

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.05.019

复合材料单向板偏轴拉伸试验方法的研究

刘璐^{1,2}, 马一凡¹

(1. 西北工业大学航空学院, 西安 710072; 2. 西安航空学院飞行器学院, 西安 710077)

摘要: 通过复合材料单向板的偏轴拉伸试验可以获得材料在拉伸和剪切应力作用下的力学响应, 对于研究复合材料的损伤和失效行为有重要意义。研究了聚醚醚酮(PEEK)/碳纤维(CF)单向板偏轴拉伸试件以及加强片的形式。结合理论分析, 提出了一种带斜角的加强片形式, 并确定了不同偏轴角度下理想的加强片倾斜角度。结合有限元建模分析, 对比了不同加强片形式对偏轴拉伸试件的应力场和变形场分布的影响。结果显示, 使用方形加强片的试件在偏轴拉伸过程中由于偏轴应力影响, 出现应力集中并导致弯曲变形。使用斜形加强片可有效消除试件中的弯矩和应力集中现象。为避免斜形加强片尖端在加载过程中发生脱黏, 进一步提出了对斜形加强片尖端进行倒圆角的优化方法, 并通过有限元建模分析了优化后加强片附近的应力场分布, 与使用未倒角加强片的试件对比发现, 对于偏轴角度小于30°的试件, 所获得的各方向最大应力相差不大, 可采用斜形加强片并倒圆角, 以获得更准确的试验数据。该设计有效改善了加强片尖端处的应力集中问题。

关键词: 纤维增强复合材料; 偏轴拉伸; 加强片; 有限元分析

中图分类号: O3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)05-0116-06

Investigation of the Off-axis Tension Specimen of Fibre Reinforced Composites

Liu Lu^{1,2}, Ma Yifan¹

(1. Department of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Aeronautics, Xi'an Aeronautical Institute, Xi'an 710077, China)

Abstract : The off-axis tension test was critical in understanding the tension/shear coupled damage and failure mechanical behaviour of fibre reinforced composite materials. The off-axis tension specimen and end-tab designs of polyetheretherketone (PEEK)/carbon fiber(CF) unidirectional composite were investigated. A new oblique end-tab for off-axis tension test was developed based on theoretical analysis. The corresponding end-tab oblique angles of PEEK/CF thermoplastic composite off-axis tension specimens with different off-axis angles were calculated. The designs of the off-axis tension specimen and end-tab were investigated using finite element method. The influences of different end-tab geometries on the stress and deformation fields of specimens were evaluated. Results show that bending stresses are generated by the off-axis loading and lead to stress concentrations within the specimens. The oblique end-tab can eliminate the bending movement and even the stress distribution within off-axis specimen. To avoid debonding at the tip of the oblique end-tab during test, an optimization of the oblique end-tab was carried out by chamfering the tip area. The effect of the optimization on the stress distribution was simulated by using finite element analysis. Results show that compared to unchamfered end-tabs, the maximum stresses in different directions are similar for tension specimen with off-axis angles smaller than 30°. It is suggested to use chamfered oblique end-tabs in off-axis tension tests to obtain accurate experimental results. The optimization design eliminates the stress concentration at the tip area of the oblique end-tab.

Keywords : fibre reinforced composite material ; off-axis tension ; end-tab ; finite element analysis

碳纤维(CF)增强热塑性树脂基复合材料性能优异, 具有广泛的应用前景, 因此研究人员也越来越

关注其力学性能表征。由于复合材料中的基体往往具有较高的韧性, 在剪切应力和拉伸应力下塑

基金项目: 国家自然科学基金项目(12072272)

通信作者: 刘璐, 博士研究生在读, 研究方向为固体力学方向

收稿日期: 2023-03-08

引用格式: 刘璐, 马一凡. 复合材料单向板偏轴拉伸试验方法的研究[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(5): 116-121.

Liu Lu, Ma Yifan. Investigation of the off-axis tension specimen of fibre reinforced composites[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(5): 116-121.

性变形明显,在拉/剪和压/剪等组合应力状态下的力学和损伤破坏行为更加复杂。因此,研究纤维增强树脂基复合材料在复杂应力状态下的力学行为和损伤行为对其广泛应用具有非常重要的意义。

纤维增强复合材料在复杂应力状态下普遍表现出非线性力学响应。为研究复合材料的非线性响应,很多学者提出了不同的试验方法。Inoue等^[1]进行了四点弯曲试验以研究复合材料的面内剪切力学响应。Gan等^[2]使用一种改进的Arcan夹具^[3]研究拉/剪和压/剪组合应力状态下复合材料的力学响应。Xiao等^[4]进行了复合材料的偏轴拉伸和偏轴压缩试验。在进行纤维增强树脂基复合材料单向板的偏轴试验时,为了准确获取材料在复杂应力状态下的力学响应,应保证试验段处于均匀的应力状态。实际上,由于偏轴试件的纤维与加载方向呈一定夹角,在夹持处的刚性约束加载下,会出现附加的面内剪切应力和弯矩,导致试验段应力分布不均匀,导致拉-剪耦合效应^[5,7-10]。且该附加力矩无法通过旋转试件夹持端来消除。针对偏轴试验中试件夹持段约束带来的拉伸-剪切耦合问题,研究人员提出了一些改良方法^[6,11-15]。Marín等^[16]在偏轴拉伸试验数据处理时引入修正系数来消除拉-剪耦合效应的影响。

笔者基于ABAQUS有限元软件对聚醚醚酮(PEEK)/CF单向层合板偏轴拉伸试验过程进行了建模分析。通过传统方形加强片与斜形加强片的试验件进行不同角度的偏轴拉伸模拟进行对比,研究加强片对实际试验件应力场分布与变形的影响,并对斜形加强片尖端进行分析与改进,防止出现加强片尖端过于尖锐,粘接不牢导致的脱黏等问题。

$$\begin{aligned}\bar{S}_{11} &= S_{11} \cos^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \sin^4 \theta \\ \bar{S}_{12} &= S_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) + (S_{11} + S_{22} - S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \\ \bar{S}_{22} &= S_{11} \sin^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \cos^4 \theta \\ \bar{S}_{16} &= (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\ \bar{S}_{26} &= (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \\ \bar{S}_{66} &= 4(S_{11} + S_{22} - 2S_{12} - 1/2S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)\end{aligned}\quad (4)$$

材料在x和y方向的位移u和v可表示为:

$$\begin{aligned}u &= \bar{S}_{11} \sigma_0 x + \bar{S}_{16} \sigma_0 y \\ v &= \bar{S}_{12} \sigma_0 y\end{aligned}\quad (5)$$

沿一条直线角度为 ϕ ,如图1所示,使u为常数,

1 试件及加强片设计

为了研究PEEK/CF热塑性复合材料的拉/剪复合应力状态的力学响应及失效行为,笔者分析的单向板正轴和偏轴拉伸试件的偏轴角包括 $0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 。为保证试验过程中试件内应力场分布均匀,应采用具有较高长细比的长方形试件,两端夹持处粘贴玻璃纤维加强片以增加与试验机夹头内的摩擦力。

根据弹性力学,平面应力下单层复合材料的应力-应变关系为:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix}\quad (1)$$

其中,1和2分别为单向板复合材料内纤维方向和面内垂直纤维方向。 S_{ij} 为材料的柔度系数常数,且可由材料弹性常数表示为:

$$S_{11} = \frac{1}{E_1}, S_{22} = \frac{1}{E_2}, S_{66} = \frac{1}{G_{12}}, S_{12} = \frac{-\nu_{21}}{E_1} = \frac{-\nu_{12}}{E_2}\quad (2)$$

其中, E_1 为1方向弹性模量, E_2 为2方向弹性模量, G_{12} 为面内剪切模量, ν_{12} 为2方向泊松比, ν_{21} 为1方向泊松比。

当单向板处于偏轴应力状态下时,材料在x-y加载坐标系下仅受沿加载轴x方向的应力 σ_0 ,其应力-应变关系为:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{16} \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{26} \\ \bar{S}_{16} & \bar{S}_{26} & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}\quad (3)$$

其中, $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 和 γ_{xy} 分别为x方向、y方向和面内剪切应变。 $\bar{S}_{ij}$ 为全局坐标系(x-y坐标系)下的柔度系数矩阵中的常数。 $\bar{S}_{ij}$ 可由材料的正轴柔度系数表示为:

$$\begin{aligned}\bar{S}_{11} &= S_{11} \cos^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \sin^4 \theta \\ \bar{S}_{12} &= S_{12} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta) + (S_{11} + S_{22} - S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta \\ \bar{S}_{22} &= S_{11} \sin^4 \theta + (2S_{12} + S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{22} \cos^4 \theta \\ \bar{S}_{16} &= (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta \\ \bar{S}_{26} &= (2S_{11} - 2S_{12} - S_{66}) \sin^3 \theta \cos \theta - (2S_{22} - 2S_{12} - S_{66}) \sin \theta \cos^3 \theta \\ \bar{S}_{66} &= 4(S_{11} + S_{22} - 2S_{12} - 1/2S_{66}) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + S_{66} (\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)\end{aligned}\quad (4)$$

则 ϕ 可表示为:

$$\cot \phi = -\frac{\bar{S}_{16}}{\bar{S}_{11}}\quad (6)$$

因此,如果在单向板偏轴拉伸试件的两夹持端

采用偏角为 ϕ 的斜向刚性连接,则可以保证沿这条线的垂直方向位移均匀,在试件考核段内产生几乎均匀的应力状态。根据上式,结合所研究材料的基本力学性能,可由式(3)计算得到不同偏轴角度试件所对应的加强片倾斜角度。笔者选择的PEEK/CF热塑性复合材料,其基本力学性能参数见表1,其中, G_{23} 为材料在2~3平面内的剪切模量。

表1 PEEK/CF复合材料基本力学性能

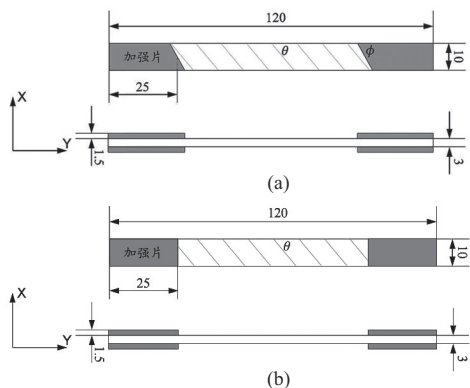
E_1 /GPa	E_2 /GPa	G_{12} /GPa	G_{23} /GPa	ν_{12}	ν_{21}
133	9.08	4.31	4.31	0.3	0.3

由材料的弹性常数计算可得各偏轴角度试件所对应的斜形加强片倾斜角度 ϕ ,见表2。

表2 不同偏轴角 θ 对应的斜形加强片倾斜角 ϕ (°)

偏轴角 θ	0	5	10	15	30	45	60	75	90
倾斜角 ϕ	90	27	22	23	38	59	79	89	90

根据以上分析,分别设计了带方形和斜形加强片的复合材料单向板偏轴拉伸试件,如图1所示。试件几何尺寸为长120 mm,宽10 mm,厚3 mm。试件考核段长70 mm,两加强片总长50 mm。



a—带斜形加强片偏轴拉伸试件;b—带方形加强片偏轴拉伸试件

图1 偏轴拉伸试件设计

2 偏轴拉伸试验有限元分析

采用PEEK/CF增强热塑性复合材料(牌号:Cetex TC1200 热塑性复合材料,荷兰东丽公司生产),其中基体材料为热塑性树脂PEEK,增强相为牌号为AS4的CF材料。设计的PEEK/CF单向板偏轴拉伸试件及加强片如图1所示,试件长120 mm、宽10 mm、厚3 mm,铺层设计为 $[0]_{20}$ 单向板,材料基本力学参数见表1。

设计的矩形加强片和斜形加强片如图1所示。加强片材料使用玻璃纤维环氧树脂,假设加强片材料为各向同性,由长50 mm、宽10 mm、厚1.5 mm的长方体切割成两块制成,其弹性模量 E 为27.58

GPa,泊松比 ν_{12} 为0.34。

分别建立了不同偏轴角试件和加强片的三维实体模型。考虑到加强片在拉伸过程中的变形,为加强片和试件分别建立模型并组合。在划分网格时保证加强片与试件在接触面部分节点对应,网格使用八节点六面体线性缩减积分单元(C3D8R)。为尽量符合偏轴拉伸试验时的真实边界条件和加载方式,通过建立参考点并与加强片的夹持面建立MPC连接,对参考点施加位移载荷来实现加载过程。采用Abaqus/Standard求解器进行模型的准静态分析。完整试件模型如图2所示。

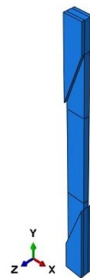


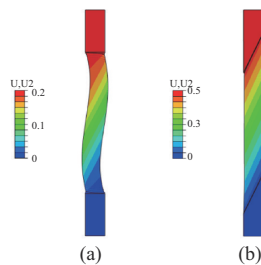
图2 15°偏轴拉伸试件及加强片有限元模型

为使在不增加过多计算量的前提下保证分析结果足够准确,有限元分析使用面内大小为 0.5 mm^2 ,层间厚度为0.3 mm的网格进行。

3 有限元模拟结果分析

3.1 小角度偏轴拉伸

对于偏轴角度较小的偏轴拉伸试件(5° , 10° , 15° 和 30°),由于所使用的斜形加强片尖角较为尖锐,且应力场分布较为相似,因此选取 15° 偏轴拉伸试件为例,根据有限元计算结果,对比分析方形加强片和斜形加强片对试件应力分布和变形的影响。图3为在试件拉伸方向施加0.2 mm位移载荷后变形云图。由图3可知,使用方形加强片的试件产生了明显弯曲变形,而使用斜形加强片的试件位移场沿纤维排列方向均匀分布,试件未发生变形。可以看出,使用斜形加强片可有效改善试件内应力分



a—带方形加强片试件;b—带斜形加强片试件

图3 15°偏轴拉伸试件位移云图

布,消除偏轴试件在拉伸时产生的弯曲力矩。

为方便对比使用不同加强片的试件的应力水平,使用拉伸过程中的名义应力 σ_0 来表征试件内各方向的应力状态。名义应力 σ_0 定义如下:

$$\sigma_0 = \frac{F_i}{S_0} \quad (7)$$

其中, F_i 为作用在加强片参考点上的y轴拉力; S_0 为试件初始横截面积,本文中试件横截面积为 $3 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ 。作用在方形加强片参考点和斜形加强片参考点上的y轴方向载荷与名义应力分别为:方形加强片试件拉力 $F_{\text{方}} = 3954 \text{ N}$,方形加强片试件名义应力 $\sigma_{0\text{方}} = 131.80 \text{ MPa}$,斜形加强片试件拉力 $F_{\text{斜}} = 3648 \text{ N}$,斜形加强片试件名义应力为 $\sigma_{0\text{斜}} = 121.60 \text{ MPa}$ 。由对比可知,在相同位移载荷下,使用方形加强片的试件端部加载拉力比斜形加强片试件更大,且具有更高的名义应力,这是由于带方形加强片的试件由于弯曲变形产生的严重的应力集中所导致的。该应力集中会引起试件过早失效,造成实验结果误差。图4为对模型施加 0.2 mm 位移载荷后使用不同加强片的 15° 偏轴拉伸试件各方向

的应力场分布。由图4可看出,在试件靠近加强片部分,有明显的应力集中现象,且带方形加强片的试件应力分布分散,十分不均匀,在试件与加强片连接的区域存在明显应力集中,且最大应力出现在两个加强片靠近侧边位置,在试件中产生面内弯矩,引起试件弯曲,仅在靠近试件中心的部分应力分布较为均匀;如图4a,4b所示,斜形加强片试件垂直于加载方向最大应力大于使用方形加强片的试件;斜形加强片试件的加载方向最大应力值远小于带方形加强片的试件(见图4c,4d),应力集中程度较小,试件考核段整体应力分布均匀,仅在试件与加强片连接区域存在一定程度的应力集中,且该区域应力均匀分布。由应力云图对比可以看出,使用斜形加强片的试件各方向应力集中均远小于使用方形加强片的试件,极大地改善了试件内的剪应力场分布,使对偏轴试件的拉伸和剪切力学响应分布更准确。

3.2 大角度偏轴拉伸

对于偏轴角度大于 30° 的试件,其对应的斜形加强片倾斜角度较大,加强片尖端处较为平缓,应力场分布较为相似。故选取 60° 偏轴拉伸试件为例,分析使用不同加强片的大角度偏轴试件的应力场变化。

图5为试件拉伸方向的位移变形结果。由图5可以看出,使用方形加强片的试件仍存在弯曲变形,但较 15° 偏轴拉伸试件弯曲程度减小,带斜形加强片的试件变形均匀,未发生变形。

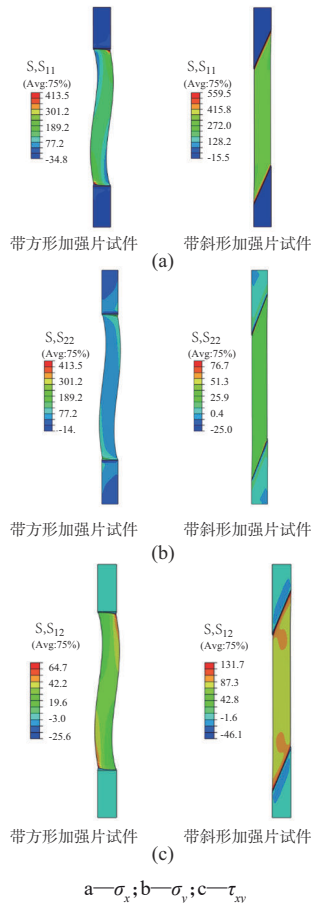


图4 15° 偏轴拉伸试件应力分布云图

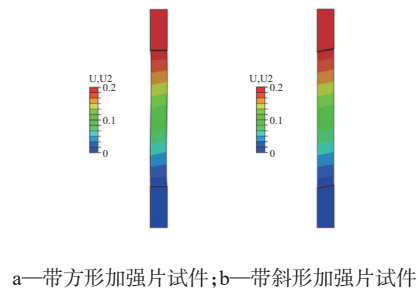


图5 60° 偏轴拉伸试件位移云图

60° 偏轴拉伸试件在对参考点y轴施加 0.2 mm 位移载荷时,带方形加强片的试件在加载方向拉力为 $F_{\text{方}} = 781 \text{ N}$;带斜形加强片试件在加载方向拉力为 $F_{\text{斜}} = 780.1 \text{ N}$ 。带方形加强片试件的名义应力为 $\sigma_{0\text{方}} = 26.06 \text{ MPa}$;带斜形加强片的试件名义应力为 $\sigma_{0\text{斜}} = 26.03 \text{ MPa}$ 。带方形加强片和斜形加强片试件的拉伸名义应力相同。此时试件内拉-剪耦合效应对材料的强度基本无影响,使用方形加强片不会产

生明显试验误差。

图 6 为施加 0.2 mm 位移载荷后 60° 偏轴拉伸试件各方向的应力场分布。由图中可以看出,在试件偏轴角增加至 60° 后,试件内横向应力占主导,拉伸和剪切应力水平较低,耦合效应不明显。因此,使用方形加强片和斜形加强片均可获得较为理想的应力场分布,对试验结果分析影响很小。

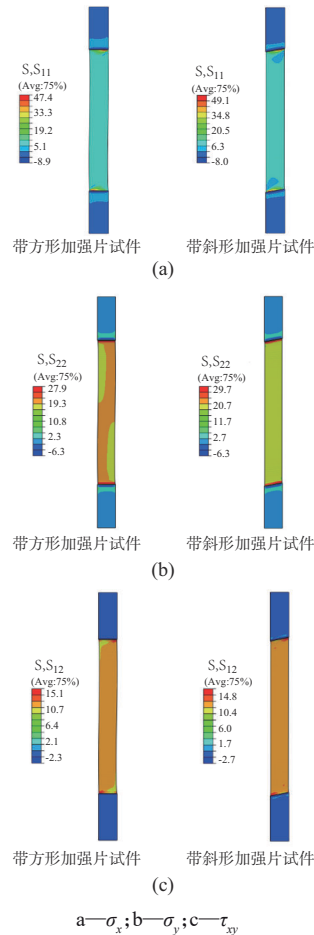


图 6 60° 偏轴拉伸试件应力分布云图

表 3 和表 4 为施加 0.2 mm 位移载荷时,各偏轴角度下使用方形加强片和斜形加强片的试件在各方向上的最大应力。由两模型各方向最大应力对比可以看出,在偏轴角度小于 30° 时,由于材料的拉-剪耦合效应较明显,使用方形加强片会导致测得的各方向最大应力产生严重偏差,而使用斜形加强片可有效消除试件内由于拉-剪耦合引起的应力集中现象,减少了偏轴拉伸试验误差;在偏轴角度大于 60° 时,纤维偏转对试件内应力场分布影响较小,因此拉-剪耦合效应不明显,使用方形加强片和斜形加强片均可获得较理想的试验结果。

表 3 带方形加强片偏轴拉伸试件各方向最大应力

偏轴角/ (°)	最大横向应力/ MPa	最大拉伸应力/ MPa	最大剪切应力/ MPa
0	15.9	473.1	4.64
5	21.2	629.4	34.3
10	26.2	561.9	61.7
15	30.1	412.4	70.1
30	33.5	166.2	48.7
45	34.3	69.2	27.2
60	30.5	41.6	14.1
75	20.7	34.4	5.4
90	7.58	32.7	0

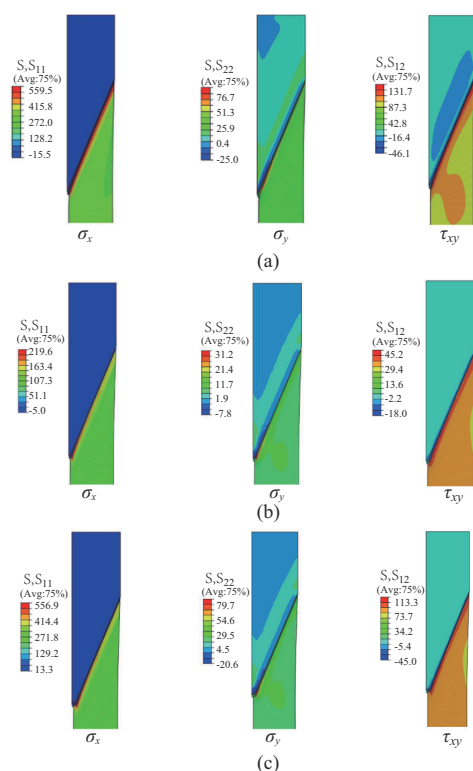
表 4 带斜形加强片偏轴拉伸试件各方向最大应力

偏轴角/(°)	最大横向应力/ MPa	最大拉伸应力/ MPa	最大剪切应力/ MPa
0	/	/	/
5	14.5	432.4	6.54
10	16.3	312.2	7.45
15	15.6	228.9	6.47
30	21.8	94.7	19.2
45	29.9	70.3	25.8
60	32.1	40.2	15.2
75	19.7	34.2	5.8
90	/	/	/

3.3 倒圆角对结果的影响

尽管斜形加强片可有效消除偏轴拉伸过程中拉-剪耦合效应的影响,消去弯曲变形,获得均匀分布的应力场,但实际试验过程中,对于较小偏轴角度试件进行拉伸时,由于斜形加强片尖角过于尖锐,且加强片与试件接合边缘处应力集中较明显,易使尖端粘接部分脱胶,进而导致加强片整体脱黏。为进一步改进该斜形加强片设计,可对加强片尖端部分进行倒圆角处理,以消除尖角,增加加强片黏合强度。

图 7 为未使用和使用倒圆角斜形加强片的 15° 偏轴拉伸试件在加强片和试件接合处各方向的应力场分布。对尖角进行 $R=1\text{ mm}$ 倒圆角处理后,试件考核段末端应力云图如图 7c 所示。对比使用原始和倒角后的斜形加强片的试件应力场分布可以看出,倒圆角处理可以有效地减小拐角处的应力集中程度,拉伸方向、垂直于拉伸方向和面内剪切最大应力与未处理的斜形加强片试件各方向的最大应力几乎相同。因此在偏轴角度较低,斜形加强片角度尖锐的情况下,加工加强片试件时,可以进行倒角处理,既可以削去尖角,防止出现尖端脱胶的情况,同时对试件的应力场分布影响很小。



a—未使用倒角;b—倒角半径0.5 mm;c—倒角半径1 mm

图7 未使用和使用倒圆角斜形加强片的15°偏轴拉伸试件应力场分布

4 结论

(1) 提出用于复合材料单向板偏轴拉伸试件的斜形加强片,并对该加强片的倾斜角度进行理论分析,得到了不同偏轴角度下斜形加强片的对应倾斜角度。

(2) 通过有限元方法分析了使用方形加强片和斜形加强片的复合材料单向板偏轴拉伸试件的变形和应力场分布,对比方形加强片,使用斜形加强片可有效消除复合材料偏轴拉伸时由拉-剪耦合效应所引起的试件弯曲和应力集中现象。

(3) 对于偏轴角度小于30°的试件,试件的弯曲程度和应力集中均较为显著,使用方形加强片和斜形加强片所获得的各方向最大应力相差较大,宜采用斜形加强片,获得更准确的试验数据;对于偏轴角度大于60°的试件,其面内剪切力和弯矩很小,应力场分布趋于均匀,使用方形加强片和斜形加强片的试件最大应力基本相同。

(4) 对斜形加强片尖角进行倒圆角处理,对试件和加强片接合处的应力场分布基本无影响,且在试验时可避免加强片尖端脱胶失效。

参考文献

[1] Inoue H, Takanashi M, Nakamura T, et al. Modified asymmetric four-point bend test method for in-plane shear properties of ceramic

matrix composites at elevated temperatures: Ceramic Engineering and Science Proceedings Volume 37, Issue 2[M/OL]//Mechanical Properties and Performance of Engineering Ceramics and Composites XI. 2019:53–60.

- [2] Gan K W, Laux T, Taher S T, et al. A novel fixture for determining the tension/compression-shear failure envelope of multidirectional composite laminates[J/OL]. Composite Structures, 2018, 184: 662–673.
- [3] De Sousa Junior R R, Gouveia J R, Ito N M, et al. Failure prediction of hybrid composite using Arcan's device and Drucker-Prager model[J/OL]. Polymer Testing, 2017, 58:256–261.
- [4] Xiao Y, Kawai M, Hatta H. An integrated method for off-axis tension and compression testing of unidirectional composites[J/OL]. Journal of Composite Materials, 2020, 45(6):657–669.
- [5] Pagano N J, Halpin J C. Influence of end constraint in the testing of anisotropic bodies[M/OL]//REDDY J N. mechanics of composite materials: Selected Works of Nicholas J. Pagano. Dordrecht: Springer Netherlands, 2021:2–16.
- [6] Pierron F, Alloba E, Surrel Y, et al. Whole-field assessment of the effects of boundary conditions on the strain field in off-axis tensile testing of unidirectional composites[J/OL]. Composites Science and Technology, 2018, 58(12):1 939–1 947.
- [7] Richaeds G L, Airhart T P, Ashton J E. Off-axis tensile coupon testing[J/OL]. Journal of Composite Materials, 2019, 3(3):586–589.
- [8] Pipes R B, Cole B W. On the off-axis strength test for anisotropic materials1[J/OL]. Journal of Composite Materials, 2019, 7(2): 246–256.
- [9] Sun C T, Berreth S P. A new end tab design for off-axis tension test of composite materials[J/OL]. Journal of Composite Materials, 2008, 22(8):766–779.
- [10] Chang B W, Huang P H, Smith D G. A pinned-end fixture for off-axis testing[J/OL]. Experimental Techniques, 2022, 8(6):28–30.
- [11] Chamis C C, Sinclair J H. Ten-deg off-axis test for shear properties in fiber composites[J/OL]. Experimental Mechanics, 2021, 17 (9):339–346.
- [12] Cron S M, Palazotto A N, Sandhu R S. The improvement of end-boundary conditions for off-axis tension specimen use[J/OL]. Experimental Mechanics, 2018, 28(1):14–19.
- [13] Sun C T, Chung I. An oblique end-tab design for testing off-axis composite specimens[J/OL]. Composites, 2021, 24(8):619–623.
- [14] Pierron F, Vautrin A. The 10° off-axis tensile test: A critical approach[J/OL]. Composites Science and Technology, 2020, 56 (4):483–488.
- [15] Kawai M, Morishita M, Saton H, et al. Effects of end-tab shape on strain field of unidirectional carbon/epoxy composite specimens subjected to off-axis tension[J/OL]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 28(3):267–275.
- [16] Marin J C, Canas J, Paris F, et al. Determination of G12 by means of the off-axis tension test. Part I: review of gripping systems and correction factors[J/OL]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022, 33(1):87–100.