

铝蜂窝在压-剪组合荷载作用下的力学特性研究

杨辉¹, 刘亚红¹, 侯秀慧², 尹冠生¹

(1. 长安大学理学院, 西安 710064; 2. 西北工业大学力学与土木建筑学院, 西安 710072)

摘要: 对铝蜂窝在压-剪组合荷载作用下的变形特征进行试验研究, 并基于试验建立铝蜂窝数值计算模型, 分析各参数对铝蜂窝在压-剪组合荷载作用下力学行为的影响。结果表明: 在 TL 面内加载时, 蜂窝变形逐渐由只在一端(加载端)变形过渡到同时在两端(加载端和非加载端)变形。在 TW 面加载时, 蜂窝主要在一端(加载端)产生变形, 并且更容易出现脱胶破坏; 蜂窝峰值荷载、平均荷载以及比能与 l/t 值呈负相关关系。 l/t 值相同时, 单元边长 l 、单元壁厚 t 越小, 则蜂窝平均荷载和比能越大。单元边长 l 对蜂窝平均荷载的影响要大于单元壁厚 t 对平均荷载的影响; 增大蜂窝高度会降低结构吸能效率。

关键词: 铝蜂窝; 组合荷载; 数值分析; 力学响应

中图分类号: V414

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.12.016

A study on the mechanical properties of aluminum honeycomb under combined shear-compression loading

YANG Hui¹, LIU Yahong¹, HOU Xiuhui², YIN Guansheng¹

(1. College of Science, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Mechanics, Civil Engineering and Architect, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The deformation characteristics of aluminum honeycomb under combined compression-shear loads were studied by an experiment. Numerical models of aluminum honeycomb were established based on the experiment to analyze the influence of parameters for the mechanical behaviors of aluminum honeycomb under combined compression-shear loads. The results show that the deformation of aluminum honeycomb gradually changes from one end (loading end) to two ends (loading end and non-loading end) when it was loaded at a TL plane. When it was loaded at TW plane, the deformation of honeycomb occurred at one end (loading end), and the debondings were more likely to occur during the loading process. The peak load, average load, and specific energy of honeycomb are negatively correlated with the value of l/t under combined compression-shear loads. If the values of l/t of honeycombs are the same, the smaller the length l and the wall thickness t are, the larger the average load and specific energy of the honeycomb are. The change of length l has greater effects on the average load of honeycomb than the change of wall thickness t . Increasing the height of honeycomb will reduce the energy absorption efficiency.

Key words: aluminum honeycomb; combined loads; numerical analysis; mechanical response

铝蜂窝是一种高比刚度、比强度的轻质结构, 且具备良好的可设计性及吸能性能, 因此在航空航天、汽车制造等领域中被广泛地应用^[1-2]。针对铝蜂窝结构的力学特性, 学者们已经开展了大量的研究。关于铝蜂窝静态问题的研究, 主要涉及其在静态荷载作用下的变形和吸能特征^[3-4]、尺寸效应^[5-6]等。铝蜂窝动态问

题的研究如: 铝蜂窝的动态强化作用^[7-9]、惯性效应^[10-12]等。除对铝蜂窝静、动态基本力学行为进行研究外, 从材料和结构角度研究铝蜂窝也是目前的研究热点之一, 如对填充碳纤维铝蜂窝^[13]、梯度蜂窝^[14]、仿生马蹄形蜂窝^[15]、组合式蜂窝^[16]、串联式铝蜂窝^[17]、加筋铝蜂窝^[18]、蜂窝-泡沫^[19]等结构的研究。另外, 铝蜂窝也常常被作为三明治结构芯层用以承受冲击^[20]或爆炸荷载^[21-22]。

目前针对铝蜂窝的研究, 大部分都只涉及铝蜂窝在单轴作用力下的力学行为。由于蜂窝在多轴载荷下的试验操作相对繁琐, 且不易测得所需数据, 故目前对

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11402035)

收稿日期: 2018-12-13 修改稿收到日期: 2019-12-25

第一作者 杨辉 男, 硕士生, 1992 年生

通信作者 尹冠生 男, 教授, 博士生导师, 1958 年生

铝蜂窝在多轴荷载作用下的研究较少^[23-30]。实际工程问题中,铝蜂窝结构往往承受多种荷载共同作用,因此了解铝蜂窝在多轴荷载作用下的力学行为是铝蜂窝结构设计的迫切需要,尤其是在压-剪组合荷载作用下的力学行为。所以文中设计了一种简单、有效的铝蜂窝压-剪组合荷载试验,并结合数值计算的方法,研究铝蜂窝在压-剪组合荷载作用下的力学行为,分析影响其在组合荷载作用下力学响应的因素。

1 铝蜂窝压-剪组合荷载试验

1.1 试验设计

试验中所采用铝蜂窝如图1所示,在W、L、T方向上的长度分别为48 mm,48 mm,30 mm。铝蜂窝往往通过冲压成型的板材沿特定方向胶结成型,故蜂窝单元中有1/3壁厚为双层壁厚。单层壁厚 $t=0.05$ mm,边长 $l=3$ mm。蜂窝基体材料为铝合金3003,屈服极限 $\sigma_0=107$ MPa,弹性模量 $E=69$ GPa,密度 $\rho=2\ 730$ kg/m³,泊松比 $\nu=0.33$ 。

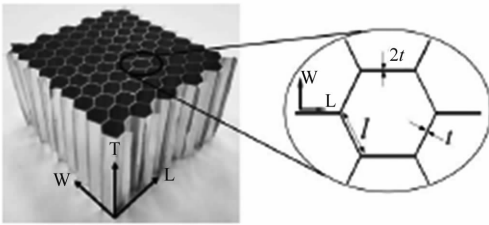
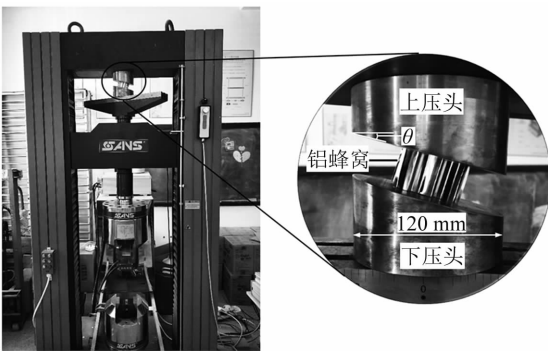


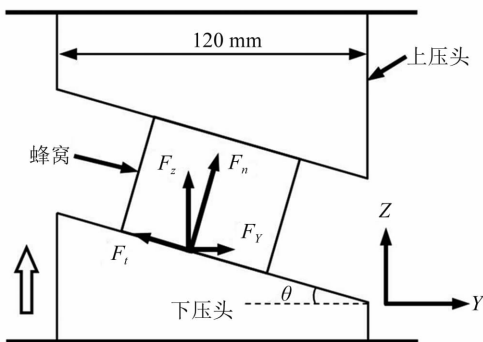
图1 铝蜂窝

Fig. 1 Aluminum honeycomb

试验加载方式如图2所示:一对直径为120 mm,且



(a) 实物图



(b) 示意图

图2 铝蜂窝加载方式

Fig. 2 Loading method of Aluminum honeycomb

一端为斜面的圆柱形压头与试验机固结,下压头沿Z轴方向向上运动,分别在TL面、TW面(图1所示)内对铝蜂窝加载,加载角度 θ 分别为 $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$,每种工况包含三组试件,总共21组。 F_n, F_t 分别为蜂窝受到的轴向压力和剪力。压头对蜂窝作用力沿Y、Z轴分量为 F_y, F_z 。由图可知

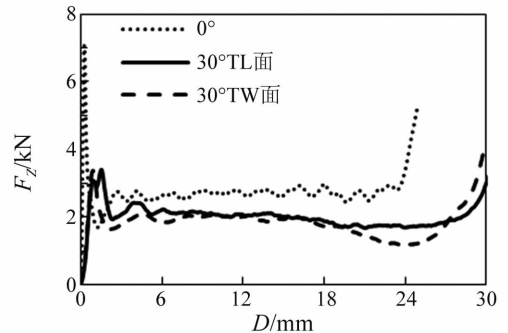
$$F_n = F_z \cos \theta + F_y \sin \theta \quad (1a)$$

$$F_t = F_z \sin \theta - F_y \cos \theta \quad (1b)$$

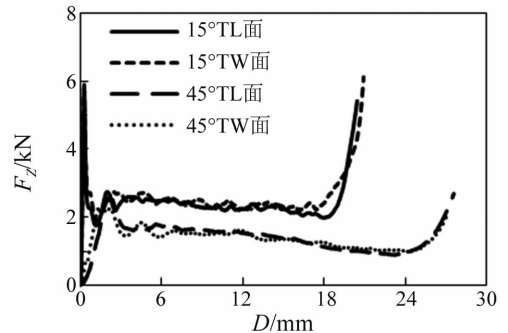
采用CMT5305电子万能试验机加载,加载速度为5 mm/min。

1.2 荷载-变形曲线

由于试验中只能测得竖向力 F_z ,故绘制 F_z -压缩量曲线如图3所示,其中D为下压头压缩量。加载角度相同时,在TL面和TW面内加载,峰值荷载及平台荷载相差不大, F_z 为压缩量曲线变化特征也基本一致:都存在明显的弹性段、平台段以及密实段,且加载角度越大,峰值荷载和平台荷载越小。另外,非轴向加载时(加载角度大于 0°),平台荷载会随着变形的增加而逐渐减小,且加载角度越大,减小程度越明显,这是铝蜂窝变形模式由渐进式压溃变形逐渐向整体失稳变形过渡导致的。



(a) $0^\circ, 30^\circ$ 加载



(b) $15^\circ, 45^\circ$ 加载

图3 铝蜂窝 F_z -变形曲线

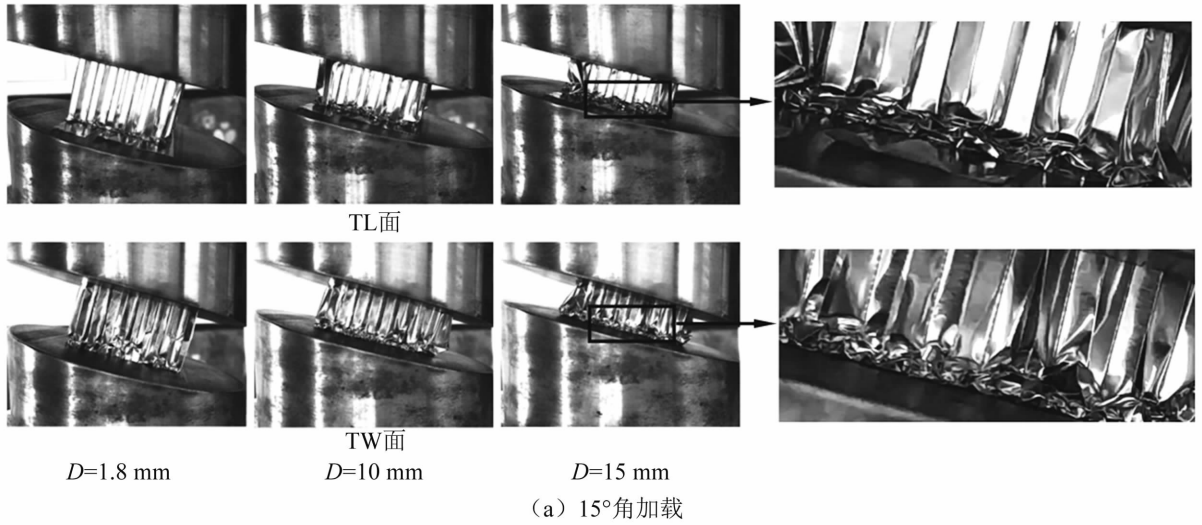
Fig. 3 F_z -deformation curves of aluminum honeycomb

1.3 变形

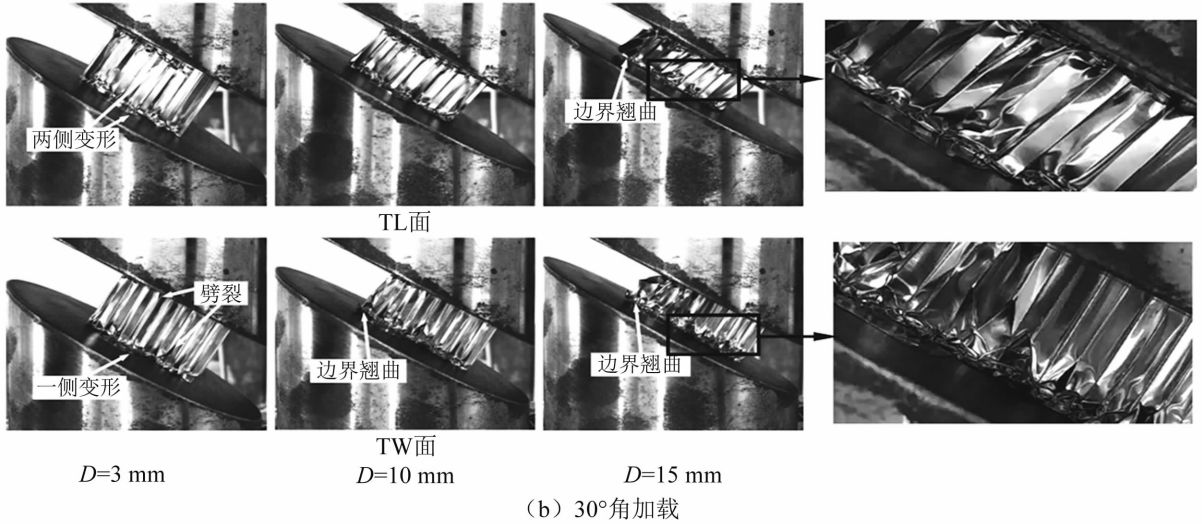
加载过程中铝蜂窝变形特征如图4所示。 15° 角加载(图4(a))时,在TL面和TW面内加载变形都开始于蜂窝下端(加载端),并随加载过程持续逐渐向上拓展,且铝蜂窝变形越大,边界翘曲现象越明显。 30° ,

45°角加载(图 4(b)、(c))时,在 TL 面内,变形同时开始于蜂窝上下两端,并随着加载过程持续逐渐向蜂窝中部拓展,加载过程中蜂窝外侧未产生明显的脱胶劈

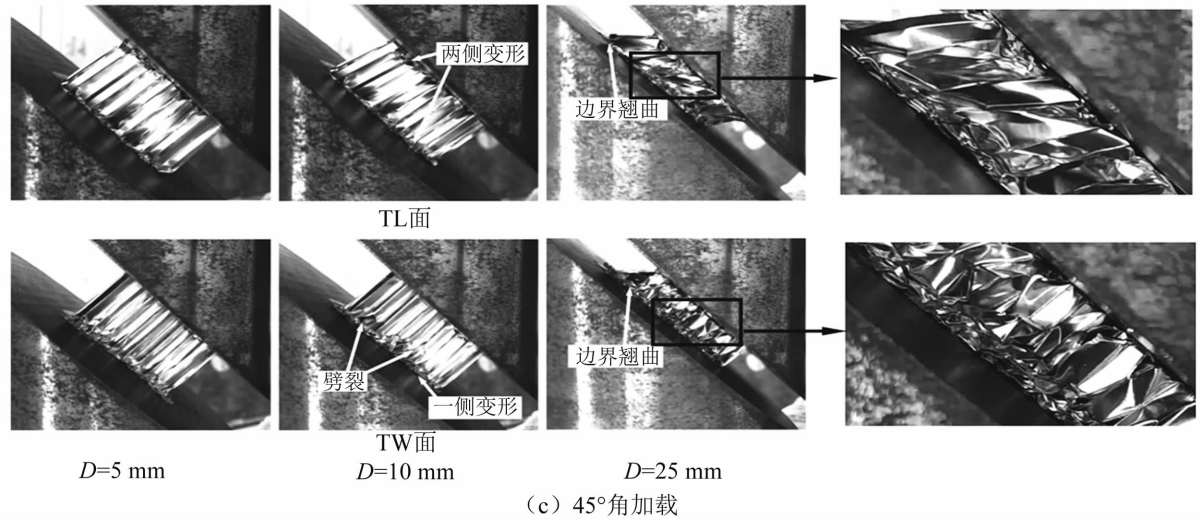
裂现象。而在 TW 面内加载时,蜂窝变形主要在下端产生,且加载过程中蜂窝外部产生了明显的脱胶劈裂,边界翘曲现象也比在 TL 面内加载时严重。



(a) 15°角加载



(b) 30°角加载



(c) 45°角加载

图 4 铝蜂窝变形及局部放大图

Fig. 4 Deformation of aluminum honeycombs

总结试验中铝蜂窝三种主要的屈曲模式如图 5 所示。模式 I:蜂窝变形始于加载端,主要产生渐进压溃变形。蜂窝单元侧壁受载后形成规则的褶皱,在荷

载-压缩量曲线上表现为荷载随位移变化而上下浮动。各层褶皱未错开或错开距离很小,且紧密地堆积在一起,蜂窝侧壁在各弯折处都形成塑性铰。此时剪

力对蜂窝变形影响较小。显然,0°角及15°角加载(TL面和TW面)时,铝蜂窝都表现出模式I的变形特征。模式II:蜂窝变形同时开始于蜂窝两端(加载端和非加载端),两端蜂窝受载形成褶皱,并逐渐向中部延伸,各层褶皱错开距离增大。随着加载过程的持续,结构还出现了整体的转动变形,此时同时存在渐进压溃变形和整体失稳变形,剪力的影响逐渐突显。加载角度为30°、45°时,在TL面内加载变形模式主要为模式II。模式III:蜂窝基本只在加载端形成褶皱,各层褶皱互相错开,非加载端出现明显的转动变形,剪力影响显著。蜂窝在TW面内加载时,主要表现为此种模式的变形特征。

对比45°角加载结束后铝蜂窝变形(图6)发现,在TW面内加载的三组蜂窝全部出现脱胶破坏,而在TL面内加载的铝蜂窝未出现脱胶破坏。30°角加载时,在

TW面加载的三组试件中有一组也出现了脱胶破坏。主要的原因在于,在TW面加载时,蜂窝所受剪力方向与W轴方向平行,即是垂直于双壁厚侧壁的(图1),在该方向蜂窝侧壁胶结强度低,容易导致脱胶开裂。而一旦出现脱胶开裂现象,脱胶部分蜂窝单元会从整体脱离,其变形与蜂窝整体也会出现差异,也就是文中观察到的边界翘曲现象。故在TW面加载时,蜂窝边界翘曲现象要比TL面加载时明显。而在TL面加载时,剪力方向平行于L轴方向,即与双壁厚侧壁平行(图1),该方向蜂窝侧壁胶结强度高,能更好地承受剪力,不易出现脱胶破坏。尽管沿两平面加载所得到的 F_z -压缩量曲线差别并不大,但考虑到脱胶脱焊对蜂窝结构力学性能的长期影响,工程实际中应尽可能使荷载在TL面内加载。

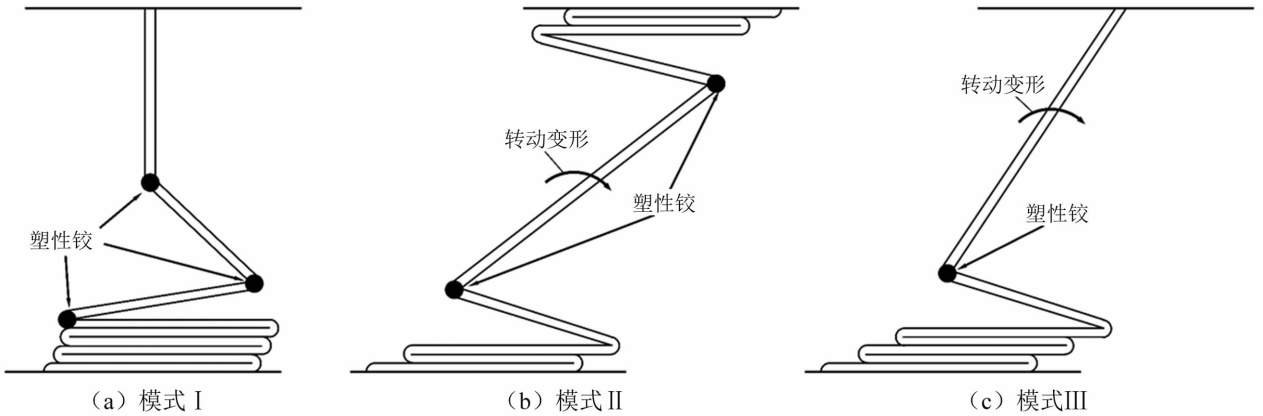


图5 铝蜂窝变形模式分析

Fig. 5 Deformation modes of aluminum honeycomb

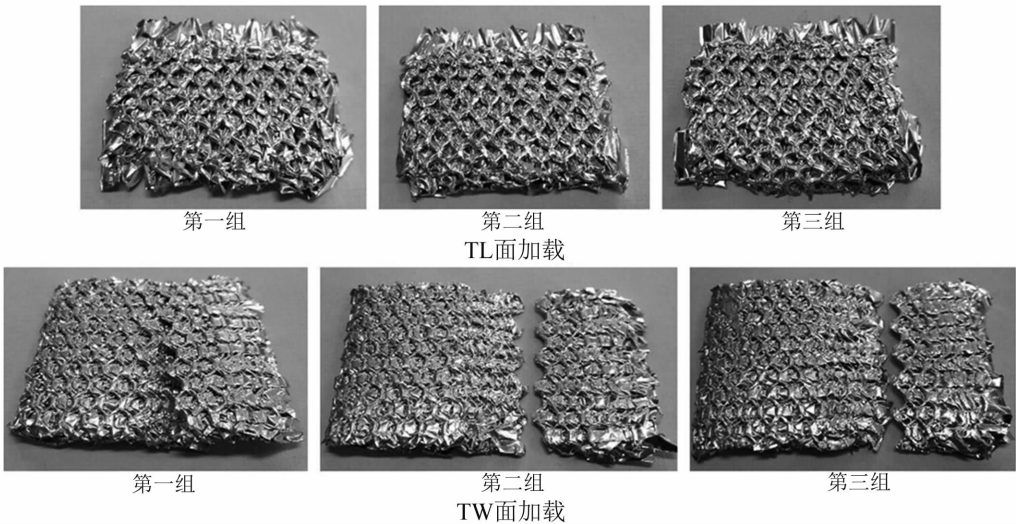


图6 加载结束后铝蜂窝变形($\theta = 45^\circ$)

Fig. 6 Deformation of aluminum honeycomb ($\theta = 45^\circ$)

2 数值计算

2.1 数值计算模型验证

借助 ABAQUS 建立与试验相同规格铝蜂窝数值计算模型。由于铝蜂窝属于薄壁结构,故采用壳单元来

分析计算其力学响应是合适的^[31]。铝蜂窝与压头接触面间建立面-面 Rough 接触,以避免铝蜂窝受载过程中出现滑移。加载过程中其它类型相互作用采用通用接触算法来模拟,厚度方向设立 5 个积分点。此外,由于加载过程中压头变形可忽略,故将上下压头

看作刚性体,以减小计算成本。由于铝蜂窝单元尺寸很小,因此有必要对其微屈曲/失效问题进行网格敏感性分析,以尽可能消除模型网格划分引起的计算误差。对铝蜂窝数值模型分别划分尺寸为 0.25 mm, 0.3 mm, 0.4 mm 的全局网格,计算与试验相同工况下铝蜂窝力学响应。

图 7 为试验与不同网格尺寸模型计算结果对比。网格尺寸为 0.25 mm 时,所得荷载曲线与试验一致性最好。峰值荷载存在一定差别,可归因于在试验开始时试样和斜面之间的轻微滑动。另外,铝蜂窝试件往往存在诸如不规则的细胞几何形状、不均匀或预屈曲的细胞壁、壁厚变化等初始缺陷。这些初始缺陷也会影响初始峰值,但对铝蜂窝在塑性阶段的力学行为影响不大。密实段开始位置存在一定差异,可能的原因在于试验中蜂窝和压头间接触存在缝隙。另外,数值计算模型材料是均匀的,且未考虑加载过程中蜂窝脱胶开裂的影响,这也是导致密实段出现差别的原因。对比加载过程中蜂窝变形(图 8)发现,网格尺寸为 0.25 mm 时,蜂窝褶皱产生的位置及边界翘曲现象与试验最吻合。由上述分析可知,网格尺寸取为 0.25 mm 时,数值模型计算结果是可靠的。

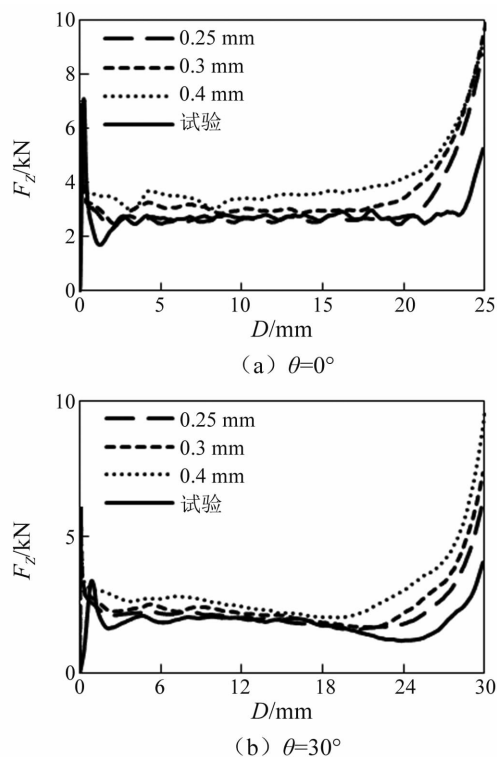


图 7 荷载-变形曲线对比

Fig. 7 Comparison of F_z -deformation curves

2.2 l/t 比值的影响

影响铝蜂窝力学性能因素众多,若完全采用试验方法成本过高,且组合荷载试验并不易实现,故利用数值计算方法对铝蜂窝进行参数研究。由图 2(b)可知下压头对铝蜂窝所施加合力 F_{in} 可由下式计算

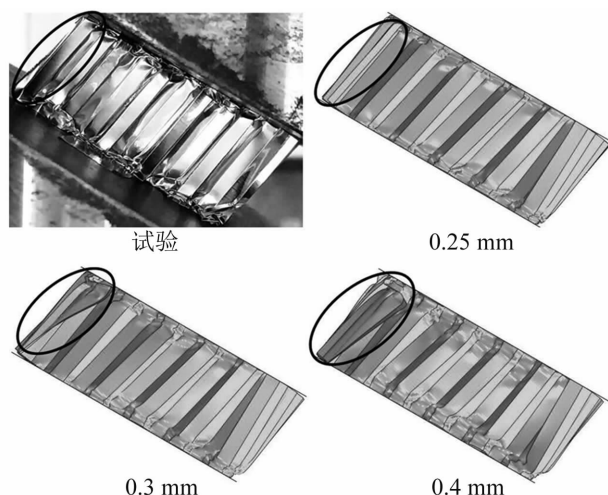


图 8 变形对比(TL 面 $\theta=30^\circ$, $D=10$ mm)

Fig. 8 Comparison of deformation

(at TL plane with $\theta=30^\circ$, $D=10$ mm)

$$F_{in} = \sqrt{F_z^2 + F_y^2} \quad (2)$$

由于铝蜂窝主要的吸能阶段在平台段,故定义平台阶段的平均荷载

$$F_{in}^{av} = \frac{1}{\delta_d - \delta_s} \int_{\delta_s}^{\delta_d} F_{in}(\delta) d\delta \quad (3)$$

式中: δ_d 为蜂窝密实段开始时的变形量; δ_s 为蜂窝塑性阶段开始时的变形量; δ 为铝蜂窝变形量。

比能(Specific Energy Absorption, SEA)被常用来定量地分析金属结构能量吸收性能。比能即结构单位质量所吸收的能量,可由下式计算

$$SEA = \frac{EM}{M} \quad (4)$$

式中: EA 为结构能量吸收值,文中即铝蜂窝在达到密实应变前所吸收的能量; M 为结构质量。

建立表 1 所示 7 种规格铝蜂窝数值计算模型, W 、 L 、 T 方向尺寸与试验相同,研究单元边长 l 和单元壁厚 t 的比值对铝蜂窝结构力学性能的影响。利用(2)式、(3)式计算加载过程中各蜂窝所受峰值荷载、平均荷载及比吸能。蜂窝单元边长 l (H1-H4) 或单元壁厚 t (H3, H5-H7) 相同时, l/t 比值越小,结构质量越大,在组合荷载作用下,峰值荷载、平均荷载和比能越大。同样,当单元边长 l 和单元壁厚 t 都不相同时(H1 和 H6、H3 和 H7),发现了同样的规律。当 l/t 比值相同时,对比 H5 和 H1 发现,前者的平均荷载和比能更高。对比 H6 和 H2、H7 和 H4 发现了同样的规律。主要的原因在于 H5、H6 和 H4 与对应蜂窝相比,单元边长 l 和单元壁厚 t 更小。减小单元边长能够增加结构稳定性,使侧壁不易因孔径过大而出现局部失稳。而减小壁厚能增加结构柔性,使得侧壁更容易屈服。

基于以上分析可知,峰值荷载、平均荷载以及比能与 l/t 值呈负相关关系。当 l/t 值相同时,单元边长 l 、单元壁厚 t 越小,则结构平均荷载和比能越大。

表1 铝蜂窝力学参数对比(TL面 $\theta=30^\circ$)

Tab.1 Comparison of mechanical parameters of aluminum honeycomb(at TL plane with $\theta=30^\circ$)

蜂窝类型	l/t	l/mm	t/mm	质量/g	峰值荷载/kN	平均荷载/kN	SEA/($J \cdot g^{-1}$)
H1	40	4	0.1	7.6	10.22	3.91	9.43
H2	60	4	0.0667	5.07	6.96	2.08	7.32
H3	80	4	0.05	3.81	5.19	1.31	5.83
H4	100	4	0.04	3.04	4.11	0.96	5.82
H5	40	2	0.05	7.45	10.08	5.67	12.6
H6	60	3	0.05	4.89	6.57	2.33	7.36
H7	100	5	0.05	3.06	4.11	0.91	5.59

如图9所示铝蜂窝荷载与比值分布图。利用最小二乘法对各组数据点进行拟合。图9(a)所示峰值荷载,当 $t=0.05\text{ mm}$ 时,得到拟合曲线

$$F_{in}^{max} = 0.0016\left(\frac{l}{t}\right)^2 - 0.325\left(\frac{l}{t}\right) + 20.47 \quad (5)$$

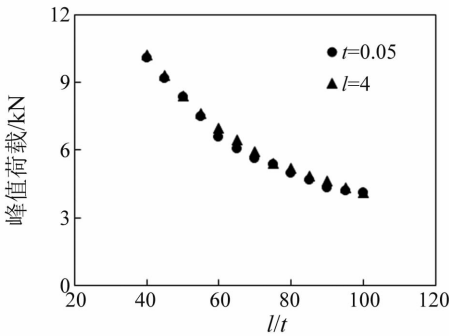
当 $l=4\text{ mm}$ 时,得到拟合曲线

$$F_{in}^{max} = 0.0014\left(\frac{l}{t}\right)^2 - 0.2946\left(\frac{l}{t}\right) + 19.684 \quad (6)$$

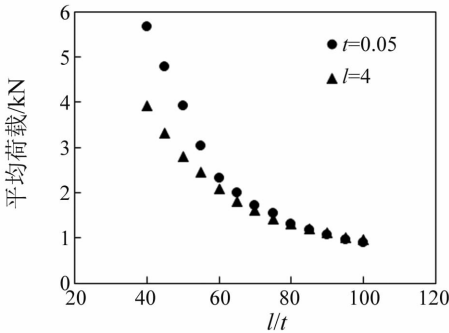
式中: F_{in}^{max} 为压头对蜂窝施加的最大荷载。

对比式(5)和式(6),两条拟合曲线各项系数相差很小,说明单元边长 l 的变化对峰值荷载的影响效果和单元壁厚 t 变化时对峰值荷载的影响基本相同。

图9(b)所示平均荷载,当 $t=0.05\text{ mm}$ 时,得到拟合曲线



(a) 峰值荷载



(b) 平均荷载

图9 荷载- l/t 比值拟合曲线(TL面 $\theta=30^\circ$)

Fig.9 Fitting curves of load- l/t

(at TL plane with $\theta=30^\circ$)

$$F_{in}^{av} = 0.0018\left(\frac{l}{t}\right)^2 - 0.3269\left(\frac{l}{t}\right) + 15.73 \quad (7)$$

当 $l=4\text{ mm}$ 时,得到拟合曲线

$$F_{in}^{av} = 0.0009\left(\frac{l}{t}\right)^2 - 0.1744\left(\frac{l}{t}\right) + 9.3086 \quad (8)$$

式中: F_{in}^{av} 为压头对蜂窝施加的平均荷载。

对比式(7)和式(8)发现,等式(7)右侧第一项系数更大,即在压-剪组合荷载作用下,单元边长 l 变化对蜂窝平均荷载的影响要大于单元壁厚 t 变化对平均荷载的影响。

2.3 T方向高度的影响

为进一步说明蜂窝高度(图1所示T方向尺寸)对结构在压-剪组合荷载作用下力学行为的影响,建立表2所示9种不同高度蜂窝数值计算模型。由表2可知,随着蜂窝高度T的增加,比吸能呈下降趋势,即结构吸能效率在下降。由于在组合荷载作用下,蜂窝变形同时存在渐进压溃变形和整体失稳变形。当蜂窝高度增大时,会加剧蜂窝由渐进压溃变形向整体失稳变形过渡的趋势,而整体失稳变形时蜂窝吸能效率是较低的。

表2 比能对比(TL面 $\theta=30^\circ$)

Tab.2 Comparison of specific energy absorption (at TL plane with $\theta=30^\circ$)

高度/mm	l	t	质量/g	SEA/($J \cdot g^{-1}$)
12	3	0.05	1.96	8.9
21	3	0.05	3.43	8.04
30	3	0.05	4.89	7.28
39	3	0.05	6.36	7.13
48	3	0.05	7.82	7.07
57	3	0.05	9.29	7.09
66	3	0.05	10.8	7.13
75	3	0.05	12.22	6.85
84	3	0.05	13.88	6.77

图10所示蜂窝高度对荷载的影响。对图10数据点进行拟合,得到关系式如下

$$F_{in}^{max} = -0.0005T + 6.5769 \quad (9)$$

$$F_{in}^{av} = -0.004T + 2.4549 \quad (10)$$

结合式(9)、式(10)及图10可知,蜂窝高度增加时对峰值荷载和平均荷载影响并不大。由于峰值荷载是弹性段的结束点,其值主要受材料弹性阶段的力学性能以及承压面积影响,故式(9)曲线斜率很小。对于平均荷载,虽然蜂窝高度越大,加载过程中平台荷载随变形增加而降低的现象越明显,但由于高度增大会增加蜂窝塑性屈服里程,故使得最终的平均荷载差别并不大。

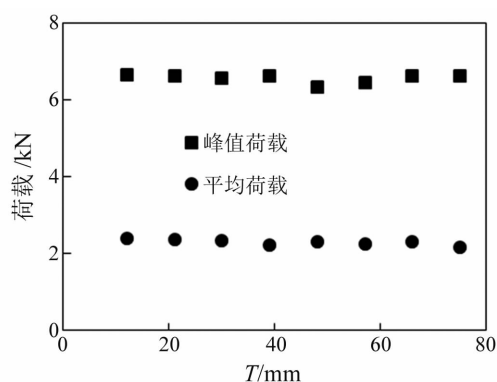


图 10 不同高度蜂窝荷载值对比(TL面 $\theta=30^\circ$)

Fig. 10 Comparison of load of honeycombs with different dimension at T-direction (at TL plane with $\theta=30^\circ$)

3 结论

文中设计了一种针对铝蜂窝简便可行的压-剪组合荷载试验,并结合数值计算的方法对压-剪组合荷载作用下铝蜂窝的力学响应进行研究,分析了铝蜂窝在 TL 面和 TW 面内加载时力学行为的差异,以及单元边长和单元壁厚比值(l/t)、蜂窝高度对铝蜂窝在组合荷载作用下力学行为的影响,研究结果表明:

(1) 加载角度相同时,在 TL 面和 TW 面内加载,峰值荷载及平台荷载相差不大。加载角度越大,峰值荷载和平台荷载越小。另外,非轴向加载时,平台荷载会随着变形的增加而逐渐减小,且加载角度越大,减小程度越明显。

(2) 由试验结果总结出铝蜂窝三种变形模式。加载角度在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 时,在 TL 和 TW 两平面内加载铝蜂窝变形都表现为模式 I 的特征;加载角度为 30° 、 45° 时,在 TL 面加载铝蜂窝变形主要表现为模式 II,而在 TW 面加载主要表现为模式 III。铝蜂窝在 TW 面内加载时,边界翘曲现象更严重,并且加载过程中蜂窝外侧出现了脱胶破坏,而在 TL 面内加载时,脱胶开裂现象并不明显。

(3) 组合荷载作用下,蜂窝峰值荷载、平均荷载以及比能与 l/t 值呈负相关关系。当 l/t 值相同时,单元边长 l 、单元壁厚 t 越小,则蜂窝平均荷载和比能越大。单元边长 l 变化对蜂窝平均荷载的影响要大于单元壁厚 t 变化对平均荷载的影响;增大蜂窝高度 T 会降低结构吸能效率。

参考文献

[1] 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 Guowei, BAI Junqing, QI Yufeng, 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.

[2] 何强,马大为,张震东. 分层屈服强度梯度蜂窝材料的动力学性能研究[J]. 工程力学, 2015,32(4): 191-196.
HE Qiang, MA Dawei, ZHANG Zhendong. Research on dynamic crushing of layered yielding stress-gradient circular honeycombs[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(4): 191-196.

[3] 蔡茂,高群,宗志坚. 铝合金蜂窝结构轴向压缩吸能特性[J]. 材料科学与工程学报, 2015,33(5): 675-679.
CAI Mao, GAO Qun, ZONG Zhijian. Energy absorption properties of honeycomb structured aluminum under axial compression[J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2015,33(5): 675-679.

[4] ASHAB A, RUAN D, LU G X, et al. Experimental investigation of the mechanical behavior of aluminum honeycombs under quasi-static and dynamic indentation[J]. Materials & Design, 2015,74: 138-149.

[5] 徐天娇. 六边形铝蜂窝力学行为的尺寸效应研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.

[6] 徐天娇,金涛,周志伟,等. 铝蜂窝面外压缩行为的尺寸效应研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(14): 3829-3833.
XU Tianjiao, JIN Tao, ZHOU Zhiwei, et al. Size effects in the out-of-plane mechanical behavior of hexagonal honeycombs[J]. Science Technology and Engineering, 2013,13(14): 3829-3833.

[7] XU S, BEYNON J H, RUAN D, 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(4): 1-13.

[8] 谭思博,侯兵,李玉龙,等. 基体材料对铝蜂窝动态强化特性的影响[J]. 爆炸与冲击, 2015,35(1): 16-21.
TAN Sibao, HOU Bing, LI Yulong, et al. Effect of base materials on the dynamic enhancement of aluminium honeycombs[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(1): 16-21.

[9] 王中钢,鲁寨军. 铝蜂窝异面压缩吸能特性实验评估[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(3): 1246-1251.
WANG Zhonggang, LU Zhaijun. Experimental assessment on energy absorption property of aluminum honeycomb under out-of-plane compression[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013,44(3): 1246-1251.

[10] HOU B, ZHAO H, PATTOFATTO S, et al. Inertia effects on the progressive crushing of aluminium honeycombs under impact loading[J]. International Journal of Solids & Structures, 2012,49(19/20): 2754-2762.

[11] 胡玲玲,余同希. 惯性效应对蜂窝能量吸收性能的影响[J]. 兵工学报, 2009,30(增刊2): 24-27.
HU Lingling, YU Tongxi. Influence of inertia effect on the energy absorption of hexagonal honeycombs[J]. Acta Armamentarii, 2009,30(Sup 2): 24-27.

[12] WANG Z G, TIAN H Q, LU Z J, et al. High-speed axial impact of aluminum honeycomb-Experiments and simulations[J]. Composites Part B Engineering, 2014,56(1): 1-8.

- [13] 刘强, 莫正伟. 铝蜂窝填充 CFRP 结构的弯曲性能研究 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2016(7): 48-52.
LIU Qiang, MO Zhengwei. Experimental and numerical investigation of the bending characteristics of CFRP square tube filled with aluminum honeycomb [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2016(7): 48-52.
- [14] TAO Y, DUAN S Y, WEN W B, 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.
- [15] YANG X F, SUN Y X, YANG J L, et al. Out-of-plane crashworthiness analysis of bio-inspired aluminum honeycomb patterned with horseshoe mesostructure [J]. Thin-Walled Structures, 2018,125: 1-11.
- [16] 李翔城, 林玉亮, 卢芳云. 组合式铝蜂窝低速冲击响应特性实验研究 [J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(2): 137-142.
LI Xiangcheng, LIN Yuliang, LU Fangyun. Experimental study on low-speed dynamic response of combined aluminum honeycomb [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018,38(2): 137-142.
- [17] 李萌, 刘荣强, 罗昌杰, 等. 铝蜂窝串联缓冲结构静态压缩仿真与试验研究 [J]. 振动与冲击, 2013, 32(9): 50-56.
LI Meng, LIU Rongqiang, LUO Changjie, et al. Numerical and experimental analyses on series aluminum honeycomb structures under quasi-static load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013,32(9): 50-56.
- [18] 王中钢, 姚松. 加筋正六角铝蜂窝异面力学特性与筋胞厚度匹配优化 [J]. 航空材料学报, 2013,33(3): 86-91.
WANG Zhonggang, YAO Song. Out-of-plane mechanical properties and thickness matching optimization between rib and cell thin-wall of reinforced regular hexagon aluminum honeycomb [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2013,33(3): 86-91.
- [19] 张绍云, 储火, 卢富德, 等. 蜂窝-泡沫缓冲系统动力学有限元分析 [J]. 振动与冲击, 2014,33(2): 52-54.
ZHANG Shaoyun, CHU Huo, LU Fude, et al. Finite element analysis for dynamic response of cushioning system made out of honeycomb paperboard and foam [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(2): 52-54.
- [20] 杨辉, 尹冠生, 李轩, 等. 金属点阵格栅三明治结构低速冲击响应分析 [J]. 塑性工程学报, 2018, 25(4): 245-253.
YANG Hui, YIN Guansheng, LI Xuan, et al. Analysis on response of metal lattice sandwich structures under low velocity impact [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2018, 25(4): 245-253.
- [21] 任鹏, 张伟, 刘建华, 等. 水下冲击波作用的铝合金蜂窝夹层板动力学响应研究 [J]. 振动与冲击, 2016,35(2): 7-11.
RENG Peng, ZHANG Wei, LIU Jianhua, et al. Dynamic analysis of aluminium alloy honeycomb core sandwich panels subjected to underwater shock loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016,35(2): 7-11.
- [22] 孙光永, 张敬涛, 李世强, 等. 爆炸载荷下层级蜂窝铝夹芯板的动力响应分析 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017,45(5): 141-146.
SONG Guangyong, ZHANG Jingtao, LI Shiqiang, et al. Dynamic response analysis of hierarchical aluminum honeycomb sandwich structure subjected to explosive load [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2017,45(5): 141-146.
- [23] HONG S T, PAN J, TYAN T, et al. Quasi-static crush behavior of aluminum honeycomb specimens under compression dominant combined loads [J]. International Journal of Plasticity, 2006,22(1): 73-109.
- [24] HONG S T, PAN J, TYAN T, et al. Dynamic crush behaviors of aluminum honeycomb specimens under compression dominant inclined loads [J]. International Journal of Plasticity, 2008,24(1): 89-117.
- [25] HOU B, PATTOFATTO S, LI Y L, et al. Impact behavior of honeycombs under combined shear-compression. Part II: Analysis [J]. International Journal of Solids and Structures, 2011,48(5): 698-705.
- [26] HOU B, ONO A, ABDENNADHER S, et al. Impact behavior of honeycombs under combined shear-compression. Part I: Experiments [J]. International Journal of Solids & Structures, 2011,48(5): 687-697.
- [27] ZHOU Z W, WANG Z H, ZHAO L M, et al. Experimental investigation on the yield behavior of Nomex honeycombs under combined shear-compression [J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2012,9: 515-530.
- [28] WANG Z G, LIU J F, HUI D. Mechanical behaviors of inclined cell honeycomb structure subjected to compression [J]. Composites Part B Engineering, 2017,110: 307-314.
- [29] ASHAB A, RUAN D, LU G X, et al. Combined compression-shear behavior of aluminum honeycombs [C]. Key Engineering Materials, 2015.
- [30] 周志伟, 王志华, 赵隆茂, 等. 航空用芳纶纸蜂窝各向异性行为研究 [J]. 实验力学, 2012,27(4): 440-447.
ZHOU Zhiwei, WANG Zhihua, ZHAO Longmao, et al. Anisotropic behaviors of nomex hoenycombs [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012,27(4): 440-447.
- [31] 庄茁, 曲小川, 廖剑晖, 等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.