文章编号：1000-5773(2013)05-0699-05

爆炸载荷作用下不同面板厚度对泡沫铝夹芯板动力响应的影响*

张培文，李　鑫，王志华，闫庆荣

（太原理工大学应用力学与生物医学工程研究所，山西太原　030024）

摘要：应用 LS-DYNA3D 有限元软件，对泡沫铝夹芯板在爆炸载荷作用下的动力响应进行了数值分析。通过面板厚度及芯层厚度的不同组合，分析了夹芯板在爆炸载荷作用下的变形模式及能量吸收规律。考虑了芯层压缩量、后面板挠度以及芯层和后面板能量的吸收情况。模拟结果对结构的抗爆能力工程设计具有一定的参考价值。

关键词：爆炸载荷；泡沫铝；夹芯板；数值模拟

中图分类号：O347　　**文献标识码**：A

1　引　言

多孔金属夹芯结构在航空航天飞行器、高速轨道车辆、汽车、高速舰船、核工业等领域有着非常广阔的应用前景，具有轻质、高比刚度和高比强度及优异的能量吸收能力等特点，在受到强冲击载荷作用时，可有效地保护置于夹芯结构后的人和设备等重要结构物[1-5]。

近年来，国内外许多学者对夹芯结构在爆炸载荷作用下的动态力学行为进行了研究。Zhu 等[2]、Dharmasena 等[3]和 Nurick 等[6]研究了爆炸载荷作用下，蜂窝夹芯结构的变形模式及吸能机理。Radford 等[7]利用泡沫子弹撞击金属夹芯结构模拟爆炸载荷的作用。McShane 等[8-9]研究了棱柱状晶格芯层夹芯结构在水下爆炸的动力响应。以上文献研究的均是前、后面板厚度相同时夹芯结构的动力响应。

本研究应用 LS-DYNA3D 有限元软件，对前、后面板厚度不同时多孔金属夹芯板在爆炸载荷作用下的动力响应进行数值分析。计算中分别考虑面板厚度、炸药量和芯层厚度对泡沫夹芯板动力响应的影响。通过对炸药量、面板厚度及芯层厚度的不同组合，分析结构在爆炸载荷作用下的变形模式及能量吸收规律。

2　计算模型及材料参数

考虑不同当量炸药在夹芯板中心正上方 200 mm 处作用下泡沫夹芯板的动力响应，分别考虑炸药量(w)为 15、20、25、30 和 35 g 的 5 种情况。泡沫铝夹芯板的尺寸为 $2L\times 2L=300\ \text{mm}\times 300\ \text{mm}$，由于载荷、结构及几何的对称性，利用前处理程序 FEMB V28(ETA. COM，美国)将模型简化成 $L\times L=150\ \text{mm}\times 150\ \text{mm}$ 的 1/4 模型，其中有两边为固支边界，另外两边为对称边界。分别考虑前、后面板厚度不同时对夹芯板动力响应的影响，前面板厚度为 $H_1=1,2,3,4$ mm，后面板厚度为 $H_2=1$ mm。芯层厚度取 $C=10$ mm 和 $C=20$ mm 两种。

* **收稿日期**：2012-10-20；**修回日期**：2012-12-26

基金项目：国家自然科学基金(11172196)；山西省留学回国人员科研资助项目(2013-046)

作者简介：张培文(1985—)，男，硕士，主要从事冲击动力学研究. E-mail：zhangpw258@yeah. net

通讯作者：闫庆荣(1960—)，女，高级工程师，主要从事冲击动力学研究. E-mail：yanqingrong@tyut. edu. cn

计算中，铝面板采用双线性随动强化弹塑性模型(＊MAT_PLASTIC_KINEMATIC)进行描述，密度 $\rho=2.7\ \mathrm{g/cm^3}$，弹性模量 $E=72$ GPa，屈服强度 $\sigma=75$ MPa，泊松比 $\lambda=0.33$。铝泡沫的力学行为采用可压缩泡沫材料模型(＊MAT_CRUSHALBE_FOAM)进行描述，密度 $\rho=0.16\ \mathrm{g/cm^3}$，弹性模量 $E=73$ MPa，屈服强度 $\sigma=2.1$ MPa，泊松比 $\lambda=0.33$。铝泡沫材料的工程应力-应变曲线如图 1 所示。TNT 炸药的材料性质由高爆炸药模型(＊MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN)和 JWL 状态方程描述。TNT 炸药性能参数和状态参数见文献[1]。炸药采用上面中心点起爆。

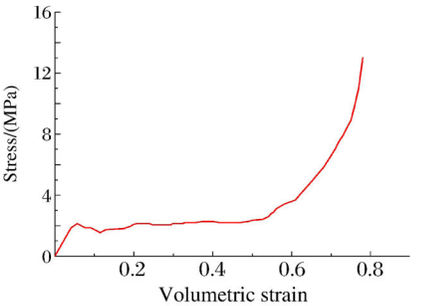


图 1 泡沫铝应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curve of aluminum foam

炸药和面板采用 Eroding_surface_to_surface 接触定义，面板与芯层采用 Automatic_surface_to_surface 接触，泡沫铝芯层采用 Automatic_single_surface 接触描述。

3 计算结果与分析

3.1 芯层压缩与后面板挠度

图 2 给出了爆炸后炸药与前面板(迎爆面)界面的接触力，从图中可以得到，爆轰产物与夹芯板的相互作用开始于 45 μs 左右，此时接触力直线上升，当作用时间约 120 μs 时，炸药与前面板的界面接触力趋近于零，在计算过程中，由于炸药网格会出现过度膨胀和扭曲，因此，为了保证计算的稳定性及节约计算时间，当爆炸产物与面板之间的接触趋于零时(图 2)，认为相互作用已经完成，此时从有限元模型中将炸药网格删除，板在惯性力作用下开始运动。

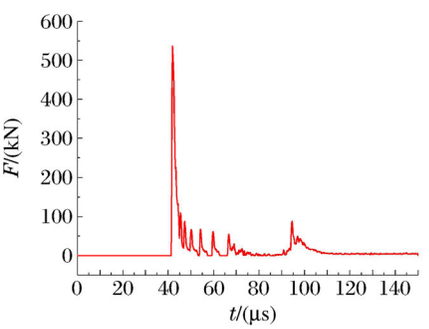
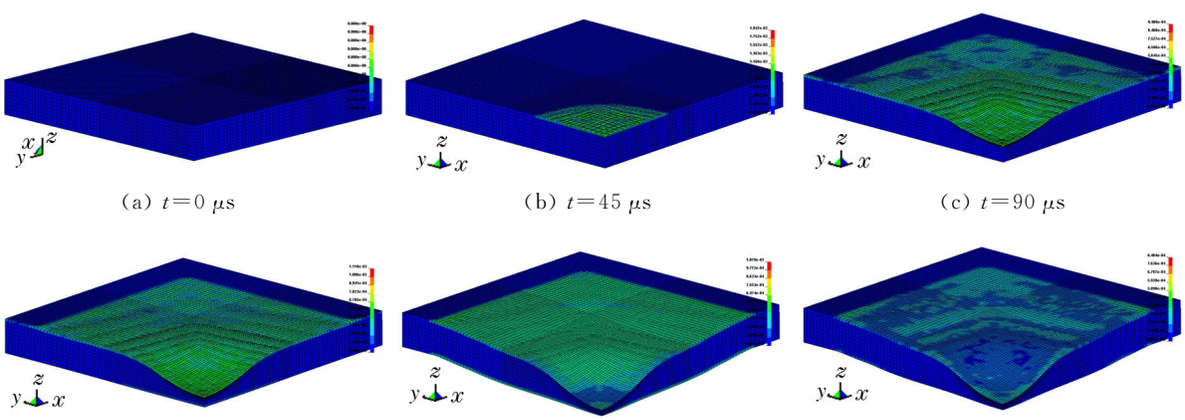


图 2 炸药与前面板界面接触力(F)

Fig. 2 Contact force of interface (F)

图 3 给出了 30 g 炸药作用下，前面板厚度 $H_1=1$ mm、芯层厚度 $C=20$ mm 夹芯板的响应过程；图 4 为前、后面板中心点挠度(Y)时程图；图 5 为夹心板层压缩量(ΔC)时程图。在爆炸载荷作用下，夹芯板的前面板中心区域首先发生变形；随着冲量的传递，变形区域逐渐向下扩展，从而泡沫芯层开始压缩变形，直至密实化，此后夹芯板整体发生变形。



(a) $t=0$ μs (b) $t=45$ μs (c) $t=90$ μs

(d) $t=120$ μs (e) $t=500$ μs (f) $t=1\,200$ μs

图 3 夹芯板的响应过程

Fig. 3 Process of explosive-structure response

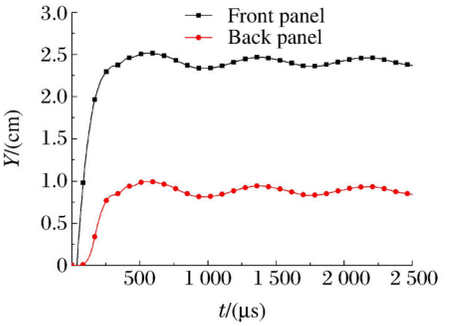


图 4 前、后面板中心点挠度时程图

Fig. 4 The deflection histories at mid-point of face-sheets

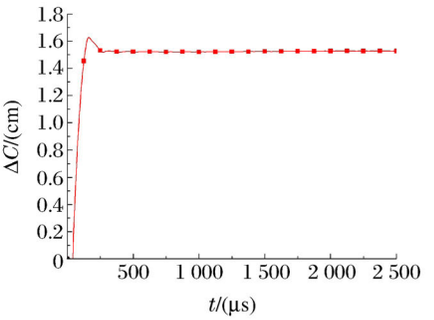


图 5 夹芯板芯层压缩时程图

Fig. 5 The core crushing histories of sandwich panel

图 6～图 9 给出了不同芯层厚度的夹芯板前面板厚度 H_1 从 1 mm 变化到 4 mm,在不同炸药量作用下,夹芯板后面板中心点挠度和泡沫芯层压缩量。从图 6～图 9 可以看出,在芯层厚度与炸药量一定的情况下,当前面板(迎爆面)厚度逐渐增加时,夹芯板的后面板最终挠度及泡沫芯层最终压缩量均有明显减小;当前面板厚度与芯层厚度一定时,夹芯板后面板最终挠度与泡沫芯层压缩量随炸药量的增加(即冲量的增加)逐渐增大;当前面板厚度及炸药量一定时,夹芯板后面板最终挠度随芯层厚度的增大呈现减小的趋势,而泡沫芯层压缩量则呈现增大的趋势。其中,芯层厚度为 10 mm 的夹芯板在 25 g 炸药作用下,前面板厚度为 2、3 和 4 mm 夹芯板的芯层压缩量较前面板厚度为 1 mm 的夹芯板芯层压缩量分别减少了 23.02%、50.97%和 67.00%,后面板挠度分别减少了 36.50%、46.86%和 55.33%。芯层厚度为20 mm的夹芯板在 25 g 炸药作用下,前面板厚度为 2、3 和 4 mm 夹芯板的芯层压缩量分别减小了 41.85%、60.75%和 73.05,夹芯板后面板挠度分别减小了 20.11%、30.11%和 39.82%。

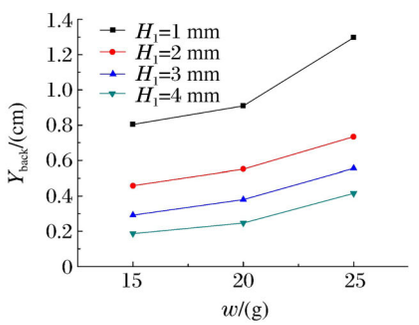


图 6 芯层厚度为 10 mm 的后面板挠度

Fig. 6 Back-panel deflection of sandwich panel with 10 mm core

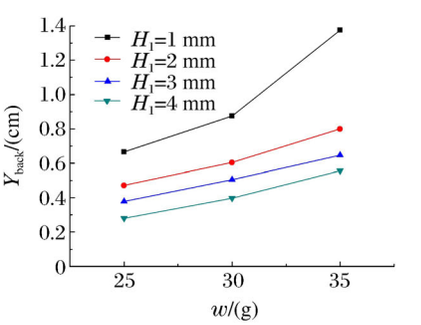


图 7 芯层厚度为 20 mm 的后面板挠度

Fig. 7 Back-panel deflection of sandwich panel with 20 mm core

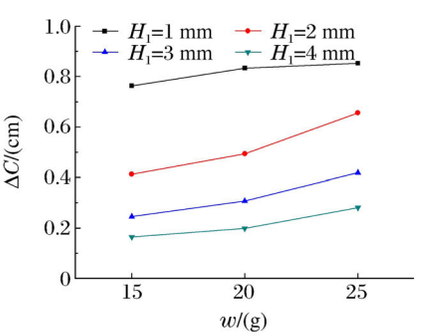


图 8 芯层厚度为 10 mm 的芯层压缩量

Fig. 8 Core compression of sandwich panel with 10 mm core

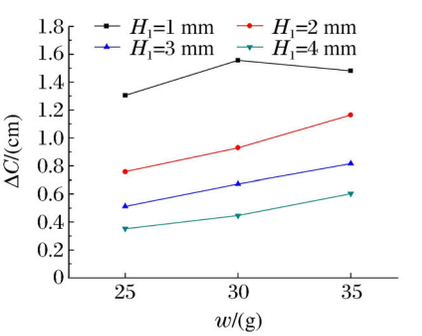


图 9 芯层厚度为 20 mm 的芯层压缩量

Fig. 9 Core compression of sandwich panel with 20 mm core

3.2 能量吸收

图 10 给出了 TNT 当量为 25 g、H_1=1 mm、C=10 mm 和 TNT 当量为 30 g、H_1=1 mm、C=20 mm 两种工况下的夹芯板各部分能量吸收时程图。从图 10 可以得到：芯层厚度对泡沫铝夹芯板的缓冲吸能效果有很大的影响，增加芯层厚度可以明显地提高夹心板的能量吸收效果，更有利于夹芯结构的安全性。

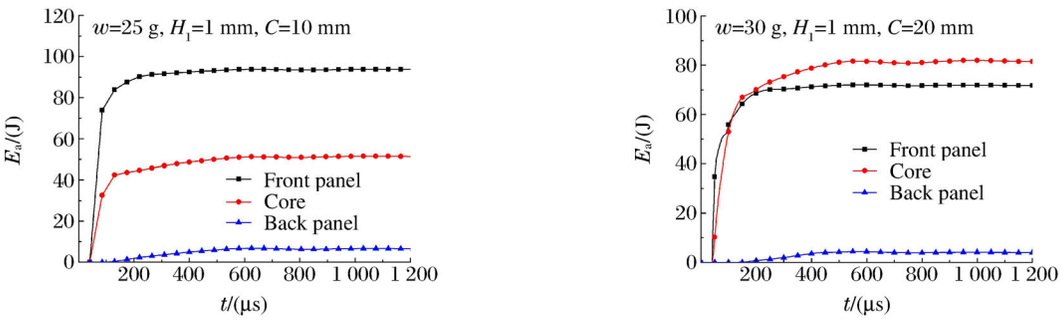


图 10 典型泡沫夹芯板能量吸收时程图

Fig. 10 The typical energy absorption curves of sandwich panel

图 11 和图 12 给出了不同芯层厚度的夹芯板、前面板厚度 H_1 从 1 mm 变化到 4 mm，在不同炸药量作用下夹芯板面板及泡沫芯层吸能量。从图 11 和图 12 可以得到，在芯层厚度与炸药量一定的情况下，当前面板（迎爆面）厚度逐渐增加、夹芯板受到冲击载荷时，后面板及泡沫芯层吸能量均有明显减小；当前面板厚度与芯层厚度一定时，夹芯板后面板与泡沫芯层吸能量随炸药量的增加（即冲量的增加）明显增大；当前面板厚度及炸药量一定时，后面板吸能量随芯层厚度的增大呈现减小的趋势，而泡沫芯层吸能量却明显增大。其中芯层厚度为 10 mm 的夹芯板在 25 g 炸药作用下，前面板厚度为 2、3 和 4 mm 的夹芯板芯层能量吸收分别减小了 56.51%、75.37%、84.66%；夹芯板后面板能量吸收分别减小了 55.67%、76.81%和 87.31%。芯层厚度为 20 mm 夹芯板在 25 g 炸药作用下，芯层能量吸收分别减小了 55.04%、73.79%和 82.92%；后面板能量吸收分别减小了 43.58%、59.53%和 79.92%。

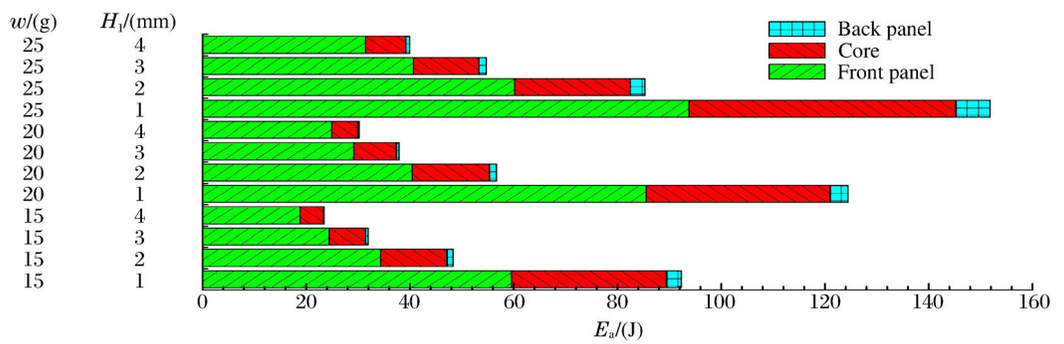


图 11 芯层厚度为 10 mm 不同工况下的能量吸收

Fig. 11 Energy absorption of sandwich panels with 10 mm core

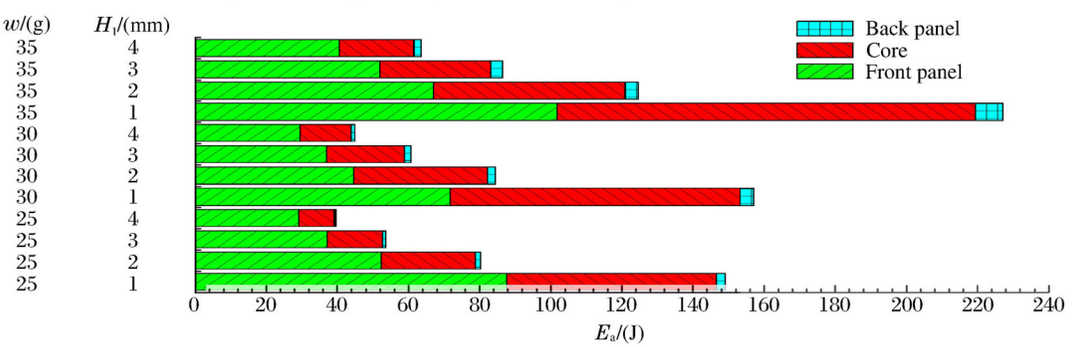


图 12 芯层厚度为 20 mm 不同工况下的能量吸收

Fig. 12 Energy absorption of sandwich panels with 20 mm core

4 结　论

采用 LS-DYNA 有限元软件,对泡沫夹芯板爆炸载荷作用下的动力响应进行了数值模拟,计算结果表明:泡沫夹芯板在爆炸载荷作用下,面板厚度和芯层厚度对夹芯板后面板挠度以及夹芯板各部分的能量吸收有明显的影响,得到如下主要结论。

(1) 当夹芯板芯层厚度一定时,前面板越厚,其芯层压缩量及后面板挠度随冲量的增大而增大的趋势变缓;爆炸载荷较强时,增加前面板厚度对降低后面板挠度效果更明显。

(2) 当夹芯板面板厚度一定时,芯层厚度为 20 mm 比芯层厚度为 10 mm 的夹芯板后面板挠度小,且泡沫芯层吸能量大,充分发挥了泡沫芯层的缓冲性能,起到了更好的防护效果,从而提高了整体结构的安全性。

References:

[1] Wang Z H, Zhu F, Zhao L M. Dynamic Behavior and Application of Sandwich Structures with Cellular Metal Cores [M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2010. (in Chinese)
王志华,朱　峰,赵隆茂. 多孔金属夹芯结构动力学行为及其应用 [M]. 北京:兵器工业出版社,2010.

[2] Zhu F, Zhao L M, Lu G X, et al. Deformation and failure of blast-loaded metallic sandwich panels—Experimental investigations [J]. Int J Impact Eng, 2008, 35(8): 937-951.

[3] Dharmasena K P, Wadley H N G, Xue Z Y, et al. Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading [J]. Int J Impact Eng, 2008, 35(9): 1063-1074.

[4] Fleck N A, Deshpande V S. The resistance of clamped sandwich beams to shock loading [J]. J Appl Mech, 2004, 71: 1-16.

[5] Xue Z Y, Hutchinson J W. Preliminary assessment of sandwich plates subject to blast loads [J]. Int J Mech Sci, 2003, 45(4): 687-705.

[6] Nurick G N, Langdon G S, Chi Y, et al. Behaviour of sandwich panels subjected to intense air blast—Part 1: Experiments [J]. Composite Structures, 2009, 91(4): 433-441.

[7] 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]. Int J Solids Struct, 2006, 43: 2243-2259.

[8] McShane G J, Deshpande V S, Fleck N A. The underwater blast resistance of metallic sandwich beams with prismatic lattice cores [J]. J Appl Mech, 2007, 74: 352-364.

[9] McShane G J, Radford D D, Deshpande V S, et al. The response of clamped sandwich plates with lattice cores subjected to shock loading [J]. Eur J Mech A—Solids, 2006, 25(2): 215-229.

Effect of Face Sheet Thickness on Dynamic Response of Aluminum Foam Sandwich Panels under Blast Loading

ZHANG Pei-Wen, LI Xin, WANG Zhi-Hua, YAN Qing-Rong

(*Institute of Applied Mechanics and Biomedical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan* 030024, *China*)

Abstract: Dynamic response of aluminum foam sandwich panel under blast loading was simulated by LS-DYNA3D. Influence of core and face sheets thicknesses of aluminum foam sandwich panels on the deformation and energy absorption was investigated. The core layer compression, the center deflection of the back panel, the energy absorption of core layer and the back panel were obtained. The simulated results can be used to optimize the design of sandwich panels in engineering application.

Key words: blast loading; aluminum foam; sandwich panel; numerical simulation