引用格式：蔡松明，严实，孟子翔，等. 三维四向编织材料不同冲头作用下多次冲击损伤分析[J]. 材料工程，2026，54(4)：302-312.
CAI Songming，YAN Shi，MENG Zixiang，et al. Analysis of multiple impact damage of three-dimensional four-directional braided composite materials under different punch heads[J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(4)：302-312.

三维四向编织材料不同冲头作用下多次冲击损伤分析

蔡松明，严　实*，孟子翔，牛勇鑫，赵　云
（哈尔滨理工大学 建筑工程学院，哈尔滨 150080）

摘要：分别使用柱形、锥形、球形冲头进行冲击实验，对试件在不同冲头冲击下的反应特性进行探讨。通过超声C扫描仪器检测试件内部损伤，分析冲击作用下试件损伤扩展的规律和过程。实验结果显示，冲头的形状是影响试件损伤模式的重要因素。在冲击实验中，球形冲头对材料的损伤最为严重，相比之下，柱形冲头造成的破坏较轻，但损伤范围更大。锥形冲头对试件的冲击响应与球形冲头类似，两者对试件造成的损伤区域面积差异不显著，但锥形冲头对试件造成的损伤较轻。材料的编织角度同样明显影响着材料的冲击抗性。材料的抗冲击能力随编织角度的增大而增强。损伤在试件上扩展的方面上，编织角度小的材料倾向于沿纵向方向破坏。大编织角度材料的损伤则往往向四周扩散。冲击实验中，试件的损伤过程包括纤维束的纵向拉伸破坏和抽拔、纤维与基体的横向拉伸破坏，以及横向压缩破坏。

关键词：三维四向；多重冲击；损伤演化；失效模式；编织角度
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000883　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000883
中图分类号：TB332　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)04-0302-11

Analysis of multiple impact damage of three-dimensional four-directional braided composite materials under different punch heads

CAI Songming，YAN Shi*，MENG Zixiang，NIU Yongxin，ZHAO Yun
（Architectural Engineering Institute，Harbin University of Science and Technology，Harbin 150080，China）

Abstract：Impact tests are carried out with cylindrical，conical and spherical punches respectively，and the response characteristics of specimens under different punch impact are discussed. The internal damage of the specimen is detected by ultrasonic C-scan instrument，and the law and process of damage expansion under impact are analyzed. The experimental results show that the shape of the punch is an important factor affecting the damage mode of the specimen. In the impact test，the spherical punch cause the most serious damage to the material，comparing to the columnar punch cause less damage，but the damage range is larger. The impact response of the conical punch to the specimen is similar to that of the spherical punch，and the damage area of the two punch to the specimen is not much different，but the damage of the conical punch to the specimen is light. The weaving angle of the material also obviously affects the impact resistance of the material. The impact resistance of the material increases with the increase of the weaving angle. In terms of damage expansion on the specimen，materials with small weaving angles tend to be damaged along the longitudinal direction. The damage of large woven angle materials tends to spread to all sides. In the impact test，the damage process of the specimen includes the longitudinal tensile failure of the fiber bundle，the transverse tensile failure of the fiber and the matrix，and the transverse compression failure.

Key words：three-dimensional four-directional；multiple impacts；damage evolution；failure mode；weaving angle

纤维增强复合材料是由高强度纤维与树脂基体结合在一起，具有优异力学性能的复合材料。这种复合材料具有高强度、轻质和优异的耐腐蚀性。随着技术发展，大量的纤维增强复合材料应用在航空航天、汽车制造、船舶工业等领域[1-4]。与单一材料相比，复合材料在多个方面具有显著优势，如更高的比强度、比模量、优异的耐腐蚀性、隔热性、可定制的性能、更高的耐疲劳与抗冲击能力等诸多优点[5-7]。与叠层复合材料相比，编织复合材料具有更强的抗冲击性能[8]，其纤维通常在不同方向上交织，使得材料在多个方向上都具有较好的强度和刚度[9]，能够更有效地承受多向应力。编织复合材料的层间结合较为紧密，减少了层间剥离的风险[10]。编织复合材料通常有较好的韧性，能够在承受冲击或疲劳载荷时表现出较好的耐久性。这使得它们在一些极端环境或高应力应用中表现更加稳定[11]。因为编织复合材料的服役环境特殊[12]，所以要求在设计和制造过程中考虑摩擦、磕碰和冲击等因素，通过选择适当的材料、优化设计和定期维护来确保其性能和耐用性。在使用过程中，编织复合材料会受到各种类型的冲击，因为其材料的特殊性，内部损伤不易被及时检测，损伤会逐渐加重[13]，需要研究材料在多重冲击下损伤的累积效应及发展过程。

近年来许多学者对三维编织复合材料进行了深入的研究，Shi 等[14]研究了三维编织复合材料在冲击载荷下的断裂行为，通过改进的分离式霍普金森压杆测试该复合材料，使用高速摄影记录裂纹开口位移、变形过程及裂纹演变。Zhou 等[15]研究了三维四向和三维五向编织复合材料在三点弯曲载荷条件下的损伤演变和变形过程，采用数字图像相关方法和声发射技术，结合微计算机断层扫描（micro-CT），分析了复合材料的内部损伤特征及微观损伤形貌。结果表明，三维五向编织复合材料由于在编织方向上增加了轴向纱线，抗分层性能得到增强。此外，小编织角度材料的纤维取向度较高，导致其损伤过程较短、变形较小。谭焕成等[16-18]通过进行高速冲击实验，并用有限元模型分析破坏模式，发现剪切破坏主要发生在冲击侧的纤维上，而拉伸破坏则发生于异侧纤维上。Li 等[19]研究了 3D 编织复合材料的低速冲击响应和失效机制，发现不同冲击速度下应力和损伤表现各异，低速下弹性变形，高速下出现锯齿形损伤。重点探讨了编织角度、织物结构、织物厚度以及结构参数等因素如何影响冲击性能。严实等[20-22]研究了三维四向碳/环氧编织复合材料的损伤机制、刚度预测和强度行为。通过拉伸和压缩实验，结合声发射检测技术，研究了材料的断口破坏形状和损伤演变规律。此外，基于三维编织结构特点，提出了刚度预测模型，并使用有限元方法模拟细观结构和应力分布，得出了编织角度对材料强度的影响。郑海燕等[23]系统分析了编织型复合材料在不同冲击能量下的压缩破坏载荷及各位置的损伤响应。孙梦尧等[24]通过低速冲击实验和 micro-CT 技术对三维五向编织复合材料的损伤特征进行了可视化和量化表征。为提升材料构件的可靠性提供了参考。当前三维编织复合材料的研究主要集中在优化其力学性能、改进编织结构设计和制造工艺、研究疲劳损伤行为、多尺度建模与仿真以及拓展其应用领域。

本工作旨在研究不同类型物体对三维编织材料的冲击的损伤演化过程，以便更全面地理解三维编织复合材料在多种冲击条件下的损伤演化形式。通过多次冲击实验，探讨了不同冲头形状和编织角度对材料的冲击效果，并通过超声波无损检测观察试件内部损伤[25-27]，分析了冲击次数与损伤扩展之间的关系。研究了材料在多重冲击下的损伤累积行为和破坏模式，以及冲击载荷对材料抗冲击性能的影响及其损伤演化过程。为提高三维四向编织复合材料的抗冲击设计提供参考。

1　实验材料与方法

1.1　实验材料

三维编织碳纤维/环氧树脂复合材料由东丽 T700-SC-12000-50B 型碳纤维作为增强材料，单股碳纤维束的细度为 800 tex，基体材料采用 TED-86 环氧树脂。本次实验采用多应用于航空航天的具有高轴向强度和刚度的小编织角度试件[28]，两种编织角度分别为 15°和 30°。（本工作中以 3D4d-15°表示 15°编织角试件，3D4d-30°表示为 30°编织角试件）因编织角度的不同，花节长度会有所变化。试件样式见图一所示。试件尺寸为 120 mm×80 mm×5 mm。相关材料参数列于表 1。

1.2　实验方法

本次实验使用 Instron-9250HV 落锤式冲击试验机[29]以及超声 C 扫描仪。落锤式冲击实验参考 ASTM D7137，该标准专门用于测试聚合物基复合材料（包括碳纤维复合材料）的冲击性能。通过该实验可以获得复合材料在受到撞击时的吸能能力。在标准中，通常通过计算从载荷-位移（或时间）曲线中提取的吸能量来进行冲击性能评估。落锤式冲击试验机锤头定位精度为 0.1 mm，最高冲击速度为 20 m/s，

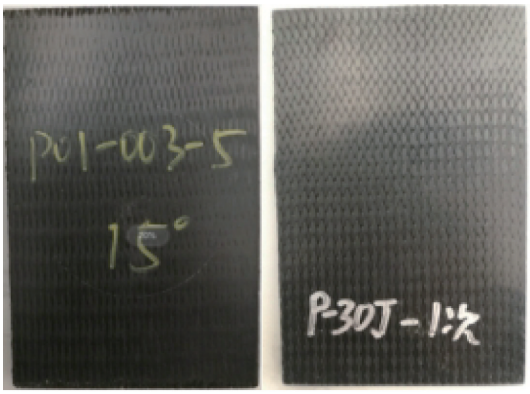


图1 不同编织角的编织复合材料试件

Fig.1 Braided composite material specimens with different braid angles

表1 材料参数

Table 1 Material parameters

Specimen	Knot length/mm	Knot width/mm	Carbon fiber volume content/%
15°	8.2±0.3	2.2±0.3	60±3
30°	4.5±0.3	2.6±0.3	60±3

最高冲击能量为826J。超声C扫描仪z轴分辨率为9 nm，探头频率范围为5～40 MHz，声波宽度为0.25 ns～1 μs。

实验设备如图2所示。试件的编号如表2所示。实验需要的冲击能量为30 J，能量来源为落锤自身重力势能和试验机顶部弹簧的弹性势能。使用的落锤质量为7.26 kg，故根据重力势能公式调整高度即可获得所需的重力势能，冲头接触试件时速度为2.873 m/s。当实验进行时，传感器可以实时收集数据，包括能量、速度、位移和冲头的接触力。本次实验需要使用定制的定位卡具，且与气动卡具配合使用，定位卡具有上下两个部分，用来固定试件。在落锤上升至指定高度后，固定好定位卡具及试件，将气动卡具向下夹紧，然后开始实验。本次测试采用的是圆柱形、圆锥形和球形三种形状的冲头。设计使用的冲击能量为30 J，冲击次数分别为1、2、5、10、20次和50次。当试件在冲击次数小于50次的时候破坏时，则不继续进行冲击。实验完成后，为避免二次撞击。防回弹装置会固定冲头。

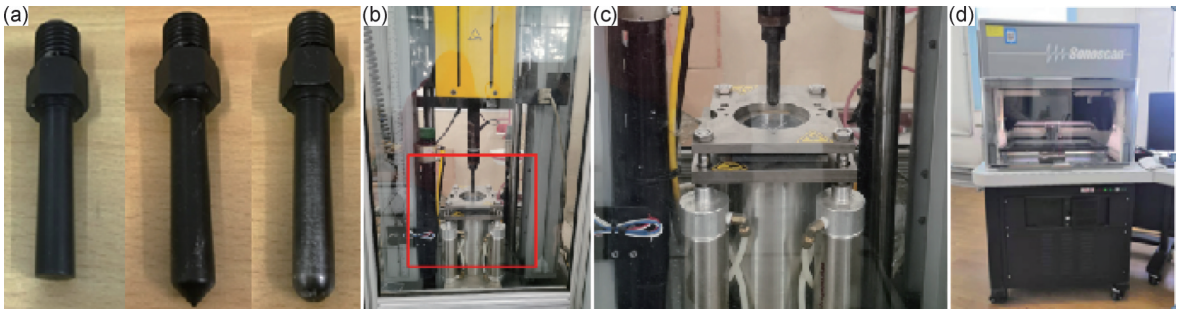


图2 冲击实验设备和卡具

(a)冲头；(b)冲击试验机；(c)气动卡具夹紧试件；(d)超声C扫描仪

Fig.2 Impact test equipment and fixtures

(a)punch head；(b)impact testing machine；(c)pneumatic fixture clamps specimen；(d)ultrasonic C scanner

1.2.1 超声C扫描

本工作采用超声C扫描技术来检测试件的内部损伤情况，超声C扫描检测材料损伤的原理主要基于超声波在材料内部传播时的反射和衰减特性。具体来说，当超声波以一定频率穿过材料时，如果遇到内部缺陷如裂纹、孔洞或分层，部分超声波会在这些缺陷处反射或散射，导致信号的衰减或回波的变化。超声C扫描利用这些变化来生成材料内部的图像，从而识别和定位潜在的损伤。图像的颜色或灰度通常代表回波信号的强度，或者可以代表超声波从发射到返回的时间。在实际操作中，探头沿着材料表面以一个固定步距移动，并在不同位置记录超声波的回波强度和时间差。通过计算和成像软件，这些数据会被处理成二维图像，显示材料内部的结构和可能的损伤区域。检测时将材料放到去离子水中，扫描的区域面积设定为80 mm×80 mm，通过此过程，可以得到试件内部损伤的形状及面积。

2 结果与分析

2.1 多重冲击实验结果分析

冲头形状为柱形时试件的载荷-时间曲线和峰值分布如图3所示，两种编织角度的试件的载荷-时间曲线表现较为稳定。在第1次冲击后3D4d-15°和3D4d-30°试件均未发生破坏。图4，5分别为柱形冲头冲击后15°和30°编织角试件的表面损伤。如图4(a)所示，冲击导致试件局部纤维被压实，纤维含量和密度均有所提高。随着冲击次数增加，试件损伤程度逐步加

表 2　试件的编号

Table 2　Number of test piece

ID	Weaving angle/(°)	Number of shocks	ID	Weaving angle/(°)	Number of shocks	Punch shape
#1-1	15	1	#2-1	30	1	Column
#1-2	15	2	#2-2	30	2	Column
#1-3	15	5	#2-3	30	5	Column
#1-4	15	10	#2-4	30	10	Column
#1-5	15	20	#2-5	30	20	Column
#1-6	15	50	#2-6	30	50	Column
#3-1	15	1	#4-1	30	1	Cone
#3-2	15	2	#4-2	30	2	Cone
#3-3	15	5	#4-3	30	5	Cone
#3-4	15	10	#4-4	30	10	Cone
#3-5	15	20	#4-5	30	20	Cone
#3-6	15	34	#4-6	30	49	Cone
#5-1	15	1	#6-1	30	1	Spherical
#5-2	15	2	#6-2	30	2	Spherical
#5-3	15	5	#6-3	30	5	Spherical
#5-4	15	10	#6-4	30	10	Spherical
#5-5	15	20	#6-5	30	20	Spherical
#5-6	15	28	#6-6	30	44	Spherical

剧。在这个过程中，接触力的峰值都表现为先升高到一定程度然后下降的趋势。初始冲击导致纤维压实，局部强度增强，接触力峰值升高；随冲击次数增加，试件损伤程度加剧，接触力峰值减小。在 50 次冲击过后，两种编织角度的试件均未断裂，试件的接触力峰值随冲击次数的增加而趋于稳定，表明编织复合材料试件在面对平面冲击时具备良好的冲击阻抗。实验中峰值载荷对比如图 3(c)所示，3D4d-30°试件的接触力峰值均高于同冲击次数下的 3D4d-15°试件的接触力峰值。原因在于 30°编织角度的试件中纤维束夹角更大，应力分布更均匀。纱线在冲击力传递过程中能够更好地吸收冲击能量以及承受和分散横向应力，在面对多次冲击时表现出更强的耐久性和抗损伤能力。第 1 次冲击实验结束后，观察试件的损伤情况，如图 4(a)和图 5(a)所示。在第 1 次冲击过后，试件上表面有圆形的损伤痕迹，但无其他严重破坏现象。有少量基体从试件表面脱离，总体结构良好。此外，观察图 4(c)和图 5(c)可见，试件背面无明显变化。

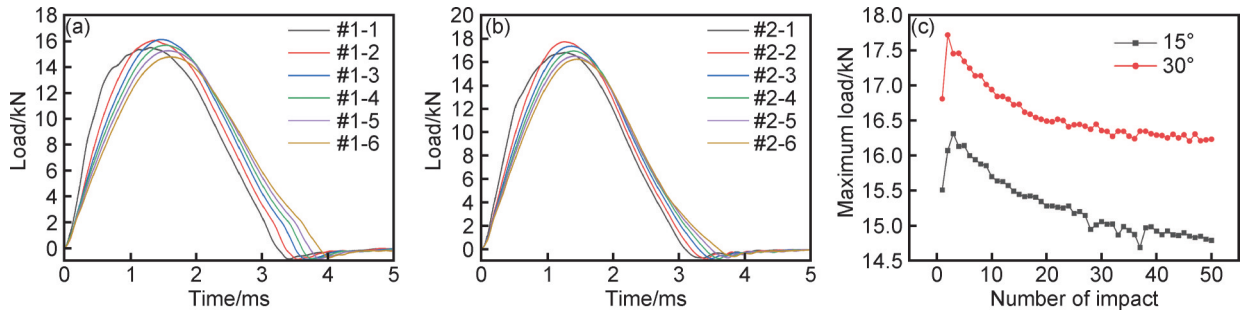


图 3　柱形冲头冲击试件的载荷-时间曲线和峰值分布

(a)15°试件；(b)30°试件；(c)峰值载荷对比

Fig.3　Load-time curve and peak value distribution of cylindrical punch impact specimen

(a)15° specimen; (b)30° specimen; (c)peak load comparison

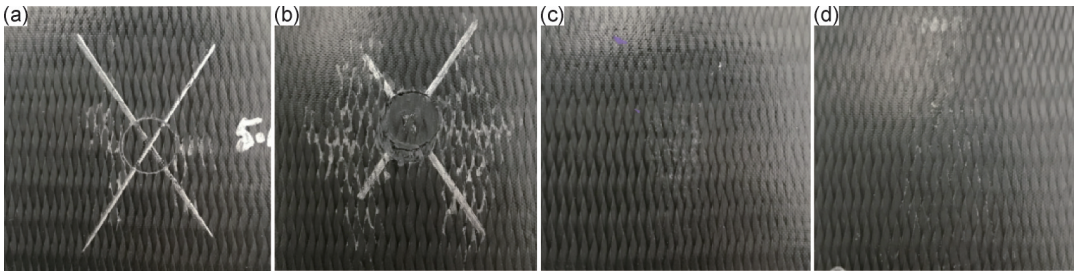


图 4　柱形冲头冲击后 15°编织角试件的表面损伤

(a)#1-1 上表面；(b)#1-6 上表面；(c)#1-1 下表面；(d) #1-6 下表面

Fig.4　Surface damage of 15° braided angle specimens after impact of cylindrical punch

(a)#1-1 upper surface; (b)#1-6 upper surface; (c)#1-1 lower surface; (d)#1-6 lower surface

随着冲击实验继续进行，在进行 50 次冲击以后，由图 4(b)和图 5(b)可见，试件表面可见一圆形凹坑，凹坑有明显的树脂脱落现象，与第 1 次冲击后的面积相比明显增大，有少量的剪切破坏现象出现在圆形区

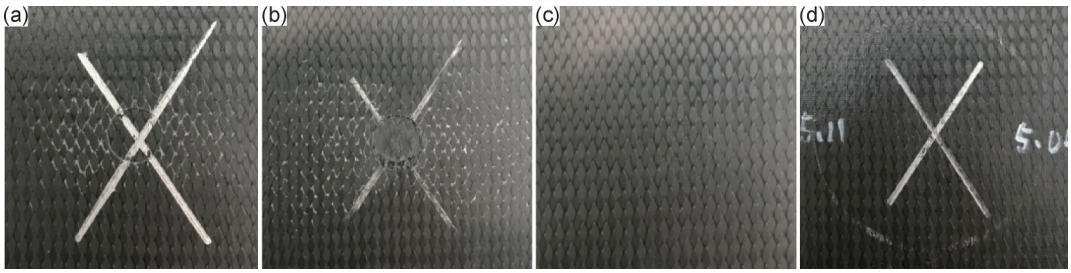


图 5 柱形冲头冲击后编织角 30°试件的表面损伤

(a)#2-1 上表面;(b)#2-6 上表面;(c)#2-1 下表面;(d) #2-6 下表面

Fig.5 Surface damage of 30° braided angle specimens after impact of cylindrical punch

(a)#2-1 upper surface;(b)#2-6 upper surface;(c)#2-1 lower surface;(d)#2-6 lower surface

域的边缘,而试件的背面则没有明显的变化。此次实验中,在冲击次数不断增加的情况下,试件的冲击抗性下降不显著,由此看出,试件对此种形状冲头的冲击的抗损伤能力较强。试件沿厚度方向的剪切极限应力大于 30 J,所以试件不容易出现整体剪切断裂。

锥形冲头的载荷-时间曲线及峰值载荷-次数曲线如图 6 所示,由图 6(a)可知,3D4d-15°试件的载荷-时间曲线在第 1 次冲击后表现较为稳定。由图 6(b)可知,3D4d-30°试件第 1 次冲击的载荷-时间曲线在峰值处表现不稳定,存在波动。3D4d-15°试件的载荷-时间曲线在第 2 次冲击后波动,接触力达到峰值后有小幅度的下降,试件有明显的破坏现象,3D4d-30°试件第 2 次冲击的载荷-时间曲线在接触力达到峰值后缓慢下降,损伤在第 1 次冲击后扩大。两种试件损伤随着冲击次数的增加而逐步加重,最终试件被贯穿。如图 6(c)所示,3D4d-15°试件在冲击次数较少时,接触力峰值随冲击次数的增加,下降较为缓慢,在冲击达到 25 次后,下降速度开始增加,接触力峰值明显降低,由此表明试件内部损伤的加剧。而 3D4d-30°试件接触力峰值随冲击次数的增加而下降的趋势与 3D4d-15°试件相比则更加稳定,接触力峰值在冲击次数达到 37 次之前,下降趋势比较缓慢,在 37 次冲击后则出现与类似 3D4d-15°试件的下降趋势,此时试件已接近完全破坏。但因试件中纱线互相缠绕而形成的复杂的结构,材料仍具有一定的冲击抗性。随着冲击次数的进一步增加,两种试件的刚度逐步减小,但下降的空间与幅度较小。最终,3D4d-15°试件在第 34 次冲击后被穿透,而 3D4d-30°试件则在第 49 次冲击时被穿透。显然,30°编织角的纤维束结构赋予了其更高的抗冲击性。

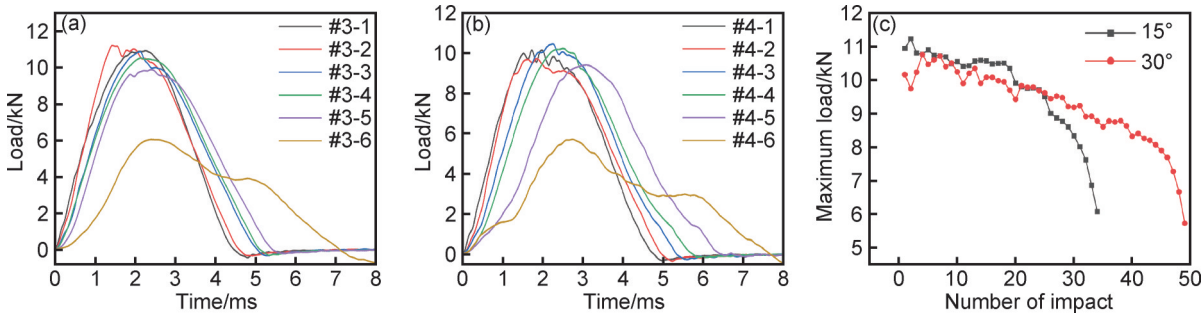


图 6 锥形冲头冲击试件的载荷-时间曲线和峰值分布

(a)15°试件;(b)30°试件;(c)峰值载荷对比

Fig.6 Load-time curve and peak value distribution of conical punch impact specimen

(a)15° specimen;(b)30° specimen;(c)peak load comparison

图 7,8 为锥形冲头冲击后 15°和 30°编织角试件的表面损伤。在锥形冲头冲击下,两种试件表现出不同破坏现象。对于 3D4d-15°试件,在第 1 次冲击后,试件表面出现了圆形的凹坑,无开裂现象,背面有略微变化。在第 2 次冲击后,凹坑的深度略微增加,背面基体开裂并出现了纤维插拔的现象。第 5 次冲击后,坑内深度增加,边缘则出现纤维束横向断裂现象,背面基体开裂现象加剧,损伤主要沿纵向扩展。在 20 次冲击过后,在试件表面凹坑处以及背面有破坏现象,纤维束出现断裂现象。背面有约 60 mm 的开裂长度。当冲击次数达到 34 次时,冲击位置的结构完全被破坏,纤维束完全断裂,试件被击穿。对于 3D4d-30°试件来说,可以

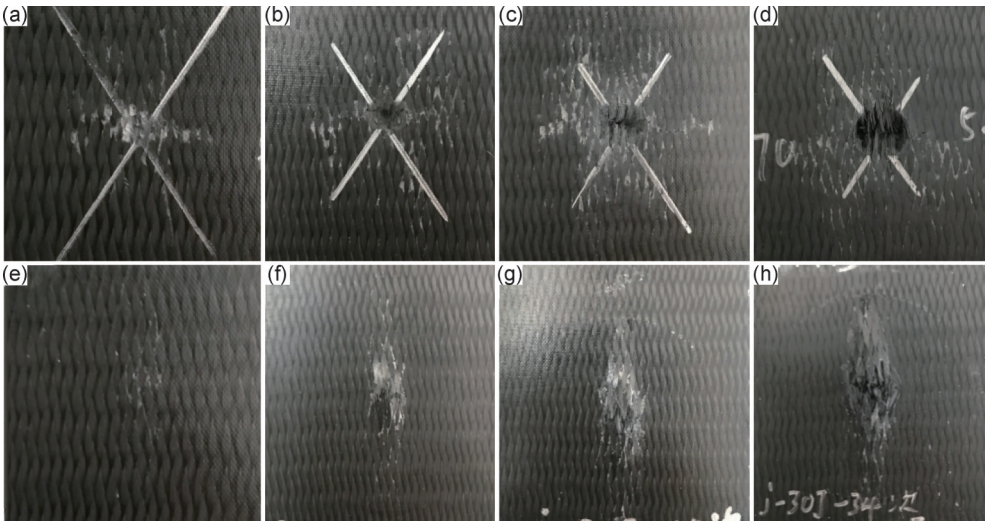


图7　锥形冲头冲击后15°编织角试件的表面损伤

(a)#3-1上表面;(b)#3-3上表面;(c)#3-5上表面;(d)#3-6上表面;(e)#3-1下表面;(f)#3-3下表面;(g)#3-5下表面;(h)#3-6下表面

Fig.7　Surface damage of 15° braided angle specimens after impact of tapered punch

(a)#3-1 upper surface;(b)#3-3 upper surface;(c)#3-5 upper surface;(d)#3-6 upper surface;(e)#3-1 lower surface;
(f)#3-3 lower surface;(g)#3-5 lower surface;(h)#3-6 lower surface

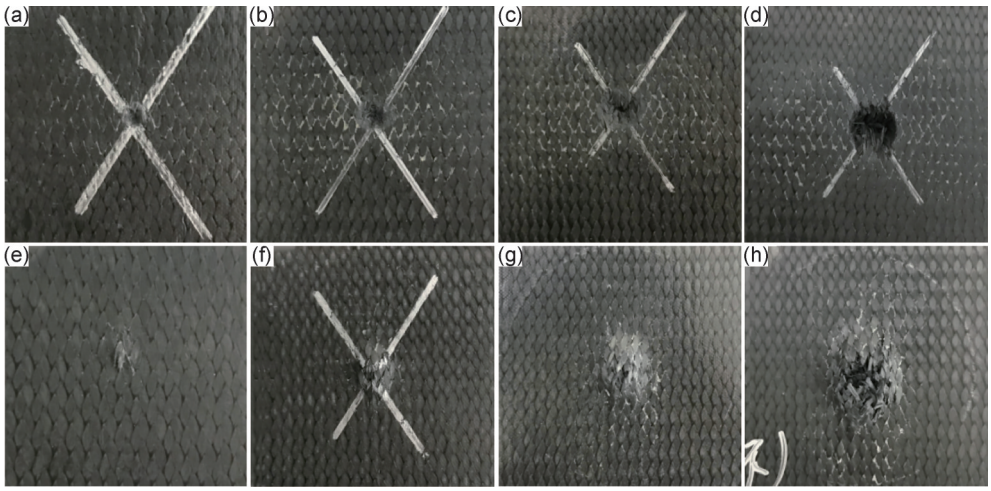


图8　锥形冲头冲击后30°试件表面损伤状况

(a)#4-1上表面;(b)#4-3上表面;(c)#4-5上表面;(d)#4-6上表面;(e)#4-1下表面;(f)#4-3下表面;(g)#4-5下表面;(h)#4-6下表面

Fig.8　Surface damage of 30° braided angle specimens after impact of tapered punch

(a)#4-1 upper surface;(b)#4-3 upper surface;(c)#4-5 upper surface;(d)#4-6 upper surface;(e)#4-1 lower surface;
(f)#4-3 lower surface;(g)#4-5 lower surface;(h)#4-6 lower surface

承受更多次的冲击,损伤的扩展也需要更多冲击能量。试件的基体开裂相比于3D4d-15°试件更容易围绕冲击点扩展,表现为不规则圆形开裂,沿编织方向的扩展不明显。可见编织材料的性能与预制体的相关性较强,编织角度增大,材料的横向力学性能更强。

球形冲头冲击试件的载荷-时间曲线及峰值载荷-次数曲线如图9所示,在前两次冲击后,试件的接触力在峰值处出现明显的波动,而载荷-时间曲线在之后的冲击过程中在峰值处表现较为稳定,这表明,前两次冲击的过程是两种试件初始损伤的主要发生阶段。损伤程度随冲击次数的增加而增加,逐渐扩展加重,试件的冲击抗性逐步降低。如图9(c)所示,在冲击次数较少时,3D4d-15°和3D4d-30°试件表现出相似的冲击响应。曲线在接触力峰值处有相似的波动,当冲击次数继续增加,达到5～20次时,曲线峰值处的表现较为稳定,下降幅度较为缓慢。在冲击次数超过20次以后,接触力峰值处的下降幅度较之前变大,且3D4d-15°试件的下降趋势较比3D4d-30°试件要提前许多。当冲击次数达到28次时,3D4d-15°试件被贯穿,失去冲击抗性。当进行到第44次冲击后,3D4d-30°试件被贯穿。

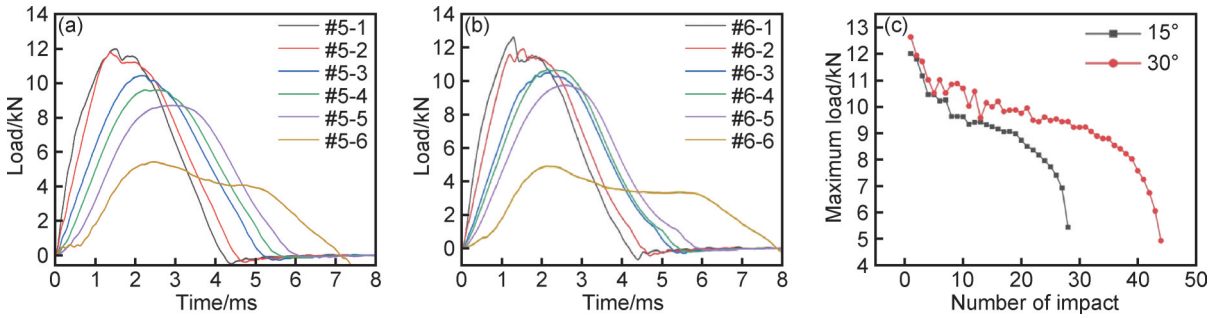


图 9 球形冲头冲击试件的载荷-时间曲线和峰值分布

(a)15°试件;(b)30°试件;(c)峰值载荷对比

Fig.9 Load-time curves and peak value distribution of spherical punch impact specimen

(a)15° specimen;(b)30° specimen;(c)peak load comparison

由两种编织角试件的载荷-时间曲线和峰值分布曲线可以看出,两者在冲击次数较少时表现相似,冲击响应差异较小;并且在冲击次数持续增加的情况下,3D4d-30°试件表现出更好的冲击抗性,而 3D4d-15°试件抗冲击性能下降更快。随着冲击次数的增加,编织板的刚度随之下降,且下降幅度比锥形冲头冲击时更为明显。此外,接触力峰值随着冲击次数的增加下降趋势较快。

试件表面受到球形冲头的冲击损伤如图 10 和图 11 所示,相对于锥头对试件的冲击,球头对试件的损伤在同等冲击次数下更为严重。这是因为球形冲头的冲击接触面积较大,冲击中心局部区域发生更大面积的弯曲变形,从而增大了层间剪切应力,冲头对冲击点的两侧纤维束的挤压作用更强,这种挤压使得纤维束承受更大的应力,导致内部纤维束和基体的破坏更加显著,引起更大面积的层间损伤。加剧了试件损伤的扩展速度,导致了更严重的破坏并减少了试件被击穿所需的冲击次数。

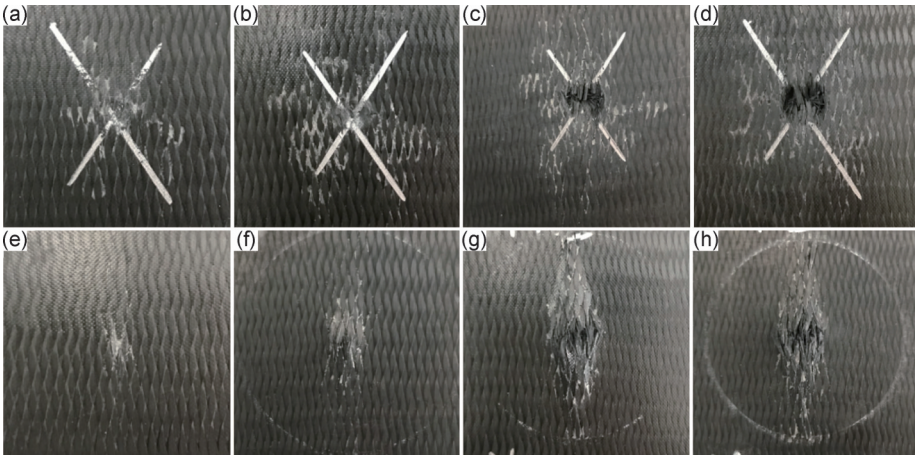


图 10 球形冲头冲击后 15°编织角试件的表面损伤

(a)#5-1 上表面;(b)#5-3 上表面;(c)#5-5 上表面;(d) #5-6 上表面;(e)#5-1 下表面;(f)#5-3 下表面;(g)#5-5 下表面;(h) #5-6 下表面

Fig.10 Surface damage of 15° braided angle specimens after impact of spherical punch

(a)#5-1 upper surface;(b)#5-3 upper surface;(c)#5-5 upper surface;(d)#5-6 upper surface;

(e)#5-1 lower surface;(f)#5-3 lower surface;(g)#5-5 lower surface;(h)#5-6 lower surface

2.2 冲头形状对载荷-时间曲线以及冲击吸收能量的影响

观察图 3,6,9 可见,相同冲击能量情况下,球形冲头和锥形冲头冲击接触时间大于柱形冲头冲击接触时间。以柱形冲头为基准,锥形冲头第 1 次冲击对应的冲击力峰值与冲击接触时间约为柱形冲头的 0.69 倍和 1.32 倍;球形冲头第 1 次冲击对应的冲击力峰值与冲击接触时间约为柱形冲头的 0.73 倍和 1.31 倍。可见冲头形状对冲击过程中冲击力影响较大。冲头形状越钝,则冲击力越大,冲击接触时间越短。反之则冲头形状越尖,冲击力越小,冲击接触时间越长。冲击实验中,试件冲击数据见表 3。

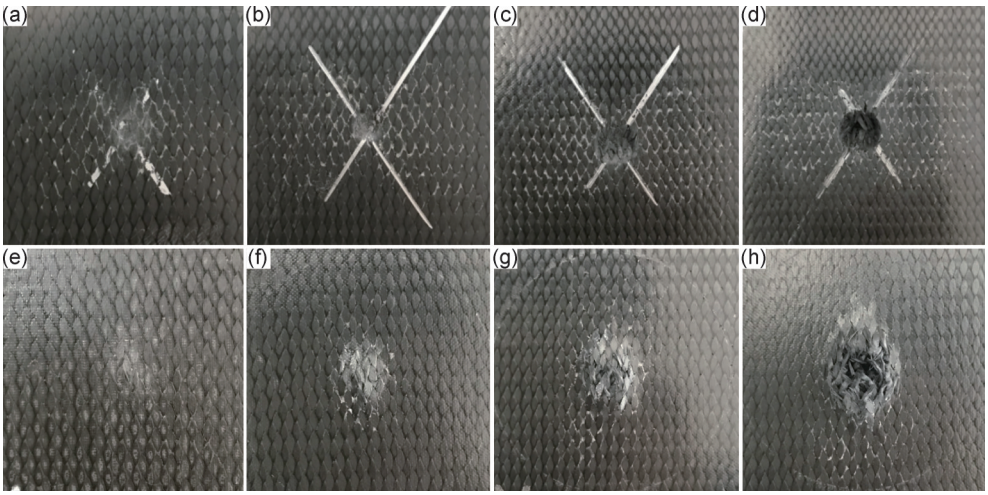


图 11　球形冲头冲击 30°编织角试件的表面损伤

(a)#6-1 上表面;(b)#6-3 上表面;(c)#6-5 上表面;(d) #6-6 上表面;(e)#6-1 下表面;(f)#6-3 下表面;(g)#6-5 下表面;(h) #6-6 下表面

Fig.11　Surface damage of 30° braided angle specimens after impact of spherical punch

(a)#6-1 upper surface;(b)#6-3 upper surface;(c)#6-5 upper surface;(d)#6-6 upper surface;(e)#6-1 lower surface;
(f)#6-3 lower surface;(g)#6-5 lower surface;(h)#6-6 lower surface

表 3　三维编织材料试件冲击数据

Table 3　Impact data of 3D braided material specimen

ID	Weaving angle/(°)	Absorbed energy/J	Peak load/kN	ID	Weaving angle/(°)	Absorbed energy/J	Peak load/kN
#1-1	15	27.17	15.5	#2-1	30	27.13	16.79
#1-2	15	27.26	16.08	#2-2	30	26.97	17.71
#1-3	15	26.76	16.14	#2-3	30	26.84	17.34
#1-4	15	27.09	15.69	#2-4	30	27.53	16.92
#1-5	15	26.69	15.28	#2-5	30	26.62	16.48
#1-6	15	27.25	14.79	#2-6	30	27.04	16.21
#3-1	15	29.13	10.92	#4-1	30	29.45	10.09
#3-2	15	29.64	11.19	#4-2	30	28.86	9.63
#3-3	15	29.79	10.84	#4-3	30	28.75	10.39
#3-4	15	28.89	10.50	#4-4	30	28.45	10.17
#3-5	15	28.52	9.85	#4-5	30	28.66	9.31
#3-6	15	28.67	5.97	#4-6	30	29.03	5.47
#5-1	15	28.14	11.94	#6-1	30	28.31	12.61
#5-2	15	27.64	11.73	#6-2	30	27.79	11.93
#5-3	15	27.98	10.36	#6-3	30	28.29	10.51
#5-4	15	28.76	9.51	#6-4	30	28.53	10.70
#5-5	15	28.88	8.59	#6-5	30	27.97	9.76
#5-6	15	27.65	5.19	#6-6	30	28.63	4.92

2.3　试件内部损伤分析

表 4 所示为试件内部受损面积占全部面积的比例。冲击实验后,试件的超声 C 扫描图如图 12～15 所示。可以看出,编织角度和冲头形状是影响试件内部损伤的两个重要因素。柱形冲头损伤面积较大,锥形冲头和球形冲头损伤面积较小。原因在于,在柱形冲头冲击时,冲头与试件的接触面较大,有更多的纤维束和基体承受了冲击能量。而在锥形、球形冲头的冲击中,试件与锥形冲头的接触面积最小,球形冲头其次,两者接触面积均小于柱形冲头。球形冲头与锥形冲头在冲击实验过程中有相似的接触模式,在两者冲击相同次数时,球形冲头造成的损伤扩展稍慢,但其造成的局部损伤更为严重,试件在较少的冲击次数下被击穿。可以看出球形冲头的冲击更具破坏性。

不同编织角度的试件在冲击后的内部损伤形态存在显著差异。3D4d-15°编织角试件的内部损伤区域

表 4 试件的内部损伤面积占扫描面积的比例

Table 4 Ratio of the internal damage area of the specimens to scanning area after impact

ID	Damage area ratio/%	ID	Damage area ratio/%	ID	Damage area ratio/%
#1-1	20.38	#3-1	6.25	#5-1	8.32
#1-3	20.75	#3-3	12.50	#5-3	18.24
#1-5	26.88	#3-5	15.50	#5-5	20.50
#1-6	32.63	#3-6	20.50	#5-6	21.26
#2-1	34.50	#4-1	19.50	#6-1	16.50
#2-3	43.50	#4-3	27.20	#6-3	35.64
#2-5	53.40	#4-5	39.25	#6-5	36.50
#2-6	61.50	#4-6	46.12	#6-6	42.82

呈现为椭圆形，边缘较为模糊，损伤的扩展方向主要为纵向，横向则较为平缓。而 3D4d-30°试件内部损伤形状则为肺叶形，损伤面积比 3D4d-15°试件更大，损伤的扩展方向在横向和纵向上都较为明显。在两种试件中，3D4d-30°试件纤维束与试件纵向的夹角大于 3D4d-15°试件，纤维束在承受冲击时受力情况不同。损伤的横向扩展也更明显。

3 结论

（1）编织角度影响材料的冲击抗性和损伤的扩展，相比之下，3D4d-30°试件在抗冲击性方面优于 3D4d-15°试件。当编织角度较小时，损伤主要呈条状

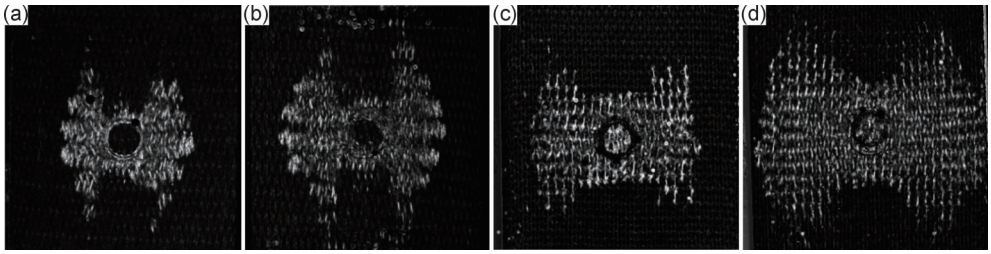


图 12 柱形冲头冲击后编织角 15°试件和编织角 30°试件的内部损伤

(a)#1-1；(b)#1-6；(c)#2-1；(d)#2-6

Fig.12 Internal damage of 15° braided angle and 30° braided angle specimens after impact of cylindrical punch

(a)#1-1；(b)#1-6；(c)#2-1；(d)#2-6

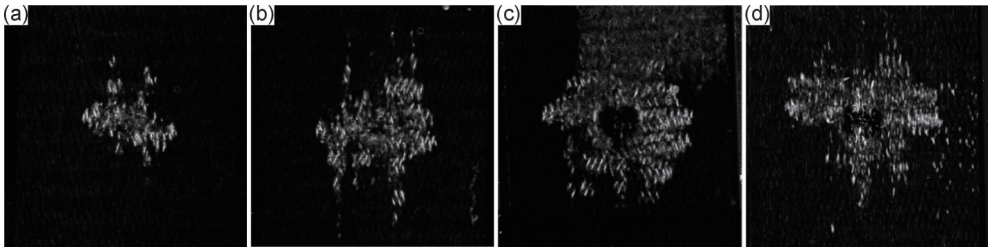


图 13 锥形冲头冲击后 15°编织角的试件的内部损伤

(a)#3-1；(b)#3-3；(c)#3-5；(d)#3-6

Fig.13 Internal damage of 15° braided angle specimens after impact of tapered punch

(a)#3-1；(b)#3-3；(c)#3-5；(d)#3-6

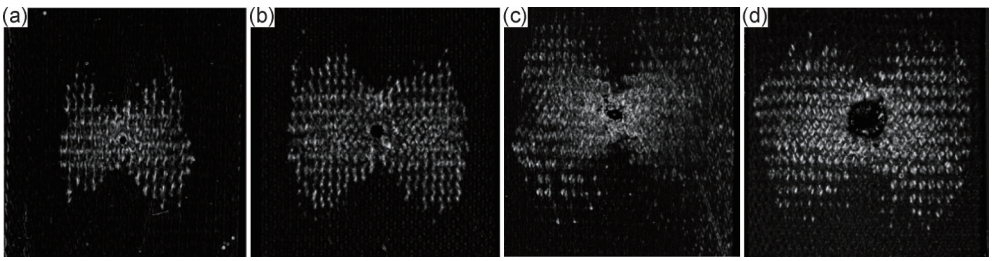


图 14 锥形冲头冲击后 30°编织角试件的内部损伤

(a)#4-1；(b)#4-3；(c)#4-5；(d)#4-6

Fig.14 Internal damage of 30° braided angle specimens after impact of tapered punch

(a)#4-1；(b)#4-3；(c)#4-5；(d)#4-6

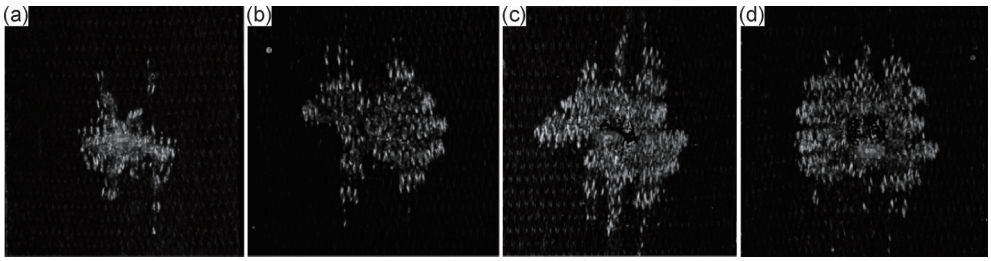


图 15　球形冲头冲击后 30°编织角试件的内部损伤
(a)#6-1;(b)#6-3;(c)#6-5;(d)#6-6

Fig.15　Internal damage of 30° braided angle specimens after impact of spherical punch
(a)#6-1;(b)#6-3;(c)#6-5;(d)#6-6

沿纵向向外延伸;而当编织角度较大时,损伤则会向四周扩散,形成近似圆形的破坏区域,3D4d-15°试件的损伤的扩展方向主要集中在纵向,3D4d-30°试件的损伤则在纵向和横向上均匀扩展。编织角越大,材料的横向抗冲击性能越强,表现出更强的力学稳定性;编织角越小,材料的横向抗冲击性能则较弱。

(2)在冲头形状方面,柱形冲头有较大的冲击接触面积,破坏面积较大,但破坏程度较轻,试件的冲击抗性下降较小。锥形冲头冲击接触面积较小,在相同冲击能量下,对试件的穿透效果更加显著。峰值载荷下降的幅度随冲击次数的增加而逐渐加大,刚度下降幅度较小。球形冲头对试件造成的损伤最为严重,造成的损伤扩展稍慢但局部破坏更严重。总体上,锥形和球形冲头对试件的冲击响应相似且损伤区域较小,但对试件的冲击抗性造成的破坏相比与柱形冲头来说更大。

参考文献

[1] OLIVEIRA T L L, ZITOUNE R, ANCELOTTI A, et al. Smart machining: monitoring of CFRP milling using AE and IR [J]. Composite Structures. 2020,249:112611

[2] AAMIR M, TOLOUEI-RAD M, GIASIN K, et al. Recent advances in drilling of carbon fiber-reinforced polymers for aerospace applications: a review[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2019,105(5/6): 2289-2308.

[3] GENG D, LIU Y, SHAO Z, et al. Delamination formation and suppression during rotary ultrasonic elliptical machining of CFRP[J]. Composites Part B: Engineering,2020,183: 107698.

[4] ZHAO Z, LI B, MA P. Advances in mechanical properties of flexible textile composites [J]. Composite Structures, 2023, 303: 116350.

[5] MARÍN J C, GRACIANI E. Normal stress flow evaluation in composite aircraft wing sections by strength of material models [J]. Composite Structures, 2022, 282: 115088.

[6] SHAHGHOLIAN-GHAHFAROKHI D, AGHAEI-RUZBAHANI M, RAHIMI G. Vibration correlation technique for the buckling load prediction of composite sandwich plates with iso-grid cores [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 142: 392-404.

[7] WANG B, HU J, LI Y, et al. Mechanical properties and failure behavior of the sandwich structures with carbon fiber-reinforced X-type lattice truss core [J]. Composite Structures, 2018, 185: 619-633.

[8] 窦宏通,王晓旭,刘晓东,等. 三维异型纺织复合材料的预制体织造技术及材料力学性能研究进展[J]. 材料工程,2023,51(4): 88-102.
DOU H T, WANG X X, LIU X D, et al. Research progress in preform weaving technology and material mechanical properties of three-dimensional special-shaped textile composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51(4): 88-102.

[9] 王欢,李嘉禄,樊威. 纤维体积分数对三维编织复合材料 T 型梁模态性能的影响[J]. 材料工程,2015,43(9): 80-86.
WANG H, LI J L, FAN W. Effect of fiber volume fraction on modal properties of three-dimension braided composite T-beams [J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(9): 80-86.

[10] XUE D, HE L, TAN S, et al. Effect of carbon fiber layers on braiding properties during three-dimensional weaving [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2023, 237 (7): 1692-1705.

[11] 李嘉禄,魏丽梅,杨红娜. 碳纤维三维编织复合材料的结构对拉伸和弯曲性能的影响[J]. 材料工程,2004,32(12): 3-7.
LI J L, WEI L M, YANG H N. Influence of structures of carbon fiber three dimensional braiding composites on their tensile and bending properties[J]. Journal of Materials Engineering, 2004, 32 (12): 3-7.

[12] 任涛,彭昂,吴大可,等. 冲击位置对复合材料加筋板冲击后压缩行为影响试验[J]. 复合材料学报,2022,39(2): 788-801.
REN T, PENG A, WU D K, et al. Experimental study on the influence of impact positions on compression-after-impact behavior of composite stiffened panels [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(2): 788-801.

[13] HOU Y, HUANG J, LIU Y, et al. Low-velocity impact and compression after impact behaviors of rib-stiffened CFRP panels: experimental and numerical study[J]. Aerospace Science and Technology, 2024, 146: 108948.

[14] SHI B, LIU S, SIDDIQUE A, et al. Comparisons on impact fracture behavior between three-dimensional four directional and five directional braided composite materials [J]. International Journal

of Damage Mechanics,2019,28(7): 990-1020.

[15] ZHOU W,ZHANG P F,YIN H F,et al. Flexural damage behavior of carbon fiber three-dimensional braided composites using acoustic emission and micro-CT[J]. Materials Research Express, 2019,6(11): 115601.

[16] 许善迎,谭焕成,关玉璞,等. 三维四向编织复合材料力学性能预测及实验验证[J]. 材料工程,2018,46(6): 132-140.
XU S Y,TAN H C, GUAN Y P, et al. Predication and experimental verification on mechanical properties of three-dimensional and four-direction braided composites[J]. Journal of Materials Engineering,2018,46(6): 132-140.

[17] 谭焕成,许善迎,黄雄,等. 三维四向编织复合材料宏观有限元模型冲击损伤仿真及试验验证[J]. 复合材料学报,2018,35(5): 1139-1148.
TAN H C,XU S Y,HUANG X,et al. Macro-scale finite element model for impact damage simulation and experimental verification of three-dimensional four-directional braided composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2018,35(5): 1139-1148.

[18] TAN H, LIU L, GUAN Y, et al. Investigation of three-dimensional braided composites subjected to steel projectile impact: experimental study and numerical simulation [J]. Thin-Walled Structures,2019,140: 144-156.

[19] LI Y Y,LYU Z Q,WANG P,et al. Finite element analyses on low-velocity impact responses of three-dimensional braided composites[J]. Fibers and Polymers,2021,22(8): 2296-2305.

[20] 严实,孙雨果,吴林志,等. 板状三维四向编织复合材料压缩细观破坏机理的实验研究[J]. 复合材料学报,2007,24(4): 133-139.
YAN S,SUN Y G,WU L Z,et al. Compressive experimental investigation of 3D 4-directional braided composites board on mesoscopic failure mechanism[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007,24(4): 133-139.

[21] 严实,郭留雨,赵金阳,等. 三维五向编织复合材料低速冲击及冲击后压缩性能实验研究[J]. 材料工程,2017,45(12): 65-70.
YAN S,GUO L Y,ZHAO J Y,et al. Experimental investigation on low-velocity impact and compression after impact properties of three-dimensional five-directional braided composites[J]. Journal of Materials Engineering,2017,45(12): 65-70.

[22] 严实,赵金阳,陆夏美,等. 基于声发射技术的三维编织复合材料低速冲击损伤分析[J]. 材料工程,2014,42(7): 92-97.
YAN S,ZHAO J Y,LU X M,et al. Low-velocity impact response of 3D braided composites by acoustic emission[J]. Journal of Materials Engineering,2014,42(7): 92-97.

[23] 郑海燕,刘元镛,郭伟国. 编织型复合材料的冲击及冲击后压缩强度的试验研究[J]. 航空材料学报,2002,22(3): 33-37.
ZHENG H Y,LIU Y Y,GUO W G. The experimental research of impact and CAI of woven composite[J]. Journal of Aeronautical Materials,2002,22(3): 33-37.

[24] 孙梦尧,张典堂,钱坤. 三维五向编织复合材料低速冲击损伤区域的量化表征[J]. 复合材料学报,2023,40(9): 5411-5422.
SUN M Y,ZHANG D T,QIAN K. Quantitative characterization of low-velocity impact damage in three dimensional five-directional braided composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2023,40(9): 5411-5422.

[25] 凡丽梅,董方旭,段剑,等. 快速无损检测技术在复合材料构件中应用与发展[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版),2021,35(4): 32-38.
FAN L M,DONG F X,DUAN J,et al. Application and development of faster non-deatructive testing technology in composite materials [J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences),2021,35(4): 32-38.

[26] 朱学耕. 超声检测在复合材料中的应用现状[J]. 科技视界,2015(34): 163.
ZHU X G. Ultrasound application in composites[J]. Science & Technology Vision,2015(34): 163.

[27] 李治应,刘菲菲,杨玉森,等. 复合材料机身壁板的超声相控阵检测[J]. 航空制造技术,2021,64(19): 82-89.
LI Z Y,LIU F F,YANG Y S,et al. Ultrasonic phased array inspection of composite fuselage panel[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2021,64(19): 82-89.

[28] ATAS C, LIU D. Impact response of woven composites with small weaving angles[J]. International Journal of Impact Engineering,2008,35(2): 80-97.

[29] 贾佳乐. 碳纤维复合材料加筋板低速冲击及其剩余压缩性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学,2021
JIA J L. Investigation on low velocity impact and residual compressive properties of reinforced composite skin plate[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology,2021

基金项目:国家自然科学基金项目(11972140)
收稿日期:2024-12-31;**录用日期**:2025-02-09
通讯作者:严实(1977—),男,教授,博士,主要从事三维编织材料力学性能表征研究,联系地址:黑龙江省哈尔滨市南岗区学府路52号哈尔滨理工大学(150080),E-mail:yanshi@hrbust.edu.cn

(本文责编:解　宏)