

引文格式: 李根, 吴天伟, 孙宝忠, 等. 开孔三维机织角联锁碳纤维复合材料拉伸力电行为[J]. 航空制造技术, 2026, 69(9): 25010061.
LI Gen, WU Tianwei, SUN Baozhong, et al. Electromechanical behavior of open-hole three-dimensional angle-interlock woven carbon fiber reinforced polymer under tensile loading[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(9): 25010061.

开孔三维机织角联锁碳纤维复合材料 拉伸力电行为

李根, 吴天伟, 孙宝忠, 顾伯洪

(东华大学, 上海 201620)

[摘要] 碳纤维复合材料的力电行为对其结构自感知至关重要。本文采用四探针法和数字图像相关技术(DIC)研究了不同偏轴角度(0°, 45°, 60°, 90°)开孔三维机织角联锁碳纤维复合材料拉伸力电行为, 揭示偏轴角度对开孔三维机织角联锁复合材料力电行为的影响。研究发现, 拉伸性能受偏轴角度影响, 轴向试样(0°, 90°)表现出更高的抗拉强度和更低的断裂应变, 碳纤维纱线为主要承载部分, 纤维抽拔是主导失效模式; 偏轴试样(45°, 60°)呈现非线性变形, 载荷主要由树脂基体承担, 基体开裂与界面脱粘是主要损伤形式。复合材料力电行为同样受偏轴角度影响, 电流密度和电势分布均表现出角度相关性; 纱线传导和接触传导分别是轴向和偏轴试样的主要导电机理, 轴向试样在断裂前电阻变化率不超过 10%, 偏轴试样最终失效前电阻变化率超过 100%。

关键词: 开孔; 三维机织复合材料; 力电行为; 方向效应; 结构健康监测

中图分类号: TB332

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25010061



李根

博士研究生, 研究领域为纺织结构复合材料电学无损检测。

三维机织复合材料因其优异抗分层能力、结构可设计性强等优点被广泛应用于国防航空航天、交通运输等领域^[1-3]。在工程应用中, 复杂形状结构件常常需要通过螺栓连接, 不可避免地会在复合材料结构上制孔^[4-6]。由于孔周边存在应力集中现象, 孔的引入削弱了复合材料结构的力学性能, 降低了复合材料结构件使用可靠性^[7-9]。在服役过程中对开孔复合材料进行实时结构健康监测对其安全使用具有重要意义。

碳纤维复合材料是一种多功能材料, 其损伤与材料电阻耦合^[10]。机械载荷不仅会导致结构损伤, 还会改变碳纤维复合材料导电网络, 引起

材料电阻变化。因此, 通过监测电阻变化, 可以实时监测材料结构的健康状况^[11-12]。电阻法已经成功应用于碳纤维复合材料拉伸损伤^[13-15]、弯曲损伤^[16-18]、剪切损伤^[19-21]、冲击损伤^[22-24]和疲劳加载损伤^[25-27]的研究中。利用电阻法对开孔机织复合材料进行结构健康监测对其安全服役具有重要意义。已有一些学者对开孔机织复合材料的力电行为进行了初步研究, Lee等^[28]研究了开孔交叉铺层碳纤维增强复合材料的拉伸力电行为, 提出了一种基于力电行为与数据处理工具结合的损伤识别系统, 结合主成分分析(PCA)和K-means聚类算法, 对多维度力电数据进行降

收稿日期: 2025-04-23; 退修日期: 2025-05-31; 录用日期: 2025-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(12372130); 中央高校基本科研业务费专项资金(CUSF-DH-D-2025008)

通信作者: 顾伯洪, 教授, 博士, 研究方向为纺织结构复合材料多尺度建模及多场耦合。

维与聚类分析,实现了不同纤维方向(0° 、 $\pm 45^\circ$ 、 90°)损伤分类识别。Wu等^[29]研究了开孔三维碳纤维角联锁机织复合材料经向拉伸载荷下的力电行为,试验采用两端电流注入和对角电流注入的方法,结合有限元分析电势分布与损伤演化,利用PCA和K-means聚类算法,建立经向拉伸载荷下三维机织角联锁复合材料损伤指标,反映不同损伤模式和损伤累积程度。当前,开孔三维机织复合材料拉伸载荷加载下电阻法结构健康监测尚未得到充分研究,尤其是不同偏轴角度开孔三维机织复合材料电阻变化和损伤演化之间的关系尚不明确。明晰不同偏轴角度开孔三维机织角联锁复合材料的拉伸力电行为,对其结构健康监测具有重要意义。

本文研究不同偏轴角度开孔三维机织角联锁复合材料力电行为,开展准静态拉伸试验,利用四探针法和数字图像相关(DIC)技术连续监测拉伸加载下不同偏轴角度(0° 、 45° 、 60° 、 90°)开孔三维机织角联锁复合材料试样电阻和应变变化,探究电阻变化与材料结构损伤相关性,揭示偏轴角度对开孔三维机织角联锁复合材料力电行为影响,为开孔三维机织角联锁复合材料结构健康监测设计提供参考。

1 试验材料及测试方法

1.1 准静态拉伸试样制备

试样制备如图1所示,图1(a)为3层三维机织角联锁增强体结构示意图,该结构由两组经纱和纬纱组成。经纱为单根12K SYT49S纱线(中复神鹰碳纤维股份有限公司),纬

纱由两根相同的纱线组成,经纱4箱/cm,一箱3入,纬纱密度为2根/cm。树脂为JC-02A/B环氧树脂(常熟佳发化学有限责任公司)。碳纤维和树脂的材料性能参数如表1所示。

通过真空辅助树脂传递模塑成型工艺(Vacuum assisted resin transfer molding, VARTM)制备三维机织角联锁碳纤维/环氧树脂复合材料。固化工艺为 $90^\circ\text{C}/2\text{h}$ 、 $110^\circ\text{C}/1\text{h}$ 、 $130^\circ\text{C}/4\text{h}$,通过燃烧法测得复合材料纤维体积分数为 $39.36\% \pm 0.76\%$ 。如图1(b)所示,使用计算机数字化控制机床(CNC)沿 0° 、 45° 、 60° 和 90° 方向切割,制备中心圆孔半径为5 mm,大小为 $250\text{ mm} \times 250\text{ mm} \times 3.2\text{ mm}$ 的拉

伸试样,拉伸试件两端粘贴环氧玻纤板($50\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$)作为加强片,避免夹持区域出现应力集中现象,如图1(c)所示。图1(d)为拉伸试样四探针测量电阻示意图,使用导电银浆粘贴厚度为0.1 mm的铜片作为电流注入电极,使用外径为0.85 mm的航空镀银导线作为电压电极。通过UNI-T UDP 5306S恒流源向复合材料试样两端A-F铜电极注入100 mA直流电流,Keysight DAQ970A数据采集仪实时同步测量A-F、B-C、C-D、D-E 4个区域的电压变化,利用欧姆定律计算复合材料电阻,利用式(1)计算拉伸过程中各区域的电阻变化率FCR。

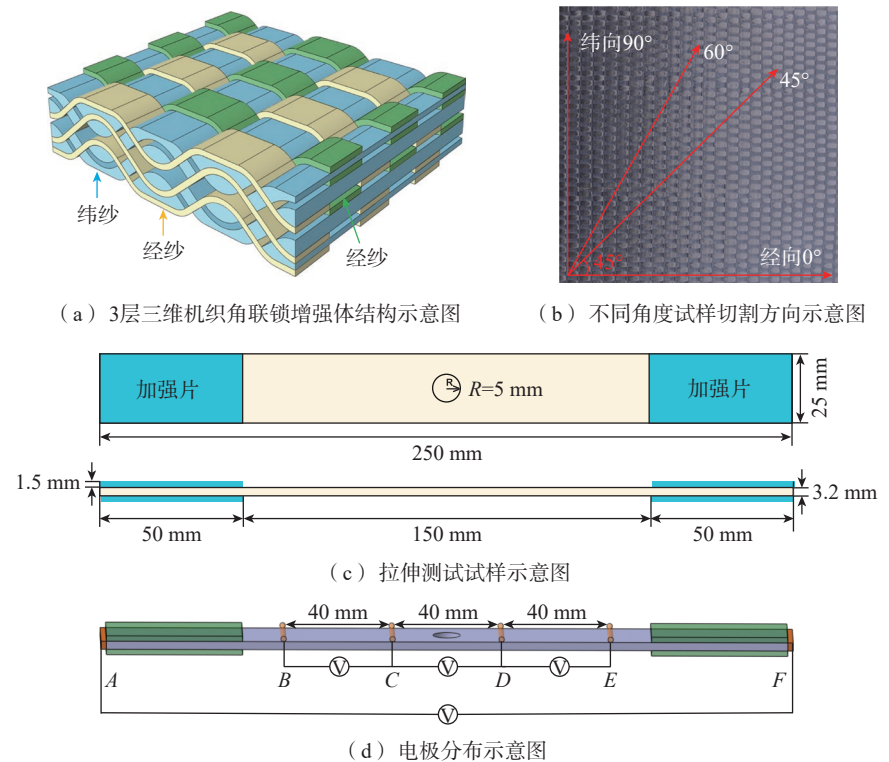


图1 试样制备图
Fig.1 Specimen preparation diagrams

表1 碳纤维和树脂材料性能参数
Table 1 Properties of carbon fiber and resin

材料	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	E_{11}/MPa	$E_{22}=E_{33}/\text{MPa}$	$G_{12}=G_{13}/\text{MPa}$	G_{23}/MPa	$\mu_{12}=\mu_{13}$	μ_{23}
碳纤维	1.80	240000	14000	9000	5000	0.25	0.30
树脂	1.13	2400	2400	890	890	0.35	0.35

$$FCR = \frac{R_t - R_0}{R_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, R_t 表示 t 时刻的电阻值; R_0 表示初始电阻值。

复合材料中 $C-D$ 区域为开孔区域, $B-C$ 、 $C-D$ 、 $D-E$ 区域长度均为 40 mm。本文在遵循 ASTM D3039 标准的基础上,重点对不同偏轴角度三维机织角联锁复合材料拉伸力电行为进行分析。

1.2 试验装置与试验方法

如图 2 所示,采用载荷传感器为 100 kN 的万测 TSE105D,以 2 mm/min 的位移控制模式进行拉伸试验。使用 DIC 分析拉伸加载过程中试样表面的应变变化。在试样中心 $C-D$ 区域喷涂散斑,使用相机记录拉伸过程中该区域散斑图像变化,通过 VIC 2D 软件计算拉伸方向应变变化,识别拉伸损伤情况。

2 开孔三维机织复合材料纱线有限元模型

考虑到树脂基体的绝缘特性,本文仅建立不包含树脂基体的三维机织角联锁复合材料纱线有限元模型,分析偏轴角度和中心圆孔的存在对三维机织角联锁复合材料导电特性的影响,如图 3 所示。

使用三维建模软件 CATIA V5-6R 2019 建立了由经纱 1、经纱 2、纬纱、两端电极和表面电极构成的几何模型。将几何模型导入 ABAQUS 中,利用热电耦合分析求解不同偏轴角度三维机织复合材料纱线电流密度分布和电势分布。热电耦合分析用于温度场和电势场的耦合计算,其矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\varphi\varphi} & \mathbf{K}_{\varphi\theta} \\ \mathbf{K}_{\theta\varphi} & \mathbf{K}_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varphi \\ \Delta\theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_\varphi \\ R_\theta \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中, $\Delta\varphi$ 和 $\Delta\theta$ 是增量电势和温度的修正量; \mathbf{K}_{ij} 是全耦合雅可比矩阵的子矩阵 ($i, j = \varphi, \theta$); R_φ 和 R_θ 分别是电残余矢量和热残余矢量,其电学行为由式 (3) 给出。

$$\int_V \frac{\partial \delta\varphi}{\partial x} \cdot \sigma^E \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} dV = \int_S \delta\varphi J dS + \int_V \delta\varphi r_c dV \quad (3)$$

式中, φ 表示电势场; $\delta\varphi$ 表示变分电势场; σ^E 表示电导率矩阵; r_c 表示体积电流源; J 表示通过 S 进入控制体积的电流密度; V 表示任意表面为 S 的控制体积。

本文忽略经纱和纬纱纤维体积分数差异导致的电导率差别,根据参考文献 [29-31],设置纱线 1 方向电导率为 67500 S/m, 2、3 方向电导率为 0.675 S/m, 铜电极电导率为 5.7×10^7 S/m, 纱线和铜电极之间施加绑定约束, 纱线间接触电导率为 0.45 S/mm²。在 ABAQUS 中对几何模型进行了网格划分, 网格尺寸大小为 0.45 mm,

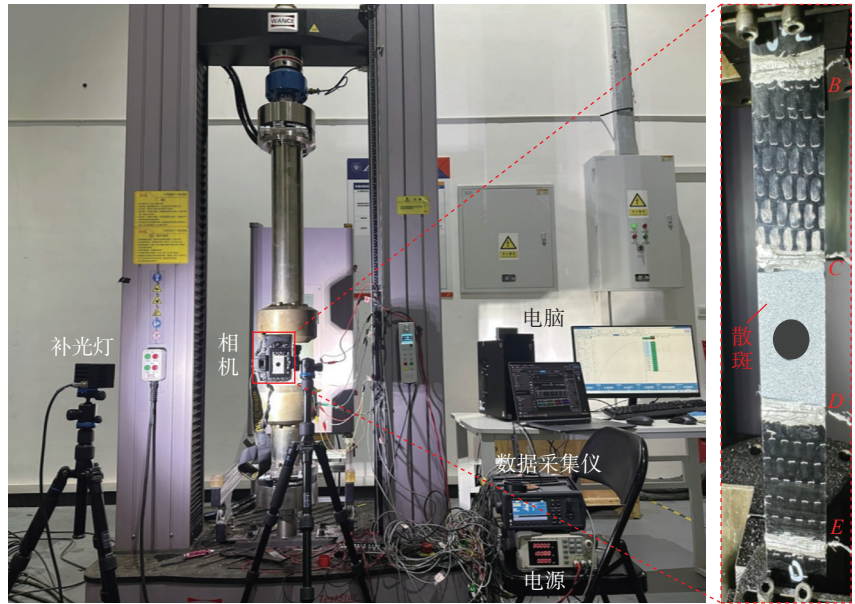


图 2 准静态拉伸试验装置图

Fig.2 Experimental setup for quasi-static tensile testing

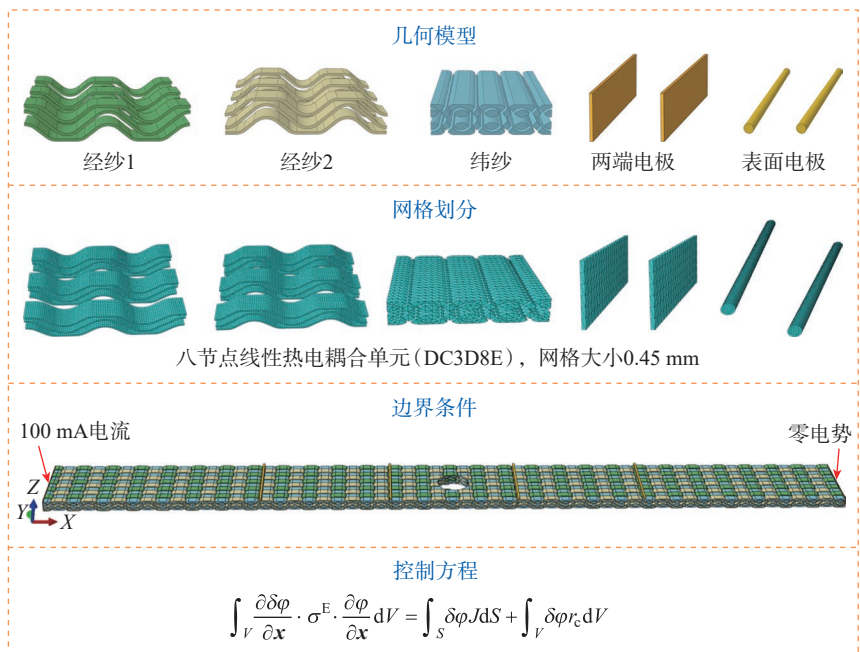


图 3 开孔三维机织复合材料纱线有限元模型

Fig.3 Finite element model of the open-hole 3D woven composite yarn

类型为八节点线性热电耦合单元 (DC3D8E)。模型一端通入 100 mA 电流,另一端接地。

3 结果与讨论

3.1 偏轴角度对三维机织角联锁复合材料拉伸性能影响

图 4 为不同偏轴试样 (0° , 45° , 60° , 90°) 拉伸载荷-位移曲线,表现出良好的可重复性。

拉伸开始阶段,载荷曲线均呈现线性增加。随着拉伸加载,不同角度试样位移-载荷曲线变化趋势明显不同,表明偏轴角度对损伤的发生/演变和破坏机制有显著影响。经向 (0°) 和纬向 (90°) 轴向试样在达到峰值载荷后,载荷骤然下降,试样承力纱线发生了灾难性破坏。与轴向试样 (0° 和 90°) 相比,偏轴试样 (45° 和 60°) 在加载过程中出现了更多负载振荡,曲线显示出“弹塑性”非线性响应,表明材料刚度降低。

图 5 为不同角度代表性试样应力-应变曲线和峰值载荷对比。与偏轴试样相比,轴向试样具有更大的断裂应力和更小的失效应变,原因是载荷方向与纤维束方向一致,碳纤维纱线作为主承力部分,轴向试样表现出较强的抗拉性能,当承载碳纤维失效,试样瞬间发生灾难性失效。而偏轴试样中,纤维束方向与外部载荷方向之间存在一个角度,大部分载荷由树脂基体承载,即使在低拉伸载荷下,树脂基体也会发生剪切流动。纤维束会沿加载方向拉伸并重新排列,在宏观尺度上表现出较大的非线性变形响应,基体开裂和界面脱粘是偏轴试样的主要损伤形式。同时,由于纬向试样中每组纱线都是由两组与经纱同规格碳纤维纱线组成,且纬向样品中纬纱近似伸直,纬向 (90°) 试样相较于经向 (0°) 试样拥有更强的承载能力。与 60° 试样相比, 45° 试样拉伸过程分担更少的拉伸/剪切载荷,从而获得最小的拉伸强度。

图 6 为不同角度试样断裂形貌,经向 (0°) 和纬向 (90°) 轴向试样损伤形式主要为纤维脆性断裂。而偏轴 (45° 和 60°) 试样中,复合材料孔周围受力模式复杂,同时存在剪切损伤、基体开裂和局部纤维断裂等多种损伤形式,偏轴角度对裂纹扩展和损伤模式有显著影响。

3.2 偏轴角度对三维机织角联锁复合材料纱线电学性能影响

图 7 为不同角度试样中心 C-D

区域的电流密度分布图,最大电流密度出现在孔周围尖端区域(三维视图红色实线圆圈区域)。电流密度分布与三维机织角联锁偏轴角度密切相关。经向 (0°) 试样电流沿经纱传导,纬纱上电流密度几乎为 0,这是因为经纱是经向试样主要导电路径,通过经纱和纬纱之间接触传导的电流几乎可以忽略不计。同样,纬向 (90°) 试样电流沿纬纱传导,经纱电流密度几乎为 0,这是因为纬纱是纬

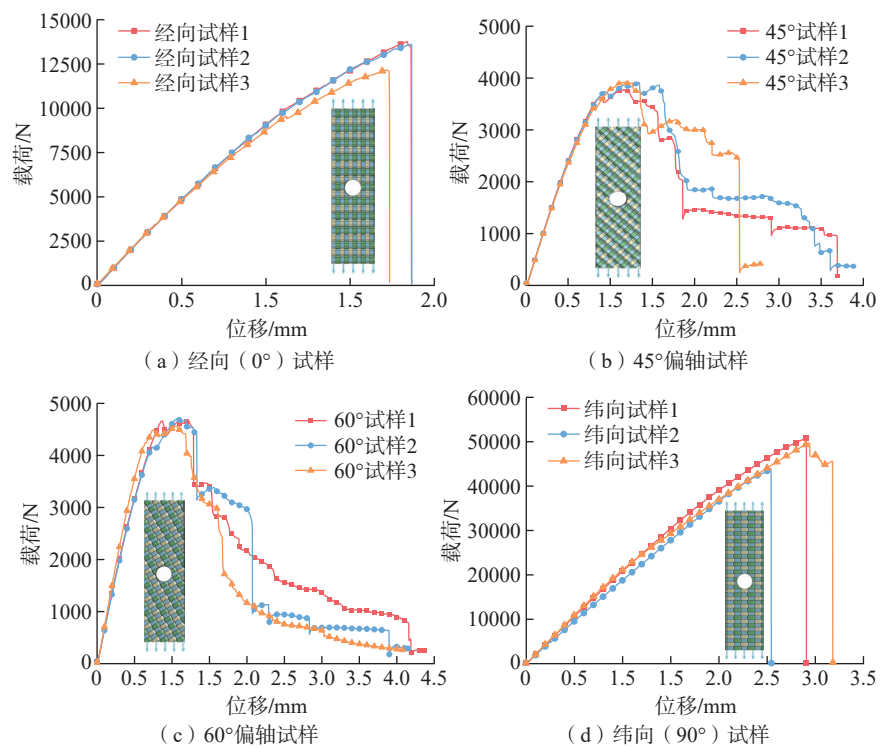


图 4 不同角度试样拉伸载荷-位移曲线

Fig.4 Tensile load-displacement curves of specimens with different orientations

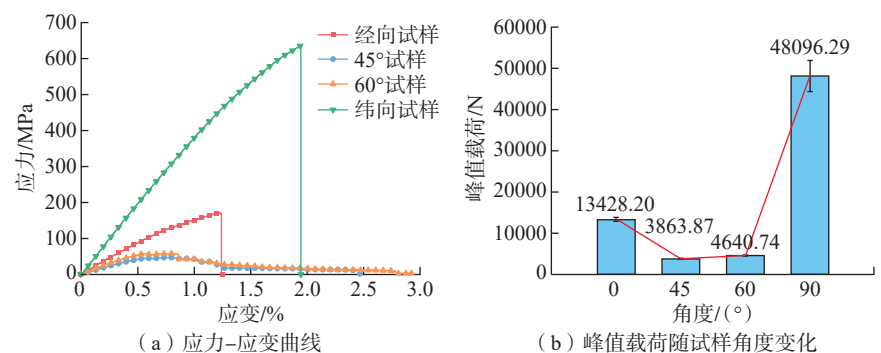


图 5 不同角度代表性试样应力-应变曲线和峰值载荷对比图

Fig.5 Stress-strain curves and peak load comparison of representative specimens with different orientations

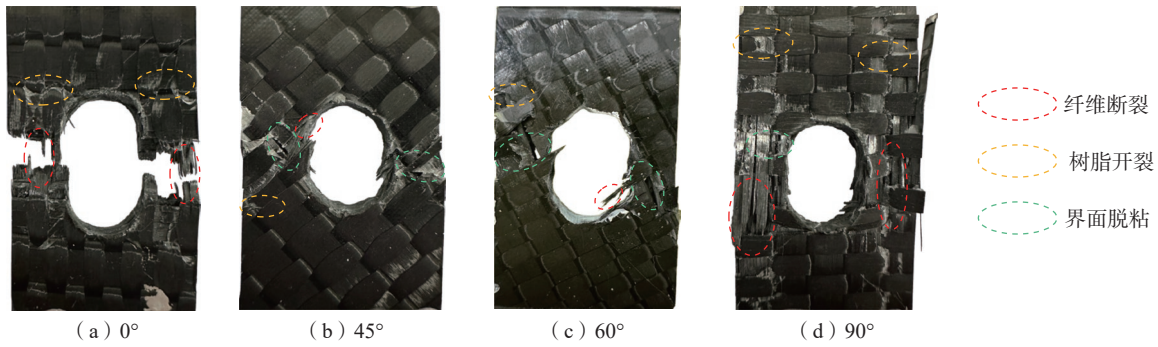


图 6 不同角度试样断裂形貌

Fig.6 Fracture morphology of specimens with different orientations

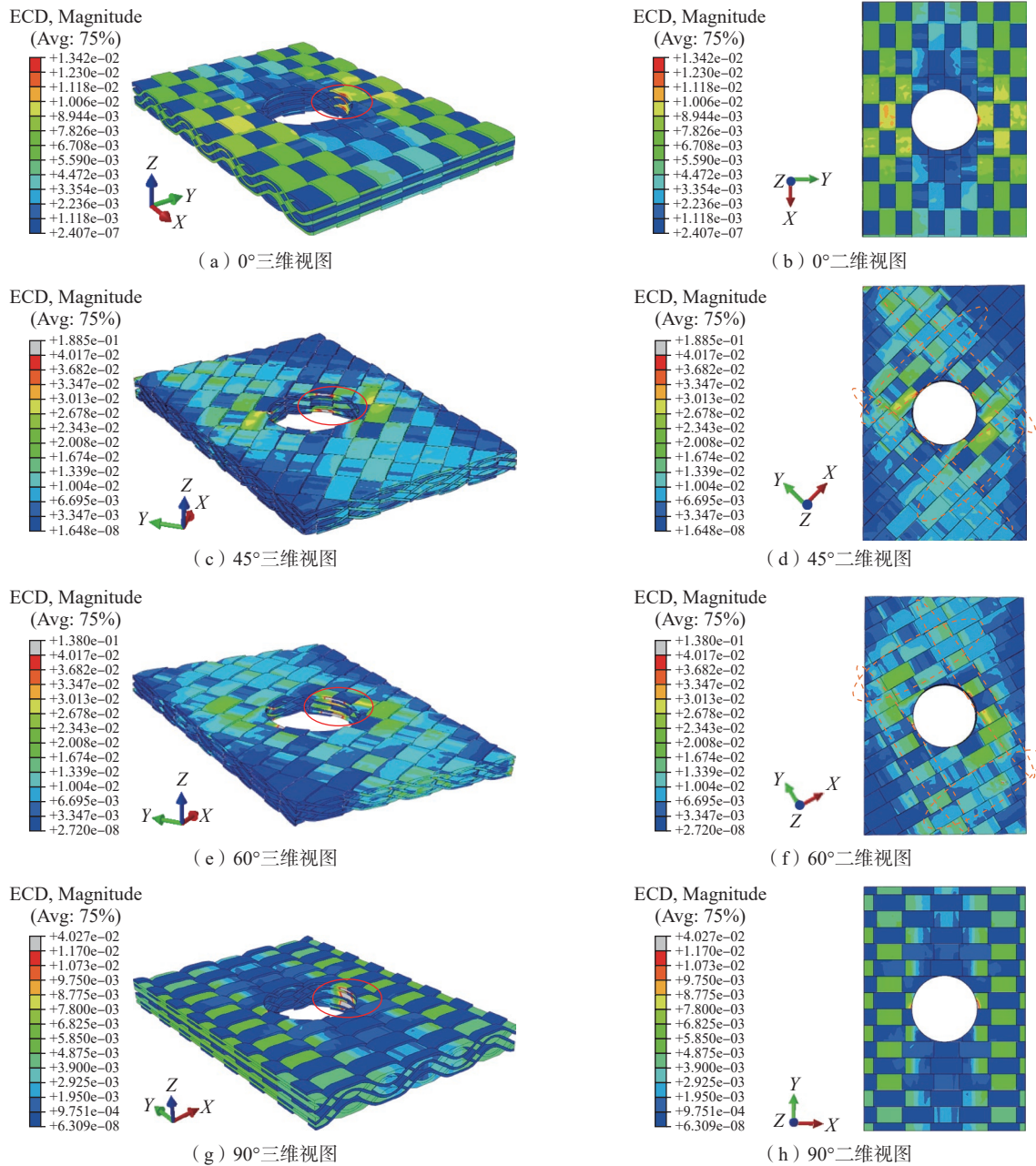


图 7 不同角度试样中心 C-D 区域电流密度分布图

Fig.7 Current density distribution in the central C-D region of specimens with different orientations

向主要导电路径,通过纬纱和经纱之间接触传导的电流几乎可以忽略不计。偏轴 45° 和 60° 试样 $C-D$ 区域内不存在连续导通的经纱或纬纱,经纱和纬纱间接触传导是偏轴试样的主要导电机理,电流密度分布表现出明显的方向性效应(二维视图橙色虚线椭圆区域)。

图 8 为不同角度试样中心 $C-D$ 区域电势分布图。经向 (0°) 试样和纬向 (90°) 试样未开孔区域纱线电势沿纤维长度方向呈现均匀的梯度减小,孔的存在使原来连续的纱线发生断裂,改变了电流传导路径,因此

孔两边纱线和沿孔纱线电势分布出现了明显差异。对于 45° 和 60° 偏轴试样,偏轴角度效应叠加孔效应使得偏轴试样电势分布呈现出与偏轴角度和孔位置相关的复杂分布。

3.3 偏轴角度对三维机织角联锁复合材料力电性能影响

图 9 为拉伸加载中不同角度试样的力电曲线。经向 (0°) 试样和纬向 (90°) 试样在断裂前的最大电阻变化率均不超过 10%,然而,偏轴 45° 和 60° 试样在最终失效前, $C-D$ 区域最大电阻变化率均超过 100%。如 3.2 节分析,经向 (0°) 和纬向 (90°) 轴向

试样中电流沿承载纱线传导,碳纤维纱线为主承力部分,在达到峰值载荷前,碳纤维纱线仅发生微小损伤,达到峰值载荷时,碳纤维纱线发生瞬时脆性断裂,因此在最终断裂前,轴向试样电阻率变化较小。 45° 和 60° 偏轴试样中,电流沿纱线之间的接触传导。在拉伸加载过程中, 45° 和 60° 偏轴试样破坏形式以基体与纤维之间的相对滑移和剪切作用引发的剪切损伤为主。随着拉伸加载过程中损伤程度不断增大,接触点位置和接触压力持续发生变化,电阻呈现不可逆的显著上升。因此,偏轴试样在最

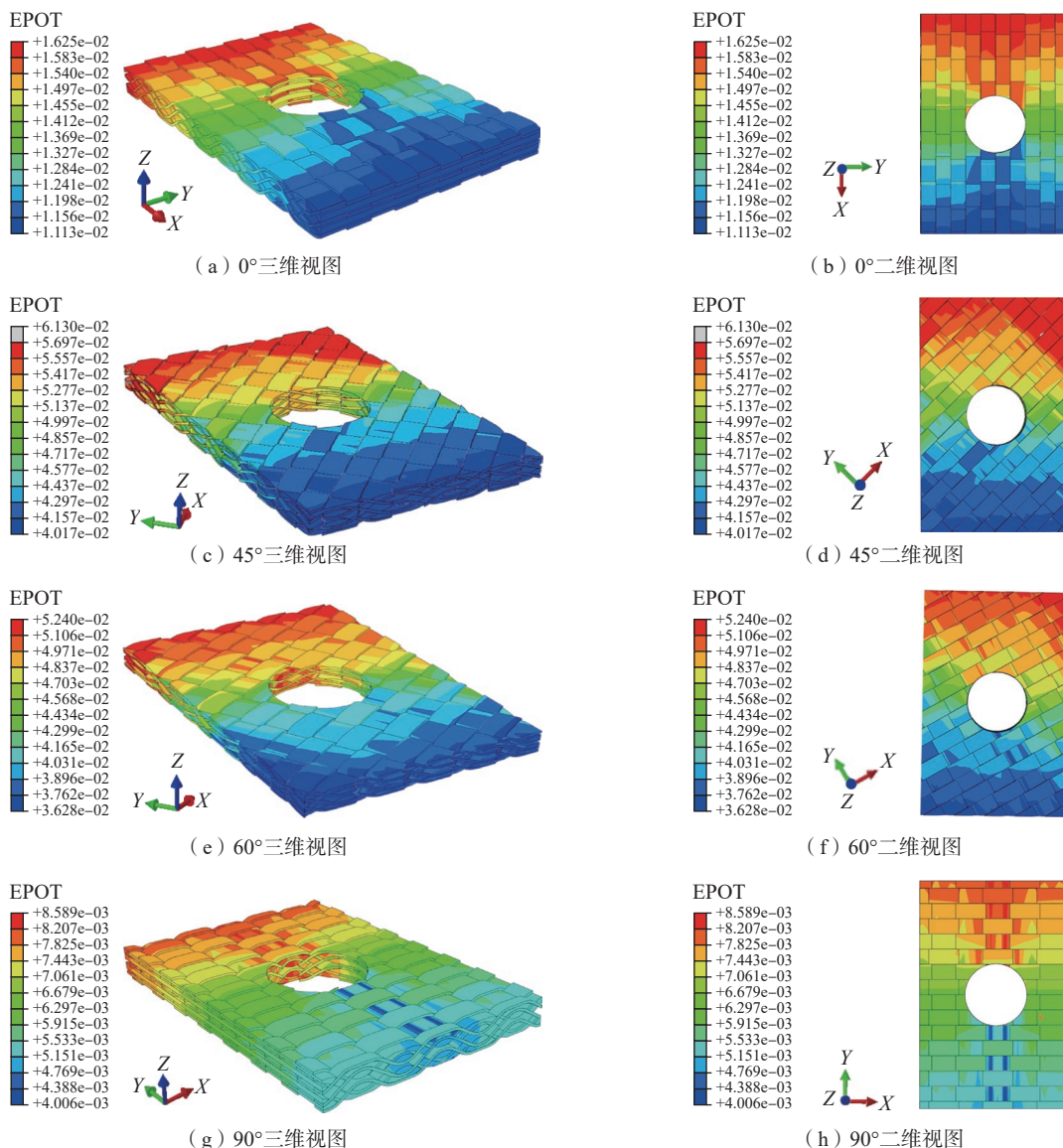


图 8 不同角度试样中心 $C-D$ 区域电势分布图

Fig.8 Electrical potential distribution in the central $C-D$ region of specimens with different orientations

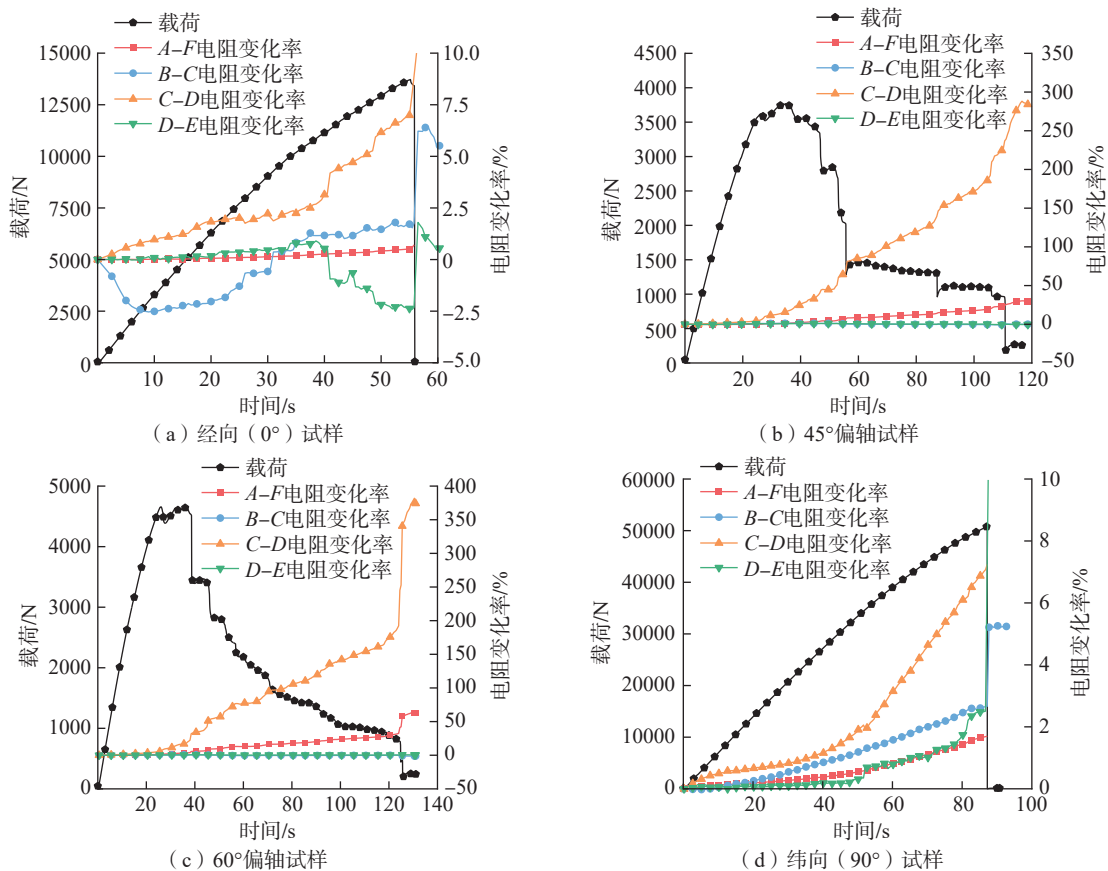


图9 不同角度试样拉伸加载力电曲线

Fig.9 Electromechanical curves of specimens with different orientations under tensile loading

终失效前表现出比轴向试样更大的电阻变化率。对于所有角度试样,4个区域中,C-D区域呈现出最大的电阻变化率,这是由于拉伸加载过程中损伤发生在含孔的C-D区域,不同区域电阻变化率可反映对应区域的损伤严重程度。

图10为经向(0°)试样拉伸加载过程中A-F、B-C、C-D、D-E 4个区域的电阻变化率随载荷变化。A-F区域电阻变化率与C-D区域电阻变化率呈现相似趋势,且C-D区域电阻变化率高于A-F区域。这是由于损伤发生在C-D区域,A-F区域电阻变化率是二探针测量的材料整体电阻变化率,因此A-F区域能监测到C-D区域损伤,但同时又不如C-D区域电阻变化率明显。B-C区域和D-E区域不是主要损伤区域,因此该区域电阻变化率也不如C-D明显。如图10(c)所示,在拉伸载荷曲线上

选择初始点,未损伤点和损伤发生点对应i~vi 6个代表性时刻,结合力电曲线与DIC应变变化,分析电阻变化与材料损伤的关系。

图11为0°试样拉伸加载中,6个代表性时刻所对应的表面应变图。i对应初始表面应变分布,随着拉伸加载,试样进入i~ii阶段,孔周围富树脂区域逐渐出现应力集中现象,纱线尚处在弹性拉伸阶段,电阻随着拉伸载荷缓慢增加;当进入ii~iv阶段时,孔周围树脂裂纹萌生,材料开始出现树脂开裂,纱线和树脂间界面损伤萌发、扩展,纱线随拉伸载荷弹性变形,电阻缓慢增加;i~iv阶段是复合材料“安全服役”阶段,此阶段无需对复合材料进行额外干预;当进入iv~v阶段时,试样进入塑性阶段,界面裂纹和树脂裂纹进一步扩展,孔周围高应力区域逐渐增多,纤维出现损伤,电阻变化率开始出现急剧变化

趋势;iv~v阶段是复合材料“损伤起始”阶段,电阻变化率在2.2%~4.19%之间,当电阻变化率超过4.19%时,需对结构件进行进一步检查,以判断是否符合安全服役要求,电阻变化率的突增可为材料提供早期预警;v~vi阶段是复合材料的“损伤演化”阶段,在此阶段树脂裂纹和界面损伤迅速累积扩展,纤维损伤加剧,电阻变化率急剧变化,最终到达vi时,承载纱线断裂,材料失效,电阻变化率突增。

图12为45°试样拉伸加载中A-F、B-C、C-D、D-E 4个区域的电阻变化率随载荷的变化。45°试样A-F区域电阻变化率与C-D区域电阻变化率也呈现相似趋势,且C-D区域电阻变化率高于A-F区域。由于B-C、D-E区域不是损伤发生区域,因此电阻变化率变化不明显。如图12(c)所示,在拉伸载荷曲线上选

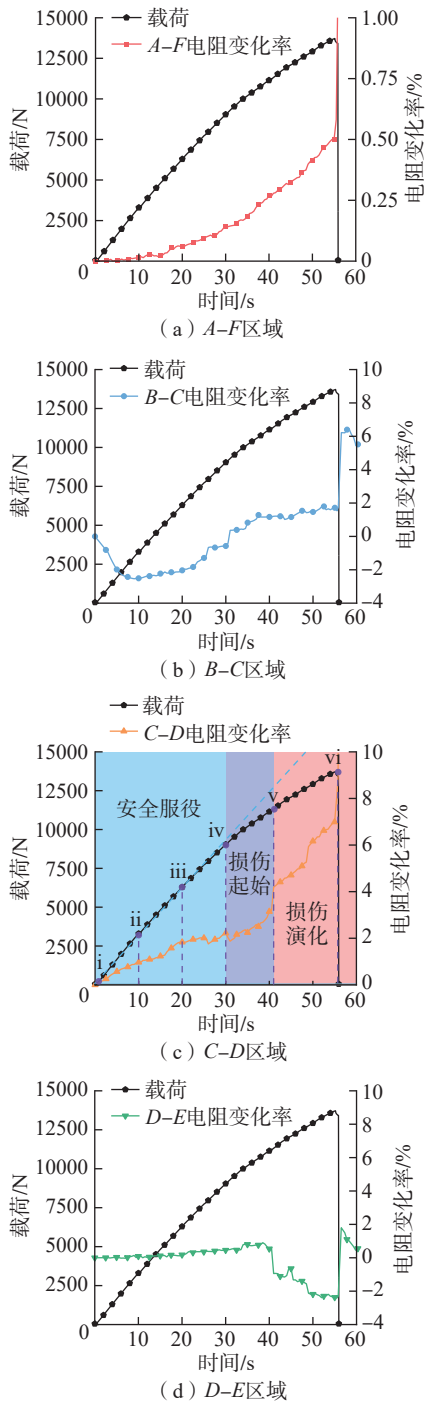


图 10 经向(0°)试样拉伸加载过程中不同区域力电曲线

Fig.10 Electromechanical curves in different regions of warp (0°) specimen during tensile loading

择初始点,未损伤点和损伤发生点对应 6 个代表性时刻,结合力电曲线与 DIC 应变变化,分析电阻变化与材料损伤的关系。

图 13 为 45° 试样拉伸加载过程

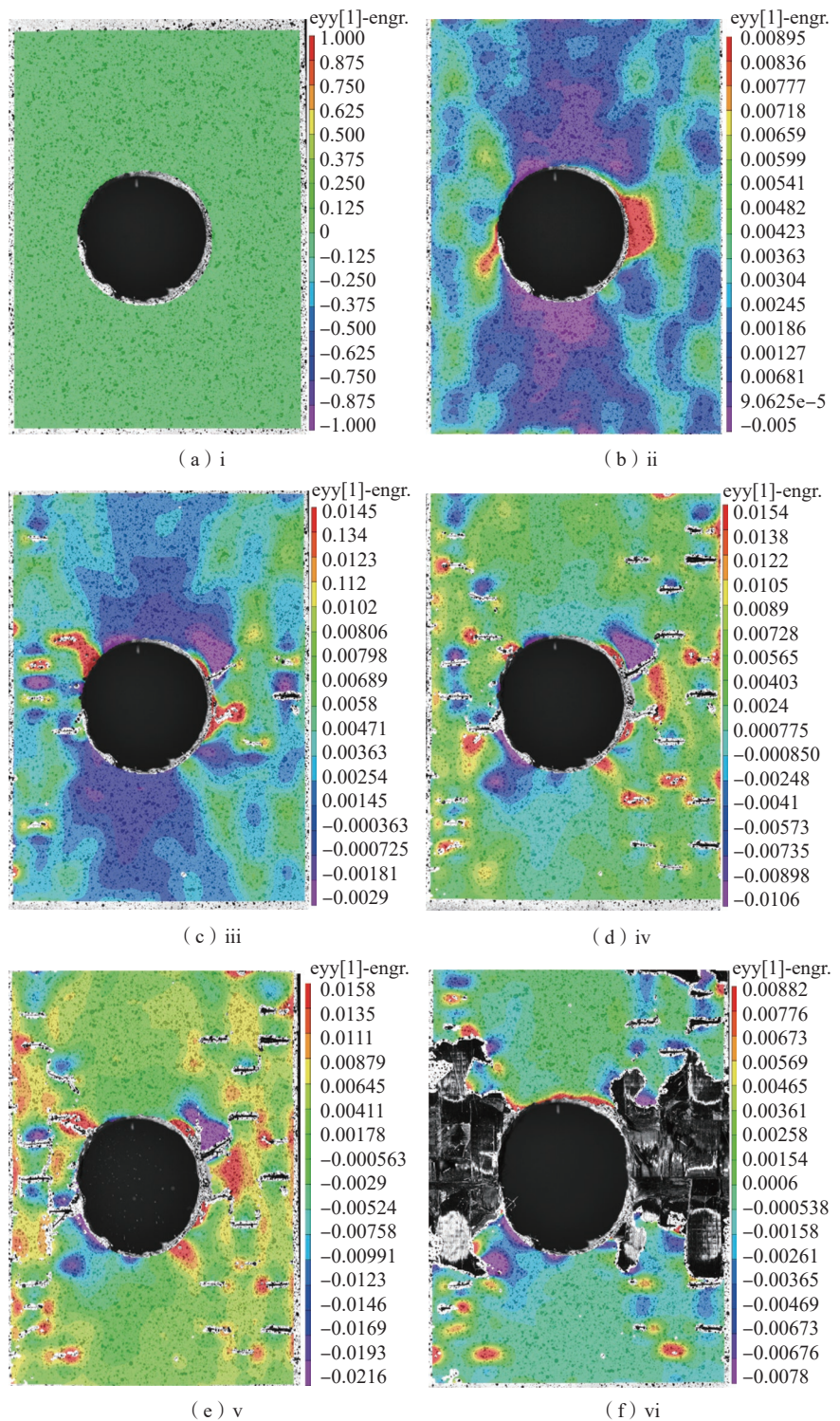


图 11 经向(0°)试样拉伸加载过程中应变变化

Fig.11 Strain evolution of warp (0°) specimen during tensile loading

中,6 个代表性时刻所对应的表面应变图。i 对应初始表面应变分布,随着拉伸加载,试样进入 i~ii 阶段,孔周围富树脂区域逐渐出现应力集中现象,纱线尚处在弹性拉伸阶段,电

阻随着拉伸载荷缓慢增加;当进入 ii~iii 阶段时,如图 13 (c) 所示,孔周围沿 45° 方向出现高应力区域,树脂裂纹萌生,试样电阻缓慢增加; i~iii 阶段是复合材料“安全服役”阶段,

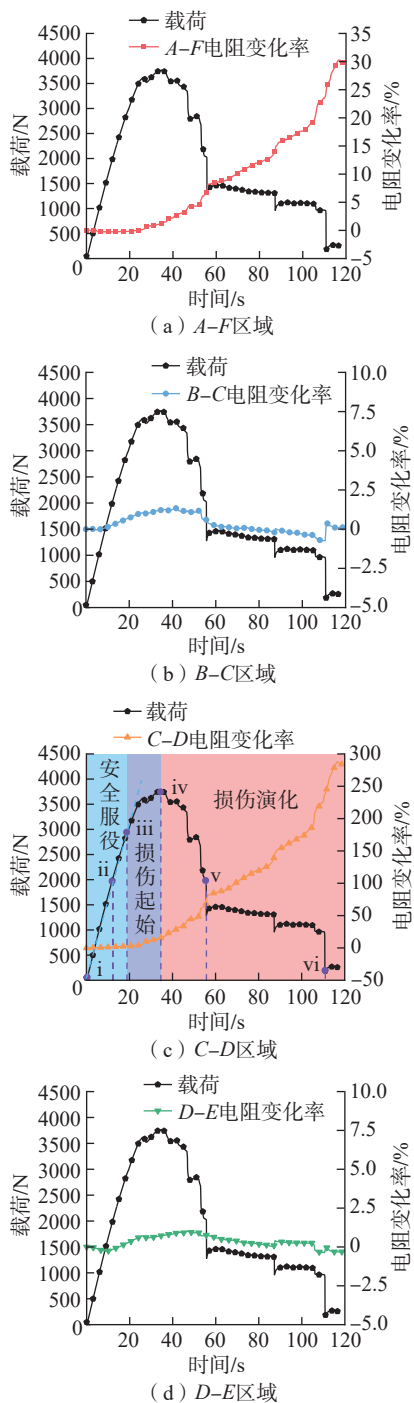


图 12 偏轴 45° 试样拉伸加载过程中不同区域力电曲线

Fig.12 Electromechanical curves in different regions of 45° off-axis specimen during tensile loading

此阶段无需对复合材料进行额外干预;当进入 iii~iv 阶段时,纤维与基体之间相对滑移和剪切作用导致纤维与基体之间的相对位移增大,经纱和纬纱接触点位置、接触面积及接触

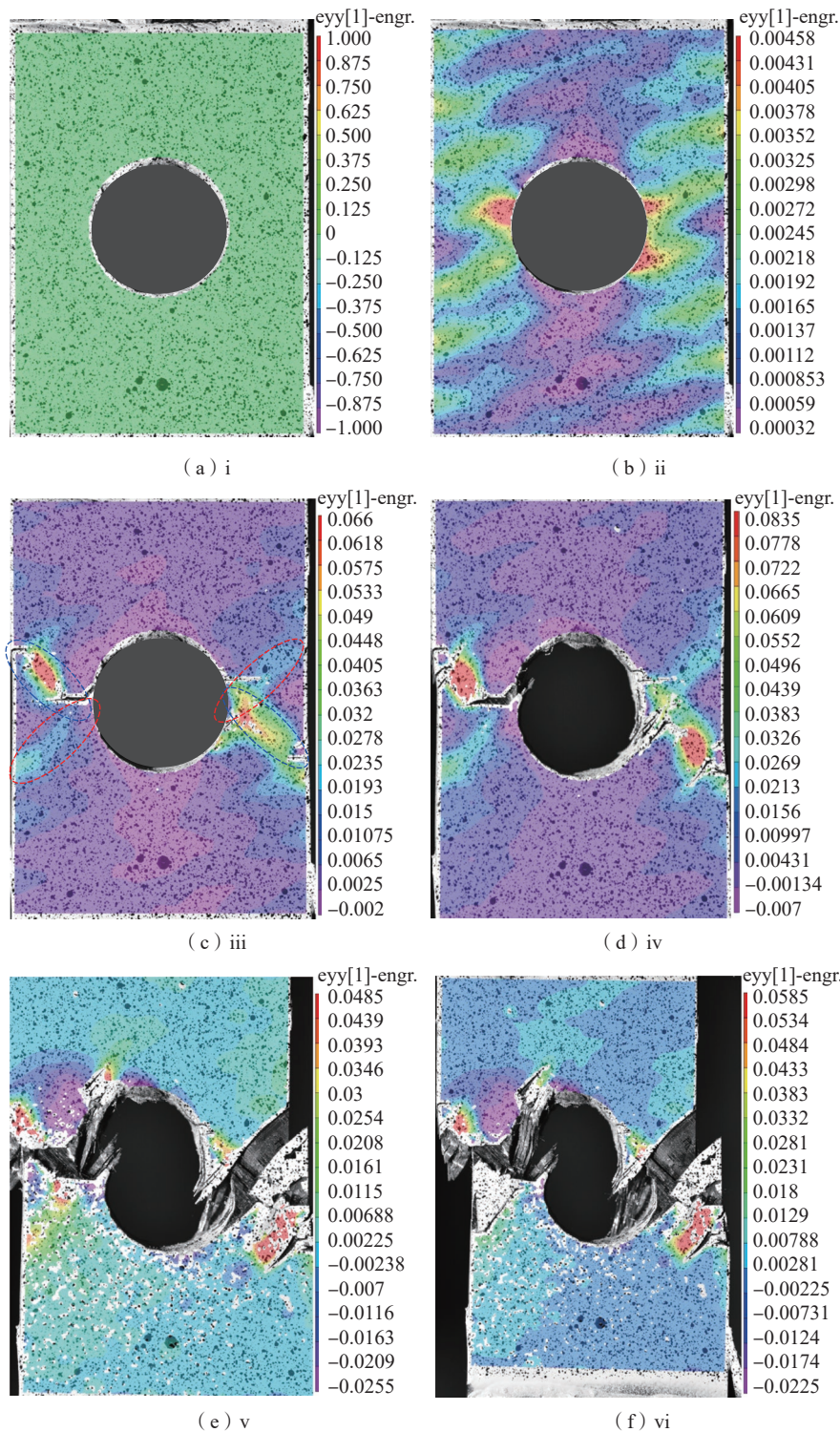


图 13 偏轴 45° 试样拉伸加载过程中应变变化

Fig.13 Strain evolution of 45° off-axis specimen during tensile loading

压力不断变化,接触电阻不可逆增加; iii~iv 阶段是复合材料“损伤起始”阶段,当电阻变化率超过 15.66% 时,需对结构件进行进一步检查,以判断是

否符合安全服役需求; iv~vi 阶段是复合材料“损伤演化”阶段,纱线和树脂之间的界面损伤进一步扩展,试样承载能力大幅下降,电阻随界面损伤累积不可逆增加,电阻变化率反映了

界面损伤的严重程度,材料最终失效时电阻变化率接近300%。

图14为60°试样拉伸加载中,A-F、B-C、C-D、D-E 4个区域的电阻变化率随载荷的变化。如图14(c)

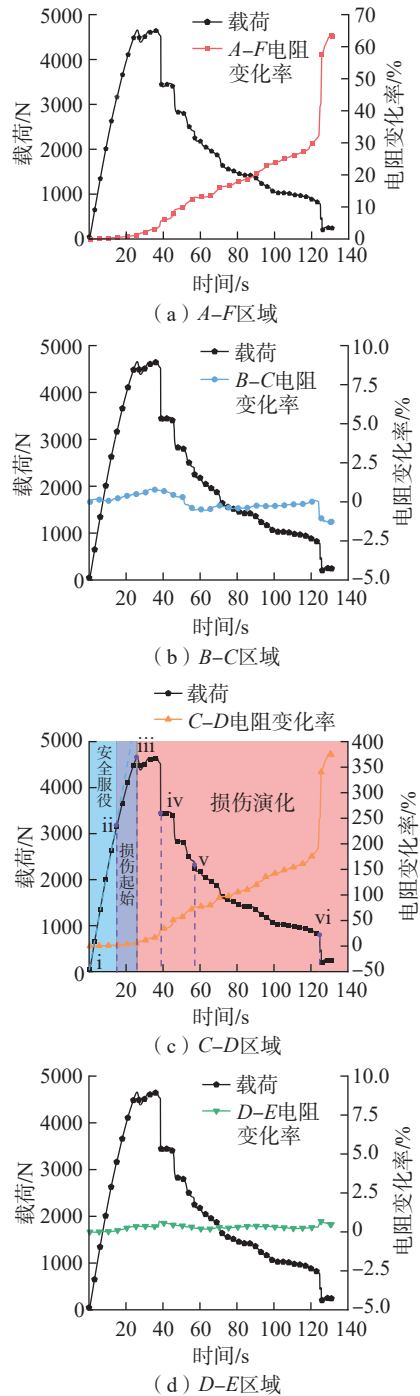


图14 偏轴60°试样拉伸加载过程中不同区域力电曲线

Fig.14 Electromechanical curves in different regions of 60° off-axis specimen during tensile loading

所示,在拉伸载荷曲线上选择初始点、未损伤点和损伤发生点对应的6个代表性时刻,结合力电曲线与DIC应变变化,分析电阻变化与材料损伤的关系。

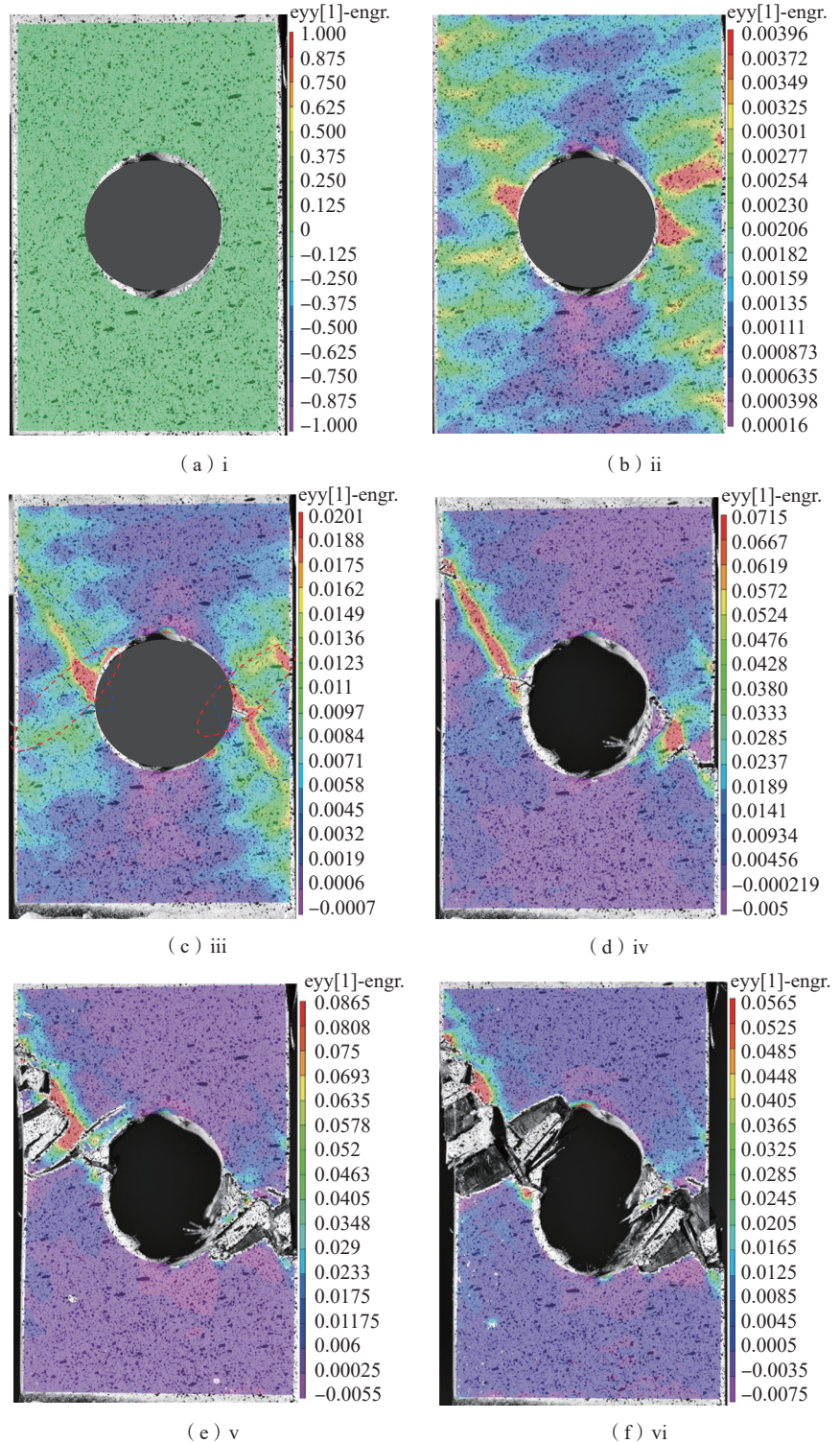


图15 偏轴60°试样拉伸加载过程中应变变化

Fig.15 Strain evolution of 60° off-axis specimen during tensile loading

图15为60°试样拉伸加载过程中,6个代表性时刻对应的表面应变图。60°试样拉伸加载过程中,应变变化、破坏机理和力电曲线与偏轴45°试样相似,两者仅由于偏轴角度

差异使应变分布和裂纹扩展路径略有不同。i~ii 阶段是材料的“安全服役”阶段,此阶段无需对复合材料进行额外干预;ii~iii 阶段是“损伤起始”阶段,纤维与基体之间相对滑移和剪切作用导致经纱和纬纱接触点的位置和接触压力不断发生变化,接触电阻不可逆增加,电阻变化率为 2.32%~6.20%,当电阻变化率超过 6.20% 时,需对结构件进行进一步检查,以判断是否符合安全服役需求;iv~vi 阶段是复合材料“损伤演化”阶段,电阻随界面损伤累积不可逆增加,材料最终失效时电阻变化率接近 400%。

图 16 为 90° 试样拉伸加载过程中, A-F、B-C、C-D、D-E 4 个区域的电阻变化率随载荷的变化。与 0° 试样力电曲线相似, A-F 区域与 C-D 区域电阻变化率也呈现相似趋势,且 C-D 区域电阻变化率高于 A-F 区域。B-C、D-E 区域导电路径受到开孔区域损伤的影响,电阻随着拉伸加载也出现了一定增加。如图 16 (c) 所示,在拉伸载荷曲线上

选择初始点、未损伤点和损伤发生点对应的 6 个代表性时刻,结合力电曲线与 DIC 应变变化,分析电阻变化与材料损伤的关系。

图 17 为 90° 试样拉伸加载过程中,6 个代表性时刻对应的表面应变图。i 对应初始表面应变分布,随着拉伸加载,试样进入 i~iii 阶段时,纬纱承载拉伸载荷,经纱两端自由,树脂沿经纱分布出现高应力区域,界面裂纹和树脂裂纹萌生,此阶段是复合材料“安全服役”阶段,纱线仍处于弹性阶段,试样电阻缓慢增加;当试样进入 iii~iv 阶段时,界面裂纹和树脂裂纹扩展,碳纤维纱线开始出现损伤,电阻以更大的斜率增加,此阶段是复合材料“损伤起始”阶段,电阻变化率为 0.96%~1.96%,电阻变化率超过 1.96% 时,需对结构件进行进一步检查,以判断是否符合安全服役需求;iv~vi 阶段是复合材料“损伤演化”阶段,在此阶段,树脂裂纹进一步扩展,界面损伤加剧,纤维损伤增加,试样电阻变化率迅速增大,到达 vi 阶段时,孔两侧纬纱断裂,试样最

终失效,试样电阻显著增加。

4 结论

本文研究不同角度开孔三维机织角联锁复合材料拉伸力电行为,利用四探针法和数字图像相关 (DIC) 技术连续监测拉伸加载轴向试样 (0°,90°) 和偏轴试样 (45°,60°) 电阻和应变变化,探究电阻变化与材料结构损伤相关性,及偏轴角度对开孔三维机织角联锁复合材料力电行为影响,主要结论如下。

(1) 复合材料拉伸性能受偏轴角度影响。轴向试样拉伸时,碳纤维纱线为主承力部分,表现出较强抗拉强度和低断裂应变,纤维抽拔断裂是主要损伤形式。偏轴试样拉伸时,载荷主要由树脂基体承载,表现出较大的非线性变形,基体开裂和界面脱粘是主要损伤形式。

(2) 开孔区域 C-D 段由于孔的存在引入了损伤,拉伸过程中损伤主要在 C-D 区域产生,因此拉伸加载中 C-D 区域电阻变化率大于同样长度的 B-C 和 D-E 区域,通过电阻变化率的大小可识别可能的损伤区域。

(3) 复合材料力电行为受偏轴角度影响,电流密度和电势分布均表现出与偏轴角度相关的方向效应。轴向和偏轴试样主要导电机理分别是纱线传导和接触传导。轴向试样在最终断裂前 C-D 区域电阻变化率均不超过 10%,偏轴试样在最终失效前 C-D 区域电阻变化率均超过 100%。电阻变化与材料结构损伤相关,电阻的突增可为材料提供失效前预警。

参考文献

- [1] ABTEW MA. A comprehensive review on advancements, innovations and applications of 3D warp interlock fabrics and its composite materials[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 278: 111395.
- [2] ABTEW MA, BOUSSU F, BRUNIAUX P, et al. Ballistic impact mechanisms—A review on textiles and fibre-reinforced composites impact

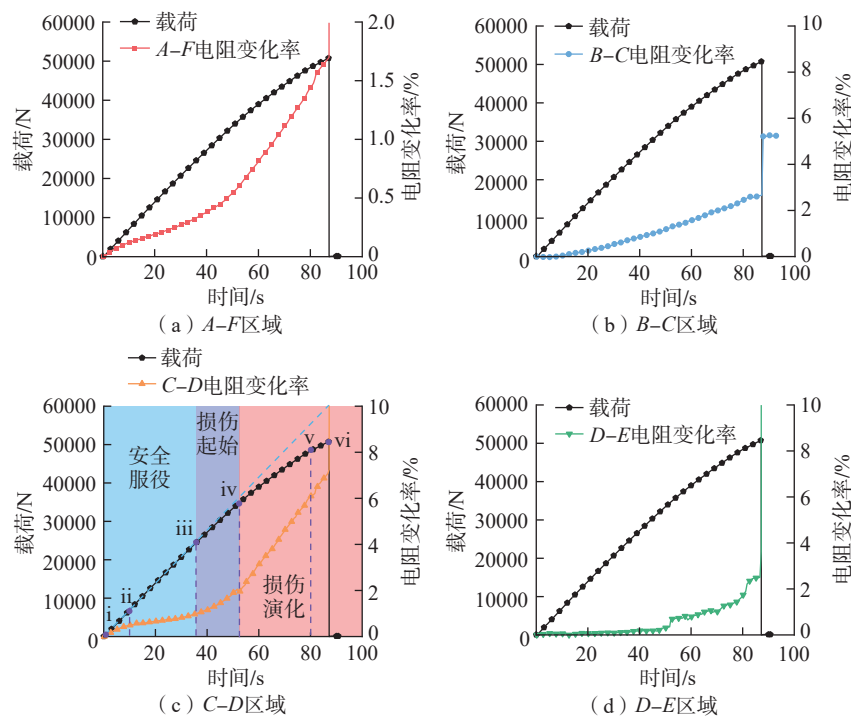


图 16 纬向 (90°) 试样拉伸加载过程中不同区域力电曲线

Fig.16 Electromechanical curves in different regions of weft (90°) specimen during tensile loading

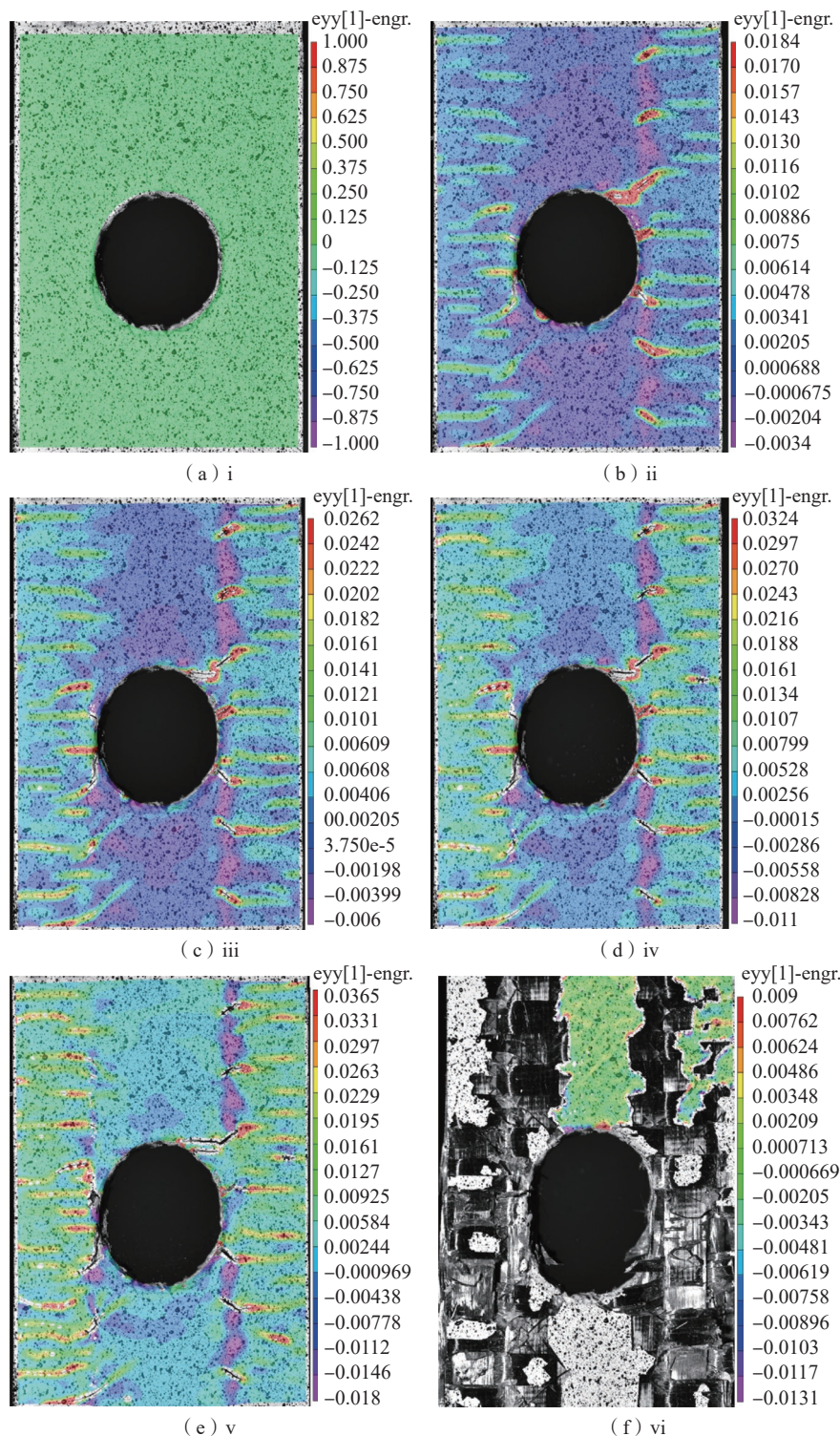


图 17 纬向 (90°) 试样拉伸加载过程中应变变化

Fig.17 Strain evolution of weft (90°) specimen during tensile loading

responses[J]. Composite Structures, 2019, 223: 110966.

[3] MOURITZ A P, BANNISTER M K, FALZON P J, et al. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites[J]. Composites Part A: Applied Science

and Manufacturing, 1999, 30(12): 1445–1461.

[4] SALEH M N, WANG Y, YUDHANTO A, et al. Investigating the potential of using off-axis 3D woven composites in composite joints' applications[J]. Applied Composite Materials, 2017, 24(2): 377–396.

[5] LAUX T, BULLOCK R C, THOMSEN O T, et al. Lay-up effect on the open-hole shear strength of composite laminates[J]. Composites Science and Technology, 2023, 239: 110044.

[6] LIU J J, WANG L Q, HE Y Q, et al. Experimental study of notched tensile strength of large open-hole carbon fiber reinforced polymer laminates at low temperature[J]. Composites Communications, 2023, 39: 101546.

[7] EKŞİ S, SALMAN L, BEŞİROĞLU M F, et al. Open hole strength and damage behavior of GFRP and CFRP composites[J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 176: 109584.

[8] LIU D X, ZHAO S C, ZHANG D Y. Experimental and numerical studies of the open hole tensile strength of drilled- and molded-hole unidirectional laminates[J]. Polymer Composites, 2025, 46(3): 2861–2875.

[9] LIU Y H, ZHANG L, LI Z X, et al. Investigation on damage evolution of open-hole plain woven composites under tensile load by acoustic emission signal analysis[J]. Composite Structures, 2023, 305: 116481.

[10] WEN J, XIA Z H, CHOY F. Damage detection of carbon fiber reinforced polymer composites via electrical resistance measurement[J]. Composites Part B: Engineering, 2011, 42(1): 77–86.

[11] 韩朝锋, 薛有松, 张东生, 等. 碳纤维复合材料电导特性和力电耦合行为研究进展[J]. 复合材料学报, 2023, 40(6): 3136–3152.

HAN Chaofeng, XUE Yousong, ZHANG Dongsheng, et al. Research progress on electrical property and electromechanical coupling behaviors of carbon fiber composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(6): 3136–3152.

[12] 薛有松, 薛凌明, 孙宝忠, 等. 碳纤维三维角联锁机织复合材料弯曲作用下力电耦合响应[J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1468–1476.

XUE Yousong, XUE Lingming, SUN Baozhong, et al. Piezoresistive effect of carbon fiber 3D angle-interlock woven composites under bending[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(3): 1468–1476.

[13] WU T W, LI G, XUE Y S, et al. Mechanical-electrical coupling behaviors of 3-D carbon fiber angle-interlock woven composites under quasi-static and cyclic tension[J]. Composite Structures, 2023, 323: 117466.

[14] LI G, WU T W, XUE Y S, et al. Tensile damage self-monitoring of carbon fiber/epoxy 3D braided composites with electrical resistance method[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 296: 109870.

[15] WU T W, LI G, GU B H, et al. Damage detection analysis of 3D braided

carbon fiber composites with electro-mechanical behavior[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2025, 189: 108593.

[16] HUANG W, XUE Y S, XUE L M, et al. Electrical-mechanical behaviors of three-dimensional braided composites under three-point bending[J]. *Textile Research Journal*, 2023, 93(3-4): 713-725.

[17] LI G, WU T W, SUN B Z, et al. Effects of thermo-oxidative aging on progressive bending damages and electromechanical behaviors of carbon fiber/epoxy 3D woven composites[J]. *Journal of Composite Materials*, 2024, 58(16): 1829-1846.

[18] ROH H D, LEE D H, PARK Y B. Smart carbon fiber reinforced plastic tubes with electromechanical structural health self-monitoring system[J]. *Engineering Structures*, 2025, 322: 118853.

[19] TAKEDA T, SHINDO Y, FUKUZAKI T, et al. Short beam interlaminar shear behavior and electrical resistance-based damage self-sensing of woven carbon/epoxy composite laminates in a cryogenic environment[J]. *Journal of Composite Materials*, 2014, 48(1): 119-128.

[20] HAN C F, HUANG S W, SUN B Z, et al. Electrical resistance changes of 3D carbon fiber/epoxy woven composites under short beam shear loading along different orientations[J]. *Composite*

Structures, 2021, 276: 114549.

[21] WU T W, LI G, HUANG S W, et al. Structural effect of warp yarns on electromechanical behavior of 3D woven carbon fiber composites for aviation applications[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2025, 159: 109986.

[22] ZHANG D, YANG B, TAN J P, et al. Impact damage localization and mode identification of CFRPs panels using an electric resistance change method[J]. *Composite Structures*, 2021, 276: 114587.

[23] LEE I Y, ROH H D, PARK H W, et al. Advanced non-destructive evaluation of impact damage growth in carbon-fiber-reinforced plastic by electromechanical analysis and machine learning clustering[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 218: 109094.

[24] OH S Y, LEE D H, PARK Y B. Impact damage characterization approach for CFRP pipes via self-sensing[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2024, 281: 109511.

[25] JANG J, LEE I Y, PARK Y B. Impact response analysis and physics-informed damage classification of sandwich composites using electrical resistance-based self-sensing[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2025, 190: 108665.

[26] TODOROKI A, MIZUTANI Y, SUZUKI Y, et al. Fatigue damage detection of

CFRP using the electrical resistance change method[J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2013, 14(4): 350-355.

[27] GADOMSKI J, PYRZANOWSKI P. Experimental investigation of fatigue destruction of CFRP using the electrical resistance change method[J]. *Measurement*, 2016, 87: 236-245.

[28] LEE I Y, JOUNG C, OH S Y, et al. Real-time in-depth damage identification and health index system for carbon fiber-reinforced composites using electromechanical behavior and data processing tools[J]. *Composites Science and Technology*, 2023, 236: 109951.

[29] WU T W, LI G, XUE Y S, et al. Electromechanical behavior and damage index system of 3D carbon fiber angle-interlock woven composites with FEA and data processing tools[J]. *Composites Science and Technology*, 2023, 244: 110318.

[30] XUE Y S, HUANG S W, SUN B Z, et al. Electro-thermal coupling behavior and temperature distribution of 3-D braided composite under direct current[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 216: 109043.

[31] LI X Y, XUE Y S, GU B H, et al. Electrical conductivities and temperature distributions of carbon fiber 3D woven composites with different electric field direction[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 200: 111910.

Electromechanical Behavior of Open-Hole Three-Dimensional Angle-Interlock Woven Carbon Fiber Reinforced Polymer Under Tensile Loading

LI Gen, WU Tianwei, SUN Baozhong, GU Bohong

(Donghua University, Shanghai 201620, China)

[ABSTRACT] The electromechanical behavior of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) is critical for their structural self-sensing. In this study, the tensile electromechanical behaviors of open-hole 3D angle-interlock woven CFRP at different off-axis angles (0°, 45°, 60°, and 90°) were investigated with four-probe method and digital image correlation (DIC) technique. The effect of off-axis angles on the electromechanical performance of the composites was systematically examined. The results indicate that significant off-axis angle dependence in tensile properties. Axial specimens (0°, 90°) demonstrate higher tensile strength and lower fracture strain, with carbon fiber yarns serving as the primary load-bearing components and fiber pull-out as the dominant failure mode. In contrast, off-axis specimens (45°, 60°) display nonlinear deformation behavior, with resin matrix transferring most loads, while matrix cracking and interfacial debonding emerge as principal damage mechanisms. The electromechanical behavior of the composite exhibits significant off-axis angle dependence, with both current density and electrical potential distribution demonstrating notable angular correlation. Yarn conduction and interfacial contact conduction dominate the electrical conduction mechanisms in axial and off-axis specimens, respectively. The axial specimens show a resistance variation of less than 10% before fracture, whereas the off-axis specimens exhibit a resistance change exceeding 100% prior to final failure.

Keywords: Open-hole; 3D woven composites; Electromechanical behavior; Directional effect; Structural health monitoring

(责编 七七)