

DOI:10.16356/j.2097-6771.2026.01.013

捆绑纱对双轴向经编复合材料力学性能的影响机制研究

李忠臣, 苑晓旭, 蔡登安, 周光明

(南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室, 南京 210016)

摘要:以玻纤双轴向经编复合材料为研究对象,探讨经编捆绑纱对其力学性能的影响。由于捆绑纱是连接经纬增强纱的关键单元,对复合材料性能存在重要影响。通过制备含低弹涤纶捆绑纱的双轴向经编复合材料及去除捆绑纱的类双轴向复合材料,采用真空导流成形工艺制作试样,测试其拉伸、压缩、三点弯曲及低速冲击性能,并结合微观形貌分析作用机制。结果表明:含捆绑纱的复合材料拉伸强度提高 21.67%,压缩强度提高 17.50%,弯曲强度和模量分别提升 10.01% 和 6.54%,低速冲击能量吸收率提高 9.92%。捆绑纱通过增强层间结合、协调纱线受力、抑制纤维屈曲与分层扩展等作用,优化了复合材料的载荷分配与能量耗散能力,显著改善其综合力学性能。

关键词:双轴经编;复合材料;玻璃纤维;捆绑纱;力学性能

中图分类号:TB332 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2026)01-0143-10

Influence Mechanisms of Binding Yarns on the Mechanical Properties of Biaxial Warp-Knitted Composites

LI Zhongchen, YUAN Xiaoxu, CAI Dengan, ZHOU Guangming

(State Key Laboratory of Mechanics and Control for Aerospace Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Taking glass fiber warp-knitted biaxial composite materials as the research object, this study investigates the influence of warp-knitted binding yarns on their mechanical properties. Since binding yarns serve as the key unit connecting warp and weft reinforcement yarns, it significantly influences composite material performance. Therefore, we prepare warp-knitted biaxial composite materials containing low-elasticity polyester binding yarns and similar biaxial composite materials without binding yarns. Samples are fabricated using a vacuum infusion molding process, the tensile, compressive, three-point bending, and low-speed impact properties are tested, and the mechanisms are analyzed through microscopic morphology analysis. The results show that the tensile strength of the composite materials with binding yarns increases by 21.67%, the compressive strength increases by 17.50%, the bending strength and modulus increase by 10.01% and 6.54%, respectively, and the low-speed impact energy absorption rate increases by 9.92%. The binding yarns enhance interlaminar bonding, coordinates yarn stress distribution, and suppresses fiber buckling and delamination propagation, thereby optimizing the composite materials' load distribution and energy dissipation capabilities, significantly improving its overall mechanical properties.

Key words: biaxial warp knitting; composite materials; glass fiber; binding yarn; mechanical performance

收稿日期:2025-09-01;修订日期:2025-10-12

通信作者:周光明,男,教授,博士生导师,E-mail:zhougm@nuaa.edu.cn。

引用格式:李忠臣,苑晓旭,蔡登安,等.捆绑纱对双轴向经编复合材料力学性能的影响机制研究[J].南京航空航天大学学报(自然科学版),2026,58(1):143-152. LI Zhongchen, YUAN Xiaoxu, CAI Dengan, et al. Influence mechanisms of binding yarns on the mechanical properties of biaxial warp-knitted composites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition),2026,58(1):143-152.

玻璃纤维增强树脂基复合材料(Glass fiber reinforced composite, GFRC)因其出色的比强度、比模量,同时具有耐腐蚀、抗疲劳和成本低廉等优点,因此GFRC在海洋运输、轨道交通、建筑和建材、运动器材等领域得到广泛应用^[1-3]。单向纤维增强树脂基复合材料因其在单一方向上具有卓越的拉伸强度和刚度而广泛使用在沿特定轴向承载的场合^[4-5]。然而,单向纤维复合材料虽在单一方向性能优异,但要在多个方向实现平衡的力学性能,通常需要复杂的多向纤维层叠。这种方法带来了诸多挑战,包括增加人工、潜在的不一致性以及分层风险,从而可能损害最终复合材料的结构完整性^[6-7]。相比之下,多轴向复合材料通过多向纤维布局,显著提升了力学性能的均衡性,在航空、汽车、风力发电等行业中展现出独特优势并得以广泛应用^[8-9]。在风电领域,随着叶片朝着大型化、轻量化方向发展,叶片长期处于复杂工况中,需承受拉伸、压缩、弯曲、剪切及低速冲击等多种载荷作用,这对所用复合材料的综合性能提出了极高要求。在运转工况下,蒙皮会承担大部分弯曲载荷、剪切载荷以及与主梁间的作用力,双轴向织物因其高强高模、可设计性强和低成本等特点,成为叶片蒙皮的理想增强材料^[10-11],而捆绑纱作为连接经纬增强纱的关键单元,通过增强层间剪切强度、改善树脂浸渍和减轻应力集中,显著提升复合材料的力学性能和抗分层能力。因此,研究捆绑纱对双轴向经编复合材料力学性能的影响,不仅有助于优化风电叶片的设计与制造,还对提升复合材料的整体性能具有重要意义。本文以玻纤双轴向经编织物为研究对象。该织物由两组沿经纬方向平行排列的单向丝束组成,通过厚度方向的经编线圈捆绑而成,捆绑纱采用低弹涤纶。

多轴向复合材料相对传统纺织复合材料纤维束弯曲程度减小,在保证面内性能的同时,一定程度上改善了材料的层间性能,提高了材料拉伸、抗冲击、能量吸收和面外的性能^[12-14]。Stolyarv等^[15]研究了不同的针织缝合工艺对经编针织物拉伸性能的影响,发现了采用经平缝编和嵌缝缝编的织物拉伸强度高于柱形缝编织物的拉伸强度。基于此,Demircan等^[16]通过树脂传递模塑方法制作双轴经编织物并研究克重和堆叠顺序对拉伸和弯曲性能的影响,与纬向和经向纤维厚度较高的复合材料相比,纬向和经向纤维厚度较低的复合材料显示出更高的拉伸和弯曲性能,且织物层的堆叠结构也会显著影响复合材料的拉伸和弯曲性能。赵兆等^[17]进

一步研究了以高性能玻璃纤维作为捆绑纱的双轴向碳纤维织物及其复合材料的拉伸性能。玻纤捆绑纱可改善树脂浸渍,减少应力集中,增强层间的结合性能,从而提高碳纤维断裂同步性以及整体拉伸性能。相同捆绑纱时,经平组织试样经向强度优于编链组织,材料的拉伸性能更好,凸显了玻纤纱的优势。类似地,敬凌霄等^[18]采用相似规格的双轴向和四轴向经编织物,比较了双轴向和四轴向经编织物的拉伸性能。铺层越多,织物越厚,尺寸稳定性越高,增强纱滑移减少,纤维强度的利用率也随之提高。刘谦等^[19]采用冲击后压缩强度试验对多轴向经编复合材料的损伤容限进行了研究。与层合板复合材料相比,多轴向经编复合材料冲击后压缩强度提高100%以上,说明缝合对提高材料的抗损伤容限有较大的贡献。Jin等^[20]在有限元模拟中,建立了一个用于表征复合材料层压板微观结构的简化模型。将经编织纱线的机械性能转化为树脂的机械性能,模拟了双轴向经编复合材料的弹道冲击损伤。有限元计算结果与实验结果吻合良好,可以有效地计算复合材料的弹道冲击性能。Fang等^[21]研究了双轴经编复合材料在不同应变速率压缩下的压缩行为,建立有限元分析模型,等效树脂将经编织纱线与树脂相结合,并根据经编织纱线和树脂的力学参数推导出刚度矩阵。

虽然已有众多学者对多轴向复合材料的力学性能进行了研究,但现有工作尚未系统揭示捆绑纱对其力学性能的影响机制。为填补这一空白,本文以玻璃纤维双轴向经编复合材料为对象,选用含低弹涤纶经编捆绑纱的织物与人工去除捆绑纱的类双轴向织物作为试验材料,采用真空导流成形工艺制备试样,开展拉伸、压缩、三点弯曲及低速冲击力学性能测试,对比两者力学性能差异,结合显微镜下细观结构分析,探讨捆绑纱在成型过程和破坏机理中的作用,揭示其对复合材料力学性能的影响机制。

1 试验材料和制备方法

1.1 试验材料

为研究双轴向经编复合材料中捆绑纱对力学性能的影响,复合材料的增强体选择玻璃纤维双轴向经编布,为获得相同线密度、纤维种类的类双轴向即去除捆绑纱的双轴向经编织物,特将双轴向经编布中的捆绑纱人工去除。双轴向经编布来自常州弘途,织物参数如表1所示,织物实物图和结构示意图分别如图1、2所示^[20,22]。

表 1 织物的材料参数

Table 1 Material parameters of fabrics

纱线	种类	经向密度/(g·m ⁻²)	线密度/Tex
经向	玻璃纤维	336	1 200
纬向	玻璃纤维	264	900
捆绑纱	低弹涤纶		

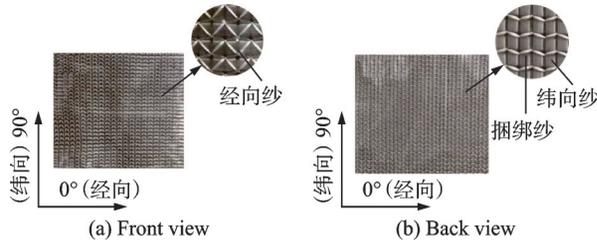


图 1 双向经编实物图^[20]

Fig.1 Physical diagram of biaxial warp knitting structure^[20]

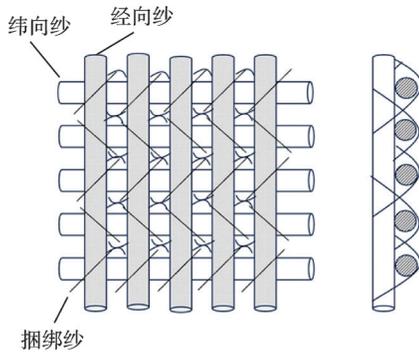


图 2 双向经编结构示意图^[22]

Fig.2 Schematic diagram of biaxial warp-knitted structure^[22]

1.2 试验尺寸

选择捆绑纱对于拉伸、压缩、纵横尺寸、三点弯曲和低速冲击的性能影响作为研究内容,各试验的试验件尺寸、试验标准和铺层如表 2 所示。

表 2 试验矩阵
Table 2 Test matrix

试验类型	长/mm	宽/mm	厚/mm	铺层	试验标准
拉伸	250	25	2	[0] ₄	ASTM D3039
压缩	140	13	4	[0] ₄	ASTM D6641
三点弯曲	155	13	4	[0] ₈	ASTM D7264
低速冲击	150	100	4	[0] ₈	ASTM D7136

1.3 试样制备

研究选择的基体材料为环氧树脂 WSR618 体系,以苯二甲胺为树脂固化剂,邻苯二甲酸二丁酯为黏度添加剂,使用了真空导流成形工艺。试验件具体成形制备工艺如下:

(1)清理模具表面,铺设脱模布。

(2)按照铺设方向将织物铺设在模具表面,避免褶皱产生。

(3)在增强体上方依次铺设导流网(加速树脂流动)、真空袋膜(形成密封腔体)。

(4)将密封膜边缘用密封胶条密封,在密封膜上预留树脂注入口和真空接口,分别连接树脂容器和真空泵。

(5)启动真空泵,将腔体真空度抽至-0.09~-0.10 MPa,检查真空度是否稳定,排查并修复漏点。

(6)混合树脂与固化剂并脱泡,打开注入口阀门,利用负压驱动树脂流动,浸润整个增强材料铺层。

(7)树脂完全浸润后关闭阀门,保持真空状态下进行室温初步固化(24 h),确保树脂初步交联。拆除辅助材料,将制品从模具取出后放入烘箱中进行 80 °C 后固化(5 h)。

(8)按试验件尺寸进行水切割,并使用水浸超声 C 扫设备对待测试样件进行检测,以确保试样件在制备和裁切过程中未产生损伤。

使用显微镜对水切割后的试验件截面进行观察,如图 3 所示,可以明显地看出双向经编的纤维束截面呈椭圆形有序分布,而类双向的纤维束截面较为杂乱,这表明双向经编纤维在成形过程中保持原有的排序,类双向的纤维受到了一定程度的扰乱,影响其力学性能。

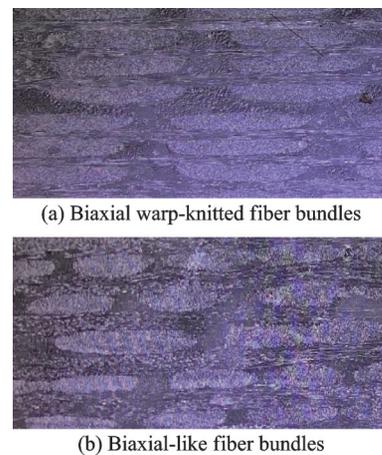


图 3 显微镜下的试验件截面

Fig.3 Cross-section of test piece under a microscope

1.4 试验方法

拉伸性能测定试验根据 ASTM D3039^[23]进行测试,在 MTS 370.25 疲劳试验机上进行,加载速度为 2 mm/min,沿 0° 方向制备拉伸试样,每种试样件 5 件。

压缩性能测定试验根据 ASTM D6641^[24]进行测试,在 MTSE 45 微机控制的电子万能试验机上进行,加载速度为 1.0 mm/min,沿 0°方向制备拉伸试样,每种试样件 5 件。

三点弯曲性能测定试验根据 ASTM D7264^[25]进行,在 MTSE 45 微机控制的电子万能试验机上进行,加载速度为 1.0 mm/min,沿 0°和方向制备拉伸试样,每种试样件 5 件。

低速冲击试验按照 ASTM D7136^[26]进行,冲击能量选取为 30 J,在 CEAST 9350 落锤式冲击试验机上进行,冲击后使用水浸超声波 C 扫进行无损检测,每种试样件 5 件。

各试验夹持方式如图 4 所示,试验过程中通过试验机自带的位移和载荷数据采集系统采集数据,同时使用应变采集系统进行应变数据采集。试样件名称以是否捆绑、试验类型和制样方向 3 部分构成,如 KLS0 代表具有捆绑纱线的 0°方向制备的拉伸件。为确保试验结果能客观反映材料真实力学性能,最终选取具有代表性的试验件数据进行分析与呈现,所选数据需满足试样制备合规、试验过程无异常干扰、数据曲线趋势合理且与同批次平行试验结果偏差在合理范围内(偏差≤5%)的要求。

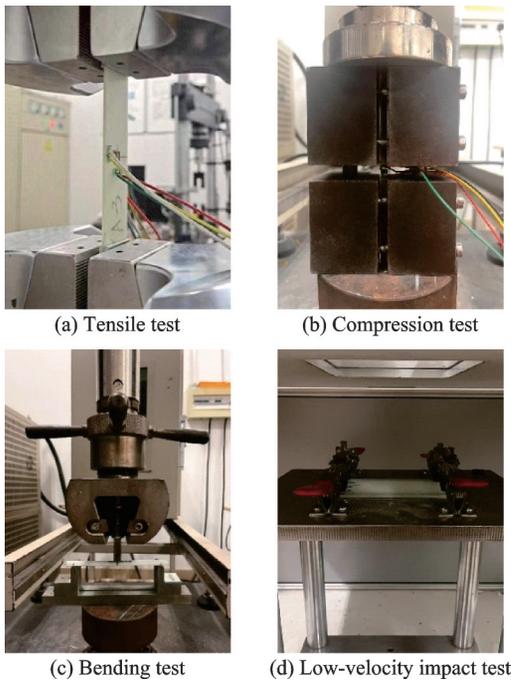


图 4 试验夹持方式

Fig.4 Test clamping methods

2 结果和讨论

2.1 拉伸试验结果

图 5 和图 6 分别展示了玻纤双轴向经编与类双轴向复合材料的拉伸试验结果及试验件破坏形

貌。试验结果表明,玻纤双轴向经编复合材料的拉伸强度和弹性模量分别为 440.4 MPa 和 23.23 GPa,比类双轴向复合材料的拉伸强度高 21.67%,而两者的弹性模量则接近。

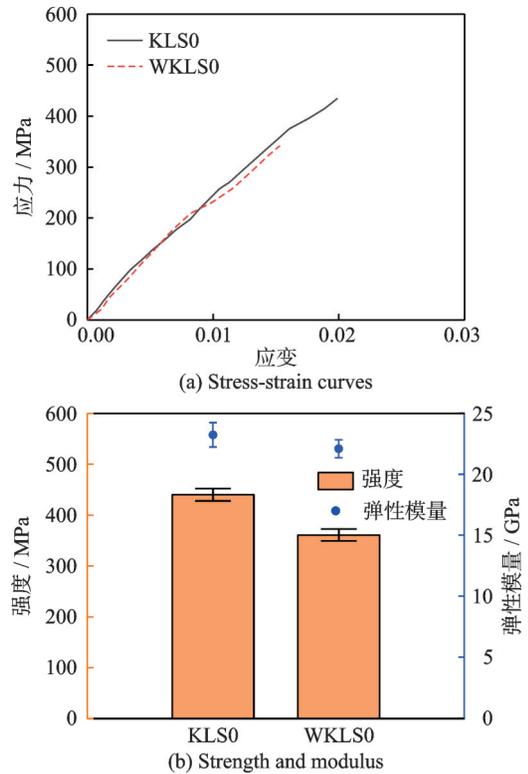


图 5 拉伸试验结果

Fig.5 Tensile test results

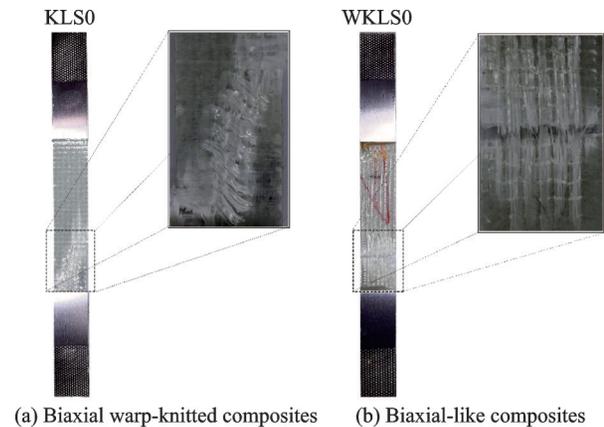


图 6 拉伸破坏形貌

Fig.6 Tensile fracture morphologies

观察试样件破坏形貌差异,破坏形式表现为纤维断裂伴随着纤维拔出。类双轴向断面平整规则,相比之下,玻纤双轴向经编复合材料的破坏区域呈现出沿拉伸方向的波纹状影响区,断面不规则。这表明,由于存在捆绑纱,玻纤双轴向经编中纵向与横向增强纱之间产生了协同效应,使得横向增强纱也能分担部分拉伸载荷。而类双轴向复合材料由于缺少捆绑纱,其纵向和横向增强纱之间

的协调作用较弱,拉伸载荷主要由基体和纵向增强纱承担。

两种材料的弹性模量相近,原因在于捆绑纱主要起协调作用而非直接承载。在弹性变形阶段初期,捆绑纱尚未发挥作用,因此两种复合材料表现出几乎相同的弹性模量。随着拉伸载荷增加,玻纤双轴向经编材料的载荷分配模式发生变化,纵向增强纱和基体承担主要载荷,横向增强纱协同分担部分载荷,而在类双轴向材料中,载荷仍仅由纵向增强纱和基体承担。因此,当载荷达到类双轴向的破坏极限时,材料发生断裂破坏,而玻纤双轴向经编材料则仍能保持原有的刚度继续承载,直至达到其更高的破坏载荷时才发生断裂破坏。

此外,捆绑纱在成形工艺中还起到固定纱线相对位置的作用,有效减少了铺层过程中对增强纱的干扰。相反,类双轴向材料因缺乏捆绑纱,其增强纱在面内和面外方向上容易发生不同程度的屈曲。这种屈曲不仅会导致局部形成富树脂区(减少有效承载纤维长度),增强纱屈曲点还极易在承载过程产生应力集中。

2.2 压缩试验结果

玻纤双轴向经编和类双轴向复合材料的压缩载荷-位移曲线和破坏形貌分别如图7和图8所示。试验结果表明,玻纤双轴向经编复合材料的压缩强度和弹性模量分别为470.6 MPa和20.41 GPa,比类双轴向复合材料的压缩强度高17.50%,弹性模量降低了9.38%。

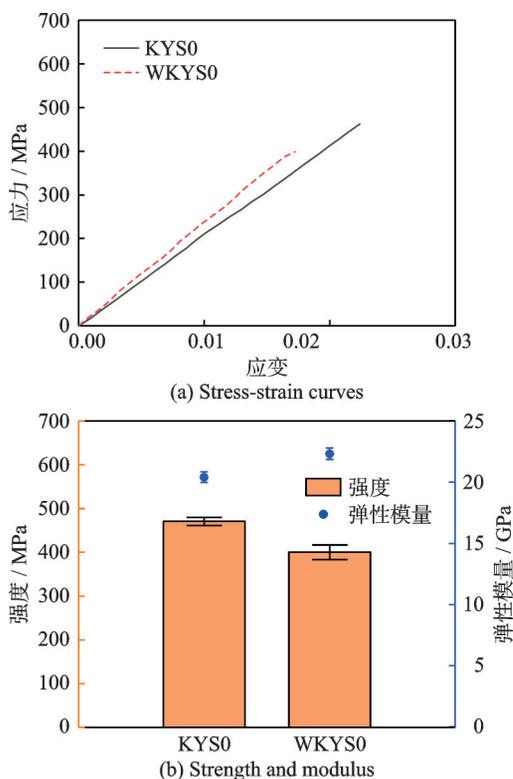


图7 压缩试验结果

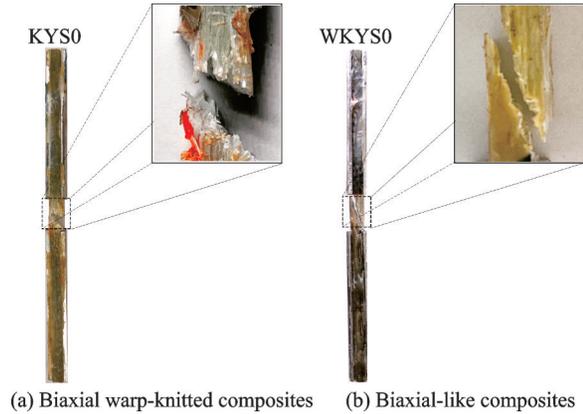


图8 压缩破坏形貌

Fig.8 Compression failure morphologies

复合材料在压缩载荷下的破坏形式复杂多样,主要形式有纤维剪切破坏、微屈曲和分层,受材料体系、铺层方式、缺陷状态等影响。断裂面通常沿最大剪切应力方向,反映剪切破坏起主导作用。基体和界面的力学性能对压缩性能影响显著,纤维易发生失稳,从而引起多种破坏机制相互作用。

结合破坏形貌可知,两种复合材料的断口呈斜面,与载荷加载方向成一定角度,这是由于试验件在压缩载荷下沿着最大剪切应力方向发生了剪切断裂。尽管两者都发生了剪切破坏,但破坏形貌仍然存在一定的差异,双轴向经编的断口处纤维束存在斜向剪断痕迹,基体伴有明显塑性变形与剪切带,而去除捆绑纱的类双轴向的断口则表现出明显分层现象,断裂面呈现“台阶状”,层与层之间脱粘显著。这是由于在双轴向经编材料中,捆绑纱通过交织作用将各层纤维紧密固定,在压缩过程中抑制了层间分层扩展,使得纤维束受约束产生局部剪切破坏,而去除捆绑纱后,层间失去机械连锁作用,裂纹易在富树脂区域萌生并横向扩展,在剪切破坏的基础上还会产生一定程度的层间分层。在性能方面,含捆绑纱的材料因捆绑纱能将面内载荷均匀分配到各层纤维,避免局部应力集中,同时有效抵抗层间剪切,抑制分层破坏,从而显著提升压缩强度,且在成形过程中保持了纤维的平直度减少了纤维的初始屈曲。在类双轴向材料内,由于各单层之间缺乏机械连锁,抗剪能力下降,压缩时易发生层间滑移和分层,使纤维束过早失去支撑而断裂,压缩强度大幅降低,并且纤维束的局部屈曲也是压缩强度降低的诱因。弹性模量的差异源自于类双轴向材料在去除捆绑纱后,树脂基体含量增加,而在压缩过程中起主要承载的为基体,树脂含量的提高在一定程度上影响了类双轴向的模量。

2.3 三点弯曲试验

玻纤双轴向经编和类双轴向复合材料的弯曲

载荷-位移曲线和破坏形貌分别如图 9 和图 10 所示。试验结果表明,玻纤双轴向经编复合材料弯曲破坏强度为 483.1 MPa,比类双轴向复合材料提升了 10.01%,弯曲模量为 21.49 GPa,比类双轴向复合材料提升了 6.54%。从载荷位移曲线可以明显看出,在载荷初始加载阶段,玻纤双轴向具有更大的抵抗变形的能力,在达到破坏载荷后,与类双轴向的载荷骤降不同,玻纤双轴向载荷随着位移呈现出阶梯式的变化,这表明玻纤双轴向在破坏后仍具有一定的刚度,仍然具有承载能力。结合三点弯曲的破坏形式分析,试验件在加载点的下表面承受拉伸,上表面承受压缩,中性层附近承受显著的剪切应力,类双轴向缺少捆绑纱的层间增强作用,内部各层纤维束之间仅依靠树脂基体进行连接和传递载荷层间结合强度不足,破坏形式从纤维主导的断裂转换为树脂主导的层间分层是弯曲强度降低的主要原因,此外,在成型工艺中缺少捆绑纱的固定会产生纤维扰乱、厚度不均匀工艺缺陷,这些缺陷引起应力传递不均匀也会使弯曲强度有一定程度的降低。层间分层会引起整体结构的刚度下降,在初始阶段其刚度变化不大但在达到破坏载荷附近时,产生的裂纹会沿着层间薄弱区快速扩展,刚度迅速下降,类双轴向没有捆绑纱的约束,在产生裂纹后迅速扩展,刚度急剧下降,破坏更突然、更彻底,而玻纤双轴向在破坏后仍具有一定的刚度,呈现一种渐进破坏的趋势。观察两种材料在显微镜下的破坏形貌,加载点上表面受压的纤维束局部发生微屈曲,在断口上呈现出小区域的褶皱,基体

被压溃形成粉末、发白的区域;加载点中性层附近类双轴向比玻纤双轴向产生了更大区域的分层,这也证实了对两种材料主导破坏模式的分析是正确的;玻纤双轴向加载点下表面产生了局部纤维拉伸断裂,类双轴向下表面并没有产生明显的纤维断裂,这是由于在纤维断裂前,分层的大量产生,结构整体刚度急剧下降,阻挡了载荷的传递。

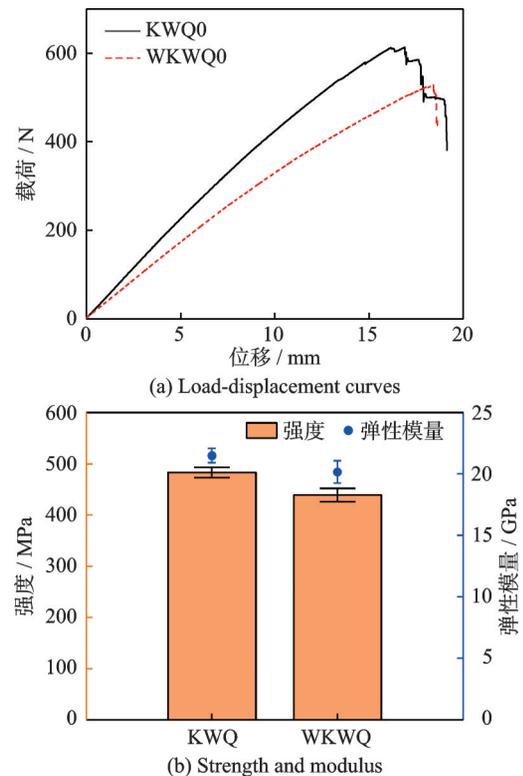


图 9 弯曲试验结果

Fig.9 Bending test results

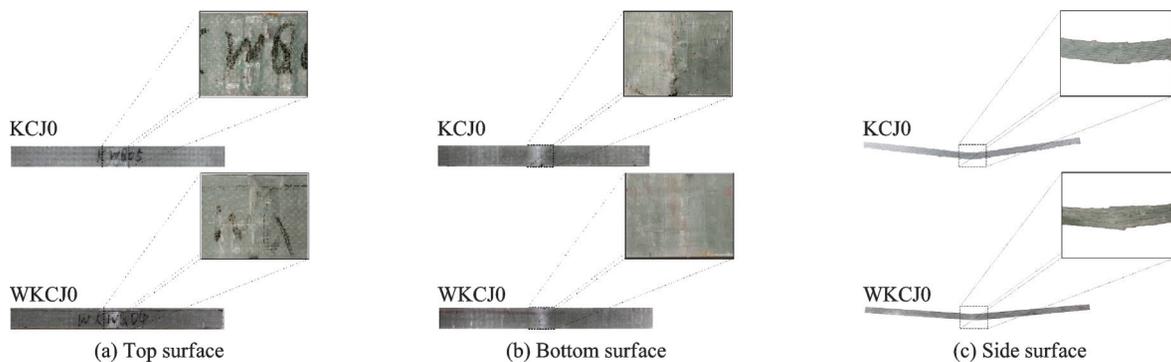


图 10 弯曲破坏形貌

Fig.10 Bending failure morphologies

2.4 低速冲击试验结果

2.4.1 低速冲击曲线分析

低速冲击试验能量、载荷和位移时间曲线如图 11 所示,试验数据如表 3 所示。

双轴向经编的能量吸收率为 61.33%,较类双轴向提高了 9.920%。在低速冲击过程中,冲头的动能被复合材料吸收,转化成板子的变形能、损伤

能等,能量的吸收主要依赖于材料的可控变形(如纤维拉伸、弯曲)、界面摩擦(纱线间/纤维和基体间)和渐进式破坏。在双轴向经编中,经纬向增强纱线被捆绑纱线“锁定”,冲击载荷作用下难以发生大幅度的纱线滑移,吸收能量的主要形式是自身拉伸变形,纤维通过弹性变形、塑性变形直至断裂耗散能量,此时纱线的拉伸破坏和断裂是吸能的主要

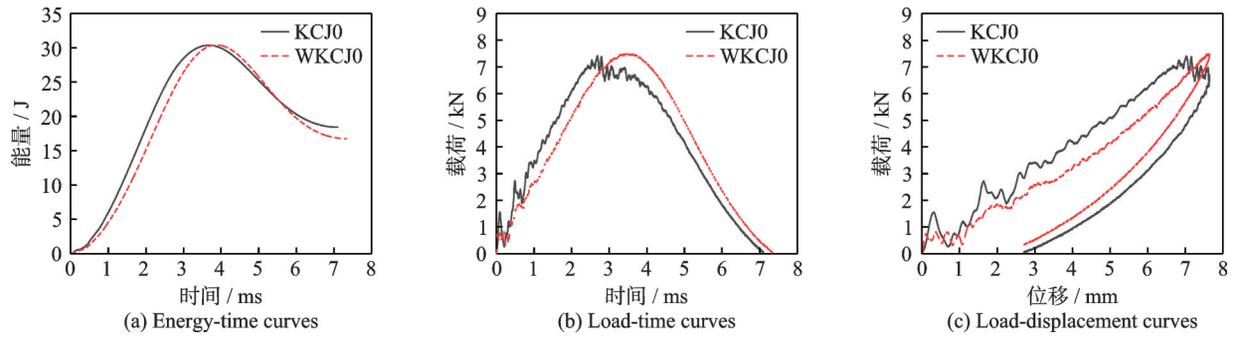


图 11 低速冲击试验曲线

Fig.11 Low-velocity impact test curves

表 3 试验数据

Table 3 Test data

类别	双轴向经编	类双轴向	差值
能量吸收量/J	18.40	16.74	1.66
能量吸收率/%	61.33	55.80	5.53
峰值载荷/N	7 414.00	7 495.00	81.00
最大位移/mm	7.03	8.32	1.29

方式,同时捆绑纱线的自身线圈结构也会因为拉伸或者断裂额外贡献吸能作用。类双轴向因为缺少捆绑纱的存在,经纬向增强纱缺少约束,冲击载荷易引发纱线的滑移,滑移过程中,纱线间的摩擦耗散能量远低于拉伸变形,降低了有效能量耗散的减少。同时,滑移导致纱线无法充分拉伸断裂,纱线的拉伸变形能量吸收潜力被浪费。能量吸收的效率还取决于参与承载的纱线数量,更多纱线同步变形/断裂,吸能更多,捆绑纱的线圈结构如同节点一样,将冲击载荷分布到冲击点周围的经纬纱线,使得大量的纱线同步承受拉伸应力,通过群体变形耗散能量,即使部分纱线断裂,周围纱线仍然在继续承载。

双轴向经编的峰值载荷为 7 414 N,较类双轴向减少了 81.00 N。双轴向经编存在捆绑纱以线圈形式将经纬向增强纱交织固定,这种结构虽能形成“网格承载体系”,但线圈会引发载荷传递的不稳定性,冲击载荷作用下,捆绑纱的线圈会因受力发生拉伸、变形甚至局部断裂,当线圈突然失效时,原本通过该线圈传递的载荷会瞬间转移至周围经、纬增强纱,导致载荷出现突发性波动。同时,不同位置的线圈受力不均,部分线圈先于其他结构发生变形或断裂,造成瞬间参与承载的整体结构出现“局部卸载-重新加载”的反复过程,使载荷传递呈现非连续状态。而去除捆绑纱后,经纬向增强纱虽失去约束,冲击时以相对滑移和堆积为主,但纱线的受力主要依赖自身拉伸刚度,传递过程中因缺乏线圈结构的突然失效和载荷转移,反而使载荷变化更平缓。因此,存在捆绑纱时,其线圈结构的不连续失

效和载荷的瞬间转移,导致双轴向经编的载荷曲线波动更严重。在载荷加载阶段双轴向经编主要是以纤维断裂的方式吸收能量,并且将冲击载荷分布到冲击点附近纱线,在载荷加载的早期就吸收了大量冲击能量,降低了峰值载荷。

载荷施加初期纤维和基体发生弹性变形,这一阶段的斜率为初始刚度,双轴向经编因为捆绑纱的协调作用具有更大的斜率及更高的初始刚度,载荷持续增大,曲线斜率开始下降,此时材料发生初始损伤,这阶段的损伤以基体开裂和层间分层为主,尤其是冲击点的正下方,达到峰值载荷前,纤维开始承担主要载荷,部分纤维因为拉伸或剪切发生断裂,此时双轴向经编因为存在“局部卸载-重新加载”的反复过程,载荷曲线出现掉载又加载的现象。峰值载荷后,类双轴向的斜率发生变化,与加载阶段相比更小,说明刚度明显降低,而双轴向经编的卸载曲线斜率与加载阶段相比并无明显变化表明整体结构还保存着较为完整的刚度。

从各曲线中可以明显看出双轴向经编的曲线与类双轴向相比各项响应更加迅速,关键在于捆绑纱的线圈结构提高了载荷的传递效率。双轴向经编中,因为捆绑纱的线圈结构形成了高效的“载荷传递网络”,在低速冲击发生时,冲击载荷作用在冲击点局部,捆绑纱的线圈结构迅速地将载荷传递到周围的经纬增强纱。由于经纬增强纱被捆绑纱牢牢固定住,纱线不会发生大幅的相对滑移,载荷可以沿着经纬方向快速扩散至更大范围的纱线,使得整个结构能够迅速对载荷作出反应。

2.4.2 超声波 C 扫及形貌分析

图 12 和图 13 分别为低速冲击后试验件冲击面、冲击背板形貌图和通过超声波 C 扫得到层间损伤区域。从冲击面和冲击背板的目视图可以看出,冲击面的破坏形式主要是受到压缩而导致的基体开裂,而冲击背板则是因为拉伸引起的纤维断裂,经 C 扫检测出两者的损伤区域面积差别证实了双轴向经编具有更好的抗分层能力。

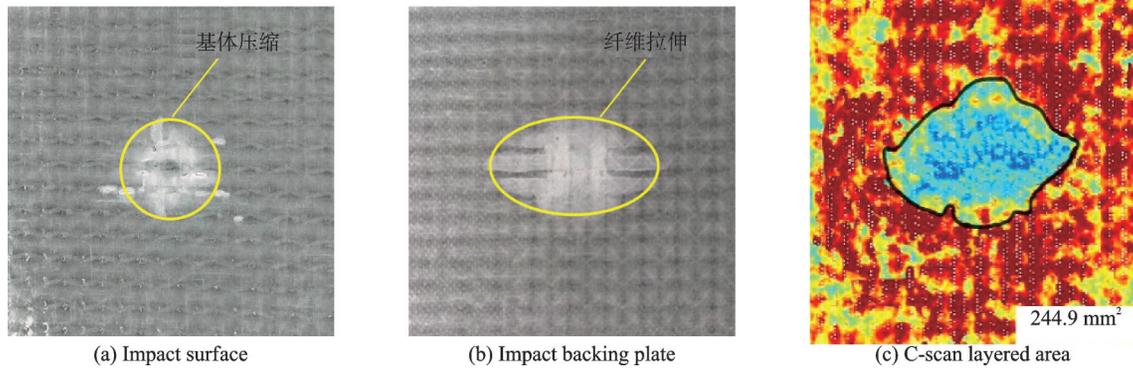


图 12 双轴向经编复合材料

Fig.12 Biaxial warp-knitted composites

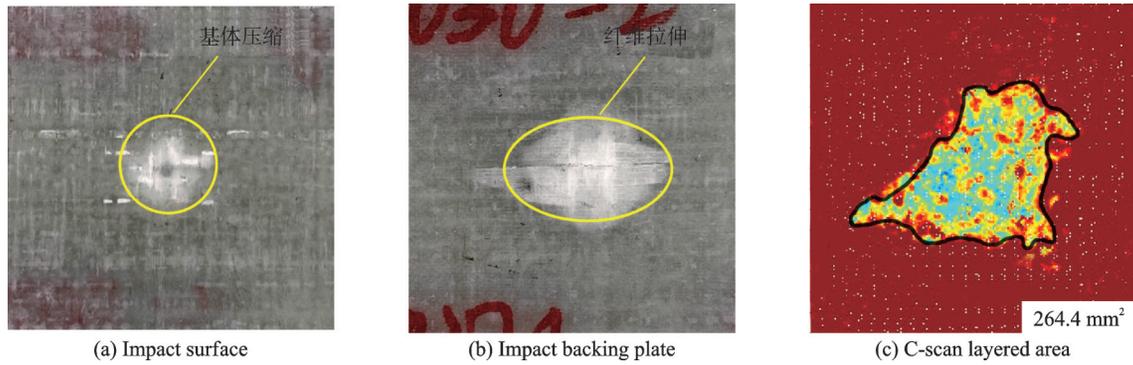


图 13 类双轴向复合材料

Fig.13 Biaxial-like composites

3 结 论

本文以玻纤双轴向经编复合材料为研究对象,通过对比含低弹涤纶捆绑纱的双轴向经编复合材料与去除捆绑纱的类双轴向复合材料,结合真空导流成型工艺制备试样,测试其拉伸、压缩、三点弯曲及低速冲击性能,并分析破坏形貌与作用机制,得出以下结论:

(1) 捆绑纱显著提升复合材料力学性能,与去除捆绑纱的类双轴向相比,含低弹涤纶捆绑纱的双轴向经编在力学性能上具有有效提升。其中,拉伸强度与压缩强度明显提高;弯曲性能方面,弯曲强度和弯曲模量均有所提升;抗冲击性能上,低速冲击能量吸收率也得到改善,整体展现出更优的承载能力、抗变形能力及能量耗散能力。

(2) 主导失效模式差异,两种材料在破坏形态上呈现显著差异,反映出失效机制的本质差别。含捆绑纱的复合材料拉伸破坏时呈现不规则断裂面,纤维抽拔明显,体现出经纬向增强纱协同承载的特性;而类双轴向缺乏捆绑纱约束,拉伸断裂面平整规则,仅依赖纵向增强纱与基体承载,未形成多向协同作用。在压缩和弯曲破坏中,类双轴向复合材料层间结合薄弱的问题凸显,易发生基体与纤维脱粘、层间分层,破坏形式以层间失效为主。

(3) 捆绑纱通过多重作用机制影响材料性能,从细观作用机理来看,捆绑纱通过 3 个方面改善复合材料性能。捆绑纱通过交织固定各层纤维,可减少成形过程中纤维的扰乱与屈曲,进而减少富树脂区的形成,有效避免局部应力集中;同时能抑制层间分层扩展,减少压缩与弯曲过程中的层间滑移及脱粘现象;此外,还可协调纱线受力,促使经纬向增强纱协同分担载荷,提升载荷分配效率,并借助自身线圈结构进一步促进能量耗散。

综上所述,捆绑纱能减少成形时纤维扰乱、提高成形品质量、改变主导破坏模式,且通过优化载荷分配与能量耗散能力,显著改善玻纤双轴向复合材料综合力学性能,为该材料在航空、风电等严苛性能要求领域的应用提供理论支持。

参考文献:

- [1] HSISSOU R, SEGHIRI R, BENZEKRI Z, et al. Polymer composite materials: A comprehensive review[J]. Composite Structures, 2021, 262: 113640.
- [2] LUNETTO V, GALATI M, SETTINERI L, et al. Sustainability in the manufacturing of composite materials: A literature review and directions for future research[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 85: 858-874.

- [3] TIWARY A, KUMAR R, CHOCHAN J S. A review on characteristics of composite and advanced materials used for aerospace applications[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 51: 865-870.
- [4] HUANG Z M. On micromechanics approach to stiffness and strength of unidirectional composites[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2018, 38(4): 167-196.
- [5] LIU T, FAN C, KE Z, et al. A real micro-structural model to simulate the transversal compression behaviors of unidirectional composites based on the μ -CT detection[J]. *Composites Communications*, 2022, 32: 101184.
- [6] BREITE C, MELNIKOV A, TURON A, et al. Detailed experimental validation and benchmarking of six models for longitudinal tensile failure of unidirectional composites[J]. *Composite Structures*, 2022, 279: 114828.
- [7] SØRENSEN B F, GOUTIANOS S, MIKKELSEN L P, et al. Fatigue damage growth and fatigue life of unidirectional composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 211: 108656.
- [8] 廖文和,戴宁. 航空航天结构轻量化设计制造技术发展现状与挑战[J]. *南京航空航天大学学报*, 2023, 55(3): 347-360.
- LIAO Wenhe, DAI Ning. Current status and challenges in the development of lightweight design and manufacturing technology for aerospace structures[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2023, 55(3): 347-360.
- [9] 谈昆伦,刘黎明,段跃新,等. 碳纤维经编织物在大飞机复合材料结构制造上的应用[J]. *玻璃纤维*, 2013(1): 11-14.
- TAN Kunlun, LIU Liming, DUAN Yuexin, et al. Application of carbon fibre woven fabrics in the manufacture of composite structures for large aircraft[J]. *Glass Fibre*, 2013(1): 11-14.
- [10] 李丽娟,蒋高明,缪旭红. 多轴向经编针织物在风力发电中的应用[C]//2009年全国经编技术交流会. [S.l.]: [s.n.], 2009: 54-59.
- LI Lijuan, JIANG Gaoming, MIAO Xuhong. Application of multi-axis warp-knitted fabrics in wind power generation[C]//Proceedings of the 2009 National Warp Knitting Technology Exchange Conference. [S.l.]: [s.n.], 2009: 54-59.
- [11] 陈振中,张鑫桂,李晓科,等. 风电叶片主梁结构的多尺度可靠性优化设计[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2024, 50(5): 85-93.
- CHEN Zhenzhong, ZHANG Xingui, LI Xiaoke, et al. Multi-scale reliability optimisation design of wind turbine blade main beam structures[J]. *Journal of Donghua University (Natural Science Edition)*, 2024, 50(5): 85-93.
- [12] 周荣星. 多轴向经编针织结构增强材料低速冲击能量吸收特性研究[D]. 上海: 东华大学, 2002.
- ZHOU Rongxing. Study on the low-speed impact energy absorption characteristics of multi-axial warp-knitted structural reinforcement materials[D]. Shanghai: Donghua University, 2002.
- [13] HAMADA H, SUGIMOTO K, NAKAI A, et al. Mechanical properties of knitted fabric composites[J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2000, 19(5): 364-376.
- [14] DEXTER H B, HASKO G H. Mechanical properties and damage tolerance of multi-axial warp-knit composites[J]. *Composites Science and Technology*, 1996, 56(3): 367-380.
- [15] STOLYAROV O, QUADFLIEG T, GRIES T. Effects of fabric structures on the tensile properties of warp-knitted fabrics used as concrete reinforcements [J]. *Textile Research Journal*, 2015, 85(18): 1934-1945.
- [16] DEMIRCAN O, YILMAZ C, KOCAMAN E S, et al. An experimental study on tensile and bending properties of biaxial warp knitted textile composites[J]. *Advanced Composite Materials*, 2020, 29(1): 73-88.
- [17] 赵兆,陈南梁,刘黎民,等. 玻纤捆绑纱双向经编碳纤维增强复合材料拉伸性能的研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2012(5): 42-46.
- ZHAO Zhao, CHEN Nanliang, LIU Limin, et al. Study on the tensile properties of glass fibre-bound yarn biaxially woven carbon fibre-reinforced composite materials[J]. *Fiberglass/Composite Materials*, 2012(5): 42-46.
- [18] 敬凌霄,何婷婷,陈星安,等. 涤纶轴向经编织物拉伸性能研究[C]//2017全国针织技术交流会. [S.l.]: [s.n.], 2017: 353-356.
- JING Lingxiao, HE Tingting, CHEN Xing'an, et al. Study on the tensile properties of polyester axial warp-knitted fabrics[C]//Proceedings of the 2017 National Knitting Technology Exchange Conference. [S.l.]: [s.n.], 2017: 353-356.
- [19] 刘谦,李嘉禄. 多轴向经编/缝合织物增强复合材料冲击后压缩强度研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 1999(2): 12-14.
- LIU Qian, LI Jialu. Study on the compressive strength of multi-axial warp-knitted/sewn fabric reinforced composite materials after impact[J]. *Fiberglass/Composite Materials*, 1999(2): 12-14.
- [20] JIN L, HU H, SUN B, et al. A simplified microstruc-

- ture model of bi-axial warp-knitted composite for ballistic impact simulation[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2010, 41(5): 337-353.
- [21] FANG F, PAN Z, GU B. Finite element analyses of compressive behaviors of biaxial warp-knitted composite material under various strain rates with a simplified geometrical model[J]. *The Journal of The Textile Institute*, 2015, 106(9): 1013-1026.
- [22] 马亚运,高晓平,穆东明. 双轴向与四轴向经编复合材料弯曲性能对比实验研究[J]. *现代纺织技术*, 2018, 26(1): 5-8.
- MA Yayun, GAO Xiaoping, MU Dongming. Comparative experimental study on the bending performance of biaxial and quadriaxial warp-knitted composite materials[J]. *Modern Textile Technology*, 2018, 26(1): 5-8.
- [23] ASTM. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials: D3039/D3039M-17[S]. Philadelphia: ASTM, 2017.
- [24] ASTM. Standard test method for compressive properties of polymer matrix composite materials using a combined loading compression (CLC) test fixture: D6641/D6641M-23[S]. Philadelphia: ASTM, 2023.
- [25] ASTM. Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials: D7264/D7264M-21[S]. Philadelphia: ASTM, 2021.
- [26] ASTM. Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event: D7136/D7136M-15[S]. Philadelphia: ASTM, 2005.

(编辑:夏道家)