复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica
第 22 卷 第 6 期 12 月 2005 年
Vol. 22 No. 6 December 2005

文章编号: 1000-3851 (2005) 06-0098-05

PES/ PVC 膜材料拉伸性能的各向异性及破坏准则

易洪雷, 丁 辛*, 陈守辉
(东华大学 纺织学院, 上海 200051)

摘 要: 以 PES/ PVC 膜材料单轴向拉伸试验为研究基础, 对膜材料的 0°、15°、30°、45°、60°、75°和 90°七个面内方向上的拉伸试验特征进行了分析, 证明了采用三次加载后的应力-应变曲线可以用来描述膜材料的弹性力学性质, 且测得的膜材料弹性常数符合正交各向异性本构关系。为获得膜材料在复杂应力状态下的断裂强度, 对膜材料拉伸断裂破坏的机理及适用的相关强度准则进行了讨论。结果表明, 利用 Tsai-Hill 强度准则能对纯拉或纯剪切型破坏模式下的膜材料断裂强度做出较好的预测, 但该准则不适合对拉剪混合型破坏模式下膜材料断裂强度的预测。

关键词: 建筑膜材料; 拉伸性能; 各向异性; 破坏准则
中图分类号: TB330.1 **文献标识码**: A

ORTHOTROPIC BEHAVIOR AND STRENGTH CRITERION OF PES/ PVC MEMBRANE MATERIALS UNDER TENSILE LOADING

YI Honglei, DING Xin*, CHEN Shouhui
(College of Textiles, Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: Based on uni-axial tensile testing experiments of PES/ PVC membrane materials, tensile performances of the samples were analyzed in seven in-plane directions including 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75° and 90°. It is discovered that the stress-strain behaviors of the samples can correctly represent the elastic properties of the membrane material after three cycles of tensile loading and unloading. The results show that the elastic performance of the materials can be described by the constitutive relations of the orthotropic materials. In order to predict the tensile strength of the membrane materials under the conditions of complicated stress, the rupture mechanisms of the materials and the corresponding strength criterion were discussed. The analytical results indicate that Tsai-Hill criterion is applicable under the pure tensile or pure shear mode. However, it is less suitable under the tensile-shear mixture mode.

Keywords: architectural membrane materials; tensile property; orthotropic; strength criterion

建筑膜材料是一种通过在织物基布上涂敷树脂或橡胶等基体材料而制成的柔性纺织复合材料。上世纪 70 年代以来, 膜结构在世界各地蓬勃兴起, 对膜材料的需求量进一步扩大, 目前膜材料已成为继砖石、木材、钢材、混凝土和玻璃之后的第六大建筑材料。在膜结构工程中, 膜材料的各向异性力学性能直接关系到膜结构的外形设计及建筑安全性, 故在进行载荷分析与裁剪设计时, 必须考虑膜材料的各向异性。

有关膜材料各向异性力学性能的研究已有多篇论文发表。Day[1] 采用非线性方程组来拟合 FG/PTFE 的双轴拉伸应力-应变关系; 日野吉彦等[2] 用塑性理论导入当量应力概念, 由几个应力对比进行分区线性化, 然后确定膜材料的弹性常数; 南宏和等[3] 则通过对双轴拉伸试验所得的应力-应变曲线进行内插, 计算应力比以获得膜材料的各向异性本构关系。上述研究以膜材料的双轴拉伸应力-应变行为为基础, 所得到的膜材料各向异性本构关系对膜结构设计有很好的指导作用。然而双轴向拉伸试验设备昂贵、计算指标复杂, 其工程实践的意义被削弱。最近, 王臣[4]、卫东等[5] 利用单轴向拉伸试验获得 PES/ PVC 膜材料沿经向、纬向、45°方

收稿日期: 2004-12-20; **收修改稿日期**: 2005-03-28
基金项目: 上海市自然科学基金(03ZR14007); 中国博士后科学基金(2003034281); 上海市博士后科研资助计划(200302)
通讯作者: 丁 辛, 教授, 主要从事纺织复合材料的制备和性能研究 Tel: (021)-62373651 E-mail: xding@dhu.edu.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

向的工程弹性常数及面内剪切模量，以简单拉伸试验获得了膜材料的弹性常数。但在他们的研究中，未给出使用上述方法的合理性证据。膜材料拉伸性能的各向异性还体现于膜材料拉伸断裂强度，然而目前对其研究尚处在简单估算阶段，导致在膜结构设计中必须采用较大的安全系数[6]。

本文作者以PES/PVC膜材料单轴向拉伸试验为研究基础，对膜材料在0°、15°、30°、45°、60°、75°和90°七个面内方向上的拉伸试验特征进行了分析。此外为获得膜材料在复杂应力状态下的断裂强度，本文中还讨论了膜材料拉伸断裂破坏的机理以及适用的相关强度准则。

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

试验采用两种规格的PES/PVC膜材料，有关膜材料的技术参数列于表1。其中，1#试样用于测试膜材料的弹性常数，2#试样用来测试膜材料的拉伸断裂强度与断裂伸长率。

1.2 试验方法

以膜材料经向为基准方向，分别沿偏离基准方向0°、15°、30°、45°、60°、75°和90°方向剪取试样。弹性常数测试采用条形试样，外形尺寸为400 mm×50 mm；拉伸断裂强度与断裂伸长率测试采用哑铃形试样，外形尺寸为400 mm×40 mm。试验在电子多功能材料试验机上进行，加载速度均为20 mm/min，有效样本数为3。

膜材料在拉伸应力-应变关系上表现为较强的非线性性质。为获得有效的弹性常数，本研究借鉴了双轴向拉伸试验的通常做法[7]，对试样进行三次加载卸载试验，以最后一次拉伸试验为依据计算膜材料的弹性常数。在三次加卸载试验中，最高载荷均设定为膜材料拉伸强度的20%。其中在第一次加载后，保持当前载荷值约3 min后再卸载，以快速稳定加载后试样中产生的残余变形。按照上述加卸载模式，膜材料在前两次试验中所产生的残余变形，大体上与实际膜结构初始加载时在膜材料上所产生的位移相当(正常条件下，膜结构中膜面应力一般控制在其拉伸强度的12.5%以内[5])，因此第三次加载时残余变形就与膜结构中膜材料实际的应力-应变关系较为接近。利用第三次加载后的应力-应变曲线，采用最小二乘法计算试样在不同偏轴角度下的张拉刚度，试验中同时采用照相光学法[8]对试样的泊松比进行测量。面内剪切刚度($G_{wf}\cdot t$)则按下式计算得到[9]：

$$G_{wf}\cdot t=\frac{E_{45^\circ}\cdot t}{2(1+\nu_{45^\circ})} \tag{1}$$

式中：E_{45°、ν_{45°分别为45°偏轴拉伸弹性模量和泊松比；t为膜材料厚度。

2 试验结果与讨论

2.1 膜材料弹性常数的各向异性

三次加卸载试验中得到1#试样的应力-应变曲线如图1所示。为了清晰起见，从0°试样开始，图中每组试验结果在横座标上平移5%的座标刻度。这样，从左至右七组曲线分别对应于0°、15°、30°、45°、60°、75°和90°拉伸试验的应力-应变曲线。由图1可看出，试样在第一次加载的应力-应变关系呈明显非线性，尤其是在偏轴拉伸情况下更是如此。经过二次加卸载试验后，试样应力-应

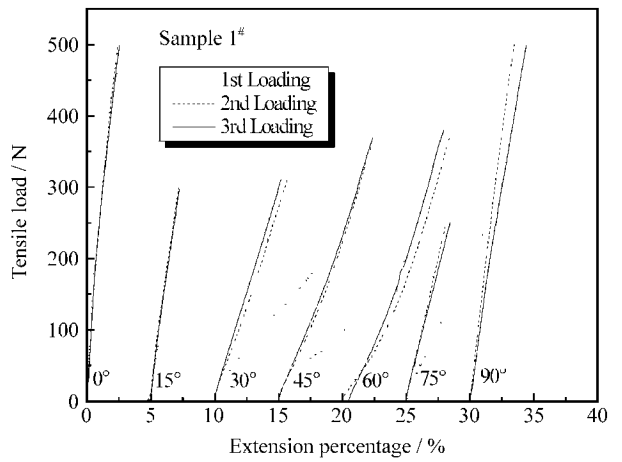

图1 正轴与偏轴试样三次加卸载试验中的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of on- and off-axis specimens under three cycles of tensile loading and unloading

表1 试验材料的技术参数

Table 1 Technical parameters of the samples

No.	Weave pattern	Yarn count/d	Fabric count (warp×weft)/(ends·cm^{-1})	Fabric mass/(g·m^{-2})	Membrane mass/(g·m^{-2})	Fabric thickness/mm	Membrane thickness/mm	Fiber volume fraction/%
1#	Basket	1000	9×9	400	960	0.28	0.76	42.0
2#	Plain	1000	12×12	270	800	0.36	0.64	34.1

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

变曲线的线性度得到了提高，而且第三次的应力-应变曲线与第二次基本一致，表明第三次加载后的应力-应变曲线可以用来描述试样的弹性力学性质。

对膜材料试样在七个方向上的张拉刚度、剪切刚度及泊松比进行了测试，测试结果如图 2 所示。为了对膜材料的正交各向异性作出判断，图中还给出了相应偏轴角度下的理论值。这里的理论值指以两个正轴及 45°偏轴拉伸刚度、泊松比为已知量，采用二维正交各向异性弹性力学本构关系[9]得到的计算值。

由图 2 可见，膜材料张拉刚度、剪切刚度及泊松比的测定值与理论值基本一致，证明了采用三次加载后的应力-应变曲线获得的膜材料弹性常数符合正交各向异性本构关系。

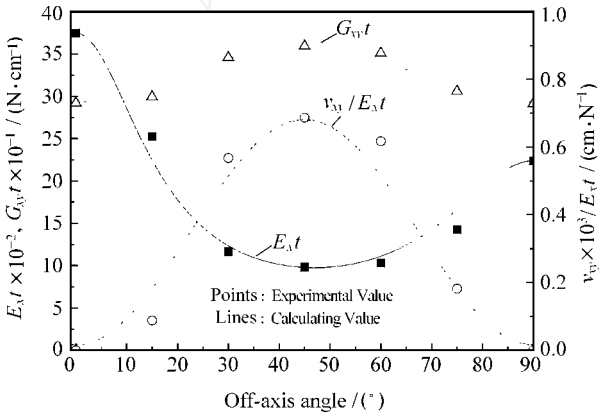

图 2　膜材料张拉刚度、剪切刚度及泊松比的理论值与试验值

Fig. 2　Testing results and theoretic prediction of tensile stiffness, shear stiffness and Poisson's ratio of the membrane material

2.2　膜材料拉伸强度的各向异性

2.2.1　膜材料的拉伸应力-应变曲线

2# 膜材料试样的典型拉伸应力-应变曲线如图 3 所示。由图 3 可见，膜材料在不同方向拉伸性能的变化规律：在 0°(经纱方向) 拉伸时拉伸模量达到最大值，而在 45°方向时最小；沿 90°(纬纱方向) 拉伸时，由于纬向纱线存在较大程度的屈曲，故膜材料的初始模量较小，而在拉伸的后半段，当纬纱充分伸直后，膜材料的纬向拉伸模量主要取决于基布中纬纱的模量和纬纱密度。由于纬密与经密基本相同，这时纬向拉伸模量就比较接近于经向了。此外从图中还可见，膜材料拉伸应力-应变曲线族的对称性，即 0°和 90°、15°和 75°、30°和 60°时的应力-应变曲线相近似。这种对称性可以从基布的准平衡组织结构的设计中得到解释。

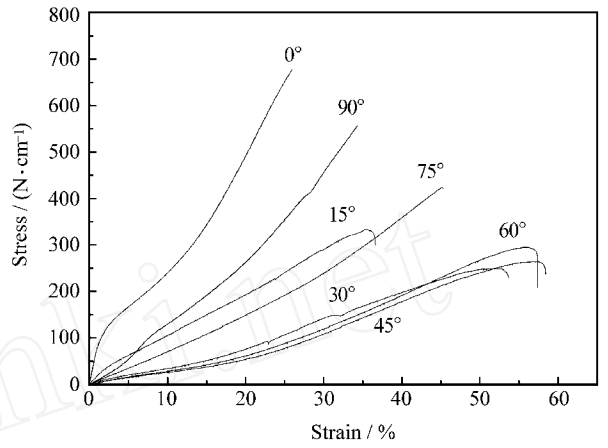

图 3　试样在不同方向上拉伸的应力-应变曲线

Fig. 3　Stress-strain behavior of the samples in different loading directions

2.2.2　膜材料拉伸断裂强度与断裂伸长率的取向分布

从图 3 中还可见膜材料拉伸断裂强度与断裂伸长率的取向分布情况。沿经向(0°)拉伸时，试样断裂强度最大，沿纬向(90°)拉伸时次之，而在偏轴拉伸情况下断裂强度出现较小值。试样断裂伸长率的分布与上述规律相反，即试样在偏轴拉伸情况下的断裂伸长率较大，而在经向拉伸时试样出现最小值。

由于膜材料基布中经纬纱粗细和密度基本相同，试样经向断裂强度大于纬向强度则意味着膜材料中经纱强度利用率较纬纱高。基布的制织过程中，受上机张力控制，经纱几乎处于完全伸直的状态，故各根经纱间的断裂一致性较高，从而使膜材料在经向表现高强低伸的断裂特征。另一方面，较大的经纱上机张力使得纬纱产生了较大的屈曲，并造成纬纱断裂的一致性降低，表现在膜材料纬向拉伸的断裂强度较经向低，而断裂伸长率则较大。

2.3　膜材料的拉伸断裂机理及强度准则

2.3.1　膜材料的拉伸断裂机理

图 4 是 2# 试样在不同加载方向上被拉断后的断口形态。图中短划虚线代表膜材料经向，点虚线代表试样断口裂纹扩展方向，粗实线代表试验加载方向；θ为偏轴角；β为断口裂纹扩展方向与试验加载方向的夹角。考察图 4 所示膜材料经拉伸断裂后的断口形态，可以发现以下三种破坏情形：

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(1)试样呈单纯拉断破坏，其特征是所有纤维都在同一位置断裂，断口与加载方向相互垂直。该情况一般发生于正轴拉伸试验中(θ= 0°和 90°方向拉伸)；(2)试样呈剪切型破坏，其断口与加载方向约呈 θ或 90°- θ角。其特征是在面内剪应力的作用下，增强纤维依次从基体(涂层材料)中抽拔出来而导致膜材料破坏。由于在该情况下，试样破坏一般是发生于基体与纤维界面间，基布中纤维并未发生断裂，因此膜材料的粘合强度在很大程度上决定了膜材料的偏轴拉伸强度；(3)试样呈拉剪混合型破坏，其断口仍与加载方向近似呈 θ或 90°- θ角。其特征是在拉应力与面内剪应力的共同作用下，试样边部纤维从基体(涂层材料)中被抽拔出来，中部则出现部分增强纤维被拉断而导致膜材料最终发生破坏，如小偏角的偏轴拉伸试验(θ= 15°或 θ= 30°)。

简而言之，对于偏轴拉伸试验，破坏总是沿平行或垂直于基布的主轴方向，且发生于强度较低的纤维或发生于其与涂层材料的界面上。由于拉应力与剪应力的共同作用，加速了膜材料的破坏而使膜材料总是表现出低于单一应力作用时所具有的拉伸断裂强度。

2.3.2 膜材料的拉伸断裂强度准则

膜材料是一种柔性纺织复合材料，已被广泛使用的复合材料强度准则对其强度准则的确定具有重要参考价值。考虑到 Tsai-Hill 强度准则比其它强度准则使用方便，而且该准则在判据式中增加了材料纵横应力的交互项，可以部分引入复杂应力状态下各应力的相互作用，提高了该准则的理论与实用价值。本文中采用 Tsai-Hill 强度准则分析膜材料试样的拉伸断裂强度。Tsai-Hill 强度准则在偏轴单向加载时的表达式为[9]

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

式中：σ_x 为偏轴拉伸强度；X、Y、S 分别为纵向拉伸强度、横向拉伸强度与面内剪切强度；θ为试样的偏轴角度。

上述强度准则中，X、Y 可通过简单拉伸试验直接得到，而对于剪切强度 S，目前国内外尚未找到合适的试验方法。本文中利用已测得的若干加载方向上的断裂强度，采用平均化方法，通过式(2)计算得到 S 值，再将试验得到的试样在不同加载方向上的断裂强度与 Tsai-Hill 强度准则进行比较，结果见图 5。从图中可以看到，在大多数情况下，Tsai-Hill 强度准则都能对其强度做出较好的预测。但小偏角的偏轴拉伸试验(θ= 15°或 θ= 30°)，该准则对试样断裂强度的预测出现了一些偏差。结合对膜材料断裂机理分析，发现试样在上述两方向拉伸时的断裂恰属拉剪混合型破坏模式，这表明 Tsai-Hill 等强度准则能对纯拉或纯剪切型破坏模式下的膜材料断裂强度做出较好的预测，而对拉剪混合型破坏模式下的膜材料断裂强度的预测上则显得不很成功。

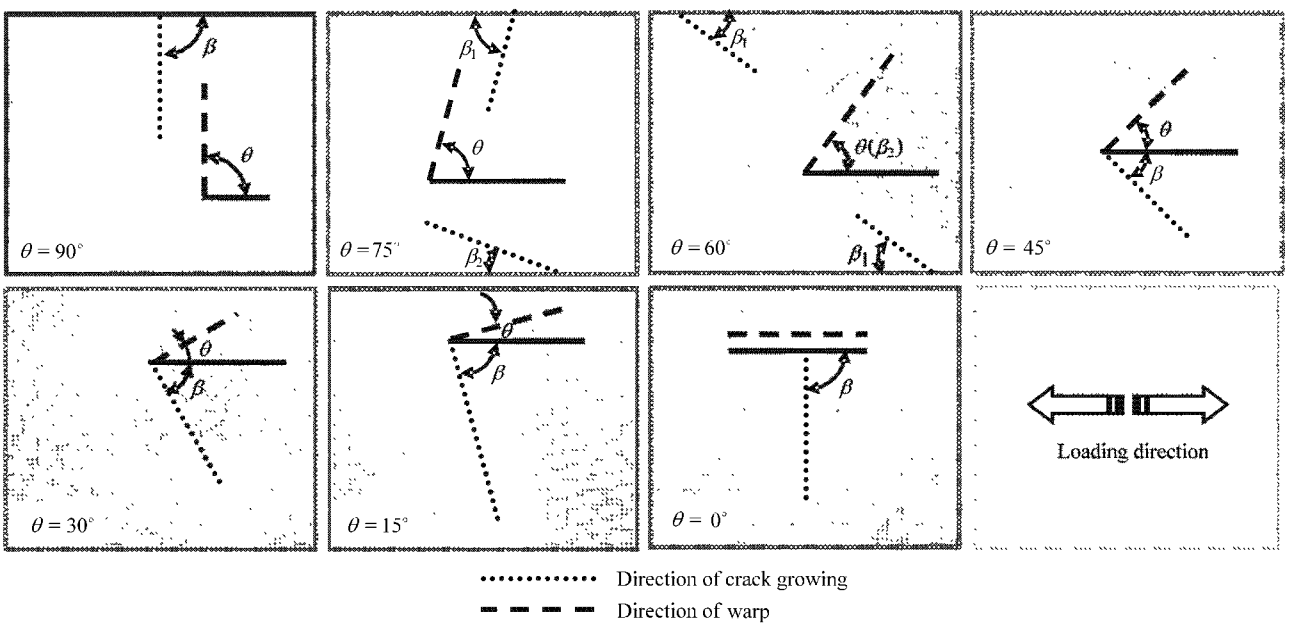

图 4 膜材料试样在不同拉伸方向上的断裂形态

Fig. 4 Fracture configuration of the samples in different loading directions

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

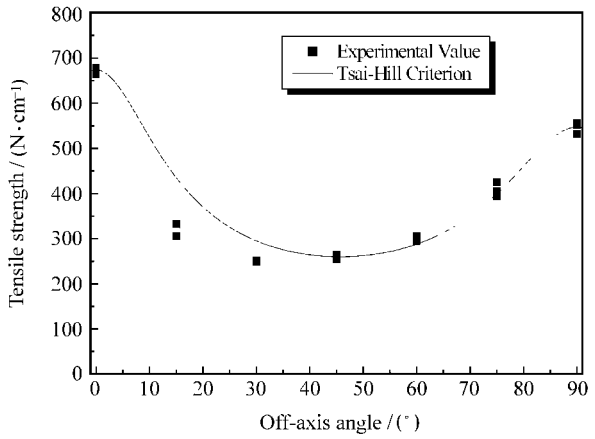

图 5　膜材料强度预测与测试结果的比较

Fig. 5　Comparison of the testing and predicting results of tensile strength of the samples

3　结　论

(1) 膜材料的拉伸性能具有强烈的正交各向异性。试验表明，沿经向的膜材料的拉伸断裂强度最高，沿纬向次之，断裂强度的最小值出现在偏轴拉伸的条件下。试样断裂伸长率的分布与上述规律相反，即断裂伸长率的最大值出现在偏轴拉伸的条件下，在经向拉伸时断裂伸长率出现最小值，而沿纬向的断裂伸长率始终高于经向。

(2) 试样在第一次单轴向加载的应力-应变关系呈明显非线性。经过三次加卸载试验后，试样应力-应变曲线的线性度得到提高。理论与试验对比分析显示，采用第三次加载的应力-应变测得的膜材料张拉刚度、面内剪切刚度和泊松比符合正交各向异性的本构关系。这表明本文中采用的单轴向拉伸试验是获得膜材料弹性常数较好的一种测试方法。

(3) 通过对膜材料拉伸断裂后的断口形态分析，发现膜材料试样呈单纯拉断型、剪切型以及拉剪混合型等不同破坏模式。将不同偏轴角下膜材料拉伸断裂强度试验值与理论预测值进行比较，结果表明，试样如果发生纯拉或纯剪切型破坏，Tsai-Hill 强度准则能对其强度做出较好的预测，但如果试样出现拉剪混合型破坏模式，则 Tsai-Hill 强度准则预测结果偏高。因此进一步研究膜材料的拉伸断裂机理，并提出新的适用于拉剪混合型破坏模式的膜材料强度准则是必要的。

参考文献：

[1] Day A S. Stress strain equations for nonlinear behaviour of coated woven fabrics [A]. In: Heki K, ed. Proceedings of the IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames [C]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1986. 17 - 24.

[2] 日野吉彦, 石井一夫. 膜構造解析におけろ材料非線性の評價[A]. 见: 日本膜構造协会学术委员会. 膜構造研究論文集(No. 8)[C]. 東京: 日本膜構造協会, 1994. 35 - 49.

[3] 南宏 和, 山本千秋, 瀬川信哉, 等. 多段線形近似にょろ膜の材料非線形解析のための弾性パラメタ算定法[A]. 见: 日本膜構造协会学术委员会. 膜構造研究論文集(No. 10)[C]. 東京: 日本膜構造協会, 1996. 45 - 51.

[4] 王　臣. 建筑膜材力学特性分析及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002. 37 - 49.

[5] 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 - 43.

[6] 关富玲, 廖　理, 夏劲松, 等. 膜结构发展综述——理论、设计、施工[J]. 钢结构与建筑业, 2002(2): 31 - 38.
Guan F L, Liao L, Xia J S, *et al*. The summarize about the development of membrane structure: Theory, design and construction [J]. *Steel Structure & Building*, 2002(2): 31 - 38.

[7] 钱若军, 杨联萍. 张力结构的分析·设计·施工[M]. 南京: 东南大学出版社, 2003. 284.

[8] 吴妙生, 周祝林. 塑料薄膜及柔性复合材料剪切模量测试技术[J]. 纤维复合材料, 1999, 16(1): 37 - 39.
Wu M S, Zhou Z L. Testing technology for shear modulus of elasticity of plastic film [J]. *Fiber Composites*, 1999, 16(1): 37 - 39.

[9] 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. 72 - 134.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net