

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0182

# 聚氨酯泡沫铝复合结构抗爆吸能试验 及数值模拟分析\*

张 勇

(江苏建筑职业技术学院建筑建造学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 通过对聚氨酯泡沫铝和混凝土组成的复合结构进行接触爆炸试验, 探讨了聚氨酯泡沫铝的吸能性能, 并进行数值模拟分析。结果显示: 聚氨酯泡沫铝的吸能性能明显优于泡沫铝, 吸能层厚度对吸能效果影响很大, 多层结构的聚氨酯泡沫铝吸能性能对比厚度一致的单层吸能层结构没有明显的改善; 在保证比较合理的吸能层厚度后, 防护结构的每一层材料层存在着一个最佳的厚度组合来保证复合层优良的抗爆性能。

**关键词:** 聚氨酯泡沫铝; 夹层结构; 抗爆试验; 吸能性能; 光滑粒子流体动力学

**中图分类号:** O383; TU599      **国标学科代码:** 13035; 43055      **文献标志码:** A

## Testing and numerical simulation of the antiknock energy absorption of polyurethane foam aluminum composite structure

ZHANG Yong

(School of Architecture Construction, Jiangsu Vocational Institute of Architecture Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu)

**Abstract:** Based on the contact explosion experiments, the absorption performance of the polyurethane foam aluminum and concrete composite structure was analyzed, and the relevant numerical simulation was analyzed and compared. First, polyurethane foam aluminum composite material was made through the pressurized equipment homemade. The hole of the aluminum foam was filled with polyurethane foam through pressure. Then the polyurethane foam aluminum composite material plates and concrete plates were fixed on the explosion experiment apparatus with high sensitivity of strain sensors, acceleration sensors and displacement sensors under the structure or surface. The experiments measured 5 groups of contact explosion experiment data under different structure combinations. Based on the change variables to the experiments, the calculation of numerical simulation experiments were supplemented to make up for other explosion experiments not involved due to lack of experiment conditions. The smooth particle hydrodynamic method (SPH) was used in the numerical simulation to avoid using Lagrange algorithm in explosion shock damage under the large deformation problem of mesh distortion problem. This method can more accurately reflect the explosion impact damage effect. Three kinds of calculation models were used to the numerical simulation. The main research was that the whole antiknock and absorption performance was changed with energy absorption layer thickness change and the number of the structure layer change of the composite structure. Results through explosion experiments and numerical analysis show that absorption performance of polyurethane foam aluminum is superior to that of aluminum foam, energy absorption layer thickness has a great influence on energy absorption effect, and the absorption performance of multilayer structure of polyurethane foam aluminum has no obvious improvement contrasting with the absorption performance of single layer structure with the same thickness. The multilayer structure of polyurethane foam aluminum also increases the difficulty of construction. Under certain conditions, with the reasonable energy absorption layer

\* 收稿日期: 2021-05-12; 修回日期: 2021-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(51478462, 51508565)

第一作者: 张 勇(1980—), 男, 博士, 讲师, [freebirdzy1980@163.com](mailto:freebirdzy1980@163.com)

thickness of the protective structure there is one best combination to ensure that the compound layer thickness of excellent antiknock performance. Finally draw the conclusions: the explosion shock wave energy absorption performance can be improved about 25% by polyurethane foam aluminum than by aluminum foam. The thickness of the polyurethane foam aluminum significantly affects on the energy absorption antiknock performance. The energy absorption performance can improve 50% with increasing the 100% thickness of polyurethane foam aluminum. Effect of changing the antiknock structural energy absorption layers combination is not obvious.

**Keywords:** polyurethane foam aluminum; sandwich structure; antiknock test; energy absorption performance; smooth particle hydrodynamics

近年来,使用新型吸能层设计夹层式结构成为新的研究方向和发展趋势,泡沫金属作为吸能材料已经广为使用。不少学者对泡沫铝的抗爆性能进行了研究。Shen 等<sup>[1]</sup>采用爆炸试验对面板材料为铝、芯层材料为泡沫铝的曲率夹芯板施加爆炸荷载来研究其动态响应,发现曲率夹芯板比等重量的实体板和夹芯平板能吸收更多的能量来缓解爆炸冲击,进一步说明了泡沫铝材料在抗爆炸冲击方面的优良性能。Merrett 等<sup>[2]</sup>对泡沫铝进行爆炸试验,研究受到冲击波压缩时的波阵面效应。Yun 等<sup>[3]</sup>分析泡沫铝材料在钢板夹层中的吸能缓冲作用,发现运用泡沫铝的牺牲层来加强混凝土墙可以显著地减少爆破压力的影响。

聚氨酯是一种比重小、价格低、易加工的发泡材料,由于其吸能减震的优良性能,已广泛应用于易损物品的缓冲包装、防护层的构建及相关结构的内部填充以及国防工程中<sup>[4-6]</sup>。Usta 等<sup>[7]</sup>对聚氨酯泡沫复合夹芯板的低速抗冲击性能进行了研究,Yüksel 等<sup>[8]</sup>对聚氨酯泡沫芯波纹夹芯板面内刚度和强度进行试验研究。

以上研究成果对泡沫铝和聚氨酯的吸能效果进行了试验验证,但仅仅是对泡沫铝进行单独的抗爆性能的研究还不够<sup>[9]</sup>,后来人们发现泡沫铝和聚氨酯复合结构会大大改良泡沫铝的缓冲吸能能力:张伟等<sup>[10]</sup>对泡沫铝-聚氨酯复合材料的静力学性能进行了分析;谢卫红等<sup>[11-12]</sup>和张勇等<sup>[13]</sup>对聚氨酯泡沫铝复合材料动力学性能进行了相关冲击试验研究;Yu 等<sup>[14]</sup>对单胞铝蜂窝填充聚氨酯试件在压缩作用下的变形模式和力-位移曲线进行了实验和数值模拟。但文献<sup>[10-14]</sup>也只是从静、动态力学性能方面进行了试验。

针对聚氨酯泡沫铝的抗爆试验还未见过。本文将开孔泡沫铝板中填充聚氨酯泡沫,制作聚氨酯泡沫铝新型复合材料,增加泡沫铝的吸能效果,并将其作为新型吸能夹层材料使用,研究其作为吸能夹层在混凝土板复合结构上的抗爆吸能效果,用实爆效果分析聚氨酯泡沫铝的抗爆性能,并在验证相关试验的可靠性的基础上进行数值模拟计算和分析,以期对这种新型复合材料在今后的工程应用上提供更加可靠的试验支撑。

## 1 试验设计

本文采用 C60 混凝土与夹层材料的复合结构进行爆炸试验。混凝土尺寸分为 500 mm×500 mm×100 mm 和 500 mm×500 mm×220 mm 两种。在首层混凝土上面加盖 100 mm 厚的覆土层,覆土层表面受到 0.5 kg 的 TNT 炸药接触爆炸。选用了泡沫铝板和聚氨酯泡沫铝板作为夹层材料。采用不同的夹层材料厚度和组合方式作为变量,一共设计了 5 组试验来研究聚氨酯泡沫铝的抗爆性能。

### 1.1 试件的制备

#### (1) 聚氨酯泡沫铝的制备

聚氨酯泡沫铝采用聚氨酯的黑料(甲苯二异氰酸酯:PM200)、白料(聚醚三元醇:N303,羟值为 470 mg KOH/g)以及泡沫铝混合发泡制备。泡沫铝采用上海众汇泡沫铝材有限公司制作的开孔泡沫铝,参数见表 1。

先将黑料按一定量加入泡沫铝板中,使其均匀地分布于泡沫铝板上,待其渗透后,再将白料按照质

量比为 1 : 1 加入, 让其和黑料混合反应发泡, 通过自制的发生容器加压将产生的聚氨酯泡沫填充到泡沫铝板的空隙中。经过发泡而成的聚氨酯泡沫成白色状, 填充于泡沫铝的空隙中, 如图 1 所示。

表 1 泡沫铝板材的性能参数表

Table 1 Performance of aluminum foam plank parameter

孔径	孔隙率	通孔率	体积质量	抗压强度	抗弯强度	抗拉强度
1.66 mm	68~78%	90~95%	0.60~0.85 g/cm <sup>3</sup>	8.61 MPa	8.06 MPa	3.41 MPa

经过称重, 聚氨酯泡沫铝板的重量较泡沫铝板的重量有较大增加, 添加聚氨酯后的泡沫铝板增重 73.79%~89.29%, 聚氨酯增加效果比较显著, 这也对之后的抗爆吸能试验提供了较理想的聚氨酯泡沫铝复合材料。

(2) 混凝土的制备

混凝土配合比参照相关的标准和满足实际需求的情况下, 如表 2 所示。

P.O 52.5 普通硅酸盐水泥: 石子满足最大粒径 20 mm 连续级配要求; 硅粉为上海天恺硅粉材料有限公司生产的微硅粉; 粉煤灰为 II 级粉煤灰; 高效减水剂为聚羧酸系高性能减水剂。

本次试验的混凝土板采用人工拌和的方式, 将原材料按照相关的配合比配制, 按照标准规程拌和混凝土, 将其浇入到模具中, 浇筑完成后进行充分振捣, 最后将制作好的混凝土试件在合适的环境条件下养护 28 d 后, 再进行爆炸试验。

1.2 试验组的设计

试验采用聚氨酯泡沫铝作吸能夹层的混凝土复合板结构, 研究 TNT 炸药在装药量为 0.5 kg 的爆炸荷载作用下的破坏情况。设计 5 种不同的组合方式如表 3 所示。

表 3 试验组设计

Table 3 Design of the test

工况	组合方式
1	覆土层(100 mm)/混凝土层(220 mm)
2	覆土层(100 mm)/混凝土层(100 mm)/泡沫铝层(20 mm)/混凝土层(100 mm)
3	覆土层(100 mm)/混凝土层(100 mm)/聚氨酯泡沫铝层(20 mm)/混凝土层(100 mm)
4	覆土层(100 mm)/混凝土层(100 mm)/聚氨酯泡沫铝层(40 mm)/混凝土层(100 mm)
5	覆土层(100 mm)/混凝土层(66 mm)/聚氨酯泡沫铝层(20 mm)/混凝土层(66 mm)/ 聚氨酯泡沫铝层(20 mm)/混凝土层(66 mm)

试验设计的 5 组工况涉及了夹层材料种类、厚度和组合方式三个参数, 通过爆炸后的试验现象和数据来分析聚氨酯泡沫铝的抗爆性能。工况 2 和 3 主要对比聚氨酯泡沫铝和泡沫铝抗爆性能的优劣, 工况 4 和 5 主要研究夹层材料厚度和组合方式对结构的抗爆性能的影响。工况 1 作为对照试验, 研究单层混凝土结构和复合层结构抗爆性能的差异。



图 1 聚氨酯泡沫铝板(左)和泡沫铝板(右)对比(尺寸: 1 m×1 m)

Fig. 1 Polyurethane foam aluminum (left) and aluminum plates (right) (size: 1 m×1 m)

表 2 混凝土的配合比(kg/m<sup>3</sup>)

Table 2 Mixture ratio of concrete (kg/m<sup>3</sup>)

水	水泥	硅粉	粉煤灰	砂	石子	减水剂
150	370	50	80	595	1 155	9

## 2 野外爆炸试验

试验定制了一个高 1 m 的钢支架,其顶部按照混凝土试件的尺寸制作,保证试验组的底部悬空。选择开阔的地带安放钢支架,在支架旁就近的位置进行混凝土板和夹层测点的布置工作,在钢支架上布设测点电路转接器,测点布置完成后,将混凝土板和夹层板叠合在一起固定在支架上,并在顶层混凝土上层进行覆土,如图 2 所示。

由于爆炸冲击波的冲击范围较大,将靠近爆炸中心位置的数据传输线穿入钢管中,防止爆炸冲击破坏数据线,同时在距离爆炸位置 20 m 的掩体里设置数据采集系统,从掩体内接线连接测点,防止爆炸冲击波对数据采集系统造成影响,如图 3 所示。本次实验采用的是以 NI 9215 数据采集模块为核心的数据采集系统(采集系统还包括 YE5853B 型电荷放大器,MSO 3014 示波仪,CS 动态电阻应变仪)。数据通过 USB 接口传入计算机,通过自行改良设计的火箭炮动力学参数测量系统进行收集和整理,根据试验方案设置 5 组试验,如图 4 所示。



图 2 试验组的安放  
Fig. 2 Test site layout



图 3 数据采集系统  
Fig. 3 Data acquisition system



图 4 现场 5 组试验布置  
Fig. 4 Five groups experimental setups

试验组设置完毕后,调整好数据采集系统,确认各个测点数据情况显示正常后,疏散周围人员,将 0.5 kg 药量的 TNT 炸药置于覆土层上起爆炸药。

本次试验通过在试验组的合理位置布设测点来记录爆炸破坏的相关参数,包括压力、位移、加速度、应变。各个位置的测点采用的传感器主要有压力传感器、应变片和位移传感器。各类型测点均布置在装药正下方,其中压力和加速度测点布置在每层介质的下表面,在结构下表面布置一个位移测点,其余位置不布置位移和速度测点,位移和速度通过加速度积分得到。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 试验现象分析

工况 1 中,混凝土板上部出现从中心向外延伸的凹陷,中心深度为 1~2 cm,直径约为 30 cm;混凝土侧面出现从上表面一直延伸到底部的裂缝;混凝土底部发生坍塌,形成直径为 10~15 cm 的坑洞。

工况 2 和 3 分别采用了泡沫铝和聚氨酯泡沫铝作为吸能夹层进行对比。两组混凝土板底部与工况

1 相比保持着较好的完整性。工况 2 中底部混凝土的破坏比工况 3 中更严重, 这表明在同样爆炸荷载的情况下, 聚氨酯泡沫铝作为夹层比泡沫铝作为夹层对底部结构有着更好的保护能力。工况 2 和 3 的夹层材料受到爆炸冲击作用发生大面积的挤压变形。泡沫铝板沿着凹陷的位置出现大量的裂缝, 聚氨酯泡沫铝板的孔隙被聚氨酯泡沫填满, 使得材料板具有一定的弹性, 因此其挤压变形要小于泡沫铝板, 如图 5 所示。



图 5 聚氨酯泡沫铝夹层(左)和泡沫铝夹层(右)受破坏情况对比

Fig. 5 Differences in the damage between the polyurethane foam aluminum sandwich (left) and aluminum foam sandwich (right)

工况 4 的复合板中, 改变了中间夹层材料的厚度, 从爆炸破坏的现象来看, 上部混凝土板没有完全碎裂, 下部混凝土底板的背部出现少量的细微裂缝, 整体混凝土的完整性优于工况 3。因此, 聚氨酯泡沫铝吸能层的厚度是混凝土复合板的抗爆性能的重要影响因素。工况 5 在材料分层上作出了相应的调整, 将 40 mm 的夹层材料分作两层, 从试验结果可以看出, 将同样厚度的单层聚氨酯泡沫铝分为两层放入混凝土的组合方式对结构抗爆性能没有明显提高, 而且还增加了施工难度(见图 6)。

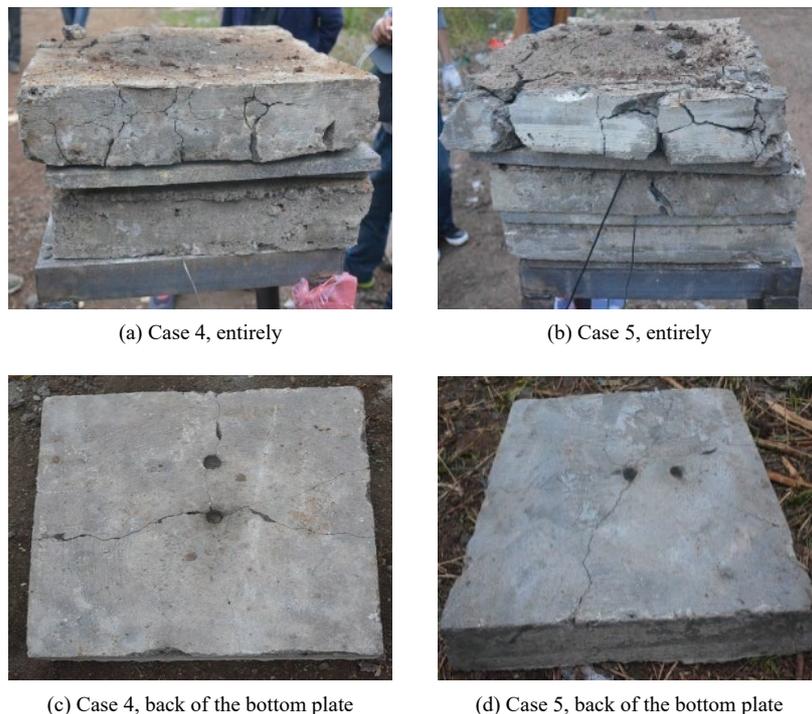


图 6 两种工况受破坏情况

Fig. 6 Damage in two cases

### 3.2 压力和应变的测试结果分析

从图 7 的底部压力测试可以看出, 工况 4 采用的加厚的聚氨酯泡沫铝对冲击波压力的衰减效果最好, 其次是工况 3 采用的聚氨酯泡沫铝材料夹层, 工况 2 采用的泡沫铝夹层的衰减效果最差。聚氨酯泡

沫铝对比泡沫铝, 压力衰减性能可以提高 25% 左右, 而工况 4 的聚氨酯泡沫铝增加厚度, 比工况 3 的夹层吸能性能又提升了 50% 左右, 所以夹层厚度的增加对于吸能性能的提升非常重要。

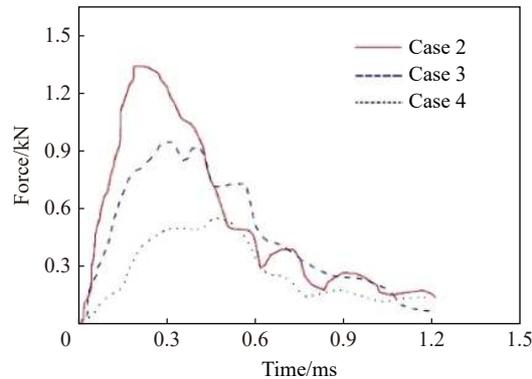


图 7 底部测点压力-时间曲线

Fig. 7 Pressure force-time curves at the bottom point

### 3.3 位移的测试结果分析

在最后的一层混凝土板的底部设置位移测点, 可以测得最后一层混凝土板受冲击波破坏后发生的相应变形而产生的位移, 如图 8 所示。可以看出: 3 组工况底部混凝土位移随着时间变化, 位移均呈现逐渐增长的趋势; 其中工况 2 位移增长最快, 这证明聚氨酯泡沫铝夹层对整体防护结构的抗爆性能的提升要优于泡沫铝; 对比工况 3、4 发现, 聚氨酯泡沫铝夹层的厚度增加 1 倍, 防护结构的底部位移减小大约 30%~40%。

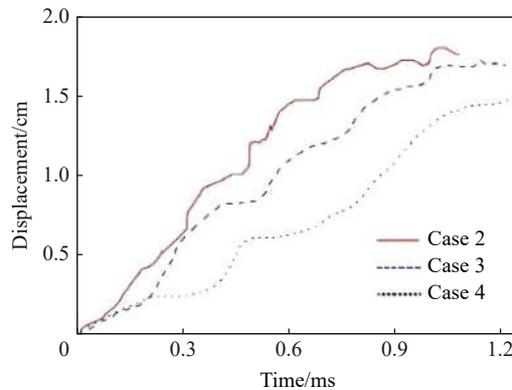


图 8 底部测点位移曲线图

Fig. 8 Displacement curves at the bottom point in three different cases

## 4 数值模拟

### 4.1 复合板各层结构模型的建立

计算采用 cm-g- $\mu$ s 单位制, 复合板各层在炸药的巨大冲击波作用下的破坏情况采用光滑质点流体动力学 (smooth particle hydrodynamics, SPH) 来模拟, 避免了采用拉格朗日算法时在爆炸冲击破坏的大变形问题下的网格畸变问题, 可以比较精确地反映爆炸冲击破坏的效应。同时, SPH 方法能够方便准确处理不同介质的交界面问题, 适用于计算试验的复合材料层板在爆炸冲击作用下的破坏情况。

根据所做的五组试验, 模拟对应的工况的情况。先采用和试验组一样的模型, 验证数值模拟试验的可靠性。模型由炸药、土壤、混凝土、泡沫铝和聚氨酯泡沫铝组成, 尺寸和试验组一致, 如图 9 所示。

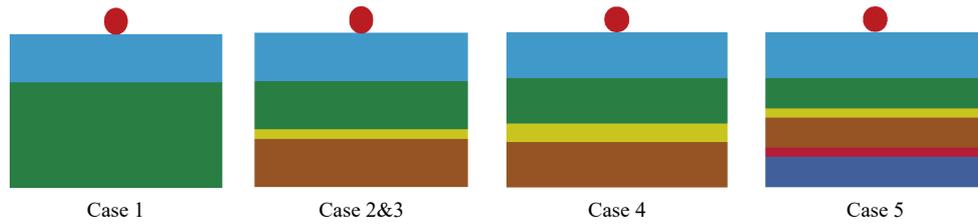


图 9 建立试验模型

Fig. 9 Test model establishment

数值模拟采用的相关材料模型为: 炸药采用软件提供的\**MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN* 模型, 选用\**EOS\_JWL* 状态方程来模拟炸药爆轰过程中压力-体积的关系; 土壤采用模型\**MAT\_SOIL\_AND\_FOAM*; 混凝土采用\**MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CONCRETE* 模型; 泡沫铝采用\**MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CONCRET* 蜂窝结构模型, 泡沫铝密度为  $650 \text{ kg/m}^3$ , 泊松比为 0.29; 聚氨酯采用\**MAT\_CRUSHABLE\_FOAM* 模型<sup>[15]</sup>; 聚氨酯泡沫铝采用\**MAT\_CRUSCHABLE\_FOAM* 模型, 密度为  $860 \text{ kg/m}^3$ , 泊松比为 0.29, 其余相关参数参照系统内提供的数值。

应力-应变的控制曲线数据采用现场试验得到的结果, 其余相关的参数由系统内相关模型提供。

图 10 给出了爆炸应力波在复合防护结构中的传播过程, 可以看出: 在冲击波通过聚氨酯泡沫铝后, 应力值衰减非常明显, 这主要是由于聚氨酯泡沫铝吸收了大量能量, 衰减了爆炸冲击波; 冲击波穿过夹层材料后到达底层混凝土, 在底端固定位置处应力不断增加; 应力波在上下层混凝土板中来回反射, 应力波一直在不断变化。

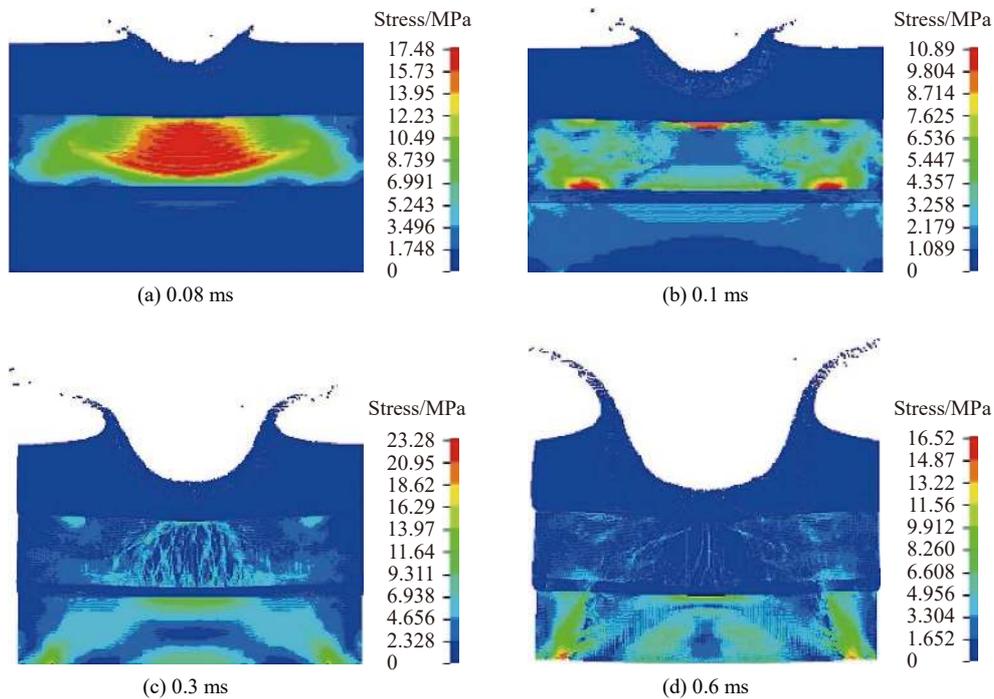


图 10 模型 3 的爆炸应力波传播图

Fig. 10 Blast stress wave spread of model 3

#### 4.2 数据一致性验证

对工况 3~5 分别取底部混凝土上表面的压力试验值和模拟值曲线进行验证, 如图 11 所示。从图中可以看出, 数值模拟曲线的峰值和试验数据有一定差距, 但是整体走势是大致相同的。由于数值模拟

设定参数和环境都是在理想状态下的,相对于试验数据而言,数值模拟曲线都比较平缓,波动不大。试验受到的影响因素较多,比如每组装药密度可能有差别,以及试验时爆炸震动导致每层材料板位置移动等等,因此试验数据相关的波动可能较大。从对比结果来看,试验和模拟的破坏现象基本一致,同时数据误差也符合相关要求,从而证明了试验和模拟的结果在一定程度上是相符合的。

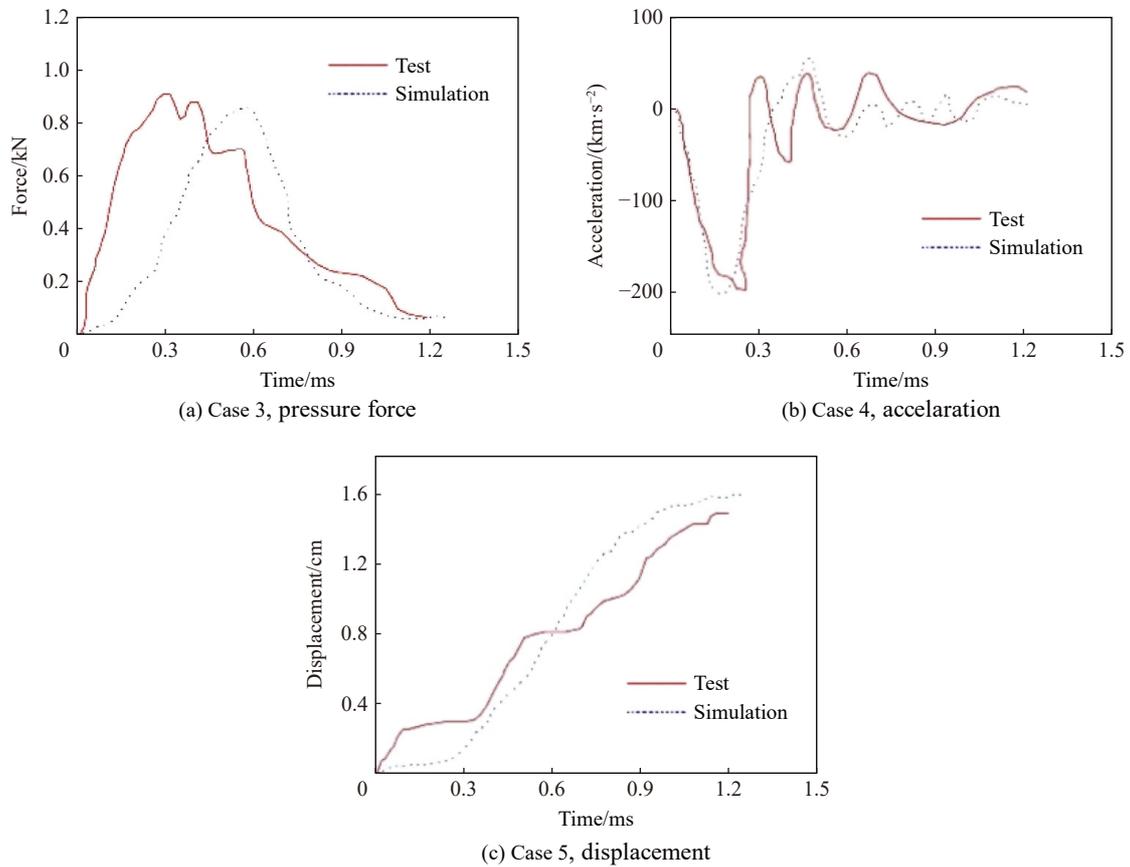


图 11 底部混凝土测点压力的试验和模拟结果验证

Fig. 11 Stress test and simulation contrast of the concrete points at the bottom

### 4.3 不同材料层厚度的数值模拟分析

因为实爆试验的条件要求比较高,成本也相应较高,要想将各种影响因素下的对照试验都做到耗费太大,因此可以利用数值模拟完善试验组,得出相应的预想结论。考虑不同材料层的厚度改变对复合结构抗爆性能的影响,设置了三个对照模型组,分别为工况 6~8,模型参数见表 4。

表 4 改变材料层厚度的试验模型

Table 4 Change material thickness of the test model

工况	组合方式
6	覆土层(100 mm)/混凝土层(120 mm)/聚氨酯泡沫铝层(20 mm)/混凝土层(100 mm)
7	覆土层(100 mm)/混凝土层(110 mm)/聚氨酯泡沫铝层(30 mm)/混凝土层(100 mm)
8	覆土层(100 mm)/混凝土层(100 mm)/聚氨酯泡沫铝层(30 mm)/混凝土层(110 mm)

构建起来的工况 6~8 主要研究各层材料不同组合厚度的影响情况,其 0.9 ms 时和工况 4 的破坏效果图如图 12 所示。

从图 12 可以看出,在 0.9 ms 时工况 6 的下层混凝土出现比工况 4 更宽的剪切裂缝,且工况 6 上层混

凝土出现大量的裂缝,混凝土发生层裂破坏。可以分析得出由于工况 6 加厚的是混凝土层,混凝土层不具备吸收冲击波的能力,工况 6 采用的 20 mm 厚的聚氨酯泡沫铝吸收的能量较少,冲击波通过入射和在不同介质分界面的反射对上下混凝土层造成了较大的破坏,因此,在 20 mm 厚的聚氨酯泡沫铝吸能层的基础上加厚混凝土,得到的防护效果不够理想。

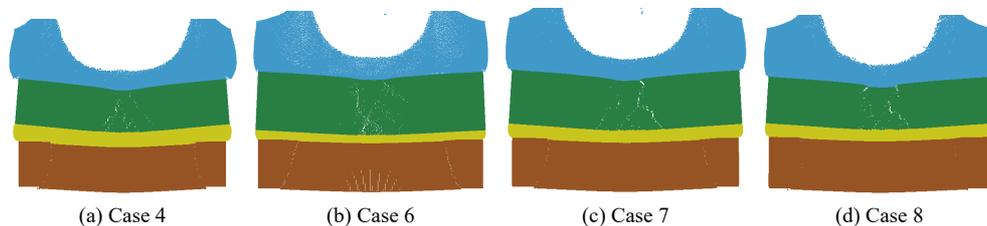


图 12 不同工况 0.9 ms 时的破坏对比

Fig. 12 Destruction contrast in different cases at 0.9 ms

工况 7 的上层混凝土产生的裂缝比工况 4 的大,破坏较为严重,但是观察到底层混凝土的破坏和工况 4 的相当,整体的防护效果和工况 4 的相差不大,说明 30 mm 厚的聚氨酯泡沫铝吸能层已经能够达到在模拟的爆炸当量下的抗爆性能要求。上层混凝土的破坏较工况 4 严重主要是由于 30 mm 的吸能层吸收的能量不如工况 4 采用的 40 mm 吸能层,冲击波在不同的介质面上发生的反射现象比较明显,反射冲击波对上层混凝土造成的破坏较为严重,和工况 6 的情况类似。

工况 8 在 30 mm 吸能层的基础上加厚底部混凝土,获得了较好的抗爆效果。在 0.9 ms 时,工况 8 的上层混凝土同样发生了较为严重的破坏,但是底部混凝土保持了很好的完整性。底部混凝土层沿着约束边开始发生剪切破坏,剪切裂缝比工况 4 的更小,混凝土中段发生小部分的脱落。总体来说,工况 8 的复合防护结构形式的抗爆性能要优于工况 4。

取模型的底部混凝土的上表面压力和底部速度时程曲线,对比分析相关的破坏情况。对于工况 4~7,由于它们底部的混凝土厚度相同,比较分析其压力曲线,如图 13 所示。对于工况 4 和 8,截取底部的速度时程曲线进行分析,如图 14 所示。

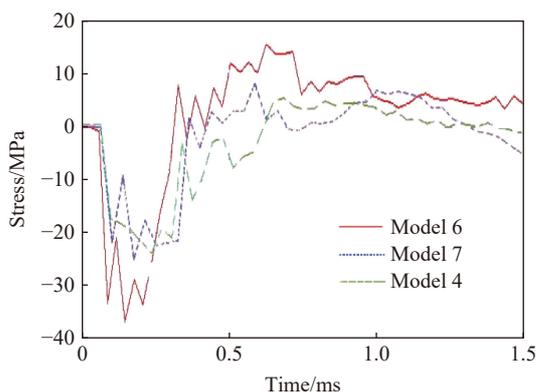


图 13 工况 4、6、7 底部混凝土节点应力对比

Fig. 13 Stress contrast of case 4, 6 & 7 nodes of the concrete at the bottom

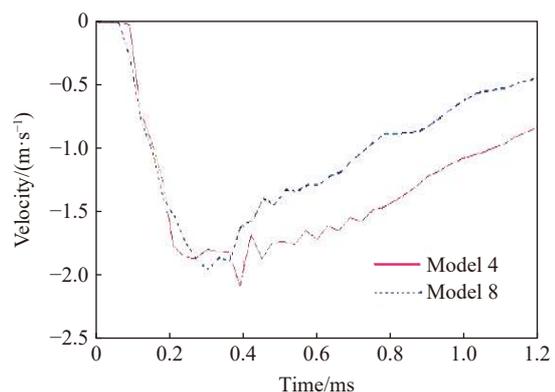


图 14 工况 4、8 底部混凝土节点速度对比

Fig. 14 Velocity contrast of model 4 & 8 node of the concrete at the bottom

从图 13 中看出工况 6 的底部应力峰值大于工况 4 和 7,说明加厚上层的混凝土并没有有效减缓冲击波对底部混凝土的冲击破坏;而工况 4 和 7 的曲线应力峰值相当,表明 30 mm 厚的聚氨酯泡沫铝吸能层能够满足防护结构的要求。从图 14 的速度对比曲线可以看出,工况 8 的底部混凝土后期变形速度比工况 4 大约减少 60% 左右,表现出了该种构型抗爆炸冲击的优良性能。

综合上述的相关现象可以看出,吸能层的厚度是复合结构整体抗爆性能的重要影响因素,一个合适的吸能厚度对于防护结构的抗爆性能非常重要。从工况 6、7、8 的上层混凝土的破坏情况来看,可以分析出冲击波在破坏复合防护层结构的时候,不同介质之间的反射波会造成巨大的破坏,是复合层结构设计必须考虑的环节。在一定炸药当量情况下,保证了比较合理的吸能层厚度后,防护结构的每一层材料层存在着一个最佳的厚度组合来保证复合层优良的抗爆性能。

## 5 结 论

(1)从爆炸试验现象和测试结果来分析,聚氨酯泡沫铝相对泡沫铝对爆炸冲击波的吸能效果可以提高 25% 左右,聚氨酯泡沫铝的厚度对吸能抗爆效果影响显著,厚度增加 1 倍,吸能性能可以提升 50% 左右,而将同样厚度的聚氨酯泡沫铝层分成两层进行试验,并没有多少改善,从而说明改变结构层的组合方式并没有太大影响。

(2)从对应的数值模拟试验中可以得知,吸能层的厚度是复合结构整体抗爆性能的重要影响因素,在一定炸药当量情况下,保证了比较合理的吸能层厚度后,防护结构的每一层材料层存在着一个最佳的厚度组合来保证复合层优良的抗爆性能。针对本试验,30 mm 厚的聚氨酯泡沫铝吸能层可以胜任防护结构的吸能任务,而 40 mm 厚的聚氨酯泡沫铝吸能层,吸能效果提升并不明显。

## 参考文献:

- [1] SHEN J H, LU G X, WANG Z H, et al. Experiments on curved sandwich panels under blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(9): 960–970. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.03.002.
- [2] MERRETT R P, LANGDON G S, THEOBALD M D. The blast and impact loading of aluminium foam [J]. *Materials & Design*, 2012, 44: 311–319. DOI: 10.1016/j.matdes.2012.08.016.
- [3] YUN N R, SHIN D H, JI S W, et al. Experiments on blast protective systems using aluminum foam panels [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2014, 18(7): 2153–2161. DOI: 10.1007/s12205-014-0092-3.
- [4] 曾贵玉, 聂福德, 刘兰, 等. 聚氨酯原位结晶包覆 HMX 的研究 [J]. *含能材料*, 2011, 19(2): 138–141. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.02.004.  
ZENG G Y, NIE F D, LIU L, et al. In-situ crystallization coating HMX by polyurethane [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2011, 19(2): 138–141. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.02.004.
- [5] 朱长春, 翁汉元, 吕国会, 等. 国内外聚氨酯工业最新发展状况 [J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2012, 10(5): 1–20. DOI: 10.16572/j.issn1672-2191.2012.05.001.  
ZHU C C, WENG H Y, LYU G H, et al. The latest development status of polyurethane industry at home and abroad [J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2012, 10(5): 1–20. DOI: 10.16572/j.issn1672-2191.2012.05.001.
- [6] 王冬梅, 夏绍灵, 张琳琪, 等. 聚氨酯/纳米复合材料的制备方法的研究进展 [J]. *高分子通报*, 2011(3): 65–72. DOI: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2011.03.015.  
WANG D M, XIA S L, ZHANG L Q, et al. Research progress in the Preparation methods of polyurethane/Nano-composite materials [J]. *Polymer Bulletin*, 2011(3): 65–72. DOI: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2011.03.015.
- [7] USTA F, TÜRKMEN H S, SCARPA F. Low-velocity impact resistance of composite sandwich panels with various types of auxetic and non-auxetic core structures [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 163: 107738. DOI: 10.1016/J.TWS.2021.107738.
- [8] YÜKSEL E, GÜLLÜ A, ÖZKAYNAK H, et al. Experimental investigation and pseudoelastic truss model for in-plane behavior of corrugated sandwich panels with polyurethane foam core [J]. *Structures*, 2021, 29: 823–842. DOI: 10.1016/J.ISTRUC.2020.11.058.
- [9] 隋顺彬, 康建功, 孙建虎. 泡沫铝在油气爆炸荷载作用下的吸能减冲击性能 [J]. *爆破*, 2011, 28(2): 30–34. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2011.02.009.  
SUI S B, KANG J G, SUN J H. Energy absorption and vibration reduction performance of aluminum foam under fuel-air explosion loading [J]. *Blasting*, 2011, 28(2): 30–34. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2011.02.009.
- [10] 张伟, 齐明思, 赵志芳, 等. 泡沫铝-聚氨酯复合材料制备及力学性能分析 [J]. *包装工程*, 2017, 38(21): 35–40. DOI: 10.19554/

- j.cnki.1001-3563.2017.21.008.
- ZHANG W, QI M S, ZHAO Z F, et al. Preparation and mechanical property analysis of aluminum foam-polyurethane composites [J]. *Packaging Engineering*, 2017, 38(21): 35–40. DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2017.21.008.
- [11] 谢卫红, 杜红涛, 李顺才. 泡沫铝与聚氨酯泡沫铝吸能特性对比 [J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2011, 27(2): 307–311.
- XIE W H, DU H T, LI S C. Comparative study of energy absorption performance for open-cell aluminum and polyurethane foam aluminum [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2011, 27(2): 307–311.
- [12] 谢卫红, 杜红涛, 李顺才. 聚氨酯泡沫铝复合材料动态力学实验 [J]. *复合材料学报*, 2011, 28(3): 103–108. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.2011.03.030.
- XIE W H, DU H T, LI S C. Experimental study on dynamic mechanical performance of polyurethanealuminum foams composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2011, 28(3): 103–108. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.2011.03.030.
- [13] 张勇, 陈力, 陈荣俊, 等. 聚氨酯泡沫铝动力学性能实验及本构模型研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2014, 34(3): 373–378. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)03-0373-06.
- ZHANG Y, CHEN L, CHEN R J, et al. Dynamic mechanical property experiment and constitutive model establishment of polyurethane foam aluminum [J]. *Explosion and Shock waves*, 2014, 34(3): 373–378. DOI: 10.11883/1001-1455(2014)03-0373-06.
- [14] YU R, LUO W, YUAN H, et al. Experimental and numerical research on foam filled re-entrant cellular structure with negative Poisson's ratio [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 153: 106679. DOI: 10.1016/J.TWS.2020.106679.
- [15] 张勇. 地面防护工程抗爆复合材料与结构研究 [D]. 江苏, 徐州: 中国矿业大学, 2014: 26, 99, 103.
- ZHANG Y. Research on the antiknock composite material and structure of ground defense engineering [D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2014: 26; 99; 103.

(责任编辑 王小飞)