

文章编号: 1001-1455(2009)04-0356-05

爆炸载荷作用下铝蜂窝夹芯板的动力响应*

张旭红, 王志华, 赵隆茂

(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: 为了考察铝蜂窝夹芯板在爆炸载荷下的动态响应, 采用自行设计的冲击摆系统, 用激光位移传感器测定了爆炸载荷作用在铝蜂窝夹芯板上的冲量, 对夹芯板的变形和失效模式进行了归类和分析, 并就芯层的几何尺寸、炸药当量及板厚对其响应的影响进行了系统研究。给出的理论分析结果与实验结果吻合较好。

关键词: 固体力学; 动力响应; 爆炸载荷; 铝蜂窝夹芯板; 变形失效模式

中图分类号: O347.3 **国标学科代码:** 130·1570 **文献标志码:** A

1 引言

爆炸载荷作用下结构的变形和失效机制的研究受到工程界的广泛关注。早期的研究主要集中于金属梁和板以及加筋等结构的非线性大变形问题^[1-2]。S. B. Menkes 等^[3]对固支铝梁进行研究, 发现梁有 3 种失效模式, 即: 整体塑性大变形(模式 I)、固支端的拉伸失效(模式 II)以及固支端的剪切失效(模式 III)。之后, 在圆板^[4]和方板^[5-7]的实验中 also 观察到了类似的失效模式。有关多孔金属夹芯梁、板在准静态压力和低速撞击作用下的研究较多, 而在爆炸载荷作用下的研究结果有限。N. A. Fleck 等^[8-10]基于芯层的压缩响应时间远小于夹芯板的整体响应时间, 建立了夹芯梁、圆板的理想刚塑性模型, J. W. Hutchinson 等^[11]对爆炸载荷作用下夹芯板和同样质量的实心板抗撞击性能进行了对比, 以面板的厚度、芯层胞元的长跨比及相对密度等为目标参数, 对具有角锥桁架、点阵结构芯层的夹芯板的进行了研究。目前, 对于爆炸载荷下铝蜂窝夹芯方板的变形和失效模式的实验研究较少。

本文中, 拟利用激光位移传感器测定蜂窝夹芯板在爆炸载荷作用下承受的冲量, 分析铝蜂窝夹芯板的变形和失效模式, 对不同厚度面板、不同几何尺寸和厚度的蜂窝芯层以及炸药当量对夹芯板动力响应的影响进行系统研究, 并与理论分析结果进行比较, 试图为矩形板抗冲击性能的工程优化设计提供参考。

2 实验方法

2.1 试件

夹芯板由上下 2 层面板和铝蜂窝夹芯层粘结而成。铝蜂窝夹芯层为 Hexcel 公司生产的六边形铝蜂窝, 性能参数可见参考文献^[12]; 上下 2 层面板由退火处理的 LY12 铝板材料构成(性能相当于 2024), 弹性模量 $E=72.4$ GPa, 剪切模量 $G=28$ GPa, 泊松比 $\nu=0.3$, 屈服强度 $\sigma_y=75$ MPa。面板厚度 f 分别为 0.5、0.8 和 1.0 mm。方形铝蜂窝夹芯试件边长 $L=300$ mm, 夹芯材料层厚度 $c=12.5$ mm。蜂窝由不同的边间距 $l(3.18、3.79$ 和 6.35 mm)和边厚 $t(0.018、0.025、0.038、0.051$ 和 0.066 mm)组合有 7 种形式, 采用 3 种厚度的面板, 共制成 60 个夹芯板试件。

2.2 试件冲量的测量

实验采用自行设计的冲击摆系统完成, 实验装置如图 1 所示。冲击摆系统质量 $M=140.75$ kg, 半径 $R=4.38$ m, 为了保证试件在爆炸过程中所受到的冲量的计算精度, 一般要求其摆动角度不得大于 5° 。实验测得 $T=3.4$ s, 而 $x_{\max} \leq 110$ mm。摆动角度为约 1.5° , 具有足够的精度。炸药使用 TNT, 预先压制成高度和直径大致相等的圆柱体, 密度在 1.50 g/cm³ 以上, 放置在试件的正前方中心 200 mm 处引爆。

采用 LD1625-200 激光位移传感器测定摆系统的位移时间曲线, 获得的典型位移曲线如图 2 所示。利用所得出的位移时间曲线可计算出试件所受的冲量。

* 收稿日期: 2008-03-03; 修回日期: 2008-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(90716005, 10802055, 10572100);

山西省自然科学基金项目(2007021005, 2009011059-11)

作者简介: 张旭红(1965—), 男, 博士研究生。

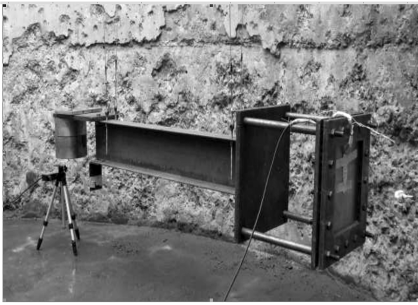


图 1 实验装置
Fig.1 Experimental set-up

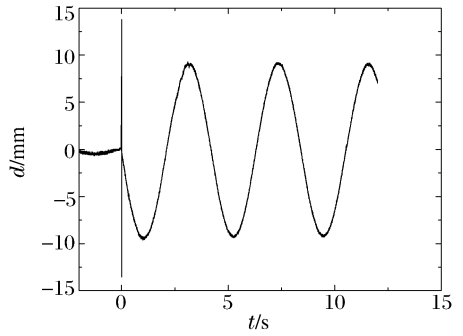


图 2 实验记录的典型位移曲线
Fig.2 Displacement curve recorded in the experiment

3 实验结果与讨论

3.1 变形和失效模式

按照铝蜂窝夹芯板的结构,将变形和失效模式按前面板、芯层、后面板等 3 种方式划分讨论。

对于前面板,所有试件都表现出在中心区的局部压缩失效和在外围区的整体大变形,在承载中心区域,可观察到 2 种类型的失效模式如图 3~4 所示,压入失效和侵蚀失效,并在周围伴有花瓣形的变形。压入失效表现为局部的大变形(没有破裂损伤),而侵蚀失效表现出局部的破裂和撕裂。

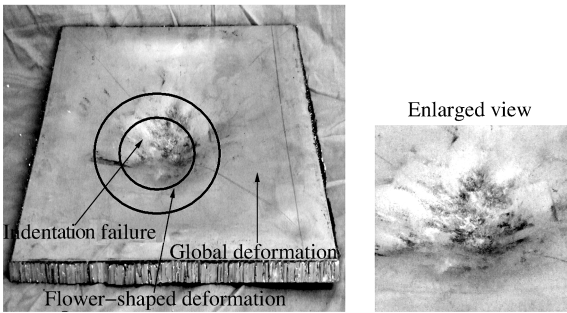


图 3 前面板的压入失效
Fig.3 Indentation failure on the front face

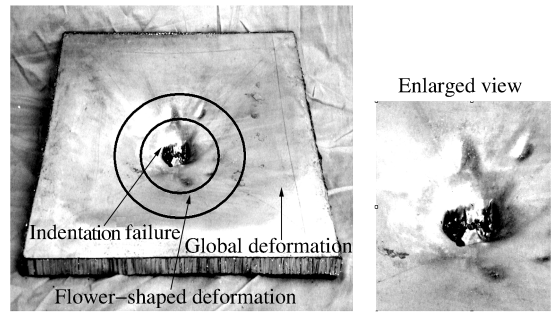


图 4 前面板的侵蚀失效
Fig.4 Pitting failure on the front face

与在低速撞击实验观察到的一样,芯层显示出 1 个渐进破坏的变形模式,按照不同的破坏程度,芯层可分为 3 个变形区域(如图 5),完全折叠区、部分折叠区和无折叠区。完全折叠区在试件的中心区域,在该区域可观察到蜂窝的竖直边发生折叠和贯穿以及局部撕裂。在部分折叠区,折叠模式相似,但渐进屈曲仅在前面板处形成,胞元竖直壁仍基本保持原状。除了折叠损伤发生外,前面板和芯层之间的脱层损伤也可在这 2 个区域观察到。非折叠区是指被钢框架约束的区域,由于没有脉冲载荷直接施加到该区域,蜂窝芯层基本没有发生折叠,但在部分折叠区和无折叠区之间可很明显地观察到芯层剪切失效。

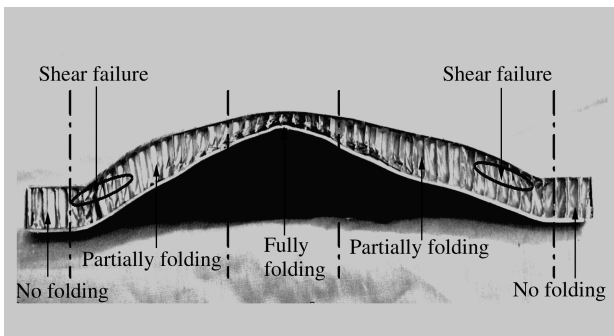


图 5 铝蜂窝芯层的失效模式
Fig.5 Failure modes of the honeycomb core

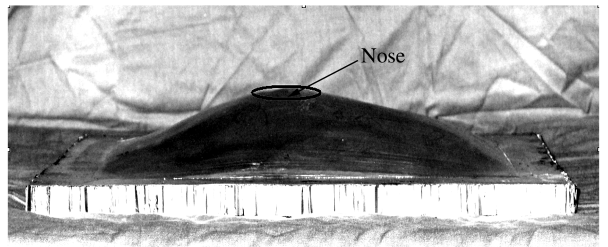


图 6 后面板的失效模式
Fig.6 Failure modes of the back face

图 6 为铝蜂窝夹芯结构后面板的变形失效模式,可近似归类在模式 I 即非弹性大变形中,其整体变形为穹形,中心的挠度最大,四边最小,并均匀地从中心一直变化到固支边界处。

3.2 分析和讨论

在了解夹芯板的变形失效模式后,下面对试件几何尺寸、蜂窝芯层的特征参数(如铝板厚度、蜂窝尺寸和厚度)以及不同量级爆炸载荷对其动力响应的影响进行分析。

3.2.1 面板厚度的影响

相同爆炸载荷下,采用的 3 种不同厚度面板的试件后面板的永久变形量如图 7 所示,随着面板厚度的增加,夹芯板的质量增加,夹芯板后面板的永久变形量也随着减小,因此,确定夹芯板质量和抗撞击性能之间的最佳配比,将是优化设计夹芯板的关键。

3.2.2 蜂窝尺寸的影响

在第 1 组试件中,首先考虑蜂窝单元边距相同($l=3.18\text{ mm}$)、壁厚不同的 4 种情况(厚度分别为 0.018 、 0.025 、 0.038 和 0.051 mm)。随着铝蜂窝壁厚的增加,后面板的永久变形量减少,如图 7 所示。

第 2 组试件中,采用蜂窝单元壁厚相同($t=0.038\text{ mm}$)、边距 l 不同(分别为 3.18 和 3.97 mm),随着铝板厚度的变化($f=0.5, 0.8, 1.0\text{ mm}$),2 种蜂窝夹芯板的平均变形量相差分别为 29.9% 、 38.0% 和 16.9% 。

第 3 组试件中,采用夹芯层质量近似相等(分别为 85.6 、 85.9 g)、相对密度相近、蜂窝单元尺寸不同,随着铝板厚度的变化($h=0.5, 0.8, 1.0\text{ mm}$),2 种蜂窝夹芯板的平均变形量相差分别为 5.2% 、 7.6% 和 2.0% 。

由于铝蜂窝单元边距和壁厚与夹芯层的相对密度呈函数关系,根据以上实验数据结果分析可知,铝蜂窝材料的相对密度直接影响夹芯板的后面板对爆炸撞击载荷的响应,相对密度越大,夹芯板的最终变形越小。

3.2.3 炸药当量的影响

第 4 组试件中,铝蜂窝夹芯结构的几何尺寸固定不变,考虑 15 、 20 、 25 、 30 g 等 4 种 TNT 炸药当量下夹芯结构的动力响应,研究不同大小脉冲载荷对夹芯结构动力响应的影响。载荷冲量与后面板的永久变形关系见图 8。从图中可看到,随着脉冲载荷增加,夹芯板的变形也相应增大,载荷冲量与永久变形量基本呈线性变化,拟合实验数据可得载荷冲量与后面板永久变形量的关系为

$$\delta = kI + b \tag{1}$$

式中: δ 为夹芯板后面板中心的残余变形量, I 为施加的载荷冲量, k 、 b 为待定参数,拟合实验参数得 $k=1\text{ mm}/(\text{N}\cdot\text{s})$, $b=2.72\text{ mm}$ 。

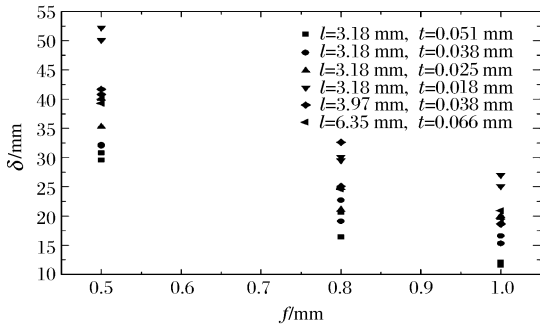


图 7 夹芯板几何尺寸的影响

Fig. 7 Effect of geometry size of sandwich plate

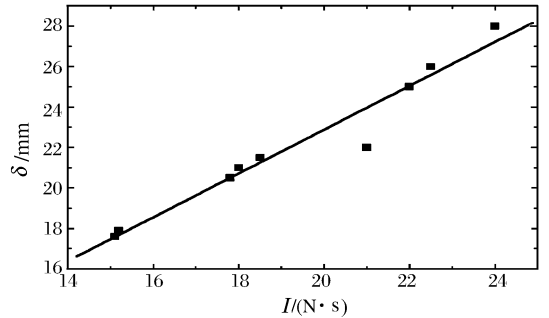


图 8 冲量大小的影响

Fig. 8 Effect of impulse about different mass of charge

4 理论分析和实验结果的对比分析

对夹芯板的变形进行了理论分析,考虑到芯层的压缩响应时间远小于夹芯板的整体响应时间,爆炸载荷下夹芯板的变形过程可分为 3 个阶段,提出 1 个考虑芯层可压缩性的屈服条件,并在此基础上,利用哈密尔顿原理给出了固支夹芯矩形板的最终变形模式。

考虑芯层可压缩性的屈服条件为

$$\left| \frac{M}{M_0} \right| + \frac{(\bar{\sigma} + 2\bar{h})^2}{4\bar{\sigma}\bar{h}(1 + \bar{h}) + \bar{\sigma}^2} \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 = 1 \quad 0 \leq \left| \frac{N}{N_0} \right| \leq \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\sigma} + 2\bar{h}} \tag{2}$$

$$\left| \frac{M}{M_0} \right| + \frac{\left[\left(\frac{N}{N_0} \right) (\sigma + 2\bar{h}) + (1 - \sigma) \right]^2 - (1 + 2\bar{h})^2}{4\bar{h}(1 + \bar{h}) + \bar{\sigma}} = 0 \quad \frac{\bar{\sigma}}{\sigma + 2\bar{h}} < \left| \frac{N}{N_0} \right| \leq 1 \quad (3)$$

式中： $M_0 = \sigma_Y h(c' + h) + \sigma_S c'^2 / 4$ ， $N_0 = \sigma_S c' + 2\sigma_Y h$ ， $\bar{\sigma} = \sigma_S / \sigma_I$ ， $\bar{h} = h/c$ ， $\bar{\rho} = \rho_c / \rho_f$ ， $c' = c(1 - \epsilon_c)$ 为经过第 2 阶段后的芯层厚度， ϵ_c 为第 2 阶段的压缩应变。

夹芯板响应时间和矩形板中点的最大挠度为

$$t_f = \frac{e_1 v_0}{e_2 + \sqrt{e_2^2 + 4e_1 e_3}}, \quad W_f = \frac{e_1 v_0^2}{2(e_2 + \sqrt{e_2^2 + 4e_1 e_3})} \quad (4)$$

式中： $e_1 = \frac{7}{12} \left(\frac{1}{3} - \frac{\zeta_0}{6} \right) \frac{ab\mu}{M_0}$ ， $e_2 = \frac{k_1}{24}$ ， $e_3 = \frac{3k_2 v_0^2}{320H}$ 。而对于下限屈服条件， $e_1 = \frac{7}{12} \left(\frac{1}{3} - \frac{\zeta_0}{6} \right) \frac{ab\mu}{\xi M_0}$ ， $e_2 = \frac{k_1}{24}$ ， $e_3 = \frac{3k_2 v_0^2}{320H}$ 。

理论分析获得的内接、外接屈服面的挠度与实验的对比如图 9~10，图中各量的量纲均为 1。从图中可看出，分析预测的变形挠度与实验结果吻合较好。

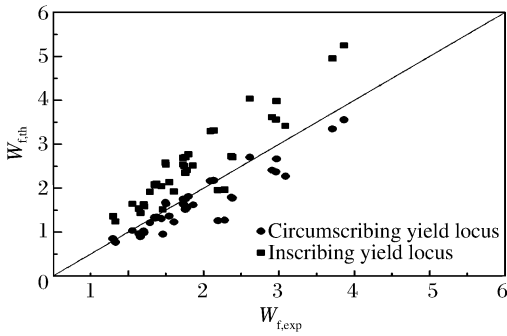


图 9 理论与实验挠度的对比

Fig. 9 Comparison of the theoretical and experimental deflections

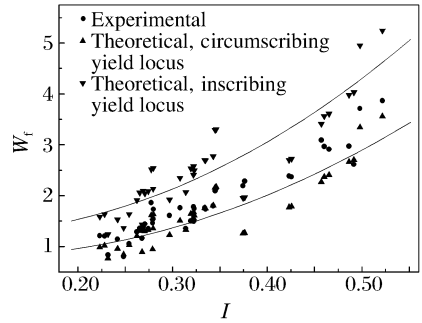


图 10 挠度与冲量的关系

Fig. 10 Relationship between the deflection and impulse

5 结 论

利用自行研制的冲击摆系统，研究了铝蜂窝夹芯板在爆炸载荷作用下的变形和失效模式，并对夹芯板面板几何尺寸和蜂窝芯层的尺寸(如铝板厚度、蜂窝几何尺寸和壁厚)以及不同大小脉冲载荷对其动力响应的影响进行了分析。实验结果表明：

由较厚的铝面板和较高相对密度的夹芯铝蜂窝组成的夹芯板在撞击载荷较小时，只在其前面板出现局部变形；而由较薄的铝面板和较低相对密度的夹芯铝蜂窝组成的夹芯板在承受较大撞击载荷时，会出现结构的整体变形，在前面板的中心区域，会出现不规则的压入失效和侵蚀失效；蜂窝夹芯层在不同的变形区会出现不同的皱褶和折叠，在较大冲量下，临近边界处会出现明显的剪切行为，而后面铝板永久变形主要呈穹顶形状。

铝蜂窝夹芯板后面板的变形是描述夹芯板动态响应的主要参数，夹芯板中铝板厚度和蜂窝材料的几何尺寸对其爆炸载荷下的动力响应有重要影响。

参考文献：

- [1] Nurick G N, Martin J B. Deformation of thin plates subjected to impulsive loading. A review. I : Theoretical considerations[J]. International Journal of Impact Engineering, 1989,8(2):159-170.
- [2] Nurick G N, Martin J B. Deformation of thin plates subjected to impulsive loading. A review. II : Experimental studies[J]. International Journal of Impact Engineering, 1989,8(2):171-186.
- [3] Menkes S B, Opat H J. Tearing and shear failures in explosively loaded clamped beams[J]. Experimental Mechanics, 1973,13(11):480-486.
- [4] Teeling-Smith R G, Nurick G N. The deformation and tearing of thin circular plates subjected to impulsive loads [J]. International Journal of Impact Engineering, 1991,11(1):77-91.
- [5] Nurick G N, Shave G C. Deformation and tearing of thin square plates subjected to impulsive loads[J]. International Journal of Impact Engineering, 1996,18(1):99-116.

- [6] Rudrapatna N S, Vaziri R, Olson M D. Deformation and failure of blastloaded square plates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999,22(4):449-467.
- [7] Nurick G N, Olson M D, Fagnan J R, et al. Deformation and tearing of blast loaded stiffened square plates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1995,16(2):273-291.
- [8] 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.
- [9] Qiu X, Deshpande V S, Fleck N A. Dynamic response of a clamped circular sandwich plate subject to shock loading [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2004,71(5):637-645.
- [10] Qiu X, Deshpande V S, Fleck N A. Finite element analysis of the dynamic response of clamped sandwich beams subjected to loading[J]. *European Journal of Mechanics A: Solids*, 2003,22:801-814.
- [11] Hutchinson J W, Xue Z. Metal sandwich plates optimized for pressure impulses[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2005,47:545-569.
- [12] Hexcel Corporation. HexWeb honeycomb energy absorption system: Design data[Z]. 2005.

Dynamic responses of sandwich plates with aluminum honeycomb cores subjected to blast loading

ZHANG Xu-hong, WANG Zhi-hua, ZHAO Long-mao*

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

Abstract: A large number of experiments were conducted, and the experimental results were reported and discussed. The quantitative results were obtained based on the measurement in the tests by a ballistic pendulum with corresponding sensors, and then the deformation/failure modes of specimens were classified and analyzed systematically. According to the experimental results, a parametric study was carried out, in which the effect of face-sheet and core configurations, such as face-sheet thickness, cell size and foil thickness of the honeycomb, and mass of charge, on the structural response were investigated. Good agreement between the experimental results and theoretical analysis indicates that the proposed method is a powerful approximation method for the dynamic plasticity analysis of a sandwich structure.

Key words: solid mechanics; dynamic response; blast loading; sandwich plate with aluminum honeycombs; deformation and failure modes

* Corresponding author; ZHAO Long-mao

E-mail address: zhaolm@tyut.edu.cn

Telephone: 86-351-6010560