

复合蛋盒型夹层结构动态压缩的力学性能研究

秦 勤^{1,2}, 王建伟¹, 刘星岩¹, 郑 林¹

(1. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

(2. 北京科技大学 顺德研究生院, 广东 佛山 520300)

摘 要: 蛋盒型结构是一种新型的周期性单胞轻质结构, 该结构具有低密度、高比强度和吸能能力强等特性。本研究通过有限元法建立了平面蛋盒型夹芯板与曲面蛋盒型夹芯板的落锤冲击模型, 对比分析了其抗冲击特性, 并且对不同条件下蛋盒型结构的动态压缩力学性能进行对比分析。结果表明: 受到冲击时的夹芯板会经历 3 个阶段, 其中压缩阶段为主要的吸能阶段, 通过将冲击动能转变为夹芯板的塑性耗散能达到缓冲吸能的目的, 同时这些特性依赖于成形高度以及上下面板厚度等结构参数, 单胞结构成形高度为 6 mm、单胞周期为 20 mm、上下面板板厚为 0.5 mm、曲率半径为 400 mm 时, 复合蛋盒型夹芯板具有更好的力学性能。

关键词: 蛋盒型结构; 复合夹芯板; 动态压缩; 抗冲击特性

中图分类号: TG306

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)11-4103-10

蛋盒型结构的结构特性使其具有良好的吸能缓震性, 通过塑性变形来消耗冲击动能, 因此是用作冲击防护的优异材料。复合蛋盒型夹层结构将吸能缓震性能优异的蛋盒型结构与强度较高的上下面板组合, 使其具有不同于传统材料的优异性能。

目前, 对于蛋盒型结构的研究主要是集中在准静态力学分析, 通过准静态压缩或者剪切等加载过程, 研究其形变、应力、破坏和吸能等特性。王远^[1]等运用 Abaqus/Explicit 软件对典型蛋盒型结构的成形过程进行了模拟, 得到了成形极限高度时的形貌、减薄率、成形力等, 最后分别分析了凸模结构参数、摩擦系数对蛋壳型结构成形结果的影响规律。Deshpande^[2]等运用塑性铰理论得到了蛋盒型结构的失效机制图, 描述了在不同载荷情况下的失效形式。Akisanya^[3]等研究了蛋盒型结构中单个结构在压缩与剪切载荷共同作用时的失效形式。Nowpada^[4]等对不同结构参数的铝制蛋盒型结构在不同边界条件下进行了准静态压缩实验。蛋盒型结构的准静态力学研究通过准静态压缩或者剪切等加载过程, 探究了其形变、应力、破坏和吸能等特性。可以在一定程度上反映结构的力学性能, 但在实际的工程应用场景下, 结构的受力情况较为复杂, 需要结合加载速率进行动态力学性能分析。

Zupan^[5]等对铝蛋盒型结构在平面外压缩作用下

的塑性破坏响应进行了试验测量和有限元建模仿真, 研究表明: 蛋盒型材料具有与金属泡沫材料同样优异的吸能能力。Haldar^[6]等运用实验与模拟相结合的方法研究了基于准静态荷载和落锤荷载的球顶和平屋顶复合材料波形芯的夹芯板吸能特性。Zhang^[7]等使用节点分离法, 运用了 J-C 本构模型和 Gruneisen 状态方程, 研究了蛋盒型结构用于 Whipple 防护结构时, 当受到高速冲击弹体的作用时蛋盒型夹层能很好地起到保护作用。通过对蛋盒型结构的准静态和动态的力学性能分析, 得出其在吸能和承载能力方面与蜂窝和泡沫铝等结构有相似的能力, 并在有些方面有更强的性能。

通过结合实验与有限元仿真, 广大科研工作者已经从准静态与动态力学两方面对蛋盒型结构进行了深入研究, 在研究中很多学者发现, 良好的夹层结构加上具有较高强度的面板层组合成的复合夹芯板具有更优异的性能。所以对于复合夹芯板的研究吸引了广大学者的关注^[8-18]。根据夹芯板的芯层不同, 夹芯板一般包括: 泡沫金属夹芯板^[8]、波纹夹芯板^[15]、蜂窝夹芯板^[16]和点阵桁架夹芯板^[18]等。祖国胤^[9]等人利用同步辐射装置的 SR-CT, 通过图像的断层扫描及 3D 重建, 对轧制复合-粉末冶金发泡工艺制备的泡沫铝夹芯板 (AFS) 进行了泡孔结构演化的研究, 分析了发泡过程中孔隙率的变化及大尺寸连通孔的形成原因。徐

收稿日期: 2020-11-24

基金项目: 北京科技大学顺德研究生院科技创新专项资金 (BK19BE009); 广东省基础与应用研究基金 (2019B1515120070)

作者简介: 秦 勤, 男, 1970 年生, 博士, 教授, 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083, E-mail: qinqin@me.ustb.edu.cn

诗峰^[13]通过数值模拟研究了不同面板和芯子组合时对于结构的抗低速冲击性能的影响。杨鹏飞^[15]以波纹夹芯板和结构为研究对象,讨论了结构参数对其压缩和冲击吸能特性的影响。张立伟^[17]通过对蜂窝铝夹芯板进行低速冲击实验,分析了半球形和平端冲头冲击下各种参数的变化对蜂窝铝夹芯板的极限承载力和吸能率的影响。

许多学者开展了准静态下夹芯板的性能研究^[19-25]。

D. Ruan^[23]等实验研究了泡沫铝夹芯板在准静态压痕载荷作用下的力学响应和能量吸收。S. Belouettar 等^[24]通过准静态四点弯实验研究了芯层密度对力学性能的影响。商磊^[25]等人采用钎焊工艺制备了 TC4 钛合金蜂窝板,对试样在室温和高温下进行异面压缩、三点弯曲性能测试和分析,并对不同温度下的试件强度及破坏模式进行分析。

部分学者进行了冲击载荷下复合夹芯板的动力响应研究^[26-30]。Michelle^[31,32]等对夹芯板进行落锤冲击作用下的瞬态变形响应进行了预测和试验,研究了两种铝蜂窝夹层结构的低速冲击响应,并对其吸能效果、抗冲击性能以及失效模式等方面进行研究。Foo^[28]等利用有限元的方法研究了低速冲击载荷下蜂窝夹芯板的失效响应。Nurick^[29]采用实验和有限元模拟方法,分析了在冲击荷载作用下,等厚低碳钢板和铝蜂窝夹芯板的性能。随后 Chi 等人^[30]研究了蜂窝夹芯板芯层高度以及面板厚度对冲击载荷下夹芯板动力响应的影响,结果表明:增加板的厚度可以减少背板的偏转,但是面板的总质量将高很多。以上学者针对复合夹芯板受到冲击作用时的力学性能进行了研究,并对结构参数对力学性能的影响进行了深入讨论。

近年来,人们发现功能梯度以及弯曲型夹芯相比传统的多孔材料具有更多的优势,特别是在吸能特性方面。Apetre 等^[33]研究了功能梯度夹芯梁在低速冲击载荷下的动力响应。Zhang^[34]等人构造了规则六边形层次蜂窝,通过有限元建模对这种新型六角分层蜂窝结构的平面外耐撞性进行研究。Lan^[35]研究发现随着曲率和面层厚度的增加,具有弯曲型蜂窝芯、六边形蜂窝芯和泡沫芯的板的抗冲击性明显增加,尤其是具有弯曲型蜂窝芯的板。对于具有弯曲型蜂窝芯的板,增加背面板厚度可以比正面板的厚度更有效地提高抗爆炸性能。上述研究大多都是集中在较为成熟的蜂窝结构的基础上对复合夹芯板的力学性能和结构参数进行研究,而作为同样具有优异性能的蛋盒型复合夹芯板以及蛋盒型复合夹芯板受冲击时的力学性能的研究却涉及较少。

本工作以复合蛋盒型夹芯板为研究对象,基于 ABAQUS 商业有限元软件,分别建立了平面蛋盒型夹芯板与曲面蛋盒型夹芯板,并对其进行落锤冲击实验仿真。探究蛋盒型夹芯板在受到动态冲击时的压缩过程,通过对复合板的仿真形变云图对其吸能原理做出解释,应用吸能曲线与反作用力曲线对复合板的抗冲击性能进行评判,进一步比较平面蛋盒型夹芯板与曲面蛋盒型夹芯板的抗冲击性能。最后系统讨论成形高度、面板厚度、冲击能量以及曲率半径对蛋盒型夹芯板抗冲击性能的影响。

1 分析模型

1.1 蛋盒型结构的几何形貌

蛋盒型结构通过冲压成形加工得到,具有可变球形凸起半径值的特性,其实物形貌如图 1a 所示,呈现出明显的周期性凹凸排列的特点。其主要的几何尺寸参数包括单胞周期 (p)、成形高度 (h)、基础板材厚度 (t) 和球形凸起半径 (r),如图 1b 示。

1.2 蛋盒型夹芯板落锤冲击模型建立

为研究复合蛋盒型夹芯板在受到冲击时的动态压缩的力学性能,分别建立平面蛋盒型夹芯板落锤冲击模型如图 2a 所示,曲面蛋盒型夹芯板落锤冲击模型如图 2b 所示,其中两模型的蛋盒型结构选用的结构参数均为:单胞周期 $p = 30 \text{ mm}$,成形高度为 $h = 5 \text{ mm}$ 和基础板厚为 $t = 0.5 \text{ mm}$ 。上下面板的厚度均为 $T = 0.5 \text{ mm}$,曲面夹芯板的曲率半径为 400 mm 。根据《夹层结构或芯子平压性能试验方法》中相关要求,压缩试样应至少包括 4 个完整的周期,因此整个夹芯板尺寸为 $120 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 。蛋盒型夹芯的材料选用 AA1060 铝,上下面板的材料选用 Q345 钢,其弹性阶段的材料参数如表 1 所示。

仿真模型各部件的接触面均选用 surface-to-surface 接触对算法,并将 mechanical constrain formulation 设置为 penalty contain method,可以有效地控制沙漏效应。建立法向硬接触、切向罚函数法摩擦的接触关系来加强接触约束,切向属性的摩擦系数设置为 0.3。复合夹芯板的边界条件是对下面板的侧面进行全约束,其余均采用自由的边界。为了简化计算将落锤设置为刚体,施加重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 模拟其自由落体运动,将其下落高度转化成初始冲击速度施加在其耦合的参考点上。

2 蛋盒型夹芯板动态压缩力学性能分析

2.1 蛋盒型夹芯板动态压缩过程分析

蛋盒型夹芯板具有良好的动态压缩特性,本节针

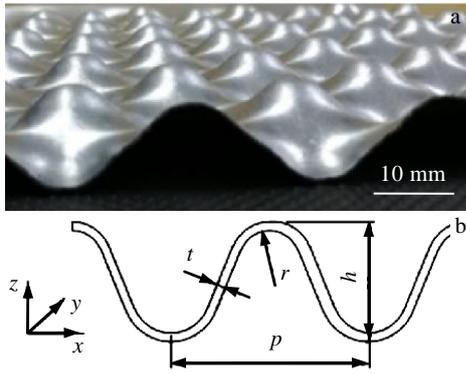


图 1 蛋盒型结构的形貌及结构参数示意图

Fig.1 Morphology of egg-box structure (a) and schematic of structural parameters (b)

对蛋盒型夹芯板在受到落锤冲击时发生的压缩形变过程进行分析，阐述蛋盒型夹芯板的吸能机理，并为下一步进行抗冲击特性数值计算的定量分析提供支持。蛋盒型夹芯板受落锤冲击的变形过程大致可分为 3 个阶段：加载阶段、压缩阶段和回弹阶段。

加载阶段为落锤下落至与蛋盒型夹芯板上面板接触时，冲击荷载开始增大，由于将落锤的下落高度转化成其初始速度，所以这个过程持续的时间较短且蛋盒型夹芯板的形变量较小。

压缩阶段是吸能缓震的主要阶段，该阶段落锤与蛋盒型夹芯板的上面板接触并持续作用，该阶段的压缩变形云图如图 3 所示，夹芯板的变形首先发生在锤头接触的冲击处，如图 3a 所示，随着夹芯板的持续受力，上面板的变形由受力中心逐渐向四周扩散如图 3b~3d 所示，在压缩过程中蛋盒型夹芯在与上下面板的相互作用下发生了致密化。当蛋盒型夹芯被压缩到一定程度时，将与下面板发生相互作用，使得下面板发生变形，最后，

落锤下落至最低处，速度减小至零并在上面板产生了 3 个方向的最大等位移为 7.38 mm 的凹坑。由于上面板与蛋盒型夹芯是通过四周的边界相粘接，相当于对其四周边沿进行了约束，在约束作用下变形云图的边界呈现菱形-圆形-菱形的变化趋势。

通过结合蛋盒型夹心层的变形过程，可以更好地阐述蛋盒型夹心板的吸能机理，其变形过程如图 4 所示。其中图 4a 表示未变形的蛋盒型结构，从图 4b 可以看出，当受到落锤冲击作用进入压缩阶段时，蛋盒型结构的顶点处受力发生内凹，在其边沿处产生塑性铰，提供其变形支撑，尖顶的单胞结构逐渐变为平顶结构。随着持续作用，内凹范围向外传递直至冲击结束如图 4c。吸能缓震的原理可以描述为落锤下落产生的冲击动能转变为夹芯板的塑性耗散能，忽略不计该过程中所产生的热能，从而达到缓冲吸能的效果。

最后为反弹阶段，落锤将以远小于冲击速度反弹，且在落锤反弹的过程中，夹芯板自身也出现了反弹并持续振动一段时间，最终产生了不可恢复的塑性凹坑变形。反弹阶段蛋盒型夹芯板通过持续振动起到缓冲作用，面板的中间位置产生一个明显的凹坑形变，且在上面板的四周边沿处产生对称的形变。

2.2 蛋盒型夹芯板抗冲击吸能特性分析

通过形变分析得出蛋盒型夹芯板主要是通过蛋盒型夹心层的塑性变形吸收冲击能量。本节将通过数值计算的方法定量的对比分析低速落锤冲击作用下平面与曲面蛋盒型夹芯板的吸能特性，其吸能性能评价的指标主要有冲击载荷曲线和吸能曲线。

首先对比分析平面蛋盒型夹芯板和曲面蛋盒型夹芯板冲击载荷曲线如图 5 所示，该曲线是提取落锤与上面板之间的接触力。从图中可以看出，2 条曲线的变化趋势基本相同，先是单调上升，达到峰值作用力后保持一段时间，为了获得更好的吸能效果，该峰值反作用力时间应当保持尽量恒定的和足够的时长。曲



图 2 平面蛋盒型夹芯板及曲面蛋盒型夹芯板落锤冲击模型

Fig.2 Drop hammer impact model for flat egg-box sandwich panel (a) and curved egg-box sandwich panel (b)

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

Material	Elastic modulus, E/GPa	Poisson's ratio, ν	Density/ kg m^{-3}
1060Al	69	0.33	2700
Q345	285	0.3	7800

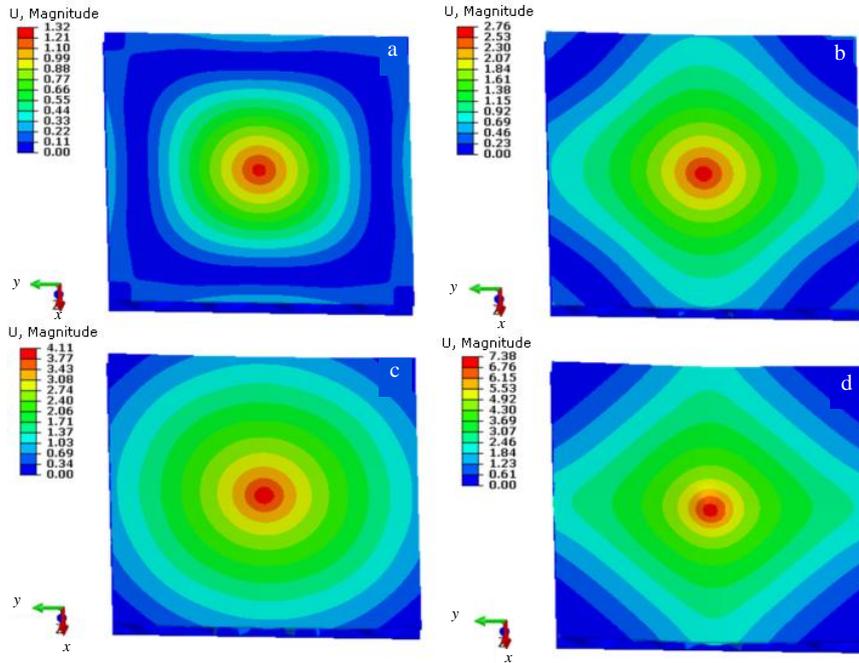


图 3 压缩不同阶段蛋盒型夹芯板受落锤冲击的整体形变图

Fig.3 Overall deformation diagram of the egg-box sandwich panel impacted by the drop hammer: (a) initial contact stage, (b, c) continuous compression stage, and (d) maximum compression displacement stage

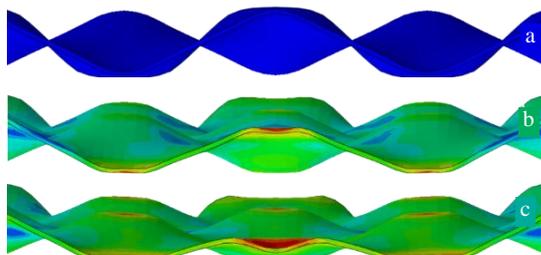


图 4 不同阶段落锤冲击中心蛋盒型单胞结构形变图

Fig.4 Deformation diagram of egg box monocyte structure with drop hammer impact center: (a) non-contact stage, (b) compression stage, and (c) end of impact stage

面蛋盒型夹芯板的峰值反作用力比平面蛋盒型夹芯板降低约 19.5%，而越小的反作用力对需要防护的设备造成的损伤将越小。整个过程中，作用力曲线都伴随着一定的抖动，这是由于整个落锤冲击的过程中，夹芯板将会发生一定的振动，使得冲击反作用力载荷曲线产生一定的抖动现象。

曲面蛋盒型夹芯板和平面蛋盒型夹芯板的吸能情况如图 6 所示，从图中可以看出，2 条吸能曲线均是先上升至最高点，再有所下降，最后保持恒定。该曲线的最高点表示的是落锤冲击的总动能，由于落锤在达到最低点时会有一定的反弹，故夹芯板不能完全地吸收所有的冲击动能，曲线最后稳定的值为夹芯板通过塑性形变吸收的总能量。从图中可以看出，曲面蛋盒型夹芯板的吸能峰值较平面蛋盒型夹芯板的峰值出现的时间靠后，主要是由于曲面蛋盒型夹芯板在面内的绝对厚度较平面蛋盒型夹芯板有所增大，落锤的冲击行程也随之增大，其峰值将随之延后。整个模型输入的能量为 11.61 J，曲面蛋盒型夹芯板吸收的能量最多，达到 10.09 J，吸能效率达到 87.0%；平面蛋盒型夹芯板吸收的吸能 9.52 J，吸能效率达到 82.1%；从吸能效果可以看出，曲面型夹芯板的吸能效果较平面蛋盒型夹芯板有所提升，吸能效果大约提升 4.9% 左右。

2.3 曲面蛋盒型夹芯板双向抗冲击性能对比

前面讨论了落锤冲击时平面蛋盒型夹芯板与曲面蛋盒型夹芯板的力学性能，在类似的探究中对落锤冲

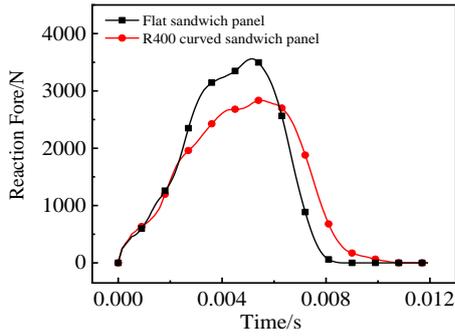


图 5 平面夹芯板与 R400 曲面夹芯板落锤冲击作用下反作用力对比曲线

Fig.5 Comparison curves of reaction force between plane sandwich panel and R400 curved sandwich panel under impact of drop hammer

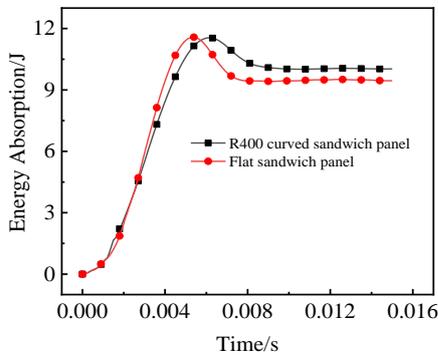


图 6 平面夹芯板与 R400 曲面夹芯板落锤冲击作用下吸能性能对比曲线

Fig.6 Comparison curves of energy absorption performance between plane sandwich panel and R400 curved sandwich panel under impact of drop hammer

击曲面蛋盒型夹芯板凹面的情况涉及较少，为保证严谨性，将对不同冲击速度下，落锤冲击曲面凹凸两面的情况。

选取从 1.5 到 3.0 m/s 的 4 组冲击速度进行仿真分析，其对比结果如图 7 所示，从图 7 中可以看出，不同冲击速度下正面冲击的吸能性均优于反面冲击，这是由于拱形结构在受到冲击力时，结构本身会产生变形压缩从而将冲击动能转换为塑性耗散能产生一部分吸能作用。从反面进行冲击时，由于凹面结构导致力不会沿板面分散出去，使反面冲击时弯曲板的吸能性变差且冲击力更大。所以在实际使用中，将曲面蛋盒型复合板的凸面作为受冲击面更合适。

3 结构参数对蛋盒型夹芯板抗冲击特性的影响规律

上一节中已经分析了蛋盒型夹芯板受冲击时的形变过程，解释了蛋盒型夹芯板的吸能机理，并且通过数值计算的方法分析了夹芯板的抗冲击特性，通过抗冲击特性的分析方法还可以进一步探究结构参数对夹芯板抗冲击特性的影响规律。

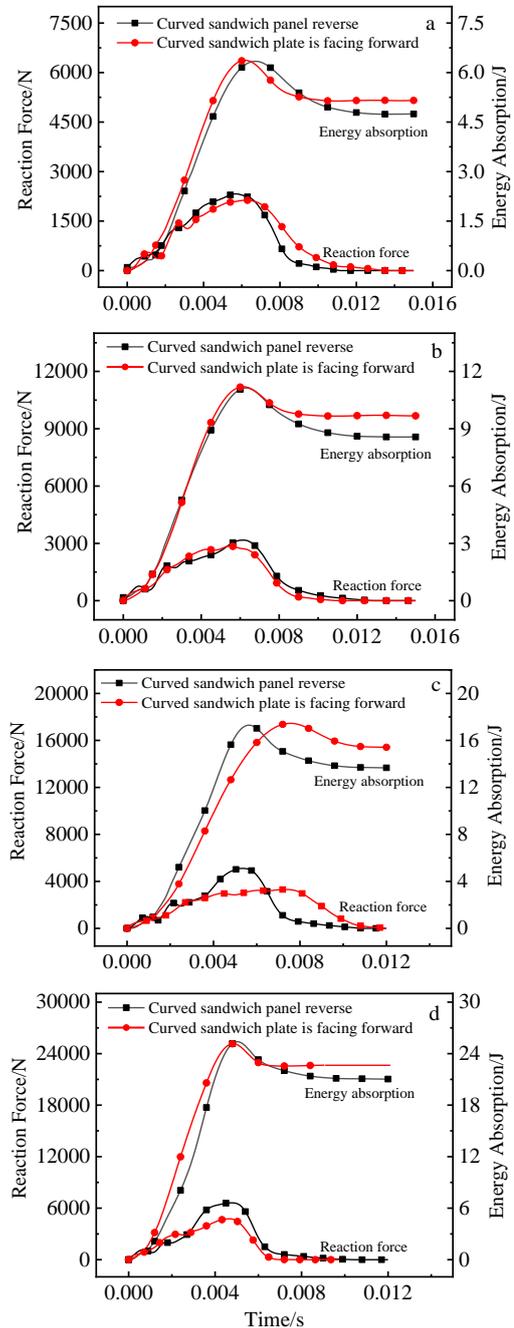


图 7 曲面夹芯板正反双向受不同落锤冲击速度作用下的反作用力及吸能对比曲线

Fig.7 Comparison curves of reaction force and energy absorption of a curved sandwich panel subjected to different impact velocities of falling weight in both directions: (a) 1.5 m/s, (b) 2.0 m/s, (c) 2.5 m/s, and (d) 3.0 m/s

3.1 成形高度对夹芯板抗冲击特性的影响

为探究成形高度对夹芯板抗冲击特性的影响，固定蛋盒型结构的基础板厚 $t=0.5\text{ mm}$ ，上下面板厚度 $T=0.5\text{ mm}$ ，周期间距 $p=30\text{ mm}$ ，冲击速度 $v=2\text{ m/s}$ ，成形高度分别选用 $h=4, 6, 10\text{ mm}$ ，蛋盒型结构的吸能与反作用力曲线如图 8 所示。

从图 8a 中可以看出，3 条曲线的变化趋势基本相同，先是单调上升，达到峰值作用力，并保持一段时间。为了获得更好的吸能效果，该峰值反作用力时间应当保持尽量恒定和足够的时长。从图中可以看出，成形高度越大，该平台应力持续的时间就越长，但是该平台到来的时间越晚。其中 6 mm 的峰值反作用力最大，而 10 mm 成形高度的蛋盒型夹芯板其峰值反作用力最小，且其应力平台持续时间最长，越小的峰值反作用力对需要防护的设备造成的损伤将越小。整个过程中，曲线都有一定的抖动，这是由于冲击过程中，夹芯板将会发生一定的振动，使得冲击载荷曲线产生抖动现象。从图 8b 可以看出，整个模型输入的能量为 11.61 J，6 mm 成形高度的夹芯板吸收的能量最多，达到 9.54 J，吸能效率达到 82.2%；10 mm 成形高度的夹芯板吸收的吸能 9.41 J，吸能效率达到 81.1%；

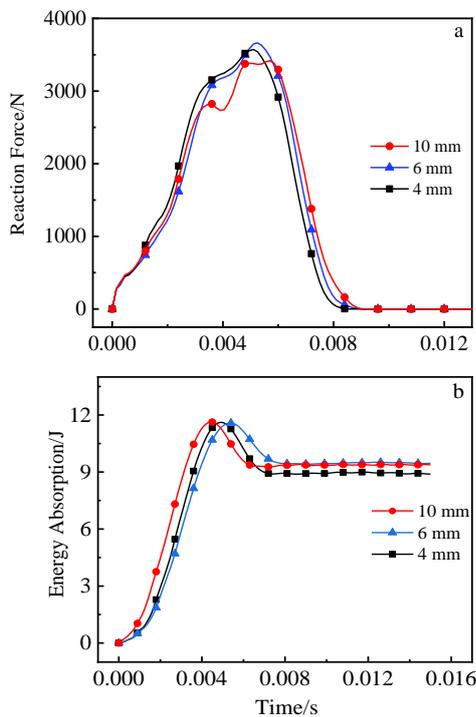


图 8 不同成形高度的平面夹芯板受落锤冲击作用下的反作用力曲线及吸能曲线

Fig.8 Curves of reaction force (a) and energy absorption (b) of flat sandwich panels with different forming heights under the impact of falling hammer

最后 4 mm 成形高度面板的夹芯板吸能效果最差，吸收能量达到 8.91 J，吸能效率为 76.7%。因此，成形高度越大，夹芯板的整体厚度也越大，落锤冲击行程随即变大，夹芯板的抗冲击性能越强，但过高的成形高度会影响吸能效率，所以 6 mm 成形高度的夹芯板的吸能效率最高。

3.2 上下面板厚度对夹芯板抗冲击特性的影响

为探究上下面板厚度对夹芯板抗冲击特性的影响，固定蛋盒型结构的基础板厚 $t=0.5\text{ mm}$ ，成形高度 $h=5\text{ mm}$ ，周期间距 $p=30\text{ mm}$ ，冲击速度 $v=2\text{ m/s}$ ，上下面板厚度分别选用 $t=0.5, 1.0, 1.5\text{ mm}$ ，蛋盒型结构的吸能与反作用力曲线图如图 9 所示。

从图 9a 中可以看出，面板厚度越大，其峰值反作用力也越大并且反作用力平台持续时间越短。其中，1.50 mm 厚度面板的峰值反作用力约为 4218 N，1.00 mm 厚度面板的峰值反作用力约为 3612 N，0.50 mm 厚度面板的峰值反作用力约为 2301 N。夹芯板的面板厚度越大，其在承受落锤冲击时，发生的形变将会更小，使其发生形变将需要更大的力，导致峰值反作用力也越大。

从图 9b 中可以看出，0.5 mm 厚度的面板吸收的能量最多，达到 10.21 J，吸能效率达到 87.9%；1 mm

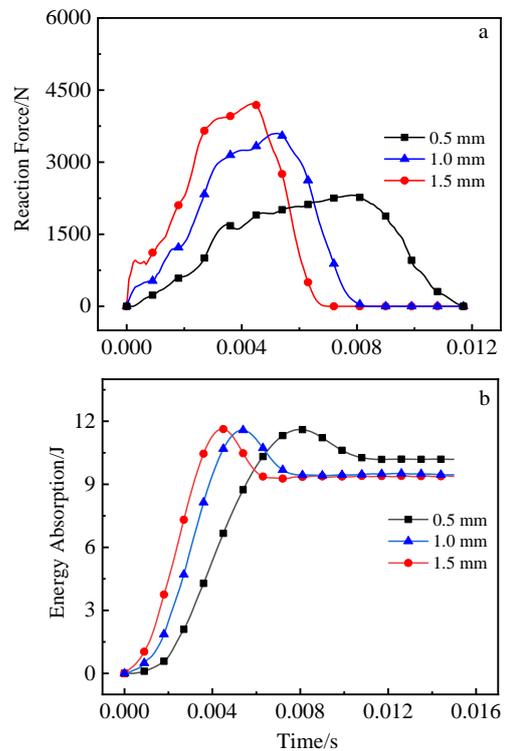


图 9 不同面板厚度的平面夹芯板受落锤冲击作用下的反作用力曲线及吸能曲线

Fig.9 Curves of reaction force (a) and energy absorption (b) of flat sandwich plates with different panel thickness under the impact of falling hammer

厚度面板的夹芯板吸能效果次之，吸收能量达到 9.52 J，吸能效率达到 81.9%；最后，1.5 mm 厚度面板的夹芯板吸收能量为 9.37，吸能效率为 80.8%。1.5 mm 厚度面板和 1 mm 厚度面板夹芯板的吸能曲线最后基本相重合。3 条曲线达到峰值的时间随着面板厚度的增大而缩短，该趋势与反作用力峰值正好相对应。从图中可以看出，1 mm 厚度和 1.5 mm 厚度面板的夹芯板吸能效果十分近似，这说明当面板厚度大于一定值时，随着面板厚度的变化，其吸能效果变化不大，并且在满足强度要求的情况下，较小的上下面板厚度的夹芯板拥有更好的抗冲击特性。

3.3 冲击速度对夹芯板抗冲击特性的影响

为探究冲击速度对夹芯板抗冲击特性的影响，固定蛋盒型结构的基础板厚 $t=0.5$ mm，上下面板厚度 $T=0.5$ mm，成形高度 $h=5$ ，周期间距 $p=30$ mm，冲击速度分别选用 $v=1, 2, 3, 4$ m/s，蛋盒型结构的吸能与反作用力曲线如图 10 所示。

从图 10a 中可以看出，冲击初始速度越大，即冲击动能越大，其峰值反作用力也越大，且到达峰值所需要的时间越短。且随着冲击速度的减小，其峰值反作用力越趋于一个稳定的范围内，且持续作用时间更长。4 m/s 冲击速度的峰值反作用力大约为 8058 N；3 m/s 冲击速度的峰值反作用力大约为 5102 N；2 m/s 冲击速度的峰值反作用力大约为 3612 N；1 m/s 冲击速度的峰值反作用力大约为 1854 N，4 m/s 的冲击速度下的冲击载荷曲线的平台段较其他冲击速度不太明显，且出现了反作用力尖峰，说明该结构参数下的夹芯板对 4 m/s 冲击速度的吸能效果不佳，不能很好地起到抗冲击防护的作用。随着冲击速度的增大，其平台阶段越短，其中 1 m/s 时，其平台阶段最长，说明该结构的夹芯板对于 1 m/s 的冲击能量缓冲效果最好。

从图 10b 中可以看出，当冲击速度为 1 m/s 时，其产生的冲击动能达到 3 J，吸收的能量为 2 J，吸能效率达到 66.7%；当冲击速度为 2 m/s 时，其产生的冲击动能达到 11.6 J，吸收的能量为 9.5 J，吸能效率达到 81.9%；当冲击速度为 3 m/s 时，其产生的冲击动能达到 25.6 J，吸收的能量为 22.9 J，吸能效率达到 89.5%；当冲击速度为 4 m/s 时，其产生的冲击动能达到 46.6 J，吸收的能量为 43.1 J，吸能效率达到 92.5%。从吸能效果可以看出，冲击初始速度越大，其吸能效果越好。这是由于冲击速度的增大，可以使夹芯板产生更大的塑性变形，从而吸收更多的冲击能量。

3.4 单胞周期对夹芯板抗冲击特性的影响

为探究单胞周期对夹芯板抗冲击特性的影响，固

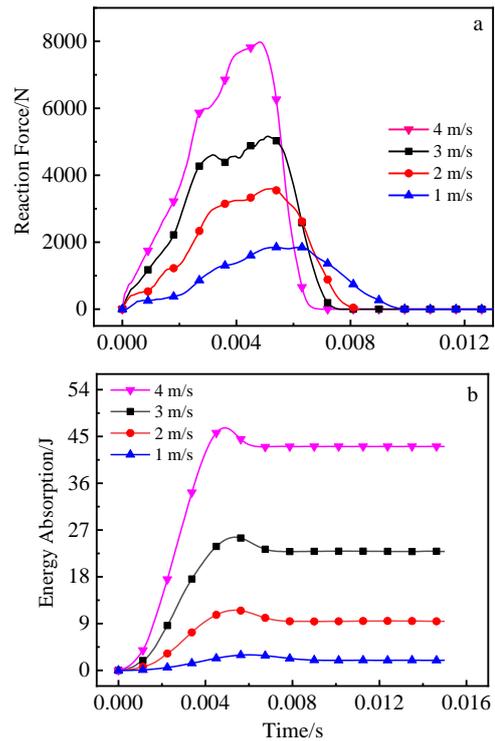


图 10 不同冲击速度的平面夹芯板受落锤冲击作用下的反作用力曲线及吸能曲线

Fig.10 Curves of reaction force (a) and energy absorption (b) of flat sandwich panels with different impact velocities under the impact of falling hammer

定蛋盒型结构的基础板厚 $t=0.5$ mm，上下面板厚度 $T=0.5$ mm，成形高度 $h=5$ mm，冲击速度 $v=2$ m/s，单胞周期分别选用 $p=20, 30, 40$ mm，蛋盒型结构的吸能与反作用力曲线如图 11 所示。

从图 11a 中可以看出，单胞周期越小，其峰值反作用力越大并且反作用力平台持续时间越短。其中，20 mm 单胞周期的峰值反作用力约为 3939 N；30 mm 单胞周期的峰值反作用力约为 3560 N；40 mm 单胞周期的峰值反作用力约为 2805 N。蛋盒型夹芯的单胞周期越小，其在承受落锤冲击时，发生的形变将会更大，使其发生形变将需要更大的力，导致峰值反作用力也越大。

从图 11b 中可以看出，随着单胞周期从大变小，其吸能能力越强，20 mm 单胞周期吸收的能量为 9.73 J，吸能效率达到 83.9%；而 40 mm 单胞周期吸收的能量为 9.30 J，吸能效率为 80.2%，20 mm 比 40 mm 单胞周期的吸能效率提高了 3.7%。这是由于在受冲击过程中单胞周期越小，锥形段的单胞间距就越小从而锥形段变形抗力增加，发生变形产生的形变将越大，导致吸能效率越高。

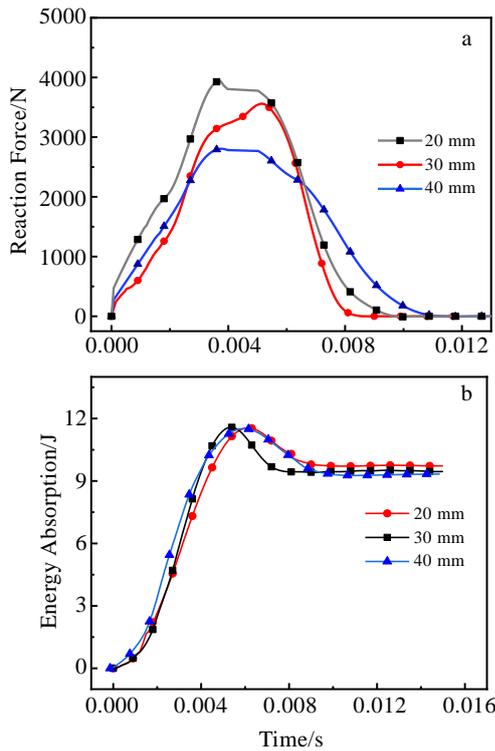


图 11 不同单胞周期的平面夹芯板受落锤冲击作用下的反作用力曲线及吸能曲线

Fig.11 Reaction force curves (a) and energy absorption (b) of flat sandwich panels with different monocellular cycles under the impact of falling hammer

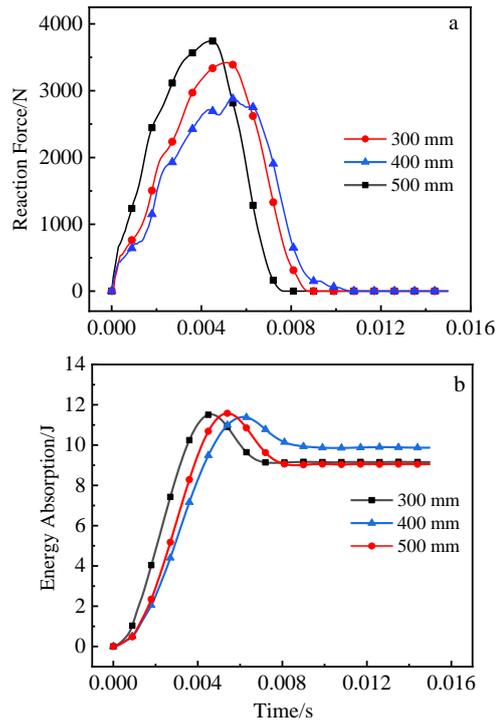


图 12 不同曲率半径的曲面夹芯板受落锤冲击作用下的反作用力曲线及吸能曲线

Fig.12 Curves of reaction force (a) and energy absorption (b) of curved sandwich panels with different radius of curvature under the impact of falling hammer

3.5 曲率半径对夹芯板抗冲击特性的影响

对于曲面蛋盒型夹芯板来说，曲率半径是影响其抗冲击特性的重要参数，所以为探究曲率半径对曲面蛋盒型夹芯板抗冲击特性的影响，固定曲面蛋盒型夹芯板的基础板厚 $t=0.5$ mm，上下面板厚度 $T=0.5$ mm，成形高度 $h=5$ mm，周期间距 $p=30$ mm，冲击速度 $v=2$ m/s，曲率半径分别选用 300、400、500 mm，曲面蛋盒型夹芯板的吸能与反作用力曲线如图 12 所示。

图 12a 中可以看出，当曲率半径由 300 mm 增大到 400 mm 时，反作用力平台维持的时间随之增大，但当曲率半径由 400 mm 增大到 500 mm 时，反作用力平台维持的时间随之减小，但是该平台到来的时间有所滞后。同时随着曲率半径值的增大，其峰值反作用力先减小后增大，且到达峰值所需要的时间先增长再减少。其中，300 mm 半径值的曲面蛋盒型夹芯板峰值反作用力约为 3452 N；400 mm 半径值的曲面蛋盒型夹芯板峰值反作用力约为 2858 N；500 mm 半径值的曲面蛋盒型夹芯板峰值反作用力约为 3748 N。当曲面蛋盒型夹芯板的曲率半径较小时，其整体凸起过大，就会造成在承受落锤冲击时面内的缓冲作用降低，造

成其峰值作用力过大，而当曲率半径过大时，曲面蛋盒型夹芯板整体上接近于平面蛋盒型夹芯板，不能起到曲面的缓冲效果。

从图 12b 中可以看出，整个模型输入的能量为 11.6 J。曲率半径为 400 mm 的曲面蛋盒型夹芯板吸收的能量最多，达到 9.90 J，吸能效率达到 85.3%；曲率半径为 300 mm 的曲面蛋盒型夹芯板吸能效果次之，吸收能量达到 9.16 J，吸能效率达到 79.0%；曲率半径为 500 mm 的曲面蛋盒型夹芯板吸收的吸能 9.05 J，吸能效率达到 78.0%。因此，400 mm 曲率半径的曲面蛋盒型夹芯板的吸能效率较 500 mm 的曲面蛋盒型夹芯板提高了 7.3% 同时受到冲击时的反作用力减少 23.8%，在受到冲击时可以更有效地吸收冲击能量并且减少冲击力对于设备的损伤。

4 结 论

1) 运用有限元法对复合蛋盒型夹层结构动态压缩的力学性能进行了研究，分析了蛋盒型夹芯板在受到冲击时的变形过程，其中压缩阶段为主要的吸能阶段，该结构的吸能原理是通过蛋盒型单胞结构的塑性变形

来达到吸能缓震的目的。

2) 定量的分析了平面蛋盒型夹芯板和曲面蛋盒型夹芯板在承受冲击载荷时形变和吸能特性。同时由于曲面蛋盒型夹芯板具有的拱形结构使其抗冲击特性优于平面蛋盒型夹芯板,从吸能效果可以看出,曲面蛋盒型夹芯板的吸能效果较平面蛋盒型夹芯板提升了 4.9%。

3) 通过分析蛋盒型结构的几何参数以及面板厚度、冲击能量对夹芯板抗冲击性的影响,发现单胞结构成形高度为 6 mm,上下面板厚度为 0.5 mm、单胞周期为 20 mm 时,平面蛋盒型夹芯板具有更好的力学性能,对于曲面蛋盒型夹芯板,当曲率半径为 400 mm 时具有更好的抗冲击特性,吸能效果达到了 85.3%。同时当冲击初始速度越大时,其吸能效果越好,但是其反作用力也越大,容易对需要安全防护的结构产生破坏。

参考文献 References

- [1] Wang Yuan(王 远), Zhang Yong(臧 勇), Li Xiaolong(李小龙). *Forging & Stamping Technology(锻压技术)*[J], 2017, 42(10): 51
- [2] Deshpande V S, Fleck N A. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*[J], 2003, 51(1): 187
- [3] Akisanya A R, Fleck N A. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2006, 48(7): 799
- [4] Nowpada S, Chirwa E C, Myler P *et al.* *International Journal of Crashworthiness*[J], 2010, 15(1): 59
- [5] Zupan M, Chen C, Fleck N A. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2003, 45(5): 851
- [6] Haldar A K, Zhou J, Guan Z. *Materials Today Communications*[J], 2016, 8: 156
- [7] Zhang X, Liu T, Li X *et al.* *Acta Astronautica*[J], 2016, 119: 48
- [8] Liu Peisheng(刘培生), Luo Jun(罗 军), Chen Yiming(陈一鸣). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2012, 41(S2): 50
- [9] Zu Guoyin(祖国胤), Sun Xi(孙 溪), Huang Peng(黄 鹏) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2017, 46(10): 3141
- [10] Xue Z, Hutchinson J W. *International Journal of Impact Engineering*[J], 2004, 30(10): 1283
- [11] Jing L, Wang Z, Zhao L. *Composite Structures*[J], 2013, 99: 213
- [12] Jing L, Wang Z, Zhao L. *Composite Structures*[J], 2014, 107: 36
- [13] XuZhi Feng(徐诗峰). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016
- [14] Li X, Wang Z, Zhu F *et al.* *International Journal of Impact Engineering*[J], 2014, 65: 79
- [15] Yang Pengfei(杨鹏飞). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013
- [16] Li X, Zhang P, Wang Z *et al.* *Composite Structures*[J], 2014, 108: 1001
- [17] Zhang Leiwei(张立伟). *Thesis for Master(硕士论文)* [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2018
- [18] Evans A G, Fleck N A, Ashby M F *et al.* *Progress in Materials Science*[J], 2001, 46: 309
- [19] Deshpande V S, Fleck N A, Ashby M F. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*[J], 2001, 49: 1747
- [20] Bart-Smith H, Hutchinson J W, Fleck N A *et al.* *International Journal of Solids and Structures*[J], 2002, 39: 4999
- [21] Deshpande V, Fleck N. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*[J], 2005, 53(11): 2347
- [22] Yungwirth C J, Wadley H N G, Connor J H *et al.* *International Journal of Impact Engineering* [J], 2008, 35(8): 920
- [23] Ruan D, Lu G, Wong Y C. *Composite Structures*[J], 2010, 92(9): 2039
- [24] Belouettar S, Abbadi A, Azari Z *et al.* *Composite Structures*[J], 2009, 87(3): 265
- [25] Shang Lei(商 磊), Xue Qichao(薛启超), Yang Dachun(杨大春) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2018, 47(2): 567
- [26] Anderson T A. *Composites Part B: Engineering*[J], 2004, 36(2): 135
- [27] Hazizan M A, Cantwell W J. *Composites Part B: Engineering*[J], 2003, 34(8): 679
- [28] Foo C C, Seah L K, Chai G B. *Composite Structures*[J], 2008, 85(1): 20
- [29] Nurick G N, Langdon G S, Chi Y *et al.* *Composite Structures* [J], 2009, 91(4): 433
- [30] Chi Y, Langdon G S, Nurick G N. *Materials & Design*[J], 2019, 31(4): 1887
- [31] Michelle S, Hoo Fatt K S P. *Composite Structures*[J], 2001, 52: 353
- [32] Michelle S, Hoo Fatt K S P. *Composite Structures*[J], 2001, 52: 335
- [33] Apetre N A, Sankar B V, Ambur D R. *International Journal of Solids and Structures*[J], 2006, 43(9): 2479
- [34] Zhang Y, Lu M, Wang C H *et al.* *Composite Structures*[J], 2016, 144: 1
- [35] Lan X, Feng S, Huang Q *et al.* *Aerospace Science and Technology*[J], 2019, 87: 37

Study on Dynamic Compression Properties of Egg-Box Sandwich Structure

Qin Qin^{1,2}, Wang Jianwei¹, Liu Xingyan¹, Zheng Lin¹

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. Shunde Graduate School, University of Science and Technology Beijing, Foshan 520300, China)

Abstract: Egg-box structure is a new type of periodic single cell lightweight structure, which has the characteristics of low density, high specific strength and high energy absorption capacity. Drop hammer impact model of egg box type sandwich panels with a plane and curved surface was established based on finite element method in this research. A comparative analysis of its impact resistant properties, and the dynamic compression mechanical properties of different egg box type structure under different conditions were analyzed. The results show that the impact of sandwich board goes through three stages, including the compression stage as the main stage of energy absorption, through the impact kinetic energy transforming into the sandwich board plastic dissipation to achieve the goal of buffer and energy absorption. At the same time, these characteristics depend on the forming height and the thickness of upper and lower panels and other structural parameters. When the forming height of single-cell structure is 6 mm, the period of single cell is 20 mm, the thickness of upper and lower panels is 0.5 mm, and the radius of curvature is 400 mm, the composite egg-box sandwich panel has better mechanical properties.

Key words: egg box structure; composite sandwich panel; dynamic compression; impact resistance characteristic

Corresponding author: Qin Qin, Ph. D., Professor, School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, E-mail: qinqin@me.ustb.edu.cn