

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.01.002

纱线间距对复合材料拉伸性能的影响

谢旺¹, 成小乐^{1*}, 孙戡¹, 李阳², 赵瀚辰²

(1. 西安工程大学机电工程学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710048)

摘要:为研究纱线间距对编织复合材料拉伸性能的影响,课题组建立了4组纱线间距的芳纶纤维橡胶基复合材料单胞模型;并通过有限元软件对沿经(纬)纱和纤维束交织2种拉伸方向的单胞模型进行拉伸性能仿真分析。结果表明:随着纱线间距的增加基体和增强相的等效应力逐渐增大,且沿经(纬)纱方向拉伸的等效应力小于纤维束交织方向;通过均质化理论计算出复合材料等效弹性常数,弹性模量随着纱线间距的增加逐渐减小,经(纬)纱方向计算的弹性模量平均高出纤维束交织方向21%。

关键词:编织复合材料;纱线间距;等效弹性模量;均质化理论;单胞模型

中图分类号:TS15;TH145.2 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2023)01-0010-06

Effect of Yarn Spacing on Tensile Property of Composites

XIE Wang¹, CHENG Xiaole^{1*}, SUN Jian¹, LI Yang², ZHAO Hanchen²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to study the effect of yarn spacing on the tensile properties of its macro-structure, a unit-cell model of aramid fiber rubber matrix composites with four sets of yarn spacing was established. Tensile property simulation analysis was performed on unit-cell model interwoven in two tensile directions along warp (weft) yarn and fiber bundle by finite element software. The results show that the equivalent force of the matrix and the reinforcement gradually increases with the increase of the yarn spacing, and the equivalent force of stretching along the warp (weft) yarn direction is smaller than that of the fiber bundle interweaving direction. The equivalent elastic constants of the composites are calculated by homogenization theory, the modulus of elasticity gradually decreases with the increase of yarn spacing, and the modulus of elasticity calculated in the warp (weft) yarn direction is on average 21% higher than that in the fiber bundle interweaving direction.

Keywords: braided composite; yarn spacing; equivalent elastic modulus; homogenization theory; unit-cell model

芳纶橡胶基编织复合材料作为一种新型高性能材料日益受到关注,广泛应用于制造领域。橡胶基编织复合材料与传统材料相比具有很强的可设计性,通过对其各组成相的合理配比能够弥补原有组分的缺点,以此来改善橡胶基材料的耐磨性和抗刺穿能力。该方法是使橡胶基材料强度高且耐久的重要研究方向,其中二维编织则是橡胶基编织复合材料中最为广泛的一种^[1-2]。

针对编织结构对复合材料拉伸性能的影响,国内外学者提出了不同的细观模型。付金毅等^[3]考虑编织结构建立了石英复合材料的单胞模型,研究了编织角对复合材料拉伸性能的影响;当编织角大于50°时拉伸模量及强度随着编织角的增加而减少。马晓红等^[4]将二维编织管平压为双层织物,并与环氧树脂复合,结果表明编织对纤维的损伤较小,最大损伤率为20.77%。编织角对拉伸性能的影响为主要因素,拉伸

收稿日期:2022-10-08;修回日期:2022-11-20

基金项目:华能集团总部科技项目(HNKJ21-H33)。

第一作者简介:谢旺(1998),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要研究方向为有限元仿真。通信作者:成小乐(1976),男,陕西西安人,博士,教授,主要研究方向为金属基复合材料。E-mail:cxlcheng@sohu.com

强度和拉伸模量随着编织角的减小而增大。屈鹏^[5]考虑了纤维束的横截面几何尺寸对应力分布的影响,建立了不同编织角的单胞模型,并分析其力学性能,结果表明对于纤维体积分数相同的单胞模型编织角对复合材料的弹性模量影响很大。BYUN等^[6]采用编织复合材料结构几何模型结合体积平均法对拉伸性能进行预测。TABIEI等^[7]通过考虑纤维束的截面尺寸,建立了编织复合材料单胞模型,并设想建立的单胞模型符合等应力应变规律,通过增量理论构造材料的刚度矩阵,来研究其拉伸性能。在上述文献的研究中,所采用的细观模型大多为考虑纤维束的编织角以及自身的几何尺寸对拉伸性能的影响,个别学者考虑了纤维体积,但尚未全面考虑纱线间距对纤维体积和拉伸性能的影响。

课题组以芳纶增强橡胶基编织复合材料为研究对象,根据制备出的复合材料几何尺寸和结构为原型,构建出不同拉伸方向下4组纱线间距的复合材料单胞模型;并利用有限元软件对单胞模型的拉伸性能进行仿真,得出纱线间距对复合材料拉伸性能的影响规律;并通过0.79 mm芳纶增强橡胶基编织复合材料的拉伸实验来验证。

1 有限元模型建立

1.1 单胞选取

对复合材料宏观力学性能和几何结构单胞模型的力学性能预测相结合是二维编织复合材料力学性能的研究方向^[8]。芳纶纤维增强橡胶基复合材料具备细观结构的周期性,可以采用复合材料代表性体积单元-单胞模型进行有限元分析^[9-10]。图1为芳纶橡胶基编织复合材料的实体试样和单胞模型,图1(a)为制备的复合材料纤维结构图,内部纤维束在经、纬2个方向之间平纹交织,因此复合材料的力学性能在经向和纬向得到加强。根据芳纶纤维橡胶基复合材料的细观结构,利用建模软件建立实体模型,并取细观结构上的最小周期性重复单元作为单胞模型,如图1(b)所示。其中,所构建的单胞模型基体和增强体的体积分数与宏观状态下制备的编织复合材料一致。

1.2 单胞结构参数

根据二维编织复合材料细观结构的特点^[11-13],对

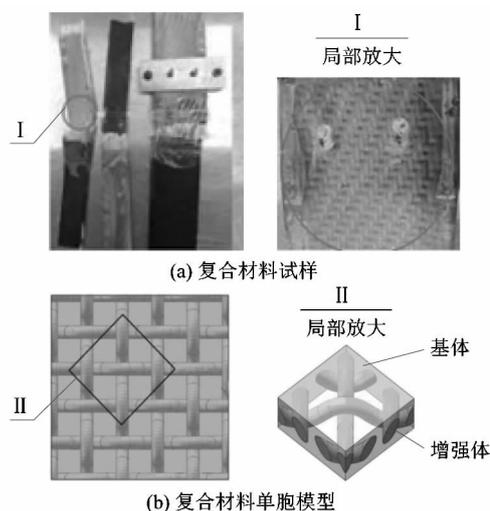


图1 单胞模型的选取

Figure 1 Selection of unite-cell model

芳纶纤维橡胶基复合材料单胞模型提出以下假设:①纤维束截面形状为圆形且直径为 d ;②经纱与纬纱的纱线间距相等且长度为 L 。芳纶增强橡胶基编织复合材料的细观结构如图2所示。为了研究纱线间距对芳纶纤维橡胶基复合材料细观力学性能的影响,建立了不同纱线间距的单胞模型,其纱线间距分别为0.79, 0.85, 0.95和1.05 mm。纤维束直径为0.3 mm,单胞模型总厚度0.8 mm,纤维增强层厚度0.7 mm。

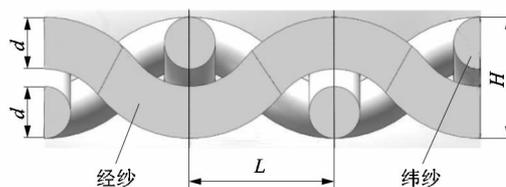


图2 复合材料细观结构

Figure 2 Macro-structure of composites

1.3 材料参数

纤维材料为芳纶II(PPTA),基体相为二元乙丙橡胶(EPM),平纹织物与橡胶材料各向同性,复合材料性能参数如表1所示^[16]。

表1 复合材料各组分性能

Table 1 Material parameters of composites

材料	弹性模量/MPa	泊松比	拉伸强度/MPa
PPTA	63 200.0	0.32	2 815.0
EPM	8.9	0.49	23.4

1.4 周期性边界条件

编织复合材料可以假设为由多个单胞模型周期性组合而成,为了将单胞模型的力学性能等效为复合材料的宏观力学性能,则需要对单胞模型施加周期性边界条件,使每一个单胞模型之间保持连续的位移和应力,得到更为精准的应力和应变。

在有限元软件中设置拉伸边界条件,将单胞模型一端固定,另一端沿拉伸方向施加 5 MPa 的拉伸载荷,模拟复合材料的单轴拉伸实验过程。考虑到拉伸方向对编织复合材料拉伸性能的影响,从而选择纤维束交织方向和经(纬)纱方向 2 种单胞模型进行拉伸,拉伸方向如图 3 所示。考虑单胞模型的复杂性,纤维束和基体均采用四面体网格进行划分,共计网格 25 207 个。纤维束与纤维束之间、纤维束与基体之间不考虑摩擦均采用绑定的方式进行连接。以经(纬)纱与拉伸方向成 45° 夹角为纤维束交织方向,经(纬)纱与拉伸方向平行为经(纬)纱方向。

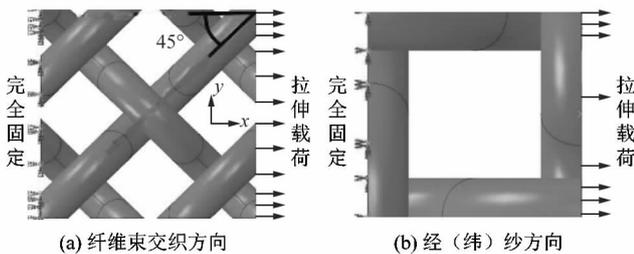


图 3 边界载荷的施加

Figure 3 Application of boundary loads

2 结果与分析

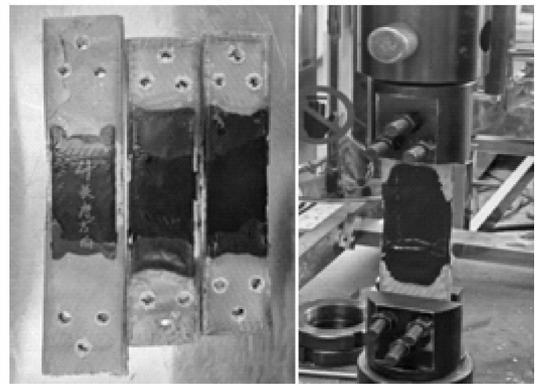
2.1 复合材料拉伸实验

委托合作单位制备出纱线间距为 0.79 mm 的芳纶橡胶基编织复合材料,并将实验试样沿经纱方向裁剪出矩形布条,得到图 4(a)中的试样;将试样固定在图 4(b)所示的拉力试验机中,试样在拉伸过程中被拉力试验机的上下夹具固定,并对试样施加恒定载荷进行单轴拉伸。通过电脑采集得到试验所需的拉伸时间和应力应变等数据。

2.2 单胞模型有限元模拟

2.2.1 纤维束交织方向

纤维束交织方向下基体表面的等效应力如图 5 所



(a) 拉伸试样

(b) 拉力试验机

图 4 复合材料拉伸实验

Figure 4 Composite tensile experiment

示。从图中可以看出,基体的应力分布具有对称性,不同纱线间距的基体在经纱和纬纱交织的部位等效应力高于其它部位,存在较为严重的应力集中。随着纱线间距的不断增加,基体的最大等效应力呈逐渐增大的趋势。0.79,0.85,0.95 和 1.05 mm 纱线间距基体最大等效应力分别为 1.496,1.796,2.311 和 2.751 MPa,表明纱线间距的增大会导致基体材料承受的应力增加。

纤维束交织方向下纤维束表面的等效应力如图 6 所示。纤维束应力最大区域出现的位置与基体中应力最大区域空间基本一致。复合材料的基体和增强相 2 者之间的等效应力相差较大,纤维束承受较大部分的拉伸载荷;且纤维束经纱与纬纱交织处应力集中显著,原因为经纬纱之间会接触摩擦而产生力的传递,此部位是增强相容易被破坏的点。0.79,0.85,0.95 和 1.05 mm 纱线间距下增强相的最大应力分别为 538,551,602 和 624 MPa,表明随着纱线间距的增大,纤维束交织部位上的应力呈逐渐增大的趋势。原因是随着纱线间距的增加,纤维束在复合材料中的体积分数在逐渐减少,致使其承受的载荷进一步增大。

2.2.2 经(纬)纱方向

经(纬)纱方向下基体表面的等效应力分布如图 7 所示。基体的最大应力出现在经(纬)纱与基体相接触的部分。对比纤维束交织方向,基体在受到同样拉伸载荷的作用下应力小于交织方向,基体的等效应力同样随着纱线间距的增加而增大。0.79,0.85,0.95

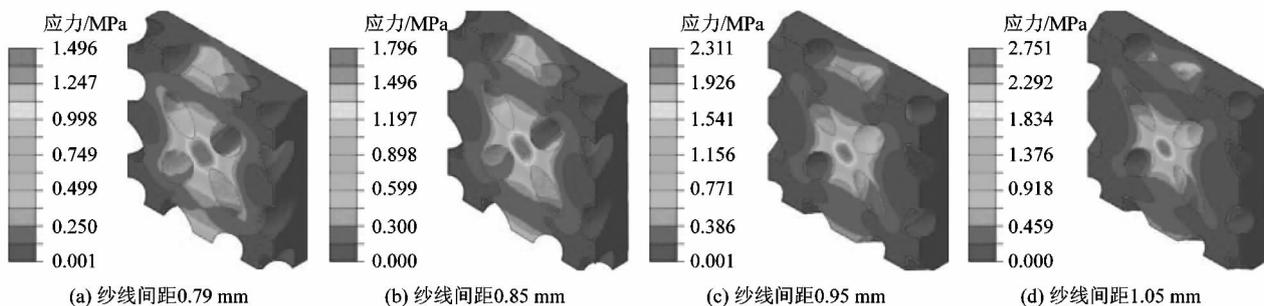


图5 交织方向基体应力云图

Figure 5 Stress nephogram of matrix with fiber interweaving direction

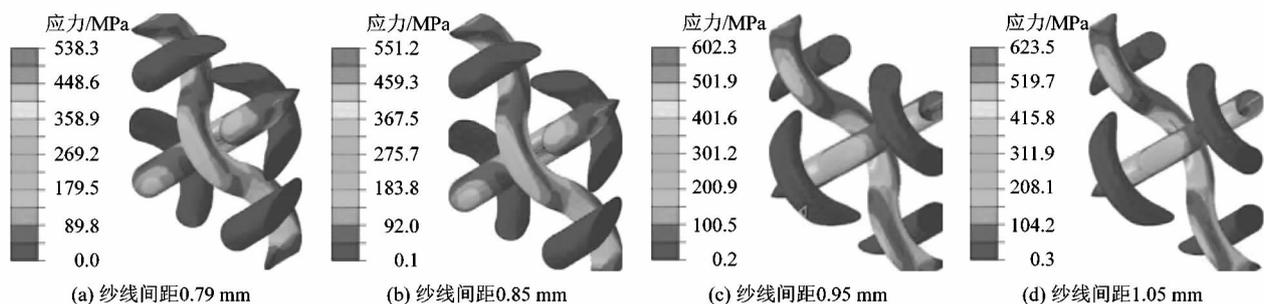


图6 交织方向增强相应力云图

Figure 6 Stress nephogram of fiber reinforcement with fiber interweaving direction

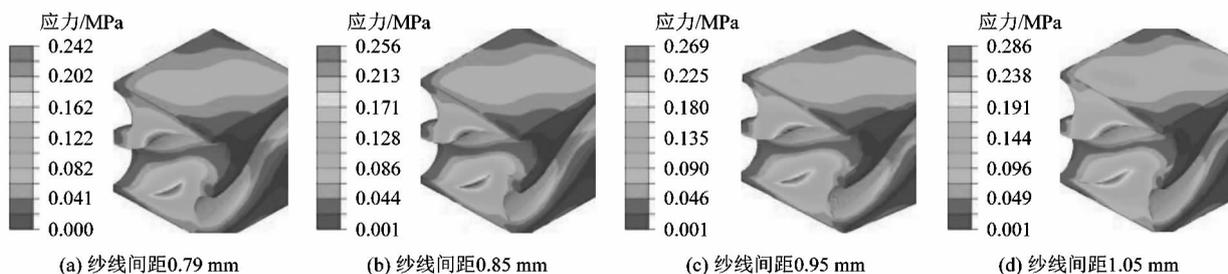


图7 经(纬)纱方向基体应力云图

Figure 7 Stress nephogram of matrix with warp (weft) yarn direction

和 1.05 mm 纱线间距下基体最大等效应力分别为 0.242, 0.256, 0.269 和 0.286 MPa, 相较于纤维束交织方向的等效应力有所减少。

经(纬)纱方向下增强相表面的等效应力如图 8 所示。增强相上的最大应力点和交织方向一样出现在了经纬纱交织部位。0.79, 0.85, 0.95 和 1.05 mm 纱线间距处织物的最大应力分别为 256, 273, 299 和 321 MPa, 相较于交织方向经由纤维束接触和摩擦导致破坏的现象有所减缓, 等效应力减少。

2.3 有限元模拟准确性分析

为了验证单胞模型预测的准确性, 在图 9 中将纱线间距为 0.79 mm 的复合材料拉伸试验得到的应力、应变与有限元模拟的数据进行对比。可以看出二者数据趋势基本相同, 以此来验证通过计算机模拟得到数据的合理性。由于纤维束在复合材料中的轨迹分为直线段和曲线段, 致使纤维束在拉伸过程中应变产生的方式有所不同。应变较低时, 纤维束随着应变的增加在曲线段随着拉伸逐渐变直, 应变较高时, 纤维束的应变则来自纱线的伸长。

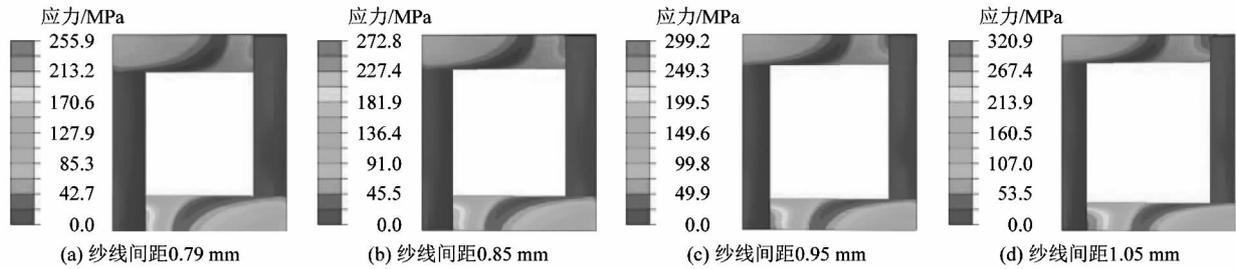


图 8 经(纬)纱方向增强相应力云图

Figure 8 Stress nephogram of fiber reinforcement with warp (weft) yarn direction

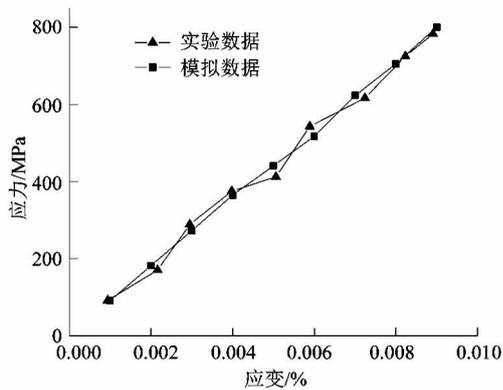


图 9 纱线间距 0.79 mm 时应力-应变曲线

Figure 9 Stress-strain curve at 0.79 mm yarn spacing

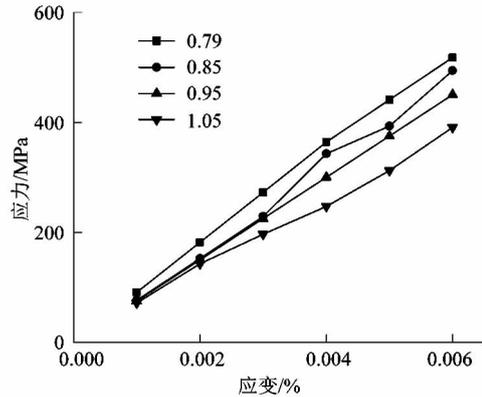


图 10 不同纱线间距下的应力-应变曲线

Figure 10 Stress-strain curves at different yarn spacings

2.4 复合材料力学性能预测

2.4.1 材料性能

图 10 为不同纱线间距下的应力-应变曲线。从图 10 可以看出芳纶橡胶基编织复合材料不同纱线间距的经向拉伸应力-应变曲线几乎呈线性关系。原因在于拉伸方向与纤维束的编织方向一致,纤维束作为拉伸载荷的主要承载体,其力学性能自然表现为纤维的线性关系。橡胶基体与纤维增强体 2 者之间刚度和弹性模量相差较大,因此基体产生微小的非线性刚度关系可以忽略。随着纱线间距的增加,等效应力的最大值有着降低的趋势;而纤维束体积分数的降低,也导致复合材料的刚度随之下降。

2.4.2 等效弹性模量计算

芳纶纤维增强橡胶基复合材料由橡胶基体和芳纶织物增强体组成。由于复合材料在细观结构上成分不均一,在承受外部载荷时,基体和增强体所承受的应力和应变也不完全一样,因此在研究复合材料细观力学

时,需要引入均质化理论,将复合材料的细观力学性能转化为宏观力学性能^[18]。

单胞模型的平均应力为:

$$\overline{\sigma_{ij}} = \frac{1}{V^r} \int_{V^r} \sigma_{ij} dV = \frac{1}{V^r} \left[\int_{V_f^r} \sigma_{ij} dV + \int_{V_m^r} \sigma_{ij} dV \right] = V_f \overline{\sigma_{ij}^f} + V_m \overline{\sigma_{ij}^m} \quad (1)$$

单胞模型的平均应变为:

$$\overline{\varepsilon_{ij}} = \frac{1}{V^r} \int_{V^r} \varepsilon_{ij} dV = \frac{1}{V^r} \left[\int_{V_f^r} \varepsilon_{ij} dV + \int_{V_m^r} \varepsilon_{ij} dV \right] = V_f \overline{\varepsilon_{ij}^f} + V_m \overline{\varepsilon_{ij}^m} \quad (2)$$

其中: $V_f = V_f^r / V^r$, $V_m = V_m^r / V^r$ 。

式中: V^r 为单胞模型的整体体积, V_f^r 为增强相体积, V_m^r 为基体体积; V_f 和 V_m 分别为单胞内增强相组分和基体相组分的体积分数,由于单胞模型能够代表整个复合材料的细观结构,所以 V_f 和 V_m 也代表整个复合材料中的增强相和基体相的体积分数; $\overline{\sigma_{ij}^f}$ 和 $\overline{\sigma_{ij}^m}$ 分别

为单胞模型内增强相和基体相的平均应力; $\overline{\varepsilon_{ij}^f}$ 和 $\overline{\varepsilon_{ij}^m}$ 分别为单胞模型内增强相和基体相的平均应变。

根据式(1)和(2)的等效弹性模量计算方法,得到不同纱线间距下的等效弹性模量如图11所示。

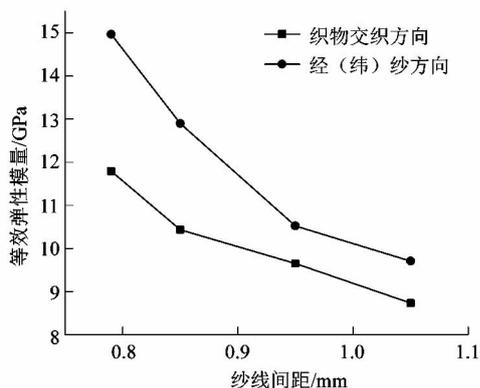


图11 复合材料等效弹性模量

Figure 11 Equivalent elastic modulus of composites

从图11可以看出在同等纱线间距下经(纬)纱方向的等效弹性模量高于纤维束交织方向,且平均高出21%。由于复合材料中纤维束所占的体积分数决定了复合材料的承载能力,而纱线间距的增加致使纤维束体积分数随之下降,导致其拉伸性能降低。因此单胞模型的等效弹性模量随纱线间距的增加而降低。

3 结语

为探究纱线间距对编织复合材料拉伸性能的影响,课题组通过建立不同拉伸方向下4组纱线间距的芳纶纤维橡胶基复合材料单胞模型,利用有限元软件对单胞模型进行拉伸仿真分析,并通过制备的0.79 mm芳纶橡胶基编织复合材料的拉伸试验对有限元模拟的准确性进行了验证,得到了以下结论:

1) 随着纱线间距的增加,芳纶纤维橡胶基复合材料单胞模型中的基体和增强体的应力均会增加,且经纬(纱)方向上的等效应力小于纤维束交织方向。

2) 复合材料不同纱线间距的经向拉伸应力-应变曲线几乎呈线性关系,并且随着纱线间距的增加,等效应力的最大值有着降低的趋势。

3) 通过均质化理论计算的复合材料等效弹性模量表明随着纱线间距的增大等效弹性模量逐渐减少,且经纬(纬)纱方向的等效弹性模量平均高于织物交织方向21%。

课题组模拟了4组纱线间距下不同拉伸方向的芳纶纤维橡胶复合材料的拉伸性能,还不能精确得出纱线间距对复合材料拉伸性能影响的能力,之后还需要对大量的纱线间距进行分析计算。

参考文献:

- [1] 龙巍,郑学林,臧建彬.基于碳纤维复合材料热性能的研究进展综述[J].应用化工,2019,48(9):2251.
- [2] 郑占阳,贺辛亥,张申申,等.三维编织夹头机构的结构设计[J].轻工机械,2015,33(5):55-56.
- [3] 付金毅,孙向春.基于编织结构的针刺复合材料拉伸性能预测[J].复合材料科学与工程,2021(4):115-116.
- [4] 马晓红,田文强,夏燕茂.二维编织复合材料的结构及力学性能研究[J].上海纺织科技,2016,44(5):28.
- [5] 屈鹏.二维二轴编织复合材料细观力学分析[D].济南:山东大学,2009:26-27.
- [6] BYUN J H. The analytical characterization of 2D braided textile composites[J]. Composites Structures, 2000, 60(5):705.
- [7] TABIEI A, YI W T. Comparative study of predictive methods for woven fabric composite elastic properties [J]. Composites Structures, 2002, 58:149-164.
- [8] 林剑豪,何艳萍,祝琳华,等.日化产品用微胶囊的细观力学性能研究进展[J].材料导报,2016,30(增刊1):329-330.
- [9] 雷卫华,陈可平.短切芳纶纤维/聚硅氧烷-甲基丙烯酸酯复合材料的结构与性能[J].复合材料学报,2021,38(5):1398.
- [10] 刘霞,杨晓翔,高剑虹.芳纶短纤维增强橡胶复合材料界面力学性能表征及有限元模拟[J].福州大学学报(自然科学版),2022,50(3):395.
- [11] 张守京,陈云辉,孙骥.编织角对复合材料弹性性能的影响[J].西安工程大学学报,2022,36(1):27.
- [12] 张寒珠,梁琳等.芳纶纳米纤维在白炭黑/溶聚丁苯橡胶复合材料中的应用[J].弹性体,2022,32(1):50.
- [13] 陈玉丽,马勇,潘飞,等.多尺度复合材料力学研究进展[J].固体力学学报,2018,39(1):62.
- [14] 张楚汉,唐欣薇,周元德,等.混凝土细观力学研究进展综述[J].水力发电学报,2015,34(12):17.
- [15] 郝英哲,岳冬梅,苏红,等.纤维增强弹性体基复合材料的有限元模拟分析[J].合成橡胶工业,2014,37(2):107.
- [16] 白荣光,李洪,窦晓勇,等.我国芳纶1414产业现状及其发展方向[J].产业用纺织品,2016,34(7):2.
- [17] 李明专,王君,鲁圣军,等.芳纶纤维的研究现状及功能化应用进展[J].高分子通报,2018(1):59.
- [18] 郝英哲.芳纶纤维复合材料细观力学性能研究[D].北京:北京化工大学,2014:35.