

# 低速冲击载荷下新型 Y 型夹芯板性能分析

## Performance analysis of a new Y-shaped sandwich panel under low-velocity impact load

王晨<sup>1</sup>, 高雪烁<sup>1</sup>, 林宇晨<sup>1</sup>, 李刚<sup>1</sup>

Wang Chen<sup>1</sup>, Gao Xueshuo<sup>1</sup>, Lin Yuchen<sup>1</sup>, Li Gang<sup>1</sup>

1. 大连理工大学 工程力学系, 工业装备结构分析优化与 CAE 软件全国重点实验室, 辽宁大连, 116024

**摘要:** 夹芯结构具有轻质、高强度等优良特性, 被应用于各类吸能防护结构。为了提升 Y 型夹芯板的力学性能, 本文提出了一种新型 Y 型夹芯板, 建立了新型 Y 型夹芯板有限元模型, 利用 ABAQUS 软件对其进行低速冲击有限元分析, 探究了不同冲击能量和冲击角度对新型 Y 型夹芯板性能的影响。结果表明, 冲击能量的大小影响冲头与夹芯板间的接触力峰值载荷、接触位移以及各部分的吸能占比, 但对接触时长影响较小; 冲击角度影响冲头与夹芯板间的接触力峰值载荷、接触时长、接触位移以及各部分的吸能量, 但对各部分的吸能占比影响不大。

**关键词:** Y 型夹芯板, 低速冲击, 冲击能量, 冲击角度

### 0 引言

夹芯结构因其优异的比强度、比刚度和吸能效果, 被广泛应用于交通装备、建筑建造等多种领域。现阶段常用的夹芯有蜂窝<sup>[1-4]</sup>、波纹<sup>[5-8]</sup>、Y 型<sup>[9-11]</sup>、泡沫<sup>[12-14]</sup>、金字塔型<sup>[15, 16]</sup>等, 夹芯类型多种多样。然而, 在日常实际应用中, 夹芯板常面临各类冲击, 尤其是低速冲击。虽然低速冲击在表面留下的破坏痕迹不明显, 但是会对夹芯结构内部产生损伤, 影响其力学性能和使用寿命, 因此, 研究夹芯结构在低速冲击载荷下的动态响应对其在工程上的应用具有重要意义。

近年来, 许多学者围绕夹芯结构的低速冲击性能开展研究。Zhang 等<sup>[17]</sup>建立了考虑几何大变形的金属泡沫多层夹芯板动力响应分析模型并进行了仿真计算, 讨论了加载位置、多层因素和冲头形状对结构响应的影响。结果表明, 该分析模型能够合理地预测冲击载荷下金属泡沫芯多层夹芯板的力学响应。Yu 等<sup>[18]</sup>通过实验和有限元方法对复合材料 Y 型夹芯结构进行了一系列弹道冲击试验, 研究结构的抗冲击性和失效模式以及冲击位置对冲击响应的影响, 通过实验和数值方法计算了残余速度、弹道极限速度和失效模式, 且仿真结果与实验结果基本一致。结果表明, Y 型夹芯结构的抗冲击能力优于层合板。

Y 型夹芯结构具有良好的抗冲击性能, 荷兰皇家斯海尔德造船厂建造已采用不锈钢 Y 型夹芯结构制造双层船体结构<sup>[19]</sup>。但是, Y 型夹芯板存在垂直于焊缝方向抗弯刚度弱, 且底部连接处容易出现连接失效、脱粘等问题, 故本文提出一种新型 Y 型夹芯结构, 提高面板的抗弯曲能力, 提升抗弯刚度, 同时增加连接面积改善脱粘失效等问题。为了探究该种新型 Y 型夹芯结构的抗冲击性能, 本文建立了其低速冲击载荷下的有限元模型, 探究了不同冲击能量和冲击角度对该新型夹芯结构性能的影响。

### 1 低速冲击载荷下新型 Y 型夹芯板数值仿真

### 1.1 新型 Y 型夹芯结构几何模型

考虑汽车、地铁等交通工具车身外板等为薄壁结构，芯体厚度取 11mm，新型 Y 型夹芯板如图所示。夹芯板由上下面板和 Y 型芯体组成，夹芯板几何特征如图 1 所示，夹芯板整体边长均为  $L=100\text{mm}$ ，上、下面板厚度均为  $m$ ，单胞平面示意图中，结构左右对称，夹芯由 Y 型区域和筋板区域组成，其中 Y 型区域包含水平方向尺寸为  $a_1$  的平台、与水平方向夹角为  $45^\circ$  且水平和竖直方向尺寸均为  $a_2$  的法兰以及竖直部，Y 型区域壁厚为  $T_Y$ ，筋板区域是高度为  $h$  的筋板，筋板之间的间距为  $x$ ，呈周期性排布，筋板区域壁厚为  $T_J$ 。其中， $a_1$ 、 $a_2$ 、 $m$ 、 $h$ 、 $x$ 、 $T_Y$ 、 $T_J$  初始值分别为 1.0mm、4.5mm、1.2mm、3.0mm、10.0mm、0.6mm、0.6mm。

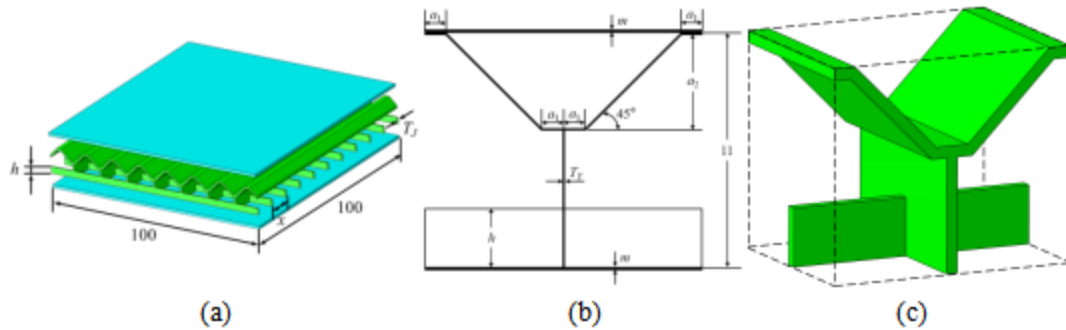


图 1 (a) 新型 Y 型夹芯板结构三维示意图 (b) 夹芯板单胞平面示意图 (c) 夹芯单胞示意图

### 1.2 有限元数值模型的建立

基于 ABAQUS 仿真分析软件，整体采用 S4R 单元，面板与夹芯之间的接触均设置为理想连接。仿真时间设置为 8ms，面板材料为 Al2024-T3，芯体为 Al3003-H19，性能参数<sup>[18]</sup>如表 1 所示。

表 1 Al2024-T3 和 Al3003-H19 的材料参数<sup>[18]</sup>

材料名称	密度(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量(GPa)	泊松比	屈服强度(MPa)	失效应变
Al2024-T3	2780	73.1	0.33	350	0.62
Al3003-H19	2730	70	0.33	183	0.52

模拟落锤实验过程，锤头仅保留竖直方向的自由度，锤头质量为 14kg，定义为刚体，施加 1.195m/s、1.690m/s、2.070m/s、2.673m/s 的初始速度，分别模拟 10J、20J、30J、50J 的冲击能量，锤头直径为 16mm。夹具板上开有半径为 38mm 的圆形孔，为夹芯板在冲击载荷下提供下行空间，在仿真分析中约束夹芯板下面板半径为 38mm 圆形孔外部的所有方向自由度，如图 4 所示。锤头与夹芯板之间相互作用方式设置为通用接触，法向为“硬”接触，切向采用“罚”函数，摩擦系数设置为 0.3。

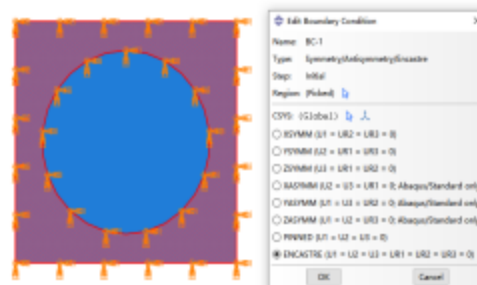


图 2 模拟夹具约束下的边界条件

### 1.3 数值仿真方法的验证

为了验证本章有限元模型分析方法，建立与参考文献[18]结构和材料相同的有限元模型，

计算 41.95J、59.78J以及 81.07J的冲击能量下铝蜂窝夹芯板的冲击响应。图 5 为三种不同能量冲击下实验与仿真的接触力-时间曲线对比图。表 2 为三种不同冲击能量下实验与仿真的接触力峰值载荷数值对比。结合图 3 和表 2 可知，仿真分析与文献[18]实验的接触力-时间曲线变化趋势基本一致，接触力峰值载荷的相对误差最大不超过 3%。表 3 为三种不同能量冲击后铝蜂窝夹芯板最大损伤深度仿真与试验误差的对比，三种不同能量冲击载荷下的下陷深度的相对误差均不超过 8%。综上可以认为，建立的有限元模型有效。

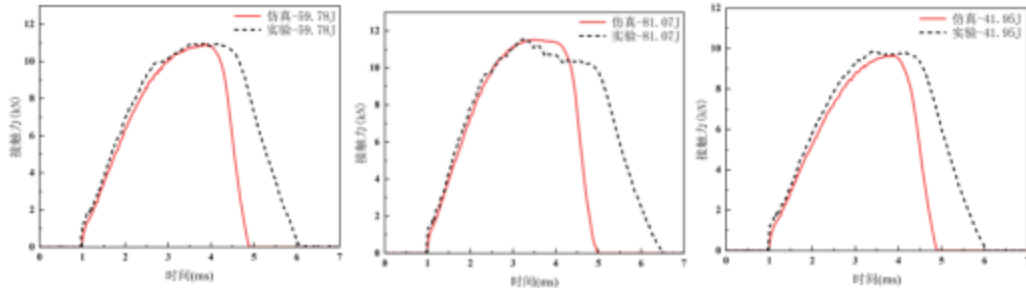


图 3 三种冲击能量下接触力-时间曲线实验与仿真对比

表 2 接触力峰值载荷在三种冲击能量下的实验与仿真对比

冲击能量/J	接触力峰值载荷 实验值/kN	接触力峰值载荷 仿真值/kN	绝对误差/kN	相对误差/%
41.95	9.88	9.63	0.25	2.53
59.78	11.02	10.92	0.10	0.91
81.07	11.57	11.54	0.03	0.26

表 3 最大损伤深度在三种能量冲击下实验与仿真数值对比

冲击能量/J	最大损伤深度实 验值/mm	最大损伤深度仿 真值/mm	绝对误差/mm	相对误差/%
41.95	7.00	6.72	0.28	4.00
59.78	8.30	8.21	0.09	1.08
81.07	10.70	9.88	0.82	7.66

能量响应是冲击仿真模型有效性的重要评价指标，为了确保模型的准确性，需保证沙漏能不超过总能量的 5%。以 50J 冲击能量为例，本文仿真模型的能量变化曲线如图 4 所示：冲击过程中系统总能量恒定，动能逐渐转化为内能，沙漏能占总能量的 1.29%，小于总能量的 5%。上述结果验证了本文数值仿真方法的有效性和准确性。

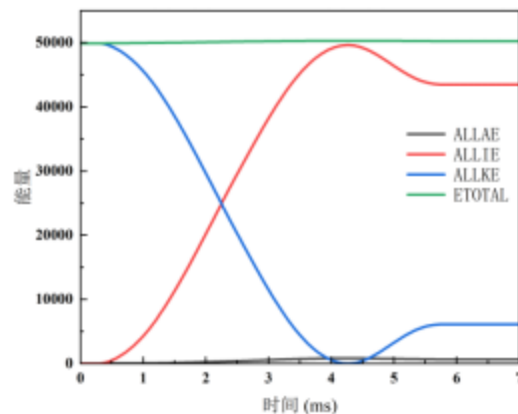


图 4 仿真模型能量变化曲线

## 2 不同冲击能量和冲击角度下新型 Y 型夹芯板的性能分析

### 2.1 不同冲击能量下新型 Y 型夹芯板的性能分析

采用 10J、20J、30J、50J 四种不同能量对 Y 型夹芯板进行冲击仿真分析，绘制四种冲击能量下的接触力时程曲线和接触力-位移曲线，如图 5 和图 6 所示。

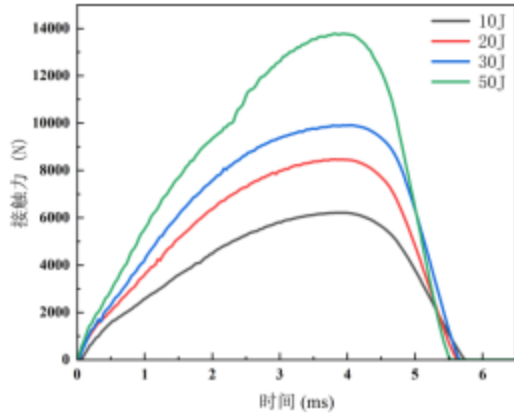


图 5 不同冲击能量下接触力时程曲线

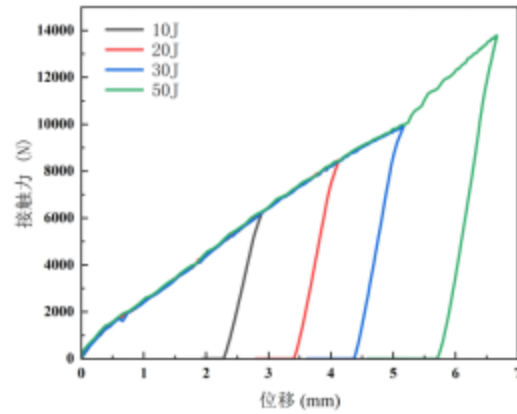
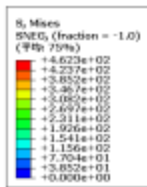


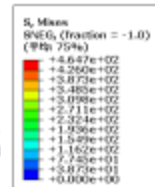
图 6 不同冲击能量下接触力-位移曲线

由图 5 和图 6 可以看出，随着冲击能量的增加，接触力峰值载荷也随着增加，与冲击能量呈正相关的变化趋势；不同冲击能量下，冲头与夹芯板的接触时长基本不变，且接触力-位移曲线的变化趋势也基本一致，但位移逐渐增大。

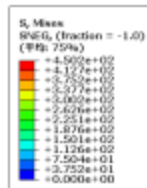
图 7 为不同冲击能量下 Y 型夹芯板的剖面损伤及应力云图。随着冲击能量的增大，上面板的凹陷程度也逐渐增大，不断有新的单元发生塑性变形来吸收增大的冲击能量。表 4 是不同冲击能量下 Y 型夹芯板各部分的能量吸收情况。由表 4 可以看出，上面板和芯体的吸能比例较大，下面板吸收能量的比例较小。随着冲击能量的增大，上面板吸能量占比逐渐降低，芯体吸能量占比逐渐增大，下面板吸能量占比有微小幅度的提升，但变化不大，这是由于芯体的塑性变形逐渐增大导致的。



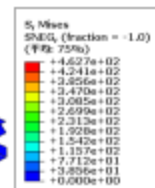
(a) 10J 能量下夹芯板剖面损伤及应力云图



(b) 20J 能量下夹芯板剖面损伤及应力云图



(c) 30J 能量下夹芯板剖面损伤及应力云



(d) 50J 能量下夹芯板剖面损伤及应力云图

图 7 不同冲击能量下 Y 型夹芯板的剖面损伤及应力云图

表 4 不同冲击能量下 Y 型夹芯板各部分的能量吸收情况

冲击能量/J	上面板		芯体		下面板	
	吸能量/J	能量占比	吸能量/J	能量占比	吸能量/J	能量占比
10J	5.352	66.29%	2.702	33.47%	0.020	0.25%
20J	9.848	58.11%	6.992	41.26%	0.107	0.63%
30J	14.784	56.75%	11.056	42.44%	0.209	0.80%
50J	23.616	53.78%	19.840	45.18%	0.460	1.05%

## 2.2 不同冲击能量下新型 Y 型夹芯板的性能分析

本节中冲头的冲击能量保持不变，始终为 50J，分别进行冲击角度为  $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  及  $60^\circ$  的冲击仿真计算，以分析冲击角度对于损伤及吸能状况的影响。冲击角度定义为冲头轴线与夹芯结构面板法线之间的夹角。如图 8 所示，冲击角度为冲头绕着过冲头头部球心且与 Y 型芯子焊缝平行的水平直线旋转的角度  $\theta$ ，以保证冲头与面板的初始接触位置保持不变。

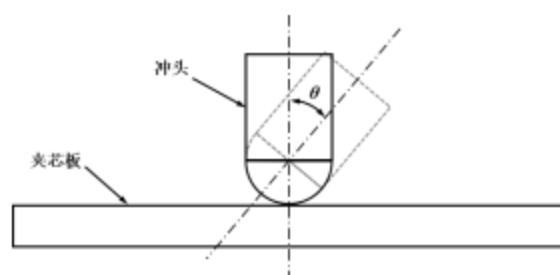


图 8 冲击角度示意图

图 9 为不同冲击角度下接触力时程曲线，图 10 为不同冲击角度下接触力-位移曲线。由图 11 和图 12 可以看出，随着冲击角度的增大，冲头与夹芯板的接触力峰值载荷逐渐降低。冲击角度的增大也导致接触时长逐渐增大，接触位移也随之增加，但其中  $0^\circ$  与  $15^\circ$  冲击角度的变化并不明显，变化趋势、峰值载荷、接触时长及位移等较为接近。

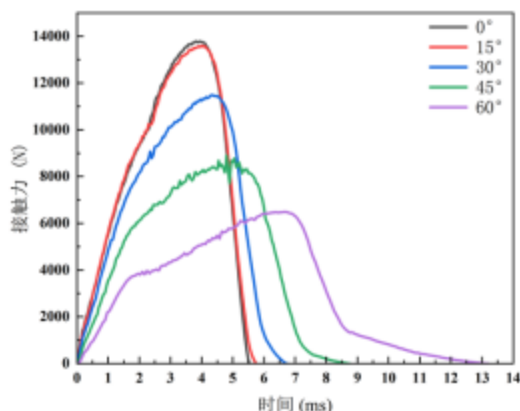


图 9 不同冲击角度下接触力时程曲线

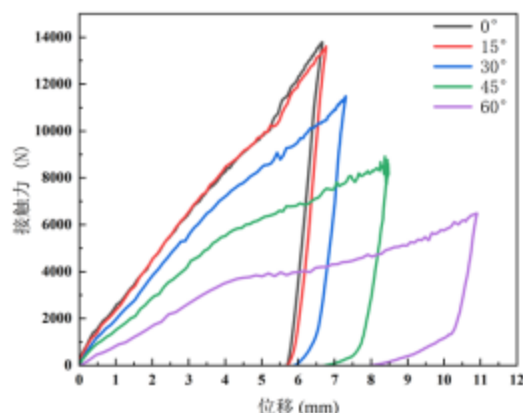


图 10 不同冲击角度下接触力-位移曲线

图 11 为 Y 型夹芯板在不同冲击角度下的剖面损伤及应力云图，上面板始终会出现凹陷，随着冲击角度的增大，凹陷的中心位置会逐渐偏离面板中心，凹陷深度随着冲击角度的增大而逐渐减小。

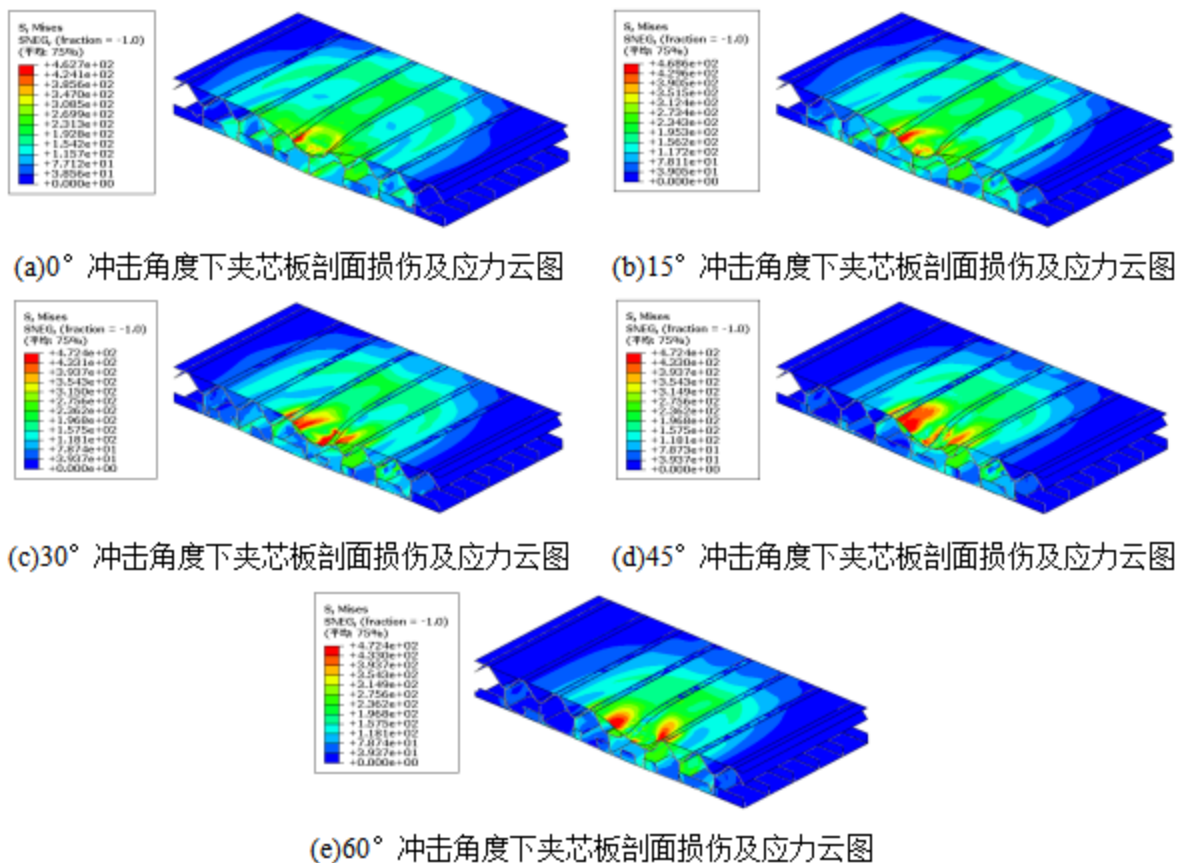


图 11 不同冲击角度下 Y 型夹芯板的剖面损伤及应力云图

表 5 是 Y 型夹芯板在不同冲击角度下上面板、芯体和下面板的能量吸收情况，由数据可知，随着冲击角度的增加，上面板的吸能量变化不大，只有 60° 冲击角度时有加大下降，芯体和下面板的吸能量均呈下降趋势，但各部分的吸能占比变化不大。然而冲头与面板摩擦耗散的能量呈逐渐增加的趋势，如图 12 所示，冲击角度越大，摩擦耗散的能量也就越大，但冲头的剩余动能逐渐减小，这说明冲击角度越大，冲头与面板的接触面积也就越大，从而导致摩擦力增加，以至于在冲击角度为 60° 时，通过摩擦损耗的能量已经接近了上面板和芯体所吸收的能量。

表 5 不同冲击角度下 Y 型夹芯板各部分的能量吸收情况

冲击角度/°	上面板		芯体		下面板	
	吸能量/J	能量占比	吸能量/J	能量占比	吸能量/J	能量占比
0	23.616	53.38%	19.840	44.84%	0.788	1.78%
15	23.440	54.53%	18.912	43.99%	0.636	1.48%
30	23.328	57.49%	16.880	41.60%	0.367	0.90%
45	24.192	60.81%	15.424	38.77%	0.170	0.43%
60	19.952	57.29%	14.680	42.15%	0.192	0.55%

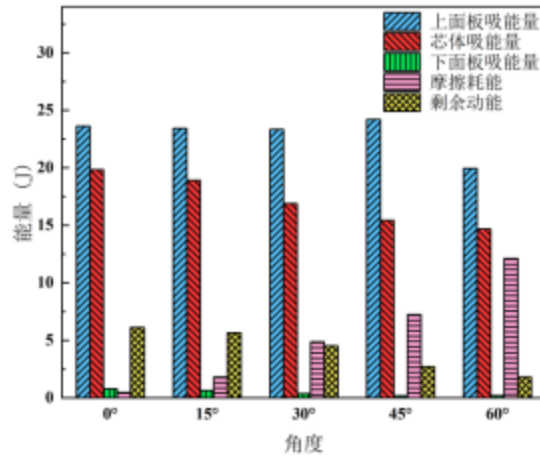


图 12 不同冲击角度下各类能量情况

### 3 结论

本文首先介绍了新型 Y 型夹芯结构的几何模型，利用有限元仿真方法探究了不同冲击能量和冲击角度对新型 Y 型夹芯板性能的影响，并得出如下结论：

1) 随着冲击能量的增大，接触力峰值载荷也随着增大，接触时长基本不变，接触位移增大，上面板吸能量占比逐渐降低，芯体吸能量占比逐渐增大，下面板吸能量占比有微小幅度的提升，但变化不大。

2) 随着冲击角度的增加，冲头与夹芯板的接触力峰值载荷逐渐降低，接触时长逐渐增大，接触位移也随之增加，上面板的吸能量变化较小，芯体和下面板的吸能量均呈下降趋势，但各部分的吸能占比变化不大，但冲头与面板摩擦耗散的能量呈逐渐增加的趋势，冲头的剩余动能逐渐减小。

### 参考文献

- [1] Ghate N, Goel M D. Influence of core topology on blast mitigation application of multi-layered honeycomb core sandwich panel[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 36.
- [2] Zeng W, Jiang W, Liu J, Huang W. Fabrication method and dynamic responses of composite sandwich structure with reentrant honeycomb cores[J]. *Composite Structures*, 2022, 299.
- [3] Elangovan H, Rajamohan V. Dynamic characterization of tapered composite sandwich plate with honeycomb core: numerical and experimental investigations[J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 178.
- [4] Hua L, Wang X, Zeng S, Ding L, Wu Z. Low-velocity impact response of sandwich panels with hierarchical honeycomb and graded hierarchical honeycomb cores: a numerical approach[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2025.
- [5] Shokoofeh D, Mahmood S. High velocity impact response of corrugated core composite sandwich structures[J]. *Journal of Composite Materials*, 2022, 56(16): 2559-2571.
- [6] Kumar R, Lal A, Sutaria B M. Static and dynamic response analysis of corrugated core sandwich plates under patch loading[J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2023, 51(12): 6729-6747.
- [7] Li F, Yuan W, Hao Y. Transient response of sandwich plates with corrugated core under mechanical-thermal loads[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2025, 25(03).
- [8] Dang W, Liu X, Sun B. Bending response of integrated multilayer corrugated sandwich panels[J]. *Applied Composite Materials*, 2023, 30(5): 1493-1512.
- [9] Yu S, Yu X, Ao Y, Mei J, Jiang W, Liu J, Li C, Huang W. The impact resistance of composite y-shaped

cores sandwich structure[J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 169.

[10] Rubino V, Deshpande V S, Fleck N A. The collapse response of sandwich beams with a y-frame core subjected to distributed and local loading[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2008, 50(2): 233-246.

[11] Liu H, Xiao X, Miao F, Yuan L, Zhang J. Low-velocity impact of clamped y-shaped sandwich beams with metal foam core[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2024, 26(8): 1707-1733.

[12] Yuan H, Wu X, Zhang J. Cutting failure behavior of foam core sandwich plates[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2024, 303.

[13] Goyal V, Rome J, Patel D N. Strength of asymmetric tapered composite foam core sandwich structures subjected to thermomechanical loading[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2023, 25(1): 6-22.

[14] Sun H, Yuan H, Zhang J, Zhang J, Du J, Huang W. Dynamic response of multilayer sandwich beams with foam-filled trapezoidal corrugated and foam cores under low-velocity impact[J]. *Engineering Structures*, 2023, 286.

[15] Li C, Chen Z, Jiao Y. Vibration and bandgap behavior of sandwich pyramid lattice core plate with resonant rings[J]. *Materials*, 2023, 16(7).

[16] Li Z, Xie L T, Ma T, Wang Y, Chai Y Y, Zhang C, Li F. A simple active adaptive control method for mitigating and isolating mechanical vibrations of the pyramid-core lattice sandwich structures[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2024, 577.

[17] Zhang J, Liu K, Ye Y, Qin Q. Low-velocity impact of rectangular multilayer sandwich plates[J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 141: 308-318.

[18] Gunes R, Arslan K. Development of numerical realistic model for predicting low-velocity impact response of aluminium honeycomb sandwich structures[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2016, 18(1): 95-112.

第一作者简介：王晨，男，2000年02月生，辽宁阜新人，大连理工大学车辆工程专业硕士，从事汽车轻量化与结构优化设计工作。通讯方式：辽宁省大连市甘井子区凌工路2号，邮箱：Wang\_Chen@mail.dlut.edu.cn。

王晨，男，2000年02月生，辽宁阜新人，大连理工大学车辆工程专业硕士，从事汽车轻量化与结构优化设计工作，曾获得辽宁省优秀毕业生、“蒋震”奖学金、大连理工大学一等学业奖学金、大连理工大学优秀研究生等荣誉称号。通讯方式：辽宁省大连市甘井子区凌工路2号，邮箱：Wang\_Chen@mail.dlut.edu.cn。