

文章编号:1000-6893(2007)02-0294-07

小编织角三维编织复合材料拉伸强度模型

徐 坤, 许希武, 田 静

(南京航空航天大学 结构强度研究所, 江苏 南京 210016)

A Model for Tensile Strength Prediction of Low Angel 3D Braided Composites

XU Kun, XU Xi-wu, TIAN Jing

(Research Institute of Structures and Strength, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘 要: 采用离散化方法,基于等应变及等应力混合平均思想,结合桥联模型,建立了四步法小编织角三维四向矩形编织复合材料的拉伸强度模型。该模型不仅可以获得材料的等效弹性性能,而且能直接得到各组分材料(纤维束中纤维和基体、纤维束外基体)的细观应力分布,并基于纤维和基体失效准则,揭示了材料在单向拉伸载荷作用下的失效机理并预报了材料拉伸强度。数值分析结果与实验数据基本吻合,证明了该模型的有效性,经讨论材料主要工艺参数对拉伸强度和应力分布的影响,得到了一些有参考价值的结论。

关键词: 三维编织; 复合材料; 小编织角; 拉伸强度; 桥联模型;

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A

Abstract: A model to predict the uniaxial tensile strength of the 4-step 3D braided rectangular composite with low braiding angle is established. By the scheme of discretization, the iso-strain and iso-stress mixed averaging assumptions are applied to analyze the elastic mechanical properties of the material. Coupled with the bridging model, the stress distribution in the fibers and matrix are obtained. Based on the failure criteria of the constituents of the material, failure mechanism of the materials under the tensile load is disclosed and the model predicts the tensile strength of the materials. At the meantime, the influence of the main technical parameters upon the tensile strength and stress distribution in the componenos are also discussed in detail, and some valuable conclusions are drawn based on the results reported herein. The predicted results of the model agree well with the experiment data, which indicates that the model to predict the tensile strength is efficient.

Key words: 3D braided; composite; low braiding angle; tensile strength; bridging micromechanics model

近年来,三维编织复合材料的拉伸实验研究与强度预报已成为该领域的研究热点^[1-6]。这些模型加深了对材料拉伸力学行为的认识,但对增强体纤维束的失效分析还不完善。目前模型^[4,5]将纤维束视为均匀、横观各向同性材料,直接采用宏观强度准则(Hoffman 准则)作为强度失效判据。因此,无法深入研究纤维束中纤维和基体的相互作用及其失效机理,这对以纤维束为增强体的三维编织材料至关重要;同时,实验表明不同编织角材料的拉伸失效控制因数和变形规律截然不同,由于现有模型缺乏针对性,很难深入揭示不同编织角材料的失效过程,从而有效分析和预报材料拉伸强度。

小编织角三维编织复合材料由于具有更为优异的面内力学性能,工程中具有显著的代表性。

在本文中基于小变形线弹性假设,采用离散化方法,运用等应变及等应力混合平均思想,结合桥联模型,建立了针对小编织角四步法三维四向矩形编织复合材料的拉伸强度模型。数值分析结果与实验数据基本吻合,证明了该模型的有效性,并讨论了材料主要工艺参数对拉伸强度和组分应力的影响规律,得到了一些有参考价值的结论。

1 实验研究

通常,人们将编织角在 $15^\circ \sim 25^\circ$ 范围内称为小编织角,编织角为 20° 的试件是最具代表性的小编织角试件。实验研究表明^[1]:编织角是三维编织复合材料一个非常重要的结构参数,编织角的大小直接决定着编织复合材料的拉伸失效机理和变形规律,材料拉伸力学行为对编织角高度敏感。对于小编织角试件,材料拉伸应力—应变曲线为线性,材料在最终破坏前表现为线弹性,材料的拉伸力学行为主要由纤维控制,纤维正向拉

收稿日期:2005-12-07; 修订日期:2006-04-17

基金项目:江苏省研究生创新计划项目(2005065);南京航空航天大学博士生创新与创优基金(4003-019017)

通讯作者:许希武 E-mail: xwxu@nuaa.edu.cn

断导致材料的最终整体失效。当编织角较大(典型为 40 左右)时,材料的拉伸力学行为主要由基体控制,大编织角编织复合材料拉伸应力—应变曲线表现为非线性。可见,不同编织角材料的变形规律和失效控制因数截然不同。

2 单胞几何模型

四步法三维四向矩形编织复合材料的增强体为三维多向网状连续纤维整体结构,由内部、表面及棱角 3 个部分组成。根据 Chen^[7]和 Zheng^[8]等研究表明,编织结构中内部区域占主导,并随着编织纱线行列数增加而增大。目前,绝大多数分析模型都以内部区域代替整体结构,在本文中采用这种形式。图 1 给出了三维四步 1 × 1 编织材料的单胞几何模型,该模型基于如下假设:纤维束横截面为椭圆形,长、短半轴分别为 a 和 b ,且截面形状沿纤维束轴线方向保持不变;所有纤维束具有相同几何特性和物理特性;编织工艺足够稳定,以保证在一定长度范围内整个编织结构的均匀一致性。

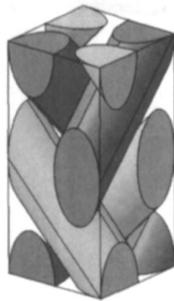


图 1 单胞几何模型

Fig. 1 Geometrical model of unit-cell

图 2 描绘了单胞内 4 根主纤维束的空间坐标关系,其中, $O-xyz$ 为材料整体坐标系, $O-x'y'z'$ 为材料局部坐标系, $O-123$ 为纱线 4 的主轴坐标系,其余纱线主轴坐标系方向类似。

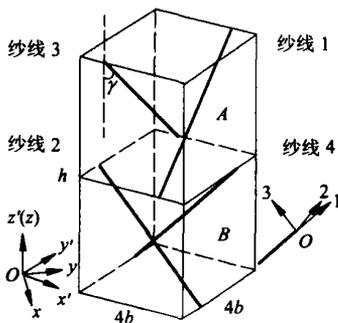


图 2 单胞纤维束的空间坐标关系

Fig. 2 Spatial coordinates relationship of main yarns

单胞编织花节高度为 h ,表面编织角为 β ,表面编织角 β 定义为预制件表面的纹路线与编织方向的夹角,编织角 β 和内部编织角 α 关系为

$$\tan \alpha = \frac{4\sqrt{3}b}{h} = \frac{\sqrt{3}}{2} \tan \beta \quad (1)$$

经“打紧”工序后,纤维束在挤紧状态下彼此相切,根据 2 根彼此相切纱线的表面方程,可得纤维束横截面的长、短半轴 a 和 b 关系为^[7]

$$a = b\sqrt{3}\cos \alpha \quad (2)$$

图 2 单胞由上下内胞 A 和 B 交替而成, A 和 B 内胞结构上具有一致性,只是空间布局不同。因此,单胞中四向纤维束所占纤维体积百分含量应与材料的纤维体积百分含量 V_f 相等,即

$$V_f = \frac{4ab \cdot \left(\frac{1}{2}h\right) \cdot V_{f,y}}{4b \cdot 4b \cdot h} \quad (3)$$

式中: $V_{f,y}$ 为纤维束的纤维体积含量; a 为纤维束因倾斜而被平行截面所截而形成的椭圆半长轴,即

$$a = a' \cos \alpha \quad (4)$$

将式(2)及式(4)代入式(3)中,可得

$$V_{f,y} = \frac{8V_f}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

若已知纤维束的纤维根数 N 、纤维单丝直径 d ,则纤维束的纤维体积含量可表示为

$$V_{f,y} = \frac{\left(\frac{d}{2}\right)^2 N}{ab} \quad (6)$$

将式(2)和式(5)代入式(6),则纤维束横截面的长、短半轴为

$$a = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\sqrt{3}\cos \alpha \cdot N}{V_{f,y}}}, \quad b = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{N}{N V_{f,y} \cos \alpha \sqrt{3}}} \quad (7)$$

如图 2,花节高度 h 和内部编织角 α 关系为

$$h = 8b' \tan \alpha \quad (8)$$

至此,建立了材料的单胞细观几何模型。

3 拉伸强度模型

3.1 基于桥联模型的混合平均刚度建模

为获得材料在单向拉伸载荷作用下的力学响应,首先采用离散化方法,用平行于 xy 平面的无数横截面,将单胞划分为 K 个子单胞,单胞不同区域的代表性子单胞如图 3 所示。

每个子单胞所含有的纤维束微元段均可视为偏轴方向的单向纤维复合材料,其主轴方向 123

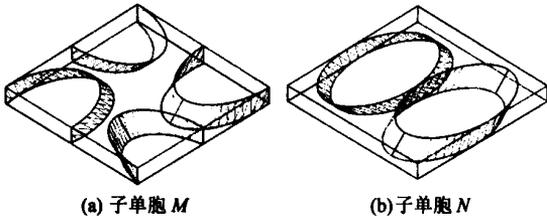


图3 子单胞微观结构

Fig. 3 Microstructures of sub-cells

(见图2)。根据桥联模型^[9],单向纤维复合材料在主轴坐标系123中,一旦给定纤维束的组分性能参数及纤维束的纤维体积含量 $V_{f,y}$,便可确定单向纤维复合材料的瞬时柔度矩阵 $S_{ij,y}$,组分纤维应力 $d_{i,f}$,基体应力 $d_{i,m}$,即

$$S_{ij,y} = (V_{f,y}S_{ij,f} + V_{m,y}S_{ij,m}A_{ij}) \cdot (V_{f,y}I + V_{m,y}A_{ij})^{-1} \quad (9)$$

$$d_{i,f} = (V_{f,y}I + V_{m,y}A_{ij})^{-1} d_j = B_{ij} d_j \quad (10)$$

$$d_{i,m} = A_{ij} (V_{f,y}I + V_{m,y}A_{ij})^{-1} d_j \quad (11)$$

式中: $V_{f,y}$ 为纤维束纤维体积含量; $V_{m,y}$ 为纤维束基体体积含量; $S_{ij,f}$ 为纤维柔度矩阵; $S_{ij,m}$ 为基体柔度矩阵。本文认为纤维具有横观各向同性,基体为各向同性,其各自柔度矩阵为

$$S_{ij,f} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{12}}{E_1} & -\frac{\mu_{12}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\mu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_{12}}{E_1} & -\frac{\mu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$S_{ij,m} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\mu}{E} & -\frac{\mu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\mu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\mu}{E} & -\frac{\mu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: E_1, E_2 分别为纤维轴向和横向弹性模量; μ_{12}, μ_{23} 分别为纤维轴向、横向泊松比; G_{12}, G_{23} 为

纤维轴向和横向剪切模量; E 为基体弹性模量; μ 为基体泊松比; G 为基体剪切模量。

式(9~11)中 A_{ij} 为桥联矩阵,通过它建立了单向纤维复合材料内基体和纤维应力关系,即

$$d_{i,m} = A_{ij} d_{j,f} \quad (14)$$

$$\text{其中: } A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{66} \end{bmatrix} \quad (15)$$

材料在线弹性范围内,桥联矩阵 A_{ij} 主对角线以上部分各元素中,除 a_{12} 和 a_{13} 外均为0,即

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= E/E_1 \\ a_{22} &= a_{33} = a_{44} = 0.5(1 + E/E_2) \\ a_{55} &= a_{66} = 0.5(1 + G/G_{12}) \\ a_{13} &= a_{12} = (S_{12,f} - S_{12,m})(a_{11} - a_{22}) / (S_{11,f} - S_{11,m}) \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

所以,一旦确定桥联矩阵 A_{ij} ,就可完全得到纤维束的瞬时柔度矩阵 $S_{ij,y}$ 。由式(9),子单胞 L 内某纤维束微元段 Y_n 在其主轴坐标系123下的柔度矩阵为 $S_{ij,y}$,通过空间坐标转换,可得到 Y_n 在材料局部坐标系 $x y z$ 下的柔度矩阵 $(S_{ij,G})_{Y_n,L}$,即

$$\left. \begin{aligned} (S_{ij,G})_{Y_n,L} &= T_{Y_n,L} S_{ij,y} (T_{Y_n,L})^T \\ (C_{ij,G})_{Y_n,L} &= [(S_{ij,G})_{Y_n,L}]^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: $Y_n = Y_1, Y_2, Y_3, Y_4$,代表单胞内沿空间同向分布的主纤维束和局部纤维束块(见图1); $T_{Y_n,L}$ 为子单胞 L 内纤维束 Y_n 的应变空间坐标转换矩阵。

单胞只承受 z 向拉伸载荷时,可认为子单胞 L 中各纤维束微元段和基体具有相同的应变,即各组分应变相同 $(\epsilon_i)_{Y_n,L} = (\epsilon_i)_{m,L} = (\epsilon_i,G)_L$,其中: $(\epsilon_i)_{Y_n,L}, (\epsilon_i)_{m,L}$ 及 $(\epsilon_i,G)_L$ 分别为子单胞 L 所含纤维束微元段应变、基体应变及子单胞 L 的平均应变。在局部坐标系 $x y z$ 下,薄片型子单胞 L 垂直于 z 轴上下两平面受到大小相等、方向相反的平均应力 σ_i ,其余各面自由。根据子单胞沿 z 向所受合力应等于各组分 z 向所受力之和,且各组分应变等于平均应变,易得子单胞 L 在局部坐标系 $x y z$ 下的平均应力 σ_i 和有效刚度矩阵 $(C_{ij,G})_L$ 分别为

$$\sigma_i = \left[\sum_{k=1}^n m_k (C_{ij,G})_{k,L} \right] (\epsilon_j,G)_L \quad (18)$$

$$(C_{ij,G})_L = (1/V) (C_{ij,G})_{k,L} dV = \sum_{k=1}^n m_k (C_{ij,G})_{k,L}$$

$$(S_{ij,G})_L = [(C_{ij,G})_L]^{-1} \quad (19)$$

式中: $k = Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, m$; m_k 为子单胞 L 中组分 k 所占体积分数; V 为组分 k 所占子单胞 L 的体积; $(C_{ij,G})_{k,L}$ 为子单胞 L 中组分 k 在局部坐标系 $x y z$ 下的刚度矩阵; $(S_{ij,G})_L$ 为子单胞 L 在局部坐标系 $x y z$ 下的柔度矩阵; n 为子单胞 L 所包含的组分种数。

由于每个子单胞具有相同的横截面面积, 当只受 z 向拉伸载荷 F_z 时, 根据力的平衡及作用力与反作用力关系可知, 各子单胞在垂直于 z 轴的上下表面均受到大小相等、方向相反的平均应力 σ_i 。根据单胞沿 z 向总变形等于各子单胞总变形之和, 且各子单胞所受 z 向平均应力相等, 则易得单胞在材料局部坐标系 $x y z$ 下的宏观有效柔度矩阵 \bar{S} 为

$$\bar{S} = (1/V_L) (S_{ij,G})_L dV = \sum_{L=1}^K m_L (S_{ij,G})_L \quad (20)$$

式中: V_L 为子单胞 L 所占单胞的体积; m_L 为子单胞 L 占整个单胞的体积分数; K 为单胞离散化所产生的总子单胞数。

将柔度矩阵 \bar{S} 经空间坐标转换, 即可得到材料单胞在整体坐标系 xyz 下的柔度矩阵 S 。由于宏观上三维编织复合材料具有正交各向异性, 根据柔度矩阵 S 中各系数与工程弹性常数的关系, 即

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \frac{1}{S_{11}}, E_2 = \frac{1}{S_{22}}, E_3 = \frac{1}{S_{33}} \\ \mu_{12} &= -\frac{S_{12}}{S_{22}}, \mu_{13} = -\frac{S_{13}}{S_{33}}, \mu_{23} = -\frac{S_{23}}{S_{33}} \\ G_{23} &= \frac{1}{S_{44}}, G_{31} = \frac{1}{S_{55}}, G_{12} = \frac{1}{S_{66}} \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

可得三维编织复合材料 9 个独立的有效弹性常数。

3.2 组分细观应力

小编织角编织复合材料拉伸应力—应变曲线为线性。因此, 在初始损伤出现前的线弹性范围内, 可直接采用全量法分析组分材料细观应力。当单胞在整体坐标系 xyz 下受 z 向拉伸载荷 F_z 时, 模型各子单胞在垂直于 z 轴的上下表面均受到大小相等、方向相反的平均应力 σ_i , 且 σ_i 等于所施加的外载荷 F_z , 即

$$\sigma_i = \sigma_z = \{0 \ 0 \ F_z \ 0 \ 0 \ 0\}^T \quad (22)$$

经空间坐标转换, 子单胞 L 所受平均应力 σ_i

转换到局部坐标系 $x y z$ 下为 $(\sigma_i)_L$, 其应力—应变关系为

$$(\sigma_i)_L = (C_{ij,G})_L (\epsilon_j)_L \quad (23)$$

由于子单胞 L 内各组分材料具有相同的应变, 即 $(\epsilon_i)_{Y_n,L} = (\epsilon_i)_{m,L} = (\epsilon_i)_L$, 根据式(18)得

$$(\sigma_i)_L = \left[\sum_{k=1}^n m_k (C_{ij,G})_{k,L} \right] (\epsilon_j)_L = (\sigma_i)_L Y_{1,L} m Y_1 + (\sigma_i)_L Y_{2,L} m Y_2 + (\sigma_i)_L Y_{3,L} m Y_3 + (\sigma_i)_L Y_{4,L} m Y_4 + (1 - m Y_1 - m Y_2 - m Y_3 - m Y_4) (\sigma_i)_L m \quad (24)$$

上式右侧各项给出了子单胞 L 内各纤维束和基体所受应力, $m Y_i$ 分别表示子单胞 L 中各纤维束的体积百分含量, $i = 1, 2, 3, 4$ 。因此, 子单胞 L 内各纤维束微元段和纤维束外基体在坐标系 $x y z$ 中的应力分别为

$$\left. \begin{aligned} (\sigma_i)_{Y_n,L} &= (\sigma_i)_{Y_n,L} \\ Y &= Y_n = Y_1, Y_2, Y_3, Y_4 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

$$(\sigma_i)_{m,L} = (\sigma_i)_{m,L} \quad (26)$$

根据桥联模型, 为得到子单胞 L 内各纤维束组分材料的应力分布, 首先应通过空间坐标转换, 将各纤维束微元段在坐标系 $x y z$ 中应力(式(25))转换到纤维束主轴坐标系 123 下, 再由式(10)和式(11), 即可得子单胞 L 内各纤维束中纤维和基体应力为

$$(\sigma_{i,f})_{Y_n,L} = B_{ij} (T_{Y_n,L})^T (\sigma_j)_{Y_n,L} \quad (27)$$

$$(\sigma_{i,m})_{Y_n,L} = A_{ij} B_{ij} (T_{Y_n,L})^T (\sigma_j)_{Y_n,L} \quad (28)$$

为反映纤维束组分材料的平均受力状态, 现沿各纤维束主轴方向, 将其纤维和基体所承担的应力在整个单胞进行体积平均, 单胞各向纤维束在各自主轴坐标系下纤维和基体的平均应力为

$$(\bar{\sigma}_{i,f})_{Y_n} = \frac{1}{4b \cdot 4b \cdot h_{L=1}} \sum_{L=1}^K \bar{V}_L (\sigma_{i,f})_{Y_n,L} \quad (29)$$

$$(\bar{\sigma}_{i,m})_{Y_n} = \frac{1}{4b \cdot 4b \cdot h_{L=1}} \sum_{L=1}^K \bar{V}_L (\sigma_{i,m})_{Y_n,L} \quad (30)$$

式中: \bar{V}_L 为子单胞 L 占整个单胞的体积分数; $(\sigma_{i,f})_{Y_n,L}$ 和 $(\sigma_{i,m})_{Y_n,L}$ 分别为子单胞 L 中第 n 根纤维束中的纤维应力和基体应力。

同理, 在局部坐标系 $x y z$ 下将纤维束外基体应力(式(26))在整个单胞内体积平均, 其平均应力为:

$$(\bar{\sigma}_i)_m = \frac{1}{4b \times 4b \cdot h_{L=1}} \sum_{L=1}^K \bar{V}_L (\sigma_i)_{m,L} \quad (31)$$

根据式(26)~式(31), 既可得到各子单胞 L 中各组分材料的细观应力分布, 同时又得到了整个单胞内各纤维束中纤维、基体以及纤维束外基体的平均应力水平, 为后续失效分析奠定了基础。

3.3 材料失效分析

实验研究表明^[1]:纤维控制小编织角三维编织复合材料的最终拉伸失效,本文模型由式(27)计算子单胞纤维束中局部纤维的主轴正应力,采用最大正应力准则作为失效判据;分析纤维束内基体平均受力状态表明:在各纤维束主轴坐标系的13平面(见图2),存在明显的剪切应力分量,故采用最大剪应力准则作为失效判据;分析单胞纤维束外基体平均受力状态表明:纤维束外基体处于3向正应力状态,故采用Mises破坏准则用于失效判断。

模型失效分析的数值过程:在线弹性范围内,采用全量法加载,直至组分初始损伤产生。如果某子单胞L中纤维轴向正应力首先达到纤维拉伸破坏强度 σ_{bf} ,则该方向纤维束的相应纤维均失去承载能力。事实上,由于单胞内各纤维束的空间位置具有轮换对称性,各纤维束相应部分应力分布具有显著的一致性,此时四向纤维束的大部分纤维已同时失效,材料失去承载能力,从而得到编织材料的拉伸破坏强度;若纤维束内基体平均最大剪应力达到基体剪切破坏强度或纤维束外基体首先满足Mises破坏准则,则认为相应基体材料失效,折减该基体弹性模量为原弹性模量

的10%;由于材料为线弹性,材料的变形状态只与载荷水平有关,而与载荷的施加路径无关,故保持拉伸载荷值不变,重新分析材料单胞的应力分布,若纤维束中纤维在此载荷水平下失效,则得到材料的最终破坏强度;若不失效,表明单胞仍能继续承载,则施加载荷增量重新分析材料组分的应力分布,直至材料纤维失效而得到材料的最终拉伸破坏强度。

4 强度预报与分析

基于Matlab软件建立了材料的力学分析模型,将刚度和拉伸强度预报模块集成在一起,形成了三维编织复合材料力学性能的分析预报平台。

为验证本文模型有效性,选取卢子兴^[1,5]和刘振国^[10]的实验和理论数据进行了数值分析及对比。板状试件为三维四向1×1碳纤维T300/环氧(TDE-85)编织复合材料,工艺参数见表1,组分性能参数见表2^[5]。模型预报过程只需输入以上各参数,表3列出了本文预报结果及各对比值。

表1 试件工艺参数

试件	$d_f/\mu\text{m}$	$N_f/10^3$	$\theta/(\circ)$	$\theta/(\circ)$	V_f
1	7.6	9	21	45	0.44
2	7.6	9	21	45	0.45

表2 组分性能参数(模量/GPa)

Table 2 Mechanical property parameters of components (Modulus / GPa)

	E_1	E_2	G_{12}	G_{23}	μ_{12}	μ_{23}	σ_{bf}/MPa	σ_{bm}/MPa	σ_{cm}/MPa
T300 碳纤维	221	13.8	9.0	4.8	0.2	0.25	3000		
TDE-85 树脂	4.5	4.5			0.34	0.34		80	46

表3 数值结果与试验数据

Table 3 Comparison of numerical results with experiment data

试件	弹性模量 E_z/GPa				拉伸强度 σ_b/MPa			
	本文	模型 ^[10]	实验		本文	模型 ^[5]	实验	
			文献[1]	文献[10]			文献[5]	文献[1]
1	68.3	68.0		67.3	667	588		627
2	69.8	68.9		71.1	677			665

由表3可知,本文模型弹性模量 E_z 和实验结果非常吻合,材料拉伸强度与实验基本吻合,表明了本文拉伸强度模型的合理有效性。

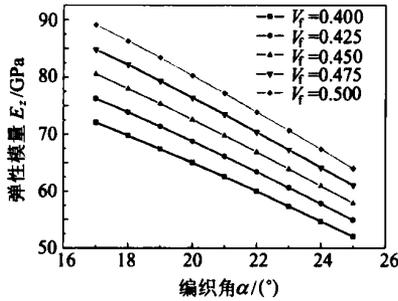
模型数值分析过程表明:材料纤维束内基体首先因平均最大剪应力首先达到基体剪切破坏强度而失效。折减纤维束内基体模量,在同一外荷作用下重新分析单胞应力分布,此时纤维主应力 σ_{11} 和纤维束外基体Mises应力随即导致

了部分纤维正向拉断和基体破坏,造成材料的最终失效。事实上,实验观察发现^[1]:小编织角破坏试件纤维束内基体和纤维界面处具有明显的剪切变形特征,即存在清晰的剪切带,说明材料在破坏前,纤维束内基体承受较大剪切力。所以,这就进一步说明由于纤维束内基体首先因剪切失效而引发纤维正向拉断,最终导致了小编织角试件失效。

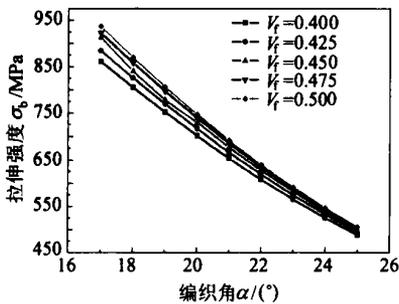
4.1 工艺参数对材料力学参数的影响

现针对表 1 中试件 2,在小编织角范围内,定性分析编织角 α 和纤维体积含量 V_f 对主要力学性能参数和组分应力的影响规律。

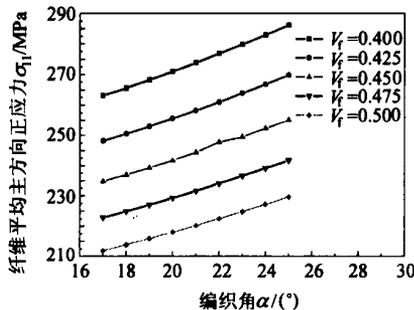
图 4(a) 为编织角 α 和纤维体积含量 V_f 对弹



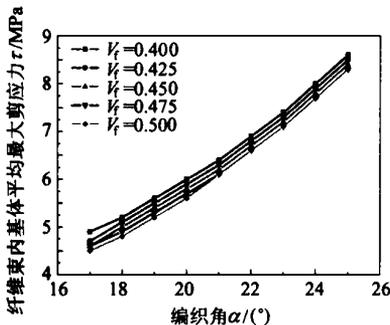
(a) α 及 V_f 对弹性模量 E_z 的影响



(b) α 及 V_f 对拉伸强度 σ_b 的影响



(c) α 及 V_f 对纤维平均主方向正应力 σ_{11} 的影响



(d) α 及 V_f 对纤维束内基体平均最大剪应力 τ 的影响

图 4 α 和 V_f 对力学性能参数和组分应力的影响

Fig. 4 Influence of technics parameters (α and V_f) on mechanical property parameters of material and stresses of component

性模量 E_z 的影响。如图,随着 α 增大, E_z 近似线性迅速减小,可见 E_z 受编织角 α 的影响特别显著。当保持 α 不变时, E_z 随着纤维体积含量 V_f 的增大而迅速增大,但随着 α 增大,增量明显减小。

图 4(b) 为编织角 α 和纤维体积含量 V_f 对拉伸强度 σ_b 的影响。 σ_b 随编织角 α 增大呈近似线性减小。当 α 不变时,随着 V_f 增大,材料拉伸强度 σ_b 逐步增大,且随 α 增大,因 V_f 增加所带来的拉伸强度增量逐步减小。

图 4(c) 为一定载荷水平下纤维平均主方向正应力 σ_{11} 随编织角 α 和 V_f 的影响规律。由图可知,随着编织角 α 的增加,纤维主方向正应力 σ_{11} 近似呈线性增大。当 V_f 增大时, σ_{11} 近似呈线性降低。

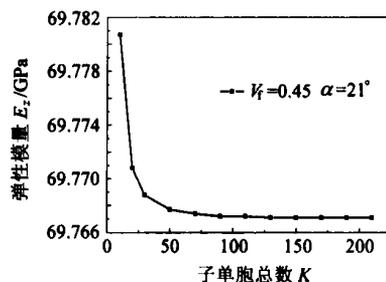
图 4(d) 为纤维束内基体平均最大剪应力 τ 随编织角 α 和 V_f 的影响规律。随着编织角 α 增大, τ 迅速增大,基体受剪切载荷作用明显增强。当编织角 α 不变时,随着 V_f 增加, τ 逐步减小,且随着编织角 α 增大,相同 V_f 所带来的 τ 减小量逐步减小。

可见,即便在小编织角范围内,各参数受 α 和 V_f 影响也十分显著,特别是对编织角 α 极为敏感。

4.2 离散化方法的数值收敛性分析

不同工艺参数材料单胞花节高度 h 各异,模型子单胞数目 K 的选取必然一定程度影响计算结果收敛性及精度。本文选取表 1 试件 2,分析了弹性模量 E_z 、拉伸强度 σ_b 、纤维平均主方向正应力 σ_{11} 和纤维束基体平均最大剪应力 τ 随 K 的变化规律。

图 5(a) ~ 图 5(d) 给出了相应的数值分析结果,当 K 大于 150 时,各力学性能参数和组分应力均无变化,结果已趋于收敛。本文验证及分析例子单胞数 K 均取值为 200,足以保证数值分析结果的收敛性和精度。



(a) K 对弹性模量 E_z 的影响

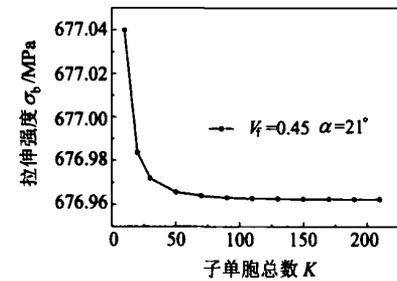
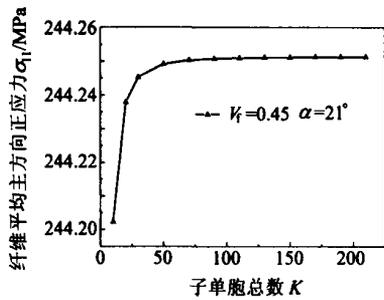
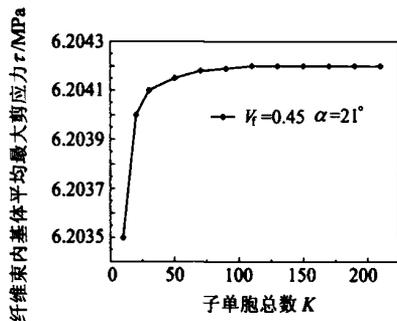
(b) K 对拉伸强度 σ_b 的影响(c) K 对纤维平均主方向正应力 σ_{11} 的影响(d) K 对纤维束内基体平均最大剪应力 τ 的影响图5 子单胞总数 K 对力学性能参数及组分应力的影响

Fig. 5 Influence of K on mechanical property parameters of material and stresses of component

5 结论

结果表明：小编织角试件最终拉伸断裂是由于纤维束内基体首先因剪切失效而引发；树脂基体剪切强度直接影响纤维束承载能力，提高基体材料剪切强度，有利于提高材料的拉伸强度；

随着编织角增大，纤维束内基体所受剪切载荷明显增强，拉伸强度 σ_b 近似线性迅速减小；随着 V_f 的增大，拉伸强度 σ_b 明显增大，但随着编织角增大，相同纤维体积含量增量所带来的拉伸强度增量开始减小；模型子单胞总数 K 与单胞花节高度 h 相关，应注意选取适当的子单胞总数 K ，以保证结果的收敛性。

参考文献

- [1] 卢子兴,冯志海,寇长河,等. 编织复合材料拉伸力学性能的研究[J]. 复合材料学报, 1999, 16(3): 129-134.

Lu Z X, Feng Z H, Kou C H, et al. Studies on tensile properties of braided structural composite materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1999, 16(3): 129-134. (in Chinese)

- [2] Sun H Y, Qiao X. Prediction of the mechanical properties of three-dimensionally braided composites[J]. Composites Science and Technology, 1997, 57(6): 623-629.
- [3] Tang Z X, Postle R. Mechanics of three-dimensional braided structures for composite materials-part 3: nonlinear finite element deformation analysis[J]. Composite Structure, 2002, 55(3): 307-317.
- [4] Zeng T, Fang D N, Ma L, et al. Predicting the nonlinear response and failure of 3D braided composites[J]. Materials Letters, 2004, 58(26): 3237-3241.
- [5] 卢子兴,刘振国,袁汉超,等. 三维编织复合材料强度的数值预报[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(5): 563-565.
- Lu Z X, Liu Z G, Mai H C, et al. Numerical prediction of strength for 3D braided composites[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(5): 563-565. (in Chinese)
- [6] Gu B H. Prediction of the uniaxial tensile curve of 4-step 3-dimensional braided preform[J]. Composite Structure, 2004, 64(2): 235-241.
- [7] Chen L, Tao X M, Choy C L. On the microstructure of three-dimensional braided preforms[J]. Composites Science and Technology, 1999, 59(3): 391-404.
- [8] Zheng X T, Ye T Q. Microstructure analysis of 4-step three-dimensional braided composites[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2003, 16(3): 142-150.
- [9] Huang Z M. Simulation of the mechanical properties of fibrous composites by the bridging micromechanics model[J]. Composites: Part A, 2001, 32(2): 143-172.
- [10] 刘振国,陆萌,袁汉超,等. 三维四向编织复合材料弹性模量数值预报[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(2): 182-185.
- Liu Z G, Lu Meng, Mai H C, et al. Numerical prediction of moduli of 3-D and 4-step braided composites[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 26(2): 182-185.

作者简介:



徐 (1978 -) 男,博士生。主要研究方向:复合材料结构力学、工程问题的力学建模与仿真。
E-mail: xukun@nuaa.edu.cn.

许希武(1963 -) 男,教授,博士生导师。主要研究方向:复合材料结构力学、飞行器结构完整性评定技术、计算力学等领域的研究。

E-mail: xwxu@nuaa.edu.cn.

田静(1983 -) 女,硕士研究生。主要研究方向:工程问题的力学建模与仿真。

E-mail: tjing@nuaa.edu.cn

(责任编辑:李铁柏)