DOI: 10.11858/gywlxb.20240720

碳纤维复合靶板抗破片冲击性能研究

李巧歌[1], 梁增友[1], 王春光[2], 郝永强[3]

(1. 中北大学机电工程学院, 山西 太原 030051;
2. 晋西集团江阳公司, 山西 太原 030051;
3. 内蒙动力机械研究所, 内蒙古 呼和浩特 010000)

摘要: 为探究碳纤维复合材料的抗破片侵彻性能, 进行了 8 g 立方体钢破片侵彻厚度分别为 5、10、15 mm 碳纤维复合材料靶板试验, 获取破片着靶速度, 并回收破片、靶板, 观测靶板破坏情况。根据试验情况进行数值模拟, 探究破片侵彻碳纤维复合材料靶板的过程及碳纤维复合材料靶板的破坏机理, 由此得到靶板破坏形式与破片速度的关系: 破片速度大于弹道极限时, 靶板以纤维的剪切破坏为主; 破片速度逐渐降低时, 纤维的拉伸破坏、基体破裂与纤维层分层多种破坏形式所占比重随着破片速度的变化而变化。

关键词: 碳纤维复合材料; 弹道侵彻试验; 破片; 破坏机理

中图分类号: O347; TJ04 **文献标志码:** A

碳纤维复合材料由碳纤维和树脂基体组成, 碳纤维是一种高强度、轻质的纤维, 而树脂则用于固定和保护纤维。常见的树脂包括环氧树脂、聚酰亚胺等。传统材料(金属、塑料、玻璃等)的成分和结构比较单一[1], 而碳纤维复合材料属于各向异性材料, 具有密度小、比强度大、比模量高、抗疲劳、抗振性能好等优点[2]。碳纤维复合材料在国防科技中被广泛应用, 尤其在航空航天领域, 碳纤维复合材料已经成为主承力构件及部分结构的防护材料, 而在弹箭毁伤中, 则用于飞机的机翼、部分关键部件的外部防护、火箭发动机外壳等[3]。因此, 纤维增强复合材料在冲击载荷作用下的动态力学行为和抗弹性能引起了国内外学者的广泛关注[4–5]。目前, 纤维增强复合材料的弹道冲击研究较为广泛[6–7]。研究表明, 影响复合材料冲击响应的主要因素包括弹体形状、弹体速度、弹体质量、弹体冲击角度、纤维种类、靶板厚度及树脂含量等。此外, 纤维增强结构直接影响复合材料的抗弹性能[8]。21 世纪初, 许多学者针对金属靶板进行了理论[9–10]、模拟[11] 和试验研究[12], 研究成果较为完善。但对于碳纤维复合材料靶板而言, 相关研究并不全面。研究碳纤维增强复合材料在破片侵彻作用下的损伤情况, 可以加深研发人员对碳纤维复合材料的认识, 指导研发人员调整战斗部结构和防护结构, 实现更有效率的杀伤和防护。刘璐璐等[13] 利用弹道冲击试验研究了圆柱形平头弹丸侵彻复合材料的破坏机理, 得出复合材料靶板的失效模式: 冲击面的主要失效模式是纤维剪切失效和基体压溃, 靶板背面的主要失效模式是纤维拉伸失效、基体开裂、纤维拔出和分层失效。邓云飞等[14–15] 通过一级轻气炮弹道侵彻试验, 研究了不同头部形状弹丸侵彻编织复合材料层合板的抗弹性能即抗冲击性能与侵彻角度的关系, 得出冲击角度为 0°、30°、45°时, 靶板弹道极限与侵彻角度的关系, 即 45°冲击时弹道极限最高, 正冲击次之, 30°斜冲击时最低。谢文波等[16] 利用一级轻气炮对碳纤维复合材料板进行侵彻贯穿试验, 分析了冲击角度对弹

* **收稿日期:** 2024-01-30; **修回日期:** 2024-02-23
基金项目: 山西省科技厅省基础研究计划项目(202103021224210)
作者简介: 李巧歌(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事高效毁伤理论与技术、弹箭结构设计等研究. E-mail: 1901041103@st.nuc.edu.cn
通信作者: 梁增友(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事弹药装药与安全技术、弹箭高效毁伤与控制技术、弹箭结构设计与仿真、新型远程弹技术等研究. E-mail: liangzy@nuc.edu.cn

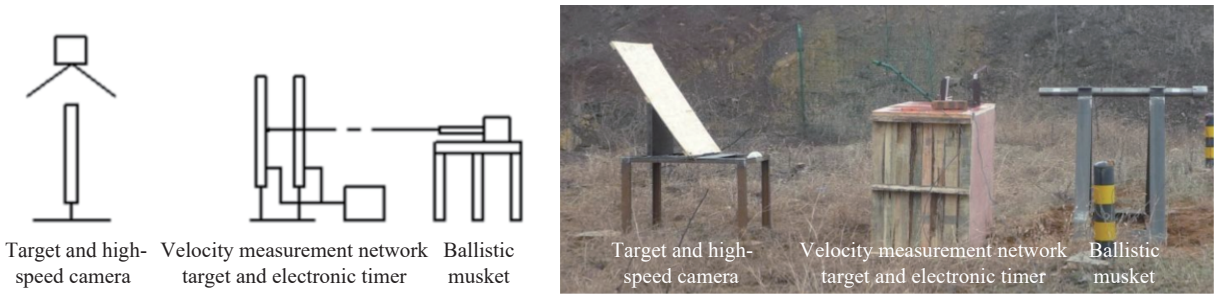
道极限、能量吸收和弹道偏转的影响，结果表明，当冲击能量较低时，靶板在正冲击下的能量吸收率比斜冲击下高，而当冲击能量较高时，则恰好相反。彭捷等[17]通过一级轻气炮发射球形弹，分析了弹丸在不同初始速度下的层合靶能量吸收率、靶板损伤变化及能量吸收机制的变化规律。在国防军工领域，试验成本高、危险性大，而且试验获得的数据只能表征始末状态，中间过程难以观测。因此，目前针对碳纤维靶板性能的研究大多采用试验与理论分析相结合的方法。

本研究将通过试验和数值模拟相结合的方法对碳纤维复合材料这一新型材料受破片侵彻时的破坏机理进行分析。破片以不同速度侵彻不同厚度的碳纤维复合靶板，得到侵彻速度对碳纤维破环形式的影响以及不同厚度碳纤维破坏形式的差异；通过试验与理论分析选取碳纤维复合材料的数值模拟参数，将数值模拟结果与试验结果对比，验证模型的准确性，进而探讨碳纤维复合材料受到破片侵彻时的破坏机理。

1　试验系统和方法

1.1　试验设备

破片侵彻碳纤维复合材料靶板的弹道侵彻试验中，试验系统包括滑膛弹道枪、钢破片及与之匹配的弹托、不同厚度的碳纤维复合材料靶板、测速靶、测速仪和高速摄影仪。破片侵彻碳纤维复合材料靶板试验系统如图 1 所示。



(a) Schematic diagram　　(b) Site layout

图 1　破片侵彻碳纤维复合材料靶板试验系统

Fig. 1　Test system of fragments penetrating carbon fiber composite target

1.2　弹靶材料

本研究选用 8 g 预制钢破片，如图 2 所示。弹道枪通过火药气体燃烧产生的压力将放置于弹托内部的破片发射，由于受到空气阻力作用，在飞行过程中破片与弹托分离，破片继续运动，以一定速度贯穿靶板前设置的测速靶后，侵彻安装于靶架上的碳纤维复合材料靶板。通过调整发射药量控制破片速度，进而获取不同的着靶速度。破片和弹托装配如图 3 所示，破片和发射药筒装配如图 4 所示。

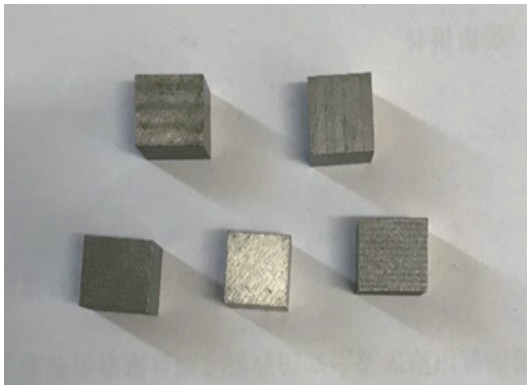


图 2　8 g 钢破片

Fig. 2　8 g steel fragments



图 3　破片和弹托装配

Fig. 3　Fragments and sabots assembly



图 4　破片和发射药筒装配

Fig. 4　Fragment and propellant cartridge

选用 T300 级预浸料和环氧树脂在高温下压制而成的板材，板材间碳纤维的铺层堆叠方式为 0°和 90°交互铺层[18]。碳纤维复合材料的力学性能参数见表 1。表 1 中：σ_{xt}为纵向抗拉强度，σ_{yt}为横向抗拉强度，E_{1t}为纵向拉伸模量，E_{2t}为横向拉伸模量，σ_{xc}为纵向抗压强度，σ_{yc}为横向抗压强度，E_{1c}为纵向压缩模量，E_{2c}为横向压缩模量，τ_{12}为纵向和横向抗剪强度，G_{12}为纵向和横向剪切模量，τ_J为黏结结构抗剪强度，γ_{12}为主泊松比。为了减少靶板边界效应对破片侵彻结果的影响，本试验选用大于破片尺寸 10 倍的靶板，即靶板尺寸为 150 mm×150 mm。为了研究不同厚度碳纤维复合材料的破坏机理，选取了 3 种厚度的板材，分别为 5、10 和 15 mm。选取的破片及碳纤维增强复合材料靶板可以反映现有使用状态下的碳纤维增强复合材料在小型破片战斗部侵彻下的损伤情况，从而为提高碳纤维复合材料的性能以及防护结构设计奠定基础。

表 1　碳纤维复合材料的力学性能参数

Table 1　Mechanical properties of carbon fiber composites plate

σ_{xt}/ MPa	E_{1t}/ GPa	σ_{yt}/ MPa	E_{2t}/ GPa	σ_{xc}/ MPa	E_{1c}/ GPa	σ_{yc}/ MPa	E_{2c}/ GPa	τ_{12}/ MPa	G_{12}/ GPa	τ_J/ MPa	γ_{12}
1 755	138	48	8.36	1 248	128	214	8.48	113	4.51	21.5	0.27

1.3　靶板损伤情况分析

将分析碳纤维复合材料靶板在局部侵彻和完全侵彻 2 种典型破坏形式下的损伤情况，为数值模拟提供依据。碳纤维复合材料靶板的损伤情况见表 2，回收不同厚度靶板的破坏形态如图 5～图 7 所示。

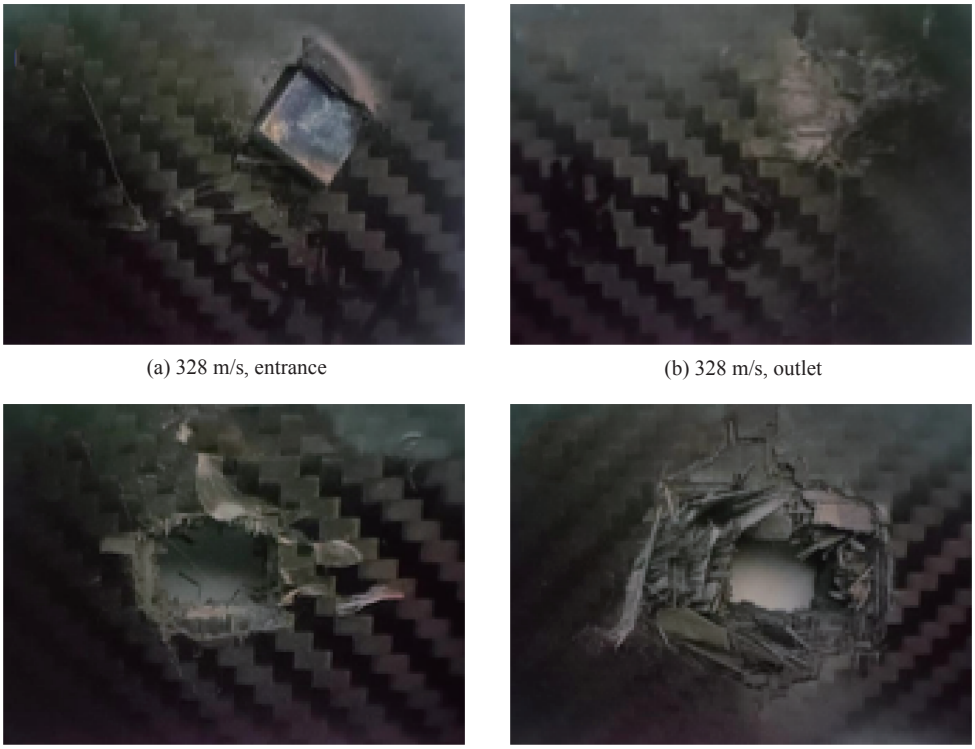
表 2　破片侵彻靶板的损伤区域统计

Table 2　Statistic of damage area of fragment penetrating target

Target thickness/mm	Failure pattern	Impact velocity/ ($m\cdot s^{-1}$)	Damage area of the projectile surface/ (mm×mm)	Damage area of back elastic surface/ (mm×mm)
5	Local penetration	328	10.92×9.60	11.55×12.24
	Complete penetration	340	13.76×10.50	23.10×25.10
10	Local penetration	398	10.63×10.21	29.80×31.42
	Complete penetration	412	14.56×10.36	30.30×17.22
15	Local penetration	443	16.26×8.35	
	Complete penetration	453	15.49×11.22	33.23×24.05

分析图 5～图 7 发现：当破片嵌入靶板时，靶板迎弹面的损伤区域与破片着靶面形状相似，产生了一定程度的冲塞破坏，破片与靶板接触附近区域未产生明显破坏；靶板背弹面大范围鼓包，出现纤维断裂及纤维间拉伸裂纹，同时出现内部纤维层分离导致的鼓包。

破片穿透靶板时，靶板迎弹面的损伤区域与破片着靶面的形状和尺寸相近，产生纤维和基体的剪切断裂破坏，破片穿孔周围靶板有纤维开裂现象；靶板背弹面纤维断裂崩落，随着靶板厚度的增加，出现纤维层分离翘起现象。破片孔道随着破片运动方向逐渐扩大，在出口处最大，靶板背面出现纤维崩裂脱落。

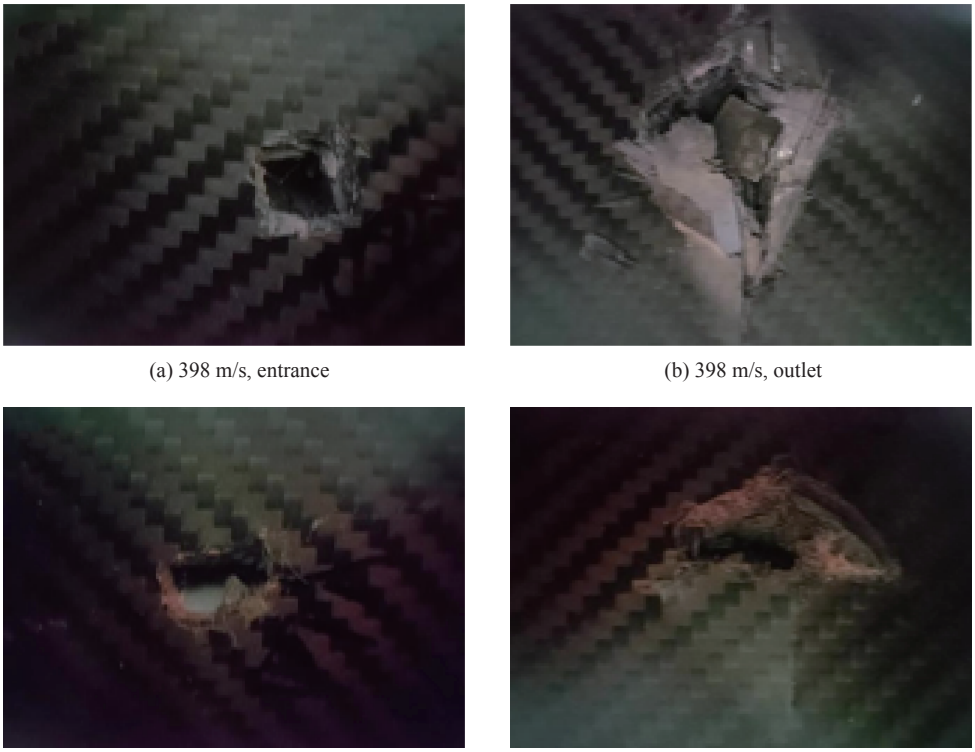


(a) 328 m/s, entrance　　(b) 328 m/s, outlet

(c) 340 m/s, entrance　　(d) 340 m/s, outlet

图 5　破片侵彻 5 mm 厚碳纤维复合材料靶板的破坏形态

Fig. 5　Failure mode of fragment penetrating 5 mm thick carbon fiber composite target

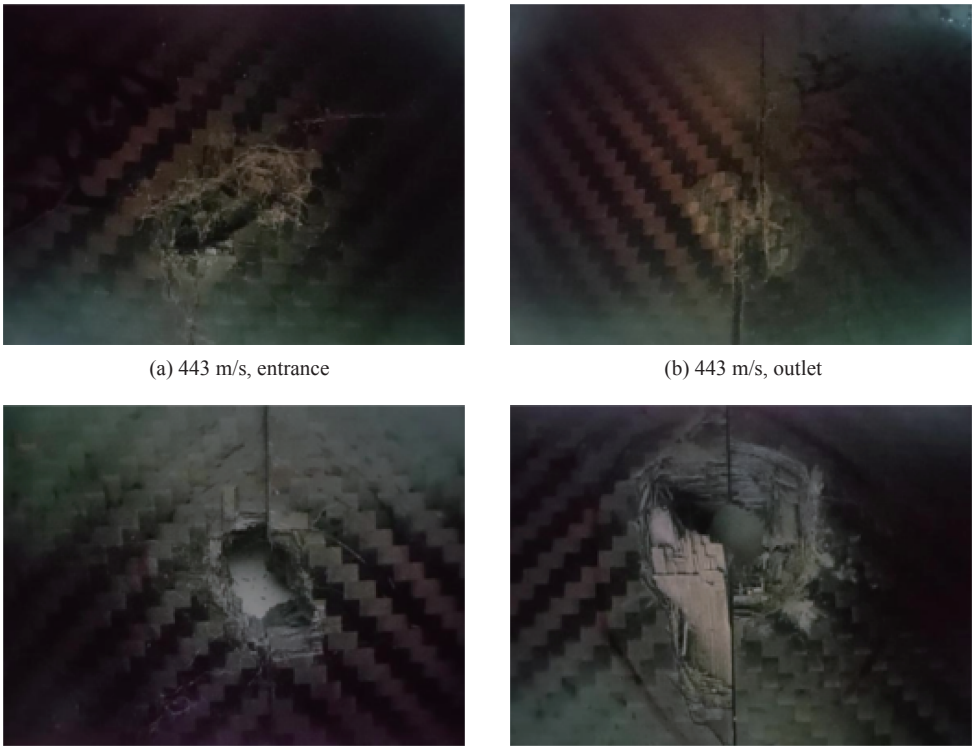


(a) 398 m/s, entrance　　(b) 398 m/s, outlet

(c) 412 m/s, entrance　　(d) 412 m/s, outlet

图 6　破片侵彻 10 mm 厚碳纤维复合材料靶板的破坏形态

Fig. 6　Failure mode of fragment penetrating 10 mm thick carbon fiber composite target



(a) 443 m/s, entrance　　(b) 443 m/s, outlet

(c) 453 m/s, entrance　　(d) 453 m/s, outlet

图 7　破片侵彻 15 mm 厚碳纤维复合材料靶板的破坏形态

Fig. 7　Failure mode of fragment penetrating 15 mm thick carbon fiber composite target

2　数值模拟

2.1　数值模拟模型

使用 TrueGrid 软件按照试验用破片和靶板的结构及实际尺寸建立数值模拟模型，采用 cm-g-μs 单位制，考虑到模型的对称性和计算时间，建立 1/2 模型。

破片为立方体钢破片，质量为 8 g，破片有限元模型如图 8 所示，破片材料参数见表 3。表 3 中：ρ为密度，G 为剪切模量，A 为屈服应力，B 为硬化系数，n 为硬化指数，c 为应变率系数，M 为温度系数，T_{M} 为熔化温度，T_{R} 为环境温度。

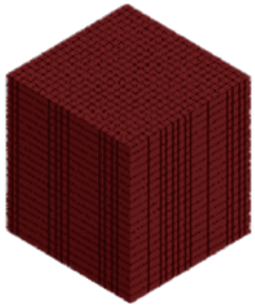


图 8　钢破片的有限元模型

Fig. 8　Finite element model of the steel fragment

表 3　钢破片材料参数

Table 3　Material parameters of steel fragment

ρ/(g·cm^{-3})	G/GPa	A/MPa	B/MPa	n	c	M	T_{M}/K	T_{R}/K
7.83	0.77	792	510	0.26	0.014	1.03	1 793	294

靶板尺寸为 150 mm×150 mm，分层建立有限元模型，通过 2 个 Part 表征不同的铺层方向。对网格进行收敛性分析[19]，设置破片网格尺寸为 0.04、0.05、0.06 mm。采用靶板中间与破片接触范围网格加密、周围稀疏的划分形式，设置中间网格尺寸为 0.05、0.10、0.15 mm，周围网格尺寸为 0.45 mm。与试验结果对比，并综合考虑计算效率和可靠性，选择靶板中间网格尺寸为 0.10 mm，周围网格尺寸为

0.45 mm, 破片网格尺寸为 0.05 mm。碳纤维复合靶板有限元模型如图 9 所示, 破片侵彻碳纤维复合材料靶板初始状态如图 10 所示。

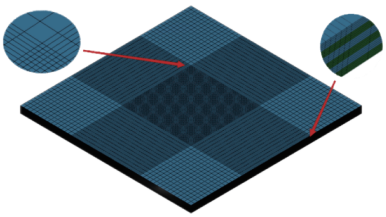


图 9　碳纤维复合材料靶板有限元模型

Fig. 9　Finite element model of carbon fiber composite target plate

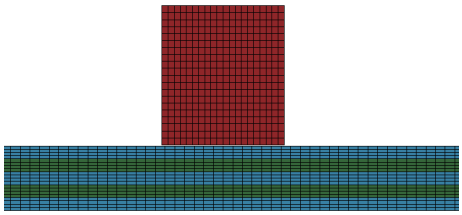


图 10　破片侵彻碳纤维复合材料有限元模型

Fig. 10　Finite element model of fragment penetrating carbon fiber composite material

2.2　数值模拟算法和材料模型

碳纤维复合材料为纤维增强材料, 具有各向异性和不均匀性, 在破片侵彻过程中的能量转化与材料的失效判定十分复杂。采用应力状态的分析方法建立各向异性材料的本构关系, 并考虑靶板材料的失效, 采用带有损伤的纤维增强复合材料本构模型。ENHANCED_COMPOSITE_DAMAGE 可以定义任意的正交各向异性材料, 用于描述纤维正交复合材料的单向层。

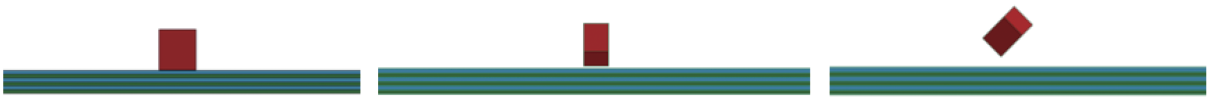
破片与靶板的接触采用面面侵彻接触算法, 在破片与靶板材料失效后将已经失效的单元删除, 碳纤维复合材料不同铺层间的接触算法采用接触解绑算法, 以实现纤维层间的分离。

基于建立的有限元模型与试验所用的碳纤维复合材料的力学性能建立有关材料模型。

2.3　数值模拟和试验结果

2.3.1　数值模拟

如图 11 所示, 对 3 种典型着靶姿态进行数值模拟, 结果表明, 数值模拟结果与试验得到的对应工况下靶板的穿透效果基本相同, 数值模拟的破片穿孔隧道基本能复现试验产生的穿孔隧道, 破片穿孔出入口剪切破坏形成的界面清晰, 穿孔大小接近试验所得, 而且各工况下穿孔大小基本没有差异。考虑到碳纤维复合材料的特殊性, 且破片接近立方体, 着靶速度较低, 因此, 侵彻效果区别不大。

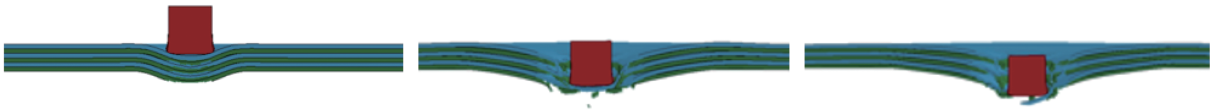


(a) Face contact　　(b) Edge contact　　(c) Point contact

图 11　破片以不同姿态侵彻碳纤维复合靶板

Fig. 11　Fragments penetrating carbon fiber composite target plates with different attitudes

破片面接触侵彻靶板的分析结果如图 12 所示。破片侵彻碳纤维复合材料的过程大致分为 3 个阶段: 第 1 阶段为破片与靶板接触, 靶板发生形变, 应力波开始传播; 第 2 阶段为应力波传播到达靶板背面, 层合板开始失效; 第 3 阶段为破片逐步侵彻碳纤维复合材料层合板, 最终完成侵彻过程。



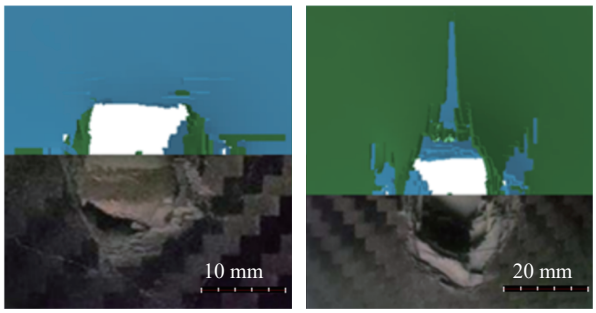
(a) Phase 1　　(b) Phase 2　　(c) Phase 3

图 12　破片侵彻碳纤维复合靶板过程

Fig. 12　Process diagram of fragment penetrating carbon fiber composite target plate

2.3.2　数值模拟与试验结果对比分析

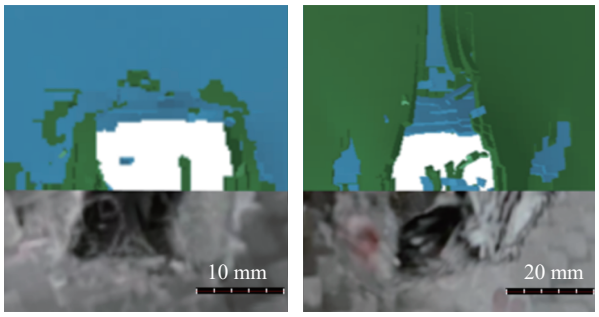
破片侵彻不同厚度碳纤维复合材料靶板的数值模拟与试验结果对比如图 13～图 15 所示。



(a) Target entrance　　(b) Target outlet

图 13　破片侵彻 5 mm 厚碳纤维复合材料靶板结果对比

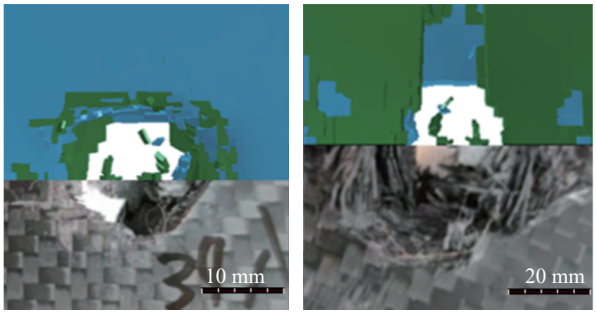
Fig. 13　Comparison of the results of fragment penetrating 5 mm thick carbon fiber composite target



(a) Target entrance　　(b) Target outlet

图 14　破片侵彻 10 mm 厚碳纤维复合材料靶板结果对比

Fig. 14　Comparison of the results of fragment penetrating 10 mm thick carbon fiber composite target



(a) Target entrance　　(b) Target outlet

图 15　破片侵彻 15 mm 厚碳纤维复合材料靶板结果对比

Fig. 15　Comparison of the results of fragment penetrating 15 mm thick carbon fiber composite target

将数值模拟获取的靶板破坏状态与试验靶板图像进行对比发现，数值模拟获取的靶板穿孔大小、形状均与试验得到的碳纤维层合板的穿孔大小、形状比较接近。由层合板厚度方向的剖面可观察到，靶板的纤维层之间有分层现象，靶板背面的纤维层变形更大，同时碳纤维复合材料产生的微裂纹、分层和翘曲也有所体现。由表 4 中的数据可知，试验弹道极限与数值模拟弹道极限的最大偏差为 7.86%，说明本研究中的数值模型模拟观测破片侵彻碳纤维复合材料的侵彻过程可靠。

表 4　试验和数值模拟得到的弹道极限误差

Table 4　Ballistic limit error of test and numerical simulation

Target thickness/mm	Ballistic limit velocity/(m·s^{-1})		Deviation/%
	Test	Simulation	
5	334	307.76	7.86
10	405	394.78	2.52
15	448	437.55	2.33

3　碳纤维复合材料破坏机理分析

结合数值模拟得到的靶板破坏过程与试验回收靶板的破坏形态，对碳纤维复合材料层合靶板的破坏机理进行分析，可以将碳纤维复合材料在受到破片冲击时的破坏形式分为纤维层剪切破坏、纤维拉伸破坏、基体破裂和纤维层分层。

碳纤维复合材料受到破片冲击时，迎弹面表面的纤维层最开始受到破片冲击，破片速度较高，加载在复合材料上的载荷较大，复合材料中的纤维束在没有发生大的拉伸形变时便由于破片接触位置的剪

切应变失效，形成剪切破坏。此种破坏形式形成了靶板上破片穿孔入口和破片形状尺寸十分接近的现象，同时材料的剪切破坏也会形成冲塞，只是相较于钢等金属靶板所形成的冲塞，碳纤维复合材料形成的冲塞是以表层的纤维层为主，并且由于层合板的分层特性，纤维层之间并非一个完全的整体，纤维形成的冲塞会在后续的侵彻中发挥作用。

破片着靶速度远大于弹道极限时，破片在整个侵彻过程中都保持着较高的速度，持续对靶板施加较大的载荷，靶板的所有纤维层均以剪切破坏为主，且由于先接触破片纤维层形成的冲塞会对破片的后续侵彻产生影响，破片的穿孔隧道逐渐扩大，而后呈现锥形。

破片速度逐渐降低时，层合板上的纤维层发生变形，层合板内部产生拉伸应变，在应变累积超过纤维层的极限时，纤维层发生拉伸破坏。

在层合板变形的同时，纤维束与基体的弹性模量不同，在两者产生相同应变的情况下，内部的应力不同，此时纤维复合材料存在基体开裂的破坏形式，表现为破片穿孔出口周围出现纤维分离现象。碳纤维复合材料层合板是在特殊工艺下压制而成，纤维层界面之间的结合力小于纤维层内部的结合力，在破片侵彻过程中后层靶板的变形逐渐变大，使得层与层之间分离产生分层破坏，在靶板上表现为靶板背弹面形成大面积鼓包，厚度方向的剖面图可以看出靶板纤维层分离。

综上所述，破片侵彻碳纤维复合材料靶板是一个十分复杂的过程，当工况发生改变时，靶板的失效模式也会随之变化。破片速度较高时，靶板以纤维的剪切破坏为主；当破片速度较低时，多种破坏形式所占比重随着破片速度的变化而变化。

4　结　论

(1) 本研究开展了 8 g 立方体钢破片侵彻 5、10、15 mm 厚碳纤维复合材料靶板数值模拟和试验研究，回收破片、靶板并获取速度数据，结果表明，随着靶板厚度增加，弹道极限增加且增速变慢。

(2) 利用 LS-DYNA 进行破片侵彻碳纤维复合材料的数值模拟，通过模型选取和调整参数，模拟结果与试验结果具有较好的一致性，试验弹道极限与数值模拟弹道极限的最大误差为 7.86%，说明数值模拟观测破片侵彻碳纤维复合材料靶板过程可靠。

(3) 结合数值模拟过程和试验回收靶板情况分析，将碳纤维复合材料在受到破片冲击时的破坏形式分为纤维层剪切破坏、纤维拉伸破坏、基体破裂和纤维层分层。靶板破坏形式与破片着靶速度有关：破片速度较高时，靶板以纤维的剪切破坏为主；破片速度较低时，纤维的拉伸破坏、基体破裂与纤维层分层多种破坏形式所占比重随着破片速度的变化而变化。

参考文献：

[1] ANUSE V S, SHANKAR K, VELMURUGAN R, et al. LVI and CAI analysis of woven carbon fiber reinforced composite laminates with different stacking sequence [J]. Key Engineering Materials, 2023, 969: 93–100.

[2] 常新龙, 孙超凡, 齐重阳, 等. 集成于碳纤维复合材料的 fsFBG 响应特性研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2024, 45(1): 208–216.
CHANG X L, SUN C F, QI C Y, et al. Response characteristics of fsFBG sensor based on carbon fiber composite laminate [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45(1): 208–216.

[3] HOSUR M V, ALEXANDER J, JEELANI S, et al. High strain compression response of affordable woven carbon/epoxy composites [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2003, 22(3): 271–296.

[4] ABRATE S. Impact on laminated composites: recent advances [J]. Applied Mechanics Reviews, 1994, 47(11): 517–544.

[5] 金子明, 隋金玲, 张菡英, 等. 纤维增强复合防弹板研究进展及抗弹性能研究 [J]. 玻璃钢, 2001(1): 1–6.
JIN Z M, SUI J L, ZHANG H Y, et al. Research progress and anti-elastic properties of fiber reinforced composite bulletproof panels [J]. Fiber Reinforced Plastics, 2001(1): 1–6.

[6] MORYE S S, HINE P J, DUCKETT R A, et al. Modelling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact [J]. Composites Science and Technology, 2000, 60(14): 2631–2642.

[7] LIU P F, ZHENG J Y. Recent developments on damage modeling and finite element analysis for composite laminates: a review [J]. Materials & Design, 2010, 31(8): 3825–3834.

[8] ORIFICI A C, HERSZBERG I, THOMSON R S. Review of methodologies for composite material modelling incorporating failure [J]. Composite Structures, 2008, 86(1/2/3): 194–210.

[9] BØRVIK T, LANGSETH M, HOPPERSTAD O S, et al. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses: part Ⅰ: experimental study [J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27(1): 19–35.

[10] BØRVIK T, HOPPERSTAD O S, BERSTAD T, et al. Perforation of 12 mm thick steel plates by 20 mm diameter projectiles with flat, hemispherical and conical noses. part Ⅱ: numerical simulations [J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27(1): 37–64.

[11] IQBAL M A, GUPTA N K. Ballistic limit of single and layered aluminium plates [J]. Strain, 2011, 47(Suppl 1): e205–e219.

[12] GUPTA N K, IQBAL M A, SEKHON G S. Experimental and numerical studies on the behavior of thin aluminum plates subjected to impact by blunt- and hemispherical-nosed projectiles [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(12): 1921–1944.

[13] 刘璐璐, 宣海军, 洪伟荣, 等. 锻纹机织复合材料高速冲击试验研究及理论分析 [J]. 中国科技论文, 2016, 11(10): 1169–1174.
LIU L L, XUAN H J, HONG W R, et al. Experimental study and theoretical analysis on high velocity impact of satin woven carbon fiber reinforced composites [J]. China Sciencepaper, 2016, 11(10): 1169–1174.

[14] 邓云飞, 袁家俊, 徐建新. 半球形头弹不同角度冲击下编织复合材料板的侵彻特性 [J]. 复合材料学报, 2018, 35(4): 843–849.
DENG Y F, YUAN J J, XU J X. Penetration characteristics of woven composite laminates impacted by hemispherical-nosed projectiles at different angles [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(4): 843–849.

[15] 邓云飞, 袁家俊, 徐建新. 刚性卵形头弹撞击角度对编织复合材料层合板侵彻特性的影响 [J]. 复合材料学报, 2018, 35(8): 2039–2045.
DENG Y F, YUAN J J, XU J X. Influence of the impact angle of rigid ogival-nosed projectiles on the penetration characteristics of woven composite laminates [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(8): 2039–2045.

[16] 谢文波, 张伟, 姜雄文. 钢球斜侵彻碳纤维复合材料板的实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(3): 647–653.
XIE W B, ZHANG W, JIANG X W. Oblique penetration on CFRPs by steel sphere [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(3): 647–653.

[17] 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.

[18] 赵稼祥. 日本东丽公司碳纤维和石墨纤维的新进展 [J]. 宇航材料工艺, 1982(5): 37.
ZHAO J X. New progress of carbon fiber and graphite fiber of toray corporation, japan [J]. Aerospace Materials & Technology, 1982(5): 37.

[19] QI S B, HUANG G Y, ZHI X D, et al. External blast flow field evolution and response mechanism of single-layer reticulated dome structure [J]. Defence Technology, 2023, 24: 241–253.

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

LI Qiaoge[1], LIANG Zengyou[1], WANG Chunguang[2], HAO Yongqiang[3]

（1. *School of Mechanical and Electrical Engineering*, *North University of China*, *Taiyuan* 030051, *Shanxi*, *China*;
2. *Jinxi Group Jiangyang Company*, *Taiyuan* 030051, *Shanxi*, *China*;
3. *Inner Mongolia Power Machinery Research Institute*, *Hohhot* 010000, *Inner Mongolia*, *China*）

Abstract: In order to explore the anti-penetration property of carbon fiber composite materials, a series of experiments need to be carried out. In experiments, 8 g cubic steel fragments penetrated carbon fiber reinforced plastics whose thickness are 5, 10 and 15 mm respectively. The velocity of fragments was obtained, the situation of target was observed, fragments and carbon fiber were recovered. The numerical simulations were carried out according to the situation of experiments. The process of fragments penetrating carbon fiber composite target was explored, and the failure mechanism of carbon fiber composite target was also explored. The relationship between the failure mode and velocity of fragments could be described as follows: when the fragment velocity exceeds the ballistic limit, the main form of target damage is fiber shear failure; when the fragment velocity is lower than the ballistic limit, the damage forms of the target include fiber shear failure, fiber tensile failure, matrix cracking and fiber layer delamination, and their proportions change with the fragment velocity.

Keywords: carbon fiber reinforced plastics; ballistic penetration test; fragment; failure mechanism