

# 纤维金属层合板的抗爆性能及失效机理

张磊<sup>1</sup>, 马小敏<sup>1</sup>, 李如江<sup>2</sup>, 李鑫<sup>1</sup>, 吴桂英<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学力学学院, 山西 太原 030024;

2. 中北大学化工与环境学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 采用爆炸冲击摆锤系统, 对玄武岩纤维-铝合金层合板和碳纤维-铝合金层合板进行了爆炸加载实验。实验中通过改变炸药质量获得不同的加载冲量, 分析了载荷冲量、结构组合形式以及纤维类型对纤维金属层合板变形/失效模式的影响。实验中观察到分层、基质失效、金属撕裂、塑性大变形等典型的变形失效模式。实验结果表明: 随着冲量的增加, 纤维金属层合板中铝合金层的塑性变形以及纤维层的损伤区域不断增大; 纤维金属层合板相对于单一的金属层合板具有更优异的抗冲击性能。

**关键词:** 纤维金属层合板; 爆炸载荷; 变形/失效模式; 抗爆性能

**中图分类号:** O382.1

**文献标识码:** A

随着高新技术的发展以及材料一体化设计新理念的日趋成熟, 同时具备高比强度、高比刚度以及优良耐腐蚀和耐疲劳性等特性的超混杂复合材料在航空航天、汽车工业、国防科技等高新技术领域得到了广泛应用。纤维-金属层合板(Fiber Metal Laminates, FML)是金属或合金材料与纤维复合材料通过交替层铺, 在特定温度和压力作用下结合而成的新型超混杂复合材料。近年来, 结构在爆炸载荷作用下的动力响应逐渐成为热点问题, 然而对于轻质材料或复合材料在爆炸载荷作用下动力响应的实验报道却较少。FML结合了纤维的抗疲劳性和高比强度以及金属的高断裂韧性和优良的抗冲击性能的特点<sup>[1-5]</sup>, 在许多高新技术领域得到了广泛应用。纤维-金属层合结构的概念早在1950年就被提出, 经过几十年的发展, 人们已经对其基本静力学行为和低速冲击下的动力学行为有了一定的了解<sup>[6-7]</sup>, 但是强动载荷下的动力学行为研究却相对较少<sup>[8-10]</sup>。Lemanski等<sup>[11-12]</sup>研究了玻璃纤维铝合金层合板在局部爆炸加载下的动力响应, 探究了层叠方式对结构响应的影响。Fleisher<sup>[13]</sup>研究了FML行李箱的抗爆性, 发现它可以承受空难级别的爆炸, 显示了复合材料结构的巨大潜力。Bikakis等<sup>[14]</sup>利用ANSYS/LS-DYNA软件分析了不同等级铝合金对FML冲击损伤响应的影响, 并与实体板的抗弹性能进行对比, 发现采用7075-T6铝合金作为金属层时FML具有最佳弹道性能。Yaghoubi等<sup>[15]</sup>通过实验和数值模拟研究了不同厚度的GLARE 5纤维金属梁的弹道冲击性能, 结果表明弹道极限相对于金属体积分数和试样厚度呈抛物线趋势变化, 同时GLARE 5梁中铝层弯曲、拉伸以及界面脱粘等失效模式对冲击能量的吸收起到重要作用。Sitnikova等<sup>[16]</sup>通过Abaqus/Explicit创建FML有限元模型, 研究了FML在局部爆炸载荷下的穿孔失效, 模拟中得到了基于薄GFPP(Glass Fiber Reinforced Polypropylene)层的FML动态失效模式, 例如拉伸撕裂以及铝层与GFPP层之间的多重剥离, 揭示了背面铝的模拟失效与GFPP损伤模式之间的相关性。古兴瑾等<sup>[17]</sup>推导了复合材料应变率相关的三维本构关系, 并将其用于复合材料层板

\* 收稿日期: 2018-05-18; 修回日期: 2018-08-17

基金项目: 山西省自然科学基金(201701D221012); 国家自然科学基金(11772215)

作者简介: 张磊(1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事复合材料力学行为研究。

E-mail: 1073268909@qq.com

通信作者: 吴桂英(1962—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事弹塑性力学研究。

E-mail: wgy2005112@163.com

高速冲击损伤的数值模拟。马小敏<sup>[18]</sup>通过 Kevlar/Epoxy 复合材料层合板的平头弹冲击实验和有限元数值模拟,分析了其在不同冲量下的变形失效模式以及不同结构的抗冲击性能。李鑫等<sup>[19]</sup>对玄武岩纤维/铝合金层合板进行了弹道实验,发现在质量相当的情况下,其抗弹性能与芳纶纤维/铝合金层合板相当。陈琪等<sup>[6]</sup>对 GLARE 层板的基本力学性能、抗冲击性能、挤压性能、疲劳性能等研究现状进行了综述,指出目前关于 GLARE 动力学特性研究的不足,需要进行系统深入的探讨。

本研究采用冲击摆锤系统对玄武岩纤维-铝合金层合板以及碳纤维-铝合金层合板进行爆炸加载实验。实验中通过改变炸药质量获得不同的加载冲量,对不同冲量作用下 FML 的变形失效模式进行分析,探讨不同配置 FML 的动力响应,并对比碳纤维和玄武岩纤维对 FML 抗爆性能的影响。

## 1 实 验

### 1.1 材料及试件

实验中所采用的玄武岩纤维布由德国 Incotology 公司提供,型号 FGMW0002;碳纤维布由美国 Hexcel 公司提供,型号 HexForceTM 282;铝合金薄板材料为 Al-6061。3 种材料的力学性能见表 1,其中: $\rho$  为面密度, $\sigma_b$  为抗拉强度, $E$  为杨氏模量, $h$  为厚度, $\sigma_s$  为屈服强度, $\varepsilon$  为断裂伸长率, $\nu$  为泊松比;碳纤维布和玄武岩纤维布的  $\sigma_b$ 、 $E$ 、 $\varepsilon$  均对应其单纤维的材料属性。

表 1 材料属性  
Table 1 Mechanical property of materials

| Material           | Type           | $\rho/(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$ | $\sigma_b/\text{GPa}$ | $E/\text{GPa}$ | $h/\text{mm}$ | $\sigma_s/\text{MPa}$ | $\varepsilon/\%$ | $\nu$ |
|--------------------|----------------|-------------------------------------|-----------------------|----------------|---------------|-----------------------|------------------|-------|
| Aluminum alloy     | Al-6061        | 810                                 | 0.124                 | 68.9           | 0.30          | 103                   | 12.0             | 0.33  |
| Carbon fiber cloth | HexForceTM 282 | 197                                 | 4.654                 | 231            | 0.26          |                       | 1.8              |       |
| Basalt fiber cloth | FGMW0002       | 210                                 | 4.300                 | 100            | 0.15          |                       | 3.1              |       |

实验中所用 FML 采用真空辅助成型方法制作,如图 1 所示。先将 Al-6061 铝合金板进行表面清洗,均匀涂抹底涂剂 (Primer94, 3M),增加与复合材料的粘结强度;固化剂与 5015 环氧树脂按照 3 : 10 的比例进行混合并搅拌均匀,放入真空干燥机中抽真空 20 min,去除搅拌时混入的气泡;然后将铝板和纤维布进行叠层铺设,其中平纹编织玄武岩纤维布和碳纤维布的铺层方向相同,并且纤维方向与铝板边缘平行;将树脂均匀涂抹在每层中,在真空袋中抽真空去除多余树脂,并进行 24 h 常温固化,随后放入 80 °C 恒温箱中进行 16 h 的固化;为了适应实验所用的夹具,对加工好的试件进行水切割,得到尺寸为 300 mm×300 mm 的 FML。为便于对比,采用相同方法制作具有相同厚度的 3 层铝合金层板。试件编号、质量( $m_s$ )及厚度( $H$ )列于表 2,其中:A 代表铝合金,B 代表玄武岩纤维,C 代表碳纤维,角标代表纤维布或铝板层数, $m_e$  为炸药质量。

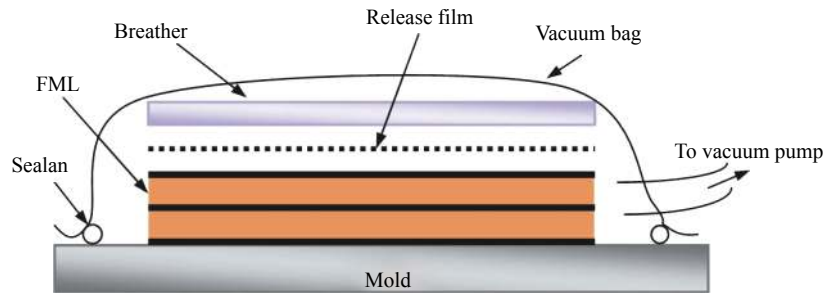


图 1 真空辅助成型工艺说明  
Fig. 1 Illustration of vacuum bagging process

表 2 FML 爆炸实验结果  
Table 2 Experimental results of FMLs

| Sample configuration                  | $m_s/g$ | $H/mm$ | $m_e/g$ | $I/(N \cdot s)$ | $\gamma/mm$ |
|---------------------------------------|---------|--------|---------|-----------------|-------------|
| A <sub>3</sub>                        | 218.2   | 0.94   | 5.0     | 5.07            |             |
| A/B <sub>2</sub> /A                   | 223.8   | 0.95   | 5.0     | 5.42            | 36.95       |
| A/B <sub>2</sub> /A                   | 203.2   | 0.91   | 3.0     | 4.32            | 29.96       |
| A/B <sub>2</sub> /A                   | 214.8   | 0.94   | 1.0     | 1.16            | 5.01        |
| A/C <sub>2</sub> A                    | 220.2   | 1.02   | 5.0     | 5.35            | 32.55       |
| A/C <sub>2</sub> A                    | 225.3   | 1.07   | 3.0     | 4.23            | 26.64       |
| A/C <sub>2</sub> A                    | 214.8   | 1.05   | 1.0     | 1.69            | 4.36        |
| A/B <sub>2</sub> /A/B <sub>2</sub> /A | 424.6   | 1.71   | 9.0     | 13.13           | 28.41       |
| A/B <sub>2</sub> /A/B <sub>2</sub> /A | 398.5   | 1.67   | 7.0     | 8.39            | 17.57       |
| A/B <sub>2</sub> /A/B <sub>2</sub> /A | 406.2   | 1.67   | 5.0     | 5.31            | 8.21        |
| A/C <sub>2</sub> /A/C <sub>2</sub> /A | 349.4   | 1.86   | 9.0     | 12.96           | 24.88       |
| A/C <sub>2</sub> /A/C <sub>2</sub> /A | 348.5   | 1.85   | 7.0     | 8.32            | 21.35       |
| A/C <sub>2</sub> /A/C <sub>2</sub> /A | 348.6   | 1.84   | 5.0     | 5.06            | 6.24        |

## 1.2 实验装置

实验装置采用自行设计的弹道冲击摆锤系统, 如图 2 所示, 系统主要由前端夹具、中部的工字型钢梁及尾部的平衡配重组成。夹具为正方形, 其外部边长为 400 mm, 内部边长为 250 mm。为了保证在运动过程中摆锤能够保持平动, 整个系统由 4 根钢丝悬挂在空中。试件由 8 根螺栓固定在前端的夹具上。圆柱形塑性炸药和起爆雷管放置在试件正前方, 距离试件 50 mm, 起爆点位于炸药正后方。在摆锤尾部设置激光位移传感器 (Micro-Epsilon LD1625-200), 通过记录摆锤运动过程的位移时程曲线计算出摆锤所受冲量, 进而根据试件的受载面积计算出试件受到的冲量 ( $I$ )<sup>[20]</sup>。试件被夹具固定之后, 爆炸冲击波的有效加载面积为 250 mm×250 mm。

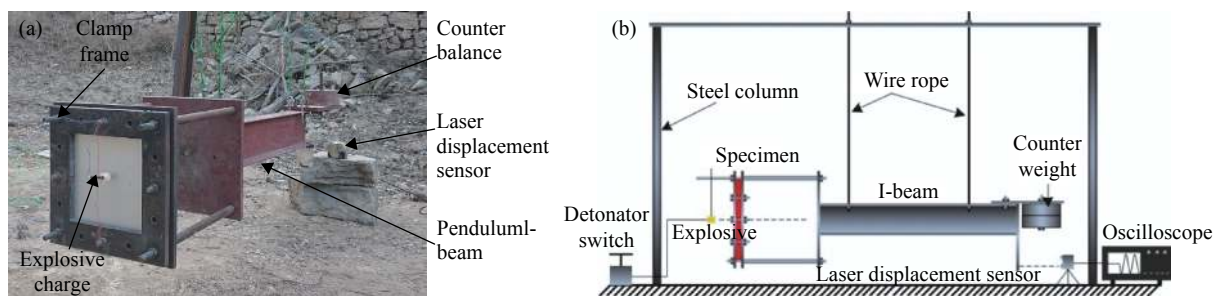


图 2 弹道摆锤系统

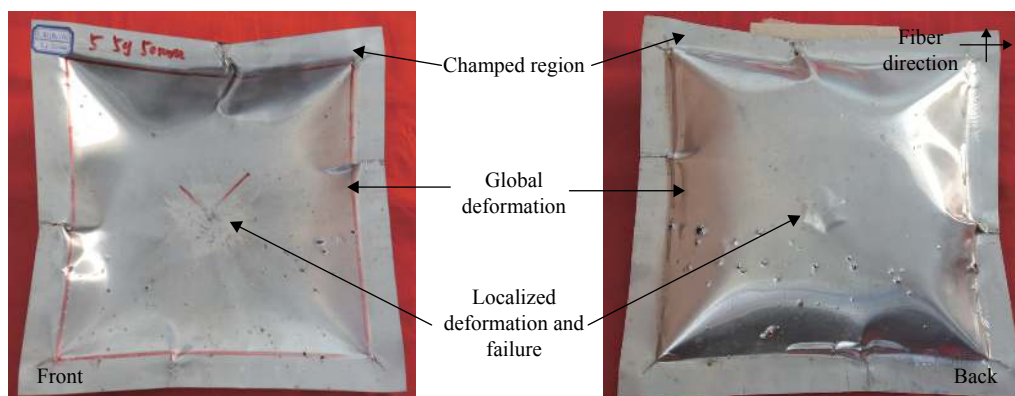
Fig. 2 Four-cable ballistic pendulum system

## 2 实验结果及分析

实验中共测试了 5 组试件, 包括 2/1、3/2 的玄武岩纤维-铝合金层合板和碳纤维-铝合金层合板以及 3 层纯铝板。实验结束后, 使用轮廓仪测得试件的最终挠度  $\gamma$ , 实验结果列于表 2。

### 2.1 典型的变形/失效模式

实验中发现大部分试件出现类似的变形/失效模式, 图 3 给出了试件 A/B<sub>2</sub>/A 在 5.42 N·s 冲量下典型的变形/失效模式, 可见试件可分为 3 个变形区域。

图 3 FML 典型的变形/失效模式 ( $A/B_2/A$ ,  $I=5.42 \text{ N}\cdot\text{s}$ )Fig. 3 Typical deformation/failure modes of FML ( $A/B_2/A$ ,  $I=5.42 \text{ N}\cdot\text{s}$ )

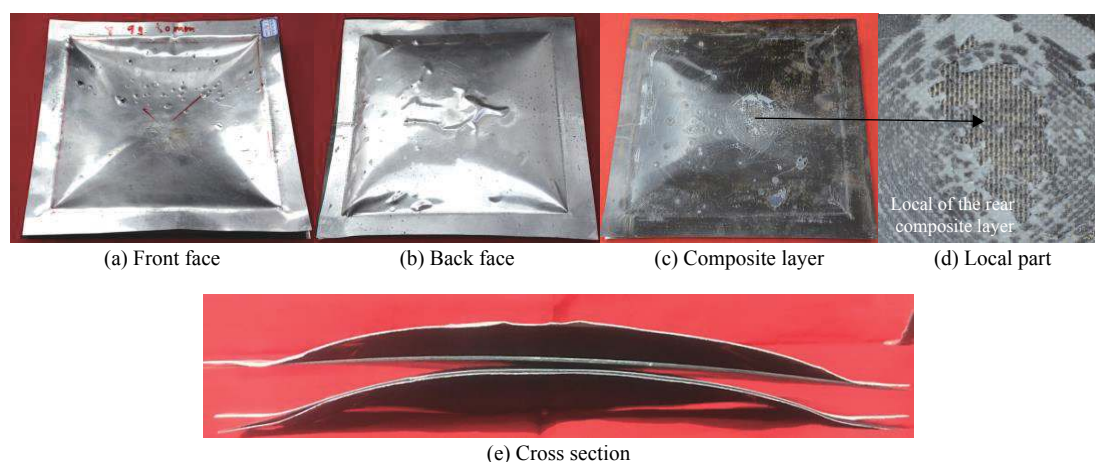
(1) 夹持区域: 此区域被夹持, 由于夹具与 FML 之间的摩擦力较小, 在结构变形过程中并不能保证完全固支, 两者会发生相对面内滑动, 因此在此区域有时会发生局部颈缩/屈曲。

(2) 整体变形区域: 在爆炸载荷作用下, 试件裸露部分形成轴对称塑性大变形, 同时在对角线方向出现明显的塑性绞线。

(3) 局部变形区域: 在载荷强度较大的中心区域, 当爆炸加载时会观察到损伤, 如铝合金层的局部凸起、纤维与金属的分层剥离、内部复合材料层的基质开裂、纤维断裂等。

本实验所得变形/失效模式与 Langdon 等<sup>[12]</sup>在 GLARE 层板爆炸实验所得结果存在一定区别, 主要原因是本实验采用空中爆炸加载而非接触爆炸加载, 因此结构中心所受最大载荷明显减小, 不会出现中心区域的局部严重破坏, 包括纤维的大量断裂、金属撕裂等。而在空中爆炸加载下, 结构受载面积增大, 结构表现出明显的整体变形模式。

图 4 给出了冲量为  $13.13 \text{ N}\cdot\text{s}$  时,  $A/B_2/A/B_2/A$  层合板的前后面板、复合材料层及横截面的变形/失效模式。可以看到, 层合板的整体变形/失效模式与图 3 相似, 由于厚度增加, 在弯曲和法向拉伸波的共同作用下, 铝合金层出现塑性大变形, 背面铝层产生了比前铝层更大的塑性变形; 粘结层完全失效, 铝板与背面复合材料层之间发生剥离; 复合材料层并未发生明显的整体变形, 局部中心在爆炸载荷下出现了明显的基质失效, 但是纤维因其高拉伸强度并未出现明显断裂。

图 4 在  $13.13 \text{ N}\cdot\text{s}$  冲量下  $A/B_2/A/B_2/A$  的变形/失效模式Fig. 4 Deformation/failure pattern of  $A/B_2/A/B_2/A$  under the impulse of  $13.13 \text{ N}\cdot\text{s}$

## 2.2 冲量对变形/失效模式的影响

图 5 给出了 A/C<sub>2</sub>/A 前、后面板在不同冲量(1.69、4.23、5.35 N·s)加载下的变形失效模式。当冲量较小时,由于炸药量较少,雷管没有全部熔化,因此层合板出现了较多破片穿透的孔洞;随着药量的增大,雷管破片在高温高压起爆过程中被熔融消耗,因此层合板上破片穿孔数量明显减少。当冲量为 1.69 N·s 时,可以看到层合板仅出现较小的塑性变形,塑性铰线不明显;当冲量增大到 4.23 N·s 时,层合板出现较大的整体变形,对角区域出现明显的塑性铰线,靠近边界处发生剪切变形,同时在边界区域出现一定的颈缩现象;随着冲量增加至 5.35 N·s,试件整体变形继续增大,塑性铰线沿对角线逐渐向板中央移动。铝板局部变形区域出现凸起,呈现不规则多边形,这一现象与 Langdon 等<sup>[12]</sup>在 GLARE 板的爆炸实验中所观察到的结果一致,主要由试件后面板和复合材料层完全分离所导致。

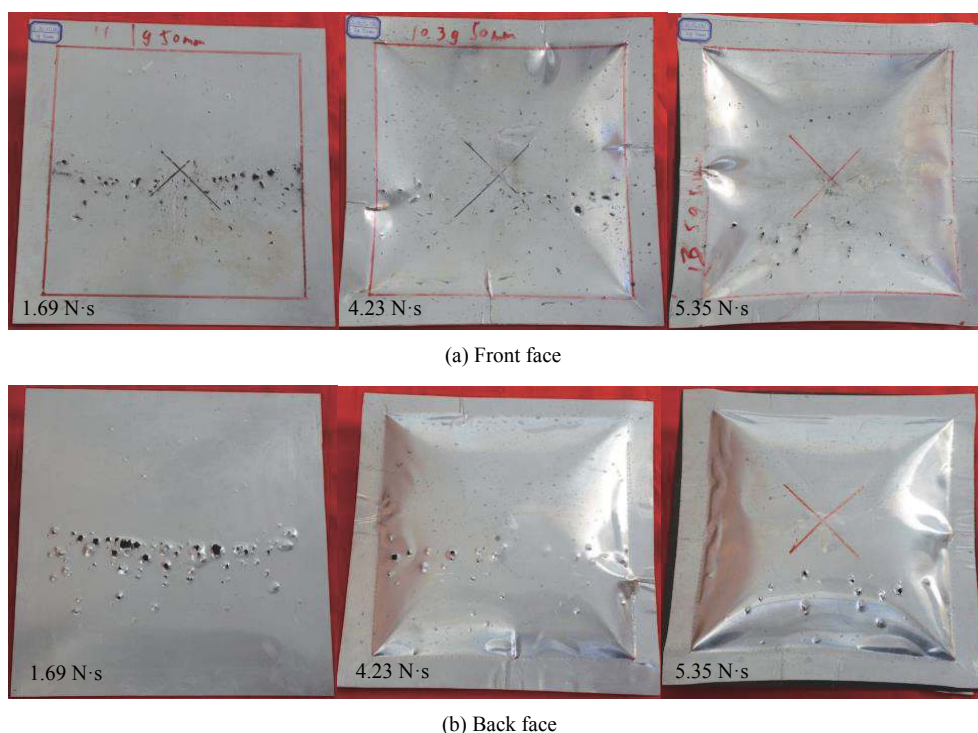


图 5 不同冲量下碳纤维铝合金层合板 A/C<sub>2</sub>/A 前后面板变形/失效模式

Fig. 5 Deformation/failure modes of front and back faces of carbon fiber aluminum-alloy laminate A/C<sub>2</sub>/A under different impulses

图 6 分别给出了不同冲量下 A/B<sub>2</sub>/A 试件和 A/C<sub>2</sub>/A/C<sub>2</sub>/A 试件的横截面变形剖面。从图 6 中可以看到:层合板的变形具有连续性和对称性,两种试件均在局部爆炸加载区域出现铝合金层的塑性变形和粘结层的失效,未发生侵彻破坏。随着冲量的增加,可以观察到 A/B<sub>2</sub>/A 试件的整体变形区域范围和最终挠度增大,如图 6(c)(冲量为 5.42 N·s 时 A/B<sub>2</sub>/A 的剖面放大图)所示,可见 FML 内部出现复合材料层的基质失效;A/C<sub>2</sub>/A/C<sub>2</sub>/A 试件的损伤区域范围增加,后铝板层的最终残余挠度增大,铝合金层与复合材料层的分层损伤由中心向两端延伸,整体变形区域和夹持区域的分层逐渐明显。

图 7 给出了不同层合板背面的变形轮廓。从图 7 中可以观察到,玄武岩纤维-铝合金层合板和碳纤维-铝合金层合板的后面板均表现出:中心区域的局部变形最大,逐渐向两边延伸;随着冲量的增大,两端出现剪切变形,纤维-铝合金层合板的损伤区域逐渐增大。从表 2 中的最终挠度可以看到,在相同冲量加载下,相同配置的碳纤维-铝合金层板的整体变形小于玄武岩纤维-铝合金层板,表现出更优异的抗爆性能。

从变形/失效模式可以看出, FML 在爆炸载荷作用下的主要能量耗散方式是:铝合金层的塑性大变

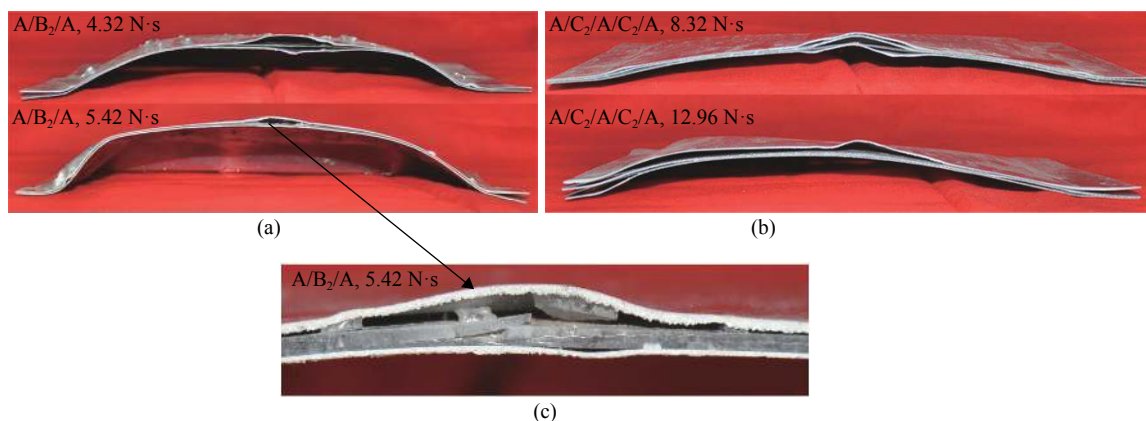
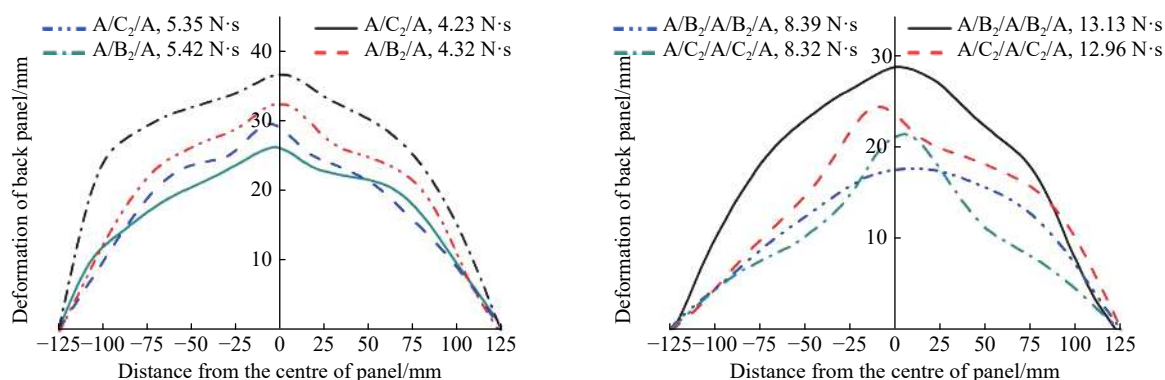
图6 不同冲量下 A/B<sub>2</sub>/A 和 A/C<sub>2</sub>/A/C<sub>2</sub>/A 背面铝板变形剖面Fig. 6 Deformation profile of back aluminum face of A/B<sub>2</sub>/A and A/C<sub>2</sub>/A/C<sub>2</sub>/A under different impulses

图7 纤维-铝合金层合板背面铝层变形轮廓

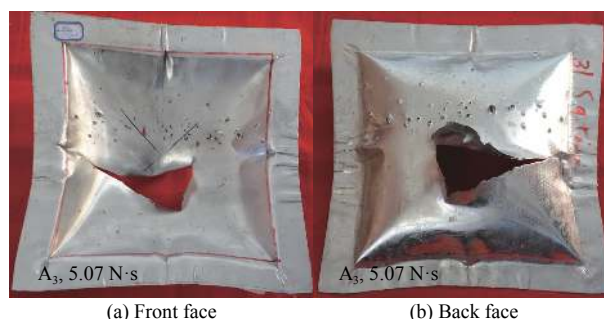
Fig. 7 Deformation profile of aluminum layer on the back of fiber-aluminum alloy laminate

形以及局部破坏、纤维复合材料层的基质失效和纤维断裂、复合材料层的内部分层以及金属层和复合材料层的剥离。实验中所观察到的 FML 动态失效模式与 Sitnikova 等<sup>[16]</sup>的模拟结果相同,进一步验证了 FML 在爆炸载荷作用下的能量耗散方式。在小冲量作用下, FML 因其较高的强度,没有发生明显的变形,因此其耗散能量较少;随着冲量的增加,上述变形失效方式将逐渐参与到能量耗散过程中,直至结构完全破坏。

### 2.3 不同层合板抗爆性能对比

图8为冲量 5.07 N·s 时 A<sub>3</sub>(3 层铝板)的变形失效模式。可以看出: A<sub>3</sub> 试件的铝合金层已经被穿透,整体变形区域出现塑性大变形且向下凹陷,局部变形区域金属失效,呈现出三角形撕裂区域。对比图3, A/B<sub>2</sub>/A 试件中的铝合金层发生塑性大变形,整体变形区域沿对角线向下凹陷,局部变形区域铝合金层未撕裂,出现一个不规则多边形凸起,该损伤由铝合金层与复合材料层剥离所致。

图9给出了不同冲量下单位质量 FML 后面板最终残余挠度的对比。从图9中可以看到,随着冲量的增加, FML 后面板的最终挠度不断增加,单位质量碳纤维-铝合金层合板的最终挠度相

图8 铝合金层合板 A<sub>3</sub> 的变形/失效模式 (I=5.07 N·s)Fig. 8 Deformation/failure modes of A<sub>3</sub> under impulse I=5.07 N·s

对较小,表现出较好的抗冲击性能。但是由于碳纤维复合材料的弹性模量与铝合金相差较大,变形过程中界面应力较大,从而更容易发生脱胶并出现局部大变形(中间凸起)。

### 3 结 论

采用冲击摆锤系统对 FML 在爆炸载荷作用下的变形失效模式进行实验研究,分析了不同面板配置、不同冲量下玄武岩纤维-铝合金层合板和碳纤维-铝合金层合板的抗爆性能,得到以下主要结论:

- (1)在爆炸载荷下试件可分为3个变形失效区域,即夹持区域、整体变形区域和局部变形区域,其能量耗散方式包括金属塑性大变形、金属纤维间的分层和剥离、基质破裂和纤维断裂等;
- (2)随着载荷冲量的增加,试件的整体变形区域范围和最终挠度增大,局部塑性变形也逐渐增大,层合板的内部出现分层、剥离、基质失效等;
- (3)由于碳纤维的抗拉强度高、密度小,因此碳纤维-铝合金层合板比玄武岩纤维-铝合金层板具有更优异的抗爆性能。

### 参考文献:

- [1] KRISHNAKUMAR S. Fiber metal laminates-the synthesis of metals and composites [J]. *Material and Manufacturing Process*, 1994, 9(2): 295-354.
- [2] VOGELANG L B, VLOT A. Development of fibre metal laminates for advanced aerospace structures [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 103(1): 1-5.
- [3] VILLANUEVA G R. Processing and characterisation of the mechanical properties of novel fibre-metal laminates [D]. Liverpool: University of Liverpool, 2002.
- [4] VILLANUEVA G R, CANTWELL W J. The high velocity impact response of composite and FML-reinforced sandwich structures [J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 64(1): 35-54.
- [5] CANTWELL W J. The mechanical properties of fibre-metal laminates based on glass fibre reinforced polypropylene [J]. *Composites Science and Technology*, 2000, 60(7): 1085-1094.
- [6] 陈琪,关志东,黎增山. GLARE 层板性能研究进展 [J]. *科技导报*, 2013, 31(7): 50-56.
- [7] CHAI G B, MANIKANDAN P. Low velocity impact response of fibre-metal laminates-a review [J]. *Composite Structures*, 2014, 107(3): 363-381.
- [8] LANGDON G S, NURICK G N, KARAGIOZOVA D, et al. Fiber-metal laminate panels subjected to blast loading [M]//*Dynamic Failure of Materials and Structures*. Boston: Springer, 2009: 269-296.
- [9] SOUTIS C, MOHAMED G, HODZIC A. Modelling the structural response of GLARE panels to blast load [J]. *Composite Structures*, 2011, 94(1): 267-276.
- [10] MOHAMED G F A, SOUTIS C, HODZIC A. Blast resistance and damage modelling of fibre metal laminates to blast loads [J]. *Applied Composite Materials*, 2012, 19(3/4): 619-636.
- [11] LEMANSKI S L, NURICK G N, LANGDON G S, et al. Behaviour of fibre metal laminates subjected to localised blast loading-Part II: quantitative analysis [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(7): 1223-1245.
- [12] LANGDON G S, LEMANSKI S L, NURICK G N, et al. Behaviour of fibre-metal laminates subjected to localised blast loading: Part I-experimental observations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(7): 1202-1222.
- [13] FLEISHER H J. Design and explosive testing of a blast resistant luggage container [J]. *Structures under Shock & Impact IV*,

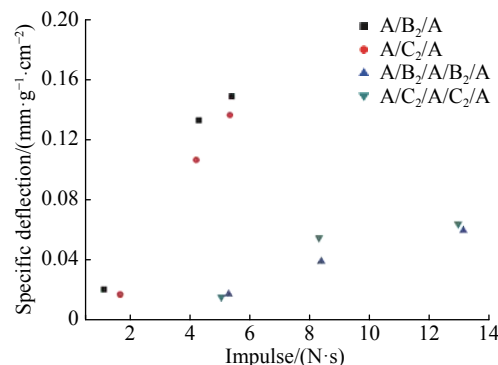


图9 单位质量FML后面板残余挠度

Fig. 9 Specific deflection of FML with different impulses

- 1996.
- [14] BIKAKIS G S E, DIMOU C D, SIDERIDIS E P. Ballistic impact response of fiber-metal laminates and monolithic metal plates consisting of different aluminum alloys [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 69: 201–208.
- [15] YAGHOUBI A S, LIAW B. Thickness influence on ballistic impact behaviors of GLARE 5 fiber-metal laminated beams: experimental and numerical studies [J]. *Composite Structures*, 2012, 94(8): 2585–2598.
- [16] SITNIKOVA E, GUAN Z W, SCHLEYER G K, et al. Modelling of perforation failure in fibre metal laminates subjected to high impulsive blast loading [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2014, 51(18): 3135–3146.
- [17] 古兴瑾, 许希武. 纤维增强复合材料层板高速冲击损伤数值模拟 [J]. *复合材料学报*, 2012, 29(1): 150–161.  
GU X J, XU X W. Numerical simulation of high speed impact damage of fiber reinforced composite laminates [J]. *Journal of Composite Materials*, 2012, 29(1): 150–161.
- [18] 马小敏. 芳纶纤维层合板的冲击力学行为 [D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [19] LI X, YAHYA M Y, BASSIRI NIA A, et al. Dynamic failure of fibre-metal laminates under impact loading-experimental observations [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2016, 35(4): 305–319.
- [20] 敬霖, 王志华, 赵隆茂. 爆炸荷载作用下结构冲量的测量 [J]. *实验力学*, 2009, 24(2): 151–156.  
JING L, WANG Z H, ZHAO L M. Measurement of impulse acted on a structure subjected to blast loading [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2009, 24(2): 151–156.

## Anti-explosion Performance and Failure Mechanism of Fiber-Metal Laminates

ZHANG Lei<sup>1</sup>, MA Xiaomin<sup>1</sup>, LI Rujiang<sup>2</sup>, LI Xin<sup>1</sup>, WU Guiying<sup>1</sup>

(1. *College of Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;*

2. *Institute of Chemical and Environmental Sciences, North Central University, Taiyuan 030051, China)*

**Abstract:** In this work we performed blast loading tests on basalt fiber-aluminum alloy laminates and carbon fiber-aluminum alloy laminate using an explosion impact pendulum system and obtained different loading impulses by changing the quality of the explosive, thereby analyzing the influences of load impulse, structure combination and fiber type on the deformation/failure mode of fiber metal laminates and revealing the laminates' typical failure modes such as delamination, matrix failure, metal tear and plastic deformation. The experimental results showed that the plastic deformations of the aluminum alloy layer in the fiber metal laminate and the damage area of the fiber layer increase with the increase of the impulse, and the fiber metal laminates have better impact resistance than that of the single metal laminate.

**Keywords:** fiber metal laminate; blast load; deformation/failure modes; blast resistance