

文章编号:1674-8190(2019)01-109-07

# 多孔金属夹芯结构的抗爆性能研究

郭雨晨<sup>1,2</sup>, 赵桂平<sup>1,2</sup>

(1. 西安交通大学 航天航空学院, 西安 710049)

(2. 西安交通大学 机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049)

**摘要:** 多孔金属夹芯结构已被广泛应用于航空航天等领域, 研究其抗爆吸能性能具有十分重要的意义。分别对金属空心小球和泡沫铝两种夹芯壳结构在 TNT 爆炸载荷作用下的抗爆性能进行爆炸实验, 并采用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件进行数值模拟研究。结果表明: 金属空心小球夹芯结构作为抗爆吸能结构是可行的; 在结构框架尺寸与质量相同时, 内面板厚外面板薄的夹芯结构具有更好的抗变形能力, 内面板薄外面板厚的夹芯结构则具有更好的吸能特性; 在结构框架尺寸与质量相同时, 负梯度夹芯结构、并列型小球夹芯结构、小半径小球夹芯结构具有更好的抵抗爆炸载荷和吸收冲击能量的性能; 在结构框架尺寸与质量相同时, 金属空心小球夹芯结构的整体强度更高, 而泡沫铝夹芯结构能更充分地发挥芯层的缓冲性能。

**关键词:** 夹芯结构; 抗爆性能; 动态响应; 金属空心小球; 泡沫铝夹芯球壳

中图分类号: O383

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.01.014

## The Dynamic Response of Sandwich Structures with Cellular Metallic Core under Blast Loading

Guo Yuchen<sup>1,2</sup>, Zhao Guiping<sup>1,2</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Porous metal sandwich structures have been widely used in aerospace and other fields. It is of great significance to study their explosion-resistant and energy-absorbing properties. The dynamic response of sandwich structures with MHS(metal hollow sphere)and aluminum foams are studied both experimentally and numerically by employing ANSYS/LS-DYNA. Experimental results prove that sandwich structure with MHS can be used to resist blast. According to the parametric studies, the sandwich structure with thin inner face sheet and thick outer face sheet has stronger deformation resistance and the structure with thick inner face sheet and thin outer face sheet has better energy absorption property. With the same total dimensions and mass, it's inferred that the sandwich structure with density graded core with the biggest density as the first impact layer and the least density as the last layer, with interlaced MHS core or with smaller radius MHS has a better performance than others. With the same dimensions and mass, sandwich structure with MHS has better overall strength but that with aluminum foam core can make more use of core material. Moreover, the conclusions are referable in the optimization of sandwich structures.

**Key words:** sandwich structures; blast resistance performance; dynamic response; metal hollow sphere; sandwich spherical shell with aluminum foam core

收稿日期:2018-03-20; 修回日期:2018-04-17

基金项目:国家自然科学基金(11772247)

通信作者:赵桂平, zhaogp@xjtu.edu.cn

引用格式:郭雨晨, 赵桂平. 多孔金属夹芯结构的抗爆性能研究[J]. 航空工程进展, 2019, 10(1): 109-115.

Guo Yuchen, Zhao Guiping. The dynamic response of sandwich structures with cellular metallic core under blast loading[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(1): 109-115. (in Chinese)

## 0 引言

多孔金属夹芯结构具有低密度、高比刚度、高比强度、优异的吸能特性等特点,已被广泛应用于航空、车辆、航海、军工以及其他领域。近年来,由于恐怖主义的蔓延,对这种复合结构抗爆性能的研究需求日趋迫切,尤其是在航空领域,由于飞行器的特殊性,爆炸防护显得尤为重要。

国内外已对金属面板夹金属泡沫芯的复合夹芯结构进行了实验、理论和数值研究<sup>[1-6]</sup>。但是由于加工技术的限制、金属泡沫结构的缺陷(例如胞壁的弯曲、皱褶及不均匀的质量分布等),会导致结构具有低劣的力学性能<sup>[7-8]</sup>。而由金属空心小球组成的结构则代表了一种新型多孔材料类型<sup>[9]</sup>。O. Friedl 等<sup>[9]</sup>对某种金属空心小球进行了密度效应和拉伸压缩变形行为的实验研究;J. Fan 等<sup>[10]</sup>针对随机排列金属空心小球和梯度变化金属空心小球结构提出了三种 3D 模型,并进行了相应的数值模拟以研究其压缩性能。目前,关于这种空心小球夹芯结构的能量吸收效果及抗爆性能的研究仍鲜有报道。

本文通过实验和有限元模拟,研究金属空心小球和泡沫铝两种夹芯结构在爆炸载荷作用下的动力响应与能量吸收机理,并分析不同参量下夹芯结构抗爆性能的变化规律。

## 1 实验研究

为了比较金属空心小球夹芯结构与泡沫铝夹芯结构的抗爆性能,分别对金属空心小球夹芯球壳和泡沫铝夹芯球壳在爆炸载荷作用下的动力响应进行实验研究,并对结构的变形破坏模式进行分析。

### 1.1 试件

实验测试两个金属空心小球夹芯球壳和两个泡沫铝夹芯球壳的抗爆性能。每个试件由经法兰连接在一起的两个半球球壳组成,每个半球球壳由内外面板和芯层三部分组成,如图 1~图 2 所示。内外面板均为 A3 钢制成,泡沫铝的相对密度为 16%,金属空心小球材料为 AISI304 不锈钢。内面板内直径 250 mm,厚度 1 mm;外面板内直径

316 mm,厚度 1 mm,金属空心小球内直径 31 mm,厚度 0.5 mm。所有的金属空心小球均用热熔胶与内外面板黏接。实验中,炸药被固定在试件的正中心,即球心。



图 1 泡沫铝夹芯球壳

Fig. 1 Structure with Al foam



图 2 金属空心小球球壳

Fig. 2 Structure with metal hollow spheres

### 1.2 实验结果

#### 1.2.1 泡沫铝夹芯球壳

试件 1 为泡沫铝夹芯球壳,承受 18 g TNT 的爆炸载荷。实验后的试件 1 如图 3 所示,可以看出:试件 1 被完全炸开分成两个半球壳,但是其主体部分并没有发生明显变形,仅法兰与螺栓连接部位出现了很大的塑性变形,表明法兰连接部位是薄弱环节。因此,对其他试件的法兰作了加强处理,宽度由最初的 30 mm 增加至 60 mm,厚度也由 2 mm 增加至 6 mm。



图 3 试件 1 实验结果图

Fig. 3 Result of specimen 1

试件 2 也是泡沫铝夹芯球壳,其承受 115 g TNT 的极大爆炸载荷。实验结果显示,球壳主体各自分开,内面板裂成若干碎片,泡沫铝芯体被压缩进入密实阶段并被炸成若干小块,外面板与法兰直接从焊接部位分离。

### 1.2.2 金属小球夹芯球壳

试件 3 为金属空心小球夹芯球壳,承受 18 g TNT 的爆炸载荷。实验后的试件 3 如图 4 所示,可以看出:试件 3 内面板出现规则的凹陷变形,金属空心小球发生明显坍塌,外面板没有明显变形。



图 4 试件 3 内面板实验结果图

Fig. 4 Inner face sheet of specimen 3

试件 4 亦为金属空心小球夹芯球壳,其承受 60 g TNT 的爆炸载荷。实验结果显示,内面板发生严重破坏,空心小球大部分出现很大的坍塌变形,一部分已被压成扁状,外面板内侧与小球接触的部位有明显凹痕但是外侧无明显变形,整个球壳完好。

从金属空心小球夹芯球壳和泡沫铝夹芯球壳在不同爆炸载荷作用下的抗爆性能实验可以看出:金属空心小球夹芯结构作为抗爆吸能结构有很大的潜力,金属空心小球可以增加整个结构抵抗爆炸载荷的强度,同时其压缩变形也可以很好地吸能减震。

## 2 有限元模拟

为了更深入地研究芯层梯度等参数对夹芯结构抗爆性能的影响,通过有限元模拟方法对金属空心小球夹芯结构的性能进行对比分析。

### 2.1 有限元模型

采用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 和任意拉格朗日欧拉算法(ALE)模拟夹芯结构在爆炸载荷作用下的动力响应,建模中分别设置不同的参数

来考虑面板厚度组合以及芯层梯度、小球排列方式、小球几何尺寸等变量的影响,分析结构抗爆性能及能量吸收规律。

为了单一变量,每组参量研究中,炸药质量、炸药离夹芯结构的距离、结构几何尺寸与质量均保持不变。

#### 2.1.1 几何模型

夹芯球壳内径 11.6 cm,外径 16.4 cm,内外面板厚度均为 0.2 cm。TNT 炸药固定于夹芯球壳正中心。由于夹芯球壳的对称性和出于方便计算考虑,有限元模型中仅建立二分之一对称模型,如图 5 所示。

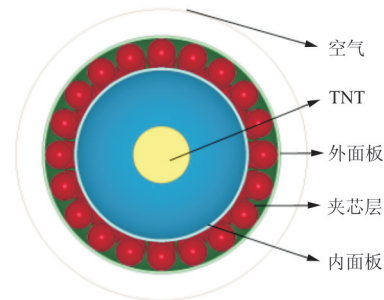


图 5 金属空心小球夹芯球壳模型图

Fig. 5 Model of sandwich sphere with MHS

#### 2.1.2 模型材料与接触设置

面板采用双线性随动强化弹塑性材料模型 \* MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC 进行描述,密度( $\rho$ )为 7.85 g/cm<sup>3</sup>,杨氏模量( $E$ )为 210 GPa,泊松比( $\lambda$ )为 0.3,屈服强度( $\sigma$ )为 240 MPa。泡沫铝采用蜂窝模型 \* MAT\_HONEYCOMB,密度为 0.531 9 g/cm<sup>3</sup>,杨氏模量为 70 MPa,泊松比为 0.285,应力应变曲线可参见文献[11]。金属空心小球采用 \* MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC 材料模型,密度为 8.06 g/cm<sup>3</sup>,杨氏模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,屈服强度为 400 MPa。TNT 炸药采用高性能炸药材料模型 \* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 和状态方程 \* EOS\_JWL 描述。空气部分则用 \* MAT\_NULL 和线性多项式状态方程 \* EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 描述,具体参数可见文献[3]。

实验中,小球用热熔胶黏接在内外面板之间,故有限元模型中,设定金属空心小球理想连接在内外面板之间,不考虑摩擦效应。金属空心小球与内外面板之间均为侵蚀面面接触 \* CONTACT\_

ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE 模型, 小球之间选用自动面面接触 \* CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE 模型。

## 2.2 有限元结果与分析

### 2.2.1 面板厚度组合

为了研究不同面板厚度组合方式对结构抗爆性能的影响, 分析五种不同面板厚度组合夹芯球壳在 20 g 炸药下的动力响应。五种组合方式的面板总厚度均为 4 mm, 为了简化标记, 用内面板厚度 + 外面板厚度代表每一种组合方式, 例如 0.4 + 3.6 代表内面板厚度为 0.4 mm、外面板厚度为 3.6 mm 的夹芯球壳。

球壳外面板的位移时程图和夹芯球壳各部分吸能图如图 6~图 7 所示。

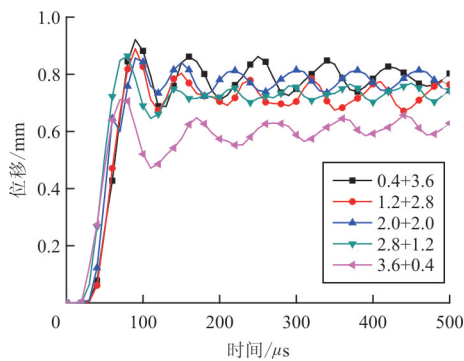


图 6 不同面板厚度夹芯球壳外面板位移时程图

Fig. 6 Displacement time history of outer facesheets with different thickness

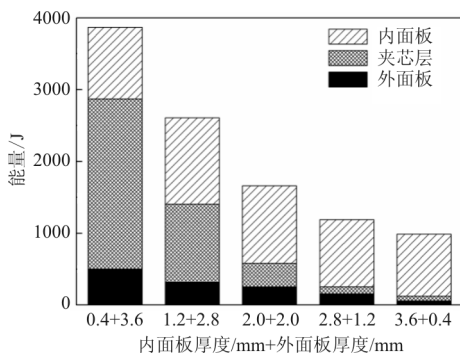


图 7 不同面板厚度夹芯球壳各部分吸能情况

Fig. 7 Energy absorption of sandwich structures with different thickness of outer facesheets

从图 6~图 7 可以看出: 随着内面板厚度逐渐增加, 外面板的位移逐渐减小, 这是由于面板强度

和刚度均比芯层大, 较厚的内面板最先受到冲击, 可以更好地缓冲爆炸载荷, 但是厚内面板承受了大部分能量, 芯层未充分变形从而发挥作用; 随着内面板厚度逐渐增加, 夹芯球壳整体吸能减少, 而且芯层吸能所占百分比大幅减少。

### 2.2.2 芯层材料

模拟比较金属空心小球夹芯球壳与泡沫铝夹芯球壳在 50 g TNT 载荷下的动态响应。

两种夹芯球壳外面板的位移时程图与吸能图如图 8~图 9 所示。

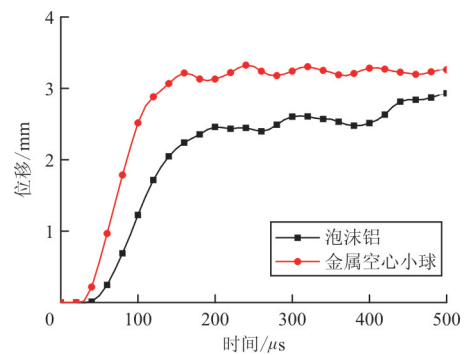


图 8 不同芯层的夹芯球壳外面板位移时程图

Fig. 8 Displacement time history of outer facesheets with different cores

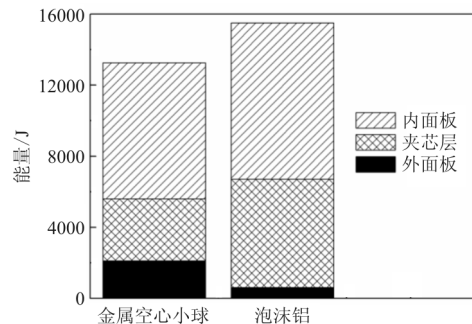


图 9 不同芯层的夹芯球壳各部分吸能情况

Fig. 9 Energy absorption of sandwich structures with different cores

从图 8~图 9 可以看出: 小球夹芯球壳抵抗变形的能力与吸能性能均劣于泡沫铝夹芯球壳, 泡沫铝夹芯球壳的内面板已经被剧烈破坏但是小球夹芯球壳的内面板仍然完好。这是由于泡沫铝夹芯球壳内面板破裂, 泡沫铝夹芯承受了较大的载荷压缩变形, 外面板所受的冲击较小; 而空心小球的刚度比泡沫铝高, 变形没有泡沫铝大, 空心小球夹芯球壳的吸能主要靠内面板, 夹芯和外面板均仅吸收



小部分能量。

作为传统的多功能材料,泡沫铝已被深入地研究且广泛地应用于众多行业。金属空心小球作为一种新型的多孔材料因其可设计性与成熟的加工工艺也得到了越来越多的关注。金属空心小球夹芯结构强度更高,但是泡沫铝夹芯结构具有更好的抗爆吸能的特性。

### 2.2.3 芯层梯度

为了简便计算,芯层为多层金属空心小球的夹芯结构选用夹芯平板来研究。

夹芯板长宽均为 12 cm,厚 3.4 cm,其中上下面板均厚 0.2 cm。夹芯板四周固支,TNT 炸药固定于距夹芯板上面板 4 cm 处。由于结构和载荷的对称性,有限元模型中仅建立四分之一对称模型,如图 10 所示。

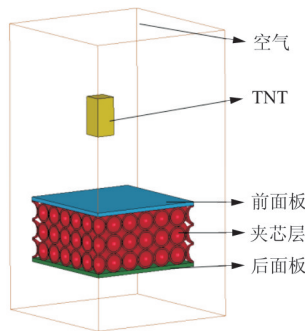


图 10 金属空心小球夹芯板模型图

Fig. 10 Model of sandwich panel with MHS

夹芯结构的芯层梯度变化通过保持小球外径不变而改变小球壁厚达到,如图 11~图 12 所示,正梯度夹芯板的小球壁厚沿冲击方向增加,负梯度板则相反,均匀芯夹芯板的小球壁厚不变。

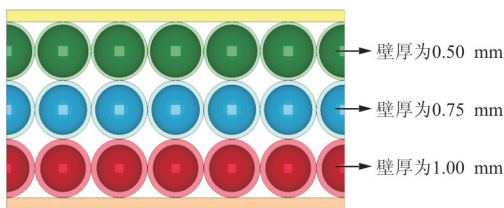


图 11 正梯度夹芯板

Fig. 11 Panel of positive gradient

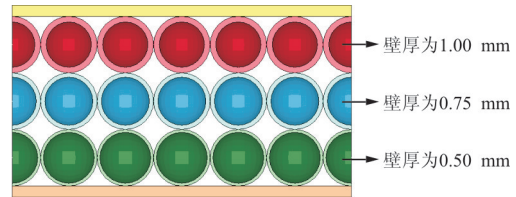


图 12 负梯度夹芯板

Fig. 12 Panel of negative gradient

在 20 g 炸药量下三种夹芯板后面板中心点位移与各部分吸能情况如图 13~图 14 所示。

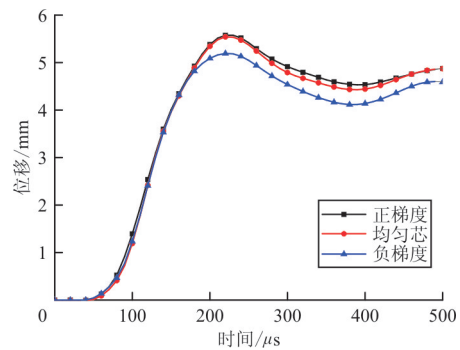


图 13 不同梯度夹芯板后面板中心点位移时程图

Fig. 13 Displacement time history of bottom facesheets' center points with different gradient cores

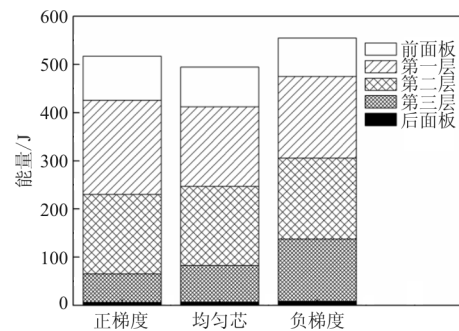


图 14 不同梯度夹芯板各部分吸能情况

Fig. 14 Energy absorption of sandwich panels with different gradient cores

从图 13 可以看出:三条位移曲线均在 220 μs 左右到达峰值然后衰减波动,其中负梯度芯夹芯板中心点位移始终最小,均匀芯其次,正梯度芯夹芯板中心点位移最大。

从图 14 可以看出:负梯度夹芯板整体吸能最多,正梯度其次,均匀芯最少;同时负梯度的三层夹芯小球吸收了几乎相同的能量,可以更好地利用芯层吸能。

### 2.2.4 芯层小球排列方式

考虑两种金属空心小球的排列方式——并列

型与交错型,分别如图 15~图 16 所示。

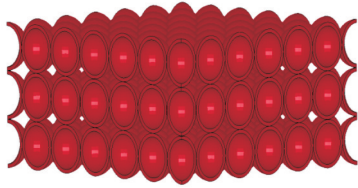


图 15 并列型夹芯  
Fig. 15 Paratactic core

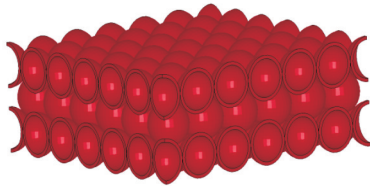


图 16 交错型夹芯  
Fig. 16 Interlaced core

在 20 g 炸药量下两种不同排列方式夹芯板的位移与吸能结果如图 17~图 18 所示,可以看出:并列型夹芯板比交错型夹芯板的变形更小,且能吸收更多的能量。

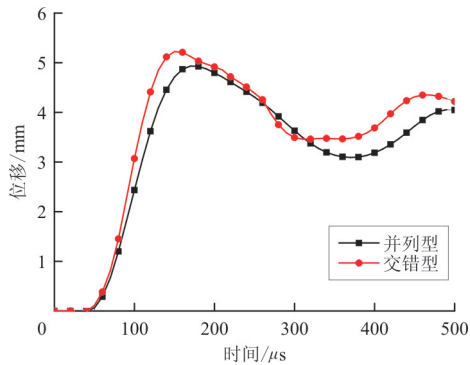


图 17 不同芯层排列方式夹芯板后面板中心点位移时程图  
Fig. 17 Displacement time history of bottom facesheets' center points with different core arrangements

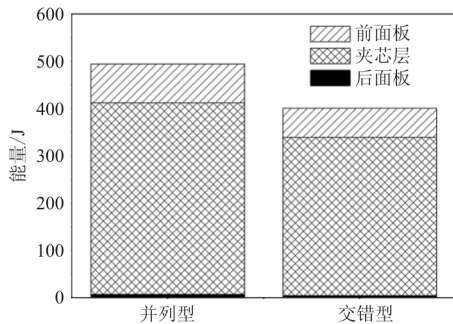


图 18 不同芯层排列方式夹芯板各部分吸能情况  
Fig. 18 Energy absorption of sandwich panels with different core arrangements

### 2.2.5 空心小球半径

保持芯层总厚度不变,分别考虑空心小球分别为 3、4、5 层的情况。为了使芯层质量相同,空心小球内外径同时改变,其中 3 层时内外径为 8.5、10 mm,4 层时内外径为 6.375、7.5 mm,5 层时内外径为 5.1、6 mm,即芯层的层数越多,小球的内外径与厚度越小。

在 20 g 炸药量下三种不同半径小球夹芯板的位移与吸能结果如图 19~图 20 所示。

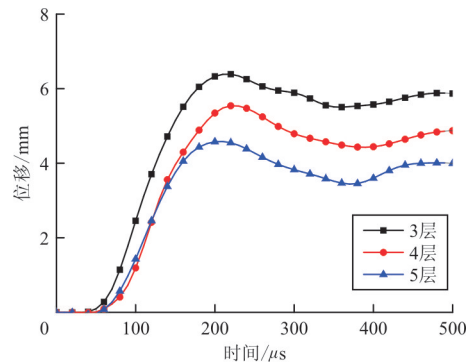


图 19 不同小球半径夹芯板后面板中心点位移时程图  
Fig. 19 Displacement time history of bottom facesheets' center points with different MHS radius

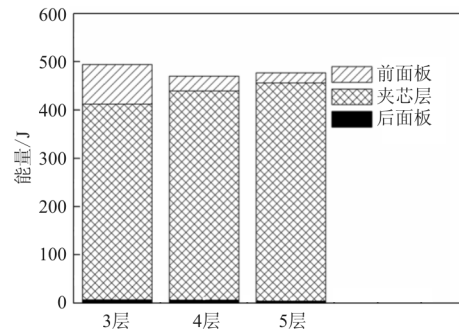


图 20 不同小球半径夹芯板各部分吸能情况  
Fig. 20 Energy absorption of sandwich structures with different MHS radius

从图 19~图 20 可以看出:3 层夹芯板的后面板位移峰值比 4 层夹芯板多 17%,比 5 层夹芯板多 40%;三种夹芯板的整体吸能数值没有很大差异,但是 3、4、5 层夹芯板的芯层吸能占比分别为 82%、92%、95%,即随着小球半径的减小,芯层吸能占比逐渐增大。

## 3 结 论

(1) 金属空心小球夹芯结构作为抗爆吸能结

构是可行的,其薄弱环节(例如焊接部位)极大地限制了结构的强度与吸能性能,因此在实际应用中应对这些连接部位作加强处理。

(2) 在结构几何尺寸与质量相同时,内面板厚外面板薄的夹芯结构具有更好的抗变形能力,而内面板薄外面板厚的夹芯板则具有更好的吸能特性。

(3) 小球夹芯结构的整体强度更高,而泡沫铝夹芯结构能更充分地发挥芯层的缓冲性能。

(4) 负梯度夹芯结构、并列型小球夹芯结构、小半径小球夹芯结构展现出更好的抵抗爆炸载荷和吸收冲击能量的性能。

### 参考文献

- [1] Friedl O, Motz C, Peterlik H, et al. Experimental investigation of mechanical properties of metallic hollow sphere structures[J]. *Metallurgical & Materials Transactions B*, 2008, 39(1): 135-146.
- [2] Zhu F, Zhao L, Lu G, et al. Deformation and failure of blast-loaded metallic sandwich panels—experimental investigations[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(8): 937-951.
- [3] Zhu F, Zhao L, Lu G, et al. Structural response and energy absorption of sandwich panels with an aluminium foam core under blast loading[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2008, 11(5): 525-536.
- [4] Brischetto S, Carrera E, Demasi L. Improved bending analysis of sandwich plates using a zig-zag function[J]. *Composite Structures*, 2009, 89(3): 408-415.
- [5] Li W, Huang G, Bai Y, et al. Dynamic response of spherical sandwich shells with metallic foam core under external air blast loading—numerical simulation[J]. *Composite Structures*, 2014, 116(1): 612-625.
- [6] Nguyen V H, Nguyen T K, Thai H T, et al. A new inverse trigonometric shear deformation theory for isotropic and functionally graded sandwich plates[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2014, 66(6): 233-246.
- [7] Simone A E, Gibson L J. Effects of solid distribution on the stiffness and strength of metallic foams[J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(6): 2139-2150.
- [8] Simone A E, Gibson L J. The effects of cell face curvature and corrugations on the stiffness and strength of metallic foams[J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(11): 3929-3935.
- [9] Friedl O, Motz C, Peterlik H, et al. Experimental investigation of mechanical properties of metallic hollow sphere structures[J]. *Metallurgical & Materials Transactions B*, 2008, 39(1): 135-146.
- [10] Fan J, Zhang J, Wang Z, et al. Dynamic crushing behavior of random and functionally graded metal hollow sphere foams[J]. *Materials Science & Engineering A: Structural Materials Properties Microstructure & Processing*, 2013, 561(3): 352-361.
- [11] 张健, 赵桂平, 卢天健. 闭孔泡沫铝应变率效应的试验和有限元分析[J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(5): 97-101. Zhang Jian, Zhao Guiping, Lu Tianjian. Experimental and numerical study on strain rate effects on close-celled aluminum foams[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(5): 97-101. (in Chinese)

### 作者简介:

郭雨晨(1993—),女,硕士研究生。主要研究方向:复合结构的冲击力学。

赵桂平(1958—),女,博士,教授。主要研究方向:复合材料及结构的冲击力学。

(编辑:马文静)