

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0472

连续纤维增强高孔隙复合材料的抗侵彻性能研究*

王洋¹, 李广滨¹, 王桂吉¹, 唐恩凌², 高国文², 彭辉¹

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 沈阳理工大学辽宁省瞬态物理力学与能量转换材料重点实验室, 辽宁 沈阳 110159)

摘要: 为开展连续纤维增强高孔隙复合材料的侵彻防护性能, 首先, 用二级轻气炮发射 Q235 钢质弹丸, 对连续纤维增强高孔隙复合材料开展弹道侵彻实验, 计算了弹道极限, 归纳和分析了其损伤的形态和模式, 并将这种复合材料的侵彻防护性能与其他材料进行了比较; 然后, 对弹道侵彻连续纤维增强高孔隙复合材料进行了数值模拟, 比较了剩余速度、损伤的形态和范围, 模拟结果与实验结果吻合较好; 进而通过观察有限元模拟的弹孔形态、应力分布和损伤分布等方式, 对侵彻过程的损伤机理进行了分析。研究结果可为复合材料在防热、冲击防护与承受外载荷等多功能一体化的应用提供参考依据。

关键词: 连续纤维增强复合材料; 弹道极限; 侵彻防护性能; 损伤机理; 能量转化

中图分类号: O347.3; TB332 国标学科代码: 13015 文献标志码: A

A study of anti-penetration properties of continuous fiber-reinforced high-porosity composites

WANG Yang¹, LI Guangbin¹, WANG Guiji¹, TANG Enling², GAO Guowen², PENG Hui¹

(1. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;

2. Key Laboratory of Transient Physical Mechanics and Energy Conversion Materials of Liaoning Province, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, Liaoning, China)

Abstract: It is of great scientific significance and application value to study the anti-penetration performance of continuous fiber-reinforced high-porosity composites. First, the ballistic penetration experiments of 20 mm thick continuous fiber-reinforced high-porosity composites were carried out by using two-stage light gas gun firing Q235 steel projectiles of diameter 4.5 mm. Based on the analysis of the initial and final velocities of bullet penetration, the ballistic limit of the material is obtained. By observing the damage patterns of the target plate, these patterns are divided into three types from low to high according to the initial velocity of the projectiles: back-crack type, back-burst type and penetrated type. The anti-penetration performance of this composite material is compared with other materials by specific energy absorption, showing that the anti-penetration performance of the composite against low-speed penetration up to 600 m/s is better than those of steel, aluminum, Kevlar and glass fiber composite. Then, an orthogonal anisotropic continuum damage constitutive model is proposed for the continuous fiber-reinforced high-porosity composites. This constitutive model is written as a subroutine and embedded in the finite element software by secondary development. On this basis, the finite element simulations of ballistic penetrations of continuous fiber reinforced high-porosity composites are conducted. The validity of the constitutive and finite element models is verified by comparing the final velocity, ballistic limit and damage range of the back surface obtained from experiment and simulation. Furthermore, the damage mechanism of the penetration process is analyzed by observing the shape of the bullet

* 收稿日期: 2023-12-29; 修回日期: 2024-04-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (12141203)

第一作者: 王洋 (1998—), 男, 硕士研究生, wangyang.0331@163.com

通信作者: 彭辉 (1986—), 男, 博士, 副研究员, penghui299@163.com

hole, stress distribution and damage distribution obtained from the finite element simulation. The results show that the formation of the bullet hole during the penetration of spherical projectile is caused by shear damage, the debonding of fiber and matrix is caused by the combined action of compression and shear, the delamination damage of the target plate is caused by the tension wave created by the reflection of compression wave, and the fiber breakage belongs to tension damage. Besides, the kinetic energy, internal energy and their proportion to the kinetic energy change of the bullet are compared with the initial velocity. It is pointed out that most of the kinetic energy of the projectile is transformed into the kinetic energy of the fragment of target plates and the plastic deformation energy of the projectile. The research results provide a reference for the multifunctional integration of these composite materials in heat protection, penetration protection and load bearing.

Keywords: continuous fiber reinforced composite; ballistic limit; anti-penetration property; failure mechanism; energy transformation

纤维增强复合材料具有比强度和比模量高、材料性能可设计性、密度低、热电绝缘性良好、耐腐蚀性能好等优点,被广泛应用于航空航天、国防军工、汽车工业、建筑与基础设施、管道与储罐、体育等领域,尤其是在防护领域应用更广泛,因此,研究复合材料的抗冲击性能具有重要意义^[1-4]。

研究人员已通过实验和数值模拟对纤维增强复合材料的弹道冲击与侵彻进行了研究。在弹道极限领域, Jenq 等^[5-6]利用能量守恒方法提出了平面编织复合材料 E-glass/Epoxy 层合板在球头弹撞击下的弹道极限; López-Puente 等^[7]研究了 CFRP(carbon fiber reinforced plastic) 层合板在球形弹体冲击作用下的弹道极限和损伤面积,结果表明,复合材料层合板损伤面积在弹道极限附近最大;杜忠华等^[8]在动量和能量守恒的基础上,根据本构关系和失效准则给出了预测复合材料层合板的弹道极限速度的经验公式。在损伤区域的划分方面,王元博^[9]根据平头弹体高速冲击的特点,将破坏区域沿靶板厚度方向划分为压入破坏和弯曲破坏。关于能量吸收,江琦^[10]研究认为,子弹垂直冲击复合材料板时,能量的吸收机理主要有弹头的摩擦和变形、纤维断裂和拔出、基底开裂或屈服破坏以及纤维和树脂发生界面脱粘。

在数值模拟方面,谭焕成等^[11]建立了三维四向编织复合材料的宏观有限元模型,发现钢珠剩余速度的模拟结果与实验结果的误差在 5% 以内,宏观冲击损伤形态与实验结果吻合较好。王云聪等^[12]赋予复合材料正交各向异性材料模型和侵蚀接触属性,模拟出了弹靶作用的三个阶段:初期,上层纤维和基底发生剪切充塞破坏;中期,因应力波在各层之间不断发生反射和透射,导致背板分层;末期,背板分层拉断且弯曲变形。Jagtap 等^[13]建立了碳纤维/环氧树脂复合材料层合板的三维有限元模型,以最大应力失效准则判断复合材料的基底开裂、分层等损伤形态,研究了不同网格尺寸对层合板冲击损伤时的接触力和变形的影响。综上所述,复合材料的侵彻防护性能会受到组分、纤维结构、制造工艺、加载条件等的影响。然而,对于以连续纤维增强高孔隙复合材料为代表的轻质耐热复合材料的弹道侵彻领域的研究鲜有报道。

连续纤维增强高孔隙复合材料是一种在酚醛树脂中添加酚醛、玻璃、陶瓷粉体为基底,石英等功能纤维为增强相^[14]的复合材料,在航空航天和武器装备中的高温和冲击下的防护领域被广泛应用,使得这类材料在实际应用中会面临高速碰撞和侵彻的情况。对这类耐热复合材料的研究多基于其隔热与耐烧蚀性能,对力学性能特别是动态力学性能与冲击防护性能的研究较少。因此,从实验、理论和数值模拟等方面开展其侵彻和防护性能研究,获取相关性能参数和特性规律,可为这类材料在侵彻防护领域的应用提供更好的支撑。

本文中,运用二级轻气炮发射不同初速度的球形弹丸,对厚 20 mm 的连续纤维增强高孔隙复合材料靶板进行正侵彻,获取不同初速度下球形弹丸侵彻靶板后的剩余速度,得到靶板的弹道极限,计算比吸能并与其他防护材料作对比,观察不同初速度下靶板的损伤形态。在此基础上,对球形弹丸侵彻靶板进行数值仿真,选取合适的本构模型进行二次开发,对侵彻过程中的应力分布、损伤分布、弹丸接触力、能量吸收与耗散情况等进行分析,并探究不同侵彻速度下靶板的损伤破坏机理,为连续纤维增强高孔隙复合材料在防护领域的应用提供依据。

1 弹道侵彻实验

1.1 实验概况

实验所用的连续纤维增强高孔隙复合材料是一种二维编织复合材料。每一发弹道侵彻实验所用的靶板边长均为 10.0 cm, 厚度均为 2.0 cm, 如图 1 所示。侵彻弹体采用 Q235 钢制作的球形弹丸, 直径均为 4.5 mm, 质量约 0.37 g。

实验在二级轻气炮上进行, 二级轻气炮的构造示意图如图 2 所示。

二级轻气炮采用高压氮气与高压氢气驱动。发射时首先在气室内充入高压氮气, 并在活塞右侧的泵管中充入氢气, 然后打开电磁阀, 让高压氮气流入泵管, 推动活塞向右运动压缩泵管的氢气。当氢气压力超过一定水平后, 发射管尾部的膜片被冲破; 高压氢气推动弹托与弹丸在炮管中前进。在弹托前进过程中活塞继续向前运动, 使高压氢气的压强不发生明显的下降, 保证弹丸高速飞出炮口, 并通过调整弹丸与炮口的距离来改变弹体离开发射管速度。子弹与弹托在弹托分离器处分离, 弹托被阻挡在测速装置之前, 以免干扰测速与侵彻。为了避免靶板四周由于弯曲应力集中导致的边界失效, 采用胶带缠绕的方法将靶板固定在靶架上, 以约束靶板的刚体转动和平动自由度。

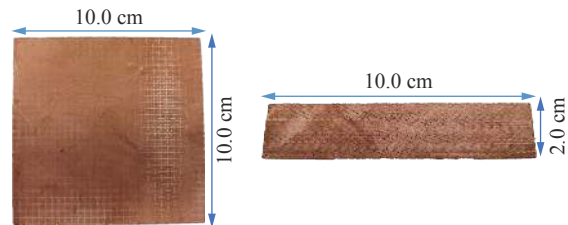


图 1 连续纤维增强高孔隙复合材料靶板

Fig. 1 Target plate made from continuous fiber reinforced high-porosity lightweight heat-resistant composite

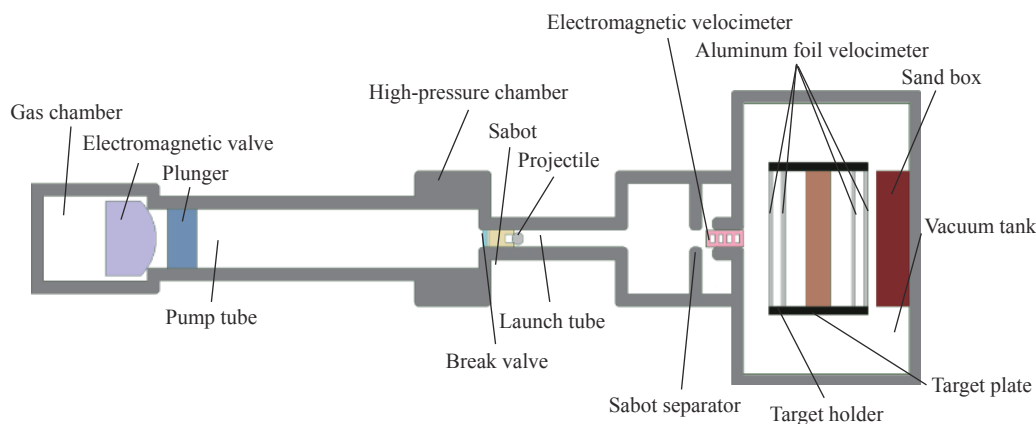


图 2 二级轻气炮构造示意图^[15]

Fig. 2 Schematic diagram of two-stage light gas gun^[15]

1.2 实验结果分析

采用 Q235 钢制球形弹丸正侵彻靶板, 进行了多发实验, 结果如表 1 所示, 可以看出, 初速度为 583.7 m/s 的弹丸未穿透靶板, 其余初速度下的弹丸都穿透了靶板。弹丸动能随初速度的增加而增加, 二者基本呈线性关系。

随着初速度由低到高增大, 侵彻过程给弹丸带来的变形会越来越明显。第 6 发实验的回收弹丸如图 3(a) 所示, 由于初速度较低, 弹丸几乎不发生塑性变形, 只是表面变得粗糙, 弹丸与靶板的接触面覆盖着少量靶板材料; 随着初速度的升高, 如图 3(b) 所示, 第 3 发实验的弹丸发生轻微的塑性变形, 表现为轻微的失圆, 弹丸与靶板的接触面被较多的靶板材料覆盖; 初速度更高时, 第 1~2 发实验的弹丸发生较明显的塑性变形, 表现为有一个明显的尖端与尖端周围材料的退缩, 弹丸与靶板的接触面覆盖着更多的靶

板材料, 如图 3(c)~(d) 所示。上述结果说明侵彻过程中不能将弹丸视为刚体, 应考虑弹丸的弹性与塑性变形。

表 1 侵彻实验结果

Table 1 Experimental results of penetration

实验	初速度/(m·s ⁻¹)	末速度/(m·s ⁻¹)	弹丸动能/J	损伤类型
1	1640.0	1227.5	218.83	切孔型
2	1450.9	1040.1	189.31	切孔型
3	1082.0	715.5	121.87	背面炸裂型
4	1046.2	651.0	124.09	背面炸裂型
5	583.7	未穿透	63.03	未穿透
6	775.0	263.5	98.27	背面裂缝型



图 3 弹道冲击实验后弹丸回收样品

Fig. 3 Recovered projectiles after the ballistic impact experiment

1.2.1 损伤形态分析

损伤形态是复合材料侵彻冲击下破坏模式和损伤机理的外在表现, 也是有限元模型中损伤分析的基础。不同的损伤形态体现了不同的失效与破坏机理和吸能特性, 所以根据冲击造成的损伤形态特征划分冲击损伤类型。如表 2 和图 4 所示, 由于在不同的初速度下, 靶板迎弹面的损伤形态差别不明显, 体现为纤维断裂、纤维基底脱粘和基底在弹丸侵彻开孔瞬间高压下的粉碎破坏与侵彻弹孔的形成, 迎弹面损伤范围直径与初速度无明显关系, 通过观察弹丸射出孔周围的损伤形态并参考文献 [16], 将侵彻损伤的类型分为背面裂缝型、背面炸裂型和切孔型三种。

背面裂缝型损伤。损伤形态如图 5 所示, 可以看到, 纤维拔出、纤维断裂和纤维基底脱粘主要集中于以弹孔为中心的十字形范围。靶板的背弹面沿着弹丸的运动方向凸出, 产生较大的残留变形, 而且损伤区域内部有大范围分层。

背面炸裂型损伤。损伤形态如图 6 所示, 在弹孔附近呈现纤维的弯折与靶板材料的折断飞出, 背弹面上的凸起程度减小。较高的弹丸速度促进了基底的碎裂, 并导致纤维与基底之间出现明显的脱粘, 弹孔周边出现了较大范围的分层。背弹面的损伤范围明显大于迎弹面的损伤范围, 介于其他两种损伤类型之间。

切孔型损伤。损伤形态如图 7 所示, 当弹丸的速度更高时, 侵彻过程中靶板局部损伤的特征更加突出, 背弹面的凸起程度比其他两种损伤类型更低。更高的弹丸速度导致基底碎裂得更严重, 并加剧了纤维基底的脱粘, 使得纤维表面几乎未被基底覆盖。弹丸从靶板中穿透过去后, 在

表 2 靶板迎弹面、背弹面损伤范围

Table 2 Damage range of the impact surface and back surface of the target plate

实验	初速度/(m·s ⁻¹)	迎弹面损伤范围	背弹面损伤范围
		直径/mm	直径/mm
1	1640.0	6.17	14.80
2	1450.9	8.63	14.78
3	1082.0	6.19	18.83
4	1046.2	5.19	16.07
5	583.7	5.23	未穿透
6	775.0	5.52	17.37

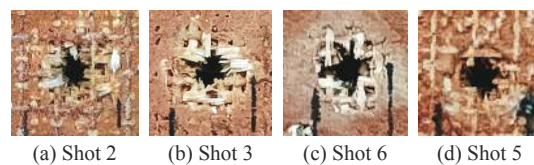


图 4 靶板迎弹面损伤形态

Fig. 4 Damage morphology of the impact surface of the target plate



图 5 背面裂缝型损伤形态(实验 6)

Fig. 5 Appearance of back-crack damage pattern (shot 6)

靶板上留下一个与弹丸直径几乎相等的弹孔, 弹孔未被纤维覆盖, 损伤区域小于背部炸裂性损伤与背面裂缝型损伤。

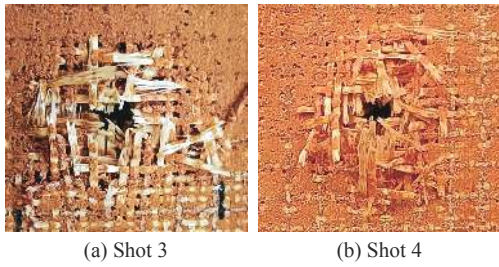


图 6 背面炸裂型损伤形态
Fig. 6 Appearance of back-burst damage pattern

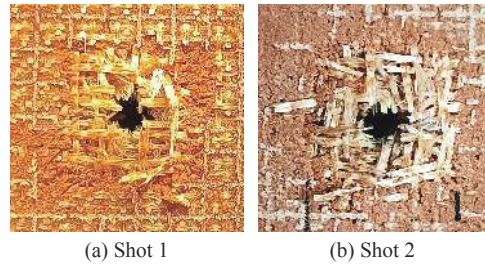


图 7 切孔型损伤形态
Fig. 7 Appearance of penetrated damage pattern

1.2.2 弹道极限

采用 Lambert-Jonas 弹道极限方程^[17]可以较好地拟合弹道冲击的剩余速度与初始速度的关系:

$$v_r = a(v_i^p - v_{bl}^p)^{\frac{1}{p}} \quad (1)$$

式中: v_i 为初速度, v_r 为末速度, v_{bl} 、 a 和 p 为拟合参数。式(1)适用于入射速度大于弹道极限的情况。如图 8 所示, 通过拟合曲线, 可以得到实验所用的复合材料靶板在正侵彻下的弹道极限约为 732.5 m/s。

1.2.3 比吸能与侵彻防护能力

弹丸在侵彻过程中的动能损耗 (ΔE_k) 是通过其初速度 (v_i) 和末速度 (v_r) 来确定的:

$$\Delta E_k = E_p + E_{air} = \frac{1}{2} m_p (v_i^2 - v_r^2) \quad (2)$$

式中: ΔE_k 包含穿透靶板的能量 E_p 和空气阻力耗能 E_{air} 。本文中忽略空气阻力, 即 $E_k = E_p$ 。按照下式定义比吸能^[18-19]:

$$E_p^* = \frac{E_p}{m_s} = \frac{E_p}{\rho A_s h} \quad (3)$$

式中: ρ 为靶板密度, h 为靶板厚度, $A_s = \pi r^2$ 为弹丸撞击面的面积。表 3 给出了不同初速度下靶板的比吸能。

将本文中的连续纤维增强高孔隙复合材料与其他金属、非金属、复合材料的比吸能 (E_p^*) 在图 9 中进行对比^[20-26], 可以看出, 连续纤维增强高孔隙复合材料的比吸能 E_p^* 与其他材料一样, 随初速度的增大而增大, 特别是连续纤维增强高孔隙复合材料(类似钢、铝等材料)存在初速度临界点, 使得比吸能 E_p^* 在超过该临界点后急剧增加。结合表 3 对比发现: 在大约 1 000 m/s 的初速度下, 连续纤维增强高孔隙复合材料的 E_p^* 比三维正交机织玻璃纤维复合材料(three-

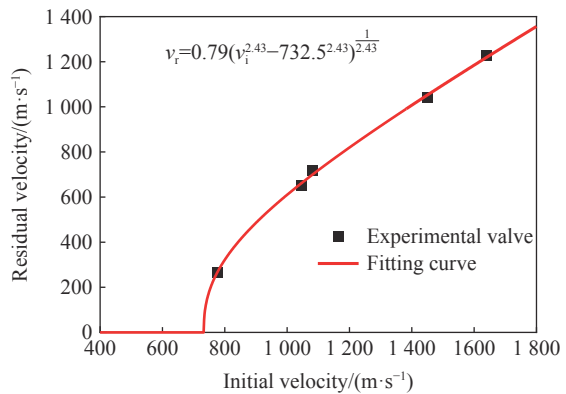


图 8 弹体侵彻的剩余速度与初速度的关系曲线
Fig. 8 Relationship between residual velocity and initial velocity in projectile penetration

表 3 不同初速度下的比吸能

Table 3 Specific absorption energy under different initial velocities

实验	初速度/ (m·s ⁻¹)	末速度/ (m·s ⁻¹)	弹丸动能 变化/J	比吸能/ (MJ·kg ⁻¹)
1	1640.0	1227.5	221.52	0.76
2	1450.9	1040.1	191.64	0.66
3	1082.0	715.5	123.37	0.43
4	1045.8	651.0	125.45	0.43
5	583.7	未穿透	63.81	0.37
6	775.0	263.5	99.48	0.34

dimensional orthogonal woven glass fiber composites, 3D GFRP) 的低 2.5%; 在大约 750 m/s 的初速度下, 连续纤维增强高孔隙复合材料的 E_p^* 相当于铝的 58%, 不锈钢的 70%, 凯夫拉的 76%, 平纹玻璃纤维/环氧酚醛层合板 (plain weave glass fabric/epoxy-phenolic laminates, 2D GFRP) 的 81%, 碳纤维复合材料 (carbon fiber reinforced plastic, CFRP) 的 65%, 比 3D GFRP 大 15%; 在大约 600 m/s 的初速度下, 连续纤维增强高孔隙复合材料的 E_p^* 比聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl methacrylate, PMMA) 大 68%, 比不锈钢大 39%, 是凯夫拉的 98%, 比 2D GFRP 大 7%, 比 3D GFRP 大 40%, 比 CFRP 小 6%。结果表明, 连续纤维增强高孔隙复合材料在初速度 750 m/s 以上的防护能力不如钢、铝等材料, 但对初速度 600 m/s 及以下的低速侵彻的防护性能优于钢、铝、凯夫拉、玻璃纤维复合材料, 因而在低密度轻质防护材料领域有较好的应用前景, 可以在初速度 600 m/s 及以下的低速侵彻条件下代替钢、铝等传统金属材料 and 碳纤维、玻璃纤维、凯夫拉等传统复合材料。

2 弹道侵彻数值模拟

2.1 有限元计算模型

对连续纤维增强高孔隙复合材料在宏观尺度上进行研究, 将弹丸和靶板视为连续均匀且无残余应力的材料, 侵彻过程中忽略冲击温升、摩擦生热、空气阻力和重力。利用弹丸和靶板本构模型的对称性建立四分之一模型。靶板边缘采用固定约束, 对称处采用对称边界约束。建立的有限元计算模型如图 10 所示, 靶板的尺寸为 50 mm×50 mm×20 mm。

采用 8 节点三维实体单元划分网格, 模型共划分为 1 004 802 个单元。又由于侵彻问题的高压和大变形区域主要在弹丸与靶板接触位置附近, 为了提高计算速度和保证计算精度, 将弹丸和靶板接触区域及周边网格的尺寸设为 0.2 mm, 其余部分网格的尺寸设为 1.0 mm, 以保证应力的分布尽量平滑, 减轻网格尺度效应对结果的影响。

2.2 材料模型及参数

对复合材料靶板, 选用正交各向异性线弹性与基于三维 Hashin 准则的失效判据作为本构模型^[27-29]。由于基于应力的损伤判据可能导致不连续问题^[30], 所以将应力修改为应变。改进后的失效准则包含以下 7 种损伤判据。

面内经向纤维拉伸:

$$F_1 = F_{1,t} = \left(\frac{E_1 \varepsilon_{11}}{X_t} \right)^2 + \left(\frac{G_{13} \varepsilon_{13}}{S_{13}} \right)^2 \quad \varepsilon_{11} \geq 0 \quad (4)$$

面内经向纤维压缩:

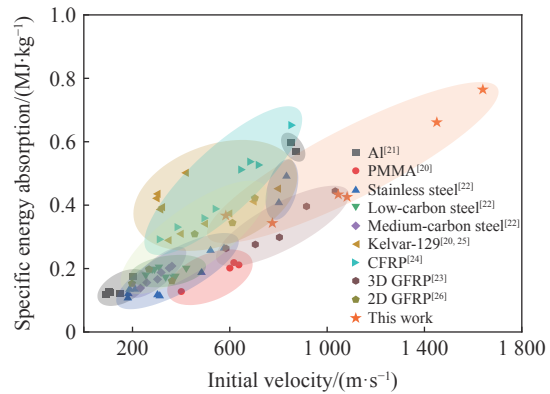


图 9 不同材料比吸能对比^[20-26]

Fig. 9 Comparison of specific absorption energy of different materials^[20-26]

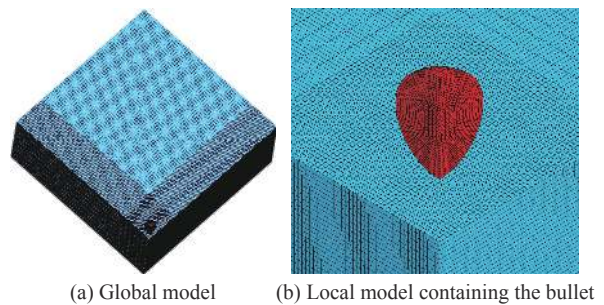


图 10 侵彻有限元模型

Fig. 10 Finite element model of penetration

$$F_2 = F_{1,c} = \left(\frac{E_1 \varepsilon_{11}}{X_c} \right)^2 \quad \varepsilon_{11} < 0 \quad (5)$$

面内纬向纤维拉伸:

$$F_3 = F_{2,t} = \left(\frac{E_2 \varepsilon_{22}}{Y_t} \right)^2 + \left(\frac{G_{23} \varepsilon_{23}}{S_{23}} \right)^2 \quad \varepsilon_{22} \geq 0 \quad (6)$$

面内纬向纤维压缩:

$$F_4 = F_{2,c} = \left(\frac{E_2 \varepsilon_{22}}{Y_c} \right)^2 \quad \varepsilon_{22} < 0 \quad (7)$$

面内剪切:

$$F_5 = F_{12} = \left(\frac{2G_{12} \varepsilon_{12}}{S_{12}} \right)^2 \quad (8)$$

面外压缩:

$$F_6 = F_{3,c} = \left(\frac{E_3 \varepsilon_{33}}{Z_c} \right)^2 \quad \varepsilon_{33} < 0 \quad (9)$$

面外拉伸分层:

$$F_7 = F_{3,t} = \left(\frac{E_3 \varepsilon_{33}}{Z_t} \right)^2 + \left(\frac{G_{13} \varepsilon_{13}}{S_{13}} \right)^2 + \left(\frac{G_{23} \varepsilon_{23}}{S_{23}} \right)^2 \quad \varepsilon_{33} \geq 0 \quad (10)$$

式中: F 为损伤判据因子, E_1 为面内经向弹性模量, E_2 为面内纬向弹性模量, E_3 为面外弹性模量, G_{12} 为面内剪切模量, G_{13} 、 G_{23} 为面外剪切模量, X_t 为面内经向拉伸强度, Y_t 为面内纬向拉伸强度, X_c 为面内经向压缩强度、 Y_c 为面内纬向压缩强度, Z_t 为面外拉伸强度, Z_c 为面外压缩强度, S_{12} 为面内剪切强度, S_{23} 、 S_{13} 为面外剪切强度, 下角标 1、2、3 指面内经向、纬向与面外法向。 $F > 1$ 后, 对靶板的拉伸与剪切模量进行如下式所示的指数型损伤退化, 退化到一定程度后单元失效删除:

$$\varphi_i = 1 - \exp\left(\frac{1 - F_i}{m_i}\right) \quad (11)$$

此外, 本模型考虑了复合材料的模量和强度的应变率效应:

$$\frac{X_{\text{rate}}}{X_0} = 1 + C_{\text{rate}} \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \quad (12)$$

式中: φ_i 为退化模量的损伤因子, F_i 为第 i 种失效模式对应的损伤函数, m_i 为损伤演化特征参数, X_{rate} 指应变率为 $\dot{\varepsilon}$ 时的模量、强度等材料参数, X_0 指参考应变率 $\dot{\varepsilon}_0$ 下的模量、强度等材料参数, C_{rate} 是为应变率效应系数, $\dot{\varepsilon}$ 为当前应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率。将上述本构模型写成 Fortran 子程序进行二次开发, 生成自定义的求解器求解。材料的模量和强度参数列于表 4 中, 这些数据通过准静态拉伸、压缩与 V 形缺口梁剪切实验测得, 以及通过应力-应变曲线拟合得到。

Q235 钢制弹丸采用双线性弹塑性硬化本构, 材料参数如表 5 所示。

表 4 靶板的材料参数

Table 4 Material parameters of the target plate

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E_1/GPa	E_2/GPa	E_3/GPa	ν_{21}	ν_{31}	ν_{32}	G_{12}/GPa	G_{23}/GPa	G_{13}/GPa	X_t/MPa
0.911	4.00	4.00	1.54	0.19	0.25	0.25	3.50	1.60	1.60	30.0
Y_t/MPa	X_c/MPa	Y_c/MPa	Z_t/MPa	Z_c/MPa	S_{12}/MPa	S_{23}/MPa	S_{13}/MPa	m_i	C_{rate}	$\dot{\varepsilon}_0/\text{s}^{-1}$
30.0	89.7	89.7	10.0	78.0	20.0	15.0	15.0	1.0~3.0	0.03~0.2	10.0

表 5 Q235 钢的材料参数^[31-32]Table 5 Material parameters of Q235 steel^[31-32]

材料密度/(kg·cm ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	屈服极限/MPa	切线模量/GPa	硬化参数 β	参考应变率/s ⁻¹	Cowper-Symonds参数 n
7850	210	0.3	235	8	1	40.4	5

2.3 数值模拟结果与分析

2.3.1 有限元模拟结果

对 1.2 节中的实验进行数值模拟。实验结果和模拟结果的对比如表 6 所示。

表 6 数值模拟结果与实验结果的对比

Table 6 Comparison of numerical simulation results with experimental results

实验	实验初速度/(m·s ⁻¹)	实验末速度/(m·s ⁻¹)	模拟末速度/(m·s ⁻¹)	模拟与实验结果的偏差/%
1	1640.0	1227.5	1202.0	2.04
2	1450.9	1040.1	995.0	4.34
3	1082.0	715.5	697.0	2.52
4	1046.0	651.0	624.0	4.59
5	583.7	未穿透, 弹孔深约 12 mm	未穿透, 弹孔深约 13 mm	8.30
6	775.0	263.5	280.0	7.22

运用式 (1) 拟合数值模拟得到的弹道冲击的剩余速度与初始速度的关系, 并与实验结果进行了对比, 如图 11 所示, 得出数值模拟的弹道极限大约为 706.3 m/s, 与实验结果 732.5 m/s 的偏差约为 3.51%。上述结果表明, 本文选用的本构模型和数值模拟能很好地与实验吻合。

为了对所构建的模拟模型及模拟结果的可靠性进行检验, 从损伤的形态、类型以及损伤区域的大小等方面, 对相同实验条件下的模拟与实验的损伤形貌和损伤面积进行了比较。实验现象与模拟结果的对比如图 12 所示。

背面裂缝型的损伤区域呈菱形, 对角线方向与面内纤维方向大致平行, 靶板沿对角线的纤维拔出、纤维断裂等损伤形态对应数值模拟中的单元失效删除带来的十字形裂缝。实验与数值模拟结果均体现出沿弹丸运动方向的突出现象。数值模拟结果的损伤范围取菱形对角线长度, 约为 16.40 mm, 与实验件的 17.37 mm 接近。

背面炸裂型的损伤区域呈圆形, 弹孔附近纤维断裂与飞出, 纤维与基底之间脱粘与拔出, 这在数值模拟中体现为弹孔周围单元的变形与飞散。数值模拟结果的损伤范围取圆形, 直径约为 14.90 mm, 与实验件的 16.07 mm 接近。

切孔型的损伤区域均呈矩形, 在更高速度下, 靶板背弹面的损伤范围小于前两种损伤, 凸起不明显, 且形成清晰的侵彻通孔, 这在数值模拟中体现为弹孔内变形与飞散的单元减少。数值模拟结果的损伤范围取正方形, 其边长约为 16.00 mm, 与实验件的 14.78 mm 接近。

实验与数值模拟损伤范围和形态的对比结果说明, 本文采用的本构模型与数值模拟方法对连续纤维增强高孔隙复合材料的侵彻损伤进行了较好的还原, 体现了损伤的主要特点。

实验与数值模拟损伤范围和形态的对比结果说明, 本文采用的本构模型与数值模拟方法对连续纤维增强高孔隙复合材料的侵彻损伤进行了较好的还原, 体现了损伤的主要特点。

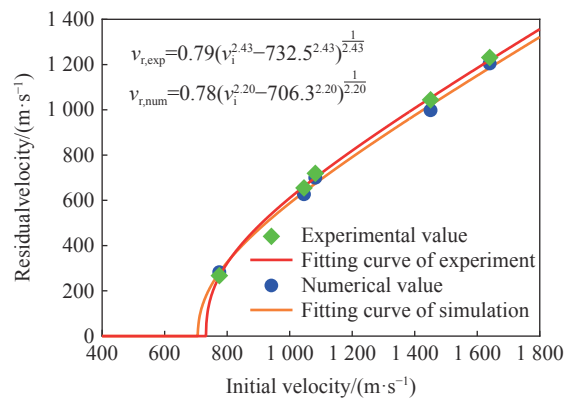


图 11 弹丸侵彻的剩余速度与初速度的实验与数值模拟结果的关系

Fig. 11 Experimental and numerical simulation results of residual velocity and initial velocity in projectile penetration

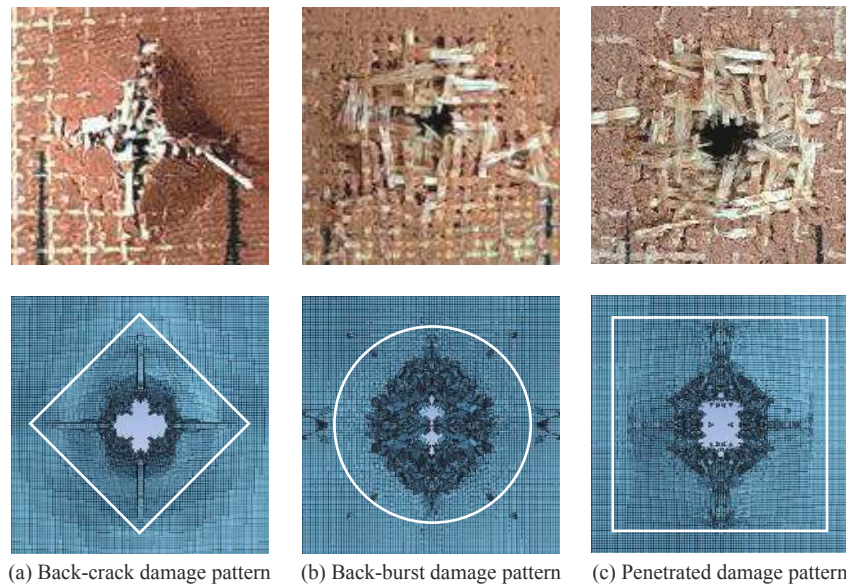


图 12 实验与数值模拟的损伤形态

Fig. 12 Damage morphology obtained from experiment and numerical simulation

2.3.2 弹丸侵彻过程分析

图 13 为侵彻速度随时间变化的曲线, 依据不同的损伤类型, 选择第 2、3、5、6 发实验的模拟结果为代表进行分析。每一条弹丸速度随时间的变化关系曲线都呈现出 4 个阶段^[33]。

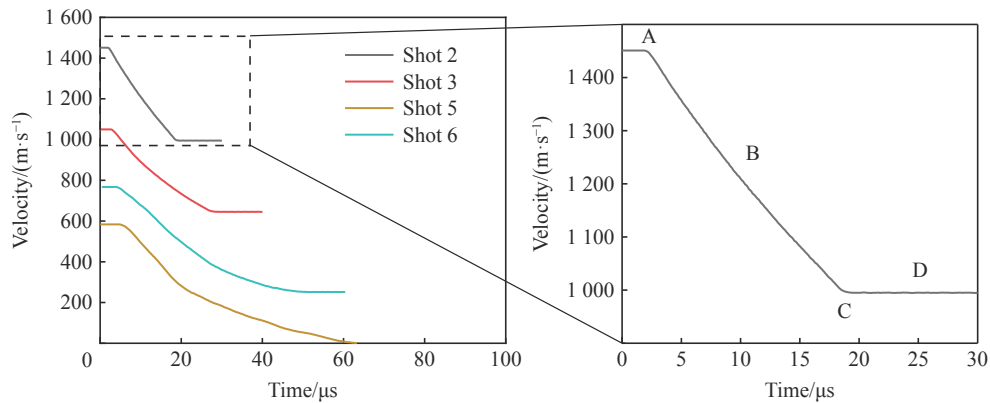


图 13 弹丸速度-时间关系曲线

Fig. 13 Velocity-time curves of projectile

(1) 开坑阶段, 即阶段 A。从弹丸接触靶板开始, 由点接触逐渐过渡到面接触。这一阶段的动能与冲击压力最大, 压力达到吉帕量级, 压缩波向四周传播, 如图 14(a) 所示。在弹丸与靶板接触区域, 靶板受到强烈挤压, 以至于破碎。此阶段直到弹丸完全没入靶板为止。

(2) 稳定侵彻阶段, 即阶段 B。此阶段弹丸完全没入靶板, 侵彻过程中弹丸与靶板接触的区域会形成压缩波, 并向四周扩展, 如图 14(b) 所示, 而且弹孔区域内的单元会因损伤失效而被删除, 在实验中体现为靶板的不断碎裂, 形成粉末并飞出弹孔。与此同时, 靶板对弹丸的阻力会随侵彻深度的加大和弹丸速度的减小而逐渐下降。

(3) 穿出阶段, 即阶段 C。弹丸头部开始穿出靶板, 所受的阻力明显下降, 侵彻阻力的减小使得弹丸速度的衰减急剧减缓, 直到弹丸头部完全冲出靶板。靶板背面会由于弹丸速度的不同体现出不同的损伤类型, 且由于压缩波在自由面处反射形成拉伸波, 在弹丸穿出靶板的过程中会使靶板产生明显的分层

损伤, 如图 14(c) 所示。

(4) 完全贯穿阶段, 即阶段 D。此阶段弹丸完全贯穿靶板, 弹丸的速度近似为一常数。由于应力波的传播和反射, 在穿孔处靶板的破坏范围会明显大于弹丸的大小, 如图 14(d) 所示。

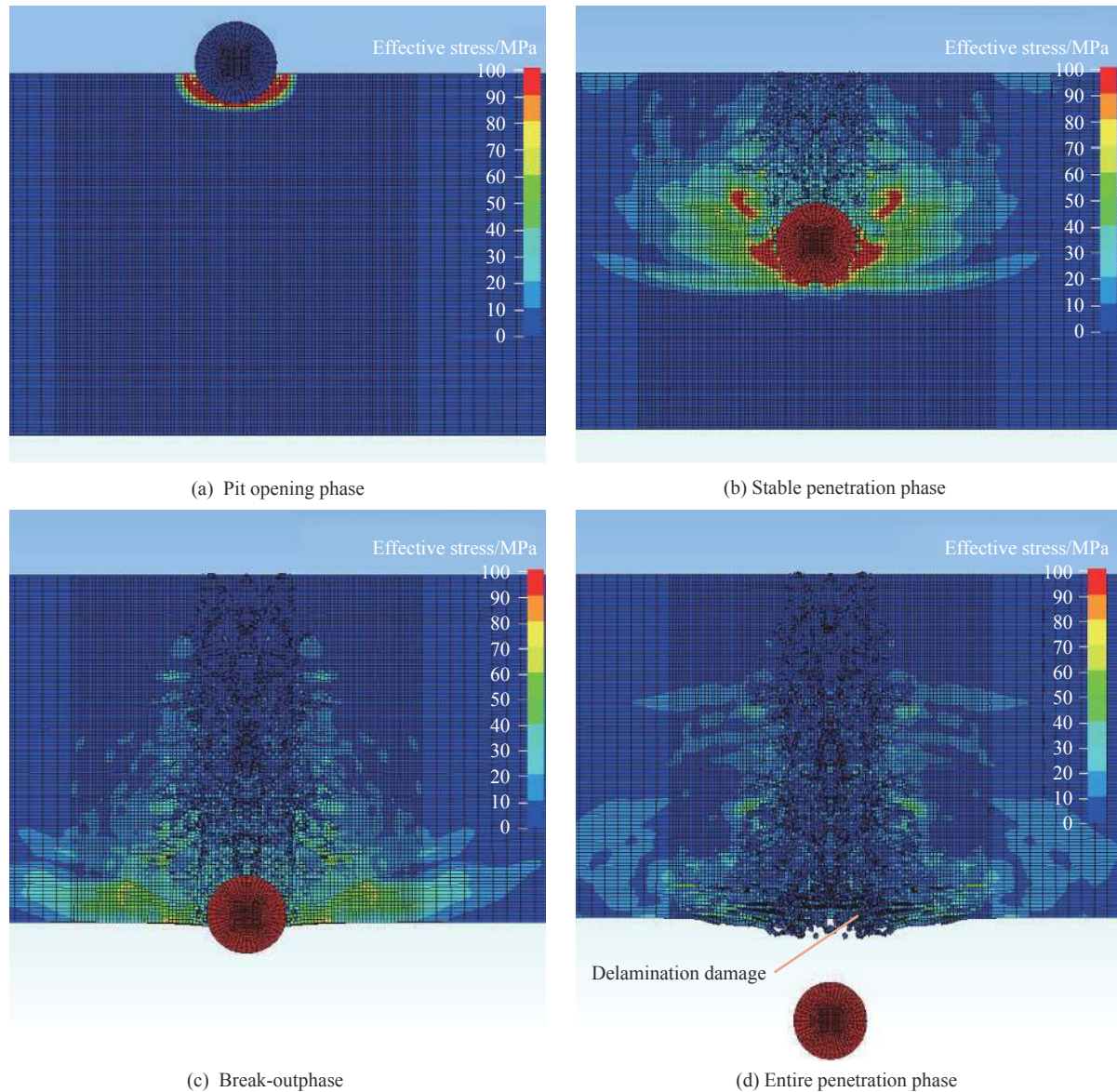


图 14 第 2 发实验对应数值模拟的侵彻过程有效应力云图

Fig. 14 Effective stress cloud pictures obtained from numerical simulation of bullet penetration process of shot 2

由表 4 可知, 靶板的面外压缩波波速 $c = \sqrt{E_3/\rho} \approx 1\,300\text{ m/s}$ 。由于剪切与分层破坏的分界点在压缩波与反射拉伸波的相遇位置^[16], 所以弹丸的初速度越高, 在厚度方向剪切作用形成弹孔的长度越大, 分层起始点离靶板背弹面越近。数值模拟很好地体现了这一趋势, 图 15 展示了不同初速度下数值模拟的弹孔形态, 随着初速度越来越低(从左往右), 红色圆圈所示的分层起始点离背弹面越来越远。

弹丸侵彻过程中接触力随时间的变化关系如图 16 所示。在开坑阶段, 复合材料的接触力急速上升。之后, 接触力的下降趋势随初速度的变化有所不同, 在第 2~3 发实验中大致分为两段: 在稳定侵彻阶段的缓慢稳定的下降与在弹丸穿出靶板的瞬间极快地降为零, 这符合图 13 中第 2~3 发实验的弹丸穿

出靶板的瞬间速度-时间曲线有不光滑点的特征,原因是应力波波速不显著高于弹丸的速度,使弹丸之前的材料受到应力波损害的范围局限于背弹面附近;而第 5~6 发实验下弹丸的接触力达到峰值后逐渐降为零,与图 13 中第 5~6 发实验下速度随时间的曲线下下降较为平缓、弹丸穿出靶板的瞬间速度-时间曲线相对光滑的特征相印证,原因是应力波波速明显高于弹丸速度,使弹丸之前的材料在离背弹面相当大的范围内已经受到应力波来回反射造成的损害。除第 2 发实验的接触力峰值达到 4.5 kN 外,其他情况下接触力的峰值约为 3.0 kN。

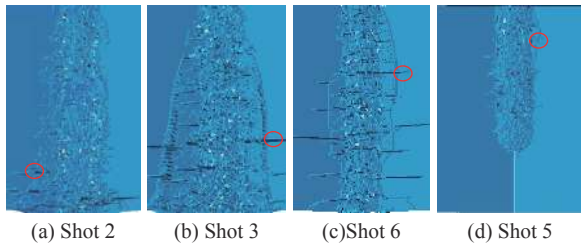


图 15 不同初速度下的弹孔形态

Fig. 15 Bullet hole patterns under different initial velocities

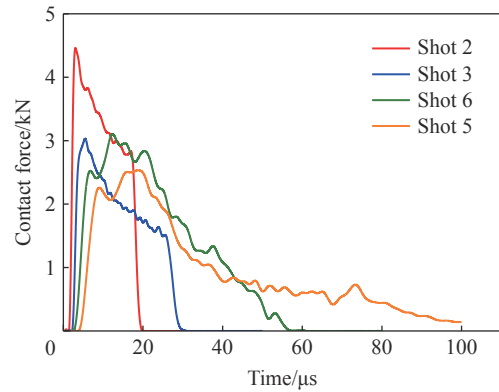


图 16 弹丸接触力随时间的变化

Fig. 16 Variation of projectile contact force with time

2.3.3 侵彻开孔过程应力与损伤分析

针对复合材料的侵彻损伤形态比金属、高分子等均质材料更加复杂的问题,有必要开展对不同的应力和损伤因子及其分布对复合材料侵彻破坏作用的分析。

侵彻过程中靶板的应力分布如图 17 所示。关于面内正应力 σ_x ,靶板与弹丸的接触区域产生了很大

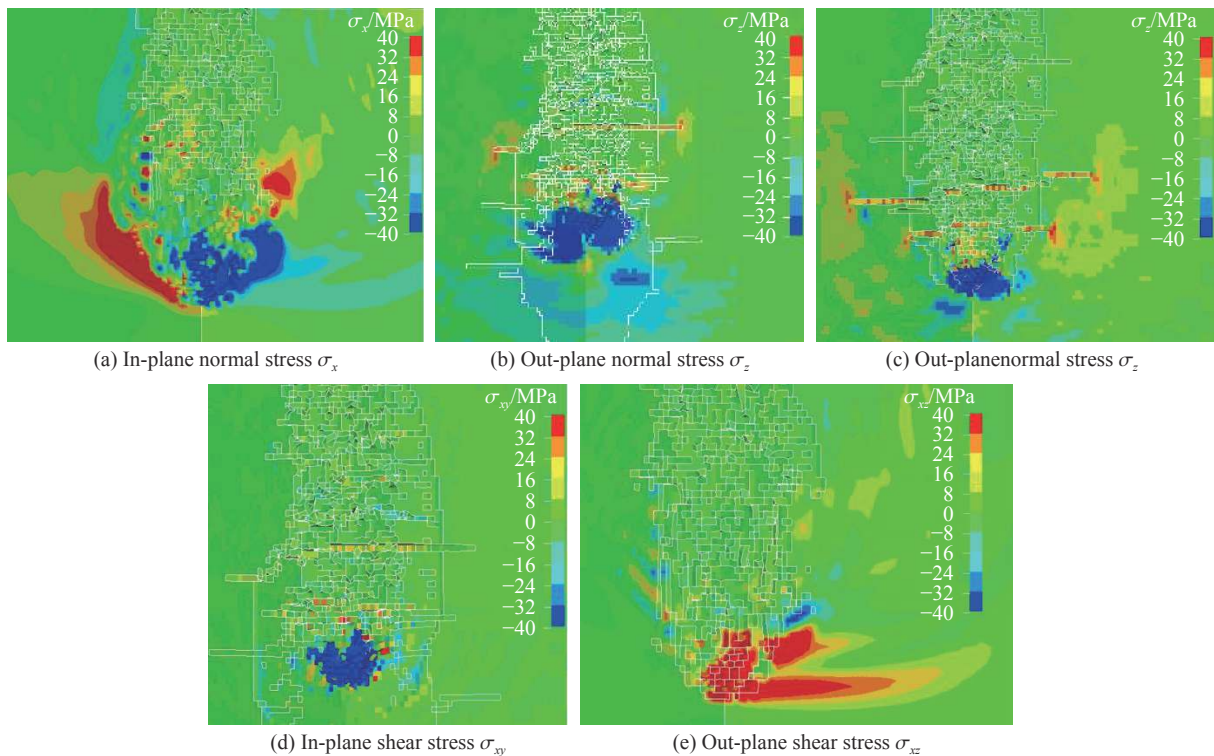


图 17 弹孔及周围的应力分布云图

Fig. 17 Stress distribution cloud picture of the penetration hole and its surroundings

的面内压应力, 而面内拉应力主要分布在经过弹孔中心的 xOz 与 yOz 平面。关于面外正应力 σ_z , 面外压应力主要分布于靶板与弹丸的接触区域, 而拉应力分布于弹孔周围, 特别是分层裂纹尖端处, 通过前后时刻面外正应力的比较可知, 面外压应力形成的压缩波在自由面处反射形成拉伸波, 导致靶板层间发生张开型 (I 型) 断裂。面内剪应力 σ_{xy} 主要分布在靶板与弹丸的接触区域, 带来一定的基底损伤。侵彻过程中靶板的面外剪应力 σ_{xz} 不仅数值很大, 而且分布在弹丸与靶板接触区域相同厚度的弹孔周围, 这表明靶板受撞击部分获得与弹丸相近的速度, 与其他相对静止的部分在侵彻方向上出现了速度梯度, 形成剪切^[34], 再加上靶板的抗剪强度较小, 因此很容易产生剪切破坏, 导致纤维在剪切梯度作用下被剪断^[16], 并造成层间滑开型 (II 型) 断裂。

稳定侵彻阶段的损伤分布如图 18 所示。弹孔周围纤维的拉伸、拔出等损伤与面内拉伸损伤有密切关系, 同时, 靶板在面内受到压缩损伤, 实际情况下体现为基底材料的碎裂、压溃, 失去对纤维的支撑作用。面内剪切损伤主要分布于靶板的面内 xOy 对角线两侧, 对侵彻过程中基底损伤与纤维束的散开有贡献, 而由于面内剪切导致的撕开型 (III 型) 断裂对分层损伤的贡献很小^[35], 所以面内剪切损伤对靶板面外分层的贡献可忽略不计。靶板的面外压缩损伤主要分布在弹丸和靶板的接触区, 说明球形弹丸侵彻是压缩与剪切共同作用的过程。靶板沿厚度方向的变形和分层与面外拉伸损伤的分布有明显关系, 在弹丸下方有面外拉伸损伤严重的区域, 这反映了靶板的分层损伤是由压缩波在自由面处反射形成拉伸波所致。

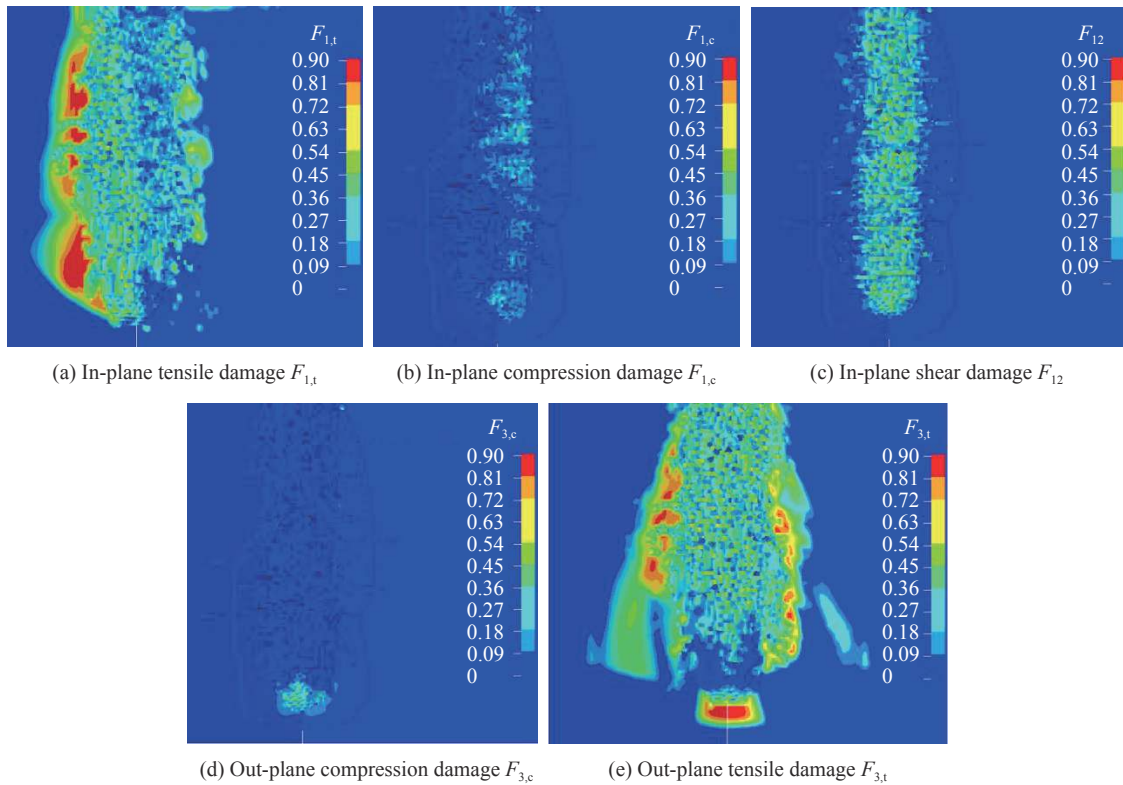


图 18 弹孔周围不同的失效判据因子对应的损伤因子分布云图

Fig. 18 Damage factor evolution distribution cloud picture corresponding to different failure criterion factors surrounding the projectile hole

2.3.4 不同损伤因子的影响分析

由于实验过后并未将靶板沿弹孔切开观察内部损伤的形态, 所以展示背弹面处实验结果的损伤形态与数值模拟的损伤因子分布, 作为推测造成不同损伤类型的影响因素之一, 如图 19 所示。由于三种损伤类型对应的面内压缩损伤较弱, 且弹丸穿透靶板后看不到面外压缩损伤, 所以仅展示面内拉伸损伤因子 $F_{1,t}$ 、面外拉伸损伤因子 $F_{3,t}$ 与面内剪切损伤因子 F_{12} 的分布。

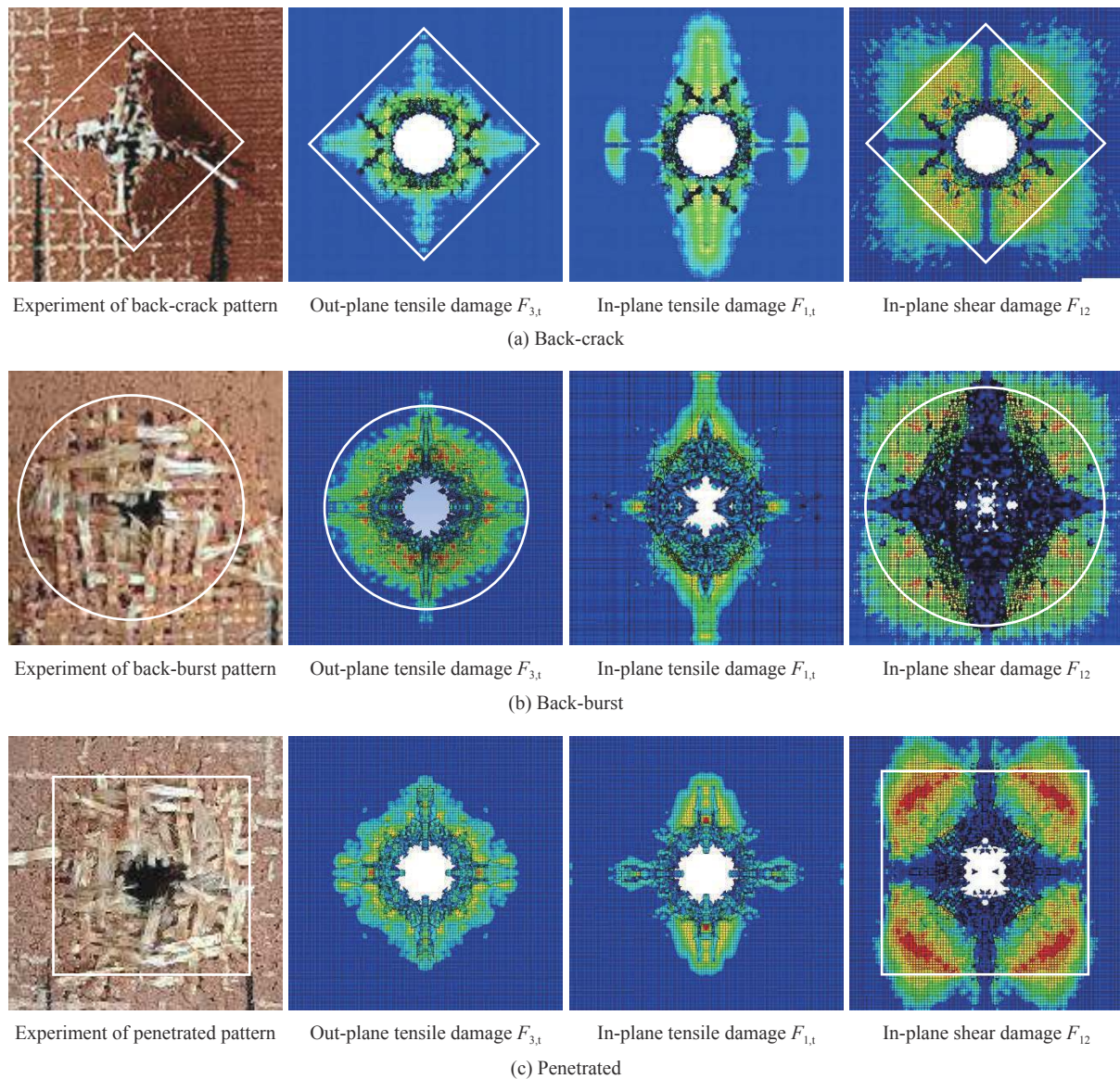


图 19 不同损伤类型的实验结果与数值仿真损伤因子分布云图

Fig. 19 Experimental results and numerical simulation damage factor distribution cloud pictures of different damage types

对比不同的损伤类型及其数值模拟损伤分布,发现面外拉伸分层损伤因子 $F_{3,t}$ 的分布与靶板损伤区域的形状和大小有明显联系,特别是背面裂缝型和背面炸裂型损伤的 $F_{3,t}$ 分布范围分别为菱形和圆形,与实验结果基本一致。 $F_{3,t}$ 也与靶板背弹面沿弹丸运动方向的凸起有关,例如,对于背面裂缝型损伤,靶板背弹面沿弹丸运动方向的凸起范围与 $F_{3,t}$ 的分布范围相当。

面内拉伸损伤 $F_{1,t}$ 的分布决定了不管任何损伤类型,弹孔周围纤维断裂之处均保持在以弹孔为中心平行于纤维方向的十字形范围内,弹孔周围纤维的损伤破坏的主导因素是过大的面内拉应力 σ_x 、 σ_y 与面内拉伸损伤 $F_{1,t}$ 、 $F_{2,t}$,与实验现象中各种损伤类型下纤维更倾向于整齐地断裂与弯折,散开的纤维的长度趋于一致而不是随机杂乱地断裂相符。

面内剪切损伤 F_{12} 的范围和强弱与背弹面纤维基底脱粘的范围和程度有密切关系,背面裂缝型损伤的纤维基底脱粘范围小、程度微弱与 F_{12} 相对严重区域面积小有关,背面炸裂型损伤的 F_{12} 相比背面裂缝型损伤显著扩大,程度更剧烈。此外, F_{12} 的分布与靶板损伤区域的形状和大小也有关,切孔型损伤的破坏范围与 F_{12} 的分布范围关系更明显,损伤程度极其剧烈,造成更显著的纤维与基底的脱粘。

2.3.5 侵彻过程能量转化分析

弹丸冲击复合材料靶板的能量消耗与弹丸特性、靶板材料和结构特性、靶板受到的约束形式以及靶板的损伤模式等相关。为简化分析,认为侵彻前后弹丸的动能主要转化为弹丸的内能、靶板的动能和内能。内能主要体现为变形、断裂等损伤;而由于靶板的边界受到刚性约束,所以靶板的动能大部分是侵彻后飞出的靶板冲击产物的动能。

不同速度下靶板的动能、内能及其占弹丸动能变化量的比重随速度的变化关系如图 20 所示。随着初速度的增大,大体上靶板的动能增大,内能减小。靶板动能占弹丸动能变化量的比例与速度之间的关系不十分明显,稳定在 40%~60% 的区间内,而靶板内能占弹丸动能变化量的比例会随速度的升高而降低,在宏观上体现为初速度越高,弹丸的动能转化为靶板碎片的动能的占比越高,而随着初速度的降低,靶板更多通过变形和损伤来吸收弹丸的能量。靶板动能与内能占弹丸动能变化量的比例之和小于 100% 的原因是,弹丸侵彻靶板的过程中,部分能量转化为弹丸的内能,耗散在弹丸与靶板的界面摩擦中。由于忽略冲击温升和摩擦耗散能量,因此,上述能量主要转化为 1.2 节所示弹丸的塑性变形产生的耗能,而且弹丸的速度越高,弹丸的动能转化为弹丸的变形等耗能更加显著。

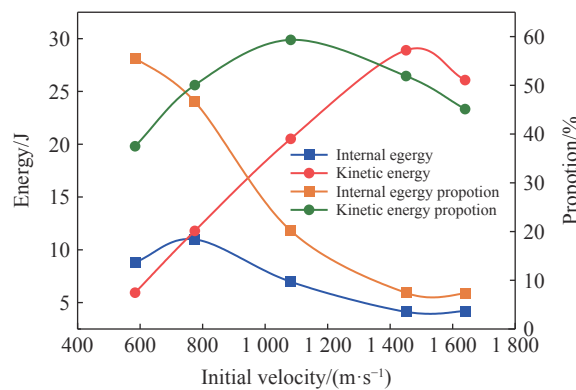


图 20 靶板动能、内能及其占比与初速度的关系

Fig. 20 Variations of kinetic energy, internal energy and their proportions of target plate with initial velocity

3 结 论

运用二级轻气炮实验装置和有限元模拟手段,分别通过实验和模拟分析对 20 mm 厚的连续纤维增强高孔隙复合材料的高速冲击进行了研究,并基于实验和数值模拟结果分析了连续纤维增强高孔隙复合材料的侵彻损伤特性。得到以下主要结论。

(1) 20 mm 厚的连续纤维增强高孔隙防热复合材料在直径 4.5 mm 的 Q235 钢弹冲击下,弹道极限速度约为 732.5 m/s,背弹面的损伤形态随初速度的不同分为背面裂缝、背面炸裂、切孔损伤三种。

(2) 连续纤维增强高孔隙复合材料在初速度 750 m/s 以上的防护能力低于钢、铝等材料,在 600 m/s 以下可以代替钢、铝等传统金属材料和碳纤维、玻璃纤维、凯夫拉等传统复合材料。

(3) 数值模拟得到的弹丸末速度、弹道极限、损伤形态与范围的结果与实验结果吻合较好。有限元模拟表明,球形弹丸侵彻过程中,弹孔的形成与纤维基底的脱粘是压缩和剪切共同作用导致的,靶板的分层损伤是压缩波反射形成的拉伸波所致,纤维的断裂属于拉伸损伤。

(4) 随弹丸初速度的提高,弹丸的动能更多地转化为靶板碎片的动能和弹丸的内能,而转化为靶板内能及其比例越来越低。

参考文献:

- [1] 胡宁, 赵丽滨. 航空航天复合材料力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2021: 4-5.

- HU N, ZHAO L B. Mechanics of aerospace composite materials [M]. Beijing: Science Press, 2021: 4–5.
- [2] 孙卫兵. 纤维增强复合材料层合板抗高速破片侵彻性能研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020: 1–3. DOI: [10.27381/d.cnki.gwlg.2020.001335](https://doi.org/10.27381/d.cnki.gwlg.2020.001335).
- SUN W B. Research on penetration resistance of fiber reinforced composite laminates under high-speed fragments [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020: 1–3. DOI: [10.27381/d.cnki.gwlg.2020.001335](https://doi.org/10.27381/d.cnki.gwlg.2020.001335).
- [3] 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. DOI: [10.19936/j.cnki.2096-8000.20220728.019](https://doi.org/10.19936/j.cnki.2096-8000.20220728.019).
- ZHANG H, SUN H J, SUN J B, et al. Research progress on the tolerance of composite containment fan case [J]. *Composites Science and Engineering*, 2022(7): 115–120. DOI: [10.19936/j.cnki.2096-8000.20220728.019](https://doi.org/10.19936/j.cnki.2096-8000.20220728.019).
- [4] 马东方, 马伯翰, 张幸镛. 冲击荷载下植物纤维增强高聚物复合材料的力学性能 [J]. *高压物理学报*, 2019, 33(2): 024204. DOI: [10.11858/gywlb.20180656](https://doi.org/10.11858/gywlb.20180656).
- MA D F, MA B H, ZHANG X Q. Mechanical properties of natural fiber reinforced polymer composites under impact loading [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(2): 024204. DOI: [10.11858/gywlb.20180656](https://doi.org/10.11858/gywlb.20180656).
- [5] JENQ S T, JING H S, CHUNG C. Predicting the ballistic limit for plain woven glass/epoxy composite laminate [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 15(4): 451–464. DOI: [10.1016/0734-743X\(94\)80028-8](https://doi.org/10.1016/0734-743X(94)80028-8).
- [6] JENQ S T, MO J J. Ballistic impact response for two-step braided three-dimensional textile composites [J]. *AIAA Journal*, 1996, 34(2): 375–384. DOI: [10.2514/3.13074](https://doi.org/10.2514/3.13074).
- [7] LÓPEZ-PUENTE J, ZAERA R, NAVARRO C. Experimental and numerical analysis of normal and oblique ballistic impacts on thin carbon/epoxy woven laminates [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008, 39(2): 374–387. DOI: [10.1016/j.compositesa.2007.10.004](https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.10.004).
- [8] 杜忠华, 赵国志, 王晓鸣, 等. 复合材料层合板抗弹性的工程分析模型 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2002, 25(1): 8–10, 60. DOI: [10.3969/j.issn.1004-244X.2002.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-244X.2002.01.002).
- DU Z H, ZHAO G Z, WANG X M, et al. Engineering analysis model of bullet-proof property of composite laminates [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2002, 25(1): 8–10, 60. DOI: [10.3969/j.issn.1004-244X.2002.01.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-244X.2002.01.002).
- [9] 王元博. 纤维增强层合材料的抗弹性能和破坏机理研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006: 63–67.
- WANG Y B. Research on ballistics resistance and failure mechanism of fiber-reinforced laminate [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006: 63–67.
- [10] 江琦. 改性 PS/UHMWPE 纤维复合材料制备及侵彻性能研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017: 39–40.
- JIANG Q. Preparation and penetration properties of modified polystyrene/UHMWPE fiber composites [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017: 39–40.
- [11] 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. DOI: [10.13801/j.cnki.fhclxb.20170821.002](https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170821.002).
- 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. DOI: [10.13801/j.cnki.fhclxb.20170821.002](https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170821.002).
- [12] 王云聪, 何煌, 曾首义. Kevlar 纤维层合板抗弹性能的数值模拟 [J]. *四川兵工学报*, 2011, 32(3): 17–20. DOI: [10.3969/j.issn.1006-0707.2011.03.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-0707.2011.03.006).
- WANG Y C, HE H, ZENG S Y. Numerical simulation of anti-resilience for Kevlar fiber laminate [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2011, 32(3): 17–20. DOI: [10.3969/j.issn.1006-0707.2011.03.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-0707.2011.03.006).
- [13] JAGTAP K R, GHORPADE S Y, LAL A, et al. Finite element simulation of low velocity impact damage in composite laminates [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4(2): 2464–2469. DOI: [10.1016/j.matpr.2017.02.098](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.098).
- [14] 冯志海, 师建军, 孔磊, 等. 航天飞行器热防护系统低密度烧蚀防热材料研究进展 [J]. *材料工程*, 2020, 48(8): 14–24. DOI: [10.11868/j.issn.1001-4381.2020.000206](https://doi.org/10.11868/j.issn.1001-4381.2020.000206).
- FENG Z H, SHI J J, KONG L, et al. Research progress in low-density ablative materials for thermal protection system of aerospace flight vehicles [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2020, 48(8): 14–24. DOI: [10.11868/j.issn.1001-4381.2020.000206](https://doi.org/10.11868/j.issn.1001-4381.2020.000206).

- [15] 杜明俊. 柔性复合材料结构超高速撞击防护性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 15–17.
DU M J. Study on hypervelocity impact on flexible composite materials [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 15–17.
- [16] 陈战辉. 碳纤维平纹织物层合板高速冲击损伤研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2019: 20–23. DOI: [10.27406/d.cnki.gxbgu.2019.000202](https://doi.org/10.27406/d.cnki.gxbgu.2019.000202).
CHEN Z H. Investigation on damage in carbon woven composite laminates caused by high velocity impact [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2019: 20–23. DOI: [10.27406/d.cnki.gxbgu.2019.000202](https://doi.org/10.27406/d.cnki.gxbgu.2019.000202).
- [17] LAMBERT J P, JONAS G H. Towards standardization in terminal ballistics testing: velocity representation: BRL report No. 182 [R]. Fort Belvoir: Defense Technical Information Center, 1976.
- [18] LEE J H, LOYA P E, LOU J, et al. Dynamic mechanical behavior of multilayer graphene via supersonic projectile penetration [J]. *Science*, 2014, 346(6213): 1092–1096. DOI: [10.1126/science.1258544](https://doi.org/10.1126/science.1258544).
- [19] HYON J, GONZALES M, STREIT J K, et al. Projectile impact shock-induced deformation of one-component polymer nanocomposite thin films [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(2): 2439–2446. DOI: [10.1021/acsnano.0c06146](https://doi.org/10.1021/acsnano.0c06146).
- [20] DENG Y F, ZHANG W, CAO Z S. Experimental investigation on the ballistic resistance of monolithic and multi-layered plates against hemispherical-nosed projectiles impact [J]. *Materials & Design*, 2012, 41: 266–281. DOI: [10.1016/j.matdes.2012.05.021](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.05.021).
- [21] DENG Y F, ZHANG W, YANG Y G, et al. The ballistic performance of metal plates subjected to impact by projectiles of different strength [J]. *Materials & Design*, 2014, 58: 305–315. DOI: [10.1016/j.matdes.2013.12.073](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.073).
- [22] DEAN J, DUNLEAVY C S, BROWN P M, et al. Energy absorption during projectile perforation of thin steel plates and the kinetic energy of ejected fragments [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(10/11): 1250–1258. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2009.05.002](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2009.05.002).
- [23] 沈玲燕. 三维正交机织玻璃纤维复合材料动态性能和抗侵彻规律研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013: 43–44.
SHEN L Y. Research on dynamic and penetration properties of the three-dimensional orthogonal woven glass fiber composites [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013: 43–44.
- [24] HONG D, LI W B, ZHENG Y, et al. Experimental research on tungsten alloy spherical fragments penetrating into carbon fiber target plate [J]. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2021, 18(5): e384. DOI: [10.1590/1679-78256510](https://doi.org/10.1590/1679-78256510).
- [25] 李硕, 王志军, 田非, 等. 芳纶复合材料抗破片模拟弹丸侵彻的一种工程分析方法 [J]. *弹箭与制导学报*, 2014, 34(5): 98–101. DOI: [10.15892/j.cnki.djzdx.2014.05.025](https://doi.org/10.15892/j.cnki.djzdx.2014.05.025).
LI S, WANG Z J, TIAN F, et al. Engineering analysis on aramid composite penetration performance by fragment simulating projectile [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2014, 34(5): 98–101. DOI: [10.15892/j.cnki.djzdx.2014.05.025](https://doi.org/10.15892/j.cnki.djzdx.2014.05.025).
- [26] ZHIKHAREV M V, SAPOZHNIKOV S B. Two-scale modeling of high-velocity fragment GFRP penetration for assessment of ballistic limit [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 101: 42–48. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2016.08.005](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.08.005).
- [27] 黄显晴. 考虑应变率效应的玄武岩纤维复合材料低速冲击性能分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2021: 33–35. DOI: [10.27162/d.cnki.gjlin.2021.001772](https://doi.org/10.27162/d.cnki.gjlin.2021.001772).
HUANG X Q. Analysis of low velocity impact properties of basalt fiber composites considering strain rate effect [D]. Changchun: Jilin University, 2021: 33–35. DOI: [10.27162/d.cnki.gjlin.2021.001772](https://doi.org/10.27162/d.cnki.gjlin.2021.001772).
- [28] 朱艳荣. 纤维增强复合材料应变率效应的数值仿真研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2019: 11–14.
ZHU Y R. Numerical simulation of strain rate effect with fiber reinforced composite [D]. Changchun: Jilin University, 2019: 11–14.
- [29] 辛士红. 纤维增强树脂基复合材料层合板抗侵彻性能数值模拟研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015: 17–21.
XIN S H. Numerical study on the penetration resistance of fiber-reinforced plastic laminates [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015: 17–21.
- [30] 刘万雷, 常新龙, 张晓军, 等. 基于改进 Hashin 准则的复合材料低速冲击损伤研究 [J]. *振动与冲击*, 2016, 35(12): 209–214. DOI: [10.13465/j.cnki.jvs.2016.12.033](https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2016.12.033).
LIU W L, CHANG X L, ZHANG X J, et al. Low-velocity impact analysis of composite plates based on modified Hashin

- criterion [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(12): 209–214. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.12.033.
- [31] 张元豪, 陈长海, 朱锡. Q235 钢板对高速弹的抗侵彻特性研究 [J]. *舰船科学技术*, 2017, 39(2): 52–54. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7619.2017.02.010.
ZHANG Y H, CHEN C H, ZHU X. Ballistic performance of Q235 steel plate subjected to impact by middle and high velocity projectiles [J]. *Ship Science and Technology*, 2017, 39(2): 52–54. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7619.2017.02.010.
- [32] 吴小峰, 李戈操. 某型拖车副车架的塑性变形分析及优化设计 [J]. *河北农机*, 2019(12): 91–92. DOI: 10.15989/j.cnki.hbnjzss.2019.12.063.
- [33] 张明, 原梅妮, 向丰华, 等. Kevlar-129 纤维复合材料抗侵彻性能数值模拟 [J]. *材料导报*, 2015, 29(24): 117–121. DOI: 10.11896/j.issn.1005-023X.2015.24.027.
ZHANG M, YUAN M N, XIANG F H, et al. Numerical simulation of anti-penetration performance on Kevlar-129 fiber reinforced composite materials [J]. *Materials Reports*, 2015, 29(24): 117–121. DOI: 10.11896/j.issn.1005-023X.2015.24.027.
- [34] 夏靖雯, 陈智刚, 顾敏辉, 等. 钨合金破片侵彻 2024 铝靶的数值模拟研究 [J]. *振动与冲击*, 2023, 42(15): 156–162, 224. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.15.019.
XIA J W, CHEN Z G, GU M H, et al. Numerical simulation for tungsten alloy fragments penetrating 2024 aluminum target [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2023, 42(15): 156–162, 224. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2023.15.019.
- [35] 刘红霞. 复合材料分层损伤的数值模拟 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006: 38.

(责任编辑 曾月蓉)