

文章编号:1007-9629(2022)08-0860-09

## 针织物与机织物膜材的力学特性对比

杨 彬, 霍震霆, 罗晓群\*, 张其林, 吴梦琳

(同济大学土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:**对比了 Seaman PVDF8028 双向经编织物膜材和 Ferrari 1202T2 膜材在  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$  和  $90^\circ$  下抗拉强度与断裂延伸率的变化规律以及断裂形式, 研究了 Tsai-Hill 强度准则、Norris 强度准则以及 Hashin 强度准则对 2 种膜材的适用性; 对比了 2 种膜材在  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $75^\circ$  和  $90^\circ$  下的偏轴撕裂形式以及撕裂特性, 研究了 2 种膜材的双轴力学特性, 以及线性和非线性正交各向异性本构模型对 2 种膜材本构关系的适用性. 研究结果可以为工程设计提供理论参考.

**关键词:** 针织物膜材; 机织物膜材; 力学特性; 强度准则; 本构模型

中图分类号: TU502<sup>+</sup>.6

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2022.08.013

## Comparison on Mechanical Properties of Knitted Fabric and Woven Fabric Membrane

YANG Bin, HUO Zhenting, LUO Xiaoqun\*, ZHANG Qilin, WU Menglin

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The variation rules of tensile strength and strain at break of the Seaman PVDF8028 biaxial warp knitted membrane and Ferrari 1202T2 membrane at seven biaxial angles of  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  and  $90^\circ$  were compared. The applicability of Tsai Hill strength criterion, Norris strength criterion and Hashin strength criterion to the two kinds of membranes was studied. The off-axis tear patterns and tear characteristics of the two kinds of membranes at  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$  and  $90^\circ$  off-axis angles were compared. The biaxial mechanical properties of the two kinds of membranes were compared, and the applicability of linear and nonlinear orthotropic constitutive models to the constitutive relations of the two kinds of membranes was discussed, which can provide theoretical reference for engineering design.

**Key words:** knitted fabric membrane; woven fabric membrane; mechanical property; strength criterion; constitutive model

涂层织物类膜材是由基层纤维、涂层和面层 3 部分组成的一种复合材料<sup>[1]</sup>, 根据其基层构成可以分为针织物类膜材和机织物类膜材 2 类. 尽管对涂层织物类膜材已有较多的研究成果, 但大都是针对以机织物为基材的建筑膜材进行的, 以针织物为基材的膜材研究相对较少.

传统机织物类膜材的基布纤维由互相垂直的 1 组(或多组)经纱和 1 组(或多组)纬纱, 按一定规律纵

横交织而成. 在编织过程中采用经纬纱上下交织的方式, 多是将经纱拉直成直线, 再将纬纱以垂直于经纱的方向上下交叉绕过经纱<sup>[2]</sup>. 这种编织方式会导致经纬纱的卷曲效应, 而且由于纬纱的弯曲, 使其拉伸强度等力学特性不能充分发挥. 针织物类膜材中的基布纤维结构较多采用预定向经编技术, 常用的预定向经编织物包括双向和多轴向经编织物等<sup>[3]</sup>. 双向经编织物结构的经纱和纬纱均为完全平直排

收稿日期: 2021-06-18; 修订日期: 2021-08-15

第一作者: 杨 彬(1979—), 男, 山东济南人, 同济大学副教授, 博士生导师, 博士. E-mail: yangbin@tongji.edu.cn

通讯作者: 罗晓群(1976—), 男, 江西临川人, 同济大学副教授, 硕士生导师, 博士. E-mail: luoxiaoqun@tongji.edu.cn

列,并互相垂直铺设为2层,再在经纬纱交叉处配合圈纱固定形成织物结构,以保证纤维无屈曲<sup>[4-5]</sup>.针织物类膜材的基材编织形式可以降低经纬纱的卷曲效应并充分利用纱线的强度.陈南梁<sup>[6]</sup>选用组织结构参数相近的多轴(双轴)向经编针织物和传统平纹机织物进行了拉伸特性对比试验,发现其拉伸强度和弹性模量存在差异.李丽英等<sup>[7]</sup>利用声发射技术对织物拉伸过程中的损伤监测验证了机织物由于屈曲效应导致纤维性能不能充分发挥的缺点.席时平等<sup>[8]</sup>分别对相似结构参数的压延柔性针织物和机织物膜材进行了撕裂试验,并对其抗撕裂特性进行了一定对比.徐海燕<sup>[9]</sup>总结了针织物抗冲击性能好、尺寸稳定性好等诸多优点.可见针织物因其相较于机织物力学特性上的差异而十分有研究价值.

目前,针对针织物和机织物在材料力学特性上进行详细对比研究的论文较少.Seaman经编织物膜材是较为典型的针织物类膜材,而Ferrari膜材作为

机织物类膜材,许多学者针对其力学特性已经有大量的研究<sup>[1,10-11]</sup>.

本文选用Seaman PVDF8028双轴向经编织物膜材(以下简称Seaman PVDF8028膜材)和Ferrari 1202T2机织物类膜材(以下简称Ferrari 1202T2膜材),分别进行不同角度下的偏轴拉伸试验,研究其偏轴拉伸特性差异及其对部分强度准则的适用性.有学者进行过不同膜材在多种角度下的偏轴撕裂试验<sup>[12]</sup>,分析比较了不同种类膜材的撕裂强度,所以本文还进行了不同偏轴角度下的偏轴梯形撕裂试验,研究其偏轴撕裂特性.最后对2种膜材进行双轴拉伸试验,研究其对线性本构模型和非线性本构模型的适用性异同.

## 1 试验准备

### 1.1 试验材料

Seaman PVDF8028膜材和Ferrari 1202T2膜材的物理参数如表1所示.

表1 Seaman PVDF8028膜材和Ferrari 1202T2膜材的物理参数  
Table 1 Physical parameters of Seaman PVDF8028 and Ferrari 1202T2 membranes

Membrane type	Base fabric type	Finished coated mass/(g·m <sup>-2</sup> )	Yarn linear density /dtex	Thickness /mm
Seaman PVDF8028	Polyester	950	1 100	0.74
Ferrari 1202T2	Polyester	1 050	1 100/1 670	0.78

### 1.2 偏轴拉伸试验

按照DG/TJ 08-2019—2019《膜结构检测标准》规定,采用切割条样法将2种膜材分别以经向为基准,沿偏轴角( $\theta$ )0°、15°、30°、45°、60°、75°和90°共7个角度裁剪长条形试件各5块,如图1所示.由于采用夹持式夹头进行拉伸试验会出现试件滑移或是在夹持端断裂,导致试验结果出现偏差,所以试验采用缠

绕式夹头,每块试件的长度取(1 000±1) mm,宽度取(50±0.5) mm,应变测距取(200±1) mm,拉伸速率恒定为100 mm/min,试验温度为(20±2) °C,相对湿度为(65±3)%.

### 1.3 偏轴撕裂试验

按照DG/TJ 08-2019—2019规定,采用切割条样法准备试件,将2种膜材分别以经向为基准,沿偏轴角为0°、15°、30°、45°、60°、75°和90°共7个角度裁剪宽为(50±0.5) mm、长度不小于180 mm的长条形试件,如图2所示.在试样上标记等腰梯形,梯形两腰为夹持线,在等腰梯形上底边中央处与边垂直方向切开切口,切口长度(25±0.5) mm,拉伸速率恒定为100 mm/min,试验温度为(20±2) °C,相对湿度为(65±3)%.

### 1.4 双轴拉伸试验

按照DG/TJ 08-2019—2019规定,双轴拉伸试样采用“十”字形切缝,将2种膜材按照经纬向对称取样,如图3所示.试件核心区域臂宽及悬臂臂长均取160 mm,沿悬臂方向每隔5 mm做均匀切缝处理,试件过渡圆弧半径取10 mm.每组试件先在1:1的荷载比( $K$ )下按照恒定的拉伸速率拉伸至最大荷载,最大荷载取膜材经纬向抗拉强度较小值的1/4;然后以相

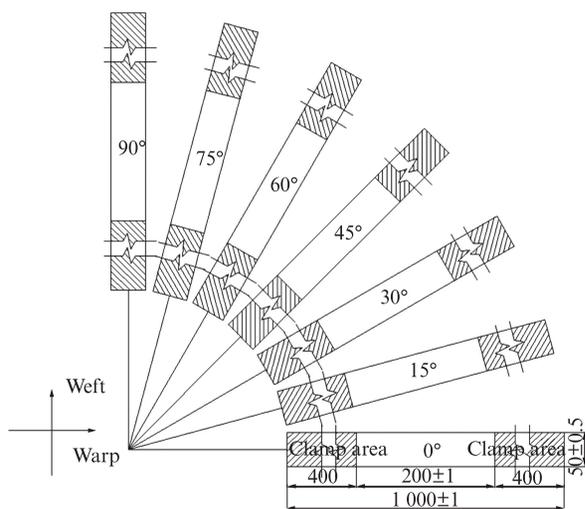


图1 偏轴拉伸试件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of off axis tensile specimen(size:mm)

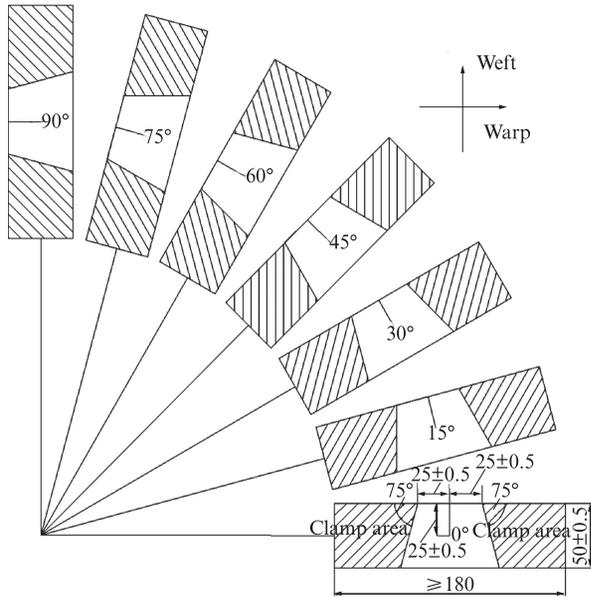


图2 偏轴撕裂试件示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of off axis tear specimen(size: mm)

同恒定速率卸载,重复加卸载3次;最后分别在1:0、0:1、1:1、1:2和2:1共计5种荷载比下进行双轴拉伸试验.

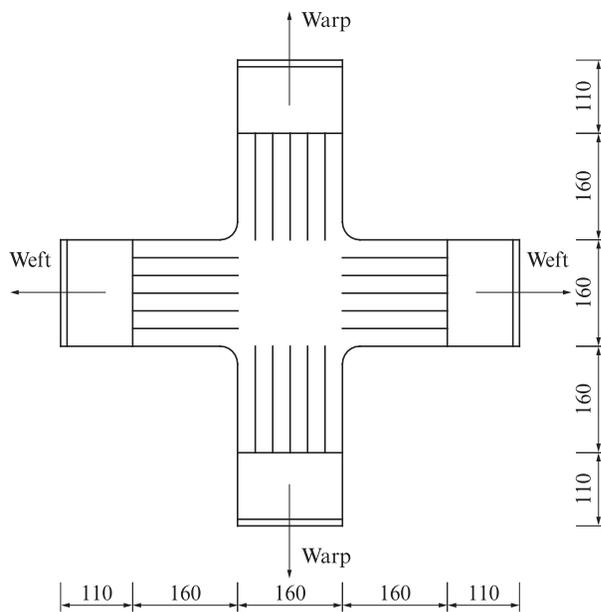


图3 双轴拉伸试件图  
Fig. 3 Drawing of biaxial tensile specimen(size: mm)

## 2 偏轴拉伸特性对比

建筑工程中的膜结构会受到来自各个方向的荷载.因此,开展针织物与机织物膜材偏轴角度下的偏轴抗拉强度以及断裂延伸率研究,可以了解膜材偏轴抗拉强度的变化趋势,分析膜材的受力薄弱环节,

为工程设计提供有价值的参考.

### 2.1 针织物与机织物膜材的偏轴拉伸性能比较

图4、5分别为 Seaman PVDF8028 膜材和 Ferrari 1202T2膜材的偏轴拉伸应力-应变曲线.表2、3分别为为 Seaman PVDF8028 膜材和 Ferrari 1202T2膜材各偏轴角度试件的性能.其中, $\sigma_T$ 为偏轴拉伸强度, $\epsilon$ 为断裂延伸率,SD为相应的标准差,RSD为相对标准偏差.由图4、5及表2、3可知:

(1)2种膜材的偏轴拉伸强度以及断裂延伸率均以45°为对称轴呈现出对称性,在0°和90°时抗拉强度最大且断裂延伸率最小,45°时抗拉强度最小而断裂延伸率最大;越偏离45°的方向,偏轴拉伸强度越大且断裂延伸率越小.

(2)Ferrari 1202T2膜材以45°为对称轴,0°与90°、15°与75°、30°与60°这3组曲线的重合度相较 Seaman PVDF8028膜材更高,抗拉强度和断裂延伸率等也更加接近.这是由于Ferrari 1202T2膜材在生

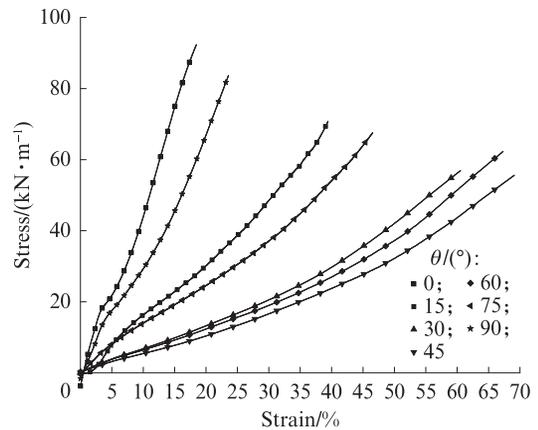


图4 Seaman PVDF8028膜材的偏轴拉伸应力-应变曲线  
Fig. 4 Off axis tensile stress-strain curves of Seaman PVDF8028 membranes

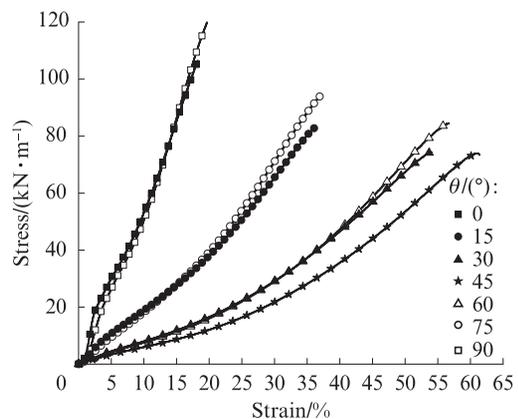


图5 Ferrari 1202T2膜材的偏轴拉伸应力-应变曲线  
Fig. 5 Off axis tensile stress-strain curves of Ferrari 1202T2 membranes

表2 Seaman PVDF8028膜材各偏轴角度试件的性能  
Table 2 Properties of Seaman PVDF8028 membrane specimens with different off-axis angles

$\theta/(\circ)$	$\sigma_T/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	SD	RSD/%	$\theta/(\circ)$	$\epsilon/\%$	SD	RSD/%
0	92.86	1.83	1.97	0	18.46	0.50	2.70
15	70.70	1.82	2.57	15	35.52	0.41	1.15
30	59.77	1.50	2.52	30	60.54	2.63	4.35
45	56.34	0.75	1.34	45	69.11	1.31	1.89
60	61.49	1.89	3.07	60	67.31	3.06	4.55
75	69.35	1.53	2.20	75	46.54	0.81	1.74
90	83.64	3.64	4.35	90	23.57	1.00	4.26

表3 Ferrari 1202T2膜材各偏轴角度试件的性能  
Table 3 Properties of Ferrari 1202T2 membrane specimens with different off-axis angles

$\theta/(\circ)$	$\sigma_T/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	SD	RSD/%	$\theta/(\circ)$	$\epsilon/\%$	SD	RSD/%
0	111.02	6.86	6.18	0	19.52	1.14	5.82
15	82.73	0.95	1.15	15	35.78	0.83	2.32
30	74.32	0.35	0.47	30	53.37	0.46	0.86
45	73.86	0.99	1.33	45	61.00	0.83	1.36
60	84.58	0.86	1.02	60	56.49	0.56	0.99
75	95.15	1.38	1.45	75	38.19	1.09	2.86
90	119.53	2.78	2.33	90	19.54	0.37	1.87

产时经过了独特的预张拉工艺,使得以45°为对称轴的膜材力学特性更为相近.而Seaman PVDF8028膜材虽然采用经纬平直铺纱并配合圈纱固定,保证了纤维无屈曲,但整体结构相较Ferrari 1202T2膜材更为松散.圈纱的存在会导致经纬纱之间存在空隙,使得整体基层纤维分布不均匀而出现应力集中,并且在拉伸至断裂的过程中,圈纱还会出现断裂和滑移,进而导致以45°为对称轴的膜材力学特性存在差异.

2.2 偏轴拉伸断裂形式比较

Seaman PVDF8028膜材和Ferrari 1202T2膜材的偏轴断裂形式如图6、7所示.由图6、7可见:2种膜材的偏轴拉伸断裂形式相近,在0°和90°时断口平齐,纤维断裂一致性较高,主要为受拉破坏;在45°的偏轴角度下以剪切破坏为主,呈现纤维拔出破坏;在15°、30°、60°

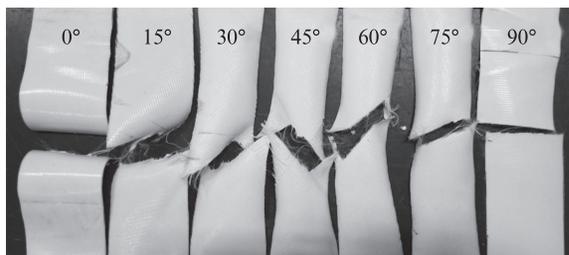


图6 Seaman PVDF8028膜材的偏轴断裂形式

Fig. 6 Off axis break forms of Seaman PVDF8028 membranes

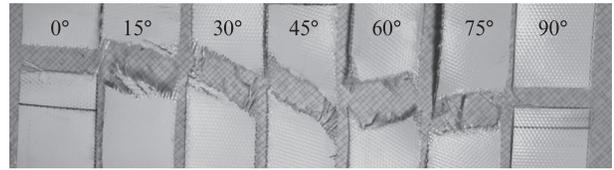


图7 Ferrari 1202T2膜材的偏轴断裂形式

Fig. 7 Off axis break forms of Ferrari 1202T2 membranes

和75°这4个角度下会呈现出中间部分纤维被一齐拉断,边缘部分纤维被拔出现象,为拉剪混合破坏,说明2种膜材在各偏轴角度下的破坏模式是较为相近的.

2.3 针织物与机织物强度准则适用性比较

膜材在实际工程中常处于拉剪混合的复杂应力状态.因此,研究膜材的强度准则对于工程实际而言是重要的.由于膜材属于复合材料,所以传统的最大应力准则和最大应变准则等强度准则并不能很好地适用.本文选取在复合材料领域较为常用的Tsai-Hill准则、Norris准则和Hashin准则,分别对Seaman PVDF8028膜材与Ferrari 1202T2膜材的试验值和预测值进行对比,比较2种膜材对3种强度准则的适用性.强度准则公式见式(1)~(4).

$$\text{Tsai-Hill 准则: } \frac{\sigma_x^2}{X^2} + \frac{\sigma_y^2}{Y^2} - \frac{\sigma_x\sigma_y}{X^2} + \frac{\tau_{xy}^2}{S^2} = 1 \quad (1)$$

$$\text{Norris 准则: } \frac{\sigma_x^2}{X^2} + \frac{\sigma_y^2}{Y^2} - \frac{\sigma_x\sigma_y}{XY} + \frac{\tau_{xy}^2}{S^2} = 1 \quad (2)$$

$$\text{Hashin 准则: } \left(\frac{\sigma_x}{X}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{S}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

$$\left(\frac{\sigma_y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{S}\right)^2 = 1 \quad (4)$$

以Tsai-Hill准则为例,其在偏轴拉伸中的表达式见式(5).

$$\frac{1}{\sigma^2} = \frac{\cos^4\theta}{X^2} + \left(\frac{1}{S^2} - \frac{1}{X^2}\right)\sin^2\theta\cos^2\theta + \frac{\sin^4\theta}{Y^2} \quad (5)$$

式中: $\sigma$ 为偏轴拉伸强度,kN/m; $X$ 、 $Y$ 分别为经纬向拉伸强度,kN/m; $S$ 为面内剪切强度,kN/m.对于膜材的剪切强度 $S$ ,由于国内外没有较好的直接测定方法,故根据已经得出的若干偏轴方向上的偏轴强度,代入式(5)中取平均值得到<sup>[14]</sup>.

根据已有试验数据中的 $X$ 、 $Y$ 值以及经过推导得出的 $S$ 值,分别绘制Seaman PVDF8028膜材以及Ferrari 1202T2膜材的Tsai-Hill准则、Norris准则以及Hashin准则的强度预测曲线,并与试验数据点进行对比分析.图8、9分别为Seaman PVDF8028、Ferrari 1202T2膜材的强度准则预测.由图8、9可知,Tsai-Hill强度准则、Norris强度准则以及Hashin准则对Seaman PVDF8028膜材的偏轴力学性能可以较好

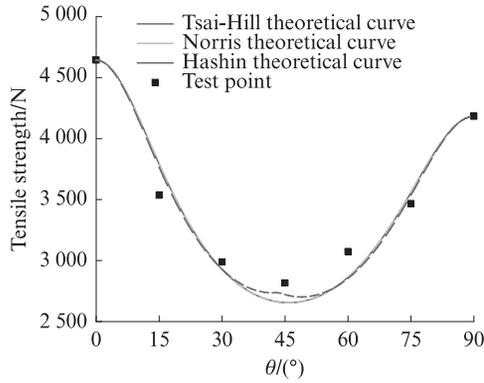


图8 Seaman PVDF8028膜材的强度准则预测

Fig. 8 Strength criterion prediction of Seaman PVDF8028 membrane

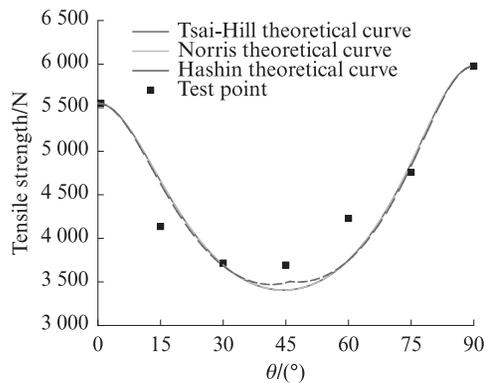


图9 Ferrari 1202T2膜材的强度准则预测

Fig. 9 Strength criterion prediction of Ferrari 1202T2 membrane

地进行预测;3种强度准则对于Ferrari 1202T2膜材部分小偏轴角度下偏轴抗拉强度的预测存在较大误差.

Seaman PVDF8028膜材以及Ferrari 1202T2膜材各偏轴角度下3种强度准则的强度预测值与实际试验值的误差比较见表4、5.由表4、5和图8、9可见:3种强度准则都可以在一定程度上对2种膜材的偏轴抗拉强度做出较好地预测;Seaman PVDF8028膜材的误差最大为7.2%,Ferrari 1202T2膜材在15°和60°下的预测值有较大的误差,最大误差值分别为12.5%和11.4%.

综合判断可知,相较于Ferrari 1202T2膜材而言,Tsai-Hill强度准则、Norris强度准则以及Hashin强度准则可以对Seaman PVDF8028膜材的偏轴抗拉强度进行更好的预测. Seaman PVDF8028膜材经纬纱之间的卷曲摩擦影响较小,更符合复合材料强度准则中采用基于均质连续材料的应变能理论.因此,其在承受复杂应力时,相较于Ferrari 1202T2膜材更接近于均质连续材料,从而使用强度准则对其进行强度预测的误差相对更小.机织物类膜材由于经纬纱之间的相互影响较大,导致其容易在小偏轴角度下的强度准则预测出现较大偏差.所以在实际工程中,可以在考虑一定的安全系数条件下,利用Tsai-Hill强度准则、Norris强度准则以及Hashin准则对Seaman PVDF8028膜材进行偏轴方向的拉伸强度预测,使其工程应用更加简便.

表4 Seaman PVDF8028膜材3种准则下预测值与试验值的比较

Table 4 Comparison of predicted and experimental values of Seaman PVDF8028 membrane under three criteria

$\theta/(\circ)$	$\sigma_T/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	Tsai-Hill		Norris		Hashin	
		Calculated/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	Error/%	Calculated/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	Error/%	Calculated/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	Error/%
0	92.86	92.86	0	92.86	0	92.86	0
15	70.70	75.79	7.2	75.79	7.2	75.28	6.5
30	59.77	58.56	2.0	58.55	2.0	58.55	2.0
45	56.34	53.10	5.8	53.10	5.8	54.41	3.4
60	61.49	57.25	6.9	57.25	6.9	57.08	7.2
75	69.35	71.17	2.6	71.17	2.6	70.72	2.0
90	83.64	83.64	0	83.64	0	83.64	0

表5 Ferrari 1202T2膜材3种准则下预测值与试验值的比较

Table 5 Comparison of predicted and experimental values of Ferrari 1202T2 membrane under three criteria

$\theta/(\circ)$	$\sigma_T/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	Tsai-Hill		Norris		Hashin	
		Calculated/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	Error/%	Calculated/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	Error/%	Calculated/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	Error/%
0	111.02	111.02	0	111.02	0	111.02	0
15	82.73	93.10	12.5	93.11	12.5	92.51	11.8
30	74.32	73.86	0.6	73.87	0.6	73.67	0.9
45	73.86	68.12	7.8	68.13	7.8	69.82	5.5
60	84.58	75.01	11.3	75.02	11.3	74.95	11.4
75	95.15	97.26	2.2	97.27	2.2	96.61	1.5
90	119.53	119.53	0	119.53	0	119.53	0

### 3 偏轴撕裂特性对比研究

实际工程中的建筑膜结构往往会有一些裂纹等初始缺陷的存在,所以膜结构的实际破坏形式往往不是受拉破坏,而是初始缺陷承受荷载后逐渐扩张导致的撕裂破坏,所以撕裂强度是一个很重要的力学指标.由于膜材在实际工程中受力形式较为复杂,初始缺口可能沿不同的方向发生撕裂.通过对针织物以及机织物膜材不同偏轴角度的试样进行梯形撕裂试验,研究针织物与机织物膜材在各偏轴角度下的撕裂特性和撕裂形式差异,可以为实际工程设计提供依据.

分别以 Seaman PVDF8028 膜材以及 Ferrari 1202T2 膜材的经向为基准,对 0°、15°、30°、45°、60°、75°和 90°共 7 个角度的试件进行梯形撕裂试验,结果如图 10、11 和表 6 所示.其中  $\sigma_A$  为偏轴撕裂强度.

由图 10、11 和表 6 可见:2 种膜材的偏轴撕裂强度均是从经(纬)向到 45°方向呈现先减小后增大的趋势,在 45°方向达到撕裂强度最大值;2 种膜材的撕裂曲线却有较大差别,Ferrari 1202T2 膜材的撕裂曲线波峰比较清晰,Seaman PVDF8028 膜材的撕裂曲线有很多细碎的小波峰,且在 45°和 60°方向上的撕裂曲线波峰很少,其中 45°方向近似呈现出单峰形式.

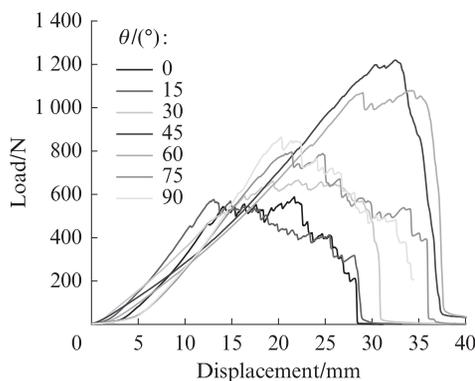


图 10 Seaman PVDF8028 膜材的偏轴撕裂曲线  
Fig. 10 Off axis tear curves of Seaman PVDF8028 membranes

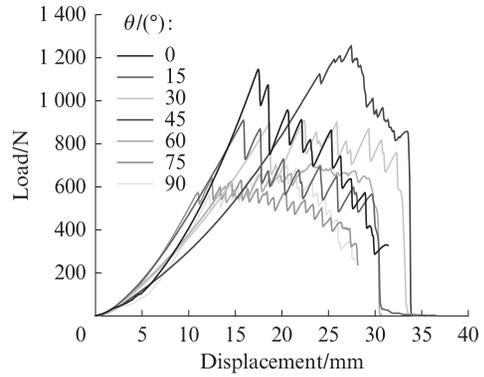


图 11 Ferrari 1202T2 膜材的偏轴撕裂曲线  
Fig. 11 Off axis tear curves of Ferrari 1202T2 membranes

2 种膜材的偏轴撕裂断口形式如图 12、13 所示.由图 12、13 可见:Ferrari 1202T2 膜材会沿垂直于经纱或纬纱的方向撕裂,在撕裂末端会有纱线拔出的情况;Seaman PVDF8028 膜材的偏轴撕裂形式与 Ferrari 1202T2 膜材大体相似,但在 45°和 60°方向上有较为明显的纱线滑移情况,最后出现整体断裂,这也是在 45°和 60°方向上撕裂波峰较少的原因.

典型的针织物膜材与机织物膜材的内部结构如图 14、15 所示.传统平纹织物类膜材采用经纬纱上下交织方式,使得纱线位置比较固定,而针织物膜材经纬纱分上下 2 层平铺,在交织处采用圈纱固定而不是完全胶结的状态,所以针织物膜材在抵抗撕裂时允许纱线发生相对移动,这也从材料本质上解释了 Seaman PVDF8028 膜材在沿 45°和 60°方向上撕裂时出现的纱线滑移现象.

### 4 双轴拉伸特性对比研究

膜材双轴拉伸试验用于研究膜材双向受拉下的变形情况,相较于单轴拉伸,双轴拉伸与膜材的实际工作状态更为接近,所以研究膜材在双轴拉伸情况下的应力-应变关系及其适用的本构模型,具有非常重要的工程实用价值.机织物类膜材双轴力学应力-

表 6 2 种膜材的偏轴撕裂强度

Table 6 Off axis tear strength of two kinds of membrane

Membrane type	$\theta/(\circ)$	$\sigma_A/N$	SD	RSD/%	Membrane type	$\theta/(\circ)$	$\sigma_A/N$	SD	RSD/%
Seaman PVDF8028	0	582.14	22.29	3.82	Ferrari 1202T2	0	981.31	36.85	3.76
	15	580.73	33.27	5.73		15	766.76	36.91	4.81
	30	691.86	49.61	7.17		30	904.06	29.59	3.27
	45	1 122.48	127.26	11.34		45	1 225.46	80.86	6.60
	60	1 081.97	86.67	8.01		60	665.78	34.61	5.20
	75	736.60	16.00	2.17		75	613.20	12.62	2.06
	90	811.37	28.08	3.46		90	736.45	29.25	3.97

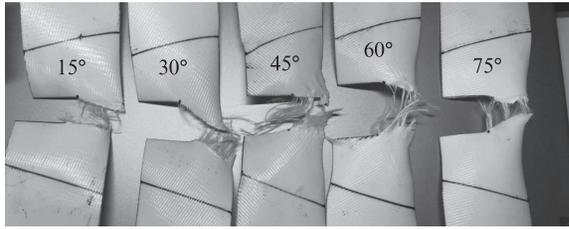


图12 Seaman PVDF8028膜材的偏轴撕裂断口形式  
Fig. 12 Fracture forms of off axis tear of Seaman PVDF8028 membranes

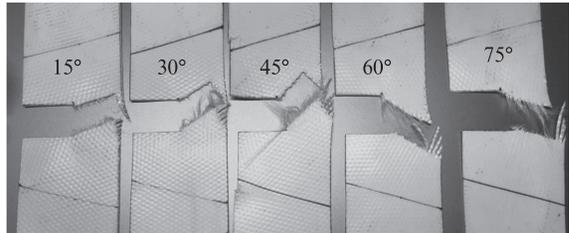


图13 Ferrari 1202T2膜材的偏轴撕裂断口形式  
Fig. 13 Fracture forms of off axis tear of Ferrari 1202T2 membranes

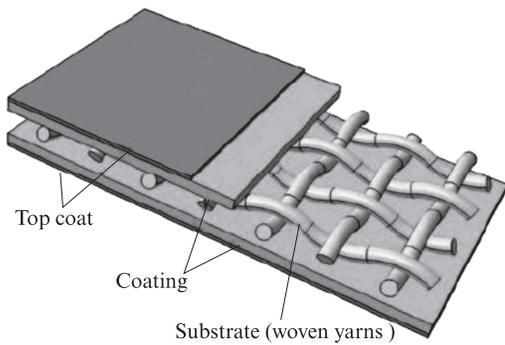


图14 机织物膜材的内部结构  
Fig. 14 Internal structure of woven fabric membrane<sup>[2]</sup>

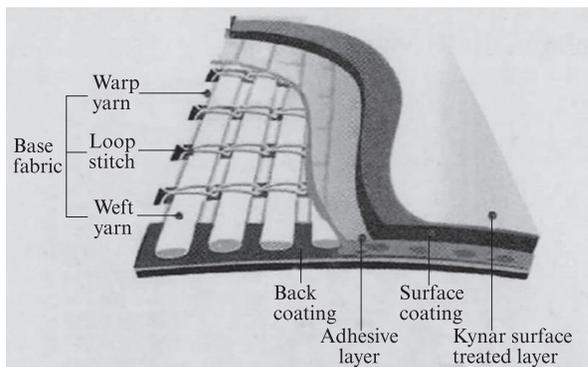


图15 针织物膜材的内部结构  
Fig. 15 Internal structure of knitted fabric membrane<sup>[5]</sup>

应变关系已经被广泛认为符合线性正交各项异性本构模型,而针织物类膜材双轴力学特性是否也符合线性正交各向异性本构模型有待研究.因此,本文首先研究了线性正交各向异性本构模型对于Seaman PVDF8028膜材的适用性,同时采用一种典型的非

线性正交各向异性本构模型对Seaman PVDF8028膜材以及Ferrari 1202T2膜材的适用性进行了对比研究.

4.1 针织物与机织物膜材双轴拉伸试验曲线比较

Seaman PVDF8028膜材和Ferrari 1202T2膜材的双轴试验应力-应变曲线如图16、17所示.

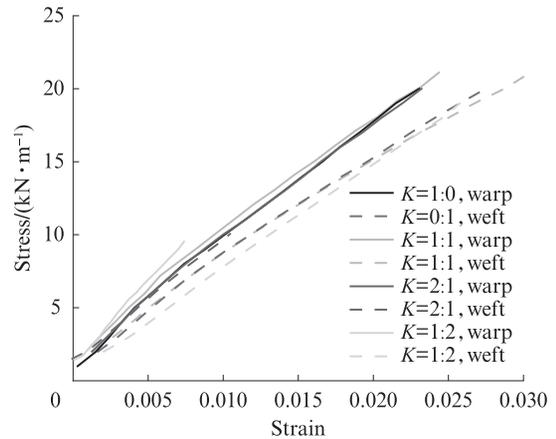


图16 Seaman PVDF8028膜材的双轴应力-应变曲线  
Fig. 16 Biaxial stress-strain curves of Seaman PVDF8028 membranes

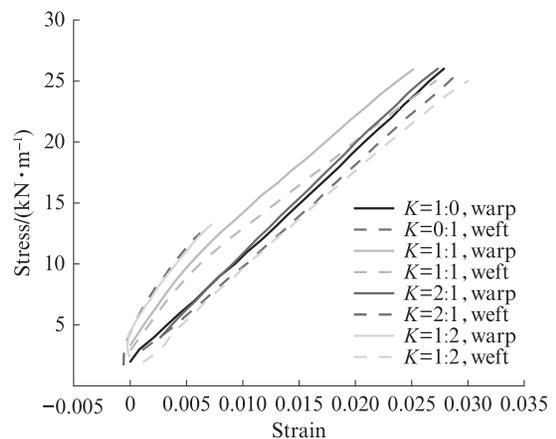


图17 Ferrari 1202T2膜材的双轴应力-应变曲线  
Fig. 17 Biaxial stress-strain curves of Ferrari 1202T2 membranes

4.2 针织物与机织物膜材线性本构模型适用性比较

膜结构设计中常常把膜材简化为正交各向异性线性材料,而由于膜材的双轴应力-应变曲线大多呈现出非线性关系,因此国内外部分学者提出了非线性正交各向异性本构模型,并在机织物类膜材本构关系的应用中取得了较好的效果,但这些模型是否可用于拟合针织物类膜材的本构关系还需进一步研究.因此,本文采用参考文献[15]中的二阶非线性正交各向异性本构模型,对Seaman PVDF8028膜材以及Ferrari 1202T2膜材的适用性进行了对比研究.该

非线性正交各向异性本构模型以非线性弹性理论为基础,由建立弹性材料的平面应力-应变关系时较为常用的能量密度法推导得出,较为符合材料本质.为了将适用程度以数据的形式体现,本文采用了2种数据处理方法:

(1)将2种膜材的3组试样所测应变试验值分别与2种本构模型拟合的理论值进行应变差均方根(RMS)计算,为了更加直观地体现出拟合误差的大小,将所求出的应变差均方根分别除以各自最大应变试验值与最小应变试验值的差值,最终结果以百分比的形式表示于表7中.

表7 2种膜材在线性和非线性本构模型下的RMS比较  
Table 7 RMS comparison of two membranes under linear and nonlinear constitutive models

Membrane type	%	
	Linear constitutive model	Nonlinear constitutive model
Seaman PVDF8028	7.1	3.5
Ferrari 1202T2	14.4	5.3

(2)为了判断拟合曲线与实际曲线的偏差,还可以利用统计学中的决定系数( $R^2$ )概念,将2种膜材在2种本构模型拟合下求得的决定系数分别列于表8中.

表8 2种膜材在线性和非线性本构模型下的决定系数比较  
Table 8  $R^2$  comparison of two membranes under linear and nonlinear constitutive models

Membrane type	%	
	Linear constitutive model	Nonlinear constitutive model
Seaman PVDF8028	0.975	0.995
Ferrari 1202T2	0.943	0.989

由表7、8可见:无论是Seaman PVDF8028膜材还是Ferrari 1202T2膜材,非线性本构模型均比线性本构模型能够对膜材的本构关系进行更好的拟合;2种本构模型对于Seaman PVDF8028膜材的拟合结果比Ferrari 1202T2膜材更加精确.

通过对针织物类膜材和机织物类膜材双轴力学性能试验的对比研究,发现无论是针织物还是机织物在荷载非等比例加载的情况下,均表现出了一定的非线性行为,说明2类膜材存在非线性正交各向异性特性.机织物类膜材已经被广泛认为适用于线性正交各向异性本构模型,通过采用线性本构模型和对2类膜材的双轴力学性能进行回归分析,发现针织物类膜材同样也适用于该模型.而针对机织物本构关系提出的非线性正交各向异性本构模型,已经证明也能适用于针织物的拟合且拟合误差更小,这是因为针织物膜材与机织物膜材基层不同的编织方

式,使得针织物膜材在双向受力时不容易像机织物膜材一样因经纬纱卷曲摩擦而相互影响.因此在实际工程中选用针织物类膜材,在进行膜材找型分析、裁剪分析等应用时可以利用规范方法或者已有的研究成果.

## 5 结论

(1)Seaman PVDF8028膜材和Ferrari 1202T2膜材不同的编织方法导致了两者力学特性的差异.

(2)Seaman PVDF8028膜材在拉剪混合条件下的力学特性降低形式与Ferrari 1202T2膜材相近,Ferrari 1202T2膜材由于其独特的预张拉工艺使得其与以 $45^\circ$ 为对称轴的力学特性更为接近.Seaman PVDF8028膜材由于经纬纱相互之间的卷曲摩擦影响更小,其性质更接近于均质连续材料,所以其偏轴拉伸力学特性相较Ferrari 1202T2膜材更加符合Tsai-Hill强度准则、Norris强度准则以及Hashin准则.

(3)Seaman PVDF8028膜材的经纬纱不是完全胶结的状态,在膜材沿膜面缺陷发生撕裂时会出现纱线聚集,使其抗撕裂强度较高,从而能比Ferrari 1202T2膜材更好地抵抗膜面初始缺陷的撕裂.

(4)Seaman PVDF8028膜材适用于线性正交各向异性本构模型,且线性及非线性本构模型对其双轴力学特性的拟合比对Ferrari 1202T2膜材的拟合更加精确,所以在工程中可以使用线性或非线性正交各向异性本构模型对针织物膜材进行膜结构的计算分析.

## 参考文献:

- [1] 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, 2007.  
LI Yang. Study and applications on mechanical properties of membrane materials and structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese)
- [2] 徐俊豪. 涂层织物类建筑膜材料的本构关系模型研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.  
XU Junhao. Constitutive model of building coated fabrics [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008. (in Chinese)
- [3] 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 Weihong, CHEN Nanliang. Performance advantages of warp knitting bi-axial fabrics used as coating substrates [J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2004, 30(6): 91-95. (in Chinese)
- [4] 宋乐颖. 经编织物复合材料在双轴荷载下的力学行为研究[D].

- 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- SONG Leying. Research on mechanical behavior of composites reinforced by warp-knitting fabrics under bi-axial loading [D]. Harbin :Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [ 5 ] 陈建稳,周涵,陈务军,等.双轴向经编类膜材PVDF8028偏轴强度及刚度特征[J].湖南大学学报(自然科学版),2019,46(9):54-61.
- CHEN Janwen, ZHOU Han, CHEN Wujun, et al. Mechanical characteristics of off-axis tensile strength and stiffness of biaxial warp-knitted fabric PVDF8028[J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2019, 46(9):54-61. (in Chinese)
- [ 6 ] 陈南梁.多轴向经编增强复合材料拉伸性能的研究[J].东华大学学报(自然科学版),2001,27(2):99-101.
- Chen Nanliang. Research on tensile property of the composite reinforced with multi-axial warp-knitted fabrics [J]. Journal of Donghua University(Natural Science), 2001, 27(2):99-101.(in Chinese)
- [ 7 ] 李丽英,孟松鹤,许承海,等.织物结构对复合材料力学性能影响的试验研究[J].材料科学与工艺,2015,23(1):6-12.
- LI Liying, MENG Songhe, XU Chenghai, et al. Experimental study on influence of fabric structure on mechanical properties of composites[J]. Materials Science and Technology, 2015, 23(1):6-12. (in Chinese)
- [ 8 ] 席时平,崔贵德,陈南梁.压延类柔性复合材料的抗撕裂性能研究[J].产业用纺织品,2005(12):17-19.
- XI Shiping, CUI Guide, CHEN Nanliang. Tearing property study on the calendered flexible composites[J]. Technical Textiles, 2005 (12):17-19. (in Chinese)
- [ 9 ] 徐海燕.经编多轴向针织物增强复合材料的研究进展[J].产业用纺织品,2012,30(10):1-6.
- XU Haiyan. Research progress in multiaxial warp knitted fabric reinforced composites[J]. Technical Textiles, 2012, 30(10):1-6. (in Chinese)
- [10] 许珊珊,张营营,徐俊豪,等.PVC涂层织物膜材的非线性各向异性本构关系模型[J].建筑材料学报,2020,23(5):1098-1103.
- XU Shanshan, ZHANG Yingying, XU Junhao, et al. Nonlinear anisotropic constitutive model of PVC coated fabric membrane[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5):1098-1103. (in Chinese)
- [11] 陈务军,王利钢,高成军.P/G类建筑织物膜材双轴剪切试验及力学特性分析[J].建筑材料学报,2016,19(3):539-543.
- CHEN Wujun, WANG Ligang, GAO Chengjun. Biaxial shear test and mechanical property analysis of P/G-type architectural fabrics [J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(3):539-543. (in Chinese)
- [12] 张旭波,吴明儿,包晗.涂层织物类膜材的偏轴梯形撕裂行为[J].建筑材料学报,2021,24(1):121-130.
- ZHANG Xubo, WU Minger, BAO Han. Off-axial trapezoid tearing behaviors of coated fabrics [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1):121-130. (in Chinese)
- [13] 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 Honglei, DING Xin, CHEN Shouhui. 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)
- [14] YANG B, YU Z L, ZHANG Q L, et al. The nonlinear orthotropic material model describing biaxial tensile behavior of PVC coated fabrics[J]. Composite Structures, 2020, 236:111850.