

DOI: 10.11858/gywlxb.20261106

# 静动态载荷下二级层级褶皱夹芯结构的缓冲吸能

刘涛<sup>1,2</sup>, 李兆凯<sup>3,4</sup>, 刘晓勇<sup>1</sup>, 谢佳苗<sup>2,5</sup>, 郝文乾<sup>2,5</sup>

1. 中北大学能源与动力工程学院, 山西 太原 030051;
2. 山西省无人飞行器工程研究中心, 山西 太原 030051;
3. 北京机械设备研究所, 北京 100854;
4. 西北工业大学国家卓越工程师学院, 陕西 西安 710072;
5. 中北大学航空宇航学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 波纹夹芯结构以其高比刚度、高比强度、轻量化以及优异的能量吸收能力在航空航天和车辆防护等领域广泛应用。通过将层级结构概念引入波纹夹芯结构, 提出了一种二级层级褶皱夹芯 (second-order hierarchical corrugated sandwich, SHCS) 结构, 研究了其力学性能和抗冲击性能。通过推导得到了该结构峰值载荷的解析式, 理论计算结果与有限元分析结果的相对误差在 10% 以内。采用数值模拟方法, 对不同小支撑数量  $n$  的结构变形模式进行了研究, 结构的变形模式可分为 3 种: 渐进屈曲、过渡屈曲和整体屈曲。在不同冲击速度和小支撑结构参数下, 进一步分析了结构的准静态压缩和动态加载响应, 重点分析了其变形机制和能量吸收特性。结果表明: 在准静态压缩载荷下, 小支撑面板厚度对能量吸收特性的影响更为显著, 当厚度由 0.8 mm 增加至 1.6 mm 时, 结构的比吸能增加 67.3%; 低速冲击条件下, 峰值载荷和比能量吸收随小支撑面板厚度增加呈抛物线变化趋势; 动态加载过程中, 随着冲击速度的增加, 结构的能量吸收性能得到提升, 且在高速冲击下, 峰值载荷和比能量吸收随小支撑面板厚度的增加呈增长趋势。

**关键词:** 波纹夹芯结构; 层级结构; 抗冲击性能; 能量吸收

**中图分类号:** O347; O521.9 **文献标识码:** A

轻量化、高承载与优异的抗冲击性能, 已成为航空航天、车辆工程、船舶建造及防护工程等领域对先进结构与材料的核心性能要求。夹芯结构由波纹芯层和上下面板组成, 拥有极佳的优势<sup>[1]</sup>, 如高比强度、高比刚度、低密度及优异的冲击防护能力<sup>[2]</sup>, 被广泛应用于吸能构件和结构防护装置。传统夹芯结构 (如波纹结构、蜂窝结构) 在性能提升过程中往往伴随结构质量增加的问题。因此, 实现夹芯结构的“轻质高强”设计并提升多工况适应性, 已成为近年来的研究重点<sup>[3]</sup>。

夹芯结构相较于实心结构具有独特优势, 不仅能显著减轻结构重量, 同时保证高承载能力, 还能满足结构与功能集成设计的要求<sup>[4]</sup>。其中, 波纹夹芯结构具有较高的抗压强度和能量吸收能力, 并且具有出色的透气性。Rong 等<sup>[5]</sup>设计了五种具有不同几何构型但尺寸、重量和材料相同的波纹夹芯结构, 并对其进行了局部冲击仿真分析, 结果表明, 在低速冲击条件下, 梯形波纹夹芯结构展现出更优的能量吸收特性。Xia 等<sup>[6]</sup>对不同核心 (正弦波、三角形、梯形和矩形) 的波纹夹层板在准静态三点弯曲下的力学性能进行了实验研究和数值模拟研究, 结果表明芯层厚度、长度和波纹角对夹芯结构的变形模式、力-位移曲线和比能量吸收有重要影响。Cheng 等<sup>[6]</sup>分析了 U 型波纹夹层结构在低速冲击下的动态响应, 揭示随着冲击速度的增加, 峰值载荷、最大位移及吸收能量逐渐增加。Cao 等<sup>[7]</sup>研究了多层波纹夹芯板在面外压缩和冲击载荷下的表现, 发现该结构对冲击速率具有显著敏感

性,这种敏感性可以通过数值模拟再现。胡旭初等<sup>[8]</sup>研究发现波纹夹芯板的胞元壁厚增大时,波纹夹芯板的最大接触力增大,能量吸收和抗冲击性能增强。魏建辉等<sup>[9]</sup>通过合理地设计夹芯梁密度梯度实现逐层压缩吸能,能够有效地提升防护结构的抗冲击性能。学者们还通过改变芯子形式来改进夹芯结构的抗压力学性能。Pan等<sup>[10]</sup>采用开槽和互锁方法制造了交叉波纹夹层板。易晓菲等<sup>[11]</sup>提出一种仿生梯度双波纹夹芯结构,并对其进行了仿爆炸冲击模拟。利用仿生学原理,Sun等<sup>[12]</sup>提出了一种仿生多正弦波纹夹芯结构来增强抗冲击性能,对其进行了低速冲击测试,结果表明,与传统波纹结构相比,该结构显著提升了能量吸收效率和冲击防护能力。Zhang等<sup>[13]</sup>研究了填充泡沫后波纹夹芯结构的冲击行为,通过低速冲击测试分析了结构几何参数对峰值力、失效模式和能量吸收的影响。

层级结构能显著增强结构的宏观刚度和强度,将其应用于承载吸能构件,能够有效控制重量的前提下,充分满足夹芯结构对于高强度与高刚度的设计要求。Dang等<sup>[14]</sup>制备了不同芯层数量的多层波纹夹芯板,研究发现,芯层数量的增加显著提高了波纹夹芯板的承载能力和变形能力,Hou等<sup>[15]</sup>还获得了多层波纹夹芯板的失效机制和能量吸收能力。Xu等<sup>[16]</sup>设计了一种新型自相似的层级六边形柱,发现二阶结构表现出最佳的耐撞性。Zhang等<sup>[17]</sup>制备了一种具有多层结构和梯度设计的改良正弦波纹夹芯结构,结果表明,引入梯度设计降低了非线性变形过程中的初始峰值强度,并减少了载荷承载能力的波动。Liu等<sup>[18]</sup>设计制备了复合材料层级蜂窝结构,在破碎力效率和比能量吸收方面均有所提升。对于多层级夹芯板,芯层尺寸和壁厚<sup>[19]</sup>、密度梯度配置<sup>[20]</sup>以及芯材类型均显著影响多层级夹芯板在低速冲击下的动态响应和能量吸收机制。Kooistra等<sup>[21]</sup>在波纹夹芯结构设计中引入层级结构原理,得到的新型轻质结构称为层级褶皱结构。方耀楚等<sup>[22]</sup>对层级褶皱结构失效机理进行了研究,总结出结构的六种失效模式并绘制了机理图。冯根柱等<sup>[23]</sup>研究不同芯层层数的二级波纹板夹芯结构在准静态压缩下的结构吸能情况,结果表明二级结构能量吸收性能显著优于一级结构。但未研究多层级波纹夹芯结构在不同冲击载荷下的力学性能和吸能特性。

研究表明,学者们普遍关注夹芯结构的轻量化和高强度设计目标,本研究旨在系统探讨二级层级褶皱夹芯结构在多种载荷工况下的冲击响应特性,通过理论分析建立结构的峰值载荷预测模型,并将计算结果与有限元模拟进行对比,验证失效理论模型的可靠性。此外,重点研究不同小支撑数量 $n$ 的二级层级褶皱夹芯结构的变形模式和抗冲击性能。进一步讨论不同加载工况下小支撑结构参数对结构抗冲击性能的影响规律。该研究为特定复杂载荷工况下调节二级层级褶皱夹芯结构能量吸收过程提供了优化设计策略。

## 1 几何模型的构建和理论分析

### 1.1 几何模型

二级层级褶皱夹芯(Second-Order Hierarchical Corrugated Sandwich, SHCS)结构是由相同元素组成的连续周期性结构,由顶端、底端面板和夹芯组成,夹芯部分由大支撑和小支撑组成。由于复合夹芯结构在工程领域的广泛应用,其结构性能计算面临着新的需求与挑战,为降低计算时间成本,本研究在保证一定精度的条件下,通过模型简化等效的方式,对二级层级褶皱夹芯结构单胞结构的抗冲击性能进行分析。为描述一个周期性单胞结构,结构尺寸如图1(a)所示,将一系列几何参数定义为:整个结构宽度为 $b$ ,面板厚度为 $t_f$ 。大支撑面板倾角、长度、厚度分别为 $\theta$ 、 $l$ 、 $t$ 。小支撑面板的倾角、长度、厚度分别为 $\theta_1$ 、 $l_1$ 、 $t_1$ 。大支撑内的小支撑数量为 $n$ 。本文结构波纹角度为 $45^\circ$ ,有研究表明该角度和其他角度相比承载能力最高<sup>[24]</sup>。构件的几何形状会严重影响波纹夹芯结构的力学性能。

在缓冲吸能结构的设计中,夹芯结构的体积分数是影响力学性能和轻量化设计的关键参数。将芯层材料所占整个结构的体积分数定义为SHCS结构的相对密度。芯层部分由大支撑结构和小支撑结构构成,可以计算得出:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_s} = \frac{2lt + (2n+1)l_1t_1 - \frac{1}{2}t^2 \cot \theta}{l \sin \theta (l \cos \theta + l_1 + t \cot \theta)} \quad (1)$$

式中, $\bar{\rho}$ 为夹芯结构的相对密度, $\rho$ 为芯层密度, $\rho_s$ 为结构基材密度。

通过改变二级层级褶皱夹芯结构的关键几何参数,可以精确调节单胞结构的相对密度。与一级单胞结构相比,对具有相同相对密度的层级结构来说,在力学性能和抗冲击性能上表现出更优越的特性<sup>[23]</sup>。通过有序控制层级结构压溃破坏的过程,使结构更平稳、更充分地吸收冲击能量。

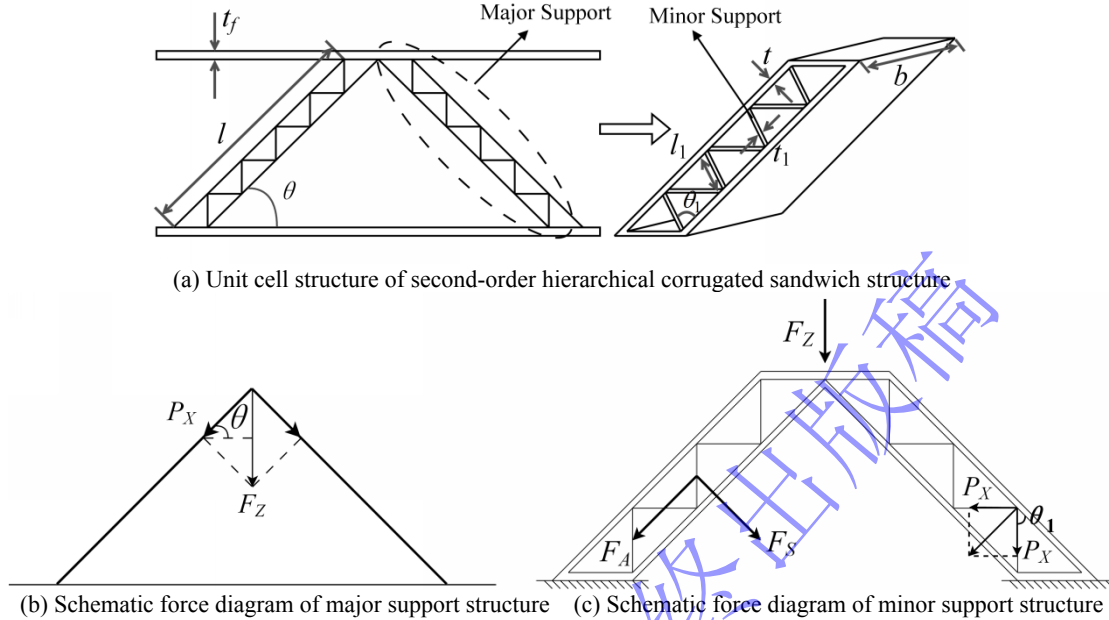


图1 二级层级褶皱夹芯结构单胞结构及受力示意图

Fig.1 Unit cell structure and stress diagram of second-order hierarchical corrugated sandwich structure

## 1.2 静态失效理论分析

在平压受力状态下,大支撑结构在外部载荷  $F_z$  作用下的受力示意图如图 1(b)所示,为简化计算,将大支撑视为多个截面为矩形的梁,构件均为理想各向同性均质材料制成,变形满足小变形条件,忽略横向剪切变形。大支撑仅沿  $Z$  方向发生位移  $\delta_z$ ,而  $X$  和  $Y$  方向上的位移  $\delta_x$ 、 $\delta_y$  均为 0。结构在  $Z$  方向上的等效应力和等效应变可表示为:

$$\sigma_z = \frac{F_z}{A_1} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta_z}{l \sin \theta} \quad (3)$$

式中,  $F_z = 2P_x \sin \theta$  为单胞结构所受的压缩载荷,可由单个大支撑的轴向力  $P_x$  所表示。  $A_1 = 2bl \cos \theta$  为单胞结构的底面积。得到大支撑发生失效时的等效应力由轴向力可表示为:

$$\sigma_z = \frac{P_x}{bl} \tan \theta \quad (4)$$

小支撑结构的受力示意图如图 1(c)所示,为了分析小支撑的失效模式,将小支撑可看作承受面内载荷的矩形板。  $F_A$  和  $F_S$  是大支撑在载荷作用下受到的轴向压缩分力和剪切分力。

大支撑所受轴向压缩力表达式为:

$$F_A = E_S A_2 \varepsilon_A \quad (5)$$

式中,  $E_S$  为大支撑的弹性模量,  $\varepsilon_A = \delta_z \sin \theta / l$  为大支撑结构沿轴向方向应变,  $A_2 = 2tb$  为横截面积。因此可得:

$$F_A = \frac{2tbE_S \sin \theta}{l} \delta_z \quad (6)$$

大支撑的剪切力  $F_S$  计算公式可参考悬臂梁剪力和挠度的对应关系:

$$\delta = \frac{F_S L^3}{3EI} \quad (7)$$

于是, 根据式(7)以及图中几何关系, 可以得到:

$$F_S = \frac{3E_S I \cos \theta}{l^3} \delta_Z \quad (8)$$

式中,  $I$  为大支撑的截面惯性矩,  $A_3$  是大支撑结构沿  $X$  (垂直于纸面) 方向的面积, 表达式分别为:

$$I = 2 \left[ \frac{lt^3}{12} + A_3 \left( \frac{l_1 \sin \theta_1}{2} \right)^2 \right] \quad (9)$$

$$A_3 = 2lt \quad (10)$$

联立式(6)~(10), 可得出大支撑的轴向力和剪切力之间的关系式为:

$$\frac{F_S}{F_A} = \left( \frac{t}{l} \right)^2 \frac{1}{\tan \theta} + 3 \left( \frac{l_1}{l} \right)^2 \frac{\sin^2 \theta_1}{\tan \theta} \quad (11)$$

根据力的平衡条件, 单个大支撑结构的合力  $F_Z$  可分解为轴向压缩分力  $F_A$  和剪切分力  $F_S$ , 因此结构的平衡方程可表示为:

$$F_Z = 2(F_A \sin \theta + F_S \cos \theta) \quad (12)$$

在压缩载荷作用下, 小支撑结构承受面内载荷。根据力的平衡关系, 大支撑的剪切分力可由小支撑的面内载荷  $P_X$  如下表示:

$$F_S = 2P_X \sin \theta_1 \quad (13)$$

联立式(2)、式(6)、式(8)、式(12)和式(13), 则小支撑发生失效时的等效应力由轴向力可表示为:

$$\sigma_z = 2P_X \sin \theta_1 \left( \frac{2tl \sin^2 \theta \sin \theta_1}{3I \cos^2 \theta} + \frac{1}{bl} \right) \quad (14)$$

本研究基于忽略短波失效模式的假设, 认为二级层级褶皱夹芯结构在压缩载荷作用下的失效模式主要为塑性屈服和欧拉屈曲<sup>[25]</sup>。根据失效部位的不同, 塑性屈服包括大支撑塑性屈服和小支撑塑性屈服。弹性屈曲包括大支撑整体屈曲、大支撑弹性褶皱、小支撑屈曲和大支撑剪切屈曲。基于此, 本文针对塑性屈服和欧拉屈曲推导其等效应力表达式。

当支撑面板应力达到材料的屈服强度  $\sigma_s$  时, 结构将出现塑性变形。通过屈服强度可分别表示出大支撑和小支撑的面内载荷为:

$$P_X = 2\sigma_s bt \quad (15)$$

基于式(4), 得到大支撑塑性屈服时的等效应力为:

$$\sigma_z = \frac{2t\sigma_s \tan \theta}{l} \quad (16)$$

同样地, 得到小支撑塑性屈服时的等效应力为:

$$\sigma_z = 4\sigma_s bt_1 \sin \theta_1 \left( \frac{2tl \sin^2 \theta \sin \theta_1}{3I \cos^2 \theta} + \frac{1}{bl} \right) \quad (17)$$

当构件长细比较大时, 整体易发生弹性屈曲, 支撑面板在承受轴向载荷时, 发生欧拉屈曲时的极限载荷为:

$$P_X = \frac{\pi^2 E_S I}{(Kl)^2} \quad (18)$$

式中,  $K$  表示大支撑结构的约束系数。结构的约束条件接近两端固支, 此时  $K$  取值为 0.5。

基于式(4)，得到大支撑整体屈曲时的等效应力为：

$$\sigma_z = \frac{\pi^2 E_s I \tan \theta}{K^2 b l^3} \quad (19)$$

同样地，得到小支撑欧拉屈曲时的等效应力为：

$$\sigma_z = 8\pi^2 E_s \sin \theta_1 \left( \frac{2t \sin^2 \theta \sin \theta_1}{3l \cos^2 \theta} + \frac{I}{b l^3} \right) \quad (20)$$

当两个小支撑之间的大支撑部分达到失稳后，结构发生大支撑弹性褶皱。其等效应力为：

$$\sigma_z = \frac{2P_{cr} \tan \theta}{l} \quad (21)$$

式中， $P_{cr}$  为屈曲临界载荷<sup>[26]</sup>。

在外部载荷作用下，大支撑由于剪切刚度过低而发生失效称为大支撑剪切屈曲，失效达到的稳定临界载荷<sup>[26]</sup>： $P_x = E_s b t_1 \sin 2\theta_1 \sin \theta_1 / 2$ ，基于式(4)，其等效应力为：

$$\sigma_z = \frac{t_1}{l} E_s \sin^2 \theta_1 \cos \theta_1 \tan \theta \quad (22)$$

### 1.3 吸能性能指标

为分析二级层级褶皱夹芯结构单胞结构在受压作用下的力学响应，本文选取载荷-位移曲线、峰值载荷、吸收总能量及比吸能作为性能评价参数。作为比较，通过输出碰撞压缩时中心点的位移来评价二级层级褶皱夹芯结构的抗冲击性能。

在力-位移曲线中可获得最大峰值点，该峰值点对应的载荷即为峰值载荷（Peak Crushing Force, PCF）。在吸能结构设计中，峰值载荷需控制在合理范围，峰值载荷过大会对防护结构产生过大冲击过载，防护安全性差。峰值载荷过小使结构快速进入密实化阶段，压缩有效塑性吸能行程，造成能量吸收效率下降。结构在压缩过程下吸收的总能量可表示为：

$$EA = \int_0^l F(x) dx \quad (23)$$

式中， $F(x)$ 为加载对应位移 $l$ 的瞬时载荷， $l$ 为结构密实化时的位移。密实化点定义为载荷急剧上升的起始点，即塑性变形阶段曲线切线与密实化阶段曲线切线的交点。

比吸能（Specific Energy Absorption, SEA）是吸收总能量与结构质量之比，是评价结构吸能特性的一个重要指标，该值越大，表明结构能量吸收效率越好。其表达式可表示为：

$$SEA = \frac{EA}{m} \quad (24)$$

式中， $m$ 为吸能结构质量。

## 2 有限元模型与验证

### 2.1 有限元模型

本文采用 ABAQUS 有限元分析软件对二级层级褶皱夹芯结构进行数值模拟。该结构由上下面板和中间芯层构成，有限元模型如图 2 所示。图中小支撑数量  $n$  为 3。面板刚度显著高于芯层材料，为确保计算效率，将面板简化为离散刚体建模，芯层部分采用 C3D8R 单元进行网格划分。

为了模拟实际的压缩测试，SHCS 结构位于固定底座上，因此对下刚性面板进行固定，上刚性面板采用以恒定速度沿垂直方向下压的加载方式，同时约束上面板其余方向的自由度。采用通用接触算法来模拟变形过程中夹芯结构本身的接触，法向接触属性设置为硬接触，切向摩擦系数定义为 0.2。为模拟面板与芯层之间的实际力学传递，两者的连接采用绑定约束。

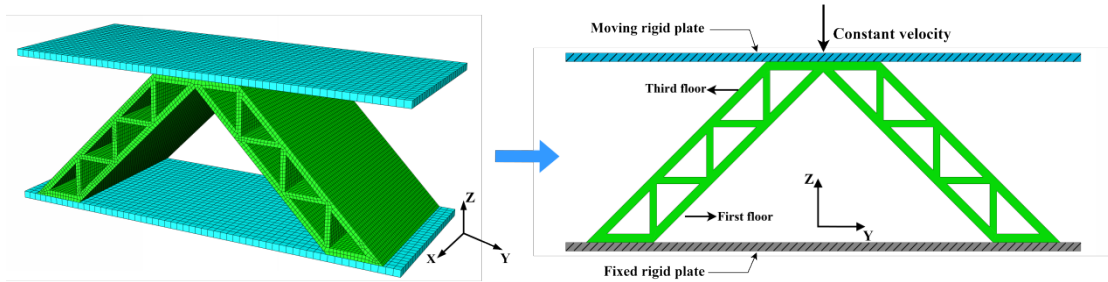


图2 有限元模型  
Fig.2 Finite element model

二级层级褶皱夹芯结构所用材料为铝合金 6061-T6, 具体材料参数如表 1 所示。其中,  $\rho$  为密度,  $E$  为杨氏模量,  $\nu$  为泊松比,  $\sigma_s$  为屈服强度,  $\sigma_u$  为极限强度; 图 3 为铝合金 6061-T6 的真实应力应变曲线。

表 1 6061-T6 铝合金材料参数  
Table 1 Material parameters of 6061-T6 aluminum alloy

Material	$\rho /(\text{kg}/\text{m}^3)$	$E/\text{GPa}$	$\nu$	$\sigma_s / \text{MPa}$	$\sigma_u / \text{MPa}$
Al 6061-T6	2700	69	0.3	262	305

为了在模型可靠性和计算资源之间取得平衡, 对网格收敛性进行了验证。图 4 为网格尺寸为 0.5 mm、1 mm、1.5 mm 和 2 mm 的力-位移曲线。可以看出, 随着网格尺寸的减小至 1 mm, 力-位移曲线基本一致, 因此网格尺寸设定为 1 mm。

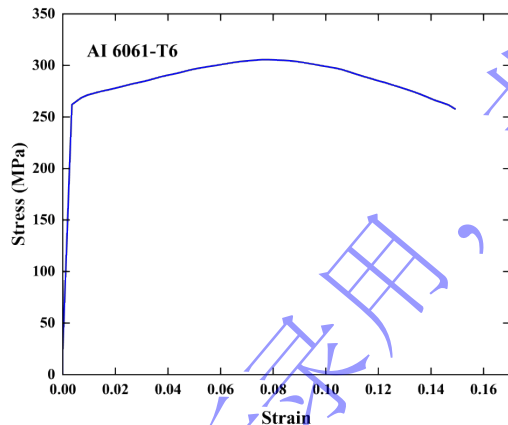


图3 铝合金 6061-T6 应力应变曲线  
Fig.3 Stress-strain curve for 6061-T6 aluminum Alloy

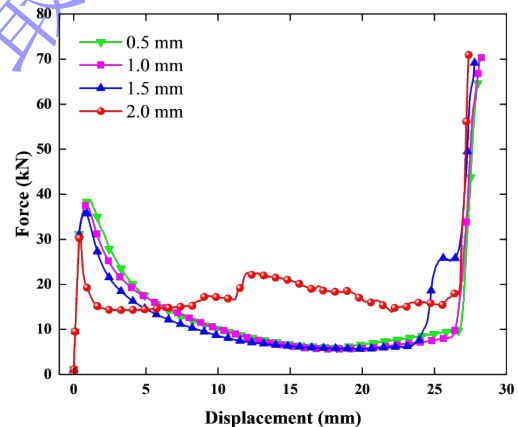


图4 网格收敛性验证  
Fig.4 Grid convergence verification

## 2.2 模型有效性验证

为保证分析结果的准确性, 通过理论表达式计算二级层级褶皱夹芯结构在准静态压缩下的 PCF 值, PCF 可由式(2)得到的等效应力化简得到。将理论计算值与仿真模拟结果进行对比, 如图 5(a)所示, 有限元模拟结果与理论值吻合良好, 模型几何参数见表 2, 此时 SHCS 结构主要表现为塑性屈服<sup>[27]</sup>。结果表明: 峰值载荷变化随大支撑厚度  $t$  的增加而显著增大; 而小支撑厚度  $t_1$  及数量  $n$  的变化对峰值载荷影响较小, 与理论计算的相对误差在 10%以内, 该结果为后续结构的参数分析提供了支撑。

利用数值模拟对 Guo 等<sup>[27]</sup>的模型及实验工况进行了复现, 实验与数值模拟结果如图 5(b)所示。结果表明, 多层级波纹夹芯结构的力-位移曲线在整体变化趋势上吻合良好, 峰值载荷误差为 5.79%。

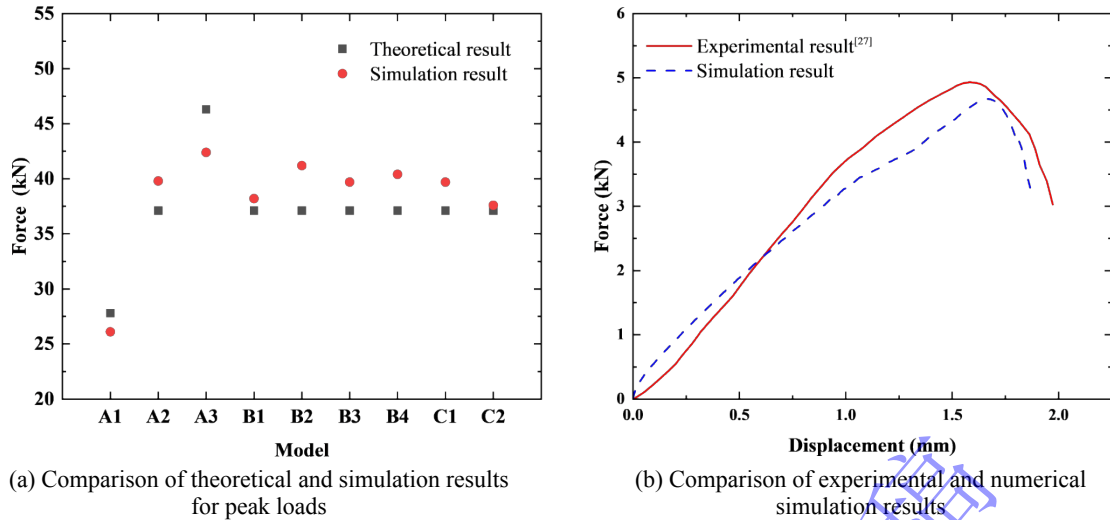


图5 理论、仿真与实验结果的峰值载荷对比  
Fig.5 Comparison of peak loads between theoretical, simulation, and experimental results

表2 模型尺寸参数及由理论计算、有限元分析的峰值载荷  
Table 2 Model dimensional parameters and peak loads derived from theoretical calculations and finite element analysis

Model	$t$	$l$	$t_1$	$l_1$	$b$	$n$	PCF (kN)		Relative error/%
							Theoretical result	Simulation result	
A1	1.5	38.9	1.5	10	25	2	27.8	26.1	-6.51
A2	2.0	38.9	1.5	10	25	2	37.1	39.8	6.78
A3	2.5	38.9	1.5	10	25	2	46.3	42.4	-9.20
B1	2.0	34.0	0.8	10	25	2	37.1	38.2	2.88
B2	2.0	36.8	1.2	10	25	2	37.1	41.2	9.95
B3	2.0	39.6	1.6	10	25	2	37.1	39.7	6.55
B4	2.0	42.4	2.0	10	25	2	37.1	40.4	8.17
C1	2	39.6	1.6	10	25	2	37.1	39.7	6.55
C2	2	58.3	1.6	10	25	3	37.1	37.6	1.33

### 3 结果与讨论

#### 3.1 准静态压缩的力学性能

本研究对二级层级褶皱夹芯结构进行准静态压缩数值模拟。将层级结构的概念应用到波纹夹芯结构下，研究二级层级褶皱夹芯结构在压缩载荷下的准静态压缩力学行为，并分析不同小支撑数量  $n$  的 SHCS 结构的褶皱机理、变形模式和吸能特性。

图 6 为褶皱机理示意图及褶皱角度的变化情况，给出 SHCS 单侧结构在压缩过程中褶皱的形成， $\beta$  表示褶皱区域的角度，随着应变增加， $\beta$  从  $180^\circ$  开始递减。图 7 给出了结构的典型变形过程和失效情况。其中，几何参数  $t=2$  mm、 $t_1=16$  mm、 $l_1=10$  mm 和  $b=50$  mm。随着小支撑数量  $n$  的增加，结构的变形模式由渐进屈曲逐渐向整体屈曲转变。其中，当  $n=2$  和  $n=3$  时，结构呈现渐进屈曲模式，大支撑和小支撑形成的褶皱较为均匀，随后向两侧传递， $\varepsilon=0.1$  时，褶皱角度  $\beta$  为  $140^\circ$  左右，随后均匀递减，其随应变增加的下降速率相对较缓；当  $n=4$  时，结构表现为过渡屈曲模式，表现出非均匀的扩散变形，且变形模式稳定性较差，导致不同模拟中褶皱角度结果存在差异。当  $n \geq 5$  时，结构为整体屈曲模式，更易发生侧向失稳，在较大的应变下，结构呈现出非常规则的“之”字形变形，与渐进

屈曲相比，并未在每个大支撑和小支撑连接处都形成褶皱。 $\varepsilon = 0.1$ 时， $n \geq 5$ 的构件在变形初期迅速降至  $120^\circ$ 左右，即在较小应变下褶皱形成较快，且褶皱角度随应变增加的下陷趋势相对较快。

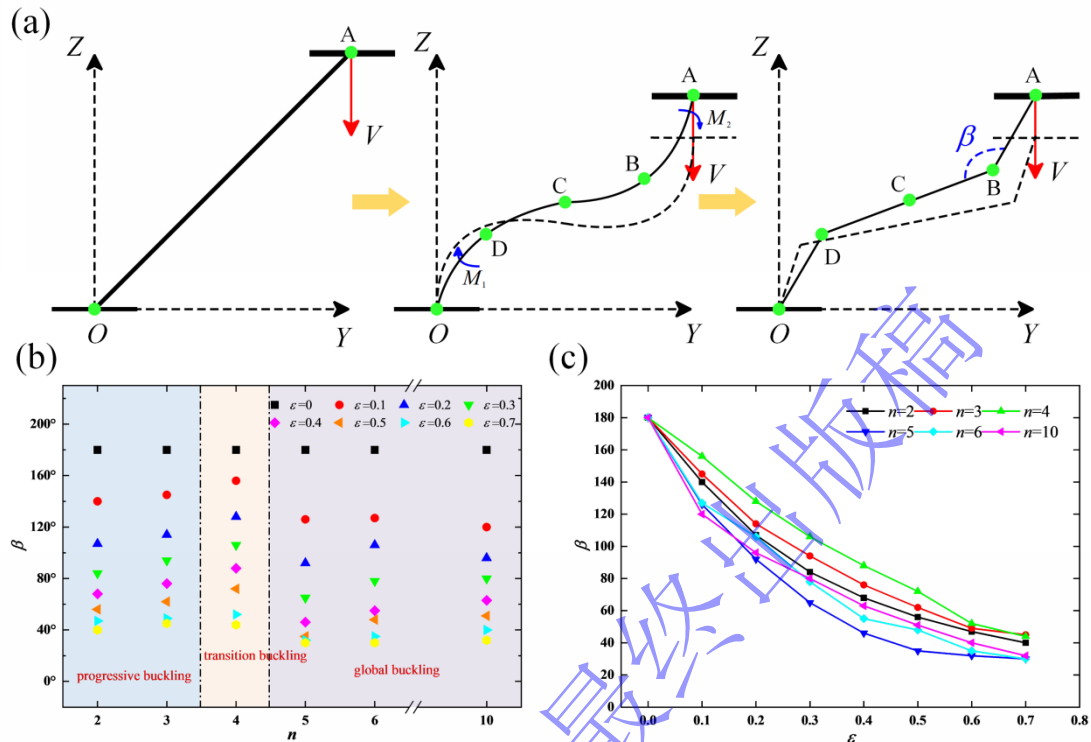


图6 褶皱机理示意图及褶皱角度变化 (a) 褶皱机理示意图 (b) 不同  $n$  下褶皱角度的变化 (c) 不同应变下褶皱角度的变化

Fig.6 Schematic diagram of folding mechanism and changes in folding angle (a) Schematic diagram of folding mechanism (b) Changes in the folding angle for different values of  $n$  (c) Changes in the folding angle under different strains

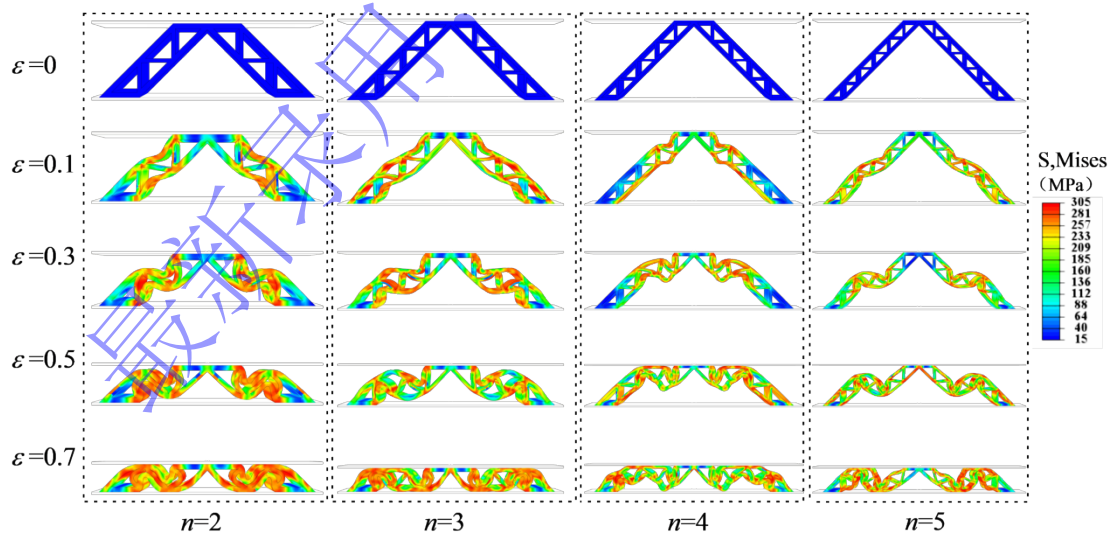


图7 不同  $n$  结构的变形模式  
Fig.7 Deformation modes of structures for different values of  $n$

由图 8(a)可知，SHCS 结构压缩失效过程由三个阶段组成：弹性阶段、塑性变形阶段和密实化阶段。在弹性阶段，随着上压板压缩，载荷随位移线性增加并出现峰值载荷；在塑性变形阶段，载荷下降进入平台段， $n=2$ 的 SHCS 结构出现波动，在  $\varepsilon=0.32$ 处出现载荷上升的情况，结合图 7 可以对比得出，这是由于褶皱形成伴随着小支撑变形加剧。对于  $n=3$  的

SHCS 结构来说, 力位移曲线没有出现明显波动, 最大化了结构的致密化应变。 $n=5$  的 SHCS 结构中, 部分小支撑结构未发生明显变形, 平均承载力较低未能有效抵抗冲击; 在密实化阶段, 胞壁相互挤压导致应力迅速增大, 结构完全被压实。本研究以达到密实化起始点 (D 点) 时的位移作为计算比吸能的依据。

从图 8(b)可见,  $n=2$  的结构更早到达密实化点, 其峰值载荷以及平均承载力较高, 从而提高了能量吸收效率。因此,  $n=2$  的 SHCS 结构变形充分, 比吸能 (SEA) 更高, 缓冲吸能效果较好。 $n=3$  的 SHCS 结构峰值载荷不高以及变形过程中载荷变化较为稳定, 不易对被保护物体造成显著破坏。而对于较大  $n$  值的 SHCS 结构, 其平均承载力较低, 能量吸收效率较差。

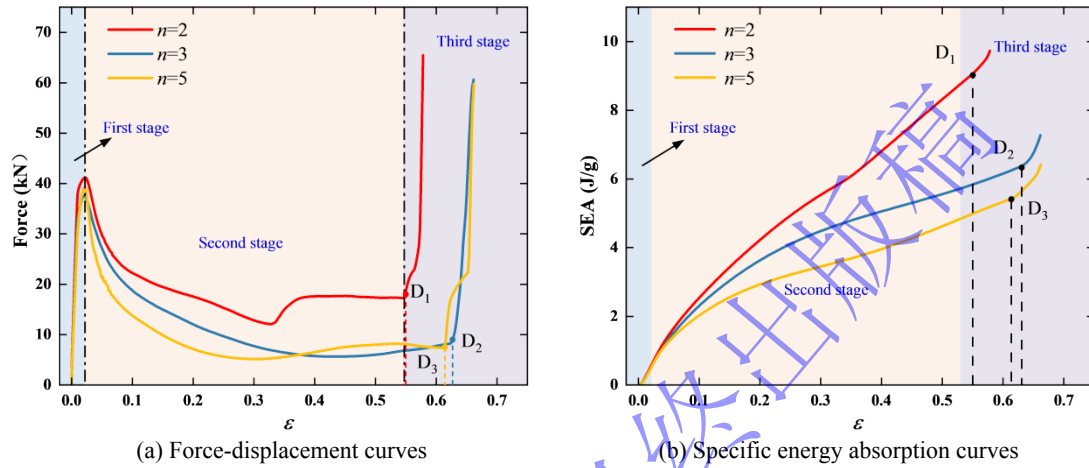


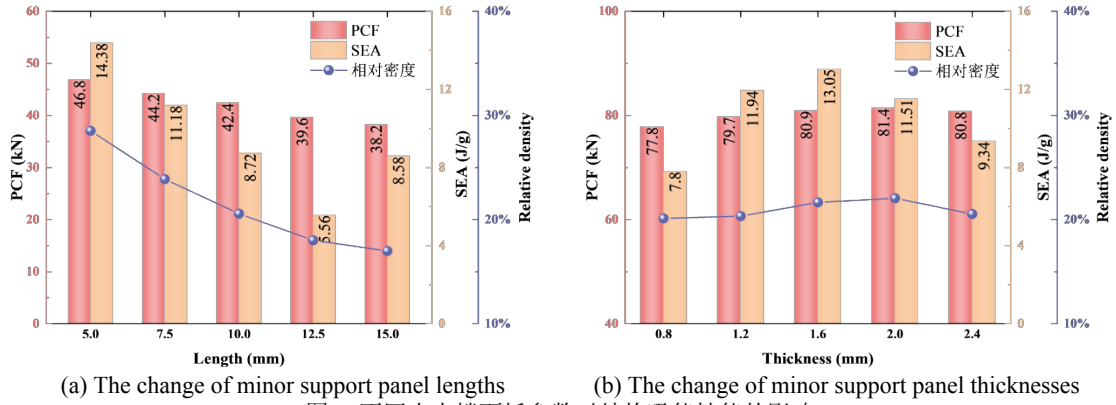
图 8 不同  $n$  结构的力-位移曲线和 SEA 变化曲线  
Fig.8 Force-displacement curves and SEA variation curves of structures with different  $n$  values

### 3.2 小支撑结构参数分析

在进行二级层级褶皱夹芯结构吸能特性的参数化分析时, 为探究小支撑结构对夹芯结构抗冲击性能的影响, 系统研究了准静态压缩下小支撑面板长度和厚度对能量吸收和结构相对密度的影响规律, 能够综合反应几何参数对材料利用率的影响。

图 9(a)是不同小支撑面板长度对 SHCS 结构吸能特性的影响。其中长度取值为 5 mm、7.5 mm、10 mm、12.5 mm 和 15 mm, 其余参数为  $n=2$ 、 $t=t_1=2$  mm、 $b=25$  mm。可以看出, 随着小支撑面板长度的增加, 导致 SHCS 结构整体体积增大, 从而使夹芯结构相对密度呈下降趋势, 由 28.52% 下降至 16.98%。峰值载荷 PCF 略有下降, 有利于抑制冲击过载。从吸能方面来看, 小支撑长度在 5 mm~12.5 mm 的 SHCS 结构的 SEA 值来说差异过大, 总体呈衰减趋势, 这主要是由于小支撑面板长度增加伴随结构质量增加, 从而使 SEA 下降, 这并不有利于结构的轻量化设计。尽管对于长度为 15.0 mm 的 SHCS 结构来说, 能量吸收特性增强, 但 SEA 仍处于较低值。这说明单纯依赖小支撑面板长度的增加并不能有效提升抗冲击性能。

本研究就小支撑面板厚度为 0.8 mm、1.2 mm、1.6 mm、2.0 mm 和 2.4 mm 的 SHCS 结构进行了吸能特性分析, 如图 9(b)所示。其余参数为  $n=2$ ,  $t=2$  mm,  $l_1=10$  mm,  $b=50$  mm。与改变小支撑面板长度不同, 改变小支撑面板厚度对二级层级褶皱夹芯结构的相对密度影响不大, 相对密度为 20%~22%, 都有较高的材料利用率。从吸能方面来看, 随着小支撑面板厚度从 0.8 mm 增加到 2.4 mm, 峰值载荷并未展现明显的变化趋势, 并且具有相似的值, 这与理论表达式是相吻合的, 而 SEA 先是逐渐增加, 然后开始下降。其中小支撑面板厚度为 1.6 mm 的结构具有最优的缓冲吸能特性, 在此厚度下, 胞壁可产生稳定且均匀的塑性较。相比于较薄结构 (0.8~1.2 mm) 因局部过早压溃导致的应力集中, 以及较厚结构 (2.0~2.4 mm) 因刚度较大而导致的变形不充分, 1.6 mm 厚度的结构能够在压缩行程中充分利用材料的塑性变形以耗散能量。



(a) The change of minor support panel lengths (b) The change of minor support panel thicknesses  
图9 不同小支撑面板参数对结构吸能性能的影响

Fig.9 Effect of different minor support panel parameters on the energy-absorption performance of structures

综上所述,小支撑壁厚的强度对结构局部屈曲和破坏的抵抗力能力增强,且因塑性变形吸收更多能量。小支撑面板增加厚度可以增加 SHCS 结构的承载力和刚度,但是要增加结构的总吸收能量和比吸能要选择合适厚度的结构。

### 3.3 动态载荷下的力学响应

本文研究了不同冲击速度下二级层级褶皱夹芯结构的动态响应特性,如图 10 所示,结构参数  $n=3$ 、 $t=2$  mm、 $t_1=1.6$  mm、 $l_1=10$  mm 和  $b=25$  mm。峰值载荷理论计算结果为 37.1 kN。随着冲击速度的增加,结构失效模式发生变化。在低速阶段 ( $v=1\sim 10$  m/s) 时,失效变形区域由中间向两端扩散。随着冲击速度增加,褶皱区域明显增多,褶皱角度形成更快,且初始褶皱角度由向内变形转变为向外变形。当 SHCS 结构继续变形时,高速冲击下,结构依赖大量褶皱来吸收更多的能量。

图 11 进一步分析了冲击速度对力-位移曲线和比吸能变化的影响规律。结果表明:静态加载的峰值载荷与理论计算结果相吻合,当动态加载速度为 30 m/s 时,峰值载荷为 44.0 kN,与理论计算结果的误差为 15.7%。当动态加载速度为 60 m/s 时,峰值载荷为 58.0 kN,与理论计算结果的相对误差为 36.0%。当加载速度高于 30 m/s 时,由于应变率效应增强,结果存在一定的误差。进入平台期后,在低速冲击条件 ( $v=1\sim 10$  m/s) 下,力-位移曲线呈现平缓的平台区域。随着冲击速度的提升,曲线峰值载荷明显增长,波动幅度加剧,这是由于惯性效应增强。结合图 11(b),从比吸能变化曲线中可以看出,随着冲击载荷的增大,结构能量吸收效率高,SEA 值越大。

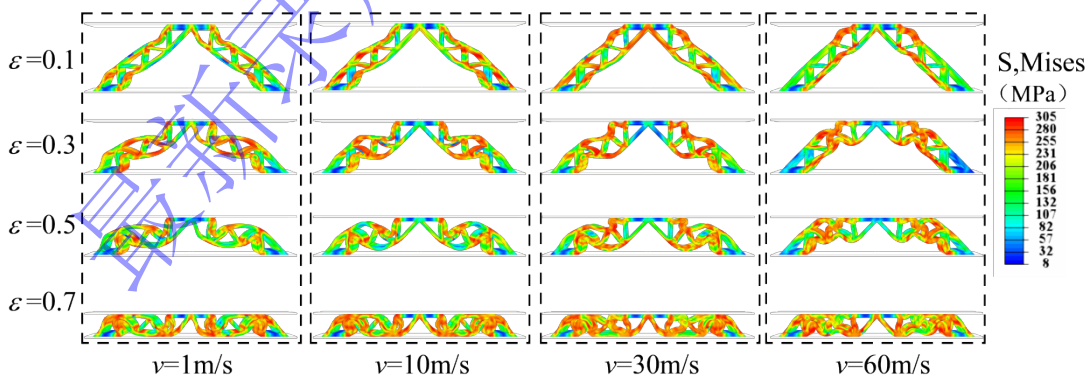


图 10 不同冲击速度下 SHCS 结构的变形模式  
Fig.10 Deformation modes of SHCS structures under different impact speeds

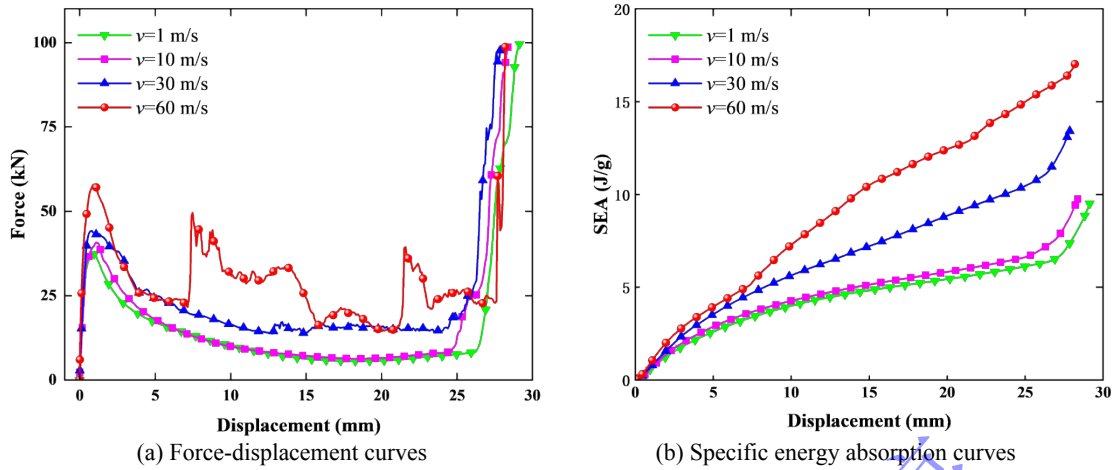


图 11 不同冲击速度下 SHCS 结构的力-位移曲线和 SEA 变化曲线  
Fig.11 Force-displacement curves and SEA variation curves of SHCS structures at different impact velocities

本研究基于准静态压缩和动态压缩仿真数据, 分析了不同冲击速度下各小支撑厚度结构的缓冲吸能特性, 如图 12 所示。其中  $n=2$ 、 $t=2$  mm、 $l_1=10$  mm 和  $b=25$  mm。当冲击速度为 1 m/s 时, 系统的动能仅占内能的 1% 以下, 此时结构变形行为与准静态压缩表现出高度一致性。研究表明: 在相同厚度条件下, 冲击速度越快, 能量吸收效果越好; 在准静态及低速冲击 ( $v=1\sim 10$  m/s) 工况下, 1.6 mm 小支撑厚度的 SHCS 结构展现出最优的 SEA 值, 而 PCF 值较高不利于被保护物体的防护。当冲击速度提升至 30 m/s 时, 较大厚度 (1.6~2.4 mm) 的 SHCS 结构的吸能优势逐渐显现, PCF 值呈现上升趋势。在高速冲击 (60 m/s) 条件下, 夹芯结构的抗冲击性能表现出显著的速度敏感性, 同时 SHCS 结构的峰值载荷和比吸能随小支撑厚度的增加而提高, 这一现象源于高速载荷下应力波传播主导变形模式, 较厚的支撑结构能够延缓局部压溃波的扩展, 通过推迟密实化点, 从而提升能量吸收能力。

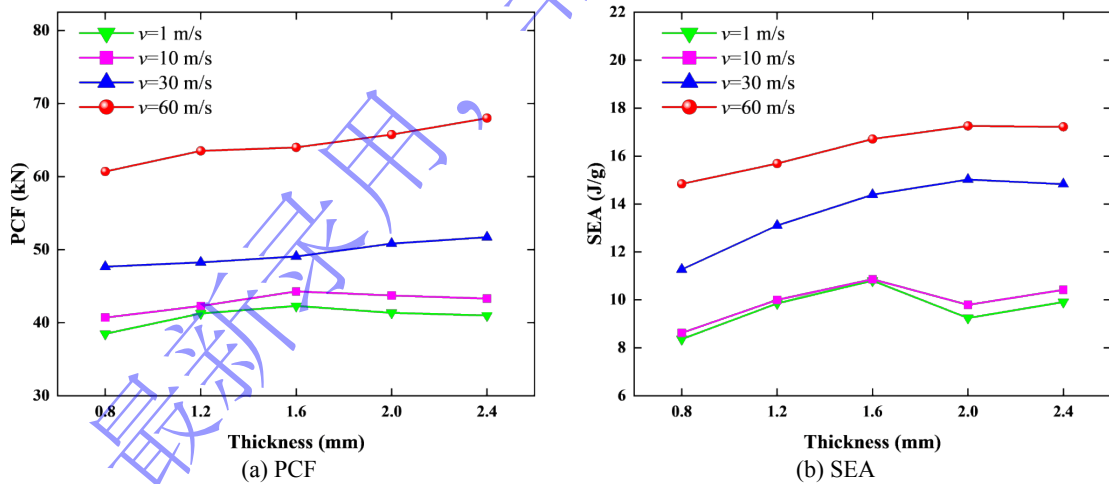


图 12 不同冲击速度和小支撑面板厚度下的 PCF 和 SEA  
Fig.12 PCF and SEA values for different impact speeds and minor support panel thicknesses

## 4 结论

本文提出了一种二级层级褶皱夹芯结构, 通过理论分析和数值模拟的方法研究其在不同冲击载荷下的变形行为和缓冲吸能特性, 采用有限元软件 ABAQUS 软件对其进行准静态压缩和动态压缩, 探究了不同  $n$  结构的变形模式和褶皱形成机理, 分析了小支撑结构参数以及不同冲击速度对其抗冲击性能的影响规律, 本文得到主要结论如下:

(1) 对二级层级褶皱夹芯结构进行理论分析, 推导出结构等效应力及峰值载荷, 结果表明理论计算结果与有限元结果误差在 10% 以内。

(2) 在准静态压缩载荷下,  $n=2$  和  $n=3$  的 SHCS 结构为渐进屈曲模式,  $n=4$  的 SHCS 结构为过渡屈曲模式,  $n \geq 5$  的 SHCS 结构为整体屈曲模式。随着小支撑面板长度的增加, SEA 呈下降趋势, 能量吸收性能变差; 随着小支撑面板厚度的增加, 比能量吸收呈现抛物线趋势, 1.6 mm 的结构表现出最高 SEA 值和较低的 PCF, 缓冲吸能特性最优。

(3) 二级层级褶皱夹芯结构的 PCF 和 SEA 随冲击速度和加载位移的提高而增大。在低速冲击条件下, 结构的能量吸收特性与准静态压缩工况相似。随着冲击速度提升到中速区间, 较厚结构的吸能优势逐渐显著。而在高速冲击工况下, 夹芯结构的 PCF 和 SEA 随小支撑面板厚度的增加呈现明显的增长趋势。

受实验条件、理论简化等因素的限制, 本文仍存在一定的局限性: 几何模型的简化, 构件假设为理想各向同性均质材料制成, 变形满足小变形条件, 忽略横向剪切变形; 静态失效理论方面, 研究基于忽略短波失效模式的假设建立理论模型; 实验验证方面, 尚缺乏充分的实验验证支撑。后续研究将进一步完善模型, 以提升研究的适用范围和工程应用价值。

## 参考文献

- [1] RONG Y, LIU J X, LUO W, et al. Effects of geometric configurations of corrugated cores on the local impact and planar compression of sandwich panels[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 152: 324-335.
- [2] ZHU F, WANG Z H, LU G X, et al. The impulsive response of aluminium foam core sandwich structures[J]. *International Journal of Materials Engineering Innovation*, 2009, 1: 133-153.
- [3] GUO H Y, YUAN H, ZHANG J X, et al. Review of sandwich structures under impact loadings: Experimental, numerical and theoretical analysis[J]. *Thin-Walled Structures*, 2024, 196: 111541.
- [4] SUN S Y M, SHENG Y L, FENG S S, et al. Heat transfer efficiency of hierarchical corrugated sandwich panels[J]. *Composite Structures*, 2021, 272: 114195.
- [5] XIA F K, PANG T, SUN G Y, et al. Longitudinal bending of corrugated sandwich panels with cores of various shapes[J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 173: 109001.
- [6] CHENG Y Q, LIU K, LI Y, et al. Experimental and numerical simulation of dynamic response of U-type corrugated sandwich panels under low-velocity impact[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 245: 110492.
- [7] CAO B T, HOU B, LI Y L, et al. An experimental study on the impact behavior of multilayer sandwich with corrugated cores[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2017, 109: 33-45.
- [8] 胡旭初, 付涛. 低速冲击下波纹夹芯板的动态响应分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2025, 46(04): 797-805.  
HU X C, FU T. Dynamic response analysis of corrugated sandwich plates under low-velocity impact[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2025, 46(04): 797-805.
- [9] 魏建辉, 李旭, 黄威, 等. 高速冲击载荷下梯度金属泡沫夹芯梁的动态响应与失效[J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(05): 101-111.  
WEI J H, LI X, HUANG W, et al. Dynamic response and failure of sandwich beams with graded metal foam core under high-velocity impact[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(05): 101-111.
- [10] PAN X, CHEN L M, DENG J Q, et al. Low-velocity impact response of thermoplastic composite sandwich panels with the intersected corrugated core[J]. *Composite Structures*, 2023, 324: 117574.
- [11] 易晓菲, 彭克锋, 常白雪, 等. 仿爆炸加载下仿生梯度双波纹结构的动态响应[J]. *兵工学报*, 2025, 46(10): 294-303.  
YI X F, PENG K F, CHANG B X, et al. Dynamic response of biomimetic gradient double corrugated structure under simulated blast load[J]. *Acta Armamentarii*, 2025, 46(10): 294-303.
- [12] SUN J, LI H H, PENG H K, et al. Low-velocity impact response of bio-inspired multi-sinusoidal corrugated sandwich structure[J]. *Engineering Structures*, 2026, 353: 122321.
- [13] ZHANG Q L, FANG H, ZHU L, et al. Impact behavior of corrugated-core infilling foam sandwich composite structure[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17: e01418.
- [14] DANG W, LIU X T, SUN B H. Bending response of integrated multilayer corrugated sandwich panels[J]. *Applied Composite Materials*, 2023, 30(5): 1493-1512.
- [15] HOU S J, SHU C F, ZHAO S Y, et al. Experimental and numerical studies on multi-layered corrugated sandwich panels under crushing loading[J]. *Composite Structures*, 2015, 126: 371-385.
- [16] XU X, ZHANG Y, WANG J, et al. Crashworthiness design of novel hierarchical hexagonal columns[J]. *Composite Structures*, 2018, 194: 36-48.

- [17] ZHANG Z, LEI H S, XU M C, et al. Out-of-plane compressive performance and energy absorption of multi-layer graded sinusoidal corrugated sandwich panels[J]. *Materials & Design*, 2019, 178: 107858.
- [18] LIU H C, CHEN L M, et al. Axial compression deformability and energy absorption of hierarchical thermoplastic composite honeycomb graded structures[J]. *Composite Structures*, 2020, 254: 112851.
- [19] BI G J, YIN J P, WANG Z J, et al. Impact resistance analysis of a composite double-layer honeycomb sandwich structure[J]. *Strength of Materials*, 2021, 53(1): 126-133.
- [20] YANG L H, SUI L, DONG Y L, et al. Quasi-static and dynamic behavior of sandwich panels with multilayer gradient lattice cores[J]. *Composite Structures*, 2021, 255: 112970.
- [21] KOOISTRA G W, DESHPANDE V, WADLEY H N G. Hierarchical corrugated core sandwich panel concepts[J]. *Journal of Applied Mechanics*. 2007, 74(2): 259-268.
- [22] 方耀楚, 吴文涛, 叶涛, 等. 局部失效缺陷下的二级层级褶皱结构失效机理研究[J]. *固体力学学报*, 2021, 42(06): 656-670.  
FANG Y C, WU W T, YE T, et al. Study on failure mechanism of hierarchical corrugated structure with a second-order core under local failure defects[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2021, 42(06): 656-670.
- [23] 冯根柱, 于博丽, 李世强, 等. 多层次夹芯结构的变形与能量吸收[J]. *高压物理学报*, 2019, 33(05): 191-200.  
FENG G Z, YU B L, LI S Q, et al. Deformation and energy absorption of multi-hierarchical sandwich structures. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(05): 191-200.
- [24] LI G, FANG Y C. Failure mode analysis and performance optimization of the hierarchical truss structure[J]. *Advances in Mechanical Engineering*. 2014, 6: 251591.
- [25] 方耀楚, 李刚. 基于板理论的层级褶皱结构失效模式分析[J]. *固体力学学报*, 2014, 35(3): 241-248.  
FANG Y C, LI G. Failure mode analysis of the structure with hierarchical corrugated truss core by using the theory of plate[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2014, 35(3): 241-248.
- [26] 李兆凯. 基于 Mindlin 理论的二级层级褶皱结构失效行为与优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.  
LI Z K. Failure behavior and optimization of hierarchical corrugated structure with second-order core based on Mindlin plate theory[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [27] GUO X X, FANG Y C, WU W T, et al. Failure mode analysis and validation of hierarchical sandwich structures under compression[J]. *Structures*. 2022, 45: 787-798.

## Energy Absorption and Cushioning Performance of Second-Order Hierarchical Corrugated Sandwich Structures under Static and Dynamic Loads

LIU Tao<sup>1,2</sup>, LI Zhaokai<sup>3,4</sup>, LIU Xiaoyong<sup>1</sup>, XIE Jiamiao<sup>2,5</sup>, HAO Wenqian<sup>2,5</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;

2. Shanxi Engineering Research Center of Unmanned Aerial Vehicle, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China;

3. Beijing Institute of Mechanical Equipment, Beijing 100854, China;

4. National Elite Institute of Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China;

5. School of Aeronautics and Astronautics, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China)

**Abstract:** Renowned for the nature of high specific stiffness and strength, lightweight, and excellent energy absorption capabilities, corrugated sandwich structures have found broad utility in fields such as aerospace and vehicle protection. This study introduces a hierarchical design concept into such structures by proposing a second-order hierarchical corrugated sandwich (SHCS) structure and

exploring its mechanical and impact performance. An analytical expression for the peak load is derived, and the discrepancy between the theoretical calculations and the finite element analysis results is within 10%. Using numerical simulation methods, the deformation modes of structures is investigated with different numbers of minor supports ( $n$ ). The deformation modes of structures are categorized into three modes: progressive buckling, transition buckling, and global buckling. Quasi-static compressive and dynamic impact responses of the structure are further analyzed under various impact velocities and geometric parameters of minor support structure, with particular focus on deformation mechanisms and energy absorption characteristics. The results indicate that under quasi-static compression, the thickness of minor support structure exerts a more significant influence on energy absorption. Increasing the thickness from 0.8 to 1.6 mm enhances the specific energy absorption by 67.3%. Under low-velocity impact, both the peak load and specific energy absorption follow a parabolic trend with increasing minor support panel thickness. During dynamic loading, the energy absorption performance of the structure improves as the impact velocity increases. Under high-velocity impact conditions, the peak load and specific energy absorption show an increasing trend with greater minor support panel thickness.

**Key words:** corrugated sandwich structure; hierarchical structure; impact resistance; energy absorption

最新录用，  
非最终出版稿