

# 三维编织复合材料内部应变场 有限元计算与原位测量\*

严 烁,孙宝忠,顾伯洪

(东华大学纺织学院,上海 201620)

**[摘要]** 三维编织复合材料被大量用于航空结构设计,在航空服役过程中需承受各种复杂载荷。测量三维编织复合材料内部原位应变,将其应用于建立材料失效预警系统和结构强度设计。在三维编织复合材料内部埋植光纤 Bragg 光栅传感器和在材料表面粘贴应变片,同时测量结构内部和表面原位应变。构建均质模型和细观结构模型,采用有限元方法分析内部原位应变场分布,有限元分析结果和试验测量结果吻合性较好。发现在准静态单轴拉伸载荷作用下,三维编织复合材料不同位置原位应变值产生变化。三维编织复合材料轴向正中间截面应变分布较为均匀;内单胞处原位应变略大于面单胞处原位应变(最大差值约 0.08%);外表面原位应变大于面单胞处原位应变(最大差值约 0.1%)。在三维编织复合材料航空结构设计中,需要充分考虑并合理使用三维编织复合材料不同位置的应变值,使材料设计和利用效率最大化。

**关键词:** 结构健康监测;三维编织复合材料;原位应变测量;光纤 Bragg 光栅(FBG)传感器;细观结构;有限元分析(FEA)

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.15.070



严 烁

硕士研究生,研究方向为三维编织复合材料力学。

碳纤维增强复合材料是以碳纤维集合体为增强相、树脂为基相,复合而成的高性能工程材料。单向板和层合板因高强度、高模量等性能已在航空航天、船舶车辆等领域应用<sup>[1-3]</sup>。自动铺带和自动铺丝技术的发展使碳纤维复合材料广泛用于制造航天器、机身等<sup>[4-5]</sup>。但是层压复合材料易分层、损伤容限低,难以制备复杂形状结构件。与此不同,三维编织预成型体中的碳纤维束可围绕复杂形状芯模相互交错、缠绕<sup>[6]</sup>,形成密实空间网状结构,它的每一根纤维束都贯穿整个结构。因此,三维编织复合材料除了高模、高强外,还具有净近成形(可编织异形件)、整体性好(不分层)、高损伤容限<sup>[7-9]</sup>等优点,可作为特定部位的工程结构件。

三维编织复合材料作为工程结构

件,整体力学性能已有大量研究<sup>[10-13]</sup>,其拉伸性能主要取决于结构参数(编织角、纤维体积分数等),提高纤维体积分数、减小编织角、引入轴向纤维束等会增强复合材料的力学性能<sup>[10,14]</sup>,拉伸失效模式主要分为基体开裂、纤维束抽拔、纱线断裂等<sup>[15-16]</sup>。对于三维编织复合材料的内部原位应力应变性质研究较少,部分学者构建三维编织复合材料均质模型、单胞模型、细观结构模型等进行有限元分析,先通过对比模型有限元分析的宏观力学性能与试验测试性能的一致性,以此验证模型的正确性,再预测模型内部、局部力学性能<sup>[17-20]</sup>。

光纤 Bragg 光栅传感器(FBG)可用于测量材料内部原位应变,进行结构健康监测<sup>[21-22]</sup>。Ramakrishnan

\* 基金项目:国家自然科学基金(51875099、51675095)。

等<sup>[3,23]</sup>在层合板铺层时直接将FBG传感器放置在材料内部;Haentzsch等<sup>[24]</sup>在机织角联锁预成型体织造时将FBG传感器从织口沿纬纱方向引入。由于编织工艺限制,以上两种方法均不适用于三维编织复合材料。黄睿<sup>[25]</sup>、李向华<sup>[26]</sup>、Li<sup>[27]</sup>、Yuan<sup>[28]</sup>和刘小会等<sup>[29]</sup>先后提出将光纤传感器(FOS)分别沿轴纱和编织纱方向直接编入,但易造成光纤脆断;Jung等<sup>[30]</sup>采用“替换法”,先将几根尼龙纤维束与碳纤维束一起编织,预成型体下机后,再将尼龙纤维束替换成FBG传感器,但编织角较大、预成型体尺寸较大时会难以替换。本文采用空心毛细管辅助法,在编织过程中,先将一定直径(内径 $\phi_1=0.3\text{mm}$ ,外径 $\phi_2=0.6\text{mm}$ )的空心毛细管沿轴向编入,预成型体下机后,沿毛细管中空插入FBG传感器,最后将毛细管从预成型体中抽出。关于利用FBG传感器监测层合板固化过程和测量材料温度、热应变的研究较多<sup>[29-33]</sup>。虽有利用FBG传感器研究三维编织复合材料力学性能的报道,但探究其内部原位应变及其结构效应的研究较少。

测量三维编织复合材料内部原位应变有重要意义,一旦监测到结构内部原位应变超过安全阈值,即进行安全预警;另外,可为复合材料结构强度设计提供参考依据。本文将FBG传感器内置于三维编织复合材料内部、将应变片粘贴于材料表面,同时直接测量材料内部和外表面原位应变;构建均质模型、细观结构模型,进行有限元分析,探究材料内部应力应变分布。

## 原位测量传感器

三维编织复合材料作为工程结构件,在服役过程中对其内部应变场进行原位测量和结构健康监测意义重大。通常,FBG传感器、压电传感器、压阻传感器和电阻应变片等都可达到原位测量的目的<sup>[21]</sup>。由于试

验测试试样尺寸有限,为避免破坏三维编织复合材料内部结构、对其应变场进行精准原位测量,本试验采用FBG传感器。同时,在部分试样表面粘贴应变片,对其表面应变进行原位测量。

## 1 FBG 传感器

FBG传感器呈线形圆柱状,直径小( $\Phi=250\mu\text{m}$ )、精度高。将FBG传感器埋设于复合材料中,需考虑以下3个方面:(1)光纤与增强纤维单丝直径间的差异;(2)涂层与增强纤维及树脂基体间的相容性;(3)光纤取向与增强纤维束排列方向间的关系<sup>[25]</sup>。这些方面主要影响涂层与复合材料的界面性能。文献[34-36]表明温度和疲劳载荷对界面影响较大,本文未涉及高温和疲劳载荷作用。因此,本文中光纤采取普通丙烯酸酯涂层。丙烯酸酯类涂层与环氧树脂基复合材料相容性好、界面性质稳定<sup>[25-26,37-38]</sup>。FBG传感器的传感核心为Bragg栅区(1~10mm),当光纤光栅解调仪发出的入射光经过栅区时,一部分光被反射,另一部分光透射,通过检测反射光波长变化即可得到应变。

根据Bragg条件<sup>[30]</sup>,

$$\lambda_B = 2n_e A \quad (1)$$

式中, $\lambda_B$ 为Bragg波长, $n_e$ 为光纤纤芯有效折射率, $A$ 为Bragg周期。

外界应变和温度等变化会引起 $n_e$ 和 $A$ 的变化,进而引起波长漂移。光栅波长漂移量与应变和温度的关系可简化为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_e \cdot \varepsilon + (\alpha + \xi) \cdot \Delta T \quad (2)$$

式中, $\Delta\lambda_B$ 为波长漂移量, $K_e$ 为应变灵敏度系数, $\varepsilon$ 为应变, $\alpha$ 、 $\xi$ 分别为光纤热膨胀系数和热光系数, $\Delta T$ 为温度变化量。

对于Bragg波长为1550nm左右的二氧化硅材质的FBG传感器,其应变灵敏度系数为1.20pm/ $\mu\text{e}$ ,温度灵敏度系数为13.7pm/ $^\circ\text{C}$ <sup>[39]</sup>。

## 2 应变片

应变片通常为箔式(丝绕式),它将材料的应变(形变)转换为自身电阻变化量,常见应变片的标准阻值为120 $\Omega$ 和350 $\Omega$ 。根据应变电阻效应,待测材料的应变为:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta R/R}{K} \quad (3)$$

式中, $\varepsilon_x$ 为待测材料应变, $\Delta R$ 为应变片电阻改变量, $R$ 为应变片初始电阻, $K$ 为应变片灵敏度系数。

对于阻值 $R$ 为120 $\Omega$ 的铜丝应变片, $K$ 值为2.00。

## 三维编织复合材料拉伸试样制备

### 1 试验材料

试样制备过程中所需材料及来源见表1。

### 2 内置FBG传感器的预成型体制备

#### 2.1 碳纤维束根数

根据ASTM D3039/D3039M-17(聚合物基复合材料拉伸性能标准试验方法)和GB/T 33613—2017

表1 材料及来源

Table 1 Materials and sources

材料名称	型号	来源
碳纤维束	T700-12K	东丽公司(Toray <sup>®</sup> )
环氧树脂	JC-02A	常熟佳发化学有限公司
固化剂	JC-02B	常熟佳发化学有限公司
FBG传感器	SMF-12C/10mm	北京泰克里科光学技术有限公司
电阻应变片	BX 120-2AA	黄岩诚立工程传感器厂

(三维编织物及其树脂基复合材料拉伸性能试验方法),结合预试验效果确定准静态拉伸试样的尺寸为:200mm×15mm×5mm(长度×宽度×厚度),其中标距长80mm。

由式(4)~(6)<sup>[40]</sup>可计算出1×1四步法矩形三维编织预成型体所需碳纤维束根数。

$$W_1 = (\sqrt{2}m + 1) \cdot d \quad (4)$$

$$W_2 = (\sqrt{2}n + 1) \cdot d \quad (5)$$

$$N = mn + m + n \quad (6)$$

式中,  $W_1$ 、 $W_2$  分别为试样的宽度和厚度,  $m$ 、 $n$  分别为编织预成型体主体纱的行、列数,  $d$  为碳纤维束等效直径( $d=0.75\text{mm}$ ),  $N$  为预成型中纤维束总根数,经计算  $N$  为 83 根。

### 2.2 内置FBG传感器的三维预成型体编织

与层压复合材料预成型体的层合结构、机织角连锁预成型体的接结或贯穿结构不同,三维编织预成型体因其1×1四步法编织工艺的特点而形成纤维束相互交错的整体结构。为了测量三维编织复合材料内部特定位置的轴向或横向应变,须在预成型体编织的过程中直接或间接将FBG传感器沿轴纱方向或垂直于轴纱方向编入。如图1所示,底盘上的锭子携带碳纤维束依次做循环往复运动,每4次为一循环,每一循环结束时已将已交错的碳纤维束打紧,以形成具有一定编织角的编织预成型体。根据碳纤维束在预成型中所处的空间位置,分为角纱、面纱和内纱(对应于三维编织复合材料的角单胞、面单胞和内单胞)。在编织过程中,FBG传感器不参与碳纤维束的交错缠绕。

### 2.3 内置FBG传感器的预成型体固化

在三维编织预成型体固化之前,将FBG传感器的栅区定位在特定位置,以实现原位测量。三维碳纤维/环氧树脂编织预成型体

固化采用真空辅助树脂传递模塑成型(Vacuum assisted resin transfer molding, VARTM)工艺,如图2所示。VARTM是将密封有预成型的真空袋抽至真空,再利用负压将树脂和固

化剂混合溶液注入其中,杜绝固化过程中的气泡造成缺陷,最后设置烘箱梯度温度使其固化,固化后试件横截面如图3所示,固化后复合材料基本参数见表2。

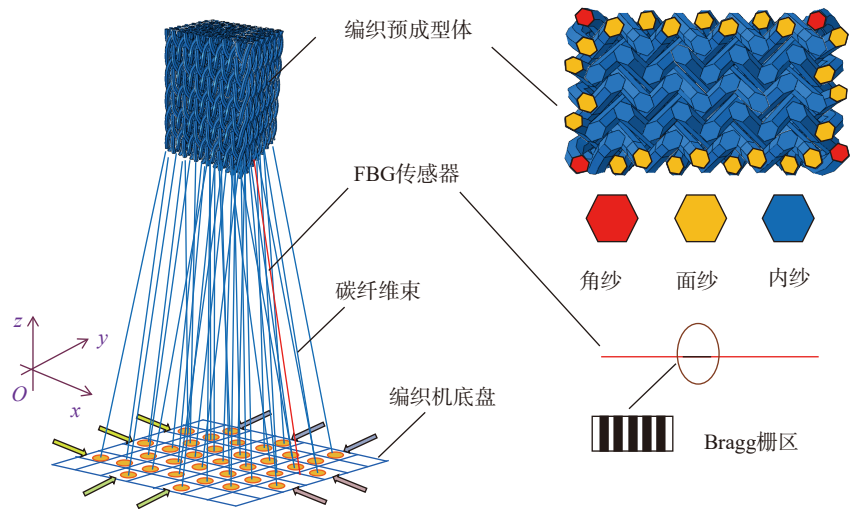


图1 内置FBG传感器的预成型体编织

Fig.1 Braiding process of preform with embedded FBG sensor

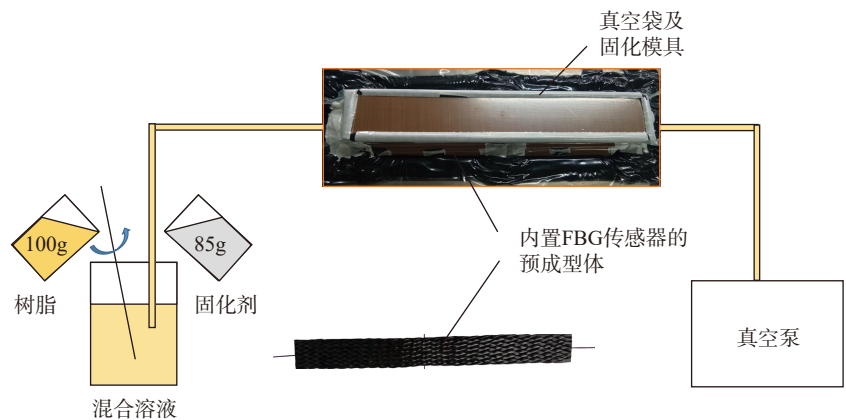
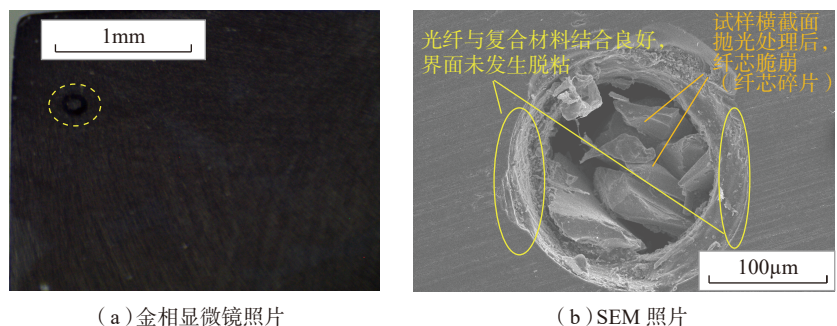


图2 VARTM示意图

Fig.2 Scheme of VARTM



(a)金相显微镜照片

(b)SEM照片

图3 固化后横截面

Fig.3 Cross-section after curing

## 2.4 拉伸测试试件

FBG 传感器栅区埋植在复合材料的位置为: 试件轴向正中间位置的面单胞和内单胞处, 如图 4 所示, 可以看出, 三维编织复合材料的角纱(角单胞)占比很小, 因此忽略。本试验共制备 3 种试样, 分别记为 No\_FB G (未内置 FBG 传感器试样)、FBG\_S、FBG\_I。其中, “FBG” 表示内置 FBG 传感器的试样, “S”、“I” 分别表示复合材料面单胞和内单胞位置。在试样中光栅栅区所对应的外表面粘贴应变片, 如图 4 和图 5 所示。

## 2.5 准静态单轴拉伸测试

本试验采用 810 万能材料测试系统(MTS)对三维编织复合材料试样进行准静态单轴拉伸测试, 试样拉伸速度为 2mm/min。FBG 传感器信号调制和波长解调采用 sm 125 型光纤光栅解调仪。应变片信号采集采用安捷伦 KEYSIGHT 34970A/34972A 数据采集仪, 该仪器可高精度直接线性测量应变片电阻。测试仪器如图 6 所示。

本试验在恒温下进行, 测试过程中, 室内温、湿度无明显变化。试样为准静态拉伸测试, 拉伸速率缓慢, 材料在失效过程中不会在瞬间释放大量热, 因此温度对本试验无影响, FBG 传感器和应变片不进行温度补偿。

## 三维编织复合材料有限元模型

### 1 均质模型

三维编织复合材料由碳纤维束

表2 三维编织复合材料基本参数

Table 2 Parameters for 3D braided composites

类型	参数
纤维体积分数 $V_f/\%$	40
编织角 $\alpha/(\circ)$	41
FBG 传感器轴向 / 应变片粘贴方向 $\beta/(\circ)$	0

和环氧树脂两相材料复合成的一体化结构, 由 FBG 传感器测量的内部

应变和应变片测量的表面应变均针对于复合材料一体化结构, 而不是单

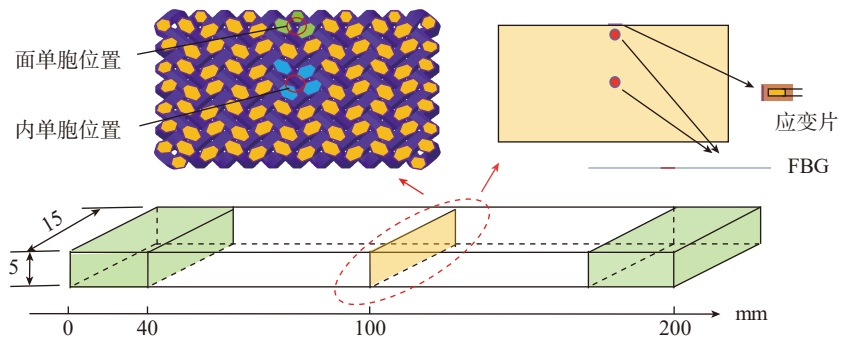


图4 传感器所处位置示意图

Fig.4 Scheme of positions of sensors

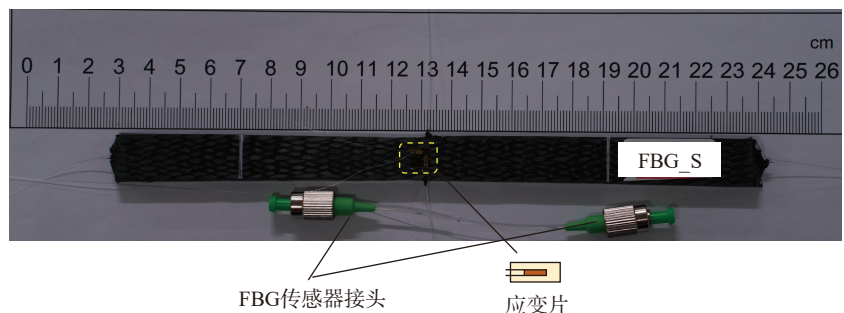


图5 试样实物图

Fig.5 Photograph of sample

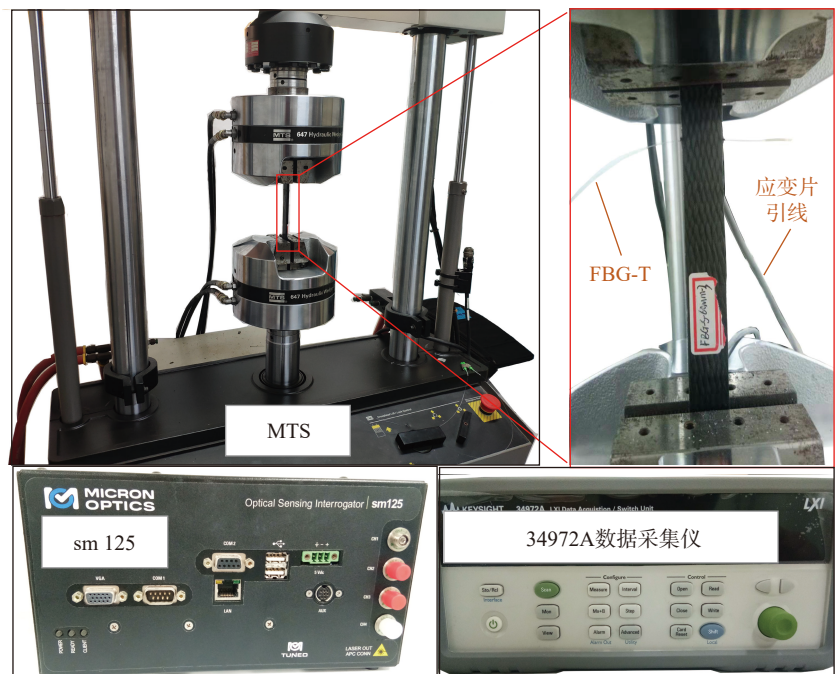


图6 试验测试仪器

Fig.6 Equipment for testing

针对于纱线(复合材料中的纱线被认为由碳纤维束和周边树脂组成,等效为单向复合材料,如图7所示)或树脂。基于均匀化理论<sup>[40]</sup>,根据碳纤维束和环氧树脂性质(表3)和预成型空间结构构建三维编织复合材料均质模型,如图7所示。均质模型已经将纱线、树脂和纱线空间路径均一化处理,它与微观结构模型不同,均质模型不区分纱线和树脂,也无预成型体空间结构。均质模型为全尺寸(200mm×15mm×5mm)结构,而光纤光栅的直径仅为250μm,为便于后续网格划分和有限元计算,模型中忽略FBG传感器,有限元模拟结果将直接提取与试件中光纤光栅埋设区域相对应的单元数值。

1.1 纱线和树脂性质

三维编织复合材料中的纱线(横观各向同性)被认为由碳纤维束(横观各向同性)和周围树脂(各向同性)组成。碳纤维束和固化后树脂的性

质见表3。

由混合定律<sup>[41]</sup>和Chamis<sup>[1]</sup>提出的方法,根据碳纤维束和树脂的性质计算出纱线的性质,如式(7)~(12)所示。

$$E_{11}^y = E_{11}^f \cdot \varepsilon_f + E^m \cdot (1 - \varepsilon_f) \quad (7)$$

$$\nu_{12}^y = \nu_{13}^y = \nu_{12}^f \cdot \varepsilon_f + \nu^m \cdot (1 - \varepsilon_f) \quad (8)$$

$$E_{22}^y = E_{33}^y = \frac{E^m}{1 - \sqrt{\varepsilon_f} \cdot \left(1 - \frac{E^m}{E_{22}^f}\right)} \quad (9)$$

$$G_{12}^y = G_{13}^y = \frac{G^m}{1 - \sqrt{\varepsilon_f} \cdot \left(1 - \frac{G^m}{G_{12}^f}\right)} \quad (10)$$

$$G_{23}^y = \frac{G^m}{1 - \sqrt{\varepsilon_f} \cdot \left(1 - \frac{G^m}{G_{23}^f}\right)} \quad (11)$$

$$\nu_{23}^y = \frac{E_{22}^y}{2G_{23}^y} - 1 \quad (12)$$

式中,  $E_{11}^y$ 为纱线轴向弹性模量,  $E_{22}^y$ 、 $E_{33}^y$ 为纱线横向弹性模量,  $G_{12}^y$ 、 $G_{13}^y$ 为纱线纵向剪切模量,  $G_{23}^y$ 为纱线横向剪切模量,  $\nu_{12}^y$ 、 $\nu_{13}^y$ 为纱线纵向泊松比,  $\nu_{23}^y$ 为纱线横向泊松比,  $\varepsilon_f$ 为纤维填充系数, f表示碳纤维束, m表示树脂。

经计算,纱线的柔度矩阵  $[S^y]$  为:

$$[S^y] = \begin{bmatrix} 0.0055 & -0.0015 & -0.0015 \\ -0.0015 & 0.1066 & -0.0461 \\ -0.0015 & -0.0461 & 0.1066 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.3053 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2265 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2265 \end{bmatrix} \quad (13)$$

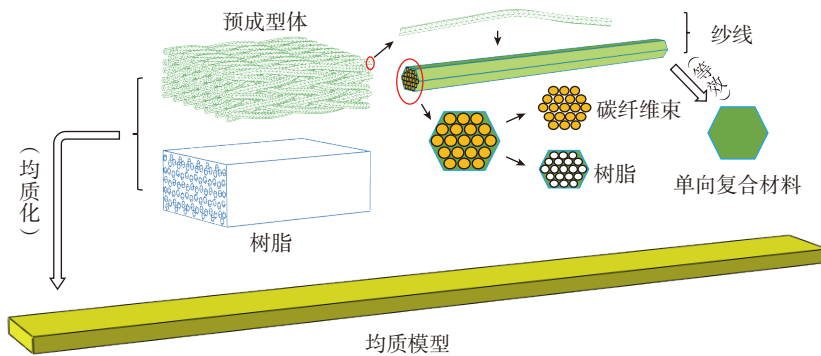


图7 均质模型  
Fig.7 Homogeneous model

1.2 均质模型性质

根据文献[42]提出的方法,可利用坐标系转换将预成型中纱线在局部坐标系下的柔度矩阵转换为全局坐标系下,并利用体积平均刚度(柔度)法将全局坐标系下纱线和树脂的柔度矩阵转换为单胞性质矩阵,再转换为均质体性质矩阵。经计算,均质模型的弹性参数见表4。

表3 碳纤维束和树脂性质参数

Table 3 Properties of carbon fiber tows and resin

复材	$E_{11}/\text{GPa}$	$E_{22}=E_{33}/\text{GPa}$	$G_{12}=G_{13}/\text{GPa}$	$G_{23}/\text{GPa}$	$\nu_{12}=\nu_{13}$	$\nu_{23}$
碳纤维束	230	15	9	5	0.25	0.3
环氧树脂	2.4	2.4	0.89	0.89	0.33	0.33

表4 均质模型性质参数

Table 4 Properties of homogeneous model

$E_{11}/\text{GPa}$	$E_{22}=E_{33}/\text{GPa}$	$G_{12}=G_{13}/\text{GPa}$	$G_{23}/\text{GPa}$	$\nu_{12}=\nu_{13}$	$\nu_{23}$
25.86	6.28	8.53	5.95	0.50	0.50

## 2 微观结构模型

为了探究 FBG 传感器所埋植区域(试样正中间位置)的纱线和树脂应力分布状态,构建微观结构模型,如图 8 所示。模型中主体部分为微观结构(20mm),对应 FBG 传感器栅区所在区域;其余部分由均质模型替代。微观结构模型为全尺寸(200mm×15mm×5mm),其中微观部分中纱线等效直径为 1mm,因此同样进行模型简化,忽略模型中的 FBG 传感器。

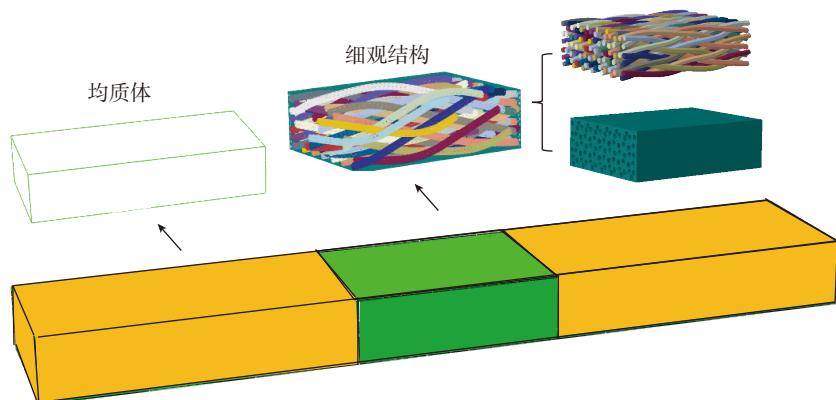


图8 微观模型

Fig.8 Micro-structural model

## 有限元分析

### 1 均质模型

均质模型构建后,利用商业有限元分析软件 ABAQUS 对其进行有限元分析。整个模型施加的边界条件为一端固定、另一端加载,网格划分为六面体、网格类型为 C3D8R、网格大小为 0.5mm、网格数量为 120000。

由于 FBG 传感器量程有限,只能测试材料微小应变(约 1%),形变过大会导致传感器数据失真直至失效,与此对应,有限元分析只模拟均质模型准静态拉伸载荷下线弹性阶段。数值计算后均质模型应力分布云图如图 9 所示。在准静态拉伸载荷下,均质模型宏观上应力呈左右对称分布,两端夹持区有明显的应力集中区域,部分逐渐延伸到夹持区和标距区之间的过渡区。在中间标距区域,应力分布均匀,无明显应力集中。提取出均质模型正中间截面(对应于 FBG 传感器栅区埋植位置),可见整个横截面应力分布较为均匀,内单胞和面单胞处应力相差很小。再分别提取出面单胞和内单胞位置的轴向应变-时间曲线,如图 10 所示,其中“FEM\_I”表示内单胞处模拟曲线,“FEM\_S”表示面单胞处模拟曲线。由图可知,在拉伸线弹性阶段,内单胞处轴向原位应变略大于面单胞处,最大差值约为 0.1%。由应力分布云图和曲线图表明,复合材料正中间截

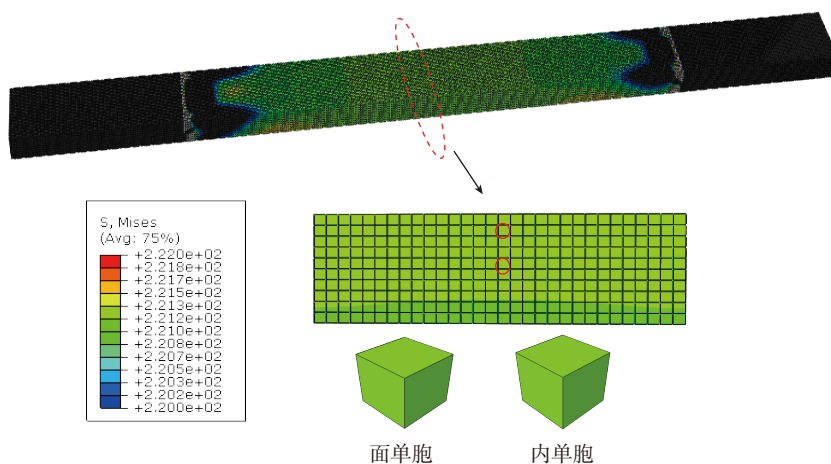


图9 均质模型应力分布云图

Fig.9 Stress distribution from homogeneous model

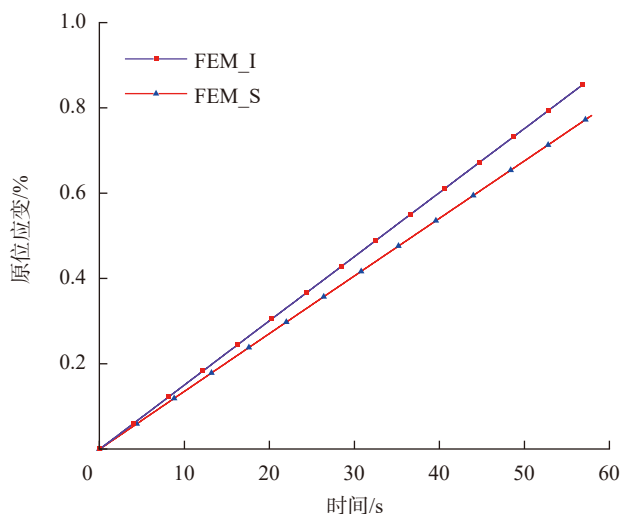


图10 均质模型原位应变-时间曲线

Fig.10 In-situ strain-time curves from homogeneous model

面内部的应力分布较为均匀,内单胞处应变略大于面单胞处。

## 2 微观结构模型

微观结构模型中纱线网格划分类型为 C3D10M, 网格大小为 0.6mm, 网格数量为 47100; 树脂划分类型为 C3D4, 网格大小为 0.5mm, 网格数量为 94800。利用有限元分析软件 ABAQUS 中动态算法进行数值计算。与均质模型一样, 只模拟三维编织复合材料线弹性阶段的应力分布, 纱线和树脂界面采用 Tie 约束。

提取微观结构模型正中间截面 (FBG 传感器栅区所在位置) 的应力分布云图, 纱线部分如图 11 所示, 树脂部分如图 12 所示。

如图 11 所示, 对于纱线结构, 提取拉伸初始时刻 ( $T_1$ ) 到模拟结束时刻 ( $T_6$ ) 之间共 6 个时刻的应力分布云图。可以看出, 拉伸初始阶段 ( $T_1 \sim T_2$ ), 中间和边缘区域纱线的应力响应几乎一致; 随着拉伸的

进行 ( $T_3 \sim T_4$ ), 部分内单胞纱线应力要略大于其他区域; 接近结束时刻 ( $T_5 \sim T_6$ ), 内单胞纱线应力进一步增大, 且整个截面应力分布较为均匀, 边缘区域的应力相对较低。

如图 12 所示, 对于树脂, 只提取初始 ( $t_0$ ) 和结束 ( $t_1$ ) 两个时刻的应力分布云图。由图 12 可知, 树脂应力分布均匀, 无明显差异, 且应力数值很低。

通过以上分析, 三维编织复合材料的增强体 (纱线) 承担了大部分载荷, 而树脂承载很低, 材料应力分布主要由纱线决定。

## 测试结果与讨论

为验证有限元分析结果的正确性, 对三维编织复合材料试样进行准静态单轴拉伸测试, 并对测试结果进行分析。三维编织复合材料被认为横观各向同性材料, 小变形下, FBG 传感器 (测量内部应变) 和应变片 (测

量外表面应变) 可以对材料应变 (1% 左右) 精确原位测量, 形变过大会导致数据失真和传感器失效。因此, 传感器只记录三维编织复合材料试样拉伸线弹性阶段的原位应变。

### 1 宏观力学曲线

三维编织复合材料试样在 MTS 测试系统上进行准静态单轴拉伸测试, 得到工程载荷 - 位移曲线 (图 13 (a)) 和工程应力 - 应变曲线 (图 13 (b)), 反映了材料整体力学性能。由图 13 可见, 在拉伸性弹性阶段, 不论有无内置 FBG 传感器的试样, 峰值载荷均为 65kN 左右, 峰值应力为 750MPa 左右, 最大工程应变为 3.0% 左右, 各曲线的斜率 (弹性模量) 相差不大。未内置 FBG 传感器试样和 FBG 传感器内置在不同位置的试样, 曲线无明显差异, 由此表明是否内置 FBG 传感器对材料整体拉伸性能基本无影响, 与文献 [22] 研究结果相一致。

### 2 原位应变曲线

FBG 传感器内置于三维编织复合材料试样内部, 栅区位于正中间截面位置的面单胞和内单胞处; 同时, 在栅区对应的试样外表面粘贴轴向应变片 (内单胞和面单胞处栅区所对应的外表面为同一位置)。FBG 传感器和应变片同时记录三维编织复合材料试样内部和外表面轴向应变, 见图 14 (a), 其中 “EXP\_RSG” 代表应变片测量曲线, “EXP\_FBG\_I”、“EXP\_FBG\_S” 分别代表 FBG 传感器测得的内单胞和面单胞处应变曲线。图 14 (b) 为试验结果与数值计算结果对比曲线图。

由图 14 (a) 可以看出, 在线弹性阶段, 应变片测得的外表面原位应变与 FBG 传感器测得的内单胞处原位应变几乎一致, 最大值约为 0.8%。外表面和内单胞处的原位应变曲线都略高于面单胞处原位应变曲线, 最大差值接近 0.1%。FBG 传感器内置于材料, 四周均被复合材料紧密包

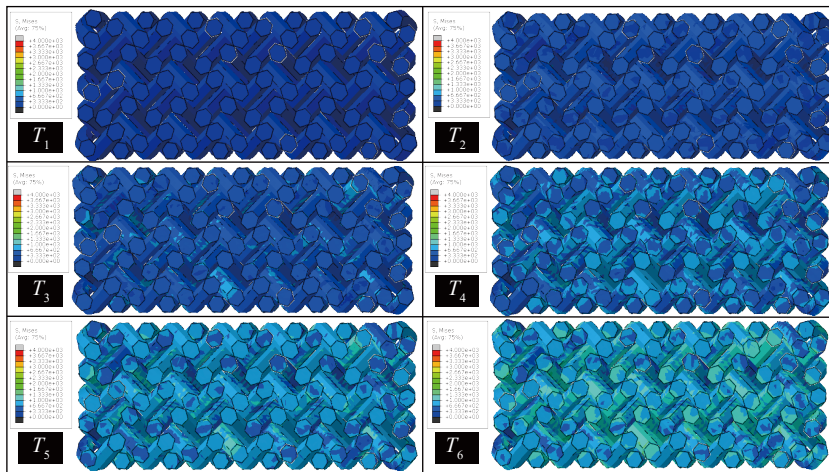


图11 微观模型纱线结构应力分布云图

Fig.11 Stress distribution of yarns from micro-structural model

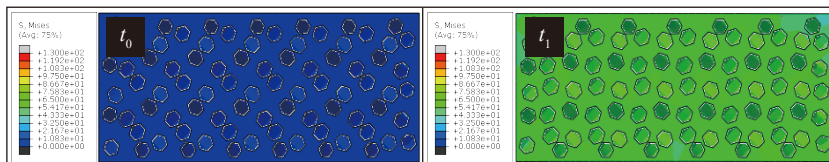


图12 微观模型树脂应力分布云图

Fig.12 Stress distribution of resin from micro-structural model

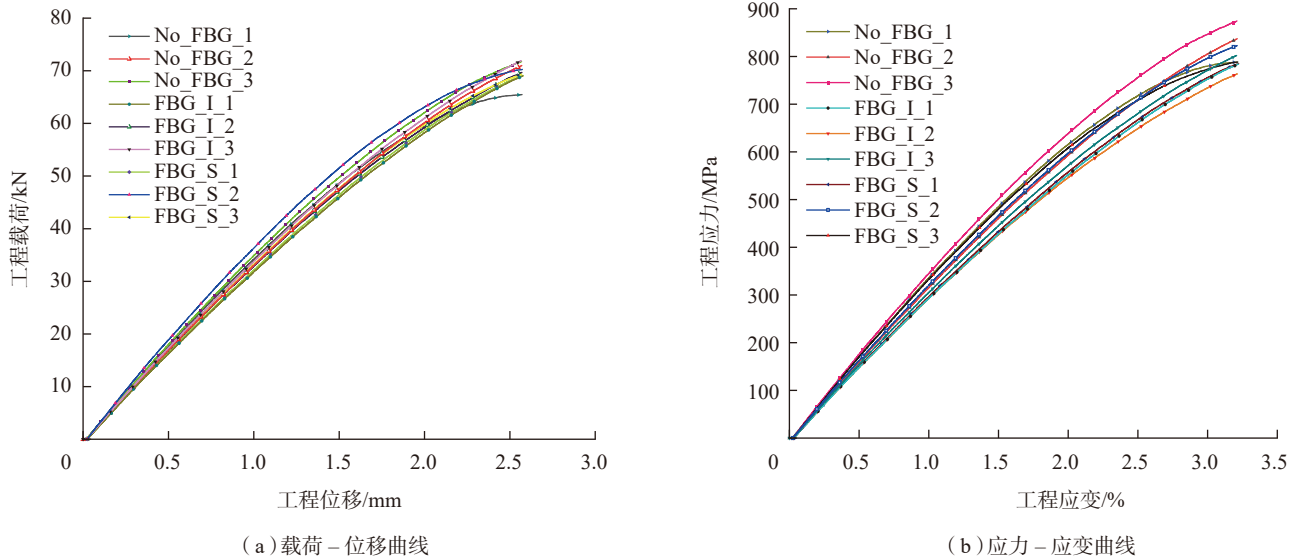


图13 工程力学曲线

Fig.13 Engineering mechanical curves

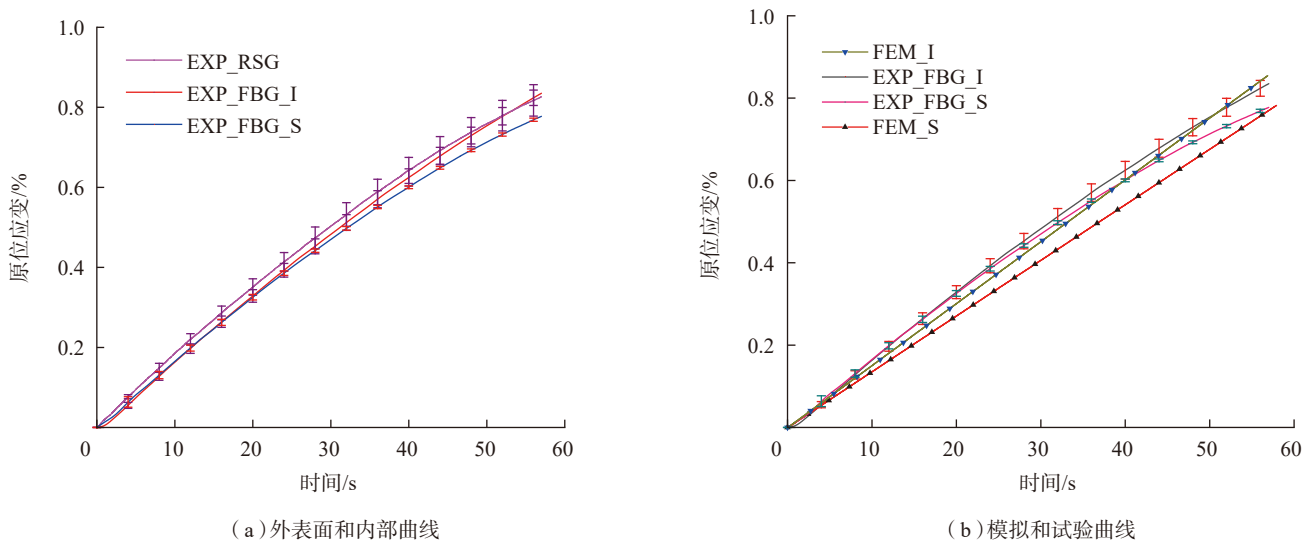


图14 原位应变-时间曲线

Fig.14 In-situ strain-time curves

裹,处于完全非自由状态,材料形变直接通过界面传递给FBG传感器,从而导致光栅波长发生漂移。内单胞和面单胞处结构有所不同,使测得的原位应变有所差异。而应变片粘贴于外表面,处于半自由状态,复合材料的外表面形变先通过黏胶传递给应变片基底,再传递给敏感栅。这种结构和传感器所处状态上的差异,使应变片测得的外表面原位应变

略大于与它只有一层面单胞相隔的FBG传感器所测原位应变。

另外,图14(a)中曲线“EXP\_FBG\_I”和曲线“EXP\_FBG\_S”的行为表现与细观结构模型有限元分析结果(图11)吻合。在拉伸初始阶段,内单胞和面单胞处应力几乎一致,表现为内单胞和面单胞处原位应变曲线重合;随着拉伸载荷的增加,内单胞处应力略大于面单胞处,表现出内

单胞处曲线略高于面单胞处,直至线性弹性阶段结束,二者差值达到最大(0.08%左右)。

图14(b)中,均质模型内单胞处模拟曲线与FBG传感器测得的内单胞处原位应变曲线较为吻合;面单胞处的模拟曲线与测试曲线略有差异,但基本趋势较为一致。这是因为三维编织复合材料的主体部分为内单胞,面单胞占比较小;而均质模

型是基于均匀化理论构建,模型属性大部分由内单胞性质决定,从而使内单胞处原位应变的有限元分析和试验结果更为接近。曲线结果表明三维编织复合材料轴向受准静态拉伸载荷时,内单胞处承载略大于面单胞处。

此外,FBG传感器和应变片所测曲线都为平滑曲线,未出现锯齿状抖动,表明在拉伸线弹性阶段,传感器与复合材料界面接合良好,未发生脱粘现象。图14所示FBG传感器完整记录了三维编织复合材料内部特定位置的原位应变随时间的变化曲线,表明通过在三维编织复合材料内部某一位置内置FBG传感器可用于长期在线监测结构内部应变变化,实现结构健康监测。

## 结论

(1) FBG传感器能够精准原位测量材料内部微小应变,实现结构健康监测。内置FBG传感器对三维编织复合材料拉伸性能几乎无影响,无论是否内置FBG传感器试样的各工程载荷-位移曲线、工程应力-应变曲线吻合性较好。

(2) 均质模型和细观结构模型有限元分析结果显示三维编织复合材料轴向受载时,正中间截面应力分布较为均匀,内单胞处应力略大于面单胞处;纱线承担的载荷远大于树脂。

(3) 准静态单轴拉伸载荷下,三维编织复合材料原位应变与结构有关。三维编织复合材料轴向正中间截面,内单胞处原位应变略大于面单胞处原位应变,最大差值0.08%左右;外表面原位应变高于与此只有一层面单胞相隔的内部原位应变,最大差值接近0.1%。

(4) 均质模型和细观结构模型有限元分析结果与试验测试分析结果一致,能够反映三维编织复合材料内部的真实应力、应变分布状态,该

两类有限元模型可用于编织复合材料构件设计。

## 参考文献

- [1] CHAMIS C. Mechanics of composite materials: past, present, and future[J]. Journal of Composites Technology and Research, 1989, 11(1): 3-14.
- [2] MÉNDEZ A, CSIPKES A. Overview of fiber optic sensors for NDT applications[M]// Nondestructive Testing of Materials and Structures. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011: 179-184.
- [3] RAMAKRISHNAN M, RAJAN G, SEMENOVA Y, et al. Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials[J]. Sensors, 2016, 16(1): 99.
- [4] LUKASZEWICZ DIRKH J A, WARD C, POTTER K D. The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future[J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(3): 997-1009.
- [5] 郑广强,姚锋,周晓芹.自动铺丝技术及其在A350制造过程中的应用[J].航空制造技术,2017,60(16): 76-82.
- ZHENG Guangqiang, YAO Feng, ZHOU Xiaoqin. Application of automatic fiber placement technology in A350 manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(16): 76-82.
- [6] 陈利,李嘉禄,李学明.三维编织中纱线的运动规律分析[J].复合材料学报,2002,19(2): 71-74.
- CHEN Li, LI Jialu, LI Xueming. Analysis of the yarn movement in 3D braids[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2002, 19(2): 71-74.
- [7] 李嘉禄.三维编织技术和三维编织复合材料[J].新材料产业,2010(1): 46-49.
- LI Jialu. 3D braided technology and 3D braided composites[J]. Advanced Materials Industry, 2010(1): 46-49.
- [8] KANG T J, KIM S, JUNG K. Prediction of mechanical properties of 3D braided composite using CAD system[J]. Textile Research Journal, 2008, 78(2): 174-182.
- [9] ZHANG C, XU X W. Finite element analysis of 3D braided composites based on three unit-cells models[J]. Composite Structures, 2013, 98: 130-142.

[10] 李嘉禄,肖丽华,董孚允.立体多向编织结构对复合材料性能的影响[J].复合材料学报,1996,13(3): 71-75.

LI Jialu, XIAO Lihua, DONG Fuyun. Influence of three dimensional and multidirectional braid structures on the properties of composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 1996, 13(3): 71-75.

[11] 孙颖,李嘉禄,李学明.二步法和四步法三维编织复合材料轴向力学性能的比较研究[J].天津工业大学学报,2003,22(4): 1-4.

SUN Ying, LI Jialu, LI Xueming. Research on the axial direction mechanical properties of the two-step and four-step three-dimensional braided composites[J]. Journal of Tiangong University, 2003, 22(4): 1-4.

[12] 李典森,刘子仙,卢子兴,等.三维五向碳纤维/酚醛编织复合材料的压缩性能及破坏机制[J].复合材料学报,2008,25(1): 133-139.

LI Diansen, LIU Zixian, LU Zixing, et al. Compressive properties and failure mechanism of three dimensional and five directional carbon fiber/phenolic braided composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2008, 25(1): 133-139.

[13] 严实.三维四向编织复合材料的力学性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.

YAN Shi. Investigation on the mechanical behavior of three-dimensional four-directional braided[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.

[14] ZHAO G Q, WANG J Y, HAO W F, et al. Numerical study on the tensile behavior of 3D four directional cylindrical braided composite shafts[J]. Applied Composite Materials, 2018, 25(5): 1103-1114.

[15] FANG X, LIAO C R, WANG D N. Femtosecond laser fabricated fiber Bragg grating in microfiber for refractive index sensing[J]. Optics Letters, 2010, 35(7): 1007-1009.

[16] NIU X M, SUN Z G, SONG Y D, et al. Tensile properties of 3-dimension-4-directional braided C/SiC composite based on double-scale model[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed, 2017, 32(6): 1271-1279.

[17] GU B. A microstructure model for finite-element simulation of 3D rectangular braided composite under ballistic penetration[J]. Philosophical Magazine, 2007, 87(30): 4643-4669.

- [18] JIANG L L, ZENG T, YAN S, et al. Theoretical prediction on the mechanical properties of 3D braided composites using a helix geometry model[J]. *Composite Structures*, 2013, 100: 511–516.
- [19] ZHANG C, CURIEL-SOSA J L, BUI T Q. A novel interface constitutive model for prediction of stiffness and strength in 3D braided composites[J]. *Composite Structures*, 2017, 163: 32–43.
- [20] SHI B H, ZHANG M, LIU S K, et al. Multi-scale ageing mechanisms of 3D four directional and five directional braided composites' impact fracture behaviors under thermo-oxidative environment[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 155: 50–65.
- [21] MONTAZERIAN H, RASHIDI A, MILANI A S, et al. Integrated sensors in advanced composites: a critical review[J]. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2019, 45(3): 1–52.
- [22] LI Y, WAN Z K, LI J L. Research on health monitor for three-dimensional braided composite material[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 48/49: 1389–1394.
- [23] RAMAKRISHNAN M, RAJAN G, SEMENOVA Y, et al. The influence of thermal expansion of a composite material on embedded polarimetric sensors[J]. *Smart Materials and Structures*, 2011, 20(12): 125002.
- [24] HAENTZSCHE E, MUELLER R, HUEBNER M, et al. Manufacturing technology of integrated textile-based sensor networks for in situ monitoring applications of composite wind turbine blades[J]. *Smart Materials and Structures*, 2016, 25(10): 105012.
- [25] 黄睿. 三维编织复合材料性能及工艺的光纤测试技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.
- HUANG Rui. Research on performances & technics of 3D braided composites based on optical fiber measurement & testing technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002.
- [26] 李向华. 基于编入光纤传感器的三维编织复合材料性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2005.
- LI Xianghua. Research on material performance of 3D braided composites based on co-braided optical fiber sensors[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [27] LI X H, ZHAO C S, LIN J, et al. The internal strain of three-dimensional braided composites with co-braided FBG sensors[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(7): 819–826.
- [28] YUAN S F, HUANG R, RAO Y J. Internal strain measurement in 3D braided composites using co-braided optical fiber sensors[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2004, 20(2): 199–202.
- [29] 刘小会, 袁慎芳. 基于光纤光栅的编织复合材料多点热应变监测[J]. *南京航空航天大学学报*, 2004, 36(5): 658–661.
- LIU Xiaohui, YUAN Shenfang. Distributing measurement of multipoint internal thermal strain of 3D braided composite using fiber Bragg grating sensor[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2004, 36(5): 658–661.
- [30] JUNG K, JINKANG T E. Cure monitoring and internal strain measurement of 3D hybrid braided composites using fiber Bragg grating sensor[J]. *Journal of Composite Materials*, 2007, 41(12): 1499–1519.
- [31] 贾卫芳. 基于光纤 Bragg 光栅传感器的碳纤维复合材料内部热应变场监测[D]. 上海: 东华大学, 2016.
- JIA Weifang. Internal thermal strain measurement of carbon fiber reinforced composites with embedded fiber Bragg grating sensors[D]. Shanghai: Donghua University, 2016.
- [32] RAO Y J, YUAN S F, ZENG X K, et al. Simultaneous strain and temperature measurement of advanced 3D braided composite materials using an improved EFPI/FBG system[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, 38(6): 557–566.
- [33] LENG J S, ASUNDI A. Structural health monitoring of smart composite materials by using EFPI and FBG sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, 103(3): 330–340.
- [34] 殷燕子. 耐温光纤布拉格光栅传感器涂层的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- YIN Yanzi. Research on heat resistance coating of optical fiber Bragg grating sensors[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [35] 武湛君, 万里冰, 张博明, 等. 光纤光栅应变传感器监测复合材料层板疲劳过程[J]. *复合材料学报*, 2004, 21(6): 75–81.
- WU Zhanjun, WAN Libing, ZHANG Boming, et al. Fatigue process monitoring for composite laminates with fiber Bragg gratings[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2004, 21(6): 75–81.
- [36] LUYCKX G, VOET E, LAMMENS N, et al. Strain measurements of composite laminates with embedded fibre Bragg gratings: Criticism and opportunities for research[J]. *Sensors*, 2010, 11(1): 384–408.
- [37] 赵磊. Bragg 光纤光栅的应力及温度传感特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
- ZHAO Lei. Research on strain and temperature sensing properties of fiber Bragg gratings[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.
- [38] 李刚, 欧书方, 徐剑. 石英光纤涂层材料[J]. *涂料技术与文摘*, 2008, 29(6): 2–5, 14.
- LI Gang, OU Shufang, XU Jian. Introduction coating materials for silica optical fiber[J]. *Coatings Technology & Abstracts*, 2008, 29(6): 2–5, 14.
- [39] CAMPANELLA C, CUCCOVILLO A, CAMPANELLA C, et al. Fibre Bragg grating based strain sensors: review of technology and applications[J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 3115.
- [40] 董纪伟. 基于均匀化理论的三维编织复合材料宏观力学性能数值模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- DONG Jiwei. Homogenization-based method for simulating macro and micro mechanical properties of 3D braided composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [41] 王海鹏. 三维编织复合材料力学性能测试的数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- WANG Haipeng. The numerical simulation on mechanics properties test of three-dimensional textile composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [42] 吴利伟. 四步法三维编织复合材料弯曲疲劳性质及损伤演化有限元分析[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- WU Liwei. Finite element analysis on bending fatigue and damage evolution of three-dimensional four-step braided composite materials[D]. Shanghai: Donghua University, 2014.

通讯作者: 顾伯洪, 教育部长江学者特聘教授, 东华大学纺织学院院长, 研究方向为纺织结构复合材料设计与制造, E-mail: gubh@dhu.edu.cn.

## Finite Element Analysis and Measurement on In-Situ Strain Distribution in 3D Braided Composites

YAN Shuo, SUN Baozhong, GU Bohong

(College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**[ABSTRACT]** Three-dimensional (3D) braided composites have been widely applied to aero-structure design. They are subjected to various complex loadings during aerospace engineering service. If the in-situ strains in 3D braided composites have been measured precisely, the early-warning failure system and strength optimization could be achieved. The fiber Bragg grating (FBG) sensors in 3D braided composites were embedded, and strain gauges at the surfaces were glued. In-situ strains of the interior and outer surfaces of the 3D braided composites were simultaneously measured. Homogeneous model and micro-structural model have been established for finite element analysis (FEA). The internal in-situ strain distributions have been compared between FEA and the tests. The FEA results were in good agreement with the tests. Under quasi-static uniaxial tensile loading, the strain varies with the different locations. The strain distribution is uniform at the middle cross-section of 3D braided composites. The strain of the interior unit-cell is slightly larger than the strain of the surface unit-cell (the maximum difference is about 0.08%). The strain of the outer surface is slightly larger than the strain of the surface unit-cell (the maximum difference is about 0.1%). It is inferred that the different strains at the different locations in the 3-D braided composites should be considered fully to optimize the efficiency of the material design.

**Keywords:** Structural health monitoring; 3D braided composites; In-situ strain measurement; Fiber Bragg grating (FBG) sensor; Microstructure; Finite element analysis (FEA)

(责编 大漠)

(上接第69页)

## Review of Flexible Sensor Networks for Structural Health Monitoring of Aircraft Smart Skin

WANG Yu<sup>1</sup>, QIU Lei<sup>1</sup>, HUANG Yongan<sup>2</sup>

(1. College of Aeronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**[ABSTRACT]** Aircraft smart skin technology is a revolutionary new technology that can change the future advanced aircraft design, and structural health monitoring (SHM) is one of its essential functions. To realize the SHM of aircraft smart skin, it is necessary to integrate large-scale and flexible sensor networks into aircraft structures. According to the actual requirements and limitations of aircraft smart skin applications, combined with different structural health monitoring methods, the design, manufacturing process and function realization of the corresponding flexible sensor networks are reviewed. Finally, the key challenges faced by the development of aircraft smart skin technology in the future are summarized and prospected.

**Keywords:** Aircraft smart skin; Structural health monitoring; Guided wave; Condition monitoring; Flexible sensor network

(责编 大漠)