

2.5D 机织石英纤维增强树脂复合材料 不同方向力学性能测试与模量预测

王雅娜^{*1, 2, 3}, 曾安民⁴, 陈新文^{1, 2, 3}, 王翔^{1, 2, 3}

(1. 中国航发北京航空材料研究院 检测研究中心, 北京 100095; 2. 航空材料检测与评价北京市重点实验室, 北京 100095;
3. 中国航空发动机集团材料检测与评价重点实验室, 北京 100095; 4. 中航复合材料有限责任公司, 北京 101300)

摘 要: 石英纤维增强树脂复合材料常用于多物理场耦合环境下, 为保证足够的层间性能, 常采用 2.5D 机织的结构形式。本文对一种浅交弯联 2.5D 机织石英纤维增强双马树脂复合材料的三维力学性能进行全面测试, 对比分析了材料在不同方向的拉伸性能和压缩性能, 以及面内、面外剪切性能。测试结果表明, 该复合材料的纬向拉伸、压缩模量略高于经向, 而拉伸、压缩强度远高于经向, 导致经向和纬向拉、压破坏模式差异显著, 拉伸时弯曲的经向纤维被拉断, 平直的纬向纤维撕裂, 压缩时平直的纬向纤维压断, 弯曲的经向纤维屈曲。同时, 该种材料具有较高的面内、面外剪切变形能力。此外, 本文基于混合定律, 提出了一个 2.5D 机织复合材料经、纬向模量估算公式。基于材料微观结构特征, 以包含经纱和纬纱的一个单胞作为代表性体积单元, 建立有限元模型, 预测该 2.5D 机织复合材料经向模量, 预测结果与试验结果吻合很好。本文的研究对 2.5D 机织石英纤维/双马树脂复合材料的研发具有一定的指导意义。

关键词: 复合材料; 2.5D 机织; 石英纤维; 力学性能; 试验研究

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2019)06-1364-10

Mechanical properties testing for 2.5D quartz fiber reinforced resin composites in different directions and module prediction

WANG Ya'na^{*1, 2, 3}, ZENG Anmin⁴, CHEN Xinwen^{1, 2, 3}, WANG Xiang^{1, 2, 3}

(1. Aeronautical Material Testing Research Center, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. Beijing Key Laboratory of Aeronautical Material Testing and Evaluation, Beijing 100095, China;
3. Key Laboratory of Aeronautical Material Testing and Evaluation, Aero Engine Corporation of China, Beijing 100095, China; 4. AVIC Composite Corporation Ltd, Beijing 101300, China)

Abstract: Quartz fiber reinforced composites are often used in multi-field coupling environments. To ensure enough interlaminar performances, quartz fiber reinforced composites often exist in the form of 2.5D braided structures. In this paper, the three dimensional mechanical properties of a 2.5D quartz fiber reinforced bismaleimide resin composites (shallow bend-joint) were comprehensively tested. The tensile and compressive properties in different directions, and in-plane and out-of-plane shear property were compared and analyzed. It has been found that the tensile and compressive module of the warp direction are slightly higher than those of the weft direction, while the tensile and compressive strength of the warp direction are significantly higher than those of the weft direction. Tensile and compressive failure modes of the material in the warp and weft direction are significantly different. In case of tension, the waved warp fibers are pulled out, and the straight weft fibers are split. In case of compression, the straight weft fibers are broken, and the waved warp fibers buckling happen. The material shows high shear deform-

收稿日期: 2018-06-19; 录用日期: 2018-08-15; 网络出版时间: 2018-09-11 15:09

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20180909.1945.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金 (11672279)

通讯作者: 王雅娜, 博士, 工程师, 研究方向为复合材料材料力学性能测试与表征 E-mail: wangyana198833@163.com

引用格式: 王雅娜, 曾安民, 陈新文, 等. 2.5D 机织石英纤维增强树脂复合材料不同方向力学性能测试与模量预测[J]. 复合材料学报, 2019, 36(6): 1364-1373.

WANG Y N, ZENG A M, CHEN X W, et al. Mechanical properties testing for 2.5D quartz fiber reinforced resin composites in different directions and module prediction[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(6): 1364-1373 (in Chinese).

ation capacities in both the in-plane and out-of-plane directions. Besides, a formula for estimating the tensile modulus of the 2.5D material was proposed based on the rule of mixtures of unidirectional composites. Based on the microstructure characteristics of the material, a unit cell containing warp and weft yarns was used as a representative volume unit to establish the finite element model, and the meridional modulus of the 2.5D woven composite was predicted. The prediction results are in good agreement with the experimental results. This study can provide some guidance for the development of the 2.5D quartz fiber/bismaleimide composites.

Keywords: composites; 2.5D braided; quartz fiber; mechanical properties; experimental investigation

石英纤维具有耐高温、耐烧蚀、抗热震等特性，并具有优良的机械性能、电绝缘性能、介电性能，在多物理场耦合的载荷环境下表现突出，已被用于航空航天、军工、半导体等领域^[1-3]。鉴于石英纤维增强树脂复合材料常服役于严苛的环境下，对其层间力学性能的要求较高，故在实际应用中常以三维编织的结构形式存在^[4-6]。三维编织复合材料有多种结构形式，2.5D 编织复合材料是其中一个主要分支^[7]。2.5D 编织结构既可避免二维编织复合材料层间性能差的缺点，又具有工艺简单、制造成本低、容易制成回转构件等优点^[8]。

针对具有不同基体材料的 2.5D 编织石英纤维增强树脂复合材料的力学性能，国内外学者已开展了一些相关研究。李杰等^[9]对 2.5D 编织石英/酚醛复合材料不同方向的拉伸、弯曲、压缩力学性能进行了对比研究，于佩志等^[10]对 2.5D 编织石英纤维增强 SiO₂ 复合材料的弯曲性能测试方法开展探索性研究。Liu 等^[11-12]研究了 2.5D 编织浅交弯联编织的石英/SiO₂ 复合材料力学行为和微观结构。然而，目前关于 2.5D 编织石英纤维增强树脂复合材料力学性能的研究仍不足，力学性能数据较少，研究工作不够系统、完善，有待开展更多的研究工作。

本文对一种 2.5D 机织石英纤维增强双马树脂复合材料不同方向的力学性能进行全面测试分析，获得了经向、纬向拉伸/压缩弹性模量和强度、厚度方向的压缩模量和强度，面内剪切模量，短梁强度（表征面外剪切性能）等。对测试结果进行对比分析，研究了该 2.5D 机织复合材料不同方向、不同力学响应的规律。基于单向纤维增强树脂基复合材料模量预测的混合定律，提出了一个 2.5D 机织复合材料经、纬向料拉伸模量估算公式。以包含经纱和纬纱的一个单胞作为代表性体积单元，建立了一个该 2.5D 机织石英纤维增强树脂复合材料经向模量预测的数值模型。本文的研究有望为 2.5D 机织石英纤维增强树脂复合材料编织结构和材料刚度的剪

裁设计提供有用的指导。

1 试验材料及方法

2.5D 机织石英纤维增强双马树脂复合材料由湖北菲利华生产。该 2.5D 复合材料具有浅交弯联的编织结构，图 1 为该编织结构的示意图。石英纤维的经纱细度为 190 g/km，经纱细度为 190 g/km×2 股。纬纱密度为 10 根/cm，纬纱密度为 4 根/cm，总的纤维体积分数为 45.5%。

该 2.5D 复合材料预制体采用机织方式，机织工艺是由织机综框按照特定的升降运动程序形成，机织过程中对织物尺寸、织物经纬密度、织物厚度、织物面密度等参数进行精密控制^[13]。然后，采用树脂传递模塑工艺(RTM)，使机织预制体渗入树脂，并固化成型得到 2.5D 机织复合材料。图 2 展示了该 2.5D 机织石英纤维增强双马树脂复合材料沿经纱和纬纱方向的截面形貌，其中图 2(a)展示了经向任意截面的形貌示意图，可见经纱是弯曲的，呈近似正弦函数的形状；图 2(b)展示了纬向截

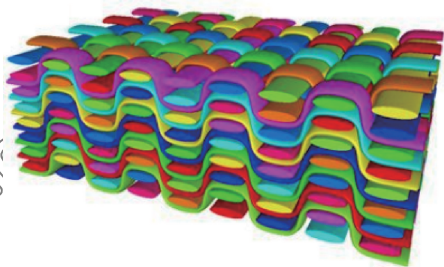


图 1 浅交弯联的纱线结构示意图^[14]

Fig. 1 Sketch of braided structure of shallow bend-joint



(a) In warp direction

(b) In weft direction

图 2 2.5D 机织石英/双马树脂复合材料经向和纬向截面形貌

Fig. 2 Cross-sectional morphologies of 2.5D quartz/bismaleimide resin composites along warp and weft directions

面的形貌示意图,可见经纬是平直的。

为获得 2.5D 机织石英纤维增强双马树脂复合材料不同方向的拉、压、剪切力学性能,制备了 7 种试件,分别为:经向拉伸、纬向拉伸、经向压缩、纬向压缩、厚度方向(T 向)压缩、面内剪切、面外剪切试件。图 3 展示了用于不同力学性能测试的试件。经向和纬向拉伸与压缩试验均采用矩形条状试件,试验件含有 16 层纬纱,其中经向拉伸/压缩试样中弯曲的经纱沿着试件长度方向,纬向拉伸/压缩试样中平直的纬纱垂直于试件长度方向,试件的名义尺寸为:拉伸试件为 250 mm 长×25 mm 宽×6 mm 厚,压缩试件为 140 长×12 mm 宽×6 mm 厚。为避免试验件在承受单轴拉伸时端部因应力集中而发生提前破坏,在试件两端粘贴玻璃纤维织物的加强片。T 向压缩试验采用圆柱形试件,试件的名义尺寸为:30 mm 长×10 mm 直径。面内剪切性能测试采用 V 型缺口梁的试件,含有 16 层纬纱,弯曲的经纱沿着试件长度方向,试件的名义尺寸为 76 mm 长×20 mm 宽×6 mm 厚,槽口间距为 12 mm,槽口深度为 4 mm。相比于普通的层板复合材料,该 2.5D 石英机织复合材料事实上无传统的层间概念,为评估该材料承受面外载荷的能力,采用短梁剪切试验测量材料的短梁强度,以表征材料经纬层间抵抗剪切变形的能力。试验采用矩形条状短梁试件,含有 16 层纬纱,弯曲经纱沿试件长度方向分布,试件名义尺寸为 20 mm 长×6 mm 宽×6 mm 厚。

2.5D 机织石英/双马树脂复合材料的力学测试在 Instron 250 kN 电子万能试验机上进行。目前尚未有专门针对 2.5D 复合材料的力学性能测试方法,本文开展的 2.5D 机织石英/双马树脂复合材料测试均参考现存的树脂基复合材料的力学性能测试方法。经向和纬向拉伸试验方法参照 ASTM

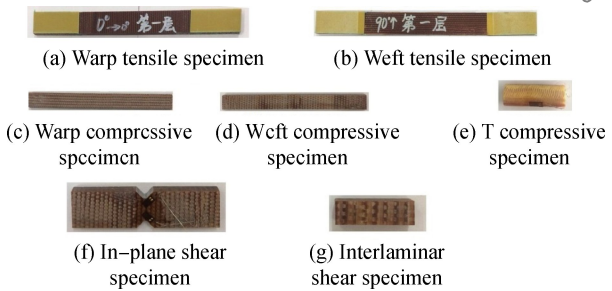


图 3 不同力学性能测试 2.5D 机织石英/双马树脂试件
Fig. 3 Test specimens of 2.5D quartz fiber/bismaleimide composites for different mechanical properties

D3039^[15]进行,加载速率为 1 mm/min,采用引伸计获得加载过程中材料的刚度信息。经向和纬向压缩试验参照 ASTM 6641^[16]进行,T 向压缩测试参照 GB/T1448^[17],加载速率为 1 mm/min,采用应变片配合静态应变仪获得压缩应变。面内剪切测试参照 ASTM 5379^[18],在 V 形缺口梁试验件工作段加载轴线的中心,与加载轴线成+45°和-45°方向黏贴两个应变片,加载速度为 1 mm/min。面外(层间)剪切采用短梁试验,参照 ASTM 2344^[19]。鉴于试件较厚,无法采用推荐的跨厚比(数值为 4),本文测试中采用的垮厚比为 3,加载速度为 1 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 2.5D 石英/双马树脂复合材料不同方向拉伸性能

图 4(a)展示了 2.5D 机织石英/双马树脂复合材料经向拉伸的载荷-位移曲线及其失效模式。该

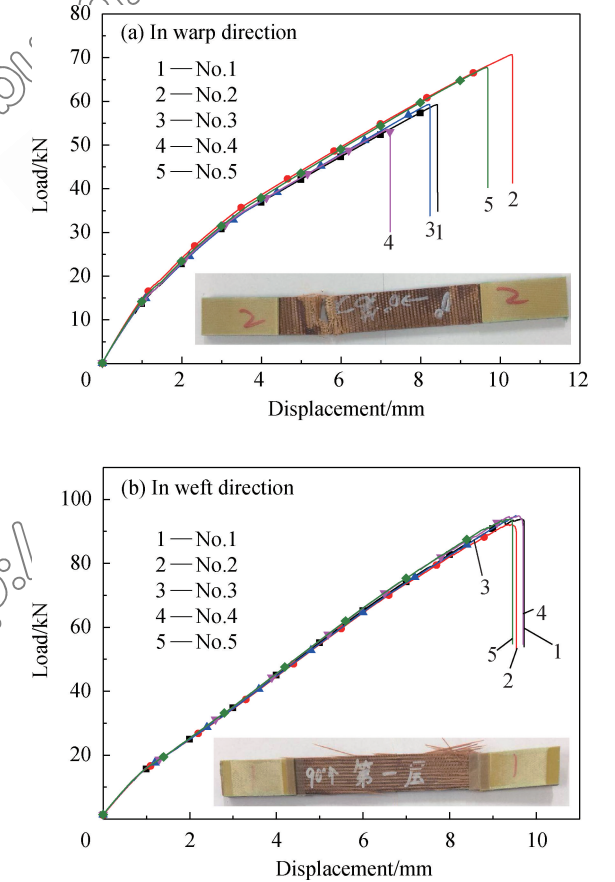


图 4 2.5D 机织石英/双马树脂复合材料经向和纬向拉伸
载荷-位移曲线及其破坏模式
Fig. 4 Tensile load-displacement curves and failure modes of 2.5D quartz fiber/bismaleimide resin composites in warp and weft directions

材料经向拉伸载荷-位移响应呈显著的非线性行为，整个加载过程中刚度逐渐降低。经向拉伸试件的失效模式为工作段拉断，仔细观察断口，发现弯曲的经纱断裂导致最终破坏。图 4(b)展示了纬向拉伸载荷-位移曲线，可见由于加载过程中基体发生提前损伤，纬向拉伸载荷-位移响应明显分为两段，分割点大约在 1 mm 位移处，前后两段载荷-位移曲线均呈现较好的线性特征。加载 1 mm 后刚度的下降被认为与加载过程中基体发生提前损伤有关。纬向拉伸试件的失效模式为工作段劈裂和靠近加强片根部处断裂，仔细观察断口，发现材料沿着纤维方向基体开裂严重，纬纱与基体界面脱粘，但纬纱本身断裂并不严重。

对比经向和纬向拉伸的载荷-位移曲线，可见，在加载初期，纬向拉伸刚度的降低比经向拉伸刚度明显，一方面是由于经向纤维体积分数含量比纬向高，纤维对经向刚度的影响占主导，故基体损伤对材料经向刚度的影响不如对纬向刚度的影响显著。另一方面由于弯曲的经纱变形能力大，在拉伸过程中随基体一起变形，不会由于纤维/基体界面破坏而造成基体提早开裂，而平直的纬纱变形能力极小，跟不上基体的变形，在加载 1 mm 后因纤维/基体界面损坏而提前开裂，此后基体将不会对模量有贡献。同时，经向和纬向拉伸的破坏模式也验证了上述分析，经向拉伸破坏是弯曲的经纱被拉断，材料中基体开裂不严重，而纬向拉伸最终破坏表现为大范围的纤维/基体脱粘，沿纤维方向基体开裂严重，导致纬纱劈裂后被拉断。

2.5D 机织石英/双马树脂复合材料经、纬向拉伸模量和强度如表 1 所示，可见经向拉伸模量稍低于纬向，而经向拉伸强度远远低于纬向，仅为纬向强度的 62%。虽然经纱含量是纬纱的 2.5 倍，但由于经纱呈弯曲形状，造成纤维拉伸性能下降，而纬纱直线分布，对纤维性能无损害。此外，根据表 1 中数据，经向拉伸强度具有极高的分散性，这是由于弯曲的经纱更容易引入各种随机分布的初始缺陷。

2.2 2.5D 石英/双马树脂复合材料不同方向压缩性能

图 5(a)~5(c)分别展示了 2.5D 机织石英/双马树脂复合材料经向、纬向和厚度方向压缩的载荷-位移曲线及失效模式。对比不同方向压缩的载荷-位移曲线，经向和纬向压缩的载荷-位移响应在

表 1 2.5D 机织石英/双马树脂复合材料经向和纬向拉伸力学性能对比

Table 1 Tensile mechanical properties of 2.5D braided quartz/bismaleimide resin composites in warp and weft directions

No.	Elastic modulus/GPa		Strength/MPa	
	Warp	Weft	Warp	Weft
1	16.6	18.6	342.4	582.0
2	18.3	19.1	409.4	581.0
3	17.9	18.8	345.4	568.0
4	17.2	19.6	313.2	591.0
5	17.9	20.6	392.5	586.0
Average	17.6	19.3	360.5	581.6
CV/%	3.9	4.1	10.9	1.5

Note: CV—Coefficient of variation.

破坏之前均能保持很好的线性，其中经向压缩破坏是瞬态的，一旦达到最大压缩载荷，试件瞬间被压溃，失去承载能力；纬向压缩破坏则不然，初始压缩损伤发生后，试件的压缩载荷还会波动地上升，直到达到载荷最大值。厚度方向(T 向)的压缩载荷-位移响应与其他两个方向差异明显，具有明显的屈服阶段，载荷达到一定程度后，载荷-位移曲线会逐渐偏离线性，压缩刚度逐渐下降，在加载最后阶段材料表现出屈服行为，当载荷达到最大值后，试件被压溃，承载能力随之下降。

对比不同方向压缩的试件破坏模式，经向压缩试件工作段发生明显屈曲，断口与载荷方向呈一定角度，断口处基体开裂和纤维/基体界面破坏严重，弯曲的经纱具有较高的变形能力而得到保护，未被压断。纬度压缩试件在工作段处发生挤压膨胀后而被压断，断口呈楔形，与载荷方向呈现一定角度，纬纱全部被剪断。T 向压缩则呈现为试件被压溃，断口是与载荷方向大约呈 45°的斜截面，说明试件是由于剪应力控制发生的破坏。

2.5D 机织石英/双马树脂复合材料经向、纬向、T 向压缩模量和强度的测试结果如表 2 所示，纬向压缩模量稍高于经向，而经向压缩模量又高于 T 向。从强度来看，纬向压缩强度最高，T 向压缩强度次之，经向压缩强度最低，其中经向压缩强度仅能达到纬向压缩强度的 49%。可见本文研究的 2.5D 机织石英/双马树脂复合材料 3 个方向中，纬向的压缩性能最好。对比上一节材料拉伸性能的测试结果，经向压缩强度占纬向压缩强度的比例更低，这是由于弯曲的经纱对压缩载荷的承载能力很小，已提早发生屈曲，最终压缩破坏是基体由于剪切而发生开裂，此时对应载荷的突降。树脂本身的

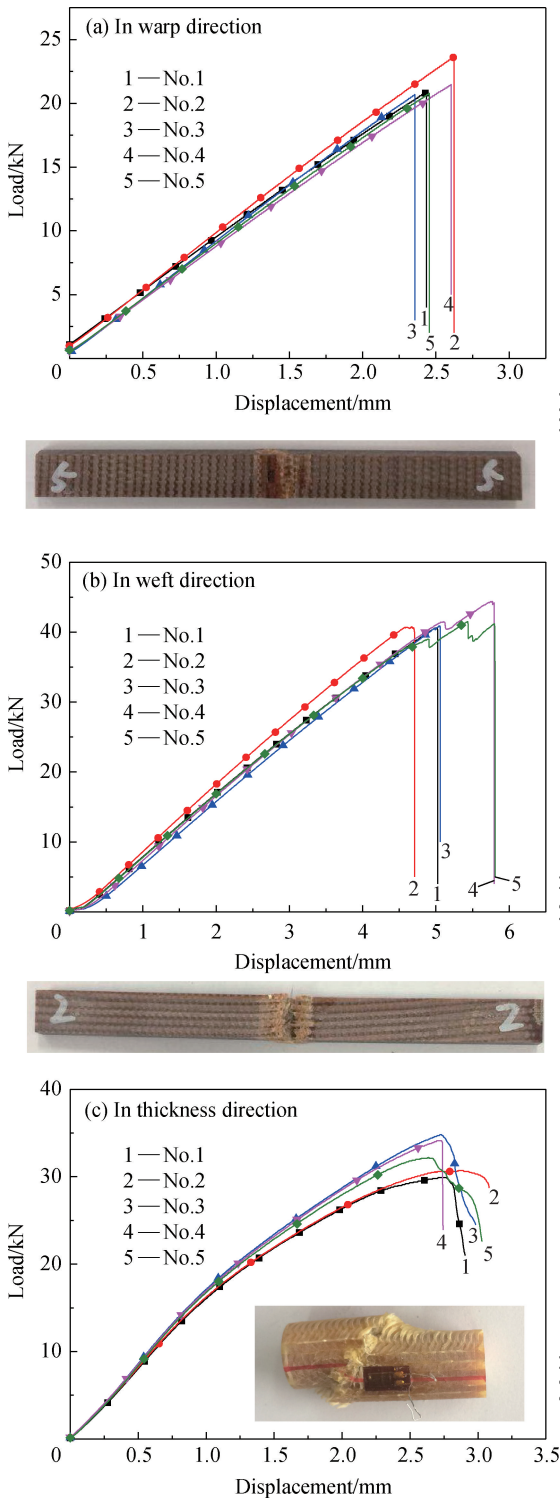


图5 2.5D机织石英/双马树脂复合材料经向、纬向及T向压缩试件的载荷-位移曲线

Fig. 5 Compressive load-displacement curves of 2.5D quartz fiber/bismaleimide resin composites in warp, weft and thickness directions

强度大约为200 MPa，经向压缩强度仅为287 MPa，这也从另一个侧面验证了上述结论^[20]。相比而言，纬纱为直纤维束，不容易发生屈曲破坏，能够较好

地承受压缩载荷，材料纬向的压缩破坏过程是：基体首先发生损伤，基体损伤累积导致局部纬纱Kinking，随后载荷逐渐传递给周围尚未发生破坏的纬纱，最终所有的纬纱被剪断。由于纬向压缩破坏是一个逐渐累积的过程，因此，在载荷-位移曲线上呈现多峰的特征。由于没有增强纤维沿T向排布，故T向压缩模量明显低于其它两个方向。另外T向压缩破坏为剪应力主导，弯曲的纤维具有较好的承受剪切变形能力，加之材料逐渐被压实，而使T向压缩在加载后期呈现明显的塑形特征。

2.3 2.5D石英/双马树脂复合材料面内与面外剪切性能

图6(a)展示了2.5D机织石英/双马树脂复合材料面内剪切的载荷-位移曲线及破坏形貌。明显可见试件工作段被剪坏。面内剪切载荷-位移响应呈明显的非线性特征，在测试过程中，试件变形程度很高，试验机压缩行程达到夹具最低限制(即试件顶到夹具)时仍未发生断裂。图7展示了测试最后阶段V形缺口梁试件的变形状态，材料在纯剪区产生波浪形剪切带，且材料表面发生明显损伤，导致其中应变片脱离试件表面，这种现象在2.5D机织碳纤维/环氧树脂复合材料面内剪切性能测试中也出现过^[21]。载荷达到第一次峰值后，缓慢降低，但是随后由于试件顶到了夹具，此后的载荷不完全由材料有效工作段承担，故测试结果是不真实的。

图6(b)展示了用于评估面外剪切性能的短梁试件的载荷-位移响应及破坏形貌。以肉眼观察外观，试件无明显损伤，在光学显微镜下，发现基体有许多微裂纹。载荷-位移曲线在初始破坏之前都能保持较好的线性关系，在彻底破坏之前，所有试件的载荷-位移曲线呈现若干波动，这是由于基体开裂逐渐演变导致的，2.5D机织结构中弯曲的经纱具有很好的止裂效果，造成裂纹偏折，引入多条损伤扩展路径，载荷得以有效地重新分配，保证材料承载能力不降。另外，在较大剪切变形下，经纱变形能与基体保持同步，有效地保护了纤维/基体界面。随着基体损伤逐渐累积到一定程度后，基体裂纹贯通，纤维/基体界面也逐渐脱粘，导致载荷下降。可见，相比于传统的2D材料，2.5D机织复合材料的面外剪切损伤阻抗更优。

2.5D机织石英/双马树脂复合材料面内、面外(纬纱层间)剪切性能测试结果如表3所示。在面内剪切载荷作用下，经纱和纬纱相互错动，使材料具

表 2 2.5D 机织石英纤维/双马树脂复合材料经向、纬向和厚度方向压缩力学性能对比

Table 2 Compressive mechanical properties of 2.5D quartz composites in warp, weft and thickness directions

No.	Elastic modulus/GPa			Strength/MPa		
	Warp	Weft	Thickness	Warp	Weft	Thickness
1	18.3	21.7	9.1	279.0	570.0	382.0
2	19.1	22.5	9.6	315.0	558.0	390.0
3	19.5	21.1	9.5	274.0	566.0	445.0
4	17.5	22.6	8.1	290.0	620.0	435.0
5	19.4	21.8	8.8	277.0	584.0	413.0
Average	18.8	21.9	9.0	287.0	579.6	413.0
CV/%	4.5	2.8	6.0	5.9	4.2	6.6

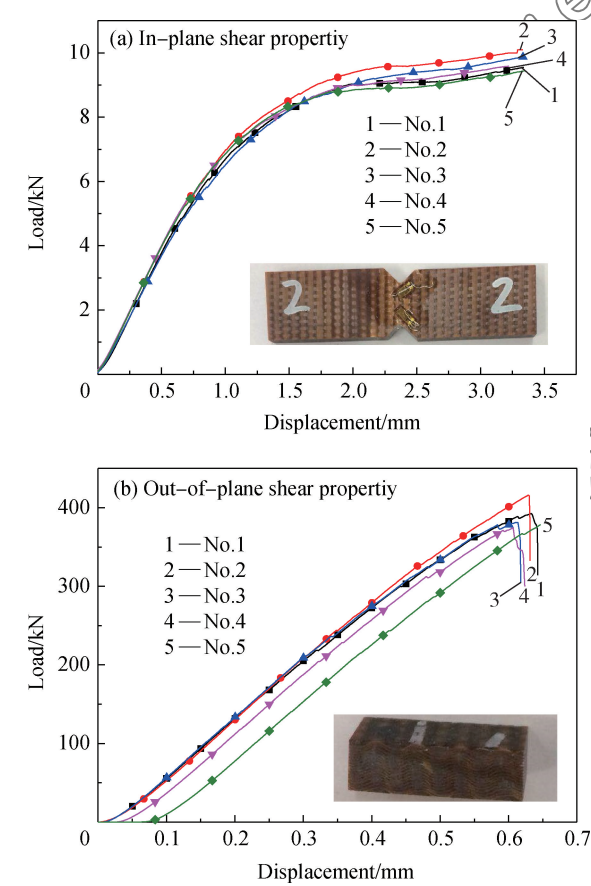


图 6 2.5D 机织石英/双马树脂复合材料面内剪切和 V 形缺口梁试件的载荷-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of V-notched beam and short beam specimens made of 2.5D quartz fiber/bismaleimide resin composites

有极好的韧性,故无法捕获试件断裂时的数据。另外机织结构导致加载过程中试件表面在厚度方向有鼓膨现象,如果应变片刚好处于材料鼓起位置,会导致 5%剪切应变之前,应变片敏感栅被刺穿而不能正常工作。图 8 展示了试验过程中测得的 2.5D 机织石英/双马树脂复合材料面内剪切应力-应变曲线,在 2%的剪切应变范围内,5 个试验件的应力-

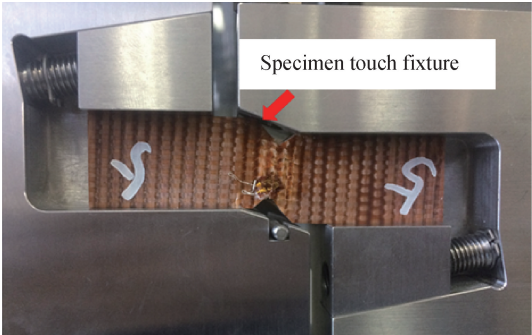


图 7 2.5D 机织石英/双马树脂复合材料 V 形缺口梁试件的面内剪切变形

Fig. 7 In-plane shear deformation behavior of V-notched beam specimens of 2.5D quartz fiber/bismaleimide resin composites

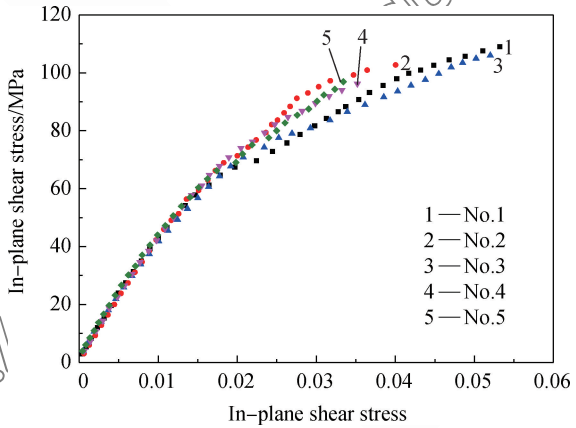


图 8 2.5D 机织石英/双马树脂复合材料面内剪切应力-应变曲线

Fig. 8 In-plane shear stress-strain curves of 2.5D quartz fiber/bismaleimide resin composites

应变曲线非常接近,但超过 2%的剪切应变之后,5 个试验件的应力-应变响应呈现较高的分散性,这可能与变形达到一定程度后,材料表面变形不均和变形异常导致应变片的测试精度下降有关。可见采用 V 型缺口梁的测试方法无法获得精确的面内剪切应力-应变关系。为了获得准确的 2.5D 机织复合材料面内剪切性能,需提出其他的测试方法。数字

图像相关方法(DIC)采用非接触的应变测量方式,并可获得全场应变,适用于具有较高极限剪切应变材料的测试,有望解决2.5D机织复合材料面内剪切性能准确测试的难题^[22]。

表3罗列了2.5D机织石英纤维增强双马树脂复合材料面内、面外剪切性能参数的测试结果,包括材料面内剪切模量,面内剪切应变达到2%时对应的剪切应力和反映层间剪切性能的短梁强度。根据表3中数据,短梁强度与2%剪应变对应的剪应力接近,由图8所示面内剪切应力-应变曲线的趋势可知,面内剪切强度可达到100 MPa以上,可见该2.5D机织石英纤维增强双马树脂复合材料的面内剪切性能优于面外剪切性能。

表3 2.5D机织石英/双马树脂复合材料面内和面外剪切力学性能

Table 3 In-plane and out-of-plane shear mechanical properties of 2.5D quartz/bismaleimide resin composites		
No.	In-plane Elastic modulus/ GPa	Out-of-plane Short beam strength/MPa
1	4.6	69.3
2	4.4	71.4
3	4.1	70.0
4	4.3	72.9
5	4.4	71.5
Average	4.36	71.0
CV/%	3.73	1.98

3 2.5D机织复合材料拉伸模量估算公式与数值模型

本文研究的2.5D机织复合材料,石英纤维经纱细度为190 g/km,密度为10根/cm,纬纱细度为190 g/km×2股,密度为4根/cm。如果经纱和纬纱都是直纤维,则经纱纤维体积含量为纬纱纤维体积分数的1.25倍。根据图2所示的经纱形貌,可将弯曲经纱的分布简化为正弦函数的分布形式,如图9所示,通过在光学显微镜下观测特征参数L和h的尺寸,可估算得到同样的材料长度范围内,弯曲纤维的实际长度为平直纤维束实际长度的1.4倍。因此弯曲经纱纤维体积含量为纬纱纤维体积分数的1.8(1.25×1.4)倍。材料中总的纤维体积分数为45.5vol%,根据上述确定的经纱和纬纱纤维体积分数的比例关系,可进一步确定经向纤维体积分率约为29vol%,而纬纱纤维体积分率约为16.5vol%。

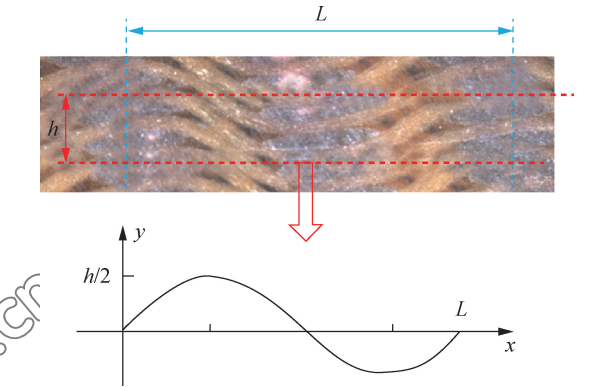


图9 弯曲经纱的形貌与特征尺寸
Fig. 9 Morphology of the warp fiber and its characteristic lengths

纤维增强树脂复合材料纤维方向模量预测的混合定律如下:

$$E = V_f \times E_f + (1 - V_f) \times E_m$$
 (1)

其中: V_f 为纤维体积分数; E_f 和 E_m 分别为纤维拉伸模量和基体拉伸模量。

上述混合定律针对于单向纤维增强树脂复合材料提出,无法直接用于2.5D机织石英纤维增强树脂复合材料拉伸模量的预测。在混合定律的基础上,本文对2.5D机织复合材料的拉伸模量提出如下假设:(1)经向模量,纬向纤维不起作用;纬向模量,经向纤维不起作用;(2)模量只取决于各自方向纤维和基体的相对体积含量;(3)考虑纤维弯曲对模量影响,引入模量折减系数K,进而提出下式所示的2.5D机织复合材料的拉伸模量估算公式:

$$E = V_f \times E_f + K \times (1 - V_f) \times E_m$$
 (2)

其中, V_f 为只计入该方向纵向排布纤维确定的纤维相对体积含量,以经向为例,在计算纤维相对体积含量时,只计入经纱影响,为此,需以经纱和基体的体积含量之和为1,然后根据经纱和基体的实际体积含量计算经向纤维相对体积含量。纬向纤维相对体积含量的计算与上述类似。

根据经纱、纬纱和基体的实际体积含量,以及上述纤维和基体的相对体积含量的定义,可知:在经向,纤维相对体积含量为35%,基体相对体积含量为65%;在纬向,纤维相对体积含量为23%,基体相对体积含量为77%。2.5D机织复合材料中两种材料组分材料属性为:石英纤维的拉伸弹性模量为70 GPa,双马来酰亚胺拉伸模量为4.6 GPa。对纬向拉伸,由于纬纱是平直的,故折减系数K=1,将已知参数代入式(2),预测得到的纬向拉伸模量为19.6 GPa,与试验测得纬向拉伸模量(19.3 GPa)非

常接近，可见式(2)在 2.5D 石英纤维增强树脂复合材料纬向拉伸模量预测方面具有很好的适用性。对于经向拉伸，由于经纱弯曲，折减系数 K 不确定。将试验测得的经向拉伸模量作为已知量 (17.6 GPa)，代入其他已知的组分材料参数和相对体积含量，可反算得到折减系数 K 约为 0.6。该折减系数可用于具有类似编织结构的 2.5D 机织纤维增强树脂复合材料的模量预测，可对材料设计提供一些指导。

针对 2.5D 机织石英/双马树脂复合材料经向拉伸模量的预测所建立的数值模型采用图 10 所示的最小完整编织单元作为有限元建模所采用的代表性体积单元。首先采用编织复合材料建模软件 TexGen[®] 建立该代表性体积单元的几何模型，经纱和纬纱的横截面均模拟为扁透镜形状，其中纬纱横截面宽度为 1.5 mm，高度为 0.15 mm，两根纬纱的间距为 1 mm。经纱横截面宽度为 1 mm，高度为 0.1 mm，两根经纱之间无间隙。将石英纤维和双马树脂基体当作各向同性材料，并为其赋予材料属性。然后为几何模型划分网格，采用减缩的 8 节点 3 维实体单元(C3D8R)，随后导出 INP 文件，并将其导入 ABAQUS[®] 中，生成图 11 所示的有限元模型，利用 TexGen[®] 生成的该有限元模型在外观上进行均匀处理，呈规则的长方体 (长 5 mm，宽 2 mm，高 0.66 mm)，隐藏了纤维与基体的各自真实形态的特征^[23-24]。在对模型进行计算之前，需设置恰当的约束条件和加载方式，对图 11 所示有限元模型最左端的侧面施加完全固支的约束。对上、下两个侧面，限制其 Y 方向的平动和绕其它两个轴的转动，对前、后两个侧面，限制其 Z 方向的平动和绕其它两个轴的转动。在最右侧平面上定义一个参考点(RP)，并定义该参考点与最右侧平面沿 X 轴方向自由度之间的耦合关系，设置该参考点沿 X 轴方向具有 0.01 mm 的位移，这种载荷定义方式可模拟试验过程中的位移型加载。

在 ABAQUS[®] 的计算模块，对 2.5D 石英纤维

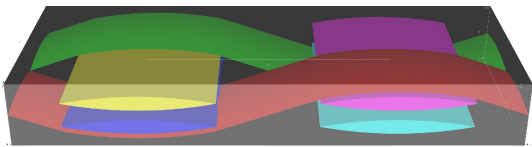


图 10 2.5D 机织石英/双马树脂复合材料代表性体积单元微观示意图

Fig. 10 Microscopic schematic diagram of a representative volume unit of 2.5D quartz fiber/bismaleimide resin composites

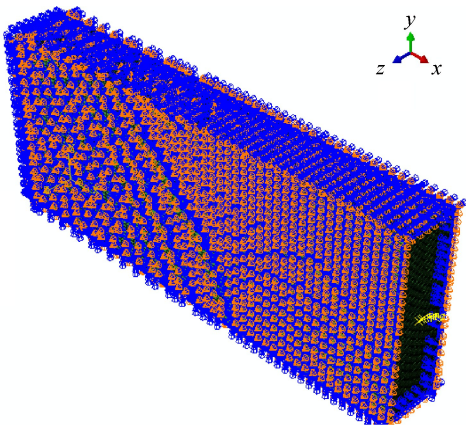


图 11 2.5D 机织石英/双马树脂复合材料三维有限元模型

Fig. 11 3D finite element model of 2.5D quartz fiber/bismaleimide resin composites

增强树脂复合材料代表性体积单元的有限元模型进行计算分析，图 12 展示了 Mises 应力的分析结果。可见纤维和基体之间变形协调，但应力具有显著的差异。根据有限元分析结果，可知该代表性体积单元在沿 X 轴方向发生 0.01 mm 伸长时，施加在最右端侧面的载荷可达 47.12 N。通过分析，可知该代表性体积单元的名义应力为 $\sigma = 35.70$ MPa，名义应变 $\epsilon = 0.002$ ，故材料拉伸模量为 $E = \sigma/\epsilon = 17.84$ GPa。这个经向拉伸模量的预测结果与试验测试结果 (17.6 GPa) 非常接近，说明本文建立的该 2.5D 机织石英/双马树脂复合材料拉伸模量数值模型具有很好的预测效果。

对 2.5D 机织材料，纬纱高度越高，对应的经纱弯曲程度越高。为了研究经纱弯曲度对经向拉伸模量的影响，建立一系列具有不同纬纱高度、其它参数不变的有限元模型，这一系列模型中的纬纱高度分别 0.05 mm、0.1 mm、0.3 mm 和 0.5 mm，预测得到的经向拉伸模量分别为 19.75 GPa、18.85 GPa、15.53 GPa 和 13.92 GPa。可见，随着经纱弯曲程度的提高，2.5D 石英纤维增强树脂复合材料的经向拉伸模量随之降低。利用本文针对 2.5D 机织复

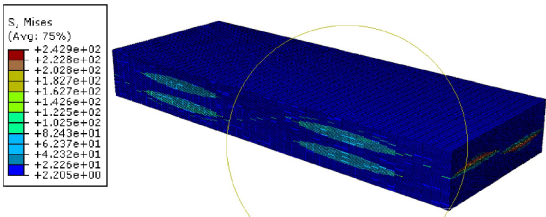


图 12 2.5D 机织石英/双马树脂复合材料有限元模型分析结果(Pa)

Fig. 12 Analysis results from finite element model of 2.5D quartz fiber/bismaleimide resin composites(Pa)

合材料模量预测开发的有限元模型,有望研究材料微观结构参数(例如纱线的截面尺寸)、纱线的弯曲程度等因素对材料模量的影响,可有效地指导 2.5D 机织复合材料编织参数的设计。

4 结 论

对一种 2.5D 机织浅交弯联石英/双马树脂复合材料的三维力学性能进行了全面测试与分析,参考 ASTM 标准进行测试,获得了该 2.5D 机织复合材料不同方向力学性能,包括经向、纬向拉伸/压缩弹性模量和强度,面内剪切模量、强度,面外剪切强度,厚度方向的压缩模量和强度等。主要结论如下。

(1) 经向拉伸的模量稍低于纬向,而经向拉伸的强度远远低于纬向,仅为纬向强度的 62%。经向拉伸破坏为经纱被拉断,纬向拉伸破坏为大范围纤维/基体界面脱粘和纬纱劈裂。

(2) 纬向压缩模量稍高于经向,经向压缩模量高于厚度方向(丁向)。纬向压缩强度最高,厚度方向压缩强度次之,经向压缩强度最低,其中经向压缩强度仅能达到纬向压缩强度的 49%;经向压缩为屈曲破坏,基体损伤严重,经向未断,纬向压缩为纬纱被剪断,厚度方向压缩为基体被压溃。

(3) 材料面内、面外剪切变形能力均很强,从强度角度看,面内剪切性能优于面外剪切性能。此外,面外剪切具有损伤逐渐积累的特征,呈现较好的损伤阻抗。

(4) 2.5D 机织复合材料在面内剪切测试中试件表面材料突起,造成应变片测试结果失真,需利用非接触的数字图像相关方法(DIC)进行应变测量。

(5) 提出了一个 2.5D 机织纤维增强树脂复合材料经向和纬向拉伸模量的估算公式,其中纬纱模量无折减,经纱模量采用 0.6 的折减系数以考虑经纱弯曲的影响,该公式可用于粗略估算具有类似结构 2.5D 机织复合材料经、纬向拉伸模量。

(6) 以材料单胞为代表性体积单元,并设置恰当的边界条件,建立了一个 2.5D 机织纤维增强树脂复合材料经向拉伸模量预测的数值模型,预测结果与试验测试结果具有很好的一致性。该模型有望用于指导 2.5D 机织复合材料的编织结构设计。

参考文献:

[1] 谢菲,夏洪山. 石英纤维复合材料作为高频透波雷达天线罩

的研究[J]. 兵器装备工程学报, 2015, 36(3): 147-150.

XIE Fei, XIA Hongshan. Quartz fiber composites as high frequency radome radome[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2015, 36(3): 147-150 (in Chinese).

[2] 宋阳曦. 二维石英纤维织物增强宽频透波陶瓷基复合材料的制备及性能研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.

SONG Yangxi. Preparation and properties study of two dimensional quartz fabric reinforced broadband wave transparent ceramic matrix composites[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010 (in Chinese).

[3] 张雄,王义,程海峰. 石英纤维透波复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2012(s1): 96-100.

ZHANG Xiong, WANG Yi, CHENG Haifeng. Research progress in quartz fiber transparent composite materials[J]. Materials Review, 2012(s1): 96-100 (in Chinese).

[4] 张迪,郑锡涛,杨超. 三维编织复合材料损伤容限性能试验[J]. 复合材料学报, 2016, 33(5): 1048-1054.

ZHANG Di, ZHENG Xitao, YANG Chao. Damage tolerance test of 3D braided composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(5): 1048-1054 (in Chinese).

[5] 卢子兴,夏彪,王成禹. 三维六向编织复合材料渐进损伤模拟及强度预测[J]. 复合材料学报, 2013, 30(5): 166-173.

LU Zixing, XIA Biao, WANG Chenyu. Progressive damage simulation and strength prediction of 3D six directional braided composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(5): 166-173 (in Chinese).

[6] LI Chengdong, ZHU Jianxun, LIU Yong, et al. Mechanical properties and microstructure of 3D sinking woven quartz fiber-reinforced silica composites by silicasol-infiltration-sintering[J]. Journal of the Textile Institute Proceedings & Abstracts, 2012, 103(11): 1189-1196.

[7] ZHAO Xiaofan, DU Jianhua, YANG Hongwei, et al. Mechanical behavior and failure mechanism of 2.5D (shallow bend-joint, deep straight-joint) and 3D orthogonal UH-WMPE fiber/epoxy composites by vacuum-assistant-resin-infused[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science Edition), 2016, 31(6): 1240-1244.

[8] 季宝锋,孙艳杰,章凌,等. 编织复合材料在高温热结构中的应用[J]. 宇航材料工艺, 2017, 47(4): 14-18, 36.

Ji Baofeng, SUN Yanjie, ZHANG Ling, et al. Application of braided composites in high temperature thermal structure[J]. Aerospace Materials & Technology, 2017, 47(4): 14-18, 36 (in Chinese).

[9] 李杰,许斌,冯志海. 2.5D 石英酚醛复合材料的性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2002(1): 35-37.

LI Jie, XU Bing, FENG Zhihai. Study on properties of 2.5D quartz phenol aldehyde composite[J]. Aerospace Materials & Technology, 2002(1): 35-37 (in Chinese).

[10] 于佩志,张涛,王晓薇. 2.5D 石英纤维织物增强二氧化硅基复合材料弯曲性能测试研究[J]. 宇航材料工艺, 2003(5):

- 58-61.
- YU Peizhi, ZHANG Tao, WANG Xiaowei. Flexural properties of 2.5D silica fiber reinforced silica matrix composites [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2003(5): 58-61 (in Chinese).
- [11] LIU Y, ZHU J, CHEN Z, et al. Mechanical behavior of 2.5D (shallow bend-joint) and 3D orthogonal quartz f/silica composites by silicasol-infiltration-sintering [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2012, 532(1): 230-235.
- [12] LIU Yong, ZHU Jianxun, CHEN Zhaofeng, et al. Mechanical properties and microstructure of 2.5D (shallow straight joint) quartz fibers-reinforced silica composites by silicasol infiltration-sintering [J]. *Ceramics International*, 2012, 38(1): 795-800.
- [13] 郭洪伟, 张立泉, 朱梦蝶, 等. 高性能复合材料用机织 2.5D 织物的结构设计及织造工艺 [J]. *玻璃纤维*, 2017(3): 1-5.
- GUO Hongwei, ZHANG Liqun, ZHU Mengdie, et al. Structural design and weaving process of woven 2.5D fabric for high performance composite materials [J]. *Fiberglass*, 2017(3): 1-5 (in Chinese).
- [14] 刘刚. 2.5D 碳/环氧编织复合材料的细观结构及弹性性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- LIU Gang. Microstructure and elastic properties of 2.5D carbon/epoxy braided composites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014 (in Chinese).
- [15] American Society for Testing and Materials International. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials: ASTM D3039/D3039M-17 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2017.
- [16] American Society for Testing and Materials International. Standard test method for compressive properties of polymer matrix composite materials using a combined loading compression (CLC) test fixture: ASTM D6641/D6641M-16e1 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2016.
- [17] 中国国家标准化管理委员会(标准制定单位). 纤维增强塑料压缩性能试验方法: GB/T 1448 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for compression properties of fiber reinforced plastics: GB/T 1448 [S]. Beijing: China Standards Press, 2005 (in Chinese).
- [18] American Society for Testing and Materials International. Standard test method for shear properties of composite materials by the v-notched beam method: ASTM D5379/D5379M-12 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2012.
- [19] American Society for Testing and Materials International. Standard test method for short-beam strength of polymer matrix composite materials and their laminates: ASTM D2344/D2344M-16 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2016.
- [20] 赵渠森, 王京城. 高性能 QY9511 双马树脂及其复合材料应用 [J]. *纤维复合材料*, 2001, 18(4): 3-9.
- ZHAO Qusen, WANG Jingcheng. Application of high performance QY9511 bismaleimide resin and its composite materials [J]. *Fiber Composites*, 2001, 18(4): 3-9 (in Chinese).
- [21] LIU G, ZHANG L, GUO L, et al. A modified V-notched beam test method for interlaminar shear behavior of 3D woven composites [J]. *Composite Structures*, 2017, 181: 46-57.
- [22] MAKEEV A, SEON G, CLINE J, et al. In quest of methods for measuring 3D mechanical properties of composites [J]. *Composites Science & Technology*, 2014, 100(21): 105-112.
- [23] LIN H, BROWN L P, LONGZHU J, CHEN A C. Modeling and simulating textile structures using texgen [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 331: 44-47.
- [24] BROWN L P, ZENG X, LONG A C, et al. Recent developments in the realistic geometric modelling of textile structures using TexGen [C]//International Conference on Digital Technologies for the Textile Industries, 2013: 1-12.