

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.09.023

三维五向复合材料力学行为与失效分析

苏海亮¹, 玉堂¹, 韩哲¹, 陈崇山², 蒋士利¹

(1. 广西科技大学机械与汽车工程学院, 广西柳州 545006; 2. 东风柳州汽车有限公司商用车技术中心, 广西柳州 545005)

摘要: 通过系统的试验研究, 深入探究不同编织角度对三维五向编织复合材料在拉伸下的力学行为影响, 在此基础上对其力学性能、失效模式以及断裂特征进行了详细的分析。首先, 研究选取了15°、25°和35°三种典型编织角度的三维五向编织复合材料作为研究对象, 采用准静态拉伸试验方法, 通过对比平纹编织复合材料的力学性能, 系统揭示了编织角度对材料性能的影响机制。结果表明, 三维五向编织复合材料的拉伸性能表现出显著的编织角度依赖性, 三维编织复合材料拉伸强度、拉伸弹性模量均随编织角增大而降低。三种角度的三维编织复合材料拉伸强度均高于传统平纹编织复合材料, 这充分体现了三维编织结构在力学性能方面的优势。最后, 结合光学显微镜对试样断口的微观形貌观察, 发现在失效形式上, 三维编织复合材料随着编织角增大, 失效模式逐渐由纤维断裂转变为界面脱黏。相较于同厚度和体积分数的平纹编织复合材料, 三维编织复合材料并无分层失效模式出现, 复合材料表现出更好的损伤容限。

关键词: 三维编织复合材料; 平纹编织; 失效模式; 编织角; 拉伸性能

中图分类号: TB333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)09-0179-08

Mechanical behavior and failure analysis of three-dimensional five directional composites

SU Hailiang¹, YU Tang¹, HAN Zhe¹, CHEN Chongshan², JIANG Shili¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China;

2. Commercial Vehicle Technology Center, Dongfeng Liuzhou Automobile Co., Ltd., Liuzhou 545005, China)

Abstract : Systematic experimental research was conducted to explore the influence of different weaving angles on the mechanical behavior of three-dimensional five directional woven composites under tension. Based on this, a detailed analysis was conducted on their mechanical properties, failure modes, and fracture characteristics. Firstly, three-dimensional five directional woven composites with three typical weaving angles of 15°, 25°, and 35° were selected as the research objects. The quasi-static tensile test method was used to compare the mechanical properties of plain weave composites, and the influence mechanism of weaving angles on material properties was systematically revealed. The results indicate that the tensile properties of three-dimensional five directional woven composites exhibit significant weaving angle dependence, and the tensile strength and modulus of three-dimensional woven composites decrease with increasing weaving angle. The tensile strength of three-dimensional woven composites from three different angles is higher than that of traditional plain weave composite materials, which fully reflects the advantages of three-dimensional woven structures in mechanical properties. Finally, the microstructures of the fracture surface of the samples were observed using an optical microscope. Observation results show that in terms of failure mode, the three-dimensional woven composite gradually transform from fiber fracture to interfacial debonding as the weaving angle increases. Compared to plain woven composites with the same thickness and volume fraction, 3D woven composites do not exhibit delamination failure modes and demonstrate superior damage tolerance.

Keywords : three-dimensional woven composite ; plain weave ; failure mode ; woven corner ; tensile property

基金项目: 广西科技重大专项(桂科AA24206045), 广西科技大学博士基金项目(20Z40)

通信作者: 陈崇山, 高级工程师, 研究方向为结构连接技术与轻量化设计

收稿日期: 2025-07-26

引用格式: 苏海亮, 玉堂, 韩哲, 等. 三维五向复合材料力学行为与失效分析[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(9): 179-186.

SU Hailiang, YU Tang, HAN Zhe, et al. Mechanical behavior and failure analysis of three-dimensional five directional composites[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(9): 179-186.

三维编织复合材料相较于传统复合材料在厚度方向、刚度、强度、性能差以及易分层等方面都有着良好的表现。由于其高强度/质量比、优异的抗分层性和高冲击耐受性等特点,三维编织复合材料有着相对更好的断裂韧性以及冲击损伤容限^[1-2]。三维编织复合材料的编织纱在空间中相互交织,由不同的空间拓扑结构可形成三维四向、五向、六向、七向等编织材料,而三维五向编织则是在四向基础上增加了一组沿主承载方向的轴向纱线,显著增强该方向的刚度和强度。

魏坤龙等^[3]在三维编织复合材料基础上考虑基体相、纤维增强相与界面相对其弹性性能的影响。Hu 等^[4]研究了不同结构构型差异的三维五向编织复合材料的弯曲性能。何红梅等^[5]研究了三维编织管件复合材料压缩与弯曲性能。Li 等^[6]制造了碳/环氧树脂三维六向编织复合材料,并研究了其拉伸疲劳行为。罗贵等^[7]针对三维四向、五向、六向、七向编织复合材料试验件进行了力学性能试验并与层合复合材料试验件性能进行比较。杨兴林等^[8]对宽度方向切削的三维编织碳/碳复合材料进行了拉伸试验研究。韩康宁等^[9]研究了不同纤维体积分数下碳纤维三维五向编织复合材料损伤演化规律以及纤维断裂等损伤模式。Gao 等^[10]研究了不同编织角度的三维编织复合材料在冲击压缩实验下的变形和损伤演化。陈燕荣等^[11]研究了层间混杂碳纤维三维编织/单向织物增强环氧树脂复合材料的力学性能。Jang 等^[12]侧重研究了不同编织角度对编织织物增强复合材料(B-CFRP)力学性能的影响。梁双强等^[13]对含开孔前后三维编织复合材料的拉伸性能进行试验研究,并通过织物几何模型对其他方向材料性能进行预测。徐玥等^[14]制备了三维编织复合材料圆管,并对其进行了轴向冲击压缩性能测试。孙厚礼等^[15]对三维编织-单向铺层混合的碳纤维复合材料管的轴向压缩性能和破坏机制进行了研究。祝林清等^[16]系统分析研究了三维编织含孔复合材料工字梁的弯曲过程及损伤机理。崔灿等^[17]利用分离式霍普金森压杆与高速摄像技术研究了三维五向编织复合材料的动态压缩特性。Wang 等^[18]引入了一系列具有预制孔的三维四向编织复合材料在不同编织角度下的纵向压缩损伤。Zhu 等^[19]对六向编织碳/环氧树脂复合材料的力学性能和失效机制进行了深入分析,在室温和高温下,获得了这种复合材料的面内压缩性能,并评估了它们的失效机制。张徐

梁等^[20]制备了不同混杂方式的三维编织复合材料薄壁圆管,通过准静态压缩试验观察其断面,并对其能量吸收以及破坏模式进行了研究。杨志贤等^[21]研究了含孔隙三维五向编织复合材料的偏轴力学性能。李冰柯等^[22]对三维四向、五向编织复合材料进行了横向冲击试验。

尽管现有研究已探讨编织角度对三维编织复合材料力学性能的影响,但针对三维五向结构在不同角度下失效模式演变机制的系统性研究仍相对有限。且多聚焦单一角度或静态性能为主,缺乏 15°到 35°梯度角度的三维五向编织材料对比,对失效模式与编织角度的关联机制阐释不足。因此,笔者采用静态拉伸试验分析不同编织角度对三维编织复合材料性能的影响,同时与平纹编织复合材料失效机理进行对比研究。并通过光学显微镜研究编织角度对三维编织复合材料失效机理的影响,揭示三维五向复合材料在 15°到 35°区间内失效模式从纤维断裂到界面脱黏的转变规律。

1 三维编织复合材料拉伸试验

1.1 材料选取

试件制备按照 ASTM D3039-17 和 ASTM D5766-23。本研究中三维编织复合材料试验件使用的碳纤维为日本东丽公司提供的 T700sc-12K 碳纤维,参数见表 1。环氧树脂为 JL235,参数见表 2。试验件尺寸为 250 mm×25 mm×3 mm,6061-T6 铝合金加强片尺寸为 50 mm×25 mm×2 mm。平纹编织复合材料碳纤维也是采用日本东丽公司提供的 T700sc-12K 碳纤维,平纹编织试验件尺寸与三维编织复合材料试验件尺寸相同且体积分数一致。

表 1 T700sc-12K 碳纤维的力学性能

Tab. 1 Mechanical properties of T700sc-12K carbon fiber

Properties	Values
E_{11} /GPa	230
E_{22} /GPa	14
E_{33} /GPa	14
G_{12} /GPa	9
G_{13} /GPa	9
G_{23} /GPa	5
μ_{12}	0.25
μ_{13}	0.25
μ_{23}	0.3

Notes: E_{11} is axial elastic modulus of fiber; E_{22} and E_{33} denote transverse elastic moduli; G_{12} and G_{13} denote in-plane/out-of-plane shear moduli, while G_{23} refers to transverse shear modulus; μ_{12} is major Poisson's ratio; μ_{13} is out-of-plane Poisson's ratio; μ_{23} is transverse Poisson's ratio.

表2 环氧树脂与固化剂性能

Tab. 2 Properties of epoxy resins and curing agents

Name	Chemical component	Viscosity/(mPa·s)	Epoxy value/[mol·(100 g) ⁻¹]	Mixing ratio
JL-235	Epoxy resin	2 000~4 000	0.53~0.56	100:34
JH-238	Curing agent	5~15		100:34

1.2 预制件设计

三维编织复合材料预制件在四步法(1×1)三维编织机上完成。编织过程包括:根据工艺设计编织角度为15°,25°,35°的三种编织材料,截面尺寸分别为3 mm×25 mm,2 mm×22 mm,2 mm×21 mm和2 mm×20 mm,花节长度分别为13.8,8.05,5.5 mm。挂纱过程,根据三维五向编织要求分别将编织纱与轴向纱挂在机器上。编织过程,根据设计的编织角和花节长度在每一次的机器循环运行过程后进行预制体的打紧。下线过程,将编织好的预制体根据长度要求进行裁切。固化过程,将预制体装入模具后进行合模,采用树脂传递成型工艺将模具内充满树脂,根据固化制度放入烘箱内加温固化。

采用三种不同的编织参数,分别制造了15°,25°,35°三种不同编织角三维编织复合材料试验件。编织角度为15°,25°,35°的试验件如图1所示。

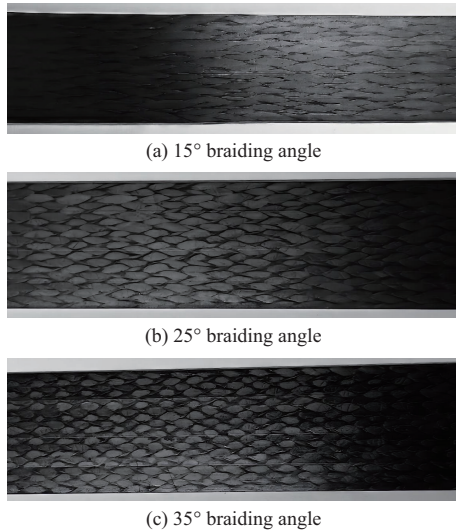


图1 不同编织角度试验件

Fig. 1 Different braiding angle test pieces

1.3 预制件纤维体积分数

在本次试验中,试验件的纤维体积分数(V_f)运用称重法予以测试。在固化前,称取三维编织复合材料的干重(M_d);待固化完成后,再次称取三维编织复合材料的质量(M),通过二者差值,即可精确得出基体质量,即 $M_m=M-M_r$ 。已知碳纤维的密度为1.8 g/cm³,基体的密度为1.13 g/cm³,由于在实际成

型过程中,材料内部空隙的存在会对纤维体积分数的准确性造成不可忽视的干扰,故而采用密度法测量试验件的密度(ρ_c),并依据式(1)算出孔隙率体积比,随后按照式(2)计算出各个试样的纤维体积分数。最终计算得出的纤维体积分数详情见表3。

$$V_v = 1 - \left[\frac{M_f/\rho_f + (M_c - M_f)/\rho_m}{M_c/\rho_c} \right] \quad (1)$$

$$V_f = \frac{M_f/\rho_f}{M_f/\rho_f + M_m/\rho_m + V_v} \quad (2)$$

式中: ρ_f 为纤维密度; ρ_m 为基体密度; ρ_c 为复合材料密度。

表3 纤维体积分数

Tab. 3 Fiber volume fraction

Braiding angle/(°)	Fiber volume fraction/%
15	55
25	55
35	55

1.4 试验设置

根据ASTM D3039-2017制备试验件,图2展示了试验件尺寸与几何形状。对于拉伸试验件,为减少试样两端夹持部分应力集中对试样造成的早期损伤,需增加夹持摩擦力防止试验件在试验过程中打滑。因此将试样两端的夹持部分进行打磨并在试验件夹持部分两端黏贴加强片,加强片材料选取6061-T6铝合金。

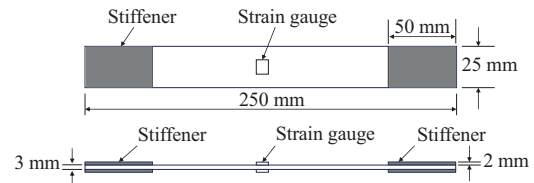


图2 试验件尺寸和几何形状

Fig. 2 Size and geometry of test piece

依据ASTM D3039-2017标准,对三维编织复合材料试件展开准静态拉伸试验。使用的试验机为UTM5105测试系统,如图3所示。试验在室温环境下进行,针对所有试样,均采用电阻应变片采集应变数据。应变片沿着试样的纵向方向进行黏贴,并且于试样正反两面呈对称黏贴,以此确保采集数

据的准确性与全面性,试验采取2 mm/min的加载速度,持续加载直至试件断裂。每组数据取5~6个有效值,并取其平均值。

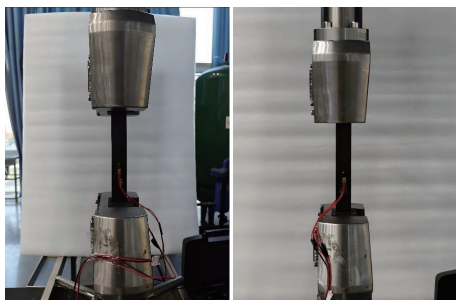


图3 UTM5105测试系统

Fig. 3 UTM5105 test system

拉伸试验结束后,采用光学显微镜对试验件断口进行拍照,以确定不同编织角度三维编织复合材料以及平纹编织复合材料失效模式。

2 结果与讨论

2.1 不同编织角度对材料力学性能的影响

在计算拉伸强度时,试验件的计算截面均为试验件总面积 $w \times t$,试验件强度(σ)计算公式见式(3)。

$$\sigma = \frac{P}{w \times t} \quad (3)$$

式中: σ 为试验件强度,单位MPa; P 为失效载荷,单位N; w 为样品宽度,单位mm; t 为样品厚度,单位mm。

图4显示了不同编织角度时三维编织复合材料的拉伸载荷-位移曲线,负载随着拉伸时间稳步增长,超过峰值负载后,载荷-位移曲线呈断崖式下降模式。当应力接近拉伸极限强度后,交织纱线会相继断裂。裂纹逐渐蔓延到纱线上时,编织纱线突出的承载能力会阻止裂纹的蔓延,直至超过纱线的承载能力,纱线断裂,随后,应力达到拉伸极限强度,试件失效。

图5a为不同编织角度下的三维编织复合材料的拉伸强度。当编织角度为15°时,拉伸强度为1 415.3 MPa,编织角度为25°时,拉伸强度为1 333.1 MPa,编织角度为35°时,拉伸强度为1 271 MPa。当编织角度25°时拉伸强度相较于编织角度15°时降低82.2 MPa,编织角度35°时拉伸强度相较于编织角度15°时降低144.3 MPa。编织角度35°与编织角度25°三维编织复合材料相较于编织角度15°三维编织复合材料拉伸强度分别降低5.8%与10.19%。拉伸强度呈现出与编织角度增加相反的

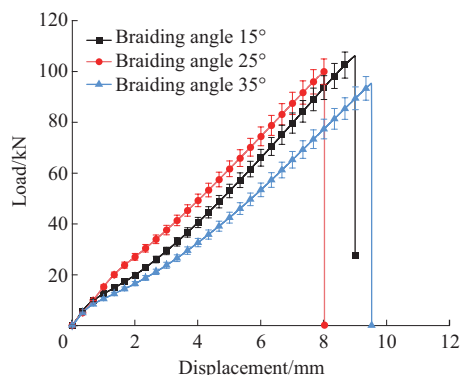
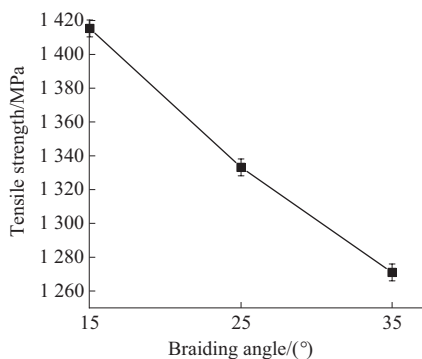
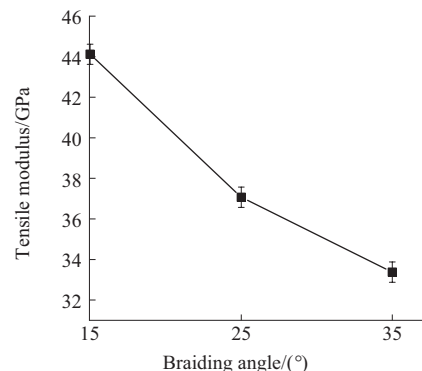


图4 载荷-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curve



(a) Tensile strength of composites with different braiding angles



(b) Tensile modulus of composites with different braiding angles

图5 不同编织角度与拉伸强度及其弹性模量的关系

Fig. 5 Relationship between different braiding angles and tensile strength and modulus

下降趋势,编织角度越大拉伸强度越低,这是由于随着编织角度的增加,碳纤维复合材料沿轴向的力学性能下降,所以材料拉伸强度降低。

三维编织复合材料试验件在拉伸载荷下表现出不同的承载能力。图5b显示了不同编织角度时复合材料试验件拉伸弹性模量。从图中可以看出,三维编织复合材料的拉伸弹性模量随着编织角度的增加而降低。这是因为随着编织角的增大,编织纱的倾斜角也随之增大,使得编织纱线沿轴向角度

增加,导致碳纤维沿轴向的力学性能降低,三维编织复合材料在拉伸载荷作用下更容易发生变形。但在较高的编织角时,下降速率减缓。当编织角度为 15° , 25° , 35° 时,拉伸弹性模量分别为44.12, 37.07, 33.38 GPa。当编织角度从 15° 增加到 35° 时,编织角度 25° , 35° 试验件相较于 15° 编织角度试验件分别下降15.98%, 24.34%。拉伸弹性模量呈现下降的趋势,这是由于三维编织复合材料的失效模式发生了改变。随着编织角度的增加,界面脱黏成为失效的主要模式,试验件在拉伸载荷的作用下失效更快。因此,在较高的编织角度下,拉伸弹性模量受影响较大。

2.2 两种复合编织材料性能对比

平纹编织复合材料与三维编织复合材料在制备过程有着较大的工艺差异,但两种编织材料可通过工艺实现同等厚度和体积分数。不同的结构表现出不同的性能,如图6所示。三维编织复合材料具有较高的拉伸强度,编织角度 35° 时三维编织复合材料最终拉伸强度相较于8层与12层铺层平纹编织复合材料分别提高38.9%与9.9%、编织角度 25° , 15° 时三维编织复合材料最终拉伸强度相较于8层与12层铺层平纹编织复合材料分别提高45.7%, 54.7%与15.3%, 22.4%。三维编织复合材料最终强度均高于平纹编织复合材料,主要是由于三维编织复合材料独特的编织结构,使其拥有更高的完整性,从而更加体现三维编织复合材料具有较强的损伤容限与断裂韧性,能够有效避免分层现象,提高整体的力学性能和抗冲击损伤能力。而平纹编织复合材料虽然具有高强度和耐疲劳等特点,但平纹

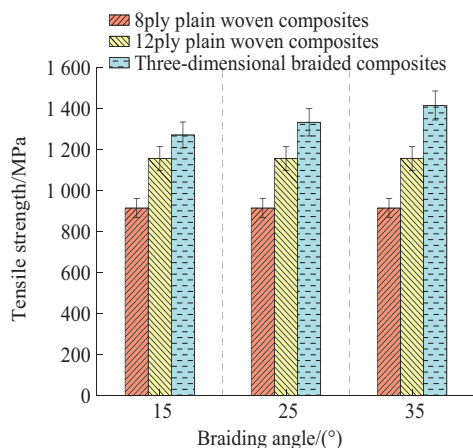


图6 三维编织复合材料与平纹编织复合材料拉伸强度对比

Fig. 6 Comparison of tensile strength between 3D braided composites and plain woven composites

编织复合材料由多层碳纤维预浸料叠加而成,各层之间通过黏合剂或树脂固化连接,易分层的问题较为突出,导致整体力学性能以及抗冲击损伤能力不及三维编织复合材料。

2.3 拉伸失效机理

2.3.1 平纹编织复合材料拉伸失效机理

平纹编织复合材料试验件损伤模式示意图如图7所示。运用光学显微镜对断口进行观察,试验件失效过程中存在分层破坏、纤维断裂、基体断裂三种损伤模式。平纹编织复合材料在拉伸载荷下会产生分层破坏损伤,由于分层现象的出现,试验件过早地出现断裂损伤。三维编织复合材料在试验过程中内部并未出现分层破坏损伤,主要得益于三维编织复合材料的整体编织结构完整性。因此三维编织复合材料损伤包容能力相较于平纹编织复合材料有着较好的体现,能够更好地维持材料的整体性能。

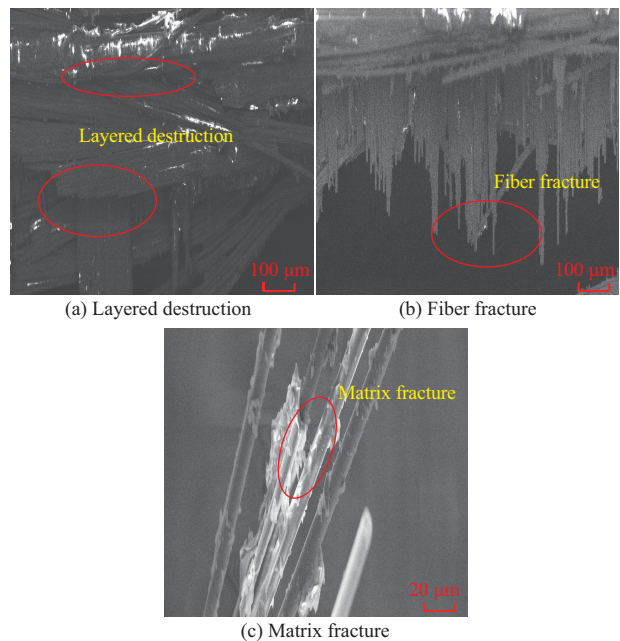


图7 平纹编织复合材料试验件断裂面光学显微镜照片

Fig. 7 Optical microscope photos of fracture surface of plain woven composite test piece

2.3.2 三维编织复合材料拉伸失效机理

三种编织角度三维编织复合材料试验件在进行拉伸试验过程中均无明显的轴向变形和声响,直至试验件断裂瞬间产生剧烈声响,表现出明显的脆性材料破坏特性,主要是树脂开裂以及纤维断裂导致的。图8显示了不同角度试验件的损伤形态,对于编织角度 15° 试验件在断口处

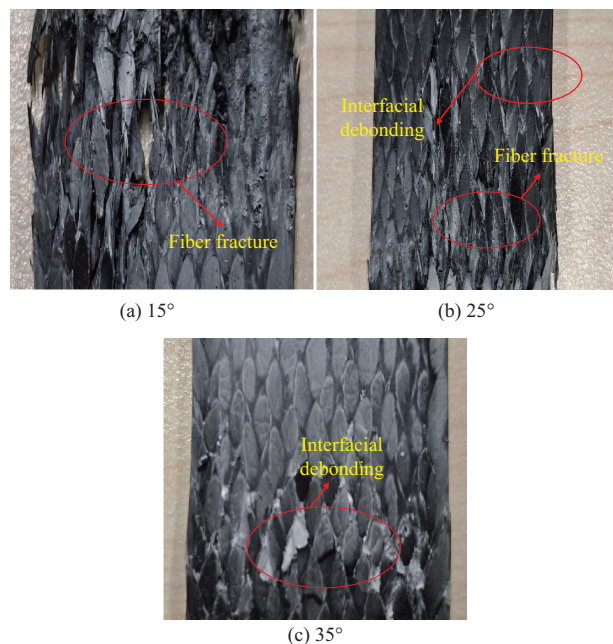


图8 不同编织角度下三维编织复合材料损伤形态

Fig. 8 Damage morphology of three-dimensional braided composites with different braiding angles

有着明显的纤维断裂的损伤模式发生,并无明显的界面脱黏损伤模式,如图8a所示。其断口处纱线断裂方向呈现出沿编织角偏转方向断裂的现象。在拉伸载荷作用下,大量纤维断裂成簇,表现出整个断裂,基体发生严重损伤,无法有效支撑起纤维。其现象发生的主要原因是编织纱线与纵向拉伸轴线有着较小的偏转角度,当进行拉伸试验时,拉伸载荷首先切断损伤初始的纱线,裂纹沿着断裂纱线方向继续向其横向扩展,最终导致试件失效。对于编织角度 35° 试验件,编织纱线与纵向轴线的偏转角度更大,随着编织角度的增大,试验件的主要损伤模式由纤维断裂转变为界面脱黏。如图8c所示观察失效区域,与 15° 试验件有明显区别。其失效表面并无断裂纤维的出现,整个失效区域呈现出蓬松状的失效形态,此现象发生主要原因是由于编织角度越大,编织结构越紧密,当裂纹到达编织纱线区域时,由于界面黏结性差,拉伸载荷并不是直接传导至编织纱线,而是沿着纱线方向向四周传导,树脂基体中的裂纹最终积累成大裂纹,最终出现界面脱黏的损伤形态。对于编织角度 25° 的试验件,纤维断裂和界面脱黏两种损伤形态同时发生。如图8b可以看出,在拉伸载荷的作用下,断裂的纱线基本呈现剪切断裂形态,相邻的编织纱线在拉伸

载荷的作用下,拉伸载荷沿着纱线方向传导,出现界面脱黏损伤形态。

从损伤放大细节中可以观察到,图9a中 15° 编织角试验件发生大量纤维断裂,表现出成簇断裂,其断裂纤维表面保持相对光滑,并无破碎基体碎片出现。图9b中 25° 编织角试验件在纤维断裂损伤基础上,不同纤维束之间纤维界面黏结性差出现界面脱黏损伤。图9c中 35° 编织角试验件由于其过大的编织角,削弱了纤维与基体之间的界面黏附,在试验件内部引入了大量的界面脱黏损伤。树脂基体在剥离过程中发生变形致使失效并黏附在纤维束表面。图像结果表明,三种三维编织复合材料在不同的编织角度下表现出不同的损伤形态。

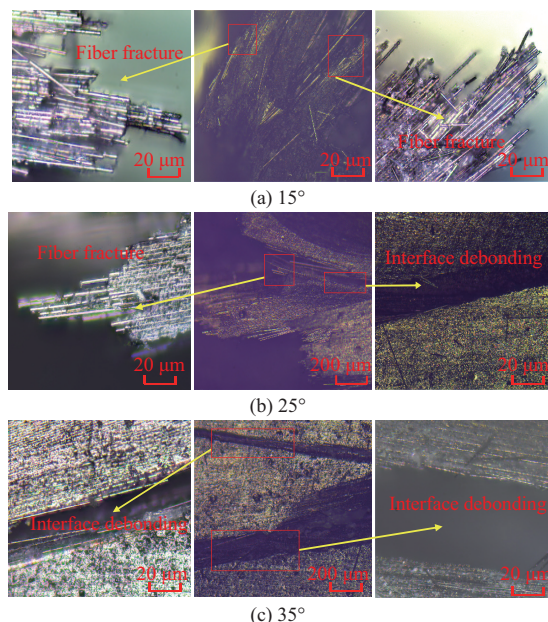


图9 不同编织角度下三维编织复合材料断裂面光学显微镜照片

Fig. 9 Optical microscope photos of fracture surface of three-dimensional braided composites with different braided angles

3 结论

(1)不同的编织角度对三维编织复合材料的拉伸强度以及拉伸弹性模量均有较大影响,编织角度越大,三维编织复合材料的拉伸强度以及拉伸弹性模量均有不同程度下降,在应用中,三维编织复合材料应保持较小的编织角度,以确保较好的性能体现。

(2)三种不同编织角度三维编织复合材料的拉伸强度相较于8层铺层12层铺层平纹编织复合材料拉伸强度均有明显提升,主要得益于三维编织复合材料的整体编织结构完整性,在拉伸过程中不同

于平纹编织复合材料会出现分层现象。

(3)当编织角从 15° 增加到 25° 时,三维编织复合材料的失效模式由纤维断裂逐渐转变为纤维断裂与界面脱黏。当编织角增加到 35° 时,失效模式转变为界面脱黏。

参考文献

- [1] WARREN K C, LOPEZ-ANIDO R A, VEL S S, et al. Progressive failure analysis of three-dimensional woven carbon composites in single-bolt, double-shear bearing[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 84:266–276.
- [2] ISART N, EL SAID B, IVANOV D S, et al. Internal geometric modelling of 3D woven composites: A comparison between different approaches[J]. *Composite Structures*, 2015, 132:1 219–1 230.
- [3] 魏坤龙, 史宏斌, 李江, 等. 孔隙缺陷对三维编织C/C复合材料等效弹性性能的影响[J]. *材料科学与工程学报*, 2021, 39(2): 186–192.
WEI Kunlong, SHI Hongbin, LI Jiang, et al. Effect of porosity on effective elastic properties of three dimensional woven C/C composites[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2021, 39(2):186–192.
- [4] HU L, LIU Z G, WANG Y B, et al. Experiments and progressive damage analyses of three-dimensional full five-directional braided composites under three-point bending[J]. *Polymer Composites*, 2016, 37(8):2 478–2 493.
- [5] 何红梅, 高兴忠, 项赫, 等. 三维编织管件复合材料压缩与弯曲性能[J/OL]. *复合材料学报*, 2024: 1–10. (2024-10-17). <https://link.cnki.net/doi/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241017.001>.
HE Hongmei, GAO Xingzhong, XIANG He, et al. Compression and bending properties of 3D braided tubular composites[J/OL]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024:1–10. (2024-10-17). <https://link.cnki.net/doi/10.13801/j.cnki.fhclxb.20241017.001>.
- [6] LI X, WANG L C, ZHAO W, et al. Selection and analysis of optimum stacking sequence and geometry dimensions on bismaleimides composite joints under tensile loading[J]. *Polymer Testing*, 2022, 105. DOI:10.1016/j.polymer testing.2021.107421.
- [7] 罗贵. 编织与层合复合材料拉压性能对比试验研究[J]. *中国民航大学学报*, 2016, 34(3):52–56.
LUO Gui. Experimental comparative study on tensile and compressive properties of braided and laminated composites[J]. *Journal of Civil Aviation University of China*, 2016, 34(3):52–56.
- [8] 杨兴林, 刘晓倩, 陈波, 等. 宽度方向切削的三维编织碳/碳复合材料拉伸试验研究[J]. *江苏科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 37(3):48–53.
YANG Xinglin, LIU Xiaoqian, CHEN Bo, et al. Tensile test of three-dimensional braided carbon/carbon composites cut in width direction[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2023, 37(3):48–53.
- [9] 韩康宁, 李小童, 秦初, 等. 三维五向碳纤维编织复合材料拉伸损伤演化行为研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2019(7):21–27.
HAN Kangning, LI Xiaotong, QIN Reng, et al. Study on the tensile damage evolution behavior of three dimensional five directional carbon fiber braided composites[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2019(7):21–27.
- [10] GAO X Z, SIDDIQUE A, SUN B Z, et al. Influence of braiding angle on multiple impact damages of 3-D braided composite along longitudinal direction[J]. *Applied Composite Materials*, 2019, 26(4):1 261–1 280.
- [11] 陈燕荣, 孙琳, 王晓明, 等. 碳纤维增强环氧树脂三维编织/单向织物混杂复合材料力学性能[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(4): 17–22.
CHEN Yanrong, SUN Lin, WANG Xiaoming, et al. Mechanical properties of carbon fiber reinforced epoxy resin three-dimensional braided/unidirectional fabric hybrid composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(4):17–22.
- [12] JANG Y, KIM J H, LEE D, et al. Comprehensive analysis of the effect of braiding angle on the wettability and mechanical properties of 3D braided carbon fiber fabric-reinforced composites[J]. *Materials Today Communications*, 2024, 41. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.110798.
- [13] 梁双强, 张成龙, 陈革, 等. 开孔三维编织复合材料强度预测及应力分析[J]. *西北工业大学学报*, 2020, 38(4):889–896.
LIANG Shuangqiang, ZHANG Chenglong, CHEN Ge, et al. Open-hole 3D braided composites strength prediction and stress analysis[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2020, 38(4):889–896.
- [14] 徐玥, 武鲜艳, 洪兴华. 低温环境下三维五向玻璃纤维/环氧树脂编织复合材料圆管冲击压缩性能[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(7):3 722–3 732.
XU Yue, WU Xianyan, HONG Xinghua. Impact compression performance of three-dimensional five directional glass fiber/epoxy resin braided composite circular tubes in low-temperature environment[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(7): 3 722–3 732.
- [15] 孙厚礼, 孙琳, 王晓波, 等. 碳纤维三维编织-铺层混合结构复合材料管的轴向压缩性能[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(8):4 084–4 093.
SUN Houli, SUN Lin, WANG Xiaobo, et al. Axial compressive property of carbon fiber 3D braided-unidirectional hybrid tubes [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(8):4 084–4 093.
- [16] 祝林清, 李倩倩, 李炜. 三维编织含孔复合材料工字梁的弯曲性能分析[J]. *纺织科学与工程学报*, 2023, 40(2):14–20, 31.
ZHU Linqing, LI Qianqian, LI Wei. Bending performance analysis of three-dimensional woven composite I-beam with holes[J]. *Journal of Textile Science and Engineering*, 2023, 40(2): 14 – 20, 31.

- [17] 崔灿,茅献彪. 三维五向编织复合材料的冲击压缩特性及破坏机制[J]. 航空材料学报,2022,42(1):81-91.
CUI Can, MAO Xianbiao. Impact compression characteristics and failure mechanism of 3D five-directional braided composites[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2022, 42(1):81-91.
- [18] WANG X, LI H H, ZHANG Y X, et al. Compressive failure characteristics of 3D four-directional braided composites with prefabricated holes[J]. Materials, 2024, 17(15). DOI:10.3390/ma17153821.
- [19] ZHU H, LI D S, HAN W F, et al. Experimental and numerical study of in-plane compressive properties and failure of 3D six-directional braided composites with large braiding angle[J]. Materials & Design, 2020, 195. DOI:10.1016/j.matdes.2020.108917.
- [20] 张徐梁,阳玉球,阎建华,等. 碳纤维-玻璃纤维混杂增强环氧树脂三维编织复合材料薄壁圆管压溃吸能特性与损伤机制[J]. 复合材料学报, 2021, 38(9):2 814-2 821.
ZHANG Xuliang, YANG Yuqiu, YAN Jianhua, et al. Crushing energy absorption characteristics and damage mechanism of carbon fiber-glass fiber hybrid reinforced epoxy 3D braided composite thin-walled circular tube[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(9):2 814-2 821.
- [21] 杨志贤,张明,李昂,等. 含孔隙缺陷三维五向编织复合材料偏轴拉伸力学性能分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(4): 569-577.
YANG Zhixian, ZHANG Ming, LI Ang, et al. Off-axis tensile mechanical properties of 3D five-directional braided composites with void defects[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(4):569-577.
- [22] 李冰珂,王磊,刘涛,等. 三维编织复合材料横向冲击变形与细观结构关系[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2018, 44(6): 868-875.
LI Bingke, WANG Lei, LIU Tao, et al. Relationships between transverse impact deformation and microstructure of 3D braided composites[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2018, 44(6):868-875.