

折纸结构夹芯板在爆炸载荷下的吸能与变形模式*

项新梅¹, 黄宏达¹, 黎文钦¹, 刘义捷¹

(1. 广州大学土木与交通工程学院, 广东 广州, 510006)

摘要: 本研究利用 3D 打印技术制备折纸结构夹芯三明治板, 并通过爆炸实验研究三明治结构的抗爆性能。通过对不同芯层、面板厚度以及载荷当量的研究发现, 增加芯层层数可以提升夹芯板的比吸能, 而加肋设计可以提升夹芯层的刚度, 从而有效增强夹芯板的抗变形能力。与均匀分布结构相比, 梯度设计的芯层可以有效提升其能量吸收能力, 是一种提升抗爆性能的有效方案。综合考虑, 折纸结构夹芯层上层更高密度的梯度设计在爆炸作用下的防护性能最优。该研究为折纸结构用于抗爆防护板提供了一种新思路。

关键词: 折纸结构芯层; 3D 打印; 三明治板; 爆炸荷载

中图分类号: O347.3

国标学科代码: 13015

文献标识码: A

Energy absorption and deformation modes of origami sandwich panels under blast loading

XIANG Xinmei¹, HUANG Hongda¹, LI Wenqin¹, LIU Yijie¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

Abstract: Origami-inspired sandwich panels have attracted increasing attention in blast-resistant design owing to their light weight and high energy-absorption capacity, yet most existing studies have focused on quasi-static compression, and experimental evidence of their response under real blast loading remains limited. This work manufactured origami-core sandwich panels by three-dimensional printing and evaluated their blast resistance, focusing on the number of core layers, the graded arrangement of layer heights, vertical ribs and face-sheet thickness. The AlSi10Mg core was fabricated by selective laser melting and 2A12 high-strength aluminium alloy was used for the face sheets. Two- and three-layer uniform cores (ORI-2 and ORI-3), three-layer gradient cores (ORI-3-GRA-1 and ORI-3-GRA-2), ribbed cores (ORI-2-RIB and ORI-3-RIB) and a gradient ribbed core (ORI-3-GRA-1-RIB) were manufactured and tested. Quasi-static tensile and compression tests were first carried out to obtain the intrinsic mechanical behaviour, followed by blast tests in a four-cable ballistic pendulum, in which emulsion explosive with a TNT equivalence of 0.7 (70 to 100 g) was detonated at a stand-off distance of 100 mm and the impulse was derived from the pendulum swing. The permanent deflection of the back face sheet and the deformation/failure modes of the panels were recorded, and the ratio of residual deflection to impulse (DP/I) was adopted to compare the blast resistance. All cores exhibited a typical

* 收稿日期: 2026-07-13; 修回日期: 2026-09-08;

基金项目: 国家自然科学基金 (12672486 和 52078152); 广东省自然科学基金 (2024A1515011293)

第一作者: 项新梅 (1986—), 女, 博士, 教授. E-mail: xiangxm@gzhu.edu.cn;

通信作者: 刘义捷 (1987—), 男, 博士, 副教授. E-mail: celiuyijie@gzhu.edu.cn.

three-stage quasi-static response of elasticity, plastic plateau and densification. Adding vertical ribs changed the dominant deformation mode from buckling of the cell walls to axial compression of the ribs, increasing the peak crushing force, mean crushing force and specific energy absorption by about 867%, 417% and 257%, respectively, relative to the uniform three-layer core. Under blast loading, ribbed and graded designs and a larger number of layers all reduced the permanent deflection of the back face sheet. It is concluded that a graded core with higher density in the upper layer adjacent to the loading face, combined with vertical ribs, provides the most favourable blast resistance, because the gradient induces progressive, layer-by-layer collapse and the ribs increase the structural stiffness. The results offer a design basis for lightweight, blast-resistant sandwich panels.

Keywords: Origami core; 3D printing; Sandwich panel; Blast loading

1 引言

夹芯板结构因其独特的轻质高强特性,在航空航天、交通运输和建筑防护等领域中得到了广泛应用。特别是在抗爆结构设计中,夹芯板因其优异的能量吸收能力和冲击抵抗性能而受到重视。在爆炸冲击载荷下,夹芯板能够有效地保护背后的结构和人员免受伤害^[1,2]。研究表明,夹芯板的抗爆性能不仅依赖于面板的材料特性,更与其核心结构的几何形态密切相关^[3,4]。多种夹芯板在爆炸冲击下的动态响应和能量吸收机制一直是研究的热点^[5-7]。近年来,为了提高夹芯板的抗爆性能,研究者们探索了多种新型夹芯板结构,包括金属蜂窝^[8-11]、泡沫填充^[12-16]以及复合层板^[17]等,这些研究为夹芯板的设计提供了新的理论基础和设计方法。

在爆炸冲击下,夹芯板的变形模式对其能量吸收能力和结构完整性至关重要。夹芯板可能表现出的变形模式包括整体弯曲、芯材屈曲、面板断裂和界面脱粘等^[17,18]。这些变形模式不仅影响夹芯板的抗爆性能,也决定了其在实际应用中的安全性和可靠性。通过分析不同夹芯板结构在爆炸冲击下的变形模式,可以为夹芯板的设计和优化提供指导。例如,通过调整芯材的密度和面板的厚度,可以有效地控制夹芯板的变形模式,从而提高其在爆炸冲击下的性能^[8,19,20]。此外,对芯层进行梯度层级设计,也有助于提升夹芯板的吸能效果^[9,21]和更小的背板挠度^[10]。近年来,随着对结构轻量化和多功能化需求的不断增长,寻找新型结构材料以提高能量吸收效率成为迫切需求。折纸结构

(origami),作为一种创新的几何构型,以其独特的可折叠性和可编程变形能力,为设计高性能的夹芯板提供了新的思路。

折纸芯是通过使用镶嵌折纸图案折叠片状材料而产生的结构,最流行的模式是 Miura 折纸模式。折纸结构通常由板材压制或 3D 打印制成,它们的几何形状和折痕的存在使这些结构具有优异的力学性能,如可调刚度^[22,23]、负泊松比^[24]、可调谐的热特性^[25]以及良好的失效模式,在受到冲击^[26,27]时提供更高的能量吸收(EA)能力。Zhang 等人^[28]提出了准静态响应的解析模型以描述 Miura 折纸单元胞在平面内压缩(X 方向)下与强度和 EA 容量相关的力学特性。Lv 等^[29]和 E.等^[30]对折纸夹芯板进行了准静态压缩试验与数值计算,证明了其优异的吸能效果;而 Liu 等^[31]对折纸夹芯进行了面外压缩、三点弯曲和面内压缩三种类型的试验,对其变形模式进行了研究。此外,复合材料在低速冲击下的损伤机理与吸能特性已有系统综述^[32],可为折纸夹芯等新型轻质结构的冲击损伤评价与吸能设计提供参考。前人的研究^[33-35]表明,面外抗压性能在爆破荷载作用下的结构优化中尤为重要。Du 等^[36]对弯折折纸夹芯板的力学行为与破坏进行了研究,揭示了折纸芯壁厚对夹芯板的破坏形式的影响。Xiang 团队^[37,38]对三浦折纸夹芯结构和拱形三浦折纸结构进行准静态力学特性研究,结果发现,与同等相对密度和高度的蜂窝结构相比,折纸结构在能量吸收性能上有着明显地提高,在弯曲和剪切荷载下具有更好或相当的刚度和强度,然而在压缩荷载作用下,折纸结构在刚度和强度方面有着明显地下降。此外, Xiang 等还^[39]研究了不同梯度对通过 3D 打印技术制造的不锈钢结构在准静态压缩工况下的变形和能量吸收的影响,结果表明梯度材料比均匀材料具有更高的比能吸收(SEA)。

综上所述,夹层结构已广泛用于防爆防护,然而,具有折纸芯的夹层结构的抗冲击性能尚未得到广泛的研究,目前的研究多集中在准静态载荷上,而对动力效应的研究相当有限,折纸结构和材料在冲击荷载作用下的行为值得特别关注^[40]。在冲击荷载下,Heimbs等^[41]通过一系列的实验和数值研究,探讨了折纸夹芯的变形和坍塌机制,包括冲击能量吸收;Basily等^[42]通过折叠技术制备了折纸超材料,利用落锤开展了低速冲击压缩试验,发现该超材料单位体积能量吸收能力优于蜂窝材料;Zhang等^[43]对三浦折纸夹层铝板进行了弹道冲击试验,分析了三种不同压头作用下超材料的塑性变形和能量吸收效率;Zhang P, Li X^[27]等人研究了具有折纸启发式核心的夹层梁在动态爆炸载荷下的响应,这些折纸结构的特性使其在能量吸收和抗冲击性能方面超越了传统的结构。此外, Harris 和 McShane^[44]以及 Kshad 等^[45]的研究也展示了采用选择性激光熔化制造的折纸结构在冲击荷载下的潜力。

本研究通过 3D 打印技术制造折纸结构夹芯板,并系统研究其在爆炸载荷下的动态响应。鉴于已有大量文献研究表明夹芯板的性能优于相同质量和材料的实心板^[46,47],本文将重点对夹芯板的抗冲击性能进行评估,不与相应的实心板进行比较。我们将探讨折纸结构的折叠角度、层数和板材厚度等因素如何影响夹芯板的抗爆性能,以及这些结构在实际应用中的潜力。研究成果能够为夹芯板的设计提供指导,同时为未来在极端环境下的结构安全提供更为可靠的保障。

2 几何模型

2.1 单胞

如图 1(a)所示,为 Miura 折纸结构的俯视图,展示了其平行四边形单元的排列模式;图 1(b)为单个折纸胞元的折叠示意图,高度为 $h/2$ 。而两个折纸胞元上下相扣形成折纸芯层的单胞结构,其高度为 h ,如图 1(c)所示。此外,如图 1(d)所示,在 Miura 折纸结构中引入了竖向肋结构,肋的高度与主结构单元的高度 h 保持一致,加肋设计增强了结构的稳定性。

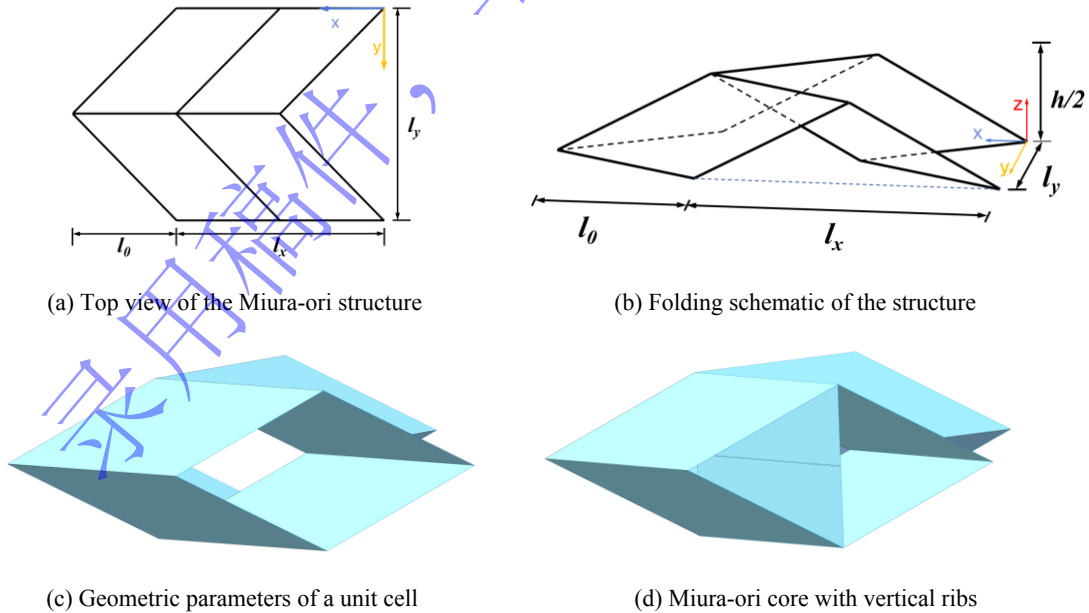


图 1 Miura 折纸单胞结构

Fig.1 Miura-ori unit cell structure

2.2 材料力学性能测试

本文芯层采用选择性激光熔融 (SLM) 成形的 AlSi10Mg 铝镁合金,该材料在 3D 打印复杂折纸几何结构时精度高、致密度好,且屈服强度约 102 MPa,利于塑性坍塌吸能;面板则选用屈服强度约

310 MPa 的 2A12 高强度硬铝, 其高刚高强度可承受爆炸冲击、约束芯层并递载荷, 且作为轧制板材便于加工。为获取合金的本构参数, 本研究依据 ASTM E8 标准开展金属材料准静态单轴拉伸试验。针对芯层与面板用标准铝板试样, 设定 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 恒定加载速率进行力学性能测试。试验过程中采用引伸计实时采集试样轴向变形数据, 同步通过万能材料试验机记录载荷-位移响应曲线。基于试样原始尺寸参数, 将原始数据转换为工程应力-应变曲线。实验系统配置高精度引伸计 (型号: YYU-100, 标距 25 mm, 精度 $\pm 0.5 \mu\text{m}$) 作为主要应变测量装置, 同步记录变形数据。载荷数据由试验机内置的力传感器 (量程 50 kN, 精度 0.5 级) 同步采集, 采样频率设置为 100Hz。实验环境温度控制在 $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, 相对湿度保持 $(45 \pm 5) \% \text{ RH}$ 。材料的单轴拉伸力学性能参数详见表 1。

表 1 实验基材材料参数

Table 1 Substrate material properties

材料类型	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量/GPa	屈服强度/MPa	泊松比
AlSi10Mg	2710	73	102	0.3
2A12	2770	72	310	0.3

3 芯层的准静态压缩实验

3.1 试件

夹芯板的芯层是阵列的 Miura 折纸结构 (如图 2 所示)。表 2 列出了芯层折纸结构的基本参数, 包括折纸的尺寸、壁厚以及质量等关键数据。试样采用统一缩写标记: ORI 表示折纸 (Origami) 芯层; 其后数字表示芯层层数 (ORI-2 为双层、ORI-3 为三层); “GRA”表示梯度设计 (Gradient); “RIB”表示加肋 (Ribbed)。据此, 双层折纸结构命名为“ORI-2”、三层折纸结构命名为“ORI-3”、梯度设计的三层折纸结构命名为“ORI-3-GRA”、三层加肋折纸结构命名为“ORI-3-RIB”。

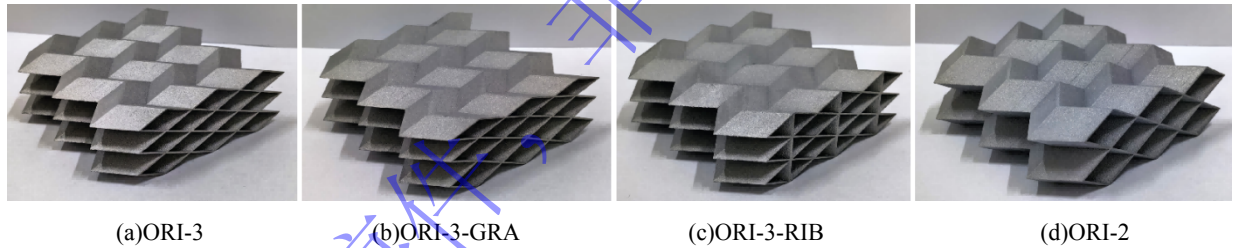


图 2 试件: (a) ORI-3 三层均匀芯层; (b) ORI-3-GRA 三层梯度芯层; (c) ORI-3-RIB 三层加肋芯层; (d) ORI-2 两层均匀芯层

Fig.2 Specimens for quasi-static compression tests: (a) three-layer uniform core; (b) three-layer gradient core; (c) three-layer ribbed core; (d) two-layer uniform core

表 2 Miura 折纸夹芯层的基本参数

Table 2 Basic parameters of the multi-layer Miura-ori core

试件名称	芯层壁厚/mm	芯层质量/g	芯层总高度 H	每层芯层高度 h
ORI-2	0.75	50.488	30	15/15
ORI-3	0.75	68.742		10/10/10
ORI-3-GRA	0.75	66.608		8/10/12
ORI-3-RIB	0.75	86.609		10/10/10

3.2 准静态试验方法

本研究采用电子万能材料试验机 (型号: WDW-50E, 如图 3(a) 所示), 依据 ASTM C365 标准, 设定 $1.6 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的恒定位移加载速率, 该参数选择兼顾了准静态加载条件 (应变率 $< 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) 与试验机量程匹配性。压缩试样为双层均匀芯层 (ORI-2)、三层均匀芯层 (ORI-3)、三层梯度芯层

(ORI-3-GRA) 以及三层加肋芯层 (ORI-3-RIB), 如图 3(b) 所示。所有试件均采用选择性激光熔融 (SLM) 技术制备, 确保几何尺寸精度控制在 ± 0.1 mm 范围内。

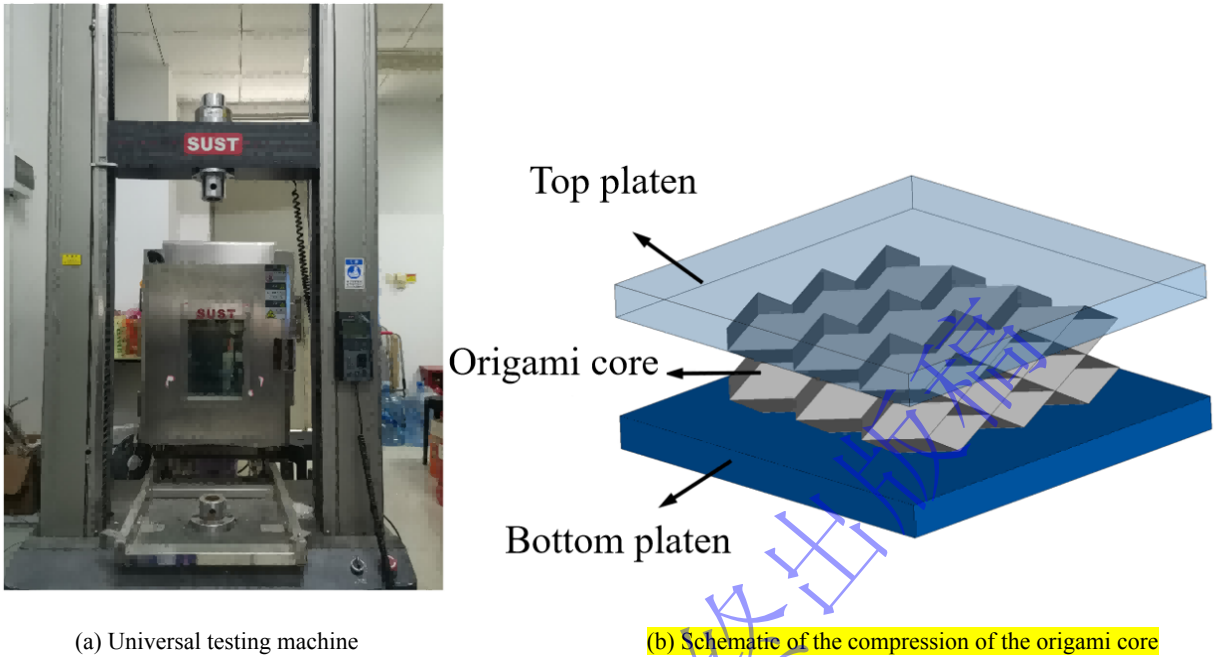


图 3 准静态压缩实验装置

Fig.3 Quasi-static compression test setup

3.3 实验结果

图 4 展示了四种芯层在准静态压缩条件下的力-位移曲线。从图中可以清晰地观察到, 这些曲线均呈现出典型的三阶段特征。在压缩的初始阶段, 力随位移的增加近乎线性增长, 直至达到局部最大值。这一阶段被称为弹性阶段 (Elastic region), 在此期间, 折纸结构主要表现出弹性变形特性。随后, 结构进入屈服阶段, 力开始下降。在这一过程中, 折纸结构的薄壁部分开始出现弯曲变形, 应力在较大位移范围内保持相对恒定。这一阶段被称为塑性平台阶段 (Plastic plateau), 是折纸结构在压缩过程中吸收能量的关键阶段。最后, 当芯层被压缩至接近致密状态时, 力迅速上升, 这一阶段被称为致密阶段 (Densification region), 此时结构的变形主要表现为整体的压实。

从图 4 可以发现, 不同折纸结构的力-位移曲线存在显著差异。均匀芯层 ORI-2 和 ORI-3 的塑性平台段均出现了不同程度的下降趋势。相比之下, 梯度芯层 ORI-3-GRA 的曲线则呈现出两个小波峰, 并且整体呈现上升趋势。这种差异主要是由于芯层各层连接处存在缺陷, 在压缩过程中, 这些缺陷部位容易出现断裂现象, 随着压缩的持续, 断裂情况愈发明显, 导致结构强度逐渐降低, 直至进入致密阶段。而对于梯度设计的折纸结构 (如 ORI-3-GRA), 由于其逐层坍塌和逐层致密的特性, 三层连接处并非同时开始断裂, 因此力-位移曲线呈现出总体上升的趋势。

相比之下, 加肋芯层 ORI-3-RIB 的压溃力显著高于其他三种结构。这种显著提升的压溃力主要归因于其独特的设计, 即在结构中增加了竖向肋。这些竖向肋垂直放置, 能够直接承受大部分竖向压力, 从而显著增强了结构的整体抗压性能。这种设计不仅提高了结构的承载能力, 还改变了其在压缩过程中的变形模式, 使其在准静态压缩下表现出更为优异的力学性能。

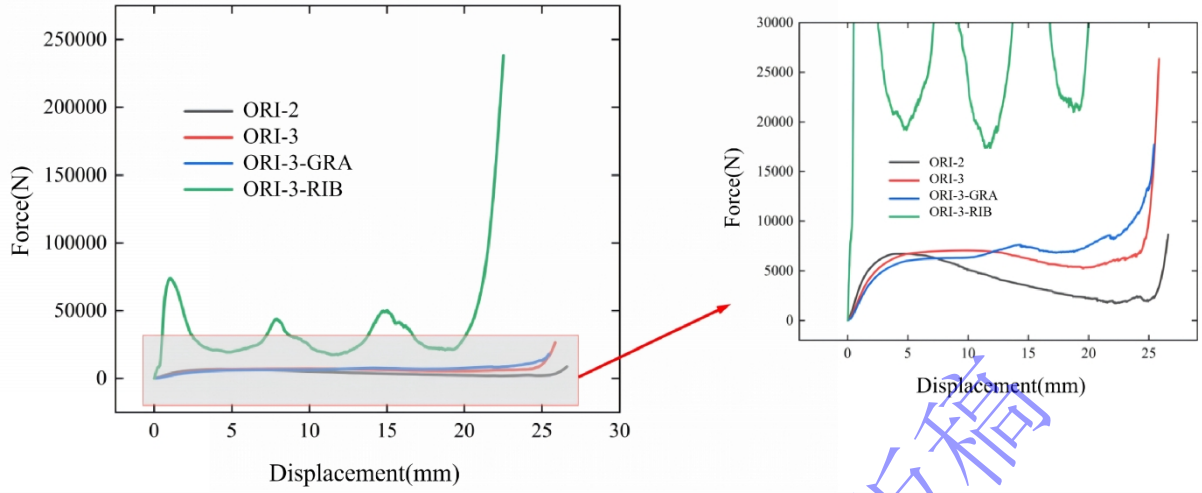
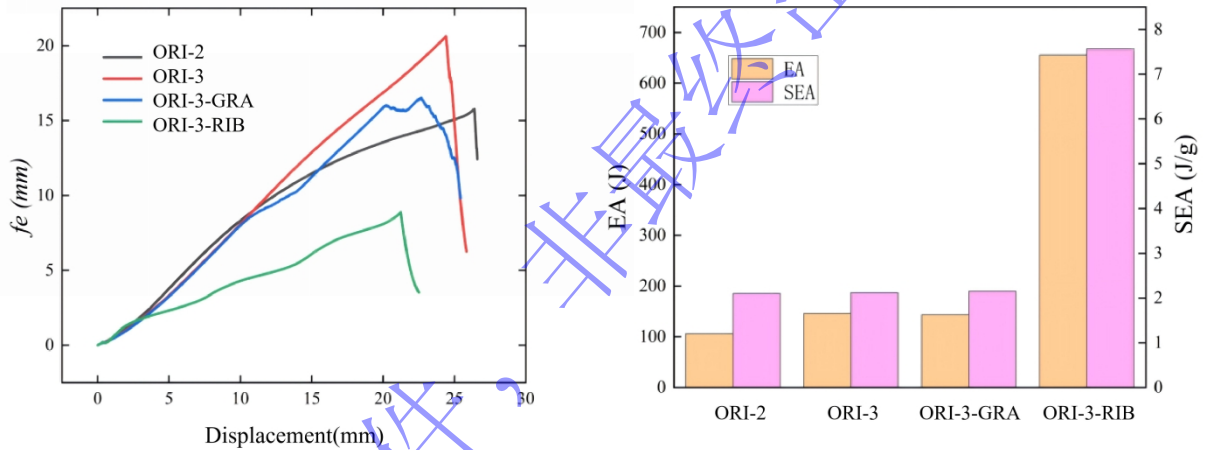


图 4 Miura 折纸结构的力-位移曲线

Fig.4 Force-displacement curves of the Miura-ori structure



(a) Deformation efficiency-displacement curve

(b) Energy absorption and specific energy absorption

图 5 夹芯板压缩性能评估曲线

Fig.5 Compressive performance evaluation curves of the sandwich panels

从峰值力 (F_{peak})、平均压溃力 (F_{ave})、吸收能量 (EA) 和比吸能 (SEA) 等重要指标来评定三明治夹芯板的力学性能，峰值力是指在压缩过程中密实化之前结构所承受的最大载荷，反映了结构在初始阶段的抗压能力。平均压溃力则表示结构在单位压缩位移下的能量吸收能力，是通过总吸能与有效压缩位移的比值计算得出。吸收能量 (EA) 是通过力-位移曲线下的积分面积计算得到的，反映了结构在整个压缩过程中吸收的总能量。比吸能 (SEA) 是通过总吸能与结构质量的比值来衡量单位质量材料的能量吸收能力。可表示为：

$$F_{ave} = \frac{\int_{\delta_0}^{\delta_D} F(\delta) d\delta}{\delta_D - \delta_0} \quad (1)$$

$$SEA = \frac{1}{m} \int_0^{\delta} F(\delta) d\delta \quad (2)$$

式中 δ_0 为力达到峰值时的位移， δ_D 为致密化开始时的位移， m 为结构的质量。

另外, 本文采用能量效率 f_e 来确定芯层的最佳能量吸收能力时的位移, 该参数由 Xiang^[48]等人首次提出, 如图 5(a)所示。当 f_e 达到最大值时, 其相对应的压缩位移作为有效位移 (即式(1)(2)中的致密化起始位移 δD) 计算能量吸收。能量效率的计算公式可表示为:

$$f_e = \frac{\int_0^{\delta} F(\delta) d\delta}{F_{peak}} \quad (3)$$

此外, 峰值力 F_{peak} , 平均力 F_{ave} , 压实位移 D 以及均匀度 $U = F_{peak}/F_{ave}$ 也是用于评判结构力学性能的指标, 其数值如表 3 所示。从表中数据可以看出, ORI-3 结构的初始峰值力为 7.63 kN, 而经过优化设计的加肋结构 ORI-3-RIB 的初始峰值力显著提升至 73.74 kN, 比 ORI-3 高出约 866%。这一结果表明, 竖向肋的加入极大地增强了结构的初始抗压能力。

表 3 芯层的力学性能的评价指标参数

Table 3 Evaluation parameters for mechanical performance of the core

试件名称	F_{peak}/kN	F_{ave}/kN	D/mm	$U = F_{peak}/F_{ave}$	EA/J	SEA/(J·g ⁻¹)
ORI-2	6.72	4.02	26.39	1.67	106.04	2.10
ORI-3	7.63	5.97	24.40	1.18	145.57	2.12
ORI-3-GRA	7.03	6.31	22.69	1.21	143.24	2.15
ORI-3-RIB	73.74	30.85	21.24	2.39	655.38	7.57

对于不加肋的 Miura 折纸芯层, ORI-2、ORI-3 和梯度设计的 ORI-3-GRA 折纸结构的初始峰值力分别为 6.72 kN、7.63 kN 和 7.03 kN。在平均压溃力方面, ORI-3-GRA 为 6.31 kN, ORI-3 为 5.97 kN, ORI-3-GRA 比 ORI-3 高出约 5.7%。而 ORI-2 的平均压溃力为 4.02 kN, 层数更多的 ORI-3 相比 ORI-2 高出 48.5%。这些结果表明, 增加层数提升结构的抗压溃能力, 但夹芯质量有所增加; 而采用梯度设计会导致峰值力降低、平均压溃力上升, 这有利于结构吸能, 该现象与文献中^[49]的结论相似。

在压实位移方面, ORI-2、ORI-3、ORI-3-GRA 和 ORI-3-RIB 分别为 26.39 mm、24.40 mm、22.69 mm 和 21.24 mm。相比于均匀布置的折纸结构, 梯度设计的折纸结构更容易达到致密点, 而加入竖向肋的折纸结构则最快达到致密点。这表明, 结构设计的优化能够有效调节压缩过程中的变形路径, 从而提高结构的致密化效率。

在能量吸收能力方面, 加肋结构表现出显著优势。如图 5(b)所示, ORI-3-RIB 相比于 ORI-3, 加入竖向肋后, 其比吸能 (SEA) 从 2.12 J·g⁻¹ 提升至 7.57 J·g⁻¹, 增加了约 257%。尽管竖向肋的加入导致结构总质量有所增加, 但其能量吸收能力的提升更为显著, 因此其比吸能 (SEA) 仍获得了大幅提升。相比之下, ORI-2、ORI-3 和 ORI-3-GRA 的总吸能 (EA) 分别为 106 J、145 J 和 143 J, 而比吸能 (SEA) 分别为 2.10 J·g⁻¹、2.12 J·g⁻¹ 和 2.15 J·g⁻¹。虽然总吸能有所提升, 但比吸能的提升并不明显。这表明, 相比于增加层数或采用梯度设计, 加入竖向肋能显著提升结构在准静态荷载下的吸能性能。这一显著提升的物理机制可从三方面解释: (1) 载荷路径改变——无肋折纸芯受压时, 载荷沿倾斜胞壁以弯曲与屈曲方式传递, 胞壁在较小载荷下即发生塑性屈曲, 故初始峰值力低; 加入竖向肋后, 肋沿压缩方向直接轴向承压, 形成“竖直短柱受压”的高刚度载荷路径, 初始刚度与峰值力大幅提高。(2) 侧向约束——竖向肋与折纸胞壁相连, 抑制了胞壁在压缩初期的面外屈曲, 推迟了结构整体失稳。(3) 变形模式转变——初始峰值由“胞壁屈曲主导”转变为“肋轴向压缩主导”, 肋截面的轴向承载能力远高于胞壁的弯曲承载能力, 故出现近一个量级的峰值力提升。

综上所述, 通过对比分析四种折纸结构的力学性能指标, 可以得出以下结论: 增加层数和采用梯度设计能够有效提升结构的抗压溃能力, 而加入竖向肋则在显著增强初始峰值力和能量吸收能力方面表现出更大的优势。这些研究结果为优化折纸结构的力学性能提供了重要的参考依据。

4 爆炸实验

4.1 爆炸实验试件信息

爆炸试样为折纸结构夹芯的三明治板，由两个面板和一个折纸芯层组成。面板采用 Al-2A12 铝合金，而夹芯层采用 3D 打印铝材 AlSi10Mg 一体成型。如图 6(c)所示，折纸芯层放在两块 400 mm×400 mm 均匀打孔的面板之间，折纸夹芯层的区域尺寸为 250 mm×250 mm×30 mm，两者采用胶水连接。折纸结构夹芯层由 $9 \times 9 \times n$ 的折纸结构单胞组成的矩阵构成。该试件尺寸综合考虑了四缆弹道摆系统的承载能力、3D 打印 SLM 的成型尺寸限制以及炸药当量（70-100 g）的试验安全边界， 9×9 的折纸单胞阵列能够体现芯层的周期性响应特征，避免单胞数量过少导致边界效应主导。三明治板的芯层共有七种，参数见表 4。芯层包括单层、双层、以及三层的均匀折纸结构，如表 4(a)、(b)、(d)。通过改变单胞的高度设计高度梯度，其中，ORI-3-GRA-1（与准静态实验中的 ORI-3-GRA 设计相同，重新命名 GRA-1 目的是与第二种梯度设计进行区分）为第一种梯度设计(e)，由上往下的单胞高度依次为 8、10、12 mm；而 ORI-3-GRA-2 为第二种梯度设计(g)，从上往下的单胞高度为 6、10、14 mm。以及双层加肋 ORI-2-RIB（见表 4(c)）和三层梯度加肋 ORI-3-GRA-1-RIB（见表 4(f)），其中肋的厚度均为 0.75 mm。

表 4 夹芯板结构设计
Table 4 Structural design parameters of the sandwich panels

试件名称	芯层图例	芯层质量/kg	芯层总 H /mm
(a)ORI-1		0.45	30
(b)ORI-2		0.55	15
(c)ORI-2-RIB		0.7	15
(d)ORI-3		0.65	10
(e)ORI-3-GRA-1		0.75	8+10+12
(f)ORI-3-GRA-1-RIB		0.8	8+10+12
(g)ORI-3-GRA-2		0.75	6+10+14

*注释：ORI 表示折纸芯层；其后数字表示芯层层数；GRA 表示梯度设计（GRA-1/GRA-2 分别对应层高 8/10/12 与 6/10/14）；RIB 表示加肋。

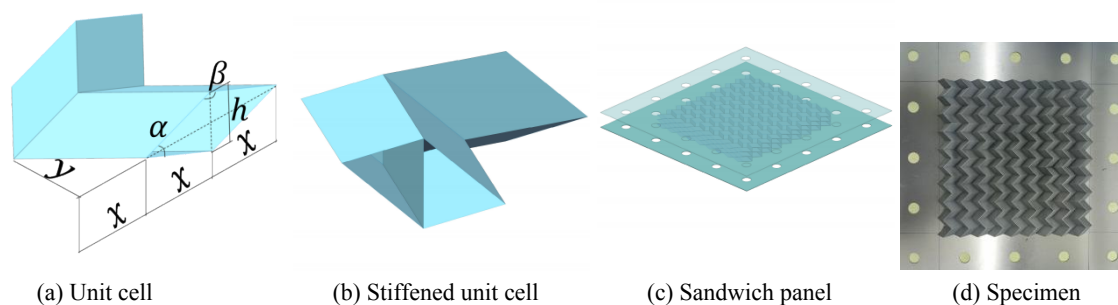
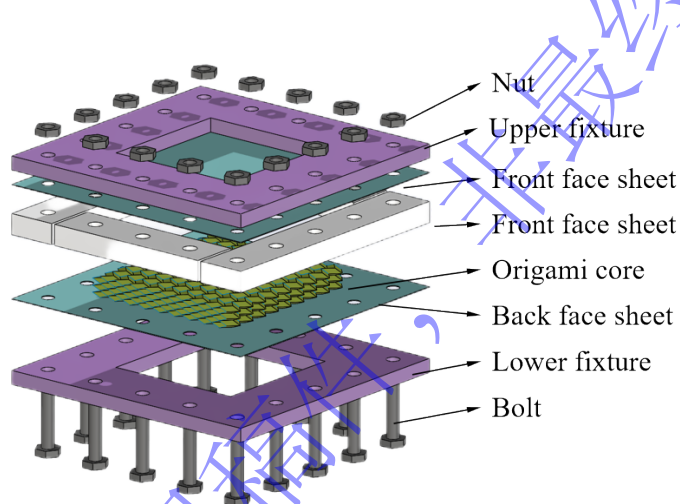


图 6 夹芯板构型及 3D 打印试件

Fig.6 Sandwich panel configurations and 3D printed specimen

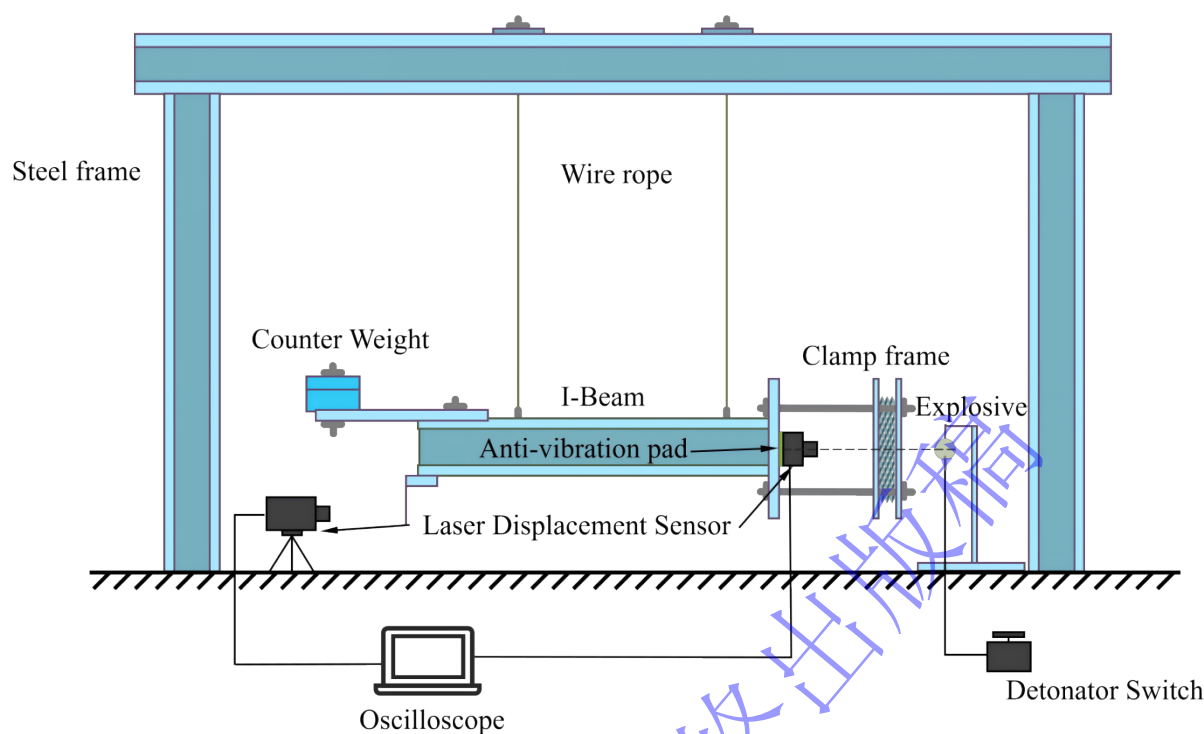
爆炸实验中，试样通过 16 颗螺丝被夹具组件固定在框架中，夹芯层的尺寸为 $250\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ ，其暴露的测试面积为 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ，如图 7(a)所示。夹芯层与面板被夹紧组件（包括夹具、垫块、螺栓、螺母）固定在摆锤上，如图 7(b)所示。图 7(b)为四缆弹道摆系统，该装置已经被广泛用于三明治结构的爆炸实验^[9,17,50,51]。系统由夹具框架、支撑结构的钢梁以及平衡配重组成，并通过四根钢丝绳在自由空气中悬挂图 7(c)。乳化炸药（一种含水炸药，其等效重量为 TNT 的 0.7 倍）和雷管被安装于试样前方。激光位移传感器（型号 Micro-Epsilon LD1607-200）安装在摆锤系统后方，用于精确测量摆锤的平移距离。



(a) Schematic of the clamping assembly



(b) Photograph of the experimental setup



(c) Schematic diagram of the experimental setup

图 7 四缆弹道摆系统

Fig.7 Four-cable ballistic pendulum system

通过分析摆动幅度的数据，可以计算出施加在摆锤前端面上的冲量。进一步结合试样的暴露面积，可以得出施加在试样上的有效冲量^[17,50-52]，摆锤上施加的冲量为：

$$I = Mx_1 \frac{1}{T} e^{\frac{2\pi}{4} \ln \frac{x_1}{x_2}} \quad (4)$$

其中摆锤系统与夹具的总质量 M 为 157.95 kg， T 为摆动周期。在周期时间的 $1/4$ (T_1) 和 $3/4$ (T_2) 时刻，分别记录了位移 x_1 和 x_2 。

实验设计了不同壁厚的面板和折纸结构芯层，面板壁厚分别为 1 mm 和 2 mm，折纸结构芯层壁厚则为 0.75 mm。此外，实验还考虑了三种炸药当量，分别为 70g、85g 和 100g。具体的实验组别如表 5 所示。通过弹道冲击摆锤与激光位移传感器，测得 70 g 当量炸药冲击下，ORI-2、ORI-3、ORI-2-RIB 折纸芯夹芯板所受冲量分别为 32.01 Ns、34.15 Ns、35.30 Ns，表明相同当量下作用于结构的冲量基本一致。

表 5 实验信息

Table 5 Experimental data

编号	试件名称	炸药当量/g	炸药距离/mm	面板厚度/mm
A-1	ORI-2-RIB	70	100	1.00
A-2	ORI-2-RIB	100	100	1.00
A-3	ORI-3-GRA-2	70	100	1.00
A-4	ORI-2	70	100	1.00
A-5	ORI-3-GRA-1	70	100	1.00
A-6	ORI-3	70	100	1.00

爆 炸 与 冲 击
Explosion and Shock Waves

A-7	ORI-3-GRA-2	100	100	1.00
A-8	ORI-2-RIB	85	100	1.00
A-9	ORI-3-GRA-1-RIB	100	100	1.00
A-10	ORI-2-RIB	100	100	2.00
A-11	ORI-2-RIB	70	100	1.00

5 爆炸实验结果和讨论

5.1 实验结果

表 6 列出了夹芯板实验的结果，涵盖了冲量、背板中心点永久变形程度以及迎爆面面板的破坏类型。实验结果表明：梯度折纸夹芯板的残余背板挠度始终小于均匀折纸夹芯板。而在相同炸药当量下，相比于加肋折纸芯层，未加肋的残余挠度更大；层数更多的夹芯板背板残余挠度也较小。由于现场试验的误差与爆炸的偶然性，相同炸药当量下的冲量也有差异，因此提出 DP/I ，即

$\frac{\text{残余挠度绝对值(mm)}}{\text{冲量(Ns)}}$ ，作为本试验的夹芯板防护性能参考标准。较大的冲量代表试件受到了更大的冲击，

而背板残余挠度则直观地体现了夹芯板的变形程度，故 DP/I 的数值越小则体现夹芯板的抵抗变形能力越好。从表 6 中我们发现：层数最多的 ORI-3 相比于 ORI-2，有着更小的 DP/I ；加肋的结构

（ORI-2-RIB）的 DP/I 值比其原始结构（ORI-2）要小 61.29%，加肋可以大幅提升夹芯板抵抗变形的能力；而梯度设计同样可以大大减小夹芯板的 DP/I 值，相比于均质试件，第一种梯度设计（ORI-3-GRA-1）的 DP/I 减小了 73%，但第二种梯度设计（ORI-3-GRA-2）则在背板与夹具接触处发生了剪切破坏。

为检验上述结果的可靠性，本实验设置了重复性验证试验：A-1 与 A-11 为相同工况（ORI-2-RIB、70 g 当量、1.00 mm 面板）的两次独立试验，测得冲量分别为 35.30Ns 与 34.22Ns（相对偏差约 3%，重复性良好）， DP/I 分别为 0.12 与 0.15，两次均显著低于未加肋试件 ORI-2 的 0.31，防护性能趋势一致。其余工况受爆炸试验成本高、危险性大的限制采用单次试验。

表 6 夹芯板爆炸实验结果

Table 6 Blast test results of the sandwich panels

序号	试件名称	炸药当量 /g	面板壁厚 /mm	冲量/Ns	背板中心残余 挠度/mm	DP/I	面板变 形模式*	背板变 形模式*
A-1	ORI-2-RIB	70	1.00	35.30	4.216	0.12	I	I
A-2	ORI-2-RIB	100	1.00	55.39	12.603	0.23	I	I
A-3	ORI-3-GRA-2	70	1.00	28.50	3.904	0.13	G-D	G-D
A-4	ORI-2	70	1.00	32.01	10.003	0.31	G-D	G-D
A-5	ORI-3-GRA-1	70	1.00	29.16	3.1207	0.10	I	I
A-6	ORI-3	70	1.00	34.15	5.006	0.15	G-D	G-D
A-7	ORI-3-GRA-2	100	1.00	55.97	-	-	T	T
A-8	ORI-2-RIB	85	1.00	40.21	9.305	0.23	I	I
A-9	ORI-3-GRA-1- RIB	100	1.00	50.16	-	-	T	T
A-10	ORI-2-RIB	100	2.00	53.53	8.210	0.15	I	I
A-11	ORI-2-RIB	70	1.00	34.22	5.181	0.15	I	I

*注释：I 表示压痕变形；G-D 表示面板与夹芯整体发生压缩；T 表示剪切破坏。

5.2 对照组实验结果

由于免受爆炸攻击的人员或物体通常位于夹芯板等屏障后面，因此样本的背面变形/失效在本文中被认为是感兴趣的主要响应。于是，为了探究不同变量条件的影响，实验被分为三个对照组，分别为：对照组 1（多种质量相近的不同结构）、对照组 2（不同厚度的迎爆面面板）、对照组 3（不同当量的炸药），具体分组情况见表 7。

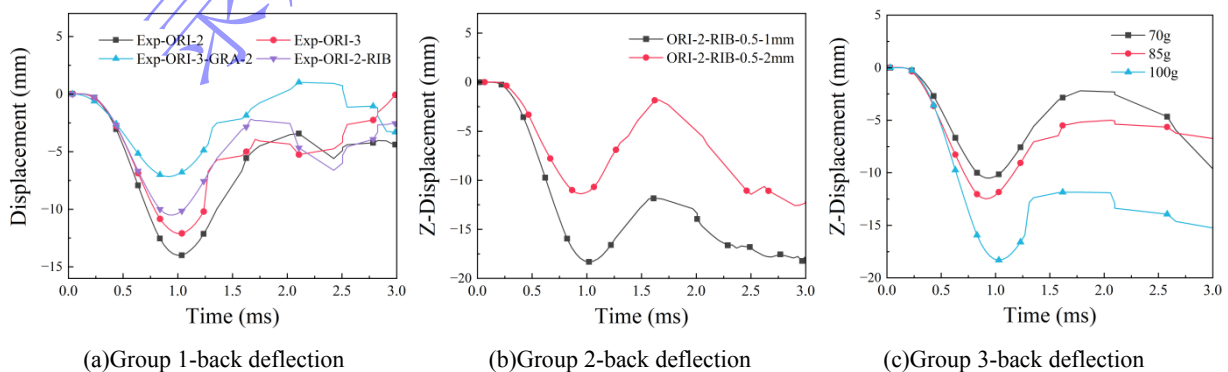
表 7 实验组对照信息

Table 7 Experimental group and control group information

组别	编号	试件名称	夹芯质量/kg	面板质量/kg	炸药当量/g	等效 TNT 当量/g
对照组 1	A-4	ORI-2	0.55	0.9	70	49
	A-6	ORI-3	0.65	0.9	70	49
	A-5	ORI-3-GRA-1	0.75	0.9	70	49
	A-3	ORI-3-GRA-2	0.75	0.9	70	49
	A-1	ORI-2-RIB	0.65	0.9	70	49
对照组 2	A-2	ORI-2-RIB	0.65	1	100	70
	A-10	ORI-2-RIB	0.65	2	100	70
	A-1	ORI-2-RIB	0.65	1	70	49
对照组 3	A-8	ORI-2-RIB	0.65	1	85	59.5
	A-2	ORI-2-RIB	0.65	1	100	70

5.2.1 夹芯层结构类型的影响(对照组 1)

为了深入探究夹芯层胞元不同布局对整体结构抗爆性能的影响，表 7 中的对照组 1 设计了五种不同芯层的夹芯板，并在相同炸药当量条件下对其抗爆性能进行了对比分析。实验结果显示，在相同的炸药当量和距离条件下，对四种不同结构的背板中心点挠度曲线进行了采集。如图 8(a)所示。所有夹层结构均表现出反弹现象，在变形过程中产生了与爆炸波方向相反的位移。特别是 ORI-3 和 ORI-3-GRA-2 结构，均产生了超过原始位置的负位移，即面板向冲击的反方向膨出。图 8(a)中四种夹芯板的背板挠度曲线从上到下依次为 ORI-3-GRA-2、ORI-2-RIB、ORI-3 和 ORI-2，这表明增加层数、采用梯度设计以及加肋设计均能显著提升夹芯板的整体抗爆性能。如图 8(d)所示，无论是二层还是三层芯层结构，均匀的折纸结构夹芯均表现出较大的压缩变形。二层和三层折纸结构的每层均受到较大程度的压缩。每种折纸结构两侧的压缩变形均大于中间部分，这是由于夹芯两侧上下均设置了刚性夹具所致。梯度设计的三层折纸结构顶层的压缩较为显著，而靠近背板的两层压缩程度相对较小。这是由于梯度设计的顶层高度较低，相对密度也较低，在受到爆炸冲击时迅速压缩密实，为夹芯层结构提供了更大的刚度，从而有效减少了整个夹芯板的变形。



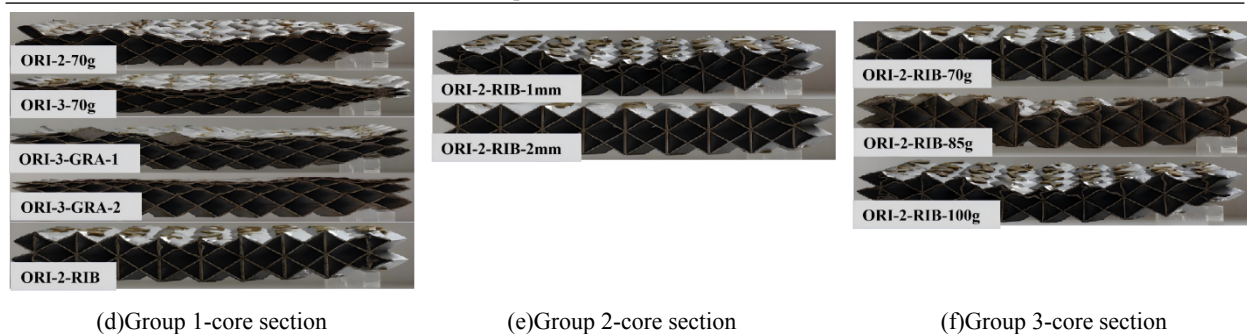


图 8 不同实验组下背板挠度曲线与夹芯剖面图

Fig.8 Back-plate deflection curves and core section views for different test groups

5.2.2 面板厚度的影响(对照组 2)

为了探究面板厚度对整体抗爆性能的影响, 分别采用 1 mm 和 2 mm 厚度面板的夹芯板, 在相同芯层结构和实验条件下开展实验研究, 如表 7 对照组 2 所示。如图 8(b)所示, 2 mm 面板相对于 1 mm 面板的夹芯板, 整体抗爆性能有显著提升, 背板最大挠度减小了 38.9%。且从图 8(e)可以看出, 采用 2 mm 面板的夹芯层变形轻微, 底层的竖向肋产生了不严重的弯曲; 而采用 1 mm 厚度面板的上层加肋夹芯已经形成了一定程度的压缩, 竖向肋也产生了严重的弯曲变形。因此, 提高面板厚度可以显著减少背板挠度, 但加厚面板则意味着重量提升, 且会减弱夹芯层折纸结构通过自身压缩吸能从而减少变形的效果。

5.2.3 当量变化的影响(对照组 3)

为了探究炸药当量的变化对夹芯板的影响, 分别采用不同当量的炸药在相同距离下引爆, 探究夹芯板的变形模式。实验结果数据如表 7 对照组 3 所示。可以从图 8(c)和图 8(f)中看到, 相比于 70g 炸药的顶部轻微凹陷变形, 采用 85g 炸药的实验组夹芯产生了更为明显的球型凹陷, 且顶层肋发生了更为严重的屈曲变形, 但整体结构完整, 位移较小; 但当采用 100g 乳化炸药时, 背板最大挠度增大了 50%, 芯层也产生了明显的压缩破坏。由此可见, 随着炸药当量的增大, 夹芯层变形程度增大。

5.3 变形/失效模式

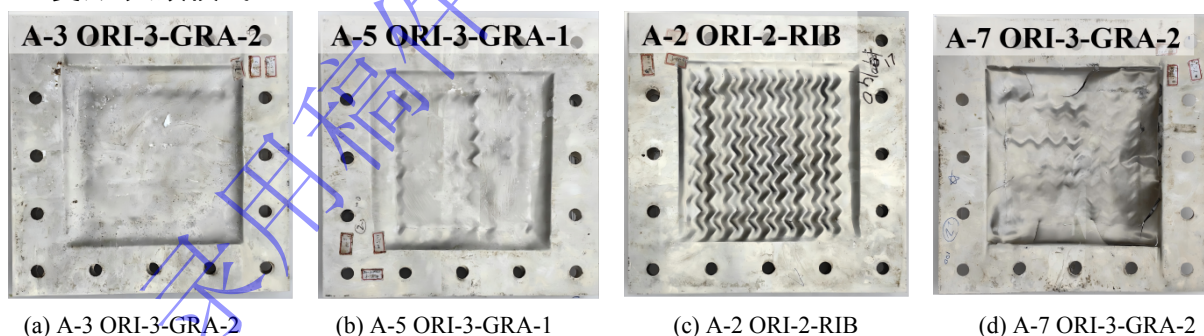


图 9 迎爆面面板变形模式

Fig.9 Deformation modes of the blast-facing panel

5.3.1 面板变形/失效

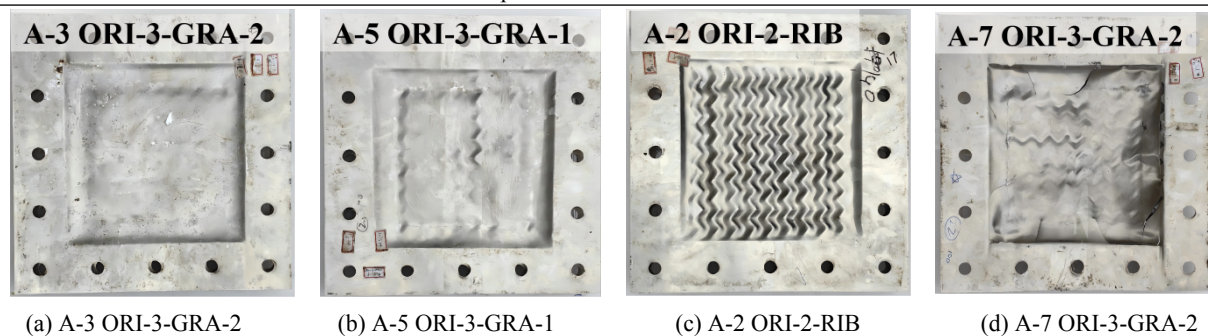


图 9 展示了多种面板变形与破坏形式。试样 A-3 和 A-5 采用梯度夹芯板，靠近炸药一侧的顶部角度较大。这些面板主要表现为沿夹具边缘向下的凹陷，同时面板与夹芯整体发生压缩(G-D)，并未形成显著的压痕（如图 9(a)、(b)虚线所示）。试样 A-2 为加肋夹芯结构，其夹芯层的刚度显著提升，并使用了 100 g 炸药。在冲击过程中，面板因夹芯层的顶部支撑而产生变形，形成了与夹芯层纹理相一致的压痕，这种变形模式被称为压痕变形（I），如图 9(c)所示。导致这种现象主要是因为面板刚度高于折纸夹芯，加入竖向肋后，夹芯刚度大大增加，在冲击到达时，致使夹芯层发生变形所需的力提升，面板率先发生变形，而更高的刚度阻止芯层变形，因此在面板上留下了压痕。试样 A-7 的夹芯结构与 A-3 相同，但使用了 100 g 炸药。面板所受压力超出极限，导致了剪切破坏（T），如图 9(d)虚线框内所示，破坏主要集中在夹具与面板接触的区域。

5.3.2 夹芯层变形/失效

图 10 展示了折纸夹芯在不同工况下的几种变形模式。对于 ORI-2 和 ORI-3 夹芯结构在与面板接触处发生了显著的塑性压缩变形，主要表现为迎爆面球形压缩。这是由于当面板受爆炸冲击变形时，夹芯层因胞元层高较大而有充足空间发生形变，冲击到达表面后，推动迎爆面向下位移，从而形成了以迎爆面板中心为圆心的球形压缩痕迹。这是由于两侧夹具位置在整个结构中起固定作用，在承受爆炸冲击时，夹芯两侧会承受整个夹芯结构向下位移的力，两侧产生塑性铰，从而导致变形程度增大。而竖向肋的加入（ORI-3-GRA-1-RIB 和 ORI-2-RIB），极大地缓解了这一现象。由于垂直肋的加入，爆炸冲击下不仅导致了 Miura 折纸结构的压缩变形，还导致了肋的弯曲变形。而加入竖向肋会极大地提高结构刚度，由此整体变形程度均明显减小。对于三层梯度加肋夹芯，由于顶层折纸结构相比于下层拥有更大的折叠角度，缺乏变形空间，在承受爆炸冲击时肋承受了较大压力，导致了断裂的发生。对于梯度折纸夹芯（ORI-3-GRA-2），其变形特征为迎爆面的均匀压缩变形。这是由于梯度设计的 Miura 折纸夹芯从上至下呈现由低到高的刚度，这导致结构在承受爆炸荷载时迎爆层由于较小的刚度被引导率先均匀变形，直到压实下层才开始发生变形。两侧夹紧区域则因夹具碰撞产生塑性铰，从而产生了较其他区域更明显的压缩变形，如图 10 中蓝色圈中部分。

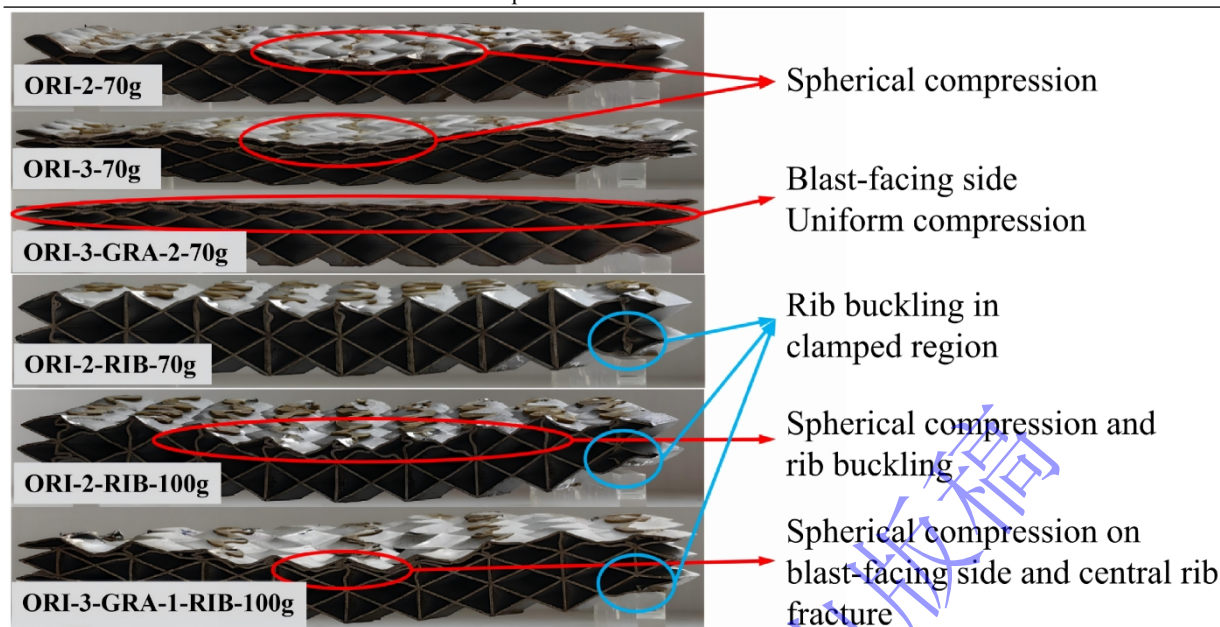


图 10 Miura 折纸夹芯变形模式

Fig.10 Deformation modes of the Miura-ori core

5.3.3 背板变形/失效

图 11 展示了夹芯板背板的破坏模式。试样 A-3 的夹芯层采用梯度设计，芯层胞元每层高度分别为 8、10、12 mm，其背板的残余挠度较小，仅为 3.904 mm 的轻微变形，结合该结构的夹芯层变形情况，这是因为梯度设计的 Miura 折纸夹芯结构在承受爆炸冲击时逐级变形，吸收了大部分冲击能量，从而减少了最后的背板变形程度。相比之下，试样 A-2 和 A-9 由于夹芯结构和冲击能量的不同，其背板沿垫块边缘出现了压痕变形（I），而背板的中心区域则保持相对平整，这是因为在承受爆炸冲击后，背板与夹芯发生了脱粘，在结构到达塑性变形极限后，背板仍向下位移了一段距离。试样 A-7 则因受到的冲击超出其承受能力，背板发生了剪切破坏（T），这种破坏主要集中在背板与垫块接触的边缘区域。

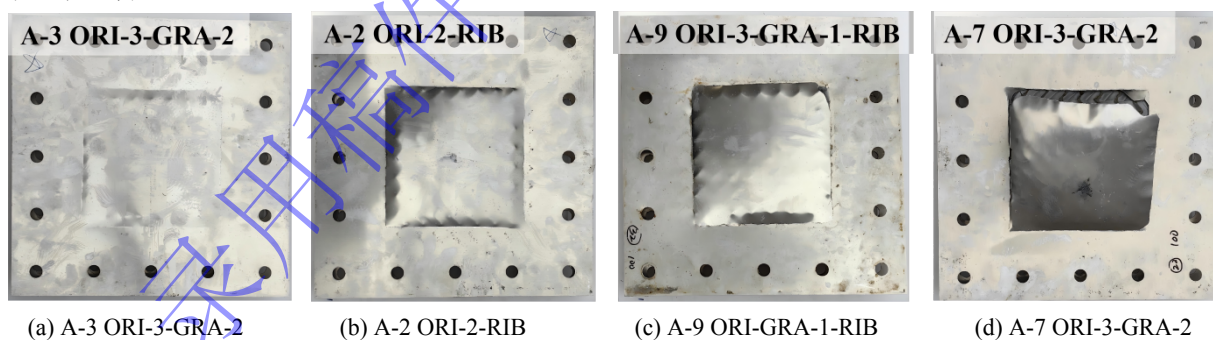


图 11 背板变形模式

Fig.11 Deformation modes of the back face sheet

6 结论

本研究利用弹道冲击摆锤实验系统，针对 Miura 折纸夹芯板开展了准静态压缩实验及爆炸载荷下的动态力学响应测试。全文实验体系遵循“准静态揭示机制、筛选构型到爆炸验证应用性能”的递进逻辑：准静态压缩实验以可控、低成本的方式系统获取不同芯层构型的本征力学性能，为构型筛选与优化提供依据；爆炸实验则作为目标工况，验证所设计夹芯板在真实爆炸载荷下的抗爆性能。两

类实验的变形模式在机制上相通,均以塑性坍塌为主要吸能方式——准静态下芯层表现为整体均匀坍塌、逐层致密,爆炸下则表现为迎爆面局部压缩、沿厚度方向渐进变形。主要结论如下:

加肋设计显著提升结构力学性能:竖向肋使三层折纸夹芯板(ORI-3)的平均压溃力、峰值载荷、比吸能分别提升417%、867%、257%。其强化机制源于肋对竖向变形的约束及诱导的应力重分布,竖向肋较未加肋结构额外贡献的吸能占总变形能的77.8%。竖向加肋结构显著降低背板残余挠度(降幅约57.9%),通过局部刚度增强抑制夹芯剪切屈曲;但整体刚度提升引发应力集中,导致背板局部压痕,变形模式由均匀压缩转为局部屈曲主导。

梯度构型(ORI-3-GRA)通过非均匀分布有效改善结构能量吸收特性,较均匀ORI-3结构实现峰值载荷的降低(-7.9%),而平均压溃力(+5.7%)和比吸能(+1.4%)同步提升,验证了非均匀刚度分布对塑性变形路径的调制作用,为多层级抗冲击结构设计提供理论依据。梯度设计较均匀配置降低背板残余挠度约37.7%,其变模显示:爆炸载荷下梯度结构呈现逐级屈曲的渐进失稳模式——迎爆面先均匀压缩,随后沿厚度方向依次触发局部屈曲,形成多级能量耗散路径。梯度设计在维持结构整体刚度的同时,显著增强了能量耗散能力,为新型抗爆防护结构的工程应用提供了关键理论支撑。

参考文献

- [1] GOEL M D, MATSAGAR V A. Blast-resistant design of structures[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2014, 19(2): 04014007. DOI: 10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000188.
- [2] JING L. Compressive strain rate dependence and constitutive modeling of closed-cell aluminum foams with various relative densities[J]. Journal of Materials Science, 2018, 53: 14739-14757. DOI: 10.1007/s10853-018-2663-z.
- [3] MA Q, REJAB M, SIREGAR J, et al. A review of the recent trends on core structures and impact response of sandwich panels[J]. Journal of Composite Materials, 2021, 55(18): 2513-2555. DOI: 10.1177/0021998321990734.
- [4] ALPHONSE M, BUPESH RAJA V K, GOPALA KRISHNA V, et al. Mechanical behavior of sandwich structures with varying core material – a review[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 44: 3751-3759. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.11.722.
- [5] JING L, WANG Z, SHIM VP, et al. An experimental study of the dynamic response of cylindrical sandwich shells with metallic foam cores subjected to blast loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 71: 60-72. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.03.009.
- [6] ZHU F, WANG Z, LU G, et al. Some theoretical considerations on the dynamic response of sandwich structures under impulsive loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010, 37(6): 625-637. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2009.11.003.
- [7] JING L, WANG Z, ZHAO L. The dynamic response of sandwich panels with cellular metal cores to localized impulsive loading[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 94: 52-63. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.03.035.
- [8] 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: 106531. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2023.106531.
- [9] LI S, LI X, WANG Z, et al. Finite element analysis of sandwich panels with stepwise graded aluminum honeycomb cores under blast loading[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 80: 1-12. DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.09.025.
- [10] LI S, LI X, WANG Z, et al. Sandwich panels with layered graded aluminum honeycomb cores under blast loading[J]. Composite Structures, 2017, 173: 242-254. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.04.037.
- [11] KUMAR R, PATEL S. Failure analysis on octagonal honeycomb sandwich panel under air blast loading[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 9667-9672. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.07.525.
- [12] QIN Q, ZHANG W, LIU S, et al. On dynamic response of corrugated sandwich beams with metal foam-filled folded plate

- core subjected to low-velocity impact[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, 114: 107-116. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.08.015.
- [13] CHENG Y, LIU M, ZHANG P, et al. The effects of foam filling on the dynamic response of metallic corrugated core sandwich panel under air blast loading – experimental investigations[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 145: 378-388. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.07.030.
- [14] LV W, LI D, DONG L. Study on blast resistance of a composite sandwich panel with isotropic foam core with negative Poisson's ratio[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 191: 106105. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.106105.
- [15] ZHOU X, JING L. Deflection analysis of clamped square sandwich panels with layered-gradient foam cores under blast loading[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 157: 107141. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107141.
- [16] SANTOSA S P, ARIFURRAHMAN F, IZZUDIN M H, et al. Response analysis of blast impact loading of metal-foam sandwich panels[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 173: 495-502. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.12.073.
- [17] MA X, LI X, LI S, et al. Blast response of gradient honeycomb sandwich panels with basalt fiber metal laminates as skins[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 123: 126-139. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2018.10.003.
- [18] LI X, ZHANG P, WANG Z, et al. Dynamic behavior of aluminum honeycomb sandwich panels under air blast: experiment and numerical analysis[J]. *Composite Structures*, 2014, 108: 1001-1008. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.10.034.
- [19] ZHANG P, CHENG Y, LIU J, et al. Experimental and numerical investigations on laser-welded corrugated-core sandwich panels subjected to air blast loading[J]. *Marine Structures*, 2015, 40: 225-246. DOI: 10.1016/j.marstruc.2014.11.007.
- [20] SUN G, WANG E, ZHANG J, et al. Experimental study on the dynamic responses of foam sandwich panels with different facesheets and core gradients subjected to blast impulse[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 135: 103327. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103327.
- [21] JIN X, WANG Z, NING J, et al. Dynamic response of sandwich structures with graded auxetic honeycomb cores under blast loading[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 106: 206-217. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.09.037.
- [22] SILVERBERG J L, EVANS A A, MCLEOD L, et al. Using origami design principles to fold reprogrammable mechanical metamaterials[J]. *Science*, 2014, 345: 647-650. DOI: 10.1126/science.1252876.
- [23] MA J, SONG J, CHEN Y. An origami-inspired structure with graded stiffness[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 136: 134-142. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2017.12.026.
- [24] YASUDA H, YANG J. Reentrant origami-based metamaterials with negative Poisson's ratio and bistability[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114: 185502. DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.185502.
- [25] BOATTI E, VASIOS N, BERTOLDI K. Origami metamaterials for tunable thermal expansion[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29: 1700360. DOI: 10.1002/adma.201700360.
- [26] LI Y, YOU Z. Multi-corrugated indented foldcore sandwich panel for energy absorption[C]// 39th Mechanisms and Robotics Conference. Boston, Massachusetts, USA: American Society of Mechanical Engineers, 2015: V05BT08A049. DOI: 10.1115/DETC2015-47269.
- [27] ZHANG P, LI X, WANG Z, et al. Dynamic blast loading response of sandwich beam with origami-inspired core[J]. *Results in Physics*, 2018, 10: 946-955. DOI: 10.1016/j.rinp.2018.07.043.
- [28] ZHANG J, KARAGIOZOVA D, YOU Z, et al. Quasi-static large deformation compressive behaviour of origami-based metamaterials[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 153: 194-207. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.01.044.
- [29] LV Y, ZHANG Y, GONG N, et al. On the out-of-plane compression of a Miura-ori patterned sheet[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 161-162: 105022. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2019.105022.
- [30] E Y, YANG G, ZHU X, et al. Experimental study on the flat-wise compression of foldcore sandwich paperboard[J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 181: 110017. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110017.
- [31] LIU S, LU G, CHEN Y, et al. Deformation of the Miura-ori patterned sheet[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2015, 99: 130-142. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2015.05.009.

- [32] RICHARDSON M O W, WISHEART M J. Review of low-velocity impact properties of composite materials[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1996, 27(12): 1123-1131. DOI: 10.1016/1359-835X(96)00074-7.
- [33] TILBROOK M T, DESHPANDE V S, FLECK N A. The impulsive response of sandwich beams: analytical and numerical investigation of regimes of behaviour[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2006, 54: 2242-2280. DOI: 10.1016/j.jmps.2006.07.001.
- [34] MCSHANE G J, DESHPANDE V S, FLECK N A. The underwater blast resistance of metallic sandwich beams with prismatic lattice cores[J]. Journal of Applied Mechanics, 2007, 74: 352-364. DOI: 10.1115/1.2198549.
- [35] HAYHURST D R, HUTCHINSON J W, MCMEEKING R M, et al. The response of metallic sandwich panels to water blast[J]. Journal of Applied Mechanics, 2007, 74: 81-99. DOI: 10.1115/1.2178837.
- [36] DU Y, KELLER T, ZHU Y, et al. Mechanical behavior and failure of carbon fiber-reinforced composite sandwich structure inspired by curved-crease origami[J]. Composite Structures, 2023, 316: 117033. DOI: 10.1016/j.compstruct.2023.117033.
- [37] XIANG X M, YOU Z, LU G. Rectangular sandwich plates with Miura-ori folded core under quasi-static loadings[J]. Composite Structures, 2018, 195: 359-374. DOI: 10.1016/j.compstruct.2018.04.084.
- [38] XIANG X M, LU G, RUAN D, et al. Large deformation of an arc-Miura structure under quasi-static load[J]. Composite Structures, 2017, 182: 209-222. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.09.023.
- [39] XIANG X, FU Z, ZHANG S, et al. The mechanical characteristics of graded Miura-ori metamaterials[J]. Materials & Design, 2021, 211: 110173. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.110173.
- [40] XIANG X M, LU G, YOU Z. Energy absorption of origami inspired structures and materials[J]. Thin-Walled Structures, 2020, 157: 107130. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107130.
- [41] HEIMBS S, CICHOSZ J, KLAUS M, et al. Sandwich structures with textile-reinforced composite foldcores under impact loads[J]. Composite Structures, 2010, 92: 1485-1497. DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.11.001.
- [42] BASILY B B, ELSAYED E A. Dynamic axial crushing of multilayer core structures of folded Chevron patterns[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2004, 21(1-3): 169-185. DOI: 10.1504/IJMP.2004.004750.
- [43] ZHANG J, LU G, ZHANG Y, et al. A study on ballistic performance of origami sandwich panels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 156: 103925. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2021.103925.
- [44] HARRIS J A, MCSHANE G J. Impact response of metallic stacked origami cellular materials[J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 147: 103730. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2020.103730.
- [45] KSHAD M A E, POPINIGIS C, NAGUIB H E. 3D printing of Ron-Resch-like origami cores for compression and impact load damping[J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28: 015027. DOI: 10.1088/1361-665X/aaec40.
- [46] DHARMASENA K P, WADLEY H N G, WILLIAMS K, et al. Response of metallic pyramidal lattice core sandwich panels to high intensity impulsive loading in air[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38: 275-289. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.10.002.
- [47] RIMOLI J J, TALAMINI B, WETZEL J J, et al. Wet-sand impulse loading of metallic plates and corrugated core sandwich panels[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38: 837-848. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2011.05.010.
- [48] XIANG Y, WANG M, YU T, et al. Key performance indicators of tubes and foam-filled tubes used as energy absorbers[J]. International Journal of Applied Mechanics, 2015, 7: 1550060. DOI: 10.1142/S175882511550060X.
- [49] 符祖书. 基于 Miura-ori 梯度结构的力学性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2022.
- [50] LI X, WANG Z, ZHU F, et al. Response of aluminium corrugated sandwich panels under air blast loadings: experiment and numerical simulation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 65: 79-88. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.11.002.
- [51] 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: 937-951. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.11.003.

[52] 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 L, WANG Z H, ZHAO L M. Measurement of impulse acted on a structure subjected to blast loading[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009, 24(2): 151-156.

录用稿件，
非最终出版稿