

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.03.027

## 爆炸加载下蜂窝夹芯板和泡沫夹芯板 变形行为实验研究\*

田立智, 宜晨虹, 汤铁钢, 苏罗川  
(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 绵阳 621999)

**摘要:** 多孔夹芯结构因优异的比强度、比刚度而广泛应用于爆炸冲击防护领域,然而目前与爆炸相关的研究主要集中在小当量爆炸加载下夹芯结构的失效机制,实际大当量加载场景下的吸能特征研究较为少见。为更好指导工程应用,设计了三种夹芯材料(泡沫铝、边长3 mm及边长10 mm的蜂窝铝)在不同夹芯构型(单层夹芯、两层夹芯)及不同面板/夹层板/背板厚度下的十种夹芯结构,并对上述夹芯结构开展了0.5 kg TNT和1 kg TNT当量爆炸加载实验,分析了不同当量下夹芯结构的整体变形特征,探讨了夹芯材料、夹芯构型等因素对吸能防护的影响。实验结果表明:爆炸加载下,泡沫夹芯结构及蜂窝夹芯结构均可通过芯体材料的大幅压缩变形吸收转换能量,但整体而言蜂窝结构的变形均匀化更好;芯体吸能效率的发挥一方面与自身的比压缩强度相关,另一方面也与表层面/背板的强度及刚度相关,在实际应用时需优化匹配芯体的压缩强度与面/背板的强度及刚度,保证芯体材料可获得最大程度的压缩,发挥其吸能优势;实验中发现双层夹芯结构在吸能防护性能上优于等面密度的单层夹芯结构,即在等面密度的情形下,通过对内部芯体的合理结构优化是提升结构整体吸能防护效果的有效途径。该研究可以为实际应用中的防护结构设计提供更多参考数据。

**关键词:** 蜂窝; 泡沫; 夹芯结构; 爆炸; 变形

**中图分类号:** TD **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2024)03-0232-08

## Experimental Study on Deformation Behavior of Honeycomb Sandwich Panel and Foam Sandwich Panel under Explosion Loading

TIAN Li-zhi, YI Chen-hong, TANG Tie-gang, SU Luo-chuan  
(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** Porous sandwich structures are widely used in anti-explosion due to their excellent specific strength and stiffness. However, current explosion research mainly focuses on the failure mechanism of sandwich structures under small equivalent explosion loading. In contrast, the research on energy absorption characteristics of porous sandwich structures under actual large equivalent loading is rarely reported. To better guide the engineering application, ten kinds of sandwich structures with three kinds of sandwich materials (foam aluminum and honeycomb aluminum with 3 mm × 10 mm side length) under different sandwich configurations (single-layer and two-layer sandwiches) and different thicknesses of face sheet/middle sheet/rear sheet were designed. The explosion tests with 0.5 kg TNT

收稿日期 (Date of reception): 2023-12-05

网络首发日期 (Published online): 2024-04-06

作者简介: 田立智 (1990-), 男, 硕士、工程师, 从事特种抗爆防护结构方面的研究, (E-mail) tianlz20@caep.cn。

通讯作者: 苏罗川 (1986-), 男, 博士、副研究员, 从事特种抗爆防护结构方面的研究, (E-mail) caepsulc@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11932018, 12072332)

**About the author:** TIAN Li-zhi (1990-), male, Master's degree, Junior engineer, mainly engaged in the research on the structures of anti-explosion, (E-mail) tianlz20@caep.cn.

**Corresponding author:** SU Luo-chuan (1986-), male, Ph. D, associate research fellow, mainly engaged in the research on the structures of anti-explosion, (E-mail) caepsulc@163.com.

**Fund Programs:** National Natural Science Foundation of China (11932018, 12072332)

and 1 kg TNT equivalent explosion loading were respectively carried out on the above sandwich structures, and the overall deformation characteristics of the sandwich structures were analyzed. The effects of sandwich materials, sandwich configurations and other factors on energy absorption were discussed. Results show that both the foam sandwich structure and honeycomb sandwich structure could absorb energy through the large compression deformation of core material under explosion loading, while the deformation uniformity of the honeycomb structures is better. Furthermore, the energy absorption efficiency of the core is both related to its specific compressive strength and strength/stiffness of the face sheet/rear sheet. It is quite necessary to optimize those parameters to ensure that the core material can obtain a maximum compression and give full play to its energy absorption advantage. It is also found that the double-layer sandwich structure is superior to the single-layer sandwich structure on energy absorption and protection performance, which is an effective way to improve the overall energy absorption of the structure.

**Key words:** honeycomb; foam; sandwich panel; explosion; deformation behavior

三明治夹芯结构因其在比强度、比刚度以及能量吸收转换方面的独特优势,近年来在冲击防护领域获得了广泛关注<sup>[1,2]</sup>。三明治夹芯结构通常包含面板、背板以及介于面板和背板之间的多孔芯体材料。因芯体材料的不同,形成了诸如蜂窝夹芯结构及泡沫夹芯结构等多种不同的具体结构形式。针对夹芯结构在冲击作用下的力学响应行为, N A Fleck 及 J W Hutchinson 等人较早研究给出了相关分析模型<sup>[3,4]</sup>,并基于能量吸收提出了结构的优化设计方向。近年来,国际国内的众多学者相继从典型失效模式、能量吸收机理、新型结构优化设计等多方面对夹芯结构进行了系统研究和认识<sup>[5-10]</sup>,为丰富夹芯结构的工程应用提供了众多思路和实证。

特别地,对于爆炸加载这类实际中最为典型的冲击情形,不少学者以直接的爆炸实验方式,观察了不同夹芯结构的失效变形特征及吸能表现。例如, M D Theobald 等人重点讨论了面板厚度对泡沫夹芯结构及蜂窝夹芯结构在爆炸冲击作用下表现行为的影响<sup>[11]</sup>。Jing Lin 等人实验给出了圆柱壳泡沫夹芯结构在爆炸载荷下的动态响应行为<sup>[12]</sup>。WANG Tao 等人观察了几何非对称蜂窝夹芯结构在爆炸作用下的响应行为<sup>[13]</sup>,并发展了相关理论预测模型。苏兴亚等人则获取了具有分层梯度的泡沫铝夹芯板在爆炸加载下的失效模式<sup>[14]</sup>。SUN Guang-yong 等人实验研究了不同面板材料及芯体的密度梯度等因素对泡沫夹芯结构响应行为的影响<sup>[15]</sup>。LI Xin 等人利用实验详细讨论了蜂窝夹芯结构与爆炸波的作用过程<sup>[16]</sup>,以及面板、芯体等的变形失效模式。进一步地, CHEN Gan-chao 等人的工作分析了面板厚度及质量分配对夹芯结构吸能特性的影响<sup>[17]</sup>。

需要指出的是,上述与爆炸相关的研究工作以小当量爆炸加载下夹芯结构的失效机制观测分析为主,本文以实际场景中的较大当量加载为背景,以直

接的实验方式获取泡沫铝及蜂窝铝两类典型金属夹芯结构在 0.5 kg TNT 和 1 kg TNT 加载下的吸能防护表现,并探讨芯体材料及构型等因素的影响,以期在实际应用中的防护结构设计提供更多参考数据。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 实验试件

本文实验中采用泡沫夹芯方板及蜂窝夹芯方板两类试件,泡沫为闭孔铝泡沫,蜂窝为正六边形铝蜂窝,面板及背板材料为铝合金。方板的外形尺寸均为 400 mm × 400 mm,方板的总厚度因各个试件之间面/背板差异而有所不同。为方便实验过程中约束固定,方板边缘处均匀分布 16 个螺钉孔,因芯体构型的差异,泡沫夹芯板和蜂窝夹芯板均分为单层夹芯板和双层夹芯板两类,但单层夹芯板和双层夹芯板内部的芯体总厚度均保持 30 mm 不变,试件结构见图 1。根据实验中加载当量的差别,实验试件共分为两组,两组试件完全一致。

试件的详细信息如表 1 所示,编号中的 F 代表泡沫铝夹芯板、H3 代表边长为 3 mm 的蜂窝铝试件、H10 代表边长为 10 mm 的蜂窝铝试件、S 代表单层夹芯板、D 代表双层夹芯板。例如: Al-F-S-3.0 表示泡沫铝单层试件,面板与背板厚度均为 3 mm; Al-H3-D-2.0 表示蜂窝边长 3 mm 的蜂窝铝双层试件,面板、夹层板及背板厚度均为 2 mm。实验试件共有三种不同的芯体,分别为泡沫铝芯体、边长为 3 mm 的正六边形蜂窝芯体以及边长为 10 mm 的正六边形蜂窝芯体三类,三种芯体材料的密度依次约为 0.2 g/cm<sup>3</sup>、0.07 g/cm<sup>3</sup> 及 0.02 g/cm<sup>3</sup>。

图 2 展示了三种芯体材料的准静态压缩曲线,泡沫铝的平台应力最高,边长 10 mm 的蜂窝铝平台应力最低。在本文的动态加载下,三类芯体的实际压缩强度均会高于图示曲线中的数据。

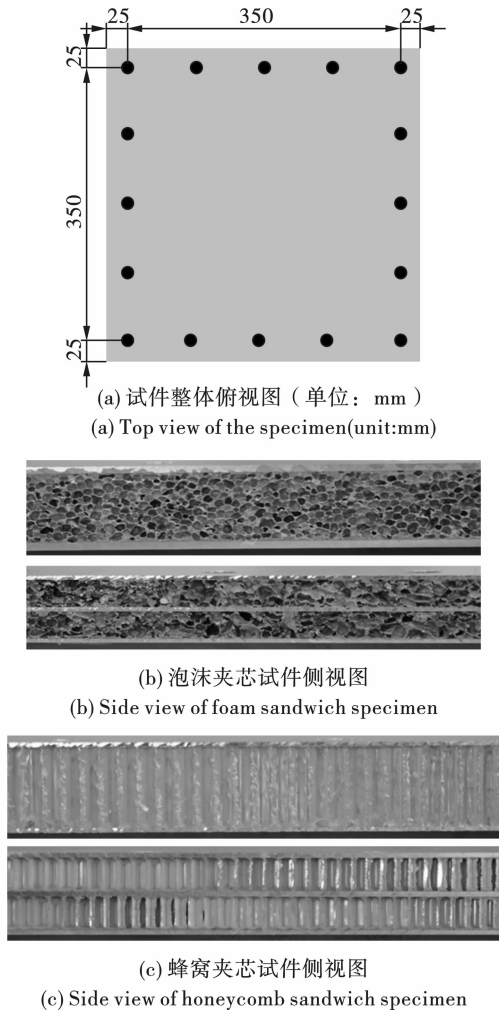


图1 实验中采用试件的结构示意图

Fig. 1 The structure of specimens used in the experiments

### 1.2 实验装置

如图3所示,试件通过表层钢制盖板与背部焊

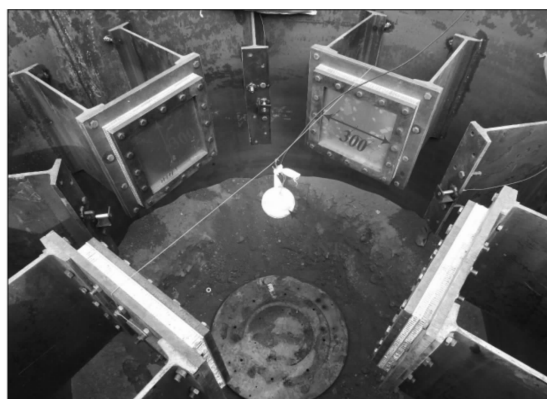
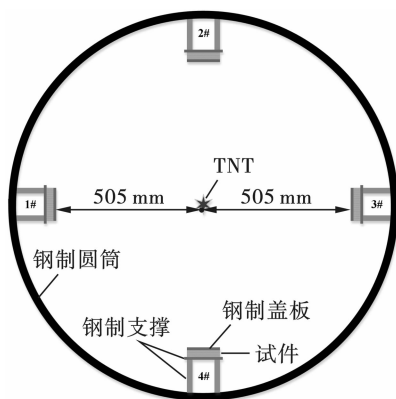


图3 实验现场布局图

Fig. 3 Experimental site layout

图4及图5分别展示了1 kg TNT加载下泡沫铝夹芯试件和蜂窝铝夹芯试件的整体变形情况。对

接在钢制圆筒的方形中空支撑结构连接,并通过四周的螺栓实现四边固支约束,试件面部和背部的可自由变形区域为300 mm × 300 mm。考虑加载的对称性及实验效费比,一发实验中沿圆筒正交方向安装4块夹芯板。实验时球形TNT炸药置于圆筒中心,且炸药球心与试件中心在同一水平面内,炸药球心距各试件中心的距离均为505 mm。实验炸药共有0.5 kg及1 kg两种不同当量,均采用球心起爆方式,所有实验均在专业爆炸场地内开展。

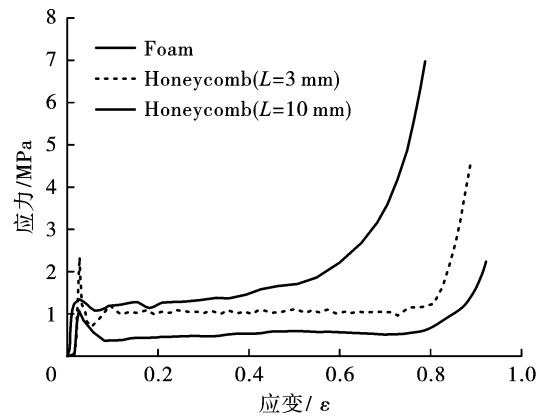


图2 三种芯体材料的准静态压缩曲线

Fig. 2 Quasi-static compression curves of three core materials

## 2 结果与讨论

### 2.1 主要变形特征

根据炸药当量的差别,实验中共开展了两组实验,两组实验所用试件完全一致,分别对应炸药当量为1 kg TNT和0.5 kg TNT。

于面板厚度为3 mm的单层泡沫铝及蜂窝铝试件(即编号为Al-F-S-3.0及Al-H3-S-3.0的试件),整

体保持完整, 面板呈内凹变形, 背板产生大范围的面外挠度; 对于面板厚度为 2 mm 的双层泡沫铝及蜂窝铝试件(即编号为 Al-F-D-2.0 及 Al-H3-D-2.0 的试件), 其整体变形形式与上述单层夹芯结构相同, 即面板内凹, 背板出现大范围面外挠度。对于面板厚度为 1.5 mm 的单层泡沫铝及蜂窝铝试件(即编号为 Al-F-S-1.5 及 Al-H3-S-1.5 的试件), 面板的内

凹程度更大, 且背板由于向面外产生了过大的挠度, 沿其背部约束的边缘出现了大幅开裂甚至整体脱落的情形; 对于面板厚度为 1.0 mm 的双层泡沫铝及蜂窝铝试件(即编号为 Al-F-D-1.0 及 Al-H3-D-1.0 的试件), 相比于单层夹芯结构, 其面板的内凹变形更为明显, 但背部的面外挠度明显减轻, 仅在局部约束部位出现了开裂。

表 1 实验中所用试件信息

Table 1 Specimens used in the experiments

组别	编号	结构形式	面板 - 夹层板 - 背板厚度/mm	芯体总厚度/mm	炸药当量/kg
A 组	Al-F-S-3.0	单层	3-0-3	30	1
	Al-F-S-1.5		1.5-0-1.5	30	
	Al-F-D-2.0	双层	2-2-2	15+15	
	Al-F-D-1.0		1-1-1	15+15	
	Al-H3-S-3.0	单层	3-0-3	30	
	Al-H3-S-1.5		1.5-0-1.5	30	
	Al-H3-D-2.0	双层	2-2-2	15+15	
	Al-H3-D-1.0		1-1-1	15+15	
	Al-H10-S-1.5	单层	1.5-0-1.5	30	
	Al-H10-D-1.0		1-1-1	15+15	
B 组	Al-F-S-3.0	单层	3-0-3	30	0.5
	Al-F-S-1.5		1.5-0-1.5	30	
	Al-F-D-2.0	双层	2-2-2	15+15	
	Al-F-D-1.0		1-1-1	15+15	
	Al-H3-S-3.0	单层	3-0-3	30	
	Al-H3-S-1.5		1.5-0-1.5	30	
	Al-H3-D-2.0	双层	2-2-2	15+15	
	Al-H3-D-1.0		1-1-1	15+15	
	Al-H10-S-1.5	单层	1.5-0-1.5	30	
	Al-H10-D-1.0		1-1-1	15+15	

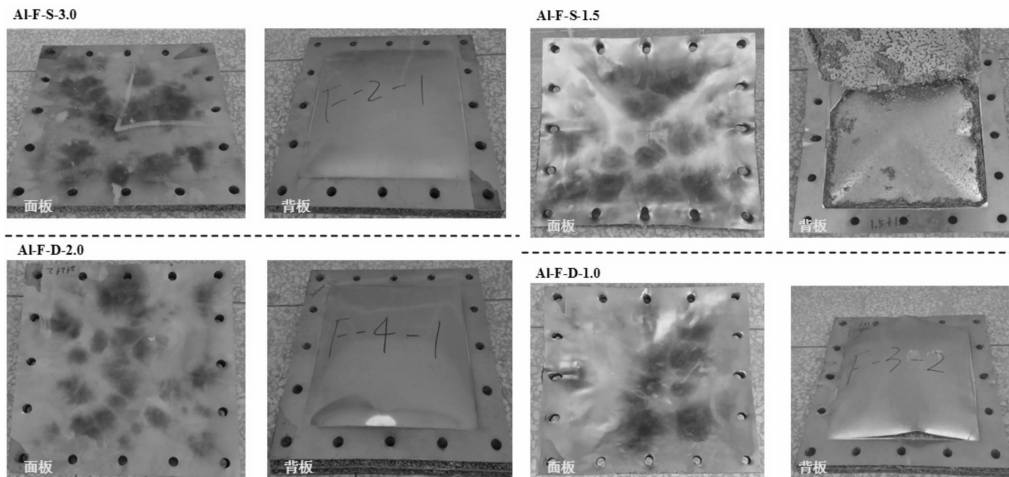


图 4 泡沫铝夹芯试件的整体变形情况(1 kg TNT 加载)

Fig. 4 The overall deformation of the aluminum foam sandwich specimen(1 kg TNT)

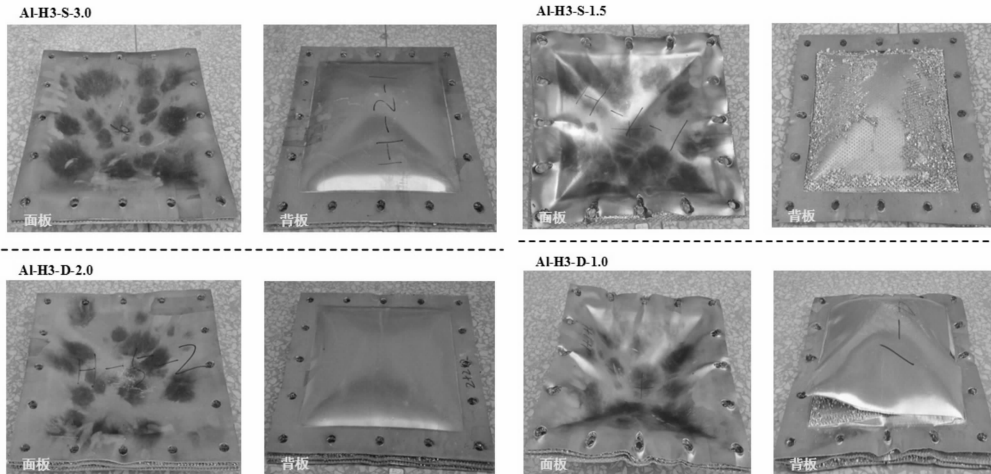


图5 蜂窝铝夹芯试件的整体变形情况(1 kg TNT加载)

Fig. 5 The overall deformation of honeycomb aluminum sandwich specimens(1 kg TNT)

相比于1 kg TNT加载的情况,0.5 kg TNT加载时的变形更为轻微,所有试件均仅出现面板的内凹以及背板的面外挠度,未出现背板开裂及脱落等情况,整体如图6所示。此外,从图6还可以发现,对于蜂窝铝夹芯试件,不管是单层结构还是双层结构,包括边界处在内的蜂窝芯体均获得了良好的压缩,

而对于泡沫铝试件,边界处的泡沫明显未获得足够的压缩。尽管实验中所用泡沫的压缩强度高于蜂窝的压缩强度(图2)可能是造成此现象的重要原因,但就变形均匀性而言,蜂窝芯体更均匀,即芯体材料的吸能利用效率更高。

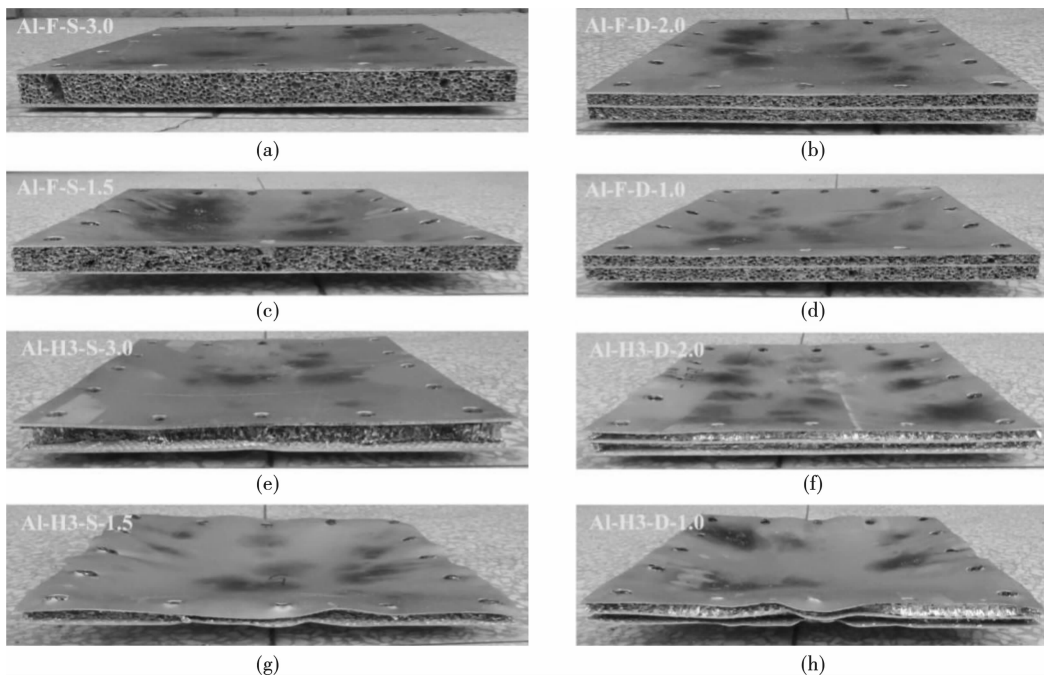


图6 泡沫铝及蜂窝铝夹芯试件的变形情况侧视图(0.5 kg TNT加载)

Fig. 6 Side view of deformation of sandwich specimens(0.5 kg TNT)

进一步地,图7和图8分别展示了泡沫铝试件和蜂窝铝试件面板和背板的变形挠度值在不同位置处的分布情况。图中横坐标为0的位置为面板或背板的中心处,横坐标值代表从中心处向平行于试件边界方向延伸的位置坐标(在实际试件中,沿4条

不同边界方向获得的挠度值仅存在较小的差异,图中仅展示一种情形的测量结果)。可以看到,不管是泡沫铝试件还是蜂窝铝试件,对于面板和背板而言,中心处的变形挠度值均为最大,越靠近边缘越低,该变形形式也符合实验的加载和边界约束特征。

进一步可以发现, 对于面/背板厚度为 3.0 mm 和 2.0 mm 两种情形, 板厚的试件(即 3 mm)变形挠度值相对较低; 但是对于面/背板为 1.5 mm 和 1.0 mm 的两种情形, 板厚的试件(即 1.5 mm)变形

挠度值却相对较高。造成该现象的原因与实验中采用的试件在芯体材料及构型等方面存在差异相关, 后续将单独讨论。

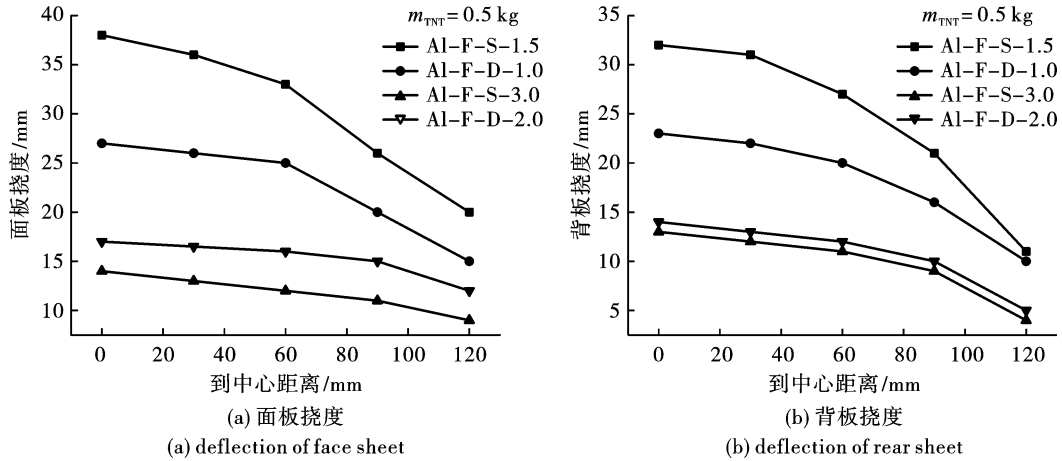


图 7 泡沫铝试件的面板及背板在不同位置处的面外挠曲度(0.5 kg TNT 加载)

Fig. 7 The out-of-plane deflection of the face sheet and rear sheet of the aluminum foam specimen at different positions(0.5 kg TNT)

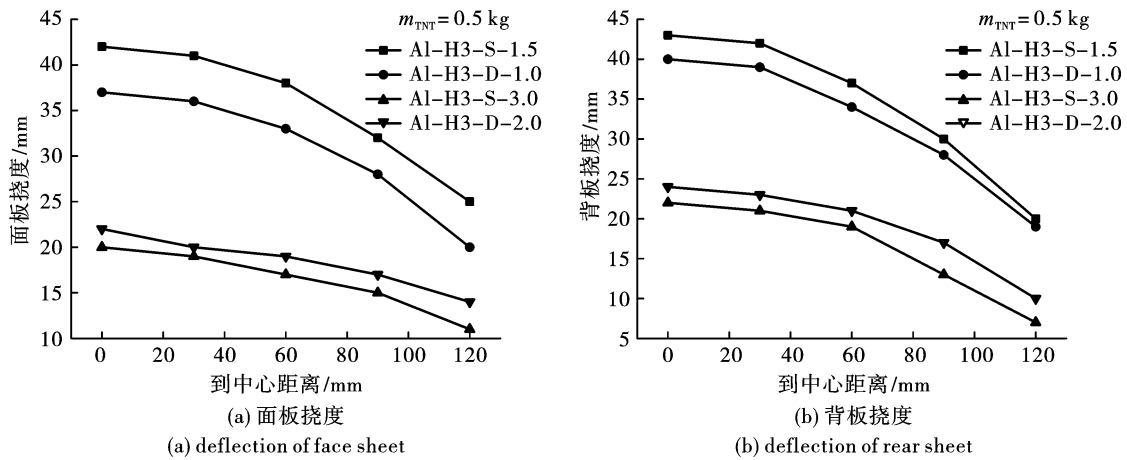


图 8 蜂窝试件的面板及背板在不同位置处的面外挠曲度(0.5 kg TNT 加载)

Fig. 8 The out-of-plane deflection of the face sheet and rear sheet of the honeycomb aluminum sandwich specimens at different positions(0.5 kg TNT)

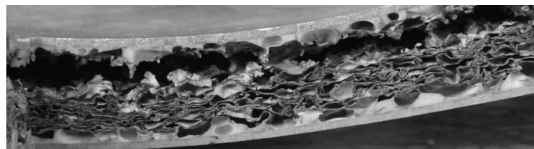
对于金属夹芯结构而言, 除了面板和背板金属材料的塑性变形吸收冲击能量外, 芯体部分的不可逆压缩变形是结构吸收能量的主要方式。图 9 给出了泡沫夹芯试件和蜂窝夹芯试件经过切割分解后的截面图。相比于初始状态, 两者芯部均发生了较为明显的压缩, 变得较为密实。尽管二者芯体都主要通过不可逆的塑性变形吸收能量, 但泡沫铝的不可逆变形主要表现为内部孔洞的大幅塌缩, 而蜂窝铝则表现为蜂窝壁沿厚度方向的多点规则屈曲形成塑性铰, 二者的抗冲击吸能模式存在明显差别。

## 2.2 芯体材料的影响

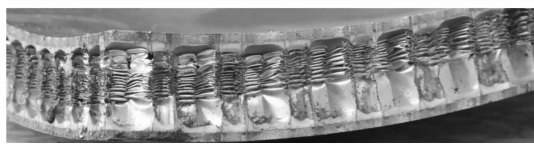
本文实验试件中三种芯体材料的压缩强度也有明显差异, 对于具有不同芯体的夹芯结构(例如蜂窝和泡沫), 尽管变形吸能模式明显不同, 但对其在实际工程应用中发挥冲击防护功能而言, 背板的变形及损坏程度是判断其吸能防护效果的直观指标。因此, 图 10 列出了上述试件在不同加载当量下的背板最大挠度值, 以讨论不同芯体下的吸能防护效果。

从图中结果可以发现, 在面板和背板厚度以及芯体构型都相同的情况下, 泡沫铝夹芯试件展现的

背板挠度或损伤最小,蜂窝边长为3 mm的蜂窝铝夹芯试件次之,边长为10 mm的蜂窝铝试件背板挠度或损伤最大。对于多孔泡沫或者蜂窝材料,冲击压缩加载下的平台强度值是影响其压缩吸能的关键参数,而从三种芯体的压缩曲线可以看出,三者的压缩强度值依次提高。但需要指出的是,芯体材料压缩强度在一定范围内的提升虽可以提高结构整体的吸能防护性能,但一般而言,多孔材料强度的提升会带来自身密度的增大,即结构整体的质量也会提高。对于类似于夹芯结构的轻质防护结构而言,单位质量下的比吸能防护效率提升才是优化设计的最终目标。因此,尽管实验结果展示出芯体材料的强度提升对结构的吸能表现有直接帮助,但是在实际的工程设计中,追求的应是具有较高比压缩强度的芯体材料。



(a) 泡沫夹芯试件芯体变形情况  
(a) Core deformation of foam sandwich specimen



(b) 蜂窝夹芯试件芯体变形情况  
(b) Core deformation of honeycomb sandwich specimen

图9 泡沫及蜂窝芯体的变形情况

Fig. 9 Deformation of foam and honeycomb core

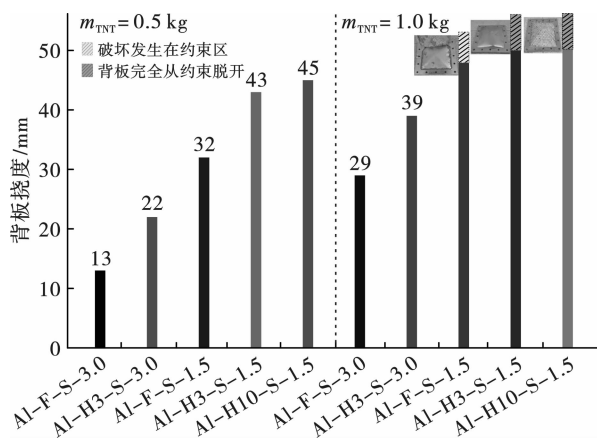


图10 两种加载强度下不同试件的变形情况

Fig. 10 Deformation of different specimens under two kinds of loading

### 2.3 芯体构型的影响

本文试件共有单层夹芯结构和双层夹芯结构两

种构型,为讨论芯体构型的影响,共有五组面密度完全一致的试件可以直接开展对比分析:Al-F-S-3.0与Al-F-D-2.0,Al-F-S-1.5与Al-F-D-1.0,Al-H3-S-3.0与Al-H3-D-2.0,Al-F-H3-1.5与Al-H3-D-1.0,Al-H10-S-1.5与Al-F-H10-1.0。

从图11(a)中0.5 kg TNT加载下试件Al-F-S-3.0与Al-F-D-2.0,以及Al-H3-S-3.0与Al-H3-D-2.0两组的变形挠度可发现,单层构型下的背板挠度变形相对较小,即吸能防护效果更佳;但是从试件Al-F-S-1.5与Al-F-D-1.0,Al-F-H3-1.5与Al-H3-D-1.0,以及Al-H10-S-1.5与Al-F-H10-1.0三组的变形挠度可发现,双层构型下的背板挠度变形却更小。从夹芯结构各部分吸能贡献可分析推测,造成上述现象的主要原因是:当面板和背面厚度较厚时(即上述3.0 mm和2.0 mm的情形),面/背板在爆炸冲击下发挥较多的防护吸能效果,弱化了芯体部分作用的发挥;而当面板和背板厚度较小时(即上述1.5 mm和1.0 mm的情形),则主要依靠芯体部分发挥吸能防护作用,此时内部的双层构型更能展示出其优势。图11(b)中展示的1 kg TNT加载时的结果可进一步佐证上述结论。可以看到,对于1 kg TNT加载的情形,上述所有具有等面密度的试件中,均是双层构型下的变形挠度值更低,即使背板出现断裂损坏,双层构型下的损坏也明显更轻微。这是因为,相比于0.5 kg TNT加载,1 kg TNT加载时的载荷强度显著提升,相比于加载输入的较大能量值,面/背板可发挥的吸能防护作用较为有限,此时还主要依靠芯体组分发挥吸能防护功效,即面/背板在吸能中的影响较小,进而更能反映出不同芯体的吸能防护差异。

尽管本文仅开展了针对单层芯体和双层芯体两种构型的实验,但从上述具有三种不同压缩强度的芯体均表现出一致的特征可以看出,等面密度的情形下,通过对内部芯体的合理优化设计是提升结构整体吸能防护效果的有效途径。

### 3 总结

通过实验观察了泡沫铝夹芯结构及蜂窝铝夹芯结构在较大当量爆炸加载下的变形及吸能行为,对比了不同结构在动态变形及吸能防护性能等方面的差异,获得的主要结论如下:

1) 爆炸加载下,泡沫夹芯结构及蜂窝夹芯结构均可通过芯体材料的大幅压缩变形吸收转换能量,但整体而言,蜂窝结构的变形均匀化更好。

2) 芯体吸能效率的发挥一方面与自身的比压

缩强度相关,另一方面也与表面/背板的强度及刚度相关。在实际应用中,需优化匹配芯体的压缩强

度与面/背板的强度及刚度,保证芯体材料可获得最大程度的压缩,发挥其吸能优势。

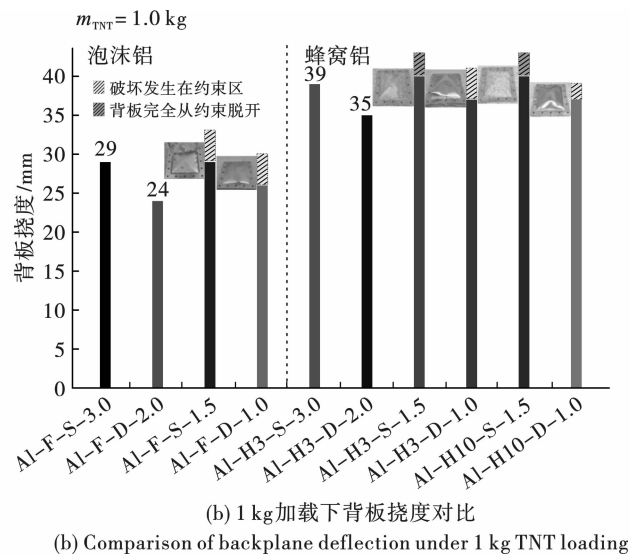
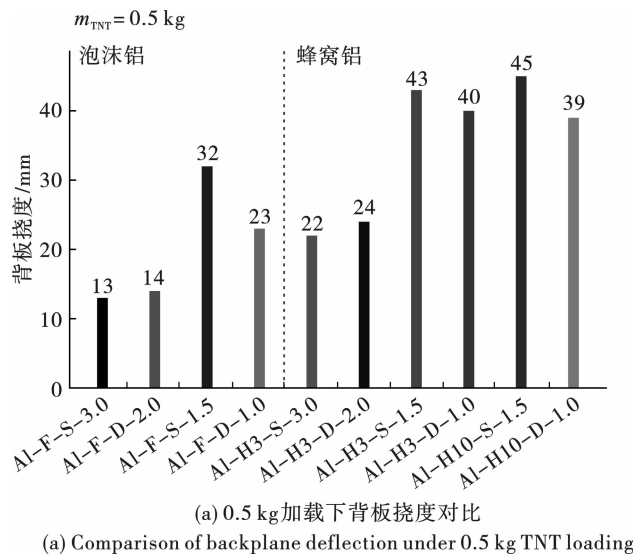


图 11 不同芯体构型试件的背板变形挠度值对比图

Fig. 11 Comparison of rear sheet deformation of different core configuration specimens

3) 实验中发现双层夹芯结构在吸能防护性能上优于等面密度的单层夹芯结构,即在等面密度的情形下,通过对内部芯体的合理结构优化是提升结构整体吸能防护效果的有效途径。

### 参考文献 (References)

- [1] 敬 霖, 王志华, 赵隆茂. 多孔金属及其夹芯结构力学性能的研究进展[J]. 力学与实践, 2015, 37(1): 1-24, 48.
- [1] JING Lin, WANG Zhi-hua, ZHAO Long-mao. Advances in studies of the mechanical performance of cellular metals and related sandwich structures [J]. Mechanics in Engineering, 2015, 37(1): 1-24, 48. (in Chinese)
- [2] VICTOR Birman, GEORGE A, KARDOMATEAS. Review of current trends in research and applications of sandwich structures [J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 142(1): 221-240.
- [3] FLECK N A, DESHPANDE V S. The resistance of clamped sandwich beams to shock loading [J]. Journal of Applied Mechanics, 2004, 71(3): 386-401.
- [4] JOHN W Hutchinson, XUE Zhen-yu. Metal sandwich plates optimized for pressure impulses [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2005, 47(4-5): 545-569.
- [5] RADFORD D D, MCSHANE G J, DESHPANDE V S, et al. The response of clamped sandwich plates with metallic foam cores to simulated blast loading [J]. International Journal of Solids and Structures, 2006, 43(7-8): 2243-2259.
- [6] 江大志, 郭 洋, 李长亮, 等. 双层夹芯复合材料结构横向冲击响应实验 [J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(6): 590-595.
- [6] JIANG Da-zhi, GUO Yang, LI Chang-liang, et al. Experimental investigation on response of two-core sandwich composite structures under transverse impact [J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(6): 590-595. (in Chinese)
- [7] FENG Zhu, WANG Zhi-hua, LU Guo-xing, et al. Some theoretical considerations on the dynamic response of sandwich structures under impulsive loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(6): 625-637.
- [8] LIU H, CAO Z K, YAO G C, et al. Performance of aluminum foam-steel panel sandwich composites subjected to blast loading [J]. Materials & Design, 2013, 47(Complete): 483-488.
- [9] SUN Guang-yong, PANG Tong, XU Cheng-long, et al. Energy absorption mechanics for variable thickness thin-walled structures [J]. Thin-Walled Structures, 2017, 118(Complete): 214-228.
- [10] 李汶蔚, 黄 威. 金属蜂窝夹芯结构抗水下冲击性能 [J]. 高压物理学报, 2020, 34(3): 158-166.
- [10] LI Wen-wei, HUANG Wei. Impulsive resistance of metallic honeycomb sandwich structures subjected to underwater impulsive loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(3): 158-166. (in Chinese)

- [16] YANG Rong-zhou, XU Ying, CHEN Pei-yuan, et al. Experimental study on SHPB cyclic impact of rubber-cement composite with different confine modes [J]. Archives of Civil Engineering, 2023, 69(2): 517-534.
- [17] WU Hao, FAN Ao-qi, ZHENG Zhi, et al. Dynamic mechanical properties and failure behaviors of brittle rock materials with a tunnel-shaped opening subjected to impact loads [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 25: 3285-3297.
- [18] HAN Zhen-yu, LI Di-yuan, LI Xi-bing. Dynamic mechanical properties and wave propagation of composite rock-mortar specimens based on SHPB tests [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(4): 793-806.
- [19] GE Jin-jin, XU Ying, HUANG Wei, et al. Experimental study on crack propagation of rock by blasting under bi-directional equal confining pressure load [J]. Sustainability, 2021, 13: 12093.
- [20] 徐 颖, 孟益平, 吴德义. 爆破工程 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2014.
- [20] XU Ying, MENG Yi-ping, WU De-yi. Blasting engineering [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2014. (in Chinese)
- [21] 刘瑞峰, 朱哲明, 杜郁美, 等. 爆炸载荷作用下不同长度裂纹的动态扩展规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S2): 3114-3123.
- [21] LIU Rui-feng, ZHU Zhe-ming, DU Yu-mei, et al. Study on dynamic propagation law of cracks with different lengths under blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(S2): 3114-3123. (in Chinese)
- [22] 杨荣周, 徐 颖, 刘家兴, 等. 爆炸荷载下刚-柔耦合围岩支护结构二维平板动态损伤破坏特征试验研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(6): 2513-2528.
- [22] YANG Rong-zhou, XU Ying, LIU Jia-xing, et al. Dynamic damage characteristics of two-dimensional flat plate of rigid flexible coupling surrounding rock supporting structure under blast loading [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2023, 54(6): 2513-2528. (in Chinese)
- [23] 张 盛, 王 峥, 张旭龙, 等. 不同尺寸砂岩动态力学性质和应力平衡性的试验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(10): 22-38.
- [23] ZHANG Sheng, WANG Zheng, ZHANG Xu-long, et al. Rock dynamic mechanical properties and dynamic stress balance of sandstone specimens with different sizes [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(10): 22-38. (in Chinese)
- [24] 杨荣周, 徐 颖, 刘家兴, 等. 砂岩与类砂岩材料的动态力学及破坏特征对比分析 [J]. 材料导报, 2023, 37(23): 70-80.
- [24] YANG Rong-zhou, XU Ying, LIU Jia-xing, et al. Comparative analysis of dynamic mechanics and failure characteristics of sandstone and quasi-sandstone material [J]. Materials Reports, 2023, 37(23): 70-80. (in Chinese)

(上接第 239 页)

- [11] THEOBALD M D, LANGDON G S. Large inelastic response of unbonded metallic foam and honeycomb core sandwich panels to blast loading [J]. Composite Structures, 2010, 92(10): 2465-2475.
- [12] JING Lin, WANG Zhi-hua, SHIM V P W, et al. An experimental study of the dynamic response cylindrical sandwich shells with metallic foam subjected to blast loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 71: 60-72.
- [13] WANG Tao, QIN Qing-hua, WANG Ming-shi, et al. Blast response of geometrically asymmetric metal honeycomb sandwich plate: Experimental and theoretical investigations [J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 105(1): 24-38.
- [14] 苏兴亚, 敬 霖, 赵隆茂. 爆炸载荷下分层梯度泡沫铝夹芯板的失效模式与抗冲击性能 [J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(6): 52-59.
- [14] SU Xing-ya, JING Lin, ZHAO Long-mao. Failure modes and shock resistance of sandwich panels with layered-gradient aluminum foam cores under air-blast loading [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(6): 52-59. (in Chinese)
- [15] SUN Guang-yong, ZHANG Jing-tao, LI Shi-qiang, et al. Experimental study on the dynamic responses of foam sandwich panels with different face sheets and core gradients subjected to blast impulse [J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 135: 1-20.
- [16] LI Xin, ZHANG Pei-wen, WANG Zhi-hua, et al. Dynamic behavior of aluminum honeycomb sandwich panels under air blast: experiment and numerical analysis [J]. Composite Structures, 2014, 108(Complete): 1001-1008.
- [17] CHEN Gan-chao, ZHANG Pan, LIU Jun. Experimental and numerical analyses on the dynamic response of aluminum foam core sandwich panels subjected to localized air blast loading [J]. Marine Structures, 2019, 65(1): 343-361.