

## 双轴向经编类膜材 PVDF8028 偏轴强度及刚度特征

陈建稳<sup>1†</sup>, 周涵<sup>1</sup>, 陈务军<sup>2</sup>, 张宁<sup>1</sup>, 王明洋<sup>3</sup>, 孙巍巍<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学 理学院, 江苏 南京 210094; 2. 上海交通大学 空间结构研究中心, 上海 200030;  
3. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:**双轴向经编类膜材具有多层次的复合结构,为深入揭示其强度及刚度特征,以高性能膜材 Seaman PVDF8028 为研究对象,进行了 7 个偏轴角度(梯度 15°)的拉伸力学性能试验,获得了各角度下应力-应变关系、强度及变形数据,推导了相应弹模-应变关系并对其衍变规律进行了深入研究.研究表明:双轴向经编类膜材 PVDF8028 为典型的非线性、各向异性材料;各角度下的变形刚度特征差异明显,且表现出规律性的衍变特征;应变全域内的应力及弹模关系曲线呈现出特征鲜明的 3 阶段:起始线弹性段、应变强化段及应力强化段;此外,膜材的强度随角度变化表现出典型的“W”形规律,异于 Tsai-Hill 等强度准则的“U”形规律.所得研究结论可为双轴向经编类膜材变形强度预测及相应膜结构的设计分析提供有益参考.

**关键词:**双轴经编织物;力学性能;偏轴;强度;刚度

**中图分类号:**TU353;TU502.6 **文献标志码:**A

## Mechanical Characteristics of Off-axis Tensile Strength and Stiffness of Biaxial Warp-knitted Fabric PVDF8028

CHEN Jianwen<sup>1†</sup>, ZHOU Han<sup>1</sup>, CHEN Wujun<sup>2</sup>, ZHANG Ning<sup>1</sup>, WANG Mingyang<sup>3</sup>, SUN Weiwei<sup>1</sup>

(1. School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;  
2. Space Structures Research Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;  
3. School of Mechanical and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** To reveal detailedly the strength and stiffness characteristics of biaxial warp-knitted fabrics, which contain multi-layered composite structures, high performance biaxial warp-knitted fabric Seaman PVDF8028 was taken as the research object, and seven tensile tests of off-axis angles with a gradient of 15° were performed. Based on the obtained stress-strain relationship, strength and deformation data of different angles, the relationship between elastic modulus and strain was deduced, and its evolution was analyzed minutely. The results show that biaxial warp-knitted fabric PVDF8028 is a typical nonlinear and anisotropic material. Stiffness characteristics of different angles present obvious differences and evolve regularly. In the whole tested strain range, the stress-strain relationship and

\* 收稿日期:2018-11-11

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51608270), National Natural Science Foundation of China(51608270); 江苏省基础研究计划资助项目(BK20150775, BK20191290), The Fundamental Research Program of Jiangsu Province(BK20150775, BK20191290); 中国博士后科学基金资助项目(2016M601816, 2017T100371), The China Postdoctoral Science Foundation(2016M601816, 2017T100371); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(30916011342), The Fundamental Research Funds for the Central Universities(30916011342)

**作者简介:**陈建稳(1981—), 男, 山东菏泽人, 南京理工大学副教授, 博士

† 通讯联系人, E-mail: jianwench@njut.edu.cn, Jianwench@yeah.net

elastic modulus-strain relationship exhibit three distinct sections, including the initial linear elastic section, strain hardening section, and stress hardening section. Additionally, there is a “W” shaped relationship between tensile strength and off-axis angles, which is different from the “U” shaped relationship of Tsai-Hill strength criterion. The results can provide some useful references for strength prediction and deformation analysis of biaxial warp-knitted fabrics, as well as the design and analysis of membrane structures.

**Key words:** biaxial warp-knitted fabrics; mechanical properties; off-axis; strength; stiffness

膜结构是一类新式空间结构, 因其在节能、绿色、适用性及施工速度等方面的突出优势, 已逐渐发展成为体育馆、展览馆等大型公共建筑的重要形式<sup>[1-3]</sup>. 近年来, 空气质量日益恶化, 人们的健康意识不断提高, 可隔绝雾霾等污染、智能净化空气的充气膜结构逐渐受到青睐, 因此对其设计、施工及材料力学性能分析等方面的研究成为热点<sup>[4-6]</sup>.

传统平纹织物类膜材采用经纬纱上下交织方式, 而双轴向经编类膜材采用经纬平直铺纱并配合圈纱固定, 后者在拉伸、扭曲等变形的稳定性、刚度、强度等机械性能的发挥水平方面具有优势, 目前, 在欧美等国的气承式膜结构中广泛应用<sup>[7]</sup>. 双轴向经编类膜材作为充气膜结构外膜的主体材料<sup>[8]</sup>, 起着承担外载和内压的关键作用, 其力学性能对于充气膜结构设计分析及运行维护具有重要意义.

目前, 国内外对于平纹织物膜材的力学性能有较深入的研究<sup>[9-15]</sup>, 而在双轴向经编类膜材方面的研究较少<sup>[16-18]</sup>, 尤其在偏轴拉伸力学变形及强度特征方面的研究尚不足<sup>[19-22]</sup>. 双轴向经编类膜材具有特殊的经编组织结构, 为典型的各向异性材料, 其力学性能受偏轴角度影响显著. 另外, 在织物膜材的强度准则适用性及刚度特征方面国内外学者也存在分歧<sup>[23-25]</sup>. 为有效揭示双轴向经编类膜材的力学响应特征, 提高充气膜结构设计分析的可靠性, 有必要开展双轴向经编类膜材偏轴拉伸力学性能的研究.

本文以高性能双轴向经编类膜材 Seaman PVDF8028 为研究对象, 针对 7 个角度的偏轴试件进行拉伸试验, 系统分析膜材的变形、强度特征及力学参数随偏轴角度的衍化规律, 所得结论及所提方法可为充气膜结构的设计分析及双轴向经编类膜材的优化设计提供参考.

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

试验采用高性能 Seaman PVDF8028 建筑膜材, 厚度为 0.74 mm, 面密度为 949 g/m<sup>2</sup>, 膜材采用双轴向经编的工艺制造而成, 其经纬向纱线密度为 8.8×7.6 根/cm(经×纬). PVDF8028 膜材的结构示意图见图 1.

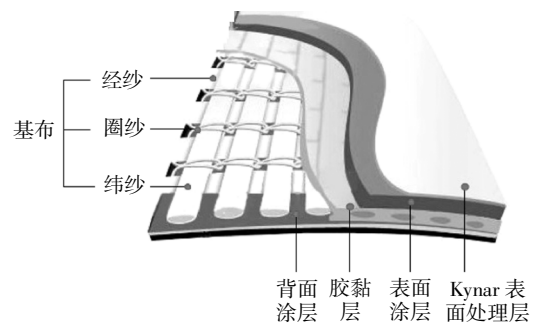
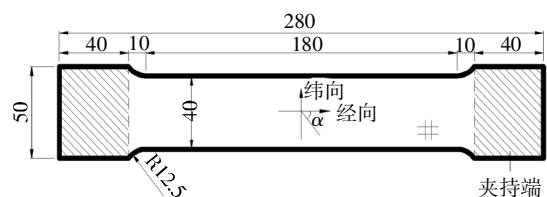


图 1 PVDF8028 的结构示意图

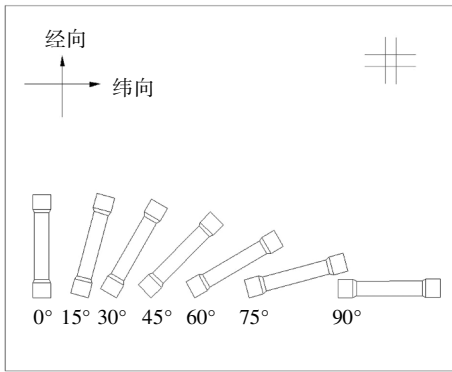
Fig.1 Structural diagram of PVDF8028

### 1.2 试件尺寸

试验采用哑铃型试件, 试件尺寸及分布见图 2. 试件总长度为 280 mm, 有效区域为 180 mm×40 mm. 以经向为基准方向, 偏轴角度共 7 个: 0°、15°、30°、45°、60°、75°和 90°. 每个角度 3 个试件, 以确保试验的可靠性.



(a) 试件尺寸



(b) 试件分布

图2 哑铃型试件尺寸(mm)及分布

Fig.2 Dimensions and distribution of dumbbell specimen

1.3 试验环境

试验室温度为(20±2)℃,相对湿度为65%±3%.

1.4 试验设备及加载制度

试验设备采用双柱落地式电子万能试验机UTM4000(图3).试验参考《膜结构检测技术规程》<sup>[26]</sup>,预张拉5N,常速拉伸至破坏,拉伸速率为50mm/min,引伸计标距为50mm.

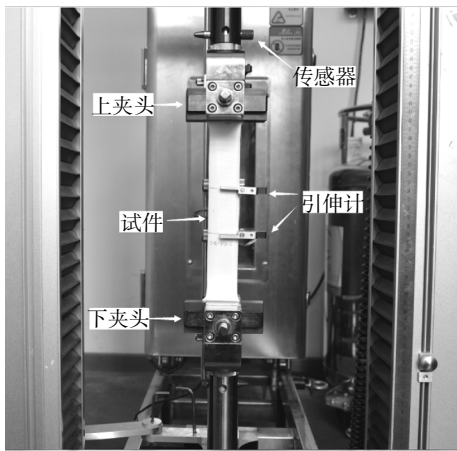


图3 UTM4000 电子万能试验机

Fig.3 UTM4000 electronic universal testing machine

2 偏轴拉伸应力-应变关系

2.1 应力-应变关系模型

不同偏轴角度下PVDF膜材的应力-应变曲线如图4所示.

由图4可知,膜材的非线性特征显著,且随偏轴角度的改变而变化明显,同时,膜材表现出明显的各向异性,各角度下材料的变形及刚度差异较大.各角度间虽存在较大差异,但均可用三段式描述其应力-应变关系:起始线弹性段、应变强化段、应力强

化段,如图5所示,具体描述如下:

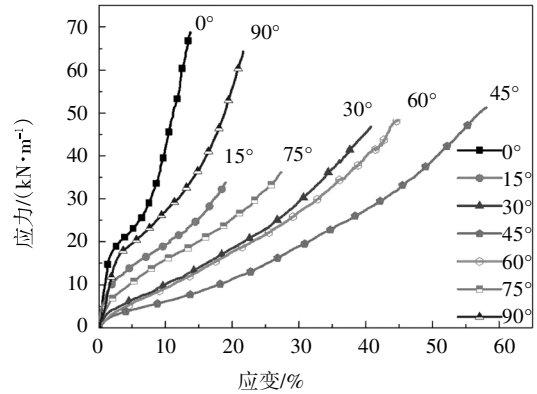


图4 偏轴拉伸应力-应变曲线

Fig.4 Bias tensile stress-strain curves

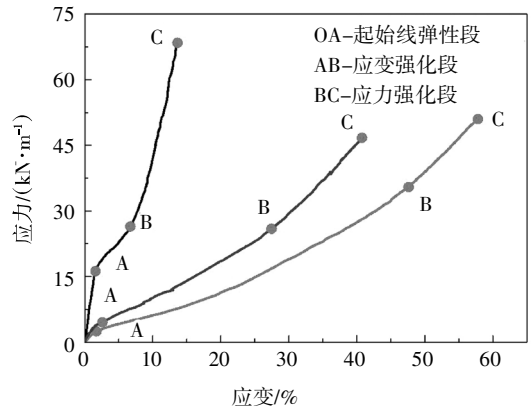


图5 偏轴拉伸应力-应变关系模型

Fig.5 Relationship model of bias tensile stress-strain

1)OA(起始线弹性段):第一个准线性段,变形较小,线性特征较明显;此时高分子涂层和基布纤维共同承担外载.随着偏轴角度的增大,起始线弹性段的应变范围先减小后增大,其中45°时最小.

2)AB(应变强化段):非线性段,应变增加较快,应力增加较慢,涂层基布二者协调受力.随着应变的增大,涂层基布出现脱离现象,应力逐渐由基布承载;偏轴角度下剪切效应明显,剪切效应的存在使变形增长较快,且随着偏轴角度的增大,应变强化段的应变范围先增大后减小,45°时出现最大值.

3)BC(应力强化段):第二个准线性段,承载力主要由纱线纤维承担,纱线刚度较大,强度发挥迅速,后期试件出现颈缩现象,接近材料承载极限.应力强化段的应变范围各角度存在差异,其中45°时最小.

2.2 强度与变形特征

膜材抗拉强度和断裂延伸率随偏轴角度的变化规律见图6.

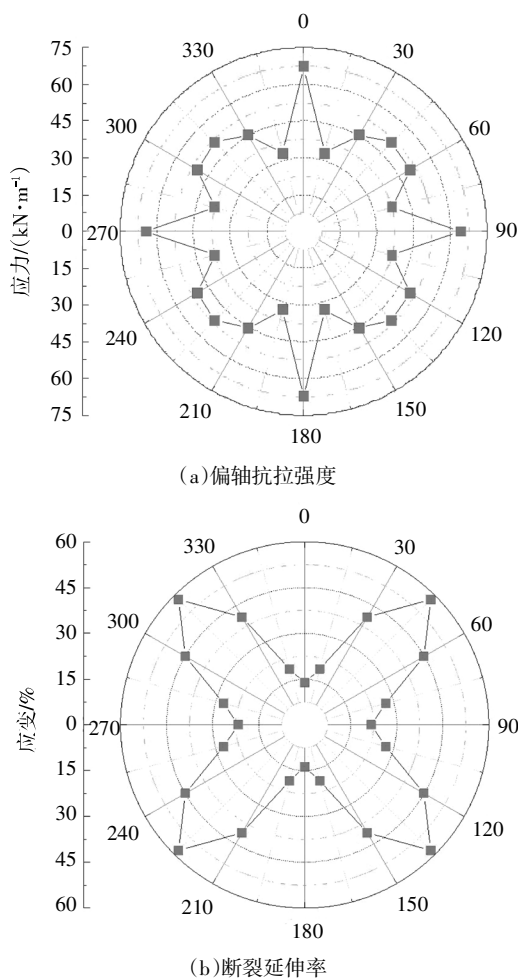


图 6 膜材偏轴抗拉强度和断裂延伸率

Fig.6 Tensile strength and strain at break of the bias membrane samples

由图 6 可知, PVDF8028 膜材表现出了明显的各向异性特征, 具体特征总结如下:

1) 当偏轴角度为  $0^\circ$  和  $90^\circ$  时膜材具有最大的抗拉强度和最小的断裂伸长率, 且经向的抗拉强度略大于纬向, 经向的断裂延伸率小于纬向。

2) 随偏轴角度的增大, 膜材的抗拉强度整体呈“W”形变化规律,  $45^\circ$  时出现一个峰值,  $15^\circ$  时最小, 这与 Tsai-Hill 等强度准则的“U”形规律<sup>[27-28]</sup>存在明显差异。

3) 膜材的断裂延伸率在  $45^\circ$  时最大, 关于  $45^\circ$  方向存在对称性, 且随着偏离对称轴角度的增大而减小。

在拉伸过程中, 纱线同时受拉力和涂层界面黏合力的约束, 拉伸过程中纱线与黏合界面逐渐发生脱黏, 主要的纱线被拉断, 但还有一部分纱线被拔出。与轴向试样的纯拉伸破坏相比, 偏轴试样混合拉

伸与剪切作用, 更容易导致拔纱。特别是偏轴角度为  $45^\circ$  时, 纱线的拉拔过程比断裂过程需要消耗更多的能量, 且  $45^\circ$  时纱线在经纬纱线发挥协同作用下抵抗外力, 因此相较于其他偏轴角度  $45^\circ$  抗拉强度会呈现一个局部峰值。

### 3 偏轴弹模-应变关系

#### 3.1 弹模-应变关系

弹模-应变关系曲线可完整地包含应力-应变关系曲线所有力学信息, 且在材料力学的细节响应上更加直观有效。因此, 本文根据应力-应变曲线通过高次拟合、求导获得各偏轴角度下的弹模-应变曲线, 如图 7 所示。

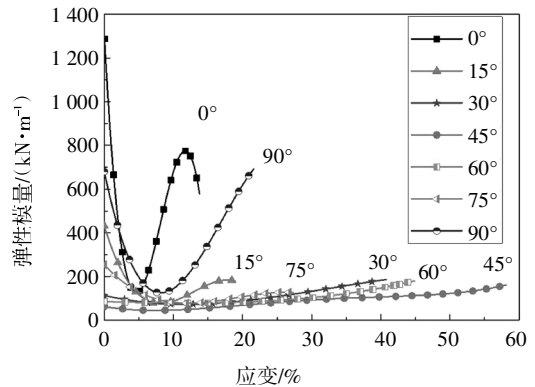
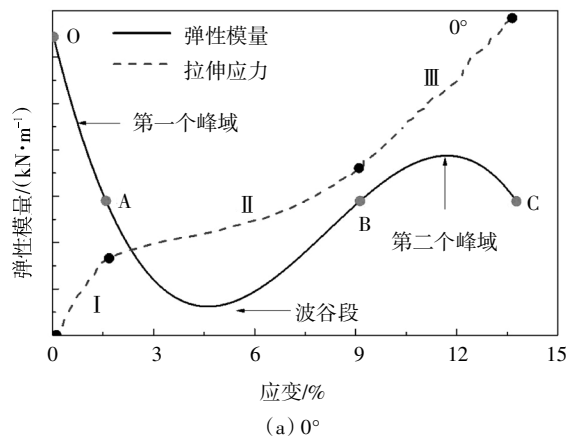
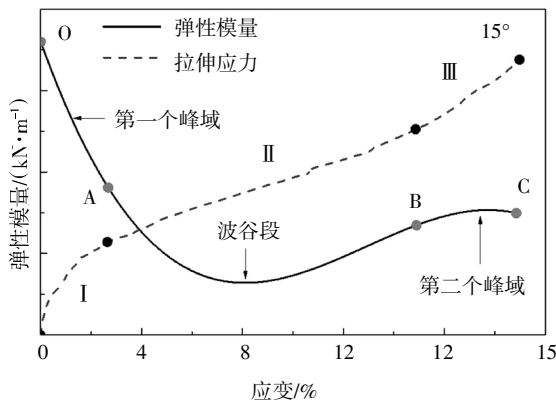


图 7 弹性模量-应变曲线

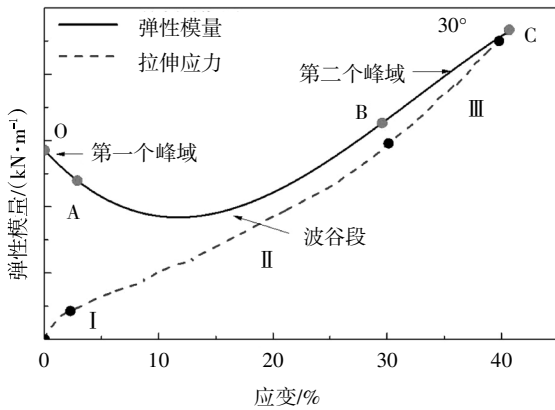
Fig.7 Modulus of elasticity-strain curves

图 7 显示, 各个偏轴角度下的弹模-应变曲线差异显著, 图像起伏特征明显, 存在显著的峰、谷区域, 且随偏轴角度存在一定的衍化规律。用图 5 中的分界点可将弹模-应变曲线划分为 3 个区域, 与应力-应变曲线的 3 个阶段一一对应, 如图 8 所示。

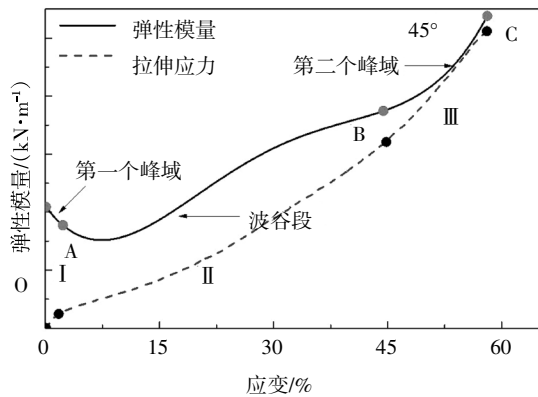




(b) 15°



(c) 30°



(d) 45°

图8 偏轴拉伸弹模-应变关系

Fig.8 Relationship of bias tensile elastic modulus-strain

由图8可知,随着应变的增加,在第1阶段膜材的弹性模量明显下降,但仍然为峰值段;在第2阶段膜材的弹性模量下降至谷底,然后稳步上升,膜材处于波谷段;在第3阶段膜材的弹性模量上升至峰值,然后又有所下降,膜材处于第二个峰域.当应变增加时,每个偏轴方向的弹模-应变曲线都发生了明显的波动,但角度越接近45°,曲线的波动越弱.依据特征,可将不同偏轴角度下的弹模-应变曲线划分成

两类:

1)(0°、15°、75°、90°):由于对应的应力-应变曲线的起始线弹性、应变强化和应力强化3阶段完整,所以弹模-应变曲线有完整的波谷段.弹性模量随着应变增大先减小后增大再减小,存在3个特征阶段.

2)(30°、60°、45°):由于对应的应力-应变曲线的起始线弹性阶段较短,应力强化阶段已不明显,所以弹模-应变曲线的第一个波峰不完整,且第二个波峰不明显.弹性模量随着应变增大先减小后增大.

图9展示了典型偏轴角度下弹模-应变关系衍生化特征.其中I、II、III和IV分别表示0°、15°、30°和45°的弹模-应变曲线.

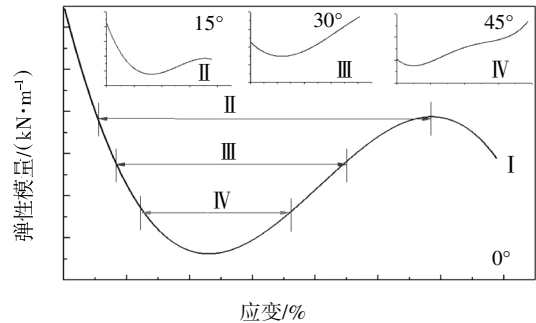


图9 弹模-应变曲线衍生化关系

Fig.9 Evolution relationship of elastic modulus-strain curve

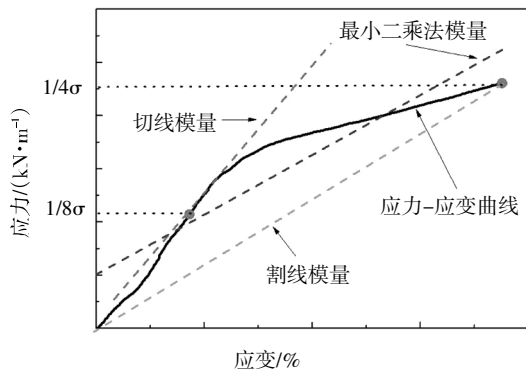
如图9所示,各角度的弹模-应变关系曲线存在密切关联,各角度均可由0°关系曲线衍生而来.15°、30°、45°的弹模-应变曲线均可在0°弹模-应变曲线上寻得根源.随着偏轴角度的增加,弹模-应变曲线在0°完整曲线中所占的比例逐渐减小,且初始值和终点值不断减小,第二个波峰段逐渐在弹模-应变曲线中消失.上述衍生化关系反映了偏轴向与材料主方向间复杂而密切的关联性.

### 3.2 弹性模量计算

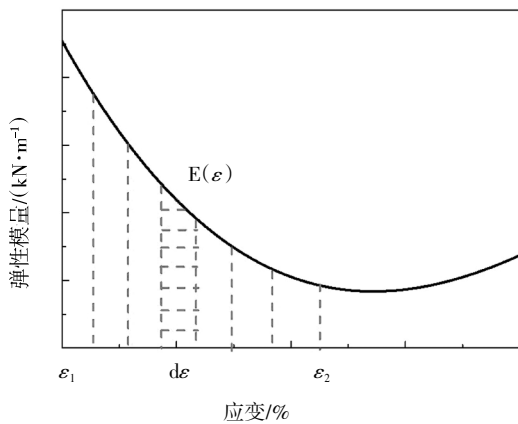
为了更加详细地分析弹模-应变关系,本文选取4种弹模取值方法进行弹模计算,包括切线模量、割线模量、最小二乘法模量和积分模量,物理示意图见图10(应力范围为 $[0, \sigma_u]$ ,  $\sigma_u$ 为抗拉强度).其中,积分模量为本文基于弹模-应变分析新提出的模量计算方法,其表达式为:

$$E = \frac{\int_{\varepsilon_1}^{\varepsilon_2} E(\varepsilon) \cdot d\varepsilon}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \quad (1)$$

式中: $E(\varepsilon)$ 表示当应变为  $\varepsilon$  时的弹性模量; $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$  表示  $\varepsilon$  的应变范围.



(a) 切线模量、割线模量及最小二乘法模量



(b) 积分模量

图 10 弹模的 4 种取值方法

Fig.10 Four estimation methods of elastic modulus

图 11 为 4 种方法求解的弹性模量的比较图. 由图 11 分析可得:

- 1) 4 种方法求出的弹性模量经向的值均最高, 偏轴角度 45°时最小.
- 2) 不同偏轴角度上膜材的弹性模量关于 45°具有一定的对称性.
- 3) 当偏轴角度较小(0°、90°、15°和 75°)时, 4 种方法求出的弹性模量差异较大; 当偏轴角度较大(30°、45°和 60°)时, 4 种方法求出的弹性模量值接近.
- 4) 由于 15°和 30°方向膜材中经向纱线与拉伸时受拉方向的一致性较高, 主要是经向纱线承受力的作用, 而 60°和 75°方向膜材主要是纬向纱线受力, 故 15°和 30°方向膜材的弹性模量分别大于 60°和 75°方向的弹性模量.

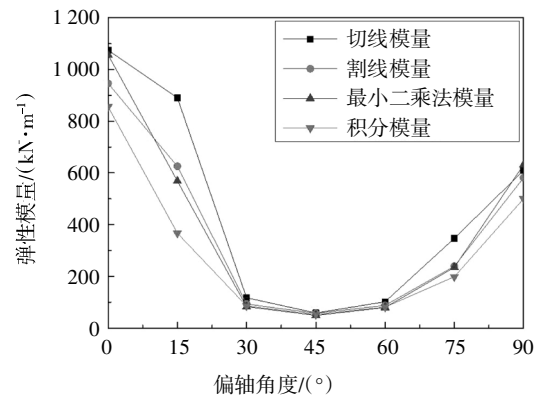


图 11 四种弹性模量取值结果的比较

Fig.11 Comparison of the results of four kinds of elastic modulus

选取拟合函数积分法的计算结果与正交各向异性板弹性理论<sup>[29-30]</sup>的预测值进行比较, 结果见图 12. 由图 12 可知, 除 15°外正交各向异性板的弹性理论能对膜材的弹性模量做出较好的预测.

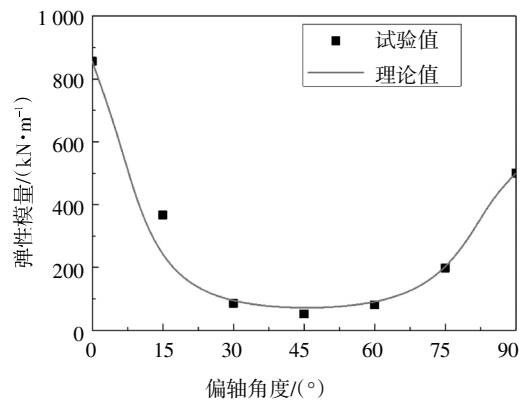


图 12 PVDF8028 不同偏轴角度下弹性模量理论值与试验值比较

Fig.12 Comparison of theoretical and experimental values for the elastic modulus of PVDF8028

## 4 结论

本文对典型经编织物膜材 Seaman PVDF8028 进行了一系列偏轴角度的单轴拉伸力学性能试验, 得出如下结论:

- 1) 膜材具有明显的非线性、各向异性的特征. 偏轴拉伸荷载作用下的应力-应变曲线可分为 3 个典型阶段, 曲线的非线性随偏轴角度的变化存在渐变特征.
- 2) 经编织物类膜材的抗拉强度并非遵守 Tsai-

Hill 等强度准则的“U”形规律,而是呈“W”形变化规律,反映了与常规材料存在内在差异性。

3)弹模-应变关系曲线可直观有效地呈现膜材的刚度随应变及角度的衍变规律;刚度在应变全域内非线性更为显著,峰谷分布分明,起伏特征显著,且各偏轴角度间存在密切的关联性,其曲线均可溯源至 $0^\circ$ 曲线。

4)拟合函数积分法可准确地确定各应变状态下的刚度特征,有效呈现膜材刚度的细微变化;在复杂膜结构的精细化设计分析中具有一定应用价值。

## 参考文献

- [1] 陈务军.膜结构工程设计[M].北京:中国建筑工业出版社,2005:118—142.  
CHEN W J. Design of membrane structure engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2005:118—142. (In Chinese)
- [2] 李阳.建筑膜材料和膜结构的力学性能研究与应用[D].上海:同济大学土木工程学院,2007:1—7.  
LI Y. Research and application on mechanical properties of architectural membrane materials and membrane structures [D]. Shanghai: School of Civil Engineering, Tongji University, 2007:1—7. (In Chinese)
- [3] 张营营,张其林,吴明儿.膜材料性能及其对结构的影响[J].空间结构,2012,18(2):70—78.  
ZHANG Y Y,ZHANG Q L,WU M E. Material properties of membrane and its influence on structural behaviors [J]. Spatial Structures,2012,18(2):70—78. (In Chinese)
- [4] 何艳丽,陈务军,赵俊钊.充气膜结构的成形理论与试验研究[J].工程力学,2013,30(4):269—274.  
HE Y L,CHEN W J,ZHAO J Z. Research on forming theory and test of inflatable membrane structures [J]. Engineering Mechanics,2013,30(4):269—274. (In Chinese)
- [5] 赵大鹏.大型充气膜结构特性分析与高强膜材试验研究[D].上海:上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院,2007:35—43.  
ZHAO D P. Structural performances analysis of large pneumatic membrane structure and experiment on high-strength fabrics [D]. Shanghai: School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 2007:35—43. (In Chinese)
- [6] 江锡虎.充气膜结构全过程分析和造型技术研究[D].上海:同济大学土木工程学院,2006:37—58.  
JIANG X H. The procedure and model technology analysis of pneumatic membrane structure [D]. Shanghai: School of Civil Engineering, Tongji University, 2006:37—58. (In Chinese)
- [7] DEMIRCAN O,KOSUI T,ASHIBE S, *et al.* Effect of stitch and bi-axial yarn types on tensile, bending, and impact properties of biaxial weft-knitted composites [J]. Advanced Composite Materials, 2014,23(3):239—260.
- [8] 矫卫红,陈南梁.经编双轴向织物用作涂层基布的性能优势[J].东华大学学报(自然科学版),2004,30(6):91—95.  
JIAO W H,CHEN N L. Performance advantages of warp knitting bi-axial fabrics used as coating substrates [J]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2004, 30(6): 91—95. (In Chinese)
- [9] ZHANG Y,ZHANG Q,ZHOU C. Mechanical properties of PTFE coated fabrics [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2010,29(24):3624—3630.
- [10] 储才元,陈峰.机织物的撕裂破坏机理和测试方法的分析[J].纺织学报,1992,13(5):4—8.  
CHU C Y,CHEN F. Tearing failure mechanism of woven fabrics and comparison between tear test methods [J]. Journal of Textile, 1992,13(5):4—8. (In Chinese)
- [11] AMBROZIAK A. Mechanical properties of PVDF-coated fabric under tensile tests [J]. Journal of Polymer Engineering,2014,35(4):377—390.
- [12] AMBROZIAK A,KLOSOWSKI P. Mechanical properties for preliminary design of structures made from PVC coated fabric [J]. Construction and Building Materials,2014,50:74—81.
- [13] BRIDGENS B,GOSLING P. Direct stress-strain representation for coated woven fabrics [J]. Computers and Structures,2004,82(23):1913—1927.
- [14] 吴明儿,慕全,刘建明.拉伸速率对 ETFE 薄膜力学性能的影响[J].建筑材料学报,2008,11(5):574—579.  
WU M E,MU T,LIU J M. Influence of extension speed on mechanical properties of ETFE foil [J]. Journal of Building Materials, 2008,11(5):574—579. (In Chinese)
- [15] 张营营,倪佳女,张其林.涂层织物类建筑膜材料的设计强度研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2011,38(12):19—24.  
ZHANG Y Y,NI J N,ZHANG Q L. Research on the design strength of architectural coated fabrics [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2011,38(12):19—24. (In Chinese)
- [16] 李绿叶.经编双轴向柔性复合材料性能研究[D].上海:东华大学纺织学院,2005:18—37.  
LI L Y. Study on properties of biaxial warp knitted flexible composites [D]. Shanghai: College of Textiles, Donghua University, 2005:18—37. (In Chinese)
- [17] 李绿叶,沈为.经编双轴向织物撕裂性能研究[J].产业用纺织品,2005,23(4):20—22.  
LI L Y,SHEN W. Study of biaxial warp knitted fabric tearing property [J]. Industrial Textiles,2005,23(4):20—22. (In Chinese)
- [18] LUO Y,HONG H,FANGUEIRO R. Tensile and tearing properties of bi-axial warp knitted coated fabrics [J]. Autex Research Jour-

- nal, 2007(2): 146—150.
- [19] 张营营, 黄源, 徐俊豪, 等. 不同拉伸速率下平织 PVC 膜材偏轴拉伸性能[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(3): 606—612.  
ZHANG Y Y, HUANG Y, XU J H, *et al.* Off-axial tensile properties of PVC coated woven fabrics under different tensile rates [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(3): 606—612. (In Chinese)
- [20] 张丽, 陈务军, 董石麟. PVDF/PES 建筑织物膜力学性能单双轴拉伸试验[J]. 空间结构, 2012, 18(3): 41—48.  
ZHANG L, CHEN W J, DONG S L. Mechanical properties analysis of architectural PVDF/PES fabrics with uni-tensile and bi-axial test [J]. Spatial Structures, 2012, 18(3): 41—48. (In Chinese)
- [21] 邹宗伟, 韩建, 刘杭锋, 等. PVC 建筑膜材拉伸异向性能研究[J]. 浙江理工大学学报, 2010, 27(2): 186—190.  
ZOU Z W, HAN J, LIU H F, *et al.* Orthotropic behavior of PVC architectural membrane materials under tensile loading [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2010, 27(2): 186—190. (In Chinese)
- [22] 张营营, 张其林, 周传志. PTFE 膜材的单向拉伸性能[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(4): 535—539.  
ZHANG Y Y, ZHANG Q L, ZHOU C Z. Uniaxial tensile properties of PTFE membrane material [J]. Journal of Building Materials, 2010, 13(4): 535—539. (In Chinese)
- [23] 何世赞, 陈务军, 高成军, 等. 浮空器蒙皮膜复合材料单轴拉伸力学性能及弹性常数[J]. 复合材料学报, 2017, 34(1): 224—230.  
HE S Z, CHEN W J, GAO C J, *et al.* Uni-axial tensile mechanical properties and elastic constants of airship envelope material [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(1): 224—230. (In Chinese)
- [24] CHEN J, CHEN W, WANG M, *et al.* Mechanical behaviors and elastic parameters of laminated fabric Urettek3216lv subjected to uniaxial and biaxial loading [J]. Applied Composite Materials, 2017, 24(5): 1107—1136.
- [25] 陈建稳, 陈务军, 王明阳, 等. 织物膜材弹性参数在应力空间上相应特征及非线性本构分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2017, 44(5): 113—121.  
CHEN J W, CHEN W J, WANG M Y, *et al.* Response characteristics of elastic parameters of woven fabrics in stress space and a nonlinear constitutive analysis [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(5): 113—121. (In Chinese)
- [26] DG/TJ 08-2019—2007 膜结构检测技术规程[S]. 上海: 上海市建设和交通委员会, 2007: 9—12.  
DG/TJ 08-2019—2007 Technical specification for inspection of membrane structures [S]. Shanghai: Shanghai Construction and Transportation Commission, 2007: 9—12. (In Chinese)
- [27] 易洪雷, 丁辛, 陈守辉. PES/PVC 膜材料拉伸性能的各向异性及破坏准则[J]. 复合材料学报, 2005, 22(6): 98—102.  
YI H L, DING X, CHEN S H. Orthotropic behavior and strength criterion of PES/PVC membrane materials under tensile loading [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(6): 98—102. (In Chinese)
- [28] 陈守辉. 机织建筑膜材料拉伸性能研究: 从单轴、双轴到多轴[D]. 上海: 东华大学纺织学院, 2008: 25—27.  
CHEN S H. Tensile performance of woven membrane materials under uni-axial, bi-axial and multi-axial load [D]. Shanghai: College of Textiles, Donghua University, 2008: 25—27. (In Chinese)
- [29] 卫东, 王臣, 向阳, 等. 建筑膜材的材性试验研究[J]. 空间结构, 2002, 8(1): 37—43.  
WEI D, WANG C, XIANG Y, *et al.* Experimental study on material properties of structural fabric [J]. Spatial Structures, 2002, 8(1): 37—44. (In Chinese)
- [30] 张双寅, 刘济庆, 于小霞, 等. 复合材料结构的力学性能[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1992: 57—62.  
ZHANG S Y, LIU J Q, YU X X, *et al.* Mechanical properties of composite structures [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1992: 57—62. (In Chinese)