

加捻植物纤维增强树脂基复合材料偏轴拉伸 非线性多层次角度融合建模

李永平^{1,2}, 李岩^{*1}

(1. 同济大学 航空航天与力学学院, 上海 200092; 2. 上海工程技术大学 飞行学院, 上海 201620)

摘要: 针对加捻植物纤维增强树脂基复合材料偏轴拉伸非线性力学行为, 以宏、细观相结合的思路, 建立了融合植物纤维微纤丝角、纱线加捻表面捻转角和复合材料偏轴拉伸角的多层次角度融合本构模型, 在实际计算时, 由于微纤丝角的随机性、难于测量和对复合材料偏轴拉伸性能相对表面捻转角和偏轴拉伸角的较小影响, 假定微纤丝角是常量, 计算时仅考虑表面捻转角和偏轴拉伸角, 适当简化。最后, 利用单向亚麻纤维织物增强环氧树脂基复合材料拉伸实验数据和文献数据验证模型的有效性, 模型计算结果与实验结果吻合较好。

关键词: 加捻; 植物纤维; 复合材料; 多层次角度; 偏轴拉伸; 非线性

中图分类号: TB330.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)08-2103-07

Modeling the off-axis tensile nonlinearity of twisted plant fiber reinforced composites fused with hierarchical angles

LI Yongping^{1,2}, LI Yan^{*1}

1. School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. College of Flight, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Aiming at the off-axis tensile nonlinear behavior of twisted plant fiber reinforced composites, hierarchical angle constitutive model was built up by integration of macroscale and microscale methods by considering micro fibril angle of plant fibers, surface twist angle of fiber yarn and off-axis tensile angle of composites. When calculated, this model could only consider the effects of surface twist angle and off-axis tensile angle because micro fibril angle was random, difficult to be measured and less effects to composites' off-axis tensile properties than surface twist angle and off-axis tensile angle. That meant micro fibril angle was assumed to be constant and that model would be simplified. Finally, the model was validated by the experimental data of unidirectional flax fabric reinforced epoxy composites conducted in this research and from the literatures. The calculated results show good agreement with the experimental data.

Keywords: twist; plant fiber; composites; hierarchical angle; off-axis tension; nonlinear

植物纤维增强树脂基复合材料由于绿色环保、较好的比刚度和比强度, 正被广泛使用并成为研究的热点。在研究植物纤维增强树脂基复合材料的过程中, 发现该种复合材料的力学行为具有明显的非线性, 而这种非线性主要是由植物纤维的加捻、编织和偏轴拉伸等因素所造成的。众所周知, 纤维增

强树脂基复合材料在偏轴拉伸载荷作用下存在着明显的非线性力学行为, 而植物纤维由于其独特的天然生长特性, 以纤维为原料进行纺纱过程中, 无法避免的加捻对其增强复合材料力学行为的影响显然是一个新的力学问题。正确掌握植物纤维增强树脂基复合材料偏轴非线性行为对于准确设计复合材料

收稿日期: 2017-08-15; 录用日期: 2017-11-13; 网络出版时间: 2017-12-06 10:15

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171206.002>

基金项目: 国家杰出青年科学基金 (11625210)

通讯作者: 李岩, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为纤维增强树脂基复合材料力学高性能化和耐久性 E-mail: liyan@tongji.edu.cn

引用格式: 李永平, 李岩. 加捻植物纤维增强树脂基复合材料偏轴拉伸非线性多层次角度融合建模[J]. 复合材料学报, 2018, 35(8): 2103-2109.

LI Yongping, LI Yan. Modeling the off-axis tensile nonlinearity of twisted plant fiber reinforced composites fused with hierarchical angles[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(8): 2103-2109 (in Chinese).

的相关性能参数、降低复合材料制造的成本、进一步拓宽其在相关领域的应用具有重要意义。为此需要建立相应的、考虑加捻的偏轴拉伸力学行为模型,为植物纤维增强树脂基复合材料的准确设计提供依据。

偏轴拉伸非线性是研究植物纤维增强树脂基复合材料力学行为的一个不可或缺部分,要建立一个更加准确的力学模型,必须结合植物纤维自身的特点,从更加细观的角度去挖掘。Madsen B. 等^[1]研究了大麻纤维增强热塑性树脂基复合材料的拉伸力学性能,通过改变植物纤维的种类、纤维、体积含量、树脂基体种类和偏轴拉伸角度等参数,采用实验研究的方式得到一些非线性力学行为的结论,其中对同一种大麻纤维增强树脂基复合材料进行 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 的偏轴拉伸,对比它们对应的拉伸应力-应变曲线,发现偏轴角度越大,相同变形条件下的应力越小,说明偏轴拉伸角度对非线性行为有直接影响,且影响很大。

从上可知,虽然 Madsen B. 等^[1]通过大量的实验研究获得了一定的规律性结论,但其并没有将这些结论以为学模型的形式表述出来,即没有建立相关的本构关系和模型,无法从理论的高度指导复合材料的结构设计和力学性能分析。

Shah Darshil U 等^[2]研究了亚麻纤维增强树脂基复合材料的 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 的偏轴拉伸行为,发现在应变小于 0.4% 时其应力-应变关系表现为明显的非线性,同时随着偏轴角度的增大,产生同样的应变所需的应力相应减小。

此外,Shah 等^[3-6]在过去五年间还对植物纤维增强树脂基复合材料非线性的拉伸力学行为及相关建模工作显示了浓厚的兴趣,其研究范围涵盖亚麻、剑麻和苧麻等植物纤维增强树脂基复合材料。他们所构建的力学模型是基于复合材料混合定律理想加捻短纤维纱线结构和 Krenchel 方向效率因子提出的,除了利用自己的实验数据进行验证外,还广泛地引用了 Goutianos 和 Peijs 等^[7]的实验数据进行验证,证实了模型的有效性,但模型仅针对复合材料的强度,没有针对本构关系进行。

另外,王春敏^[8]提出加捻后剑麻纤维束的弹性模量发生了改变,其沿纤维方向的弹性模量变化规律为 $E'_t = E_t \cos^2 \theta$ (E_t 和 E'_t 分别为加捻前后剑麻纤维弹性模量, θ 为捻转角)。

显然,之前的学者没有提出加捻对植物纤维增强树脂基复合材料偏轴拉伸非线性力学行为影响的

本构模型,这正是本文研究的出发点。本文拟综合细观力学和宏观力学的方法,研究加捻偏轴拉伸条件下的加捻植物纤维增强树脂基复合材料的非线性力学行为,即研究综合考虑植物纤维微纤丝角、纱线表面捻转角和复合材料板的偏轴拉伸角度,在三者复合情况下的非线性力学行为。

1 植物纤维增强树脂基复合材料偏轴拉伸下的多层次角度

1.1 植物纤维的微纤丝角

由于植物纤维结构和组成的特殊性,其自身具有各向异性的力学特征,同时其增强的复合材料也呈现明显的各向异性。

事实上,植物纤维本身就是一种复合材料,其主要组成成分是纤维素、半纤维素和木素。构成植物纤维的最小单元——微纤丝,包含各向异性的结晶形态和无定形区,而微纤丝又被半纤维素、木质素等基体包裹。在韧皮纤维中,如亚麻和大麻,结晶区结晶态的纤维素可以达到 70% ^[9],而且其微纤丝螺旋状地环绕着细胞壁,并不是平行于单纤维方向,而是与单纤维轴向呈一定的夹角——微纤丝角。细胞壁分为初生壁和次生壁,其中次生壁又分成几层,每一层的微纤丝角也不同^[9-10]。图1为植物纤维及其复合材料不同层次下的角度。如图1(a)所示,S2层次生壁占总厚度的 80% ^[9,11],一些学者已经研究了微纤丝角对植物纤维纵向拉伸属性和应力-应变行为的影响^[12],结论是:微纤丝偏轴角度对植物纤维的力学行为有直接影响,角度越小,植物纤维纵向拉伸模量和强度越高,但失效应变越小,同时微纤丝角也与植物纤维的非线性应力-应变行为相关,微纤丝角越大,非线性力学行为越明显^[13-15]。实际上,由于S2层次生壁最厚且微纤丝偏转角最小,其对植物纤维拉伸性能的影响最大,因此可以通过把S2层次生壁的微纤丝角作为一个参数来对植物纤维进行分类:韧皮纤维,如亚麻、大麻和黄麻具有小微纤丝角($<10^\circ$);叶类纤维,如剑麻、菠萝和香蕉等,具有中微纤丝角($10^\circ \sim 25^\circ$);种子纤维,如椰壳、棉花和棕榈,则具有高微纤丝角($>25^\circ$)^[16-17]。然而,当前无法控制S2层次生壁微纤丝角,但该角度可以作为一个特征参数,在选取不同植物纤维来制备植物纤维复合材料时可以作为参考^[18]。

1.2 纤维纱线的加捻角——捻转角

相比人工纤维,由于天然生长和制备工艺的原

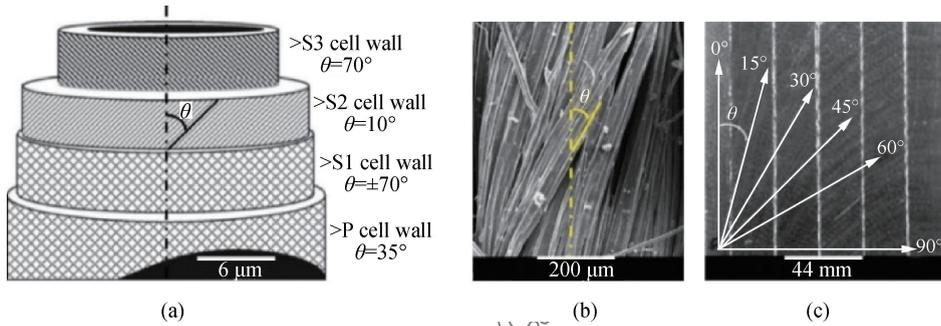


图 1 植物纤维及其复合材料不同层次下的角度

Fig. 1 Different scale angles for plant fibers and their composites

(a) Cell wall model of single flax fiber showing microfibril's off-axis angle; (b) Helical fibers showing twist angle in the twisted short flax fiber yarn; (c) Different tensile off-axis angles for composites' tension^[2]

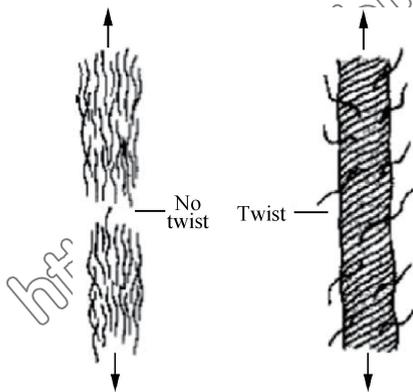


图 2 植物纤维束加捻^[1]

Fig. 2 Twist of plant fiber bundles^[1]

因, 植物纤维通常较短, 在使用时需要纺成连续纤维纱线, 以方便工业生产的需要, 而这一工艺过程就是通过加捻来实现的(如图 1(b)和图 2 所示)。需要提及的是: (1)通过改变捻度, 可以优化纱线的强度; (2)在达到最优捻度之前, 增大捻度, 可以提高纱线力学性能, 但却削弱了其增强复合材料的力学性能^[1]。

实际上, 加捻纤维束在承受纵向拉伸载荷时, 可以近似地看作是复合材料单向板的偏轴拉伸, 其展开的近似图形如图 3 所示。

1.3 复合材料的偏轴拉伸角

图 1(c)为复合材料偏轴拉伸的示意图。拉伸载荷方向与纤维主方向间形成一定的夹角, 该夹角即为偏轴拉伸角。

此前, 许多学者已经研究了复合材料在纵向和横向上的拉伸性能^[20-21], 但实际上, 复合材料的偏轴拉伸是更为常见的载荷形式, 也有不少学者对此展开了研究, 基本都聚焦于模型的构建, 也有单纯展开实验研究的, 他们发现拉伸模量和强度随着偏

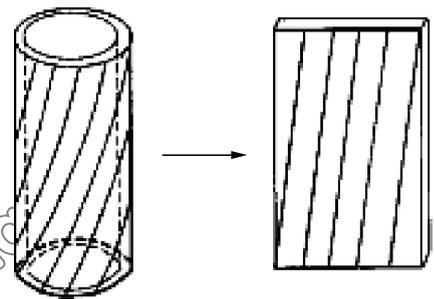


图 3 纤维束加捻近似于单向板的偏轴拉伸^[19]

Fig. 3 Similarity between fiber bundle twist and off-axis tension of unidirectional composite laminate^[19]

轴角度的增加而迅速下降^[22-24]

2 纤维增强树脂基复合材料多层次角度融合的偏轴拉伸非线性模型

影响植物纤维增强树脂基复合材料单向偏轴拉伸强度及其他力学性能的还有其他因素, 如纤维长径比、纤维分布和长宽度的离散度等, 本文的建模专注于角度的融合, 忽略这些因素的影响, 即认为是定值。

考虑到植物纤维区别于传统纤维在结构上的特殊性, 为取得更好的建模效果, 本文采用细观力学与宏观弹塑性理论相结合的方法进行建模。

基于前面所述的 3 种层次角度, 分别选取并定义为微纤丝角 α 、表面捻转角 β 和偏轴拉伸角 γ , 3 种角度在不同层次上、不同程度地对复合材料偏轴拉伸非线性力学行为造成影响, 为此, 本文构建多自变量的应力-应变关系函数:

$$\sigma = f(\alpha, \beta, \gamma, \epsilon) \quad (1)$$

对于微纤丝角的测量, 为得到具有统计学意义上的平均值, 要测量大量的单根纤维, 目前较高效的射线衍射法也仅能反映几百个细胞的平均微纤丝

角,另外,微纤丝角也具有一定的随机性,因此当确定植物纤维种类时,其微纤丝角相对于表面捻转角和偏轴拉伸角对其复合材料偏轴拉伸力学性能的影响较小,在本文所构建的模型中可以忽略不计,即可以假设偏轴拉伸时在微观尺度下的植物纤维微纤丝角不再变化,微纤丝角 α 就为定值,为常数;当确定偏轴拉伸角度 γ 时, γ 即为定值,为常数,式(1)就可以简化为

$$\sigma = f(\beta, \epsilon) \quad (2)$$

式(2)即表征应力、应变与表面捻转角三者之间的关系。此时,当偏轴拉伸角度为 0° 时,即无偏轴角度,为纵向拉伸。当偏轴角度不为 0 时,(1)在忽略微纤丝角 α 变化的情况下,可以简化为 $\sigma = f(\beta, \gamma, \epsilon)$,此时存在 3 个自变量 β 、 γ 和 ϵ 。为此,如何融合这些自变量并可解析成为建模的关键。

Lagzdins 等^[25]在 1998 年提出了利用一系列可逆的线性张量函数来表述应力、应变和偏轴角的关系,如正切函数、反正切函数、正弦双曲函数和反正弦双曲函数等,并采用玻璃纤维/环氧树脂复合材料展开实验,验证得到一个半经验公式。该经验公式考虑到各向异性材料应力的多向性及偏轴拉伸的坐标变换,为简化模型,采用了张量的表述形式:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{s}\boldsymbol{\sigma}P(p)/p \quad (3)$$

其中: $\boldsymbol{\sigma}$ 、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 和 \boldsymbol{s} 分别为应力、应变和柔度张量, p 为应力张量的非负标量函数, $P(p)$ 为 p 的连续、严格递增的反函数。

$$p = p(\boldsymbol{\sigma}) = (b_{ijkl}\sigma_{ij}\sigma_{kl})^{1/2} \quad (4)$$

其中, b_{ijkl} 为非负正定张量 \boldsymbol{b} 的分量, $i, j, k, l \in (1, 2, 3)$ 且 $b_{ijkl} = b_{jikl} = b_{ijlk} = b_{klij}$ 。

该模型对于研究植物纤维增强树脂基复合材料的非线性力学行为具有一定的借鉴意义和适用性,但在考虑多层次角度融合的情况下,需要做些修正。

根据前人对于植物纤维增强树脂基复合材料偏轴拉伸的实验结果,结合其应力-应变曲线形状类似于正弦双曲图形,本文选取正弦双曲函数形式的标量函数:

$$P(p) = \sinh(p) \quad (5)$$

于是,根据式(3),有

$$\varepsilon_{ij} = s_{ijkl}\sigma_{kl} \sinh(p(\boldsymbol{\sigma}))/p(\boldsymbol{\sigma}) \quad (6)$$

对于单向复合材料的偏轴拉伸,在载荷方向上(偏轴拉伸角 γ) 有

$$\varepsilon_\gamma = s_\gamma\sigma_\gamma \sinh(p(\boldsymbol{\sigma}))/p(\boldsymbol{\sigma}) \quad (7)$$

其中,柔度 s_γ 可以由 Tsai-Hill 理论得到:

$$s_\gamma = \frac{\cos^4\gamma}{E_1} + \frac{\sin^4\gamma}{E_2} + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\lambda_{12}}{E_1}\right)\sin^2\gamma\cos^2\gamma \quad (8)$$

其中: E_1 和 E_2 分别为复合材料在纤维 1 和 2 方向上的杨氏模量; G_{12} 为 1、2 平面内的剪切模量; λ_{12} 为泊松比。其中,为把表面捻转角融合进入模型中,结合复合材料混合定律,定义

$$E_1 = \cos^2 2\beta E_{uty} V_y + E_m V_m \quad (9)$$

其中: E_{uty} 为未加捻纤维纱线的弹性模量;下标 y 、 m 分别表示纱线和基体; V 表示体积分数。显然,表面捻转角对力学性能的影响体现在纵向拉伸模量的计算上。

由于偏轴拉伸时存在剪切应力,故定义

$$p(\boldsymbol{\sigma}) = \sigma_\gamma \sqrt{b_{1111}\cos^4\gamma + b_{2222}\sin^4\gamma + 4b_{1212}\sin^2\gamma\cos^2\gamma} \quad (10)$$

3 实验验证

本文所建立的模型拟采用亚麻纤维增强树脂基复合材料的偏轴拉伸实验结果进行验证,部分数据来自本课题组,部分数据来自文献资料。

选用亚麻纤维作为增强体的一个主要原因是其次生壁微纤丝角小于 10° ,属于小微纤丝角的韧皮纤维,这样尽可能减少对上述模型的影响。另外,据统计,1999~2005 年间,亚麻纤维增强树脂基复合材料在汽车行业占 65% 左右的市场份额^[26],应用较广泛。

3.1 纵向(0°)拉伸实验

实验采用的增强体为单向亚麻纤维纱线(比利时),线密度为 $1.2 \sim 1.25 \text{ g/cm}^3$,织物面密度为 200 g/m^2 ,加捻亚麻纱线沿 0° 纤维方向并列排放,在 90° 方向用几根亚麻纱线编织到一起。基体为环氧树脂(环氧 618,质量比为环氧:固化剂:促进剂 = $100 : 80 : 1$)。实验采用热压工艺,流程为: 90°C 预热 30 min,加压 1 MPa,升温至 125°C 固化 2 h,自然冷却后脱模。拉伸试样为长条状,标距为 50 mm,尺寸为 $250 \text{ mm} \times 15 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。单向植物纤维增强环氧基复合材料的纵向拉伸实验根据标准 ASTM D3039/D3039M-08 进行^[27],加载速率为 1.0 mm/min 。

实验得到的典型纵向拉伸应力-应变曲线如图 4 所示。可以看出,在初始拉伸阶段,出现典型的由于加捻所致的非线性力学行为,但此非线性应变

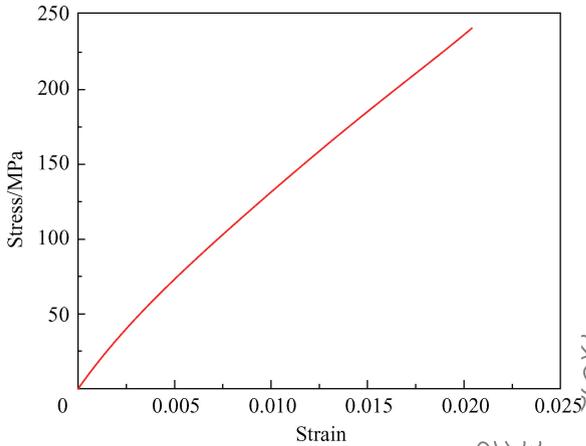


图4 典型亚麻纤维增强环氧树脂基复合材料纵向拉伸应力-应变曲线

Fig. 4 Typical longitudinal tensile stress-strain curves of flax fiber reinforced epoxy composites

量更小, 之后随着表面捻转角恒定, 曲线变为直线, 表现为线性应力-应变关系。

本处的 θ 拉伸实验, 主要是为了验证亚麻纤维增强环氧树脂复合材料也存在加捻导致的非线性问题, 进一步表明在研究偏轴拉伸时考虑纤维加捻影响的重要性。

3.2 文献数据

Shah 等^[2]制作了单向亚麻纤维织物增强聚酯基复合材料, 含有 4 层单向纤维织物, 亚麻纤维束 (250 tex) 用聚酯丝缝合形成低捻度 (用 T 表示, $T = 50$, T 为捻的数量, 等于 $1/L$, L 为每个捻的纱线长度) 的 S 捻 (单纱中的纤维或股线中的单纱在加捻后, 捻回的方向由下而上, 自右至左的称 S 捻) 纱线, 线密度 1.529 g/cm^3 , 纱线纤维体积分数 $V_y = 26.9\%$, 平均捻转角^[28] $\theta_{\text{mean}} = 3.3^\circ$ ($\theta_{\text{mean}} = \theta + \theta/\tan^2\theta - 1/\tan\theta$, 此文献中的 θ 即为前文所述表面捻转角 β), 基体采用邻苯型不饱和聚酯, 基体模量 $E_m = 3.7 \text{ GPa}$ 。他们进行了 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 和 90° 的偏轴拉伸试验, 其中在 0° 拉伸时, 得到 $E_1 = 15.3 \text{ GPa}$ (捻转角不变化时)、 $E_2 = 3.8 \text{ GPa}$ 、 $G_{12} =$

$$p(\sigma) = \sigma_\gamma \sqrt{1.9 \times 10^2 \cos^4 \gamma + 1.25 \times 10^4 \sin^4 \gamma + 8.8 \times 10^3 \sin^2 \gamma \cos^2 \gamma} \quad (16)$$

式中, σ_γ 为偏轴角度为 γ 时的应力值。注意, 此时表面捻转角 β 的影响主要体现在纵向拉伸模量 E_1 的计算上, 进而影响模型当中 b_{1111} 等参数的取值, 从而表面捻转角得以融入到模型当中, 在表面捻转角不再变化时 β 恒定, 但之前是变量, 而微纤丝角与表面捻转角和偏轴拉伸角相比, 对于复合材料偏

1.51 GPa 、 $\lambda_{12} = 0.31$, 从 0° 拉伸得到的非线性应力-应变曲线可以估算出当应变为 0.005 时, 应力为 60 MPa , 应力-应变曲线由非线性转变为线性^[2] (该应变可以作为其他不同角度的偏轴拉伸非线性向线性转变的转折点), 文中没有直接给出未加捻亚麻纤维纱线的弹性模量 E_{uty} , 由文献^[29]可知亚麻纤维单丝的拉伸模量为 $(43 \pm 16.7) \text{ GPa}$, 由于单丝测得的模量数据误差大, 为计算方便, 经多次试取值, 本文选取 47 GPa 作为未加捻纤维纱线的近似拉伸模量, 即 $E_{\text{uty}} = 47 \text{ GPa}$, 这样根据式(9)计算得到的 E_1 值更接近真实值。

4 结果与讨论

利用上述数据, 根据式(9), 求得 $E_1 = 12.64 \cos^2 2\beta + 2.7$ 。

于是可以计算 ϵ_x 和 ϵ_y , 为计算方便, 选取纵向拉伸模量恒定不变的值, 即 $E_1 = 15.3 \text{ GPa}$ 的特殊情况进行模型检验。

在 0° 拉伸时, 根据式(10)可得

$$p(\sigma) = \sigma_{11} \sqrt{b_{1111}} \quad (11)$$

式(7)简化为

$$\epsilon_{11} = \sinh(\sigma_{11} \sqrt{b_{1111}}) / E_1 \sqrt{b_{1111}} \quad (12)$$

代入 0° 拉伸的弹性模量 $E_1 = 15.3 \text{ GPa}$ 及此时的应力和应变值, 得到 $b_{1111} = 190 \text{ GPa}^{-2}$ 。

在 90° 拉伸时, 根据式(10)有

$$p(\sigma) = \sigma_{22} \sqrt{b_{2222}} \quad (13)$$

式(7)简化为

$$\epsilon_{22} = \sinh(\sigma_{22} \sqrt{b_{2222}}) / E_2 \sqrt{b_{2222}} \quad (14)$$

代入 90° 拉伸时的弹性模量 $E_2 = 3.8 \text{ GPa}$ 及此时的应力和应变值, 得到 $b_{2222} = 12\,500 \text{ GPa}^{-2}$ 。

当 15° 拉伸时, 根据式(10)有

$$p(\sigma) = \sigma_{15^\circ} \sqrt{2.2 \times 10^{-4} + 0.25 b_{1212}} \quad (15)$$

代入 15° 拉伸时的柔度 (依据式(8)计算得到) 及此时的应力和应变值, 得到 $b_{1212} = 2\,200 \text{ GPa}^{-2}$, 继而得到

轴拉伸性能的影响较小, 在本章的融合模型中仅提出概念, 实际计算时忽略它的影响。

根据以上分析, 结合实验数据, 利用 MATLAB 绘制模型模拟曲线, 单向亚麻纤维织物增强聚酯基复合材料偏轴拉伸模型模拟结果与实验对比如图 5 所示。可知, 仿真结果与实验结果吻合较

好,总的表现是模型值比实验值偏大,存在偏差,计算曲线形状与实验曲线相似,随着偏轴角度增大,计算曲线与实验曲线更加接近,另外,随着偏轴拉伸角度增大,曲线呈现下降的趋势,即复合材料弹性模量不断减小,这是由于偏轴角度越大,纤维的承载效率越低,拉伸初始不一定产生损伤破

坏,但随着偏轴拉伸载荷的增加,存在垂直于轴向拉伸载荷的基体微裂纹,非弹性应变演化加速,纤维的转动增大,纤维与基体逐步脱粘,基体出现明显裂纹等。随着偏轴角的增大,纤维纱线加捻的影响逐渐降低,可以不再重点考虑,而主要考虑偏轴角的影响。

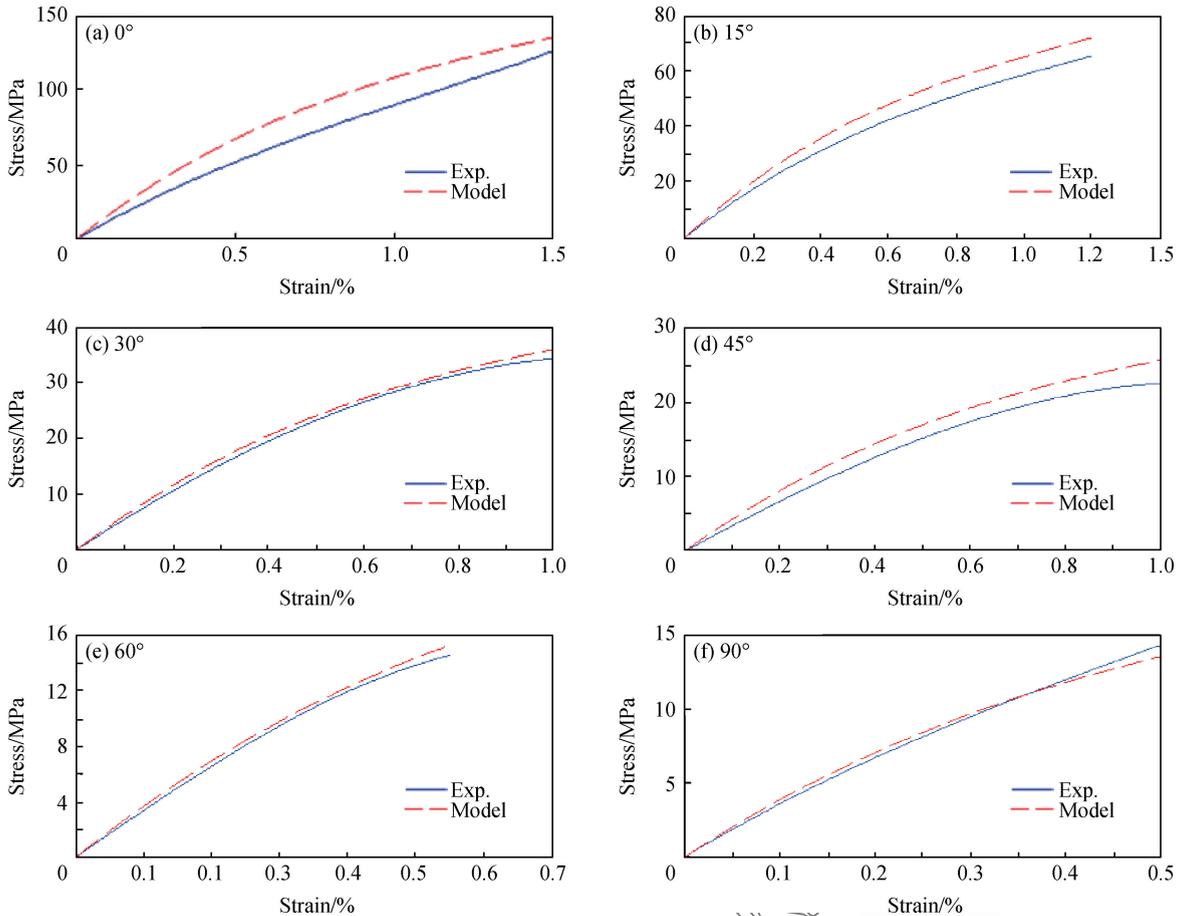


图5 单向亚麻纤维织物增强聚酯基复合材料偏轴拉伸模型模拟结果与实验对比

Fig. 5 Comparison between experimental data and model data for off-axis tension of unidirectional flax fabric reinforced polyester composites

另外,需要注意的是在利用模型进行计算时,应注意各模量与应力的单位转换。

本文构建了基于正弦双曲函数的唯象本构模型,实际上,通过观察三角函数的图形,也可以选取反正弦双曲函数、正切函数和反正切函数等来作为建模的主体。对于 0° 拉伸,若考虑加捻的影响,即将表面捻转角作为一个变量考虑到本构方程中,则得到的是应力、应变和表面捻转角三者的本构关系。

5 结论

(1) 提出并建立了针对加捻植物纤维增强树脂基复合材料的多层次角度融合模型,给出了融合3

种角度的复杂模型,实际计算时要适当约简,并注意各物理量单位的换算。

(2) 在偏轴拉伸中,偏轴角对复合材料偏轴拉伸力学性能的影响比表面捻转角和微纤丝角的大,起主导作用,偏轴角越大,模型结果与实验结果吻合越好。

(3) 从模型结果可以看出,随着偏轴拉伸角度增大,曲线呈现下降的趋势,即复合材料弹性模量不断减小。

参考文献:

[1] MADSEN B, HOFFMEYER P, LILHOLT H. Hemp yarn reinforced composites—II: Tensile properties[J]. Composites

- Part A: Applied Science & Manufacturing, 2007, 38(10): 2204-2215.
- [2] SHAH D U, SCHUBEL P J, CLIFFORD M J, et al. The tensile behavior of off-axis loaded plant fiber composites; An insight on the nonlinear stress-strain response[J]. Polymer Composites, 2012, 33(9): 1494-1504.
- [3] SHAH D U, SCHUBEL P J, CLIFFORD M J, et al. Mechanical characterization of vacuum infused thermoset matrix composites reinforced with aligned hydroxyethylcellulose sized plant bast fiber yarns[C]//4th International Conference on Sustainable Materials. Polymers and Composites, 2011.
- [4] SHAH D U, SCHUBEL P J, CLIFFORD M J. Modelling the effect of yarn twist on the tensile strength of unidirectional plant fiber yarn composites [J]. Journal of Composite Materials, 2013, 47(4): 425-436.
- [5] SHAH D U, SCHUBEL P J, CLIFFORD M J, et al. Hydroxy ethylcellulose surface treatment of natural fibers; The new 'twist' in yarn preparation and optimization for composites applicability [J]. Journal of Material Science, 2012, 47(6): 2700-2744.
- [6] SHAH D U, SCHUBEL P J, CLIFFORD M J. Determining the minimum, critical and maximum fiber content for twisted yarn reinforced plant fiber composites[J]. Composites Science & Technology, 2012, 72(15): 1909-1917.
- [7] GONTHANOS S, PEIJS T. The optimisation of flax fibre yarns for the development of high-performance natural fibre composites[J]. Advanced Composite Letters, 2003, 12(6): 237-241.
- [8] 王春敏. 纤维束本构方程的研究[J]. 纺织学报, 2006, 27(3): 1-3.
WANG Chunming. Study on the constitutive equation of fiber bundle[J]. Journal of Textile Research, 2006, 27(3): 1-3 (in Chinese).
- [9] PLACET V, TRIVAUDEY F, CISSE O, et al. Diameter dependence of the apparent tensile modulus of hemp fibres; A morphological, structural or ultrastructural effect[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2012, 43(2): 275-287.
- [10] BERGANDER A, SALMEN L. Cell wall properties and their effects on the mechanical properties of fibers[J]. Journal of Material Science, 2002, 37(1): 151-156.
- [11] BALEY C. Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2002, 33(7): 939-948.
- [12] BLEZDZI A K, GASSAN J. Composites reinforced with cellulose based fibres[J]. Progress in Polymer Science, 1999, 24(2): 221-274.
- [13] MCLAUGHLIN E C, TAIT R A. Fracture mechanism of plant fibres[J]. Journal of Material Science, 1980, 15(1): 89-95.
- [14] REITERER A, LICHTENEGGER H, TSCHEGG S, et al. Experimental evidence for a mechanical function of the cellulose microfibril angle in wood cell walls[J]. Philosophical Magazine A, 1999, 79(9): 2173-2184.
- [15] BURGERT I, FRATZL P. Plants control the properties and actuation of their organs through the orientation of cellulose fibrils in their cell walls[J]. Integrative & Comparative Biology, 2009, 49(1): 69-79.
- [16] PICKERING K L. Properties and performance of natural-fibre composites[M]. Boca Raton: CRC Press LLC, 2008.
- [17] LEWIN M. Handbook of fiber chemistry[M]. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press LLC, 2007.
- [18] BARNETT J R, BONHAM V A. Cellulose microfibril angle in the cell wall of wood fibres[J]. Biological Reviews, 2004, 79(2): 461-472.
- [19] MA Hao, LI Yan, WANG Di. Investigations of fiber twist on the mechanical properties of sisal fiber yarns and their composites[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2014, 33(7): 687-696.
- [20] BALEY C, PERROT Y, BUSNEL F, et al. Transverse tensile behaviour of unidirectional plies reinforced with flax fibres [J]. Materials Letters, 2006, 60(24): 2984-2987.
- [21] WEYENBERG I V, CHITRUONG T, et al. Improving the properties of UD flax fibre reinforced composites by applying an alkaline fibre treatment[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2006, 37(9): 1368-1376.
- [22] KUMAR P. Role of 2'-mercaptopropionylglycine (MPG) against toxicity of cyclophosphamide in normal and tumour-bearing mice [J]. Indian Journal of Experimental Biology, 1986, 24(12): 767-770.
- [23] NTENGA R, BE'AKOU A, et al. Estimation of the elastic anisotropy of sisal fibres by an inverse method[J]. Journal of Materials Science, 2008, 43(18): 6206-6213.
- [24] CICHOCKI F R, THOMASON J L. Thermoelastic anisotropy of a natural fiber[J]. Composites Science & Technology, 2002, 62(5): 669-678.
- [25] LAGZDINS A, TETERS G, ZILAUCS A. Nonlinear deformation of composites with consideration of the effect of couple-stresses [J]. Mechanics of Composite Materials, 1998, 34(5): 403-418.
- [26] SHAHZAD A. Hemp fiber and its composites—A review [J]. Journal of Composite Materials, 2012, 46(8): 973-986.
- [27] ASTM. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials: ASTM D3039/D3039M-08 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2017.
- [28] MADSEN B, HOFFMEYER P, THOMSEN A B, et al. Hemp yarn reinforced composites-I. Yarn characteristics[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2007, 38(10): 2194-2203.
- [29] SHAH D U, NAG R K, CLIFFORD M J. Why do we observe significant differences between measured and 'back-calculated' properties of natural fibres[J]. Cellulose, 2016, 23(3): 1481-1490.