

引用本文:刘岩,谢慧,范磊,等. Kapton 薄膜偏轴拉伸试验研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(1): 57-64.

LIU Yan, XIE Hui, FAN Lei, et al. Research on off-axis tensile tests of Kapton film[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(1): 57-64.

DOI:10.19815/j.jace.2022.04013

Kapton 薄膜偏轴拉伸试验研究

刘岩, 谢慧, 范磊, 陈奕贤, 刘伊震

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要:为深入揭示 Kapton 高分子膜材强度和刚度特征, 对其进行 7 个偏轴角度(0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90°)下的单轴拉伸试验, 获得了材料在各角度下的应力-应变关系、强度和断裂延伸率等数据, 推导了相应的弹性模量-应变关系。结果表明: Kapton 薄膜为典型的非线性、各向异性材料, 整个拉伸过程的应力-应变曲线可以分为 3 个阶段, 即近似弹性段、应变强化段、应力强化段; Kapton 膜材强度随偏轴角度的变化表现出“N”形分布规律, 异于 Tsai-Hill 等强度准则的“U”形规律, 这是由于膜材内部分子链的择优取向, 导致偏轴角度 30° 时抗拉强度最大, 偏轴角度 60° 时抗拉强度最小; 断裂延伸率随偏轴角度的增大呈现出增大的趋势; 不同偏轴角度下的弹性模量均有所差异, 正交各向异性板的弹性理论可以较好预测 Kapton 膜材的等效弹性模量; 研究所得结论可为 Kapton 膜材强度、变形预测及相应的充气可展结构设计分析提供参考。

关键词: Kapton 薄膜; 偏轴拉伸试验; 各向异性材料; 弹性模量; 力学性能

中图分类号: TU532.3

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2023)01-0057-08

Research on off-axis tensile tests of Kapton film

LIU Yan, XIE Hui, FAN Lei, CHEN Yixian, LIU Yanzhen

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: In order to deeply reveal the strength and stiffness characteristics of Kapton polymer film material, uniaxial tensile tests were carried out at 7 off-axis angles (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° and 90°). The stress-strain relationship, strength and fracture elongation of the material at various angles were obtained, and the corresponding elastic modulus-strain relationship was deduced. The results show that Kapton film is a typical nonlinear and anisotropic material. The stress-strain curve of the whole tensile process can be divided into three stages, including approximate elastic stage, strain strengthening stage and stress strengthening stage. Kapton film strength shows an “N” shape distribution law with the change of off-axis angle, which is different from the “U” shape law of Tsai-Hill strength criterion. This is due to the preferred orientation of molecular chains in the film material, resulting in the maximum tensile strength when the off-axis angle is 30° and the minimum tensile strength when the off-axis angle is 60° . The fracture elongation increases with the increase of off-axis angle. The elastic modulus under different off-axis angle is different. The elastic theory of orthotropic plates has a good prediction for the

收稿日期: 2022-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(51908043); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(300102280201)

作者简介: 刘岩(1984-), 男, 工学博士, 副教授, E-mail: liuy@chd.edu.cn.

equivalent elastic modulus of Kapton film. The conclusions of the study can provide reference for the strength and deformation prediction of Kapton film and the corresponding design and analysis of inflatable deployable structure.

Key words: Kapton film; off-axial tensile test; anisotropic material; elastic modulus; mechanical property

0 引言

为适应当前国防和航空事业的发展,完成中国各项深空探测任务,对高精度大型空间可展开结构的需求越来越迫切。充气可展结构(图 1)作为一种

有前景的可折叠展开结构,代表着未来深空发展方向之一^[1-5]。它在地面发射时为折叠收纳状态,收藏在整流罩内,待航天器进入空间轨道后,再由地面控制指令使其在空间轨道上按照设计要求逐步完成展开动作,最后锁定并保持运营工作状态。

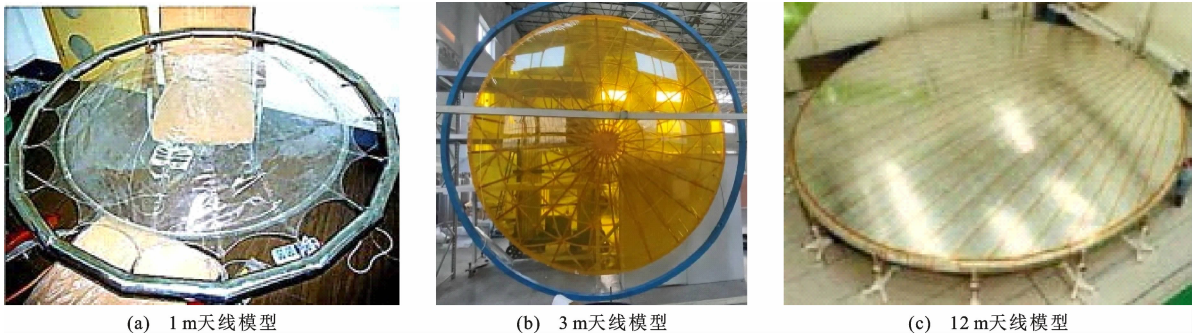


图 1 充气可展结构

Fig. 1 Inflatable deployable structure

作为充气可展结构的反射面材料 Kapton 膜是美国杜邦公司生产的一种含有聚酰亚胺基的高分子聚合物薄膜,具有优良的化学稳定性、耐高温性、坚韧性、耐磨性、阻燃性、电绝缘性等,其诞生至今短短几十年,广泛应用于空间可展结构中。与传统的建筑膜材相比,Kapton 膜材料的力学性能研究仍旧相对落后。前期学者对 Kapton 薄膜进行了不同速率下的单轴拉伸试验,结果表明任意拉伸速率下,膜材沿膜材长度方向(MD)和垂直膜材长度方向(TD)应力-应变曲线均完全不同,表现出明显的各向异性,这对结构设计(诸如强度设计、裁剪分析等)会产生较大的影响^[6-7]。目前,已有部分学者^[8-9]对建筑膜材进行了部分角度的偏轴拉伸试验,讨论了膜材料拉伸性能的各向异性,对其拉伸断裂机理和适用的相关强度准则分析后形成了一定成果。然而围绕 Kapton 薄膜的既有研究主要集中在材料物理成型、化学制备等方面^[10-15],关于其力学性能的研究很少,尤其是偏轴拉伸力学特性未见相关报道,尚处空白阶段,难以满足工程应用,亟待对 Kapton 薄膜进行不同角度的裁切制备试样,开展系列偏轴单轴拉伸试验,系统考察并明晰该膜材的强度特征及其力学参数随偏轴角度的衍变规律,为后续充气可展结构

的设计分析以及在轨试验提供较为完备的材性数据。

1 试验及方法

1.1 试样制备

试验 Kapton 薄膜型号为 100 HN,可在极苛刻温度环境 $-269\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下安全使用,其相关基本参数如表 1 所示。本文参照塑料薄膜拉伸试验国家标准^[16],采用切割样条法对 Kapton 膜材以 MD 向为起始裁切方向,依次以 15° 递增,最终止于 TD 向裁切矩形条状试样,进行常温下的偏轴单向拉伸试验。条形试样宽 25 mm,总长度 150 mm,厚度 $25\ \mu\text{m}$,两夹持端距离为 100 mm,其几何尺寸如图 2 所示。最终偏轴角度为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° 、 90° 共 7 个,分布如图 3 所示。每个角度各制备 5 个试样,以确保数据的可靠性。试样制备时,为了使膜片拉伸破断位置发生在试样中部,其夹持端采用铝片进行双面粘贴予以加强,如图 4 所示。

1.2 试验环境及拉伸速率

在偏轴拉伸试验之前先对 Kapton 膜材进行了常温($20\text{ }^{\circ}\text{C}$)下不同速率的单向拉伸试验,试验结果表明拉伸速率对 Kapton 膜材的抗拉强度、断裂延

表 1 Kapton 薄膜基本参数

Table 1 Basic parameters of Kapton film

参数	数值	检测方法
电容率	3.9	ASTM D-150-81
耗散因数	0.003	ASTM D-150-81
表面电阻率/($10^{16} \Omega \cdot m^{-2}$)	3.6	ASTM D-257-78
撕裂强度/N	11	ASTM D-1004-90
密度/($g \cdot cm^{-3}$)	1.54	ASTM D-1004-90
导热系数	0.385	特拉华州大学检测法
可燃性等级	V-0	UL-94
热收缩率	0.2	ASTM D-5214-91

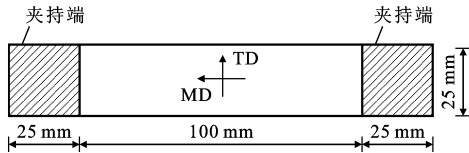


图 2 条形试样几何尺寸

Fig. 2 Geometric dimension of strip sample

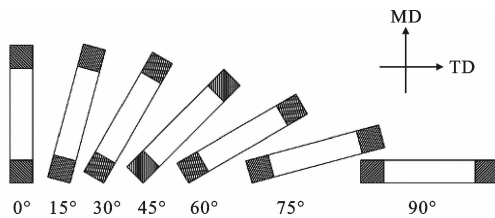


图 3 裁切试样分布

Fig. 3 Distribution of strip samples

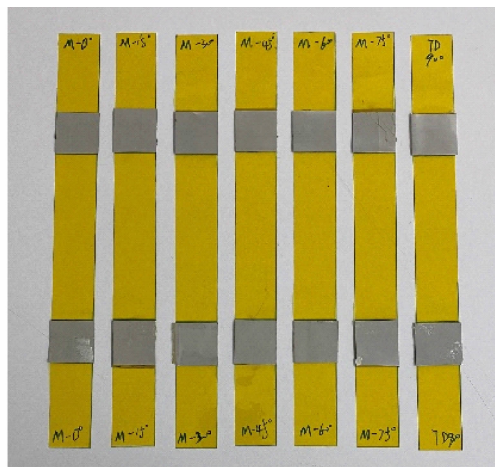


图 4 制备好的试样

Fig. 4 Prepared samples

伸率、等效屈服强度、屈服应变以及拉伸弹性模量均有一定影响,并且拟合了相应的公式。基于既有不同拉伸速率下的试验结果并结合相关的国家标准,该偏轴试验单向拉伸速率采用 $100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,试验室温度为 $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$,相对湿度为 $40\% \pm 2\%$ 。

1.3 试验设备

采用美国英斯特朗公司生产的型号为 IN-

STRON5965 的电子红外拉伸试验机进行单轴拉伸(图 5),夹具采用手动楔形夹具(图 6),试验机最大载荷为 5 kN。参考《塑料拉伸性能的测定》(GB/T 1040.1—2006)以及《膜结构技术规程》(CECS 158:2015),试验开始时在夹具中央夹紧试样,使其纵向中心线通过夹持面的中心线,以确保试验轴心受拉,待其恒温稳定后开启试验机进行试样的拉伸。拉伸初始时刻首先对膜材进行预张拉,预张力大小约为 3 N,然后采用位移控制将试件常速拉伸至破坏(图 7),同步实时记录荷载-位移曲线。试验数据采集频率为 20 Hz。

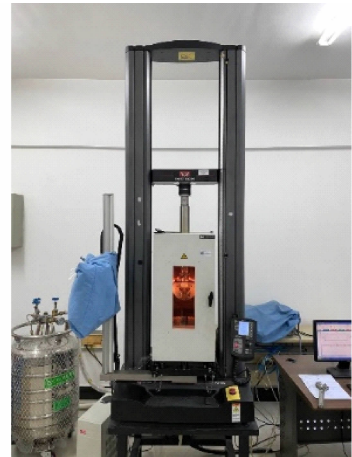


图 5 拉伸试验机

Fig. 5 Tensile test machine



图 6 楔形夹具

Fig. 6 Wedge gripping

2 结果与讨论

2.1 偏轴拉伸应力-应变关系

不同偏轴角度 θ 下 Kapton 膜材的应力-应变曲线如图 8 所示。Kapton 膜材具有显著的非线性特征,随着偏轴角度的不断变化,不仅非线性特征变化

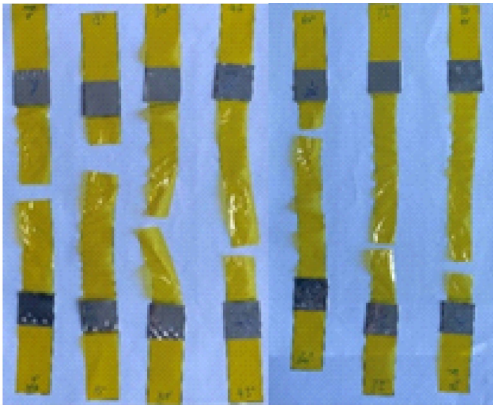


图7 断裂后的试样

Fig. 7 Fractured samples

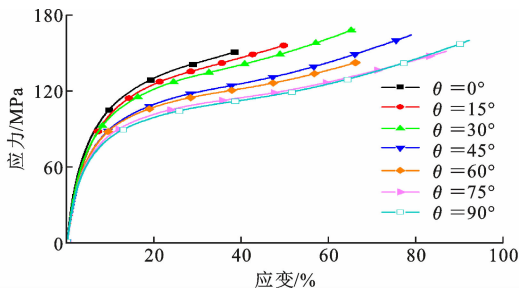


图8 偏轴拉伸应力-应变曲线

Fig. 8 Off-axis tensile stress-strain curves

明显,且表现出明显的各向异性,材料在各角度下的变形及刚度差异较大。图9为偏轴拉伸应力-应变关系模型。在角度较小(如 0° 、 15° 、 30°)时,应力-应变关系可用二阶段来描述,即近似弹性段和应力强化阶段(图9中的黑色曲线);随着偏轴角度增加至 45° 、 60° ,材料的应力-应变关系可用三阶段来描述,即近似弹性段、应变强化段、应力强化段(图9中的蓝色曲线);当角度增大到 75° 和 90° 时,其应力-应变曲线依然可简化为3个阶段,但在此角度下应变强化段明显变得更平缓、更长(图9中的绿色曲线)。

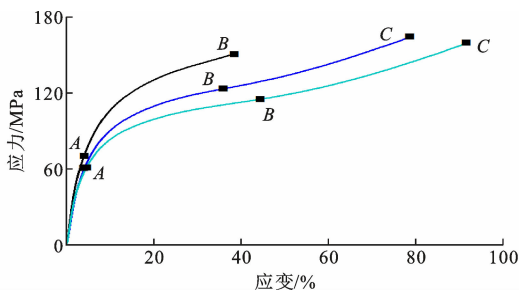


图9 偏轴拉伸应力-应变关系模型

Fig. 9 Model of off-axis tensile stress-strain relationship

对于曲线的3个阶段的具体描述如下:

(1)OA段:近似弹性段,变形较小,应变基本在 1.5% 以内,呈现明显的线性特征,随着偏轴角度的

增大,初始近似弹性段应变范围逐步减小,在 90° 时(TD方向)达到最小,应变只有 0.87% 。

(2)AB段:应变强化段,该段有着显著的塑性变形特征,应力增加较缓,而应变增加很快,膜材刚度显著降低。对偏轴角度下的拉伸而言,其剪切效应突出,导致膜材的变形发展很快,且随着偏轴角度的增大,应变强化段逐步变长, 90° 时(TD方向)达到最大。

(3)BC段:应力强化段,该段的线性化程度较应变强化段有所增强,膜材刚度明显开始提高,强度发挥迅速。当试件拉断破坏时,断面出现一定的颈缩,达到材料的极限承载力。在该阶段,应变范围随着偏轴角度的增大而增大, 90° 时达到最值,其应变范围为 $0.45\sim 0.92$ 。

2.2 强度与变形特征

Kapton膜材的抗拉强度和断裂延伸率随偏轴角度的变化规律如图10所示。首先根据试验的7个偏轴角度直接描绘各力学指标和偏轴角度的关系曲线,见图10(a)、(b)。可以看出,Kapton薄膜的应力、应变随着偏轴角度的不同存在着显著的差异度,表现出明显的各向异性特征。具体体现在:①随着偏轴角度的增加,Kapton膜材的抗拉强度呈现出“N”形的变化规律, 30° 附近出现波峰,具有最大的抗拉强度, 60° 附近出现波谷,具有最小的抗拉强度;②断裂延伸率从 $0^\circ\sim 90^\circ$ 基本呈增大趋势,但在 60° 附近出现明显的下降。考虑上述特征与材料内部发生分子链的择优取向有关^[17],将该结果从 $0^\circ\sim 90^\circ$ 推演至整个平面范围内任意角度($0^\circ\sim 360^\circ$),其力学指标和角度的关系曲线如图10(c)、(d)所示。

2.3 破坏机理

Kapton膜材力学性能表现出各向异性的特征,考虑是由于薄膜在制备过程中的牵引、固化等制作工艺的共同作用所导致。高分子材料的破坏过程本质是材料的微观和细观结构的不均匀性和缺陷在力学过程中逐渐发展,最终呈现为宏观的材料破坏。偏轴拉伸试验中偏轴角度为变量,而该材料的分子链取向是值得关注的重点。高分子材料的分子链取向可以极大地提高材料的拉伸强度,即当外力沿着分子链取向方向作用时,该方向上的材料拉伸强度和弹性模量都会增大,同时分子链的取向作用也会导致弹性的各向异性;垂直于分子链取向方向上的力学性质存在明显降低,外加应力方向和大小的变化都会对膜材内部结构和整体性能产生影响。从图8、10可以看出,不同偏轴角度下的膜材拉伸曲线在

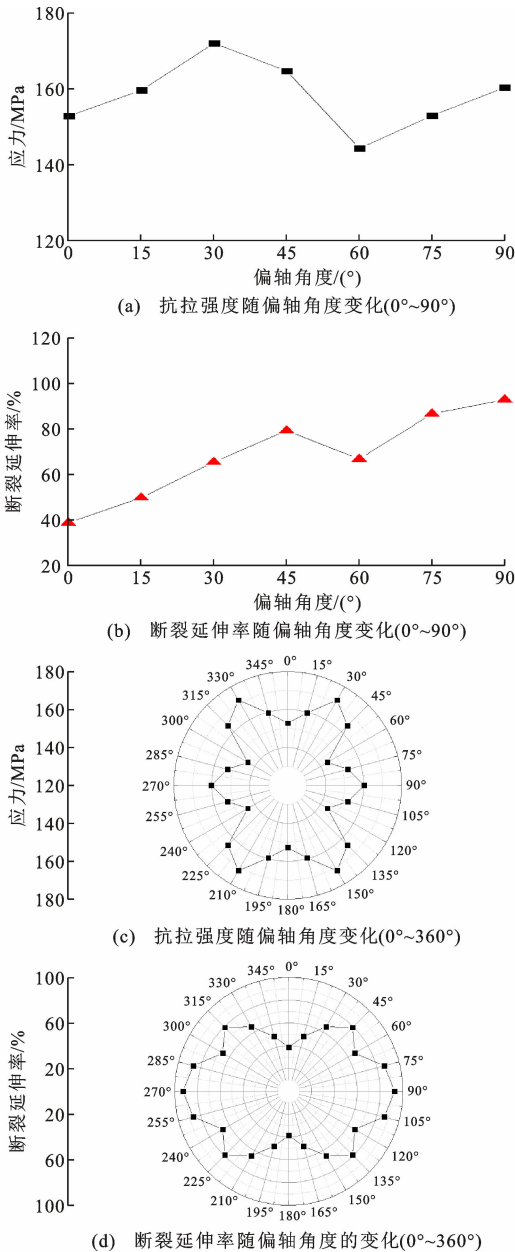


图 10 Kapton 膜材偏轴抗拉强度和断裂延伸率
Fig. 10 Off-axis tensile strength and fracture elongation of Kapton film

近似弹性段重合度很高,随着应力的继续增加,曲线在塑性变形阶段表现出明显的差异,且抗拉强度在偏轴角度为 30°和 60°附近时分别出现波峰与波谷,可得出 Kapton 膜材在 30°方向分子链具有择优取向。Kapton 膜材在外加应力处于低水平时,膜材内部分子链的择优取向尚未发挥作用,所以在近似弹性段各角度下的拉伸曲线重合度较高;当外加应力增大到一定数值,即材料进入塑性变形阶段时,此时分子链的择优取向会导致各偏轴角度下力学性能产生差异。分析可以得出 30°和 150°为分子链主链方向,抗拉强度最大,而在 60°和 120°方向上,抗拉强

度最小,如图 11 所示。

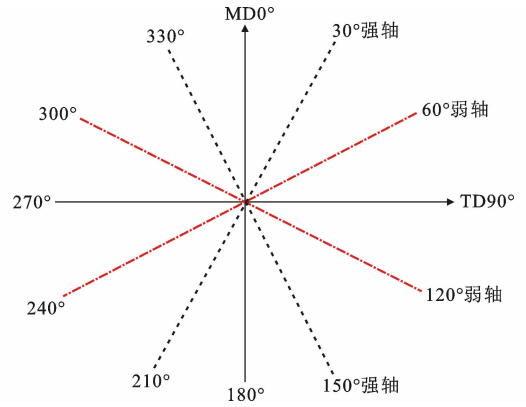


图 11 Kapton 膜材的强轴与弱轴

Fig. 11 Strong axis and weak axis of Kapton film

2.4 偏轴抗拉强度分析

Kapton 膜材为正交各向异性材料,采用 Tsai-Hill 理论预测偏轴强度。Tsai-Hill 理论假设正交各向异性材料的强度失效依据类似于各向同性材料的 Mises 准则,综合考虑了材料 3 个主方向与相应强度对破坏的影响,Tsai-Hill 理论判断依据见式(1)。

$$\frac{\sigma_L^2}{X^2} - \frac{\sigma_L \sigma_T}{X^2} + \frac{\sigma_T^2}{Y^2} + \frac{\tau_{LT}^2}{S^2} = 1 \quad (1)$$

式中: X 、 Y 分别为 MD、TD 方向的拉伸强度; S 为材料的剪切强度; σ_L 、 σ_T 分别为 MD、TD 方向上的应力; τ_{LT} 为材料主方向的切应力。

Tsai-Hill 理论对材料偏轴抗拉强度进行预测的强度 F_x 计算公式见式(2)。

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

将 S 代入式(2)求解各偏轴抗拉强度,结果如图 12 所示。可以看出,Tsai-Hill 理论计算得出的强度与实测数据存在明显的差异,不能用于强度预测,因此建立拟合关系式对 Kapton 膜材的偏轴抗拉强度进行描述,结果如图 13 所示。Kapton 膜材的偏轴抗拉强度 f 的拟合方程如式(3)所示。

$$f = -2 \times 10^{-7} \theta^5 + 5 \times 10^{-5} \theta^4 - 0.004 1 \theta^3 + 0.103 2 \theta^2 - 0.015 5 \theta + 150.64 \quad (3)$$

2.5 弹性模量-应变关系

弹性模量与应变的关系曲线可较为完整涵盖应力-应变关系曲线所有的力学信息,在材料力学细节响应上的描述也更为直观深刻,通过对应力-应变曲线进行高次拟合,再进行求导获得各偏轴角度下的弹性模量-应变曲线,如图 14 所示。可以看出,各角

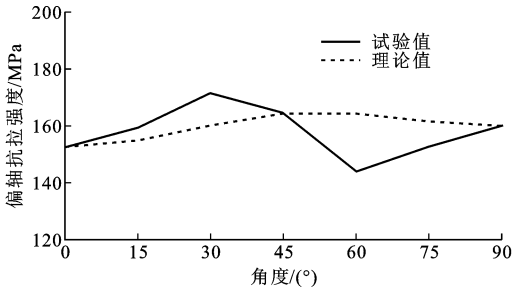


图 12 偏轴抗拉强度试验值和理论值对比

Fig. 12 Comparison between test and theoretical values of off-axis tensile strength

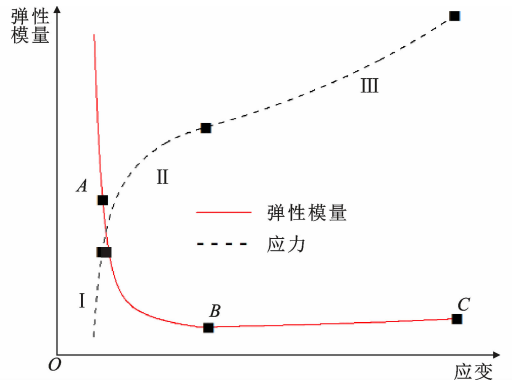


图 15 弹性模量-应变关系模型

Fig. 15 Model of elastic modulus-strain relationship

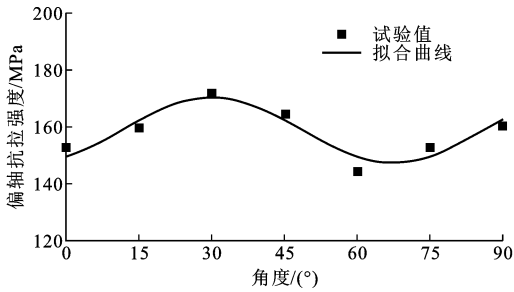


图 13 偏轴抗拉强度试验值和拟合公式值对比

Fig. 13 Comparison between test and fitting formula values of off-axis tensile strength

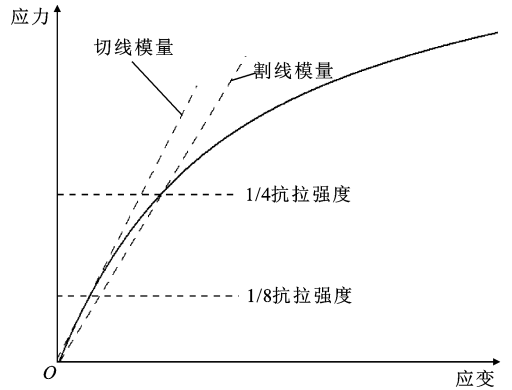


图 16 切线模量、割线模量取值方法

Fig. 16 Determining method of tangent and secant modulus (the slope of the point) and according to Davidow 等^[18]提出的利用应变能理论计算获得的等效弹性模量。当应力-应变曲线为非线性时, Davidow 等^[18]依据应变能理论提出了一种屈服强度的取值方法,有效反映了此情况下材料的屈服强度和屈服应变,如图 17 所示。

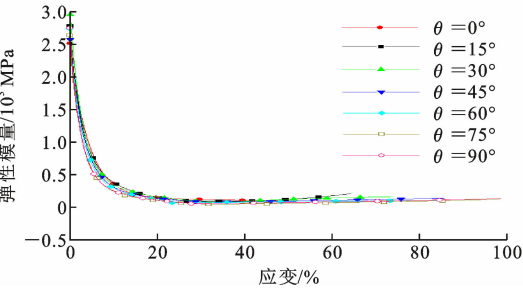


图 14 弹性模量-应变曲线

Fig. 14 Elastic modulus-strain curves

度下弹性模量随应变的变化趋势一致,曲线重合度高。弹性模量随应变的变化趋势存在着一定的规律,从弹性模量-应变关系模型(图 15)可以看出,弹性模量和应变之间的关系也可划分为 3 个阶段。随着应变的增加,在第 1 阶段时 Kapton 膜材的弹性模量迅速下降;在第 2 阶段时弹性模量下降趋于平缓,直至降至谷底;进入第 3 阶段后弹性模量开始缓慢上升至膜材被拉断。上述变化阶段反映了材料弹性模量同拉伸过程中材料内部分子链断裂和缺陷发展之间的关联性。

2.6 弹性模量计算

本文通过 3 种计算方法来分析弹性模量(图 16),包括切线弹性模量(选取原点和 1/8 抗拉强度点的斜率)、割线弹性模量(选取原点和 1/4 抗拉强

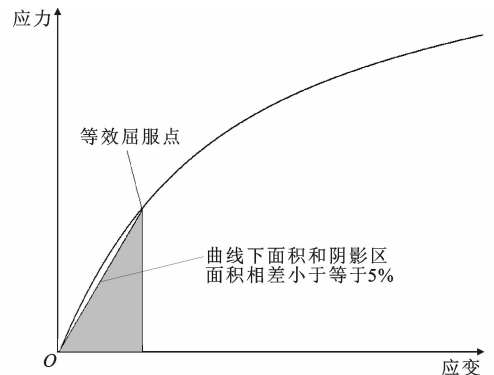


图 17 根据能量法求解等效屈服点

Fig. 17 Equivalent yielding point estimation according to energy theory

该等效屈服点的计算方法为:在应力-应变曲线的近似弹性段选取一点,应力-应变的关系式见式(4)。

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4)$$

式中: σ 为应力; ε 为应变; E 为弹性模量。

当加载至该点时,吸收的应变能 W' 可由式(5)估算。

$$W' = \frac{1}{2} \sigma_y \varepsilon_y \quad (5)$$

式中: σ_y 为屈服应力; ε_y 为屈服应变。

依据能量法,由应力-应变曲线近似弹性段上的该点,按式(6)可计算其实际吸收的总应变能 W 。当估算的应变能 W' 与实际的应变能 W 的相对误差控制在一定的范围内(一般取值为 5%) [式(7)],即可认为该点为等效屈服点。

$$W = \int_0^{\varepsilon_y} \sigma d\varepsilon \quad (6)$$

$$\frac{W - W'}{W} \leq 5\% \quad (7)$$

等效弹性模量的计算可选取该等效屈服点之前的应力-应变数据,采用最小二乘法进行线性拟合即可求得。

通过上述 3 种方法求得的弹性模量如图 18 所示,分析可知:① 0° 方向(MD 方向)的弹性模量均值最高,偏轴角度为 45° 时的弹性模量均值最小;②除偏轴角度 0° 和 90° 以外,3 种计算方法所求的弹性模量值较为接近;③随着偏轴角度的不断变化,膜材弹性模量总体趋势是不断下降,但是弹性模量数值不断波动,随角度的增加其变化整体呈现锯齿状,这是由于膜材内部分子链在不同的工况作用下出现了择优取向所导致。

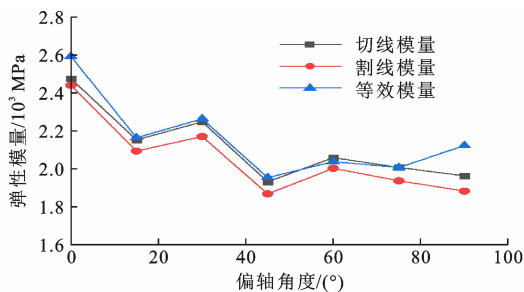


图 18 弹性模量取值结果

Fig. 18 Results of elastic modulus

将采用正交各向异性板弹性理论^[19]的预测值与等效弹性模量的取值结果进行对比,其理论公式如式(8)所示。

$$\frac{1}{E_{(\theta)}} = \frac{\cos^4(\theta)}{E_{(0^\circ)}} + \left(\frac{4}{E_{(45^\circ)}} - \frac{1}{E_{(0^\circ)}} - \frac{1}{E_{(90^\circ)}} \right) \cdot \sin^2(\theta) \cos^2(\theta) + \frac{\sin^4(\theta)}{E_{(90^\circ)}} \quad (8)$$

式中: $E_{(\theta)}$ 为任意偏轴角度 θ 下的等效弹性模量。

Kapton 弹性模量对比结果如图 19 所示。理论

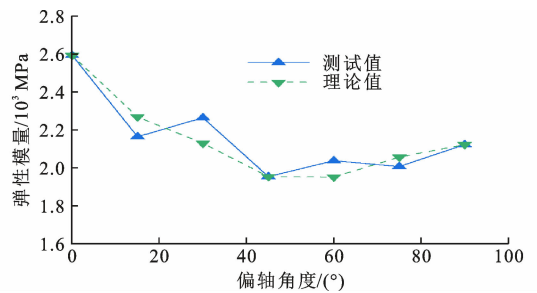


图 19 Kapton 弹性模量理论与测试值对比

Fig. 19 Comparison between theoretical and test values for elastic modulus of Kapton

值与测试值最大相对误差为 5.96%,出现在 30° 角,可见除偏轴角度为 30° 左右,正交各向异性板的弹性理论均能对 Kapton 膜材的弹性模量做出较好预测。

3 结 语

(1) Kapton 膜材具有明显的非线性和各向异性特征,整个拉伸过程的应力-应变曲线可以分为 3 个阶段,即近似弹性段、应变强化段、应力强化段。

(2) Kapton 膜材的抗拉强度随偏轴角度的变化规律不同于 Tsai-Hill 等强度准则的“U”形规律,而是呈现出“N”形的变化规律,这是由于膜材内部分子链的择优取向,导致偏轴角度 30° 时抗拉强度最大,偏轴角度 60° 时,抗拉强度最小;断裂延伸率随偏轴角度的增大也呈现出增大的趋势;外加应力方向和大小的变化都会对膜材的内部结构和整体性能产生影响,这体现了 Kapton 膜材同其他材料的内在差异性。

(3) 各偏轴角度下弹性模量-应变关系曲线总体变化规律趋于一致,可划分为与应力-应变关系曲线一一对应的 3 个阶段,弹性模量先急剧减小,后缓慢增大。基于 Davidow 等提出的利用应变能理论的求解方法可以对 Kapton 这种无明显屈服点的非线性材料求解其等效弹性模量,该值能够较为准确地反映膜材在各应变状态下的刚度特征,且与正交各向异性板的弹性理论结果吻合度高,在后续充气可展结构的设计分析中具有一定的参考价值。

参考文献:

References:

[1] 谢光贤. 国外聚酰亚胺薄膜发展概况[J]. 绝缘材料通讯, 1992, 25(1): 34-40, 49.

XIE Guangxian. Overview of polyimide film development abroad [J]. China Civil Engineering Journal,

- 1992,25(1):34-40,49.
- [2] 王凯,高生强,詹茂盛,等.热塑性聚酰亚胺研究进展[J].高分子通报,2005(3):25-32.
WANG Kai, GAO Shengqiang, ZHAN Maosheng, et al. Development of thermoplastic polyimide [J]. Polymer Bulletin, 2005(3):25-32.
- [3] SAEED M B, ZHAN M S. Adhesive strength of partially imidized thermoplastic polyimide films in bonded joints[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007, 27(1):9-19.
- [4] JOHNSON L, YOUNG R M, MONTGOMERY IV E E. Recent advances in solar sail propulsion systems at NASA[J]. Acta Astronautica, 2007, 61(1/2/3/4/5/6):376-382.
- [5] LIAW D J, WANG K L, HUANG Y C, et al. Advanced polyimide materials: syntheses, physical properties and applications[J]. Progress in Polymer Science, 2012, 37(7):907-974.
- [6] BRIDGENS B, BIRCHALL M. Form and function: the significance of material properties in the design of tensile fabric structures[J]. Engineering Structures, 2012, 44:1-12.
- [7] DINH T D, REZAEI A, DE LAET L, et al. A new elasto-plastic material model for coated fabric[J]. Engineering Structures, 2014, 71:222-233.
- [8] 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 Materialiae Compositae Sinica, 2005, 22(6):98-102.
- [9] 邹宗勇,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 Zongyong, HAN Jian, LIU Hangfeng, et al. Orthotropic behavior of PVC architectural membrane materials under tensile loading[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2010, 27(2):186-190.
- [10] SAEED M B, ZHAN M S. Effects of Monomer structure and imidization degree on mechanical properties and viscoelastic behavior of thermoplastic polyimide films[J]. European Polymer Journal, 2006, 42(8):1844-1854.
- [11] MATLOFF G L. The solar photon sail: history, current status and future prospects[J]. Journal of the British Interplanetary Society, 2011, 64(2):58-71.
- [12] 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 Yingying, HUANG Yuan, XU Junhao, 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.
- [13] 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 Yingying, ZHANG Qilin, ZHOU Chuanzhi. Uniaxial tensile properties of PTFE membrane material[J]. Journal of building materials, 2010, 13(4):535-539.
- [14] 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 Jianwen, 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 Sciences), 2019, 46(9):54-61.
- [15] 王波,吴亚波,郭洪宝,等. 2D-C/SiC复合材料偏轴拉伸力学行为研究[J]. 材料工程, 2017, 45(7):91-96.
WANG Bo, WU Yabo, GUO Hongbao, et al. Investigation on off-axis tensile mechanical behaviors of 2D-C/SiC composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(7):91-96.
- [16] 膜结构检测技术规程: DG/TJ 08-2019-2007 [S]. 上海:上海市住房和城乡建设管理委员会, 2019.
Technical specification for inspection of membrane structures: DG/TJ 08-2019-2007 [S]. Shanghai: Shanghai Housing and Urban Construction Management Committee, 2019.
- [17] 董珊珊. 聚酰亚胺薄膜多场耦合作用下电子辐照损伤行为研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.
DONG Shan-shan. Electron irradiation damage behavior of polyimide film under multi-physical field coupling condition[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [18] DAVIDOW S A, FRIDLEY K J. Development of design values for wood-plastic composite materials[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(5):415-418.
- [19] 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 Dong, WANG Chen, XIANG Yang, et al. Experimental study on material properties of structural fabric[J]. Spatial Structures, 2002, 8(1):37-43.