DOI: 10.11883/1001-1455(2016)03-0333-07

梯度蜂窝夹芯板在爆炸荷载作用下的动力响应*

李世强,李 鑫,吴桂英,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: 利用弹道冲击摆锤系统对分层梯度蜂窝夹芯板在爆炸荷载下的动力响应进行了实验研究,分析了梯度蜂窝夹芯板在爆炸荷载作用下的变形失效模式,并与传统非梯度蜂窝夹芯板的抗爆性能做了对比。通过一维应力波理论,分析了应力波在梯度芯层中的传播规律。应力波透射系数在梯度试件中比非梯度芯层中小,而且相对密度递减的芯层组合有最小的应力波透射系数。综合考虑结构变形失效模式,后面板挠度,芯层压缩量以及应力波传播特点得到:分层梯度蜂窝夹芯板的抗爆性能明显优于传统的非梯度夹芯板,在所研究的荷载范围内,芯层相对密度从大到小排列试件的抗爆性能相对较好。

关键词: 爆炸力学;动力响应;爆炸荷载;蜂窝夹芯板;功能梯度材料
中图分类号: O381 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

随着汽车工业及航空航天技术的不断发展,夹芯复合结构由于比强度和比刚度高而被广泛的应用于防撞吸能构件的设计中。研究人员做了许多有关夹芯结构准静态[1]、动态[2]力学行为的工作,涉及的芯层结构包括蜂窝[3]、金属泡沫[4]、波纹板[5]及点阵结构[6]等多种形式,但大多数研究限于非梯度夹芯结构的力学行为。

分层梯度夹芯结构被认为是提高夹芯结构强度,减轻重量更为有效的途径。E. Etemadi 等[7]利用 LS-DYNA 有限元程序分析了功能梯度芯梁在圆柱形子弹冲击下的力学行为,他们发现与传统均质梁相比,最大接触力和最大应变都有明显的降低。L. Cui 等[8]提出了一种关于功能梯度聚合物泡沫的理论模型,在此模型的基础上,利用有限元方法研究了功能梯度泡沫的吸能特性,他们指出:增加梯度层之间的密度差异会降低芯层的吸能特性,相反减小层间密度差异能够提高芯层的吸能效率。N. Gardner 等[9]分析了功能梯度夹芯梁在冲击波作用下的力学响应,发现增加芯层数目能够有效的提高结构的抗冲击性能。X. Liu 等[10-11]通过数值模拟计算,分析了梯度金属泡沫夹芯圆柱壳和夹芯板在爆炸荷载下的动力响应,并与传统非梯度夹芯结构做了对比研究,他们发现在相同的荷载作用下梯度结构的抗爆炸性能明显优于非梯度结构,并且密度递减排列的梯度结构具有最佳的抗爆性能。Y. Li 等[12]和 N. A. Apetre 等[13]对梯度夹芯结构的动力响应做了数值模拟计算,指出通过合理的芯层设计能够提高芯层的吸能效率,减轻或者完全避免结构的破坏。L. Zhang 等[14]对梯度波纹夹芯板在冲击波作用下的动力响应进行了实验研究,他们发现平缓递减梯度芯层排列方式能够有效的减小后面板的挠度,提高结构的抗冲击性能。

本文中利用弹道冲击摆锤系统对分层梯度蜂窝夹芯板在爆炸荷载作用下的动力响应做了实验研究,分析梯度蜂窝夹芯板在爆炸荷载作用下的变形失效模式,并与传统非梯度蜂窝夹芯板的抗爆性能做了对比,并通过一维应力波理论,分析应力波在梯度芯层中的传播规律。

1 试样制备与实验方法

试件采用 5052 铝合金作为前后面板,厚度为 1.0 mm,蜂窝芯层基体材料采用 1200 铝合金,蜂窝孔为标准的正六边形,壁厚 $\tau=0.04$ mm,芯层根据蜂窝孔边长 a 的不同分为取 3 种:$a=1.5$ mm (记为

* **收稿日期**: 2014-10-13; **修回日期**: 2015-02-10
基金项目: 国家自然科学基金项目(11172196);山西省自然科学基金项目(2014011009-1)
第一作者: 李世强(1986—),男,博士;**通信作者**: 吴桂英,wgy2005112@163.com。

S)，$a=2.0$ mm(记为 M)，$a=2.5$ mm(记为 L)。各芯层的初始相对密度为：

$$\rho_0=\frac{2\tau/a}{(1+\sin\theta)\cos\theta}\rho_s \tag{1}$$

式中：τ 为蜂窝孔壁厚，$\theta=30°$，ρ_s 为基体材料密度。

通过不同的排列方式，可得到 6 种密度梯度组合形式不同的试件，记为 G1～G6，每种试件芯层从前到后的排列方式见表 1；另外，制作 3 种芯层密度不同的非梯度试件，记为 UG1、UG2 和 UG3，芯层分别为 S、M、L 型。试件的长和宽均为 300 mm，厚度为 23.0 mm。为了防止蜂窝板在变形过程中层间相互嵌入破坏，采用厚度为 0.1 mm 的 5052 铝合金箔膜作为隔层，芯层与面板及隔层板之间不粘结，为自由接触。夹芯板试件如图 1 所示，其中 C1、C2、C3 分别代表从前到后的 3 个芯层。各种材料力学性能参数如表 2 所示，其中 $\sigma_{0.2}$ 为材料的屈服强度，E 为弹性模量，ν 为泊松比。

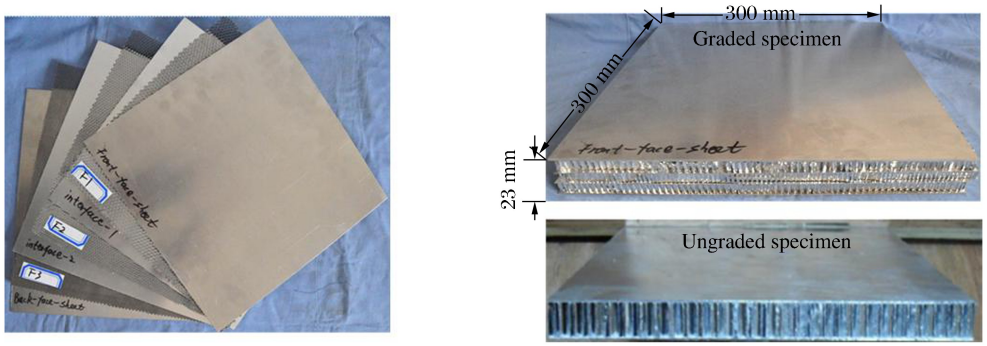

图 1 夹芯板试件

Fig. 1 Specimens of sandwich plates

表 1 试件分组与实验结果

Table 1 Specimen configurations and blast loading results

试件	芯层排列	W/g	R/mm	I/(N·s)	γ/mm	δ/mm		
						C1	C2	C3
G1	L-M-S	20	200	20.27	22.1	6.31	6.21	0.52
G2	L-S-M	20	200	20.06	17.4	5.91	3.74	1.93
G3	M-L-S	20	200	20.36	19.1	5.40	5.30	0.58
G4	M-S-L	20	200	20.32	18.6	5.79	1.50	4.05
G5	S-L-M	20	200	20.23	17.6	4.31	5.79	1.45
G6	S-M-L	20	200	20.01	18.1	5.53	4.67	4.41
G6	S-M-L	25	250	20.21	22.6	5.42	1.22	4.04
G6	S-M-L	30	300	20.54	25.3	5.68	5.86	6.00
UG1	S	20	120	20.19	34.6		贯穿	
UG1	S	20	150	20.03	21.7		贯穿	
UG1	S	20	200	20.14	20.6		7.70	
UG2	M	20	200	15.65	18.3		8.55	
UG2	M	30	300	19.25	28.6		10.88	
UG2	M	25	250	18.23	26.7		9.40	
UG3	L	20	200	15.31	24.0		13.60	
UG3	L	25	250	16.41	26.6		13.50	
UG3	L	30	300	19.03	26.1		13.00	

表 2 材料力学性能参数

Table 2 Mechanical properties of aluminum alloys

材料	$\sigma_{0.2}$/MPa	E/GPa	ρ_s/(g·cm^{-3})	ν
AL5052	325	70	2.7	0.3
AL1200	163	70	2.7	0.3

图 2 为冲击摆锤系统，冲击摆锤由一根长约 1.5 m 的工字钢、配重以及夹具 3 部分组成，通过 4 根钢绞线悬挂在空中，试件夹具通过螺栓固定在摆锤的夹具中。TNT 炸药在试件正前方起爆，起爆后整个系统在爆炸冲击作用下作前后摆动，通过测定摆锤系统摆动的位移来确定试件所受的冲量，摆锤总质量 M=151.3 kg，摆动半径为 2.69 m，摆动最大角度约为 2°，摆动周期 T=3.14 s，摆动最大位移为 100 mm。TNT 装药采用圆柱形(直径为 D，长度为 L)，如图 3 所示。

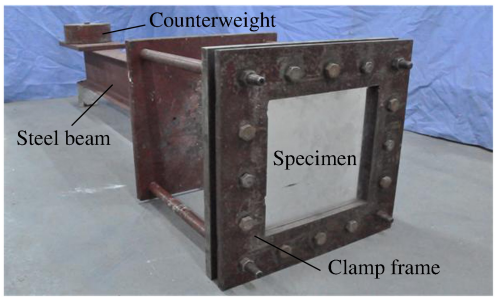

图 2 冲击摆锤系统

Fig. 2 Ballistic pendulum system

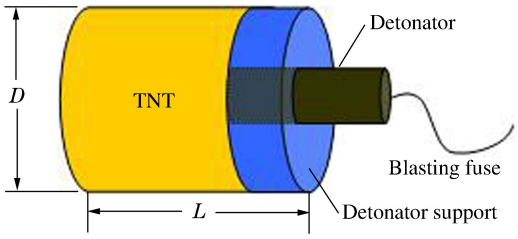

图 3 TNT 装药

Fig. 3 TNT charge

2 实验结果与分析

2.1 实验结果

表 1 给出了 17 个试件的芯层组合方式及实验结果，其中：W 为 TNT 药量，R 为 TNT 炸药距试件前面板的距离，I 为爆炸作用的冲量，γ 为前后面板的挠度，δ 为芯层的压缩量。冲量 I 是通过冲击摆锤系统测量得到，前后面板的挠度 γ 及芯层的压缩量 δ 均为试件最终的残余值。冲量的表达式为[15]：

$$I = Mx_1(2\pi/T)e^{\beta T/4} \tag{2}$$

$$\beta = \ln(x_1/x_2)/T \tag{3}$$

式中：x_1 和 x_2 分别为 $t=T/4$ 和 $t=3T/4$ 时摆锤的位移值。

2.2 失效模式分析

夹芯结构的失效模式可以分为 3 类[16]：模式Ⅰ，非弹性整体大变形；模式Ⅱ，非弹性局部变形；模式Ⅲ，局部贯穿撕裂。对于非梯度试件，3 种失效模式如图 4 所示。图 5 和图 6 分别给出了 W=20 g，R=200 mm 时，梯度试件的剖面图和 G1 试件的芯层压缩区域分化情况。

从表 1 以及图 4～6 可以看出，大多试件的前面板均呈现出局部变形或贯穿失效模式。分别从变形失效模式和塑性区域大小两方面分析夹芯板局部变形特征。从图 4 中可以看出随着装药距离的减小，非梯度夹芯结构的变形模式从非弹性大变形逐渐向局部压缩贯穿失效模式发展，当装药距离较近时，前面板呈花瓣状撕裂破坏，芯层贯穿，后面板也出现了较明显的局部变形(图 4(c))，在后面板上出现局部的鼻状凸起。从图 5 可以看出，芯层的排列组合对结构的变形有明显的影响，当第 1 层蜂窝芯层的胞孔较小时，前面板主要为局部变形，前两层芯层变形以胞孔屈曲密实化和整体弯曲变形为主，第 3 层蜂窝芯层与后面板为整体弯曲大变形；当第 1 层蜂窝板的胞孔较大时，前后面板呈现整体大变形，芯层主要呈现部分压缩与整体弯曲变形。并且从图 5 中还可以发现，G6 试件各部分变形相对一致，表现出了较好的整体变形性能。

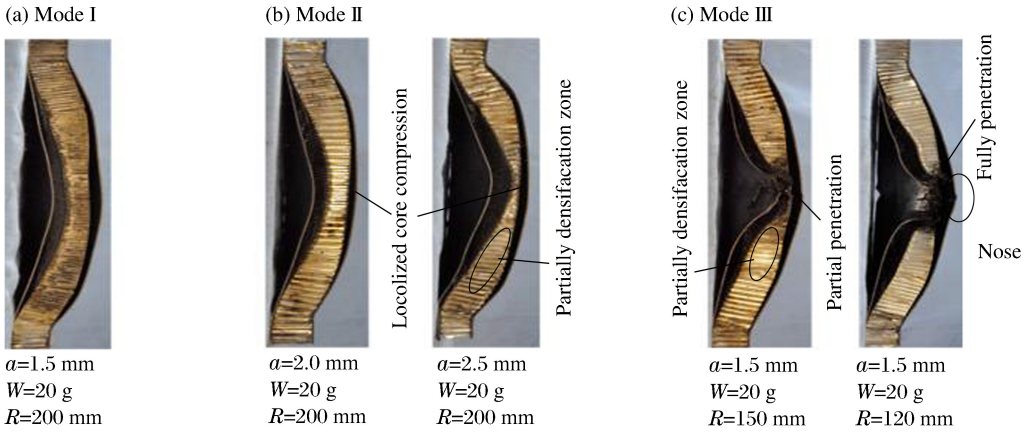

图 4 非梯度试件变形模式

Fig. 4 Deformation modes of ungraded sandwich plates

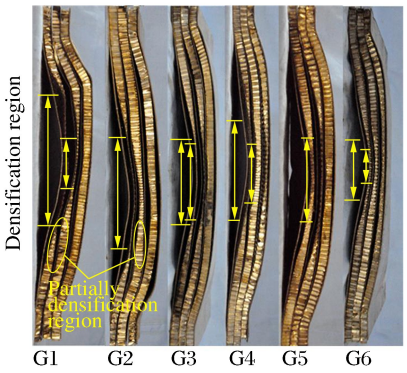

图 5 梯度试件变形模式

Fig. 5 Deformation modes of graded sandwich plates

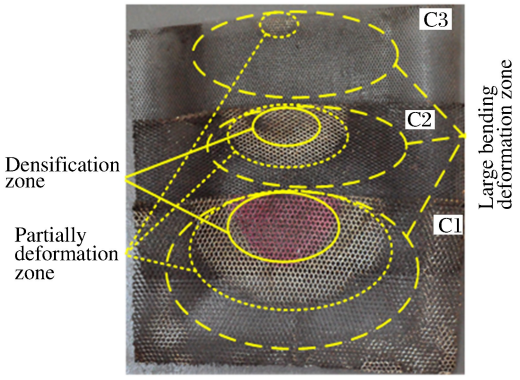

图 6 芯层压缩区域划分

Fig. 6 Failure pattern of the honeycomb core

通过对芯层的压缩程度将芯层从中心到边界划分了 3 个不同的区域，分别为：完全密实化区域；部分密实化区域，非压缩区域[17]。在非梯度试件中也出现了相似的芯层变形区域，如图 4 所示，如果药量较大，或炸药距离较前面板较近时，在芯层中部完全密实化区域会发生部分贯穿或完全贯穿失效。从图 6 可以看出，在 $W=20$ g，$R=200$ mm 时，G1 试件（芯层相对密度从前到后递增排列）第 1 层蜂窝中心区域完全被压实，从中心向外芯层的压缩量逐渐减小，第 3 层蜂窝芯层中部没有出现压实区域，较小的中心区域被部分地压缩，主要呈现出整体的弯曲变形。芯层主要压缩区域和密实化区域的近似呈圆形，表 3 给出了梯度试件在 $W=20$ g，$R=200$ mm 时变形区域面积对比，其中 S_1 和 S_2 分别为部分压实区域和完全压实区域面积。从表 3 中可以看出，相对密度较小的芯层变形区域和密实化区域较大，当相对密度最小的芯层（L 型）在结构的不同位置时，压缩区域面积在 78.5～254.3 mm^2 范围内。不同试件中芯层相对密度最大的蜂窝芯层（S 型）压缩区域相差较大，当它作为 C3 芯层时压缩区域面积在 7.1～12.7 mm^2 范围内，但当其作为 C1 芯层时压缩区域面积在 103.8～132.7 mm^2 范围内。由于增加相对密度加大的芯层的压缩量和压缩区域，可以有效提高结构的吸能效果，所以相对密度较大的芯层靠近冲击端时有利于结构抗爆性能的提高。

2.3 抗爆性能对比

结构抗爆性能可以通过对前后面板挠度、变形失效模式、芯层压缩量和能量吸收比例以及应力波传播特性等方面来分析。本小节综合夹芯板后面板挠度和芯层压缩情况与失效模式对比分析不同夹芯板的抗爆性能。图 7 和图 8 分别给出了梯度试件与非梯度试件后面板挠度残余值及芯层压缩量的对比。从图 7 可以看出，在 3 种工况下，梯度试件后面板挠度明显小于非梯度试件。当 $W=20$ g，

表 3 梯度试件芯层变形区域面积对比($W=20$ g,$R=200$ mm)

Table 3 Comparison of the deformation area of the core layers ($W=20$ g,$R=200$ mm)

试件	芯层排列	S_1/mm²			S_2/mm²		
		C1	C2	C3	C1	C2	C3
G1	L-M-S	254.3	78.5	12.7	132.7	28.3	0
G2	L-S-M	213.7	63.6	12.6	86.5	0	0
G3	M-L-S	176.6	132.7	7.1	50.2	28.3	0
G4	M-S-L	201.0	50.2	78.5	63.6	0	7.1
G5	S-L-M	132.7	153.9	15.9	0	28.3	0
G6	S-M-L	103.8	38.5	201.0	33.2	5.0	0

$R=200$mm 时，与非梯度试件 UG3($a=2.5$ mm)相比，梯度试件 G1、G2、G3、G4、G5 和 G6 后面板挠度分别减小了 7.9%、27.5%、20.4%、22.5%、26.7%和 24.6%。在 6 种梯度组合中，“L-S-M”、“S-L-M”、“S-M-L”3 中排列方式表现出了较好的抗爆炸冲击性能。从图 8 可以看出，不同的芯层排列对各芯层的压缩量有明显的影响，但孔径较大的芯层(L 型)在结构的任何位置都有 5～6 mm 的压缩量，当孔径较小的芯层(S 型)靠近前面板时，其压缩量明显增加，由于能量耗散主要通过芯层逐渐压缩屈曲，所以增加芯层的压缩量是提高夹芯结构能量吸收的有效途径。在 G6 试件中 3 层芯层都有较大的压缩量，且总压缩量是所有试件中最大的，其呈现出整体变形模式，所以综合以上变形模式，后面板挠度以及芯层的压缩情况，G6 试件(芯层相对密度从前到后逐渐减小)的抗爆炸冲击性能较好。

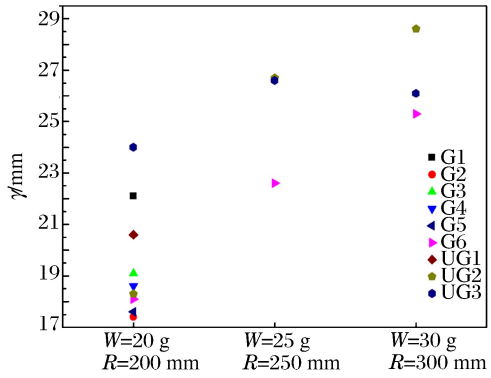

图 7 不同工况下后面板残余挠度

Fig. 7 Permanent mid-point deflections of the back-face-sheet under differente conditions

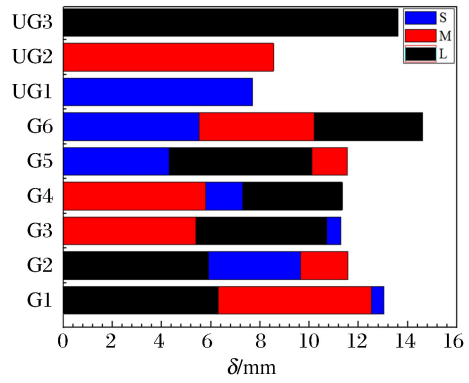

图 8 $W=20$ g,$R=200$ mm 时的芯层压缩量

Fig. 8 Core compressions while $W=20$ g, $R=200$ mm

2.4 应力波在梯度芯层中的传播

梯度芯层中应力波的传播特性对芯层的能量吸收和耗散有明显的影响，而影响应力波传播特性的主要因素为芯层材料的波阻抗[18-20]。由于应力波传播特性较为复杂，目前有关这方面的研究都集中在一维应力波理论的基础上，应力波从一种介质传播到另一种介质中时，在界面上发生反射与透射 2 种现象，在考虑夹芯结构作为防护层时，主要关注应力波的透射，减小透射波是提高夹芯结构防护性能的主要方法，在一维状态下，透射应力波为：

$$\Delta\sigma_{\mathrm{T}}=\frac{2}{1+(\rho_0 c_0)_1/(\rho_0 c_0)_2}\Delta\sigma_{\mathrm{I}}=K\Delta\sigma_{\mathrm{I}} \tag{4}$$

式中：$\Delta\sigma_{\mathrm{T}}$ 是透射应力波的应力增量，$\Delta\sigma_{\mathrm{I}}$ 是入射应力波的应力增量，K 为透射系数，$(\rho_0 c_0)_1$ 和 $(\rho_0 c_0)_2$ 分别是前方材料和后方材料的波阻抗，c_0 为材料的声速。如果 $(\rho_0 c_0)_1<(\rho_0 c_0)_2$，则 $\Delta\sigma_{\mathrm{T}}>\Delta\sigma_{\mathrm{I}}$ 如果 $(\rho_0 c_0)_1>(\rho_0 c_0)_2$，则 $\Delta\sigma_{\mathrm{T}}<\Delta\sigma_{\mathrm{I}}$。如果有多层材料，则透射系数可表示为[21]：

$$K_n=\frac{2}{1+(\rho_0c_0)_1/(\rho_0c_0)_2}\cdot\frac{2}{1+(\rho_0c_0)_2/(\rho_0c_0)_3}\cdots\frac{2}{1+(\rho_0c_0)_{n-1}/(\rho_0c_0)_n}$$
$$=\frac{2^{n-1}}{\prod_{i=1}^{n-1}[1+(\rho_0c_0)_i/(\rho_0c_0)_{i+1}]} \tag{5}$$

式中：$(\rho_0c_0)_i$ 为第 i 层材料的波阻抗。本文中，$(\rho_0c_0)_L>(\rho_0c_0)_M>(\rho_0c_0)_S$，所以芯层的组合次序对应力的传播有明显的影响，当芯层相对密度从前到后逐渐减小时，透射系数 Kn 是最大的，相反，当芯层相对密度从前到后逐渐增加时，透射系数 K_n 最小。所以 G6 试件芯层的组合方式有利于减小透射应力波。然而，式(4)和(5)均未考虑材料在变形过程中波阻抗的变化，而随着蜂窝的压缩，蜂窝板的相对密度 ρ 在不断的改变，满足：

$$\rho=\rho_0/(1-\varepsilon_t) \tag{6}$$

式中：ρ_0 为蜂窝板的初始相对密度，ε_t 为不同时刻蜂窝芯层的压缩应变。

同时蜂窝芯层中的波速也不断变化，而且波速的变化更为复杂，在冲击波在不断压缩的芯层中传播时，冲击波的传播特性变得更加复杂，式(5)已可能不再适用，有关这方面的结论还需要进一步做数值模拟和理论研究。

3 结 论

通过爆炸荷载作用下蜂窝夹芯板的实验，对比分析了梯度夹芯板与传统非梯度结构变形失效模式以及抗爆性能，实验结果表明：(1)夹芯板变形模态主要呈现两种变形模式：非弹性整体大变形和局部贯穿失效；梯度夹芯板芯层的组合方式对结构的变形模式有明显的影响，当第 1 层蜂窝板的胞孔较小时，前面板呈现局部变形；当第 1 层蜂窝板的胞孔较大时，前面板呈现整体大变形。(2)分层梯度试件的抗爆性能明显优于非梯度试件，在本文研究的荷载范围内，相对密度从前到后逐渐减小的芯层组合具有最佳的抗爆炸冲击性能。(3)在一维应力波理论下，不考虑波阻抗在芯层压缩过程中的变化，相对密度从前到后逐渐减小的芯层组合有利于应力波的耗散和结构抗冲击性能的提高。但是当冲击波在压缩后的芯层中不断的发生反射和透射时，应当考虑波阻抗变化的影响。

参考文献：

[1] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: structure and properties[M]. 2nd ed. UK: Cambridge University Press, 1997.

[2] Xu S, Beynon J H, Ruan D, et al. Strength enhancement of aluminium honeycombs caused by entrapped air under dynamic out-of-plane compression[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012,47(4):1-13.

[3] Zhao H, Gary G. Crushing behavior of aluminum honeycombs under impact loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 1998,21(10):827-836.

[4] Zhang X, Zhang H, Wen Z. Experimental and numerical studies on the crush resistance of aluminum honeycombs with various cell configurations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014,66:48-59.

[5] Liang C-C, Yang M-F, Wu P-W. Optimum desing of metallic corrugated core sandwich panals subjected to blast loads[J]. Ocean Engineering, 2001,28(7):825-861.

[6] McShane G J, Radford D D, Deshhpand V S, et al. The response of clamped sandwich plates subjected to shock loading[J]. European Journal of Mechanics: A: Solids, 2006,25:215-129.

[7] Etemadi E, Khatibi A A, Takaffoli M. 3D finite element simulation of sandwich panels with a functionally graded core subjected to low velocity impact[J]. Composite Structures, 2009,89(1):28-34.

[8] Cui L, Kiernan S, Gilchrist M D. Designing the energy absorption capacity of functionally graded foam materials[J]. Material Science Engineering A: Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2009,507(1/2):215-225.

[9] Gardner N, Wang E, Shukla A. Performance of functionally graded sandwich composite beams under shock wave loading[J]. Composite Structures, 2012,94(5):1755-1770.

[10] Liu X, Tian X, Lu T J, et al. Blast resistance of sandwich-walled hollow cylinders with graded metallic foam

cores[J]. Composite Structures, 2012,94(8):2485-2493.

[11] Liu X, Tian X, Lu T, et al. Sandwich plates with functionally graded metallic foam cores subjected to air blast loading[J]. International Journal of Mechanical Sciences,2014,84:61-72.

[12] Li Y, Ramesh K T, Chin E S C. Dynamic characterization of layered and graded structures under impulsive loading[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001,38(34/35):6045-6061.

[13] Apetre N A, Sankar B V, Ambur D R. Low-velocity impact response of sandwich beams with functionally graded core[J]. International Journal of Solids and Structures, 2006,43(9):2479-2496.

[14] Zhang L, Hebert R, Wright J T, et al. Dynamic response of corrugated sandwich steel plates with graded cores [J]. International Journal of Impact Engineering, 2014,65:185-194.

[15] 敬霖，王志华，赵隆茂. 爆炸荷载作用下结构冲量的测量[J]. 实验力学，2009，24(2)：151-156.
Jing Lin, Wang Zhihua, Zhao Longmao. Measurement of impulse acted on a structure subjected to blast loading [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009,24(2):151-156.

[16] 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, 2009,91:433-441.

[17] 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.

[18] Makris A, Frost D L, Nerenberg J, et al. Attenuation of a blast wave with a cellular material[C]// Proceedings of the 20th International Symposium on Shock Waves (ISSW/20). Pasadena, CA, USA, 1996,2:1387-1392.

[19] Bruck H A. A one-dimensional model for designing functionally graded materials to manage stress waves[J]. International Journal of Solids and Structures, 2000,37(44):6383-6395.

[20] Samadhiya R, Mukherjee A, Schmauder S. Characterization of discretely graded materials using acoustic wave propagation[J]. Computation Materials Science, 2006,37(1/2):20-28.

[21] 宋博，胡时胜，王礼立. 分层材料的不同排列次序对透射冲击波强度的影响[J]. 兵工学报，2000，21(3)：272-274.
Song Buo, Hu Shisheng, Wang Lili. Influnence on the transmitted intensity of shock wave through different tactic orders of layered materials[J]. Acta Armamentarii, 2000,21(3):272-274.

Dynamic response of functionally graded honeycomb sandwich plates under blast loading

Li Shiqiang, Li Xin, Wu Guiying, Wang Zhihua, Zhao Longmao

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

Abstract: In this paper we report on the tests that investigate the blast resistance of graded sandwich plates. The deformation model, the back-face-sheet deflections and the core compressions have been compared with the test results obtained from tests done on structures with ungraded core layers. The stress transfer characteristics are analyzed based on the one dimensional stress wave theory, indicating that the stress wave transferred factor is smaller in the graded core layers and it is smallest in the relative density-tapered core arrangement specimen. By considering the deformation model, back-face-sheet deflections, core compressions and stress transfer characteristics, the blast resistance of the graded sandwich plates is found to be better than that of the ungraded ones, and in the present loading conditions, the relative density-tapered core arrangement from the front sheet to the back sheet is found to have the best blast resistance.

Key words: mechanics of explosion; dynamic response; blast loading; honeycomb sandwich panels; functionally graded materials

（责任编辑　王小飞）