

缓冲与隔振

基于特征单元的三角形蜂窝异面压缩的有限元分析

孙德强^{a,b,c}, 李钟波^{a,b,c}, 李国志^{a,b,c}, 段世非^{a,b,c}, 白家华^{a,b,c}, 张帆^{a,b,c}, 李清^{a,b,c}
(陕西科技大学 a.陕西省造纸技术与特种纸品开发重点实验室 b.中国轻工业纸基功能材料重点实验室
c.轻化工程国家级实验教学示范中心, 西安 710021)

摘要: 目的 研究三角形蜂窝排列方式对三角形蜂窝异面动态压缩性能的影响。方法 借助 Ansys/LS-DYNA 建立基于特征单元的三角形蜂窝异面动态压缩的有限元分析模型, 研究三角形蜂窝排列方式对三角形蜂窝异面压缩性能的影响。结果 将三角形蜂窝胞元阵列模型的有限元分析结果与理论值进行对比, 证明三角形蜂窝的有限元模型是可靠的, 随后将三角形胞元阵列模型与此研究中采用的特征单元模型计算结果进行对比, 结果显示 2 种有限元计算模型的计算结果一致, 证明此研究特征单元结构的选取和模型的建立是可靠的。结论 不同排列方式对三角形蜂窝在异面方向上的动态峰应力和单位体积能量吸收没有影响。

关键词: 三角形蜂窝; 有限元分析; 压缩性能; 异面

中图分类号: TB484 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2019)19-0080-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.19.011

Finite Element Analysis on Out-of-plane Compression of Triangular Honeycomb Based on Representative Cells

SUN De-qiang^{a,b,c}, LI Zhong-bo^{a,b,c}, LI Guo-zhi^{a,b,c}, DUAN Shi-fei^{a,b,c}, BAI Jia-hua^{a,b,c}, ZHANG Fan, LI Qing^{a,b,c}

(a.Shaanxi Provincial Key Lab of Papermaking Technology and Specialty Paper Development b.Key Lab of Paper Based Functional Materials of China National Light Industry c.National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education, Shaanxi University of Science & Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence of triangular honeycomb arrangement on the dynamic compression properties in the out-of-plane direction of triangular honeycomb. By means of Ansys/LS-DYNA, a finite element analysis model of triangular honeycomb's out-of-plane dynamic compression based on representative cells was established, and the influence of triangular honeycomb arrangement on the out-of-plane compression properties of triangular honeycomb was studied. Comparing the finite element analysis results of the triangular honeycomb whole cell array model with the theoretical values, it was proved that the finite element model of the triangular honeycomb was reliable. Then, the triangular whole cell array model was compared with the calculated results of the representative cell model used in this study. The results showed that, the calculated results of the two finite element calculation models were consistent, which proved that the selection of the representative cell structure and the establishment of the model in this study were reliable. Different

收稿日期: 2019-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(51575327); 陕西省教育厅重点实验室及基地项目(16JS014); 陕西省教育厅 2014 陕西本科高校专业综合改革试点子项目(陕教高[2014]16 号)

作者简介: 孙德强(1976—), 男, 陕西科技大学教授、博导, 主要研究方向为多孔材料力学性能测试与仿真、计算机辅助技术与软件开发。

通信作者: 李国志(1979—), 男, 陕西科技大学副教授, 主要研究方向为包装材料结构与系统设计。

arrangements have no effect on the dynamic peak stress and energy absorption per unit volume of triangular honeycomb in the out-of-plane direction.

KEY WORDS: triangular honeycomb; finite element analysis; compression property; out-of-plane

二维多孔材料是一种由大量多边形孔在平面上聚集形成的二维结构材料,其中孔形状类似于蜂巢结构的材料称为蜂窝材料。常见的蜂窝材料可以分为六边形、三角形和四边形蜂窝材料等。蜂窝材料由于其强度高、质轻和易于废弃处理的特点,在包装领域中,蜂窝材料通常被用来制作蜂窝隔板、蜂窝隔垫等。

关于蜂窝材料的缓冲性能和能量吸收已有大量理论、试验和有限元方面的研究。刘凯宇^[1]等、胡章优^[2]等、孙德强^[3-4]等借助有限元法研究了各种二维多孔材料的共面变形模式、峰应力和能量吸收。李响^[5]等提出了相同等效密度下进行类蜂窝及六边形蜂窝夹芯结构等效力学参数对比分析的方法。Wang^[6]提出了一种新型蜂窝结构,采用有限元方法系统研究了其面内动态破碎行为和能量吸收能力。孙德强^[7]等采用有限元方法得到了关于各结构参数和冲击速度的三角形蜂窝共面动态峰应力经验关系式。邓小林^[8]等研究了一种全参数化的正弦曲线蜂窝结构,发现正弦曲线蜂窝结构的反作用力波动情况与其振幅以及冲击速度直接相关。上述研究证明,蜂窝单元结构参数和冲击速度决定着二维多孔材料的共面宏观力学性能;此外,蜂窝材料异面方向有着不同于其他 2 个共面方向上的缓冲力学性能,因此有必要对蜂窝材料异面方向的缓冲力学性能进行研究。

马思群等^[9]研究了六边形蜂窝铝碰撞后的异面动态峰应力和能量吸收,得出动态峰应力的理论公式。Nia 等^[10]通过试验研究了(低)应变率对裸露和泡沫填充蜂窝结构压缩力学行为的影响。张静静^[11]通过动态冲击试验方法研究了蜂窝纸板的厚度、内含气体和厚跨比对其异面动态冲击力学性能的影响,得到了异面冲击力学性能的影响规律,给出相关理论公式,为试验研究提供理论依据。Xu 等^[12]研究了 4 种六边形铝蜂窝结构在异面方向上的力学性能。对其他形状的蜂窝结构在异面方向上并没有一套系统的理论研究,且大部分研究都是针对某一个特定的蜂窝结构去计算的。其实选取蜂窝整体的某一特征单元进行分析研究,也是一种行之有效的方法。王钰堃等^[13]利用铝蜂窝的最小周期结构—"Y"型单元研究了铝蜂窝结构的异面压缩变形过程和能量吸收特性,以了解不同胶黏剂对铝蜂窝吸能性能的影响。通过对"Y"型单元进行准静态的压溃有限元模拟,选择合适的胶黏剂制造铝蜂窝,并为后续缓冲包装件的深入研究打下了基础。孙德强^[14]基于特征单元的方法,计算出了六

边形蜂窝共异面弹性模量,对特征单元模型施加约束来模拟周期性边界条件,最后证明了该方法的正确性。Hu 等^[15]通过理论和数值方法,在广泛的冲击速度范围内研究了圆形蜂窝体在平面外冲击下的动态破碎,并通过实验进行了验证。Hong 等^[16]研究了三角形管的坍塌模式和能量吸收,进行了准静态轴向压缩实验。将分析和数值预测与实验进行比较,以建立预测三角管平均破碎力的有效方法。

文中通过数值模拟的方法,研究排列方式对三角形蜂窝在异面方向上能量吸收的影响。此课题主要研究三角形蜂窝结构排列方式对其性能的影响,为各种蜂窝结构性能的深入研究打下坚实基础。同时,可以为这类材料缓冲包装设计提供更加完备的理论依据和方法,在蜂窝结构的合理使用、优化缓冲设计、制造资源和材料的节约等方面具有重要意义。

1 计算模型

文中主要通过 Ansys/LS-DYNA 有限元分析软件研究三角形蜂窝(见图 1)在异面方向(图 1e 中 x_3 方向)上排列方式对三角形蜂窝能量吸收和缓冲性能的影响。图 1a 为无交错排列的三角形蜂窝结构,图 1b 为交错 1/4 底边边长排列的三角形蜂窝结构,图 1c 为交错 1/3 底边边长排列的三角形蜂窝结构,图 1d 为交错 1/2 底边边长排列的三角形蜂窝结构。鉴于这些排列方式的蜂窝结构在几何结构中都具有周期性特性,因此分别在图 1 所示的三角形蜂窝结构中选一个具有代表性的特征单元结构,如图 1 所示的矩形虚线区域内部所示结构,用于以下分析。

三角形蜂窝特征单元异面压缩有限元模型示意图见图 2,特征单元试样 M 加在 2 个刚体板之间,下支撑板 P_2 固定,上冲击板 P_1 以恒定的速度 v 向下均匀压缩试样至样品密实。图 1e 为三角形蜂窝结构参数示意, l 为胞元边长, t 为胞元厚度, θ 为三角形蜂窝的拓展角, b 为蜂窝沿异面方向的厚度。为了验证三角形蜂窝有限元模型的可靠性,上述三角形蜂窝结构试样材料选用相同的铝材作为蜂窝芯层,采取多段线性弹塑性材料模型,其弹性模量 $E_s=68.2$ GPa,屈服应力 $\sigma_y=80$ MPa,极限应力 $\sigma_u=173$ MPa,泊松比 $\mu=0.3$,幂率指数 $n=0.23$ ^[17]。所有的蜂窝芯面使用 5 个积分点的 Belytschko-Tsay 壳单元 shell 163 进行网格划分,整个模型使用定义为 Self-contact 型接触,试样与上下刚性板之间定义为 Surface-to-Surface 型接触。

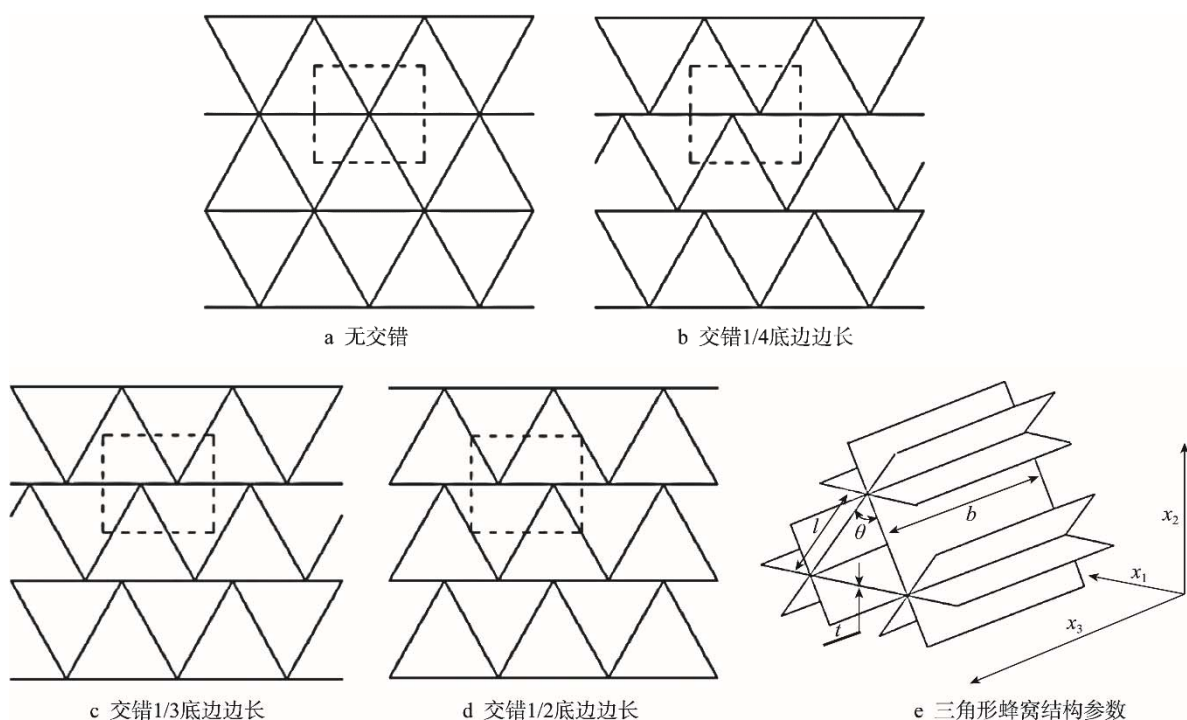


图1 三角形蜂窝结构及结构参数

Fig.1 Triangular honeycomb structure and structural parameters

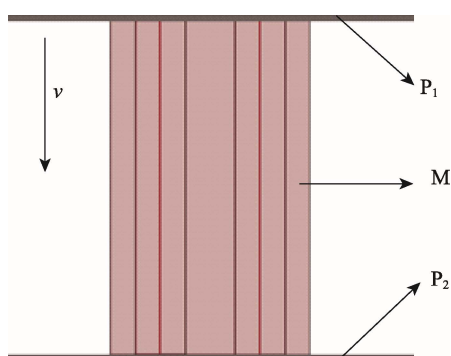


图2 三角形蜂窝有限元模型

Fig.2 Finite element model of triangular honeycomb

2 结果与讨论

2.1 有限元分析模型

Tran 等提出了三角形管的动态平均破碎力 F^{dym} , 将其定义为具有相应位移量的等效恒定力, 其理论表达式^[17]见式(1)。

$$F^{\text{dym}} = 1.45\pi^{0.5}\sigma_0 t^{1.5} B^{0.5} \frac{\sqrt{Q(\gamma, \beta)}}{2\eta} \quad (1)$$

式中: $Q(\gamma, \beta) = 32 + 6\cos\gamma + \frac{32}{\cos\beta}$; $\sigma_1 = \sqrt{\frac{\sigma_y \sigma_u}{1+n}}$; $\gamma = \frac{90^\circ - \beta}{2}$; B 为外板和内部板的长度总和; β 为图 1e 中 θ ; σ_1 为材料的流动应力; Q 为角度转换系数; γ 为二板角角度; η 为有效破碎距离系数。

为了保证结果的有效性, 三角形管模型(即胞元阵列模型)的各个参数和载荷与 Tran 等一致, 其中 $\sigma_0 = 0.106 \text{ GPa}$, $Q(\gamma, \beta) = 101.79$, $B = 439.376 \text{ mm}$, $\eta = 0.7$ 。图 3a 模拟的变形结果与 Tran 等的研究一致, 同时, 有限元分析得到平均破碎力为 53.41 kN, 上述平均破碎力的理论预测为 54.903 kN, 见图 3b。理论值与有限元模拟值具有较好的一致性, 且 $F-U$ 曲线与其他结构的蜂窝类似, 随着位移 U 增大, 破碎力 F 首先达到初始峰值, 然后下降, 并在平均破碎力值附近波动。以上各点均证明文中三角形蜂窝胞元阵列模型的可靠性。

为了降低计算成本, 提高计算效率, 选取图 1 中所示矩形虚线区域的内部结构, 并将此结构命名为特征单元。在特征单元的边界处施加关于局部坐标系 x 方向(即对称平面的法线方向)的对称约束, 以模拟足够多孔(胞元)的胞元阵列蜂窝结构性质, 见图 4。

不同排列方式的三角形蜂窝特征单元($l = 3 \text{ mm}$, $t = 0.03 \text{ mm}$, $\theta = 60^\circ$, $b = 10 \text{ mm}$, $v = 30 \text{ m/s}$)在异面方向的应力应变曲线见图 5, 发现不同排列方式的三角形蜂窝特征单元在压缩过程中的应力应变曲线走势都大致相同。首先发生线弹性变形至一个峰值, 这个峰值为初始峰值应力 σ_0 , 此时对应的应变称为初始应变 ε_0 ; 屈服后产生塑性坍塌, 经历长的平台区大变形, 平台区的应力水平均值称为平均峰值应力; 随着应变的进一步增大, 进入密实化变形阶段, 此时的蜂窝材料被压实, 同时对应的应变称为密实化应变 ε_D , 到达密实化应变时对应蜂窝材料的有效吸收总能量称为 W_D , 曲线下方的面积即为蜂窝材料的能量吸收。平

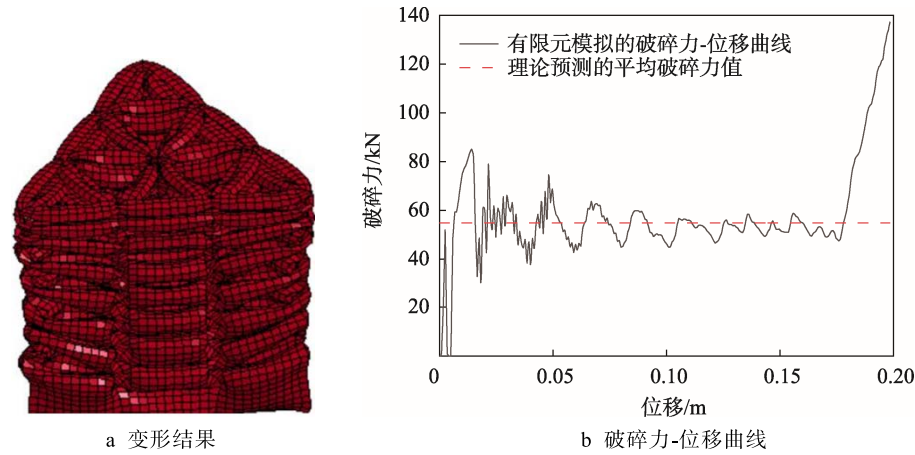


图 3 三角形管变形结果和破碎力-位移曲线
Fig.3 Deformation results and F - U curve of triangular pipe

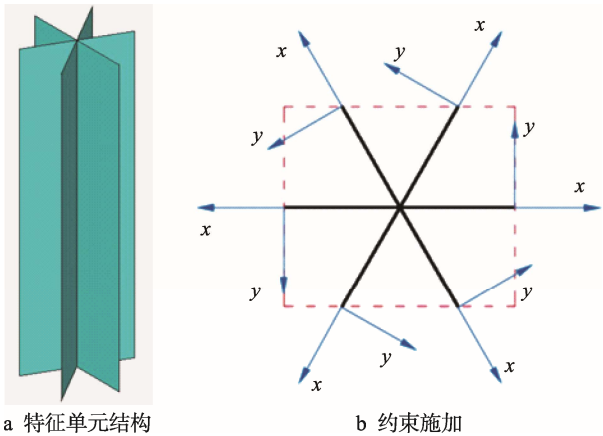


图 4 无交错排列的三角形蜂窝特征单元结构及约束施加
Fig.4 Triangular honeycomb representative cell structure without staggered arrangement and constraint application

均峰应力 σ 的大小决定了蜂窝材料的能量吸收能力,在动态压缩载荷作用下,平均峰应力 σ 命名为动态峰应力。为了验证特征单元模型的可靠性,对动态峰应力 σ_p 进行研究,其计算见式 (2)。

$$\sigma_p = \frac{\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_D} \sigma d\varepsilon}{\varepsilon_D - \varepsilon_0} \tag{2}$$

经过尝试性模拟后,三角形蜂窝结构在图 1e 所示 x_1, x_2 方向上的单元数目为 8 个或 8 个以上时,在异面方向上的动态峰应力 σ_p 基本相同,因此,对图 1 中三角形蜂窝结构建立 x_1, x_2 方向上单元数目为 8×9 的胞元阵列蜂窝结构模型,以验证图 4 所示的三角形蜂窝特征单元模型的合理性。比较了胞元阵列模型和特征单元模型在压缩速度为 $3 \sim 240 \text{ m/s}$ 之间的动态峰应力(以 $l=3 \text{ mm}$, $\theta=60^\circ$, $t=0.03 \text{ mm}$, $b=10 \text{ mm}$, 无交错排列方式为例),胞元阵列模型和特征单元模型在不同压缩速度下的动态峰应力值见表 1。结果显示,特征单元模型总体的动态峰应力均略小于胞元阵列的动态峰应力,此差异可能是胞元阵列在压缩过程中,蜂窝间由于相互接触导致蜂窝之间产生相互作用力造

成的。此外,两者之间虽有差异,但很小,可忽略,这说明两者之间有着良好的一致性,表明在选取的特征单元模型用来代替胞元阵列模型研究其性质是合理的。

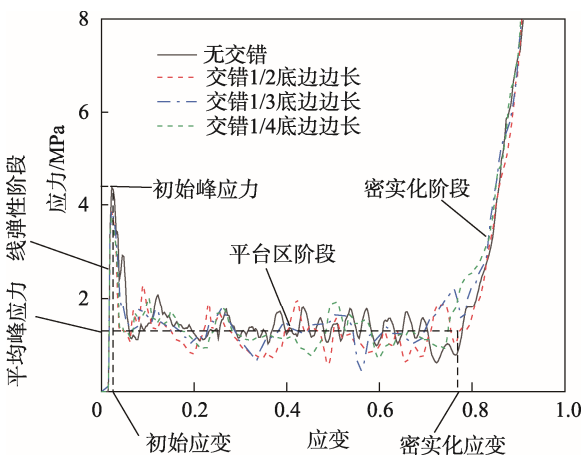


图 5 三角形蜂窝特征单元 ($l=3 \text{ mm}$, $t=0.03 \text{ mm}$, $\theta=60^\circ$, $b=10 \text{ mm}$, $v=30 \text{ m/s}$)在异面方向的应力应变曲线
Fig.5 Stress-strain curve of the triangular honeycomb representative cell ($l=3 \text{ mm}$, $t=0.03 \text{ mm}$, $\theta=60^\circ$, $b=10 \text{ mm}$, $v=30 \text{ m/s}$) in the out-of-plane direction

表 1 胞元阵列模型和特征单元模型在不同压缩速度下的动态峰应力值

Tab.1 Dynamic peak stress values of whole cell array model and representative cell model at different compression speeds

$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	特征单元动态峰应力/MPa	胞元阵列动态峰应力/MPa
3	0.196 212	0.201 431
15	0.223 614	0.238 809
30	0.269 561	0.302 316
90	0.573 47	0.611 801
120	0.831 853	0.844 115
150	1.049 383	1.109 964
210	1.754 52	1.809 175
240	2.138 4	2.212 739

2.2 变形模式

无交错排列三角形蜂窝特征单元（以 $l=3\text{ mm}$, $t=0.03\text{ mm}$, $\theta=60^\circ$, $b=10\text{ mm}$, $v=3\text{ m/s}$ 时为例）在异面方向的变形模式见图 6。结果表明不同排列方式的三角形蜂窝特征单元在压缩过程中的变形模式都大致相同。变形首先在靠近上压板处发生,此时为弹性变形,之后发生折曲变形,进入平台区阶段,折曲变形不断向下扩展,当折曲扩展至样品底部时进入密实化阶段。



图 6 无交错排列三角形蜂窝特征单元 ($l=3\text{ mm}$, $t=0.03\text{ mm}$, $\theta=60^\circ$, $b=10\text{ mm}$, $v=3\text{ m/s}$) 在异面方向压缩的变形模式

Fig.6 Deformation models of the triangular honeycomb representative cell without staggered arrangement ($l=3\text{ mm}$, $t=0.03\text{ mm}$, $\theta=60^\circ$, $b=10\text{ mm}$, $v=3\text{ m/s}$) in the out-of-plane direction

2.3 动态峰应力

4 种排列方式的三角形蜂窝特征单元模型在不同压缩速度条件下动态峰应力与压缩速度的关系曲线见图 7, 其中 4 条曲线几乎重合。这说明在同一压缩速度条件下, 4 种排列方式的三角形蜂窝特征单元模型动态峰应力值差异很小, 且差异可以忽略不计。同时, 对于任一排列方式, 随着压缩速度的增大, 动态

峰应力增大, 且增大的幅度也在增大。

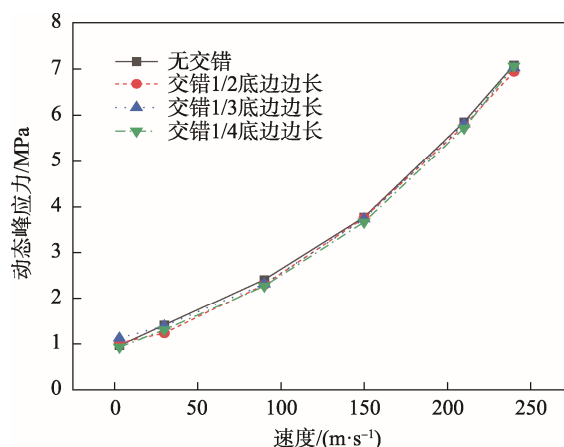


图 7 不同排列方式三角形蜂窝特征单元的动态峰应力-速度曲线

Fig.7 Dynamic peak stress-velocity curves of triangular honeycomb representative cell with different arrangements

2.4 单位体积能量吸收

总能量吸收 E_T 的计算公式为:

$$E_T = \int_0^s F ds \quad (3)$$

式中: F 为压缩载荷; s 为压缩位移。

单位体积吸收能量 E_V 是比较不同结构之间吸收能量性能的重要指标, 计算公式为结构在变形过程中吸收的总能量除以结构体积, 见式 (4)。

$$E_V = \frac{E_T}{V} \quad (4)$$

式中: V 为样品的体积。

4 种排列方式三角形蜂窝特征单元模型在不同压缩速度条件下的动态峰应力值见表 2, 表中 4 种排列方式对应的单位体积能量吸收值几乎一致。这说明在同一压缩速度条件下, 4 种排列方式三角形蜂窝特征单元模型的单位体积能量吸收值差异很小, 且差异可以忽略不计。同时, 对于任一排列方式, 随着压缩速度的增大, 单位体积能量吸收在增大, 且增大的幅度也在增大。

表 2 不同排列方式特征单元模型在不同压缩速度下的单位体积能量吸收值
Tab.2 Energy absorption per unit volume of different arrangement representative cell models at different compression velocities

$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	无交错/ $(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3})$	交错 1/4 底边边长/ $(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3})$	交错 1/3 底边边长/ $(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3})$	交错 1/2 底边边长/ $(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3})$
3	0.721 141	0.651 538	0.833 937	0.743 566
15	0.890 735	0.869 587	0.789 686	0.892 86
30	1.025 566	0.963 664	1.083 321	0.968 661
90	1.960 96	1.892 55	1.943 745	1.903 594
150	3.215 434	3.150 83	3.234 845	3.217 228
210	5.131 19	5.118 112	5.163 896	5.164 564
240	6.263 214	6.191 249	6.253 308	6.244 257

3 结语

通过有限元仿真模拟研究了不同排列方式三角形蜂窝在异面方向上的能量吸收, 得出以下结论。

1) 在压缩过程中, 不同排列方式三角形蜂窝在压缩过程中的应力-应变曲线趋势和变形模式大致相同, 都会经历线弹性阶段、屈服阶段、平台区阶段和密实化阶段。

2) 通过对选取的不同排列方式三角形蜂窝的特征单元模型施加对称约束来代替三角形蜂窝胞元阵列模型, 研究其异面压缩性能是否合理。

3) 在同一压缩速度条件下, 不同排列方式三角形蜂窝的动态峰值应力值和单位体积能量吸收值相等; 对于任意排列方式来说, 随着压缩速度增大, 动态峰值应力值和单位体积能量吸收值都在增大, 且增大的幅度也都在增大。

参考文献:

- [1] 刘凯宇, 晏瀛, 季佳佳. 新型内凹蜂窝结构的力学分析[J]. 科技视界, 2017(10): 4—5.
LIU Kai-yu, YAN Ying, JI Jia-jia. Mechanical Analysis of a New Concave Honeycomb Structure[J]. Science & Technology Vision, 2017(10): 4—5.
- [2] 胡章优, 兰华, 左文杰, 等. 负泊松比多胞材料的面内动态冲击仿真研究[J]. 机械与电子, 2019, 37(2): 31—34.
HU Zhang-you, LAN Hua, ZUO Wen-jie, et al. In-plane Dynamic Impact Simulation of Cellular Materials with Negative Poisson's Ratio[J]. Machinery & Electronics, 2019, 37(2): 31—34.
- [3] 孙德强, 万众望, 雷晓东, 等. 斜方形蜂窝共面冲击力学行为[J]. 包装工程, 2016, 37(19): 1—5.
SUN De-qiang, FANG Zhong-wang, LEI Xiao-dong, et al. Mechanical Behavior of Rhombic Honeycomb Cores under In-plane Impact Loadings[J]. Package Engineering, 2016, 37(19): 1—5.
- [4] 孙德强, 张小强, 王复会, 等. 凹六边形蜂窝芯材共面准静态力学行为[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版), 2015, 33(5): 153—156.
SUN De-qiang, ZHANG Xiao-qiang, WANG Fu-hui, et al. In-plane Quasi-static Mechanical Behavior of Cissoidal Hexagonal Honeycomb Cores[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology(Natural Science Edition), 2015, 33(5): 153—156.
- [5] 李响, 杨祉豪, 陈博文. 类蜂窝和六边形蜂窝夹芯等效力学参数对比与仿真[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2019, 41(2): 88—92.
LI Xiang, YANG Zhi-hao, CHEN Bo-wen. Comparison and Simulation of Equivalent Mechanical Parameters of Quasi-honeycomb and Hexagon Honeycomb[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences), 2019, 41(2): 88—92.
- [6] WANG H, LU ZX, YANG ZY, et al. In-plane Dynamic Crushing Behaviors of a Novel Auxetic Honeycomb with Two Plateau Stress Regions[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 151: 746—759.
- [7] 孙德强, 宫凯, 李国志, 等. 三角形蜂窝的共面冲击动力学[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版), 2013, 31(1): 98—105.
SUN De-qiang, GONG Kai, LI Guo-zhi, et al. Dynamics of Triangular Honeycombs under In-plane Crushing Loadings[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology(Natural Science Edition), 2013, 31(1): 98—105.
- [8] 邓小林, 刘旺玉. 一种负泊松比正弦曲线蜂窝结构的面内冲击动力学分析[J]. 振动与冲击, 2017, 36(13): 103—109.
DENG Xiao-lin, LIU Wang-yu. In-plane Impact Dynamic Analysis for a Sinusoidal Curved Honeycomb Structure with Negative Poisson's[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(13): 103—109.
- [9] 马思群, 郝月, 孙彦彬, 等. 六边形蜂窝铝异面动态冲击仿真研究[J]. 机械设计与制造工程, 2018, 47(8): 18—22.
MA Si-qun, HAO Yue, SUN Yan-bin, et al. The Simulation of the Out-plane Dynamic Impact Property of Hexagonal Aluminum Honeycombs[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2018, 47(8): 18—22.
- [10] NIA A A, SADEGUI M Z. An Experimental Investigation on the Effect of Strain Rate on the Behaviour of Bare and Foam-filled Aluminium Honeycombs[J]. Materials & Design, 2013, 52(24): 748—756.
- [11] 张静静. 动态冲击载荷下蜂窝纸板的力学行为[D]. 西安: 陕西科技大学, 2018.
ZHANG Jing-jing. Mechanical Behaviors of Honeycomb Paperboard under Dynamic Impact Loadings[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2018.
- [12] XU S, BEYNON J H, DONG R, et al. Experimental Study of the Out-of-plane Dynamic Compression of Hexagonal Honeycombs[J]. Composite Structures, 2012, 94(8): 2326—2336.
- [13] 王钰堃, 毛贺, 韩国坤, 等. 铝蜂窝“Y”形单元准静态压溃有限元模拟研究[J]. 包装工程, 2018, 39(11): 88—95.
WANG Yu-kun, MAO He, HAN Guo-kun, et al. Quasi-static Crushing Finite Element Simulation on Aluminum Honeycomb "Y" Shaped Cell[J]. Package Engineering, 2018, 39(11): 88—95.
- [14] 孙德强. 多孔缓冲材料有限元结构分析与设计方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
SUN De-qiang. Finite Element Structure Analysis and Design Method of Porous Buffer Material[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [15] HU LL, HE XL, WU GP. Dynamic Crushing of the Circular-celled Honeycombs under Out-of-plane Impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 75: 150—161.
- [16] HONG W, JIN F N, ZHOU J N, et al. Quasi-static Axial Compression of Triangular Steel Tubes[J]. Thin-walled Structures, 2013, 62(1): 10—17.
- [17] TRANTN, HOU SJ, XU H, et al. Theoretical Prediction and Crashworthiness Optimization of Multi-cell Triangular Tubes[J]. Thin-walled Structures, 2014, 82: 183—195.