

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0156

高速冲击载荷下梯度金属泡沫夹芯梁的动态响应与失效*

魏建辉¹, 李旭¹, 黄威², 徐宏建^{2,3}, 方搏鹏²

(1. 武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430061;

2. 华中科技大学船舶与海洋工程学院, 湖北 武汉 430074;

3. 天津航海仪器研究所, 天津 300131)

摘要: 采用泡沫弹冲击加载实验对梯度金属泡沫夹芯梁结构开展了不同冲击强度下的动态响应和失效研究, 分析了由三种不同密度泡沫铝组成的等面密度的五种不同梯度的夹芯结构在夹支边界条件下的抗高速冲击性能, 结合三点弯曲实验, 研究梯度效应对夹芯结构抗冲击性能的影响。研究表明: 密度梯度对结构的失效过程和失效模式有着明显的影响, 且夹芯梁结构的初始失效模式对结构整体响应和主要的能量吸收机制起着主导作用; 当冲击条件不足以使得均质芯材发生压缩时, 均质及负梯度夹芯结构初始失效模式为整体弯曲变形, 低强度芯层位于前两层的梯度结构随着冲击强度的变化出现不同程度的局部芯层压缩; 当冲击强度较低时, 梯度结构通过丰富的局部失效表现出明显优于均质结构的抗冲击变形能力; 当冲击强度大于临界值时, 均质结构具有更好的抗冲击变形能力。通过合理地设计密度梯度实现逐层压缩吸能, 能够有效的提升防护结构的抗冲击性能。

关键词: 梯度夹芯结构; 抗冲击性能; 动态响应; 失效模式

中图分类号: O382; O347.3

国标学科代码: 13035; 13015

文献标志码: A

Dynamic response and failure of sandwich beams with graded metal foam core under high-velocity impact

WEI Jianhui¹, LI Xu¹, HUANG Wei², XU Hongjian^{2,3}, FANG Bopeng²

(1. Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430061, Hubei, China;

2. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China;

3. Tianjin Navigation Instrument Research Institute, Tianjin 300131, China)

Abstract: The dynamic response and failure of sandwich beams with gradient metal foam core subjected to high-velocity impact are studied experimentally. The impact resistance of five sandwich beams with different density gradient arrangements but the same surface density composed of three aluminum foams with different densities is analyzed. All the sandwich beams are simply-clamped. Combined with the quasi-static three-point bending tests, the impact resistance of the gradient sandwich beams is evaluated in terms of dynamic deformation and failure modes by considering the effects of core density gradient and impulsive intensity. The results show that the density gradient effect significantly influences the dynamic response and failure mode. The initial failure mode plays an important role in the structural response and the predominant energy absorption mechanism. Since the impact condition can not produce the local compression of the medium-density core, the initial failure

* 收稿日期: 2022-04-16; 修回日期: 2022-06-06

基金项目: 国家自然科学基金(12272147; 11802100)

第一作者: 魏建辉(1986—), 男, 博士, 高级工程师, weijh@163.com

通信作者: 黄威(1987—), 男, 博士, 副教授, weihuang@hust.edu.cn

mode of the uniform and negative gradient sandwich structures is the overall bending deformation, while the local core compression is the initial failure mode of the other structures with weak cores located in the first two layers. When the impulsive intensity is low, the gradient sandwich beam has superior impact resistance to the uniform counterpart. With increasing intensity, once a critical intensity is exceeded, the gradient sandwich beam shows low bending resistance to the uniform counterpart. Therefore, the optimal design of the core density gradient can efficiently improve the impact resistance of the sandwich beams under the high-velocity impact, which is a valuable reference for engineering applications.

Keywords: sandwich beam with gradient metal foam core; impact resistance; dynamic response; failure mode

具有结构轻量化与功能一体化特点的功能梯度夹芯结构近年来凭借其优异的力学性能和能量吸收特性,作为一种新型的抗爆炸冲击吸能材料在航空航天、水陆交通等领域获得了广泛的关注^[1-4]。多孔金属泡沫材料可以通过较大的塑性变形吸收较多的能量,继而成为广泛应用的抗冲击吸能材料^[5]。通过对金属泡沫进行密度梯度设计得到的拥有仿生特性的功能梯度夹芯结构显示出了明显优于其等质量均质泡沫芯材的夹芯结构的性能^[6-7],显示出了巨大的工程应用前景。

目前对多孔金属泡沫材料不同应变率加载下的能量吸收机理已经有了较为全面的认知^[1,8],Deshpande 等^[9]和 Daniel 等^[10]分别建立了各向同性和考虑了应变率效应的多孔材料唯像本构模型。针对大量不同金属泡沫夹芯结构在爆炸、侵彻、高速撞击等强动载以及低速撞击等载荷条件下结构响应和失效机理的研究表明,以金属泡沫为芯层的夹芯结构具有优于金属蜂窝、波纹、点阵等夹芯结构的抗冲击吸能特性^[6,11],并且可以通过泡沫芯层的强度设计获得更优异的抗爆炸冲击性能^[12]。基于此,近年来学者们通过采用密度梯度的分层夹芯结构来进一步开展抗冲击防护结构的轻量化设计^[13]。通过落锤试验机开展的低速冲击实验,Jing 等^[14]指出梯度设计使得夹芯结构的抗弯曲能力下降进而性能不如均质结构,而 Zhang 等^[15]则指出固支的负梯度夹芯结构具有更好的抗低速冲击性能。在强动载作用下,苏兴亚等^[16]指出均质芯层夹芯板的抗冲击性能优于所有分层梯度夹芯板,与 Zhou 等^[17]获取的结论一致。但是,Wang 等^[6]却得到了不一致的结论,即负梯度结构具有更好的抗爆炸性能,且这种优异性随着梯度的增加而愈加明显。由此可知,受到不同加载条件、边界条件、密度梯度等因素的影响,目前针对分层密度梯度结构在冲击载荷作用下的抗冲击性能研究仍不够完善。

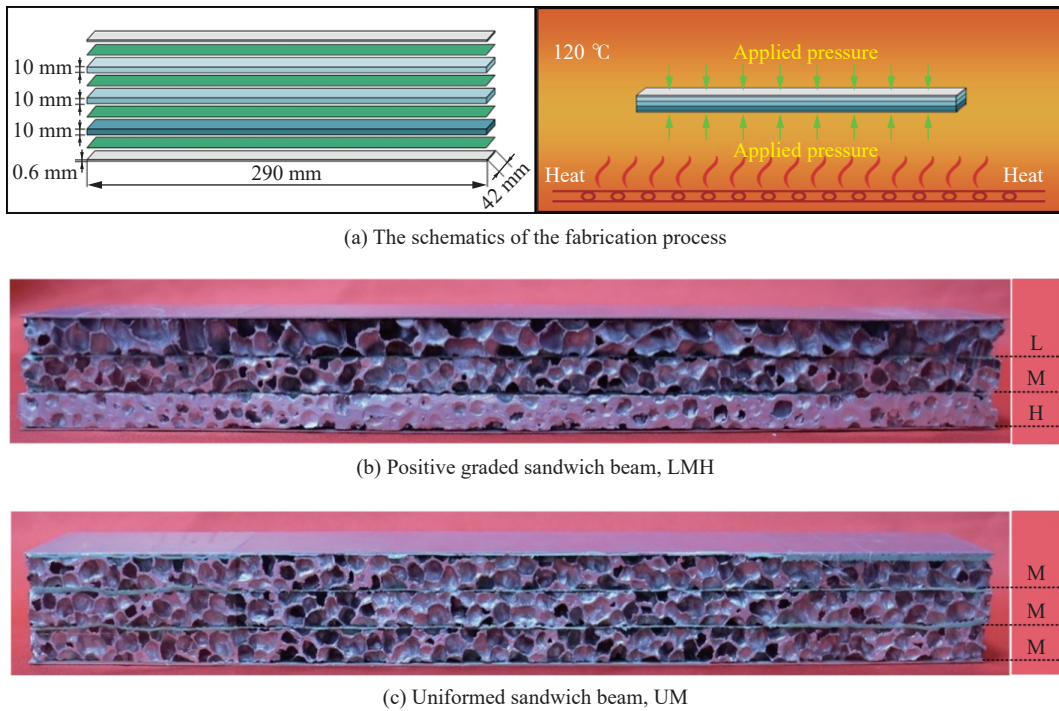
为了探究芯层梯度效应对夹芯结构抗冲击性能的影响规律,本文利用一级轻气炮加载系统和高速相机,采用具有不同速度的金属泡沫弹体对由三种不同密度结构组成的分层密度梯度夹芯梁结构进行冲击加载,对比分析夹支边界条件下五种等面密度梯度夹芯梁结构的动态变形响应和失效模式,结合准静态三点弯曲实验,明确分层夹芯梁结构抗高速冲击性能的梯度效应。

1 实验方法

1.1 试件制备

泡沫梯度夹芯梁结构由 0.6 mm 厚的 2A12 铝合金上下面板以及三层 10 mm 等厚度的泡沫铝组成。用环氧树脂胶膜将夹芯结构进行逐层胶结,预压后放置于 120 °C 保温箱中保温 1.5 h,得到实验所需泡沫铝梯度夹芯梁结构,如图 1 所示。试样的长、宽、高分别为 290 mm×42 mm×32 mm。

本文采用 3 种不同密度的金属泡沫铝,组成 5 种不同密度梯度的夹芯结构。泡沫铝材料的三种不同密度分别是 0.28 g/cm³(low density, L)、0.42 g/cm³(medium density, M)、0.56 g/cm³(high density, H),对应的屈服强度分别为 4.03、9.46、15.45 MPa,压实应变分别为 0.47、0.50、0.54。五种密度梯度结构均具有相同的单位面积质量,6.97 kg/m²。如图 1(b) 和图 1(c) 所示,结构形式根据不同密度泡沫芯层的分布位置分别为:均匀芯层结构(UM)、正梯度芯层结构(LMH)、负梯度芯层结构(HML)、半正梯度芯层结构(MLH)、半负梯度芯层结构(MHL)。



(a) The schematics of the fabrication process

(b) Positive graded sandwich beam, LMH

(c) Uniformed sandwich beam, UM

图 1 金属泡沫梯度夹芯梁结构

Fig. 1 Gradient metal foam sandwich beam

1.2 实验设备

针对梯度泡沫夹芯梁结构分别开展了准静态的三点弯曲实验和泡沫弹高速冲击实验。三点弯曲准静态实验在材料试验机上进行, 加载速度为 2 mm/min, 有效跨距与高速冲击实验相同, 均为 150 mm。高速冲击加载实验装置见图 2, 夹芯梁结构以两端夹支的状态固定于防护靶舱中, 确保其在冲击载荷作用下能够纵向滑动, 进而达到模拟大型结构变形的边界约束条件。

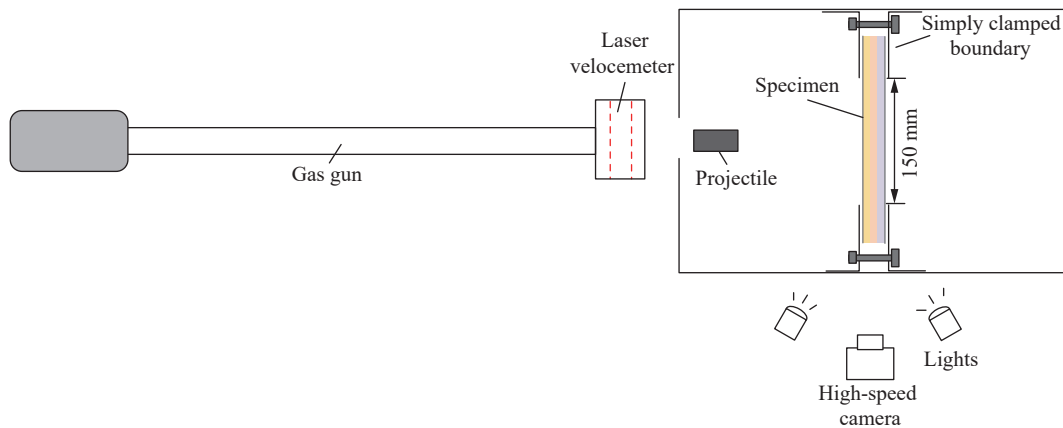


图 2 泡沫梯度夹芯梁结构高速冲击加载实验装置示意图

Fig. 2 Experimental setup for the graded foam sandwich beams

由一级轻气炮发射 $\varnothing 39.6 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$, 密度为 0.40 g/cm^3 的金属泡沫弹以不同速度高速撞击夹芯梁结构实现模拟空气爆炸的作用工况^[18]。本文针对不同密度梯度的夹芯结构分别开展低、中、高三种不同速度的冲击实验, 初始冲击速度在 157.0 到 266.3 m/s 之间, 对应的初始动量 $I_0 = m_0 v_0$ 在 3.30~3.76 N·s 之间, 其中 m_0 为泡沫弹初始质量, v_0 为泡沫弹的初始速度。为了获取结构动态响应和失效过程, 高速照相机(SA-Z)被正对夹芯梁结构放置。高速相机采样频率为 $100\,000 \text{ s}^{-1}$, 像素大小为 640×280 。

2 实验结果与分析

2.1 三点弯曲实验结果与分析

图 3 展现了三种典型金属泡沫梯度夹芯梁结构在三点弯曲加载下的失效过程和失效模式。结合图 4 所示的对应的载荷-位移关系曲线可知, 在相同的单位面积质量下, 密度梯度的分布对结构失效过程和失效模式有着明显的影响, 继而影响梯度结构的能量耗散机制。不同梯度结构载荷-位移曲线上的骤降点均对应着结构新失效模式的出现和演化。在较低的面-芯界面强度下, 结构前面板受载点处的局部压缩和褶皱致使面-芯脱粘失效最先发生于所有结构。随着锤头的继续下降, 在共同经历初始阶段的近似弹性上升后, 梯度差异引起的芯材初始失效的不同在载荷-位移曲线上骤然显现。均质结构 UM 在经历了轻微的芯材局部压缩和结构整体弯曲变形后, 随着载荷的增加, 泡沫材料本身缺陷和集中应力作用下使得结构在大小相同的横向剪切力作用下于简支边界形成裂纹, 使得曲线从峰值骤降。横向剪切裂纹沿厚度方向增长, 并进一步引起锤头端部裂纹的产生, 直至裂纹贯穿而使得 UM 丧失承载能力。负梯度结构 HML 由于高密度层置于前端, 在结构变形初始阶段无芯材压缩发生, 因此其载荷-位移曲线类弹性段较之 UM 明显更长。随着结构横向变形和跨中弯矩的增加, 强度最低的芯层在中心位置发生由下到上

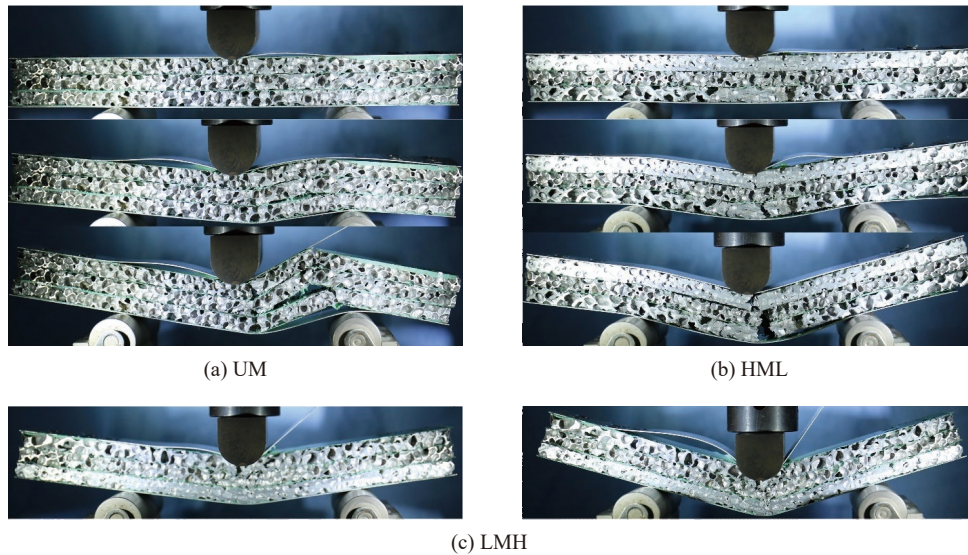


图 3 典型泡沫铝梯度夹芯梁结构三点弯曲失效过程

Fig. 3 Failure of typical gradient metal foam sandwich beams under the three-point bending

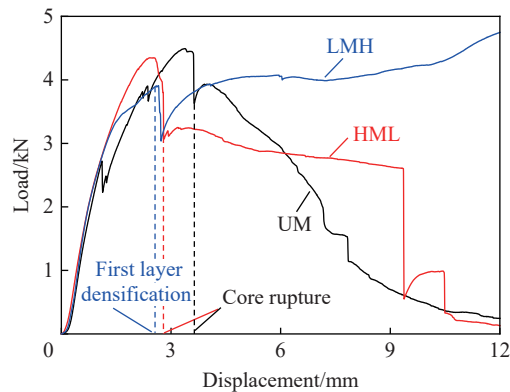


图 4 典型泡沫铝梯度夹芯梁结构三点弯曲载荷-位移关系

Fig. 4 Load-displacement curve of the typical gradient metal foam sandwich beam under the three-point bending

的断裂。裂纹由下往上衍生, 结构承载能力在最上层高密度层保持完好情况下基本保持不变, 便出现了图 4 所示的平台段。随着裂纹在最大密度层的萌生, 结构瞬间丧失承载能力。正梯度结构 LMH 则由于最上层芯材密度最低, 芯材的初始失效为芯材的局部压缩, 随着压缩量的增加, 载荷-位移曲线上升变缓, 直至第一层被完全压实。LMH 持续在中心载荷作用下发生持续的横向变形。由此可见, 在准静态三点弯曲作用下, 正梯度、均质、负梯度泡沫夹芯梁结构芯层分别发生以局部芯材压缩、横向剪切和弯曲为主导的失效。

2.2 高速冲击实验结果与分析

为了阐明边界条件对结构抗冲击性能的影响, 文献 [19] 对比了完全固支和夹支边界下均质、正梯度和负梯度夹芯梁结构的动态响应和失效, 但是针对夹支边界下结构响应的梯度效应未做详细讨论。本文在此基础上, 通过增加半正梯度 (MLH) 和半负梯度 (MHL) 泡沫夹芯梁结构, 进一步系统开展夹支边界条件下金属泡沫夹芯梁结构抗冲击性能芯材梯度效应的研究。通过泡沫铝弹高速冲击实验研究, 表 1 列出了单位面积质量相同的 5 种密度梯度夹芯梁结构在三种冲击强度下的初始实验条件和背板中点塑性变形。

表 1 金属梯度夹芯结构高速冲击实验初始条件及结果

Table 1 Experimental conditions and results of the graded metal foam sandwich beams

编号	芯层	m_0/g	$v_0/(m \cdot s^{-1})$	$I_0/(N \cdot s)$	w_0/mm	编号	芯层	m_0/g	$v_0/(m \cdot s^{-1})$	$I_0/(N \cdot s)$	w_0/mm	编号	芯层	m_0/g	$v_0/(m \cdot s^{-1})$	$I_0/(N \cdot s)$	w_0/mm
w-UM	MMM	21.00	157.0	3.30	10.89	m-UM	MMM	21.54	226.4	4.88	12.57	s-UM	MMM	19.00	266.3	5.06	9.21
w-HML	HML	21.14	160.6	3.39	5.90	m-HML	HML	19.14	234.4	4.49	25.97	s-HML	HML	19.26	261.4	5.04	26.81
w-LMH	LMH	21.83	175.9	3.84	2.58	m-LMH	LMH	22.36	229.6	5.13	52.78	s-LMH	LMH	21.47	260.8	5.60	23.46
w-MLH	MLH	19.95	179.7	3.59	7.01	m-MLH	MLH	20.44	240.0	4.91	15.50	s-MLH	MLH	21.20	261.6	5.54	31.83
w-MHL	MHL	21.29	176.4	3.76	9.22	m-MHL	MHL	22.27	233.3	5.20	20.94	s-MHL	MHL	22.69	263.5	5.98	38.53

注: (a) w_0 为塑性变形; (b) 本表中均质梯度 (UM)、正梯度 (LMH) 和负梯度 (HML) 夹芯结构数据均来自于文献 [19]。

2.2.1 动态响应与失效分析

图 5 显示了五种不同密度梯度的泡沫铝夹芯梁结构在相似的较低速度冲击下的动态响应和失效过程。在低速冲击下, 梁结构发生两侧向中心的轻微纵向滑移, 结构在冲击后仍然保持在夹支的状态。不同于准静态三点弯曲的情况, 局部冲击载荷作用下 UM 首先发生整体变形。在载荷作用区域边缘, 由于横向剪力的猛然增大, 出现横向裂纹, 并继续诱导芯材层间脱粘的大面积发生。随着持续加载和横向变形的增大, 导致夹支端横向剪切裂纹的产生。如图 5(a) 所示, UM 芯材未发生明显的局部压缩。负梯度夹芯结构由于第一层强度的增加, 在低速下发生以整体变形为主的失效, 且无明显横向剪切失效。当第一层为强度最低的正梯度结构时, 结构主要发生局部的芯材压缩和整体变形失效。相较于均质结构, 具有同样首层泡沫的 MLH 和 MHL 仍然呈现出了明显的差异。如图 5(b) 所示, MLH 强度最低的第二层泡沫层在冲击的初始时刻便发生局部的压缩, 而前后层芯材无明显压缩。结构整体响应等效于由低密度泡沫为芯层、金属板和其相连芯层为新面板的夹芯结构的响应。随着横向变形的增加, 芯层间不连续的抗弯能力使得层间脱粘的发生。与之相比, MHL 前两层较大的压缩强度使得结构在冲击初始阶段即发生整体的弯曲变形, 如图 5(c) 所示。强度最低的泡沫层厚度基本保持不变, 仅在发生较大横向弯曲变形时夹支边界造成了两端的轻微压缩和剪切失效。变形机制与 HML 基本相同。但是当冲击强度增加后, 中等密度作为第一层更易发生局部芯材压缩, 继而导致失效机制的变化。

图 6 给出了半负梯度结构 MHL 和半正梯度结构 MLH 分别在中等冲击强度和高冲击强度下的初始冲击、开始整体结构响应和持续变形的动态响应和失效过程。由图可知, 随着冲击强度的增加, MHL 中等密度的首层泡沫在冲击初始时刻发生芯材的局部压缩。在后续结构整体变形过程中, 结构弯曲变形显著增加, 继而在边界位置导致低强度芯层的局部压缩。高强度和低强度芯层厚度基本保持不变, 与低

强度冲击响应基本相同。在强冲击载荷下, MLH 的中间低强度泡沫层在冲击初始时刻即发生快速的芯材压缩直至压实。首层中密度芯层在较低背部支撑载荷下随着弱芯层的压溃和泡沫弹的冲击同时发

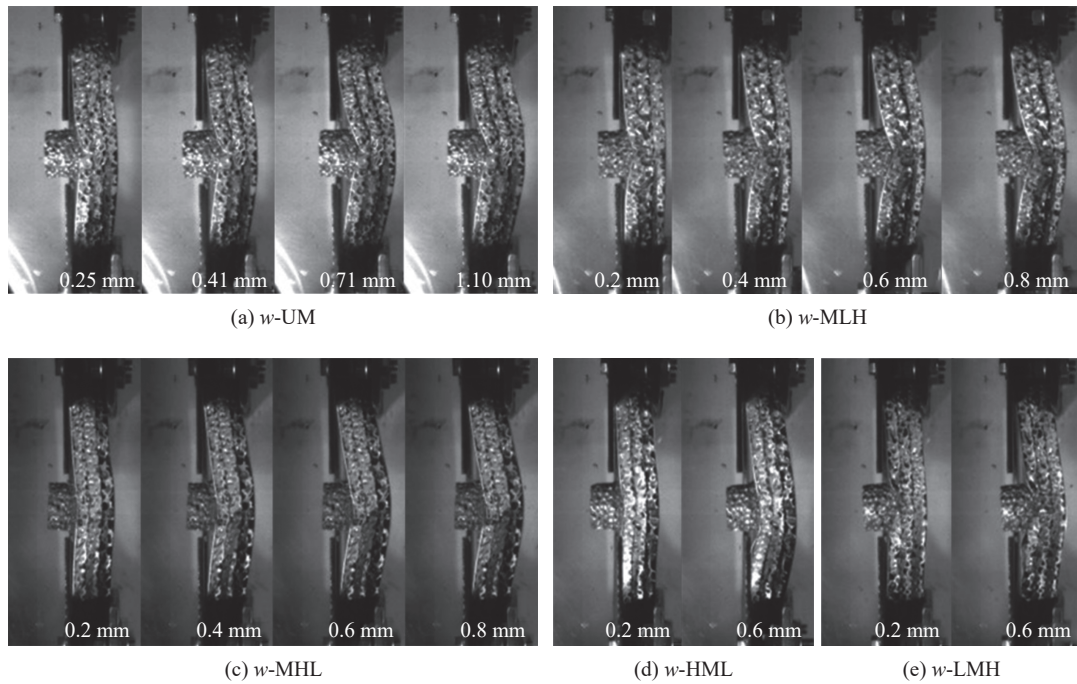


图 5 低速冲击下金属梯度夹芯梁结构动态变形与失效

Fig. 5 Dynamic deformation and failure modes of the gradient metal foam sandwich beams under the low impulsive intensity

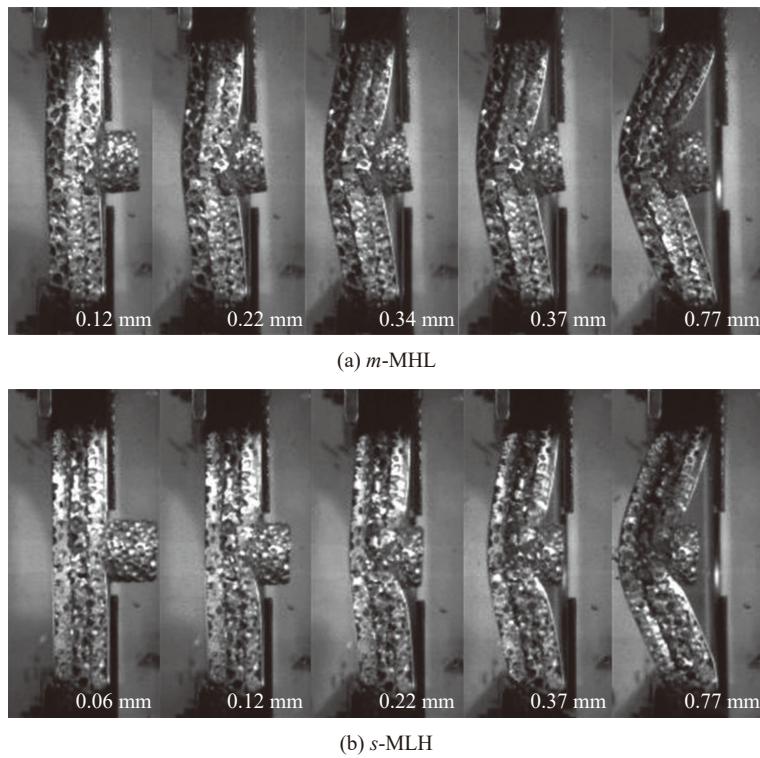


图 6 中速和高速冲击下金属梯度夹芯梁结构动态变形与失效

Fig. 6 Dynamic deformation and failure modes of the gradient metal foam sandwich beams under the medium and high impulsive intensities

生芯材压缩, 直至在整体变形过程中, 第二芯层的压实和大弯曲变形作用下发生断裂。两种梯度结构均由于芯层强度的不连续而在大弯曲变形下发生显著的层间脱粘失效。

夹芯结构背板中点的变形响应和最大变形是衡量结构抗冲击能力的一个重要指标。图 7 给出了不同梯度泡沫夹芯梁结构在三种冲击载荷作用下的中点变形响应和塑性变形大小。需要指出的是, 当冲击强度超过最低值时, 不同芯材的结构会发生明显的纵向滑移。由图 7(a) 可知, 通过低强度芯层的压缩吸能能够有效的降低背板中点的变形。当冲击强度不足以使得中等密度芯层在冲击初始发生压缩时, 梯度设计均能够有效的降低最大变形。梯度芯层通过局部压缩降低结构变形速率, 通过压缩耗能, 达到降低横向变形的效果。冲击结束后, 结构通过弹性恢复达到最终的塑性变形状态。通过图 7(b) 可知, 充分的芯层压缩是降低最大变形和塑性变形的有效机制。这种趋势随着冲击强度的增加同样有效。由图 7(c) 和图 7(d) 可知, 当中点变形约大于 20 mm 后, 结构的大弯曲变形致使结构发生纵向滑移。均质结构在冲击强度使其发生芯材压缩后, 结构的整体变形和中点变形均小于不同梯度的等面密度夹芯结构, 显示出了更好的抗冲击性能。LMH 由于首层的快速压实, 整体变形未得到明显提升。MLH 则由于双层不同强度芯层的压缩吸能, 显示出了较之其他形式梯度结构更好的抗冲击性能。MHL 由于能量的耗散以结构变形为主, 在不同冲击强度下, 其横向变形均呈现为较大数值, 无法提供较好的抗冲击性能。由此可见, 通过合理的密度梯度设计, 在预计的冲击强度范围内, 通过不同芯层在不同冲击强度下的逐层压缩吸能, 能够有效地提升防护结构的抗冲击变形能力。

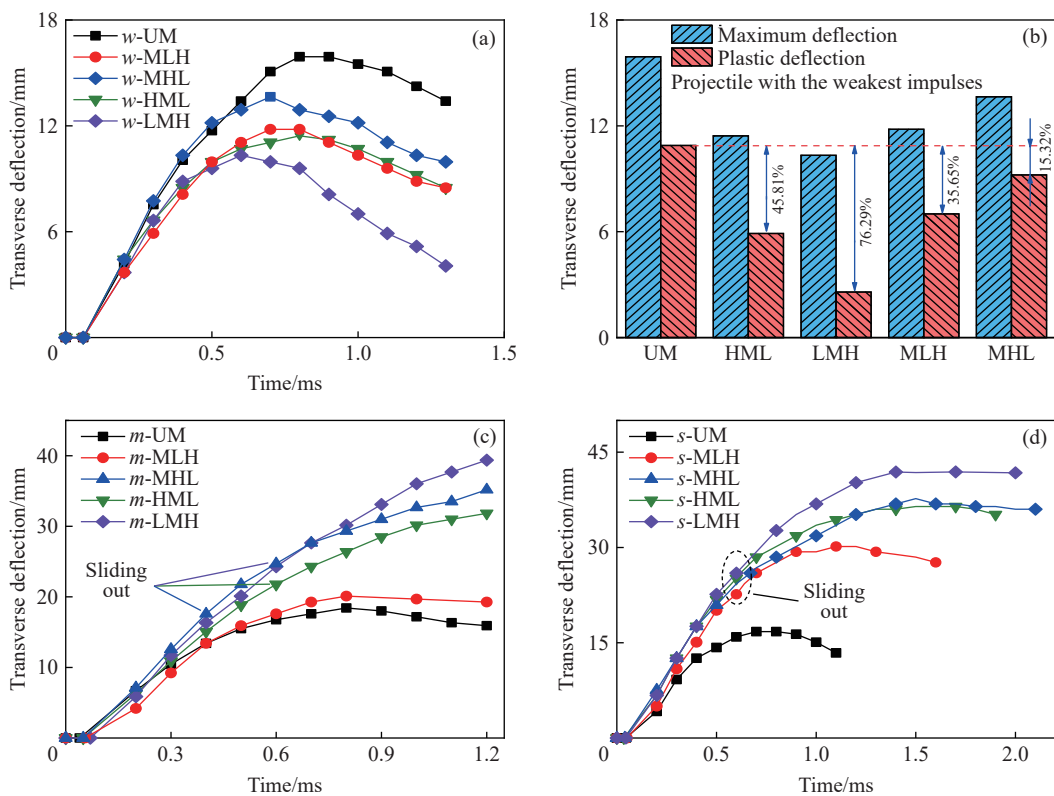


图 7 不同冲击速度下梯度夹芯梁结构背板中点动态响应和变形

Fig. 7 Central dynamic response and deformation of the gradient metal foam sandwich beams under the impulsive loads

2.2.2 变形与失效模式分析

图 8 给出了均质中等密度泡沫夹芯梁结构在低速冲击加载下的失效模式。如前所述, 由于低强度冲击不会使中等密度芯层发生压缩, 该均质夹芯结构整体为横向弯曲变形以及对应的芯层失效和面板变形。由图 8 可知, 夹芯结构前后面板在冲击载荷下受弯曲和纵向拉伸作用发生塑性变形, 并在前面板

形成轻微褶皱。当芯层不发生压缩失效时,其主要通过横向剪切裂纹的产生和生长以及芯层间拓展来耗散主要的冲击能量。结构失效的分布沿跨长方向呈对称分布的趋势。泡沫弹体冲击区域失效分布最为复杂,由于剪力在弹体边界的骤然增加,第一层和第二层泡沫均出现贯穿的横向剪切失效,并伴随完整的层间脱粘。该区域的层间脱粘裂纹在动态变形过程中持续向两侧延伸,接近至边界位置。在最边缘区域,由于夹具端的横向剪力使得层间裂纹停止延伸并转换为横向裂纹,靠近夹具的第三层裂纹更为明显,基本贯穿。

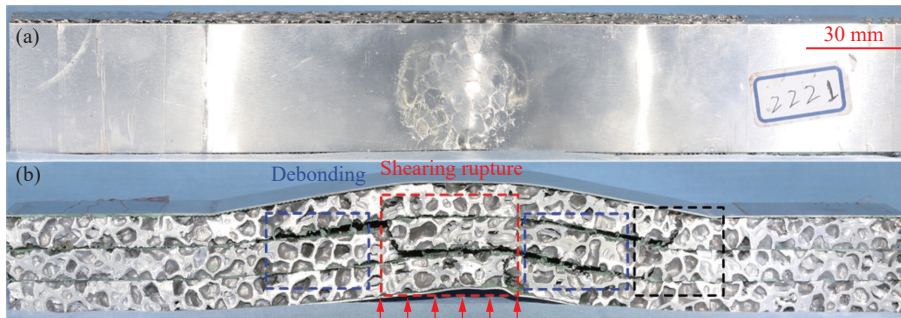


图 8 均质泡沫铝夹芯梁结构低速冲击载荷作用下的失效模式

Fig. 8 Failure modes of UM under the low impulsive intensity

与均质结构 UM 相比,图 9 给出了近似冲击强度下其他四种不同梯度的夹芯梁结构测试后的失效模式。由图 9 可知,梯度芯材的梁结构无论是变形还是失效均显示出均质结构的特性。除了 LMH 由于首层低强度芯层发生明显的局部压缩失效,其他形式的结构除了发生局部的层间脱粘之外,芯层失效程度低,以负梯度 HML 为最。在近似相同的人射能量下,造成这种差异的一个主要因素可以归结为泡沫弹具有与中等密度芯层相似的密度,波阻抗相似的情况使得结构吸收的能量更大。

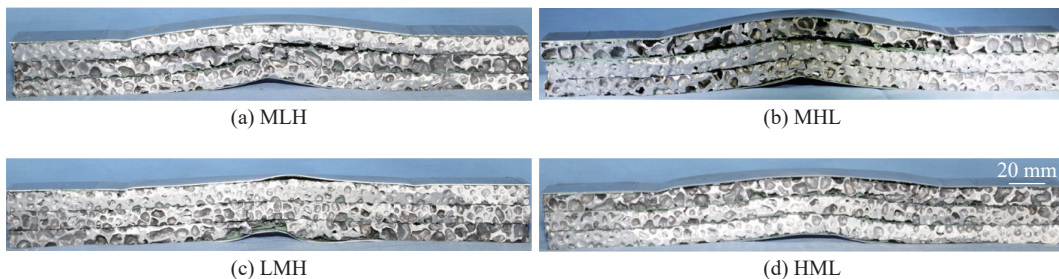


图 9 梯度泡沫铝夹芯梁结构低速冲击载荷作用下的失效模式

Fig. 9 Failure modes of the gradient metal foam sandwich beams under the low impulsive intensity

随着冲击强度的变化,夹芯梁结构的失效模式受到芯材梯度效应的影响发生了明显的改变。图 10 给出了五种不同梯度夹芯梁结构在中等强度冲击和高强度冲击载荷作用后的结构失效模式。正梯度 LMH 结构在受到中等冲击强度时首层芯材的完全压实而导致结构局部变形效应明显,进而引起过度变形,并在边界出现贯穿横向剪切失效,导致结构基本丧失承载能力。负梯度 HML 结构仍然以整体变形为初始响应,随着冲击强度的增加,在弹体冲击区域和第三层出现越来越多的横向断裂失效,且低强度芯层在变形区域均无明显压缩。与之相比,均质夹芯结构 UM 整体变形和失效在夹支边界下随冲击强度变化并不敏感。通过不同速度的动态加载过程可知,均质夹芯结构在更高强度的冲击加载下首层发生轻微的芯层压缩,并在弹体头部中心位置随着压缩的停止出现剪切断裂,裂纹横向生长并诱发层间失效。同样发生首层的轻微压缩,MLH 和 MHL 的失效模式与均质结构同样存在明显差异。MLH 始终呈现为上述的低强度泡沫为芯层的等效夹芯结构,在冲击过程中首先出现的是低强度层的压缩失效和局部变形。随着冲击强度和变形增加,首层中密度层出现压缩并在弯曲变形作用下发生中心断裂,并在高

强层发生边界剪切断裂。MHL 则由于更强的支撑力作用于第一层中等密度层, 在经历了首层的轻微压缩后结构出现整体弯曲变形, 变形明显大于 MLH。随着冲击强度和弯曲变形的增加, 弹体冲击区域发生多芯层断裂, 并在边界易出现剪切失效。

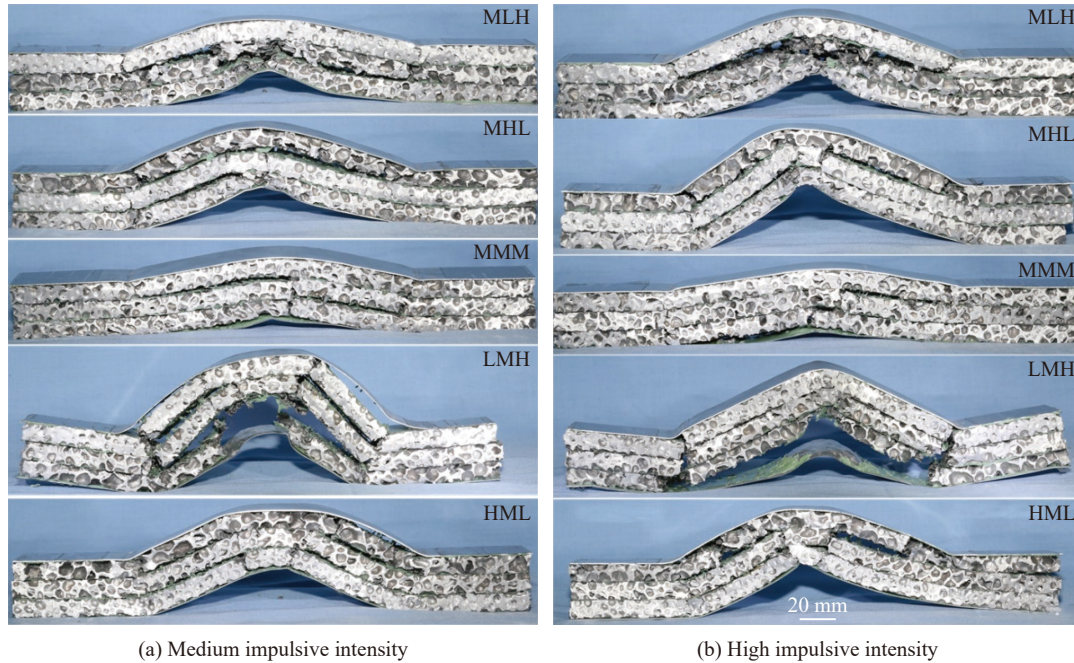


图 10 梯度泡沫铝夹芯梁结构冲击载荷作用下的失效模式

Fig. 10 Failure modes of the gradient metal foam sandwich beams under the impulsive loads

结合结构的动态变形和失效模式可知, 尽管芯层的横向剪切失效和层间脱粘失效为夹芯结构最主要的失效模式, 但是随着冲击强度和芯层梯度的变化, 这两种失效模式以及泡沫压缩失效出现的先后顺序以及失效程度会发生明显的变化, 这种变化即是主导对应结构能量吸收的主要机制。上述的失效模式分析可知, 不同梯度的夹芯结构受到中心局部冲击加载时, 其失效模式的沿着跨长分布基本呈现出较好的对称性, 如图 11(a) 所示。中心区域(III)受到弹体的直接作用, 为失效最严重区域, 随着冲击强度和芯层强度的由低到高的变化, 失效模式由芯层压缩转换为整体响应后的断裂, 对结构整体响应和能量吸收机制起到主要作用。相邻区域(II)收到局部压缩和整体大变形的影响以层间失效为主。在边缘区域(I),

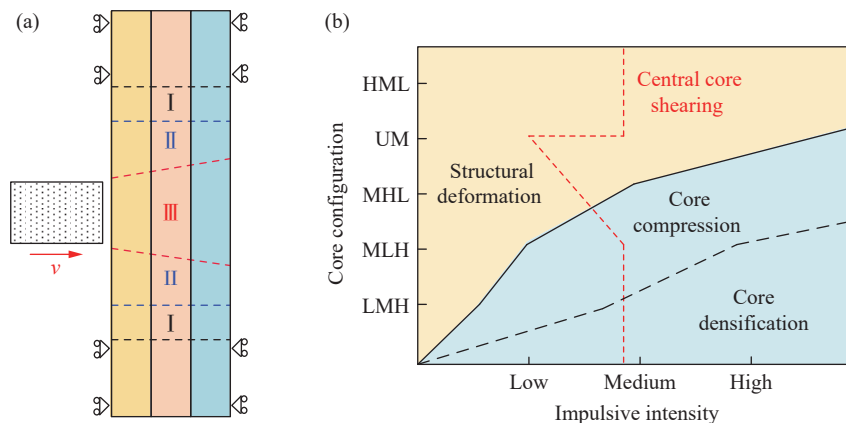


图 11 梯度夹芯梁结构抗冲击失效模式

Fig. 11 Failure modes of the gradient metal foam sandwich beams subjected to high-velocity impact

受大变形和夹具反力作用, 随着冲击强度和最后层芯层强度的增加易发生横向剪切失效。但是当最后层强度较低时, 则主要发生局部的芯材压缩失效。

如前所述, 梯度夹芯梁结构的初始失效模式对结构整体响应和主要的能量吸收机制起着主导作用。图 11(b) 给出了梯度夹芯梁结构在不同冲击载荷作用下初始失效模式图以及随之衍生的主要失效模式。不同梯度夹芯梁结构随着冲击强度的变化所呈现的初始失效模式主要为芯材局部压缩和整体变形(实线)。由实验结果可知, 在密度相近的泡沫弹体冲击下, 均质夹芯结构仅发生轻微的芯层压缩。均质和负梯度的夹芯结构以整体变形为主。其他梯度的夹芯结构随着冲击强度的变化均会出现不同程度的芯层压缩, 当低强度芯层位于前两层时会随着冲击强度的增加发生完全压实失效(虚线)。中心的断裂失效均是伴随芯材的压缩和弯曲变形而产生, 在中等冲击强度下, 所有结构均会发生不同程度的中心断裂失效(红色虚线), 而均质结构则会在更低强度下出现该失效。

3 结 论

本文利用泡沫弹冲击实验开展了金属泡沫梯度夹芯梁结构的抗冲击性能研究, 分析了五种不同梯度的等面密度夹芯结构在夹支边界条件下抗冲击性能随冲击强度以及梯度效应的变化规律, 结合三点弯曲实验, 通过结构的动态响应过程和失效分析, 得到了以下结论。

(1) 在准静态三点弯曲作用下, 密度梯度的分布对结构失效过程和失效模式有着明显的影响, 继而影响梯度结构的能量耗散机制。正梯度、均质、负梯度泡沫夹芯梁结构芯层分别发生以局部芯材压缩、横向剪切和弯曲为主导的失效。

(2) 冲击加载下, 梯度夹芯梁结构的初始失效模式对结构整体响应和主要的能量吸收机制起主导作用。当冲击条件不足以使均质夹芯结构发生局部芯材压缩时, 均质及负梯度夹芯结构初始失效模式为整体弯曲变形。低强度芯层位于前两层的其他梯度形式的夹芯结构随着冲击强度的变化均会出现不同程度的局部芯层压缩。

(3) 当冲击强度较低时, 梯度结构通过更丰富的局部失效表现出明显优于均质结构的抗冲击变形能力, 其中芯层压缩起主要作用。随着冲击强度的提升, 存在一个临界冲击强度, 即当低强度芯层被快速压实时, 均质结构具有更好的抗冲击变形能力。在预计的冲击强度范围内, 通过合理地设计密度梯度而实现芯材的逐层压缩吸能, 能够有效提升防护结构的抗冲击变形能力。

参考文献:

- [1] SUN Y, LI Q M. Dynamic compressive behaviour of cellular materials: a review of phenomenon, mechanism and modelling [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 112: 74–115. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2017.10.006.
- [2] LIU Z, MEYERS M A, ZHANG Z, et al. Functional gradients and heterogeneities in biological materials: design principles, functions, and bioinspired applications [J]. *Progress in Materials Science*, 2017, 88: 467–498. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.04.013.
- [3] 王根伟, 刘冕, 宋辉, 等. 冲击载荷下径向密度排布对泡沫金属力学性能影响的研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(7): 071401. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0403.
WANG G W, LIU M, SONG H, et al. Influence of radial density arrangement on mechanical properties of metal foam under impact loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(7): 071401. DOI: 10.11883/bzycj-2019-0403.
- [4] 叶楠, 张伟, 黄威, 等. PVC 夹芯板在冲击载荷下的动态响应与失效模式 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(1): 37–45. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0037-09.
YE N, ZHANG W, HUANG W, et al. Dynamic response and failure mode of PVC sandwich plates subjected to impact loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(1): 37–45. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0037-09.
- [5] 敬霖, 王志华, 赵隆茂. 多孔金属及其夹芯结构力学性能的研究进展 [J]. *力学与实践*, 2015, 37(1): 1–24. DOI: 10.6052/1000-0879-14-180.
JING L, WANG Z H, ZHAO L M. Advances in studies of the mechanical performance of cellular metals and related sandwich

- structures [J]. *Mechanics in Engineering*, 2015, 37(1): 1–24. DOI: 10.6052/1000-0879-14-180.
- [6] WANG E, LI Q, SUN G. Computational analysis and optimization of sandwich panels with homogeneous and graded foam cores for blast resistance [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 147: 106494. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106494.
- [7] CUI L, KIERNAN S, GILCHRIST M D. Designing the energy absorption capacity of functionally graded foam materials [J]. *Materials Science and Engineering A: Structural Materials: Properties*, 2009, 507: 215–225. DOI: 10.1016/j.msea.2008.12.011.
- [8] HUANG W, XU H, FAN Z, et al. Compressive response of composite ceramic particle-reinforced polyurethane foam [J]. *Polymer Testing*, 2020, 87: 106514. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106514.
- [9] DESHPANDE V S, FLECK N A. Isotropic constitutive models for metallic foams [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2000, 48(6/7): 1253–1283. DOI: 10.1016/S0022-5096(99)00082-4.
- [10] DANIEL I M, CHO J M, WERNER B T. Characterization and modeling of strain-rate-dependent behavior of polymeric foams [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, 45: 70–78. DOI: 10.1016/j.compositesa.2012.10.003.
- [11] RADFORD D D, MCSHANE G J, DESHPANDE V S, et al. The response of clamped sandwich plates with metallic foam cores to simulated blast loading [J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2006, 43: 2243–2259.
- [12] QIU X, DESHPANDE V S, FLECK N A. Impulsive loading of clamped monolithic and sandwich beams over a central patch [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2005, 53: 1015–1046. DOI: 10.1016/j.jmps.2004.12.004.
- [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. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2005.06.003.
- [14] JING L, SU X, CHEN D, et al. Experimental and numerical study of sandwich beams with layered-gradient foam cores under low-velocity impact [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 135: 227–244. DOI: 10.1016/j.tws.2018.11.011.
- [15] ZHANG W, QIN Q, LI K, et al. Effect of stepwise gradient on dynamic failure of composite sandwich beams with metal foam core subject to low-velocity impact [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2021, 228: 111125. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2021.111125.
- [16] 苏兴亚, 敬霖, 赵隆茂. 爆炸载荷下分层梯度泡沫铝夹芯板的失效模式与抗冲击性能 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(6): 063103. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0198.
- SU X Y, JING L, ZHAO L M. Failure modes and shock resistance of sandwich panels with layered-gradient aluminum foam cores under air-blast loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(6): 063103. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0198.
- [17] ZHOU X F, 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.
- [18] RADFORD D D, DESHPANDE V S, FLECK N A. The use of metal foam projectiles to simulate shock loading on a structure [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 31(9): 1152–1171. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2004.07.012.
- [19] FANG B P, HUANG W, XU H J, et al. High-velocity impact resistance of stepwise gradient sandwich beams with metal foam cores [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 181: 110054. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110054.

(责任编辑 王小飞)