新型橄榄形零泊松比蜂窝结构设计 及力学性能分析



尹震¹,梁珂^{1,2},程潜¹,李叶璇¹
1.西北工业大学,陕西西安710072
2.飞行器基础布局全国重点实验室,陕西西安710072

摘 要:蜂窝夹芯常应用于大变形-高承载结构中,开展新型结构设计和参数分析对于提高其安全性和变形能力尤为重要。 本文通过对正弦形零泊松比-蜂窝结构的等效力学性能进行研究,在传统的蜂窝构型基础上,设计了一种新型橄榄形零泊 松比蜂窝,采用数值仿真方法对蜂窝结构开展参数分析并进行了物理试验验证。研究结果表明,新型橄榄形蜂窝结构可有 效解决传统正弦形零泊松比蜂窝结构面内变形能力不足的问题,该研究成果在航空航天领域具有重要应用价值,尤其是在 提高结构变形能力方面表现突出。

关键词:零泊松比;蜂窝结构;等效弹性模量;力学性能;柔性蒙皮

中图分类号:V229.7

文献标识码:A

柔性蒙皮是智能变体飞行器"的重要组成部分,具有良 好的大变形能力和承载性能,可适应日益复杂的飞行任 务[2-3]。蜂窝结构具备质量轻、承载能力高、各向异性以及可 设计性强的特点,已成为解决柔性蒙皮大变形-高承载基础 矛盾的理想结构。传统的直线形蜂窝结构虽然具有良好 的面外刚度,但其面内变形能力不足,难以满足大变形需 求[5]。因此,国内外学者对曲线形零泊松比蜂窝构型展开了 研究。王婷婷等⁶⁰分析了折线形和U形蜂窝结构的面内拉伸 变形性能,研究发现当蜂窝长度增大,蜂窝材料的弹性模量 下降,其面内拉伸性能提高。艾森等四基于能量法建立了零 泊松比蜂窝结构的等效弹性模量,并通过数值分析和试验方 法验证了其理论模型的正确性。鲁超等[8-9]分别采用了柔性 悬壁梁模型和欧拉梁模型对零泊松比蜂窝芯斜壁板在大变 形条件下的弯曲变形性能进行了研究,并给出了等效弹性模 量的非线性特性及相同方向和不同方向弹性模量的变化特 性。梁珂等[10-11]设计了一种由六边形正泊松比蜂窝和薄板 组成的零泊松比结构,可通过对薄板结构进行优化设计实现 整个结构弯曲刚度的变化。Sahariah等^[12]设计了一种新型的 零泊松比管状点阵结构,通过准静态压缩试验,该结构表现

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.12.001

出优异的抗压强度和弹性模量。Houssem等^[13]研究了在不改变单胞几何性质的情况下控制其力学性能。Broccolo等^[14]提出了具有不同形状的蜂窝互锁组合,这一设计可以导致分级蜂窝在不同区域具有同塑性和反塑性行为。尽管已有研究探讨了不同结构和材料的蜂窝在特定条件下的性能表现,但对于大变形条件下的蜂窝结构的研究较少。

本文首先基于Gibson理论^[15-16]推导了零泊松比蜂窝单 胞的等效力学性能公式,并对等效弹性模量公式进行了准 确性验证和适用范围界定;然后以等效弹性模量的适用范 围为依据,在传统的正弦形零泊松比蜂窝构型基础上,提出 了一种新型橄榄形蜂窝单胞构型;最后,分别采用有限元仿 真和物理试验对该蜂窝结构的面内变形性能开展研究,为 该新型构型在智能变体结构中的应用提供了理论依据。

1 零泊松比蜂窝单胞的等效力学性能公式及 验证

1.1 零泊松比蜂窝单胞的等效力学性能

相比于直线形零泊松比蜂窝构型,曲线形零泊松比蜂 窝构型(正弦形和橄榄形蜂窝)具有良好的面内变形能力。

收稿日期: 2024-05-09; 退修日期: 2024-08-09; 录用日期: 2024-10-11 基金项目: 航空科学基金(2023Z073053005)

引用格式: Yin Zhen, Liang Ke, Cheng Qian, et al. Design and mechanical property analysis of novel olive-shaped zero-poisson's ratio honeycomb structures[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(12):1-7. 尹震,梁珂,程潜,等. 新型橄榄形零泊松比蜂窝结 构设计及力学性能分析[J]. 航空科学技术, 2024, 35(12):1-7.

正弦形蜂窝结构的面内变形性能可采用Gibson理论^[12-13]展 开研究。对于正弦形蜂窝单胞的等效力学性能应重点研究 其等效弹性模量E,,如图1所示。单胞结构沿x方向表现为 材料的弹性模量,即E,=E,沿x和y的方向的等效泊松比均 为0,即v_w=v_w=0。对正弦形蜂窝单胞结构施加沿v方向 的拉力P,倾斜胞壁发生弯曲变形,从而使单胞结构产生了 沿v方向的变形。因此需要对倾斜胞壁开展受力分析,如 图2所示。







图2 倾斜胞壁旋转后的受力分析 Fig.2 Analysis of force on curved cell-wall after rotation

倾斜胞壁上任意截面位置的弯矩为

$$M(x) = P\left[x\cos\theta - \frac{1}{2}l\cos\theta - A\sin\left(\frac{2\pi}{l}x\right)\sin\theta\right]$$
(1)

式中,A为斜胞壁正弦函数幅值,I为倾斜胞壁的长度,x为载荷 分量P,距离所求横截面的距离。将式(1)代入应变能公式中, 积分后再对轴力P求偏导,可得倾斜胞壁沿y方向的位移

$$\delta_{y} = \frac{Pl\left[6A^{2}\sin^{2}\theta + l^{2}\cos^{2}\theta + (6/\pi)Al\sin 2\theta\right]}{bEt^{3}}$$
(2)

式中,b为蜂窝单胞的高度,E为零泊松比蜂窝单胞的弹性 模量,t为倾斜胞壁的厚度。

假设倾斜胞壁沿y方向的等效长度为D/2,可得到倾斜 胞壁沿该方向等效应变

$$\varepsilon_{y} = \frac{2Pl \left[6A^{2} \sin^{2}\theta + l^{2} \cos^{2}\theta + (6/\pi) Al \sin 2\theta \right]}{DbEt^{3}}$$
(3)

式中,D为倾斜胞壁沿y方向的长度。

再将倾斜胞壁等效为矩形板,矩形板的长和宽分别为 $l\cos\theta \pi D/2$ 。其沿y方向的应变

$$E_{y}^{\prime} = \frac{P}{E_{y}bl\cos\theta} \tag{4}$$

将式(3)和式(4)联立,可得正弦形蜂窝单胞沿v方向

的等效弹性模量

$$E_{y} = E\left(\frac{t}{l}\right)^{3} \frac{D}{2l\cos\theta \left[\frac{6A^{2}\sin^{2}\theta}{b^{2}} + \frac{6A}{\pi b\sin2\theta} + \cos^{2}\theta\right]}$$
(5)

1.2 零泊松比蜂窝单胞的力学性能验证

为更直观地验证等效弹性模量公式的适用性,本文采 用有限元仿真方法建立整体尺寸相同的正弦形蜂窝单胞模 型和矩形板模型。蜂窝单胞采用6061-T6铝合金,矩形板 采用各向异性材料,将表1中的结构参数代入式(5)可得 $E_1 = 68900 \text{MPa}, E_2 = 1.767 \text{MPa}, v_{12} = 0_{\circ}$

表1 正弦形蜂窝单胞参数 Table 1 Parameters of the sinusoidal honeycomb

A/mm	<i>l</i> /mm	<i>θ</i> /(°)	t/mm	<i>b</i> /mm	D/mm
1	21	12.37	1	1	10

由式(5)可知,与等效弹性模量公式直接相关的结构参 数分别为倾斜胞壁形状幅值Α、倾斜胞壁长度1、角度θ以及 壁厚t。图3~图7分别是正弦形蜂窝单胞在不同结构参数 下的计算结果,对比图3和图4可得,幅值越小,等效弹性模 量越准确;对比图4和图5可得,倾斜胞壁越长,等效弹性模 量越准确;对比图4和图6可得,胞壁越厚,等效弹性模量越 准确;对比图4和图7可得,倾斜胞壁角度越小,等效弹性模 量越准确。其中算例1和算例3的误差较大,主要是由于倾 斜胞壁的弯曲程度较大或弯曲变形集中在较小区域内,使 其几何非线性响应更加显著。



(b)等效的矩形板位移云图

图 3 算例1 (A=2mm,l=21mm,t=1mm,θ=12.37°) Fig.3 Case 1 (A=2mm, l=21mm, t=1mm, $\theta=12.37^{\circ}$)

2 橄榄形零泊松比蜂窝单胞设计

本文的蜂窝单胞的尺寸依据蜂窝板的整体尺寸来确



Fig.4 Case 2 (*A*=1mm, *l*=21mm, *t*=1mm, *θ*=12.37°)





(b)等效的矩形板位移云图

图 5 算例 3 (A=1mm,l=17.5mm,t=1mm,θ=12.37°) Fig.5 Case 3 (A=1mm, l=17.5mm, t=1mm, θ=12.37°)



图 6 算例4 (*A*=1mm,*l*=21mm,*t*=1.25mm,*θ*=12.37°) Fig.6 Case4 (*A*=1mm, *l*=21mm, *t*=1.25mm, *θ*=12.37°)

定,其中蜂窝板的尺寸为141mm×134mm。在蜂窝单胞的 等效弹性模量公式的适用范围内,以单胞的等效弹性模量



图 7 算例5 (A=1mm,l=21mm,t=1mm, θ=9.59°) Fig.7 Case 5 (A=1mm, l=21mm, t=1mm, θ=9.59°)

尽可能取最小值为原则,进一步确定蜂窝单胞的各个结构 参数。

(1) 多胞列数及单胞长度 h

由于蜂窝板的长度为141mm,因此可选取的单胞列数 和长度分别为2mm×70mm、3mm×47mm、4mm×35mm等, 蜂窝多胞列数越多,单胞结构中倾斜胞壁的长度1就越小, 其等效弹性模量越大。若蜂窝多胞列数越少,其结构就越 稀疏,导致面外承载能力较弱。综合考虑等效弹性模量以 及蜂窝板的面外承载能力,蜂窝板选为3列。

(2) 蜂窝宽度 D

蜂窝板中单胞行数主要影响倾斜胞壁的角度。行数越 多,单胞的倾斜胞壁角度越小,等效弹性模量越准确。但当 单胞结构的宽度为9mm时,单胞内各胞壁之间的间隙就很 难满足加工精度的要求。综合考虑等效弹性模量以及单胞 的加工精度,蜂窝多胞行数为12行。因此,可面内变形的 蜂窝多胞结构由12×3个蜂窝单胞构成,其中单胞结构的设 计尺寸为47mm×11mm。

(3) 胞壁厚度 t

胞壁越厚,等效弹性模量公式越准确,但增加壁厚会使 倾斜胞壁在竖直方向上的变形区间长度减小,在发生面内 变形时可能会出现胞壁接触现象。因此,结合单胞结构的 加工精度,其胞壁的厚度设计为1mm。

(4) 倾斜胞壁角度 θ

单胞中倾斜胞壁的角度由单胞的长度和宽度确定,通 过单胞基本尺寸可得θ>10.84°。为减小倾斜胞壁角度使 等效弹性模量更准确,本文在正弦形蜂窝结构基础上加入 副胞壁结构,可有效将倾斜胞壁角度减小为0°,如图8 所示。 (5)幅值A和副胞壁 d_1 、 d_2

为了满足蜂窝中各胞壁之间的间隙,图8中的间隙 e_{f} , g可取1mm。由已知的结构尺寸和几何关系可得倾斜胞壁 正弦形状的幅值A = 1mm,由单胞的宽度可进一步确定副 胞壁的尺寸 $d_1 = 2$ mm, $d_2 = 2.5$ mm。

(6)倾斜胞壁长度1

根据蜂窝单胞的整体长度和胞壁的厚度大小,倾斜胞壁的长度*l*可取到最大值为*l*=22mm。

根据Gibson理论,增加副胞壁的正弦型蜂窝单胞等效 力学性能公式为

通过以上过程可得到增加副胞壁的橄榄形蜂窝单胞结构,如图8所示。将图8中单胞结构参数代入式(6)中可得 到单胞的等效弹性模量 E_y =0.820MPa。1.2节中正弦形蜂 窝单胞的等效弹性模量 E_y =1.644MPa,可得新型橄榄形蜂 窝单胞等效弹性模量减小了50.1%,有效提高了其面内变 形性能。将该单胞结构进行组合得到可面内变形的蜂窝多 胞结构,如图9所示。





3 橄榄形零泊松比蜂窝板力学性能研究

本文所研究的橄榄形零泊松比蜂窝多胞结构采用 6061-T6铝合金,该材料的力学性能为弹性模量 68.9GPa、 泊松比 0.33、屈服强度 292MPa。在某商业有限元软件中采 用壳单元建立蜂窝板有限元模型,并考虑结构的大变形几



Fig.9 Olive-shaped honeycomb multicellular structure (unit:mm)

何非线性效应,通过引入双线性弹塑性本构模型来准确计 及材料的非线性承载效应。在物理试验中,采用万能试验 机测量橄榄形零泊松比蜂窝板的拉压性能,并测量蜂窝结 构的局部应变结果,如图10所示。橄榄形零泊松比蜂窝结 构的整体变形主要来自倾斜胞壁的自身变形,因此,在蜂窝 板有限元模型的倾斜胞壁处划分较密的网格(0.2mm),其 余部位的网格尺寸为1mm,进而平衡数值模拟的计算精度



(a) 蜂窝板的有限元模型



(b) HTDIC分析蜂窝结构拉伸性能图 10 物理试验和仿真模型Fig.10 Physical experiment and simulation model

与效率。

通过对比图 11 的试验与仿真得到的载荷一位移曲线 可知,在弹性变形阶段,试验与仿真得到的结构整体刚度相 差 6.30%,主要是由蜂窝板的加工误差以及试验件在固定 和加载过程中存在不可避免的偏心作用产生。在结构发生 较大面积的屈服后试验曲线与仿真结果的差异主要来自有 限元数值分析中对材料本构模型的近似描述。

将蜂窝板 0.2% 的残余变形所对应的整体应变作为屈服条件,该整体应变可基本反映出蜂窝板弹性可回复的极限变形量。由图 11 可知,当驱动位移达到 40mm(整体应变为 30%)时,结构已发生屈服。因此,图 12 只展示了整体应变在 0~29% 范围内的曲线,通过分析可知,蜂窝变形驱动层达到屈服条件时的弹性可回复拉伸极限变形量分别为 15.303% 和 16.648%,两者之间的差异为 8.07%。

物理试验与数值仿真结果中的应变云图如图13所示。 选取倾斜胞壁上两处不同位置的节点(A和B),在物理试验



图 11 蜂窝板的载何-位移曲线(拉伸变形重100%)

Fig.11 Load-displacement curves of honeycomb panel (tensile deformation of 100%)



过程中,这两个节点的应变值分别为0.1614%和0.1326%, 均位于HTDIC的云图色标的波峰范围内(0.125%~ 0.188%)。在仿真结果的应变云图中,测量与上述节点位置 相同区域的应变值,分别为0.1688%和0.1403%。由此可 知,物理试验和数值仿真结果在应变值出现频率较大的区 域有较好的一致性。

4 结论

本文通过研究正弦形零泊松比蜂窝单胞结构的等效力 学性能,对其进行参数化分析,设计了一种新型橄榄形零泊 松比蜂窝单胞构型,该构型具备较好的面内变形性能,为未 来的柔性可变形结构提供基础研究。通过研究,可以得出 以下结论:

(1)通过正弦形和橄榄形蜂窝单胞的等效弹性模量公式可得到同一整体结构参数下,新型橄榄形蜂窝单胞的等效弹性模量减小了50.1%。

(2) 拉伸试验过程中, 橄榄形零泊松比蜂窝板达到屈



服条件时的弹性可回复拉伸极限变形量为15.303%,此时, 倾斜胞壁和竖直胞壁的连接位置应力水平较大。 **AST**

参考文献

[1] 吴斌,杜旭朕,汪嘉兴.变体飞机智能结构技术进展[J].航空
 科学技术,2022,33(12):13-30.

Wu Bin, Du Xuzhen, Wang Jiaxing. Smart structure technology progress of morphing aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(12): 13-30. (in Chinese)

- [2] 张平,周丽,邱涛.基于可变形蜂窝的柔性蒙皮力学性能分析 与结构设计[J].固体力学学报,2013,34(5):433-440.
 Zhang Ping, Zhou Li, Qiu Tao. Mechanical property analysis and structural design of flexible skin based on deformable honeycomb[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2013, 34 (5): 433-440. (in Chinese)
- [3] 张音旋,邱涛,王健志. 一种柔性蒙皮设计技术及其在后缘变 弯度机翼结构中的应用[J]. 航空科学技术,2012(5): 26-28.
 Zhang Yinxuan, Qiu Tao, Wang Jianzhi. A flexible skin design technology and the application on variable camber trailing edge
 [J]. Aeronautical Science & Technology, 2012(5): 26-28. (in Chinese)
- [4] Olympio K, Gandhi F. Zero poisson's ratio cellular honeycombs for flex skins undergoing one-dimensional morphing[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2010, 21(17):

1737-1753.

- [5] 董文俊,孙秦.手风琴式蜂窝材料的等效弹性模量分析[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(7):1103-1106.
 Dong Wenjun, Sun Qin. Equivalent elastic modulus analysis of accordion cellular material[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(7): 1103-1106.(in Chinese)
- [6] 王婷婷,高军鹏,许虎,等.零泊松比蜂窝面内拉伸力学响应的有限元模拟[J]. 航空科学技术,2023,34(6):66-76.
 Wang Tingting, Gao Junpeng, Xu Hu, et al. Finite element simulation of in-plane tensile mechanical response of honeycombs with a zero poisson's ratio[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023,34(6):66-76. (in Chinese)
- [7] 艾森,郭瑜超,聂小华,等.零泊松比蜂窝结构一维变形行为
 [J].南京航空航天大学学报,2021,53(4):629-636.
 Ai Sen, Guo Yuchao, Nie Xiaohua, et al. One-dimensional deformation behavior of a honeycomb structure with zero poisson's ratio[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2021,53(4): 629-636. (in Chinese)
- [8] 鲁超,李永新,董二宝,等.零泊松比蜂窝芯等效弹性模量研 究[J]. 材料工程, 2013 (12):80-84.
 Lu Chao, Li Yongxin, Dong Erbao, et al. Equivalent elastic modulus of zero poisson's ratio honeycomb core[J]. Journal of Materials Engineering, 2013(12):80-84. (in Chinese)
- [9] 柯映林,金成柱,刘刚. NOMEX 蜂窝芯等效弹性模量的非 线性分析[J]. 自然科学进展, 2006 (2):252-256. Ke Yinglin, Jin Chengzhu, Liu Gang. Nonlinear analysis of the equivalent elastic modulus of NOMEX honeycomb cores[J]. Progress in Natural Science, 2006(2): 252-256. (in Chinese)
- [10] Liang Ke, Cheng Qian. A novel design of an actively deformable honeycomb structure with application to a variable thickness leading-edge wing[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2023,34(16):1902-1916.
- [11] Huang Jian, Zhang Qiuhua, Scarpa F, et al. Bending and benchmark of zero Poisson's ratio cellular structures[J]. Composite Structures, 2016, 152:729-736.
- [12] Sahariah B J, Baishya M J, Namdeo A, et al. A novel strategy to design lattice structures with zero Poisson' s ratio[J]. Engineering Structures, 2023, 288:116214.
- [13] Houssem E F, Toufik B, Brahim I. Modeling of hexagonal

honeycomb hybrids for variation of Poisson' s ratio[J]. Materials Testing, 2022,64(8): 1183-1191.

- [14] Broccolo S, Laurenzi S, Scarpa F. AUXHEX: A Kirigami inspired zero Poisson's ratio cellular structure[J]. Composite Structures, 2017, 176: 433-441.
- [15] Gibson J, Ashby M, Schajer G, et al. The mechanics of twodimensional cellular materials[J]. Mathematical, Physical and

Engineering Sciences, 1982, 382: 1782.

[16] 陈誉,富明慧,郑彬彬.基于Gibson公式修正的蜂窝材料非 线性本构[J].重庆大学学报,2016,39(5):56-62.Chen Yu, Fu Minghui, Zheng Binbin. Nonlinear constitutive

relation for honeycombs based on the modifications to Gibson's formula[J]. Journal of Chongqing University, 2016, 39(5): 56-62. (in Chinese)

Design and Mechanical Property Analysis of Novel Olive-Shaped Zero-Poisson's Ratio Honeycomb Structures

Yin Zhen¹, Liang Ke^{1,2}, Cheng Qian¹, Li Yexuan¹ 1 Northwestern Polytechnical University, Xi' an 710072, China

2 National Key Laboratory of Aircraft Confoguration Design, Xi' an 710072, China

Abstract: Honeycomb sandwich structure are often used in Large-deformation and high coad-bearing structures. It is paticularly important to carry out novel strutural design and parameter analysis to improve their safety and deformation capacity. The equivalent mechanical properties of sinusoidal zero-poisson's ratio honeycomb structure are investigated based on the gibson theory, and a novel olive-type zero-poisson's ratio honeycomb structure is designed on the basis of the traditional honeycomb configuration. Then, the mechanical properties of the honeycomb structure are investigated by means of physical experiments and numerical simulation methods. The results show that the novel olive-type honeycomb structure can take into account the in-plane tensile and compressive properties synchronously, which can effectively solve the problem of insufficient in-plane deformation capacity of the traditional zero-poisson's ratio honeycomb configuration. The research results have important application value in the aerospace field, especially in improving the structural deformation capacity.

Key Words: zero poisson's ratio; honeycomb structure; equivalent elastic modulus; mechanical property; flexible skin