

高压物理学报

碳纤维-泡沫铝夹芯板低速冲击响应

刘姗姗 刘亚军 张英杰 李志强

Low-Velocity Impact Response of Carbon Fiber-Aluminum Foam Sandwich Plate

LIU Shanshan, LIU Yajun, ZHANG Yingjie, LI Zhiqiang

引用本文:

刘姗姗, 刘亚军, 张英杰, 等. 碳纤维-泡沫铝夹芯板低速冲击响应[J]. 高压物理学报, 2020, 34(3):034202. DOI: 10.11858/gywlb.20190872

LIU Shanshan, LIU Yajun, ZHANG Yingjie, et al. Low-Velocity Impact Response of Carbon Fiber-Aluminum Foam Sandwich Plate[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(3):034202. DOI: 10.11858/gywlb.20190872

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190872>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

CFRP层合板低速冲击响应及损伤特性研究

Low-Velocity Impact Behavior and Damage Characteristics of CFRP Laminates

高压物理学报. 2019, 33(4): 044202 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180699>

筋条形状对复合材料加筋壁板低速冲击动态响应的影响

Effect of Stiffener Shape on Low-Velocity Impact Behavior of Composite Stiffened Panels

高压物理学报. 2017, 31(6): 769 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.06.012>

内部爆炸载荷下泡沫铝夹心柱壳动态响应仿真研究

Dynamic Response of Sandwich Cylinders Cored with Aluminum Foam under Internal Blast Loading

高压物理学报. 2018, 32(2): 024101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20170596>

GFRP增强圆钢管在低速冲击荷载作用下的应变率效应

Strain Rate Effect of GFRP-Reinforced Circular Steel Tube under Low-Velocity Impact

高压物理学报. 2019, 33(4): 044203 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180653>

钢纤维混凝土板在冲击与爆炸荷载下的K&C模型

K&C Model of Steel Fiber Reinforced Concrete Plate under Impact and Blast Load

高压物理学报. 2020, 34(3): 024201 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190853>

多层次夹芯结构的变形与能量吸收

Deformation and Energy Absorption of Multi-Hierarchical Sandwich Structures

高压物理学报. 2019, 33(5): 055902 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180707>

碳纤维-泡沫铝夹芯板低速冲击响应

刘姗姗¹, 刘亚军¹, 张英杰¹, 李志强^{1,2,3}

(1. 太原理工大学机械与运载工程学院应用力学研究所, 山西 太原 030024;

2. 太原理工大学材料强度与结构冲击山西省重点实验室, 山西 太原 030024;

3. 力学国家级实验教学示范中心(太原理工大学), 山西 太原 030024)

摘要: 为研究夹芯结构的低速冲击响应, 以碳纤维(T700)/环氧树脂复合材料层合板为上下面板, 以闭孔泡沫铝为芯层, 模拟夹芯板落锤冲击时的损伤演化过程。复合材料层合板采用三维实体单元建模, 基于有限元软件ABAQUS中的用户子程序VUMAT, 引入三维Hashin失效准则模拟复合材料的损伤破坏; 采用二次应力准则, Cohesive单元模拟黏结层的层间失效; 闭孔泡沫铝芯层采用3D Voronoi细观模型建模。分析复合材料夹芯结构在落锤冲击下的损伤起始、损伤扩展和最终破坏模式, 通过锤头的接触力、位移、夹芯板的内能、后面板的最大位移研究夹层结构的能量吸收情况及抗冲击特性, 得出了在质量保持不变的情况下, 5种芯层相对密度和厚度的耦合关系中的最优设计是芯层相对密度15.0%, 厚度为10 mm, 为满足实际工程中的需求提供了设计依据。

关键词: 复合材料夹芯板; 低速冲击; 损伤演化; 动态响应; 吸能特性

中图分类号: O344.1

文献标识码: A

纤维增强复合材料以其高比强度、高比刚度、耐疲劳和耐腐蚀等优异性能被广泛应用于航空航天、航海、汽车等重要领域。泡沫铝以其密度小、抗冲击能力强、耐高温、抗腐蚀、易加工、成型精度高等优异的物理和化学性能, 在工厂机房、机器设备、建筑、汽车防护等领域被广泛应用。而以纤维增强复合材料为面板、泡沫金属为芯层的夹芯结构, 具有轻质、耐高温、隔热阻燃以及可以较好地吸收冲击能量等优良的特性, 已大量应用于汽车防冲档、机械装置保护壳、飞机外壳夹层和太空飞行器的防护层等领域^[1-2]。

近年来, 研究人员对纤维增强复合材料夹芯结构的力学性能进行了大量研究。Tita等^[3]通过进行低速冲击试验、压痕试验与准静态有限元模拟, 将压痕试验结果与动力试验结果进行对比, 验证了复合材料薄板在低速冲击时的惯性效应。韩守红等^[4]对几种铝泡沫夹层结构的抗爆炸性能进行了有限元分析, 从变形模式、运动响应和吸能特性等方面对比研究了夹层结构的动态响应特性, 并找到了其中抗爆炸性能最优的夹层复合结构, 对抗爆炸结构的工程设计具有一定指导意义。李志斌等^[5]利用材料试验机(MTS)和落锤试验机研究了夹芯板结构在压入和侵彻时的变形和失效行为, 得到不同压头/锤头形状和边界条件对泡沫铝夹芯板的压入和侵彻响应以及能量吸收性能的影响。赵金华等^[6]使用泡沫铝芯层、玄武岩纤维(BF)和超高分子量聚乙烯纤维(UHMWPE)面板的复合夹芯结构, 通过Instron 9350落锤式冲击试验机对夹层结构复合材料进行了冲击试验, 并与蜂窝铝夹层结构的性能进行了对比, 得到纤维类型、铺层结构设计、芯材对夹层结构复合材料冲击性能和损伤模式的影响规律。目前对复合材料渐进损伤分析大多采用试验和有限元方法, 在研究吸能特性时, 多采用比能量来衡量能量的吸收,

* 收稿日期: 2019-12-23; 修回日期: 2020-02-04

基金项目: 国家自然科学基金(11672199); 山西省自然科学基金项目(201601D011011)

作者简介: 刘姗姗(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: liushanshan0104@163.com

通信作者: 李志强(1973—), 男, 博士, 教授, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: lizhiqiang@tyut.edu.cn

忽略了芯层相对密度和高度的耦合作用对夹芯板结构在低速冲击下的力学性能影响。

本研究考虑了芯层相对密度和高度耦合作用的影响,在保证夹芯板质量一定的情况下,通过分析复合材料夹芯结构在低速冲击下锤头的接触力、位移、动能,以及芯层的塑性耗散能、后面板的最大位移来研究夹层结构的能量吸收能力及抗冲击特性,从而得到 5 种不同芯层的相对密度与厚度的耦合关系中最优的设计,为满足实际工程需求提供设计依据。

1 有限元模型

1.1 试件结构

冲击试件由碳纤维-闭孔泡沫铝夹芯板组成,面板为 T700 碳纤维板,基体材料为环氧树脂,上下面板均为 8 层,单层厚度为 0.125 mm,具体结构如图 1 所示。

1.2 有限元网格划分

图 2 给出了有限元模拟的三维模型。碳纤维面板的网格划分采用渐进过渡的疏密网格,网格密度从板中间到两边依次降低,网格单元类型为 C3D8R,层间界面采用 Cohesive 单元,单层厚度为 0.01 mm,网格单元类型为 COH3D8。芯层闭孔泡沫铝使用 3D Voronoi 随机模型建模,首先根据芯层的体积、相对密度等进行相关计算得出形核点的个数,给定空间内任意一个胞元核点坐标,采用 Matlab 软件中的随机函数并经过多次循环得到所有的核点坐标,通过 MPT_Voronoi 工具箱得到随机模型,随机模型中所有胞元的节点和面的坐标信息以 ANSYS 命令流的格式生成 txt 文本,将其导入 ANSYS 中,得到闭孔泡沫铝的几何模型,最后再以 iges 格式输出,在 Hypermesh 中划分网格,最终将其导入 ABAQUS 软件与碳纤维面板及锤头装配后进行相应计算^[7]。闭孔泡沫铝芯层基体材料为 Al6061-T6,有限元网格单元类型为 S4R,面板与芯层之间采用通用接触。

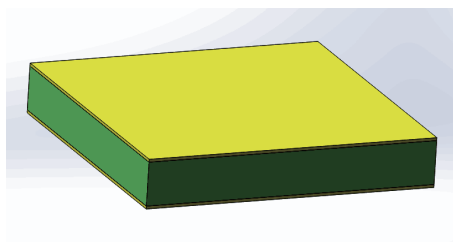


图 1 夹芯板结构示意图

Fig. 1 Diagram of sandwich plate structure

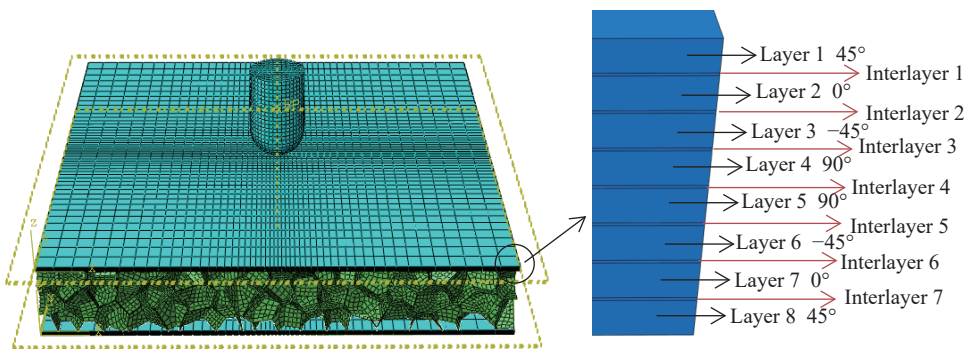


图 2 三维有限元模型

Fig. 2 Three-dimensional finite element model

夹芯板四周固支,冲击部位位于板中心,整个模型采用通用接触。面板为 100 mm × 100 mm 的正方形,芯层厚度以及冲击能量视结构类型而定,夹芯板的上下面板均为 [45°/0°/-45°/90°]_s 铺层的碳纤维板。

1.3 材料参数

采用三维 Hashin 损伤失效准则^[8-10]模拟落锤冲击下 T700 碳纤维面板层内的失效模式,具体的失效准则如下。

纤维拉伸失效 ($\sigma_{11} \geq 0$)

$$F_{\text{ft}} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}} \right)^2 \geq 1 \quad (1)$$

纤维压缩失效 ($\sigma_{11} < 0$)

$$F_{\text{fc}} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c} \right)^2 \geq 1 \quad (2)$$

基体拉伸失效 ($\sigma_{22} + \sigma_{33} \geq 0$)

$$F_{\text{mt}} = \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_t} \right)^2 + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}} \right)^2 \geq 1 \quad (3)$$

基体压缩失效 ($\sigma_{22} + \sigma_{33} < 0$)

$$F_{\text{mc}} = \frac{1}{Y_c} \left[\left(\frac{Y_c}{2S_{12}} \right)^2 - 1 \right] (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{2S_{12}} \right)^2 + \frac{\tau_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}} \right)^2 + \left(\frac{\tau_{13}}{S_{13}} \right)^2 \geq 1 \quad (4)$$

式中: F_{ft} 表示纤维拉伸断裂, F_{fc} 表示纤维挤压断裂, F_{mt} 表示基体拉伸断裂, F_{mc} 表示基体挤压断裂, X_t 、 X_c 分别表示 1 方向的拉伸强度和压缩强度, Y_t 、 Y_c 表示 2 方向的拉伸强度和压缩强度, S_{12} 表示 12 层间剪切强度, S_{23} 表示 23 层间剪切强度, σ_{11} 、 σ_{22} 、 σ_{33} 为 3 个方向的正应力, τ_{12} 、 τ_{23} 、 τ_{13} 为 3 个方向的剪应力。

以上 4 种损伤模式的相关材料参数如表 1 所示, 其中 E_1 、 E_2 分别表示 1、2 方向的弹性模量, G_{12} 、 G_{13} 和 G_{23} 为剪切模量分量, ν 为泊松比, ρ 为密度。

表 1 复合材料力学性能参数^[11]

Table 1 Mechanical parameters of the composite materials^[11]

E_1/GPa	E_2/GPa	ν	G_{12}/GPa	G_{13}/GPa	G_{23}/GPa
180	10	0.28	2.6	3.9	3.9
X_t/MPa	X_c/MPa	Y_t/MPa	Y_c/MPa	S_{12}/MPa	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
2 500	1 250	60	186	85	1.95

层间的损伤采用内聚力 (Cohesive) 单元^[12]模拟。内聚力单元可以有效模拟分层损伤的起始、扩展以及最终分层的发生^[13]。具体材料参数见表 2^[14], 表中 K_{nn} 、 K_{ss} 、 K_{tt} 为内聚力模型刚度, N 、 S 、 T 分别表示 3 个方向的拉伸强度, G_1 、 G_2 、 G_3 分别表示 3 个方向的断裂能。

闭孔泡沫铝芯层基体材料为 Al6061-T6, 其应力-应变关系采用 Johnson-Cook 本构方程^[15]描述。Johnson-Cook 本构方程表达式为

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (5)$$

基于 Johnson-Cook 本构模型的失效表达式为

$$\varepsilon_u^f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \eta)](1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (6)$$

式中: ε 为应变, $\dot{\varepsilon}^*$ 为等效应变率, ε_u^f 为失效应变, A 为静态屈服强度, B 为应变硬化模量, C 为应变率敏感系数, T^* 为无量纲温度, n 为应变硬化因子, m 为温度软化因子, $D_1 \sim D_4$ 为材料参数。材料参数见表 3。

表 2 Cohesive 单元材料参数^[14]

Table 2 Material parameters of cohesive elements^[14]

$K_{\text{nn}}/(\text{GPa}\cdot\text{mm}^{-1})$	$K_{\text{ss}}(=K_{\text{tt}})/(\text{GPa}\cdot\text{mm}^{-1})$	N/MPa	$S(=T)/\text{MPa}$	$G_1/(\text{J}\cdot\text{m}^{-2})$	$G_2(=G_3)/(\text{J}\cdot\text{m}^{-2})$
120	43	30	80	520	970

表 3 Al6061-T6 材料参数

Table 3 Material parameters of Al6061-T6

$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	E/GPa	ν	A/MPa	B/MPa	N	m
2.7	70	0.28	265	426	0.34	1

2 模型验证

以冲击能量为 91.7 J、上下碳纤维面板铺层为 $[45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ]_s$ 、闭孔泡沫铝芯层相对密度为 10%、边界条件为四周固支、冲击部位为板中心为例来验证模型的有效性。在进行网格划分时,经过反复计算尝试,碳纤维面板的网格划分采用渐进过渡的疏密网格来提高有限元的计算效率。

图 3 给出了夹芯板的能量-时间曲线、系统动能-时间曲线和沙漏能-时间曲线。夹芯板的内能和系统动能峰值分别为 92.3 J 和 91.2 J,都与冲击总能量相差不超过 1%,说明整个系统的能量是守恒的,夹芯板的吸能曲线以及能量-位移曲线(见图 4)都与文献[16–17]中的曲线趋势一致,验证了模型及模拟过程的正确性。伪应变能的峰值为 4.48 J,占冲击总能量的比值小于 5%,说明沙漏能是可以控制的。

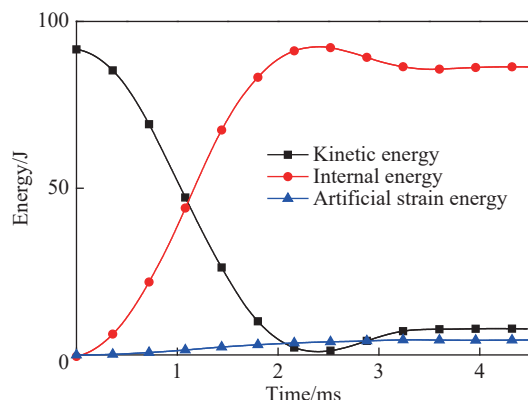


图 3 能量-时间曲线

Fig. 3 Energy-time curves

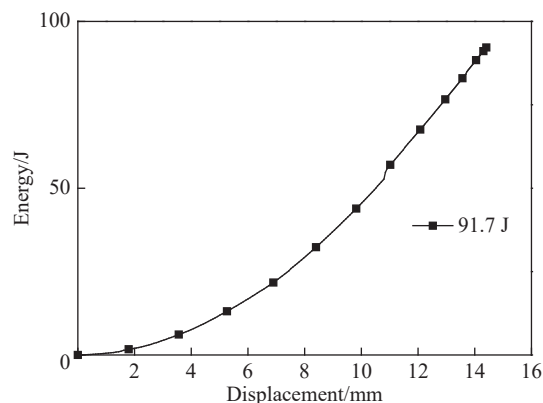


图 4 能量-位移曲线

Fig. 4 Energy-displacement curve

3 模拟结果与讨论

3.1 不同冲击能量下夹芯板的变形模式

为研究不同冲击能量下碳纤维-泡沫铝夹芯板的变形模式,选取 3 种冲击能量 33.0、58.7、91.7 J,分别对相同的夹芯板进行冲击。通过控制冲击速度为 6、8、10 m/s 实现 3 种不同能量的冲击,泡沫铝芯层的相对密度为 10.0%。

图 5 给出了不同冲击能量下夹芯结构的冲击载荷-时间曲线,图 6 给出了碳纤维面板和芯层的破坏模式。结合图 5 与图 6 可以看出,在夹芯板的冲击过程中,锤头作用区域的面板和芯层均发生局部破坏。在冲击起始阶段,碳纤维面板和芯层共同承受冲击力,冲击力迅速上升;随着冲击的继续,上层面板发生破坏直至被撕裂(见图 6(a)和图 6(c)),芯层的泡沫铝被压缩并且出现明显的塑性变形,塑性变形的区域如图 6(b) 所示;冲击载荷达到峰值并出现一个较长的“平台区”,然后开始下降。冲击能量的大小决定了“平台区”冲击力的大小,冲击能量越大,冲击载荷的峰值就越高。

表 4 给出了冲击过程中后面板的撕裂层数,冲击能量越大,后面板撕裂的层数越多。

图 7 给出了锤头位移随冲击时间的变化趋势。冲击起始阶段锤头位移增大,在冲击时间 2.2 ms 附近时,冲击位移达到最大值,之后减小。图 8 给出了动能随时间变化的曲线。冲击动能在 2.2 ms 之前

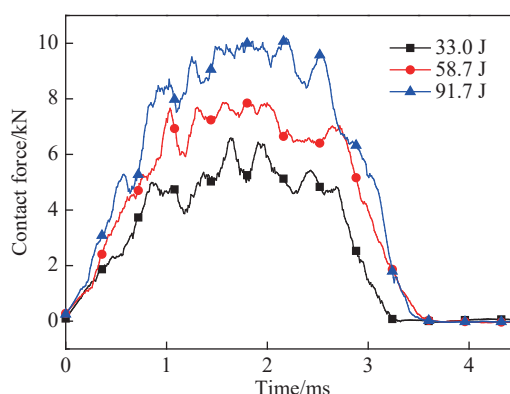


图 5 不同冲击能量下的冲击载荷-时间曲线

Fig. 5 Force-time curves under different impact energy

一直减小, 2.2 ms 之后又变大, 说明 2.2 ms 之后冲击过程已经完成, 锤头发生回弹, 同时冲击力减小, 直到冲击力下降为零, 冲击过程结束。可见, 冲击持续时间与冲击能量并无关系, 在不同的冲击能量下, 冲击过程完成的时间没有明显差异。

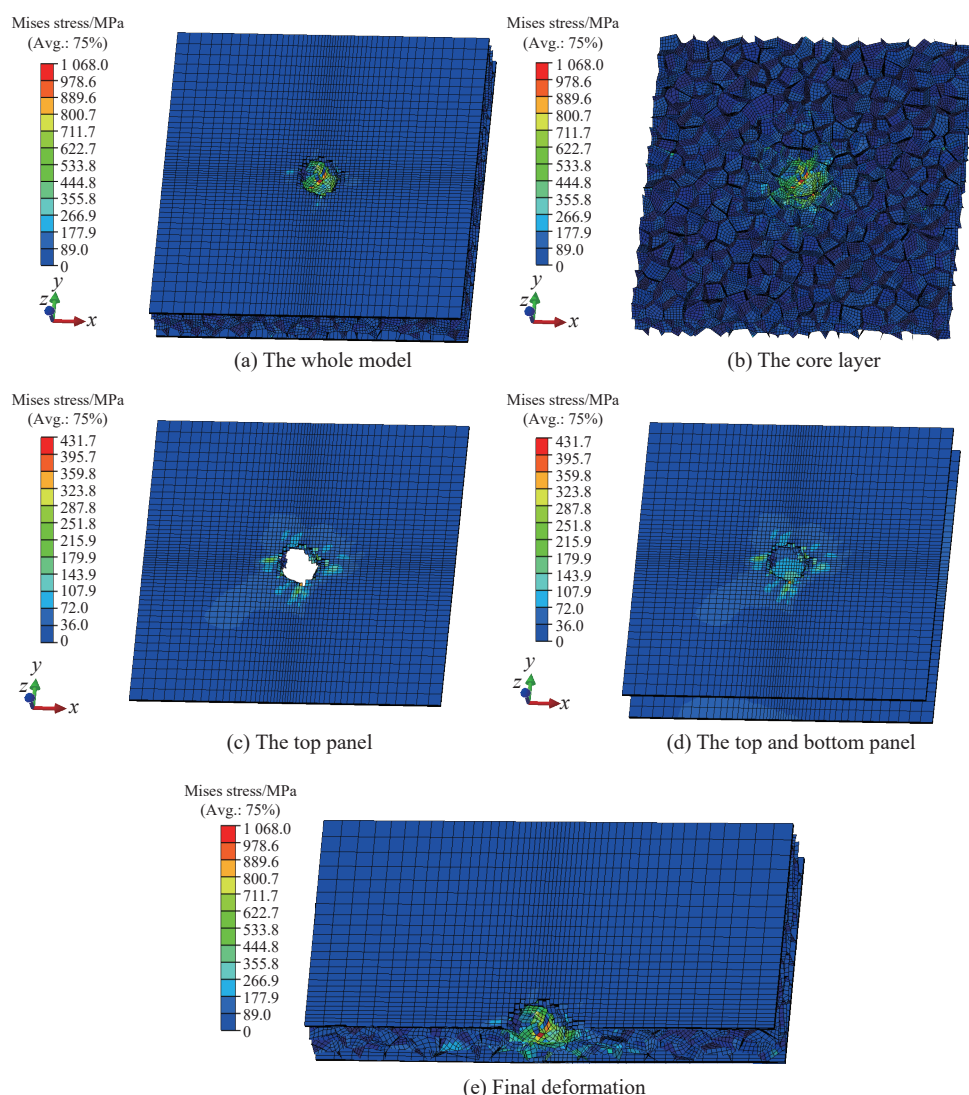


图 6 33.0 J 冲击能量下夹芯板的破坏模式

Fig. 6 Failure mode of sandwich panel under 33.0 J impact energy

图 9 给出了夹层结构内能随时间的变化曲线。在整个冲击过程中, 夹层结构的内能先增大后减小, 最后趋于稳定。内能大小用来表示夹层结构吸收的能量。图 10 给出了冲击能量与夹芯板后面板的位移的关系。在一定范围内, 随着冲击能量的增大, 后面板的最终位移也增大。

表 4 不同能量下面板的撕裂程度

Table 4 Tear degree of rear panel under different energy

Impact energy/J	Tear layers
33.0	0
58.7	3
91.7	5

3.2 芯层相对密度与芯层高度耦合作用对夹芯板抗冲击性能的影响

芯层的相对密度和芯层高度对夹芯板抗冲击性能都有影响。为研究芯层不同相对密度与芯层高度的耦合作用对碳纤维-泡沫铝夹芯板抗冲击性能的影响, 保持芯层质量不变, 设计 5 种夹芯结构, 按照芯层相对密度从小到大(或芯层高度从大到小)对其进行编号, 分别记为 1[#]、2[#]、3[#]、4[#]和 5[#], 初始冲击能量为 33.0 J, 参数如表 5 所示。

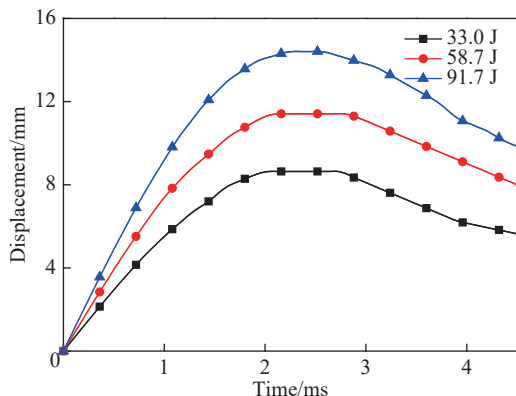


图 7 不同冲击能量下锤头位移-时间曲线

Fig. 7 Displacement-time curves of impactor at different impact energy

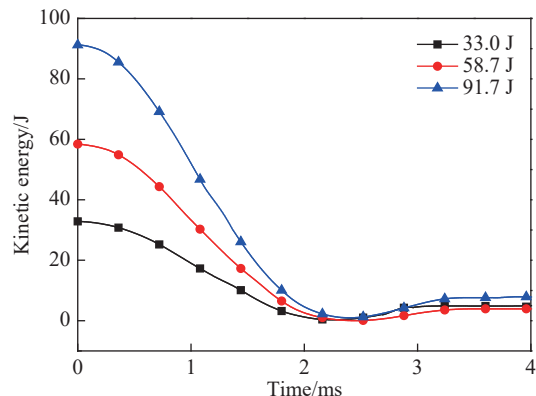


图 8 不同冲击能量下锤头动能-时间曲线

Fig. 8 Kinetic energy-time curves of impactor at different impact energy

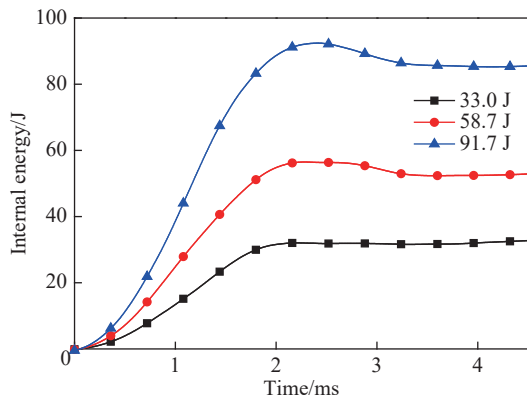


图 9 不同冲击能量下夹芯板内能-时间曲线

Fig. 9 Internal energy-time curves of the sandwich board at different impact energy

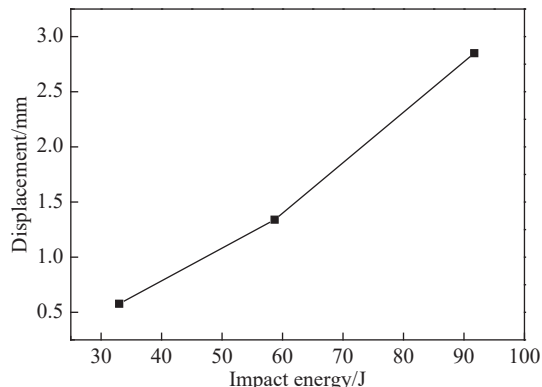


图 10 不同冲击能量下面板的最大位移

Fig. 10 Maximum displacement of rear panel at different impact energy

表 5 5 种不同的夹芯结构

Table 5 Five different sandwich structures

Structure type	Plane size of specimen/(mm × mm)	Stacking sequence	Upper (lower) panel thickness/mm	Core relative density/%	The thickness of the core layer/mm	Diameter of impactor/mm	Impact energy/J
1 [#]	100 × 100	[45°/0°/-45°/90°] _s	1	10.0	15.0	12.5	33.0
2 [#]				12.5	12.0		
3 [#]				15.0	10.0		
4 [#]				17.5	8.6		
5 [#]				20.0	7.5		

图 11、图 12 分别显示了 5 种夹芯结构受冲击时, 锤头的冲击载荷-时间曲线和锤头位移-时间曲线。可以看出, 在初始冲击能量相同的条件下, 芯层相对密度为 10.0%(厚度为 15 mm)时, 冲击力峰值明显小于其他 4 种相对密度下的峰值, “平台区”时间更长, 锤头最大位移也更大。

图 13 给出了 5 种夹芯板受冲击时锤头的动能-时间曲线, 锤头动能的变化趋势基本相同。因此芯层质量一定时, 芯层相对密度和厚度在一定范围内, 冲击过程中冲击动能无显著变化。

图 14 给出了 5 种不同夹芯板的芯层的塑性耗散能-时间曲线。可以看出, 3[#]结构的塑性耗散能较

其他 4 种结构大。图 15 给出了不同结构后面板最大位移与芯层厚度的比值(δ/h)。可以看出: 不同结构的后面板最大位移与芯层厚度的比值不同; 随着芯层相对密度的增大和芯层厚度的减小, 夹芯板的后面板最大位移与芯层厚度的比值增大, 抗冲击性能变差。

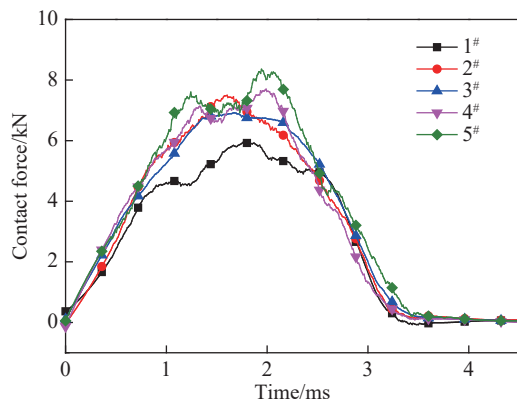


图 11 不同夹芯结构的冲击载荷-时间曲线

Fig. 11 The impact force-time curves for different sandwich structures

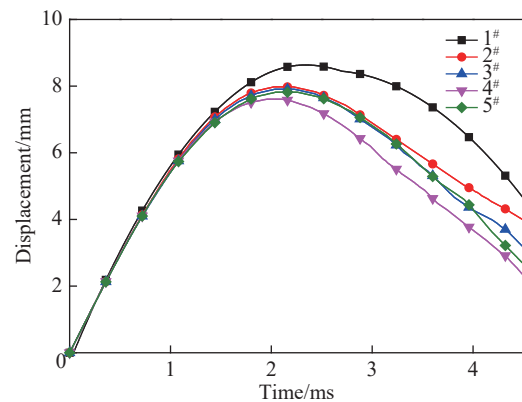


图 12 不同夹芯结构的锤头位移-时间曲线

Fig. 12 The displacement of impactor-time curves for different sandwich structures

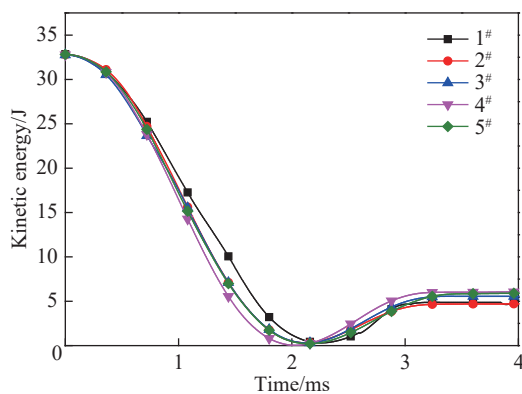


图 13 不同夹芯结构的锤头动能-时间曲线

Fig. 13 Kinetic energy of impactor-time curves of impactor for different sandwich structures

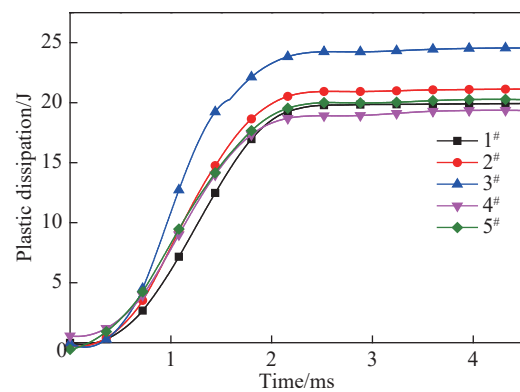


图 14 不同夹芯结构的芯层塑性耗散能-时间曲线

Fig. 14 Plastic dissipation energy of core layer-time curves for different sandwich structures

图 16 给出了 5 种结构的后面板各层纤维的最大应力变化曲线。可以看出, 随着芯层相对密度的提高和厚度的减小, 各层上的最大应力总体呈现增大趋势。

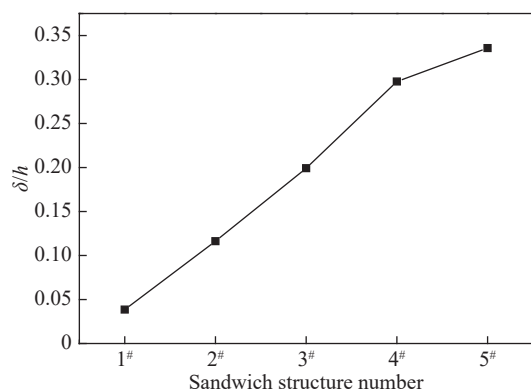


图 15 不同结构后面板最大位移与芯层厚度的比值曲线

Fig. 15 The ratio curves of the maximum displacement of back layer to core thickness for different sandwich structures

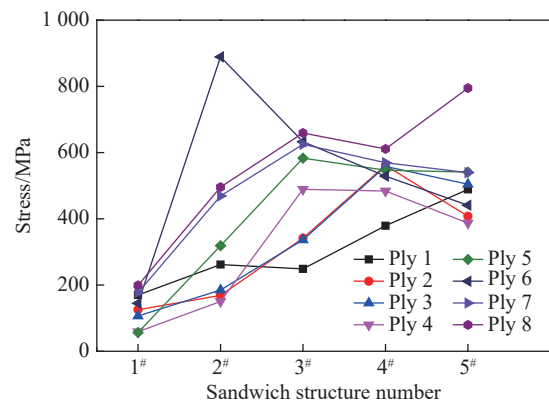


图 16 不同夹芯结构后面板各层的最大应力变化曲线

Fig. 16 Maximum stress of each back layer for different sandwich structures

5 种结构后面板的撕裂程度见表 6。不同结构的芯层相对密度增加, 芯层高度减小, 后面板撕裂层数逐渐增加。

在本研究的 5 种结构中, 当芯层相对密度为 15.0% 时, 芯层相对较薄, 冲击载荷峰值较小, 芯层的塑性耗散能较大, 并且后面板的最大位移也相对较小, 后面板剩余 3 层未撕裂, 仍然具有一定的承载能力, 所以认为在芯层质量保持一定的情况下, 结构类型 3[#]为最优的芯层相对密度与厚度耦合设计。

3.3 边界条件对夹芯板抗冲击性能的影响

为研究不同边界条件对碳纤维-泡沫铝夹芯板抗冲击性能的影响, 使用简支和固支两种边界条件, 冲击能量为 33.0 J, 分别对相同的夹芯板进行冲击, 芯层相对密度为 10.0%。

结合图 17、图 18 和图 19 可以看出, 边界条件为四边简支时, 冲击完成所需时间比固支边界更长, 锤头位移的峰值更大, 后面板的最大应力是固支条件下的 1.99 倍。简支条件下后面板最大应力大于固支条件, 说明四边固支的夹芯板的抗冲击性能更好。

表 6 5 种不同结构后面板的撕裂程度

Table 6 Tear degree of rear panel for five sandwich structures

Structure No.	Tear layers
1 [#]	0
2 [#]	3
3 [#]	5
4 [#]	7
5 [#]	8

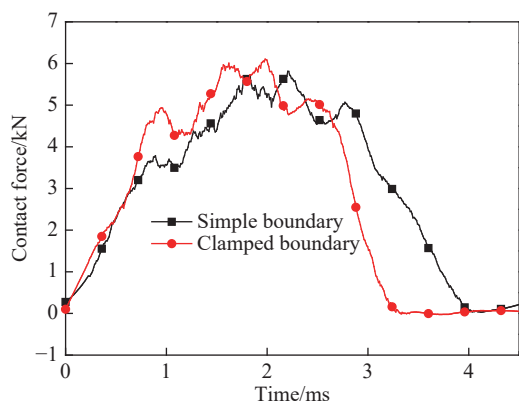


图 17 冲击载荷-时间曲线

Fig. 17 Force-time curves

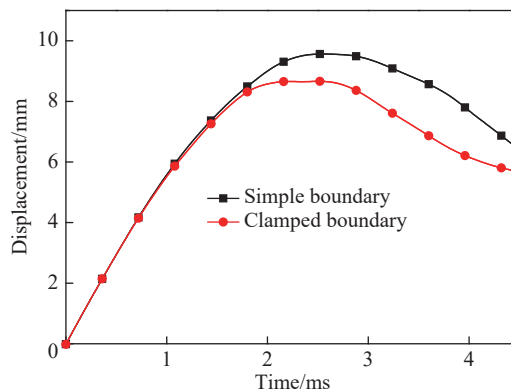


图 18 锤头位移-时间曲线

Fig. 18 Displacement-time curves of impactor

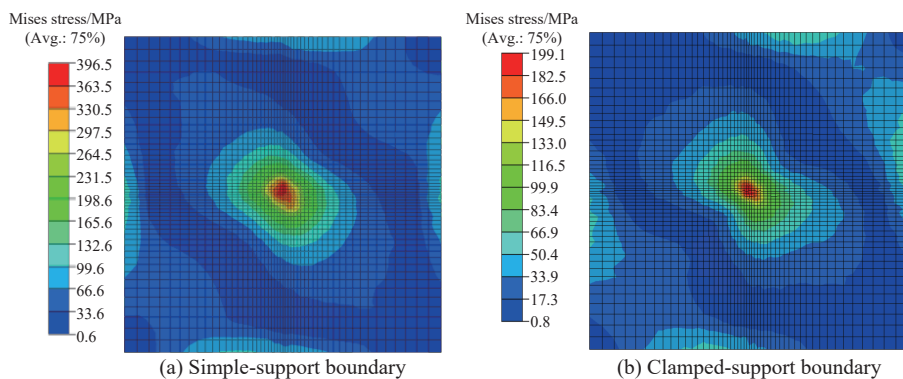


图 19 后面板应力云图

Fig. 19 Stress plot of rear panel

4 结 论

为研究碳纤维面板-泡沫铝芯层结构抗低速冲击响应,对复合材料夹芯结构受低速冲击载荷进行了有限元仿真,建立了低速冲击 T700 碳纤维-泡沫铝夹层板的有限元模型,分析了复合材料夹芯结构在落锤冲击下的损伤起始、损伤扩展和最终破坏模式,通过锤头的接触力、位移、夹芯板的内能、后面板的最大位移研究夹层结构的能量吸收情况及抗冲击特性,主要得出如下结论。

(1) 给出了碳纤维-泡沫铝夹芯板落锤低速冲击下的损伤失效区域,结果显示夹芯结构可以有效地吸收冲击能量。随着冲击能量的增大,夹层结构面板的失效层数增多,冲击载荷的峰值增大,结构塑性变形吸收的能量也增大,后面板的最大位移增大。

(2) 保持冲击能量不变,设计面板铺层不变、芯层相对密度在 10.0%~20.0% 之间的 5 种结构,通过改变芯层的厚度,使芯层质量一定。在这 5 种芯层相对密度与厚度的耦合关系中,芯层相对密度 15.0%、厚度 10 mm 为最优的耦合方式,使得结构既满足一定的抗冲击性又不至于太厚。为实际工程中平衡防护层的厚度、质量与抗冲击性能的需求提供了设计指导。

(3) 相同能量冲击下,四周固支的夹芯板的抗冲击性能较四周简支更好。

参考文献:

- [1] 王巍, 安子军, 彭春彦, 等. 泡沫铝填充钢/铝复合管轴向抗冲击吸能特性 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(7): 1093–1099.
WANG W, AN Z J, PENG C Y, et al. Simulative research on the energy absorption characteristics of aluminum foam-filled steel/Al clad tube under axial impact loading [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(7): 1093–1099.
- [2] 骆伟, 谢伟, 刘敬喜. 芯层几何构形对复合材料波纹夹层结构冲击特性的影响 [J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2018, 32(1): 21–26.
LUO W, XIE W, LIU J X. Research on dynamic characteristics of a sandwich structures with various core shapes under impact loads [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 32(1): 21–26.
- [3] TITA V, CARVALHO J D, VANDEPITTE D. Failure analysis of low velocity impact on thin composite laminates: experimental and numerical approaches [J]. *Composite Structures*, 2008, 83(4): 413–428.
- [4] 韩守红, 吕振华. 铝泡沫夹层结构抗爆炸性能仿真分析及优化 [J]. 兵工学报, 2010, 31(11): 1468–1474.
HAN S H, LÜ Z H. Numerical simulation of blast-resistant performance of aluminum foam sandwich structures and optimization [J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(11): 1468–1474.
- [5] 李志斌, 卢芳云. 泡沫铝夹芯板压入和侵入性能的实验研究 [J]. 振动与冲击, 2015(4): 1–5.
LI Z B, LU F Y. Tests for indentation and perforation of sandwich panels with aluminium foam core [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015(4): 1–5.
- [6] 赵金华, 曹海琳, 晏义伍, 等. 泡沫铝夹层结构复合材料低速冲击性能 [J]. *材料工程*, 2018, 46(1): 92–98.
ZHAO J H, CAO H L, YAN Y W, et al. Low velocity impact properties of aluminum foam sandwich structural composite [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2018, 46(1): 92–98.
- [7] 荣誉. 梯度泡沫金属力学性能的 Lagrangian 分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [8] HASHIN Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1980, 47: 329–334.
- [9] 谭开忍, 肖熙. 含有腐蚀缺陷海底管道极限载荷分析 [J]. *海洋工程*, 2006, 24(3): 63–67.
TAN K R, XIAO X. Analysis on limit load of corroded submarine pipelines [J]. *The Ocean Engineering*, 2006, 24(3): 63–67.
- [10] 沈璧. 极限载荷分析法在压力容器分析设计中的应用 [J]. *石油化工设备*, 2011, 40(4): 35–38.
SHEN J. Limit load analysis application in pressure vessel analytical design [J]. *Petro-Chemical Equipment*, 2011, 40(4): 35–38.
- [11] 肖先林, 王长金, 赵桂平. 碳纤维复合材料-泡沫铝夹芯板的冲击响应 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(15): 110–117.
XIAO X L, WANG C J, ZHAO G P. Dynamic responses of carbon fiber composite sandwich panels with aluminum foam core subjected to impact loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(15): 110–117.
- [12] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strains rates, temperatures and pressures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31–48.

- [13] 熊明洋, 向忠, 胡旭东, 等. 基于 ABAQUS 的 CCF300 碳纤维层合板低速冲击破坏数值模拟 [J]. *轻工机械*, 2017, 35(4): 27–32.
XIONG M Y, XIANG Z, HU X D, et al. Numerical simulation of low velocity impact failure of CCF300 carbon fiber laminate based on ABAQUS [J]. *Light Industry Machinery*, 2017, 35(4): 27–32.
- [14] 陈县辉. 基于内聚力单元的层合板低速冲击响应模拟研究 [D]. 太原: 中北大学, 2014.
- [15] STUBBS C. Compilation strategies: alternate approaches to achieve low power consumption [J]. *Electronic Component News*, 2008, 52(4): 11–113.
- [16] 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.
- [17] SAHU S, MONDAL D P, CHO J U, et al. Low-velocity impact characteristics of closed cell AA2014-SiCp composite foam [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 160: 394–401.

Low-Velocity Impact Response of Carbon Fiber-Aluminum Foam Sandwich Plate

LIU Shanshan¹, LIU Yajun¹, ZHANG Yingjie¹, LI Zhiqiang^{1,2,3}

- (1. *Institute of Applied Mechanics, College of Mechanical and Vehicle Engineering,
Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;*
2. *Shanxi Key Laboratory of Material Strength & Structural Impact,
Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;*
3. *National Demonstration Center for Experimental Mechanics Education
(Taiyuan University of Technology), Taiyuan 030024, Shanxi, China)*

Abstract: In order to study the low velocity impact response of the core-layer structure, this paper simulates the damage process of sandwich structure, that carbon fiber (T700)/epoxy composite laminates are used as the top and bottom panel, the foam aluminum is used as core layer, under impact loading of drop hammer. The composite laminates were modeled with three-dimensional solid elements, and the failure criteria of three-dimensional Hashin were introduced to simulate the damage of composite materials by the user subroutine VUMAT in the finite element software ABAQUS. The bonding layer failure between the layers was simulated with criterion of the secondary stress and cohesive unit. The aluminum foam core layer was modeled by a 3D Voronoi mesoscopic model. By analyzing the damage initiation, damage propagation and final failure modes of composite sandwich structures under low speed impact, the progressive failure mechanism of composite materials was clarified. The contact force and displacement through the hammer head, internal energy of sandwich panel, rear panel to study the stress distribution and maximum displacement energy absorption and impact resistance of sandwich structure. The optimal design of the coupling relation between the relative density and thickness of five different core layers under the condition of a certain quality control have been obtained, which provides designed guidance for satisfying the requirements of practical engineering.

Keywords: composite sandwich plate; low speed impact; damage evolution; dynamic response; energy absorption characteristics