

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.04.018

零泊松比蜂窝结构一维变形行为

艾森, 郭瑜超, 聂小华, 常亮

(中国飞机强度研究所计算结构技术与仿真中心, 西安 710065)

摘要: 为满足柔性蒙皮的变形需求, 针对一种适用于柔性蒙皮的零泊松比蜂窝结构开展了一维变形行为的研究。首先通过考虑蜂窝胞壁轴向变形及弯曲变形, 基于能量法建立了零泊松比蜂窝结构的等效弹性模量理论模型, 并分别应用数值分析和试验方法验证了理论模型的正确性。然后分别以铝合金和钢材为基体材料, 利用数值分析方法进一步分析了零泊松比蜂窝结构的非线性变形行为, 并获得了蜂窝结构的变形量与残余应变的关系。结果表明: 蜂窝变形过程中的力学行为与结构的几何参数以及母材的选择有关。因此, 可以通过改变蜂窝结构的几何参数, 实现蜂窝结构驱动力及残余应变的调节; 同时, 在选择基体材料时, 为兼顾“面内”刚度和“面外”承载能力, 不仅应该选用杨氏模量小的材料, 减少其驱动力, 还应该选用弹性段大的材料, 减小残余变形。

关键词: 零泊松比; 蜂窝结构; 一维变形; 非线性力学特性

中图分类号: V214.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2021)04-0629-08

One-Dimensional Deformation Behavior of a Honeycomb Structure with Zero Poisson's Ratio

AI Sen, GUO Yuchao, NIE Xiaohua, CHANG Liang

(Computational Structure Technique & Simulation Center, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: Tensile mechanical properties of a zero Poisson's ratio (ZPR) honeycomb structure suitable for morphing application is studied. A theoretical method for calculating in-plane tensile modulus of ZPR cellular structures is proposed based on energy method, and the impacts of the unit cell geometrical configurations on in-plane tensile modulus is studied systematically based on finite element (FE) simulation. Then, experimental tests validate the feasibility and effectiveness of the theoretical and FE analysis. In addition, to describe the nonlinear deformation regularity of ZPR cellular structures, FE simulation with using aluminum alloy and steel as the workpiece is built and the relationship between the deformation and the residual strain is studied. Results show that these cell geometric parameters and material performance provide different contributions to the effective mechanical properties of ZPR cellular structures, which suggests that the in-plane mechanics of ZPR cellular structures can be manipulated by designing cell geometrical parameters and material selection. Furthermore, when selecting the base material, in order to take into account both the “in-plane” stiffness and the “out-of-plane” load-bearing capacity, not only materials with a small Young's modulus should be selected to reduce its driving force, but also materials with a large elastic section should be selected to reduce residual deformation.

基金项目: 装备预研联合基金(6141B05030602)资助项目。

收稿日期: 2021-02-03; **修订日期:** 2021-05-07

通信作者: 艾森, 男, 硕士, 工程师, E-mail: aisen.w@163.com。

引用格式: 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 & Astronautics, 2021, 53(4): 629-636.

Key words: zero Poisson's ratio; honeycomb structure; one-dimensional morphing; nonlinear mechanical characteristic

可变形飞行器通过自适应地改变自身气动布局,以适应复杂多变的飞行任务和飞行环境,因而成为未来先进飞行器发展的主要研究方向之一^[1]。该类飞行器若要实现机翼变后掠、前/后缘变弯度等典型变体功能,机翼蒙皮就必须承受足够大的气动载荷和变形量,所以不能简单地使用常规材料或现有的材料来实现^[2-6]。

为协调可变形机翼蒙皮的变形与承载能力,选用质量轻,抗弯刚度、抗压刚度强的材料或结构成为实现机翼可控变形的有效途径。在这类材料或结构中,蜂窝结构作为典型代表,日益受到世界范围内的广泛关注。蜂窝结构作为可变形柔性蒙皮的支撑体,不仅具有良好的“面内”力学性能,而且可为蒙皮提供足够的“面外”刚度去承载气动载荷,并以较小的驱动力提供较低的“面内”轴向刚度和较高的应变能力。

蜂窝结构的力学性能直接取决于其拓扑构型和蜂窝原材料,不同的拓扑构型会直接导致蜂窝结构具有不同的泊松比效应。零泊松比效应可以限制垂直方向的收缩(或胀形),从而阻止水平方向有效刚度的显著增加^[7]。具有零泊松比特性的蜂窝在沿翼展加载时垂直方向不收缩,满足了变形机翼应用的要求。而正泊松比和负泊松比的蜂窝在承受面外空气动力载荷时分别表现出马鞍形曲面和双曲率效应^[8-9],限制了它们在变形飞机上的应用。

零泊松比蜂窝结构具有质量轻、力学性能好等优点,被应用在变形机翼蒙皮上。Gibson和Ashby^[10]在考虑蜂窝壁的弯曲变形后,研究了等壁厚蜂窝结构的力学性能,但其理论结果与实验结果存在较大的误差。Gong等^[11]提出了一种新的零泊松比蜂窝结构,通过抑制非变形方向上的泊松效应,实现了沿两个正交方向的变形,避免了变形方向上有效刚度的增加。Huang等^[12]提出了一种将六边形结构与连接薄板组装在一起的面内变形零泊松比蜂窝结构的设计方法。Liu等^[13-14]建立了几种不同的零泊松比胞状结构弹性常数的理论模型,并采用有限元法进行验证。Chen^[15]从数值和实验两方面研究了零泊松比蜂窝结构的抗弯刚度。

综合现有文献可见,目前研究主要集中在蜂窝结构的等效弹性模量上,而等效弹性模量的研究都基于线弹性小变形假设。如果要将蜂窝结构应用于变形机翼上时,必须考虑机翼变形过程中非线性

对蜂窝结构力学性能的影响。为实现蜂窝结构的工程应用,本文针对一种零泊松比蜂窝结构开展力学特性的分析研究。首先建立了零泊松比蜂窝结构等效拉伸模量的理论模型,然后通过数值方法和试验方法对理论模型及数值结果进行相互验证。为考虑蜂窝结构在机翼中的大变形特性,采用数值方法,分别研究了铝蜂窝和钢蜂窝结构在非线性条件下的力学特性,获得的相关结果可为变形机翼蒙皮的选材和结构设计提供重要支撑。

1 线弹性条件下蜂窝力学特性分析

1.1 理论模型

图1为一种零泊松比蜂窝结构的几何模型。图1中,蜂窝单元几何形状为水平对称、竖直对称图形,几何形状由单胞斜壁长度 l 、单胞斜壁与水平线的夹角 θ 、垂直壁长度 h 、斜壁及垂直壁的厚度 t 及整个蜂窝板的高度 b 来表示。采用量纲为一的处理方式,定义两个量纲为一的参数 α 、 β , α 、 β 分别为垂直壁长度、壁厚与斜壁长度之比,这样可以获得 $h=2\alpha l$ 、 $t=\beta l$ 。

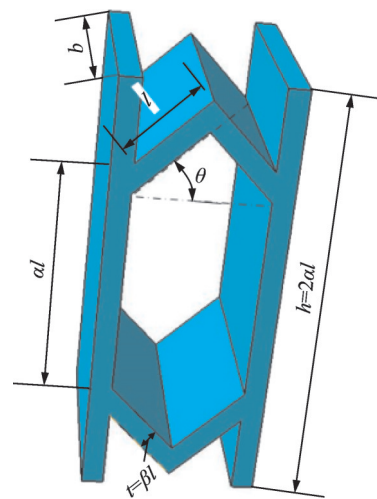


图1 零泊松比蜂窝结构的几何模型

Fig.1 Geometric model of the honeycomb structure with zero Poisson's ratio

关于零泊松比蜂窝构型的等效弹性模量的推导,目前已有较多文献对其进行了详细的描述,如文献[16-17]。本文在此基础上,利用能量法推导零泊松比蜂窝的等效弹性模量。

为计算沿 a 方向的面内拉伸模量,以蜂窝结构的单胞为研究对象,其计算模型如图2(a)所示。在所提出的单胞结构中,显然无法实现沿 b 方向的

大变形,因此本文只考虑沿 a 方向的面内拉伸。由于蜂窝单元在垂直和水平方向都具有对称性,可将模型简化为四分之一模型。简化后,模型左端设置固定边界,右端设置集中力 F 和力矩 M ,如图 2(b) 所示。

由于竖直蜂窝壁沿 a 方向的长度远小于斜壁的长度,因此可近似认为变形过程中的位移均由斜壁产生,而忽略竖直蜂窝壁的拉伸变形。同样的假设在文献[18]的研究中也提及。基于此假设,在后文的推导中将只考虑斜壁的弯曲和拉伸变形。

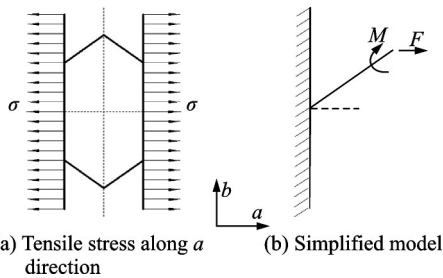


图 2 零泊松比蜂窝面内拉伸模量的计算模型

Fig.2 Calculation model of the in-plane tensile modulus of the honeycomb structure with zero Poisson's ratio

由于拉伸过程中,蜂窝结构承受垂直方向的力为 0,根据平衡方程,可以得出力矩 M 为

$$M = \frac{1}{2} Fl \sin\theta \quad (1)$$

悬臂梁在弯矩 $M(x)$ 和轴向荷载 $F_N(x)$ 作用下的应变能 U 可以表示为

$$U = \int_0^l \frac{M^2(x)}{2EI} dx + \int_0^l \frac{F_N^2(x)}{2EA} dx \quad (2)$$

式中: I 为斜壁截面惯性矩, A 为斜壁横截面积, E 为材料的杨氏模量。

一般假定逆时针方向的弯矩为正。此时,弯矩为

$$M(x) = \left(\frac{1}{2} l - x\right) F \sin\theta \quad (3)$$

轴向力为

$$F_N(x) = F \cos\theta \quad (4)$$

将式(3、4)代入式(2)中,可得应变能为

$$U = \frac{F^2 l^3 \sin^2\theta}{24E_s I} + \frac{F^2 l \cos^2\theta}{2E_s A} \quad (5)$$

式中 E_s 为蜂窝基体材料的杨氏模量。

根据卡式第二定理^[19],弹性系统在承受静载荷时,位移 δ_i 可以通过应变能 U 对所施加的力 F_i 的偏导数来计算。

$$\delta_i = \frac{\partial U}{\partial F_i} \quad (6)$$

因此,力的作用点在水平方向产生的位移为

$$\delta_1 = \frac{Fl^3 \sin^2\theta}{12E_s I} + \frac{Fl \cos^2\theta}{E_s A} \quad (7)$$

根据均质化理论,蜂窝结构的等效拉伸模量可由等效应力 σ_1 和等效应变 ϵ_1 推导出

$$\sigma_1 = \frac{F}{\alpha lb} \quad (8)$$

$$\epsilon_1 = \frac{\delta_1}{l \cos\theta} \quad (9)$$

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{\epsilon_1} \quad (10)$$

联立式(7~10),可得沿 a 方向的量纲为一等效拉伸模量为

$$\frac{E_1}{E_s} = \frac{\beta^3 \cos\theta}{\alpha(\sin^2\theta + \beta^2 \cos^2\theta)} \quad (11)$$

1.2 数值分析

为验证理论结果,利用商用有限元软件对蜂窝结构进行了数值分析。分析过程中,蜂窝结构选用的材料为铝合金,弹性模量为 76 GPa,泊松比为 0.33。为研究几何参数的变化对蜂窝结构等效拉伸模量的影响,取蜂窝胞元 $l=10$ mm, $b=5$ mm, θ 从 $0^\circ \sim 45^\circ$ 变化,增量为 5° ,变量 α 分别取 2、2.5、3,变量 β 分别取 0.1、0.15、0.2。

采用二维梁单元计算平面内弹性模量。端面 A 固支约束,端面 B 沿 x 方向施加 10 kN 的均布载荷,如图 3 所示。

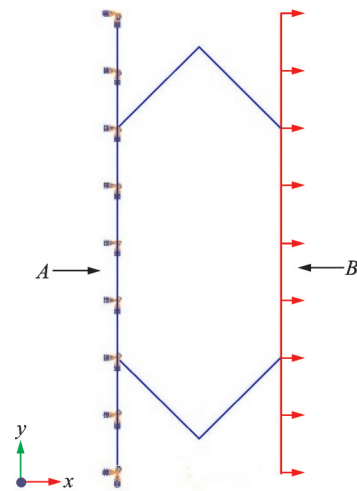


图 3 零泊松比蜂窝结构有限元模型

Fig.3 Finite element model of the honeycomb structure with zero Poisson's ratio

图 4 为不同胞壁厚度下,零泊松比蜂窝结构的量纲为一等效弹性模量 E_1/E_s 随 θ 变化图。由图 4 获知, E_1/E_s 随着斜壁倾斜角的增大而减小,当 E_1/E_s 在 $\theta=0^\circ$ 处达到极大值,此时斜壁处在水平方

向,发生纯拉伸。在其他参数保持不变时, E_1/E_s 随着参数 β 的增加而增加。

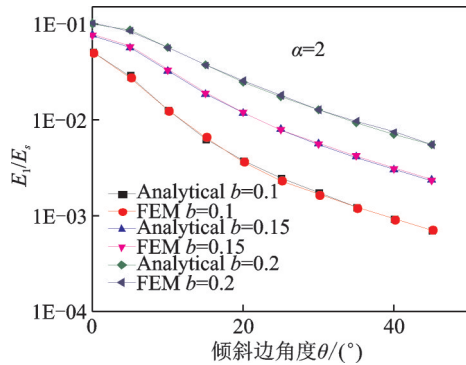


图4 不同胞壁厚度蜂窝结构对单胞等效弹性模量的影响

Fig.4 Influence of honeycomb structure with different cell wall thickness on unit cell equivalent elastic modulus

图5为不同垂直壁长度下,零泊松比蜂窝结构的量纲为一等效弹性模量 E_1/E_s 随 θ 变化图。与图4相似, E_1/E_s 在 $\theta=0^\circ$ 处达到极值, E_1/E_s 随着斜壁倾斜角 θ 的增加而减小。此外, E_1/E_s 随参数 α 的增加而减小,这是由于随着 α 的增加,蜂窝结构的等效面积也相应地增加,使得其等效应力降低。

比较图4和图5,当参数 α 从2变为3时, E_1/E_s 在一个数量级上波动,而当 β 从0.1变为0.2时, E_1/E_s 则在1~2个数量级上波动,因此,可认为参数 β 对 E_1/E_s 影响比参数 α 更大,可为各种参数的平面弹性模量设计提供良好的参考模型。

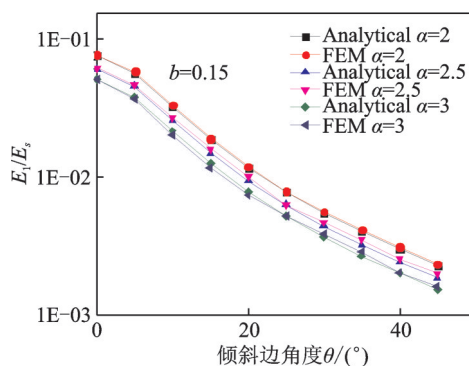


图5 不同垂直壁长度蜂窝结构对单胞等效弹性模量的影响

Fig.5 Influence of honeycomb structure with different vertical wall length on unit cell equivalent elastic modulus

在Rubert等^[20]的分析模型中,蜂窝结构仅发生纯弯曲,导致其横向刚度在 $\theta=0^\circ$ 处接近无穷大,这与实际情况不符。本文在考虑胞壁轴向变形后,零泊松比胞体结构在 $\theta=0^\circ$ 时的面内拉伸模量不再是

无穷。另外,从图4和图5可见,零泊松比蜂窝结构量纲为一后的等效弹性模量理论结果与数值计算结果具有高度的一致性,平均相对误差在4%左右,其原因主要是在等效弹性模量的计算忽略了垂直壁的变形。

1.3 试验验证

以 $l=10$ 、 $\alpha=2$ 、 $\beta=0.1$ 和 $\theta=45^\circ$ 的蜂窝结构为研究对象,对蜂窝进行面内拉伸试验,测量其等效拉伸模量,并与理论结果、数值计算结果进行对比。常规钣金成型或冲压成型加工的铝合金无法一步成型蜂窝结构,需要借助不同的模具,并利用金属胶将斜壁与垂直壁粘接,此加工过程过于复杂,加工成本大,且无法保证结构精度。因此蜂窝以成本较低的“未来8002”光敏树脂为原材料(弹性模量为2800 MPa),经3DSL光固化激光3D打印机打印而成,不仅能保证加工精度,同时能降低加工成本,节省加工时间。

原材料及蜂窝板的拉伸性能经10 kN量程Instron 5566万能试验机测量3~5次获得。拉伸速度为1 mm/s,分别记录试验过程中相应的力和位移,用于计算零泊松比蜂窝结构的等效拉伸模量。零泊松比蜂窝板的拉伸参照标准ASTM D638-08。

图6为蜂窝结构拉伸试验结果和应力-应变曲线,同时给出了弹性段理论计算结果。由拉伸试验结果可见,随着载荷的不断增大,蜂窝结构的V形斜壁逐渐拉直,最后在直壁与斜壁连接处被拉断。由于直壁与斜壁连接处存在应力集中现象,所以从该处断裂。由弹性段应力-应变值得,蜂窝结构的等效弹性模量为2.35 MPa,而理论结果约为1.96 MPa,相差约0.4 MPa。误差来源可能有两点:(1)使用3DSL光固化成型工艺制造的样品具有分层沉积特点以及额外的内部孔隙,不满足蜂窝板均匀化和各向同性的假设^[21]。(2)在理论模型中,并未考虑垂直胞壁的变形,而拉伸试验中,考虑了垂直胞壁的变形。

2 非线性条件下蜂窝力学特性分析

基于线性理论获得的蜂窝结构力学特性一般与试验结果具有较高的吻合度,但若考虑蜂窝结构的几何或材料等非线性效应,则又表现出不同的力学特性。文献[22]建立了蜂窝结构的几何非线性模型,获得了变形量与拉伸载荷的影响关系。但该文献只考虑了几何非线性效应,对材料非线性效应未做考虑。为此,本文针对上述研究的零泊松比蜂窝结构开展考虑材料非线性效应的力学特性分析。

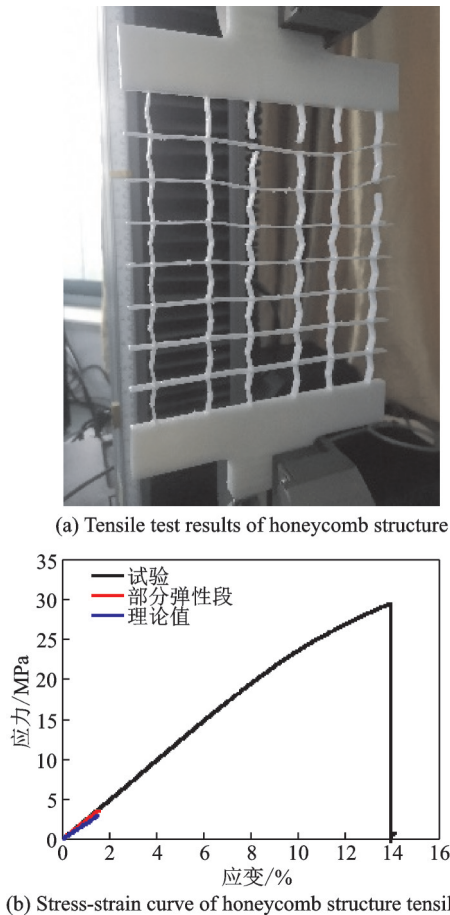


图 6 蜂窝结构拉伸试验结果和应力-应变曲线
Fig.6 Tensile test results and stress-strain curves of honeycomb structure

以 $l=10$ 、 $\alpha=2$ 、 $\beta=0.1$ 和 $\theta=45^\circ$ 的蜂窝结构为研究对象,分别以某铝合金和某钢为材料(铝和钢的真实应力-应变曲线如图 7 所示),将材料的真实屈服应力定义为真实塑性应变的函数,其中铝合金的杨氏模量为 76 000 MPa,泊松比为 0.33,初始屈服应力为 311 MPa;钢的杨氏模量为 200 000 MPa,泊松比为 0.3,初始屈服应力为 418 MPa。材料采用理想弹塑性模型,遵循 von Mises 准则。

为模拟蜂窝结构一维往复拉伸变形过程,有限元模型选用 3×6 个蜂窝胞元的全尺寸模型,如图 8 所示。经收敛性分析确定数值模拟中单元的最小尺寸为 0.5 mm。A 表面固支,采用耦合的形式,在 B 表面上施加位移,随后卸掉 B 表面上的位移,其余表面则设置为自由边界。

图 9 为铝合金基体材料的蜂窝结构(简称为铝蜂窝结构)在产生 5% 变形时,不同参数蜂窝的残余应变。如图 9 所示,当 $\theta < 15^\circ$ 时,无论参数 α 、 β 如何变化,铝蜂窝始终保留约 4.5% 的残余应变。当 $\theta > 15^\circ$ 时,残余应变随着 θ 的增加逐渐减少,这是由于当蜂窝结构沿着 x 方向拉伸时,随着载荷的增

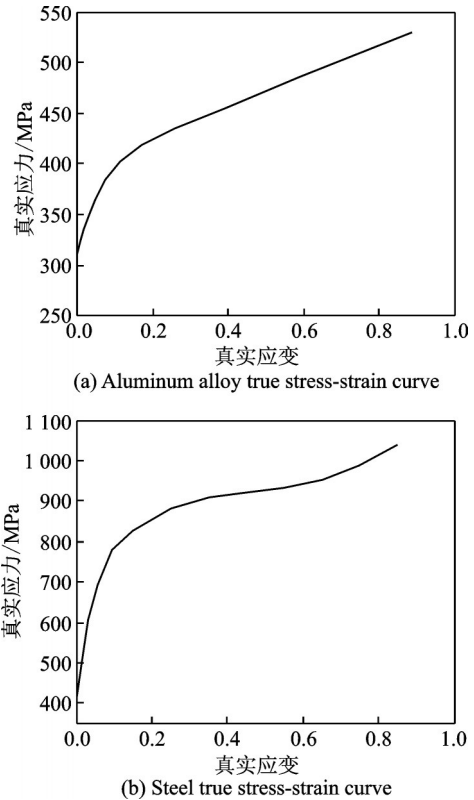


图 7 某型铝合金和钢材的真实应力-应变曲线
Fig.7 True stress-strain curves of a certain type of aluminum alloy and steel

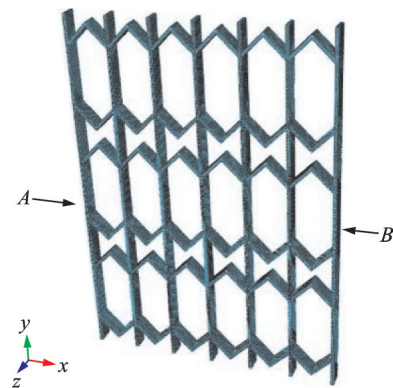


图 8 非线性条件下蜂窝结构力学特性计算模型
Fig.8 Calculating model of mechanical characteristics of honeycomb structure under nonlinear conditions

大,结构的有效夹角会不断减小。由图 4 和图 5 可知,蜂窝结构的等效横向弹性模量随着夹角的减小而增大。因此,在横向变形的过程中,蜂窝结构的横向弹性模量随着变形的增大而增大,即几何强化效应。此外,蜂窝壁厚的减少,即参数 β 的减少,也能够导致残余应变的减少(图 9(a)),而参数 α 对残余应变没有影响(图 9(b))。实际上,蜂窝在拉伸过程中,垂直方向上的蜂窝壁的变形可以忽略不计,其主要变形来自蜂窝斜壁的变形。以 $l=10$ 、

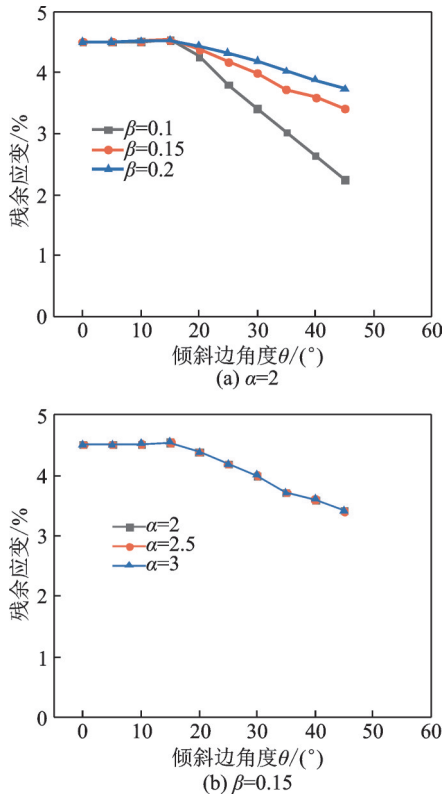


图9 铝蜂窝结构在产生5%变形时,不同参数蜂窝结构的残余应变

Fig.9 Residual strain of the honeycomb structure with different parameters when the aluminum honeycomb structure is deformed by 5%

$\alpha=2, \beta=0.1$ 和 $\theta=45^\circ$ 的铝蜂窝结构为研究对象, 分别对蜂窝结构施加 1~15 mm 的一维往复变形, 得出图 10 所示的应力-应变曲线图, 图 10(b) 为图 10(a) 中红线框处的局部放大图。如图 10 所示, 随着蜂窝变形程度地增加, 蜂窝结构残余应变也相应地增加。如图 10(b) 所示, 铝合金蜂窝结构产生 2% 的变形时, 应力应变曲线出现非线性段。

进一步研究材料非线性对蜂窝结构一维变形行为的影响, 选取另一种飞机中常用的材料, 钢材为蜂窝结构的基体材料(简称为钢蜂窝结构), 保留蜂窝结构的其他参数, 即 $l=10, \alpha=2, \beta=0.1$ 和 $\theta=45^\circ$ 。同样对钢蜂窝结构施加 1~15 mm 的一维往复变形, 得出图 11 所示的应力应变曲线, 图 11(b) 为图 11(a) 中红线框处的局部放大图。与铝蜂窝结构相似, 钢蜂窝结构的残余应变随着变形程度的增加而增加。不同的是, 钢蜂窝结构的非线性变形出现在 1% 变形左右, 如图 11(b) 所示。

根据图 10 及图 11, 可得出铝和钢蜂窝结构施加应变与残余应变的关系, 如图 12 所示。当铝蜂窝结构变形小于 2%, 卸载后, 蜂窝结构基本上能够恢复为原形。而铝蜂窝结构变形大于 2%, 铝蜂

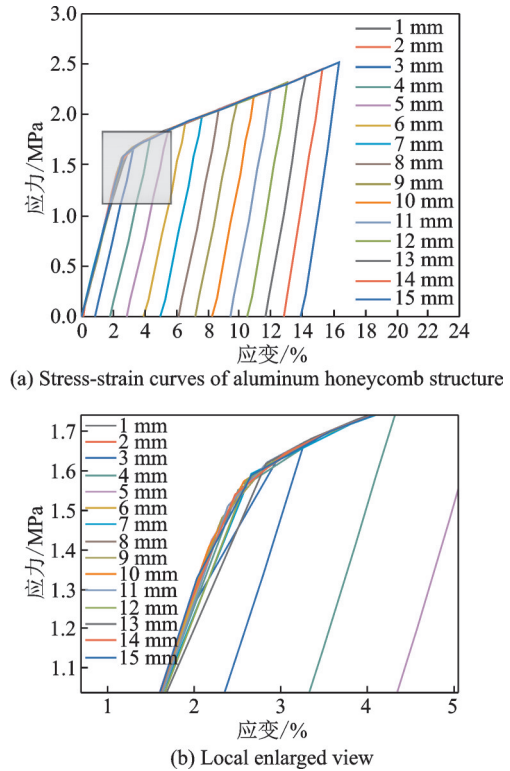


图10 不同变形条件下,铝蜂窝结构应力-应变曲线
Fig.10 Stress-strain curves of aluminum honeycomb structure under different deformation conditions

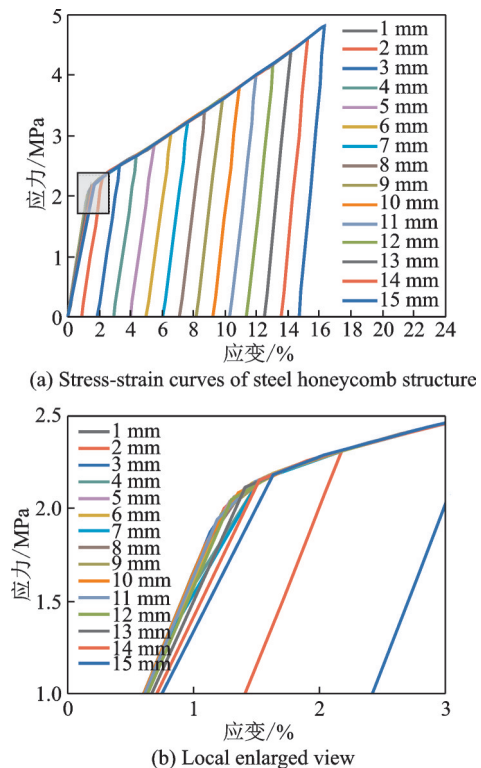


图11 不同变形条件下,钢蜂窝结构的应力-应变曲线
Fig.11 Stress-strain curves of steel honeycomb structure under different deformation conditions

窝结构由于产生非线性变形, 卸载不能恢复原形, 其残余应变与施加应变可看成线性关系。钢蜂窝

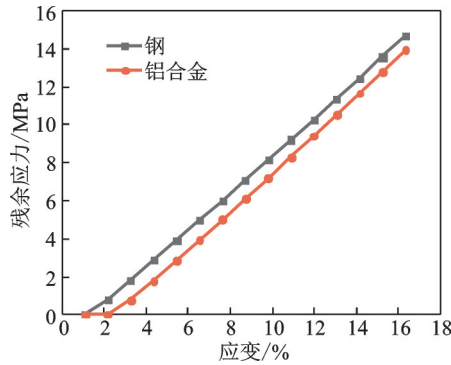


图12 蜂窝结构应变与残余应变的关系

Fig.12 Relationship between the strain of the honeycomb structure and the residual strain

结构变形大于1%就会出现非弹性变形,其残余应变与施加应变同样可看成线性关系。

此外,钢蜂窝结构的残余应变要大于铝蜂窝结构。实际上蜂窝结构应用于二维柔性蒙皮上,须综合考虑其线性段和非线性段的力学行为。因此,可以通过调节蜂窝结构的几何参数,实现蜂窝结构的驱动力调节。此外,在选择基体材料时,在满足其“面外”刚度以承载气动载荷的前提下,不仅应该选用杨氏模量小的材料,减少其驱动力,还应该选用弹性段大的材料。

3 结 论

本文在考虑胞壁轴向变形及弯曲变形后,采用能量法推导了零泊松比蜂窝结构等效弹性模量的理论模型,并通过数值分析和试验进行了验证。然后分析了几何参数及材料属性对蜂窝结构在一维变形中的非线性行为的影响,得出如下结论:

(1)零泊松比蜂窝结构的等效弹性模量随着斜壁倾斜角 θ 的增加而减小,随着参数 β 的增加而增加,随参数 α 的增加而减小。

(2)零泊松比蜂窝结构应用于二维变形时,其残余应变随着 θ 的增加逐渐减少,随着参数 β 的减少而减少,而参数 α 对残余应变没有影响。

(3)除了几何参数的影响外,材料属性对零泊松比蜂窝结构一维变形的非线性行为的影响也较大,在具体选材时,须做综合考虑。

参考文献:

[1] 段富海,初雨田,关文卿,等.变形机翼的关键技术研究现状及其展望[J].空军预警学院学报,2020,34(6):203-209.
DUAN Fuhai, CHU Yutian, GUAN Wenqing, et al. Research status and prospect of key technology of morphing wing [J]. Journal of Air Force Early Warning

Academy,2020,34(6):203-209.

- [2] 李小飞,张梦杰,王文娟,等.变弯度机翼技术发展研究[J].航空科学技术,2020,21(2):12-24.
LI Xiaofei, ZHANG Mengjie, WANG Wenjuan, et al. Research on variable camber wing technology development [J]. Aeronautical Science & Technology, 2020,21(2):12-24.
- [3] 聂瑞.变体机翼结构关键技术研究[D].南京:南京航空航天大学,2018.
NIE Rui. Research on key technologies of morphing wing structures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [4] 聂瑞,裘进浩,季宏丽.变体机翼单向变形柔性蒙皮理论与实验研究[J].科学技术与工程,2017,17(11):115-121.
NIE Rui, QIU Jinhao, JI Hongli. Flexible skins theoretical and experimental research for one-dimensional wing morphing [J]. Science Technology and Engineering, 2017,17(11):115-121.
- [5] 尹维龙.可变后缘弯度机翼柔性蒙皮的刚度需求分析[J].中国科学:技术科学,2010,40(9):1090-1094.
YIN Weilong. Stiffness requirement of flexible skin for variable trailing-edge camber wing [J]. Sci China Tech Sci, 2010,40(9):1090-1094.
- [6] KIKUTA M T. Mechanical properties of candidate materials for morphing wings [D]. Virginia: Virginia Tech, 2003.
- [7] OLYMPIO K R, GANDHI F. Zero Poisson's ratio cellular honeycombs for flex skins undergoing one-dimensional morphing [J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2010, 21(17): 1737-1753.
- [8] ALDERSON A, ALDERSON K L, CHIRIMA G, et al. The in-plane linear elastic constants and out-of-plane bending of 3-coordinated ligament and cylinder-ligament honeycombs [J]. Composites Science and Technology, 2010, 70(7): 1034-1041.
- [9] HUANG J, ZHANG Q, SCARPA F, et al. Bending and benchmark of zero Poisson's ratio cellular structures [J]. Composite Structures, 2016, 152: 729-736.
- [10] GIBSON L J, ASHBY M F. Cellular solids: Structure and properties [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [11] GONG X, HUANG J, SCARPA F, et al. Zero Poisson's ratio cellular structure for two-dimensional morphing applications [J]. Composite Structures, 2015, 134(15): 384-392.
- [12] HUANG J, GONG X, ZHANG Q, et al. In-plane mechanics of a novel zero Poisson's ratio honeycomb core [J]. Composites Part B Engineering, 2015, 89(15): 67-76.

- [13] LIU W, LI H, YANG Z, et al. Mechanics of a novel cellular structure for morphing applications[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 95: 1-2.
- [14] LIU W, LI H, YANG Z, et al. In-plane mechanics of a novel cellular structure for multiple morphing applications[J]. *Composite Structures*, 2019, 207: 598-611.
- [15] CHEN D H. Bending deformation of honeycomb consisting of regular hexagonal cells[J]. *Composite Structures*, 2011, 93(2): 736-746.
- [16] 陈金金. 适用于变体机翼的胞状柔性蒙皮研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2014.
CHEN Jinjin. Research on cellular flexible skin for morphing wing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [17] 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.
- [18] 刘卫东, 李虹林. 零泊松比手风琴蜂窝等效模量[J]. *固体力学学报*, 2018, 39(1): 100-112.
LIU Weidong, LI Honglin. Equivalent moduli of accordion honeycomb with zero Poisson's ratio[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2018, 39(1): 100-112.
- [19] NAILEN R. Roark's formulas for stress and strain [M]. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [20] RUBERT E A, WOODS B K S, LEE K, et al. Design and fabrication of a passive 1D morphing aircraft skin[J]. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*, 2010, 21(17): 1699-1717.
- [21] LIRA C, SCARPA F, TAI Y H, et al. Transverse shear modulus of SILICOMB cellular structures[J]. *Composites Science and Technology*, 2011, 71(9): 1236-1241.
- [22] 石庆华, 尹维龙. 大变形蜂窝结构的几何非线性建模与力学分析[C]//第二十一届全国复合材料学术会议(NCCM-21). 呼和浩特: [s.n.], 2020.
SHI Qinghua, YIN Weilong. Geometrically nonlinear model and analysis of morphing honeycomb with large deformation [C]//Proceedings of the 21st National Conference on Composite Materials (NCCM-21). Huhhot: [s.n.], 2020.

(编辑:陈琚)