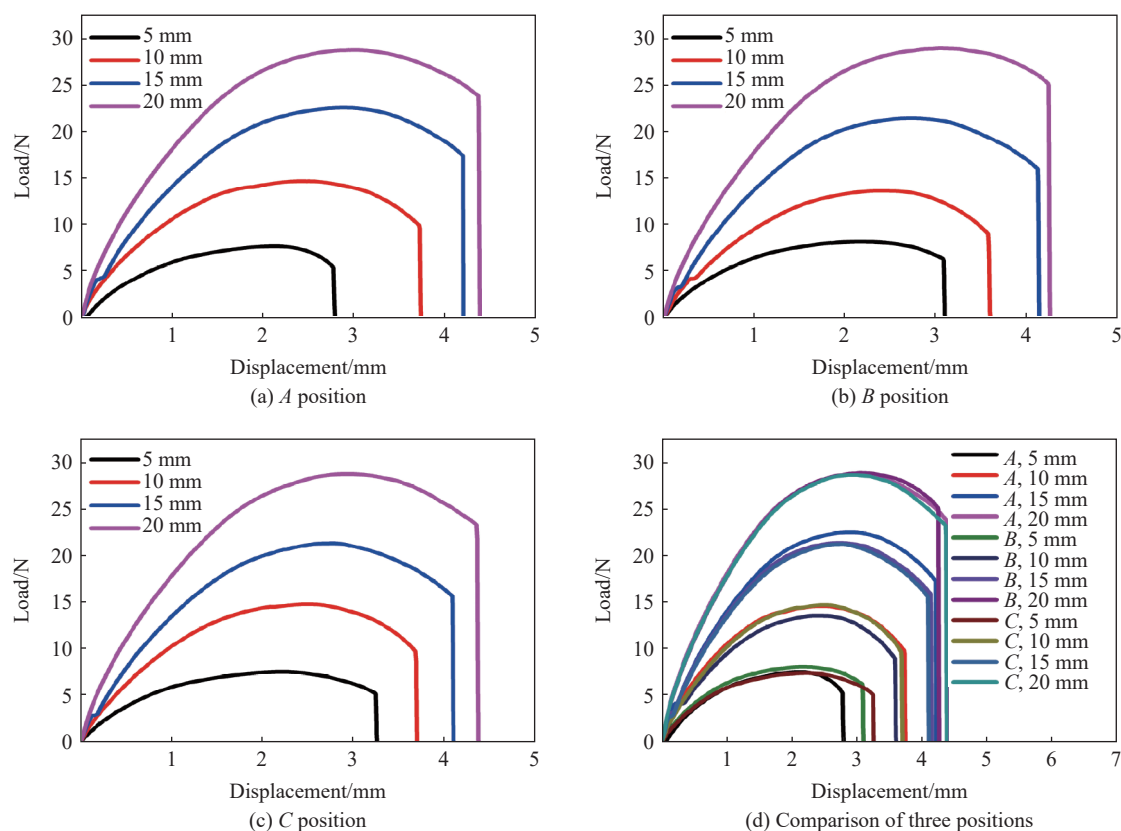


图 5 S-25 的 0° 缺口试样在不同位置处的力-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curve of the 0° notched specimens at different positions for S-25

2.2.2 缺口尺寸对隔膜拉伸性能的影响

根据无缺口试样力学性能随不同加载角度的变化规律可以发现, 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内选取 3 个方向就可以分析隔膜其他方向上的性能, 因此对于缺口试样只选取 0° 、 45° 和 90° 方向进行研究。实验中发现, 只有 0° 缺口试样沿 TD 断裂, 45° 和 90° 缺口试样均沿着 MD 断裂, 这与无缺口试样拉伸实验中的断裂方向相同, 说明缺口的存在不会影响试样拉伸断裂方向。图 6 比较了 3 个加载角度下韧带长度分别为 5、10、15、20 和 25 mm 的缺口试样和无缺口试样的应力-应变曲线, 其中韧带长度为 25 mm 即等于试样宽度, 代表无缺口试样的应力-应变曲线。图 6(b)、图 6(c)、图 6(e)、图 6(f) 中局部应力-应变曲线过于密集, 为便于观察与分析, 将韧带长度为 5、10、15、20 mm 的缺口试样的应力-应变曲线放大, 见插图。

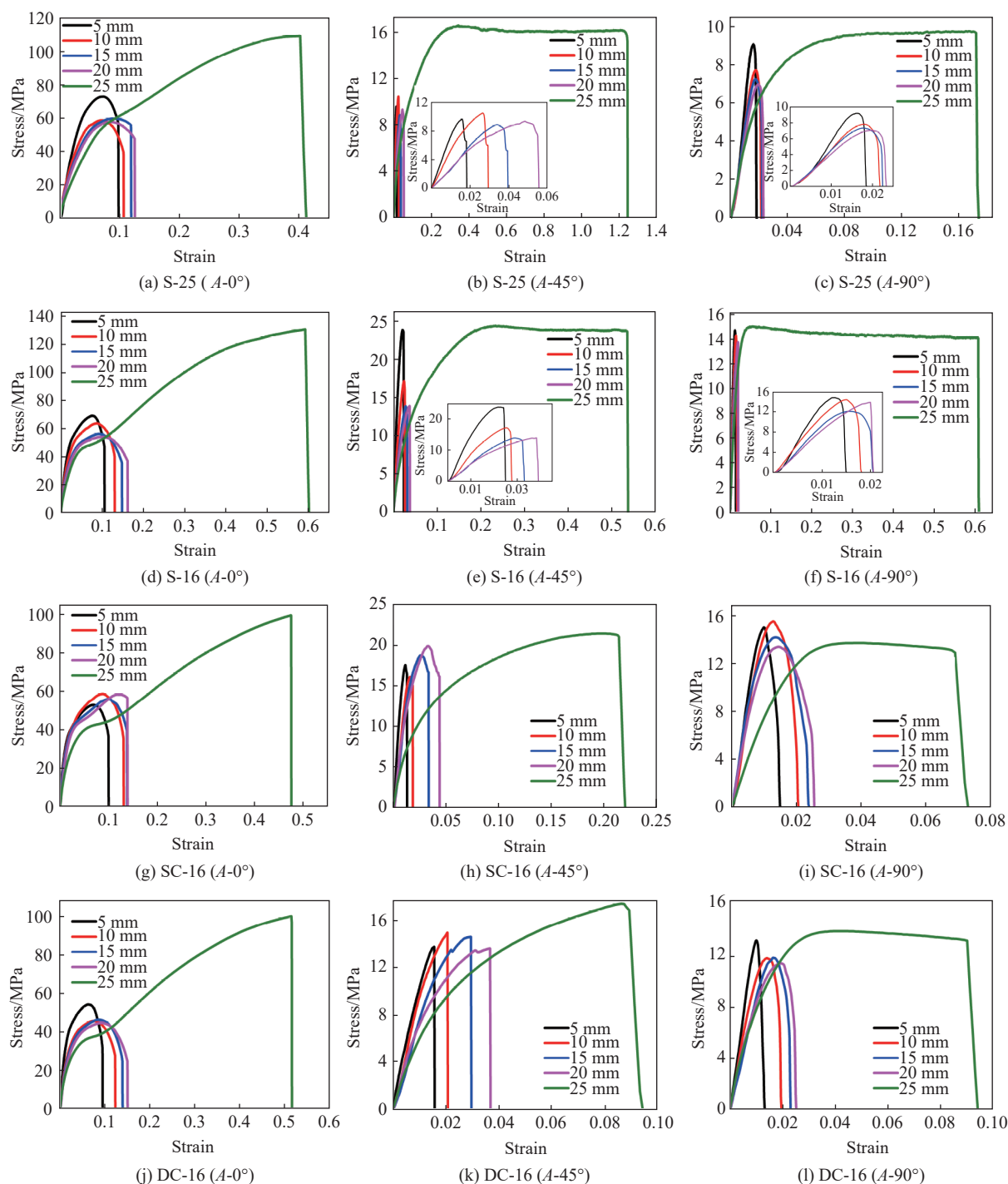


图 6 缺口试样与无缺口试样应力-应变曲线的比较

Fig. 6 Comparison of stress-strain curves between notched specimens and unnotched specimens

从图 6 中可以发现: 线型缺口提高了试样的弹性模量; 韧带长度越小即缺口越深, 弹性模量增加越明显; 破坏应变随着韧带长度的增加而增大; 在拉伸过程中缺口试样相比于无缺口试样来说, 破坏应变减小, 其塑性阶段大幅减小; 除了 SC-16 的 90° 缺口试样外, 其余缺口试样的拉伸强度全都比相应无缺口试样低, 说明缺口的存在会降低材料的拉伸强度; 缺口试样的线型缺口方向沿 90° 方向时 (即 0° 缺口试样), 其拉伸强度最大。通过分析可以知道, 隔膜作为高聚物具有和金属材料相似的缺口效应, 即缺口试样在拉伸过程中, 也会像金属材料一样在缺口位置处出现应力集中现象。

3 结 论

通过 4 种隔膜材料线型缺口试样和无缺口试样在不同加载角度下的拉伸实验, 研究了加载角度与隔膜材料拉伸强度的关系, 得到不同加载角度试样的断裂方向, 分析了线型缺口位置和尺寸对于隔膜力学性能的影响, 得到如下结论。

(1) 对于同种隔膜材料来说, 加载角度互为补角的两个试样的 σ_0 大小相近。 σ_0 与 σ_{90} 比值的大小关系为 S-25 > S-16 > SC-16 > DC-16。

(2) 缺口使隔膜材料的弹性模量升高, 塑性降低; 韧带长度越小即缺口越深, 弹性模量越大。

(3) 单轴拉伸实验中, 缺口试样的破坏应变随着韧带长度的增加而增大。

(4) 拉伸实验中, 缺口试样和无缺口试样的断裂方向相同, 即除 0° 试样沿着 TD 断裂, 其他方向均沿着 MD 断裂。

参考文献:

- [1] AVDEEV I, MARTINSEN M, FRANCIS A. Rate- and temperature-dependent material behavior of a multilayer polymer battery separator [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23(1): 315–325.
- [2] HUANG X S. Separator technologies for lithium-ion batteries [J]. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2011, 15(4): 649–662.
- [3] ROTH E P, DOUGHTY D H, PILE D L. Effects of separator breakdown on abuse response of 18650 Li-ion cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 174(2): 579–583.
- [4] SANTHANAGOPALAN S, RAMADASS P, ZHANG J Z. Analysis of internal short-circuit in a lithium ion cell [J]. *Journal of Power Sources*, 2009, 194(1): 550–557.
- [5] DARCY E. Screening Li-ion batteries for internal shorts [J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 174(2): 575–578.
- [6] SPOTNITZ R M, WEAVER J, YEDUVAKA G, et al. Simulation of abuse tolerance of lithium-ion battery packs [J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 163(2): 1080–1086.
- [7] BÖHNSTEDT W. Challenges for automotive battery separator development [J]. *Journal of Power Sources*, 1997, 67(1/2): 299–305.
- [8] WANG X H, SHEN W H, HUANG X F, et al. Estimating the thickness of diffusive solid electrolyte interface [J]. *Science China*, 2017, 60(6): 064612.
- [9] MA Z S, XIE Z C, WANG Y, et al. Failure modes of hollow core-shell structural active materials during the lithiation-delithiation process [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 290: 114–122.
- [10] WU H, XIE Z C, WANG Y, et al. Modeling diffusion-induced stress on two-phase lithiation in lithium-ion batteries [J]. *European Journal of Mechanics A*, 2018, 71: 320–325.
- [11] HU B, MA Z S, LEI W X, et al. A chemo-mechanical model coupled with thermal effect on the hollow core-shell electrodes in lithium-ion batteries [J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2017, 7(4): 199–206.
- [12] WU H, XIE Z C, WANG Y, et al. A constitutive model coupling irradiation with two-phase lithiation for lithium-ion battery electrodes [J]. *Philosophical Magazine*, 2019, 99(8): 992–1013.
- [13] 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.
- [14] HALALAY I C, LUKITSCH M J, BALOGH M P, et al. Nanoindentation testing of separators for lithium-ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 238: 469–477.
- [15] WANG E, WU H P, CHIU C H, et al. The effect of battery separator properties on thermal ramp, overcharge and short circuiting of rechargeable Li-ion batteries [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2019, 166(2): A125–A131.
- [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 & Design*, 2016, 95: 319–328.
- [17] KALNAUS S, WANG Y L, TURNER J A. Mechanical behavior and failure mechanisms of Li-ion battery separators [J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 348: 255–263.

- [18] CHEN J H, HU H J, LI S, et al. Evolution of mechanical properties of polypropylene separator in liquid electrolytes for lithium-ion batteries [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2018, 135(27): 46441.
- [19] CANNARELLA J, LIU X Y, LENG C Z, et al. Mechanical properties of a battery separator under compression and tension [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2014, 161(11): F3117–F3122.
- [20] XU H Y, ZHU M, MARCICKI J, et al. Mechanical modeling of battery separator based on microstructure image analysis and stochastic characterization [J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 345: 137–145.
- [21] 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.
- [22] CHEN J C, YAN Y D, SUN T, et al. Deformation and fracture behaviors of microporous polymer separators for lithium ion batteries [J]. *RSC Advances*, 2014, 4(29): 14904.
- [23] DROZDOV A D, DE C CHRISTIANSEN J. Viscoelasticity and viscoplasticity of semicrystalline polymers: structure-property relations for high-density polyethylene [J]. *Computational Materials Science*, 2007, 39(4): 729–751.
- [24] LI X X, WU H Y, WANG Y, et al. Study on the β to α transformation of PP/POE blends with β -phase nucleating agent during the tensile deformation process [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527(3): 531–538.
- [25] ROZANSKI A, GALESKI A, DEBOWSKA M. Initiation of cavitation of polypropylene during tensile drawing [J]. *Macromolecules*, 2011, 44(1): 20–28.
- [26] ZUO F, KEUM J K, CHEN X M, et al. The role of interlamellar chain entanglement in deformation-induced structure changes during uniaxial stretching of isotactic polypropylene [J]. *Polymer*, 2007, 48(23): 6867–6880.

Effects of Loading Angle and Linear Notch on Tensile Properties of Lithium-Ion Battery Separator

XUE Pengcheng^{1,2}, FAN Wenjie^{1,2}, WANG Genwei^{1,2}, WANG Bin^{1,3}

(1. Institute of Applied Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

2. Shanxi Key Laboratory of Material Strength & Structural Impact, College of Mechanical and Vehicle Engineering of Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

3. College of Engineering, Design and Physical Sciences, Brunel University, London UB83PH, UK)

Abstract: Lithium-ion battery separators act as the physical barriers to prevent contact between the positive and negative electrodes, and their structural integrity is critical to battery safety. In this paper, uniaxial tensile tests were carried out on four kinds of commercial separators, and the effects of loading angle and linear notch on tensile strength, elastic modulus and fracture mode were analyzed. The results show that the tensile strength of the 0° specimens without notch is the largest and the tensile strength of 90° specimens is the smallest. When the loading angles of two notched specimens are supplementary, their tensile strength is close to each other. For the notched specimens, the failure load is the largest when the notched direction is along 90°. The linear notched specimens have higher elastic modulus, but the plastic deformation is greatly reduced. Both the unnotched specimens and the notched specimens are broken along MD (machine direction) except for the 0° specimens along TD (transverse direction).

Keywords: lithium-ion battery; separator; uniaxial tension; loading angle; linear notch