DOI: 10.11883/bzycj-2024-0483

核壳式复合活性破片对间隔靶的毁伤效应*

薛建锋[1], 赵旭峰[2], 皮爱国[3], 许红浩[1], 原黎明[1], 万斯奇[1]
（1. 航空工业洪都 660 所, 江西 南昌 330024;
2. 中国兵器工业第 208 研究所, 北京 102202;
3. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 1000081）

摘要： 为提升氟聚物基活性破片的毁伤效率, 拓展其应用范围, 研制了一种“核壳”式复合结构活性破片, 该破片采用湿混法, 引入碳纤维增强基体材料的强度, 采用特定的烧结条件, 制备了 PTFE/Al/CF 钨粉和 PTFE/Al/CF 钨球 2 种试样, 并开展了相应的基本力学性能试验。通过 2 种结构破片侵彻 3 mm+3 mm+2 mm+2 mm 多层间隔铝靶试验, 采用 Python 自编的源程序对试验数据进行自动处理, 获得了各层靶板的穿孔面积、变形体积以及反应光强总量, 对比分析了不同速度和约束条件下多层间隔靶的毁伤特征差异。研究结果表明：“核壳”式破片侵彻能力更强, 低速可穿透 4 层靶板, 但穿孔面积较小, 穿孔直径约为 0.95 倍破片直径; 均质破片穿孔面积更大, 但侵彻能力较弱, 穿孔直径约为 1.21 倍破片直径, 高速条件下只能穿透 3 层靶板; 钢壳约束显著提升了破片的穿孔和侵彻能力。破片的主要活性反应发生在与第 2 层靶的撞击过程中, 但其释能反应对穿孔效应的促进作用有限, 毁伤特征差异主要取决于破片的力学特性。

关键词： 爆炸力学; 核壳式复合活性破片; 间隔靶; 毁伤效应
中图分类号： TJ04; O385　　**国标学科代码：**　　**文献标志码：** A

Study on the damage effect of core-shell composite reactive fragments on spaced targets

XUE Jianfeng[1], ZHAO Xufeng[2], PI Aiguo[3], XU Honghao[1], YUAN Liming[1], WAN Siqi[1]
（1. 660 *Design Institute of Hong Du Aviation Industry Group*, *Nanchang* , *Nanchang* 330024, *Jiangxi*, *China*;
2. *No.*208 *Research Institute of China Ordnance*, *Beijing* 102202, *China*;
3. *State Key Laboratory of Explosive Science and Technology*, *Beijing Institute of Technology*, *Beijing* 100081, *China*）

Abstract: To enhance the damage efficiency of fluoropolymer-based reactive fragments and broaden their application range, a novel core-shell composite structure active fragment has been proposed. To improve the strength of the matrix material, carbon fiber was introduced via a wet mixing method. Under specific sintering conditions, two types of samples were prepared: PTFE/Al/CF tungsten powder and PTFE/Al/CF tungsten ball. The basic mechanical properties of these samples were tested. The addition of tungsten powder was found to increase the dynamic compressive strength of the composite. Penetration tests were conducted on 3 mm+3 mm+2 mm+2 mm multi-layer interval aluminum targets using both types of fragments. The experimental data were automatically processed using a Python-based program, yielding the perforation area, deformation volume, and reaction light intensity for each layer of the target plate. The damage characteristics of the multi-interval target under different velocity and constraint conditions were compared and analyzed. The results show that the core-shell type fragment exhibits superior penetration ability. It can penetrate all four layers of the target plates at low speeds, although the perforation area is relatively small, with a perforation diameter approximately 0.95 times the fragment diameter. In contrast, the homogeneous fragment has a larger perforation area but weaker penetration ability. Its perforation diameter is about 1.21 times the fragment diameter, and it can only penetrate three layers of target plates at high speeds. The steel shell constraint

* **收稿日期：** 2024-12-11；**修回日期：** 2025-04-28
第一作者： 薛建锋（1987—　），男，博士，高级工程师，xuejianfeng666@163.com
通信作者： 皮爱国（1977—　），男，博士，教授，aiguo_pi@bit.edu.cn

significantly enhances the punching and penetration capabilities of the fragments. The primary active reaction of the fragment occurs during impact with the second layer of the target. The energy release reaction has a limited effect on improving the punching effect. The differences in damage characteristics are mainly attributed to the mechanical properties of the fragments. These findings provide valuable insights for the structural design and damage effect evaluation of reactive fragments.

Keywords: mechanics of explosion; core-shell composite reactive fragment; spaced target; damage effect

先进材料与新型结构的应用可大幅提升武器弹药装备的综合毁伤效应。传统武器弹药装备的动能毁伤元一般采用惰性金属材料，如钨、钢、铜等[1]，一般没有活性毁伤效应，少量含锆、钛等金属的毁伤元具有一定引燃效应。显然，上述传统毁伤元除动能侵彻、机械贯穿等效应之外，毁伤效应能力不足，如一些不敏感战斗部，高速惰性破片甚至高速惰性聚能射流都无法将其直接引爆，如要实现对这类目标的“一击即毁”，传统毁伤元无能为力，需研发新型活性毁伤元。

以聚四氟乙烯（PTFE）为基体的氟聚物基活性材料是高效毁伤领域研究最活跃的方向之一[2-5]，其由氟聚物基体和各种填充物构成，常用的基体材料包括聚四氟乙烯和聚丙烯，填充物通常为活性金属、合金、金属间化合物或铝热剂等。在一定弹靶作用边界条件下，采用这类材料制备的破片具有较好的贯穿毁伤和活性释能毁伤效应，不仅可以动能穿透目标，还能通过撞击引发化学反应释放化学潜能，实现复合毁伤效果。黄亨建等[6] 以 PTFE/Al 活性材料为基础，制备了毁伤增强型破片，该破片除具有动能打击能力之外，还具有爆炸、冲击超压和高温作用等复合毁伤能力。郑雄伟等[7] 研究了 PTFE/Al 材料的毁伤释能威力，发现当冲击速度高于 1 200 m/s 时，材料的释能效率并不随着速度的增加而增大，而是达到了一种较为完全的能量释放状态。传统的 PTFE/Al 体系在实际使用中存在着密度不足，低速冲击条件下反应效率显著下降的问题。肖艳文等[8] 探索了将钨粉加入传统成分体系内制成的 PTFE/Al/W 活性破片对双层间隔靶的毁伤效应，发现在高速碰撞条件下，活性破片对前靶的破坏模式为冲塞贯穿，后靶穿孔模式为花瓣形延性扩孔。Wang 等[9] 探讨了活性破片对油箱的增强损伤效应，发现活性破片点燃煤油的速度低于传统钢弹，活性破片在腔内释放的化学能作为额外的内部点火源，显著增强了破片的点火能力。彭军等[10] 探讨了同质量包覆式活性破片与惰性钢破片撞击双层铝靶板的毁伤效应，发现两类破片对前靶板的穿孔形态和机理相同，破片着速越高，活性破片对后靶的毁伤增强效应越显著。Yuan 等[11] 试制了一种由 PTFE/Al 和 PTFE/Al/Bi_2O_3 组成的功能梯度活性材料，新型活性材料试样的撞击方向对其反应具有显著影响。Zhang 等[12] 开展了 PTFE/Al/W 活性破片对双间距铝板的穿孔行为，发现随着弹丸密度的增大，前板的失效模式发生转变，并提出了活性破片侵彻双层间隔铝靶临界速度的理论预测模型，该模型能够很好地反映活性破片的穿孔性能。王在成等[13] 研究了钨锆钛活性破片穿靶后的耦合毁伤机理，发现随着速度的增大，后靶的毁伤面积和材料反应程度呈增大的趋势，化学能在耦合毁伤中的贡献度也增大。曹进等[14] 开展了 PTFE/Al 和 Al 基金属破片超高速碰撞多层钢靶的典型毁伤模式研究，发现 2 种活性材料均产生了明显的靶后横向增强毁伤效应，能够对第 2 层靶板造成超过 4 倍弹径的破孔，还发现侵彻速度的提高对 PTFE/Al 活性破片的毁伤效果增强作用有限。

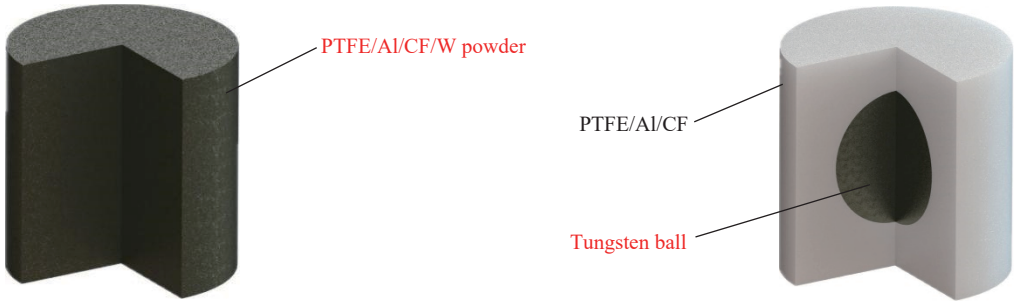
针对目前 PTFE/Al 材料强度与密度偏低，导致其侵彻毁伤威力不足的问题，本文中制备一种“核壳”式复合结构活性材料试样，系统开展这 2 种不同结构的活性破片对间隔靶的毁伤效应试验。通过轻气炮对活性破片进行驱动加速，撞击多层间隔靶，探究不同撞击速度与有无钢壳约束情况下相同质量的均质结构活性破片（PTFE/Al/CF/钨粉）与“核壳”式复合结构活性破片（PTFE/Al/CF/钨球）对间隔靶的毁伤效应差异，得到各层靶板的穿孔尺寸特征、变形体积特征以及反应过程的光强变化规律。值得注意的是，在活性材料应用中普遍存在穿靶效率与释能效率之间的矛盾问题：提高材料强度虽可增强穿靶能力[8,12]，但往往会抑制其释能反应；而单纯优化释能特性往往难以同步改善材料的力学性能[11]。

1　活性破片制备

1.1　试样结构

选用碳纤维增强 PTFE/Al 材料作为试样的基体材料，添加一定量的钨粉以提高材料的密度，为了分

析钨粉对破片毁伤威力的影响，制作了一种具有相同质量的新型“核壳”式复合活性材料试样。2 种活性破片的外形尺寸均为⌀10 mm×10 mm，如图 1 所示，2 种活性破片的基体材料均为 PTFE/Al/CF，试样 1 中添加了一定质量的钨粉以提高密度，如图 1(a)所示。试样 2 中未添加钨粉，而是在试样中心放置了一颗钨球，其结构如图 1(b)所示，试样的总质量与试样 1 保持一致。



(a) Sample 1　　(b) Sample 2

图 1　活性材料试样结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the structure of the reactive material sample

1.2　材料配比

根据文献 [15] 的结论，碳纤维含量为 2% 时材料具有较好的动态压缩性能，碳纤维过多反而会导致材料整体强度下降，因此，碳纤维质量占总质量的 2%，基体材料质量配比见表 1。

表 1　活性材料试样的基体材料质量配比

Table 1　Formulation of the matrix material for the reactive material test sample

w(PTFE)/%	w(Al)/%	w(CF)/%	理论最大密度/(g·cm^{-3})
72.0	26.0	2	2.270

试样 2 的总质量为 3.6 g，其中所用的钨球平均质量为 2.016 g。已知活性破片 PTFE/Al 质量比为 76.5/23.5，其中碳纤维质量占比 2% 的基础上，通过计算确定符合密度要求的材料配方，最终得出 PTFE/Al/CF/W 的具体质量配比，见表 2。

表 2　试样 2 的质量配比

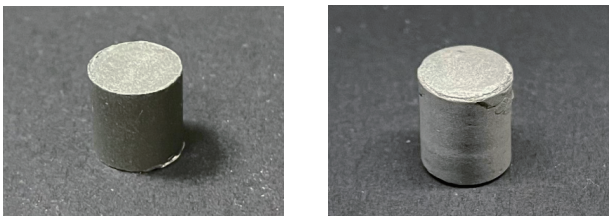
Table 2　Formulation of sample 2

配方	w(PTFE)/%	w(Al)/%	w(CF)/%	w(W)/%
试样	30.1	10.9	2	57

主要原材料包括：聚四氟乙烯(PTFE)，密度为 2.152 g/cm^3；球形铝粉，粒径为 25 μm，活性铝≥98%；钨粉，粒径＜5 μm，纯度≥99.98%。碳纤维(CF)为 1、3 mm 的短切碳纤维；钨合金球，直径为 6 mm。

1.3　压制成型与烧结成型

采用湿混法制备混合粉体材料，用模具压制试样。针对具有“核壳”复合结构的试样 2，设计了一套专用圆头压杆，直径为 10 mm，其压制端面加工有直径 6 mm 的半球形结构。具体实验过程如下：首先，根据试样尺寸计算所需粉体材料质量，将其均分为 2 份。将第 1 份粉体材料缓慢倒入模具中，通过轻微晃动使粉体均匀沉降于模具底部；然后，使用圆头压杆进行第 1 阶段压制，压制完成后取出压杆，在试样中心形成半球形凹槽；接着，使用镊子将钨球轻放入凹槽内；完成上述步骤后，将第 2 份粉体材料倒入模具，采用平头压杆在 500 MPa 压力下进行最终成型。针对“核壳”复合结构活性材料试样在烧结过程中易开裂的特性，通过引入碳纤维增强基体材料的强度，以碳纤维长度为 1 mm、烧结温度 350 ℃ 为标准的试样烧结条件。烧结完成的试样如图 2 所示。



(a) Sample 1　　(b) Sample 2

图 2　活性材料试样

Fig. 2　Reactive material sample

1.4　基本力学性能

采用 LE3504-H300 型电子万能试验机对 2 种试样开展准静态压缩测试，试验后测得试样 1 的弹性模量为 760 MPa、屈服强度为 22.43 MPa、抗压强度为 31.43 MPa、失效应变为 0.087，试样 2 的弹性模量为 560 MPa、屈服强度为 15.44 MPa、抗压强度为 23.66 MPa、失效应变为 0.102 采用分离式霍普金森压杆对试样进行动态加载测试，2 种活性材料的动态力学性能参数见表 3。从表中可以看出，相比于 PTFE/Al/CF 活性材料，加入钨粉后，在相同应变率下，材料的屈服强度、压缩强度和弹性模量均有所提高。从微观的角度分析，材料试样内的钨粉颗粒在受压缩时容易形成力链，力链的存在使得材料在相同应变率下能承受的最大载荷增大，钨粉的加入使得材料的动态抗压强度得到提升。

表 3　2 种材料的动态力学性能参数

Table 3　Dynamic mechanical properties of two materials

试样	气室气压/MPa	应变率/s^{-1}	屈服强度/MPa	弹性模量/MPa	抗压强度/MPa
PTFE/Al/CF	0.04	682	18.7	849	25.0
	0.10	2 304	29.1	963	44.8
	0.15	3 007	37.5	1 202	52.1
	0.20	5 448	48.8	1 260	55.8
PTFE/Al/CF/W	0.05	970	31.9	1 611	37.2
	0.10	2 378	38.9	2 288	53.2
	0.15	3 217	45.1	2 791	56.5
	0.20	5 386	52.6	2 810	63.5

2　毁伤效应试验

2.1　试验原理和方法

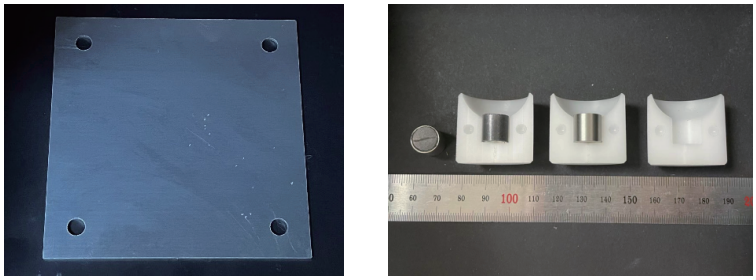
试验场地布置如图 3 所示，加载平台为一门 30 mm 口径的轻气炮，试验装置包括弹托拦阻器、测速网靶、高速摄影仪以及多层靶。

相比于普通惰性金属材料，氟聚物基活性材料的强度普遍偏低，在对硬装甲目标的毁伤中并没有优势，其靶后的释能效应是提升毁伤效应的关键，针对轻防护的高价值目标，活性破片的动能-化学能耦合毁伤效应能极大提升战斗部的毁伤效率。典型高价值目标的等效靶标包括飞机蒙皮、航空油箱、相控阵雷达等。在本次研究中，选取多层间隔铝靶作为等效目标开展活性破片的侵彻毁伤试验，靶板厚度分别为 3、3、2 和 2 mm，材料为 2A12 硬铝，尺寸为 170 mm×170 mm。靶板间距均为 100 mm，其中前 2 层厚度为 3 mm，后 2 层厚度为 2 mm，通过 4 根不锈钢丝杆固定在靶架中心。活性破片通过分离式尼龙弹托由轻气炮加载发射，通过调整发射气压对初速进行调整，为改变破片在穿靶过程中的约束状态，采用 0.5 mm 厚的 Q235 钢壳对部分破片进行包覆，靶板和活性破片实物如图 4 所示。侵彻毁伤试验设计见表 4。

(a) Test site layout　　(b) Experimental device

图 3　试验场地布置示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the test site



(a) Physical target board　　(b) Reactive fragment samples and sabot

图 4　靶板和活性破片实物图

Fig. 4　Images of target plates and reactive fragments

表 4　侵彻毁伤试验设计

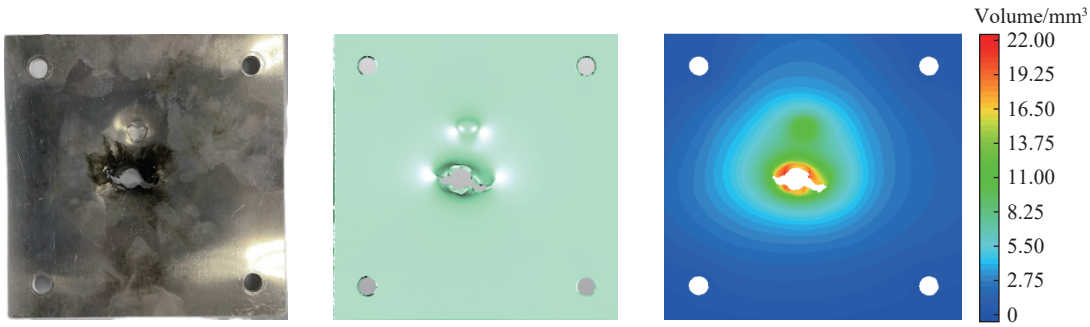
Table 4　Design of penetration and damage tests

破片类型	有无约束	试验编号	质量/g	破片直径/mm	破片长度/mm	气室压力/MPa	速度/(m·s^{-1})
PTFE/Al/CF/钨粉	无	1-1	3.60	10.02	10.04	3.0	549
		1-2	3.61	10.02	10.03	5.5	606
		1-3	3.55	10.02	10.02	8.0	759
	有	1-4	5.24	11.10	10.03	3.0	538
		1-5	5.22	11.10	10.03	5.5	673
		1-6	5.18	11.10	10.01	8.0	725
PTFE/Al/CF/钨球	无	2-1	3.59	10.02	10.04	3.0	533
		2-2	3.61	10.04	10.02	5.5	673
		2-3	3.56	10.02	10.00	8.0	736
	有	2-4	5.20	11.10	10.50	3.0	565
		2-5	5.22	11.10	10.50	5.5	653
		2-6	5.21	11.10	10.50	8.0	745

2.2　毁伤威力表征方法

以往通常采用最大挠度、穿孔尺寸或毁伤面积来表征活性破片的毁伤威力，这些一维或二维特征量无法完全表征靶板的毁伤变形程度，本文中将补充使用靶板的变形体积这个三维特征量来对靶板的变形程度进行更精确地定量分析。为准确获取靶板的变形特征，采用高精度三维激光扫描仪对靶板进行扫描，激光扫描仪的扫描误差小于 0.1 mm，每块靶板的点云数据集中包含约 9.5×10^5 个点。

通过 Python 编写点云文件的处理程序，删除个别无效的点云数据，同时重置坐标系，完成点云数据的基础处理后，通过面积分最终计算出每块靶板的变形特征量，如图 5 所示。



(a) Damaging physical images　(b) 3D point cloud model　(c) Deformation cloud diagram

图 5　靶板典型照片与处理图片

Fig. 5　Typical target photos and processed images

2.2.1　穿孔面积

通常由于三维点云模型包含大量的点，每个点都有其在三维空间中的坐标，因计算内存限制，无法直接生成变形云图。通过把这些点映射到二维网格上，可以将三维数据降维到二维，从而简化数据的处理和分析。具体的算法思路如下。

(1) 数据读取：读取 CSV 格式的点云数据。这些数据由三维空间中的一系列点组成，每个点通过其在三维空间中的 x、y、z 坐标来定义。

(2) 设定网格大小：确定在 x 和 y 方向上划分的网格数(即网格特征尺寸 N_d)。这个值决定了最终网格的精细程度。N_d 值越大，每个网格代表的空间区域就越小，处理后的数据就越精细。

(3) 计算步长：根据点云数据在 x 和 y 方向上的范围（最大值和最小值）以及网格特征尺寸，计算每个网格在 x 和 y 方向上的步长。

(4) 转换为网格坐标：将点云数据中每个点的 x 和 y 坐标转换为网格坐标，通过除以步长并取整，将每个点分配到相应的网格。

(5) 数据统计：遍历点云中的每个点，根据其网格坐标将其 z 值累加到对应网格的总和中，并统计该网格的点的个数。

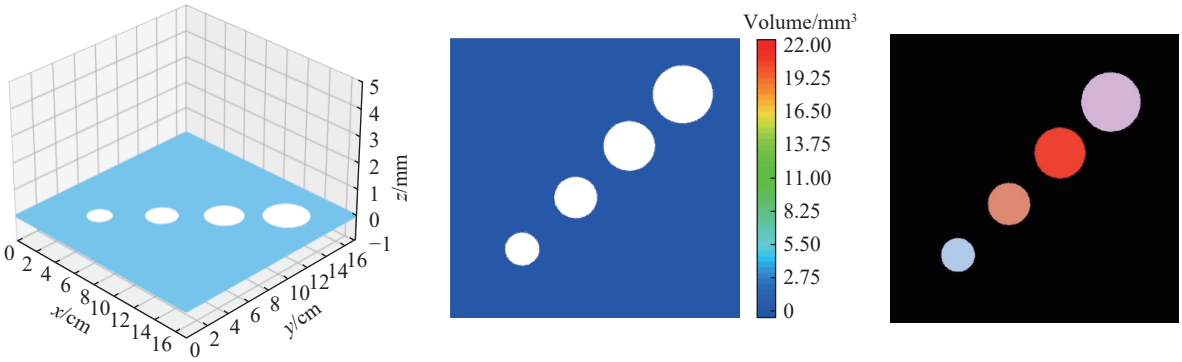
(6) 计算网格高度：对每个网格，将该网格内所有点的 z 值总和除以点的数量，得到该网格的平均 z 值。如果一个网格内没有任何点，将其平均值设为一个特定的替换值。

(7) 处理缺失数据：对于没有包含任何点的网格，通过考虑周围网格的平均 z 值来估计一个合理的值。通常涉及到一个确定邻域的过程，其中会考虑到一个预定义的半径来确定邻域的大小。

(8) 数据输出：输出处理后的靶板变形云图以及相应的矩阵 $\boldsymbol{M}$。

(9) 统计穿孔个数与穿孔面积：对得到的矩阵 $\boldsymbol{M}$ 基于文献 [16] 提出的深度优先搜索算法的思想，实现对靶板穿孔个数与各个穿孔面积的统计。

以 17 cm×17 cm 的靶板为例，在靶板上设置 4 个直径分别为 2.0、2.5、3.0、3.5 cm 的圆孔。为与实际扫描出的点云对应，生成的点云文件包含 9.5×10^5 个数据点，且为随机分布，将带孔靶板的三维点云数据导入自编源程序中，可以输出经过处理后的靶板的变形云图，如图 6(b)所示。由计算结果可知，处理程序计算得出的穿孔面积与理论计算面积的误差最大仅为 5.19%，在接受误差范围内。使用该源程序在计算包含 9.5×10^5 个数据的靶板点云文件时具有良好的可信度。



(a) Original state point cloud map　　(b) Processed deformation cloud map　　(c) Target after completing deep search

图 6　完成评估程序前后的靶板

Fig. 6　target before and after the evaluation procedure

2.2.2　变形体积

采用与前文类似的方法编写靶板体积的计算程序，存储于矩阵 $\boldsymbol{M}$ 中。该矩阵记录了靶板在冲击载荷作用下的响应结果。通过设定变形量阈值条件，筛选出矩阵 $\boldsymbol{M}$ 中位移量超过阈值的区域，识别出靶板的塑性变形区域。将塑性变形区域的位移数据和单元面积相乘后累计求和，计算靶板的塑性变形区体积 V_p，将计算得到的塑性变形区体积 V_p 输出，用于后续毁伤效应分析。

对于存在穿孔的靶板，将其变形体积划分为塑性变形区、柱状穿孔区和球缺状冲塞区 3 部分，如图 7 所示。靶板的变形体积（V_d）由以上 3 部分相加得出：

$$V_d = V_p + V_c + V_s \tag{1}$$

式中：塑性变形区的体积 V_p 由计算程序处理生成得出，柱状穿孔区的体积 V_c 由穿孔面积（A_s）与靶板的最大挠度（L_{max}）计算得到：

$$V_c = A_s L_{max} \tag{2}$$

A_s 由 2.2.1 节中的计算程序处理生成，L_{max} 取值于点云数据中 z 轴的最大值。

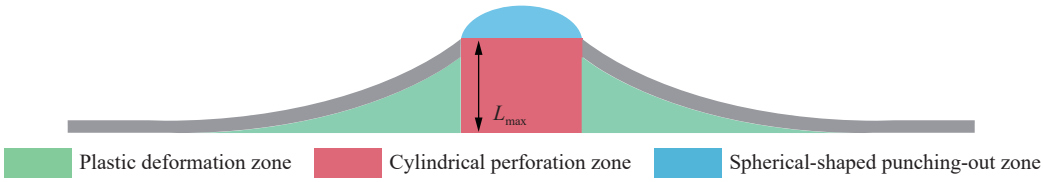


图 7　靶板变形示意图

Fig. 7　Schematic diagram of target plate deformation

对于冲塞区的体积 V_s，将其等效为一个完美的球缺体，底圆的半径为 r，球高度为 h，体积计算公式为：

$$V_s = \frac{1}{6}\pi h(3r^2 + h^2) \tag{3}$$

球缺的底圆半径与靶板的穿孔大小相关，将靶板的穿孔简化为球缺的底圆，穿孔面积 A_s 即为圆面积，因此球缺底圆的等效半径：

$$r = \sqrt{\frac{A_s}{\pi}} \tag{4}$$

对于球缺的高度 h，通过对试验后收集的大量靶板冲塞进行测量发现，冲塞的尺寸虽然不同，但其尺寸特征具有一定的相似性，冲塞的高度与底圆等效半径的比例近似为一个常数，取 $h \approx 0.45r$。

2.3　试验结果及分析

2.3.1　典型侵彻过程

为对比均质活性破片和“核壳式”活性破片在高速冲击下的行为差异，选用等质量相同尺寸的 2 种破片在相同着速下撞击多层间隔靶。图 8 和图 9 分别为均质活性破片和“核壳式”活性破片在有约束条件下撞靶的典型高速摄影照片。均质活性破片和“核壳式”活性破片在撞击第 1 层靶板过程中被激活，产生明显的火光。并在第 1 层靶板后方，2 种活性破片破碎成二次破片，分别撞击碰撞第 2 层靶板。均质活性破片的残余侵彻体被椭球形碎片云包围，“核壳式”活性破片中的钨球位于碎片云前端，

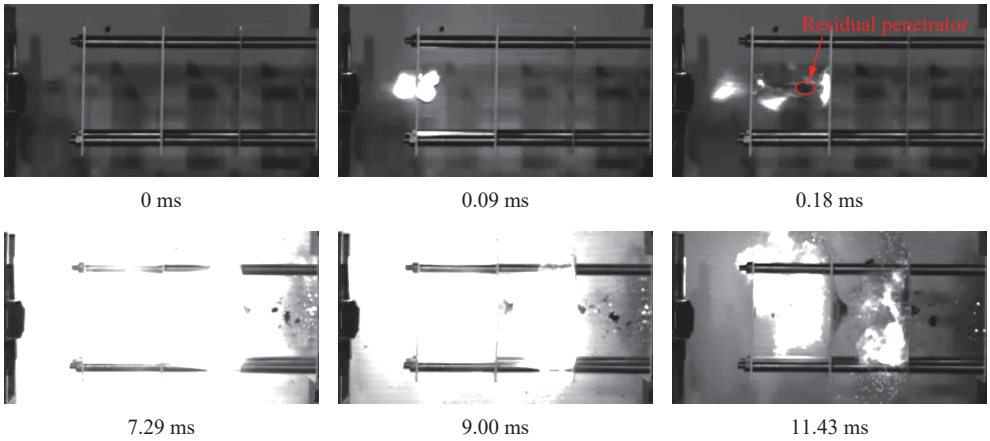
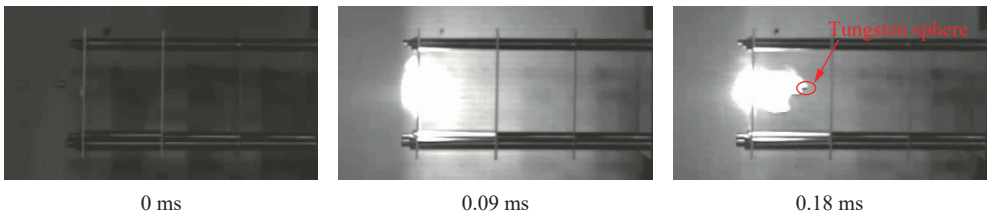
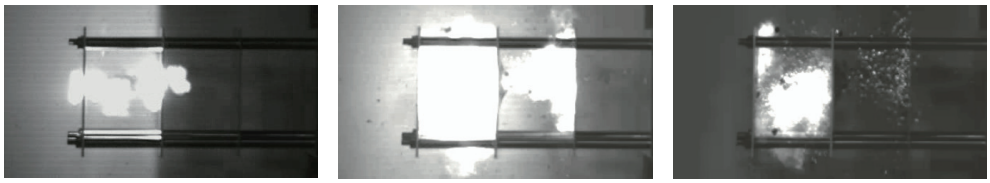


图 8　典型高速摄影图像(PTFE/Al/CF/W 粉，有壳体，538 m/s)

Fig. 8　Typical high-speed photography image (PTFE/Al/CF/W power, with shell, 538 m/s)





0.27 ms　　7.2 ms　　11.70 ms

图 9　典型高速摄影图像(PTFE/Al/CF/W 球, 有壳体, 565m/s)

Fig. 9　Typical high-speed photography image(PTFE/Al/CF/W ball, with shell, 565m/s)

先与第 2 层靶板发生接触, 并形成穿孔。“核壳式”破片的碎片云会一部分先透射过钨球贯穿的穿孔并继续向前运动, 另一部分会继续撞击第 2 层靶板, 对靶板造成毁伤。而均质活性破片是碎片云先撞击第 2 层靶板, 残余侵彻体继续撞击靶板。在形成的碎片云撞击第 2 层靶板时, 2 种破片的火光更为明显, 伴随有破片的进一步反应。

2.3.2　靶板穿孔面积

通过自编源程序对各工况下靶板的穿孔面积进行计算, 计算结果汇总于表 5, 总穿孔面积的差异见图 10。

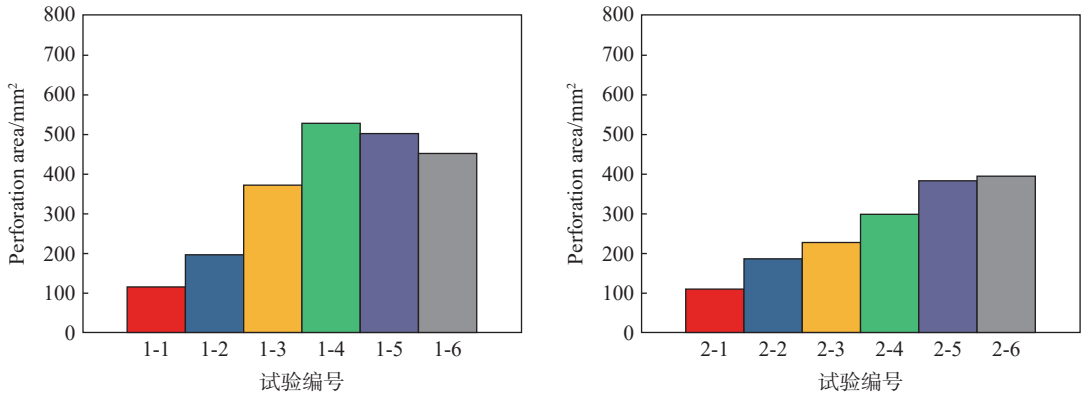
表 5　各工况对应的各层靶板的穿孔面积

Table 5　Perforated area of each layer of the target plate for each operating condition

试验编号	速度/(m·s^{-1})	各层靶板穿孔面积/mm^2				总穿孔面积/mm^2
		第1层	第2层	第3层	第4层	
1-1	549	116.06	0	0	0	116.06
1-2	606	116.18	79.76	0	0	195.94
1-3	759	132.82	128.32	110.86	0	372.00
1-4	538	159.99	366.57	0	0	526.56
1-5	673	148.66	330.38	22.43	0	501.47
1-6	725	170.16	202.30	80.46	0	452.92
2-1	533	39.42	22.77	24.16	24.85	111.20
2-2	673	111.21	25.55	24.16	24.51	185.43
2-3	736	157.22	25.09	22.08	22.89	227.28
2-4	565	138.60	111.09	24.04	23.81	297.54
2-5	653	155.71	176.64	25.32	24.04	381.71
2-6	745	140.45	206.46	20.00	26.24	393.15

破片撞击靶板时, 其动能主要通过 2 种方式传递: 一是导致靶板材料发生局部压缩和剪切破坏, 形成穿孔; 二是引起靶板整体结构的弹性变形和应力波传播。从穿孔面积的整体变化趋势来看, 随着速度的增大, 破片的穿靶层数增多, 穿孔面积也随之增大。

没有钢壳约束的情况下, 最大穿孔面积出现在第 1 层靶板, 由于破片自身的结构强度相对较低, 在撞击过程中易发生显著的形态畸变和结构破碎。第 2 层靶板的穿孔原因主要是残余侵彻体和钨球的二次动能作用, 破片在穿透第 1 层靶板过程中已消耗部分动能, 且其形态结构发生了明显的塑性变形和破碎分散, 导致穿孔能力显著降低。产生这一现象的主要原因是破片在初始撞击阶段具有较高的动能, 能量集中作用于局部区域, 使得第 1 层靶板形成最大穿孔面积。在钢壳约束的情况下, 最大穿孔面积均出现在第 2 层靶板, 穿透靶板的层数也随之增多, 其侵彻效率也得到了一定的提升, 钢壳的约束能使破片整体强度增大, 破片在撞击过程中能更好地保持结构完整性, 从而在穿透第 1 层靶板后, 仍具备较强的侵彻能力, 在第 2 层靶板上形成最大穿孔面积, 进而提高了其毁伤威力。



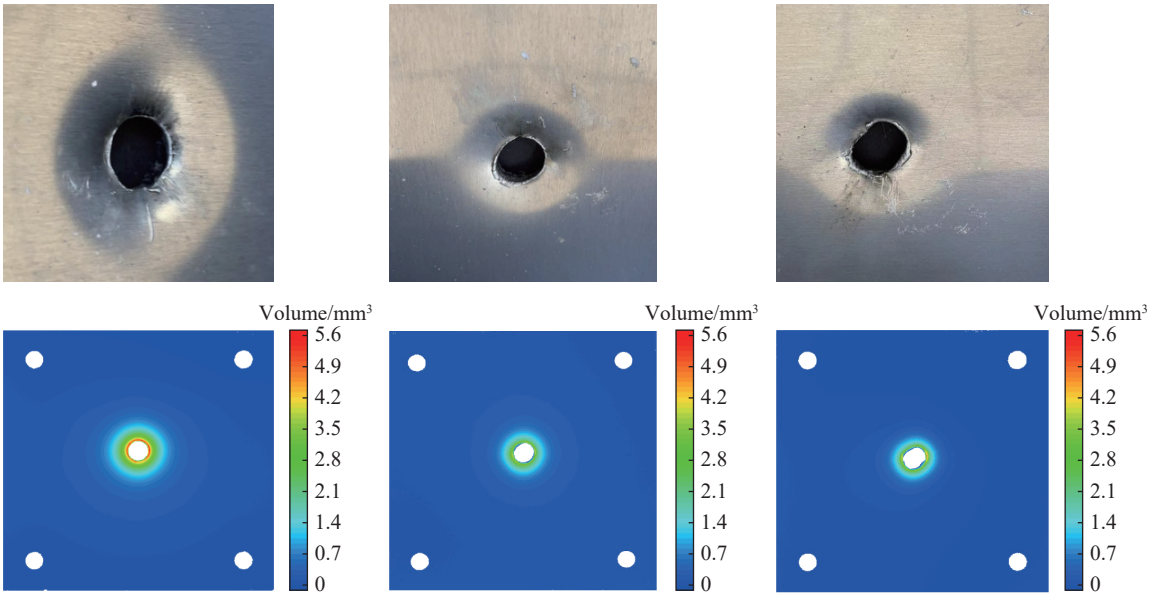
(a) Homogeneous reactive fragment　　(b) Core-shell composite reactive fragment

图 10　总穿孔面积

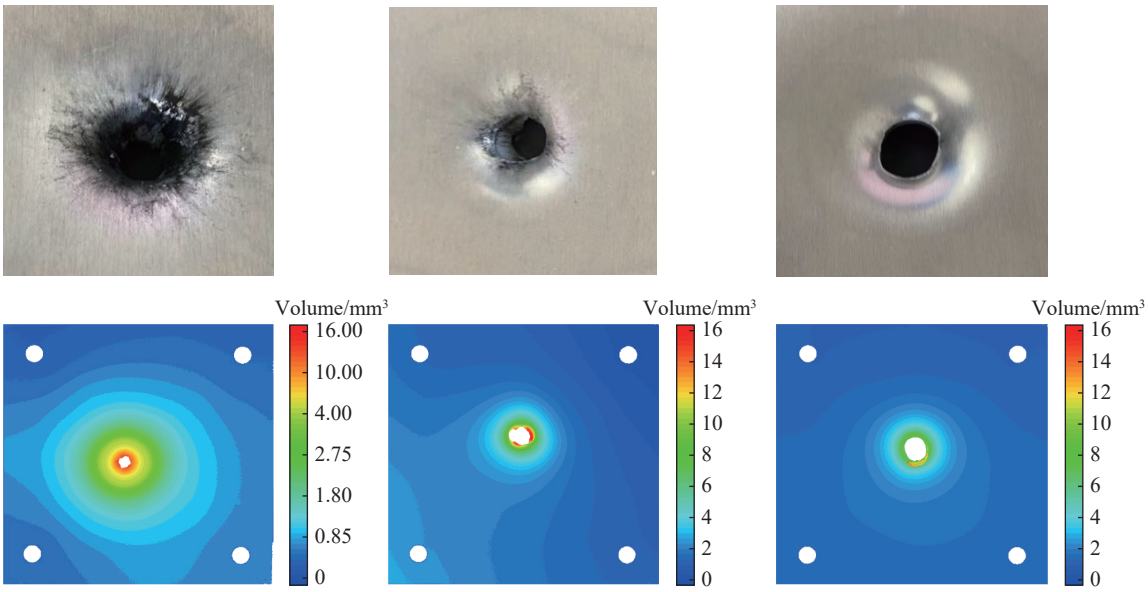
Fig. 10　Total perforation area

“核壳”式复合结构活性破片的穿孔面积明显小于均质结构的活性破片，但其穿靶效率远高于后者，在没有钢壳约束的情况下，以 533 m/s 的撞击速度就能稳定贯穿 4 层靶板，而均质结构活性破片在强约束的情况下，以 725 m/s 的撞击速度仍只能贯穿 3 层靶板。

均质活性破片在无约束状态下，第 1 层靶破坏模式为高速撞击导致的冲塞破坏，如图 11(a)～(c)所示，穿透第 1 层靶板产生的穿孔面积随速度的变化不大，穿孔等效直径约为 1.21 倍破片直径，在钢壳约束状态下的第 1 层靶的穿孔面积随速度的变化特征也与之类似，平均穿孔直径为 1.28 倍破片直径。在不同约束条件下，“核壳”式复合结构活性破片对第 1 层靶的穿孔面积存在明显差异：无约束条件下，破片对第 1 层靶的穿孔面积随速度的增大而明显增大；有约束条件下，速度变化对第 1 层靶的穿孔面积的影响明显降低，3 种速度下的穿孔面积都十分接近，穿过第 2 层靶后的速度对穿孔面积的影响开始变得显著。在有钢壳约束的情况下，2 种结构的活性破片在撞击第 1 层靶时产生的变形量较为一致，产生了较严重的破碎现象，但钢壳的约束会使碎片仍集中在特定范围内，在穿透第 1 层靶时可近似看作完整的破片，因此速度对穿孔面积的影响较弱。待穿透第 1 层靶后，碎片开始飞散，使得破片的侵彻能力降低，但变形做功能力增强，此时，对第 2 层靶的穿孔面积随速度的差异开始变得明显。从图 11 可以看出，自编程序计算的靶板变形结果与试验结果吻合度较高，证明该程序具有较高的可信度。



(a) 1-1　　(b) 1-2　　(c) 1-3



(d) 2-1　　(e) 2-2　　(f) 2-3

图 11　第 1 层靶板变形的试验结果和程序计算对比

Fig. 11　Comparison between experimental results and program calculations of the first target plate deformation

从第 2 层靶板的穿孔尺寸特征可以发现，约束条件对“核壳”式复合结构活性破片穿孔面积影响显著：在无约束条件下，第 2 层靶板的穿孔直径约为 0.95 倍的钨球直径，从图 12 可以看到，第 2 层靶板穿孔周围的熏黑现象随着速度的增大而更加明显，说明爆燃反应更加强烈，钨球后端的基体材料和小尺寸碎片的爆燃并不会增大对第 2 层靶板的穿孔面积，穿孔面积主要是由钨球的动能侵彻造成的。“核壳”式复合结构活性破片在有无约束条件下都能成功穿透 4 层靶板，从靶板的具体穿孔特征分析可以发现，后 2 层靶板的侵彻穿孔由钨球造成，受活性材料的影响较小。

(a) 2-1　　(b) 2-2　　(c) 2-3

图 12　第 2 层靶板的毁伤形貌

Fig. 12　Damage morphology of the second-layer target plate

不同活性破片的穿孔尺寸特征差异表明，在相同速度下，“核壳”式复合结构活性破片穿透靶板的层数明显高于相同质量下的均质结构活性破片，具有更高的侵彻效应，但造成的最大穿孔面积明显低于后者。“核壳”式复合结构活性破片对多层靶的穿透能力更强，从穿孔面积看，均质结构活性破片的毁伤效应更高，能造成更大的穿孔破坏，但对多层靶的侵彻效应偏低。

2.3.3　靶板变形体积

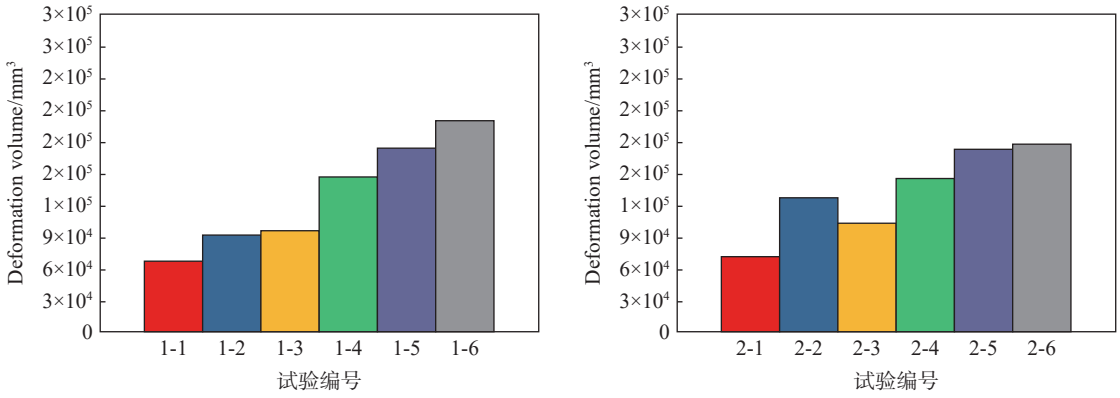
通过自编的变形体积计算程序获得了各靶板的具体变形量(表 6)，总变形体积的差异见图 13。

通过对比不同撞击速度下对多层间隔靶结构目标所产生的变形总体积变化趋势发现，靶板在撞击过程中所产生的总变形体积随速度的增大而增大。

表 6　各工况变形靶板的变形体积

Table 6　The deformation volume of the deformed target plate under various working conditions

试验编号	速度/(m·s^{-1})	各层靶板变形体积V_d/mm^3				总变形体积V_t/mm^3
		第1层	第2层	第3层	第4层	
1-1	549	11 845	55 840	–	–	67 685
1-2	606	11 433	53 539	27 499	–	92 471
1-3	759	6 655	29 797	35 855	23 655	95 962
1-4	538	11 387	98 668	36 862	–	146 917
1-5	673	6 990	87 570	74 165	5 000	173 725
1-6	725	7 455	107 958	62 652	21 882	199 947
2-1	533	30 809	11 968	11 477	15 603	69 857
2-2	673	51 321	28 440	27 452	18 495	125 708
2-3	736	47 834	28 047	14 814	10 555	101 250
2-4	565	36 352	57 151	32 070	18 638	144 211
2-5	653	23 198	102 155	34 736	10 826	170 915
2-6	745	35 591	81 511	47 527	10 635	175 264



(a) Homogeneous reactive fragment　　(b) Core-shell composite reactive fragment

图 13　总变形体积

Fig. 13　Total deformation volume

通过对不同约束状态下变形体积的分析，约束条件改变了“核壳”式复合结构活性破片的毁伤模式。在无约束情况下，靶板变形都集中在第 1 层靶，而当存在钢壳约束时，靶板的最大变形主要出现在第 2 层靶板。这是因为外层基体材料强度较弱，在侵彻第 1 层靶板时，破片前端基体材料部分发生动态破碎，产生的部分碎片沿周向发生溅射，未能穿透第 1 层靶板，在靶板上留下了明显的延性扩孔，钨球后端未反应的碎片云在侵彻第 2 层靶时发生反应，留下明显的烧蚀。在存在约束的条件下，在穿透第 1 层靶板时虽然也发生了破碎，但在钢壳约束下，碎片并未发生明显的溅射，穿透第 1 层靶板后破片的质量损失较小，在撞击第 2 层靶板时仍然保持较高的动能。从第 2 层靶板的变形特征可知，有约束状态下，“核壳”式复合结构破片对第 2 层靶产生的变形量高于无约束条件下的变形体积，侵彻第 1 层靶板后，在有约束条件下，破片依然能够保持较高的动能，其形态相对完整，能够有效地传递动能到靶板上，导致较大的靶板变形。分析第 3～4 层靶板可知，无论有无约束，变形体积随着速度的改变差别不大，在 3 层靶板后，对靶板的结构毁伤主要以钨球的动能毁伤为主，活性材料对后续靶板的毁伤影响明显减弱。

无论有无约束条件，均质活性破片对第 1 层靶板的变形体积均会随着速度的增大而减小，出现这个现象的原因是：均质活性破片对第 1 层靶板的破坏模式均是冲塞破坏，但在速度较高的情况下，破片穿

透时间缩短，爆燃扩孔效应降低，导致第 1 层靶板塑性变形区的体积明显减小。对第 2 层靶板进行分析发现，在无约束条件下，均质活性破片在低速和中速下的变形体积差异不大，这是因为：低速下靶板破坏表现为隆起，中速下靶板被穿孔，当残余侵彻体无法穿过靶板时，大多数反应材料破碎，爆燃主要发生在第 1～2 层靶板之间，当残余侵彻体能够穿透靶板，则爆燃主要发生在第 2 层穿孔附近，对其体积变形的贡献不大，这也解释了扩孔随速度增大的原因；当速度增大后，靶板的塑性变形明显减小；在有约束条件下，均质活性破片对第 2 层靶板的变形体积显著高于无约束条件。

随着速度的增大，在无约束情况下，“核壳”式复合结构活性破片在高速侵彻过程中对前 2 层靶板造成的变形体积显著高于均质结构破片，如图 14 所示，这是由于“核壳”复合结构的存在，导致材料内部波阻抗特性出现了不连续，在撞击过程中，这种结构特征促使基体材料更容易发生破碎，使得材料的主要能量耗散方式转变为靶板的塑性变形做功，导致其产生的总变形量增大。在有约束的情况下，破片破碎后发生飞散的现象被极大抑制，避免了材料在强度上的细微差异造成的靶板变形量的差异，而“核壳”复合结构中钨球的存在使得其穿靶效率得到极大提升，这种结构上的变形做功优势被放大，使得在受钢壳约束时侵彻多层靶时产生的变形总量反而高于均质结构，在高速撞击下这种差异更加明显。

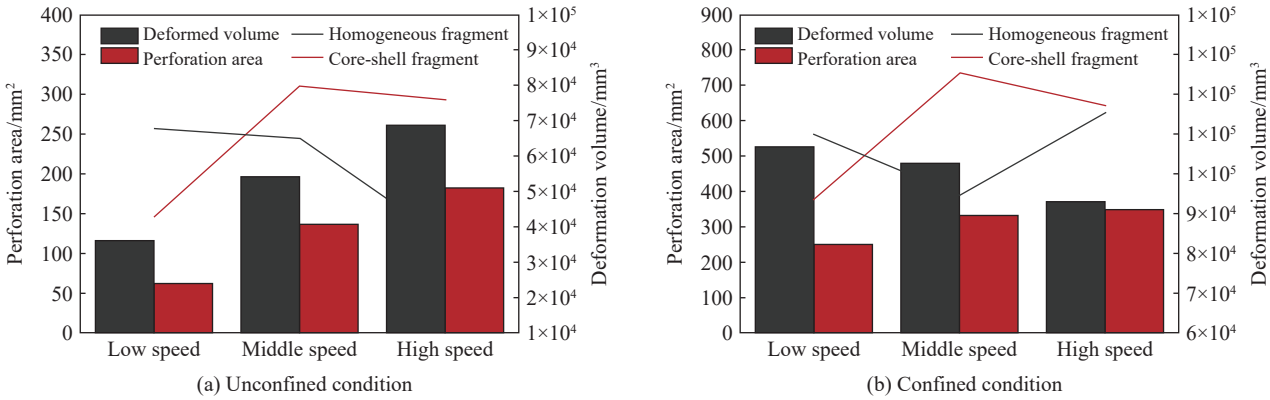


图 14　前两层靶板的变形体积和穿孔面积对比

Fig. 14　Comparison between the deformed volume and perforation area of the first two layers of target plates

综上所述，没有约束的“核壳”式复合结构活性破片在以中高速撞击靶板时，对前 2 层靶板的变形毁伤效应明显优于均质破片。在有约束情况下，2 种结构活性破片的整体强度得到了较大提升，但“核壳”式复合结构破片对靶板侵彻效率的优势使得其变形毁伤效应得到了提高。

2.3.4　破片反应光强

在活性破片侵彻过程中，火光区的亮度可以作为反应程度的指征[17]，不同撞击速度下冲击反应全过程中发生活性反应的亮度特征如表 7 所示，光强总量的差异见图 15。

从总的反应光强特征值的变化趋势可以看出，在有约束情况下，活性破片反应光强均明显高于无约束情况下的结果，随着速度的增大，反应光强也随之增大。在无约束情况下，当速度达到约 600 m/s 时，反应光强对速度的敏感性降低，随着速度的增大，反应光强的总量并没有发生明显的增加，推断此时已达到材料的最大反应率，速度的增大并不能使材料的反应效率进一步增大。由于无约束情况下破片撞击第 1 层靶时产生的溅射现象，使得大量碎片材料发生损耗，穿透第 1 层靶后的活性材料总质量减小，影响了其总能量的释放。

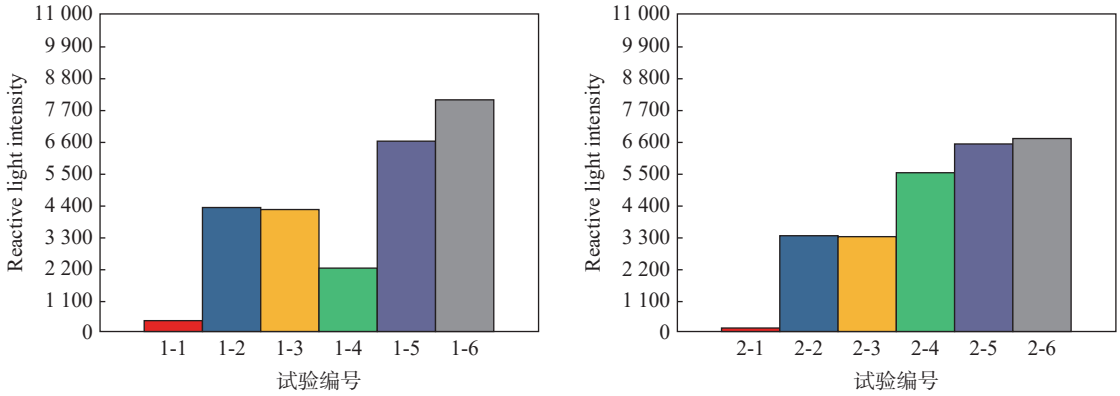
反应光强的最大值几乎总是出现在第 2 层靶板前，从反应光强特征判断，主要的活性反应出现在与第 2 层靶板的撞击过程中。当破片撞击第 1 层靶板时，发生剧烈破碎，在不存在约束时，破碎后的碎片残骸向四周飞散，造成了部分质量损失，同时有少部分材料发生了初步反应。在约束存在时，撞击过程中产生的压缩波在破片内传播，当传播至样品与钢壳的边界时，发生反射，并向传播方向相反的方向继续传播，由于钢壳的强约束影响，压缩波在材料内部不断叠加，最终使得破片的破碎特性相较于无约束情

况下更加剧烈，产生的细小碎片更多，其使得第 1 层靶板处产生的反应相较无约束下更加强烈，反应光强也更大，但也明显低于第 2 层靶前的反应光强。破片在与第 1 层靶的撞击过程中虽有部分反应，但反应光强在总光强中的占比较小，主要的活性反应发生破片与第 2 层靶的撞击过程中，破片与第 1 层靶的撞击破碎过程是影响后续反应的关键，撞击速度越大，破碎程度越高，后续反应的光强越大；破片的约束越强，产生的质量损失越小，后续参与反应的材料质量越大。

表 7　各工况下变形靶板前的亮度积分结果

Table 7　The brightness integral results before the deformation target plate under various working conditions

试验编号	速度/(m·s^{-1})	各层靶板前的亮度积分				总亮度积分
		第1层	第2层	第3层	第4层	
1-1	549	140.06	247.09	–	–	387.15
1-2	606	1 103.80	2 322.21	856.01	–	4 282.02
1-3	759	948.40	1 402.60	1 035.30	845.70	4 232.00
1-4	538	468.10	861.50	862.90	–	2 192.50
1-5	673	1 451.60	2 939.20	2 189.90	1 149.80	7 730.50
1-6	725	1 852.10	2 468.10	2 148.40	1 538.00	8 006.60
2-1	533	18.45	71.40	31.80	7.80	129.45
2-2	673	919.20	1 244.40	784.80	367.80	3 316.20
2-3	736	841.80	1 136.70	768.50	548.20	3 295.20
2-4	565	1 256.50	1 873.40	1 419.90	956.40	5 506.20
2-5	653	1 393.10	2 621.70	1 507.50	981.40	6 503.70
2-6	745	1 571.00	2 022.60	1 797.60	1 271.20	6 662.40



(a) Homogeneous reactive fragment　　(b) Core-shell composite reactive fragment

图 15　总反应光强

Fig. 15　Total reactive light intensity

在各工况下，不同活性破片产生的最大反应光强几乎都出现在第 2 层靶的位置，但靶板出现最大变形与穿孔的位置与之并不符合，活性破片在侵彻多层靶时的活性释能反应与其造成的毁伤变形特征之间的耦合关系似乎并不明显，换而言之，活性破片的活性释能反应对其穿靶效应的促进作用并不明显，破片的毁伤特征差异主要与其力学特性有关。

3　结　论

开展了相同质量的均质结构活性破片（PTFE/Al/CF/W 粉）与“核壳”式复合活性破片（PTFE/Al/CF/W

球)在不同速度和约束情况下对 3 mm+3 mm+2 mm+2 mm 间隔 2A12 铝板的毁伤效应试验，通过自编源程序对获得的数据进行处理分析，获得了各靶板的穿孔尺寸特征、变形体积特征以及反应过程的光强变化特征，得到以下结论。

(1)“核壳”式破片侵彻能力更强，在低速时可穿透 4 层靶板，但穿孔面积较小，穿孔直径约为 0.95 倍破片直径；均质破片穿孔面积更大但侵彻能力较弱，穿孔直径约为 1.21 倍破片直径，高速时只能穿透 3 层靶板。使用钢壳约束能明显提升活性破片的穿孔破坏能力，对破片的侵彻毁伤能力有一定的提升。

(2) 没有约束的“核壳”式复合结构活性破片在中高速撞击靶板时对前 2 层靶板的变形毁伤效应明显优于均质破片。在有约束的情况下，2 种结构活性破片的整体强度得到了较大提升，但“核壳”式复合结构破片对靶板侵彻效率的优势使得其变形毁伤效应得到了提高。

(3) 从反应过程产生的光强变化来看，破片在与第 1 层靶的撞击过程中虽有部分反应，但反应光强在总光强中的占比较小，主要的活性反应发生破片与第 2 层靶的撞击过程中。对比靶板的穿孔变形毁伤特征发现，不同活性破片在各工况下产生的最大反应光强位置与靶板出现最大变形和穿孔的位置并不符合，活性破片的活性释能反应对其毁伤效应的促进作用并不明显，破片的毁伤特征差异主要与其力学特性有关。

参考文献：

[1] 李向东, 杜忠华. 目标易损性 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013.
LI X D, DU Z H. Target Vulnerability [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2013.

[2] 叶文君, 汪涛, 鱼银虎. 氟聚物基含能反应材料研究进展 [J]. 宇航材料工艺, 2012, 42(6): 19–23. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2012.06.003.
YE W J, WANG T, YU Y H. Research progress of fluoropolymer-matrix energetic reactive materials [J]. Aerospace Materials & Technology, 2012, 42(6): 19–23. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2330.2012.06.003.

[3] WADDELL J T, BOOTES T H, BUDY G D, et al. Reactive shaped charge, reactive liner, and method for target penetration using a reactive shaped charge: US 2011/0239888 A1 [P]. 2011-10-18.

[4] 沈波, 李延. 全含能侵彻战斗部对多层钢介质的毁伤威力表征技术 [J]. 含能材料, 2021, 29(2): 141–148. DOI: 10.11943/CJEM2020256.
SHEN B, LI Y. Characterization technology of damage power of all-energetic penetrating warhead to multilayer steel medium [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(2): 141–148. DOI: 10.11943/CJEM2020256.

[5] 王靖岩, 王义智, 韩志伟. 铝-氟聚物反应性物质制备及研究进展 [J]. 含能材料, 2021, 29(1): 78–86. DOI: 10.11943/CJEM2020113.
WANG J Y, WANG Y Z, HAN Z W. Preparation and research progress of aluminum-fluoropolymer reactive materials [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(1): 78–86. DOI: 10.11943/CJEM2020113.

[6] 黄亨建, 黄辉, 阳世清, 等. 毁伤增强型破片探索研究 [J]. 含能材料, 2007, 15(6): 566–569. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2007.06.002.
HUANG H J, HUANG H, YANG S Q, et al. Preliminary research on damage enhanced fragment [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007, 15(6): 566–569. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2007.06.002.

[7] 郑雄伟, 袁宝慧, 陈进, 等. Al-PTFE 活性材料的冲击压力对冲击释能规律影响研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(3): 110–113. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20160421.002.
ZHENG X W, YUAN B H, CHEN J, et al. Effect of shock pressure on energy releasing characteristic of Al-PTFE reactive materials [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 39(3): 110–113. DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20160421.002.

[8] 肖艳文, 徐峰悦, 余庆波, 等. 高密度活性破片碰撞双层靶毁伤效应 [J]. 科技导报, 2017, 35(10): 99–103. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.10.014.
XIAO Y W, XU F Y, YU Q B, et al. Damage of double-spaced plates by reactive material fragment impact [J]. Science & Technology Review, 2017, 35(10): 99–103. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.10.014.

[9] WANG H F, XIE J W, GE C, et al. Experimental investigation on enhanced damage to fuel tanks by reactive projectiles

impact [J]. Defence Technology, 2021, 17(2): 599–608. DOI: 10.1016/j.dt.2020.03.01.

[10] 彭军, 李彪彪, 袁宝慧, 等. 钢包覆式活性破片侵彻双层铝靶的行为特性研究 [J]. 火炸药学报, 2020, 43(1): 90–95. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.201911013.
PENG J, LI B B, YUAN B H, et al. Research on behavior of steel-coated reactive materials fragment on penetrating double-layer aluminum plates [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2020, 43(1): 90–95. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.201911013.

[11] YUAN Y, LIU Z Y, HE S, et al. Shock-induced reaction behaviors of functionally graded reactive material [J]. Defence Technology, 2021, 17(5): 1687–1698. DOI: 10.1016/j.dt.2020.09.010.

[12] ZHANG H, WANG H F, YU Q B, et al. Perforation of double-spaced aluminum plates by reactive projectiles with different densities [J]. Materials, 2021, 14(5): 1229. DOI: 10.3390/ma14051229.

[13] 王在成, 徐祎, 姜春兰, 等. 钨锆钛活性破片对间隔靶的毁伤效应 [J]. 兵工学报, 2023, 44(12): 3862–3871. DOI: 10.12382/bgxb.2023.0289.
WANG Z C, XU Y, JIANG C L, et al. Damage effect of W/Zr/Ti reactive fragments on spaced targets [J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(12): 3862–3871. DOI: 10.12382/bgxb.2023.0289.

[14] 曹进, 陈春林, 马坤, 等. 球形含能结构材料弹体超高速撞击多层薄钢靶的毁伤特性 [J]. 含能材料, 2023, 31(8): 786–796. DOI: 10.11943/CJEM2023131.
CAO J, CHEN C L, MA K, et al. Investigation on damage characteristics of multilayer thin steel target penetrated by hypervelocity spherical reactive materials projectile [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2023, 31(8): 786–796. DOI: 10.11943/CJEM2023131.

[15] 任鑫鑫, 李裕春, 吴家祥, 等. 碳纤维对 PTFE/Al 反应材料动态力学行为和点火特性影响研究 [J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(10): 1026–1035. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2023.047.
REN X X, LI Y C, WU J X, et al. Effect of carbon fiber on dynamic mechanical behavior and ignition characteristics of PTFE/Al reactive materials [J]. Transactions of Beijing institute of Technology, 2023, 43(10): 1026–1035. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2023.047.

[16] 丁亮亮. PELE 弹活性内芯配方与弹体结构设计及毁伤机理研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2019. DOI: 10.27052/d.cnki.gzjgu.2019.000303.
DING L L. Research on the reactive inner core formulation and structural design as well as damage mechanism of PELE projectile [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019. DOI: 10.27052/d.cnki.gzjgu.2019.000303.

[17] SI S P, HE C, LIU S, et al. Influence of impact velocity on impact-initiated reaction behavior of Zr-Ti-Nb alloy [J]. Materials & Design, 2022, 220: 110846. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.110846.

(责任编辑　曾月蓉)