

蜂窝铝夹芯板对低附带毁伤元冲击响应特性研究

李涛涛¹, 刘静², 任凯^{1*}

(1. 中北大学 地下目标毁伤技术国防重点学科实验室, 太原 030051;

2. 西南技术工程研究所, 重庆 401329)

摘要: **目的** 以蜂窝铝夹芯板为研究对象, 分析其对 $\phi 8$ mm 氧化锆陶瓷破片低附带毁伤元冲击响应特性。**方法** 首先通过弹道枪试验, 获得氧化锆陶瓷破片正侵彻和 30° 斜侵彻蜂窝铝夹芯板的弹道极限, 然后使用有限元方法探究不同着角下蜂窝铝夹芯板的冲击响应特性与抗变形能力, 对比分析破片直径对蜂窝铝夹芯结构冲击响应特性的影响。**结果** $\phi 8$ mm 氧化锆陶瓷破片对铝蜂窝夹芯板正侵彻弹道极限速度为 236.5 m/s, 着角为 30° 的斜侵彻弹道极限速度为 276.5 m/s。直径近似蜂窝单元跨度的破片, 破片直径越大, 斜侵彻角度对蜂窝铝夹芯板击穿比动能的影响越小。相同着角下, 氧化锆陶瓷破片直径越大, 击穿蜂窝铝夹芯板所需的比动能越小。**结论** 得出了铝蜂窝夹芯板对陶瓷地附带毁伤元的冲击响应特性规律, 研究结果可为反卫星和反航天目标战斗部的设计提供参考。

关键词: 低附带毁伤; 斜侵彻; 蜂窝铝夹芯板; 弹道极限; 有限元分析

中图分类号: TB482.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-3563(2025)05-0242-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2025.05.031

Impact Response Characteristics of Honeycomb Aluminum Sandwich Panel to Low Collateral Damage Element

LI Taotao¹, LIU Jing², REN Kai^{1*}

(1. National Defense Key Laboratory of Underground Target Damage Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Southwest Institute of Technology and Engineering Research, Chongqing 401329, China)

ABSTRACT: The work aims to take honeycomb aluminum sandwich panel as the object to analyze its impact response characteristics to low collateral damage element of $\phi 8$ mm zirconia ceramic fragments. Firstly, the ballistic limit of zirconia ceramic fragments penetrating into honeycomb aluminum sandwich panel at normal and 30° oblique angles was obtained by ballistic gun test. Then, the impact response characteristics and deformation resistance of honeycomb aluminum sandwich panel at different angles were explored by finite element method, and the effect of fragment diameter on the impact response characteristics of honeycomb aluminum sandwich structure was compared and analyzed. The vertical penetration ballistic limit velocity of $\phi 8$ mm ceramic fragments into aluminum honeycomb sandwich panel was 236.5 m/s, and the oblique penetration ballistic limit velocity with an impact angle of 30° was 276.5 m/s. For the fragments with a diameter similar to the span of a honeycomb unit, the larger the diameter of the fragment, the smaller the impact of the oblique penetration angle on the specific kinetic energy of the honeycomb panel for breakdown. At the same oblique angle, the larger the diameter of ceramic fragments, the smaller the specific kinetic energy required to penetrate

收稿日期: 2025-01-16

基金项目: 山西省基础研究计划 (202303021222113)

*通信作者

honeycomb aluminum sandwich panel. The impact response characteristics of aluminum honeycomb sandwich panel to ceramic low collateral damage element are obtained and the research results can provide reference for the design of anti-satellite and anti-space target warheads.

KEY WORDS: low collateral damage; oblique penetration; honeycomb aluminum sandwich panel; ballistic limit; finite element analysis

近年来, 人们对低附带损害弹药的关注逐渐提高, 该种弹药能在达到对目标有效毁伤的同时降低对周围环境的影响。陶瓷作为一种高强度低密度的材料, 成为了低附带毁伤元研究的关注热点^[1]。

蜂窝夹芯板具有强度高、比质量轻、高吸能、高隔音隔热的特点, 这得益于蜂窝夹芯板的独特结构, 蜂窝夹芯板由前背板及中间的蜂窝芯层压合而成。这种结构能够通过弯曲变形及蜂窝芯层单元之间的断裂吸收能量^[2], 在降低结构质量的基础上拥有较高的比强度。当蜂窝夹芯板受载时, 夹芯层发生溃缩, 并吸收能量, 能够作为吸能结构应用于包装工程中, 同时蜂窝夹芯板被广泛应用于航空航天^[3-4]、交通出行^[5-6]、工程建设^[7]等行业领域。

针对蜂窝夹芯板的研究也在不断深入, 包括但不限于蜂窝面板^[6,8]及夹芯的材料^[9-12]对蜂窝铝夹芯板整体性能的提升, 仿生学在夹芯结构中的应用^[13-18]也备受学者的关注。

Gunes 等^[19]研究了功能梯度面板增强蜂窝夹层结构在弹道冲击作用下的损伤机理和变形, 并采用有限元方法研究了功能梯度面板的材料组成对蜂窝夹层结构抗弹性能的影响。Sun 等^[2]通过试验研究了面板厚度、芯层高度、蜂窝壁厚及蜂窝胞元尺寸对蜂窝夹芯板冲击性能的影响, 还通过数值模拟得到了各夹层构型的弹道极限速度和临界射孔能量。Zhang 等^[20]通过准静态穿孔和弹道冲击试验, 考察了弹丸冲击速度、核心密度以及弹头形状的影响。Palomba 等^[21]通过低速冲击试验对双层蜂窝夹层结构吸能能力进行了评估, 对比了双层板与单层蜂窝和其他轻质板的吸能能力。Yahaya 等^[22]研究了泡沫弹冲击下不同铝蜂窝芯的夹层板、空气夹层板和等效质量的单层板的防护能力, 并讨论了蜂窝夹层板和整体板的变形和弹性回弹。袁浩^[23]等进行了直径 6 mm 钨球侵彻蜂窝铝夹芯板的试验研究, 得到其弹道极限速度为 169 m/s, 得出抗球形破片侵彻最差, 并通过数值模拟及理论计算得出了蜂窝铝夹芯板的等效铝靶厚度。

关于陶瓷破片对蜂窝铝夹芯板侵彻作用的相关研究较少, 且在许多实际工程应用中, 蜂窝铝夹芯板更容易受到斜冲击。为了完善相关研究以及更好地评估蜂窝夹芯板对破片的抗侵彻能力, 本文对蜂窝铝夹芯板在氧化锆陶瓷破片垂直侵彻和斜置侵彻情况下的受力形式及弹道极限进行了研究分析。

1 侵彻试验

1.1 试验设计

采用直径为 8 mm、材料为氧化锆的球形破片(破片质量为 1.6 g), 对 0°、30°这 2 种不同斜置角度的蜂窝铝夹芯结构进行弹道极限速度侵彻试验。破片装于尼龙弹托, 由 12.7 mm 线膛弹道枪加载, 破片速度通过药筒内装药量的多少来控制。破片出膛后, 弹托在空气阻力的作用下与破片分离, 破片通过弹托挡板后的激光测速靶板后继续向前飞行至着靶。在靶板后设置塞有缓冲物的回收沙箱, 以回收靶板塞块及破片。试验布置如图 1 所示。

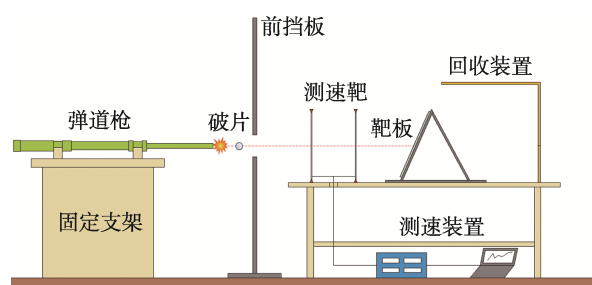


图 1 试验布置
Fig.1 Test arrangement

试验所用靶板尺寸为 150 mm×150 mm×10 mm, 夹芯结构由铝合金面板(2A12)及蜂窝夹芯(5052)通过结构胶黏合而成, 前后铝合金面板的厚度相同, 均为 1 mm。蜂窝芯层厚度 H 为 8 mm, 蜂窝单元结构为正六边形, 六边形边长 L 为 4 mm, 蜂窝单元壁厚 D 为 0.04 mm, 靶板结构如图 2 所示。

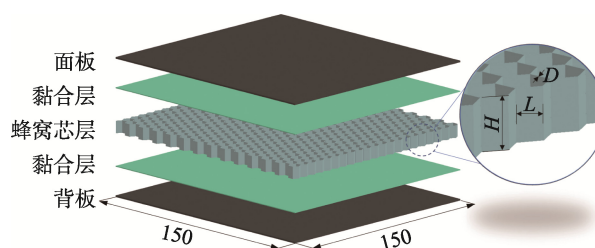


图 2 靶板结构
Fig.2 Structure of target plate

1.2 试验结果

对 $\phi 8$ mm 氧化锆陶瓷破片以 2 种着角对蜂窝铝夹芯板进行侵彻试验, 结果见表 1。其中, 极限贯穿速度采用美国 Frankford 兵工厂的试验处理方法计算:

$$v_{50} = \begin{cases} v_A + \frac{N_p - N_c}{N_p + N_c} (v_{HP} - v_A) & N_p > N_c \\ v_A - \frac{N_p - N_c}{N_p + N_c} (v_A - v_{LC}) & N_p \leq N_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: v_{50} 为破片撞击靶板的极限贯穿速度; v_A 为混合区内全部测试速度的平均值; N_p 为局部贯穿数; N_c 为完全贯穿数; v_{HP} 为局部贯穿时的最高速度; v_{LC} 为完全贯穿时的最低速度。

由试验结果可知, 当 $\phi 8$ mm 氧化锆陶瓷破片垂直侵彻蜂窝铝夹芯板时, 弹道极限为 236.5 m/s。当着角为 30° 时, 弹道极限为 276.5 m/s。

表 1 试验数据
Tab.1 Test data

着角/ $^\circ$	破片速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	是否穿透	$v_{50}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
0	208	未穿透	236.5
	218	未穿透	
	222	未穿透	
	276	穿透	
	242	穿透	
30	253	穿透	276.5
	282	穿透	
	293	穿透	
	289	穿透	
	277	未穿透	
	275	未穿透	
	243	未穿透	

2 仿真计算

2.1 仿真模型

使用 truegrid 建模软件建立的仿真模型结构如图 3 所示, 模型尺寸为 $10 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$, 模型由破片、前背板及芯层构成, 蜂窝夹芯与面板之间使用 *CONTACT_TIED_SURFACE_TO_SURFACE (绑定接触) 来模拟现实中的黏合状态。为保证计算精度, 网格尺寸严格控制在 $0.005 \sim 0.01 \text{ mm}$ 。破片和蜂窝夹芯靶板均采用 Lagrange 算法, 破片与靶板之间使用 *CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE (侵蚀接触), 夹芯板的四周通过约束 *Bangdery 固

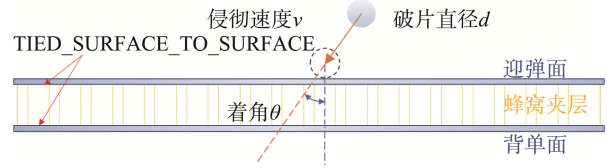


图 3 数值模拟模型

Fig.3 Numerical simulation model

定。由于冲击时间短, 忽略摩擦作用, 将破片侵彻过程视为绝热过程^[24]。求解过程由 LS-DYNA 有限元数值模拟软件完成。

2.2 材料模型

铝蜂窝铝夹芯板材料为 2024 铝及 5052 铝。在侵彻过程中, 靶板材料会出现大变形及高压、高应变区。同时, JOHNSON_COOK 本构模型能较为准确地描述金属材料从准静态到大应变、高应变率的响应过程^[25]。因此, 2024 铝及 5052 铝均采用 JOHNSON_COOK 模型来描述, 其表达式为:

$$\sigma = (A + B\varepsilon_p^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*) (1 - T^{*m}) \quad (2)$$

式中: A 、 B 、 C 、 n 和 m 为材料常数; ε_p 为材料的等塑性应变; $\dot{\varepsilon}_p^*$ 为无量纲化的等塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_p^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$, $\dot{\varepsilon}$ 和 $\dot{\varepsilon}_0$ 分别为实验应变率和参考应变率; T^{*m} 为材料熔化温度, 由室温 T_r 和常态中材料的熔化温度决定, 表达式见式 (3)。

$$T^{*m} = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (3)$$

GRUNEIEEN 状态方程表达式为:

$$p = \frac{\rho_0 C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{\alpha}{2} \mu^2 \right]}{1 - (S_1 - 1) \mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2}} + (\gamma_0 + \alpha \mu) E \quad (4)$$

式中: S_1 、 S_2 、 S_3 为曲线 $V_S - V_p$ 斜率的系数; γ_0 为状态方程参数; α 为 γ_0 的一阶体积修正参数; $\mu = \rho / \rho_0 - 1$ 。

表 2 蜂窝铝夹芯板材料主要参数
Tab.2 Main parameters of honeycomb aluminum sandwich panel material

材料	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	A	B	C	m	n
2024 铝	2.698	0.175	0.380	0.034	1.0	0.43
3003 铝	2.680	218	546	0.038	3.73	0.355

氧化锆陶瓷破片的材料模型采用 *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CERAMICS, 该模型更适用于描述陶瓷、玻璃等脆性材料。

3 结果及分析

3.1 响应及吸能分析

根据表 1 的试验数据可知, 当着角为 0° 时, $\phi 8 \text{ mm}$

表 3 破片材料主要参数
Tab.3 Main parameters of fragment materials

材料	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	G/GPa	A	B	C	m	n
ZrO ₂ 陶瓷	5.91	155	1	0.77	0.007	1.0	0.38

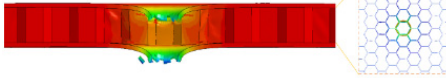
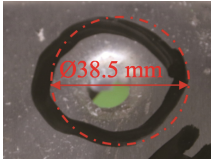
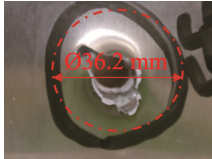
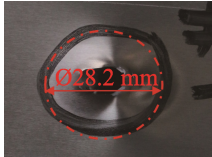
氧化锆陶瓷破片侵彻蜂窝铝夹芯板的弹道极限速度为 236.5 m/s; 当着角为 30°时, 弹道极限速度为 276.5 m/s。选取这 2 种不同工况的弹道极限速度进行靶板的变形情况分析, 其仿真和试验结果见表 4。

蜂窝铝夹芯板在 $\phi 8\text{ mm}$ 氧化锆陶瓷破片以接近极限贯穿速度的正侵彻作用下, 面板和背板均出现不同程度的变形凹陷, 并在破片侵彻方向形成“火山口”状的隆起。仿真结果表明, 面板的变形区域直径约为 39.2 mm, 隆起高度约为 3.80 mm, 背板的变形区域直径约为 37 mm, 隆起高度约为 3.86 mm。试验结果显示, 面板的变形区域直径为 38.5 mm, 背板的变形区域直径为 36.2 mm, 误差小于 3%, 仿真结果具

有较高的准确性。比较之下, 面板的变形面积更大, 这是因为在破片与面板的作用过程中, 蜂窝夹层通过变形吸收了部分破片的动能, 迟滞了面板的变形行为, 使得面板与破片的作用时间更持久, 面板变形区域范围也更大。

区别于正侵彻, 破片以 30°着角侵彻靶板时, 破片所形成的穿孔近似为椭圆形, 且靶板整体的变形程度降低。面板的变形区域直径约为 34.4 mm, 背板的变形区域面积直径约为 27.8 mm。在蜂窝层中靠近破片出口方向的蜂窝壁, 由于破片的直接撞击, 出现了严重的撕裂破碎, 基本与蜂窝层脱离。面板形成的隆起部分大致与破片侵彻方向一致, 而背板的隆起方向更接近于竖直方向。这是由于在蜂窝夹芯层的作用下, 破片受平行于靶面的阻力更大, 该方向的速度分量先降到 0, 而此时破片仍有垂直于靶面的速度, 使得破片以极限贯穿速度与靶板作用后, 其出口方向更偏向垂直于靶板。

表 4 数值仿真结果
Tab.4 Numerical simulation results

破片着角/(°)	侵彻速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	仿真靶板侧向变形	试验靶板面板	试验靶板背板
0	236.5			
30	276.5			

3.2 破片着角对蜂窝铝夹芯板冲击响应特性的影响

由试验可知, 蜂窝铝夹芯板对不同破片着角侵彻的防护性能存在差异, 为进一步探究破片着角对蜂窝铝夹芯板冲击响应特性的影响, 对 $\phi 8\text{ mm}$ 氧化锆陶瓷破片在不同着角对蜂窝铝夹芯板的极限贯穿速度进行仿真研究。仿真结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 极限贯穿速度随破片着角的增大而提高, 且着角越大, 极限贯穿速度变化率越大。着角在 0°~30°时, 极限贯穿速度的增长缓慢; 当角度从 45°增加到 60°时, 靶板极限贯穿速度的变化率激增; 随着角度的继续增加, 会出现破片跳飞的现象, 此时破片对靶板不能形成有效侵彻。当着角增大, 破片贯穿靶板所需的能量也随之提高。着角越大, 破片贯穿靶板所需能量的变化率越大。当着角为 30°时, 破片贯穿靶板所需能量较着角为 0°时提高 15.81%; 当着角为 60°时, 破片贯穿靶板所需能量较着角为 0°时提高 102.73%。

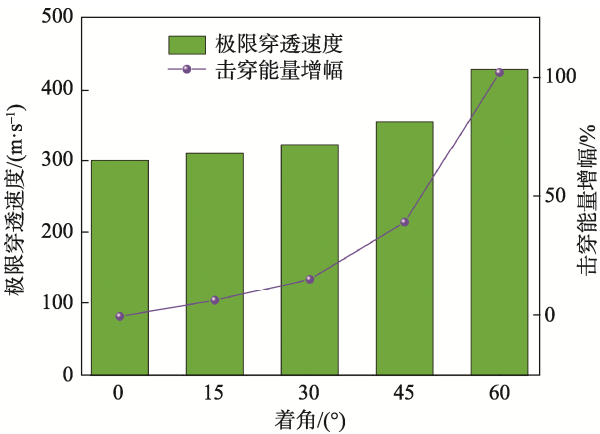


图 4 不同着角靶板极限贯穿速度及击穿能量变化
Fig.4 Change of limit penetration velocity and breakdown energy of target plate at different angles

$\phi 8\text{ mm}$ 氧化锆陶瓷破片在不同着角条件下, 以极限贯穿速度击穿蜂窝铝夹芯板时, 破片的速度方向与破片实际运动方向如图 5 所示。可以发现, 随着角的

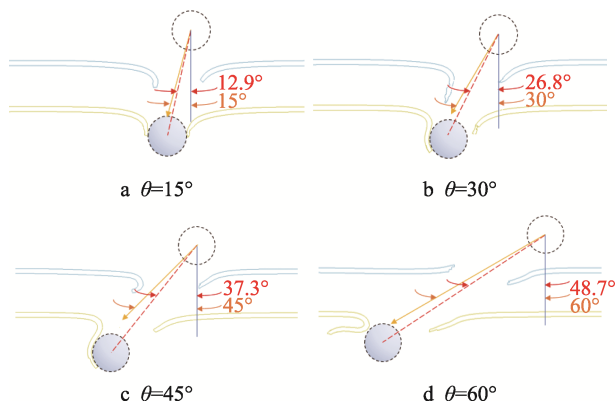


图 5 各着角下靶板典型破坏形貌
Fig.5 Typical failure morphology of target plate at different angles

增大,破片在侵彻过程中的偏移现象也越明显。着角为 15° 时,破片偏移角度为 1.1° ;着角为 30° 时,破片偏移角度为 3.2° ;着角为 45° 时,破片偏移角度为 7.8° ;着角为 60° 时,破片偏移角度为 11.3° 。

不难发现,不同着角下破片击穿蜂窝铝夹芯板过程中的破片偏移规律大致相同,这与破片在侵彻过程中与蜂窝铝夹芯板的作用有关。图 6 中出现的 2 个拐点分别为破片穿透面板及背板的过程。对比不同着角的吸能变化(如图 7 所示)可以发现,面板与芯层的吸能过程基本不变,吸能过程中背板的参与时间随着角的增大滞后了,从 0° 时的 $49\ \mu\text{s}$ 到 60° 时的 $67\ \mu\text{s}$ 。这是因为着角增大后,破片延速度方向到后靶面的

距离增加了,但破片的极限贯穿速度增幅并未超过距离的增幅,故破片与背板作用时间滞后。

观察不同着角下蜂窝铝夹芯板各部件的吸能占比(如图 8 所示)可以发现,蜂窝层吸能占比随破片着角的增大而减小。这是由于着角增大后,破片与芯层的相互作用从一开始通过面板变形传递载荷转换到破片直接与芯层蜂窝壁单元接触,并且着角越大,芯层蜂窝壁单元受破片直接接触的范围越大,受破片影响不能更有效吸能的蜂窝面积越多。这种情况是非常不利于靶板整体变形的,同样也不利于蜂窝铝夹芯板的能量吸收。

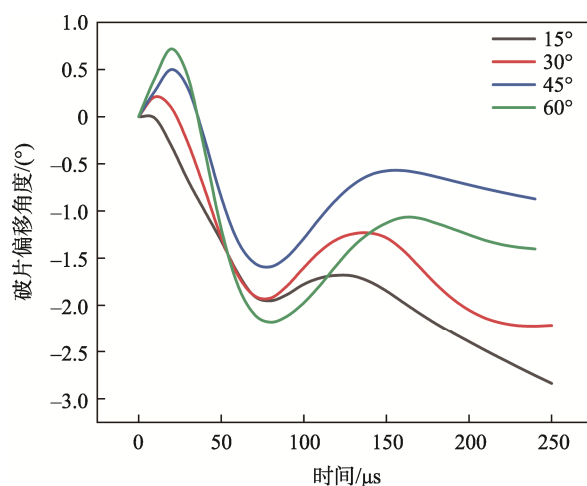


图 6 破片偏移角随时间变化曲线
Fig.6 Variation curve of fragment offset angle with time

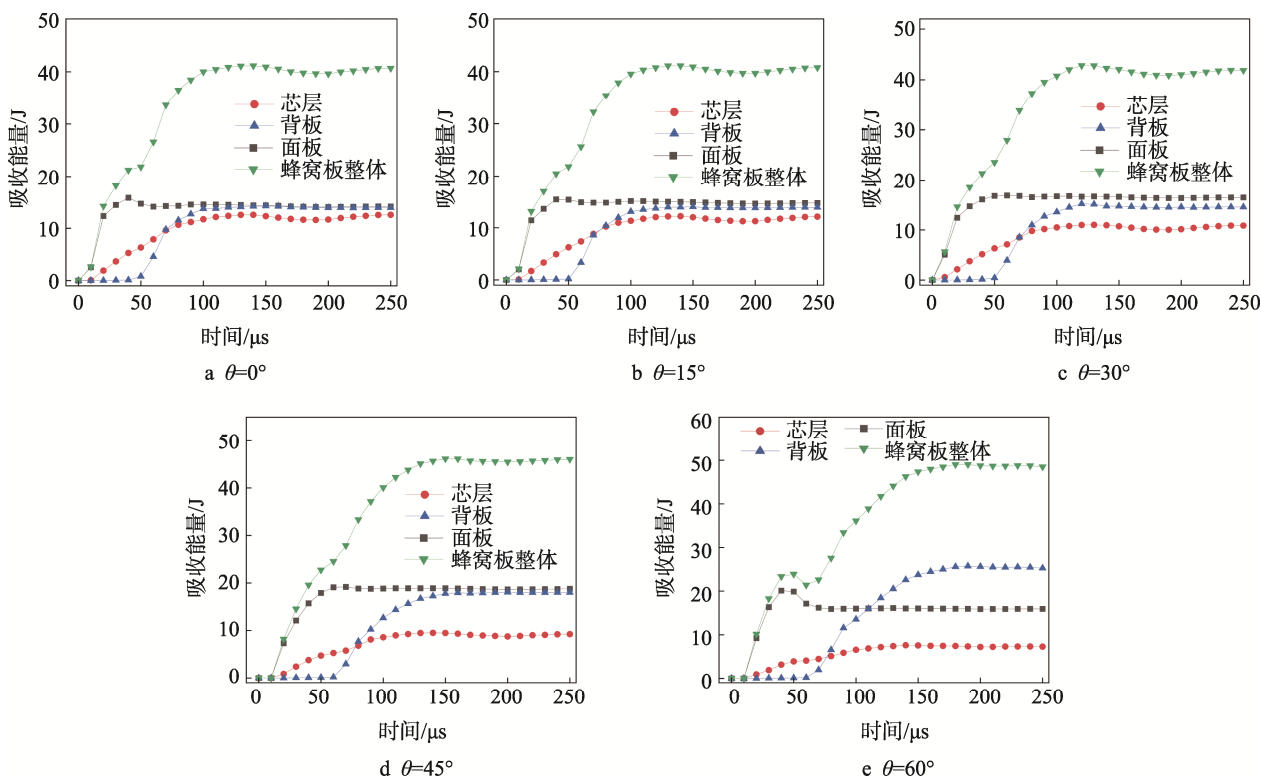


图 7 不同着角下蜂窝铝夹芯板各部件吸收能量随时间变化曲线
Fig.7 Curve of energy absorption of each component of honeycomb aluminum sandwich plate with time at different angles

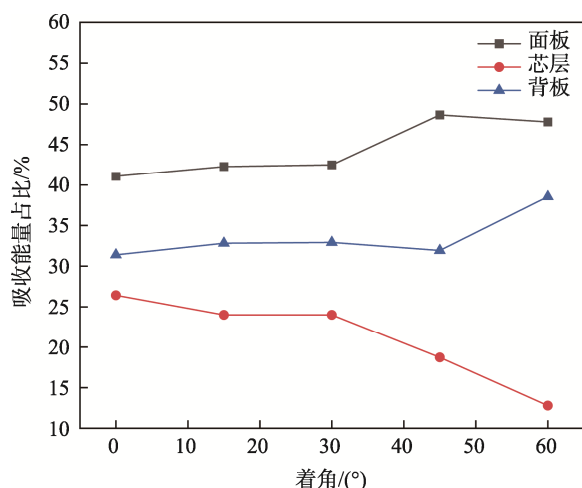


图 8 不同着角下蜂窝铝夹芯板各部件吸能占比曲线
Fig.8 Energy absorption ratio curves of each component of honeycomb aluminum sandwich panel at different angles

3.3 破片大小对蜂窝铝夹芯板吸能的影响

为探究破片直径接近蜂窝单元跨度 (8 mm) 时对蜂窝铝夹芯板吸能规律的影响, 对破片直径从 6 mm 到 10 mm 对蜂窝铝夹芯板的斜侵彻进行仿真研究。由图 9 可以看出, 当破片直径增加, 其对蜂窝芯层造成的损伤范围增加。破片直径为 6、8、10 mm 时, 蜂窝芯损伤范围直径分别为 30.9、38.4、48.1 mm, 蜂窝芯的损伤范围可以很好地反映蜂窝芯在靶板吸收破片动能过程中的贡献程度。

当破片直径为 6 mm 时, 在变形面板接触作用下, 蜂窝芯层发生压垮变形。面板在破片的冲击作用下形成变形凹陷, 此时蜂窝芯层主要受力来自凹陷部分的纵向挤压。随着凹陷部分的深入, 来自凹陷部分的挤压也逐渐转向, 这使得在蜂窝芯入口处塑性变形区域

接近于圆形。脱离面板后, 破片进入与蜂窝铝夹芯板无接触作用的阶段。此阶段蜂窝层吸能明显下降, 仅剩的能量变化来自面板的变形响应。最后阶段破片接触背板, 蜂窝芯主要受力来源于背板的拉伸变形。由于背板与蜂窝间的黏合, 背板在变形时拉动蜂窝壁缓冲, 在产生的拉伸力超过面板与蜂窝间的黏合强度后, 会发生脱黏现象。此阶段芯层的主要破坏形式为拉伸力作用下的拉伸变形及撕裂, 除蜂窝单元上部分的坍塌及下部分的撕裂外, 中心蜂窝单元的结构基本保持完整。

当氧化铝陶瓷破片直径增加到 8 mm 后, 破片与蜂窝芯层的接触范围增加, 造成蜂窝单元的破坏形式发生改变。在面板与蜂窝芯层的作用过程中, 面板的变形凹陷范围与蜂窝单元直径基本一致, 蜂窝单元在此过程中紧贴靶板的蜂窝壁的坍塌变形与靶板凹陷部分作用的塑性变形同时发生, 蜂窝壁均撕裂于蜂窝薄壁交界处, 整体呈花瓣状碎裂。随着破片的深入, 破片与面板的作用逐渐减小。当破片接触背板时, 背板变形产生的拉伸力使上半部分蜂窝壁的裂纹飞速扩展, 中心蜂窝单元的基本结构完全破坏。剩余的连接部分无法承受蜂窝铝夹芯板变形的拉伸力导致中心蜂窝单元从蜂窝芯层中整个脱离。

破片直径增加到 10 mm 时, 破片对蜂窝芯层的破坏作用与直径 8 mm 时相似, 中心蜂窝单元的基本结构完全破坏, 区别在于在破片穿透面板面板的变形范围更大了, 中心蜂窝单元及周边的蜂窝壁变形程度也更高, 蜂窝壁的破碎程度也更高。破片直径对蜂窝铝夹芯板各部分吸能占比的影响如图 10 所示。可以看出, 破片直径的变化对面板的吸能占比基本没有影响。芯层的吸能占比随破片直径的增加而增加, 破片直径从 6 mm 增加到 8 mm, 芯层吸能占比从 22% 增加到 27%。背板的吸能占比随破片直径的增大而减小。

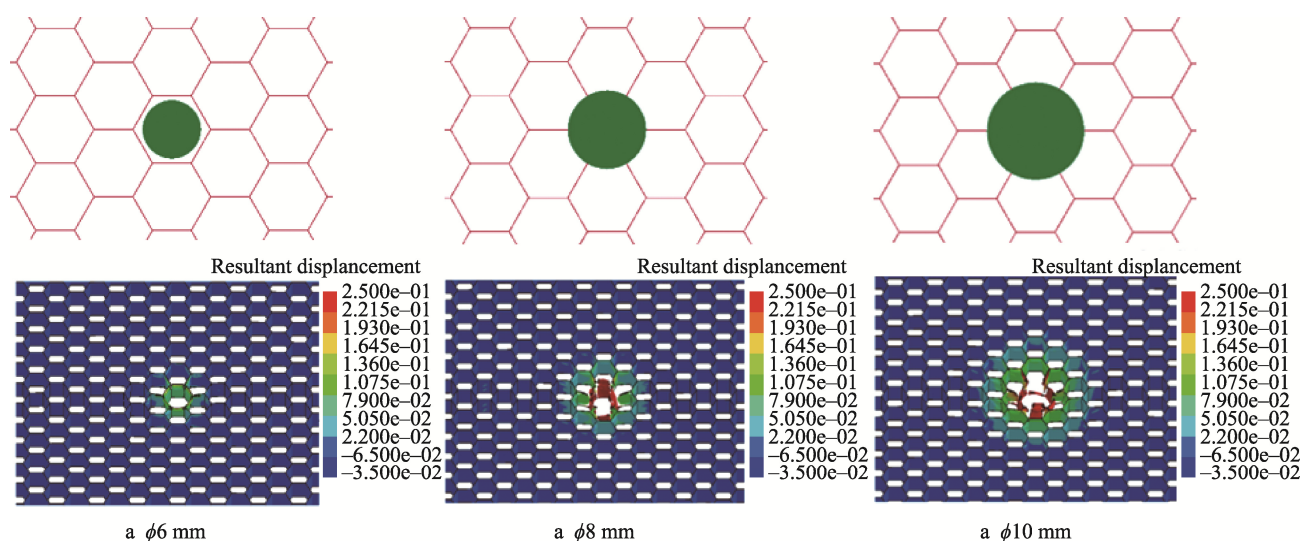


图 9 不同直径陶瓷破片侵彻蜂窝铝夹芯板芯层损伤云图
Fig.9 Cloud map of damage caused by ceramic fragments of different diameters penetrating the core layer of honeycomb aluminum sandwich panels

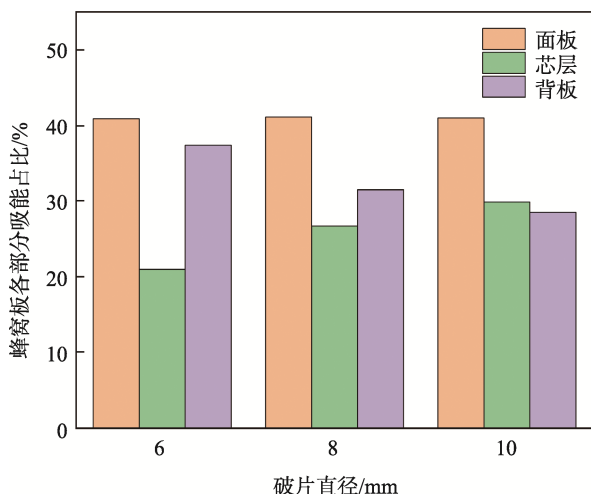


图 10 破片直径对蜂窝铝夹芯板各部分吸能占比的影响

Fig.10 Effect of fragment diameter on the energy absorption ratio of various parts of honeycomb aluminum sandwich panels

由图 11 可以看出,当破片直径为 6 mm 时,击穿蜂窝铝夹芯板的比动能最高,并且随着陶瓷破片着角的增大,破片击穿蜂窝铝夹芯板的比动能也逐渐增大,变化最明显。破片直径增大后,着角对蜂窝铝夹芯板的击穿比动能的影响下降,造成这一现象的原因是蜂窝芯的破碎导致了蜂窝层对前背板的支撑不足。破片直径增大后,受破片碰撞直接破碎的蜂窝芯层范围增大,这对整个蜂窝铝夹芯板的吸能响应有很大影响,失去原有蜂窝结构完整性的蜂窝芯层对面板和背板的支撑作用都大幅下降,导致蜂窝铝夹芯板整体抗弹性的下降。

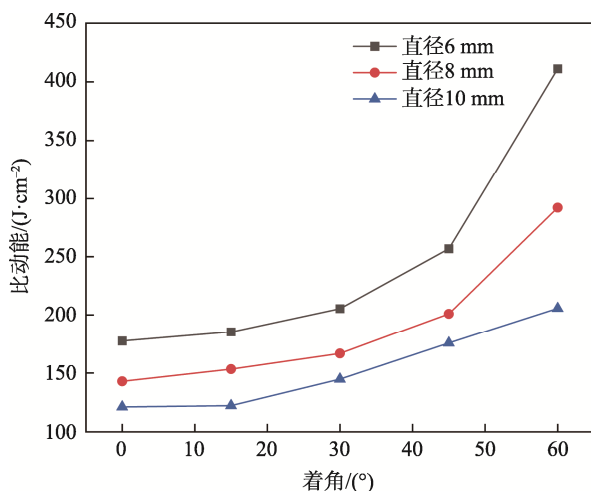


图 11 破片不同直径及着角击穿蜂窝铝夹芯板的比动能

Fig.11 Specific kinetic energy of the honeycomb aluminum sandwich plate of different diameters and angle of the fragment for breakdown

4 结论

本文采用数值模拟方法,并通过试验验证数值模

拟的准确性。针对铝蜂窝板对低附带毁伤元冲击响应特性开展了研究,得出以下结论:

1) 弹道枪试验结果表明, $\phi 8$ mm 氧化铝陶瓷破片以 0° 、 30° 着角侵彻蜂窝铝夹芯板时,弹道极限分别为 236.5、276.5 m/s。

2) 蜂窝铝夹芯板在受正侵彻时,蜂窝芯层的吸能效率更高,蜂窝以轴向压溃的形式吸收了部分破片传递的能量。斜侵彻过程中,弹丸的偏转会导致蜂窝芯层压溃方向不同,造成蜂窝芯单元结构性的破坏,从而影响蜂窝铝夹芯板整体的防护能力、

3) 直径近似蜂窝单元跨度的破片,破片直径越大,斜侵彻角度对蜂窝板击穿比动能的影响越小。相同破片着角下,氧化铝陶瓷破片直径越大,击穿蜂窝板所需的比动能越小。

参考文献:

- [1] 黄德雨,王坚茹,刘国栋,等. 基于陶瓷微粒的低附带毁伤战斗部作用方式研究[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(12): 27-30.
HUANG D Y, WANG J R, LIU G D, et al. Experimental Study on Small Ceramic Ball Particles as Low Lollateral Damage Munition's Anti-Element[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013, 34(12): 27-30.
- [2] SUN G Y, CHEN D D, WANG H X, et al. High-Velocity Impact Behaviour of Aluminium Honeycomb Sandwich Panels with Different Structural Configurations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 122: 119-136.
- [3] MEO M, VIGNJEVIC R, MARENGO G. The Response of Honeycomb Sandwich Panels under Low-Velocity Impact Loading[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2005, 47(9): 1301-1325.
- [4] RANA S, FANGUEIRO R. Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering[M]. London: Woodhead Publishing, 2016: 129-174.
- [5] STENIUS I, ROSÉN A, KUTTENKEULER J. On Structural Design of Energy Efficient Small High-Speed Craft[J]. Marine Structures, 2011, 24(1): 43-59.
- [6] SHIN K B, LEE J Y, CHO S H. An Experimental Study of Low-Velocity Impact Responses of Sandwich Panels for Korean Low Floor Bus[J]. Composite Structures, 2008, 84(3): 228-240.
- [7] BONANNO A, CRUPI V, EPASTO G, et al. Aluminum Honeycomb Sandwich for Protective Structures of Earth Moving Machines[J]. Procedia Structural Integrity, 2018, 8: 332-344.
- [8] RYAN S, SCHAEFER F, DESTEFANIS R, et al. A Ballistic Limit Equation for Hypervelocity Impacts on Compo-

- site Honeycomb Sandwich Panel Satellite Structures[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 41(7): 1152-1166.
- [9] KOOISTRA G W, WADLEY H N G. Lattice Truss Structures from Expanded Metal Sheet[J]. *Materials & Design*, 2007, 28(2): 507-514.
- [10] WANG B, WU L Z, MA L, et al. Mechanical Behavior of the Sandwich Structures with Carbon Fiber-Reinforced Pyramidal Lattice Truss Core[J]. *Materials & Design* (1980-2015), 2010, 31(5): 2659-2663.
- [11] HEIDARI-RARANI M, RAFIEE-AFARANI M, ZAHEDI A M. Mechanical Characterization of FDM 3D Printing of Continuous Carbon Fiber Reinforced PLA Composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 175: 107147.
- [12] FOO C C, CHAI G B, SEAH L K. Mechanical Properties of Nomex Material and Nomex Honeycomb Structure[J]. *Composite Structures*, 2007, 80(4): 588-594.
- [13] YANG X F, MA J X, SHI Y L, et al. Crashworthiness Investigation of the Bio-Inspired Bi-Directionally Corrugated Core Sandwich Panel under Quasi-Static Crushing Load[J]. *Materials & Design*, 2017, 135: 275-290.
- [14] ZHANG W, YIN S, YU T X, et al. Crushing Resistance and Energy Absorption of Pomelo Peel Inspired Hierarchical Honeycomb[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 125: 163-172.
- [15] ZHANG X C, LIU N N, AN C C, et al. Dynamic Crushing Behaviors and Enhanced Energy Absorption of Bio-Inspired Hierarchical Honeycombs with Different Topologies[J]. *Defence Technology*, 2023, 22: 99-111.
- [16] PORTER M M, NOVITSKAYA E, CASTRO-CESEÑA A B, et al. Highly Deformable Bones: Unusual Deformation Mechanisms of Seahorse Armor[J]. *Acta Biomaterialia*, 2013, 9(6): 6763-6770.
- [17] HA N S, PHAM T M, TRAN T T, et al. Mechanical Properties and Energy Absorption of Bio-Inspired Hierarchical Circular Honeycomb[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2022, 236: 109818.
- [18] XIANG J W, DU J X, LI D C, et al. Numerical Analysis of the Impact Resistance in Aluminum Alloy Bi-Tubular Thin-Walled Structures Designs Inspired by Beetle Elytra[J]. *Journal of Materials Science*, 2017, 52(22): 13247-13260.
- [19] GUNES R, ARSLAN K, APALAK M K, et al. Ballistic Performance of Honeycomb Sandwich Structures Reinforced by Functionally Graded Face Plates[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2019, 21(1): 211-229.
- [20] ZHANG Q C, YANG X H, LI P, et al. Bioinspired Engineering of Honeycomb Structure – Using Nature to Inspire Human Innovation[J]. *Progress in Materials Science*, 2015, 74: 332-400.
- [21] PALOMBA G, EPASTO G, CRUPI V, et al. Single and Double-Layer Honeycomb Sandwich Panels under Impact Loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 121: 77-90.
- [22] YAHAYA M A, RUAN D, LU G, et al. Response of Aluminium Honeycomb Sandwich Panels Subjected to Foam Projectile Impact – an Experimental Study[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 75: 100-109.
- [23] 袁浩, 任凯, 任晓鹏, 等. 蜂窝铝夹芯板抗侵彻性能研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(19): 98-103.
- YUAN H, REN K, REN X P, et al. Anti-Penetration Performance of Honeycomb Aluminum Sandwich Panel[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(19): 98-103.
- [24] 张陈, 张小萍, 刘苏苏, 等. 等面密度钢/铝组合靶的抗侵彻性能研究[J]. *图学学报*, 2022, 43(3): 513-521.
- ZHANG C, ZHANG X P, LIU S S, et al. Study on the Penetration Resistance of Steel/Aluminum Composite Target with Isoplanar Density[J]. *Journal of Graphics*, 2022, 43(3): 513-521.
- [25] 杜志鹏, 李晓彬, 夏利娟, 等. 用数值方法分析板梁结构抗动能穿甲性能[J]. *振动与冲击*, 2006, 25(3): 180-182.
- DU Z P, LI X B, XIA L J, et al. Numerical Study on the Perforation Resistibility of Plate Girder Target[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2006, 25(3): 180-182.