

文章编号: 1001-1455(2010)06-0561-08

# 撞击载荷下泡沫铝夹芯梁的塑性动力响应\*

敬霖, 王志华, 赵隆茂, 阎庆荣

(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:** 应用泡沫金属子弹撞击加载的方式研究了固支泡沫铝夹芯梁和等质量实体梁的塑性动力响应。采用激光测速装置和位移传感器测量了泡沫子弹的撞击速度和后面板中心点的位移-时间曲线, 研究了加载冲量、面板厚度和芯层厚度对夹芯梁抗冲击性能的影响。给出了泡沫铝夹芯梁的变形与失效模式, 实验结果表明结构响应对夹芯结构配置比较敏感, 后面板中心点的残余变形与加载冲量、面板厚度呈线性关系。与等质量实体梁的比较表明, 泡沫铝夹芯梁具有更好的抗冲击能力。实验结果对多孔金属夹芯结构的优化设计具有一定的参考价值。

**关键词:** 固体力学; 动力响应; 冲击载荷; 夹芯梁; 泡沫铝

**中图分类号:** O347

**国标学科代码:** 130·15

**文献标志码:** A

## 1 引言

泡沫金属是一种结构与功能一体化的新型材料, 由于良好的理化性能和力学性质, 在航空航天、军事工程、催化载体、屏蔽防护和吸能缓冲等一些高技术领域具有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。由于其特殊的孔隙结构, 泡沫金属可承受较大的塑性变形, 从而能吸收较多的能量。在一些高技术领域和实际应用中, 泡沫金属材料通常作为芯体, 与高强度、高刚度的面板组合形成夹芯结构, 这种夹芯结构克服了单一泡沫金属材料强度低等缺点, 具有吸能效率和比刚度高的优点, 充分发挥了泡沫材料独特的优异特性。

对准静态载荷下泡沫金属夹芯结构力学行为的研究主要集中于夹芯结构的变形/失效模式、能量吸收能力及机理等方面<sup>[4-8]</sup>。关于多孔金属夹芯结构在高速冲击、特别是在爆炸载荷下动态失效行为的研究还很少。D. D. Radford 等<sup>[9]</sup>对比研究了3种不同拓扑芯层的夹芯梁及等质量实体梁的抗冲击能力, 结果发现研究的夹芯梁的抗冲击能力都高于等质量实体梁。N. A. Fleck 等<sup>[10]</sup>系统研究了固支夹芯梁抵抗爆炸载荷的能力, 将夹芯梁的结构响应分为3个阶段: 流固耦合作用、芯层压缩和结构整体响应阶段。V. L. Tagarielli 等<sup>[11]</sup>理论和实验研究了准静态载荷下固支夹芯梁的失效模式。J. L. Yu 等<sup>[12]</sup>利用落锤加载设备研究了开孔泡沫铝夹芯梁的变形和失效机理, 发现动态加载下夹芯梁由于出现了较大的局部压入和破坏失效, 其能量吸收能力低于准静态加载。D. D. Radford 等<sup>[7]</sup>提出了使用金属泡沫子弹撞击产生强压力脉冲模拟炸药爆炸产生冲击载荷的实验方法, 指出加载冲量可以通过改变子弹长度、相对密度及撞击速度来实现。泡沫金属夹芯结构冲击力学行为的研究已成为研究热点, 但是, 这一领域的研究尚处于起步阶段, 没有获得完整的冲击失效模式, 其能量吸收能力和吸能机理及其动力响应等的研究工作还很不完善。

本文中, 应用泡沫金属子弹撞击加载的方式实验研究固支泡沫铝夹芯梁和等质量实体梁的塑性动力行为。给出泡沫铝夹芯梁的变形和失效模式, 研究不同的加载冲量、面板厚度和芯层厚度对抗冲击性能的影响, 并与等质量实体梁进行对比分析。

\* 收稿日期: 2009-09-17; 修回日期: 2009-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(10572100, 90716005, 10802055); 山西省自然科学基金项目(2007021005); 山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划和山西省留学回国人员科研项目(2009-27)

作者简介: 敬霖(1984—), 男, 博士研究生。

## 2 实验过程

### 2.1 试件结构及分组

实验夹芯梁由 HY-914 胶将前后面板和芯层粘接构成实验试件,如图 1 所示。面板为 2A12-O 铝合金,其力学性能参数如下:密度  $\rho_f=2.7 \text{ t/m}^3$ ,杨氏模量  $E=72.4 \text{ GPa}$ ,剪切模量  $G=28 \text{ GPa}$ ,泊松比  $\nu=0.33$ ,屈服强度  $\sigma_{f,y}=75.8 \text{ MPa}$ 。泡沫铝芯层为虹波金属材料公司生产的泡沫铝板材,泡沫子弹为 Alporas 泡沫铝(Shinko Wire Com,德国),子弹直径  $2a=36.5 \text{ mm}$ 。泡沫芯层的平均密度  $300 \text{ kg/m}^3$ ,杨氏模量  $0.4 \text{ GPa}$ ,泊松比  $0.20$ ,屈服强度  $2.4 \text{ MPa}$ ;泡沫子弹的平均密度  $250 \text{ kg/m}^3$ ,杨氏模量  $1.0 \text{ GPa}$ ,泊松比  $0.30$ ,屈服强度  $1.5 \text{ MPa}$ 。

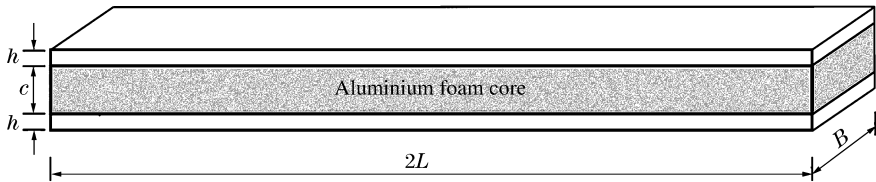


图 1 泡沫铝夹芯梁示意图

Fig. 1 Geometry and dimension of the aluminum foam core specimen

为了综合考察固支泡沫铝夹芯梁的抗冲击性能,应用泡沫金属子弹撞击加载的方式,分别从加载冲量、面板厚度和芯层厚度方面研究固支夹芯梁在冲击载荷下的动力响应。泡沫金属子弹为  $\varnothing 36.5 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$  的圆柱体,夹芯梁的几何尺寸为  $300 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ ,面板厚度分别为  $0.5, 0.8, 1.0 \text{ mm}$ ,芯层厚度分别为  $10, 20, 30 \text{ mm}$ 。实验试件分为 3 组,每组试件研究 1 个参数对夹芯梁结构响应的影响。第 1 组研究不同加载冲量( $0.5 \sim 1.6 \text{ N} \cdot \text{s}$ )下夹芯梁( $h=0.5 \text{ mm}, c=10 \text{ mm}$ )的动力响应;第 2 组比较在给定冲量( $I \approx 1.1 \text{ N} \cdot \text{s}$ )和芯层厚度( $c=10 \text{ mm}$ )的情况下,3 种面板厚度( $0.5, 0.8, 1.0 \text{ mm}$ )夹芯梁的抗冲击性能;第 3 组考察了冲量一定( $I \approx 1.55 \text{ N} \cdot \text{s}$ )及面板厚度一定( $0.5 \text{ mm}$ )时,3 种不同芯层厚度( $10, 20, 30 \text{ mm}$ )夹芯梁的变形结果。

### 2.2 实验装置

实验装置主要由空气动力枪、激光测速装置、实验支架、激光位移传感器和数据记录仪器等组成,如图 2 所示。空气动力枪驱动泡沫铝子弹撞击泡沫铝夹芯梁,子弹的速度可通过气压控制,其大小可由激光测速装置获得。夹芯梁后面板中心点的挠度由激光位移传感器(LD 1625-200,  $\mu\text{e. Com}$ , 德国)测得。为实现固支边界条件,实验支架包括了由 2 块端面平整厚度为  $18 \text{ mm}$  的钢板组成的夹具装置,并用 M16 的螺栓固定,如图 3 所示。

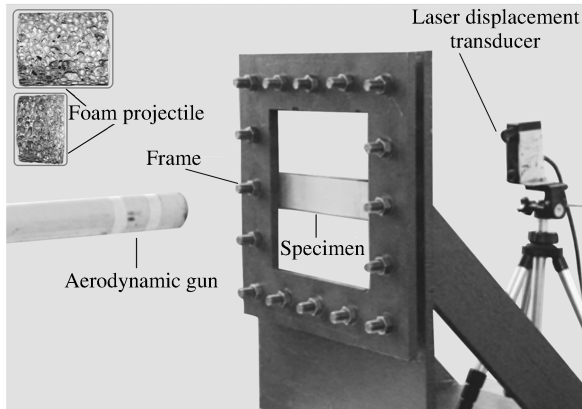


图 2 实验装置

Fig. 2 The sketch of the experimental set-up

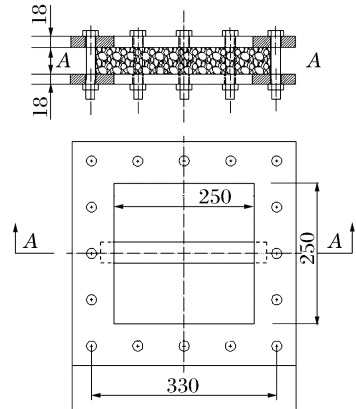


图 3 固支夹具装置

Fig. 3 Sketch of the clamping device

### 3 实验结果分析

泡沫金属夹芯结构的实验结果分为 2 种类型：(1)定量的实验结果(包括加载冲量和后面板中心点的残余变形等)；(2)夹芯结构的变形和失效模式。为了直观了解夹芯结构的性能,首先给出了夹芯梁的变形和失效模式。基于夹芯梁的结构配置,实验中观察到的变形和失效模式可分为前面板、芯层和后面板的变形和失效模式。

#### 3.1 前面板的变形和失效模式

泡沫金属子弹撞击载荷下,前面板的变形有 2 种模式:局部压入失效(见图 4)和整体变形(见图 5)。实验中发现,当夹芯梁面板较薄或芯层较厚时易出现压入失效,主要表现为子弹作用区域的局部大变形(没有破坏损伤),变形的大小主要取决于加载冲量的大小;而当面板较厚时常表现为整体弯曲变形,子弹作用的中心区域未出现压入失效现象,变形的大小与加载冲量有关。

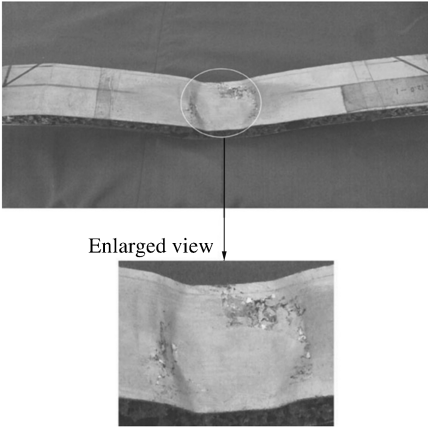


图 4 前面板的压入失效

Fig. 4 Indenting failure on the front face

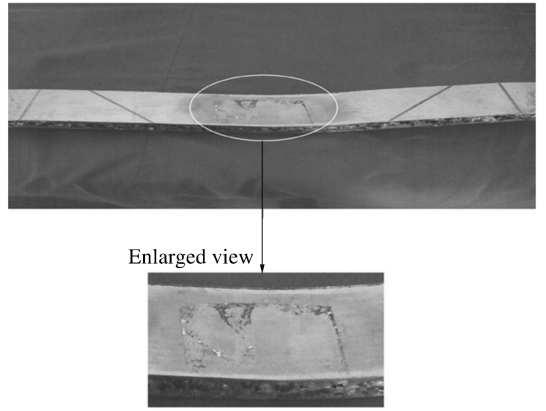


图 5 前面板的整体变形

Fig. 5 Global deformation of the front face

#### 3.2 芯层的变形和失效模式

不同芯层厚度(10、20、30 mm)的夹芯梁的芯层压缩模式不尽相同,但基本上呈现出一个渐进破坏的变形模式。图 6 给出了面板厚 1.0 mm 的 3 种不同芯层厚度夹芯梁的变形模式。从图中看出,芯层厚度为 10 mm 的夹芯梁的变形模式更接近于集中力作用,这为进一步深入研究夹芯结构的动力行为提供了可靠的实验依据。按照破坏程度的不同,可分为压缩区和无压缩区。压缩主要发生在加载中心区域,该区域可观察到局部的塑性大变形,泡沫孔壁弯曲、坍塌甚至胞孔完全压实。在距离加载区域较远处以及固支端,泡沫芯层几乎没有发生任何变化,该区域我们定义为无压缩区域。实验中还发现,一定冲量范围内某些结构配置的夹芯梁在加载区域还可能观察到明显的剪切失效(见图 7)。

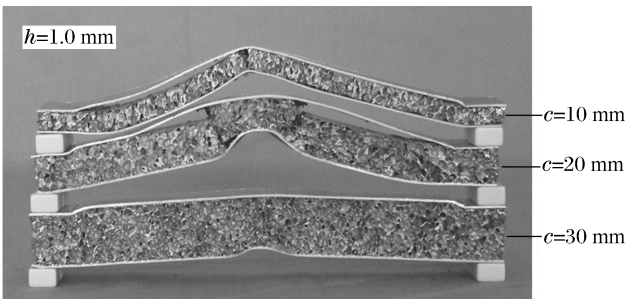


图 6 泡沫芯层压缩变形模式

Fig. 6 Compressive deformation mode of foam core

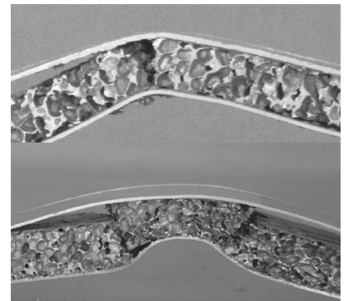


图 7 泡沫芯层变形局部放大图

Fig. 7 Enlarged drawing of foam core

### 3.3 后面板的变形和失效模式

S. B. Menkes 等<sup>[13]</sup>给出了固支梁在爆炸载荷下的 3 种变形失效模式:非弹性大变形、伴有拉伸撕裂的非弹性大变形及横向剪切失效。泡沫金属夹芯梁在撞击载荷下后面板的变形失效模式可近似为非弹性大变形,中心点挠度最大,与泡沫铝夹芯板不同的是未观察到明显的花瓣形变形,如图 8 所示。

为了更加清楚地了解后面板的变形过程,图 9 给出了 3 个不同冲量下夹芯梁( $h=0.5\text{ mm}$ ,  $c=10\text{ mm}$ )和一个等质量实体梁后面板中心点的位移时程曲线。泡沫子弹撞击下,前面板中心区域获得冲量,之后开始压缩芯层,而后面板由于惯性阻止芯层的压缩,在芯层的反作用力下后面板产生变形,并在短时间内达到最大值,图 9 观察到的永久变形是后面板在停止振荡后保留的残余变形  $W$ 。

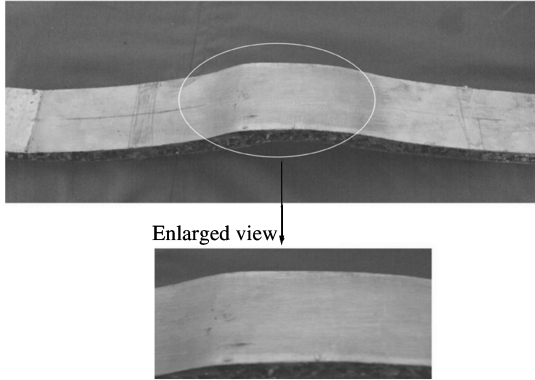


图 8 后面板的变形模式

Fig. 8 Deformation mode of the back face

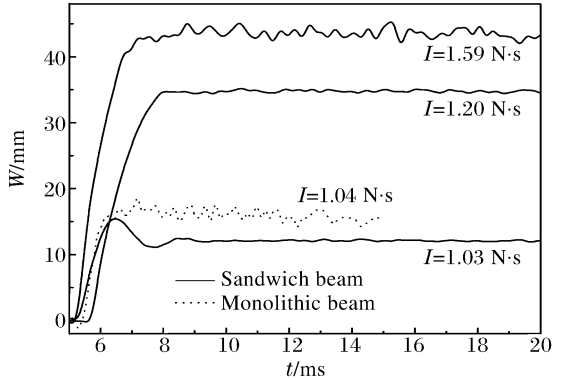


图 9 夹芯梁后面板的位移时程曲线

Fig. 9 Variation of mid-span deflection of the back face with time

## 4 泡沫铝夹芯梁的参数

夹芯结构应用于工程防护时,被保护物往往处于夹芯结构后面板的一侧。因此,结构承受冲击载荷时,将后面板的最终挠度作为研究夹芯结构的抗冲击性能的主要参数具有重要的研究意义和工程应用价值。本节中,分别从加载冲量、面板厚度、芯层厚度方面研究泡沫铝夹芯梁的动力响应,从而得到不同参数对泡沫铝夹芯梁抗冲击性能的影响。

### 4.1 加载冲量的影响

为了研究不同冲量对夹芯梁抗冲击性能的影响,应用泡沫金属子弹撞击加载技术,研究芯层厚度为 10 mm、面板厚度为 0.5 mm 的 6 个试件。子弹质量近似相等,冲量范围为 0.5~1.6 N·s。图 10 给出了不同加载冲量下夹芯梁的变形模式,从图中可以看出,随着加载冲量的增大,泡沫铝夹芯梁的最终挠度也相应增大,拟合实验数据可知加载冲量与最终挠度基本上呈线性变化,如图 11 所示。加载冲量

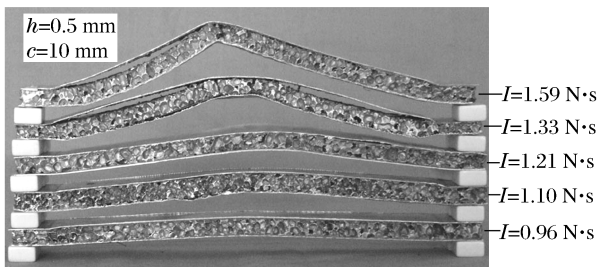


图 10 不同冲量下泡沫铝夹芯梁的变形模式

Fig. 10 Deformation modes of clamped sandwich beams subjected to impulse loading

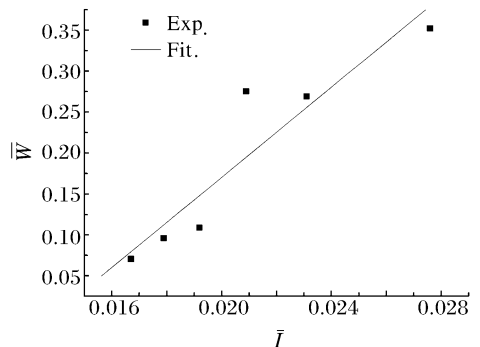


图 11 加载冲量与夹芯梁最终挠度的关系

Fig. 11 The relationship of normalized impulse and deflection

与后面板的最终挠度的关系为

$$\bar{W} = a\bar{I} + b \tag{1}$$

式中： $\bar{W} = \frac{W}{L}$ ，为后面板的量纲一挠度，其中  $W$  为后面板中心点的最终挠度， $2L$  为固支梁的有效长度；

$\bar{I} = \frac{I}{L \sqrt{\rho_f \sigma_{f,y}}}$ ，为量纲一冲量， $I$ 、 $\rho_f$  和  $\sigma_{f,y}$  分别为加载冲量、面板材料密度和面板屈服强度； $a$ 、 $b$  为拟合

参数，分别为  $-0.38$  和  $27.52$ 。

### 4.2 面板厚度的影响

这一组实验研究不同面板厚度对夹芯梁抗冲击性能的影响。采用试件的芯层厚度为  $10\text{mm}$ ，面板厚度为  $0.5$ 、 $0.8$ 、 $1.0\text{mm}$ ，加载冲量约  $1.1\text{N}\cdot\text{s}$ 。图 12 给出了不同面板厚度的夹芯梁的动力响应，随着面板厚度的增大，夹芯梁的最终挠度逐渐减小。实验结果表明，与面板厚度为  $0.5\text{mm}$  的夹芯梁相比，面板厚度为  $0.8\text{mm}$  的夹芯梁的最终挠度约为它的  $2/3$ ，而面板厚度为  $1.0\text{mm}$  的夹芯梁的最终挠度约为它的  $2/5$ 。拟合实验数据后得到面板厚度与夹芯梁最终挠度呈线性关系(见图 13)

$$W = ph + q \tag{2}$$

式中： $W$  为将夹芯梁的最终挠度， $h$  为面板厚度， $p$ 、 $q$  为拟合参数，且有  $p = -15.90$ ， $q = 21.65\text{mm}$ 。

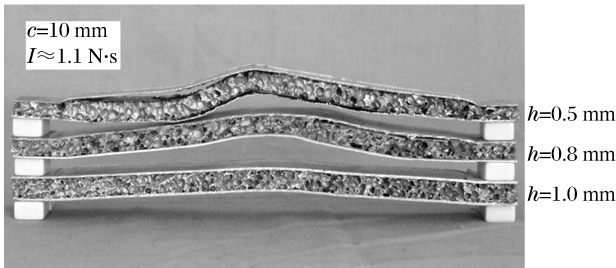


图 12 不同面板厚度夹芯梁的变形模式

Fig. 12 Deformation modes of sandwich beams with different face-sheets

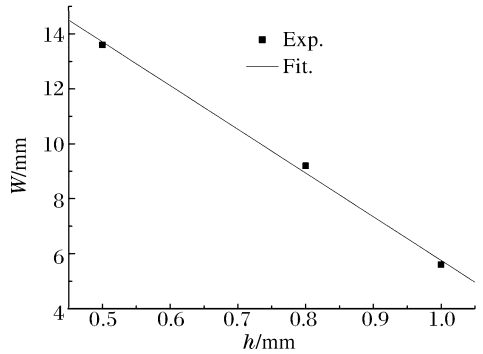


图 13 面板厚度与夹芯梁最终挠度的关系

Fig. 13 Relationship of face sheet and deflection

### 4.3 芯层厚度的影响

试件面板厚度为  $0.5\text{mm}$ ，加载冲量约  $1.55\text{N}\cdot\text{s}$ ，子弹质量近似相等，实验结果如表 1 和图 14 所示，表中  $m$  为子弹质量。结果发现，通过增加芯层厚度可以明显减小夹芯梁的最终挠度，从而提高夹芯结构的承载能力。与芯层厚度为  $10\text{mm}$  的夹芯梁相比，芯层厚度为  $20\text{mm}$  的夹芯梁可使后面板的最终挠度减小约  $30.9\%$ ，而芯层厚度为  $30\text{mm}$  的夹芯梁却能减少  $65.5\%$  左右。由此可见，芯层厚度与泡沫铝夹芯梁的抗冲击性能有密切关系，增加芯层厚度能够提高芯层的抗剪刚度，从而提高夹芯梁的抗冲击性能，这为夹芯梁的优化设计提供了一定的技术参考。

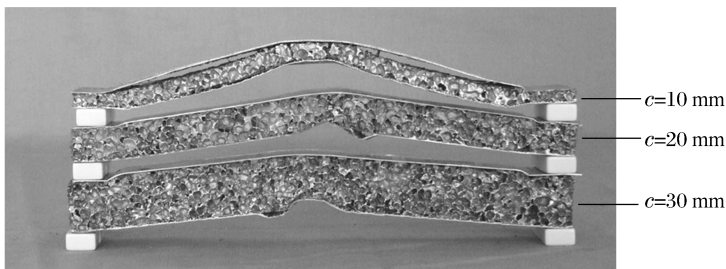


图 14 不同芯层厚度夹芯梁的变形模式

Fig. 14 Deformation modes of sandwich beams with different core

表 1 不同芯层厚度的夹芯梁的最终挠度

Table 1 The permanent deflection of different thickness of cores

$h/\text{mm}$	$c/\text{mm}$	$I/(\text{N} \cdot \text{s})$	$m/\text{g}$	$W/\text{mm}$	$\bar{W}$
0.5	10	1.59	13.76	44.0	0.352 0
0.5	20	1.55	14.20	30.4	0.243 2
0.5	30	1.52	13.78	15.2	0.121 6

## 5 与等质量实体梁的比较

为了对比研究泡沫铝夹芯梁和等质量实体梁在冲击载荷下的抗冲击能力,采用 5 个与夹芯梁等质量的实体梁试件,加载冲量与 4.2.1 节中的夹芯梁近似相等,如图 15 所示。为了便于对比研究夹芯梁和实体梁的动力响应,梁后面板中心点的量纲一挠度  $\bar{W}$  与量纲一冲量  $\bar{I}$  的关系如图 16 所示。在本文研究的冲量范围内,夹芯梁与等质量实体梁的残余变形均随着冲量的增加逐渐增大,且相等加载冲量时夹芯梁后面板的最终挠度均小于实体梁。可见,与等质量的实体梁相比,泡沫铝夹芯梁由于其芯层材料的可压缩性,耗散了绝大部分的加载能量,从而具有优越的抗撞击性能。采用这种结构可以有效减小其变形量,使得后面板一侧的物体或人员得到有效的保护,达到结构防护的目的。

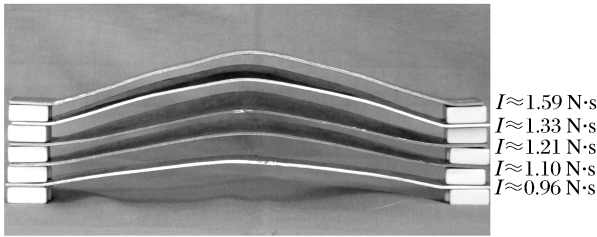


图 15 不同冲量下实体梁的变形模式

Fig. 15 Deformation modes of clamped monolithic beams subjected to impulse loading

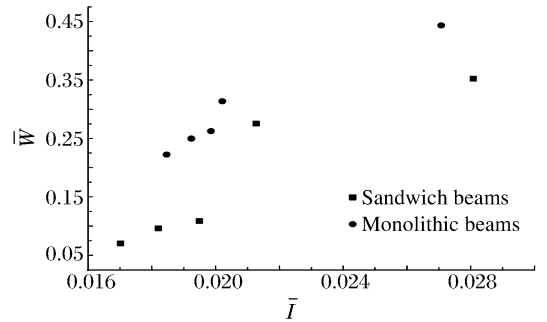


图 16 夹芯梁与实体梁最终挠度对比图

Fig. 16 A comparison of the permanent deflection of sandwich and monolithic beams

## 6 与准静态下变形的比较

为了系统研究泡沫铝夹芯梁的力学性能,对泡沫金属夹芯梁及其等质量的实体梁进行准静态加载,加载冲头采用与泡沫子弹相同的截面直径。加载终止条件通过后面板中心点的最终挠度控制,当达到动态压缩的永久变形时停止加载。图 17 给出了相同挠度下,泡沫子弹撞击加载与准静态加载下 2 种板的变形模态。从图中可以看出,动态加载下夹芯梁在泡沫子弹作用区域两端出现局部剪切失效;而准

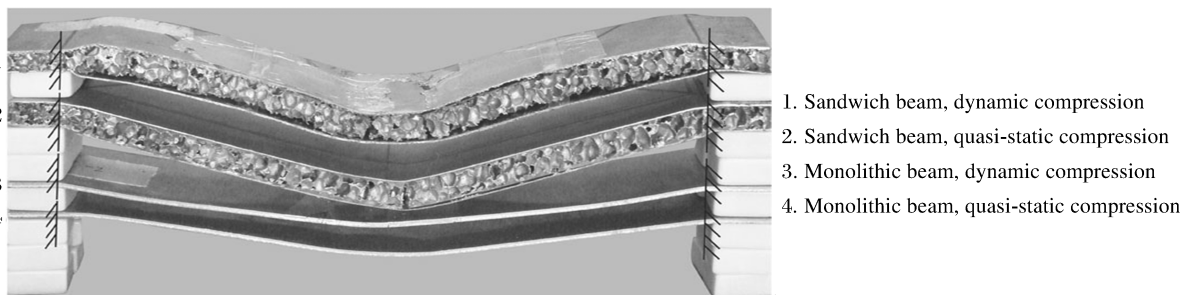


图 17 动态与准静态压缩对比图

Fig. 17 Photographs of the dynamically tested and the quasi-statically tested specimens

静态加载时夹芯梁呈现出整体弯曲变形,在夹芯梁的中部出现剪切失效。然而在实体梁试验中观察到了不同的变形模式,动态加载下实体梁表现为整体大变形,且变形过程是连续的;准静态压缩时实体梁加载冲头区域先出现局部压缩,再呈现出整体大变形。

## 7 结 论

应用泡沫金属子弹撞击加载的方式研究了固支泡沫铝夹芯梁和等质量实体梁的抗冲击性能,分别讨论了加载冲量、面板厚度和芯层厚度对夹芯梁抗冲击性能的影响。得到了梁后面板中心点的最终挠度与加载冲量的关系,并与准静态加载下的变形失效模式相比较,主要结论如下:

(1)泡沫金属子弹撞击加载下,夹芯梁的变形主要呈现出整体大变形。前面板主要表现为子弹作用区域的局部压入失效和整体变形;芯层的变形根据破坏程度的不同可分为加载中心区域的压缩变形和接近固支端的无压缩变形;后面板的变形为非弹性大变形,中心点挠度最大,与夹芯板不同的是未观察到明显的花瓣形变形。

(2)参数研究结果表明,泡沫铝夹芯梁后面板中心点的最终挠度随着加载冲量的增大而增大,且呈指数变化。实验研究范围内,最终挠度随着面板厚度的增加线性减少。而芯层厚度与夹芯梁抗冲击性能密切相关,增加芯层厚度能显著地提高夹芯梁的抗冲击能力。

(3)通过一定范围的冲量研究表明,与等质量的实体梁相比,泡沫铝夹芯梁具有较强的抗冲击能力和明显的结构优势。

## 参考文献:

- [1] 王志华. 泡沫铝合金动态力学性能及其吸能机理的研究[D]. 太原:太原理工大学,2005.
- [2] 赵桂平,卢天建. 多孔金属夹芯板在冲击载荷下的动态响应[J]. 力学学报,2008,40(2):195-206.  
ZHAO Gui-ping, LU Tian-jian. Dynamic response of cellular metallic sandwich plates under impact loading[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2008,40(2):195-206.
- [3] 李美峰. 多孔金属夹层板在高速冲击下的动态力学性能研究[D]. 西安:西安交通大学,2007.
- [4] Xue Z Y, Hutchinson J W. A comparative study of impulse-resistant metal sandwich plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004,30(10):1283-1305.
- [5] Hutchinson J W, Xue Z Y. Metal sandwich plates optimized for pressure impulses[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,47(4-5):454-569.
- [6] Foo C C, Seah L K, Chai G B. Low-velocity impact failure of aluminium honeycomb sandwich panels[J]. Composite Structures, 2008,85(1):20-28.
- [7] Radford D D, Deshpande V S, Fleck N A. The use of metal foam projectiles to simulate shock loading on a structure[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,31(9):1152-1171.
- [8] 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]. European Journal of Mechanics A/Solids, 2006,25(2):215-229.
- [9] Radford D D, Fleck N A, Deshpande V S. The response of clamped sandwich beams subjected to shock loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2006,32(6):968-987.
- [10] Fleck N A, Deshpande V S. The resistance of clamped sandwich beams to shock loading[J]. Journal of Applied Mechanics, 2004,71(5):386-401.
- [11] Tagarielli V L, Fleck N A. A comparison of the structural response of clamped and simply supported sandwich beams with aluminium faces and a metal foam core[J]. Journal of Applied Mechanics, 2005,72(5):408-417.
- [12] Yu J L, Wang X, Wei Z G, et al. Deformation and failure mechanism of dynamically loaded sandwich beams with aluminum-foam core[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,28(3):331-347.
- [13] Menkes S B, Opat H J. Tearing and shear failures in explosively loaded clamped beams[J]. Experimental Mechanics, 1973,13(11):480-486.

## Dynamic plastic response of foam sandwich beams subjected to impact loading\*

JING lin, WANG Zhi-hua, ZHAO Long-mao, YAN Qing-rong

*(The institute of Applied Mechanics and Biomedical Engineering,  
Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)*

**Abstract:** An investigation on dynamic response of clamped sandwich beams with aluminum foam cores and monolithic beams was achieved by using aluminum foam projectile loading. LDV device and Laser displacement transducer were applied to measure impact velocity of projectile and deflection-time history of the mid-point of back face of the beam, respectively. And then the effects of applied impulse, face-sheet thickness, and core thickness on the response of structures were studied. Deformation and failure modes of sandwich beams are exhibited according to experimental investigation. The results indicate that the structural response is sensitive to the configuration of sandwich structures. The permanent deflection of the mid-point of back face is presented proportional relationship with applied impulse and face-sheet thickness, respectively. Comparing with monolithic beams of the same mass, the result shows that sandwich beams have a superior shock resistance. The experimental results are of worth to optimum design of cellular metallic sandwich structures.

**Key words:** solid mechanics; dynamic response; impact loading; sandwich beam; aluminum foam

---

\* Received 17 September 2009; Revised 20 November 2009

Supported by the National Natural Science Foundation of China (10572100, 90716005, 10802055)

Corresponding author: YAN Qing-rong, qingrongyan@tyut.edu.cn

(责任编辑 曾月蓉)