

三角形蜂窝异面动态压缩仿真研究

孙德强¹, 李钟波¹, 谭一², 李国志¹

(1. 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; 2. 北京城市学院, 北京 100083)

摘要: **目的** 研究三角形蜂窝材料结构参数和压缩速度对其异面压缩性能的影响。**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有限元分析模型, 而后对三角形蜂窝在不同单元结构参数和压缩速度下进行异面压缩参数化仿真计算。**结果** 对于三角形蜂窝, 当所有结构参数保持不变时, 异面动态峰应力与压缩速度呈二次曲线关系。在给定压缩速度下, 扩展角固定的三角形蜂窝的异面动态峰应力与壁厚边长比呈幂函数关系; 壁厚边长比固定的三角形蜂窝的异面动态峰应力与拓展角呈二次曲线关系。**结论** 当相对密度一致时, 正三角形蜂窝比正六边形蜂窝异面比吸能值更大; 异面动态峰应力与压缩速度、单元结构参数之间的相互关系, 可用一定关系曲线进行拟合。

关键词: 三角形蜂窝; 有限元分析; 异面; 比吸能; 动态峰应力

中图分类号: TB484 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)11-0078-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.11.012

Simulations of Out-of-plane Dynamic Compressions of Triangular Honeycomb Cores

SUN De-qiang¹, LI Zhong-bo¹, TAN Yi², LI Guo-zhi¹

(1a. 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 and Technology, Xi'an 710021, China; 2. Beijing City University, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: The work aims to study the influence of configuration parameters and compression velocity of triangular honeycomb on the out-of-plane compression performance. Ansys/LS-DYNA was employed to create the finite element model for dynamic out-of-plane compression of triangular honeycomb based on the representative cell and the simulations of triangular honeycomb cores with various cell configuration parameters under the out-of-plane compressions were carried out. For triangular honeycomb, when all configuration parameters were fixed, the out-of-plane dynamic plateau stress was related to the compression velocity by quadratic polynomial equation. For a given compression velocity, the dynamic out-of-plane plateau stress of triangular honeycomb with a fixed expanding angle was related to the ratio of cell wall thickness to edge length by a power law. For the triangular honeycomb with a fixed ratio of cell wall thickness to edge length, the out-of-plane dynamic plateau stress is related to the expanding angle by a quadratic relationship curve. With the same relative density, SEA of regular triangular honeycomb is larger than that of regular hexagonal honeycomb; and the correlations between out-of-plane dynamic plateau stress and compression velocity (or cell configuration parameters)

收稿日期: 2019-06-21

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)

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。

can be well fitted by certain curves.

KEY WORDS: triangular honeycomb; finite element analysis; out-of-plane; specific energy absorption; dynamic plateau stress

二维多孔芯材是由楞边或壁面呈二维多边形排列,像蜂窝一样堆积充填平面区间,而形成的类似蜂巢结构的材料。常见的有六边形、三角形和四边形等蜂窝材料。二维多孔芯材具有比强度高、比能量吸收高、成本低和多功能性,被广泛应用于航空航天、高速列车和汽车行业等各种工程领域^[1]。

胡章优^[2]、王青松^[3]和卢子兴^[4]等通过有限元软件 LS-DYNA 分别研究了内凹三角形蜂窝、旋转正方形蜂窝和一种新型拉胀蜂窝模型(简称星型-箭头蜂窝)在共面方向上的压缩性能。李响等^[5]以类蜂窝结构为研究对象,讨论了不同冲击速度作用下该结构的共面冲击力学性能及能量吸收能力,并与传统的六边形蜂窝结构在不同方向冲击作用下的变形模式、比吸收能量进行了对比。研究表明,蜂窝体共异面方向上具有不同的机械特性。特别是,由于蜂窝的共面和异面变形机制不同,蜂窝的异面刚度和强度远高于它们的共面刚度和强度^[6],因此,研究蜂窝结构异面性能很有必要。郑吉良^[7]和马思群^[8]等分别研究了等腰梯形蜂窝芯和六边形蜂窝在异面方向上的压缩性能。

Hu^[9]和王钰堃^[10]等通过选取特征单元结构分别研究了圆形蜂窝和六边形蜂窝异面压缩性能。

文中通过数值模拟的方法,选取三角形蜂窝特征单元结构,研究了压缩速度和结构参数对三角形蜂窝在异面方向上压缩性能的影响,更加深入地了解影响蜂窝结构性能的因素,对于促进蜂窝结构的合理使用、缓冲优化设计、制造资源和材料的节约等方面,具有重要经济价值和科学研究意义。

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结构在异面方向(图 1a 中 X_3 方向)上结构参数和压缩速度对三角形蜂窝异面压缩性能的影响。由于三角形蜂窝结构在几何结构中都具有周期性的特性,所以在三角形蜂窝结构选取一个具有代表性的特征单元结构,如图 1b 中所示的矩形虚线区域内部所示的结构,特征单元结构的示意图和特征单元约束施加,见图 1c—d。同时,为了降低计算成

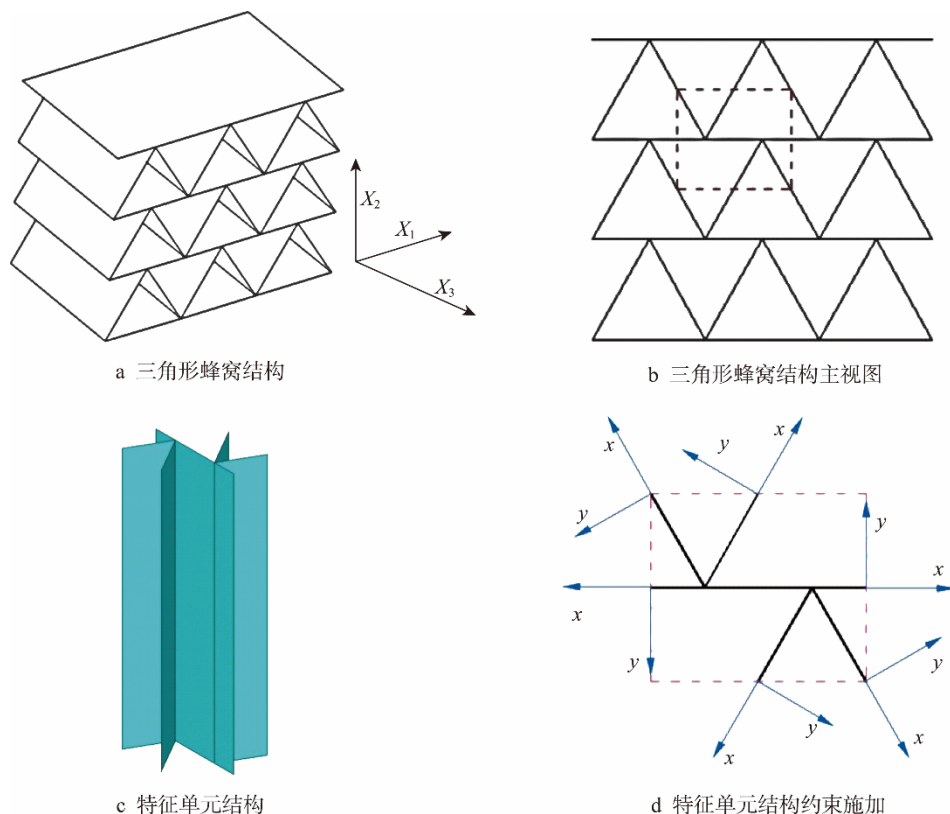


图 1 三角形蜂窝结构

Fig.1 Triangular honeycomb structure

本, 提高计算效率, 参考 Hu^[9]和王钰堃^[10]等建立模型的思路和方法, 文中基于三角形蜂窝特征单元结构进行有限元建模。

三角形蜂窝单管结构参数见图 2a, 图 2a 中 l 为胞元的边长, 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, 文中固定 l 为 3 mm b 为 10 mm。三角形蜂窝有限元模型见图 3, 特征单元试样 M 置于 2 个刚体板 P_1 和 P_2 之间, 下支撑板 P_2 被固定, 上压缩板 P_1 以恒定的速度 v 向下压缩试样。为了验证三角形蜂窝有限元模型的可靠性, 三角形蜂窝结构试样材料选用与 TRAN 等^[11]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 $n=0.23$ 。所有

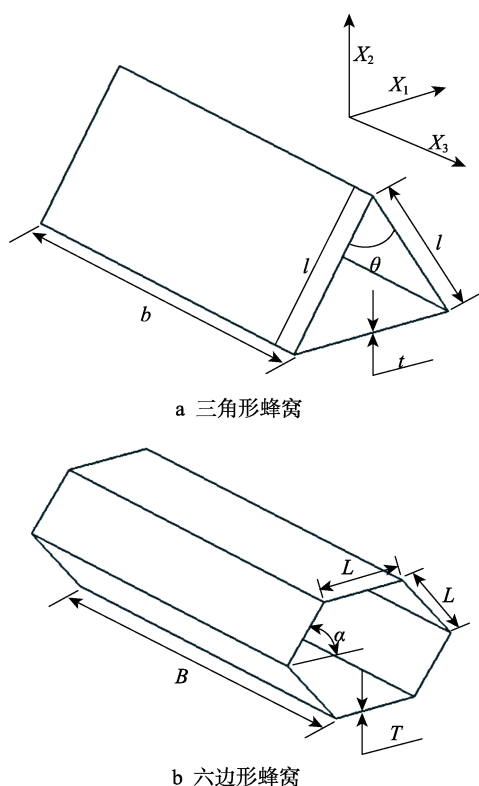


图 2 蜂窝单管结构参数

Fig.2 Configuration parameters of honeycomb single tube

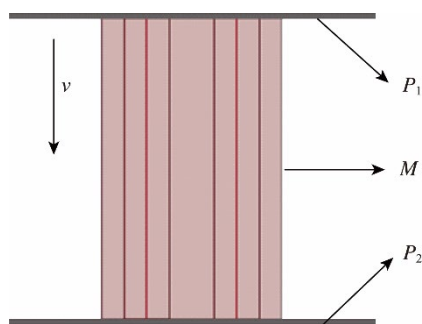


图 3 三角形蜂窝有限元模型

Fig.3 Finite element model of triangular honeycomb

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。

2 结果与讨论

2.1 三角形蜂窝与六边形蜂窝异面 SEA 的对比

六边形蜂窝作为生活中最常见的蜂窝结构, 其在异面动态压缩过程中应力应变曲线^[12]与三角形蜂窝结构材料在异面动态压缩过程中的应力应变曲线走势大致相同, 三角形蜂窝结构特征单元 ($l=3$ mm, $t=0.03$ mm, $\theta=60^\circ$, $b=10$ mm, $v=30$ m/s) 在异面方向上的典型应力应变曲线见图 4。不同参数下的三角形蜂窝结构特征单元在异面方向上的应力应变曲线见图 5。首先发生线弹性变形, 变形至一个峰值, 这个峰值称为初始峰应力 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变形, 随着应变的增大, 经历长的平台区大变形, 平台区的应力水平均值称为动态峰应力 σ_p (静态压缩中条件下该应力水平均值称为静态峰应力); 随着应变的进一步增大, 最后到密实化变形阶段, 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的总能量称为 E_D , 对应曲线下方的面积即为蜂窝材料的能量吸收。

蜂窝结构最重要特征是其相对密度, 其定义为蜂窝结构密度 ρ^* 与基材密度 ρ_s 之间的比率。相对密度可以从 0.001 到通常为 0.4^[13]。为了保证数据对比的可靠性, 文中的三角形蜂窝模型和六边形蜂窝模型都为均匀壁厚的模型, 即蜂窝结构中所有壁厚都相等。参考赵辉等^[14]相对密度的推导过程, 得到三角形蜂窝和六边形蜂窝密度公式分别见式 (1) 和式 (2)。

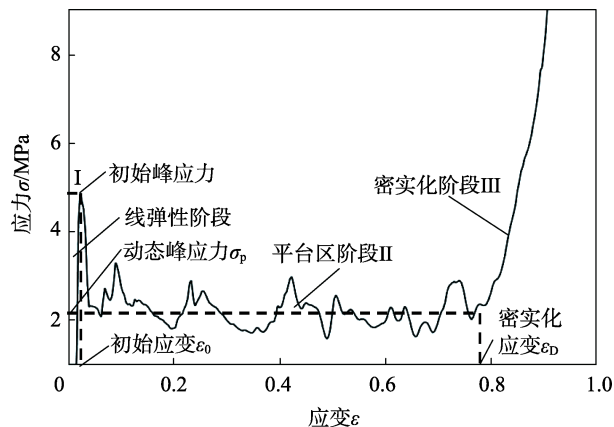


图 4 三角形蜂窝特征单元在异面方向的应力应变曲线 ($l=3$ mm, $t=0.03$ mm, $\theta=60^\circ$, $b=10$ mm, $v=30$ m/s)

Fig.4 Stress-strain curve of the triangular honeycomb representative cell in direction X_3 ($l=3$ mm, $t=0.03$ mm, $\theta=60^\circ$, $b=10$ mm, $v=30$ m/s)

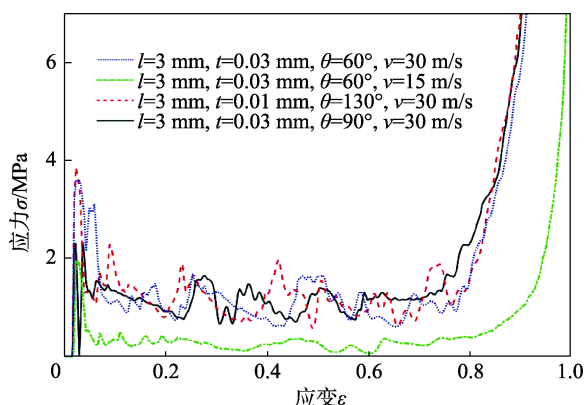


图 5 不同参数下三角形蜂窝特征单元在异面方向的应力应变曲线

Fig.5 Stress-strain curve of the triangular honeycomb representative cell in direction X_3 under different parameters

六边形蜂窝相对密度为：

$$\frac{\rho_3^*}{\rho_3} = \frac{3t}{2l \cos \theta (1 + \sin \theta)} \quad (1)$$

三角形蜂窝相对密度为：

$$\frac{\rho_6^*}{\rho_6} = \frac{2 \left(1 + \sin \frac{\alpha}{2} \right) T}{\sin \alpha L} \quad (2)$$

比吸能 (Specific Energy Absorption, SEA) 是指在有效破坏长度 (b_D^*) 内, 结构单位质量 (m) 吸收的总能量 (E_D), 是衡量元件吸能能力的重要参数。在压缩过程中结构所吸收的总能量可由压缩力 (F) 在压缩距离上的积分得到, 其计算见式 (3) [15]。

$$S_{EA} = \frac{\int_0^{b_D^*} F db^*}{\rho_s A b^*} \quad (3)$$

式中： A 为蜂窝结构的有效横截面积。

文中对比试验选取的蜂窝结构均为正多边形蜂窝 (即式中 $\theta=60^\circ$, $\alpha=30^\circ$)，且为了保证两者在单位体积的用材相等, 故保证两者的相对密度相等来进行合理的对比试验 (即 $\rho_3^*/\rho_s = \rho_6^*/\rho_s$)。三角形蜂窝与六边形蜂窝在压缩速度在 3 ~ 240 m/s 之间时, 两者的比吸能值的对比见图 6。图 6 中可以看出三角形蜂窝的比吸能值均大于六边形蜂窝, 表明在保证两者在异面方向上厚度相同时, 单位面积相同用材的三角形蜂窝比六边形蜂窝吸收更多的能量。说明在异面方向上三角形蜂窝比六边形蜂窝能量吸收性能更好, 同时也说明了研究三角形蜂窝的必要性。

2.2 三角形蜂窝结构参数及压缩速度对其异面动态峰应力的影响

在动态压缩载荷作用下, 动态峰应力 σ_p 的大小决定了蜂窝材料的能量吸收能力, 所以三角形蜂窝异面动态峰应力 σ_p 为研究对象, 其计算公式为：

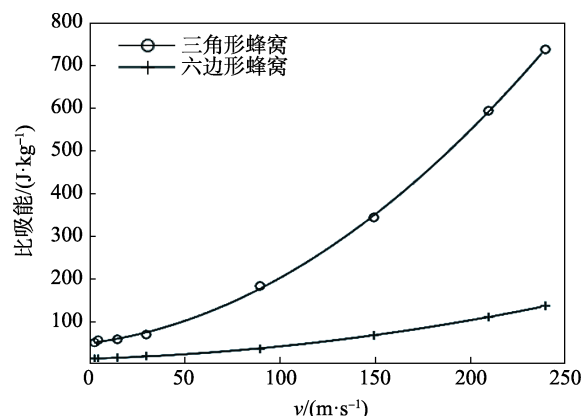


图 6 三角形蜂窝与六边形蜂窝的比吸能-速度曲线

Fig.6 SEA-velocity curves of triangular honeycomb and hexagonal honeycomb

$$\sigma_p = \frac{\int_{\varepsilon_0}^{\varepsilon_D} \sigma d\varepsilon}{\varepsilon_D - \varepsilon_0} \quad (4)$$

2.2.1 壁厚边长比对三角形蜂窝异面动态峰应力的影响

不同壁厚的三角形蜂窝 ($\theta=60^\circ$) 在不同压缩速度下的动态峰应力值见表 1。从表 1 中的数据可以直观地看出随着压缩速度和壁厚的增大, 计算出的动态峰应力数值都是递增的。图 7a, c, e 分别为 $\theta=30^\circ$, $\theta=60^\circ$, $\theta=130^\circ$ 时, 基于最小二乘法拟合的动态峰应力与压缩速度的关系图; $\theta=30^\circ$, $\theta=60^\circ$, $\theta=130^\circ$ 时, 基于最小二乘法拟合的动态峰应力与壁厚边长比 (t/l) 的关系见图 7b, d, f。图 7b, d, f 表明当保持除 t/l 和 v 之外的其他配置参数不变时, 动态峰应力与三角形蜂窝壁厚度边长比呈幂函数关系。在异面压缩下, 其表达式见式 (5)。

$$\sigma_p = \sigma_y A'' (t/l)^k \quad (5)$$

式中： A'' 为常数； k 为相应的关系指数。

2.2.2 拓展角 (θ) 对三角形蜂窝异面动态峰应力的影响

不同壁厚的三角形蜂窝 ($t=0.03$ mm) 在不同压缩速度下的动态峰应力值见表 2。从表 2 中的数据可以直观地看出随着压缩速度和壁厚的增大, 计算出的动态峰应力数值都是递增的。当 $t=0.01$ mm, $t=0.03$ mm, $t=0.04$ mm 时, 基于最小二乘法拟合的动态峰应力与拓展角的关系见图 8a, c, e; 当 $t=0.01$ mm, $t=0.03$ mm, $t=0.04$ mm 时, 基于最小二乘法拟合的动态峰应力与压缩速度的关系见图 8b, d, f。图 8a, c, e 表明当保持除 θ 和 v 之外的其他配置参数不变时, 基于最小二乘法拟合可知, 动态峰应力与拓展角的曲线形式与二次函数最为接近。在异面压缩下, 其表达式见式 (6)。

$$\sigma_p = A^* \theta^2 + B^* \theta + C \quad (6)$$

表 1 不同壁厚的三角形蜂窝 ($\theta=60^\circ$) 在不同压缩速度下的动态峰应力值Tab.1 Dynamic plateau stress values of triangular honeycombs ($\theta=60^\circ$) with different wall thicknesses at different compression velocities MPa

壁厚边长比	$V/(m \cdot s^{-1})$						
	3	15	30	90	150	210	240
0.003 33	0.196 212	0.223 614	0.251 098	0.573 470	1.049 383	1.754 520	2.138 400
0.006 67	0.430 609	0.657 576	0.787 081	1.317 382	2.318 795	3.655 432	4.365 309
0.008 33	0.801 001	0.876 780	1.036 114	1.840 744	3.042 196	4.632 388	5.617 447
0.010 00	1.018 110	1.197 772	1.241 492	2.303 525	3.791 126	5.777 434	6.945 132
0.011 67	1.446 156	1.483 278	1.672 972	2.788 004	4.664 306	6.970 644	8.360 397
0.013 33	1.545 986	1.572 279	2.057 158	3.461 783	5.501 091	8.533 708	10.291 072
0.016 67	2.043 465	2.290 635	3.094 792	4.756 793	7.460 056	10.986 430	/

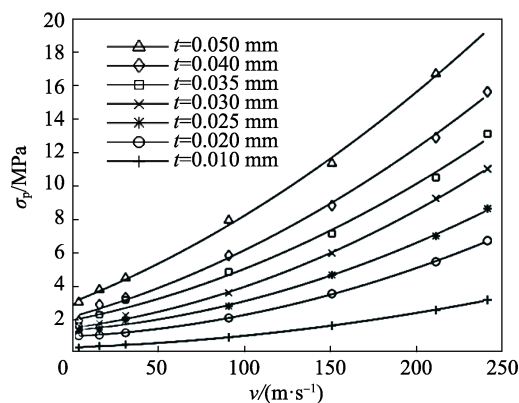
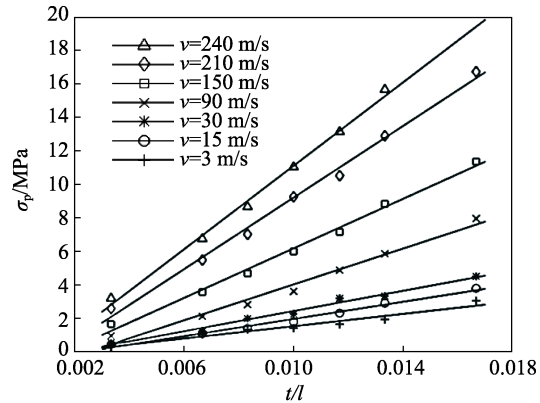
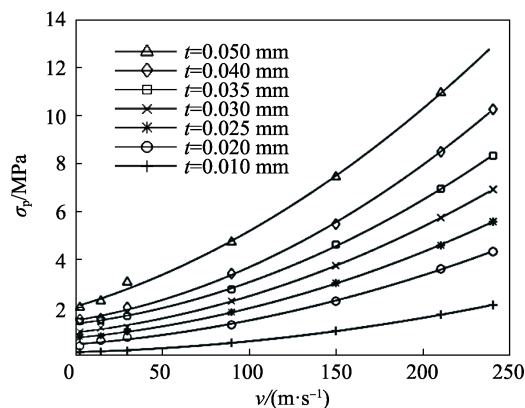
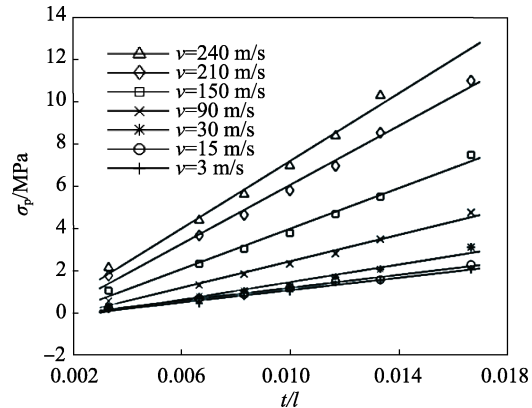
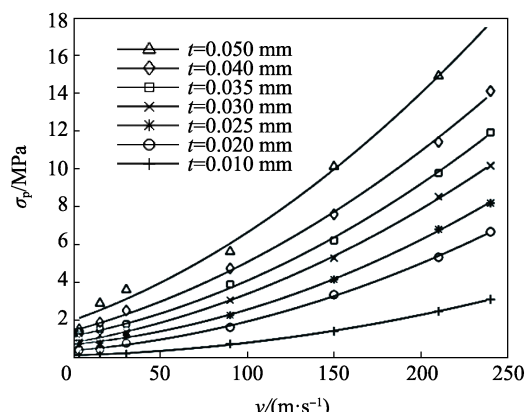
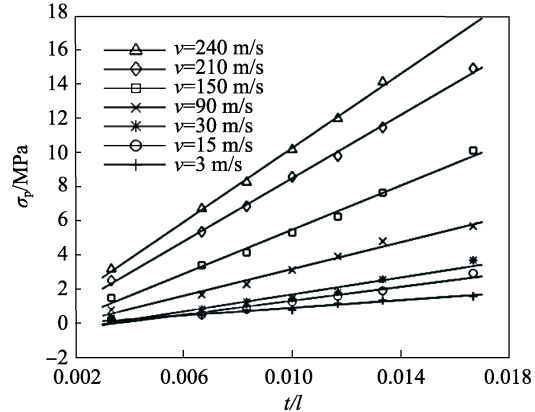
a 动态峰应力-速度曲线($\theta=30^\circ$)b 动态峰应力-壁厚边长比曲线($\theta=30^\circ$)c 动态峰应力-速度曲线($\theta=60^\circ$)d 动态峰应力-壁厚边长比曲线($\theta=60^\circ$)e 动态峰应力-速度曲线($\theta=130^\circ$)f 动态峰应力-壁厚边长比曲线($\theta=130^\circ$)

图 7 壁厚边长比和压缩速度与动态峰应力关系

Fig.7 Relation curves between dynamic plateau stress and ratio of wall thickness to edge length and compression velocity

表 2 不同拓展角的三角形蜂窝 ($t=0.03\text{ mm}$) 在不同压缩速度下的动态峰应力值Tab.2 Dynamic plateau stress values of triangular honeycombs ($t=0.03\text{ mm}$) with different expanding angles at different compression velocities MPa

$\theta/(^{\circ})$	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$						
	3	15	30	90	150	210	240
20	1.935 780	2.541 215	2.980 094	5.346 777	8.476 051	12.377 370	15.128 058
40	1.302 966	1.467 922	1.833 333	3.027 951	4.864 867	7.298 469	8.839 038
60	1.003 447	1.197 772	1.231 847	2.303 525	3.759 533	5.777 434	6.945 132
90	0.798 947	0.901 501	1.169 021	2.282 660	3.818 552	6.094 767	7.313 145
110	0.857 394	0.964 872	1.317 412	2.194 727	3.873 054	6.142 513	7.773 890
130	0.911 380	1.250 601	1.420 252	3.079 441	5.522 128	8.350 950	10.186 930
150	1.130 818	1.389 439	1.911 967	4.103 088	7.640 085	12.015 429	15.359 255

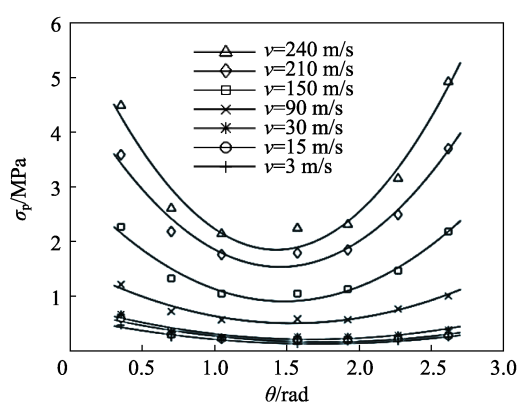
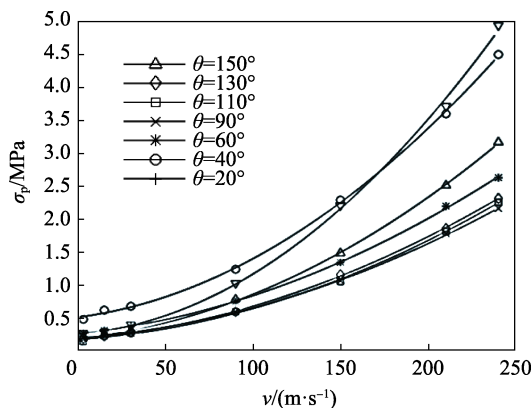
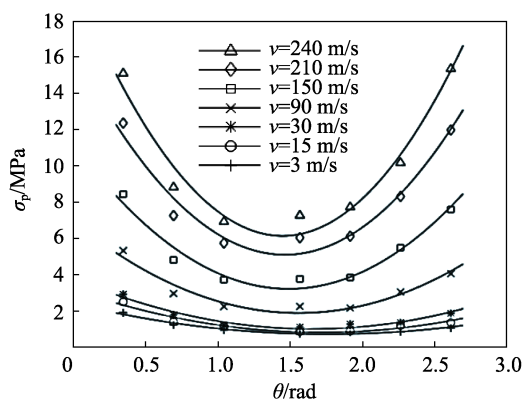
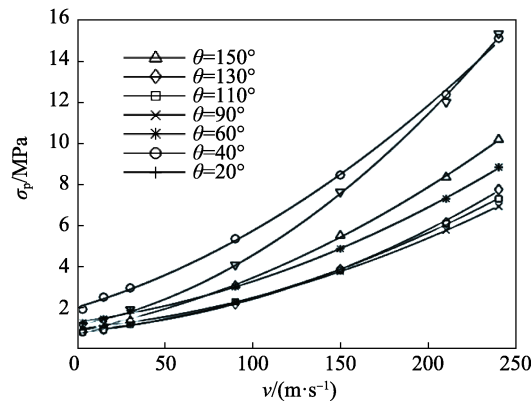
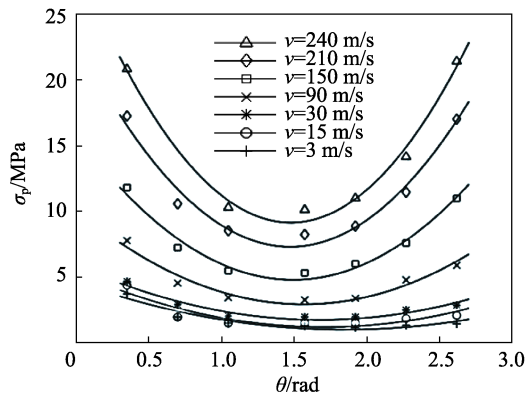
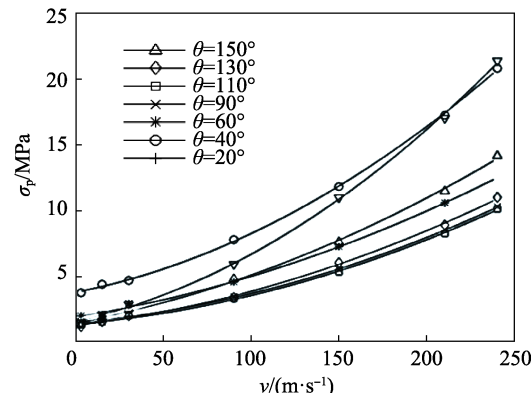
a 动态峰应力-拓展角曲线($t=0.01\text{ mm}$)b 动态峰应力-速度曲线($t=0.01\text{ mm}$)c 动态峰应力-拓展角曲线($t=0.03\text{ mm}$)d 动态峰应力-速度曲线($t=0.03\text{ mm}$)e 动态峰应力-拓展角曲线($t=0.04\text{ mm}$)f 动态峰应力-速度曲线($t=0.04\text{ mm}$)

图 8 拓展角和压缩速度与动态峰应力关系曲线

Fig.8 Relation curves between dynamic plateau stress of triangular honeycomb and expanding angles and compression velocities

式中： A^* ， B^* ， C 为关系系数，由蜂窝的材料、结构参数和压缩速度共同决定。

2.2.3 压缩速度（ v ）对三角形蜂窝异面动态峰应力的影响

图 7a，c，e 和图 8b，d，f 表明当保持除 v 之外的其他配置参数不变时，基于最小二乘法拟合可知，动态峰应力与压缩速度的曲线形式与二次函数最为接近。在异面压缩下，其表达式见式（7）。

$$\sigma_p = A'v^2 + B'v + C' \quad (7)$$

式中： A' ， B' 为关系系数，由蜂窝的材料、结构参数和压缩速度共同决定； C' 为异面静态峰应力。

3 结 语

通过有限元仿真模拟研究了三角形蜂窝在异面方向压缩性能，得出如下结论。

1）在压缩过程中，不同压缩速度和结构参数三角形蜂窝的应力-应变曲线趋势大致相同，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）在保证六边形蜂窝和三角形蜂窝相对密度一致时，正三角形蜂窝的比吸能比正六边形蜂窝更大，说明在异面方向上正三角形蜂窝比正六边形蜂窝能量吸收性能更好。

3）基于最小二乘法拟合出压缩速度和结构参数对三角形蜂窝动态峰应力的影响规律，为该种类型的材料模型的研究提供了理论铺垫。

参考文献：

- [1] FENG J, ZHANG Y C, WANG P, et al. Oblique Incidence Performance of Radar Absorbing Honeycombs[J]. Composites Part B: 2016, 99: 465—471.
- [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] 王青松, 卢子兴, 杨振宇, 等. 旋转正方形蜂窝面内冲击的数值模拟[C]// 中国力学学会固体力学专业委员会、国家自然科学基金委员会数理科学部, 中国力学学会, 2018. WANG Qing-song, LU Zi-xing, YANG Zhen-yu, et al. Numerical Simulation of In-plane Impact of Rotating Square Honeycomb[C]// Chinese Society of Mechanics Solid Mechanics Committee, National Natural Science Foundation of China, Chinese Society of Mechanics, 2018.
- [4] 卢子兴, 王欢, 杨振宇, 等. 星型-箭头蜂窝结构的面内动态压溃行为[J]. 复合材料学报, 2019, 36(8): 1893—1900. LU Zi-xing, WANG Huan, YANG Zhen-yu, et al. In-plane Dynamic Crushing of Star-arrowhead Honeycomb Structure[J]. Library Theory and Practice, 2019, 36(8): 1893—1900.
- [5] 李响, 周幼辉, 童冠. 类蜂窝结构的面内冲击特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(3): 80—86. LI Xiang, ZHOU You-hui, TONG Guan. In-Plane Dynamic Impact Characteristics of the Quasi-honeycomb Structure[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(3): 80—86.
- [6] ZHANG Q, YANG X, LI P, et al. Bioinspired Engineering of Honeycomb Structure-using Nature to Inspire Human Innovation[J]. Progress in Materials Science, 2015, 74: 332—400.
- [7] 郑吉良, 彭明军, 孙勇. 等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板的面外压缩性能[J]. 材料工程, 2017, 45(2): 72—79. ZHENG Ji-liang, PENG Ming-jun, SUN Yong. Out-plane Compressive Properties for Isosceles Trapezoid Honeycomb Core of FRP Sandwich Panel[J]. Journal of Materials Engineering, 2017, 45(2): 72—79.
- [8] 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.
- [9] HU L L, HE X L, WU G P. Dynamic Crushing of the Circular-celled Honeycombs under Out-of-plane Impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 75: 150—161.
- [10] 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.
- [11] TRAN T N, HOU S J, XU H, et al. Theoretical Prediction and Crashworthiness Optimization of Multi-cell Triangular Tubes[J]. Thin-Walled Structures, 2014, 82: 183—195.
- [12] TAO Y, DUAN S, WEN W, et al. Enhanced Out-of-plane Crushing Strength and Energy Absorption of In-plane Graded Honeycombs[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 118: 33—40.
- [13] BITZER T. Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing[M]. Berlin: Dordrecht Springer Netherlands, 1997: 10—11.
- [14] 赵辉, 宋扬, 黄江平. 胞元参数对铝蜂窝吸能特性的影响[J]. 机械设计, 2016, 33(9): 15—20. ZHAO Hui, SONG Yang, HUANG Jiang-ping. Influence of Cell Parameters on Aluminum Honeycomb's Energy Absorption Characteristics[J]. Journal of Machine Design, 2016, 33(9): 15—20.
- [15] 解江, 马骥瑶, 霍雨佳, 等. 纤维铺层角度对复合材料薄壁圆管轴向压溃吸能特性影响研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(20): 200—206. XIE Jiang, MA Cong-yao, HUO Yu-jia, et al. Effect of Ply Orientations on Energy-absorbing Characteristics of Composite Thin-walled Circular Tub[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(20): 200—206.