

高压物理学报

多层级夹芯结构的变形与能量吸收

冯根柱 于博丽 李世强 刘志芳

Deformation and Energy Absorption of Multi-Hierarchical Sandwich Structures

FENG Genzhu, YU Boli, LI Shiqiang, LIU Zhifang

引用本文:

冯根柱, 于博丽, 李世强, 等. 多层级夹芯结构的变形与能量吸收[J]. 高压物理学报, 2019, 33(5):000000. DOI: 10.11858/gywlb.20180707

FENG Genzhu, YU Boli, LI Shiqiang, et al. Deformation and Energy Absorption of Multi-Hierarchical Sandwich Structures[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2019, 33(5):000000. DOI: 10.11858/gywlb.20180707

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180707>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多三明治结构反应装甲干扰射流的数值模拟

Numerical Simulation of Interference Effect of Multi Sandwich Structure Reaction Armor to Jet
高压物理学报. 2018, 32(6): 065107 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180571>

二阶层级自相似四边形蜂窝动力压缩行为数值模拟

Dynamic Crushing Response of Self-Similar Second Order Hierarchical Square Honeycombs
高压物理学报. 2017, 31(4): 358 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2017.04.002>

管廊内燃气爆炸作用下不同抗爆结构性能研究

Anti-Explosion Performance of Different Anti-Explosion Structures under Gas Explosion in Pipe Gallery
高压物理学报. 2019, 33(4): 045204 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180640>

爆炸冲击波在仿桥梁结构内传播的数值模拟

Numerical Simulation of Explosive Shock Wave Propagation in Imitation Bridge Structure
高压物理学报. 2019, 33(4): 042301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20180649>

爆炸载荷下V型泡沫铝夹芯板的动态响应

Dynamic Response of V-Shaped Sandwich Panel under Blast Loading
高压物理学报. 2016, 30(6): 484 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2016.06.008>

氧化锌的高压电子结构、光学性质与电性能的理论研究

Theoretical Investigation on Electronic Structure, Optical Properties and Electrical Properties of Zinc Oxide under High Pressure
高压物理学报. 2016, 30(2): 101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.2016.02.003>

DOI: 10.11858/gywlxb.20180707

多层级夹芯结构的变形与能量吸收

冯根柱^{1,2}, 于博丽^{1,2}, 李世强^{1,2}, 刘志芳^{1,2}

(1. 太原理工大学应用力学研究所, 山西 太原 030024;

2. 山西省结构冲击与材料强度重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要:采用数值模拟与理论分析相结合的方法研究了多层级波纹板夹芯结构在准静态压缩载荷下的变形规律与能量吸收性能,建立了结构临界失效载荷的计算公式,并与数值模拟结果进行了对比,理论预测与数值模拟结果吻合较好。分析了芯层厚度对二级芯层结构在压缩载荷下的变形模式及能量吸收性能的影响,并与一级结构进行了对比。结果表明:二级芯层结构的能量吸收性能显著优于一级芯层结构;随着结构芯层厚度增加,二级结构的比吸能和载荷效率增大;芯层厚度较小时二级单层结构的比吸能高于二级双层和三层结构,二级双层结构的比吸能略高于二级三层结构。

关键词:层级结构;夹芯结构;能量吸收;数值模拟

中图分类号:O341

文献标识码:A

夹芯结构由于具有较好的吸能缓冲性能以及较高的比强度和比刚度,被广泛应用于航空航天、交通运输、航海等领域。近年来随着对夹芯板研究的不断深入,提出了各种桁架夹芯和褶皱型夹芯等形式。其中,层级结构思想引起了众多学者的关注。Lakes^[1]通过研究发现,层级结构与非层级结构相比具有更加显著的刚度和强度,同时也具有足够的稳定性及可靠性。Zhang等^[2-3]通过梯形波纹板夹芯结构的静态压缩和低速冲击实验,研究了不同芯层材料、不同载荷下结构的能量吸收和变形过程,结果表明不同芯层材料和冲击能量下结构的能量吸收性能不同。Hou等^[4]对不同层数的梯形夹芯板结构进行了实验研究,发现不同层数结构的能量吸收性能不同。Meza等^[5]对多层级桁架结构的演变模式进行了分析,提出了几种不同结构的破坏形式和变形模式。Kooistra等^[6]研究了层级波纹板结构的6种失效模式,并给出了结构在不同相对密度及角度下的破坏机理图。Velea等^[7]提出了一种制备二级夹芯结构的方法,将一级波纹板结构芯层替换为多孔填充芯层,通过实验和理论分析发现,二级结构有着良好的刚度和强度。Wu等^[8]将金字塔型夹芯结构的芯层替换为层级夹芯结构,理论推导出了结构的等效刚度,通过实验研究了芯层几何参数对结构变形模式的影响,并总结出结构的6种不同变形模式。Wu等^[9]设计了二级金字塔形夹芯结构,进行了理论分析和数值模拟,结果表明二级芯层结构具有较好的强度和稳定性。Liu等^[10]将传统格栅夹芯结构芯层板替换为蜂窝夹芯结构,通过实验研究和数值模拟研究发现,在压缩载荷下二级芯层结构有着较好的能量吸收性能和稳定的变形性能,在轻量化和能量吸收方面具有更好的工程应用前景。

多孔结构及蜂窝结构有着良好的力学性能和能量吸收性能^[11]。Jing等^[12]通过实验研究了3种不同多孔芯层夹芯板结构在脉冲载荷下夹芯板的变形模式,结果表明不同芯层夹芯结构的变形模式不同,芯层和面板尺寸不同的夹芯结构的力学性能不同。Chen等^[13-14]根据层级蜂窝结构的设计理论设

* 收稿日期: 2018-12-27; 修回日期: 2019-01-15

基金项目: 国家自然科学基金(11772216, 11602161)

作者简介: 冯根柱(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事冲击动力学研究。

E-mail: fenggenzhu0989@link.tyut.edu.cn

通信作者: 刘志芳(1971—), 女, 副教授, 主要从事冲击动力学研究。E-mail: liuzhifang@tyut.edu.cn

计了不同芯层形式的层级蜂窝结构,并由理论分析得到结构变形模式,利用有限元对结构变形模式进行了验证,与传统蜂窝结构相比,层级蜂窝结构具有更好的能量吸收性能。Yin^[15]、Qiao^[16]等利用有限元软件对层级蜂窝结构进行了数值模拟,研究结果表明层级蜂窝结构的力学性能远优于传统蜂窝。

已有的研究主要集中于传统波纹板夹芯结构和层级蜂窝结构,关于多层级夹芯结构的力学性能与能量吸收的研究较少。本研究基于波纹板夹芯结构,设计了3种二级波纹板夹芯结构,通过理论分析和数值模拟相结合的方法研究一级和二级夹芯结构的变形模式与能量吸收性能,理论预测结构的临界失效载荷;建立不同芯层层数的二级波纹板夹芯结构的有限元模型,研究不同芯层厚度对多层级波纹板夹芯结构变形模式和能量吸收性能的影响,并传统的一级夹芯波纹板结构进行对比,分析其比吸能与结构效率。

1 层级夹芯结构的芯层设计和理论分析

1.1 芯层结构设计

根据层级蜂窝结构的设计理论,将一级梯形波纹板夹芯结构的芯层替换为三角形多孔夹芯结构,共设计了3种芯层结构,如图1所示。图1(a)为一级波纹板夹芯结构的芯层,斜板长度为 l_a ,顶板长度为 l ,斜板角度为 ω ,芯层板厚度为 t_a ;二级结构的芯层如图1(b)、图1(c)和图1(d)所示,其中图1(b)为二级单层结构,图1(c)和图1(d)分别为二级双层和三层结构,二级结构芯层由大支撑面板和小支撑构成,水平方向小支撑为横向小支撑。二级结构中不同层数结构的尺寸参数相同,斜向大支撑面板长度为 l_a ,厚度为 t_a ,小支撑长度为 l_b ,厚度为 t_b ,小支撑与外板角度均为 θ ,外板与水平方向夹角为 ω 。结构垂直于纸面方向的厚度为30 mm。

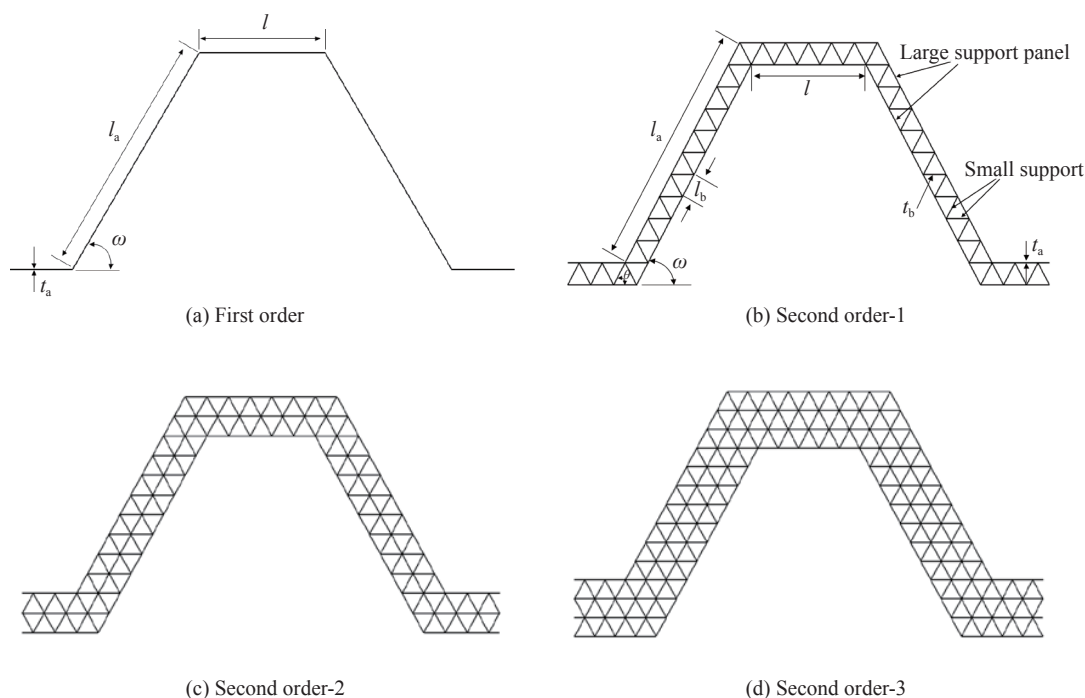


图1 芯层结构模型设计

Fig. 1 Corrugated core design of sandwich structure

1.2 理论分析

小支撑厚度与大支撑面板厚度相同的结构模型如图2所示,在外部载荷 F_x 和 F_y 作用下考虑横向小支撑的变形,基于小变形假设,由受力分析可以得到结构变形和力之间的关系,通过几何分析可以得到合力与变形之间的关系

$$\begin{cases} \frac{F_x}{2} = F_n \cos \omega + F_t \sin \omega \\ \frac{F_y}{2} = F_n \sin \omega - F_t \cos \omega \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \delta_x = \delta_n \cos \omega + \delta_t \sin \omega \\ \delta_y = \delta_n \sin \omega - \delta_t \cos \omega \end{cases} \quad (2)$$

式中: F_x 和 F_y 分别为沿 x 轴和 y 轴的外部载荷, δ_x 和 δ_y 为沿 x 轴和 y 轴的变形, F_n 和 F_t 分别为夹芯夹层在外部载荷下的轴向压缩分量和剪切分量, δ_n 和 δ_t 分别为夹芯夹层的轴向变形和剪切变形。

当只有 F_x 作用时, $\delta_y=0$, $\delta_x \neq 0$, 此时有

$$F_n = EA \frac{\delta_n}{l} = \frac{F_x}{2 \cos \omega} \quad (3)$$

$$\delta_n = \frac{F_n l}{EA} \quad (4)$$

式中: EA 为夹芯夹层截面的抗拉刚度。由结构几何关系可知

$$\delta_x = \frac{\delta_n}{\cos \omega} \quad (5)$$

当只有 F_y 作用时, $\delta_y \neq 0$, $\delta_x=0$, 此时有

$$F_n = EA \frac{\delta_n}{l} = \frac{F_y}{2 \sin \omega} \quad (6)$$

同样有

$$\delta_y = \frac{\delta_n}{\sin \omega} \quad (7)$$

当结构芯层为二级结构时, 如图 2(d) 所示, (1) 式~(7) 式仍然成立。根据文献 [17] 给出的不同尺寸比下结构的失效机制, 当 $l_b/l_a > \sqrt{\varepsilon_y}/\pi \sin \theta$ (其中 ε_y 为材料屈服应变) 时层级结构出现大支撑面板塑性屈服的失效模式。本研究中结构模型的尺寸满足上述条件, 因此失效模式为大支撑面板发生塑性屈服, 即大支撑面板达到材料屈服应力时结构失效。由 (1) 式和 (2) 式可得单胞结构大支撑面板在 y 方向上发生塑性屈服时结构的合力

$$F_y = (2n+2) \sigma_y b t_n \sin \omega \quad (8)$$

式中: n 为二级结构层数, b 为结构垂直于纸面方向的厚度, σ_y 为屈服应力。

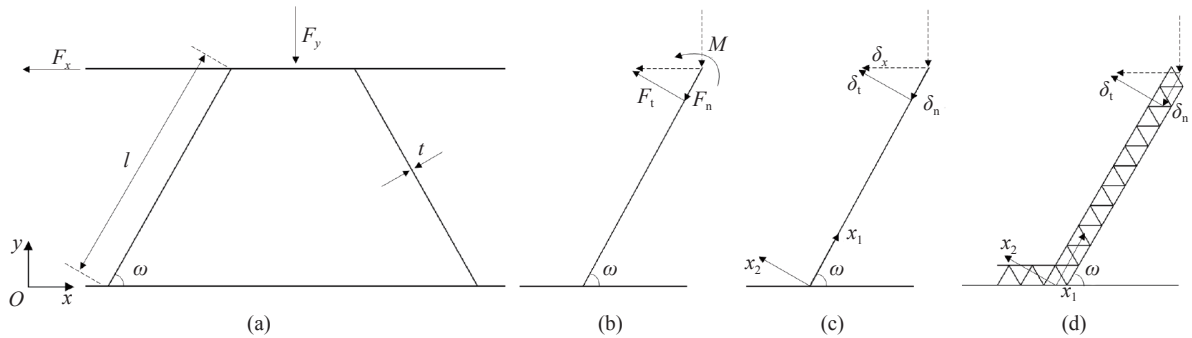


图 2 结构单胞受力示意图

Fig. 2 Force diagram of structural unit cell

根据结构变形模式, 考虑横向小支撑的变形, 如图 3 所示, F_b 为横向小支撑在 y 方向的力, δ_b 为 δ_n 在 y 方向的分量, 由此可知

$$\delta_b = \frac{F_b l_b^3}{3D} \quad (9)$$

弯曲刚度

$$D = \frac{Et_b^3}{12(1-\nu^2)} \quad (10)$$

式中: E 为弹性模量, ν 为泊松比。由此可以得到

$$F_b = 2n \frac{\sigma_y t_b^3 \sin \omega}{4(1-\nu^2) l_b^2} \quad (11)$$

式中: t_b 和 l_b 分别为二级结构芯层小支撑厚度和长度。二级结构单胞在 y 方向的合力为

$$F_y = F_{y'} + F_b \quad (12)$$

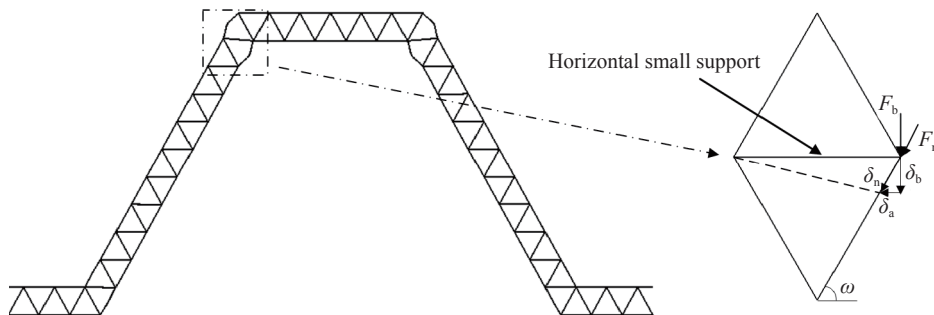


图3 小支撑变形示意图

Fig. 3 Deformation diagram of the horizontal small supporter

2 有限元模型

有限元模型主要包括3部分: 刚性压板、刚性支撑底板和波纹板夹芯结构。波纹板夹芯结构由芯层和上、下面板构成, 上、下面板设置为刚体, 厚度为2 mm。图4为二级双层结构有限元模型。波纹板夹芯结构和下部底板采用壳单元, 刚性压板采用实体单元。刚性压板速度 $V=1$ m/s, 下部刚性底板固定, 中部波纹板夹芯结构芯层与上、下两面板之间采用绑定约束。结构材料为铝合金6061-T6, 材料参数如表1所示, 其中 ρ 为密度。图5为材料应力-应变曲线^[6]。结构单元类型采用四节点线性缩减积分壳单元(S4R), 单元特征长度 $L=1$ mm。芯层和上、下面板为自接触, 刚性压板与上面板、底板与下面板为面面接触, 静摩擦系数和动摩擦系数分别为0.20和0.15^[18]。

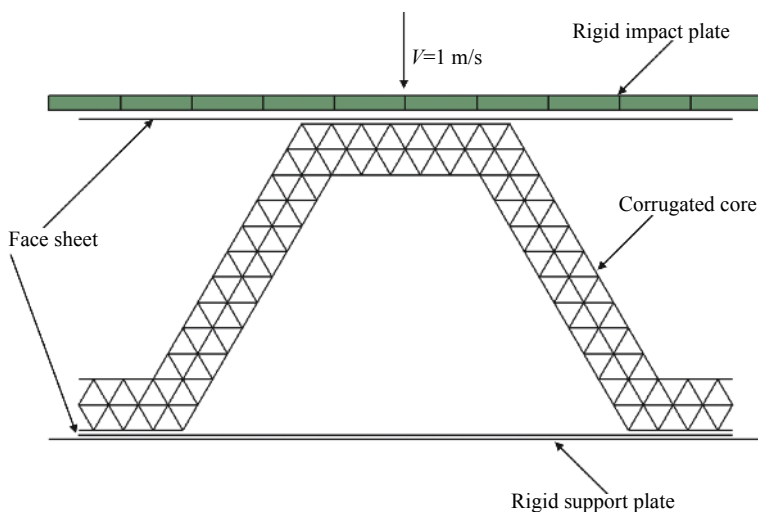


图4 层级波纹板夹芯结构有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the hierarchical corrugated core sandwich structure

2.1 准静态分析

利用 LS-DYNA 进行准静态分析时^[19]: 首先在模拟过程中结构动能要相对于内能较小, 其次结构的力-位移曲线相对于速度的变化是稳定的。如图 6(a) 所示, 结构在压板速度为 0.5 m/s 和 1.0 m/s 时动能相对于内能较小, 结构整体内能受速度变化的影响较小; 图 6(b) 为结构在压板速度为 0.5 m/s 和 1.0 m/s 时的力-位移曲线, 可以看出两条曲线的重合度较高, 速度变化对结构力-位移曲线的影响较小。通过对结构进行网格敏感性验证, 并考虑到计算时间等因素, 计算时取压板的速度为 1.0 m/s, 网格单元尺寸为 1 mm。

2.2 能量吸收指标

为了评估结构的能量吸收性能^[20], 选取总能量吸收 (E_A)、平均载荷 (P_m)、比吸能 (ξ_{E_A})、载荷效率 (A_E) 4 个评价指标。

表 1 6061-T6 铝合金材料性能

Table 1 Material properties of aluminum 6061-T6

Material	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	σ_y/MPa	E/GPa	ν
Al 6061-T6	2.700	251	69	0.33

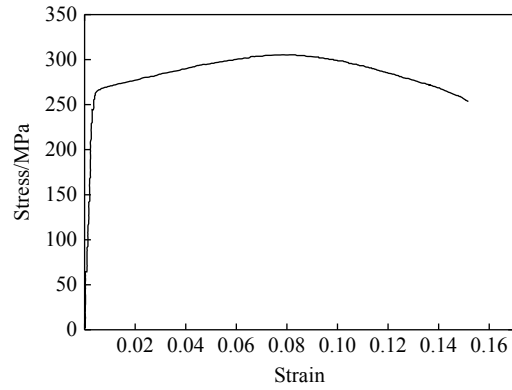


图 5 6061-T6 铝合金材料的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of Al 6061-T6

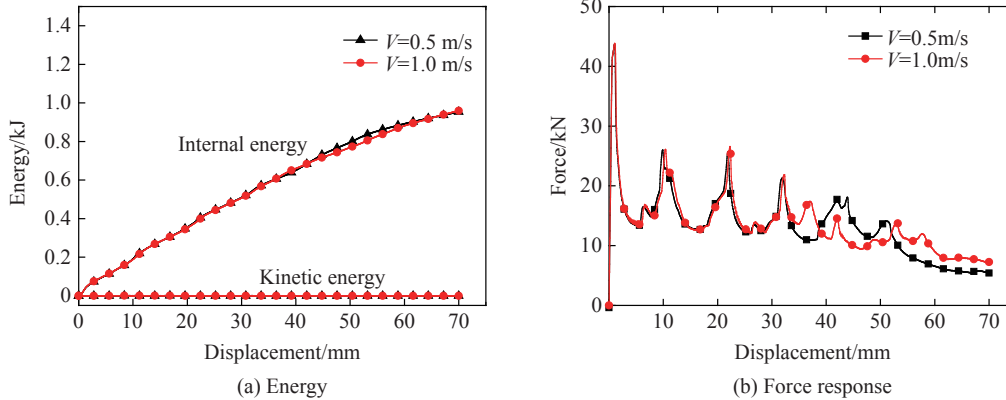


图 6 准静态分析

Fig. 6 Quasi-static simulation

总能量吸收 E_A 为结构在变形过程中吸收的能量

$$E_A = \int_0^{\delta} F(x)dx \quad (13)$$

式中: δ 为结构的变形位移 (取 $\delta=70$ mm), $F(x)$ 为压缩过程中的瞬时载荷。

平均载荷 P_m 定义为单位变形长度的能量吸收

$$P_m = E_A/\delta \quad (14)$$

比吸能 ξ_{E_A} 定义为结构单位质量的能量吸收

$$\xi_{E_A} = E_A/m \quad (15)$$

式中: m 为结构总质量。比吸能越大, 结构的能量吸收性能越好。

载荷效率定义为平均载荷与峰值载荷的比值

$$A_E = P_m/P_k \quad (16)$$

式中: P_k 为峰值载荷。较好的吸能结构应该具有较大的载荷效率, 并且力-位移曲线波动较小。

3 模拟结果与分析

3.1 芯层板厚度的影响

建立一级和二级结构模型, 其中一级结构芯层壁厚为 2 mm, 二级结构模型中 $t_a=t_b$, 即二级结构内部小支撑厚度与外部大支撑面板厚度相同。层级结构芯层板厚度分别为 0.565、0.75、1.00、1.25 mm, 结构几何参数如表 2 所示。图 7 给出了一级和二级层级结构在不同芯层板厚度下的力-位移曲线。由图 7 可知, 二级结构平台力明显高于一级结构。一级结构在靠近芯层上部产生塑性铰, 随着变形的增大未产生新的塑性铰, 力-位移曲线变化平稳。二级结构随着变形增大发生折叠塑性变形, 力-位移曲线会随之发生波动; 在芯层厚度为 1.25 mm 时二级单层结构由于变形模式发生变化, 力-位移曲线发生波动而随之上升; 随着二级结构层数的增加, 结构平台力增大; 随着二级结构厚度的增大, 其平台力增大。

表 2 模型尺寸

Table 2 Size parameters of the model

Type	l/mm	l_a/mm	l_b/mm	t_a/mm	t_b/mm	$\theta/(^\circ)$	$\omega/(^\circ)$
First order	50	100		2			60
Second order-1	50	100	10	0.565/0.75/1.00/1.25	0.565/0.75/1.00/1.25	60	60
Second order-2	50	100	10	0.565/0.75/1.00/1.25	0.565/0.75/1.00/1.25	60	60
Second order-3	50	100	10	0.565/0.75/1.00/1.25	0.565/0.75/1.00/1.25	60	60

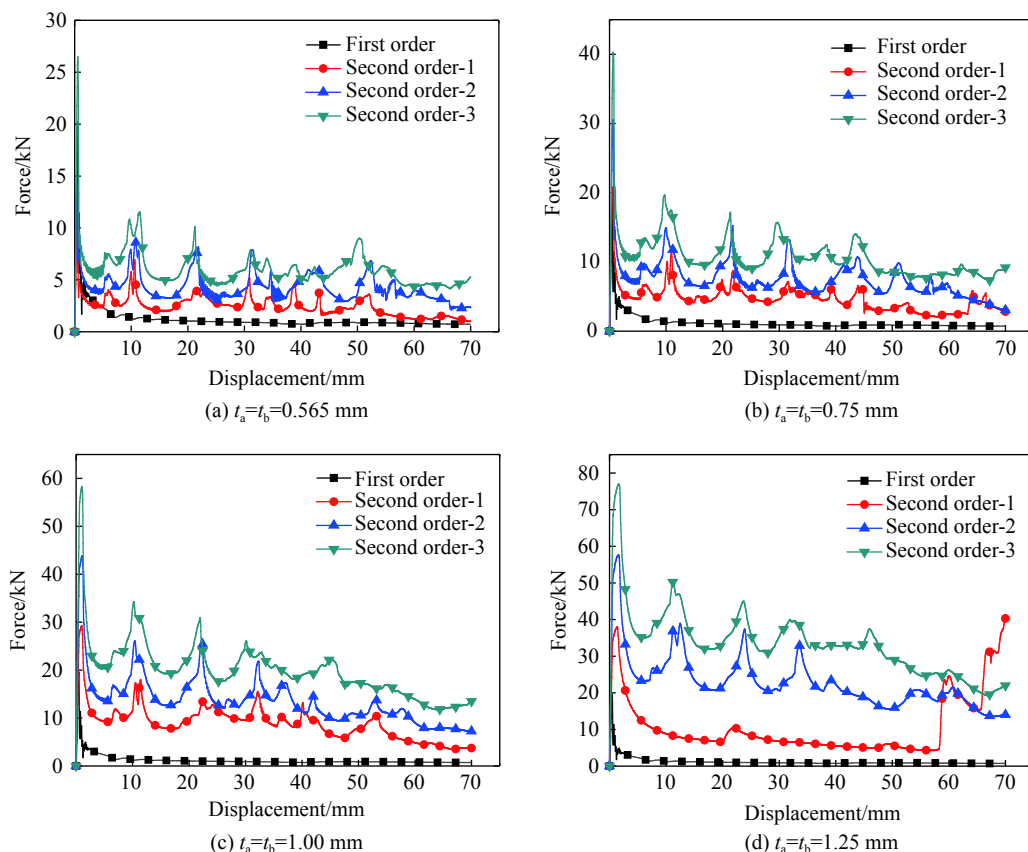


图 7 不同芯层厚度结构力-位移曲线

Fig. 7 Force-displacement curves of the structure with different core thicknesses

图 8 所示为不同芯层厚度下结构失效载荷理论值与模拟值的对比。对于数值模拟结果, 当结构的承载力达到峰值时认为结构失效, 即取力-位移曲线上的峰值载荷为结构失效载荷, 可以看出理论值与

模拟值吻合较好。当结构厚度为 0.565 mm 时, 由于其厚度较小, 在压缩载荷下的变形模式受屈曲影响较大, 故理论值较模拟值偏大; 当结构厚度为 1.25 mm 时, 小支撑端部变形受边界条件的影响较大, 理论值相对于模拟值偏小。

3.2 变形模式

图 9 所示为芯层板厚度 $t=2$ mm 时一级结构在不同应变下的变形模式, 应变为结构在受载荷方向上的变形位移与结构上、下两面板之间原始距离之比。由图 9 可知: 一级结构首先发生屈曲, 在靠近芯层斜支撑上部产生塑性铰, 随着变形的增大, 结构发生失稳, 从而产生非对称变形。图 10 所示为二级结构在应变为

0.3 时不同芯层厚度下的变形模式, 可以看出: 当厚度较小时, 结构的变形发生在整体斜支撑与整体水平支撑的交界处, 整体斜支撑内部的小支撑发生逐层折叠的塑性变形; 当芯层厚度为 1.25 mm 时, 结构斜支撑整体产生塑性铰而发生非对称变形; 厚度变化对二级双层和三层结构的变形模式影响较小。在芯层厚度较小时, 二级结构主要为小支撑整体逐层发生塑性变形, 从而有更多能量转换为非弹性能, 提高了结构整体的能量吸收能力。

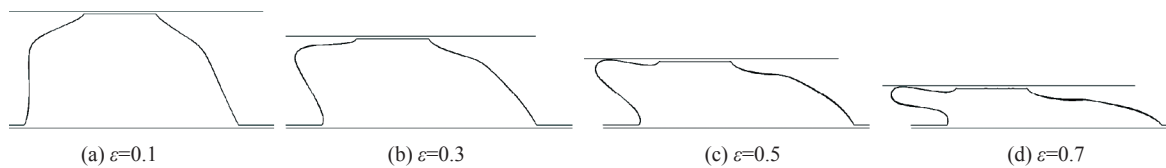


图 9 一级结构变形模式

Fig. 9 Deformation modes of the first structure

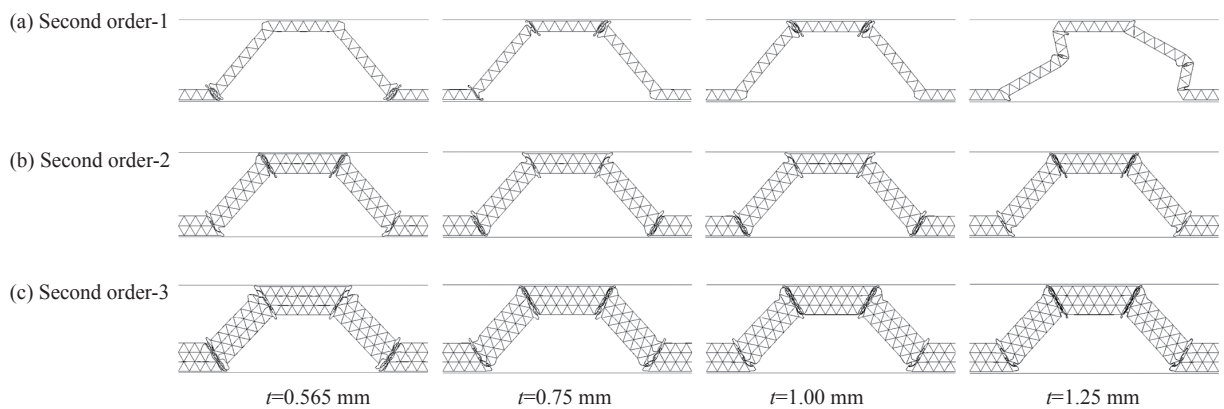


图 10 不同芯层厚度下结构的变形模式

Fig. 10 Deformation modes of structure with different core thicknesses

3.3 能量吸收性能分析

二级结构变形模式主要为小支撑逐层折叠的塑性变形, 相对于一级结构, 其在变形过程中小支撑不断发生塑性变形产生塑性铰, 从而有更多的能量转换为非弹性能, 提高了结构的能量吸收性能。图 11 为不同芯层厚度结构的比吸能柱状图。由图 11 可知: 层级波纹板夹芯结构的比吸能高于传统波纹板夹芯结构; 随着结构芯层厚度增大, 结构的比吸能不断提高; 由于二级单层结构变形模式的变化,

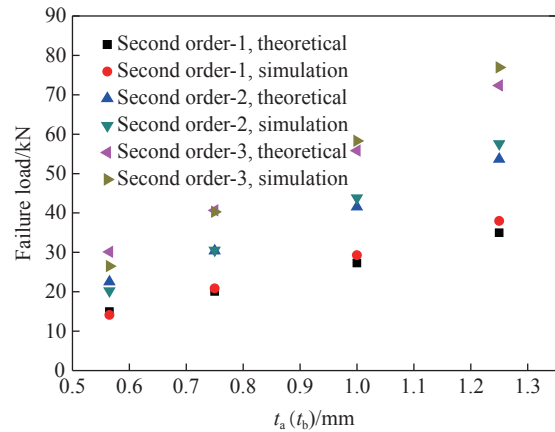


图 8 结构失效载荷对比

Fig. 8 Comparison of structural failure loads

芯层厚度较小时二级单层结构的比吸能高于二级双层及三层结构,厚度较大时二级单层结构的比吸能低于二级双层及三层结构;二级双层结构的比吸能略高于二级三层结构。

图12为结构载荷效率随芯层厚度的变化关系。随着芯层厚度的增大,结构的载荷效率提高,二级单层结构由于变形模式的变化,载荷效率发生波动。由于二级单层结构在芯层厚度为1.25 mm时结构变形模式为斜支撑整体发生失稳,相对于小支撑发生折叠变形时其能量吸收性能降低,从力-位移曲线可以看出,结构平台力减小导致结构的载荷效率下降。二级双层和三层结构的载荷效率不断增加,二级三层结构的载荷效率高于二级双层结构。

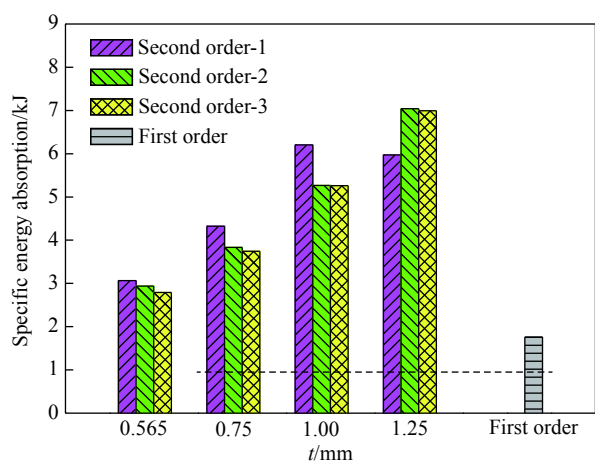


图11 结构的比吸能柱状图

Fig. 11 Specific energy absorption column graph of the structure

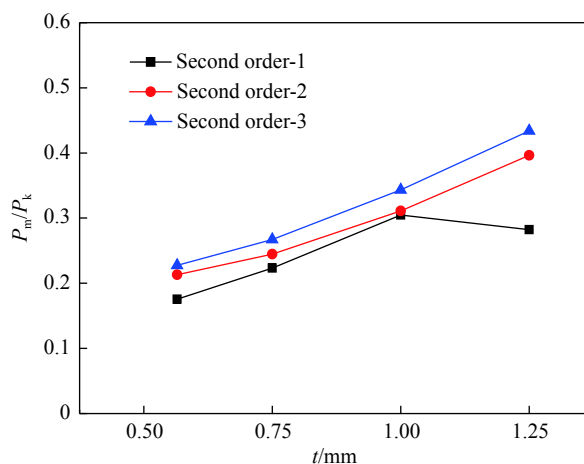


图12 结构的载荷效率

Fig. 12 Load efficiency of the structure

4 结 论

设计了不同层数的层级波纹板夹芯结构,利用数值模拟方法研究了在压缩载荷下层级夹芯结构的变形规律与能量吸收性能,理论推导了结构临界失效载荷公式;分析了结构参数对其变形模式和能量吸收性能的影响,并与一级结构进行了对比分析,得到如下研究结果。

(1) 理论分析得到的结构失效载荷与数值模拟结果吻合较好。

(2) 在准静态压缩载荷作用下,一级结构首先发生屈曲,随着变形增大,结构发生失稳而产生非对称变形;二级单层结构在厚度为1.25 mm时由于芯层整体产生塑性铰而失稳;二级双层和二级三层结构在整体斜支撑与整体水平支撑的交界处,整体斜支撑内部的小支撑发生逐层折叠的塑性变形。

(3) 二级波纹板夹芯结构的比吸能显著大于一级结构;二级结构芯层小支撑发生逐层折叠的塑性变形时,结构能量吸收性能较好;随着芯层厚度的增大,二级结构的比吸能和载荷效率增加,芯层厚度较小时二级单层结构的比吸能高于二级双层和三层结构,二级双层结构的比吸能略大于二级三层结构。

参考文献:

- [1] LAKES R. Materials with structural hierarchy [J]. *Nature*, 1993, 361(6412): 511–515.
- [2] ZHANG J, SUPERNAK P, MUELLER-ALANDER S, et al. Improving the bending strength and energy absorption of corrugated sandwich composite structure [J]. *Materials & Design*, 2013, 52(24): 767–773.
- [3] HE W, LIU J, TAO B, et al. Experimental and numerical research on the low velocity impact behavior of hybrid corrugated core sandwich structures [J]. *Composite Structures*, 2016, 158: 30–43.
- [4] HOU S, SHU C, ZHAO S, et al. Experimental and numerical studies on multi-layered corrugated sandwich panels under

- crushing loading [J]. *Composite Structures*, 2015, 126: 371–385.
- [5] MEZA L R, ZELHOFFER A J, CLARKE N, et al. Resilient 3D hierarchical architected metamaterials [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(37): 11502–11507.
- [6] KOOISTRA G, DESHPANDE V, WADLEY H. Hierarchical corrugated core sandwich panel concepts [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2007, 74(2): 259–268.
- [7] VELEA M N, SCHNEIDER C, LACHE S. Second order hierarchical sandwich structure made of self-reinforced polymers by means of a continuous folding process [J]. *Materials & Design*, 2016, 102: 313–320.
- [8] WU Q, GAO Y, WEI X, et al. Mechanical properties and failure mechanisms of sandwich panels with ultra-lightweight three-dimensional hierarchical lattice cores [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2017, s132/s133: 171–187.
- [9] WU Q, ASHKAN V, MOHAMAD E A, et al. Lattice materials with pyramidal hierarchy: systematic analysis and three dimensional failure mechanism maps [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 125: 112–114.
- [10] LIU H, CHEN L, DU B, et al. Flatwise compression property of hierarchical thermoplastic composite square lattice [J]. *Composite Structures*, 2019, 210: 118–133.
- [11] 王志华, 朱峰, 赵隆茂. 多孔金属夹芯结构动力学行为及其应用 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2010: 1–27.
- WANG Z H, ZHU F, ZHAO L M. Dynamic behavior and application of sandwich structures with cellular metal cores [M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2010: 1–27.
- [12] JING L, WANG Z, ZHAO L. The dynamic response of sandwich panels with cellular metal cores to localized impulsive loading [J]. *Composites Part B*, 2016, 94: 52–63.
- [13] CHEN Y, JIA Z, WANG L. Hierarchical honeycomb lattice metamaterials with improved thermal resistance and mechanical properties [J]. *Composite Structures*, 2016, 152: 395–402.
- [14] CHEN Y, LI T, JIA Z, et al. 3D printed hierarchical honeycombs with shape integrity under large compressive deformations [J]. *Materials & Design*, 2018, 137: 226–234.
- [15] YIN H, HUANG X, SCARPA F, et al. In-plane crashworthiness of bio-inspired hierarchical honeycombs [J]. *Composite Structures*, 2018, 192: 516–527.
- [16] QIAO J, CHEN C. In-plane crushing of a hierarchical honeycomb [J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2012, 85/86: 57–66.
- [17] 方耀楚. 二级层级褶皱结构力学性能研究与优化设计 [D]. 大连: 大连理工大学, 2014: 25–47.
- FANG Y C. Mechanical properties and optimal design of hierarchical corrugated structure with the second order [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014: 25–47.
- [18] 田泽, 韩阳, 尹晓文, 等. 截面几何参数对帽型梁轴向冲击响应的影响 [J]. *高压物理学报*, 2018, 32(5): 94–101.
- TIAN Z, HAN Y, YIN X W, et al. Effect of sectional geometrical parameters on axial impact responses of hat-section beam [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2018, 32(5): 94–101.
- [19] SANTOSA S P, WIERZBICKI T. Experimental and numerical studies of foam-filled sections [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2000, 24(5): 509–534.
- [20] 宋宏伟, 范子杰, 虞钢. 几类典型耐撞性结构吸能性能的比较 [C]//2004 汽车安全技术国际研讨会暨汽车安全技术学术年会, 2004.

Deformation and Energy Absorption of Multi-Hierarchical Sandwich Structures

FENG Genzhu^{1,2}, YU Boli^{1,2}, LI Shiqiang^{1,2}, LIU Zhifang^{1,2}

(1. *Institute of Applied Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;*

2. *Shanxi Key Laboratory of Material Strength and Structural Impact, College of Mechanics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*)

Abstract: The deformation law and energy absorption performance of the multi-hierarchical sandwich structure under quasi-static compression have been studied by numerical and theoretical methods. The calculation formula of the critical failure load of the structure is established and compared with the numerical simulation results. The theoretical prediction is in good agreement with the numerical simulation results. Finite element models of the hierarchical corrugated core sandwich structure were established. The effects of core thickness on the deformation mode and energy absorption performance of secondary structure under quasi-static compression load were studied and compared with that of the primary structure. The results show that the energy absorption properties of the secondary core structure are significantly better than that of the primary core layer. As the thickness of the core increases, the specific energy absorption of the second order structure for single-layer is higher than that of the second order structure for two-layers and three-layers, and the specific energy absorption of the second order structure for two-layers is slightly higher than that of the second order structure for three-layers.

Keywords: hierarchical structure; sandwich structure; energy absorption; numerical simulation