

引文格式: 章劲草, 张一帆, 雷力明, 等. 织物结构对变厚度三维机织复合材料低速冲击性能影响研究[J]. 航空制造技术, 2026, 69(16): 25020409.

ZHANG Jincao, ZHANG Yifan, LEI Liming, et al. Influence of fabric structure on low-velocity impact performance of variable-thickness 3D woven composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(16): 25020409.

织物结构对变厚度三维机织复合材料低速冲击性能影响研究

章劲草¹, 张一帆², 雷力明¹, 陈利²

(1. 太行国家实验室, 成都 610213;

2. 天津工业大学, 天津 300387)

[摘要] 针对航空装备中关键抗冲击部件对轻量化复合材料的迫切需求, 系统探讨了变厚度三维机织复合材料的低速冲击性能及其影响机制。通过树脂传递模塑工艺制备了具有 1/3 斜纹、五枚缎纹和八枚缎纹 3 种不同织构的变厚度复合材料试件。采用落锤冲击试验装置, 在 5 J 和 10 J 两个能量水平下对试件进行冲击测试, 完整记录了载荷-时间、载荷-位移及能量-时间等动态响应曲线。试验结果显示, 八枚缎纹结构表现出最优的抗冲击性能, 其峰值载荷分别较五枚缎纹和 1/3 斜纹结构显著提高 39.13% 和 88.14%; 随着冲击能量的增加, 所有试件的响应时间均相应延长, 损伤程度也明显加剧。同时, 适当增加经纱浮长可有效缓解应力集中现象, 显著延缓分层损伤的扩展进程。本研究为变厚度三维机织复合材料在机翼前缘、叶片边缘等关键抗冲击部位的结构优化设计提供了试验依据和理论支撑。

关键词: 变厚度; 三维机织复合材料; 低速冲击; 织物结构; 渐进损伤

中图分类号: V214

文献标志码: A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25020409

Influence of Fabric Structure on Low-Velocity Impact Performance of Variable-Thickness 3D Woven Composites

ZHANG Jincao¹, ZHANG Yifan², LEI Liming¹, CHEN Li²

(1. Taihang National Laboratory, Chengdu 610213, China;

2. Tiangong University, Tianjin 300387, China)

[ABSTRACT] Addressing the growing demand for lightweight materials in critical impact-resistant aerospace components, this study systematically investigates the low-velocity impact performance and underlying mechanisms of variable-thickness 3D woven composites. Three types of variable-thickness composite specimens with 1/3 twill, 5-harness satin, and 8-harness satin architectures were manufactured using resin transfer molding (RTM). Low-velocity impact tests were conducted at energy levels of 5 J and 10 J using a drop-weight impact apparatus, during which dynamic response data including load-time history, load-displacement curves, and energy-time profiles were recorded. Experimental results demonstrate that the 8-harness satin architecture exhibits superior impact resistance, with peak load values exceeding those of the 5-harness satin and 1/3 twill structures by 39.13% and 88.14%, respectively. With increasing impact energy, the response duration of all specimens was prolonged and damage severity intensified. Furthermore, increasing the float length of warp yarns effectively mitigates stress concentration and significantly retards delamination propagation. This research

收稿日期: 2025-12-22; 退修日期: 2026-01-19; 录用日期: 2026-03-11

基金项目: 国家自然科学基金(U2441265); 太行国家实验室基础研究基金(C2024-3-001)

通信作者: 张一帆, 研究员, 博士, 研究方向为复杂结构预制品设计与制造。

provides valuable experimental evidence and theoretical support for optimizing variable-thickness 3D woven composites in critical impact-resistant components such as wing leading edges and blade tips.

Keywords: Variable thickness; 3D woven composites; Low-velocity impact; Fabric structure; Progressive damage

三维机织复合材料(3D woven composites, 3DWCs)依靠多向纤维束的空间互锁构造,在厚度方向形成连续增强,可显著提升层间断裂韧性与冲击损伤容限,同时保持高比强度和高比刚度,现已在航空航天等领域得到广泛应用^[1]。但工程中叶片、壁板等构件多为变厚度曲面。变厚度机织复合材料需先经过组织结构、机织工艺的设计得到预成型织物,再通过不同的成型技术得到所需复合材料。针对2.5D变厚度预制件,一般采用纱线数量增减法来实现边界厚度的均匀变化,通过控制单位长度内纱线根数的连续变化,既保证厚度分布满足外形要求,又最大限度降低因纱线骤减引起的局部应力集中^[2]。

当前,三维机织复合材料低速冲击性能研究主要采用落锤试验与数值仿真相结合的方法,重点揭示其损伤模式与演化规律,这对评估材料在复杂工况下的服役性能具有重要意义。此外,织物结构对复合材料破坏模式具有显著影响。例如,角联锁结构通过抑制分层保持冲击后完整性,而正交结构则以纤维断裂为主导失效模式。Kazemianfar等^[3]指出,冲击头形状与入射角度显著改变损伤模式,钝形冲击器会导致更大的损伤面积和更高的阈值载荷,损伤程度主要受冲击头形状和Z向纤维体积分数的影响。Liu等^[4]在10 J、20 J和30 J的冲击能量水平下,对三维机织复合材料进行了低速落锤冲击试验,以研究机织结构对复合材料面外机械性能的影响,结果发现全厚度角联锁结构是最优结构,准穿透能量为30 J,而其他结构的准穿透能量为20 J。Liu等^[5]测试了三维正交机织复合圆板在准静态压痕和横向冲击下的损伤,研究了准静态载荷和冲击载荷之间的载荷-位移曲线的差异,并通过建立晶胞模型来分析复合材料的损伤,利用VUMAT用户材料子程序来表征三维正交机织复合材料的本构关系和损伤演变。Zhang等^[6]设计了3种不同结构的三维层间互锁(LTL)机织复合材料,分析了其在低速冲击下的宏观力学行为,发现密集的纱线交织结构表现出优异的抗冲击性能,可以有效分散冲击载荷,加入衬经纱可以显著改善复合材料的层间黏合和整体抗冲击性。尽管三维机织复合材料的冲击性能已得到广泛关注^[7-8],但现有研究仍集中于等厚度板或简单平板,织造工艺方面也只集中于等厚度材料的结构变化^[9],对变厚度三维机织复合材料的结构变形研究较少^[10],结构变化对复合材料的力学性能评价尚不清

晰,相关研究尚不系统,尤其是对变厚度三维机织复合材料的低速冲击力学响应尚缺乏系统认识^[11-12]。基于此,本文设计并制备了1/3斜纹、五枚缎纹和八枚缎纹3种变厚度预制体。根据预试验结果,5 J冲击能量处于材料的弹性损伤阈值区间,可有效表征材料在低冲击载荷下的弹性变形、界面脱黏等轻微损伤行为;10 J冲击能量则跨越至塑性损伤与纤维断裂区间,能够揭示材料在中高冲击强度下的能量吸收机制、损伤拓展路径及承载能力衰减规律。两个能量梯度形成了从“轻微损伤”到“明显损伤”的完整覆盖。因此,分别以5 J和10 J的冲击能量对其进行低速冲击测试,定量获取载荷-位移-能量曲线与损伤形貌,以阐明织物结构对冲击抗力与能量吸收的影响规律。

1 试验及方法

1.1 原材料

增强相采用TG800HX-12K高强度碳纤维(山西钢科碳材料有限公司);基体体系采用TDE-86环氧树脂(天津晶东化学复合材料有限公司),配套甲基四氢苯酐(MTHPA)为固化剂,N,N-二甲基苄胺(DMBA)为促进剂,符合航空级环氧-酸酐体系的常规配比要求。

1.2 织物结构设计

叶片预制体的核心几何特征为厚度梯度连续变化。在纱线线密度与经纬密度恒定时,织物厚度与纱线层数呈正相关,因此可通过调控层数实现厚度控制。

图1给出了试样织物结构和试样特征的示意图。本文选取了1/3斜纹(TS)、五枚缎纹(SS-I)及八枚缎纹(SS-II)3种织物结构进行探讨,预制体结构和缩写名称如图1(a)所示。在织造过程中,通过改变纱线单元的数量实现织物厚度的变化。具体而言,主要采用调整经纱层数的方法,使预制体的起始厚度从7 mm逐渐过渡至结尾处的3.5 mm。变厚区的设置如下:试样两端各设有长约25 mm的等厚段,一端保持起始厚度7 mm,另一端保持结尾厚度3.5 mm;在长度为50 mm的变厚区域内实现厚度的均匀过渡。为防止表层纬纱脱落,每隔一纬在正面与背面各减少一层经纱,从而确保织物在整个变厚区域平滑过渡,同时避免表面纬纱的松散或脱落。该方法保证了织物厚度的有效调控,同时也维持了织物结构的稳定性和完整性。本试验所用的三维

机织物均采用天津工业大学复合材料研究院自主研发的卧式三维织机织造完成。预制体中各纱线系统所用碳纤维的规格参数及相关织造参数详见表 1。

1.3 复合材料制备

三维机织复合材料成型工艺采用树脂传递模塑技术。在压力 0.4~0.6 MPa 的条件下,将树脂注入模具中直至完全浸润纤维预制体,然后将注胶完成的模具放入烘箱进行高温固化,固化制度为 130 ℃ × 2 h+150 ℃ × 1 h+160 ℃ × 8 h+180 ℃ × 3 h。固化后经冷却、脱模制得三维机织复合材料,其示意图与实物如图 1 (b) 所示。

复合材料的纤维体积含量 V_f 通过称重法求得,计算公式为

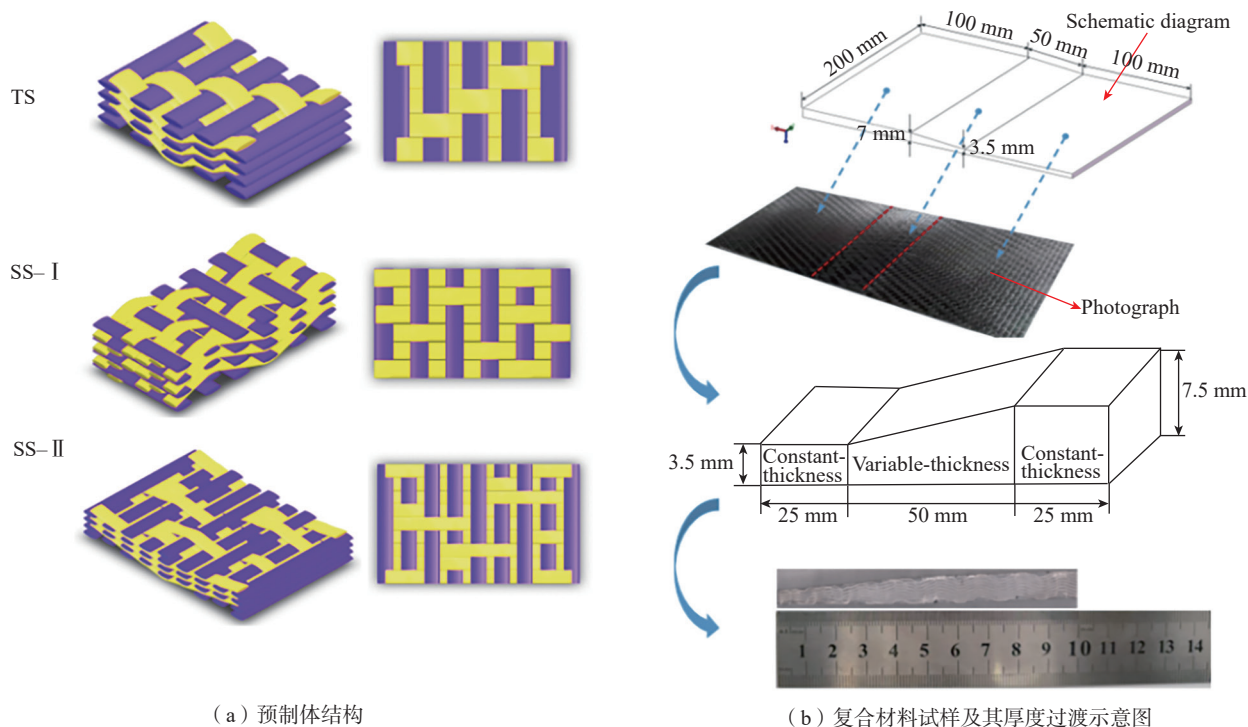
$$V_f = \frac{M_f}{\rho_f \times L_x \times L_y \times H}$$

式中, M_f 为预成型材料的质量, g; ρ_f 为碳纤维的密度, g/cm³; L_x 、 L_y 和 H 为复合材料的尺寸, mm。

1.4 冲击测试

研究了 3 种变厚度三维机织复合材料的低速冲击性能,试验参考的标准为 ASTM D4812—19《塑料悬梁无缺口冲击强度的标准试验方法》,将复合材料板通过精雕机切割成 100 mm × 13 mm 的标准试样,使用 Instron Dynatup 9250HV 落锤冲击试验机进行低速冲击试验,冲击测试设备如图 2 (a) 所示,利用 3D 轮廓仪表征其损伤模式,其设备图如图 2 (b) 所示。

测量接触力时,采用量程为 20 kN 的内置力传感器,并辅以采样率 166.7 kHz 的高频数据采集系统记录关键参数;采用防反弹系统可确保试样免受后续冲击,同时保证夹具稳定性。冲击能量可通过调节冲头支架的高



(a) 预制体结构

(b) 复合材料试样及其厚度过渡示意图

图 1 变厚度三维机织复合材料结构和试样

Fig.1 Structure and specimens of variable-thickness 3D woven composites

表 1 变厚度三维机织预制体工艺及复合材料参数

Table 1 Parameters of variable-thickness 3D woven preforms and composites

试样	纱线线密度 /Tex		经纱		纬纱		厚度 /mm	纤维体积分数 /%
	经纱	纬纱	密度 / (根 /cm)	层数	密度 / (根 /cm)	层数		
1/3 斜纹 (TS)	1000	1000	5	8~4	5	9~5	7.1~3.6	54.87
五枚缎 (SS-I)	1000	1000	5	8~4	5	9~5	7.2~3.5	54.73
八枚缎 (SS-II)	1000	1000	5	8~4	5	9~5	7.3~3.7	57.94

度来调整。所有测试均使用直径 12.7 mm、总质量 7.2 kg 的半球形钢制冲击器,对变厚度三维机织复合材料试样分别施加 5 J 和 10 J 的冲击能量。冲击位置位于试样的厚度过渡区,可直接研究厚度沿长度方向均匀变化对材料动态断裂行为的影响。每种结构试样在经向各进行 5 次重复冲击测试,以验证结果的可重复性。

2 结果与讨论

2.1 载荷-时间响应

图 3 为 3 种不同结构试样在 5 J 和 10 J 冲击能量下

的时间-载荷曲线。可以看出,冲击载荷随时间非线性增加,并出现轻微的锯齿状波动。观察到的细微锯齿状波动主要是由于复合材料层内的弹性应力波和振动。随后,出现的载荷明显降低或明显的锯齿状波动,表明每个试样都经历了明显的渐进式损坏过程。由于三维机织复合材料具有较高的韧性,在此过程中载荷保持相对稳定。当位移达到最大值时,冲头速度会减速到 0,导致冲头反弹,载荷随之减小到 0。

由图 3 (a)可以看出,在 5 J 冲击能量下,SS-II 的峰值载荷分别比 SS-I 和 TS 高出 39.13% 和 88.14%。

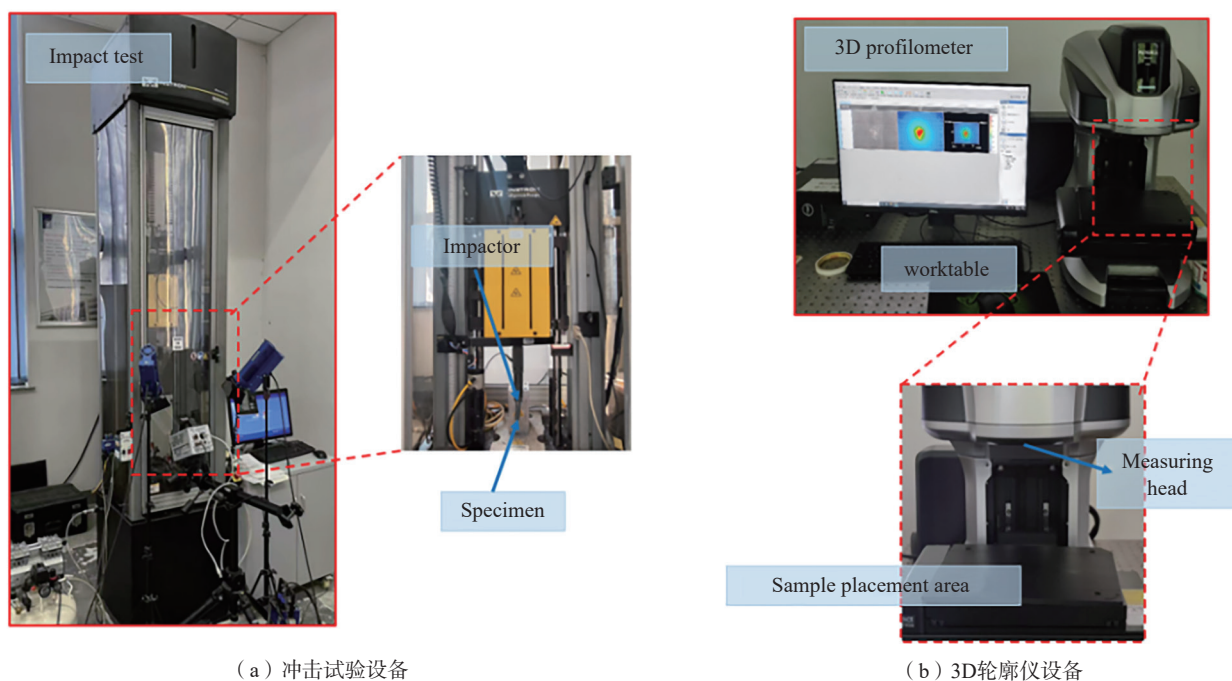


图 2 复合材料试验设备

Fig.2 Composite material testing equipment

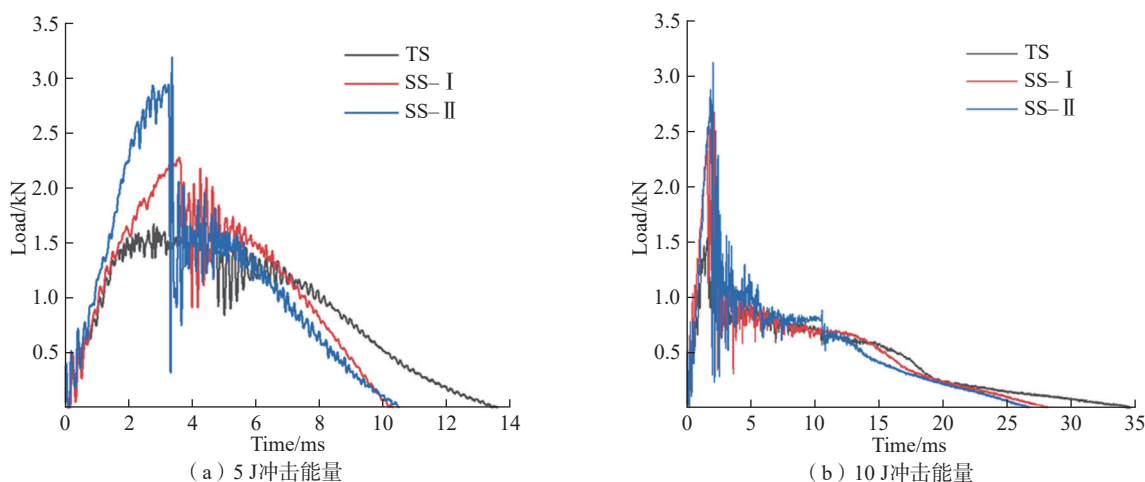


图 3 试样时间-载荷曲线

Fig.3 Time-load curves of the specimens

这是由于八枚缎纹结构经纱浮长较长,纱线路径平直、卷曲率低,冲击过程中更有利于应力传递与分布,使应力分布也更为均匀,减少应力集中现象,因而能够更好地承受冲击能量,表现出较高的峰值载荷。相应地,相较于八枚缎纹,五枚缎纹及斜纹结构的交织点更多。纱线在冲击载荷作用下易发生局部弯曲,导致应力集中,使其在冲击过程中更易出现局部损伤,从而在较低载荷下迅速失效。对于冲击响应时间,八枚缎纹与五枚缎纹结构相差不大;斜纹结构的响应时间较五枚缎纹和八枚缎纹分别延长 30.08% 和 32.75%,这是由于斜纹结构交织点密集,损伤在材料结构中传播较慢,表现出更长的失效时间。从曲线可知,离散性较小。试样 TS、SS-I、SS-II 的峰值载荷标准差分别为 3.54%、2.46%、3.07%。

由图 3 (b) 可以看出,在 10 J 冲击能量下,曲线响应与 5 J 冲击能量时类似,八枚缎纹结构试样的峰值载荷最大,五枚缎纹略低,斜纹最小。相较于斜纹结构,前二者峰值载荷分别提高了 93.75% 和 68.75%,这与其结构特点相对应。在高冲击能量下,试样的响应时间都有所增加。可见,随着冲击能量的增加,试样损伤更严重,表现出更长的能量吸收时间。对于 10 J 冲击能量,试样 TS、SS-I、SS-II 的峰值载荷标准差分别为 3.22%、3.78%、4.24%。

2.2 载荷-位移响应

图 4 为 3 种试样在 5 J 和 10 J 冲击能量水平下的位移-载荷曲线,其上升部分的斜率反映了复合材料在冲击载荷下的弯曲刚度。可以看出,八枚缎结构的初始弯曲刚度最高,其次是五枚缎纹,最后是 1/3 斜纹结构。还可以看出,3 种试样的最大位移都随着冲击能量的增加而近似线性增加,这是因为在达到峰值位移时,试样中储存的弹性能量随着冲击能量的增加而上升,从而导

致弹性变形增加。

如图 4 (a) 所示,在 5 J 冲击能量下,八枚缎纹结构试样的峰值载荷最大,五枚缎纹结构次之,斜纹结构最低。这主要是由于八枚缎纹结构的经纱浮线较长,纱线卷曲程度较低,经纬纱交织点更少。因此,在受到冲击载荷时 3 种结构试样的最大位移呈递减的趋势:斜纹位移最大,五枚缎纹次之,八枚缎纹最小。相较于后二者,斜纹结构的最大位移分别提高了 143.78% 和 44.44%。这主要是由于八枚缎的组织循环较大,经纱和纬纱的交织点较少,纱线在织物中相对平直,初始弯曲刚度较高,使得材料在弯曲时需要更大的外力来克服初始刚度。因此,八枚缎纹结构的最大位移较小。在斜纹结构中,经纱和纬纱的交织规律为斜向排列,交织点比缎纹结构多,层间连接相对更弱,冲击能量难以通过纤维束有效传递和耗散,导致冲击的最大位移增加。

如图 4 (b) 所示,在 10 J 冲击能量下,3 种结构试样响应规律与低冲击能量类似,相较于五枚缎结构和八枚缎纹结构,斜纹的最大位移分别提高了 61.97% 和 38.55%;相较于低冲击能量,在高冲击能量下 3 种结构试样最大位移都有所提升,这可能是由于试样对 10 J 的冲击能量敏感度更高,试样损伤程度更大,表现出更大的位移。

2.3 能量-时间响应

图 5 为试样在 5 J 和 10 J 冲击能量下的时间-能量曲线。在初始阶段,吸收的能量会上升到接近冲击能量的值,此时绝大部分动能都转移到复合材料上,使撞击器速度减小到 0;然后,随着撞击器的反弹,吸收的能量以比初始阶段更慢的速度减少,复合材料与撞击器分离后,吸收的能量趋于稳定,此时的能量值代表试样的吸收能量,随着冲击能量的增加,达到峰值能量的时间

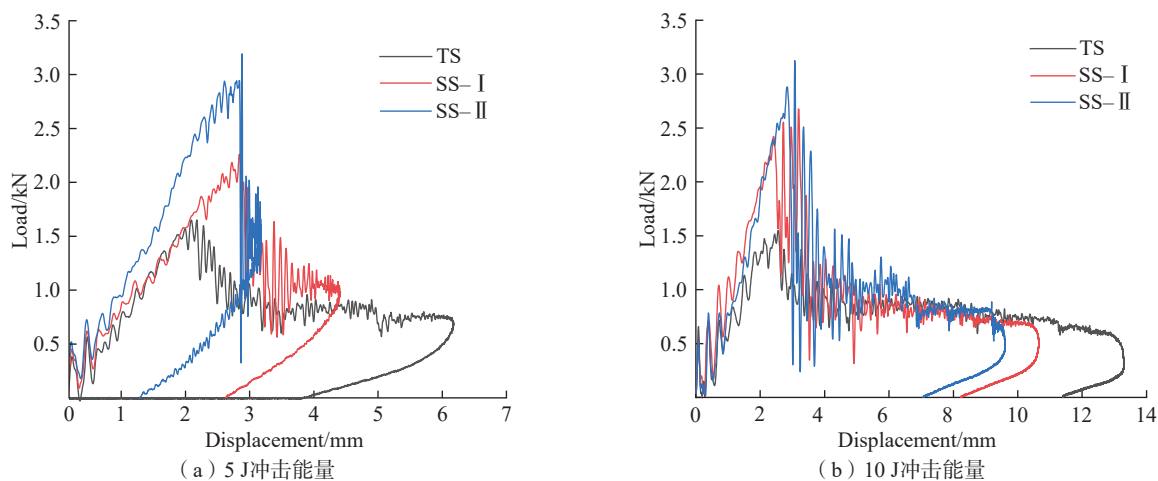


图 4 试样位移-载荷曲线

Fig.4 Displacement-load curves of the specimens

也在延长。

由图5可知,在5 J、10 J冲击能量下,试样的吸收能量值差异不显著,但八枚缎纹的结构特点让纱线在织物中具有较大的屈曲空间,使得纱线在受到冲击时能够更好地变形和恢复,因此吸收更多的能量。五枚缎纹的经纬组织点之比为4:1,浮长线较八枚缎纹短,纱线卷曲率相对较高。因此,其能量吸收能力略低于八枚缎纹。1/3斜纹结构试样的纱线卷曲率相对较高,且其结构中纱线的交织点较多,限制了纱线的变形能力,其能量吸收能力最低。

2.4 损伤行为分析

图6为试样在5 J和10 J冲击能量下的损伤模式。可见,在5 J冲击能量下,试样TS、SS-I、SS-II的损伤都较小,只出现少量基体开裂,未观察到明显的纤维断裂损伤。随着冲击能量的增加,开始出现较多的基体开

裂及纤维断裂。对比3种结构可知,斜纹结构和五枚缎纹结构试样的损伤较严重,八枚缎纹结构试样损伤较小。这是由于八枚缎纹结构交织点较少,纱线在冲击载荷作用下不易发生局部弯曲,应力集中现象不明显,使其在冲击过程中能够更好地承受载荷,出现较少损伤。

3 结论

本文分析了八枚缎纹、五枚缎纹和1/3斜纹3种结构的变厚度三维机织复合材料试样在5 J和10 J冲击能量下的载荷-时间响应、载荷-位移响应及能量-时间响应,得到以下结论。

(1) 本研究的变厚度三维机织复合材料中,八枚缎纹结构表现出最高的峰值载荷和最优的能量吸收能力,这是因为其结构特点有助于更有效的应力传递和更加均匀的应力分布。在5 J冲击能量下,其峰值载荷

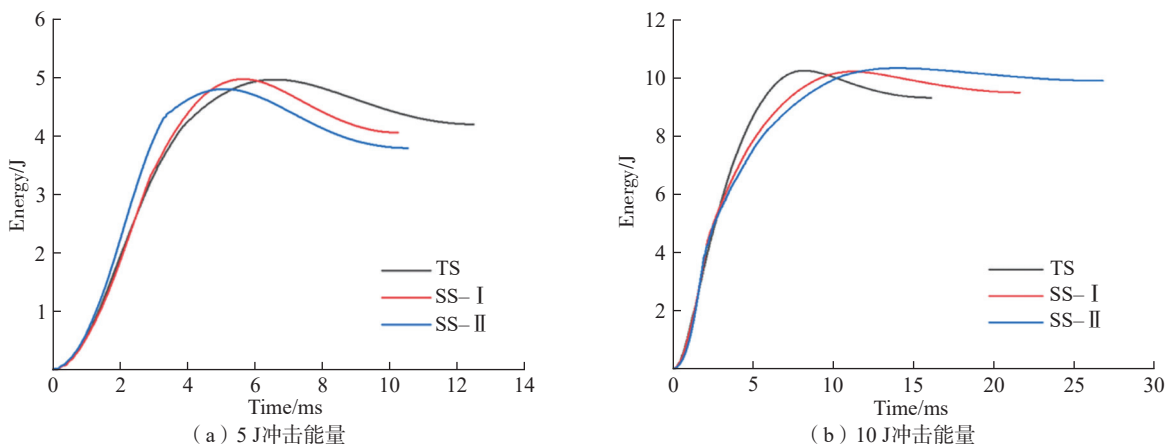


图5 试样时间-能量曲线
Fig.5 Time-energy curves of the specimens

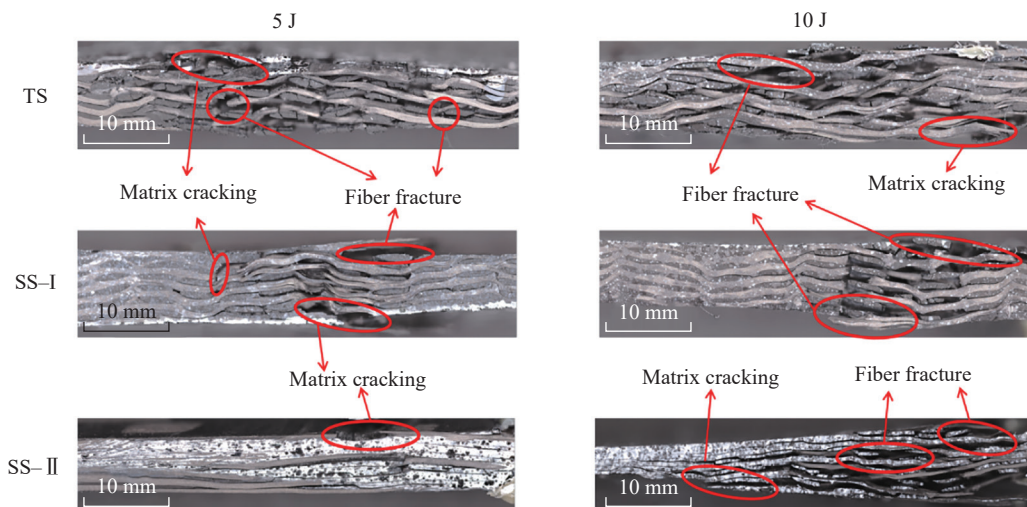


图6 试样冲击损伤形貌
Fig.6 Impact damage morphology of the specimens

分别较五枚缎纹和 1/3 斜纹结构显著提高 39.13% 和 88.14%。随着冲击能量的增加,所有试件的响应时间均相应延长,损伤程度也明显加剧。

(2) 斜纹结构因交织点较多和层间连接较弱,受到冲击时易发生局部损伤。在 5 J 冲击能量下,其最大位移分别提高了 44.44% 和 143.78%;而在 10 J 冲击能量下,相较五枚缎纹结构和八枚缎纹结构,斜纹的最大位移分别提高了 38.55% 和 61.97%,由此可知,斜纹结构因交织紧密,在相同冲击能量下具有更大的最大位移和较低的能量吸收效率。

(3) 随着冲击能量的增加,所有试样的能量吸收量都增加,但八枚缎纹结构因为其特殊的织物构造能够更好地变形和恢复,从而在高冲击能量下表现出更高的能量吸收能力。

(4) 在对抗冲击性能要求较高的应用场景中,八枚缎纹结构更具优势,而对于对位移有较大容忍度的应用,则可以考虑使用斜纹结构。

参考文献

- [1] JING K K, XIE S C, ZHANG Y F, et al. Impact resistance of 3D woven fabrics and composites: A review[J]. Thin-Walled Structures, 2025, 213: 113262.
- [2] LIU X D, ZHANG D T, QIU H P, et al. On-axis fatigue behaviors and failure characterization of 3D5D braided composites with yarn-reduction using X-ray computed tomography[J]. Composites Science and Technology, 2021, 203: 108585.
- [3] KAZEMIANFAR B, NAMI M R. Influence of oblique low velocity impact on damage behavior of 2D and 3D woven composites: Experimental and numerical methods[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 167: 108253.
- [4] 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.
- [5] LIU Y J, NATSUKI T, SUZUKI D, et al. Low-velocity impact-resistance of aramid fiber three-dimensional woven textile-reinforced thermoplastic-epoxy composites[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2024, 37(9): 2827–2857.
- [6] ZHANG Y F, FENG J D, YAN J Q, et al. Effect of weave pattern on the low-velocity impact properties of 3D woven composites[J]. Thin-Walled Structures, 2025, 209: 112969.
- [7] GALANOPOULOS G, PAUNIKAR S, STAMATELATOS G, et al. SHM for complex composite aerospace structures: A case study on engine fan blades[J]. Aerospace, 2025, 12(11): 963.
- [8] CHOWDHURY S, DUBEY D, BEHERA B K. An experimental investigation on the influence of weave architectures on out-of-plane and in-plane impact properties of 3D woven fabric-reinforced composites[J]. Journal of Materials Science, 2024, 59(47): 21735–21800.
- [9] TIAN X Y, DING H J, GU B H. Experimental assessment of low velocity impact damage in 3D angle-interlock woven kevlar/epoxy composite using DIC analysis[J]. Applied Composite Materials, 2025, 32(4): 1579–1595.
- [10] ZHANG S, LIU C Y, ZHANG X, et al. Simulation of failure behavior of 2.5D SiC/SiC variable thickness dovetail joint structures based on mesoscale model[J]. Composite Structures, 2024, 327: 117716.
- [11] KORKMAZ M, KARAKUZU R, LABANIEH A R, et al. The low velocity impact properties of three-dimensional (3D) warp interlock woven composites according to the fabric architecture[J]. Journal of Composite Materials, 2024, 58(24): 2655–2668.
- [12] WEI Q S, CHEN J X, YANG D, et al. A numerical study on the effects of fabric structure on the impact resistance of 3D interlock woven fabrics[J]. Journal of Composite Materials, 2024, 58(20): 2279–2296.

(责编 阳光)