

爆炸冲击波和破片群复合作用下泡沫铝/纤维夹芯结构的毁伤特性*

周楠^{1,2,3}, 唐奎⁴, 孙佳慧⁵, 王金相⁴, 刘大斌¹, 方雨³

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094;

2. 南京警察学院刑事科学技术学院, 江苏 南京 210023;

3. 安徽弘雷金属复合材料科技有限公司, 安徽 宣城 242000;

4. 南京理工大学瞬态物理国家重点实验室, 江苏 南京 210094;

5. 呼伦贝尔市公安局, 内蒙古 呼伦贝尔 021000)

摘要: 在简易自制爆炸装置的近场爆炸中, 防护结构常受到爆炸冲击波和破片的复合作用, 为了提高结构的防护性能, 设计并制备了含“泡沫铝/纤维”夹芯复合结构材料, 通过开展“爆炸+侵彻”实验, 研究复合结构在爆炸冲击波和高速破片复合作用下的失效模式, 重点讨论爆炸冲击波和破片两种载荷时序性对毁伤特性的影响, 并分析不同材料的吸能机理。研究表明: 爆距的变化直接影响爆炸冲击波和破片作用的时序性, 在本文讨论的工况中, 当爆距大于600mm时, 破片先于冲击波作用。在冲击波和破片的复合作用下, 铝面板除了破片的贯穿破坏外, 还伴有局部凹陷变形; 泡沫铝自身胞孔结构在冲击载荷作用下发生压溃变形和胞壁屈服碎裂; 弹孔处纤维则在破片的侵彻下发生拉伸变形和断裂, 并伴有高温失效; 铝背板主要以瓣裂撕裂破坏为主。在两种时序性作用下, 弹孔的存在削弱了冲击波对铝面板的作用, 后序夹芯结构材料和铝背板的变形破坏程度较前序材料更为严重。本研究的开展对轻质复合结构材料在有限空间近爆防护领域中的应用和功能设计提供了技术依据。

关键词: 夹芯结构; 泡沫铝; UHMWPE 纤维; 时序性; 毁伤特性

中图分类号: O385

国标学科代码: 130-35

文献标识码: A

Damage characteristics of foamed aluminum/fiber sandwich structure under the combined loading of near-field blast shock wave and fragments

ZHOU Nan^{1,2,3}, TANG Kui⁴, SUN Jiahui⁵, WANG Jinxiang⁴, LIU Dabin¹, FANG Yu³

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

2. Department of Criminal Science and Technology, Nanjing Police University, Nanjing 210023, Jiangsu, China;

3. Anhui Honlly Clad Metal Materials Technology Co., Ltd, Xuancheng 242000, China;

4. Science and Technology on Transient Physics Laboratory, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;

5. Hulunbuir Public Security Bureau, Hulunbuir, 021000, Inner Mongolia, China)

Abstract: In the near-field explosion of improvised explosive device, the protective structure is often subjected to the combined

*收稿日期: 2024-05-08; 修回日期: 2024-09-03;

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11602113、12102202); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(LGZD202301); 江苏省“333 高层次人才培养工程”和江苏省“十四五”重点学科(公安技术)资助。

第一作者: 周楠 (1986-), 男, 博士, 副教授. E-mail: nudge@163.com。

action of blast wave and fragments. To improve the protection performance of the structure, a composite structural material containing foamed aluminum/fiber sandwich was designed and prepared. The "explosion + penetration" experiment was carried out to study the failure mode of the composite structure under the combined action of explosion shock wave and high-speed fragments. In the experiment, the time for the explosive shock wave to reach the surface of the composite plate and the pressure attenuation before and after passing through the material were tested by installing PVDF pressure gauges on the upper and lower surfaces of the composite plate. Meanwhile, the time for the shock wave to reach the surface of the composite plate was measured by piezoelectric probes for the purpose of verification. The time for fragments to reach the surface of the composite plate was tested using a comb-shaped target, and the velocity attenuation of fragments after penetrating the target plate was obtained. The influence of the two loading's timing sequence of explosion shock wave and fragment on the failure mode was discussed, and the energy absorption mechanism of different materials was analyzed. The results show that the change of detonation distance directly affects the timing sequence of the action of explosion shock wave and fragment. In the conditions discussed in this paper, when the detonation distance is greater than 600mm, the fragment acts before the shock wave. Under the combined action of shock wave and fragment, the aluminum plate is accompanied by local sag deformation in addition to the penetration failure of fragments. The cellular structure of foamed aluminum was crushed and deformed under the impact load. The fibers at the bullet hole are stretched and fractured under the penetration of fragments, and are accompanied by high temperature failure. Under the two sequential effects, the existence of bullet holes weakens the effect of shock wave on the front aluminum plate, and the deformation and damage degree of the later sandwich structural material and the rear aluminum plate are more serious than that of the previous material. This research provides a technical basis for the application and functional design of lightweight composite structural materials in the field of near-burst protection in limited space.

Keywords: sandwich structure; foamed aluminum; UHMWPE fiber; time sequence; damage characteristic

国家公共安全是保障民生、发展经济的重要前提，近些年，危害国家公共安全的极端恐怖暴力在国内外仍不断发生，如何有效预防与应对此类爆恐案件成为全世界共同关注的问题。通过梳理发现，此类爆恐案件中广泛涉及各类简易自制爆炸装置，如何对其开展有效防护则成为亟待解决的问题，这其中涉及的科学问题主要包含近场爆炸多载荷耦合作用与防护结构材料毁伤机理等，国内外学者针对此领域开展了较为广泛的研究。

在爆炸冲击波和破片联合作用下结构材料的毁伤研究方面，侯海量等^[1,2]设计并制备了4种典型的夹芯复合结构用以模拟抗爆舰船舱壁，并对其开展了冲击波与破片联合作用实验，得出两种毁伤元对结构破坏的耦合作用，并阐明了该耦合作用中时空因素的影响；田力等^[3,4]探究了民用建筑墙及其构件在近爆条件下对冲击波和破片联合作用下的防护性能，讨论了炸药比例距离和炸药起爆位置对夹芯板防护效果的影响，发现夹芯板在两种毁伤元联合作用下造成的破坏程度显著大于两种毁伤元单一作用客体时破坏效应的线性叠加；Nystrom等^[5]采用试验和数值模拟法研究了混凝土结构在不同载荷作用下的破坏效应，同样指出联合载荷作用下结构的整体破坏程度大于单一载荷对结构产生的破坏程度之和。针对冲击波和破片的运动规律，Gong等^[6]根据冲击波在空气中的传播和衰减特性，分别求解了冲击波在破片前、二者相遇和冲击波在破片后的三阶段传播规律；Grisaro等^[7]研究了爆炸冲击波和破片侵彻的耦合作用过程，综合考虑破片质量、爆炸和装药等因素，提出了简化分析模型用以评估多破片冲量破坏效应，重点关注于两种载荷共同作用的压力-时间变化关系；Phillip等^[8]采用实验法对裸炸药和车载式简易爆炸装置爆炸时产生的爆炸冲击波和破片的加载和破坏作用开展了定量研究；Chu等^[9]对含聚脲涂层钢板在爆炸冲击波和破片耦合作用下的防护性能开展了计算研究，指出针对破片先于冲击波作用的情况，应提高结构迎弹面的抗弹性能。陈兴等^[10]研究了破片式战斗部爆炸后破片和冲击波两种毁伤元的相遇位置，讨论了破片质量、爆速和爆热等因素对相遇位置的影响；陈长海等^[11,12]通过分析冲击波和破片在空气中的运动规律，考虑壳体对冲击波强度的影响，建立了冲击波和破

片先后作用临界爆距的理论计算模型,讨论了破片间隙、破片尺寸和破片质量等因素对冲击波绕流的影响规律,此外,根据试验结果提出了结合载荷强度和作用时间来判定是否发生复合作用的判据;蔡林刚等^[13]开展了泡沫铝板在空中爆炸冲击波与高速破片联合作用下的动态响应与毁伤实验研究,分析了不同爆炸距离对泡沫铝靶板穿孔分布特性、芯层毁伤特点、背板毁伤形态的影响,讨论了背板花瓣形破口的形成机理;侯俊亮等^[14]通过分析破片和冲击波两种毁伤元作用时序对耦合作用的影响,来分析杀爆战斗部对目标的耦合作用机理,并通过量纲分析给出了以有孔平板相对于无孔平板在爆炸冲击波载荷下的中心点挠度增益表征的耦合作用系数,构建了耦合作用模型。蔡志华等^[15]采用LS-DYNA有限元法对聚脲/凯夫拉/泡沫组合的不同结构在爆炸冲击波和破片联合作用下的防护性能开展了数值模拟研究,表明不同的结构排布显著影响防护效果,且聚脲-凯夫拉-泡沫结构的防弹抗爆性能更好。梁民族等^[16]采用试验和仿真法研究了冲击波和破片对固支方板的联合作用效果,分析了冲击波-破片联合载荷的耦合特性,指出在爆炸场近区,冲击波和破片无论哪种载荷先到达靶板,只要二者到达间隔小于靶板响应时间,载荷之间都存在耦合毁伤效应。

从国内外研究现状不难看出,有关复合结构材料在爆炸冲击波和破片联合作用下破坏模式和毁伤机理的研究吸引了越来越多学者的关注,同时,有关泡沫铝和UHMWPE纤维材料在轻质防护领域中的应用研究也越来越活跃。基于此,本文在综合考虑近场爆炸中爆炸冲击波和破片耦合作用的基础上,设计并制备一种“泡沫铝/纤维”夹芯复合结构材料,通过开展“爆炸+侵彻”实验,研究复合结构在爆炸冲击波和高速破片复合作用下的失效模式,讨论爆炸冲击波和破片两种载荷时序性对失效模式的影响,并分析不同材料的吸能机理。本研究的开展对于提高公共场所和民用建筑设施的防爆能力、减轻恐怖袭击的危害具有重要的现实意义。

1 “爆炸+侵彻”实验

为研究爆炸冲击波和破片复合作用下复合结构的失效模式,设计并制备了“爆炸+破片”毁伤元。为提高毁伤元作用的集中性,采用圆柱状TNT炸药,密度为 1.566g/cm^3 ,直径为 5cm ,高为 4cm ,单发药量约为 123g ,传爆药使用泰安药柱,规格为 $\phi 2\text{cm}\times 0.5\text{cm}$,质量为 2.5g ;预制破片由Q235钢板线切割加工而成,单个破片尺寸为 $0.5\text{cm}\times 0.5\text{cm}\times 0.2\text{cm}$,密度为 7.85g/cm^3 ,质量为 0.39g 。将预制破片以无间隙密集排列的方式黏贴在药柱下表面,保证破片与药柱紧密结合,单发药柱端面黏贴预制破片总数为69个。在测试手段方面,通过在复合板上下表面安装PVDF压力计来测试爆炸冲击波到达复合板表面的时间以及经过材料前后的压力衰减;在此基础上,再次通过压电探针测试冲击波到达复合板表面的时间,以达到复核的目的;破片到达复合板表面的时间则通过梳状靶来测试,并获得破片贯穿靶板后的速度衰减,综合三方面信号,研判近场爆炸后破片和冲击波到达的时序。实验中,夹芯复合板整体水平放置于支架上,采用专用夹具进行四周固支约束;“爆炸+破片”毁伤元借助于专用托架放置于复合板迎爆面中心正上方,通过调节其高度控制爆距,爆距分别设置为 200mm 、 400mm 、 600mm 和 800mm ,实验现场设置见图1。

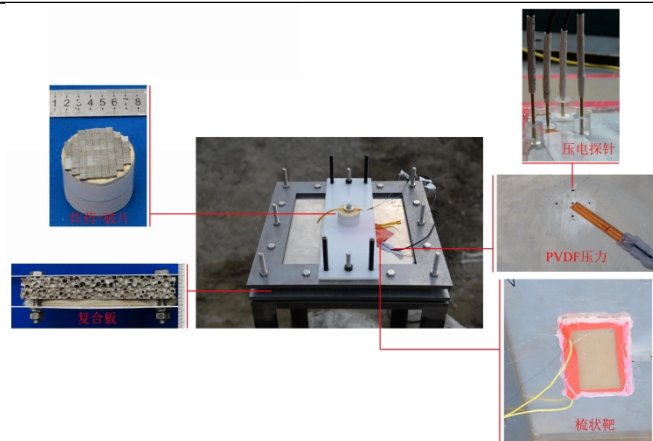


图 1 实验现场装置

Fig.1 Experimental equipment setting

本实验所制备夹芯复合板是以泡沫铝板和 UHMWPE 纤维布作为夹芯层，铝板作为面板和背板。其中，泡沫铝板为闭孔泡沫铝，尺寸为 30 cm（长）×30 cm（宽）×1 cm（厚），密度约为 0.6 g/cm³；UHMWPE 纤维布选用面密度（即单位面积材料的质量）为 170g/m²（记为 SM-17）的机织布，单层纤维布厚度为 0.5mm；铝板尺寸为 30cm（长）×30cm（宽）×0.1cm（厚），其材料为 2024 铝。为综合分析爆距（即黏有破片的药柱端面至复合板上表面的垂直距离）和夹芯材料等因素对复合板失效模式的影响，在控制复合板面密度相同的情况下（约为 1.4g/cm²），设置夹芯层组合方式为“泡沫铝-泡沫铝-纤维”，此种夹芯组合在已开展的研究中被证明具有最优的防护性能^[17]。复合板组合方式和爆距设置见表 1。

表 1 不同复合板夹芯组合方式和爆距设置

Table 1 Different combinations of target core and detonation distance setting

靶板 编号	夹芯材料			面密度 (g/cm ²)	爆距 R/mm
	上层	中层	下层		
1	T-1cm 泡沫铝	T-1cm 泡沫铝	12-layer SM-17 纤维	1.4	200
2	T-1cm 泡沫铝	T-1cm 泡沫铝	12-layer SM-17 纤维	1.4	400
3	T-1cm 泡沫铝	T-1cm 泡沫铝	12-layer SM-17 纤维	1.4	600
4	T-1cm 泡沫铝	T-1cm 泡沫铝	12-layer SM-17 纤维	1.4	800

注：“T-1cm 泡沫铝”表示厚度为 1cm 的泡沫铝板，“12-layer SM-17”表示 12 层面密度为 170g/m² 的纤维。

2 冲击波和破片时序性分析

2.1 时序性理论计算

在爆炸冲击波和破片两种毁伤元复合作用的过程中，二者的到达时间直接影响着复合结构的失效模式。在此过程中，炸药爆炸所释放的能量作为主要做功源，一部分用来加速预制破片，使破片获得初始动能，以一定速度沿着爆轰传播方向呈发散状向外飞散，其散布程度主要受炸药量和爆距的影响；其余部分主要转化为爆轰产物的动能及其内能，需要指出的是，炸药爆炸时传递到空气中的能量耗散因占比较小，在本文计算中忽略不计。

对破片而言，爆炸初始时刻其在炸药高温高压产物的作用下迅速向外飞散，根据 Gurney 公式^[18]和飞板驱动理论^[19]可获得破片速度 V_0 表达式为：

$$V_0 = \frac{\sqrt{2E}}{\sqrt{4(1+M/C)^2/3+M/C}} \quad (1)$$

式中： $\sqrt{2E}$ 为由炸药性能决定的 Gurney 常数， C 为炸药的总质量， M 为破片的总质量。

破片在飞行过程中，自身重力和空气阻力将导致其速度的衰减，所以破片飞行时间 t_f 与距离 R 的关系^[20]为：

$$t_f = 250 \frac{m_f^{1/3}}{V_0} (e^{\frac{0.004R}{m_f^{1/3}}} - 1) \quad (2)$$

式中： m_f 为破片质量。

对冲击波而言，破片的飞散会消耗其部分能量，故由能量法可知，消耗后用以形成冲击波的有效炸药量 m_{be} 与初始装药量 C 的关系^[20]为：

$$m_{be} = \frac{0.347 + 0.653\alpha}{2 - \alpha} C \quad (3)$$

式中： α 为破片装填系数， $\alpha = C / (C + M)$ 。

可由经验公式^[21]改进得到冲击波波阵面传播到距离 R 处的时刻 t_s 为：

$$t_s = 4.56 \times 10^{-4} \times R^{1.76} \times m_{be}^{-0.25} \quad (4)$$

在本文讨论的有限空间爆炸问题中，破片速度衰减有限，因此，在不考虑破片速度衰减的情况下式（2）可简化为：

$$t_f = \frac{R}{V_0} \quad (5)$$

2.2 时序性结果分析

2.2.1 理论计算结果

通过上述分析可以发现，当实验条件一定时，爆距的变化直接影响着冲击波和破片到达的时序性。对于本文所设计实验工况，时序性理论计算所用参数见表 2。

表 2 时序性计算参数
Table 2 Parameters of timing calculation

$\sqrt{2E} / (\text{m/s})$ ^[22]	C/g	M/g	α	m_{be}/g
2438	123	26.91	0.82	91.99

基于上述参数，分别对破片到达靶板时间和冲击波到达靶板时间开展计算，理论计算结果如表 3 所示。其中，对于破片到达靶板的时间，分别采用公式（2）和公式（5）开展了计算。从表中可以看出，对于实验中所设计的三种爆距（200mm、400mm 和 600mm），冲击波到达靶板的时间均先于破片，也就是说，对于理论结果，当爆距在 600mm 以内时，冲击波先于破片到达靶板。同时，通过比较冲击波和破片到达靶板的时间随爆距的变化规律可以看出，当爆距由 200mm 逐步增加到 600mm 时，二者的差距越来越小，即破片由落后于冲击波至二者逐步逼近。进一步增加爆距为 800mm 时的计算工况，此时，破片要先于冲击波到达靶板表面，也就是说，当爆距由 600mm 增加至 800mm 时，破片作用于靶板的时序性先于冲击波。通过联立式（4）和式（5），可求得冲击波和破片的重叠位置为 $R=758\text{mm}$ ，进一步佐证了表 3 中时序性结论。

表 3 冲击波和破片时序性理论计算结果
Table 3 Theoretical results of the time sequence of shock wave and fragment

爆距 R/mm	重叠位置 比例爆距 ^[23] $R_s / (\text{m/kg}^{1/3})$	破片初速 $V_0/(\text{m/s})$	破片到达靶板 时间 t_f/s (公式 2)	破片到达靶板 时间 t_f/s (公式 5)	冲击波到达靶板时间 t_s/s	时序性
200	0.15	1643.96	1.23×10^{-4}	1.22×10^{-4}	0.49×10^{-4}	冲击波先到达
400			2.46×10^{-4}	2.43×10^{-4}	1.65×10^{-4}	冲击波先到达
600			3.70×10^{-4}	3.65×10^{-4}	3.37×10^{-4}	冲击波先到达
800			4.97×10^{-4}	4.86×10^{-4}	5.59×10^{-4}	破片先到达

2.2.2 实验测试结果

对于时序性实验研究，为判别冲击波和破片到达时序，将同种工况下冲击波和破片到达复合板最上层靶板的时间进行比较，实验结果如表4所示，对于每种工况同时分析两路信号以提高实验结果精度，其中，冲击波到达时间由压电探针测得，破片到达时间由梳状靶测得，典型实验测试信号见图2。

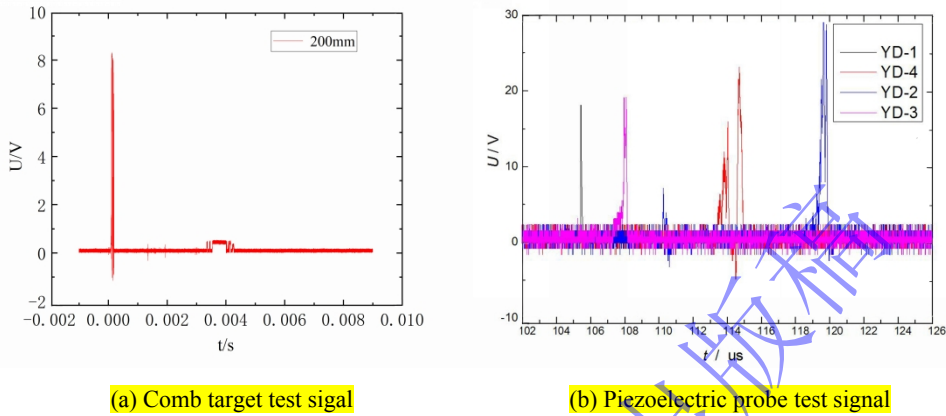


图2 典型实验测试信号 (R=200mm)

Fig.2 Typical experimental data (R=200mm)

综合表4和图2可以看出：当爆距为200 mm时，爆炸冲击波先于破片到达靶板，领先了12 μ s；当爆距为400 mm时，冲击波到达时间仍快于破片到达时间，提前了22 μ s；而当爆距增加为600 mm时，破片到达时间首次快于冲击波到达时间，提前了16 μ s；当爆距为800 mm时，未能获得冲击波到达时间信号，故无法获得其时序性。从上述结果可以看出，总体上，本文采用的实验手段可较好地测得冲击波和破片作用的时序性，但鉴于测试信号的稳定性，需要更稳定更精确的实验方法将冲击波和破片作用过程解耦，以稳定分析时序性。

表4 冲击波和破片时序性实验结果

Table 4 Experimental results of the time sequence of shock wave and fragment

爆距 R/mm	破片到达靶板时间 t_f/s	冲击波到达靶板时间 t_s/s	时序性
200	1.17×10^{-4}	1.05×10^{-4}	冲击波先到达
400	2.18×10^{-4}	1.96×10^{-4}	冲击波先到达
600	2.89×10^{-4}	3.05×10^{-4}	破片先到达
800	3.81×10^{-4}	-	-

注：“-”表示未测试到信号。

2.2.3 数值仿真结果

为直观刻画爆炸冲击波和破片的解耦过程，采用 ANSYS/LS-DYNA 仿真分析软件对该装药结构的作用过程进行数值模拟，为了提高计算效率，建立 1/4 计算模型，模型和网格划分如图3所示。因本文数值仿真主要针对爆炸冲击波和破片作用的时序性开展计算，暂未考虑复合结构的毁伤破坏，所以未对复合结构进行精细建模，仅用单层均质铝板代替，以获得破片分布状态。因此，有限元计算模型主要包括炸药、破片、空气以及金属板4个 part，其中炸药为圆柱状 TNT 炸药，直径为 5cm，药高为 4cm，采用 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型和 *EOS_JWL 本构，见公式(6)，所用参数见表5^[18]；空气采用 *MAT_NULL 材料模型和 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 本构，所用参数见文献[23]，二者采用欧拉网格建模，单元使用多物质 ALE 算法；破片材料为 Q235 钢，尺寸为 5mm \times 5mm \times 2mm，共 69 个，采用 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC 模型；金属板为 2024 铝板，尺寸为

30cm×30cm×0.1cm，采用 Johnson-Cook 本构关系和 Grüneisen 状态方程，所用参数见文献[17]，破片和金属板采用拉格朗日网格，金属板、破片与炸药和空气间采用耦合算法。起爆方式为顶端中心点起爆，炸药爆炸后驱动破片向前飞散，典型飞散状态见图 4，从图中可以看出，冲击波和破片的位置关系随传播距离而发生变化：在炸药爆炸初期，爆炸冲击波具有更高的传播速度，冲击波前沿位置领先于破片；随着破片加速与飞散，冲击波强度不断减弱，二者经历耦合直至破片领先于冲击波向前传播。典型爆距处破片和冲击波到达复合板的时间见表 6。

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (6)$$

式中： P 是爆轰产物压力， V 是相对体积， E 为单位体积的内能， A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为 JWL 系数。

表 5 TNT 炸药 JWL 计算参数
Table 5 JWL parameters of TNT

密度 $\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	爆速 $V_D/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	爆压 P_{CJ}/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
1566	6800	21	374	3.75	4.15	0.9	0.35

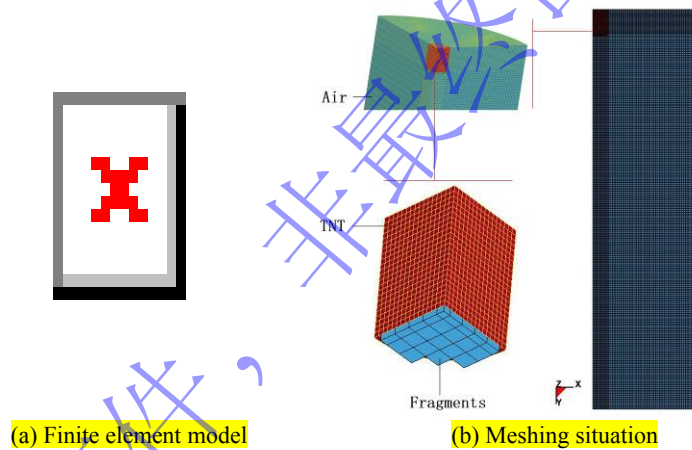


图 3 有限元计算模型
Fig.3 Finite element model

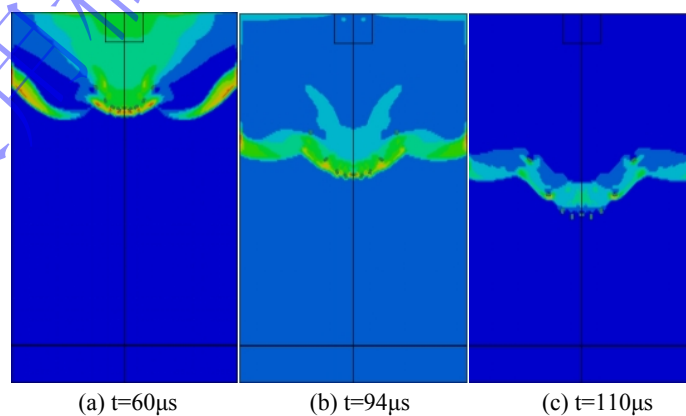


图 4 冲击波和破片典型飞散状态
Fig.4 Typical flying state of shock wave and fragments

表 6 冲击波和破片时序性数值仿真结果
Table 6 Numerical results of the time sequence of shock wave and fragment

爆距 R/mm	破片到达靶板时间 t_f/s	冲击波到达靶板时间 t_s/s	时序性
200	1.04×10^{-4}	0.40×10^{-4}	冲击波先到达
400	2.02×10^{-4}	1.99×10^{-4}	冲击波先到达
600	2.98×10^{-4}	3.04×10^{-4}	破片先到达
800	4.00×10^{-4}	4.12×10^{-4}	破片先到达

图 5 综合给出了表 3、表 4 和表 6 中时序性理论计算结果、实验结果和仿真结果，从图中可以直观看出，由公式 (2) 和公式 (5) 分别计算所得的破片到达时间的理论值相差不大，平均误差 1.39%，二者之于实验测量值的平均误差为 15.87%，二者之于数值仿真结果的平均误差为 12.77%，实验值与仿真结果的平均误差为 6.64%；对于冲击波到达时间的实验测试结果，相较于理论计算结果和数值仿真结果，二者平均误差分别为 27.21%和 21.26%，实验值与仿真结果的平均误差为 18.77%。综合分析理论结果、实验结果和仿真结果间的差异可得，冲击波到达复合板时间计算结果的误差值普遍高于破片达到复合板时间计算结果，且随着爆距的增大计算误差呈现出减小的趋势，如当爆距较小时 ($R=200\text{mm}$)，冲击波到达靶板时间的理论结果、仿真结果均与实验结果相差较大，但随着爆距的增大，二者越来越接近，这主要是因为理论计算中未充分考虑破片飞散对冲击波的消耗以及冲击波对破片的扰流作用，所以，当爆距较小时，二者差异明显。时序性相关系列结果可有效反映冲击波和破片时序性变化规律，有助于综合分析冲击波和破片近距耦合作用对复合结构毁伤特性的影响。

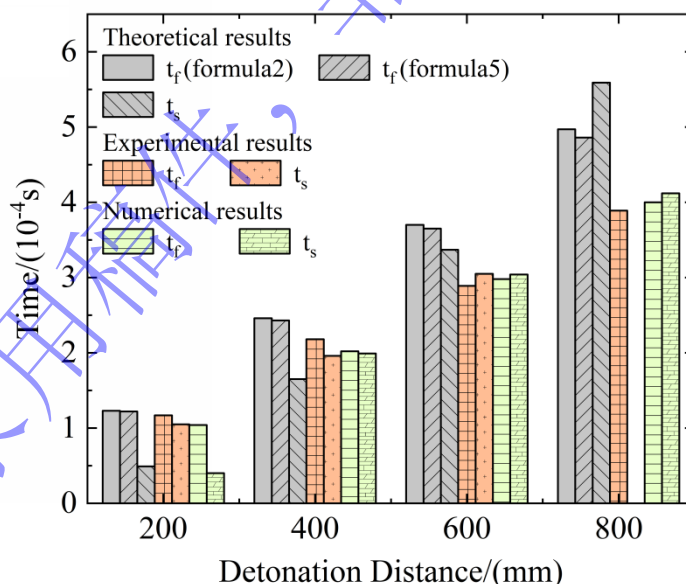


图 5 冲击波和破片时序性结果比较
Fig.5 Comparison of the time sequence of shock wave and fragment

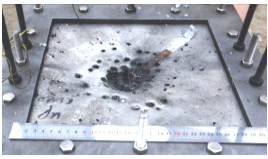
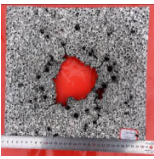
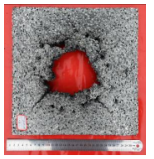
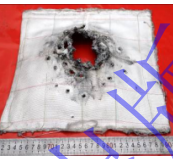

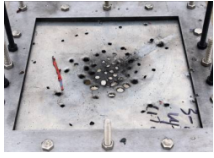
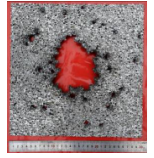
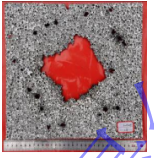
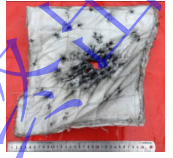

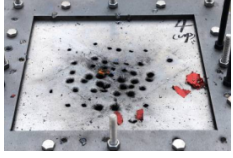

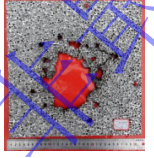
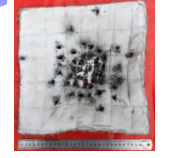


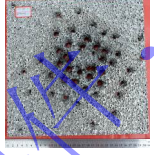

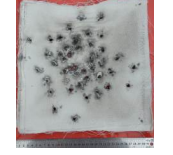

3 复合结构失效模式与耗能分析

3.1 复合结构整体失效与耗能

在自制爆炸装置的近场爆炸中，复合结构主要受到爆炸冲击波和破片两种毁伤元的联合作用，相较于单一毁伤元对复合结构的破坏，两种毁伤元的耦合作用及其时序性对复合结构失效模式和耗能机理的影响更为复杂。Leppänen^[24]和 Nyström 等^[5]的研究也指出冲击波和破片的耦合破坏作用要大于单一载荷破坏作用之和。为分析爆炸冲击波和破片作用时序性对夹芯复合结构失效模式和耗能机理的影响，基于前文关于时序性的研究，分别将爆距设置为 200mm、400mm、600mm 和 800mm，炸药质量保持不变（123g），对面密度相同、组合方式相同的复合板开展实验研究，典型实验结果见表 7。

表 7 不同爆距下复合结构典型失效模式

Table 7 Typical failure modes of composite structure at different detonation distances

爆距 R/mm	铝面板	上层 泡沫铝板	下层 泡沫铝板	纤维层	铝背板
200					
400					
600					
800					

当爆距为 200mm 时，复合板发生了明显的贯穿破坏，破坏主要集中于爆心下方的各层材料中心处。对于铝面板，其在爆心对应区域发生了明显的爆炸冲击波和破片的耦合破坏，既有破片的贯穿破坏，还有冲击波作用下的局部凹陷变形；由于爆距较近，破片未能完全飞散，致使铝面板上所留弹孔多形成连贯破坏，数值结果见图 6.(a)，二者具有较好的一致性。相较于单一爆炸载荷的近距离作用，耦合作用中弹孔的形成致使冲击波强度衰减更为明显，不足以使复合板整体发生凹陷变形^[25]，由此可见，虽然爆炸冲击波先于破片到达靶板，但破片作用下形成的弹孔对随进冲击波的作用仍起到一定程度的耗散作用。对于铝背板，其在冲击波和破片的复合作用下发生典型的瓣状撕裂破坏，撕裂主要发生在 45° 方向上，相较于前序材料，铝背板上形成的撕裂区域尺寸最大，所以铝背板主要通过自身的瓣状撕裂破坏和凹陷变形吸收能量。当爆距增大至 400mm 时，破片的飞散角也随之变大，除了外围破片的飞散角度增幅较大外，中心区域的弹孔分布位置相对集中，与破片预置方式近乎一致，分布较为均匀，铝面板在破片的作用下主要发生独立贯穿破坏，与爆距为 200mm 时不同的是，铝面板中心未连结形成大面积孔洞；因破片着靶姿态的不同，弹孔形状和大小也存在一定差异，数值结果见图 6.(b)，能够更加直观地说明此点。同样的，当冲击波先于破片到达靶板时，铝面板整体几乎无凹陷变形，仅爆炸中心处稍有凹陷，但夹芯结构材料和铝背板发生了更为显著的变形破坏，说明弹孔的存在削弱了冲击波对铝面板的作用，更多地作用于后序结构，其变形破坏程度远大于铝面板。

当爆距进一步增大至 600mm 时，破片到达靶板时间的实验结果和仿真结果均小于冲击波到达时间，说明在此爆距下破片要先于冲击波达到靶板；然而，需要指出的是，破片到达靶板时间的理论结果要大于冲击波达到靶板时间，这主要是因为理论计算中未充分考虑破片飞散对冲击波的消耗以及冲击波对破片的扰流作用。从表 7 中可以看出，铝面板在破片的作用下仍以独立贯穿破坏为主，且随着爆距的增加，弹孔分布更为均匀，未形成大面积孔洞；对于形成的单个弹孔而言，因破片着靶姿态不同，弹孔形状和大小也存在一定差异，当两个弹孔相互临近时，会连结成一个大弹孔。数值计算中破片的飞散更加理想，未出现相近连结的情况，如图 6.(c)所示。此外，从实验结果可见，铝面板整体几乎无凹陷变形，说明冲击波强度总体较低，且形成的弹孔起到了泄压作用，后序材料的破坏程度也明显低于前两者情况。与此同时，铝背板的瓣状撕裂破坏程度也明显降低。当爆距为 800mm 时，破片的飞散角进一步增大，着靶破片的数量明显减少，弹孔间的分布距离也更大，实验结果和数值结果较一致地反映了此变化规律。此外，由实验结果可知，铝面板上弹孔的直径总体上大于破片尺寸，说明当冲击波晚于破片到达靶板时，冲击波对已形成弹孔具有一定的扩孔作用。随着爆距的进一步增大，冲击波强度的衰减也更为显著，夹芯材料的破坏也以破片的贯穿破坏为主；对于铝背板而言，由于冲击波晚于破片达到，冲击波的剩余强度更多地作用于铝背板上，使其发生了明显的凹陷变形，未贯穿弹孔数也明显增多。一般而言，当“爆炸冲击波+破片”毁伤元工况保持不变时，随着爆距的增加，破片的飞散角度不断增大，作用于结构表面的载荷的初始强度不断降低。通过比较文中不同爆距下不同材料的失效模式可以看出，对于组合方式一定的复合结构，存在一最佳防护距离，当爆距不小于此最佳防护距离时，该复合结构能够完全防护爆炸冲击波和破片冲击的联合作用。

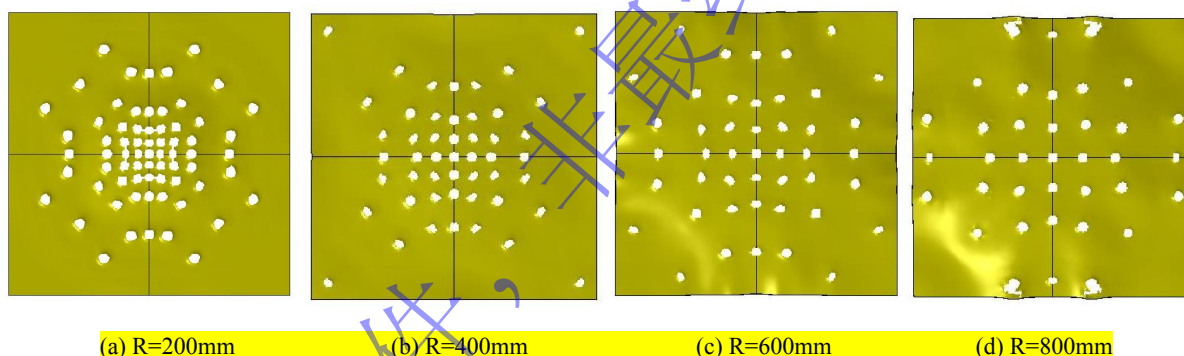


图 6 冲击波和破片在不同爆距复合作用下铝面板失效模式
Fig.6 Failure modes of front aluminum plate under the combined action of shock wave and fragment at different explosion distances

3.2 夹芯层材料宏观失效

对于泡沫铝和纤维两类夹芯材料，二者在爆炸冲击波和破片复合作用下的局部失效模式分别如图 7 和图 8 所示。综合与表 7 中不同材料的总体失效模式比较可见，当爆距为 200mm 时，泡沫铝夹芯板和纤维夹芯层的破坏模式和铝面板相似，但二者的局部凹陷变形程度和中心圆孔破坏直径均大于铝面板，除纤维层会断裂收缩外，后序材料的变形破坏程度呈现出递增趋势，这主要是冲击波在传播过程中穿过弹孔的扩散作用所致；此外，在纤维层靠近贯穿圆孔的内缘部分发生了明显的高温烧蚀，加剧了纤维的断裂失效，这主要由炸药爆炸高温产物和高温破片所致，所以，除了爆炸冲击波和破片的复合作用外，温度也是影响复合板失效模式和防护性能的因素之一。当爆距为 400mm 时，泡沫铝夹芯板在破片的作用下于弹孔处发生胞壁的压溃破坏，在靶板外圈形成多个独立的弹孔，而在爆心区域内因弹孔邻近，弹孔间的胞壁发生连通撕裂破坏，形成近似矩形的撕裂破坏，与预置破片的分布较一致，同时，后方泡沫铝板的孔洞直径大于前方泡沫铝板，泡沫铝板中心区域凹陷变形有限；对于纤维层材料，由于夹具约束不足发生了抽离，破坏有限，未能起到有效的防护作用。当爆距为 600mm 时，泡沫铝夹芯板在破片的作用下呈现出和前两种工况较一致的变化规律，但中心区域的孔洞尺寸明显小于前两者；对于纤维层材料，入射面纤维在形成弹孔破坏的同时还出现了大面积烧蚀现象，而出

射面纤维烧蚀现象并不明显。当爆距为 800mm 时，破片的飞散角度进一步变大，泡沫铝夹芯板和纤维层总体上以破片的单独贯穿破坏为主，仅在下层泡沫铝板中心处形成了小面积的连通贯穿，泡沫铝板整体几乎无凹陷变形；纤维层首次出现了未贯穿情况，未贯穿处纤维在破片的冲击作用下发生了显著的拉伸变形，形成鼓包。通过不同爆距下夹芯材料的失效模式同样可以看出，本文所设计制备的夹芯复合结构针对实验中设定的“爆炸+破片”毁伤元，存在有效防护距离，当爆距大于此防护距离时，能够有效地拦截破片，这也为不同防护要求下的结构设计提供了依据。

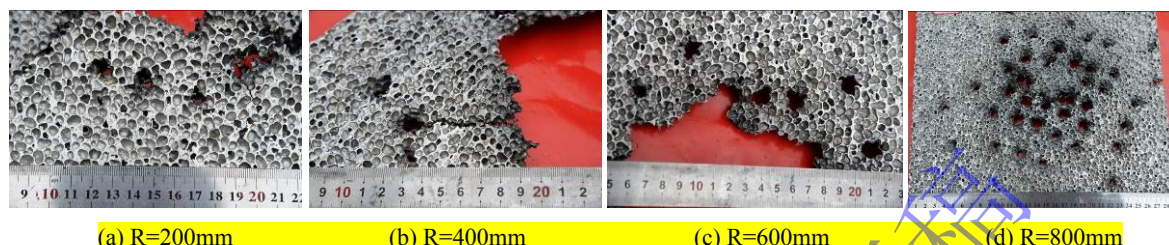


图 7 不同爆距下泡沫铝典型失效模式

Fig.7 Typical failure modes of foamed aluminum at different detonation distances

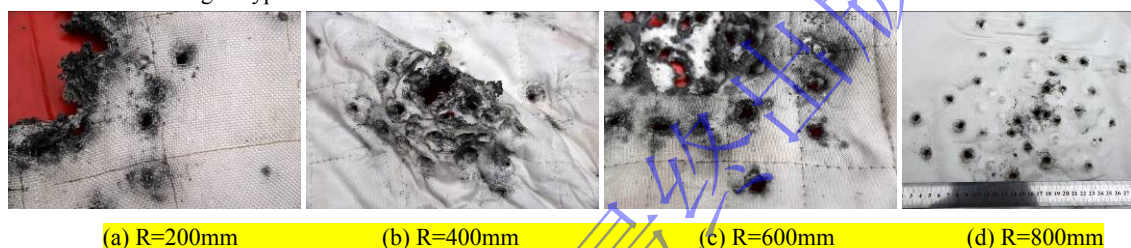
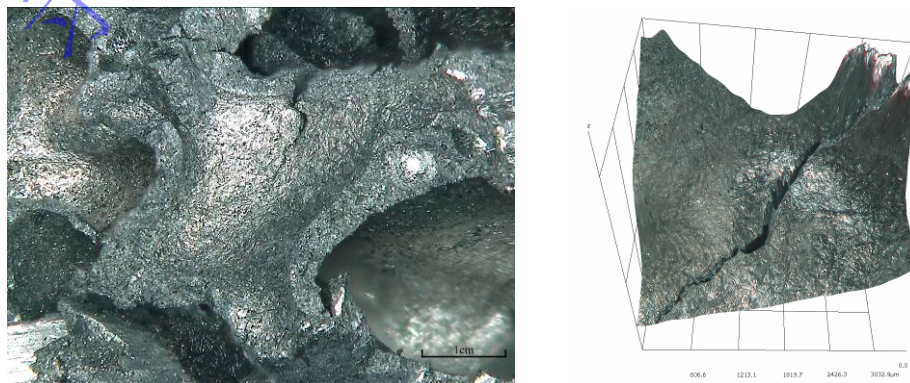


图 8 不同爆距下 UHMWPE 纤维典型失效模式

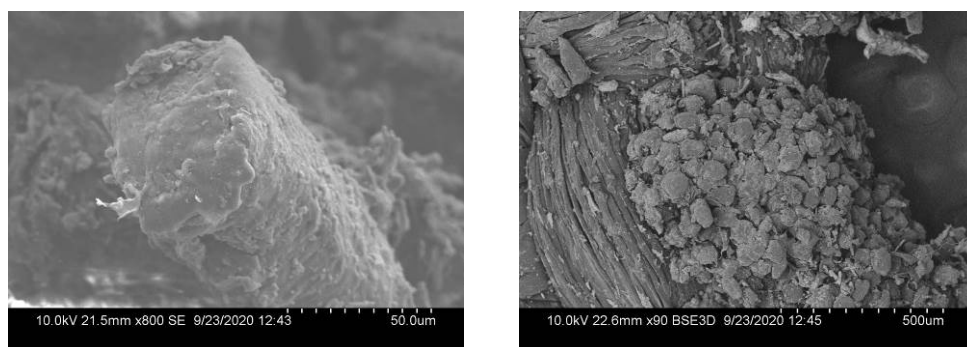
Fig.8 Typical failure modes of UHMWPE fiber at different detonation distances

3.3 材料结构的微观失效

在对泡沫铝和纤维材料失效模式的宏观特征进行分析的基础上，进一步采用三维视频显微镜和扫描电镜对二者的微观失效形态进行了观察分析，典型微观失效模式如图 9 所示。从图 9.(a)中可以看出，在爆炸冲击载荷的作用下，单个胞孔结构主要发生胞壁的压溃变形，随着压溃变形的积累，应力集中的胞孔边缘处会形成裂缝，不断生长，最终形成贯通的撕裂破坏；体现在泡沫铝板的宏观破坏模式上则呈现出显著的碎裂破坏，而碎裂的形成则是若干个裂缝贯通所致。对于纤维材料的失效而言，在破片的侵彻作用下，纤维主要发生拉伸断裂破坏，通过扫描电镜观察可得，在纤维的断裂处形成较为规整的断裂面，如图 9.(b)所示；此外，由于近场爆炸具有较高的爆炸温度，且金属破片也会在爆炸高温产物的作用下形成高温，所以，在靠近弹孔内侧的纤维还存在典型的高温失效现象，从图中可以明显的看出，在纤维束端部具有明显的高温烧结粗糙现象，呈簇状。泡沫铝和纤维材料微观失效模式的分析有利于更加全面的揭示结构材料的耗能机制，能够为结构材料防护性能的优化设计提供依据。



(a) Microscopic failure morphology of foamed aluminum



(b) Microscopic failure morphology of UHMWPE fiber

图9 泡沫铝和纤维微观失效模式

Fig.9 Microscopic failure modes of foamed aluminum and fiber

4 时序性对靶板毁伤特性的影响

4.1 冲击波先于破片作用

由前文分析结果可得，当爆距 $R=200\text{mm}$ 和 $R=400\text{mm}$ 时，爆炸冲击波均先于破片作用于复合板，此时，复合板各层材料贯穿弹孔数量和形成的连通弹孔的最大尺寸的变化规律如图 10 所示。图中横坐标“1-5”分别表示“铝面板、上层泡沫铝、下层泡沫铝、UHMWPE 纤维层和铝背板”5 种材料，从图 10.(a)中可以看出，铝面板上弹孔数为 50 个，而预制破片总数为 69 个，形成弹孔数明显少于破片数，这主要是因为爆距较小，破片未完全飞散，部分作用较为集中所致；此外还可以看出，沿着爆炸冲击波和破片传播的方向，各层材料上所遗留的独立弹孔数量不断减少，而弹孔最大尺寸不断增加，主要是在爆距较小的情况下，后序材料上的相邻弹孔连通，形成较大的毁伤弹孔，致使其最大尺寸不断增加，相较于铝面板所形成的最大尺寸 65mm，铝背板形成更为显著的撕裂破坏，最大尺寸达 169mm，增大了 160%。

类似的，当爆距 $R=400\text{mm}$ 时，复合板各层材料贯穿弹孔数量和形成的连通弹孔的最大尺寸的变化规律如图 10.(b)所示。随着爆距的增加，破片的飞散角也随之变大，此时，铝面板上弹孔数量为 66 个，和预制破片数几近一致。沿着载荷作用的方向，各层材料上的弹孔数量也呈现整体减少的趋势，而最大弹孔尺寸则呈现整体增大的趋势。需要指出的是，纤维层上的弹孔数和最大弹孔尺寸的变化规律均出现了波动，这主要是因为纤维层在爆炸冲击波的作用下四周固支约束发生了脱离，未能充分发挥自身的抗破片防护作用，致使铝背板发生了比近爆距 ($R=200\text{mm}$) 更为显著的撕裂破坏。从图中两块泡沫铝板最大弹孔尺寸的变化规律可以看出，在此工况下，后序材料形成了更明显的扩孔破坏，后序泡沫铝板的最大弹孔尺寸相较于前序泡沫铝板提高了 37.5%；而当爆距 $R=200\text{mm}$ 时，前后泡沫铝板的尺寸几乎无变化。由此可见，在一定爆距范围内，冲击波穿过弹孔后对后序材料的破坏存在明显的扩孔效应。

4.2 破片先于冲击波作用

当爆距达到 600mm 时，由前文分析可得，破片先于冲击波作用于复合板。随着爆距的进一步增大，破片的飞散角也不断变大，破片的着靶范围也不断扩大，由表 6 中实验结果可得，部分破片直接作用于夹具之上，所以铝面板上形成的弹孔数量经统计为 49 个，如图 10.(c)所示。同样的，随着各层材料发挥自身的防护作用，后序材料上遗留的弹孔数量逐渐减少，需要指出的是，泡沫铝板因相邻弹孔的贯通，形成了较大的连通破坏面，致使独立弹孔数量减少。对于最大弹孔尺寸的变化而言，泡沫铝板同样体现出较明显的扩孔效应，后序泡沫铝板的弹孔最大尺寸较前者提高了 21.7%。由于破片分散度较高，纤维层上主要形成独立的弹孔破坏，同时，爆炸冲击波强度随着爆距的增大而衰减明显，铝背板形成的撕裂破坏尺寸在三种工况中也最小。当破片先于冲击波作用于靶板形成弹孔后，随

进冲击波持续作用，进一步加剧铝背板弹孔的瓣状撕裂破坏，发生明显的扩孔破坏。

当爆距增加到 800mm 时，破片飞散范围进一步扩大，直接作用于铝面板上的破片数量也进一步减少，此时，铝面板上形成的弹孔数量为 47 个，如图 10.(d)所示。总体上，后序材料上的弹孔数量呈现出递减趋势，不同的是，下层泡沫铝板上弹孔数量明显减少、最大撕裂破坏尺寸（134mm）明显增大，主要是中心区域破片相对集中，邻近泡沫铝板弹孔连通破坏所致。需要指出的是，随着爆距的增加，冲击波强度进一步衰减，在纤维层和铝背板上形成的未贯穿弹孔的数量分别为 10 和 14，呈现出明显增多的趋势。

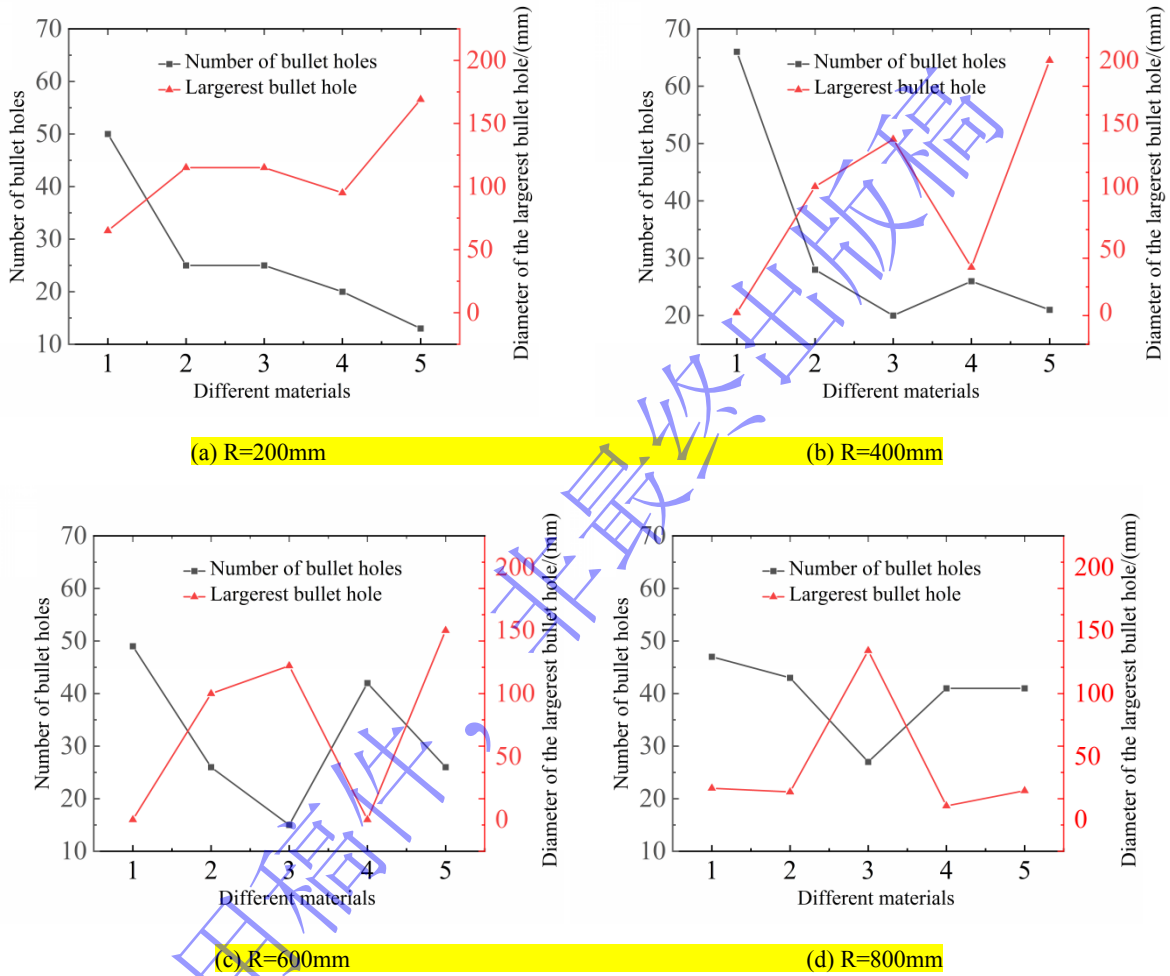


图 10 不同材料上弹孔数量及其最大尺寸

Fig.10 Number and maximum size of bullet holes on different materials

5 结论

本文采用定向“爆炸+破片”实验，对含泡沫铝/UHMWPE 纤维夹芯复合结构在冲击波和破片复合作用下的毁伤特性和吸能机理开展了研究，重点讨论了时序性对复合结构毁伤特性的影响，通过本文的研究，得到以下结论：

- (1) 当装药量和其它实验工况一定时，爆距的变化是影响爆炸冲击波和破片作用时序性的主要因素。在本文讨论的实验工况中，当爆距大于 600mm 时，破片先于冲击波作用；增大爆距可提高破片分布的散度和均匀性。
- (2) 在爆炸冲击波和破片的复合作用下，铝面板除了破片的贯穿破坏外，还伴有局部凹陷变形；

泡沫铝自身胞孔结构在冲击载荷作用下发生压溃变形和胞壁屈服碎裂；弹孔处纤维则在破片的侵彻下发生拉伸变形和断裂，并伴有高温失效；铝背板主要以瓣裂撕裂破坏为主。

(3) 当冲击波先于破片作用时，铝面板仅爆炸中心处稍有凹陷；而当破片先于冲击波作用时，铝面板整体几乎无凹陷变形，这主要是因为爆距除直接影响爆炸冲击波和破片作用的时序性之外，还影响着冲击波强度的衰减规律。类似的是，在两种时序性作用下，后序夹芯结构材料和铝背板均发生了更为显著的变形破坏，说明弹孔的存在削弱了冲击波对铝面板的作用，使其更多地作用于后序材料，后序材料的变形破坏程度较前序材料更为严重。

参考文献

- [1] 郑红伟, 陈长海, 侯海量, 等. 爆炸冲击波和高速破片载荷的复合作用特性及判据研究 [J]. 振动与冲击, 2019, 38(3): 24-31. DOI: CNKI:SUN:ZDCJ.0.2019-03-005.
ZHENG H W, CHEN C H, HOU H L, et al. Multiple impact features of blast shock waves and high-velocity fragments on clamped square plates and a criterion to judge if multiple impact happens [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(3): 24-31. DOI: CNKI:SUN:ZDCJ.0.2019-03-005.
- [2] 李茂, 高圣智, 侯海量, 等. 空爆冲击波与破片群联合作用下聚脲涂覆陶瓷复合装甲结构毁伤特性 [J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(11): 1-13. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0119.
LI M, GAO S Z, HOU H L, et al. Damage characteristics of polyurea coated ceramic/steel composite armor structures subjected to combined loadings of blast and high-velocity fragments [J]. Explosion and Shock Wave, 2020, 40(11): 1-13. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0119.
- [3] 田力, 胡建伟. 近爆冲击波和破片群联合作用下 I-V 型夹芯板的防护性能研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(11): 2834-2837. DOI: CNKI:SUN:ZNGD.0.2018-11-025.
TIAN L, HU J W. Research on protective properties of I-V sandwich panel under the combined loading of close-range blast wave and fragments [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(11): 2834-2837. DOI: CNKI:SUN:ZNGD.0.2018-11-025.
- [4] 田力, 胡建伟. I-V 型夹芯板在近爆冲击波和破片群联合作用下防爆性能研究 [J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 49(1): 32-46. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbzkb.2019.01.004.
TIAN L, HU J W. Research on explosion protective properties of I-V sandwich panel under combined loading of close-range blast wave and fragments [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 49(1): 32-46. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbzkb.2019.01.004.
- [5] NYSTRÖM U, GYLLTOFT K. Numerical studies of the combined effects of blast and fragment loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(8): 995-1005. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.02.008.
- [6] GONG C A, CHEN Z G, YIN L K. Analysis of movement laws of fragment and shock wave from a blast fragmentation warhead [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2015, 6(3): 218-222. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8042.2015.03.003.
- [7] GRISARO H Y, DANCYGIER A N. Characteristics of combined effects of blast and fragment loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 116(1): 51-64. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.02.004.
- [8] PHILIP M, CHRISTINE S, TERRY B. Blast and fragmentation loading indicative of a VBIED surrogate for structural panel response analysis [J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 126: 172-184. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.12.011.
- [9] CHU D Y, WANG Y G, YANG S L, et al. Analysis and design for the comprehensive ballistic and blast resistance of polyurea-coated steel plate [J]. Defence Technology, 2023, 19: 35-51. DOI: 10.1016/j.dt.2021.11.010.
- [10] 陈兴, 周兰伟, 李向东, 等. 破片式战斗部破片与冲击波相遇位置研究 [J]. 高压物理学报, 2018, 32(6): 1-9. DOI:

- CNKI:SUN:GYWL.0.2018-06-010.
- CHEN X, ZHOU L W, LI X D, et al. Coupling action spans for air-blast waves and fragments by fragmentation warheads exploding in air [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(6): 1-9. DOI: CNKI:SUN:GYWL.0.2018-06-010.
- [11] 郑红伟, 陈长海, 李茂, 等. 空爆冲击波对高速破片绕流效应的仿真 [J]. 舰船科学技术, 2019, 41(1): 34-39. DOI: CNKI:SUN:JCKX.0.2019-01-007.
- ZHENG H W, CHEN C H, LI M, et al. Research on turbulent flow of blast wave on high-velocity fragments by numerical simulation [J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(1): 34-39. DOI: CNKI:SUN:JCKX.0.2019-01-007.
- [12] 郑红伟, 陈长海, 李茂, 等. 空爆冲击波对不同形状破片的绕流作用仿真分析 [J]. 舰船科学技术, 2019, 41(3): 31-36. DOI: CNKI:SUN:JCKX.0.2019-05-007.
- ZHENG H W, CHEN C H, LI M, et al. Research on turbulent flow of blast wave on high-velocity fragments in different shapes by numerical simulation [J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(3): 31-36. DOI: CNKI:SUN:JCKX.0.2019-05-007.
- [13] 蔡林刚, 杜志鹏, 李晓彬, 等. 爆炸冲击波与破片联合作用下泡沫夹芯板的毁伤特性研究 [J]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 2020, 44(2): 316-320. DOI: CNKI:SUN:JTKJ.0.2020-02-022.
- CAI L G, DU Z P, LI X B, et al. Study on damage characteristic of foam sandwich panel under combined action of explosion shock wave and fragments [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2020, 44(2): 316-320. DOI: CNKI:SUN:JTKJ.0.2020-02-022.
- [14] 侯俊亮, 蒋建伟, 李应波, 等. 杀爆战斗部破片和冲击波对目标的耦合作用 [J]. 火炸药学报, 2020, 43(3): 335-340. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.201909009.
- HOU J L, JIANG J W, LI Y B, et al. Study on the coupling effect of fragments and shock wave of the blast-fragmentation warhead on typical targets [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2020, 43(3): 335-340. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.201909009.
- [15] 王智, 常利军, 黄星源, 等. 爆炸冲击波与破片联合作用下防弹衣复合结构防护效果的数值模拟 [J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(6), 063202: 1-12. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0515.
- WANG Z, CHANG L J, HUANG X Y, et al. Simulation on the defending effect of composite structure of body armor under the combined action of blast wave and fragments [J]. Explosion and Shock Wave, 2023, 43(6), 063202: 1-12. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0515.
- [16] 周猛, 梁民族, 林玉亮. 冲击波-破片联合载荷对固支方板的耦合作用机理 [J]. 兵工学报, 2023, 43(增刊 1): 99-106. DOI: 10.12382/bgxb.2023.0732.
- ZHOU M, LIANG M Z, LIN Y L. Mechanism of coupling effect of shock wave and fragments on clamped square plate [J]. Acta Armamentarii, 2023, 44(Suppl.1): 99-106. DOI: 10.12382/bgxb.2023.0732.
- [17] ZHOU N, WANG J X, JIANG D K, et al. Study on the failure mode of a sandwich composite structure under the combined actions of explosion shock wave and fragments [J]. Materials and Design, 2020, 196(109166): 1-15. DOI: 10.1016/j.matdes.2020.109166.
- [18] KONG X S, WU W G, LI J, et al. A numerical investigation on explosive fragmentation of metal casing using Smoothed Particle Hydrodynamic method [J]. Materials and Design, 2013, 51: 729-741. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.04.041.
- [19] 孙业斌. 爆炸作用与装药设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1987:47-55.
- [20] 安振涛, 王超, 甄建伟, 等. 常规弹药爆炸破片和冲击波作用规律理论研究 [J]. 爆破, 2012, 29(1): 15-18. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2012.01.004.
- AN Z T, WANG C, ZHEN J W, et al. Theoretical Research on Action Law of Fragment and Shock Wave of Traditional Ammunition Explosion [J]. Blasting, 2012, 29(1):15-18. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2012.01.004.
- [21] 梁为民, 张晓忠, 梁仕发, 等. 结构内爆炸破片与冲击波运动规律试验研究 [J]. 兵工学报, 2009(s2): 223-227. DOI:

CNKI:SUN: BIGO.0. 2009-S2-047.

LIANG W M, ZHANG X Z, LIANG S F, et al. Experimental Research on Motion Law of Fragment and Shock Wave under the Condition of Internal Explosion [J]. Acta Armamentarii, 2009(s2):223-227. DOI: CNKI:SUN:BIGO.0. 2009-S2-047.

[22] 黄正祥, 祖旭东. 终点效应 [M]. 北京: 科学出版社, 2014:85.

[23] 甘露, 陈力, 宗周红, 等. 近距离爆炸比例爆距的界定标准及荷载类型 [J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(6): 1-12. DOI: 10.11883/bzycj-2020- 0194.

GAN L, CHEN L, ZONG Z H, et al. Definition of scaled distance of close-in explosion and blast load calculation model [J]. Explosion and Shock Wave, 2021, 41(6): 1-12. DOI: 10.11883/bzycj-2020- 0194.

[24] LEPPÄNEN J. Leppänen J. Experiments and numerical analyses of blast and fragment impacts on concrete [J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(7): 843–860. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2004.04.012.

[25] CAI S P, LIU J, LI C P. Dynamic response of sandwich panels with multi-layered aluminum foam/UHMWPE laminate cores under air blast loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 138: 1-16. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103475.

(责任编辑 爆炸与冲击)