DOI: 10.11883/bzycj-2016-0267
文章编号: 1001-1455(2018)01-0085-07

电炮加载下芳纶蜂窝夹芯板的动力响应*

赵亚运[1],莫建军[2],谭福利[2],孙宇新[1],张 进[3]
(1. 南京理工大学瞬态物理国家重点实验室,江苏 南京 210094;
2. 中国工程物理研究院流体物理研究所,四川 绵阳 621999;
3. 南京晓庄学院环境科学学院,江苏 南京 210094)

摘要: 研究了方形钛-芳纶蜂窝夹芯板在电炮驱动的高速聚酯飞片撞击加载下的动力响应,给出了面板和蜂窝芯层在不同冲击速度下的变形及失效模式。采用 VISAR(velocity interferometer system for any reflector)测速技术测量了后面板中心点的速度时程,分析了芳纶蜂窝夹芯板的动态响应过程,讨论了冲击速度对夹芯板动力响应和抗冲击能力的影响。研究结果表明,低波阻抗的芳纶蜂窝破碎行为阻断了应力波向后面板的传播途径,破碎的蜂窝和塑形大变形的前面板吸收了高速冲击的大部分能量,充分发挥了钛合金的高强度和芳纶蜂窝的缓冲吸能特性,提高了夹芯板整体的防护能力。

关键词: 动力响应;脉冲载荷;夹芯板;芳纶蜂窝;聚酯飞片;电炮
中图分类号: O347.3 **国标学科代码**: 1301575 **文献标志码**: A

夹芯结构一般由上下两层低密高强面板和中间轻质芯层构成,以其优良的能量吸收能力和抗爆抗冲击特性被广泛应用到航空航天、交通运输、武器装备等对结构重量敏感的领域。芳纶蜂窝具有轻质、高强度、耐辐射等优良性能[1],钛合金具有比强度高、工艺性能好、耐高温等一系列突出优点。钛-芳纶蜂窝夹芯板不仅可以吸收较高冲击能量,还可以长时间工作在高辐射环境下,可被应用到空间防护结构和定向能防护结构中。因此,开展芳纶蜂窝夹芯板的冲击实验对于了解其防护能力具有重要意义。目前,通常采用爆炸冲击波加载[2-5]、子弹撞击加载[6-8]、Hopkinson 杆脉冲波加载[9-10]等方式研究夹芯板在不同冲击环境下的防护机理和性能。相比,电炮[11]加载能够为飞片提供更高的动能,并且可以通过控制飞片厚度和充电电压调节加载压力和脉冲宽度,实验可控性好,可用于模拟空间薄片撞击和定向能武器攻击。基于此,本文中利用电炮施加强冲击脉冲载荷,采用 VISAR(velocity interferometer system for any reflector)测速技术测量芳纶蜂窝板后面板背面中心点的速度,给出面板和蜂窝夹芯的在不同冲击速度下的失效模式,分析夹芯板的动态响应过程并研究冲击速度对后面板动态响应的影响。

1 实验方法

1.1 试件

正方形试件由前面板、芳纶蜂窝夹芯层、支撑框、后面板 4 部分组装而成。其中,前、后面板材料均为 TC4 钛合金;夹芯层材料为 AC-KH-1.83-48 型间位芳纶纸蜂窝,胞元为正六边形,非稳定型平面压缩强度为 2.05 MPa,纵向和横向抗剪切强度分别为 1.29 MPa 和 0.86 MPa[12]。支撑框材料为 45 钢,内壁与蜂窝侧壁接触,通过约束夹芯层边界的侧向位移,降低蜂窝尺寸效应对实验结果的影响。

试件和蜂窝胞元的几何尺寸如图 1 所示。正方形试件厚度 $T=7$ mm,边长 $L=50$ mm,其中,蜂窝夹芯层厚度 c、前面板厚度 h_u、后面板厚度 h_d 分别为 4、2 和 1 mm;夹芯层边长 $L_a=46$ mm,与此对应的支撑框边框厚度 $b=2$ mm。芳纶蜂窝的 3 个关键参数分别为:蜂窝边长 $l=1.83$ mm,密度 $\rho=48$ kg/m^3,壁厚 $t\approx0.1$ mm。芳纶蜂窝受生产工艺影响,粘接成型后使单胞 6 边中有 2 边为双倍壁厚,其几何形态如图 1(b)所示。

* **收稿日期**: 2016-09-01; **修回日期**: 2016-12-19
第一作者: 赵亚运(1990—),男,博士研究生; **通信作者**: 孙宇新,yxsun01@163.com。

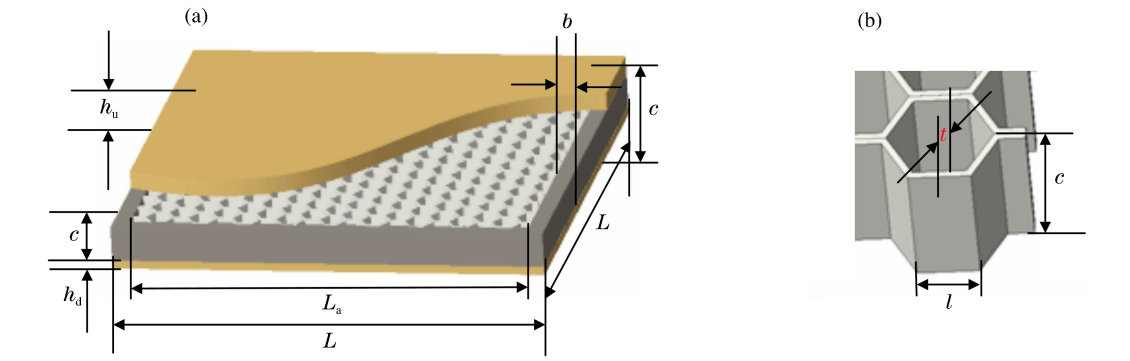


图 1 试件和蜂窝胞元的几何尺寸

Fig. 1 Geometries and dimensions of the square specimen and honeycomb cell

1.2 实验装置

采用储能 14.4 kJ 的电炮作为加载装置[13],利用 VISAR 实测后面板背面中心点的速度历史,开展蜂窝夹芯板的高速冲击实验。

电炮的基本原理是 RLC 电路快速放电,高电阻金属箔吸能爆炸。典型的电炮放电回路如图 2 所示,当铝桥箔吸收了电脉冲能量转化成的大部分焦耳热,爆炸产生的高温金属蒸气和等离子体急剧膨胀,推动 0.5 mm 厚的聚酯薄膜(Mylar)经加速腔炮膛口环切出直径为 30 mm 的高速 Mylar 飞片,飞片在加速腔内加速到接近终态速度冲击试件。图 3 为电炮实验安装结构示意图:试件安置在加速腔的上方,前面板向下且中心线与加速腔轴线重合,无外力约束;试件的上方安装 VISAR 测试探头。

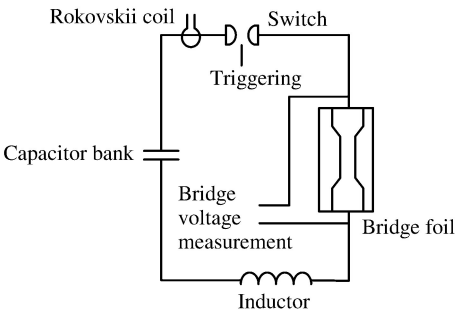


图 2 电炮放电回路原理图

Fig. 2 A principle diagram for the discharge circuit of the electric gun

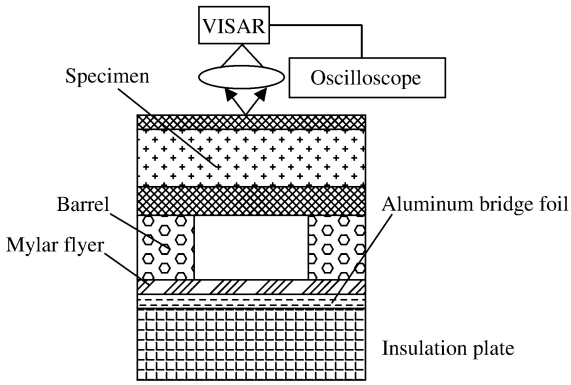


图 3 实验试件安装结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental setup

2 实验结果与分析

2.1 量化结果

金属箔电爆炸驱动 Mylar 飞片的速度可以通过金属箔与飞片之间能量转换的电格尼公式[11]获得:

$$v_f = \sqrt{KJ^n}\left(\frac{m_f}{m_m}+\frac{1}{3}\right)^{-1/2} = \sqrt{KJ^n}\left(\frac{\rho_f h_f}{\rho_m h_m}+\frac{1}{3}\right)^{-1/2} \tag{1}$$

式中:v_f 为飞片的终态速度,K、n 为经验常数,J 为爆炸电流密度,m_f 为飞片面积质量,m_m 为金属箔面积质量,ρ_f、ρ_m 分别为飞片和金属桥箔的密度,h_f、h_m 分别为飞片和金属桥箔的厚度。

高速碰撞过程中 Mylar 飞片瞬间融化和气化,如果忽略 Mylar 飞片的气化反冲冲量,则作用在试件上的总冲量等于飞片的终态动量,即 $I=\pi D^2 t_f \rho_f v_f/4$,$D$ 和 t_f 分别为飞片的直径和厚度。表 1 汇总了 Mylar 飞片终态速度、作用在试件上的总冲量和前面板的失效模式。

表 1 实验得到的冲量和失效模式

Table 1 Impulses and deformation/failure modes obtained in experiments

样品	v_f/(km·s^{-1})	I/(N·s)	前面板的失效模式
A1	1.78	0.881	层裂模式Ⅰ
A2	2.00	0.990	层裂模式Ⅱ
A3	2.33	1.153	层裂模式Ⅱ
A4	2.74	1.356	层裂冲塞模式

2.2 变形和失效模式

夹芯板不同的变形及失效模式对应不同的能量吸收状态和结构承载能力，研究其变形及失效模式对于优化芳纶蜂窝夹芯板的设计具有重要的参考价值。下面分别讨论前面板、夹芯层和后面板的变形及失效模式。

2.2.1 前面板的变形和失效模式

前面板直接受到 Mylar 飞片的高速冲击，它的变形和失效模式体现了冲击载荷的强度，可以分为 3 种不同模式。

(1)层裂模式Ⅰ。此模式下最明显的实验现象是面板背面开始层裂，层裂片尚未完全形成，如图 4 中 A1 所示。根据撞击形成的圆形边界可以将前面板分为局部变形区和整体变形区，如图 5 所示。Mylar 飞片直接冲击而成的局部变形区，中心平整，背面留有六边形芳纶蜂窝夹芯的规则压痕。整体变形区从背部裂纹扩展到整个面板。

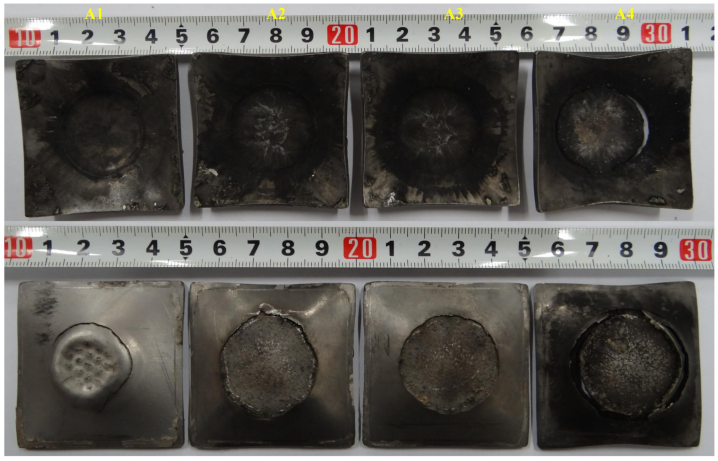


图 4 试件前面板的层裂模式

Fig. 4 Spallation modes for the front plates of the specimens

(2)层裂模式Ⅱ。此模式下前面板的破坏程度持续增大如图 4 中 A2、A3 所示，背面层裂片完整生成。如图 6 中 A2、A3 所示，圆形层裂片直径约 2.6 mm，中心部分鼓起，边缘翘起并伴有一圈明显的裂缝。层裂片呈现出这种形态的原因可能是：钛板受到 Mylar 飞片冲击后，内部形成的冲击波近似为一维应变平面波，但受侧向稀疏波的影响，导致产生的层裂片中心速度略大于边缘，最终表现为中心鼓起、边缘滞后的现象。

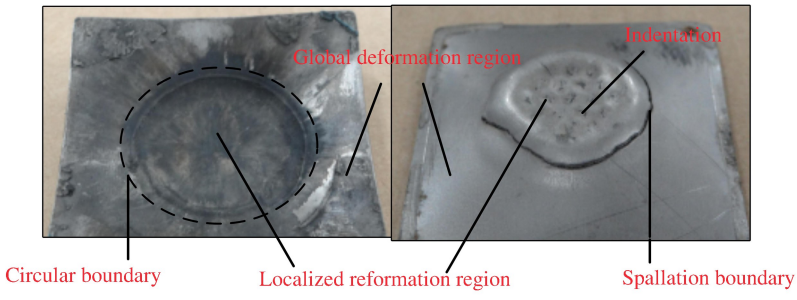


图 5 试件 A1 层裂模式局部放大图

Fig. 5 Enlarged spallation views for the front plate of Specimen A1

(3)层裂冲塞模式。此模式下前面板发生层裂和冲塞组合破坏，如图 5 中 A4 所示，前面板背面层裂，局部变形区塞块即将脱离面板。和 A2 和 A3 的层裂片相比，A4 的层裂片(如图 6 中 A4 所示)厚度减小，直径也仅约 2.3 mm。受飞片高速冲击后，前面板中的应力脉冲近似为三角形，脉冲在自由面反

射为拉伸波。按照最大拉应力瞬时断裂准则，可确定层裂片的厚度 δ[14] 为：$\delta=2\lambda c_0\sigma_c/\sigma_p$，其中 λ 为脉冲宽度，c_0 为材料纵波波速，σ_p 为脉冲峰值，σ_c 为层裂阀值应力。根据数值计算结果，A2、A3、A4 的峰值压力分别为 26.5、33.1、38.9 GPa，脉冲宽度分别为 341、334、318 ns，即随着冲击速度的提高，前面板中脉冲峰值增大但脉冲宽度减小，最终形成的层裂片厚度减小。冲塞破坏形成的原因可能是：飞片平整性好，气化过程施加反冲载荷，TC4 钛合金前面板对应变率和绝热剪切敏感而厚度仅有 2 mm，冲击结束后仅撞击坑边缘存在明显的剪切应变集中，并直接导致剪切破坏即冲塞。

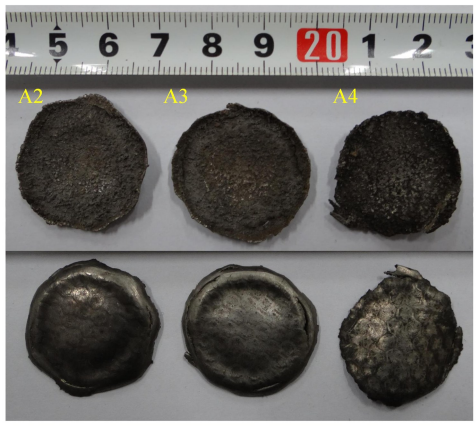


图 6 层裂片

Fig. 6 Photographs of spall scabs

2.2.2 芳纶蜂窝的变形和失效模式

蜂窝夹芯的中心区域被完全压碎如图 7 中 A1 所示，并且随着冲击速度的提高，前面板变形不断增大，与其形状相适应的蜂窝夹芯的破坏区域不断扩展如图 7 中 A3 所示。对应于前面板的变形区，处于前面板局部变形区的蜂窝胞元一直承受垂直方向的压力，破坏模式为垂直压缩破坏；周围的蜂窝胞元由于受整体变形区斜度的影响，同时受水平和垂直方向的压力，破坏模式为倾斜压缩破坏。相比倾斜压缩破坏，垂直压缩破坏更能充分发挥芳纶蜂窝缓冲吸能特性。



图 7 芳纶蜂窝夹芯典型破坏模式

Fig. 7 Typical failure modes of aramid honeycomb cores

2.2.3 后面板的变形和失效模式

所有测试试件的后面板均为非弹性大变形，面板呈方形盘状（图 8），正面中心区域有一个底部平坦的凹坑；从背面看，塑性变形从平台边缘向周围平滑过度，无明显的塑性铰。破碎的蜂窝在后面板与层裂片碰撞中起到缓冲作用，导致碰撞时间延长，后面板中心区域虽然集中了获得的全部能量，但由于层裂片较平整，在撞击区边缘存在较高的速度梯度，塑性变形也主要发生于此。

通过分析试件变形模式可以发现：由于试件与飞片尺寸差别较小，与大尺寸试件相比等同于试件侧面缺少约束，导致面板的永久变形量偏大，边界效应明显，蜂窝夹芯的破坏程度增大。

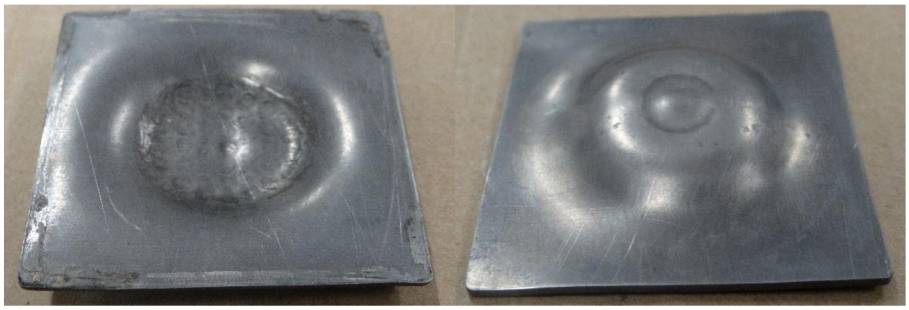


图 8 后面板典型失效模式（试件 A3）

Fig. 8 Typical failure modes of the back plates (Specimen A3)

2.3　讨论

2.3.1　夹芯板的动态响应过程

在强脉冲载荷作用下夹芯板动态响应过程可以分为以下 3 个阶段，如图 9 所示。

第 1 阶段：碰撞开始到前面板层裂结束。前面板在 Mylar 飞片高速撞击下内部形成高强压力脉冲，应力脉冲在自由面发生反射，在钛和蜂窝界面上发生反射和透射。但由于自由面占前面板的后界面绝大部分，芳纶蜂窝的波阻抗远小于钛合金的波阻抗，最终导致冲击波到达后界面几乎被完全反射。若反射拉伸脉冲峰值超过了钛合金层裂阈值应力，层裂发生。在这一阶段应力波未传播到后面板，心点速度一直为零，如图 10 所示。

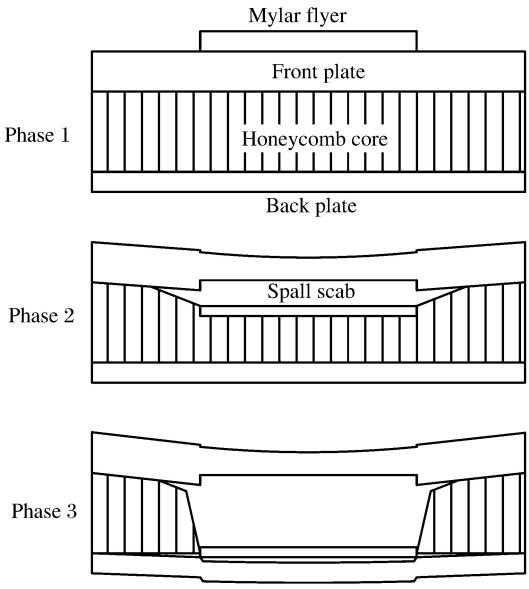


图 9　蜂窝夹芯板的变形示意图

Fig. 9　Sketches showing dynamic deformation of the sandwich panel with a honeycomb core

第 2 阶段：前面板和层裂片压缩芳纶蜂窝夹芯。首先，高速层裂片压缩垂直破坏区的蜂窝胞元，胞元上层的应变在高速冲击下迅速超过其极限应变，处于层裂片边缘的蜂窝胞元在层裂片剪切作用下断裂；然后，高速变形的前面板压缩倾斜破坏区的蜂窝胞元，此区域的蜂窝胞元在水平力的作用下向侧面倾斜但未被完全压碎。在此期间，后面板中心点速度开始波动上升但依然近似于零。

第 3 阶段：前面板或层裂片撞击后面板，面板变形。在碰撞过程中，垂直压缩区的蜂窝被完全压碎，形成的冲击波到达后面板背面，中心点速度迅速达到其初始速度峰值，经短暂波动之后保持稳定，后面板中心区域以此稳定速度快速变形。

2.3.2　冲击速度对后面板动态响应的影响

夹芯板后面板的变形和失效体现了夹芯板的抗冲击能力，而夹芯板内部传播的冲击波又直接决定了后面板的变形和失效。测试点的初始速度峰值是后面板内部冲击波强度的直观体现。图 10 为试件后面板表面的 VISAR 测试结果，曲线可以分为 4 个典型阶段（以曲线 A3 为例）：阶段 a，层裂片压缩蜂窝，由蜂窝传播到其背面的应力波导致测试点速度波动；阶段 b，破碎蜂窝被压实过程中测试点速度开始缓慢升高；阶段 c，蜂窝被压实后层裂片与后面板直接碰撞，速度急速上升到初始速度峰值，之后应力波在自由面间的反射直接导致速度曲线呈现出周期性波动衰减；阶段 d，此阶段测试点速度变化逐渐减小，取衰减前的波峰作为其稳定变形速度，鉴于层裂片较平整，撞击区的速度梯度小，所以稳定速度能反映碰撞后后面板获得的动能。

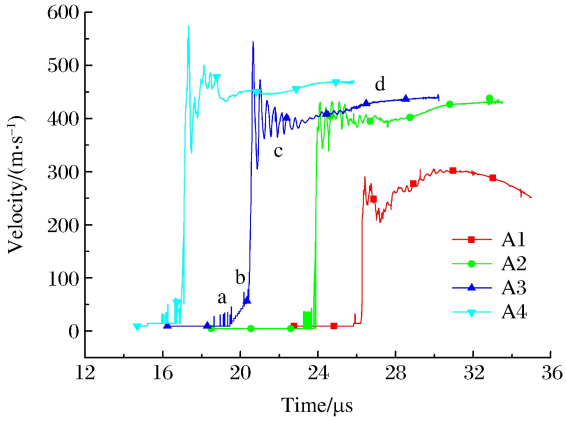


图 10　VISAR 测试得到的后面板背面测试点的速度历史曲线

Fig. 10　Velocity-time curves measured by VISAR at the rear surfaces of the back plates

随着冲击速度的提高，试件的初始速度峰值和稳定变形速度上升，如图 11 所示，说明后面板内部的

压力峰值也随冲击速度的提高而升高。从图 11 还可以发现:从 A1 到 A2,峰值速度和稳定速度迅速升高,增幅均超过 100 m/s;从 A2 到 A4,峰值速度增幅逐渐缩小,稳定速度则升高较慢。速度曲线呈现出这种上升形式的原因可能是:峰值速度与未层裂的前面板或者层裂片的冲击速度正相关,并且层裂片冲击形成的峰值速度远高于前面板直接碰撞形成的峰值速度;稳定速度与碰撞过程中后面板获得的动能正相关,而层裂片 A2、A3 和 A4 的质量仅约 0.7、0.7 和 0.4 g,携带的动能低,又经过芳纶蜂窝的缓冲减速,碰撞后后面板获得的动能增加缓慢。试件 A1、A2 的速度差值近似于零,且速度时程曲线没有典型的应力波自由面反射特征,说明在前面板或层裂片与后面板碰撞前,破碎的芳纶蜂窝夹芯未被完全压实,在碰撞过程中依然起着缓冲吸能、削弱应力峰值的关键作用。

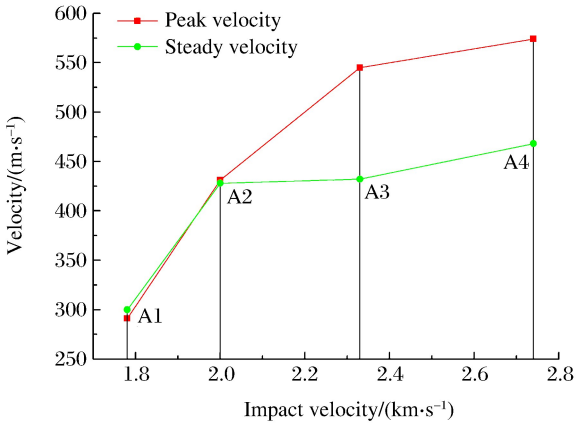


图 11 在不同冲击速度下,试件的初始速度峰值和稳定变形速度

Fig. 11 Initial peak velocities and steady velocities at different impact velocities for specimens

3 结 论

通过芳纶蜂窝-TC4 钛合金夹芯板的电炮冲击实验,对面板和蜂窝夹芯的失效模式进行了系统分析,并分析了夹芯板的动态响应过程和冲击速度对后面板动态响应的影响,得到如下结论:

(1)低波阻抗芳纶蜂窝的破碎行为阻断了应力波向后面板的传播途径,削弱了后面板的应力峰值,降低了后面板的变形和破坏程度。

(2)破碎的芳纶蜂窝和塑形大变形的前面板,吸收了高速冲击的绝大部分能量,保护了后面板及其以后的部件,充分发挥了钛合金的高强度和芳纶蜂窝的缓冲吸能特性,提高了整体的防护能力。但如何在空间和质量允许的条件下,最大程度地发挥蜂窝夹芯板的防护能力,需对蜂窝夹芯板进行详细设计。

(3)后面板的初始速度峰值和稳定速度分别反映了内部压力峰值和碰撞以后获得的动能,两者均随飞片冲击速度的提高而增大。

参考文献:

[1] 王曙中.芳纶浆粕和芳纶纸的发展概况[J].高科技纤维与应用,2009,34(4):15-18.
WANG Shuzhong. The state of development of PPTA-pulp and aramid paper[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2009,34(4):15-18.

[2] ZHU Feng, ZHAO Longmao, LU Guoxing, 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] 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.

[4] AVACHAT S, ZHOU M. Effect of facesheet thickness on dynamic response of composite sandwich plates to underwater impulsive loading[J]. Experimental Mechanics, 2012,52(1):83-93.

[5] FAN Zhiqiang, LIU Yingbin, XU Peng. Blast resistance of metallic sandwich panels subjected to proximity underwater explosion[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016,93:128-135.

[6] GOLDSMITH W, SACKMAN J. An experimental study of energy absorption in impact on sandwich plates[J]. Économie Rurale, 2013,204(3):58-59.

[7] HOU Weihong, ZHU Feng, LU Guoxing, et al. Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with alu-

minium foam core[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010,37(10):1045-1055.

[8] YAHAYA M A, RUAN D, LU G, et al. Response of aluminium honeycomb sandwich panels subjected to foam projectile impact: An experimental study[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015,75:100-109.

[9] DESHPANDE V S, FLECK N A. High strain rate compressive behaviour of aluminium alloy foams[J]. International Journal of Impact Engineering, 2000,24(3):277-298.

[10] MUKAI T, KANAHASHI H, MIYOSHI T, et al. Experimental study of energy absorption in a close-celled aluminum foam under dynamic loading[J]. Scripta Materialia, 1999,40(8):921-927.

[11] CHAU H H, DITTBENNER G, HOFER W W, et al. Electric gun: A versatile tool for high-pressure shock-wave research[J]. Review of Scientific Instruments, 1980,51(12):1676-1681.

[12] 马春花，刘玉. 国产芳纶纸蜂窝性能的研究[J]. 高科技纤维与应用，2013,38(3):20-24.
MA Chunhua, LIU Yu. Study on the properties and applications of China's domestic aramid paper honeycomb[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2013,38(3):20-24.

[13] 赵剑衡，孙承纬，唐小松，等. 高效能电炮实验装置的研制[J]. 实验力学，2006,21(3):369-375.
ZHAO Jianheng, SUN Chengwei, TANG Xiaosong, et al. Development of electric gun with high performance [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006,21(3):369-375.

[14] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京：国防工业出版社，1985:60-64.

Dynamic responses of aramid honeycomb sandwich panels loaded by an electric gun

ZHAO Yayun[1], MO Jianjun[2], TAN Fuli[2], SUN Yuxin[1], ZHANG Jin[3]

(1. *National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*;
2. *Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*;
3. *School of Environmental Science, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

Abstract: We studied the dynamically loaded quadrate sandwich plates constructed from titanium alloy plates with an aramid honeycomb core using high-velocity Mylar flyers produced by an electric gun, and classified systematically the deformation/failure modes of the plates and the honey comb core. Applying the velocity interferometer system for any reflector (VISAR) in measuring the velocity history at the midpoint of the back plates, we analyzed the dynamic response processes of the sandwich panels and identified the influences of the impact velocity on the dynamic response and the impact resistance of the sandwich panels. The results indicate that the stress pulses were blocked by the aramid honeycombs (a low wave impedance material), which led to the deformed front plates that absorbed most of the impact energy, thereby improving effectively the impact resistance capability of the general sandwich panels owing to the high strength of the titanium alloy and the energy absorption of the aramid honeycomb.

Keywords: dynamic response; impulse loading; sandwich plate; aramid honeycomb; Mylar flyer; electric gun

(责任编辑　张凌云)