正方形自填充蜂窝结构异面平台应力的研究

孙德强¹,葛凤¹,张超²,崔燕燕¹,本金翠¹,常露¹,高璐璐¹,王倩¹ (1.陕西科技大学 a.中国轻工业功能印刷与运输包装重点实验室 b.轻化工程国家级实验教学示范 中心 c.3S 包装新科技研究所,西安 710021; 2.西安西电变压器有限责任公司,西安 710077)

摘要:目的 为了促进正方形自填充蜂窝的合理使用,研究其异面平台应力随冲击速度、壁厚边长比和 自填充级数的变化规律。方法 利用 ANSYS/LS-DYNA 建立基于胞元阵列的正方形自填充蜂窝异面冲击 分析的有限元模型。对自填充级数为0的正方形蜂窝进行异面压缩试验和相应的仿真分析,证明有限元 模型的可靠性。基于简化的超折叠单元理论,建立蜂窝准静态平台应力的理论模型,并证明理论模型的 可靠性。结果 正方形自填充蜂窝在大的壁厚边长比和冲击速度下拥有更高的动态平台应力;在自填充 级数由0变为1时,动态平台应力增长率最大。结论 在其他因素不变的情况下,正方形自填充蜂窝的 异面动态平台应力与冲击速度的平方呈线性关系,与壁厚边长比呈幂指函数关系,其增长率随自填充级 数逐级递减。基于数值模拟结果,得到了不同自填充级数下正方形自填充蜂窝异面动态平台应力的经验 公式。

关键词: 正方形自填充蜂窝; 异面冲击; 有限元模拟; 平台应力 中图分类号: TB484 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)17-0269-07 DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.17.033

Out-of-plane Plateau Stress of Square Self-filled Honeycomb Structure

SUN De-qiang¹, GE Feng¹, ZHANG Chao², CUI Yan-yan¹, BEN Jin-cui¹, CHANG Lu¹, GAO Lu-lu¹, WANG Qian¹

(1. a. Key Lab of Functional Printing and Transport Packaging of China National Light Industry b. National Demonstration Center for Experimental Light Chemistry Engineering Education c. 3S Research Institute of Novel Packaging Science and Technology, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China; 2. Xi'an XD Transformer Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

ABSTRACT: The work aims to promote the rational use of square self-filled honeycombs by studying the change rules of their out-of-plane plateau stresses with impact velocity, ratio of cell wall thickness to side length and self-filling order. ANSYS/LS-DYNA was used to establish the finite element model based on cells array for the out-of-plane impact analysis of square self-filled honeycombs. The out-of-plane compression test and corresponding simulation analysis were carried out on the square honeycomb with self-filling order of 0 to prove the reliability of the finite element model. Based on the simplified super folded element theory, the theoretical quasi-static plateau stress model of square self-filled honeycomb was established and verified by the simulation results. The square self-filled honeycomb higher dynamic plateau stress with increasing ratio of cell wall thickness to side length and impact velocity. When the self-filling order changed from 0 to 1, the growth rate of the dynamic plateau stress was the largest. When other factors are fixed, the out-of-plane dynamic plateau stress of square self-filled honeycomb has a linear relation with the square of velocity and a power func-

tion relation with the ratio of cell wall thickness to side length, and the growth rate decreases gradually with increasing self-filling order. Based on the finite element simulation, the empirical formulas of dynamic plateau stress are obtained for the square self-filled honeycomb with different self-filling orders.

KEY WORDS: square self-filled honeycomb; out-of-plane impact; finite element simulation; plateau stress

蜂窝常作为蜂窝板夹芯材料,具有质量小、比强 度高、比刚度大、稳定性好和吸能特性良好等诸多优 异性能,在包装、汽车、船舶和建筑等领域内有着广 泛的应用^[1-3]。目前,较为常见的蜂窝芯材结构有六 边形^[4]、方形^[5]、三角形^[6]等构型,有关其静动态力 学性能已经开展了大量的研究。

随着蜂窝应用和工程需求的日益扩大,促使蜂窝 向更轻和更强的方向发展,因此新的蜂窝不断被提 出,其中对蜂窝进行填充是一种有效提高整体吸能特 性的新思路。Liu 等^[7]通过对 EPP 泡沫填充和未填充 蜂窝板进行共异面压缩试验,发现随着 EPP 填料的 增加,蜂窝的平均平台应力和总能量吸收显著提高。 彭琦^[8]通过对一种聚氨酯泡沫填充类蜂窝进行共异 面的数值模拟,发现泡沫填充后显著提高了类蜂窝的 共异面耐撞性能。此外,蜂窝还有其他的填充方式, 如 Zhang 等^[9]将圆柱形管填充到正方形、六边形和八 边形蜂窝的不同位置,构成了一种仿生多胞蜂窝,对 其进行了理论与仿真分析,得到一种具有优异吸能效 果的结构。Wu等^[10]在正方形管中加入加强筋,使其 成为多单元薄壁结构,对其进行试验和有限元分析, 发现随着多胞管数量的增加,其平均平台应力和比能 量吸收得到明显提高。Zhang 等^[11]在六边形蜂窝的基 础上,用较小的规则六边形迭代构造了一种六边形分 层蜂窝,通过对0、1和2阶3种分层蜂窝进行仿真 分析得到,在相对密度一定的情况下,其总能量吸收 随着阶数的增加而增大。

受到上述填充方式的启发,本文以正方形蜂窝为 例,构建一种同种构型蜂窝进行"自填充"的蜂窝结 构,即正方形自填充蜂窝(Square Self-filled Honeycomb,简称 SSF 蜂窝)。建立可靠的用于冲击分 析的有限元模型,推导其异面静态平台应力理论公 式,并基于大量参数化仿真计算来探究冲击速度、壁 厚边长比和自填充级数对其异面平台应力的影响规 律,以此为 SSF 蜂窝优化设计提供理论支撑。

1 数值模拟分析

1.1 正方形自填充蜂窝

如图 1 所示, SSF 蜂窝是由不同的正方形以内接 方式逐级填充的。图 1 中的 *l*、*l*₁、*l*₂代表着逐级正方 形的边长,满足式(1)所示关系,其中 *n* 为自填充 级数。假设所有蜂窝胞元的壁厚为 *t*,异面方向上蜂





窝的高度为 h。

$$l_{n} = \frac{\sqrt{2}}{2} l_{n-1} = \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^{n} l$$
 (1)

1.2 有限元模型

本文借助 ANSYS/LS-DYNA 建立 SSF 蜂窝异面 动态冲击分析的有限元模型,如图 2 所示。蜂窝体夹 在 2 个刚性压板之间,支撑板 *P*₂固定,压缩板 *P*₁以 恒定速度 *v* 向下匀速压缩试样。蜂窝胞壁使用 5 个积 分点的 Belystchko-Tsay 壳单元 shell 163 进行网格划 分,单元边长为 0.5 mm。沿用 Sun 等^[12]所用材料参 数模型,蜂窝样品之间定义为 Self-contact 接触,蜂 窝体与两刚性压板间定义 Auto Surface-to-surface 接 触,静动摩擦因数均为 0.2。



1.3 有限元模型可靠性验证

1.3.1 样品压缩试验

为了验证文中有限元仿真建模方法的可靠性,对 2×2的正方形蜂窝胞元阵列进行静态压缩试验,试验 样品如图 3a 所示。其基材为 6063 T5 型铝合金,胞 元长 *l*=20 mm、高度 *h*=50 mm、壁厚 *t*=0.8 mm。利用 万能材料试验机对试样进行静态压缩,压缩速度为 10 mm/min;上压板的最大位移为 40 mm。





a 试验样品

b 静态压缩试验

图 3 压缩试验样品与设备 Fig.3 Specimen and machine of compression test

1.3.2 基材拉伸试验

参照 GB/T 16865—2013^[13]制作 6063 T5 型铝合金 的拉伸试样,加工尺寸如图 4 所示。单轴拉伸试验也在 万能材料试验机上进行,拉伸速率为 2 mm/min。从图 5 所示的拉伸应力-应变曲线中计算得到基材的材料参 数:弹性模量 E_s =68 GPa、屈服应力 σ_s =180 MPa、正切 模量 E_r =682 MPa、泊松比 μ =0.33、密度 ρ_s =2 700 kg/m³。



Fig.5 Tensile σ - ε curve of base material specimen

1.3.3 试验和仿真结果分析

假设压缩应变为 ε ,图 6 是试验和仿真得到的变

形模式。从图 6 中可以看出,蜂窝试样首先在靠近支 撑端位置产生褶皱变形,随后向上渐进折叠压缩直至 密实,这与有限元仿真变形模式相一致。图 7 是试验 和有限元仿真得到的应力-应变曲线和平台应力,发 现两者的应力-应变曲线具有很好的一致性,平台应 力的误差在 3.18 %左右。由此证明该有限元模型是可 靠的,可以用于后续的仿真分析。







2 理论分析

2.1 异面静态平台应力理论模型

Chen 等^[14]提出的简化的超折叠单元理论认为, 薄壁结构在异面压缩变形的过程中,变形能由塑性铰 链形成的弯曲能量 W_B和膜拉伸的应变能 W_m两部分 组成,即:

$$2HP_{\rm m}k = W_{\rm B} + W_{\rm m} \tag{2}$$

式中: *H* 为一个折叠的半波长; *P*_m 为平均压缩 载荷; *k* 为有效压缩行程系数,通常取 0.7~0.75^[15], 取 *k*=0.75。

单个折叠单元在折叠的过程中会产生 3 条弯曲 铰链,如图 8 所示,铰链转动的角度 θ_i 分别为 $\pi/2$ 、 π 和 $\pi/2$ 。将弯曲铰链的能量耗散相加得到弯曲能,见 式 (3)。

$$W_{\rm B} = \sum_{i=1}^{3} M_0 \theta_i B_{\rm n} = 2\pi M_0 B_{\rm n}$$
(3)

式中: M_0 为全塑性弯矩,其计算公式为 $M_0 = \frac{1}{4}\sigma_s t^2$;

 $\sigma_{\rm s}$ 为蜂窝基体材料的屈服应力^[16]; $B_{\rm n}$ 为蜂窝截面长度。





膜能是通过对膜拉伸和压缩的面积进行积分得 到的。Zhang 等^[17]把零级 SSF 蜂窝划分成 3 种基本单 元:角单元、"十"字形单元和"T"形单元,如图 9 所示,膜能的计算式分别见式(4)—(6)^[17]。

$$M_{(\oplus \oplus \pi)} = 4M_0 H^2 / t$$
 (4)

$$M_{(+)} = 16M_0 H^2 / t \tag{5}$$

$$M_{\rm (T)} = 8M_0 H^2 / t \tag{6}$$



图 9 零级正方形自填充蜂窝的折叠单元示意图 Fig.9 Schematic diagram of folding unit of 0 order square self-filled honeycomb

如图 10 所示, 一级 SSF 蜂窝在零级蜂窝的基础上, 增加了 "K" 形单元和六面板角单元两种基本折叠单元, 膜能的计算式见式 (7) — (9)^[18], 式中 β 为 45°。



图 10 一级正方形自填充蜂窝的折叠单元示意图 Fig.10 Schematic diagram of folding unit of 1 order square self-filled honeycomb

$$M_{(\mathrm{K})} = \frac{8M_0 H^2}{t} \left(1 + \frac{1}{\cos\beta} \right) \tag{7}$$

$$M_{({\rm chom}\,{\rm K})} = \frac{16M_0H^2}{t} \left(1 + \frac{1}{\cos\beta}\right) \tag{8}$$

因此, SSF 蜂窝膜能的通用计算公式为:

$$V_{\rm m} = N_{\rm c} M_{(\rm fl \mu \bar{\mu} \pi)} + N_{\rm 0} M_{(+)} + N_{\rm T} M_{(\rm T)} + N_{\rm K} M_{(\rm K)} + N_{\rm S} M_{(\rm fr m M)} = N_{(\rm m)} M_{\rm 0} H^2 / t$$
(9)

式中: N_{c} 、 N_{0} 、 N_{T} 、 N_{K} 和 N_{S} 分别为角单元、"十" 字形单元、"T"形单元、"K"形单元和六面板角单 元的个数; $N_{(m)}$ 为膜能的系数函数,是由基本折叠 单元的个数决定。

将式(3)和式(9)代入式(2)中,可以得到:

$$2HP_{\rm m}k = 2\pi M_0 B_{\rm n} + N_{\rm (m)} M_0 \frac{H^2}{t}$$
(10)

折叠半波长 H 可以由 $\partial P_m / \partial H = 0 来确定, 其计$ 算式见式(11)。

$$H = \sqrt{\frac{2\pi B_{\rm n} t}{N_{\rm (m)}}} \tag{11}$$

将式(11)代入式(10)中可以得到 SSF 蜂窝在 异面下所承受的平均载荷为:

$$P_{\rm m} = \frac{M_0}{k} \sqrt{\frac{2\pi B_{\rm n} N_{\rm (m)}}{t}} = \frac{\sigma_{\rm s}}{4k} t^{\frac{3}{2}} \sqrt{2\pi B_{\rm n} N_{\rm (m)}}$$
(12)

设 SSF 蜂窝的承载面积为 *A*,准静态平台应力的 计算式为:

$$\sigma_{\rm m} = \frac{P_{\rm m}}{A} = \frac{\sigma_{\rm s}}{4kA} t^{\frac{3}{2}} \sqrt{2\pi B_{\rm n} N_{\rm (m)}}$$
(13)

当 SSF 蜂窝在 $x_1 \ \pi x_3 \ 5$ 向上的胞元数量 N 均为 11 时,满足阵列最少胞元数目的要求^[19]。重复上述 过程,可以得到 0—5 级正方形自填充蜂窝准静态平 台应力的理论模型,即当 n=0 时, $\sigma_m=4.93\sigma_s(t/l)^{1.5}$; 当 n=1 时, $\sigma_m=18.07\sigma_s(t/l)^{1.5}$;当 n=2 时, $\sigma_{\rm m}$ =28.89 $\sigma_{\rm s}(t/l)^{1.5}$; 当 *n*=3 时, $\sigma_{\rm m}$ =38.17 $\sigma_{\rm s}(t/l)^{1.5}$; 当 *n*=4 时, $\sigma_{\rm m}$ =46.24 $\sigma_{\rm s}(t/l)^{1.5}$; 当 *n*=5 时, $\sigma_{\rm m}$ =53.35 $\sigma_{\rm s}(t/l)^{1.5}$ 。

2.2 理论模型的验证

从图 11 中可以看出, SSF 蜂窝在不同壁厚边长 比 *t/l* 下的准静态平台应力的理论值与仿真值具有很 好的一致性。说明在允许的误差范围内,所推导的理 论模型具有可靠性,可以有效预测 SSF 蜂窝的异面准 静态平台应力。



Fig.11 Theoretical and simulation values of quasi-static plateau stress

3 动态平台应力

已有研究表明^[20],蜂窝在异面动态冲击下会产生 动态增强现象,其动态平台应力会显著大于准静态平 台应力。本节将基于数值模拟分析来研究 SSF 蜂窝动 态平台应力 σ_n的影响因素。

3.1 冲击速度的影响

以一级 SSF 蜂窝为例来研究冲击速度 v 对蜂窝动

态平台应力 σ_1 的影响。表 1 给出了蜂窝在不同 t/l 和 v下的 σ_1 值,并基于最小二乘法拟合得到如图 12 所 示的 σ_1 -v曲线。从图 12 中可以看出,SSF 蜂窝的 σ_1 与 v^2 呈线性关系,满足关系式(14),符合 Reid 等^[21] 提出的一维冲击波模型。在 t/l一定时,v=200 m/s 的 σ_1 值在 v=3 m/s 的基础上提高了 163%~275%,说明 SSF 蜂窝在高速冲击载荷下具有更高的动态平台应力。

$$\sigma_n = \sigma_m + Cv^2 \tag{14}$$

式中: Cv² 为惯性效应引起的动态增强; C 为动态增强系数,列于表1的最后1列。

3.2 壁厚边长比的影响

从表1中可以看出,不同的壁厚边长比对应着不同的动态增强系数,为了研究这种相关性,基于最小二乘法拟合得到 *C-t/l* 曲线,如图 13 所示,并得到了动态增强系数的经验公式(15),这与 Ruan 等^[22]的结论是一致的。

$$C = 0.385(t/l)^{2} + 0.044(t/l) - 1.558 \times 10^{-4}$$
(15)
结合式(14)—(15),得到一级 SSF 蜂窝的动

态平台应力 σ_1 公式为:

$$\sigma_{1} = 18.07\sigma_{s} \left(t/l \right)^{\frac{1}{2}} + \left[0.385 \left(t/l \right)^{2} + 0.044 \left(t/l \right) - 1.558 \times 10^{-4} \right] v^{2}$$
(16)

当冲击速度 v 一定时,式(16)可以近似用幂指 函数来代替,即:

$$\sigma_1 = B\sigma_s \left(t/l \right)^P \tag{17}$$

式中: *B* 为拟合系数; *P* 为指数。不同的冲击速 度下对应着不同的 *B* 和 *P*。

基于表达式(17) 拟合表 1 中的数据,得到如图 14 所示的 σ_1 -*t*/*l* 曲线。从图 14 中可以看出,仿真值 与经验公式具有很好的一致性。在 v 一定时,一级 SSF 蜂窝的 σ_1 与 *t*/*l* 呈幂指数关系,*t*/*l*=0.05 的 σ_1 值是 *t*/*l*=0.006 的 23.27 倍,说明大的壁厚边长比能够使 SSF 蜂窝承受更高的异面动态平台应力。

表 1 一级正方形自填充蜂窝在异面冲击载荷下的动态平台应力值 Tab.1 Dynamic plateau stresses of 1 order square self-filled honeycomb under out-of-plane impact

壁厚边	$\sigma_{ m l}/{ m MPa}$												<i>C</i> /
长比	v=	v=	v=	v=	v=	v=	v=	v=	v=	v=	v=	v=	$(10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
	3 m/s	6 m/s	10 m/s	20 m/s	30 m/s	50 m/s	70 m/s	100 m/s	125 m/s	150 m/s	175 m/s	200 m/s	
0.006	2.13	2.50	2.61	2.79	3.00	3.46	4.08	4.96	5.76	6.75	7.65	7.98	1.68
0.010	4.98	4.92	4.73	5.32	5.70	6.65	7.81	9.68	11.32	12.98	14.77	16.72	3.28
0.014	7.91	8.02	7.57	8.66	9.30	10.79	11.69	15.50	18.03	20.72	23.66	26.63	5.07
0.020	13.74	13.86	14.07	14.74	15.75	17.58	20.61	25.03	29.34	33.36	38.24	43.20	8.07
0.030	26.57	26.90	26.19	28.50	30.40	32.67	37.81	46.82	54.11	62.07	70.63	79.74	14.60
0.040	43.41	44.45	43.35	44.96	46.80	50.78	58.74	67.68	85.01	97.53	116.74	129.72	23.90
0.050	67.10	67.64	67.79	68.67	71.02	76.93	84.20	101.99	117.82	137.33	153.19	176.53	29.20



图 14 一级正方形自填充蜂窝的 σ₁-t/l 曲线 Fig.14 σ₁-t/l curves of 1 order square self-filled honeycombs

3.3 自填充级数的影响

采用上述一级 SSF 蜂窝动态平台应力经验公式

的拟合方法,可得到 0、2、3、4 和 5 级 SSF 蜂窝异 面 动态平台应力公式,分别为 $\sigma_0 = 4.93\sigma_s(t/l)^{\frac{3}{2}} + \left[0.257(t/l)^2 + 0.011(t/l) - 0.136 \times 10^{-4}\right]v^2$ 、 $\sigma_2 = 28.89$ · $\sigma_s(t/l)^{\frac{3}{2}} + \left[0.045(t/l)^2 + 0.067(t/l) - 2.012 \times 10^{-4}\right]v^2$ 、 $\sigma_3 = 38.17\sigma_s(t/l)^{\frac{3}{2}} + \left[0.281(t/l)^2 + 0.07(t/l) - 2.181 \times 10^{-4}\right]v^2$ 、 $\sigma_4 = 46.24\sigma_s(t/l)^{\frac{3}{2}} + \left[0.032(t/l)^2 + 0.087(t/l) - 3.039 \times 10^{-4}\right]v^2$ 、 $\sigma_5 = 53.35\sigma_s(t/l)^{\frac{3}{2}} + \left[0.009(t/l)^2 + 0.094(t/l) - 3.202 \times 10^{-4}\right]v^2$ 。

图 15 为 0—5 级 SSF 蜂窝在 t/l 为 0.02 时的 o_n-n 曲线。从图 15 可直观看出,当 v 一定时,蜂窝的动 态平台应力随自填充级数逐级递增,其增长率随自填 充级数逐级递减。在自填充级数由 0 变为 1 时,动态 平台应力的增长率最大,在自填充级数由 4 变为 5 时, 动态平台应力的增长率最小,这与经验公式中的动态 增强系数的变化规律是相吻合的。



4 结语

本文主要基于简化的超折叠单元理论和有限元 数值模拟,得到了 SSF 蜂窝异面平台应力的理论模型 和经验公式,具体结论如下:

1)通过对蜂窝样品进行准静态压缩试验,将试验结果与仿真结果进行对比,变形模式与应力-应变曲线都具有很好的一致性,由此证明了有限元仿真模型的可靠性。

2)基于简化的超折叠单元理论推导了 SSF 蜂窝 准静态平台应力的理论模型,对比分析了仿真值与理 论值,两者都很吻合,说明理论模型是准确的。

3)SSF 蜂窝的动态平台应力与速度的平方呈线 性关系,与壁厚边长比呈幂指函数关系,在大的壁厚 边长比和高速冲击下,具有更高的动态平台应力。 4) SSF 蜂窝的动态平台应力增长率随自填充级数的增加而趋缓。当 n 由 0 变为 1 时,动态平台应力的增长率最大。通过数值模拟计算结果,得到了 0—5 级 SSF 蜂窝动态平台应力的经验公式。

参考文献:

 [1] 马芳武,孙昊,梁鸿宇,等. 自相似分层蜂窝结构多 碰撞工况耐撞性研究[J]. 汽车工程, 2022, 44(6): 886-892.

MA Fang-wu, SUN Hao, LIANG Hong-yu, et al. Study on Crashworthiness of Self-Similar Hierarchical Honeycomb Structure under Multiple Collision Conditions[J]. Automotive Engineering, 2022, 44(6): 886-892.

- [2] ALPHONSE M, RAJA V, KRISHNA V, et al. Mechanical Behavior of Sandwich Structures with Varying Core Material-a Review[J]. Materials Today Proceedings, 2021, 44(1): 3751-3759.
- [3] XU Gang, WANG Zhong-gang, LI Zhen-dong, et al. Theoretical and Numerical Analyses on Mechanical Performance of Octagonal Honeycomb Structures Subjected to Out-of-Plane Compression[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2020, 27(17): 1461-1472.
- [4] ALTIN M, ACAR E, GULER M. Crashworthiness Optimization of Hierarchical Hexagonal Honeycombs under Out-of-Plane Impact[J]. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science, 2020, 235(6): 203-210.
- [5] LI Zhi-gang, WANG J, LI M, et al. Theoretical Analysis and Numerical Simulation of Square Honeycombs[J]. Journal of Physics Conference Series, 2021, 1777(1): 1-8.
- [6] ZHANG Yong, CHEN Teng-teng, XU Xiang, et al. Out-of-Plane Mechanical Behaviors of a Side Hierarchical Honeycomb[J]. Mechanics of Materials, 2019, 140: 103227.
- [7] LIU Qiang, FU Jie, MA Jing-bo, et al. Axial and Lateral Crushing Responses of Aluminum Honeycombs Filled with EPP Foam[J]. Composites Part B Engineering, 2017, 130: 236-247.
- [8] 彭琦.泡沫填充类蜂窝夹层结构耐撞性分析[D].宜
 昌:三峡大学, 2020: 15-46.
 PENG Qi. Crashworthiness Analysis of Foam-Filled Honeycomb-Like Sandwich Structure[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2020: 15-46.
- [9] ZHANG L W, BAI Z H, BAI F H. Crashworthiness Design for Bio-inspired Multi-cell Tubes with Quadrilateral, Hexagonal and Octagonal Sections[J]. Thin-Walled Structures, 2018, 122(1): 42-51.
- [10] WU Su-zhen, ZHENG Gang, SUN Guang-yong, et al. On Design of Multi-Cell Thin-Wall Structures for Crashworthiness[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 88: 102-117.
- [11] ZHANG Yong, LU Ming-hao, WANG C H, et al.

Out-of-Plane Crashworthiness of Bio-Inspired Self-Similar Regular Hierarchical Honeycombs[J]. Composite Structures, 2016, 144: 1-13.

- [12] SUN D Q, SUN Y J, BEN J C, et al. Energy Absorption Characteristics of Circular-celled Honeycombs under Inplane Quasi-static Compressive Loadings[J]. International Journal of Materials Research, 2021, 112(7): 565-577.
- [13] GB/T 16865—2013,变形铝、镁及其合金加工制品拉 伸试验用试样及方法[S].
 GB/T 16865—2013, Test Pieces and Method for Tensile Test for Wrought Aluminium and Magnesium Alloys Products[S].
- [14] CHEN W, WIERZBICKI T. Relative Merits of Single-cell, Multi-Cell and Foam-filled Thin-Walled Structures in Energy Absorption[J]. Thin-Walled Structures, 2001, 39(4): 287-306.
- [15] 于鹏山,刘志芳,李世强.新型仿生蜂窝结构的设计 与耐撞性能分析[J].高压物理学报,2022,36(1): 149-160.
 YU Peng-shan, LIU Zhi-fang, LI Shi-qiang. Design and Crashworthiness Analysis of New Bionic Honeycomb Structure[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(1): 149-160.
- [16] 赵国伟,白俊青,祁玉峰,等.异面冲击下金属蜂窝 结构平均塑性坍塌应力模型[J].振动与冲击,2016, 35(12): 50-54.
 ZHAO Guo-wei, BAI Jun-qing, QI Yu-feng, et al. Average Plastic Collapse Stress Model of Metallic Honeycomb Structure under Out-of-Plan Impact Load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(12): 50-54.
 [17] ZHANG Xiong, CHENG G. ZHANG Hui, Theoretical
- [17] ZHANG Xiong, CHENG G, ZHANG Hui. Theoretical Prediction and Numerical Simulation of Multi-Cell Square Thin-Walled Structures[J]. Thin-Walled Structures, 2006, 44(11): 1185-1191.
- [18] TRAN T, HOU Shu-juan, HAN Xu, et al. Theoretical Prediction and Crashworthiness Optimization of Multi-Cell Triangular Tubes[J]. Thin-Walled Structures, 2014, 82(12): 183-195.
- [19] WANG Zhong-gang, SHI Chong, DING San-san, et al. Crashworthiness of Innovative Hexagonal Honeycomb-Like Structures Subjected to Out-of-Plane Compression[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(2): 621-628.
- [20] XU Shan-qing, BEYNON J H, RUAN Dong, et al. Strength Enhancement of Aluminium Honeycombs Caused by Entrapped Air under Dynamic Out-of-Plane Compression[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 47: 1-13.
- [21] REID S R, PENG C. Dynamic Uniaxial Crushing of Wood[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 19(5/6): 531-570.
- [22] RUAN D, LU G, WANG B, et al. In-Plane Dynamic Crushing of Honeycombs—a Finite Element Study[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(2): 161-182.