

doi: 10.7690/bgzd.2025.11.009

破片对玻璃钢薄靶毁伤的数值仿真和试验

高展博¹, 焦俊杰¹, 何勇¹, 单锋¹, 王晗程¹, 严雷², 尹刚², 王佳兴¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 安徽方圆机电股份有限公司, 安徽 蚌埠 233000)

摘要: 针对玻璃钢材料的应变率效应, 运用 LS-DYNA 对不同厚度的玻璃钢薄靶在破片冲击下的响应规律进行仿真研究。实验中显示, 当靶板厚度一定时, 破片的靶后速度随着初始速度的增加而增加; 而穿靶过程中的动能损耗, 随初始速度的增加而增大; 当初始速度一定时, 破片的靶后速度随靶板的厚度增加而减小, 近似成线性变化; 玻璃钢薄靶在破片的冲击下, 主要为冲塞破坏, 靶板材料的主要失效模式为基体的挤压破碎、纤维的剪切破坏和拉伸断裂。实验结果表明, 该研究对玻璃钢目标的毁伤评估及战斗部的威力设计具有较为重要的意义。

关键词: 玻璃钢; 冲击; 数值模拟**中图分类号:** TJ04 **文献标志码:** A

Numerical Simulation and Experiment of Fragment Damage to FRP Thin Target

Gao Zhanbo¹, Jiao Junjie¹, He Yong¹, Shan Feng¹, Wang Hancheng¹, Yan Lei², Yin Gang², Wang Jiaxing¹

(1. School of Mechanical and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Anhui Fangyuan Mechanical & Electrical Co., Ltd., Bengbu 233000, China)

Abstract: Aiming at the strain rate effect of GFRP materials, LS-DYNA was used to simulate the response law of GFRP thin targets with different thicknesses under fragment impact. The research results indicate that when the thickness of the target plate is constant, the velocity behind the target of the fragment increases with the increase of the initial velocity; The kinetic energy loss during the target penetration process increases with the increase of initial velocity; When the initial velocity is constant, the velocity behind the target of the fragment decreases with the increase of the thickness of the target plate, approximately linearly changing; Under the impact of fragments, the main failure modes of GFRP thin targets are impaction failure, and the main failure modes of target plate materials are matrix compression fracture, fiber shear failure, and tensile fracture. The experimental results show that the research has significant implications for the damage assessment of GFRP targets and the power design of warheads.

Keywords: GFRP; shock; numerical simulation

0 引言

纤维增强复合塑料(fiber reinforced plastics, FRP), 根据采用的纤维不同分为玻璃纤维增强复合塑料、碳纤维增强复合塑料、硼纤维增强复合塑料等。其中玻璃纤维增强复合塑料也被称作玻璃钢, 因其强度大、比刚度高、比吸能高, 具有良好的抗爆、抗侵彻性能, 自问世以来就发挥着重要作用^[1-2]。近年来, 随着玻璃钢加工工艺的进一步发展, 玻璃钢已不仅仅局限于小型舰艇, 大型船舶的一些关键部件也有玻璃钢的应用, 例如: 上层建筑、推进器、桅杆、指挥舱、弹药舱、燃油舱等^[3], 众多学者针对玻璃钢材料展开了一系列的毁伤研究。

张元豪等^[4]用 1 000~1 300 m/s 的高速破片侵彻钢/玻璃钢组合结构, 发现后置玻璃钢靶板的破坏形式有纤维剪切断裂、层间脱胶以及纤维拉伸断裂破坏, 且破片在侵彻玻璃钢前置的靶板时动能有更

大的损耗; 李金柱等^[5]利用弹道枪发射钨合金球形破片撞击玻璃钢夹层板发现玻璃纤维抽拔、拉伸断裂是玻璃钢板吸收能量的主要方式; Zee 等^[6]指出纤维复合材料的分层破坏主要集中在靠近靶板背面的一侧; 杜忠华等^[7]利用能量守恒定理推导出了玻璃钢靶板的弹道极限预测公式并通过缩比模型对其进行了验证; Wen 等^[8-11]提出了针对不同形状弹体侵彻 FRP 层合板预测侵彻深度和弹道极限的公式; 覃悦等^[12-13]对 Wen 的能量简化模型做出改进, 给出了锥形弹头和卵圆形弹头侵彻 FRP 侵彻深度、残余速度和极限速度的预测公式; 谢恒等^[14]运用数值模拟分析了靶板直径、边界约束条件、破片形状等因素对破片侵彻纤维复合材料板的影响。Abtew 等^[15]对玻璃钢在冲击载荷下的弹道极限、失效形式和吸能机制进行了研究。周越松等^[16]在研究中发现弹体的侵彻速度越大, 玻璃钢所吸收的能量越多。现有

收稿日期: 2024-10-18; 修回日期: 2024-11-22

第一作者: 高展博(1996—), 男, 河南人, 硕士。

的研究多是研究破片低速侵彻模式下玻璃钢靶板的毁伤形式，或针对某一特定速度研究玻璃钢靶板的毁伤机理，对破片在不同速度撞击下靶板的动态响应分析较少并且忽视了玻璃钢材料的应变率效应。笔者采用高速破片冲击玻璃钢薄靶，分析玻璃钢靶板的破坏模式，并对其在不同速度冲击下的毁伤规律进行研究，并且在考虑玻璃钢材料的应变率硬化效应下，对其进行了数值仿真研究。

1 实验及实验结果

1.1 破片侵彻实验装置

实验采用 30 mm 口径滑膛炮系统发射破片，通过火药气体驱动。为增加发射时的气密性使破片达到预定的速度，破片用两瓣式铝合金弹托包裹，弹托挤进炮膛时，弹托底部受到剪切作用，破片出膛后弹托在空气阻力的作用下向两侧分离，偏离弹道，破片能够保持预定的轨迹。该系统还包括测速靶和多通道测试仪，用来记录破片穿靶前后的速度变化以及高速摄像机，以及用来拍摄破片穿靶的过程。实验装置如图 1 所示。

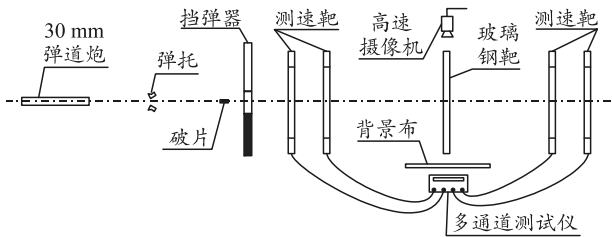
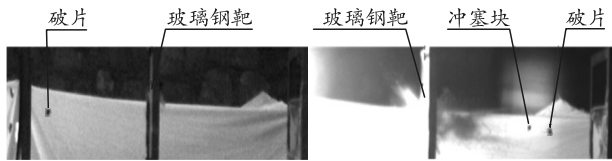
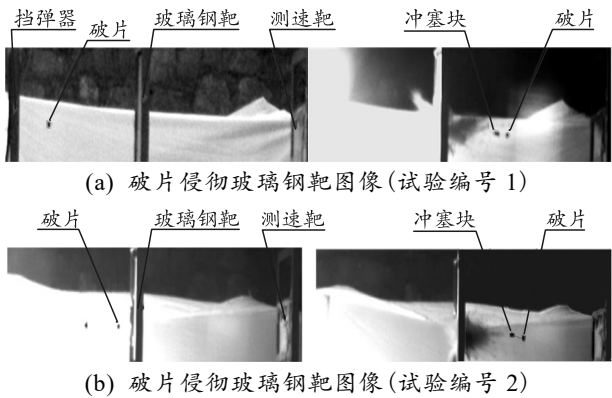


图 1 实验装置

破片采用 $\Phi 12.8\text{ mm}\times 11.1\text{ mm}$ 的圆柱，由紫铜材料车削加工而成。玻璃钢靶板由拉挤工艺成型，靶板尺寸为 $500\text{ mm}\times 500\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ ，实验时将靶板垂直于弹道固定于靶架上。

1.2 破片侵彻实验结果

破片侵彻玻璃钢薄靶穿靶过程如图 2 所示。



(c) 破片侵彻玻璃钢靶图像 (试验编号 3)

图 2 破片侵彻玻璃钢靶图像

由图 2 可以观察到：破片贯穿玻璃钢靶后，玻璃纤维或基体碎末向后飞散，同时有 2 个碎片从靶后的烟尘中飞出，通过高速分幅相机的连续帧可以计算 2 个碎片在空气中的速度衰减，玻璃钢的密度为紫铜的 1/4，可以判断出靠前的为铜制破片，由此断定破片穿靶过程中存在着冲塞破坏。验证了仿真结果中玻璃钢薄靶在破片的冲击下为冲塞破坏。

1.3 破片侵彻实验结果

破片侵彻玻璃钢薄靶试验结果如表 1 所示。

表 1 破片侵彻玻璃钢薄靶试验结果

编号	靶板厚度/mm	破片质量/g	破片弹托总质量/g	初始速度/(m/s)	剩余速度/(m/s)	动量变化值/J	相对动量变化值/%
1	10	12.81	52.73	794	670	1 163	28.8
2	10	12.78	52.69	845	718	1 268	27.8
3	10	12.82	52.96	984	861	1 455	23.4

1.4 靶板的失效形式分析

破片侵彻玻璃钢薄靶的穿孔形态如图 3 所示。

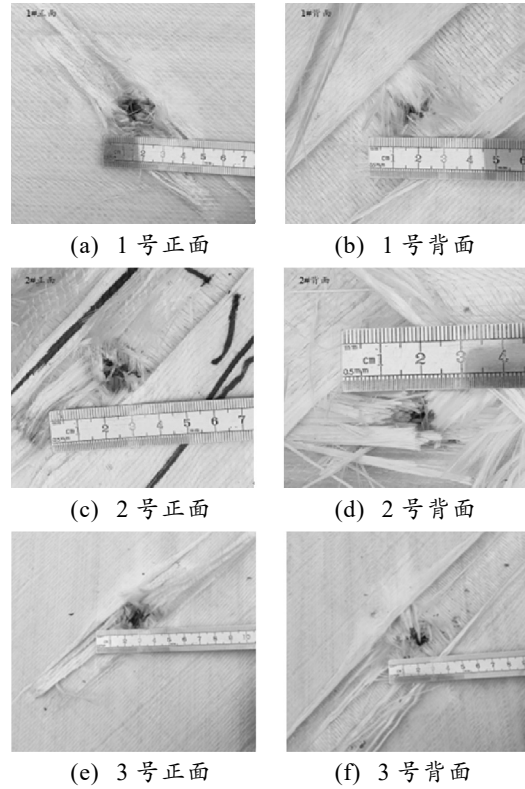


图 3 穿孔破坏形态

通常来说, 玻璃钢的失效形式主要有: 基体破碎、纤维剪切/拉伸断裂以及层间分层失效。在破片侵入玻璃钢靶的过程中, 玻璃钢靶往往不是单一的失效模式, 通过对高速影像和靶板的穿孔形态, 分析玻璃靶的破坏过程, 玻璃钢板的侵入主要分为:

1) 挤压剪切阶段。从图 2 的靶板迎弹面可以观察到, 有碎屑沿着破片运动的相反方向飞出, 同时也有纤维向外撕扯, 图 3 靶板正面也可以观察到纤维从通孔向外撕扯的痕迹。这是由于破片冲击玻璃钢靶, 在破片与靶板的接触位置形成一个高压区域, 压力超过玻璃钢基体的压缩强度, 基体碎裂向外飞出, 破片与靶板的接触位置也发生剧烈变形, 随着破片侵入玻璃钢靶板, 玻璃钢表面的玻璃纤维受到破片的挤压, 在玻璃纤维被拉断之前, 由于玻璃纤维的拉伸模量远大于基体, 玻璃钢靶表面出现了纤维拔出现象, 最终玻璃纤维随着破片的挤压, 达到拉伸极限从而断裂形成碎屑。当破片进一步侵入的过程中, 挤压着压碎的基体和玻璃纤维碎屑向前进方向以及周围运动, 同时使破片弹道上的受剪切而断裂。这一阶段玻璃钢靶板吸收了大部分的能量。

2) 拉伸断裂阶段。从图 3 靶板的背面可以观察到, 靶板纤维有明显向外拉扯的痕迹, 最终导致脱粘分层, 直至断裂。这是由于剪切波的在玻璃钢靶内部的横向传播, 破片撞击区域的背面将会凸起形成变形锥, 出现纤维拔出现象, 最终以破片与靶板的接触点为拉伸端造成拉伸破坏。

2 有限元仿真计算

笔者利用有限元仿真软件 LS-DYNA 对破片侵入玻璃钢靶板进行数值模拟计算。为减少计算量, 笔者将建立 1/4 模型, 破片和玻璃钢靶板均采用八节点的拉格朗日网格, 模型的对称面上添加对称约束, 限制节点沿对称面方向的流动。靶板模型的边界处采用无反射边界, 消除模型尺寸对仿真结果的影响。破片与玻璃钢靶板之间以及玻璃钢靶板内部之间的接触都设置为面面侵蚀接触方式。

玻璃钢材料由玻璃纤维编织而成的玻璃纤维布通过树脂材料粘合而成, 由于其内部的纤维铺陈方式使其沿纤维方向和垂直纤维方向的力学性能有较大差异, 表现为各向异性。针对每个玻璃纤维铺设层, 其内部的纤维方向都是一致的, 当厚度足够小时, 可以近似地认为玻璃钢材料在每层内为各向同性, 很多个各向同性的玻璃纤维层层叠铺陈, 经由

树脂材料的粘合, 最终表现为玻璃钢材料的整体各向异性, 所以靶板的仿真模型在厚度方向建立一系列单层网格, 用来模拟玻璃钢材料内部的纤维层。各层网格之间采用 (*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBEAK) 接触, 能很好地模拟树脂基体材料的粘合作用, 模拟其中的拉伸强度以及剪切强度的作用。使用该接触的优点是当接触面积间的应力超过设定的最大值时, 该接触会自动退化为面面接触, 在很好地模拟玻璃钢材料的分层现象的同时, 不会使模型计算出现错误。

破片模型的尺寸为 $\Phi 12.8 \text{ mm} \times 11.1 \text{ mm}$, 如图 4 所示。玻璃钢板模型尺寸长宽高为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 如图 5 所示。由于破片的冲击速度较大, 靶板发生变形的区域较小, 在边界上采用无应力反射边界约束后, 该尺寸的靶板模型可以在保证计算精度的条件下尽可能减小计算时间, 靶板的网格划分采用过渡网格, 在靶板中心碰撞区域, 对网格进行加密处理, 在中心 $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 区域内, 网格大小为 0.5 mm , 其余区域网格尺寸为 1 mm 。

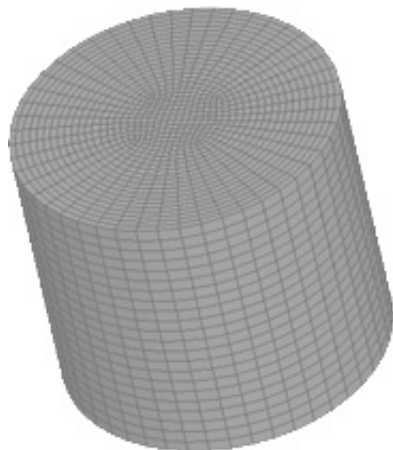


图 4 破片模型

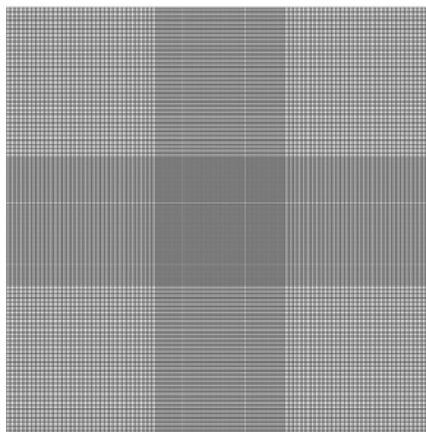


图 5 靶板模型

破片的材质选择为紫铜, 在 LS-DYNA 中使用

Grunersen 状态方程和 Johnson-Cook 本构模型来共同描述。材料的状态方程是描述材料的压力、密度和内能或温度等热力学参数的关系式，反应材料的体积特性。Grunersen 状态方程的表达式为：

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + (1 - \gamma_0/2) \mu - a \mu^2/2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a \mu) E. \quad (1)$$

式中： ρ_0 为材料的参考密度； C 为冲击波速度-质点速度曲线的截距； S_1 、 S_2 、 S_3 为冲击波速度-质点速度曲线的斜率系数； γ_0 、 μ 、 a 为 Grunersen 方程系数， $\mu = 1/V - 1$ ， V 为当前材料的相对体积， a 为对 γ_0 的一阶体积修正； E 为材料的内能。

材料本构模型主要是描述材料应力-应变关系的数学表达式，Johnson-Cook 本构方程中将它的流动应力项表述为与等效塑性应变、等效塑性应变率及温度相关的函数式，其表达式为：

$$\sigma_y = \left(A + B \varepsilon^{pn} \right) \left(1 + c \ln \frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \left(1 - \left(\frac{(T - T_0)}{(T_m - T_0)} \right)^m \right). \quad (2)$$

式中： σ_y 为动态应力； A 为在参考应变率和参考温度下材料的静态屈服应力； B 为材料应变硬化参数； n 为材料应变硬化指数； c 为应变率敏感系数； m 为温度软化指数； ε^p 为等效塑性应变； ε_0 为塑性应变； T 为材料当前温度； T_0 为参考温度； T_m 为材料的熔化温度。材料参数参考文献[2]。

玻璃钢为应变率敏感材料，选取双线性弹塑性本构模型采用 Plastic_Kinematic，应变率效应应用 Cowper-Symonds 应变率模型描述：

$$\sigma_d = \left(\sigma_0 + \frac{E E_h}{E - E_h} \varepsilon^p \right) \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D} \right)^{1/N} \right]. \quad (3)$$

式中： σ_d 为动态屈服强度； σ_0 为静态屈服强度； E 为弹性模量； E_h 为硬化模量； ε^p 为有效塑性应变； $\dot{\varepsilon}$ 为等效塑性应变率； D 、 N 为常数。其材料参数参考文献[17]。

3 有限元仿真结果分析

3.1 仿真结果

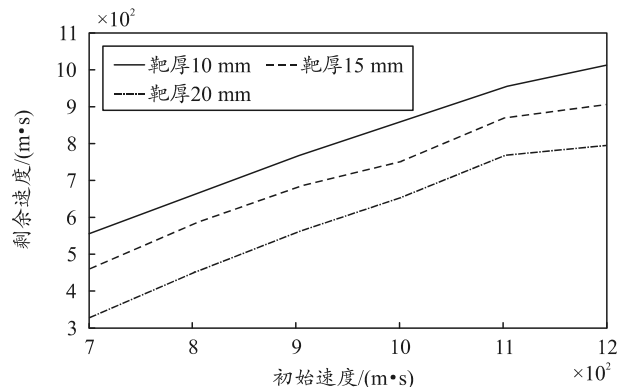
破片以不同的速度侵彻不同厚度的玻璃钢薄靶数值仿真结果如表 2 所示。

表 2 破片侵彻玻璃钢薄靶仿真结果

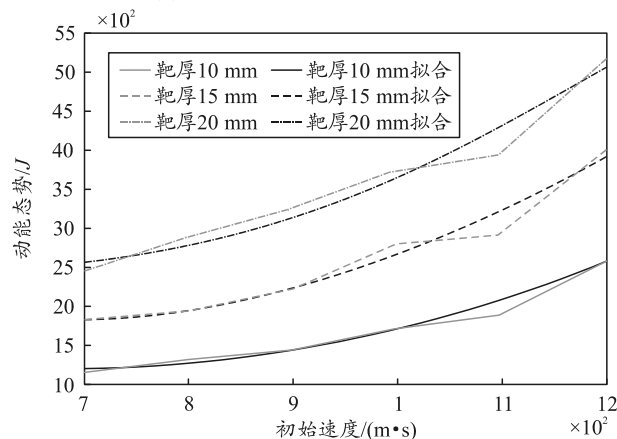
初始速度/ (m/s)	靶板厚度/ mm	剩余速度/ (m/s)	动能损耗/ J	相对动能 损耗/%
700	10	558	1 134	36.4
	15	459	1 772	56.9
	20	329	2 425	77.9
800	10	664	1 264	31.1
	15	585	1 894	46.6
	20	441	2 834	69.7
900	10	767	1 413	27.5
	15	681	2 202	42.8
	20	555	3 190	62.0
1 000	10	858	1 677	26.4
	15	753	2 755	43.4
	20	650	3 668	57.7
1 100	10	957	1 870	24.3
	15	871	2 872	37.3
	20	769	3 930	51.1
1 200	10	1 020	2 544	27.8
	15	904	3 962	43.3
	20	793	5 155	56.3

3.2 速度对破片侵彻玻璃钢靶的影响规律

破片以不同的初始速度冲击玻璃钢板的速度能量变化规律如图 6 所示。



(a) 破片靶后速度随初速变化趋势



(b) 破片动能损耗随初速变化趋势

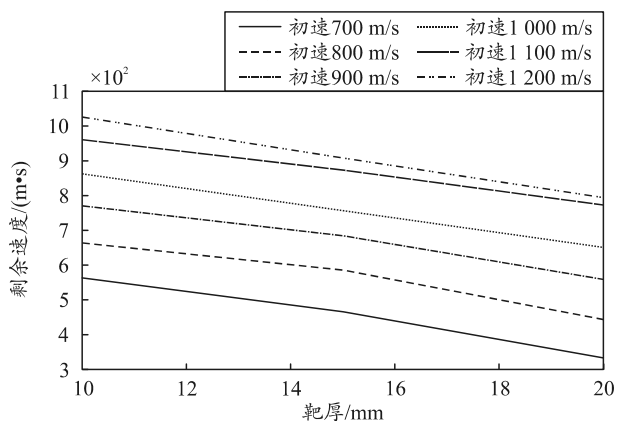
图 6 靶后速度及破片动能损耗随初始速度变化趋势

从图 6(a)中可以观察到：当靶板厚度一定时，破片的靶后速度随着初始速度的增加而增加且成线性变化。图 6(b)所示为 3 种靶板厚度情况下，破片穿靶过程中动能损耗随破片的初始速度变化趋

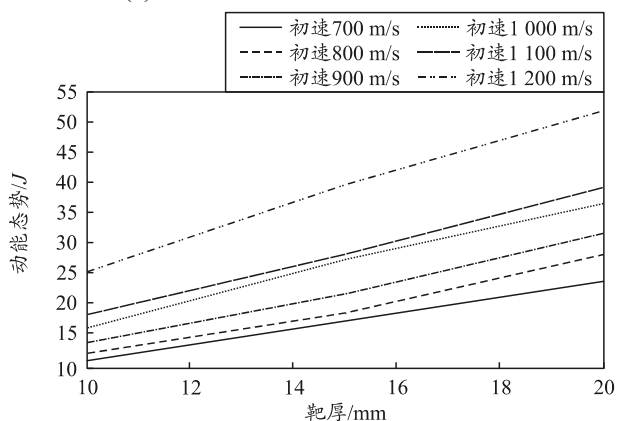
势。破片的初始速度越大,穿靶过程中的动能损耗就越大。

3.3 靶板厚度对破片侵彻玻璃钢靶的影响规律

不同厚度的玻璃钢靶在相同初始速度破片冲击下的速度能量变化规律如图 7 所示。



(a) 靶后速度随靶板厚度变化趋势



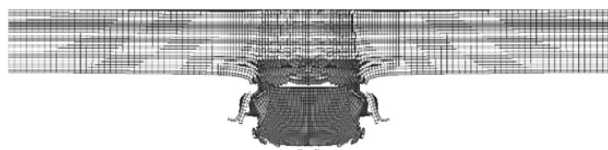
(b) 动能损耗随靶板厚度变化趋势

图 7 靶后速度及破片动能损耗随靶板厚度变化趋势图

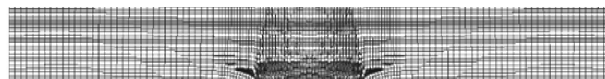
从图 7(a)中可以观察到:破片初始速度越大,破片的靶后速度,即剩余速度越大;同时,剩余速度随着靶板厚度增加逐渐减小,近似呈线性变化。从图 7(b)中可以观察到:当板厚度一定时,破片穿靶的动能损耗随着初始速度的增大而增加;当破片的初始速度一定时,破片的穿靶动能损耗随靶板的厚度增加而增大。

3.4 靶板的失效形式分析

破片以不同速度完全穿过靶板后,靶板的毁伤形态如图 8 所示。



(a) $V=800$ m/s 穿孔截面



(b) $V=100$ m/s 穿孔截面



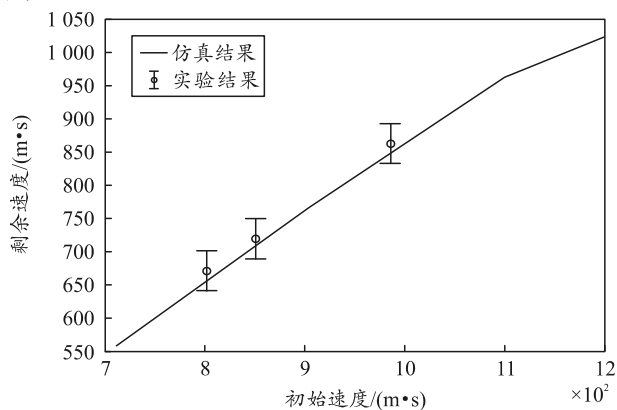
(c) $V=1200$ m/s 穿孔截面

图 8 靶板侵彻仿真结果

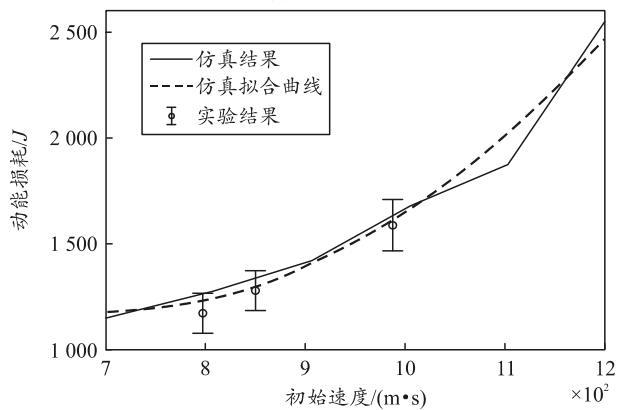
从图 8 可以观察到不同速度破片冲击下,靶板的破坏形式基本一致。破片在侵彻玻璃钢薄靶的过程中,随着侵彻深度增加,破片逐渐变形,导致玻璃靶上的穿孔直径逐渐增大。同时,可以观察到靶板内部不同纤维层之间也有明显的分层现象。靶板穿孔靠近背面的部分材料被剪断,形成局部的冲塞破坏。

3.5 数值仿真与试验对比分析

破片穿靶过程中试验与仿真结果对比如图 9 所示。



(a) 速度误差



(b) 能量损耗误差

图 9 破片穿靶过程中试验与仿真误差

如图 9 所示, 实验结果中破片的剩余速度和动能损耗与数值仿真结果变化趋势基本一致。靶板剩余速度试验值与数值仿真结果误差在 5% 以内, 穿靶过程中能量损耗试验与仿真误差值在 10% 以内, 吻合度良好。

4 结束语

1) 通过不同速度破片冲击玻璃钢薄靶的数值模拟和实验研究, 确定了玻璃钢靶板为一种应变率敏感材料, 在冲击响应过程中会出现硬化现象。

2) 当靶板厚度一定时, 破片的靶后速度随着初始速度的增加而增加; 穿靶过程之中的动能损耗, 随初始速度近似呈二次函数增加。当初始速度一定时, 破片的靶后速度随靶板的厚度增加而减小, 近似成线性变化。

3) 玻璃钢薄靶在破片的冲击下, 主要为冲塞破坏。靶板材料的主要失效模式为基体的挤压破碎, 纤维的剪切破坏和拉伸断裂。

参考文献:

- [1] 杨珍菊. 国外复合材料行业进展与应用(中)[J]. 纤维复合材料, 2017, 34(1): 30-42.
- [2] 李中泽, 高旭东, 董晓亮. 玻璃纤维复合装甲抗射流侵彻的性能研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(9): 126-131.
- [3] 冯利军, 程正冲, 李伏. 船用复合材料应用现状及发展[J]. 装备环境工程, 2017, 14(5): 51-55.
- [4] 张元豪, 陈长海, 朱锡. 钢/玻璃钢组合结构对高速弹丸的抗侵彻特性[J]. 中国舰船研究, 2017, 12(1): 93-100.
- [5] 李金柱, 李明静, 李海生. 玻璃钢-聚氨酯泡沫夹层板抗破片侵彻贯穿研究[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(2): 121-129.
- [6] ZEE R H, HSIEH C Y. Energy loss partitioning during ballistic impact of polymer composites[J]. Polymer Composites, 1993, 14(3): 265-71.
- [7] 杜忠华, 赵国志, 杨玉林. 陶瓷/玻璃纤维/钢板复合靶板抗弹性能的研究[J]. 兵工学报, 2003(2): 219-221.
- [8] WEN H M, REDDY T Y, REID S R, et al. Indentation, penetration and perforation of composite laminate and sandwich panels under quasi-static and projectile loading[J]. Key Engineering Materials, 1998, 141/142/143: 501-552.
- [9] REDDY T Y, WEN H M, REID S R, et al. Penetration and perforation of composite sandwich panels by hemispherical and conical projectiles[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1998, 120(2): 186-194.
- [10] REID S R, WEN H M, SODEN P D, et al. Response of single skin laminates and sandwich panels to projectile impact[C]//Composite materials for offshore operation-2. American Bureau of Shipping, 1999: 593-617.
- [11] WEN H. Penetration and perforation of thick FRP laminates[J]. Composites Science and Technology, 2001, 61(8): 1163-72.
- [12] 覃悦, 文鹤鸣, 何涛. 锥头弹丸撞击下 FRP 层合板的侵彻与穿透的理论研究[J]. 高压物理学报, 2007(2): 121-128.
- [13] 覃悦, 文鹤鸣, 何涛. 卵形弹丸撞击下 FRP 层合板的侵彻和穿透[J]. 复合材料学报, 2007(2): 131-136.
- [14] 谢恒, 吕振华. 破片侵彻纤维复合材料板的有限元数值模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(1): 96-101.
- [15] ABTEW M A, BOUSSU F, BRUNIAUX P, et al. Ballistic impact mechanisms: a review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses[J]. Composite Structures, 2019, 223: 110966.
- [16] 周越松, 梁森, 王得盼, 等. 层间混杂铺层复合材料装甲抗侵彻性能研究[J]. 化工新型材料, 2022, 50(10): 118-123, 129.
- [17] 徐志超. 船用玻璃钢/聚氨酯夹层板抗侵彻性能研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2019.