

DOI:10.16356/j.2097-6771.2026.01.009

结构和张力对机织 T 形构件抗冲击性能的影响

邓祖晔¹, 袁志超¹, 郭子桐^{1,2,3}, 杨天政¹, 檀晨晨⁴, 杨昊达¹, 孙正^{1,2,3}

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016; 2. 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; 3. 江苏省先进复合材料技术与装备创新中心, 南京 211500; 4. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 南京 211106)

摘要: 提出了一种可在三维织机设备上通过一次穿纱实现多种组织结构的 T 形复合材料样件的织造新方法。采用仿形分区穿纱与特定提综方式, 将纬纱植入经纱层内, 并通过合理设计纬纱路径实现 T 形肋板与梁部的一体化成形。制备所得的 T 形碳纤维复合材料构件在 7.5 J 冲击能量下进行夏比摆锤冲击测试, 研究不同组织结构及经纱张力条件下对构件抗冲击性能的影响规律。对 9 种不同类型构件的实验结果进行比较分析表明: 在相同经纱张力条件下, 浅交结构在冲击过程中表现出更高的最大冲击载荷, 较正交结构和浅交-衬经结构分别提高约 37% 和 20%; 浅交-衬经结构在吸能性能方面更优, 在 0.6 N 和 1.1 N 经纱张力下均表现出最高的能量吸收率; 而正交结构对经纱张力变化较为敏感, 随着经纱张力的增大, 其吸收总能量提升了约 52%。研究结果表明, 纬纱屈曲程度越低、经纱张力越小, 构件拥有越高的冲击载荷峰值, 而纬纱屈曲程度越高、经纱张力越大, 构件拥有越大的总吸收能量。本研究为 T 形构件的应用提供了理论基础。

关键词: 三维机织; T 形; 冲击; 织物结构; 经纱张力

中图分类号: V258

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2026)01-0104-13

Influence of Fabric Structure and Warp Tension on Impact Performance of Woven Carbon Fiber T-Shaped Composites

DENG Zuyue¹, YUAN Zhichao¹, GUO Zitong^{1,2,3}, YANG Tianzheng¹, TAN Chenchen⁴,
YANG Haoda¹, SUN Zheng^{1,2,3}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China; 3. Jiangsu Innovation Center of Advanced Composite Technology and Equipment, Nanjing 211500, China; 4. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: A novel weaving approach is proposed to fabricate T-shaped composite specimens featuring multiple structural configurations on a three-dimensional weaving machine through a single threading process. This method employs a profiled zonal threading strategy combined with specifically designed shedding sequences to embed weft yarns into the warp layers. By optimizing the weft paths, the rib and web sections of the T-shaped preform are integrally formed in a single operation. T-shaped carbon fiber composite

基金项目: 国家自然科学基金(52305376, 52405375); 中国博士后科学基金面上项目(2023M741679); 中国博士后科学基金(2023TQ0157)。

收稿日期: 2025-11-11; **修订日期:** 2026-01-19

通信作者: 孙正, 男, 副教授, 硕士生导师, E-mail: zhengsun@nuaa.edu.cn。

引用格式: 邓祖晔, 袁志超, 郭子桐, 等. 结构和张力对机织 T 形构件抗冲击性能的影响[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2026, 58(1): 104-116. DENG Zuyue, YUAN Zhichao, GUO Zitong, et al. Influence of fabric structure and warp tension on impact performance of woven carbon fiber T-shaped composites[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics(Natural Science Edition), 2026, 58(1): 104-116.

components are fabricated and subjected to Charpy impact tests at an impact energy of 7.5 J. Thus, the effects of different weave structures and warp tensions on the impact performance are investigated. Comparative analysis of nine types of specimens reveal that, under identical warp tension conditions, the shallow-interlaced structure exhibits the highest peak impact load, approximately 37% and 20% greater than those of the orthogonal and the shallow-interlaced with backing warp structures, respectively; the shallow-interlaced with backing warp structure demonstrates superior energy absorption capability, achieving the highest energy absorption efficiency under both 0.6 N and 1.1 N warp tensions; in contrast, the orthogonal structure shows pronounced sensitivity to warp tension, with its total absorbed energy increasing by approximately 52% as warp tension rises. The results indicate that lower weft buckling and smaller warp tension enhance peak impact load, whereas higher weft buckling and greater warp tension improve total energy absorption. These findings provide a theoretical basis and experimental insight for the structural design and performance optimization of T-shaped composite components.

Key words: three-dimensional weaving; T-shaped; impact; fabric structure; warp tension

以碳纤维为增强体,环氧树脂为基体的复合材料拥有高比强度、高比刚度以及耐腐蚀性,为各行业的轻量化提供了新的解决方案^[1-3]。特别是在航空航天领域,复合材料构件相比于同结构金属构件质量可以减轻 30%~50%^[4-6]。目前,复合材料预制体的主要织造形式包括二维层合结构与三维多层结构。在机织工艺中,二维机织布层合结构相较于三维机织织物,在面内力学性能方面具有一定优势,但在抗分层性与抗冲击性能方面,三维机织结构表现更为优异^[7-10]。正因如此,三维机织织物在航空航天结构件,尤其是机匣与叶片部位的 T 形连接件及承力件中得到越来越广泛的应用^[11-12]。然而,一旦关键部位的连接件或承力件在受到冲击载荷后发生失效,可能对飞行器整体结构安全造成严重威胁。因此,系统研究三维机织复合材料的关键织造工艺参数及其对预制体成形质量和复合材料性能的影响,具有重要的理论意义与工程价值。

在抗冲击性能研究方面,二维层合板的相关研究已较为丰富。蔡宣明等^[13]对二维碳纤维层合板进行高速冲击实验,实验表明不同冲击速度作用下,层合结构损伤模式主要表现为冲击面的纤维断裂和冲击背面的纤维分层、纤维拉伸断裂及纤维束的劈裂。盛鸣剑等^[14]通过实验与神经网络结合的方式预测了二维层合板在不同冲击能量下的损伤程度,为后续的研究提供了参考。Patel 等^[15]指出,二维层合板在受到不同角度冲击时,不同铺层顺序的样件会出现程度不一的分层现象。此外,层合板的抗冲击性能对铺层顺序与纤维混杂方式高度敏感。何帅^[16]与 Stephen 等^[17]对其进行了实验研究,但尚未对其机理进行系统阐释。Wanger 等^[18]针对层间失效行为建立了材料模型,实现了较高可靠性

的冲击响应预测。与平板结构不同,T形件与工形件由于几何形状带来的应力集中及铺层不连续等问题,其抗冲击性能需从薄壁结构与主承载方向进行综合研究。杨发建等^[19]与陈方等^[20]开展了 T 形件边缘冲击实验,提出了损伤判据,并通过结构尺寸设计使其满足飞行器升力需求。王维韩等^[21]对 T 形件的加筋区进行了冲击实验,揭示了损伤机理,并建立了多尺度预测模型,验证了其在 T 形与工形件预测中的有效性。在抗冲击性能更具优势的三维机织复合材料领域,相关研究也取得了诸多进展。Ren 等^[21]针对三维机织平板件开展了经向与纬向冲击实验,分析了方向性差异的成因,并建立了中尺度力学模型。Wei 等^[23]针对三维机织物的高速冲击过程,研究了纱线的失效模式并开发了全尺寸纱线级模型。Jing 等^[24]利用 CT(Computed tomography)技术对三维机织织物的拉伸与剪切行为进行建模分析,建立了中尺度代表性体元(Representative volume element, RVE)模型及适用于低速冲击的宏观预测模型。此外,多位学者还针对三维机织 T 形与工形构件的冲击行为进行了深入研究。Hao 等^[25]分析了三维机织 T 形件在加强筋方向受冲击时的损伤机理;文献[26-28]对带缺口的工形件进行了断裂与裂纹扩展研究,揭示了织物内部结构与基体损伤间的关系;魏小玲^[29]则分析了单 T 形与多 T 形结构下不同冲击损伤机理的差异。

总体来看,已有研究在三维机织 T 形或工形预制体的织造与抗冲击性能方面取得了丰富成果,但多数工作未对预制体织造过程与关键机织参数进行系统描述。实际上,在三维织造工艺中,工艺参数与织造参数对预制体成形质量及最终复合材

料性能具有显著影响^[30-31]。其中,经纱张力与织物组织结构是影响织造质量的关键因素。Launay 等^[32]已对经纱张力对织物力学性能的作用进行了实验探讨,并提出了相应的试验装置。陆慧中等^[33]采用了不同的经纱张力进行织造,表明随着经纱张力的增大,织造过程中经纱的磨损愈加严重。Mebrate 等^[34]证明织造过程中增加经纱的张力会显著降低织物的强度,同时也注意到不同纱线张力会对纤维造成不同程度的损伤,最终影响到复合材料的性能^[35]。与此同时,不同组织结构与织物力学性能之间的关系也得到广泛关注^[8,36],为进一步揭示结构-性能关系,研究者们采用不同建模方法建立了针对力学性能的预测模型^[37-38],并在此基础上开发了虚拟织造软件,结合神经网络与数据库技术实现了织物组织与性能的正向和逆向预测^[39-41]。

综上所述,三维机织 T 形复合材料在抗分层与抗冲击性能方面相较二维层合结构具有显著优势,因此在航空航天中承受冲击载荷的关键部件中具有广阔的应用前景。针对三维机织工形预制体的织造参数与工艺参数对复合材料抗冲击性能的影响开展系统研究,具有重要意义。本研究基于不同经纱张力与组织结构织造三维机织预制体,采用“工”形模具与真空辅助树脂传递模塑工艺制备碳

纤维复合材料,并通过摆锤冲击实验分析不同织造参数组合下的抗冲击性能差异,探讨织物结构与经纱张力对三维机织 T 形复合材料抗冲击性能的影响规律。

1 碳纤维预制体织造、复合材料成形

1.1 预制体尺寸和织造工艺

本研究所采用的 T 形预制体织造工艺来源于环形引纬织造工艺^[42]。该工艺可在保持原有织造参数与工艺流程的基础上,实现工形预制体的一次成形,并进一步制备 T 形预制体,从而有效提升织造效率。为满足复合材料摆锤冲击实验的尺寸要求,并兼顾所采用织造工艺的适配性,对工形预制体的截面及厚度尺寸进行了合理设计,其具体设计参数为

$$H_B = 2H_b = 4 \text{ mm} \quad (1)$$

$$L_h = 80 \text{ mm} \quad (2)$$

$$L_H = 100 \text{ mm} \quad (3)$$

$$L_d = 50 \text{ mm} \quad (4)$$

$$L_s = 2L_h + L_H = 260 \text{ mm} \quad (5)$$

式中: H_B 为中部梁厚度; H_b 为支板厚度; L_h 为支板幅宽; L_H 为中部梁幅宽; L_d 为预制体经纱方向长度; L_s 为预制体压扁状态下沿纬纱方向的总幅宽。工形预制体外形如图 1 所示。

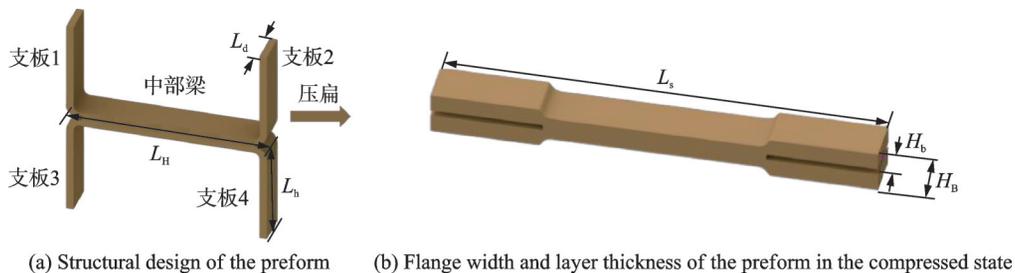


图 1 工形预制体外形设计

Fig.1 Configuration design of the I-shaped preform

在织造过程中,采用“压扁-还原”织造方法:上机织造时将两支板部分压扁,使其与梁处于同一水平面,待预制体织造完成后下机展开支板即可恢复至原始工形结构。本研究的 T 形预制体由综框织机完成织造,所使用的设备为自主研发的单综眼剑杆织机,配备 20 个综框,最大织造幅宽可达 700 mm。考虑到本研究的实验需求,设计预制体幅宽为 260 mm,可充分满足织造及成形要求。设备的经纱张力采用弹簧重力辊组合方式进行控制,如图 2 所示,经纱层通过导纱棍进入经纱张力控制机构范围,绕经重力辊后绕出导纱棍。在重力辊中,经纱张力在竖直方向上的分力与弹簧的拉力和

重力辊的重力总和大小相等,通过调整重力辊的质量和弹簧挂在弹簧挂钩的位置,可以对经纱张力进行调节,具体的计算为

$$T = \frac{F_t + F_g}{2\cos\theta} \quad (6)$$

式中: T 为经纱张力; F_t 为弹簧拉力; F_g 为重力辊重力; θ 为经纱张力与竖直方向的夹角。

在碳纤维选型方面,碳纤维束密度越大,单根纱线越粗,为降低纱线间的摩擦与磨损,需相应减小纱线密度。因此,本研究选用中复神鹰碳纤维股份有限公司生产的 SYT49S 12K 碳纤维作为增强体。织造过程中,经纱密度为 $W_a = 2.5$ 根/cm,纬

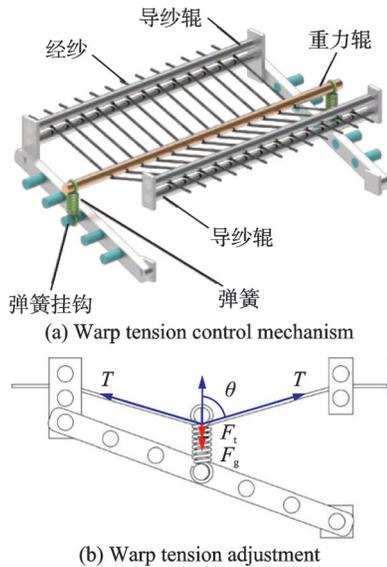


图 2 经纱张力控制方式

Fig.2 Warp tension control scheme

纱密度为 $W_e=2.5$ 根/cm。

常规三维机织织物通常通过经纱的弯曲与不同层纬纱的交织形成特定的内部结构。然而,当需要更换织造的三维结构时,此类织造方式操作较为繁琐;同时受设备条件限制,经纱层厚度往往有限,在面对异形预制体时,纬纱方向上的成形能力不足。本研究所采用的织造工艺与传统方式不同,其三维结构的形成并非依赖经纱的弯曲,而是通过纬纱的弯曲与多层经纱的交织来实现特定的空间结构。该方法采用近净成形截面织造的理念,通过不同截面的组合沿经纱方向逐步推进,实现 T 形或复杂截面构件的整体织造。该工艺的一大特点是:在无需重新穿综穿纱的条件下,能够在织物任意区域灵活调整内部三维组织结构,以满足不同区域对结构强度或弹性性能的差异化需求。此外,该方法在织造轴向长度较大的构件时具有显著优势,可有效提升织造效率并保证成形精度。

根据压扁织造工艺原理及织物尺寸设计,由于两支板的厚度为梁厚度的一半,因此在同一截面上支板区域的经纬纱数量约为梁区域的一半。在实际织造过程中,受引纬张力、引纬方式以及织物组织结构等因素影响,预制体的最终尺寸通常会与理论设计值存在一定偏差。为研究织物结构与经纱张力对复合材料抗冲击性能的耦合影响规律,本研究设计了 3 种三维织物组织:三维正交结构、浅交弯联结构和浅交弯联-衬经结构。

三维正交结构的 1 个织造周期由 4 个截面组成,包括 2 个贯穿经纱层的角联锁截面和 2 个衬经纱截面,如图 3(a) 所示;浅交弯联结构的 1 个周期由 2 个截面组成,2 个截面在经纱方向上相互交织

形成角联锁结构如图 3(b) 所示;浅交弯联-衬经结构由 4 个截面组成,分别在浅交弯联结构的 2 个截面后各插入 1 个衬经纱截面,如图 3(c) 所示。在本研究中,位于角联锁截面内的纬纱称为角联锁纱,位于衬经纱截面内的纬纱称为衬经纱。3 种结构在穿透经纱层数上或有无衬经纱上有所差别:在三维正交结构的角联锁截面中,纬纱通过贯穿所有经纱层将该区域中的经纱捆绑集中在一起,在 1 个截面中只需要 1 根纬纱即可完成所有经纱层的捆绑集中,这种贯穿所有经纱层的纬纱具有最大的屈曲程度,捆绑集中经纱的效果也最明显;在带衬经纱的浅交弯联结构的角联锁截面中,纬纱只贯穿 2 层经纱,在 1 个截面中需要多根纬纱对经纱层进行两两交织,直到完成所有经纱层的捆绑集中,这种穿层方式的纬纱具有较小的屈曲程度,捆绑集中经纱的效果与三维正交结构的相比较弱;在浅交弯联结构中,与前两种结构相比,少了衬经纱截面,保持了角联锁截面的连续性,但是减弱了对同一层经纱的支撑效果。这 3 种内部组织结构集中了目前常用的织物结构特征,可以满足探究组织结构对织物的影响需求。

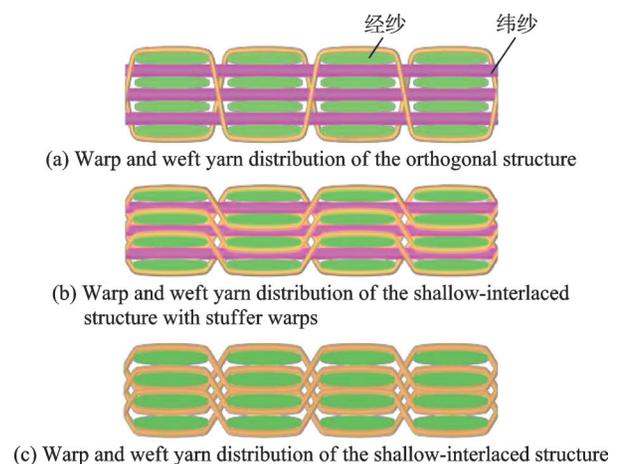


图 3 3 种不同结构的经纬纱分布特征

Fig.3 Warp and weft yarn distribution characteristics of three structures

在经纱张力方面,传统织造方式认为过小的经纱张力会使纱线之间的角联锁结构过于松散,而过大的张力则可能在织造过程中造成纱线磨损,使纱线损伤对复合材料性能的不利影响超过张力调控带来的影响效果。综合考虑织造设备的张力选择限制与织造的稳定性,本研究选取 0.6、1.1 和 1.6 N 这 3 种经纱张力条件进行织造实验。

具体的织物组织示意图如图 4 所示。本研究中工字梁的成形是通过纬纱的空间轨迹来约束经纱在预制体截面上的分布实现的。纬纱的空间轨

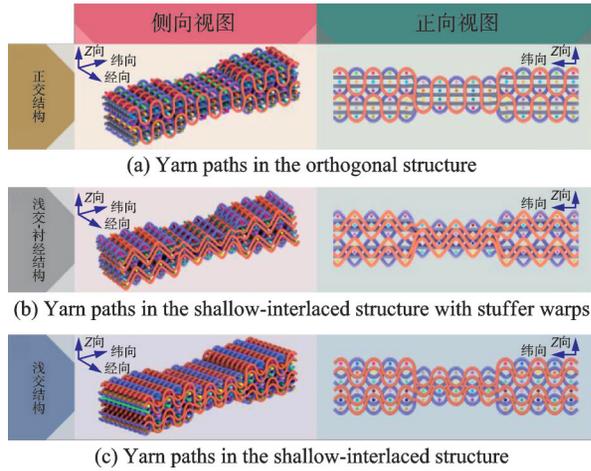


图4 正交结构、浅交弯联结构和带衬经纱的浅交弯联结构纱线排布

Fig.4 Yarn arrangements of the orthogonal structure, the shallow-interlaced structure, and the shallow-interlaced structure with stuffer warps

迹主要分为2种:(1)纬纱从左上支板经过中间梁后到达右上支板;(2)纬纱从左下支板经过中间梁后到达右下支板。通过这两种不同的纬纱运动路径,可以将原本在空间中均匀排列的经纱重新分配至左上支板、右上支板、中间梁、左下支板和右下支板5个主要区域,从而形成具有明显梁-肋板特征的工字梁结构。沿单根纬纱的空间运动轨迹观察可知,在引纬过程中3种织物组织的同一层经纱存在两种典型运动模式:(1)该层经纱整体同时上提或下降;(2)该层经纱中部分上提、部分下降,上下交替排列,并以两根经纱为一个循环周期。前一种运动形式下,同层经纱的运动自由度为1;而后一种形式中,经纱的运动自由度可达1或2。为了满足第2种情况中同一层经纱运动自由度为2的较高维运动,将同一层经纱的自由度设置为2,即采用两个不同的综框分别控制同层经纱的运动。在工字梁预制体中,纬纱需要从上下支板向中间梁处汇聚,因此在引入上支板纬纱时,可通过均匀分布的经纱提综实现织造;而在引入下支板纬纱时,需先将上支板区域的经纱全部提起,再依据均匀经纱的方式对下支板及梁区域进行提综。基于此分析,本研究将综框功能区分为支板综框与梁综框,其中支板综框用于成形两侧支板,仅穿两侧综眼;梁综框用于成形中间梁,仅穿中部综眼。结合上述经纱运动规律,在同一综框中采用间隔综眼穿纱的方式进行布置,以满足多区域结构协同成形的需要,如图5(a)所示。在综框数量的配置上,为实现设计厚度 B ,支板部分采用3层经纱织造,梁部分采用4

层经纱织造。根据前文分析,每层经纱中包含两种运动规律不同的纱线,且只有具有相同运动规律的纱线才能被穿入同一个综框加以控制。因此,支板部分所需综框数为 N_1 ,梁部分所需综框数为 N_2 ,预制体总体所需综框数为 N_3 ,其计算方式为

$$N_1 = n_1 \times r \quad (7)$$

$$N_2 = n_2 \times r \quad (8)$$

$$N_3 = 2N_1 + N_2 \quad (9)$$

式中: n_1 为支板经纱层数; n_2 为梁经纱层数; r 为经纱运动的最大自由度。本研究所需的经纱数量可以根据预制体截面尺寸进行计算,各部分所需经纱数量为

$$R_1 = R_2 = \frac{H}{2} \times W_a \times n_1 \times 2 = 120 \quad (10)$$

$$R_3 = L \times W_a \times n_2 = 100 \quad (11)$$

$$R_s = R_1 + R_2 + R_3 = 340 \quad (12)$$

式中: R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_s 分别代表了上支板、下支板、梁和预制体所需要的经纱数量。上机织造时采用图5(b,c,d)的纹板图,将所有9种类型的织物织造完成后再进行整体下机,如图5(e)所示。

1.2 复合材料成形

本实验采用无模具的真空辅助树脂传递模塑工艺,基体材料选用惠柏新材生产的AM-8927 A/B型低黏度耐高温环氧树脂。实验过程中,以透明玻璃板作为底部支撑,以便实时观察树脂的渗透方向。将预制体置于玻璃板中央,并通过梁固定块与支板固定块对其进行定位和压紧。在真空状态下,预制体受到来自5个方向的恒定且均匀的压实力,从而在树脂固化过程中能够保持稳定的工字形结构。进胶管设置在预制体的最底端,出胶管连接单向止流阀。树脂自下而上开始浸润预制体,直至上端空气被完全排出。当观察到整个真空袋内树脂分布均匀且出胶管中不再有气泡逸出时,停止树脂吸入。随后将玻璃板整体置入烘箱中进行固化处理,固化工艺为:50℃保温7h,随后升温至100℃保温3h。固化完成后取出玻璃板,脱模获得工字形碳纤维复合材料构件。之后对工形构件进行切割加工,制备出T形试样,共获得27个样件,如图6所示。由于冲击实验主要作用于复合材料的肋板区域,因此对所有样品进行了编号并测量肋板厚度。其中,编号前一个数字代表结构参数,从1至3分别代表正交结构、浅交结构以及浅交+衬经结构,后一个数字代表经纱张力,从1至3分别代表0.6、1.1以及1.6N,具体见表1。

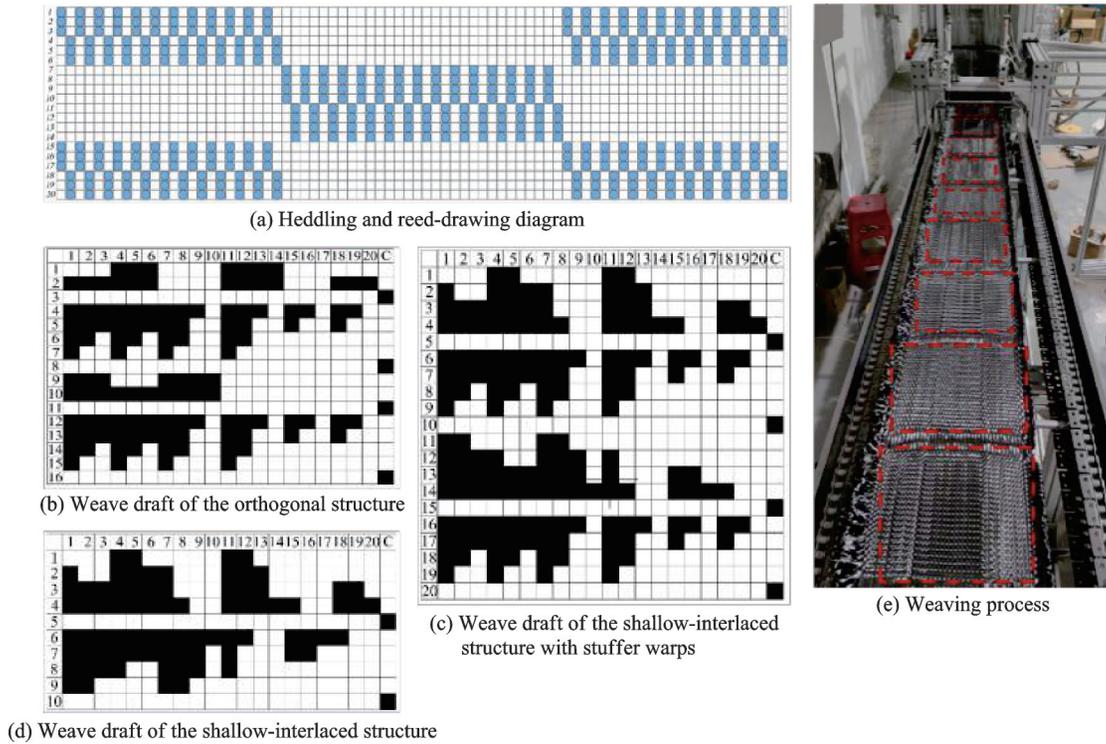


图 5 I 形预制体织造工艺流程

Fig.5 Weaving process of the I-shaped preform

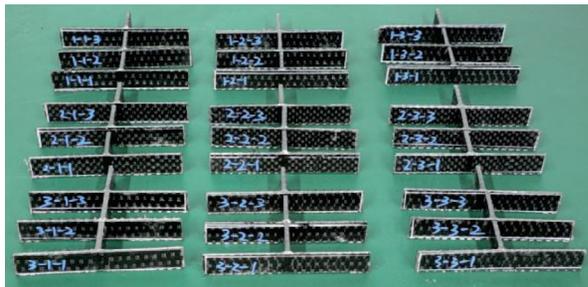


图 6 切割后的 T 形构件

Fig.6 T-shaped components after cut

表 1 复合材料肋板厚度参数

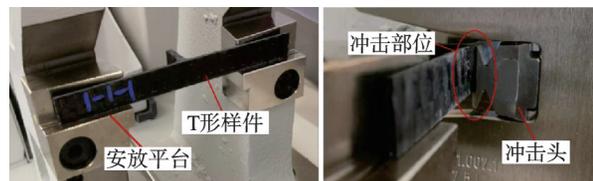
Table 1 Thickness parameters of the composite rib

预制体编号	结构参数	张力参数/N	复合材料肋板平均厚度/mm
1-1	正交	0.6	1.68
1-2	正交	1.1	1.71
1-3	正交	1.6	1.76
2-1	浅交	0.6	1.99
2-2	浅交	1.1	2.00
2-3	浅交	1.6	2.04
3-1	浅交+衬经	0.6	1.78
3-2	浅交+衬经	1.1	1.82
3-3	浅交+衬经	1.6	1.91

1.3 T 形构件冲击实验方法

为研究在支板与梁连续成形的 T 形复合材料构件中,不同机织参数组合对连接区域抗冲击性能的影响,本研究开展了摆锤冲击实验。该实验旨在

简化并模拟 T 形构件在实际服役过程中受到沿梁方向外物冲击时的能量传递与破坏特征。实验依据 ISO 179 标准进行,使用 INSTRON CEAST 9050 型摆锤冲击试验机,实验温度控制在 23 °C,跨距设定为 62 mm。对 9 组不同机织参数组合的 T 形样件进行了低速冲击测试,其定位方式如图 7(a) 所示。由于样件带有梁结构,放置在实验平台上时存在一定的不稳定性,为确保样件在受冲击前保持固定位置,在样件与设备接触面之间涂覆少量胶粘剂进行临时定位。在正式实验前,进行了 2 组预实验,冲击能量分别为 5 J 和 10 J。结果表明,5 J 能量不足以引发明显断裂,仅产生轻微损伤;而 10 J 能量过高,冲击速度过快,导致实验数据记录不完整。综合考虑后,正式实验统一采用 7.5 J 的冲击能量,通过调整摆锤质量与下落高度进行控制。每种类型的样件重复实验 3 次,以确保结果的可靠性。通过分析相同冲击能量下不同组织结构 and 经



(a) Specimen positioning (b) Impact configuration

图 7 摆锤冲击样件固定位置及冲击部位

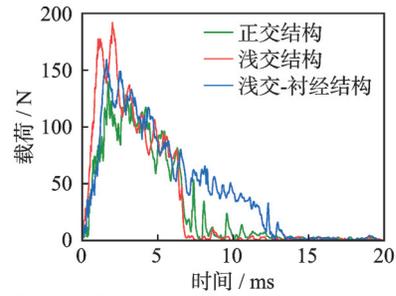
Fig.7 Specimen fixing position and impact location in the pendulum impact test

纱张力条件下的构件损伤形态、载荷响应及能量吸收差异,系统揭示机织参数对 T 形复合材料抗冲击性能的影响规律。冲击方向示意图 7(b)。

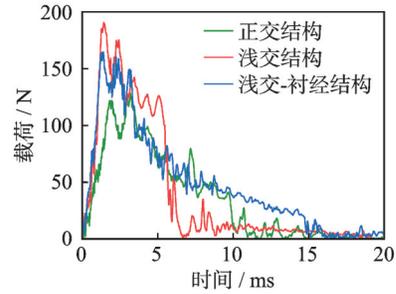
2 实验结果与讨论

2.1 冲击载荷-时间曲线

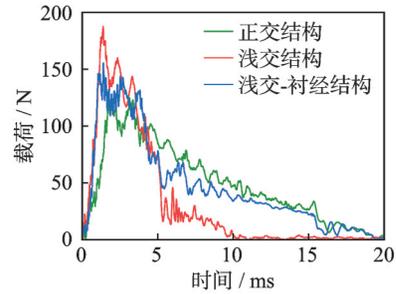
对 9 种类型的 T 形复合材料样件进行了夏比摆锤冲击实验,获得其载荷-时间曲线,并按照相同经纱张力进行分类分析,如图 8 所示。整体来看,在 3 种经纱张力条件下,正交结构的载荷上升速率最慢,浅交结构的载荷上升速率最快,而浅交-衬经结构的载荷上升速率则随经纱张力的增大而逐渐加快。由图 8(a)可见,1-1 与 2-1 组样件在达到冲击载荷峰值后均出现一段载荷缓慢卸载阶段,随后载荷迅速下降至接近 0;而 3-1 样件在达到峰值后未出现明显的载荷骤降,直至约 14 ms 时载荷才降至 0 附近。实验结果表明,1-1 与 3-1 样件在冲击初期表现出更优的弹性变形能力,而 2-1 样件则具有更好的结构稳定性,能够承受更高的冲击载荷峰值。由图 8(b)可见,3-2 与 2-2 样件在载荷上升阶段的加载速率基本一致,而 1-2 样件依然保持较低的加载速率。在卸载阶段,2-2 样件首先出现明显的载荷骤降;1-2 样件经历了平缓卸载后出现小幅下降;3-2 样件在峰值后则先经历小幅骤降,再进入较长的平缓卸载阶段。由此可见,经纱张力的增大会削弱浅交-衬经结构的弹性变形能力,同时延缓正交结构的完全失效时间。由图 8(c)可观察到,2-3 与 3-3 样件在达到峰值后均出现显著的载荷骤降,随后进入平缓卸载阶段,其中 2-3 样件的骤降幅度更大;而 1-3 样件在峰值后则表现为平缓卸载直至完全失效。实验结果表明,随着经纱张力的增加,3 种织物结构的样件均呈现出延迟完全失效的趋势。峰值载荷是复合材料抗冲击性能的重要指标,与材料的初始刚度有关^[43]。对同一类型样件的 3 次独立冲击载荷峰值进行处理,得到 9 种类型样件的冲击载荷峰值均值和标准差,并将其列于表 2。从表中可以观察到随着经纱张力的增大,同种结构的冲击载荷峰值整体呈下降趋势。在相同经纱张力下,浅交结构的冲击载荷峰值始终高于正交结构与浅交-衬经结构。以浅交结构为基准,当经纱张力为 0.6 N 时,正交结构与浅交-衬经结构的冲击载荷峰值分别下降约 37% 和 20%;当经纱张力提高至 1.1 N 时,对应下降幅度分别为约 48% 和 18%;在 1.6 N 条件下,下降幅度进一步达到约 49% 和 21%。



(a) Load-time curves of three structures under 0.6 N



(b) Load-time curves of three structures under 1.1 N



(c) Load-time curves of three structures under 1.6 N

图 8 不同类型样件的载荷-时间曲线

Fig.8 Load-time curves of different types of specimens

表 2 不同类型样件的冲击峰值

Table 2 Impact peak loads of different types of specimens

经纱 张力/N	正交结构		浅交结构		浅交-衬经结构	
	冲击 载荷/N	标准 差	冲击 载荷/N	标准 差	冲击 载荷/N	标准 差
0.6	139.59	3.77	191.77	6.09	159.19	9.00
1.1	128.68	4.62	190.46	5.81	161.82	2.28
1.6	126.28	4.11	187.72	7.56	155.52	7.78

由第 1.1 节的织物设计可知,正交结构由 4 个织造截面循环组成,角联锁截面与衬经纱截面相互交替分布,其中角联锁纱跨越 3 层经纱,仅有 1 根;浅交结构由 2 个织造截面循环组成,仅包含角联锁截面,角联锁纱跨越 2 层经纱,共有 2 根;浅交-衬经结构同样由 4 个织造截面循环组成,角联锁截面与衬经纱截面相邻,角联锁纱跨越 2 层经纱,数量为 2 根。在相同经纱张力条件下,浅交结构相较于正交结构和浅交-衬经结构不含衬经截面,角联锁截面连续排列,使纬纱与经纱之间的交织更加紧密,整体结构更为稳固。在受到冲击载荷时,紧密的结构不易将载荷沿纱线间隙传递与扩散,因此浅交结

构表现出较弱的弹性形变能力和较快的载荷卸载速率。正交结构的角联锁纱相比于浅交结构和浅交-衬经结构少 1 根,因此在冲击中表现出较低的冲击载荷峰值。经纬纱张力与经纬纱形态息息相关,且经纬纱之间的摩擦与经纱张力有强关联^[44]。本研究进行引纬时,采用固定的纬纱张力,在纬纱张力一致下,跨越经纱层数多的纬纱将会受到更多经纱的挤压,经纬纱之间的约束力就会随之增大。浅交-衬经结构的角联锁纱跨越层数相较于正交结构的跨越层数较少,因此经纬纱交织点结构相对疏松,经纬纱在交织点的摩擦力相对较小,在受冲击时载荷更容易沿着纱线传递,经纬纱交织点应力集中现象相较于正交结构较小,从而延缓完全失效时间。经纱张力对织物内部纱线屈曲状态亦有显著影响:在低张力条件下,经纱维形能力较弱,当角联锁纱跨越经纱时,经纱发生较大形变,导致角联锁纱的屈曲程度较小、角联锁纱与边界层经纱之间摩擦较小;而在高张力条件下,经纱维形能力增强,角联锁纱跨越经纱时引起的经纱形变减小,角联锁纱屈曲程度增大,角联锁纱与边界层经纱之间摩擦增大。图 9 为 3 种经纱张力下的角联锁纱形态。图 9 中标绿的线为纬纱,可以看到 0.6 N 经纱张力下纬纱绕过经纱后呈现 136° 和 140° 的转角;1.1 N 经纱张力下纬纱绕过经纱后呈现 131° 和 127° 的转角;1.6 N 经纱张力下纬纱绕过经纱后呈现 121° 和 120° 的转角。转角越大说明纬纱越平直,可以观察到随着经纱张力的提升,角联锁纱的屈曲程度呈上升趋势,屈曲程度较大的纱线在冲击载荷作用下更易发

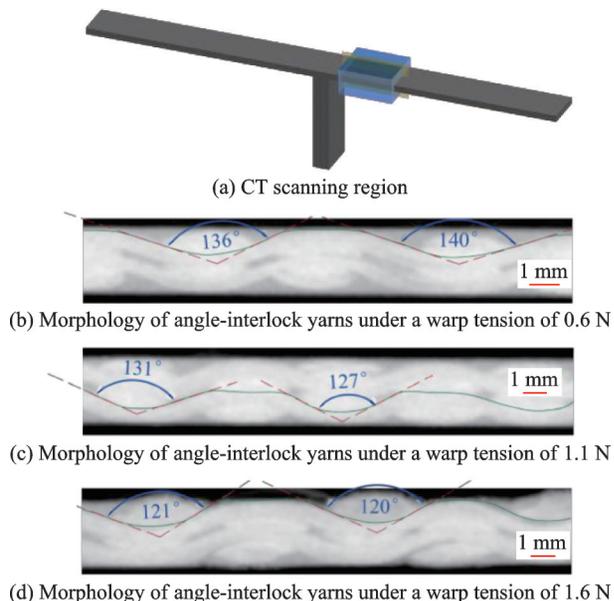


图 9 不同经纱张力下的角联锁纱形态

Fig.9 Morphologies of angle-interlock yarns under different warp tensions

生断裂,因此整体上表现出经纱张力增大导致冲击载荷峰值逐渐下降的规律。

2.2 吸收能量-时间曲线

本研究采用的试验台可以输出冲击过程中样件的位移,结合上冲击过程中的载荷,采用离散法计算样件吸收的能量为

$$E_a = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{F_i + F_{i+1}}{2} (x_{i+1} - x_i) \quad (13)$$

式中: E_a 为吸收的能量; F_i 为*i*时刻的冲击载荷; F_{i+1} 为*i+1*时刻的冲击载荷; x_{i+1} 为*i+1*时刻的位移; x_i 为*i*时刻的位移。

对 9 种类型样件的能量吸收曲线按照相同经纱张力进行了分类整理。如图 10(a)所示,在冲击初期,2-1 的能量吸收速率明显快于 1-1 和 3-1,表明该结构在冲击初期更易发生损伤,从而使结构迅速进入非弹性变形阶段。随着冲击过程的推进,2-1 的能量吸收曲线较早进入平台阶段,说明其损伤以早期纤维断裂为主,后续渐进性损伤机制发展受限,从而导致其总吸收能量较低,呈现出一定的脆性失效特征。3-1 的能量吸收过程更为平缓,其主要能量耗散集中在冲击中后期,对应于分层扩展及纤维断裂等渐进性损伤机制的持续发展。实验结果表明,2-1 具有较高的刚度,但表现出一定的脆性,吸收总能量较低;而在经纱张力为 0.6 N 的条件下,3-1 样件表现出最优的冲击韧性。从图 10(b)中可见,随着经纱张力的增加,3-2 在冲击初期的能量吸收速率与 2-2 基本一致,但在整个加载过程中始终保持较高的能量吸收水平,说明该结构在冲击过程中不仅发生了初期的基体与界面损伤,同时伴随分层、纤维断裂及纤维拔出等多种损伤机制的协同演化,使能量能够在较长时间尺度内持续被耗散,同时也表明提高经纱张力有助于增强碳纤维复合材料的整体刚度。从图 10(c)中可观察到,当经纱张力由 1.1 N 增加至 1.6 N 时,1-3 的总能量吸收显著提升,但其在冲击初期的能量吸收速率仍然偏低;同时,2-3 和 3-3 样件保持较快的能量吸收速率。实验结果表明,正交结构对经纱张力变化较为敏感。当经纱张力由 0.6 N 增加至 1.6 N 即提升约 67% 时,其最大吸收能量提高约 52%。相比之下,浅交结构对经纱张力变化不敏感,在经纱张力增加至 1.6 N 时,其最大吸收能量反而呈现一定程度的下降,表明该结构的吸能机制受经纱张力调控作用有限。

碳纤维复合材料在受到冲击载荷时,其吸收的能量主要通过弹性变形、非弹性变形、基体开裂、纤

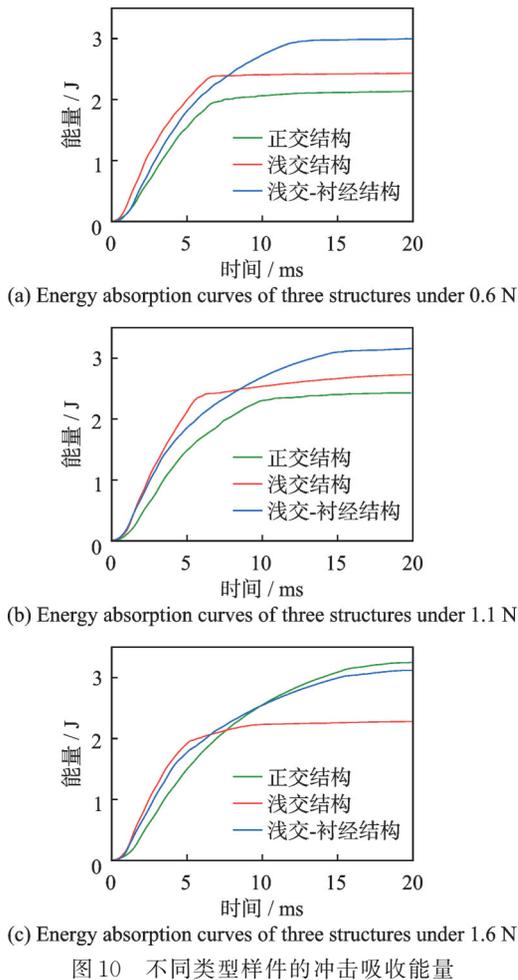


图 10 不同类型样件的冲击吸收能量

Fig.10 Impact energy absorption of different types of specimens

维断裂、纤维拔出以及分层等多种机制进行耗散。在相同经纱张力条件下,浅交结构相较于正交结构和浅交-衬经结构具有更紧密的组织,使得复合材料更快进入非弹性变形阶段,能量吸收速率更高。同时,由于纤维之间的交织更加紧密,其能量主要以纤维断裂的形式被消耗,其他机制所占比例较低。正交结构由于角联锁纱数量少于其他两种结构,在低经纱张力下整体能量吸收较弱。浅交-衬经结构兼具浅交结构的角联锁截面和衬经纱截面,其中角联锁截面提高了组织紧密度,而衬经纱截面因纱线相对笔直,具备更好的能量传递与吸收能力,因此在各经纱张力条件下均表现出较高的能量吸收效率。对于正交结构而言,随着经纱张力的增大,角联锁纱屈曲程度加剧,其对中间层经纱的约束作用减弱,导致中间层经纬纱之间的摩擦减少、结构趋于松散。此时,能量不仅通过纤维断裂消耗,还可通过分层等形式进一步耗散,多种吸能机制协同作用,使正交结构在高经纱张力下表现出更优的能量吸收效果。

2.3 损伤形式

复合材料受到冲击时表面会出现基体压溃、凹痕等不可逆变形,背面出现纤维失效、长裂痕等^[45]。对 9 种 T 形样件在夏比摆锤冲击后的损伤形貌进行分析,如图 11 所示,1-1 样件的支板与梁均发生完全断裂,而 1-2 和 1-3 的支板与梁均未完全断裂。1-1 和 1-2 在冲击面与背面均可观察到明显的基体开裂现象(图 11(a,b))。进一步观察可发现 1-2 的冲击背面存在纤维拔出的趋势(图 11(b))。相比之下,1-3 的冲击面未见显著基体开裂(图 11(c)),但从侧面观察,1-1 和 1-2 的梁部未出现明显分层(图 11(a,b)),而 1-3 的梁部则表现出明显的分层特征(图 11(c))。

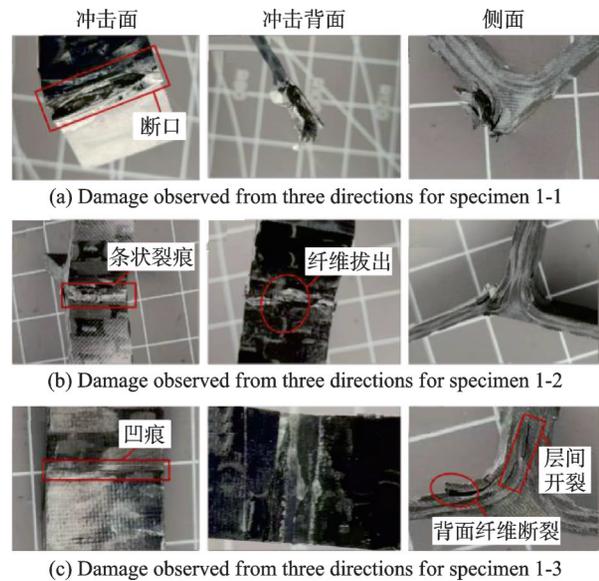


图 11 正交结构不同张力下的冲击损伤

Fig.11 Impact damages of the orthogonal structure under different warp tensions

从图 12 中可以看出,所有浅交结构样件的支板与梁均发生完全断裂,这类损伤形式通常在冲击载荷达到峰值后迅速形成,并会导致结构局部刚度和承载能力的突降,从而在载荷-时间曲线中表现为明显的载荷骤降现象^[46-47],这与 2.1 节中浅交结构的曲线趋势保持了一致性。与此同时还伴随明显的基体开裂和纤维断裂现象,部分断裂区域还可观察到纤维拔出(图 12(b,c))。

如图 13 所示,浅交-衬经系列样件在冲击后均未出现完全断裂,其冲击正面呈现条状裂纹(图 13(a,b,c)的左侧图),冲击背面出现显著的纤维断裂,并伴随局部纤维拔出迹象(图 13(a,b,c)的中间图)。从侧面观察可见,样件存在明显的分层现象,且随着经纱张力的增大,分层程度愈加明显(图 13(a,b,c)的右侧图)。

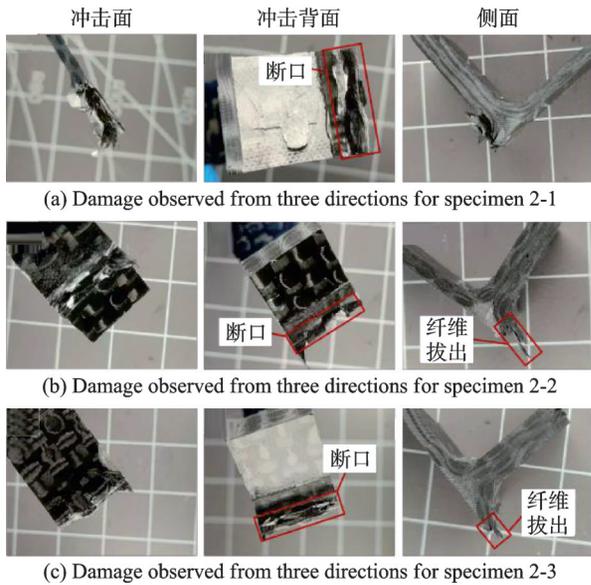


图 12 浅交结构不同张力下的冲击损伤
Fig.12 Impact damages of the shallow-interlaced structure under different warp tensions

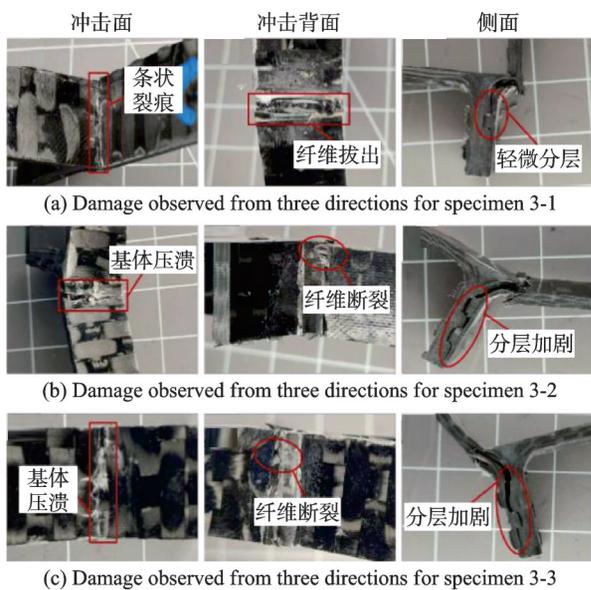


图 13 浅交-衬经结构不同张力下的冲击损伤
Fig.13 Impact damages of the shallow-interlaced structure with stuffer warps under different warp tensions

在低经纱张力下,正交结构中的角联锁纱屈曲程度较小;随着经纱张力的增大,角联锁纱屈曲程度加大,对中间层纱线的约束力随之减弱,结构趋于松散。在结构较为紧密的 1-1 样件中,失效首先发生在支板与梁的转折处,由于经纬纱交织紧密、力传递范围较小,纱线在转折处发生完全断裂;而在结构较松散的 1-2 与 1-3 中,层间结合性能减弱,冲击能量通过纤维拔出与分层形式耗散的比例增加。浅交结构的织造截面仅由角联锁截面组成,结构稳定且力传递范围更小,由于角联锁纱跨经纱层数较少,经纱张力对其影响有限,因此 3 种经纱张力下的浅交结构样件均表现出支板与梁的完全断

裂。浅交-衬经结构由于引入衬经纱截面,使整体结构相较浅交结构更为松散;同时,其角联锁纱跨经纱层数小于正交结构,而在织造过程中植入的角联锁纱长度相同,跨层数越多的角联锁纱对经纱层的约束力越强。因此,浅交-衬经结构由于约束力较弱,在低经纱张力下即出现分层现象,且随着经纱张力的进一步增大,角联锁纱的约束能力持续下降,分层现象愈发显著。

3 结 论

本文开发了一种基于三维织机的一次穿纱多组织结构 T 形碳纤维预制体织造方法,通过纬纱弯曲实现角联锁结构的形成,并采用非模具真空辅助树脂传递成形工艺制备复合材料。针对 9 种不同机织参数组合的 T 形碳纤维复合材料构件,开展了摆锤冲击实验,对比分析了其冲击载荷响应特性与能量吸收行为。研究得出以下结论:

(1)在三维织机上,通过纬纱弯曲形成角联锁结构是可行的。结合特定的穿纱与提综方式,可以实现一次穿纱条件下的多组织结构织造,为复杂形状预制体的高效一体化成形提供了新思路。

(2)在相同经纱张力下,浅交结构表现出最高的冲击载荷峰值,正交结构表现出最低的冲击载荷峰值。在经纱张力为 0.6 N 时,浅交结构的冲击载荷峰值相比正交结构提升约 37%,相比浅交-衬经结构提升约 20%;在 1.1 N 时,分别提升约 48% 和 18%;在 1.6 N 时,分别提升约 49% 和 21%。

(3)在能量吸收方面,浅交-衬经结构展现出较高的冲击韧性与吸能能力。正交结构对经纱张力变化较为敏感,经纱张力提升 67% 时,其能量吸收提高约 52%;而浅交结构对经纱张力变化不敏感,当经纱张力增加至 1.6 N 时,能量吸收反而呈下降趋势。

(4)综合冲击载荷峰值与能量吸收特性分析,支撑件、抗冲击刚性骨架等需要提高冲击瞬时承载能力、限制初期变形的部位,浅交结构更有利;缓冲层、防护层等以能量耗散与抗冲击韧性为主要设计目标的吸能型构件,浅交-衬经结构更有利。

参考文献:

[1] MCILHAGGER A, ARCHER E, MCILHAGGER R. Manufacturing processes for composite materials and components for aerospace applications[M]. Cambridge, UK: Polymer Composites in the Aerospace Industry, 2020: 59-81.
[2] RUBINO F, NISTICÒ A, TUCCI F, et al. Marine

- application of fiber reinforced composites: A review [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(1): mse8010026.
- [3] ULBRICHT A, ZEIDLER F, BILKENROTH F, et al. Structural lightweight components for energy-efficient rail vehicles using high performance composite materials[J]. *Transportation Research Procedia*, 2023, 72: 1685-1692.
- [4] 张昊, 孙宏杰, 孙建波, 等. 复合材料风扇机匣包容性相关研究进展[J]. *复合材料科学与工程*, 2022(7): 115-120.
- ZHANG Hao, SUN Hongjie, SUN Jianbo, et al. Research progress on the tolerance of composite containment fan case[J]. *Composites Science and Engineering*, 2022(7): 115-120.
- [5] 纪双英, 王晋, 邢军, 等. 国外航空发动机风扇包容机匣研究进展[J]. *航空制造技术*, 2010, 53(14): 44-48.
- JI Shuangying, WANG Jin, XING Jun, et al. Research development of containment casing of aeroengine fan abroad[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2010, 53(14): 44-48.
- [6] 李杰, 巨亚斌. LEAP-X 发动机和 Tech-X 发动机先进技术分析[J]. *航空制造技术*, 2013, 56(10): 56-59.
- LI Jie, JU Yabin. Advanced technology analysis of LEAP-X engine and tech-X engine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2013, 56(10): 56-59.
- [7] ALY-HASSAN M S, HATTA H, WAKAYAMA S, et al. Comparison of 2D and 3D carbon/carbon composites with respect to damage and fracture resistance[J]. *Carbon*, 2003, 41(5): 1069-1078.
- [8] PANKOW M, JUSTUSSON B, RIOSBAAS M, et al. Effect of fiber architecture on tensile fracture of 3D woven textile composites[J]. *Composite Structures*, 2019, 225: 111139.
- [9] 孙洋, 黄建, 韩晨晨, 等. 二维与三维机织复合材料面内力学性能对比[J]. *航空学报*, 2023, 44(18): 303-314.
- SUN Yang, HUANG Jian, HAN Chenchen, et al. Comparison of in-plane mechanical properties of 2D and 3D woven composites[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(18): 303-314.
- [10] 单忠德, 周征西, 孙正, 等. 航空航天先进复合材料三维预制体成形技术与装备研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(20): 64-79.
- SHAN Zhongde, ZHOU Zhengxi, SUN Zheng, et al. Research of 3D advanced aerospace composite preforms forming technology and equipment[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(20): 64-79.
- [11] GRIES T, BETTERMANN I, BLAUROCK C, et al. Aachen technology overview of 3D textile materials and recent innovation and applications[J]. *Applied Composite Materials*, 2022, 29(1): 43-64.
- [12] YANG H J, KIM D, KANG K M, et al. Manufacturing seamless three-dimensional woven preforms with complex shapes based on a new weaving technology [J]. *Heliyon*, 2024, 10(1): e24121.
- [13] 蔡宣明, 潘成龙, 郭安肖, 等. 高速冲击加载下碳纤维复合材料层合结构抗侵彻特性及响应机理[J]. *振动与冲击*, 2024, 43(12): 88-96, 165.
- CAI Xuanming, PAN Chenglong, GUO Anxiao, et al. Anti-penetration characteristics and response mechanism of carbon fiber reinforced plastic laminated structures under high-impact loading[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2024, 43(12): 88-96, 165.
- [14] 盛鸣剑, 陈普会. 复合材料低速冲击损伤面积神经网络估算方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2018, 50(1): 30-35.
- SHENG Mingjian, CHEN Puhui. Estimation method for damage area after low-velocity impact of composite material based on neural network[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2018, 50(1): 30-35.
- [15] PATEL S, VUSA V R, SOARES C G. Crashworthiness analysis of polymer composites under axial and oblique impact loading[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 156: 221-234.
- [16] 何帅. 二维机织复合材料拉伸和弹道冲击损伤与失效研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- HE Shuai. Research on tensile and ballistic impact damage and failure of 2D woven composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [17] STEPHEN C, SHIVAMURTHY B, MOURAD A I, et al. Experimental and finite element study on high-velocity impact resistance and energy absorption of hybrid and non-hybrid fabric reinforced polymer composites[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 18: 5406-5418.
- [18] WAGNER T, HEIMBS S, FRANKE F, et al. Experimental and numerical assessment of aerospace grade composites based on high-velocity impact experiments[J]. *Composite Structures*, 2018, 204: 142-152.
- [19] 杨发建, 朱书华, 胡元杰, 等. 复合材料 T 型缘条边缘冲击试验与数值仿真分析[J]. *航空精密制造技术*, 2024, 60(6): 13-16, 21.
- YANG Fajian, ZHU Shuhua, HU Yuanjie, et al. Impact test and numerical simulation analysis of T-type edge strips in composite materials[J]. *Aviation Preci-*

- sion Manufacturing Technology, 2024, 60(6): 13-16, 21.
- [20] 陈方, 姚卫星, 吴富强. 复合材料 T 型加筋低速边缘冲击及剩余压缩强度的数值仿真分析[J]. 材料导报, 2020, 34(20): 20130-20136.
- CHEN Fang, YAO Weixing, WU Fuqiang. A progressive damage simulation method for the low velocity edge-impact damage and residual compression strength of composite T-stiffeners[J]. Materials Review, 2020, 34(20): 20130-20136.
- [21] 王维韩, 侯玉亮, 赵巧莉, 等. 平纹编织复合材料加筋壁板低速冲击及冲击后压缩性能多尺度分析[J]. 振动与冲击, 2024, 43(12): 109-117, 202.
- WANG Weihang, HOU Yuliang, ZHAO Qiaoli, et al. Multiscale modeling of the low-velocity impact and compression after impact behaviors of rib-stiffened plain woven composites[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(12): 109-117, 202.
- [22] REN C L, SIDDIQUE A, SUN B Z, et al. Differences of transverse impact damages in 3D angle-interlock woven composites between warp and weft directions [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2019, 28(8): 1203-1227.
- [23] WEI Q S, YANG D, GU B H, et al. Numerical and experimental investigation on 3D angle interlock woven fabric under ballistic impact[J]. Composite Structures, 2021, 266: 113778.
- [24] JING K K, ZHOU H, WANG H, et al. Multiscale damage and low-velocity impact study of three-dimensional woven composites[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 202: 112132.
- [25] HAO A Y, SUN B Z, QIU Y P, et al. Dynamic properties of 3-D orthogonal woven composite T-beam under transverse impact[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39(7): 1073-1082.
- [26] WANG L, SUN B Z, GU B H. Mode-I fracture crack growth behaviors of 3-D angle interlock woven composites under low-velocity wedge-loaded impact [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2021, 242: 107468.
- [27] FANG J, SUN B Z, GU B H. Mode-I fracture failure mechanism of 3-D braided composites under low-velocity wedge-loaded impact[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 310: 110533.
- [28] SIDDIQUE A, SUN B Z, GU B H. Effect of pre-crack length on Mode I fracture toughness of 3-D angle-interlock woven composites from finite element analyses[J]. The Journal of the Textile Institute, 2019, 110(10): 1445-1458.
- [29] 魏小玲. T 字型三维机织物结构设计优化及机械性能分析[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2022.
- WEI Xiaoling. Structural design optimization and mechanical property analysis of T-shaped three-dimensional woven fabric[D]. Wuhan: Wuhan Textile University, 2022.
- [30] ZHOU Z X, SUN Z, SHAN Z D, et al. Advanced composite preform forming technology for structures and its digitization: A review[J]. Thin-Walled Structures, 2025, 211: 113053.
- [31] ABTEW M A. 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.
- [32] LAUNAY J, HIVET G, DUONG A V, et al. Experimental analysis of the influence of tensions on in plane shear behaviour of woven composite reinforcements[J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(2): 506-515.
- [33] 陆慧中, 周海丽, 李超, 等. 经纱织造张力对碳纤维增强三维机织复合材料力学性能的影响研究[J]. 纺织导报, 2023(3): 76-78.
- LU Huizhong, ZHOU Haili, LI Chao, et al. Effect of warp tension on mechanical properties of carbon fiber reinforced three-dimensional woven composite[J]. China Textile Leader, 2023(3): 76-78.
- [34] MEBRATE M, GESSESSE N, ZINABU N. Effect of loom tension on mechanical properties of plain woven cotton fabric[J]. Journal of Natural Fibers, 2022, 19(4): 1443-1448.
- [35] LI M R, WANG P, BOUSSU F, et al. Investigation of the strength loss of HMWPE yarns during manufacturing process of 3D warp interlock fabrics[J]. Applied Composite Materials, 2022, 29(1): 357-371.
- [36] ZHOU G W, SUN Q P, MENG Z X, et al. Experimental investigation on the effects of fabric architectures on mechanical and damage behaviors of carbon/epoxy woven composites[J]. Composite Structures, 2021, 257: 113366.
- [37] ANSAR M, WANG X W, ZHOU C W. Modeling strategies of 3D woven composites: A review[J]. Composite Structures, 2011, 93(8): 1947-1963.
- [38] YANG Z, JIAO Y N, XIE J B, et al. Modeling of 3D woven fibre structures by numerical simulation of the weaving process[J]. Composites Science and Technology, 2021, 206: 108679.
- [39] LEAF J, WU R D, SCHWEICKART E, et al. Interactive design of periodic yarn-level cloth patterns[J]. ACM Transactions on Graphics, 2018, 37(6): 1-15.
- [40] ZHANG W J, LI Y D, KONG W Y, et al. Assess-

- ment of 3D woven near-net-shaped I-sections for aeronautical applications: Weave design, manufacture, and mechanical properties under multiple loading conditions[J]. *Polymer Composites*, 2024, 45(16): 14845-14860.
- [41] BROWN L P, ENDRUWEIT A, LONG A, et al. Characterisation and modelling of complex textile geometries using Te_xGen[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, 406(1): 012024.
- [42] YUAN Z C, SHAN Z D, LEI L M, et al. A study on the effects of annular weft insertion paths and tensions on the impact property at the joints of 3D woven composites with closed sections[J]. *Polymer Composites*, 2025. DOI:10.1002/pc.70389.
- [43] 陈然, 张迪, 蔡登安. 碳/芳纶混杂复合材料蜂窝夹芯板低速冲击及冲击后压缩实验研究[J]. *南京航空航天大学学报(自然科学版)*, 2025, 57(1): 109-119. CHEN Ran, ZHANG Di, CAI Dengan. Experimental study on low-velocity impact and compression after impact of carbon/aramid hybrid composite honeycomb sandwich panels[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition)*, 2025, 57(1): 109-119.
- [44] 许泳豪. 成型双向角联锁织物的经纬纱张力分析及其匹配关系研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2023. XU Yonghao. Analysis of warp and weft yarn tension and its matching relation in weaving bi-directional angle-interlock fabrics[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2023.
- [45] 刘杜浩, 常斌, 乔景龙, 等. FRP层合板抗冲击能力与损伤面积的经验估计法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2023, 55(4): 693-701. LIU Duhao, CHANG Bin, QIAO Jinglong, et al. An empirical estimation method for impact resistance and damage area of FRP laminates[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2023, 55(4): 693-701.
- [46] LIU Y J, XIA H, NI Q Q. Experimental investigation on low-velocity impact performance of 3D woven textile composites[J]. *Applied Composite Materials*, 2022, 29(1): 121-146.
- [47] LI Y, WANG F S, SHI X G, et al. Impact response of 3D orthogonal woven composites with different fiber types[J]. *Applied Composite Materials*, 2023, 30(6): 1819-1840.

(编辑:张蓓)