

爆炸破片冲击下碳纤维复合材料的吸能性能和失效机制数值模拟

周志鹏 曹辉 付琼 王新文 王志勇

Numerical Simulation of Energy Absorption Performance and Failure Mechanism of CFRP Composites under Fragment Impact after Explosion

ZHOU Zhipeng, CAO Hui, FU Qiong, WANG Xinwen, WANG Zhiyong

引用本文:

周志鹏, 曹辉, 付琼, 等. 爆炸破片冲击下碳纤维复合材料的吸能性能和失效机制数值模拟[J]. 高压物理学报, 2025, 39(7):074204. DOI: 10.11858/gywlxb.20240882

ZHOU Zhipeng, CAO Hui, FU Qiong, et al. Numerical Simulation of Energy Absorption Performance and Failure Mechanism of CFRP Composites under Fragment Impact after Explosion[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(7):074204. DOI: 10.11858/gywlxb.20240882

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240882>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

碳纤维复合靶板抗破片冲击性能研究

Study on Anti-Fragment Impact Performance of Carbon Fiber Reinforced Plastics

高压物理学报. 2024, 38(4): 044103 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20240720>

3D打印浆砌层合结构复合材料层间断裂韧性的数值模拟

Numerical Simulation on Interlaminar Fracture Toughness of 3D Printed Mortar Laminated Composites

高压物理学报. 2020, 34(4): 044206 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190827>

碳纤维增强复合材料层合板的抗冲击性能

Impulsive Resistance of the CFRP/Epoxy Laminate

高压物理学报. 2020, 34(2): 024101 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20190822>

碳纤维-手撕钢复合材料的力学性能及除冰功能

Mechanical Property and De-Icing Function of Carbon Fibre-Hand-Torn Steel Composites

高压物理学报. 2023, 37(5): 054101 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230661>

碳纤维增强复合材料夹芯板的砰击损伤特性

Damage Characteristics of Carbon Fiber Reinforced Composite Sandwich Panels Subjected to Water Slamming Loading

高压物理学报. 2023, 37(1): 014203 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20220653>

Zr基非晶破片对碳纤维复合靶及后效铝靶的侵彻试验研究

Experimental Study on the Penetration of Zr-Based Amorphous Fragment into Carbon Fiber Composite Target and Post-Effect Aluminum Target

高压物理学报. 2024, 38(2): 025101 <https://doi.org/10.11858/gywlxb.20230764>

爆炸破片冲击下碳纤维复合材料的 吸能性能和失效机制数值模拟

周志鹏¹, 曹 辉², 付 琼¹, 王新文¹, 王志勇³

(1. 山西警察学院治安系, 山西 太原 030401;
2. 太原理工大学机械工程学院, 山西 太原 030024;
3. 太原理工大学航空航天学院, 山西 太原 030024)

摘要: 碳纤维增强聚合物 (carbon fibre-reinforced polymer, CFRP) 复合材料在破片冲击作用下的复杂侵彻行为和失效机制尚不明确, 这一现状制约了其在防护领域的应用。针对实验手段在获取侵彻历程信息时面临的监测难度大、成本高昂等问题, 构建了 CFRP 复合材料破片冲击有限元分析 (finite element analysis, FEA) 模型, 采用基于应变的三维 Hashin 失效准则, 并引入强度的速率依赖性关系。通过与实验结果对比, 验证了 FEA 模型的有效性。模拟结果表明, 在不同 TNT 当量和破片距爆点距离的条件下, 破片的初速度和撞击倾角存在显著差异。将破片相对于靶板上不同平面间的倾角分别定义为 α 和 β 。固定冲击速度仅改变倾角 α 时, 试样的吸能效果和冲击速度敏感性未表现出明显差异, 而改变倾角 β 时试样的吸能效果和冲击速度敏感性差异显著。当 $\beta=0^\circ$ 时, CFRP 复合材料在 195~392 m/s 的速度范围内表现出明显的冲击速度敏感性。当 $\alpha=0^\circ$ 时, CFRP 复合材料在 195~392 m/s 的冲击速度范围内的冲击速度敏感性随着 β 的增大而逐渐减弱。可视化的侵彻过程和破坏区域表明, 接触面积、接触时间和变形程度是导致 CFRP 复合材料吸能效果和冲击速度敏感性差异的重要因素。

关键词: 破片冲击; 碳纤维增强聚合物复合材料; 有限元模拟; 失效行为

中图分类号: O521.9; TB332

文献标志码: A

碳纤维增强聚合物 (carbon fibre-reinforced polymer, CFRP) 复合材料以其高比强度、高比模量、耐腐蚀、抗疲劳以及良好的可设计性等突出特点, 广泛应用于航空航天、发电储能和国防装备等领域^[1-4], 并逐渐成为警用装备发展的基础性、战略性和先导性材料。然而, CFRP 复合材料的固有脆性严重限制了其抗冲击性能^[5-6]。随着爆炸袭击形式的多样化, 对 CFRP 构件的抗冲击性能提出了更高的要求。深入理解 CFRP 复合材料的失效机制进而开展装备研发, 是预防爆炸冲击导致的灾难性事故的关键途径。高速破片侵彻破坏是爆炸环境下 CFRP 复合材料常见的破坏形式, 其引发的内部失效往往是导致灾难性事故的重要隐患^[7]。然而, CFRP 复合材料在冲击载荷下的失效机制十分复杂, 主要通过层间分层、基体开裂、纤维断裂、纤维脱粘和纤维滑移等损伤失效模式的协同作用来吸收冲击能量, 与传统材料的损伤失效模式存在较大差异^[8]。此外, 其纤维相与树脂相的应变率敏感性差异较大, 可能导致 CFRP 复合材料在随机破片侵彻下的失效模式呈现显著差异。目前, 已有较多关于 CFRP 复合材料抗侵彻性能的研究。Zhou 等^[9]研究了冲击角度、冲击器直径、铺层方向和堆叠顺序等因素对 CFRP 层合

* 收稿日期: 2024-09-02; 修回日期: 2024-10-11

基金项目: 国家自然科学基金 (12272257); 山西省基础研究计划资助项目 (202403021222493)

作者简介: 周志鹏 (1993—), 男, 博士, 讲师, 主要从事爆炸冲击与先进防护研究. E-mail: zzp_wsry@163.com

通信作者: 王新文 (1973—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事爆炸防控技术研究. E-mail: wxwls@sina.com

王志勇 (1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: wangzhiyong@tyut.edu.cn

板低速冲击响应的影响,通过凹痕深度、分层损伤投影面积和能量耗散等参数评估了损伤特性及其相关性。彭捷等^[10]利用单级轻气炮开展了 CFRP 层合板高速冲击实验,通过高速摄影仪监测撞击过程,采用 C-scan 技术和显微镜表征损伤区域,探究了 CFRP 层合板的能量吸收率、损伤形式及能量吸收机制随冲击速度的变化规律。然而,实验手段获取侵彻历程信息的成本高昂,且弹丸穿透靶板后产生的碎片会对弹丸轨迹和剩余速度的监测造成干扰。随着材料本构的发展成熟和计算方法的不断优化,数值模拟的精度和可靠性显著提升,有限元分析(finite element analysis, FEA)方法已成为实验研究的有效补充手段^[11]。尽管 FEA 方法在 CFRP 复合材料抗冲击性能研究中得到广泛应用^[12-13],但其在随机破片侵彻条件下的吸能机制和破坏机制尚不明确。因此,利用 FEA 方法开展高速破片侵彻 CFRP 复合材料的仿真研究具有重要意义。本研究基于 ABAQUS/Explicit 2017 内嵌的 CONWEP 程序建立爆炸载荷作用下钛合金破片运动分布的 FEA 模型,设定破片速度和破片倾角;构建 CFRP 复合材料在破片冲击下的分析模型,考虑速率依赖性并采用三维 Hashin 失效准则来评估层合板的力学性能,通过自定义的 Vumat 子程序计算 FEA 模型;通过与实验结果对比,验证 FEA 模型的有效性;通过分析破片剩余速度历程,研究冲击速度和破片倾角对高速冲击条件下 CFRP 层合板吸能效果的影响;通过可视化内部损伤破坏过程和变形区域,揭示 CFRP 复合材料在不同冲击速度和破片倾角下的吸能机制以及差异化吸能效果的内在原因。

1 数值模型

由于 CFRP 层合板的非均质性、界面分层以及冲击速度敏感性等特点,其在高速冲击作用下的动态力学响应十分复杂。为降低实验成本与风险,并可视化复合材料在破片侵彻过程中的内部结构、损伤演化和失效机制以及贯穿后的破坏模式,本研究基于 ABAQUS 构建了 CFRP 层合板的弹道冲击模型,并通过自定义的 Vumat 子程序计算 FEA 模型。

1.1 有限元模型

基于 ABAQUS 内嵌的 CONWEP 程序建立爆炸载荷作用下钛合金破片运动分布模型,该半经验方法无需考虑炸药类型,可减少计算时间。如图 1(a)所示,模型主要由炸点(RP-1)和破片群组成。在爆炸暴恐事件中,常见的爆炸装置为体积小、当量低的简易爆炸装置。为此,设置炸点距破片群中心 50 mm,选取 500、1 000、1 500 和 2 000 g 的 TNT 当量,破片尺寸设定为 20 mm×20 mm×4 mm,破片密度为 4.4 g/cm³,破片之间采用通用接触算法。图 1(b)为 CFRP 层合板的破片冲击模型,主要由破片、靶板和 2 个夹具组成。参考 ASTM 7136M 中试样 4~6 mm 的厚度标准,该工作中靶板由 24 层纤维/环氧复

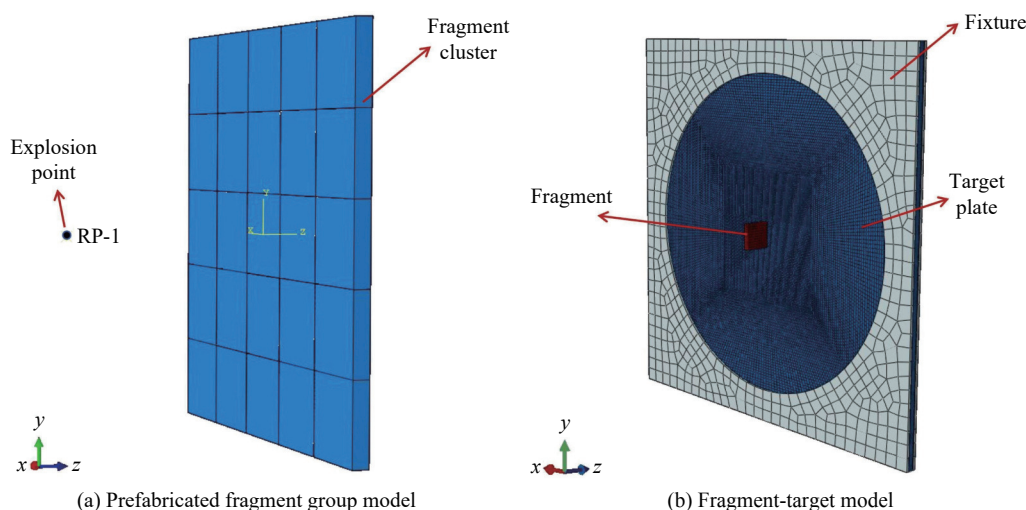


图 1 几何模型

Fig. 1 Geometric model

合材料组成,厚度为 4.56 mm,采取 $[0/90]_{12}$ 铺层方式。另外,为避免尺寸效应的影响(破片与靶板的长度比值应大于 1/10),靶板尺寸设定为 300 mm×300 mm。基于 CONWEP 模型的计算结果,赋予单个破片不同的倾角和初速度(v_1),初速度范围(195~392 m/s)为不同当量 TNT 下破片最高速度的集合,使其仅沿 z 方向自由运动($v_x=v_y=0$)。夹具孔洞的直径设置为 250 mm,固定夹具在任意方向的自由度,从而固定靶板并对其施加一定的压力。

CFRP 层合板的材料参数如表 1 所示,其中: ρ 为密度, E_{11} 、 E_{22} 、 E_{33} 为弹性模量, μ_{12} 、 μ_{13} 、 μ_{23} 为泊松比, G_{12} 、 G_{13} 、 G_{23} 为剪切模量, F_{1T} 、 F_{2T} 、 F_{3T} 为拉伸强度, F_{1C} 、 F_{2C} 、 F_{3C} 为压缩强度, S_{12} 、 S_{13} 、 S_{23} 为剪切强度, G_{11} 、 G_{22} 、 G_{33} 为断裂韧性。由于破片和夹具的刚度远大于靶板,可设定为刚体。模型采用 C3D8R 网格,为提高计算效率,采用差异性网格划分,如图 1(b) 所示,靶板中间密集区的网格尺寸为 2 mm,外围网格尺寸为 6 mm。以通用接触算法模拟破片、靶板与夹具之间的相互作用,切向设置摩擦因数为 0.3 的惩罚摩擦公式,法向设置“硬”接触算法。

表 1 CFRP 层合板的材料参数^[14]
Table 1 Material parameters of CFRP laminate^[14]

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E_{11}/GPa	E_{22}/GPa	E_{33}/GPa	μ_{12}	μ_{13}	μ_{23}	G_{12}/GPa
1.68	139	6.655	6.655	0.013 8	0.013 8	0.445	3.346
G_{13}/GPa	G_{23}/GPa	F_{1T}/MPa	F_{2T}/MPa	F_{3T}/MPa	F_{1C}/MPa	F_{2C}/MPa	F_{3C}/MPa
3.346	2.302	2 961	64	64	2 665	127	127
S_{12}/MPa	S_{13}/MPa	S_{23}/MPa	$G_{11}/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2})$	$G_{22}/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2})$	$G_{33}/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2})$		
63	63	63	62	22	22		

1.2 材料模型

纤维增强聚合物复合材料通常被认为是横观各向同性材料^[15]。考虑到 CFRP 复合材料在高速冲击下的连续应变,采用基于应变的三维 Hashin 失效准则判断损伤起始。在高速冲击下,CFRP 复合材料的力学性能通常会表现出比较明显的应变率效应,其中强度的速率依赖关系为

$$S = S_0 \left(1 + C \ln \frac{|\dot{\epsilon}|}{\dot{\epsilon}_0} \right) \quad (1)$$

式中: S 为动态强度,MPa; S_0 为准静态强度,MPa; $\dot{\epsilon}$ 为当前时间步的应变率, s^{-1} ; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率, s^{-1} ; C 为应变率硬化修正系数。

采用基于连续介质力学的非线性本构模型描述材料损伤的发生与演变过程。为降低高速冲击过程中网格对大变形的敏感性,在损伤演化方程中引入断裂能 G_i ($i=1, 2, 3$),损伤演化方程为^[16]

$$\begin{cases} d_{Lt} = 1 - e^{-\sigma_{11}^{ft} \epsilon_{11}^{ft} (f_{Lt}-1)/G_1} / f_{Lt} \\ d_{Lc} = 1 - e^{-\sigma_{11}^{fc} \epsilon_{11}^{fc} (f_{Lc}-1)/G_1} / f_{Lc} \\ d_{Tt} = 1 - e^{-\sigma_{22}^{ft} \epsilon_{22}^{ft} (f_{Tt}-1)/G_2} / f_{Tt} \\ d_{Tc} = 1 - e^{-\sigma_{22}^{fc} \epsilon_{22}^{fc} (f_{Tc}-1)/G_2} / f_{Tc} \\ d_{Zt} = 1 - e^{-\sigma_{33}^{ft} \epsilon_{33}^{ft} (f_{Zt}-1)/G_3} / f_{Zt} \\ d_{Zc} = 1 - e^{-\sigma_{33}^{fc} \epsilon_{33}^{fc} (f_{Zc}-1)/G_3} / f_{Zc} \end{cases} \quad (2)$$

式中: d 为网格损伤; σ_{ij} 为材料的二阶应力张量分量,MPa; ϵ_{kl} 为材料的二阶应变张量分量; f 为应力。下标 L、T 和 Z 表示网格上正交坐标系的 3 个方向,下标 t 和 c 分别表示拉伸和压缩,上标 f,t 和 f,c 分别表示拉应力和压应力。

采用 Murakami-Ohno 模型描述 CFRP 复合材料的损伤演化,沿 L、T 和 Z 方向的损伤分别为

$$\begin{cases} D_L = \max(d_{Ll}, d_{Lc}) \\ D_T = \max(d_{Tl}, d_{Tc}) \\ D_Z = \max(d_{Zl}, d_{Zc}) \end{cases} \quad (3)$$

$C(D)_{ijkl}$ 为四阶损伤刚度张量, 表示为

$$C(D) = \begin{bmatrix} b_L^2 C_{11} & b_L b_T C_{12} & b_L b_Z C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & b_T^2 C_{22} & b_T b_Z C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & b_Z^2 C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & \text{sym} & & b_{LT} C_{44} & 0 & 0 \\ & & & & b_{LT} C_{44} & 0 \\ & & & & & b_{TZ} C_{66} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{cases} b_L = 1 - D_L \\ b_T = 1 - D_T \\ b_Z = 1 - D_Z \\ b_{LT} = \left[\frac{2(1 - D_L)(1 - D_T)}{2 - D_L - D_T} \right]^2 \\ b_{TZ} = \left[\frac{2(1 - D_T)(1 - D_Z)}{2 - D_T - D_Z} \right]^2 \\ b_{ZL} = \left[\frac{2(1 - D_Z)(1 - D_L)}{2 - D_Z - D_L} \right]^2 \end{cases} \quad (5)$$

在高速冲击过程中, 分层破坏被认为是复合材料层合板的主要破坏模式, 对层合板的抗冲击性能有显著影响。因此, 设置实际厚度为 0.001 mm 的内聚力单元模拟界面层, 采用二次牵引准则确定界面初始损伤, 即

$$\left(\frac{t_n}{t_n^0} \right)^2 + \left(\frac{t_s}{t_s^0} \right)^2 + \left(\frac{t_t}{t_t^0} \right)^2 = 1 \quad (6)$$

式中: t_n 为内聚力单元的法向应力分量, MPa; t_s 为内聚力单元的第一剪切方向应力分量, MPa; t_t 为内聚力单元的第二剪切方向应力分量, MPa; t_n^0 为法向界面强度, MPa; t_s^0 为第一剪切方向界面强度, MPa; t_t^0 为第二剪切方向界面强度, MPa。

当二次应力破坏函数的值达到 1.0 时, 界面开始发生损伤。界面的损伤演化由 Benzeggagh-Kenane 定律控制

$$G_n^C + \left(G_s^C - G_n^C \right) \left(\frac{G_s + G_t}{G_n + G_t} \right)^\eta = G_t^C \quad (7)$$

式中: G_n^C 为法向临界断裂能量释放速率, N/mm; G_s^C 为第一剪切方向临界断裂能量释放速率, N/mm; G_t^C 为第二剪切方向临界断裂能量释放速率, N/mm; G_n 为 t_n 做的功, mJ; G_s 为 t_s 做的功, mJ; G_t 为 t_t 做的功, mJ; η 为材料系数。

CFRP 层合板界面内聚力单元的材料参数^[17]如表 2 所示。

表 2 界面内聚力单元的材料参数^[17]
Table 2 Material parameters of cohesive elements^[17]

t_n^0/MPa	t_s^0/MPa	t_t^0/MPa	$G_n^C/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	$G_s^C/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	$G_t^C/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$	η
50	90	90	0.52	0.92	0.92	1.5

1.3 数值验证

采用数值模拟方法对 Du 等^[17]的靶板类型(L45)和实验工况进行复现, 将模拟结果与实验结果进

行对比。如图 2 所示, 模拟所得速度阈值与文献 [17] 一致, 模拟与实验得到的速度历程曲线趋同, 最大误差为 7.3 m/s, 相对误差小于 10%。值得一提的是, 同一时刻两种工况的模拟结果均略小于实验结果, 其成因可能是实验中层合板试样存在缺陷以及破片角度难以精准控制。此外, 图 3 展示了 L45 靶板撞击面和背面的冲击破坏模式。靶板撞击面弹孔呈矩形, 破坏区域明显小于背面, 靶板背面破坏区域有明显的分层破坏和面外变形, 所得破坏特征与文献 [17] 相同。结果表明, 该有限元模型很好地描述了 CFRP 层合板的弹道冲击响应和损伤破坏行为, 验证了有限元模型的有效性。

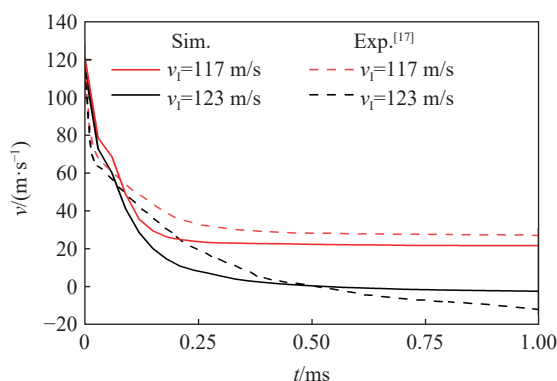


图 2 模拟与实验^[17]所得速度历程曲线对比

Fig. 2 Comparison of velocity history curves obtained by simulation and experiment^[17]

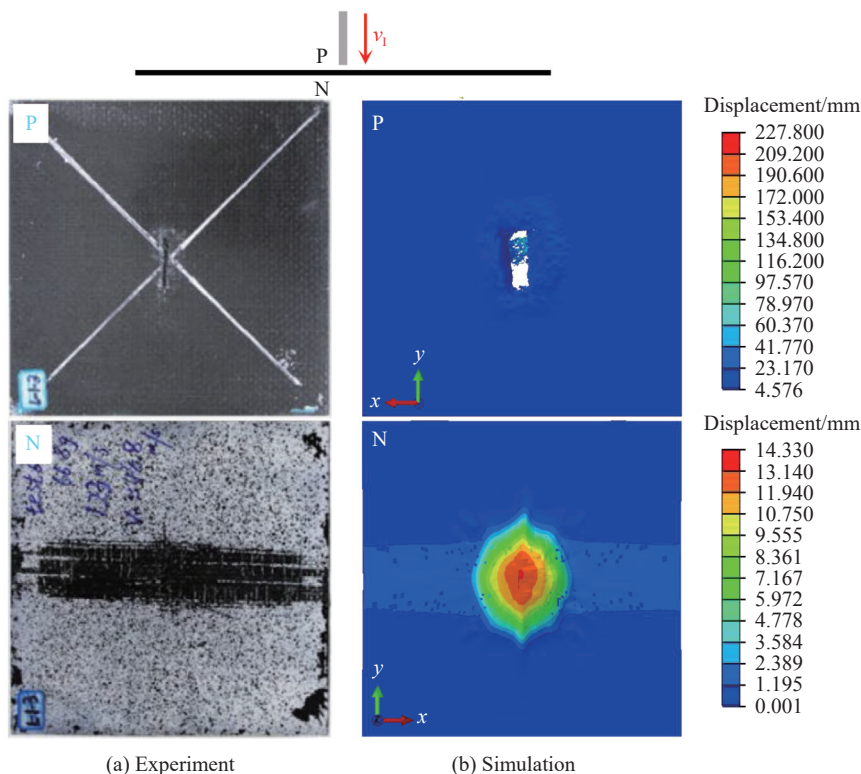


图 3 实验结果^[17]与模拟结果的对比(P 和 N 分别表示试样的正面与背面)

Fig. 3 Comparison between experimental results^[17] and simulation results (P and N represent the front and back of the specimen, respectively)

将靶板中心区域的网格尺寸分别设定为 1.5、2.0 和 3.0 mm, 对比输出的速度-时间曲线和变形区域, 对网格收敛性进行了验证。如图 4 所示, 3 种网格密度下的破片速度-时间曲线基本一致。由图 5 可知, 3 种网格密度下靶板在 0.3 ms 时的变形区域和破坏形貌十分接近, 可忽略网格尺寸的影响。

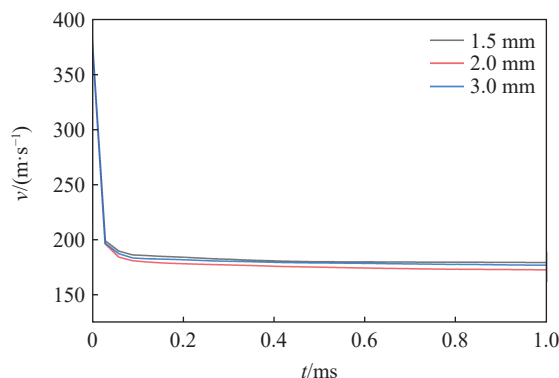


图 4 靶板中心区域网格尺寸分别为 1.5、2.0 和 3.0 mm 时破片速度-时间曲线

Fig. 4 Velocity-time curves of fragments when the mesh size in the center area of the target plate is 1.5, 2.0 and 3.0 mm, respectively

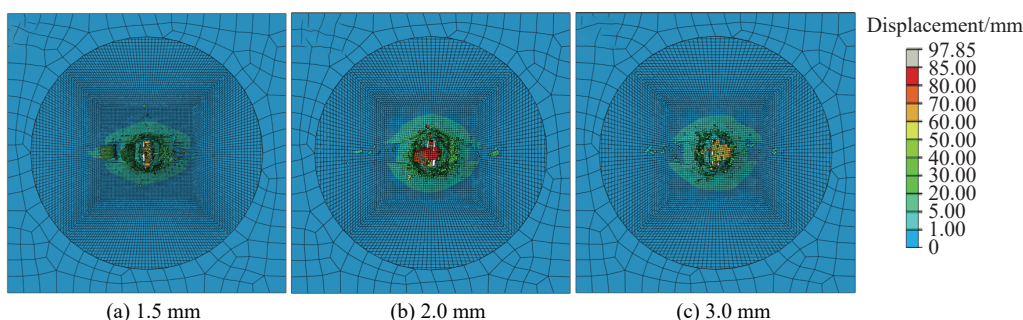


图 5 中心区域网格尺寸分别为 1.5、2.0 和 3.0 mm 时靶板的变形区域和破坏形貌

Fig. 5 Deformation region and failure morphology of target plates with mesh size of 1.5, 2.0 and 3.0 mm in the central region, respectively

2 结果与讨论

2.1 破片扩散状态及能量吸收

破片是爆炸杀伤的主要形式之一,探究影响破片杀伤效果的因素具有重要价值。为了有效掌握爆炸后破片的扩散特性,还原破片对 CFRP 层合板的毁伤效果,在模拟时先采用 CONWEP 程序对预制破片施加爆炸载荷,并设定不同的 TNT 当量,由此获取特定破片在不同 TNT 当量下的冲击速度和飞行姿态。在实际爆炸中,破片距爆点的距离不同,可能产生不同的毁伤效果。如图 6(a) 所示,对预制破片群的破片位置进行标注,破片距爆点的距离随着标注数字的增大而增加。可以发现,不同数字标注对应的破片在爆炸载荷作用下具有不同的飞行姿态(图 6(b))。此外,正如图 6(c)~图 6(f) 所示,在 500、1 000、1 500 和 2 000 g 的 TNT 当量下,破片群具有不同的冲击速度,分别为 40~195、94~293、128~350 和 163~392 m/s。在相同 TNT 当量下,不同位置破片的冲击速度存在明显差异。

爆炸载荷下破片往往具有随机的飞行姿态,破片撞击靶板时的倾角可能是影响毁伤效果的重要因素。如图 7 所示,本工作分别考虑了 y - z 平面和 x - z 平面上破片与靶板间的倾角,将其定义为 α 和 β ,其中, α 的取值为 0° 、 15° 、 30° 和 45° , β 为 0° 、 22.5° 、 45.0° 、 67.5° 和 90.0° 。将 $\beta=0^\circ$ 时被不同倾角 α 破片撞击的靶板定义为 S-A 型试样,将 $\alpha=0^\circ$ 时被不同倾角 β 破片撞击的靶板定义为 S-B 型试样,分别对其进行编号。设破片在 500、1 000、1 500 和 2 000 g 的 TNT 当量下的最高速度为初速度,图 8 为不同倾角破片的冲击速度-时间曲线。当 $\beta=0^\circ$ 时,多种倾角 α 破片的剩余速度均随着初速度的增大而显著增大,可以认为 S-A 型试样均具有显著的冲击速度敏感性,如图 8(a)~图 8(d) 所示。另一方面,当 $\alpha=0^\circ$,随着 β 的增大,破片的剩余速度-时间曲线趋于重合,表明随着 β 的增加, S-B 型试样的冲击速度敏感性逐渐降低,如图 8(e)~图 8(h) 所示。值得一提的是,当 $\beta=90^\circ$ 时, 195~392 m/s 速度范围内的破片均无法穿透靶板(见图 8(h))。详细试样信息和模拟结果见表 3,其中 v_R 为剩余速度。

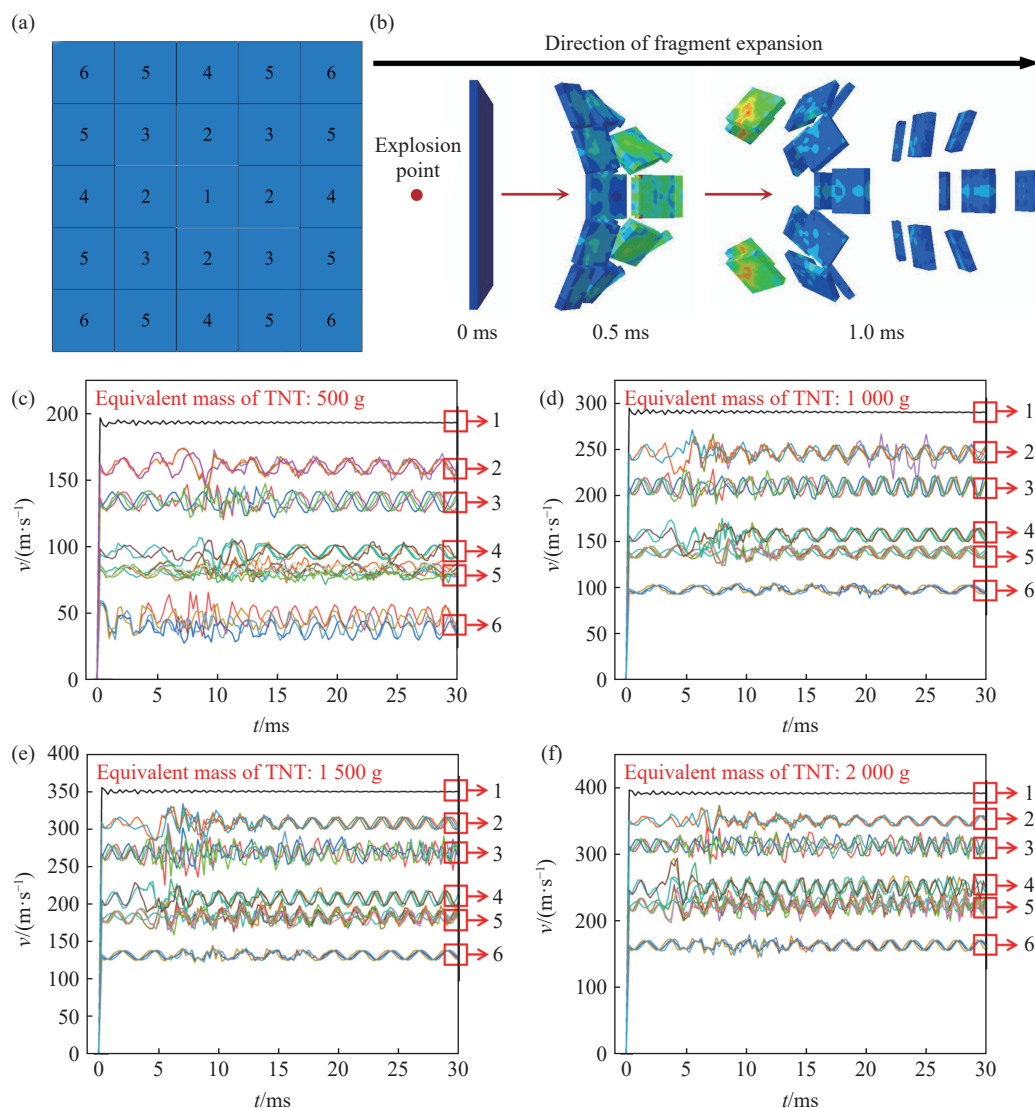


图 6 (a) 预制破片群及破片位置标注(由位置 1 至位置 6, 破片距离爆点距离增加), (b) 不同位置破片在爆炸载荷作用下的飞行姿态, (c)~(f) 500、1 000、1 500 和 2 000 g TNT 当量下破片群中破片冲击速度随时间的变化曲线(表明位置 1 至位置 6 破片的冲击速度分布情况)

Fig. 6 (a) Prefabricated fragment group and fragment location marking (from position 1 to position 6, the distance between fragment and explosion point increases); (b) the flight attitude of fragments at different locations under explosive loading; (c)~(f) is the curve of the impact velocity of each fragment in the fragment group with the TNT equivalent of 500, 1 000, 1 500 and 2 000 g, respectively, indicating the impact velocity distribution of fragments at positions 1 to 6

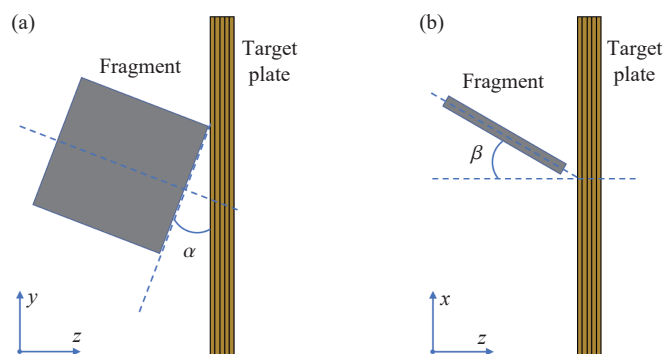


图 7 破片在 y - z 和 x - z 平面上与靶板的倾角

Fig. 7 Inclination angles of fragments with the target plate on y - z and x - z planes

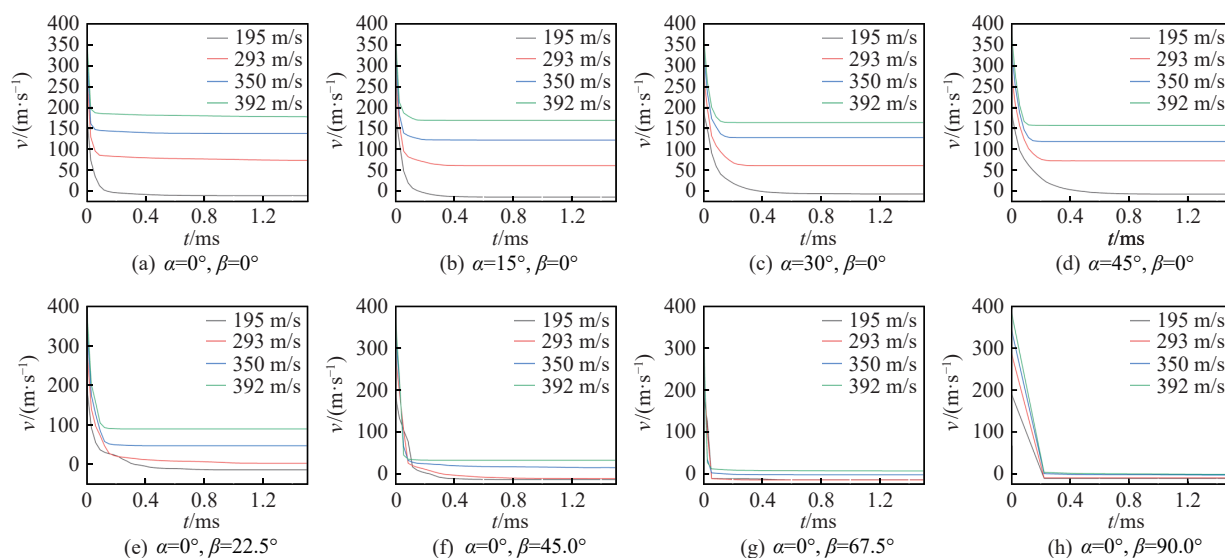


图 8 不同倾角下破片的冲击速度-时间曲线

Fig. 8 Impact velocity-time curves of fragments at different inclination angles

表 3 试样信息和剩余速度结果

Table 3 Specimen information and residual velocity results

Specimens	$\alpha/(^\circ)$	$\beta/(^\circ)$	$v_i/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_R/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
S-A-1/S-B-1	0	0	195	-9.13
S-A-2/S-B-2	0	0	293	74.79
S-A-3/S-B-3	0	0	350	138.44
S-A-4/S-B-4	0	0	392	178.14
S-A-5	15	0	195	-12.46
S-A-6	15	0	293	61.87
S-A-7	15	0	350	122.46
S-A-8	15	0	392	169.24
S-A-9	30	0	195	-6.42
S-A-10	30	0	293	60.83
S-A-11	30	0	350	127.58
S-A-12	30	0	392	163.38
S-A-13	45	0	195	-6.75
S-A-14	45	0	293	72.79
S-A-15	45	0	350	119.09
S-A-16	45	0	392	157.46
S-B-5	0	22.5	195	-11.57
S-B-6	0	22.5	293	5.18
S-B-7	0	22.5	350	48.98
S-B-8	0	22.5	392	91.04
S-B-9	0	45.0	195	-11.90
S-B-10	0	45.0	293	-9.70
S-B-11	0	45.0	350	16.25
S-B-12	0	45.0	392	33.90
S-B-13	0	67.5	195	-13.18

表 3 (续)
Table 3 (Continued)

Specimens	$\alpha/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	$v_i/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_R/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
S-B-14	0	67.5	293	-12.56
S-B-15	0	67.5	350	-0.87
S-B-16	0	67.5	392	8.13
S-B-17	0	90.0	195	-9.32
S-B-18	0	90.0	293	-8.03
S-B-19	0	90.0	350	-1.54
S-B-20	0	90.0	392	-0.45

2.2 倾角 α 对 CFRP 层合板冲击速度敏感性和吸能效果的影响

首先,探究了倾角 α 对 CFRP 层合板冲击速度敏感性的影响。如图 9(a) 所示,相同 β 、不同 α 下,破片的剩余速度均随着初速度的增大而增大,剩余速度和初速度具有相似的变化趋势。在 195、293、350 和 392 m/s 的冲击速度下,不同 α 的破片间剩余速度的最大差值占初速度的比值分别为 3.1%、4.8%、5.5% 和 5.3%,较小占比意味着相近的剩余速度,同时也表明不同 α 的破片冲击下靶板相似的冲击速度敏感性。图 9(b) 展示了不同冲击速度下破片剩余速度随 α 的变化趋势,可以发现,随着 α 的增大,破片剩余速度并未展现明显的变化趋势,并且具有相似的值,表明 α 不是影响层合板试样吸能效果的主要因素。值得注意的是,在 195 m/s 的冲击速度下,破片剩余速度均为负值,表明在该工况下,500 g 的 TNT 当量炸药不足以使破片击穿 CFRP 层合板,而 1 000、1 500 和 2 000 g 的 TNT 当量有部分破片击穿 CFRP 层合板。

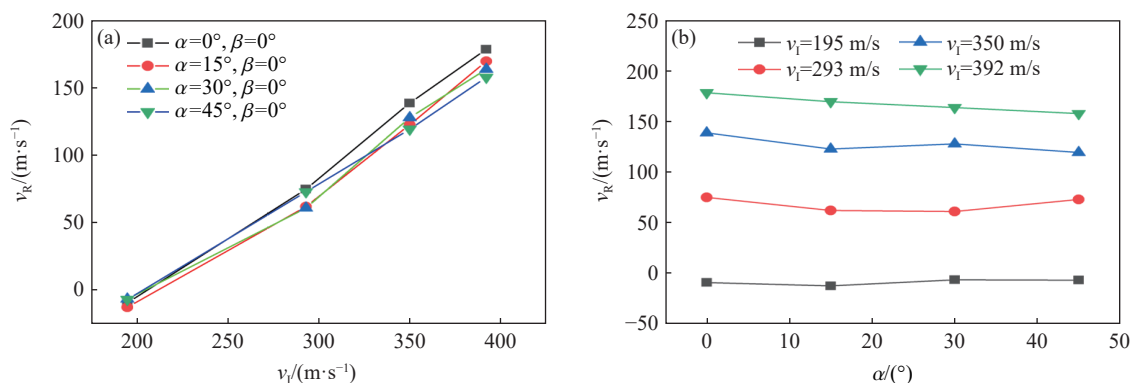


图 9 (a) 具有不同倾角 α 的破片的剩余速度-初速度关系, (b) 具有不同初速度的破片的剩余速度与倾角 α 的关系

Fig. 9 (a) Residual velocity vs. initial velocity for fragments with different inclination α ;
(b) residual velocity vs. inclination α of fragments with different initial velocities

为探究图 9 所示结果的成因,可视化并分析了 392 m/s 冲击速度下破片侵彻 S-A 型试样的破坏过程。如图 10 所示,不同倾角 α 的破片在侵彻过程中, α 没有发生明显变化。尽管 CFRP 层合板具有优异的比强度和比刚度,但其固有脆性使其在破片侵彻过程中快速发生失效破坏^[18-20],甚至难以对破片的 α 造成明显改变。从图 10 和图 11 可以看出,在破片侵彻过程中,所有倾角 α 下 CFRP 层合板试样的破坏模式几乎一致,均为正面压缩破坏和背面拉伸破坏^[21],且破坏程度十分相似。可以认为,所有倾角 α 下 CFRP 层合板试样具有相似的冲击速度敏感性和吸能效果。

值得一提的是,如图 10 所示,仅在侵彻初始阶段(0.3~0.6 ms),CFRP 层合板试样正面的破坏模式有所差异。其中, S-A-4 试样与破片发生面面接触,而其他 3 种试样则先与破片的一角发生接触,后者更易造成应力集中。然而,4 种破片与试样的接触面积并没有显著差异。此外,CFRP 层合板试样吸能时的破坏模式主要表现为层间分层和背面纤维的拉伸破坏^[22],不同倾角 α 的破片在侵彻过程中导致的

正面破坏模式的差异难以对 CFRP 层合板的吸能特性造成明显影响。

图 12 给出了试样背面的破坏形态。所有试样都形成了一个由破片冲击引起的压缩破坏导致的小尺寸矩形破坏区域。此外,背面变形区域呈现出相似的变形程度和一致的纤维拉伸破坏特征,变形是 CFRP 层合板吸收冲击能量的主要机制之一。因此,相似的变形程度是导致不同倾角 α 的破片冲击下 CFRP 层合板试样具有相似冲击速度敏感性和吸能性能的重要原因。

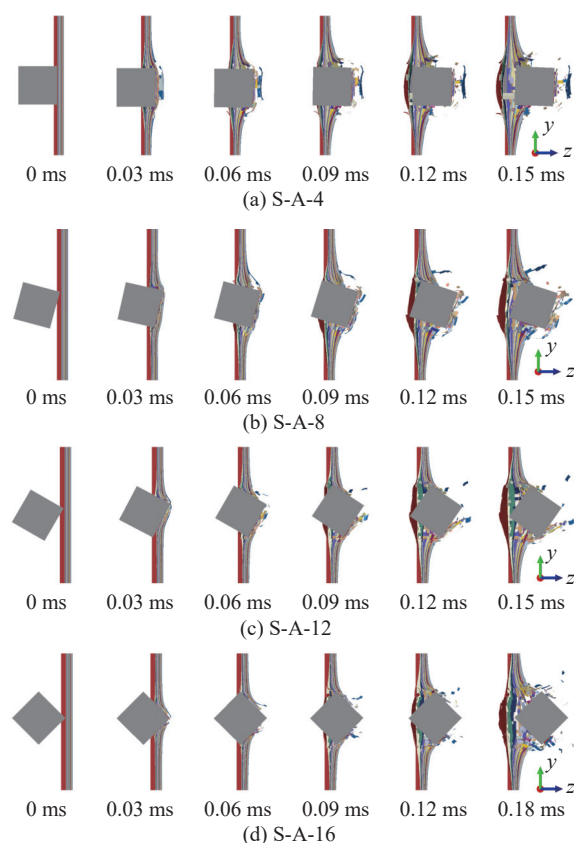


图 10 层合板试样在具有 392 m/s 冲击速度和不同倾角 α 的破片冲击下的侵彻破坏过程(y-z 平面)

Fig. 10 Penetration process of laminate specimens under the impact of fragments with different angles of α and impact velocity of 392 m/s (in y-z plane)

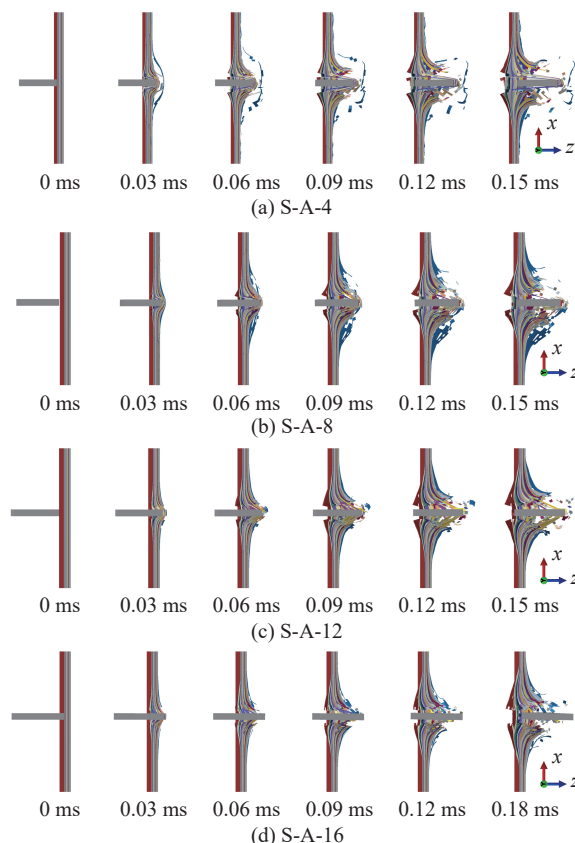


图 11 层合板试样在具有 392 m/s 冲击速度和不同倾角 α 的破片冲击下的侵彻破坏过程(x-z 平面)

Fig. 11 Penetration process of laminate specimens under the impact of fragments with different angles α and impact velocity of 392 m/s (in x-z plane)

2.3 倾角 β 对 CFRP 层合板冲击速度敏感性和吸能效果的影响

进一步探究了倾角 β 对 CFRP 层合板冲击速度敏感性的影响。如图 13(a) 所示,具有相同 α , 不同 β 的破片,其剩余速度随着初速度的增大而增大;不同于具有倾角 α 的破片,随着 β 的增大,破片剩余速度的增长趋势逐渐放缓,呈现出显著差异。可以认为, β 对 CFRP 层合板冲击速度敏感性的影响较大。另一方面,图 13(b) 展示了不同冲击速度下,破片剩余速度随 β 的变化趋势。可以发现,在 195 m/s 的冲击速度下,破片剩余速度均为负值,表明在该工况下 500 g 的 TNT 当量炸药不足以使破片击穿 CFRP 层合板。在 293~392 m/s 的冲击速度范围内,破片剩余速度均随着 β 的增大而减小,并在 $\beta=90.0^\circ$ 时降为负值,表明倾角 β 对 CFRP 层合板的吸能性能具有显著影响。在 1 000、1 500 和 2 000 g 的 TNT 当量炸药爆炸后存在部分破片击穿 CFRP 层合板。

为探究图 13 所示结果的成因,可视化并分析了 392 m/s 冲击速度下 S-B 型试样的破片侵彻破坏过程。由图 14 可知,尽管 4 种试样均展现了相似的破坏模式,即正面发生压缩破坏,背面则以拉伸破坏为主^[21],但随着 β 由 0° 增大到 67.5° ,破片贯穿层合板所需时间明显增加,层合板的破坏程度显著增大。

这种现象与破片剩余速度随 β 的增大而减小的趋势相符合,表明更大范围的破坏区域和更长的破坏过程使得层合板对破片动能的吸收效果更好^[23-24]。另一方面,不同于图 10 在侵彻过程中几乎没有变化的 α ,图 15 的侵彻过程中破片的倾角 β 均发生了明显变化。 β 的变化导致破片与靶板在撞击初期的接触面积增大,较大的接触面积可有效避免应力集中以及应力集中引起的快速损伤破坏,并促进冲击能量的耗散。其中, $\beta=67.5^\circ$ 时破片与靶板具有更大的接触面积,破片的剩余速度较低。

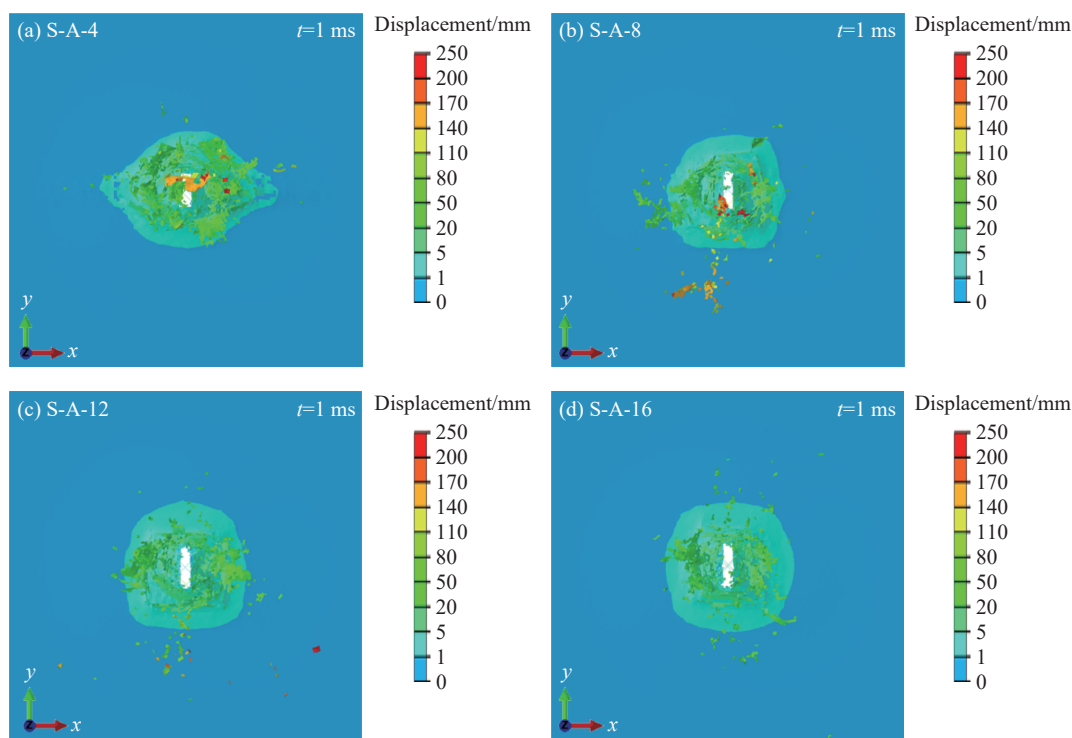


图 12 层合板在具有 392 m/s 冲击速度和不同倾角 α 的破片冲击下背面的破坏形态和变形区域

Fig. 12 Failure modes and deformation regions of back of laminate specimen under the impact of fragments with impact velocity of 392 m/s and different inclination angles α

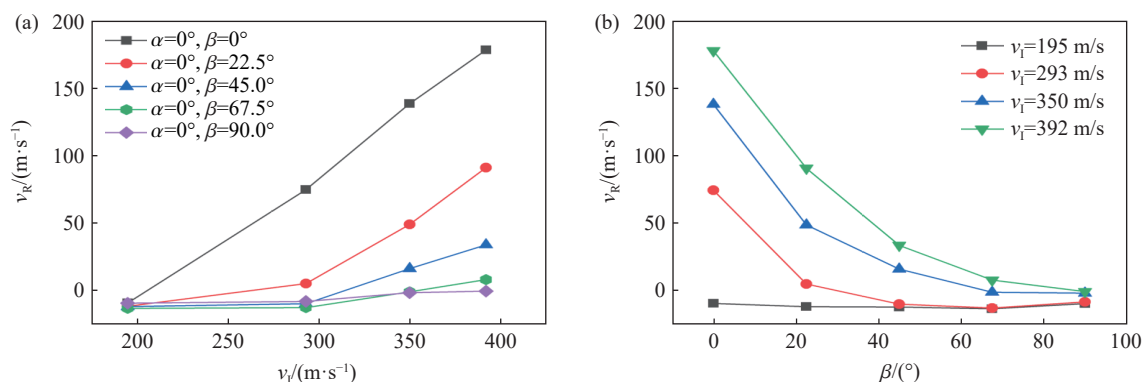


图 13 (a) 具有不同倾角 β 的破片的剩余速度-初速度关系, (b) 具有不同初速度的破片的剩余速度-倾角 β 的关系

Fig. 13 (a) Residual velocity vs. initial velocity for fragments with different inclinations β ; (b) residual velocity vs. inclination β of fragments with different initial velocities

另一方面,如图 16 所示, S-B-20 试样中破片未穿透靶板,靶板正面受破片压力后变形,随后发生回弹。然而,破片撞击靶板产生的应力波传播到靶板背部的自由表面后反射形成拉伸波,导致靶板背面纤维层发生显著的分层破坏和拉伸破坏,造成较大损伤。模拟结果表明,当 $\beta=90.0^\circ$ 时,破片以较大的接触面积冲击 CFRP 层合板,难以将其贯穿,但仍可以使层合板发生严重的损伤破坏。

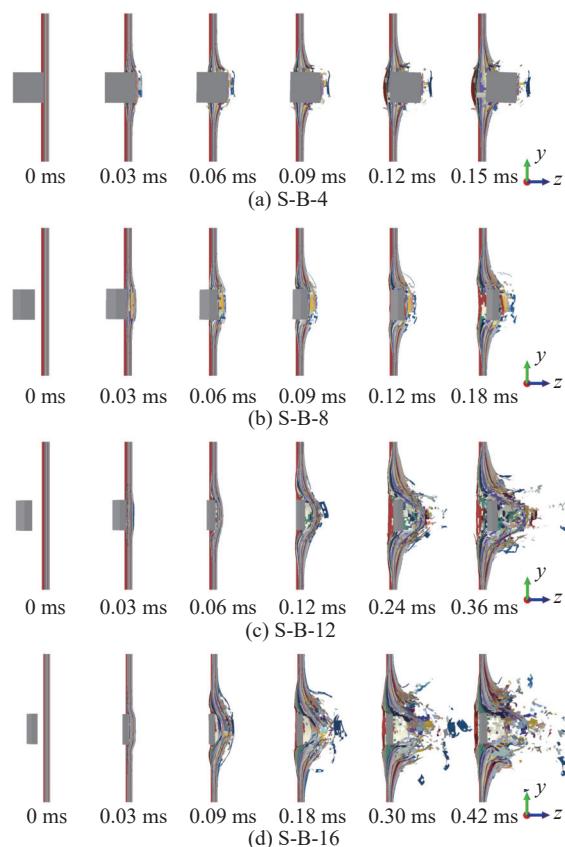


图 14 层合板试样在具有 392 m/s 冲击速度和不同倾角 β 的破片冲击下的侵入破坏过程(y-z 平面)

Fig. 14 Penetration process of laminate specimens under the impact of fragments with different angles β and impact velocity of 392 m/s (in y-z plane)

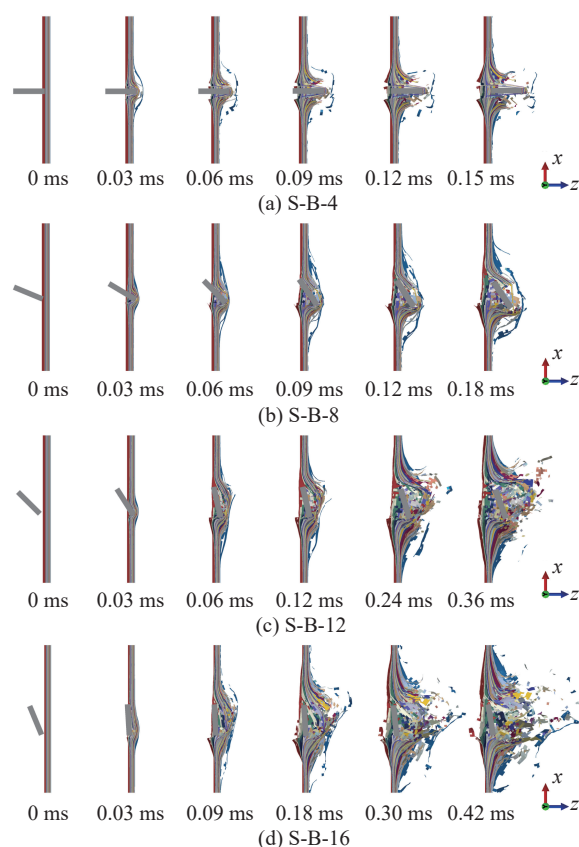


图 15 层合板试样在具有 392 m/s 冲击速度和不同倾角 β 的破片冲击下的侵入破坏过程(x-z 平面)

Fig. 15 Penetration process of laminate specimens under the impact of fragments with different angles β and impact velocity of 392 m/s (in x-z plane)

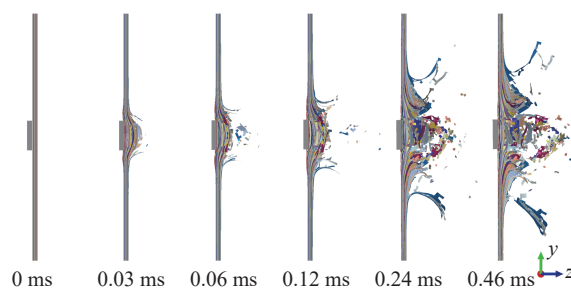


图 16 层合板试样 S-B-20 在具有 392 m/s 冲击速度和 90.0° 倾角 β 的破片冲击下的侵入破坏过程(y-z 平面)

Fig. 16 Penetration process of laminate specimens under the impact of fragment with impact velocity of 392 m/s and 90.0° inclination angle β (in y-z plane)

图 17 展示了不同倾角 β 的破片冲击下试样背面的变形程度。不同于图 12 中细长的弹孔形态, 图 17 中的弹孔尺寸更大, 表明试样正面在具有倾角 β 的破片冲击下发生了更大程度的压缩破坏。另一方面, 试样背面的变形区域随着 β 的增大而显著增大, 意味着更大程度的能量吸收^[25]。因此, 较大程度的变形是导致较大倾角 β 的破片冲击下 CFRP 层合板试样具有较强吸能效果的重要原因, 也是导致 S-B 型试样间差异化冲击速度敏感性的关键因素。

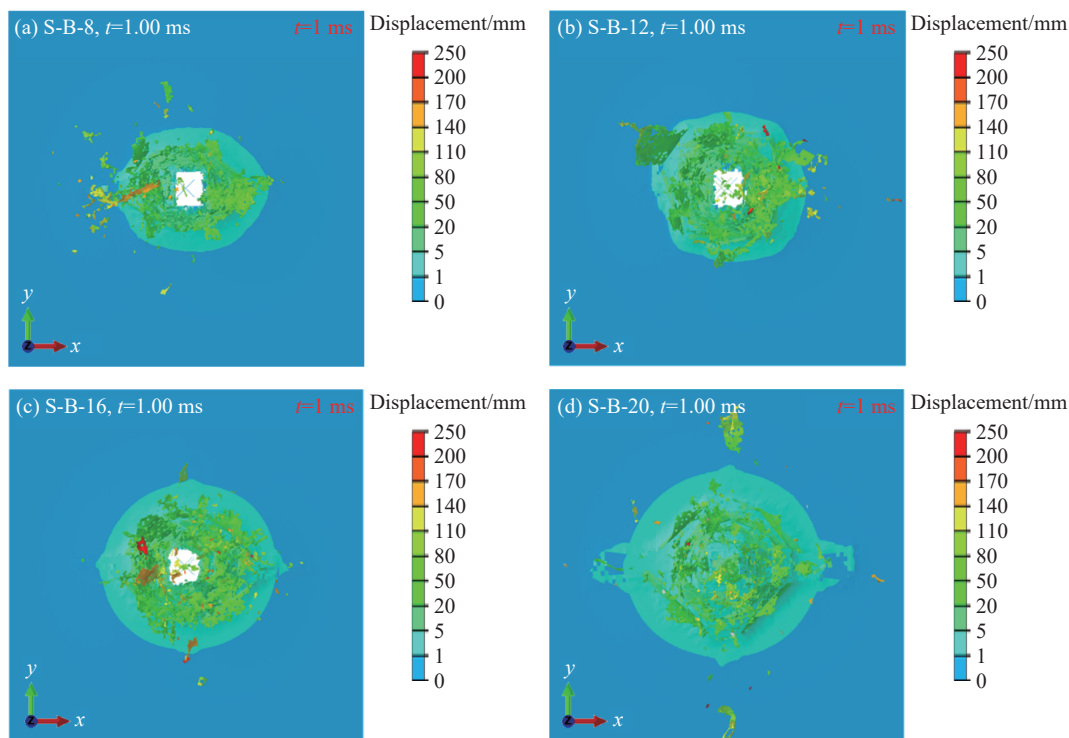


图 17 层合板在具有 392 m/s 冲击速度和不同倾角 β 的破片冲击下背面的破坏形态和变形区域

Fig. 17 Failure modes and deformation regions of back of laminate specimen under the impact of fragment with 392 m/s impact velocity and different inclination angles β

3 结 论

通过 FEA 方法研究了破片的冲击速度和倾角对高速冲击下 CFRP 层合板吸能效果和破坏模式的影响, 对其冲击速度敏感性和吸能机制进行了分析。结果表明, FEA 模型可有效模拟 CFRP 层合板的破片冲击响应。预制破片在不同 TNT 当量和距爆点距离下具有差异明显的初速度和撞击倾角。S-A 型试样均具有明显的冲击速度敏感性, CFRP 复合材料的吸能效果和冲击速度敏感性未随着破片倾角 α 的增加表现出明显差异, 侵彻过程中层合板难以对 α 造成明显改变, 相似的接触面积、接触时间和变形程度是造成 S-A 型试样间相似吸能效果和冲击速度敏感性的重要原因。S-B 型试样的吸能效果随着破片倾角 β 的增大而显著增强, 其冲击速度敏感性则随 β 的增大而明显减弱, 侵彻过程中 β 发生了明显改变, 由此造成的接触面积、接触时间和变形程度增大是导致 S-B 型试样间差异化吸能效果和冲击速度敏感性的重要原因。此外, 当 $\beta=90.0^\circ$ 时, 500~2 000 g TNT 当量下的破片均无法穿透 CFRP 层合板, 但层合板背面仍表现出更为严重的损伤破坏。

参考文献:

- [1] 廖斌斌, 周建武, 林渊, 等. CFRP 层合板低速冲击响应及损伤特性研究 [J]. 高压物理学报, 2019, 33(4): 044202.
LIAO B B, ZHOU J W, LIN Y, et al. Low-velocity impact behavior and damage characteristics of CFRP laminates [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(4): 044202.
- [2] JIN L, ZHANG B L, CHEN F J, et al. Dynamic contribution of CFRP strips to CFRP-strengthened RC shear walls [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 255: 108479.
- [3] XIANG X M, XIAO C K, LU G X, et al. Novel interaction effects enhance specific energy absorption in foam-filled CFRP tapered tubes [J]. Composite Structures, 2024, 343: 118288.
- [4] GUO H L, LIAO H H, SU M, et al. Shear strengthening of RC beams with prestressed NSM CFRP: influencing factors and

- analytical model [J]. *Composite Structures*, 2024, 342: 118262.
- [5] SERGI C, IERARDO N, SARASINI F, et al. Assessment of ply thickness and aluminum foils interleaving on the impact response of CFRP composites designed for cryogenic pressure vessels [J]. *Composite Structures*, 2025, 351: 118563.
- [6] ZHANG J Y, XIE J, ZHAO X Z, et al. Influence of void defects on impact properties of CFRP laminates based on multi-scale simulation method [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 180: 104706.
- [7] 袁浩天, 刘钊, 孙文豪, 等. 聚能侵彻体作用下钢-CFRP 层合板的防护性能 [J]. 高压物理学报, 2023, 37(2): 024202.
- YUAN H T, LIU Z, SUN W H, et al. Protective performance of steel-CFRP laminates under sharped charge projectile [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2023, 37(2): 024202.
- [8] BOCCARDI S, MEOLA C, CARLOMAGNO G M, et al. Effects of interface strength gradation on impact damage mechanisms in polypropylene/woven glass fabric composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 90: 179–187.
- [9] ZHOU J W, LIAO B B, SHI Y Y, et al. Low-velocity impact behavior and residual tensile strength of CFRP laminates [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 161: 300–313.
- [10] 彭捷, 张伟岐, 田锐, 等. 碳纤维层合板抗球形弹冲击动态响应特性试验研究 [J]. 复合材料科学与工程, 2020(6): 18–24, 56.
- PENG J, ZHANG W Q, TIAN R, et al. Experimental study on the dynamic response of carbon fiber laminates impacted by spherical projectile [J]. *Composites Science and Engineering*, 2020(6): 18–24, 56.
- [11] LIU J L, SINGH A K, LEE H P, et al. The response of bio-inspired helicoidal laminates to small projectile impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 142: 103608.
- [12] 朱浩, 郭章新, 宋鲁彬, 等. 拉伸载荷下含孔复合材料层合板的力学性能及失效机理 [J]. 高压物理学报, 2017, 31(4): 373–381.
- ZHU H, GUO Z X, SONG L B, et al. Mechanical property and failure mechanism of composite laminates containing a circular hole under tension [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31(4): 373–381.
- [13] WANG J R, XIE W H, YI F J, et al. Numerical simulation on fracture mechanisms of CFRP with barely visible impact damage by hail impact [J]. *Composite Structures*, 2023, 305: 116499.
- [14] XING J, DU C L, HE X, et al. Finite element study on the impact resistance of laminated and textile composites [J]. *Polymers*, 2019, 11(11): 1798.
- [15] XU Z, YANG F, GUAN Z W, et al. An experimental and numerical study on scaling effects in the low velocity impact response of CFRP laminates [J]. *Composite Structures*, 2016, 154: 69–78.
- [16] PANKOW M, WAAS A M, YEN C F, et al. Modeling the response, strength and degradation of 3D woven composites subjected to high rate loading [J]. *Composite Structures*, 2012, 94(5): 1590–1604.
- [17] DU C L, WANG H F, ZHAO Z Q, et al. A comparison study on the impact failure behavior of laminate and woven composites with consideration of strain rate effect and impact attitude [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 164: 107843.
- [18] JIANG H Y, REN Y R, LIU Z H, et al. Low-velocity impact resistance behaviors of bio-inspired helicoidal composite laminates with non-linear rotation angle based layouts [J]. *Composite Structures*, 2019, 214: 463–475.
- [19] LI K M, NI X P, WU Q Q, et al. Carbon-based fibers: fabrication, characterization and application [J]. *Advanced Fiber Materials*, 2022, 4(4): 631–682.
- [20] 邱晓清, 唐柏鉴, 任鹏, 等. 冲击波和破片对超高分子量聚乙烯板联合作用的仿真模拟 [J]. 江苏科技大学学报 (自然科学版), 2020, 34(3): 6–13.
- QIU X Q, TANG B J, REN P, et al. Simulation of the damage of UHMWPE plate by the combined action of shock waves and fragments [J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 34(3): 6–13.
- [21] ZHOU Z P, SUN W F, ZHENG N, et al. Experimental and numerical investigation of the energy absorption characteristics of carbon-basalt hybrid fiber reinforced polymer composites under ballistic impact [J]. *Composite Structures*, 2024, 335: 118000.
- [22] LIU Q, GUO B Q, CHEN P W, et al. Investigating ballistic resistance of CFRP/polyurea composite plates subjected to ballistic impact [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 166: 108111.
- [23] SHISHEVAN F A, AKBULUT H. Low-velocity impact behavior of carbon/basalt fiber-reinforced intra-ply hybrid composites [J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering*, 2019, 43(1): 225–234.
- [24] CHEN D D, LUO Q T, MENG M Z, et al. Low velocity impact behavior of interlayer hybrid composite laminates with carbon/glass/basalt fibres [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 176: 107191.
- [25] ZHANG T G, SATAPATHY S S, VARGAS-GONZALEZ L R, et al. Ballistic impact response of ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE) [J]. *Composite Structures*, 2015, 133: 191–201.

Numerical Simulation of Energy Absorption Performance and Failure Mechanism of CFRP Composites under Fragment Impact after Explosion

ZHOU Zhipeng¹, CAO Hui², FU Qiong¹, WANG Xinwen¹, WANG Zhiyong³

(1. Department of Public Security, Shanxi Police College, Taiyuan 030401, Shanxi, China;

2. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

3. College of Aeronautics and Astronautics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract: The application of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite in protective equipment is restricted by its complex penetration behavior and unclear failure mechanism under fragment impact. To overcome the difficulty and high cost of monitoring the penetration process information through experiments, a finite element analysis (FEA) model of CFRP composite under fragment impact is constructed in this study. In this model, a strain-based three-dimensional Hashin failure criterion is adopted, and the rate-dependent relationship of strength is introduced. The effectiveness of the FEA model is verified by comparison with experimental results. The simulation results show significant difference in both initial velocities and impact inclination angles under different TNT equivalents and distances from the explosion point. The inclination angles of fragments with the target plate on y - z and x - z planes are defined as α and β . When $\beta=0^\circ$, CFRP composites exhibit pronounced impact velocity sensitivity in the velocity range of 195–392 m/s. The energy absorption capability and impact velocity sensitivity of specimens with different inclination angles β are significantly different. However, the energy absorption capability and impact velocity sensitivity of specimens with different inclination angles α do not show significant differences. When $\alpha=0^\circ$, the impact velocity sensitivity of CFRP composites in the impact velocity range of 195–392 m/s gradually declines with the increase of inclination angle β . Visualization of the penetration process and failure area indicates that the contact area and time and deformation degree are the crucial reasons for the differences in energy absorption capability and impact velocity sensitivity observed in CFRP composites.

Keywords: fragment impact; carbon fibre-reinforced polymer composite; finite element simulation; failure behavior