

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.01.003

涤纶增强橡胶基复合材料各向异性超弹性本构研究

毛金威¹, 王新峰¹, 宋豪鹏¹, 于健²

(1. 南京航空航天大学航空学院, 南京 210016; 2. 南京航空航天大学通用航空与飞行学院, 南京 211106)

摘要: 基于一种适用于平纹涤纶增强橡胶复合材料的各向异性超弹性本构模型, 将应变能分解为橡胶基体应变能、织物纤维拉伸应变能与织物增强橡胶剪切应变能 3 部分, 并根据单轴拉伸试验数据确定了本构模型参数。编写了有限元材料子程序进行仿真分析, 并与试验数据对比验证了本构模型的合理性。该模型从宏观出发, 能更好地表征复合材料编织物在拉伸过程中由于大变形所引起的非线性各向异性力学行为, 具有结果准确、简单实用等优点, 为织物增强橡胶复合材料的设计应用提供了理论依据。

关键词: 复合材料; 橡胶; 织物增强复合材料; 各向异性本构模型; 超弹性; 有限元法

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2023)01-0028-07

Study on Anisotropic Hyperelastic Constitutive Model of Polyester Reinforced Rubber Composites

MAO Jinwei¹, WANG Xinfeng¹, SONG Haopeng¹, YU Jian²

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. College of General Aviation and Flight, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Based on the anisotropic hyperelastic constitutive model of plain polyester reinforced rubber composites, the strain energy is decomposed into three parts: rubber matrix strain energy, fabric fiber tensile strain energy and fabric reinforced rubber shear strain energy, and parameters of the constitutive model are determined by uniaxial tensile tests. The algorithm of ABAQUS UANISOHYPER_INV is introduced to analyze the hyperelastic behaviors, and verified by comparison with experimental data. The nonlinear anisotropic behavior of the fabric can be better characterized by the proposed macroscopic model, which is caused by the large deformation during the tensile process. We can use the anisotropic hyperelastic constitutive model to obtain an accurate prediction result simply and practically. The proposed model also provides a theoretical basis for the design of fabric reinforced rubber composites.

Key words: composite material; rubber; fabric reinforced composites; anisotropy constitutive model; hyperelasticity; finite element method (FEM)

纤维增强橡胶基复合材料由于其高弹性、耐腐蚀等优点被广泛应用于交通运输、密封减震、国防军工等方面。近年来, 在航空航天领域, 织物增强橡胶基复合材料作为飞机自适应鼓包进气道蒙皮

的优选材料之一, 受到了广泛的关注。由于鼓包进气道所受气动载荷较为复杂, 并且其蒙皮在自适应调节的过程中会出现较大应变, 而与之相关的理论研究及试验数据较为稀缺, 因此, 研究织物增强橡

收稿日期: 2022-02-10; 修订日期: 2022-03-15

通信作者: 王新峰, 男, 博士, 副教授, E-mail: xinfengw@nuaa.edu.cn。

引用格式: 毛金威, 王新峰, 宋豪鹏, 等. 涤纶增强橡胶基复合材料各向异性超弹性本构研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(1): 28-34. MAO Jinwei, WANG Xinfeng, SONG Haopeng, et al. Study on anisotropic hyperelastic constitutive model of polyester reinforced rubber composites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(1): 28-34.

胶基复合材料的力学性能,并建立其各向异性超弹性本构关系具有重要意义,可为自适应鼓包进气道的蒙皮设计提供依据。

现有的对织物增强橡胶复合材料的研究,主要集中于橡胶材料的成型工艺及基本力学性能。刘永兴等^[1]研究了不同纤维表面改性方法对织物增强三元乙丙橡胶绝热材料力学性能的影响;王文东等^[2]研究了芳纶织物增强三元乙丙/丁基橡胶复合材料的拉伸、撕裂、剥离与粘接性能;周红涛等^[3-5]研究了平面三向织物增强橡胶复合材料的拉伸、撕裂与顶破性能。对于织物增强复合材料刚度特性方面的研究,高冀峰等^[6]提出了一种多尺度结合的方法推导其刚度矩阵;沈亚军等^[7-8]利用代表性体积单元建立了有限元模型,对织物增强橡胶复合材料进行了数值仿真研究。在上述工作所建立的本构模型中,织物与纤维分别被赋予各自的材料参数,将两者视为理想结合。此类模型的准确性较大程度上依赖于组分材料的力学参数,且在大应变时预测结果会出现较大偏差。此外,对于纯编织物,彭雄奇等^[9]建立了各向异性超弹性模型;胡虹玲等^[10]建立了考虑拉剪耦合的超弹性模型;黄小双等^[11]建立了考虑双拉耦合的超弹性模型;张必超等^[12]建立了非正交本构模型,模型效果较好。对于帘线增强橡胶复合材料,彭雄奇等^[13-15]研究了其中帘线、橡胶各相互作用项超弹性本构,并基于超弹性本构建立了纤维增强橡胶结构力学特性的预测方法,预测值与试验值吻合度较高。

本文从纤维增强复合材料的超弹性本构模型出发,发展了一种适用于平纹涤纶织物增强橡胶复合材料的各向异性超弹性本构关系。利用材料的试验数据确定了模型的各个参数,从而避免了对其中组分材料的分别建模,将模型的预测值与已有的试验数据和数值模拟进行对比分析,结果表明该模型简单实用、方便易行,在较大应变下适用性好。

1 各向异性超弹性模型

1.1 超弹性模型的一般形式

基于连续介质力学理论及 Spencer^[16]的不变量理论,平纹织物增强橡胶基复合材料的应变能函数可被表示为,与右 Cauchy-Green 变形张量 C 和织物初始经、纬方向 a_0 、 b_0 相关的不变量的函数,其具体形式如下

$$W(C, a_0, b_0) = W(I_i) \quad 1 \leq i \leq 7 \quad (1)$$

右 Cauchy-Green 变形张量不变量表示为

$$\begin{cases} I_1 = \text{tr}(C) \\ I_2 = \frac{1}{2}[(\text{tr}C)^2 - \text{tr}(C^2)] \\ I_3 = \det(C) \\ I_4 = A_0: C = a_0 \cdot C \cdot a_0 = \lambda_a^2 \\ I_5 = A_0: C^2 = a_0 \cdot C^2 \cdot a_0 \\ I_6 = B_0: C = b_0 \cdot C \cdot b_0 = \lambda_b^2 \\ I_7 = B_0: C^2 = b_0 \cdot C^2 \cdot b_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $A_0 = a_0 \otimes a_0$; $B_0 = b_0 \otimes b_0$; λ_a 、 λ_b 分别为沿织物两个方向的拉伸比。

采用超弹性本构方程,第二类 Piola-Kirchhoff 应力张量可表示如下

$$S = 2 \frac{\partial W}{\partial C} = \sum_{i=1}^7 \frac{\partial W}{\partial I_i} \frac{\partial I_i}{\partial C} \quad (3)$$

1.2 织物增强橡胶材料的应变能解耦

基于连续介质力学和复合材料力学基本假设,平纹织物增强橡胶基复合材料的刚度模型可以被视为是应变耦合问题。在发生变形时,其应变能 W 可以分解为橡胶基体应变能 W_M 、织物纤维拉伸应变能 W_F 和织物增强橡胶的剪切应变能 W_{shear} 3 部分

$$W = W_M + W_F + W_{\text{shear}} \quad (4)$$

首先,将平纹织物增强橡胶基复合材料的橡胶基体视为不可压缩材料,则其应变能 W_M 可运用 Mooney-Rivlin 模型来表示

$$W_M = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (5)$$

式中 C_{10} 、 C_{01} 为橡胶材料参数,单位为 MPa。

织物纤维拉伸应变能 W_F 可分为径向纤维拉伸应变能 W_{FA} 与纬向纤维拉伸应变能 W_{FB} 两部分。考虑到平纹织物的正交对称性,且纤维的压缩刚度在本模型中可以忽略不计,以织物中的径向纤维为例,可运用多项式函数来表示其径向纤维拉伸应变能 W_{FA} ^[11]

$$W_{FA} = \begin{cases} k_1(I_4 - 1)^2 + k_2(I_4 - 1)^3 + k_3(I_4 - 1)^4 & I_4 > 1 \\ 0 & I_4 \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中 k_1 、 k_2 、 k_3 为纤维材料参数,单位为 MPa。

同理,可得织物中纬向纤维拉伸应变能 W_{FB} 为

$$W_{FB} = \begin{cases} k_1(I_6 - 1)^2 + k_2(I_6 - 1)^3 + k_3(I_6 - 1)^4 & I_6 > 1 \\ 0 & I_6 \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

对于织物增强橡胶材料,剪切应变能 W_{shear} 可分为径向剪切应变能 W_{shearA} 与纬向剪切应变能

W_{shearB} 两部分之和,其剪切应变能可表示为纤维与橡胶夹角 φ 大小变化及纤维拉伸有关的函数,以沿纤维径向为例,材料的剪切应变能 W_{shearA} ^[13]可表示为

$$W_{\text{shearA}} = W(I_4, I_5) = f(I_4)(a\chi^2 + b\chi) \quad (8)$$

式中: $\chi = \tan^2 \varphi = \frac{(I_5 - I_1 I_4 + I_2) I_4}{I_3} - 1$ ^[17]; a, b 为

材料参数,单位为MPa。而考虑到剪切应变能与纤维拉伸长度正相关,影响因子 $f(I_4)$ 可表示为

$$f(I_4) = e^{c(I_4 - 1)} \quad (9)$$

式中 c 为量纲化为一的材料参数。

同理,沿纤维纬向,纤维增强橡胶材料的剪切应变能为

$$W_{\text{shearB}} = W(I_6, I_7) = f(I_6)(a\chi'^2 + b\chi') \quad (10)$$

式中: $\chi' = \frac{(I_7 - I_1 I_6 + I_2) I_6}{I_3} - 1$ ^[17]; $f(I_6) = e^{c(I_6 - 1)}$ 。

1.3 平纹织物增强橡胶各向异性超弹性模型

对于织物增强橡胶复合材料,通过上述工作可分别确定其橡胶基体和织物的拉伸应变能,以及织物增强橡胶材料的剪切应变能。将式(5~10)代入式(4),即可得到织物增强复合材料的应变能

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + k_1(I_4 - 1)^2 + k_2(I_4 - 1)^3 + k_3(I_4 - 1)^4 + k_1(I_6 - 1)^2 + k_2(I_6 - 1)^3 + k_3(I_6 - 1)^4 + e^{c(I_4 - 1)}(a\chi^2 + b\chi) + e^{c(I_6 - 1)}(a\chi'^2 + b\chi') \quad (11)$$

各不变量对右Cauchy-Green变形张量 C 求偏导结果如下

$$\begin{cases} \frac{\partial I_1}{\partial C} = \frac{\partial \text{tr} C}{\partial C} = I \\ \frac{\partial I_2}{\partial C} = I_1 I - C \\ \frac{\partial I_4}{\partial C} = a_0 \otimes a_0 \\ \frac{\partial I_5}{\partial C} = a_0 \otimes C \cdot a_0 + a_0 \cdot C \otimes a_0 \\ \frac{\partial I_6}{\partial C} = b_0 \otimes b_0 \\ \frac{\partial I_7}{\partial C} = b_0 \otimes C \cdot b_0 + b_0 \cdot C \otimes b_0 \end{cases} \quad (12)$$

将式(11)和(12)代入式(3),可得

$$S = 2(W_1 I + W_2(I_1 I - C) + W_4(a_0 \otimes a_0) + W_5(a_0 \otimes C \cdot a_0 + a_0 \cdot C \otimes a_0) + W_6(b_0 \otimes b_0) + W_7(b_0 \otimes C \cdot b_0 + b_0 \cdot C \otimes b_0)) \quad (13)$$

式中 $W_i = \partial W / \partial I_i$,表示应变能函数对第 i 个不变量的偏导数,可由式(11)计算得到。Cauchy应力张量可表示为

$$\begin{aligned} \sigma = J^{-1} F S F^T = & 2(W_1 B + W_2(I_1 B - B^2) + \\ & I_4 W_4(a_0 \otimes a_0) + I_4 W_5(a_0 \otimes B \cdot a_0 + a_0 \cdot B \otimes a_0) + \\ & I_6 W_6(b_0 \otimes b_0) + I_6 W_7(b_0 \otimes B \cdot b_0 + b_0 \cdot B \otimes b_0)) \end{aligned} \quad (14)$$

关于模型中的参数,可依据所设计的单轴拉伸试验结果来确定。其中,可通过纯橡胶单轴拉伸试验数据得到橡胶材料的超弹性常数 C_{10} 和 C_{01} 的值;织物材料参数 k_1, k_2 和 k_3 的值可通过拟合织物增强橡胶复合材料的径向单轴拉伸试验数据得到;通过拟合织物增强橡胶复合材料沿 45° 方向单轴拉伸数据,可以得到式(11)中 a, b 和 c 的值。

2 单轴试验

2.1 试验件及试验装置

试验件基于测试标准GB/T 528—2009(硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定)进行设计,制作纯橡胶和涤纶织物增强橡胶(织物与轴向夹角分别为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$)共5种各5个哑铃状单轴拉伸试验件,如图1所示。单轴拉伸试验在南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室开展,采用电子万能试验机对试验件进行加载,如图2所示。由于试验过程中试验件整体变形较大,传统应变测量系统无法有效采集试验件应变数据,因此采用了非接触式引伸计进行测量,如图3所示。



图1 拉伸试验件图

Fig.1 Tensile test specimens



2 电子万能试验机

Fig.2 Electronic universal testing machine



图3 应变测量系统

Fig.3 Strain measuring system

2.2 试验数据及分析

单轴试验过程中,由于载荷测量系统与应变测量系统相对独立,试验最终可获得时间-载荷与时间-应变数据。利用试验历程记录对齐两组数据的时间零点后,对固定时间点采用线性插值得到与对应的应力-应变关系。单轴拉伸试验结果如图4所示,图中图例R表示橡胶,FR表示织物增强橡胶材料,数字表示径向纤维与拉伸方向角度。从图中可以看出,在应变 $<5\%$ 范围内,涤纶织物增强橡

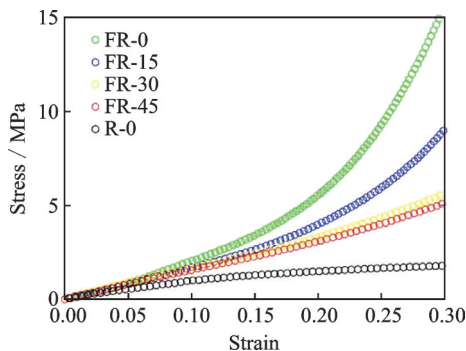


图4 单轴拉伸试验结果图

Fig.4 Results of uniaxial tensile test

$$\begin{cases} \sigma_1 = 2(W_1\lambda_1^2 + W_2(I_1\lambda_1^2 - \lambda_1^4)) + (W_4 + 2W_5\lambda_1^2)\lambda_1^2 \cos^2\alpha + (W_6 + 2W_7\lambda_1^2)\lambda_1^2 \sin^2\alpha \\ \sigma_2 = 2(W_1\lambda_2^2 + W_2(I_1\lambda_2^2 - \lambda_2^4)) + (W_4 + 2W_5\lambda_2^2)\lambda_2^2 \sin^2\alpha + (W_6 + 2W_7\lambda_2^2)\lambda_2^2 \cos^2\alpha \\ \sigma_3 = 2(W_1\lambda_3^2 + W_2(I_1\lambda_3^2 - \lambda_3^4)) \end{cases} \quad (17)$$

式中 $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$,在实际使用中,可将Cauchy应力转换为工程应力便于计算。

3.1 橡胶基体参数拟合

基于纯橡胶拉伸试验数据,经拟合可得橡胶本构模型的参数如下

$$C_{10} = -1.21 \text{ MPa}, C_{01} = 3.25 \text{ MPa} \quad (18)$$

图6给出了模型预测的应力-应变曲线与试验数据的对比结果。从图中可以看出,预测值在 10% 应变内与试验值吻合较好,在 $10\% \sim 35\%$ 应变时,与试验值趋势一致,且相差极小。当应变大于 35% 时,预测值低于试验值,并且差距有扩大趋势,但在

胶复合材料的刚度相较于纯橡胶来说差别较小,在应变超过 10% 之后,织物增强橡胶材料的刚度明显增大。同时,拉伸方向与织物纤维方向夹角越小,材料刚度越大,当沿织物纤维方向拉伸时,刚度达到最大。在超过 15% 应变后,材料刚度呈现出了明显的上升趋势。这是由于涤纶纤维在小应变、较小伸长率时,较易被拉伸,而随着应变不断增大,其刚度逐渐增强。

3 参数拟合及验证

图5给出了纤维增强复合材料单轴拉伸时的卸载状态。设沿织物经、纬向与载荷方向的夹角分别为

$$\mathbf{a}_0 = (\cos \alpha, \sin \alpha, 0), \mathbf{b}_0 = (\sin \alpha, -\cos \alpha, 0) \quad (15)$$

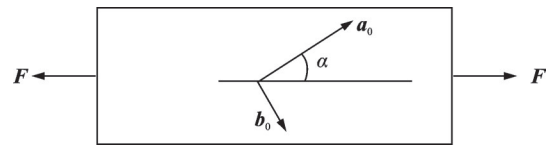


图5 单轴拉伸示意图

Fig.5 Schematic diagram of uniaxial stretching

在单轴拉伸状态下,变形梯度张量 F 与左、右Cauchy-Green变形张量 B 、 C 分别可表示为

$$F = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & \\ & \lambda_2 & \\ & & \lambda_3 \end{bmatrix}, B = FF^T = \begin{bmatrix} \lambda_1^2 & & \\ & \lambda_2^2 & \\ & & \lambda_3^2 \end{bmatrix} = F^T F = C \quad (16)$$

式中 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 分别为3个方向的主伸长率。

由于在单轴拉伸状态下,对不可压缩材料来说, $\chi \approx I_5 - I_4^{2[17]}$, $\chi' \approx I_7 - I_6^2$ 。则Cauchy应力分量可表示为

40%应变内相差不大。

3.2 织物拉伸数据拟合

根据沿涤纶织物增强橡胶复合材料径向拉伸数据拟合织物拉伸参数,其中的橡胶参数已在3.1节中给出。模型参数拟合结果如下

$$k_1 = 1.03 \text{ MPa}, k_2 = -1.20 \text{ MPa}, k_3 = 3.23 \text{ MPa} \quad (19)$$

拟合的应力-应变曲线在 10% 应变内略高于试验值,而在 $10\% \sim 30\%$ 应变内拟合效果很好,几乎与试验值一致,如图7所示。

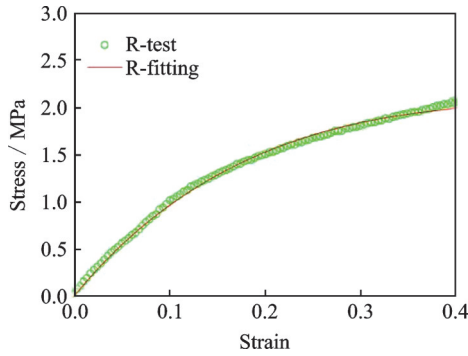


图6 纯橡胶应力-应变曲线

Fig.6 Stress-strain curves of pure rubber

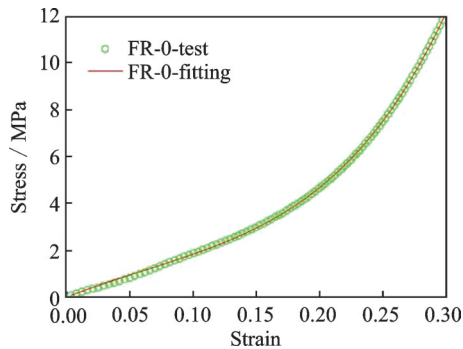


图7 织物材料拉伸应力-应变曲线

Fig.7 Fitting comparison diagram of fabric tensile parameters

3.3 织物增强橡胶剪切参数拟合

利用涤纶织物增强橡胶复合材料45°拉伸试验,可以得到其纵横剪切性能。基于试验数据对织物增强橡胶的各向异性超弹性本构模型进行拟合,模型中橡胶参数及织物参数已在3.1与3.2节中所给出。经拟合,模型的各项参数如下

$$a = 1.02 \text{ MPa}, b = 0.92 \text{ MPa}, c = -0.58 \quad (20)$$

其应力-应变曲线与试验曲线对比如图8所示。可以看出,在15%应变内拟合值略高于试验值,在15%~30%应变吻合较好,总体拟合效果较好。

综上所述,织物增强橡胶的各向异性超弹性模型及参数如式(20)及表1所示。

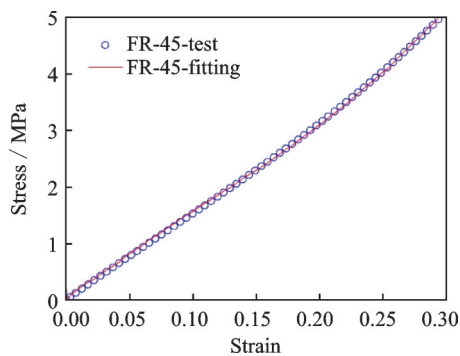


图8 织物增强橡胶剪切应力-应变曲线

Fig.8 Comparison diagram of fabric-rubber shear parameter fitting

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + k_1(I_4 - 1)^2 + k_2(I_4 - 1)^3 + k_3(I_4 - 1)^4 + k_1(I_6 - 1)^2 + k_2(I_6 - 1)^3 + k_3(I_6 - 1)^4 + e^{c(I_4 - 1)}(a(I_5 - I_4^2)^2 + b(I_5 - I_4^2)) + e^{c(I_6 - 1)}(a(I_7 - I_6^2)^2 + b(I_7 - I_6^2)) \quad (21)$$

表1 涤纶织物增强橡胶复合材料各向异性超弹性参数
Table 1 Anisotropic hyperelastic parameters of polyester fabric reinforced rubber composites

$C_{10}/$ MPa	$C_{01}/$ MPa	$k_1/$ MPa	$k_2/$ MPa	$k_3/$ MPa	$a/$ MPa	$b/$ MPa	c
-1.21	3.25	1.03	-1.20	3.23	1.02	0.92	-0.58

3.4 模型验证

图9给出了本文所建立的涤纶织物增强复合材料单轴拉伸试验件的有限元模型。基于ABAQUS UANISOHYPER_INV子程序,将根据试验值确定的各向异性超弹性参数引入所建立的有限元模型中。



图9 有限元模型示意图

Fig.9 Schematic diagram of finite element model

利用所建立的有限元模型对涤纶织物复合材料15°方向偏轴拉伸性能进行了预测,与拉伸试验值的对比结果如图10所示。从图中可以看出,模型预测的应力-应变曲线与试验曲线在20%应变内吻合较好,而在20%应变后,预测值逐渐低于试验值,不过仍在5%以内,从而验证了模型及其参数的准确性。当橡胶复合材料应变较大时,其预测精度远高于基于层合板理论所提出的本构模型。

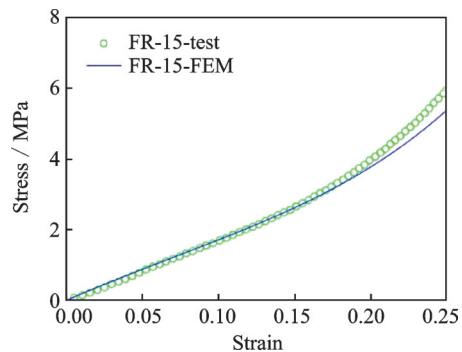


图10 15°方向偏轴拉伸应力-应变曲线

Fig.10 Off axis tensile stress-strain curves at 15°

4 结 论

(1) 基于一种涤纶织物增强橡胶复合材料各向异性超弹性本构模型,将应变能解耦为橡胶基体应变能、织物拉伸应变能和织物-橡胶剪切应变能,并根据单轴试验结果,确定了模型参数。

(2) 通过偏轴拉伸试验进一步对所提出的涤纶织物增强复合材料本构模型进行了验证性分析。模型预测结果与试验值吻合良好,其相对误差在 $\pm 5\%$ 以内,在大应变条件下,其预测精度远高于传统复合材料本构模型。

参考文献:

- [1] 刘永兴,赵元,张维海,等.纤维织物增强三元乙丙橡胶绝热材料的制备及性能[J].宇航材料工艺,2019,49(5):48-52.
LIU Yongxing, ZHAO Yuan, ZHANG Weihai, et al. Fabrication and performances of fabrics reinforced ethylene-propylene-diene monomer insulations[J]. Aerospace Materials and Technology, 2019, 49(5): 48-52.
- [2] 王文东,胡浩,李小慧.芳纶织物增强三元乙丙/丁基橡胶复合材料的力学与粘接性能[J].机械工程材料,2015,39(9):72-75.
WANG Wendong, HU Hao, LI Xiaohui. Mechanical and adhesive properties of EPDM/IIR composite reinforced with aramid fabric[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2015, 39(9): 72-75.
- [3] 周红涛,肖学良,钱坤.平面三向织物增强橡胶复合材料的偏轴拉伸性能研究[J].中国塑料,2019,33(3):38-42,49.
ZHOU Hongtao, XIAO Xueliang, QIAN Kun. Study of off-axial tensile behaviors of triaxial weave fabric reinforced rubber composites[J]. China Plastics, 2019, 33(3): 38-42, 49.
- [4] 周红涛,方镁淇,钱坤,等.平面三向织物及其增强橡胶复合材料的顶破性能研究[J].中国塑料,2019,33(6):76-81.
ZHOU Hongtao, FANG Meiqi, QIAN Kun, et al. Study of bursting properties of triaxial weave fabric reinforced rubber composites[J]. China Plastics, 2019, 33(6): 76-81.
- [5] 周红涛,钱坤,董硕.平面三向织物增强橡胶复合材料撕裂性能研究[J].中国塑料,2021,35(1):54-59.
ZHOU Hongtao, QIAN Kun, DONG Shuo. Study on tear properties of triaxial weave fabric composites[J]. China Plastics, 2021, 35(1): 54-59.
- [6] 高冀峰,陈务军,杨天洋.织物增强复合材料纤维-织物-壳-梁多尺度分析[C]//中国力学大会(CCTAM 2019).杭州:中国力学学会,2019:686-697.
GAO Jifeng, CHEN Wujun, YANG Tianyang. A fiber-fabric-shell-beam multiscale method for the analysis of weave reinforced composites[C]//Proceedings of Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics (CCTAM 2019). Hangzhou: Chinese Society of Mechanics, 2019: 686-697.
- [7] 沈亚军.橡胶基复合材料结构的刚度特性研究[D].南京:南京航空航天大学,2017.
SHEN Yajun. Study on the prediction of stiffness characteristics of rubber matrix composite structure[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [8] 张赋,李旭东.织物增强复合材料弹性常数的有限元法预测[J].机械工程材料,2014,38(4):82-86,95.
ZHANG Fu, LI Xudong. Finite element prediction of elastic constant of fabric reinforced composites[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2014, 38(4): 82-86, 95.
- [9] 彭雄奇,堵同亮,郭早阳.机织复合材料各向异性超弹性本构模型[J].机械工程学报,2012,48(20):48-53.
PENG Xiongqi, DU Tongliang, GUO Zaoyang. Anisotropic hyperelastic constitutive model for woven composite fabrics under large deformation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(20): 48-53.
- [10] 胡虹玲,龚友坤,彭雄奇,等.考虑拉剪耦合的二维编织物各向异性超弹性本构模型[J].复合材料学报,2017,34(6):1388-1393.
HU Hongling, GONG Youkun, PENG Xiongqi, et al. An anisotropic hyperelastic constitutive model considering shear-tension coupling for 2-dimensional woven fabrics[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(6): 1388-1393.
- [11] 黄小双,姚远,彭雄奇,等.考虑双拉耦合的复合材料编织物各向异性超弹性本构模型[J].复合材料学报,2016,33(10):2319-2324.
HUANG Xiaoshuang, YAO Yuan, PENG Xiongqi, et al. Anisotropic hyperelastic constitutive model with biaxial tension coupling for woven fabric composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(10): 2319-2324.
- [12] 张必超,彭雄奇,黄小双.考虑双拉耦合的复合材料编织物非正交本构模型[J].应用数学和力学,2016,37(3):227-234.
ZHANG Bichao, PENG Xiongqi, HUANG Xiaoshuang. Non orthogonal constitutive model of composite braids considering double tension coupling[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2016, 37(3): 227-234.
- [13] 郭国栋,彭雄奇,赵宁.一种考虑剪切作用的各向异性超弹性本构模型[J].力学学报,2013,45(3):451-455.

- GUO Guodong, PENG Xiongqi, ZHAO Ning. An anisotropic hyperelastic constitutive model considering shear action[J]. *Theoretical and Applied Mechanics*, 2013, 45(3): 451-455.
- [14] 黄小双, 彭雄奇, 张必超. 帘线/橡胶复合材料各向异性黏-超弹性本构模型[J]. *力学学报*, 2016, 48(1): 140-145.
- HUANG Xiaoshuang, PENG Xiongqi, ZHANG Bichao. Anisotropic hyperelastic constitutive model with biaxial tension coupling for woven fabric composites [J]. *Theoretical and Applied Mechanics*, 2016, 48(1): 140-145.
- [15] 孙书蕾, 毛建良, 彭雄奇. 考虑纤维弯曲刚度的橡胶-帘线复合材料各向异性超弹性本构模型[J]. *应用数学和力学*, 2014, 35(5): 471-477.
- SUN Shulei, MAO Jianliang, PENG Xiongqi. An anisotropic hyperelastic constitutive model with fibre bending stiffness for cord-rubber composites [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2014, 35(5): 471-477.
- [16] SPENCER A J M. *Continuum theory of the mechanics of fibre-reinforced composites*[M]. New York: Springer-Verlag, 1984.
- [17] PENG X Q, GUO Z Y, MORAN B. An anisotropic hyperelastic constitutive model with fiber-matrix shear interaction for the human annulus fibrosus [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2006, 73(5): 815-824.

(编辑: 胥橙庭)