

# 零泊松比蜂窝面内拉伸力学响应的有限元模拟



王婷婷<sup>1</sup>, 高军鹏<sup>1</sup>, 许虎<sup>1</sup>, 张宝艳<sup>1</sup>, 韩钮栋<sup>2</sup>, 张典堂<sup>2</sup>

1. 中国航空制造技术研究院, 北京 101300

2. 江南大学生态纺织教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122

**摘要:**自适应飞行器因其对于不同飞行阶段的空气动力学适应性,逐渐成为航空航天研究的重点领域。可变形蒙皮不仅需要具有良好的面内拉伸变形性能,同时材料结构也需要具有一定的刚度来应对飞行过程中的载荷。本文提出以由高性能工程塑料聚醚醚酮(PEEK)材料制备的折线形蜂窝和U形蜂窝材料作为蒙皮结构,通过数值模拟计算确定柔性蒙皮的面内拉伸变形模式及两种蜂窝材料的形状尺寸参数对其面内拉伸变形力学响应的影响。结果表明,折线形蜂窝和U形蜂窝材料的面内变形模式呈现高度一致性,同时,两者的面内拉伸变形性能与蜂窝胞元长度和高度成正比,而与蜂窝厚度成反比。本文研究结果可为变体结构的设计与制备提供理论支持。

**关键词:**可变形蒙皮; 蜂窝胞元; 拉伸力学响应; 结构优化; 数值模拟

中图分类号: TB 332

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.06.009

随着航空航天工业的发展,轻质多孔的蜂窝材料结构越来越多地应用于航空航天领域,如夹芯蜂窝结构、负泊松比蜂窝结构和零泊松比蜂窝结构等<sup>[1-4]</sup>。而飞行器在不同的飞行过程中所需要的气动布局有所不同,传统的固定翼飞行器无法同时满足不同飞行阶段中的气动外形,导致发动机需要提供更大的推力来维持飞行器的飞行姿态和速度<sup>[5-12]</sup>。

早在20世纪40年代,就有学者提出可变后掠翼的机翼变形理论,经过研究发展,在俄罗斯图-160轰炸机、美国F-14战斗机等飞行器上得到发展应用。陈钱等<sup>[13]</sup>探究了可变形飞行器机翼以不同方式变后掠时的气动特性和机理,并发现剪切变后掠具有旋转变后掠的特性,且具有显著优越的升阻比。王臻等<sup>[14]</sup>利用连杆滑块思想设计了一种可变后掠伸缩的变形机翼结构,通过数值模拟分析确定了此自适应机翼结构的强度薄弱环节。20世纪80—90年代,美国军工研究了一种倾转旋翼系统,使飞行器可以像传统直升机那样垂直起降,不再受限于飞行器升降条件,在飞行中需要加速时,可以机械调动旋翼方向,从而使飞行器可以高

本文通过有限元数值模拟计算,分析零泊松比蜂窝材

速飞行<sup>[15-16]</sup>。马铁林等<sup>[17]</sup>通过不同的数值计算方法研究了旋翼滑流对倾转旋翼机气动特性的影响,研究发现滑流定常影响会使飞行器阻力增加,影响气动布局。

但是,类似的需要刚性机械结构对飞行器机翼进行调动的方案中,不仅机械转动装置重量(质量)大,会增加飞行器的油耗,同时复杂的机械传动装置也会改变机体内部布局,不仅故障频发,而且维护检修更是费时费力。目前,柔性可变形机翼越发受到研究人员的关注,尤其是零/负泊松比蜂窝结构因其在变形过程中的特殊结构特性更加得到青睐。张平等<sup>[18]</sup>提出一种十字形可变形蜂窝结构,从理论和模拟数值计算分析了该结构在面内方向的变形机理以及十字形可变形蜂窝的形状参数对其力学性能的影响,结果表明该结构具有良好的面内方向变形能力和承载能力。翟宏州等<sup>[19]</sup>对六边形蜂窝结构进行有限元模拟仿真计算,获得拉伸变形时蜂窝胞壁应力及应变分布,并制备了试样进行验证,结果发现蒙皮试件靠近胞壁黏结处在拉伸过程中会最先受到破坏,有效验证了数值计算结果。

料在面内60%拉伸变形下的变形模式和准静态拉伸力学响

收稿日期: 2022-12-18; 退修日期: 2023-04-06; 录用日期: 2023-05-07

基金项目: 航空科学基金(2020Z055025003)

引用格式: Wang Tingting, Gao Junpeng, Hu Xu, 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(06): 66-76. 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(06): 66-76.

应,探讨不同的结构尺寸参数下对零泊松比蜂窝材料面内拉伸的力学响应的影响,为揭示零泊松比蜂窝的面内变形机理提供基础研究依据,也为零泊松比多孔材料的设计与应用提供一定的引导。

## 1 模型的建立

### 1.1 零泊松比蜂窝的几何结构

产生零泊松比效应的蜂窝结构主要依靠于蜂窝胞元之间的支撑梁,而蜂窝结构的面内拉伸性能由蜂窝胞元结构决定,常见的蜂窝胞元结构如图1所示<sup>[20]</sup>。其中,图1(a)为折线形蜂窝结构的几何参数,参数 $l$ 代表了折线形蜂窝的横向跨度, $kl$ 、 $hl$ 分别为折线形蜂窝的边长和高。图1(b)为U形蜂窝结构的几何参数,参数 $l$ 为U形蜂窝的横向距离, $R$ 为U形圆弧半径, $hl$ 为蜂窝胞元的高。此外,参数 $t$ 代表了两种蜂窝胞元的厚度。

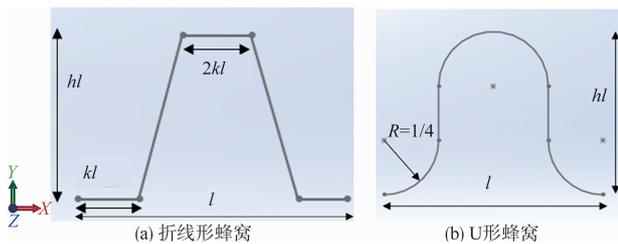


图1 零泊松比蜂窝单元的几何参数

Fig.1 Geometric parameters of the honeycomb cell with zero Poisson's ratio

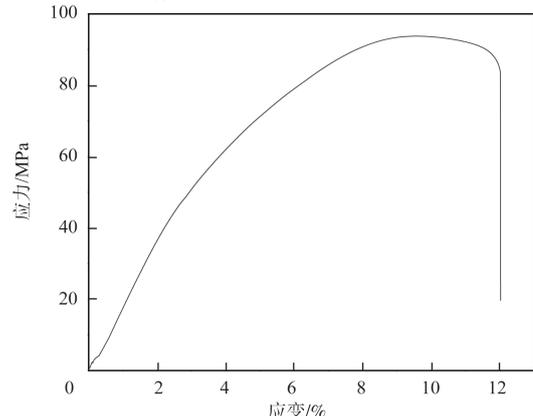
### 1.2 有限元模型

本文使用法国达索公司的Abaqus商用软件进行静态动力学有限元模拟分析,对折线形蜂窝和U形蜂窝零泊松比材料面内 $X$ 方向拉伸性能进行数值模拟。在数值模拟过程中,蜂窝结构材料选用工程塑料聚醚醚酮(PEEK),采用弹塑性力学本构进行计算,材料参数分别为:弹性模量 $E=3881\text{MPa}$ ,泊松比 $\nu=0.3$ ,材料弹塑性力学曲线通过试验获得,PEEK原材料由上海远铸智能公司提供,由威布三维的高性能3D打印机进行制备,制备工艺参数为喷嘴温度 $400^\circ\text{C}$ 、底板温度 $120^\circ\text{C}$ 、腔室温度 $90^\circ\text{C}$ ,参照ISO 527-2标准进行测试,试验件如图2(a)所示,得到材料弹塑性力学曲线如图2(b)所示。蜂窝材料选用壳单元,采用减缩积分壳单元算法,并用四边形网格对蜂窝材料进行划分。为了满足收敛性需要,蜂窝材料沿厚度方向设置为 $20\text{mm}$ ,支撑梁宽度为 $1\text{mm}$ 。

图3所示为零泊松比蜂窝材料的面内拉伸有限元模型。其中,图3(a)为折线形蜂窝材料模型,在 $X$ 和 $Y$ 方向各取4和两个胞元。图3(b)为U形蜂窝材料模型,在 $X$ 和 $Y$ 方



(a) 聚醚醚酮(PEEK)材料测试试样



(b) 聚醚醚酮(PEEK)材料应力—应变曲线

图2 聚醚醚酮(PEEK)试样及应力—应变曲线

Fig.2 Polyether ether ketone (PEEK) specimen and stress-strain curve

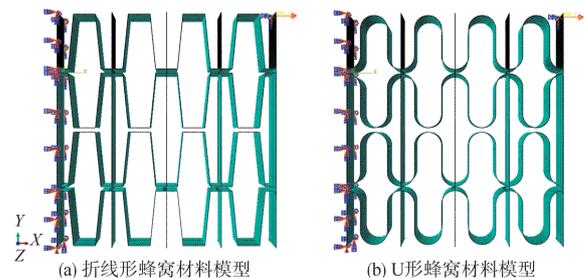


图3 零泊松比蜂窝材料面内拉伸有限元模型

Fig.3 Finite element model of honeycomb material in plane tension with zero Poisson's ratio

向同样各取4个和两个胞元。将蜂窝模型的一端设定为完全固定,另一端设置为相对于蜂窝材料长度60%的位移。

## 2 模拟结果和讨论

### 2.1 折线形蜂窝材料在不同结构参数下的拉伸力学响应

#### 2.1.1 折线形蜂窝材料受长度 $l$ 的影响

图4给出了在不同长度 $l$ ( $l$ 分别取 $15\text{mm}$ 、 $20\text{mm}$ 和 $25\text{mm}$ )下,折线形蜂窝材料的面内拉伸力学响应,并给出了

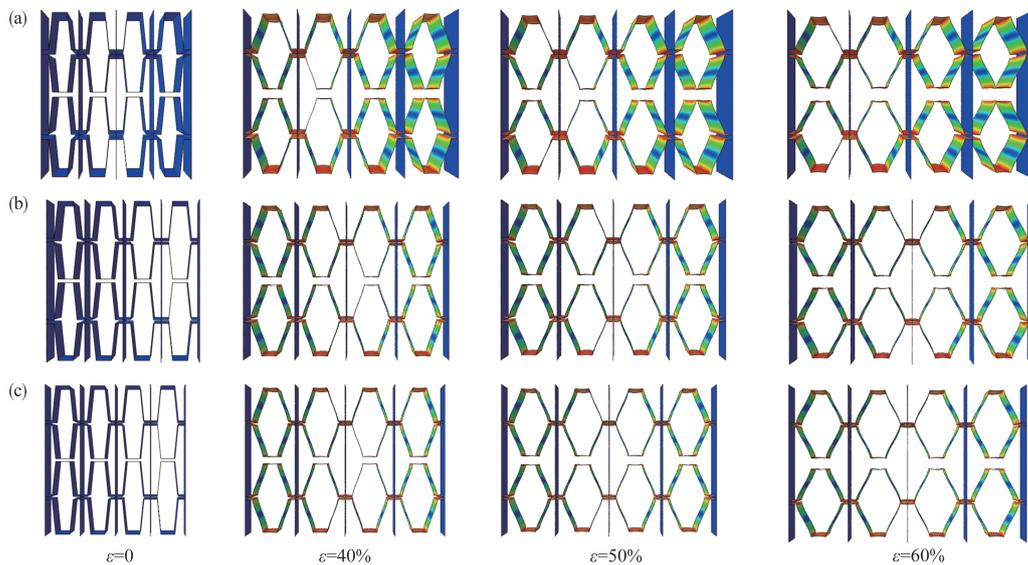


图4 折线形蜂窝材料不同长度 $l$ 下的不同时刻面内拉伸变形模式

Fig.4 In-plane tensile deformation modes at different times for different lengths  $l$  of folded-line honeycomb materials

在不同拉伸应变下的蜂窝变形模式。分析比较折线形蜂窝材料在不同长度 $l$ 下的面内拉伸变形过程,可以发现,折线形蜂窝材料的变形模式比较一致,在横向产生拉伸应变的同时,纵向因为支撑梁的存在,材料很好地维持了零泊松比超结构。在较小的拉伸应变下,整个蜂窝结构的变形比较均匀,出现应力集中的部分集中在折线形蜂窝结构的弯折处,并且随着拉伸应变的提高,应力集中现象加剧。

图5为不同长度 $l$ 下蜂窝材料拉伸端的力学响应曲线,得到的弹性模量统计于表1内。可知随着 $l$ 增加,在相同的拉伸应变下,应力值有明显下降,反映在弹性模量上, $l$ 取

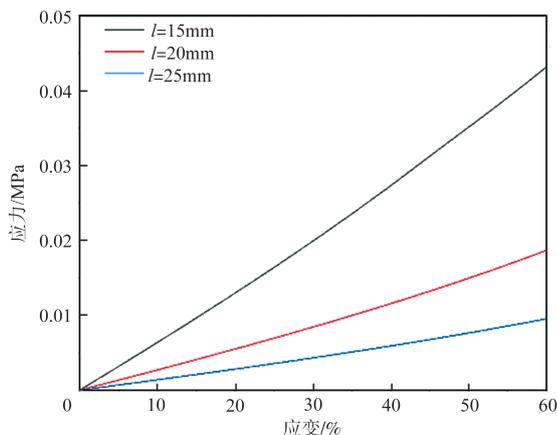


图5 不同长度 $l$ 下折线形蜂窝材料的面内拉伸力学响应曲线

Fig.5 In-plane tensile mechanical response curves of curved line honeycomb materials with different lengths  $l$

表1 不同长度 $l$ 下折线形蜂窝材料的弹性模量

Table 1 Elastic modulus of curved line honeycomb material with different lengths  $l$

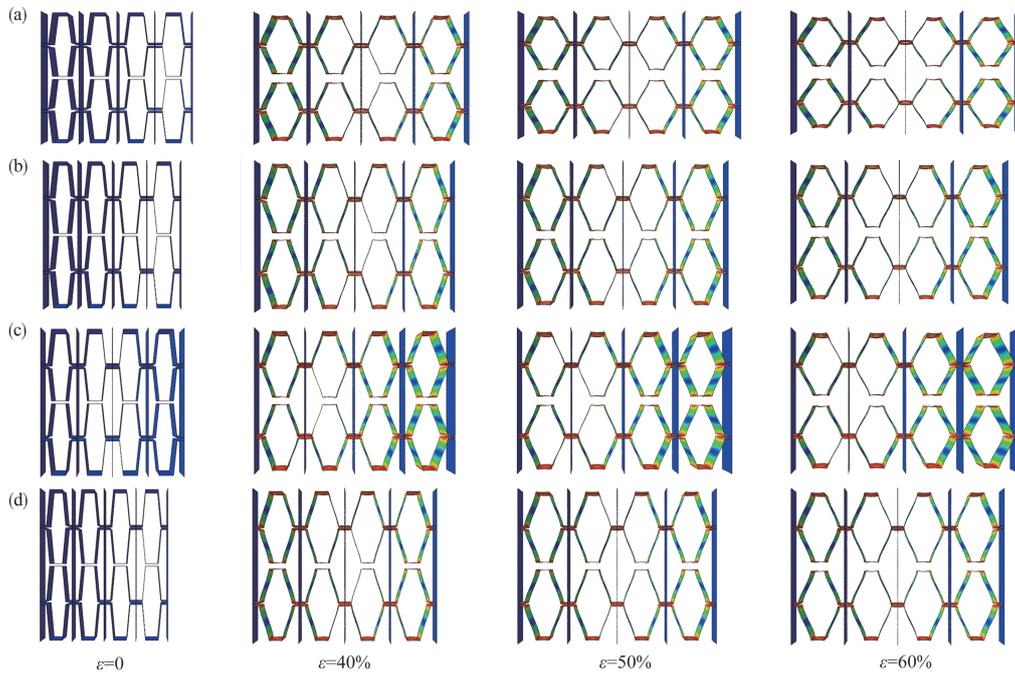
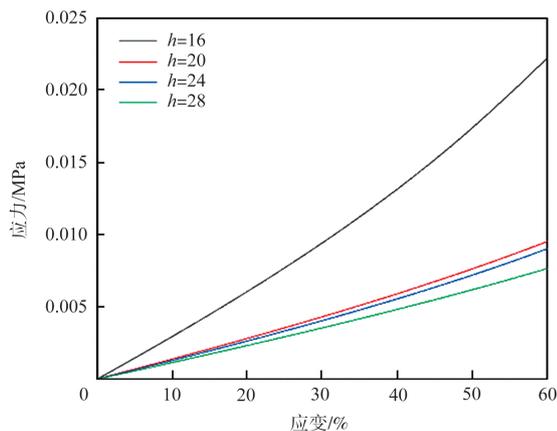
$l/\text{mm}$	弹性模量/MPa	60%应变下应力集中情况/MPa
15	0.072	27.34
20	0.036	21.45
25	0.018	17.31

25mm时,蜂窝材料弹性模量最低,仅为0.018MPa,意味着此时的折线形蜂窝材料具有较高的变形能力。

### 2.1.2 折线形蜂窝材料受高度系数 $h$ 的影响

根据上一节得到的结论, $l$ 取25mm时蜂窝具有更加优秀的面内拉伸变形能力。进一步研究不同高度下的折线形蜂窝材料在60%面内拉伸变形模式,高度系数分别为0.8、1.0、1.2、1.4,如图6所示。

图7反映了不同高度下的折线形蜂窝材料在面内拉伸变形时的力学响应曲线,得到的弹性模量和最大应力集中情况统计于表2中。比较分析不同高度下的折线形蜂窝材料在面内拉伸变形过程可知,折线形蜂窝材料在拉伸变形过程中,各胞元变形保持一致,这可能是因为在静态动力学中,结构受到的载荷较为稳定一致,因此具有相似的变形机理。此外,当高度增加时,蜂窝材料的应力集中情况得到有效缓解,当 $h=1.4$ 时,最大应力仅为14.48MPa。从应力—应变曲线上也能发现,高度的增加能够使蜂窝材料在相同的应变下具有更小的应力,蜂窝材料的弹性模量降低,零泊松比超结构的变形能力得到有效提升。

图6 折线形蜂窝材料不同高度关系系数 $h$ 下的不同时刻面内拉伸变形模式Fig.6 The in-plane tensile deformation modes at different times under different height relation coefficients  $h$  of foldline honeycomb material图7 不同高度关系系数 $h$ 下折线形蜂窝材料的面内拉伸力学响应曲线Fig.7 In-plane tensile mechanical response curves of folded line honeycomb material under different height relation coefficients  $h$ 

### 2.1.3 折线形蜂窝材料受厚度 $t$ 的影响

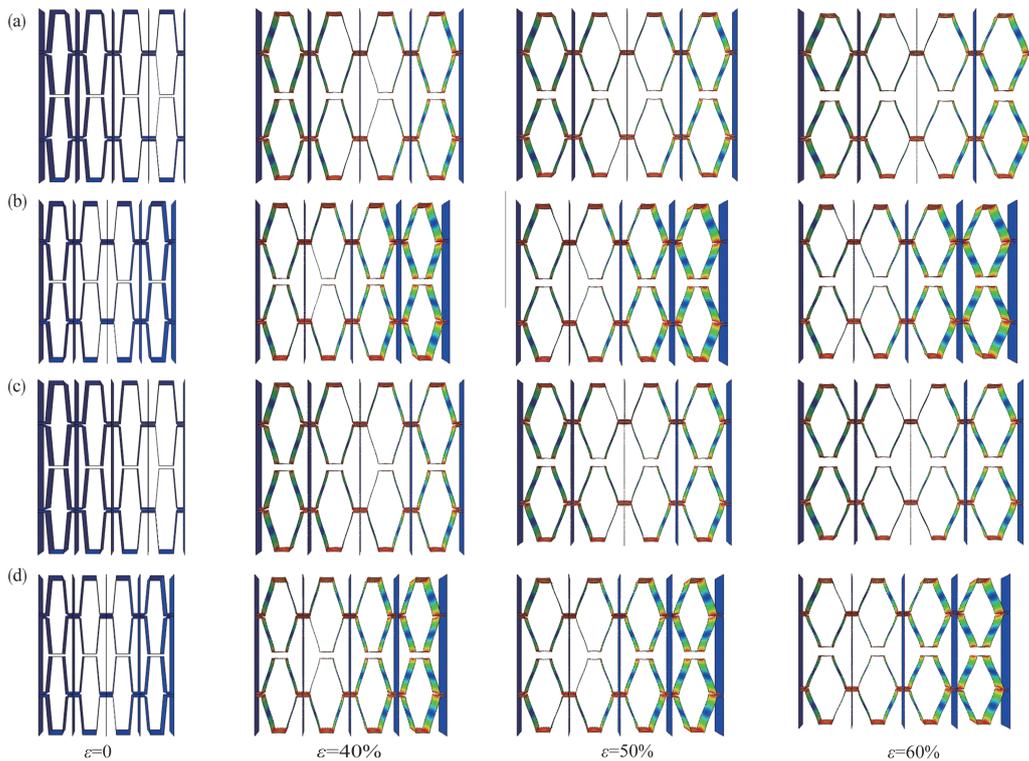
由上面两节得到的结论,当 $l$ 和 $h$ 分别取25mm和1.4时,折线形蜂窝具有更加优秀的面内拉伸性能。在此基础上进一步研究蜂窝厚度对于折线形蜂窝面内拉伸变形能力的影响。厚度分别为0.6mm、0.8mm、1.0mm、1.2mm的折线形蜂窝材料在60%面内拉伸变形下的变形过程如图8所

示,得到的力学响应曲线如图9所示,将最大应力集中情况和弹性模量记录于表3。比较分析不同蜂窝厚度下的折线形蜂窝面内拉伸变形过程,可知折线形蜂窝材料的拉伸变形机理与之前保持一致。而蜂窝厚度对于折线形蜂窝材料的面内拉伸变形能力影响较大。随着蜂窝厚度降低,折线形蜂窝模型的应力集中情况有了明显缓解,最大应力由17.46MPa降至8.921MPa,弹性模量进一步降至0.003MPa,证明随着蜂窝厚度降低,折线形蜂窝材料的面内拉伸变形能力提升。值得注意的是,随着蜂窝厚度降低,拉伸变形过程中得到的力学响应曲线趋向于线弹性,这说明折线形蜂窝材料在大变形下的结构稳定性提升,弹性模量并不会出现突变,蜂窝结构所能承受的最大应变提高。

### 2.1.4 尺寸参数对折线形蜂窝结构面内弹性模量的影响

$L/H$ 及蜂窝厚度 $t$ 对折线形蜂窝结构面内弹性模量的影响如图10所示。

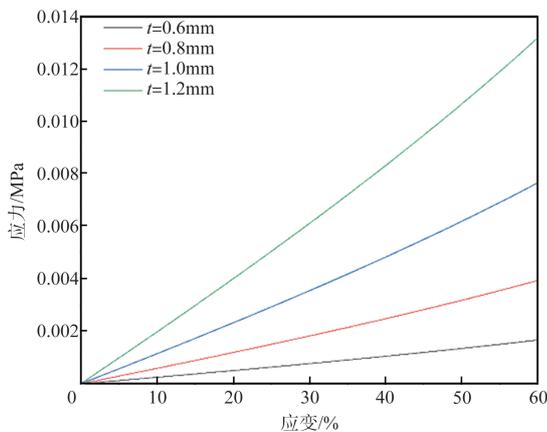
本节在上文的基础上讨论研究了折线形蜂窝结构的面内弹性模量与尺寸参数的变化关系。可以看到,当折线形蜂窝结构的横向跨度一定时,增大蜂窝结构的纵向跨度 $H$ ,会使折线形蜂窝结构的面内模量明显下降,但这种下降并不是呈线性的,拟合的曲线表明随着 $H$ 增大,折线形蜂窝结构的面内弹性模量变化幅度减小,逐渐趋于稳定,这说明当

图8 折线形蜂窝材料不同厚度 $t$ 下的不同时刻面内拉伸变形模式Fig.8 In-plane tensile deformation modes of folded-line honeycomb material at different thicknesses  $t$  at different times表2 不同高度系数 $h$ 下折线形蜂窝材料的弹性模量Table 2 Elastic modulus of curved line honeycomb material with different height coefficients  $h$ 

$h$	弹性模量/MPa	60%应变下应力集中情况/MPa
0.8	0.030	23.72
1.0	0.015	17.31
1.2	0.014	18.47
1.4	0.012	14.48

表3 不同蜂窝厚度 $t$ 下折线形蜂窝材料的弹性模量Table 3 Elastic modulus of curved line honeycomb material with different honeycomb thicknesses  $t$ 

$t/\text{mm}$	弹性模量/MPa	60%应变下应力集中情况/MPa
0.6	0.003	8.921
0.8	0.006	11.58
1.0	0.014	14.48
1.2	0.022	17.46

图9 不同厚度 $t$ 下折线形蜂窝材料的面内拉伸力学响应曲线Fig.9 In-plane tensile mechanical response curves of curved line honeycomb material with different thicknesses  $t$ 

横向跨度一定时,一味增加纵向跨度是无法改善蜂窝结构的面内变形能力的。与之类似的是,当蜂窝厚度降低到一定程度后,对蜂窝面内弹性模量的影响开始下降。

## 2.2 U形蜂窝材料在不同结构参数下的拉伸力学响应

### 2.2.1 U形蜂窝材料受长度 $l$ 的影响

图11为不同长度 $l$ 下的U形蜂窝材料面内拉伸变形过程示意图,图12为拉伸变形过程中的力学响应曲线,得到的弹性模量和最大应力集中情况统计于表4中。U形蜂窝材料在静态动力拉伸下,整体变形模式与折线形蜂窝材料相似,各蜂窝胞元一同承担载荷进行形变,U形蜂窝材料在拉伸变形过程中,应力集中情况主要出现在U形蜂窝的顶点和胞元与支撑梁连接处,这意味着,当蜂窝材料承受较大应变时,U形蜂窝的顶点以及胞元与支撑梁连接处容易出现断裂失稳的

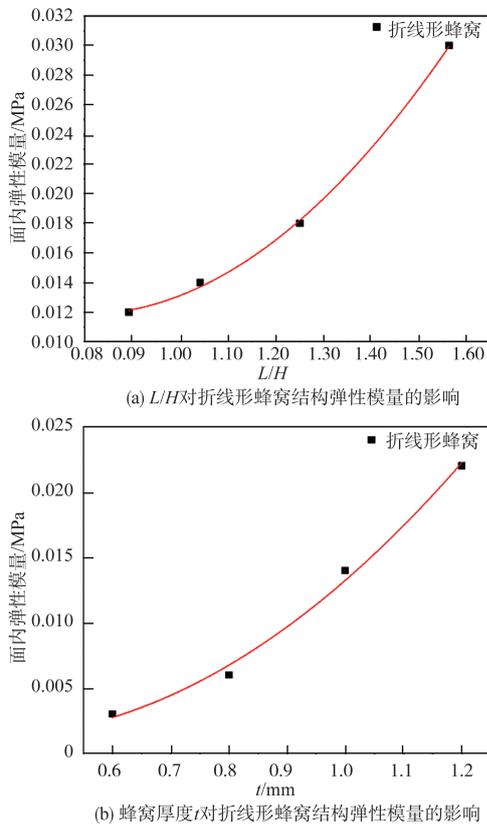


图10  $L/H$ 及蜂窝厚度 $t$ 对折线形蜂窝结构弹性模量的影响  
Fig.10 Effect of  $L/H$  and honeycomb thickness  $t$  on elastic modulus of folded honeycomb structure

情况。此外,随着长度 $l$ 增加,U形蜂窝材料的应力集中情况得到缓解,从30.2MPa降至21.8MPa,蜂窝结构弹性模量降低,U形蜂窝材料面内拉伸变形能力得到有效提升。

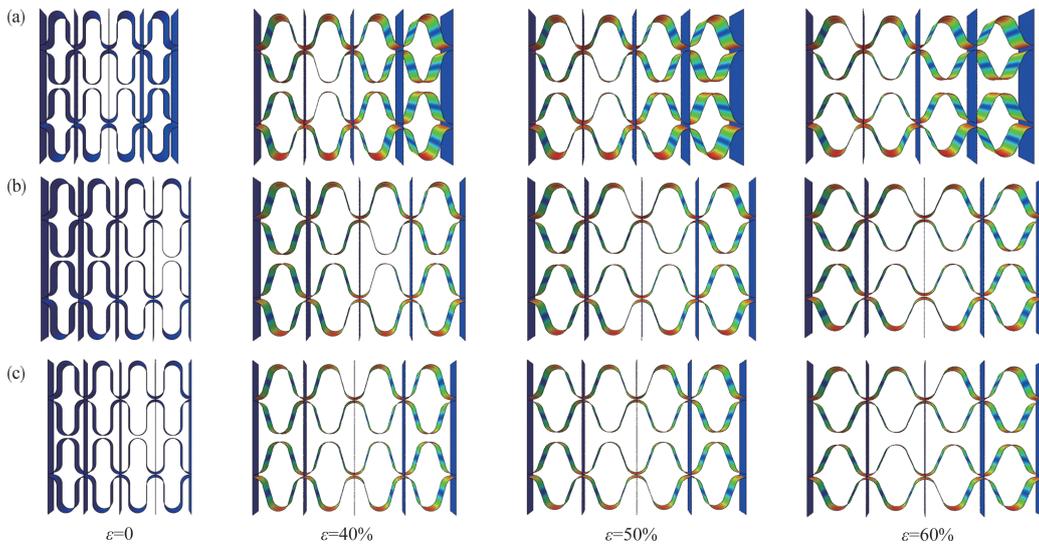


图11 U形蜂窝材料不同长度 $l$ 下的不同时刻面内拉伸变形模式

Fig.11 In-plane tensile deformation modes of U-shaped honeycomb material at different time points with different lengths  $l$

### 2.2.2 U形蜂窝材料受高度系数 $h$ 的影响

由上节得到的结论, $l$ 取24mm时,U形蜂窝材料的面内拉伸性能最佳,图13为 $l=24\text{mm}$ 时,不同高度系数 $h$ 下的U形蜂窝材料在60%面内拉伸变形过程示意图,图13(a)为 $h=0.5$ 的U形蜂窝材料,可以看到,在60%拉伸形变下,U形胞元几乎被拉至平行,这也导致图14中的应力—应变曲线出现骤升,应力集中情况加剧,零泊松比超结构出现失稳。其他高度系数下的U形蜂窝材料变形模式趋同,应力集中主要出现在U形蜂窝的顶点,以及胞元与支撑梁的连接处。与折线形蜂窝材料类似的是,当高度系数 $h$ 增加时,应力集中得到有效化解,蜂窝材料面内拉伸变形能力提升,弹性模量降至0.003MPa。

### 2.2.3 U形蜂窝材料受厚度 $t$ 的影响

从上述的研究中可以发现,长度和高度增加时,U形蜂窝材料的面内拉伸性能得到很大提升,这可能是因为蜂窝材料的相对密度下降,弹性模量因此下降。本节在 $l=24\text{mm}$ 、 $h=2$ 的基础上,进一步研究U形蜂窝材料厚度 $t$ 对面内拉伸变形能力的影响。厚度 $t$ 取值分别为0.6mm、0.8mm、1.0mm和1.2mm,图15为U形蜂窝材料在不同厚度 $t$ 下不同时刻的面内拉伸变形模式示意图,并获得如图16所示的力学响应曲线。可以观察到,当厚度 $t$ 增加时,U形蜂窝材料的胞元顶点和胞元与支撑梁连接处的应力集中加剧,由4.024MPa增至7.098MPa,但U形蜂窝的面内拉伸变形模式并未就此改变。从力学响应曲线的对比中可以看到,不同厚度下的U形蜂窝材料的力学响应趋于线弹性,这意味着这几种构型在60%的拉伸变形下均表现出弹性变形

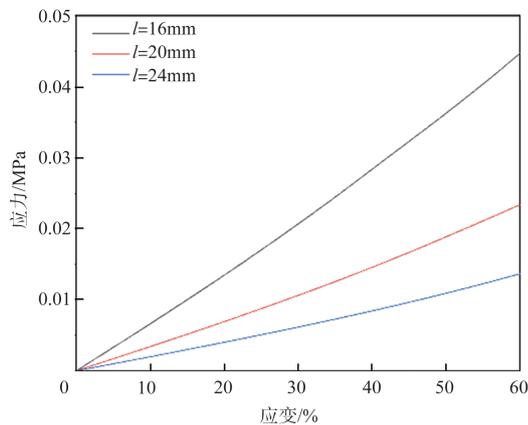


图12 不同长度 $l$ 下U形蜂窝材料的面内拉伸力学响应曲线  
Fig.12 In-plane tensile mechanical response curves of U-shaped honeycomb materials with different lengths  $l$

表4 不同长度 $l$ 下U形蜂窝材料的弹性模量  
Table 4 Elastic modulus of U-shaped honeycomb material with different lengths  $l$

$l/\text{mm}$	弹性模量/MPa	60%应变下应力集中情况/MPa
16	0.073	30.20
20	0.037	25.17
24	0.022	21.80

的模式,并未出现结构失稳的情况。此外,厚度 $t$ 的增加导致U形蜂窝材料的弹性模量从0.0002MPa增至0.0026MPa,

弹性模量出现了相对较大的上升,U形蜂窝材料的面内拉伸变形性能下降。

### 2.2.4 尺寸参数对U形蜂窝结构面内弹性模量的影响

本节在上述研究中进一步讨论了U形蜂窝结构尺寸参数对蜂窝结构面内弹性模量的影响。图17(a)研究了 $L/H$ 对U形蜂窝结构弹性模量的影响,与折线形蜂窝结构类似的是,当 $L/H \leq 1$ 时, $H$ 的增大对于蜂窝结构面内变形的能力影响较小。图17(b)研究了蜂窝结构厚度 $t$ 对U形蜂窝结构面内弹性模量的影响,蜂窝结构厚度对于面内弹性模量的影响较大,但当 $t$ 降至0.8mm后,蜂窝结构的面内弹性模量变化较小,且受限于实际生产工艺条件,蜂窝结构厚度一味降低,反而会对蜂窝结构产生不利影响。

## 3 结论

本文通过研究折线形蜂窝和U形蜂窝材料的长度、高度以及蜂窝厚度,优化零泊松比蜂窝结构的面内拉伸变形性能,使之在维持零泊松比超结构的状态下,通过面内的拉伸大变形,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)折线形蜂窝和U形蜂窝材料随着 $X$ 方向的长度增加,蜂窝材料的弹性模量出现下降,蜂窝材料的面内拉伸性能提高,即拉伸性能与 $X$ 方向长度成正比。

(2)折线形蜂窝和U形蜂窝材料随着高度系数 $h$ 的增

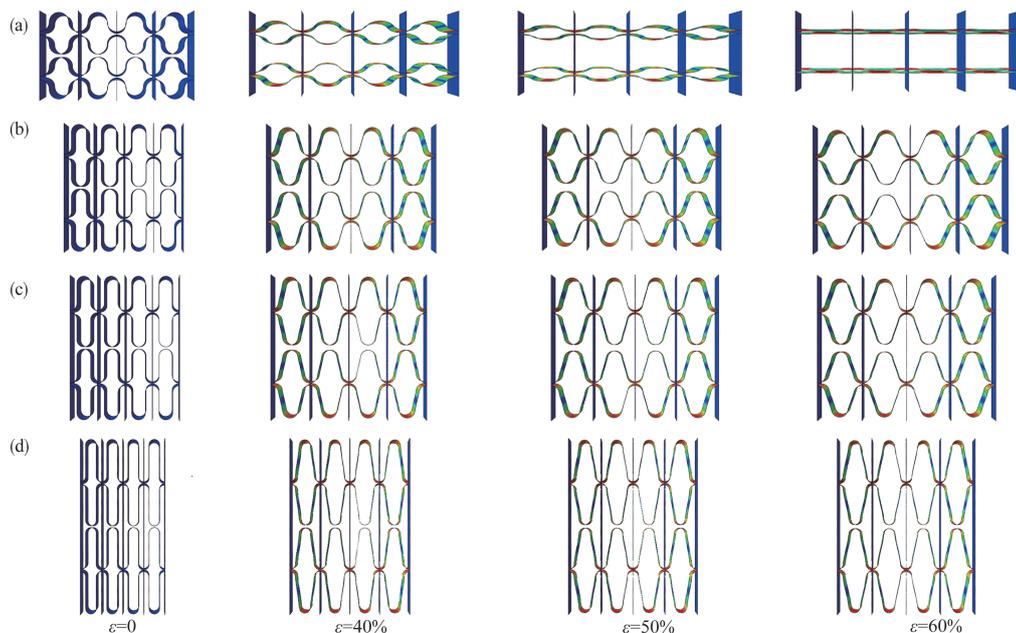


图13 U形蜂窝材料不同高度关系系数 $h$ 下的不同时刻面内拉伸变形模式

Fig.13 The in-plane tensile deformation modes of U-shaped honeycomb material at different times under different height relation coefficients  $h$

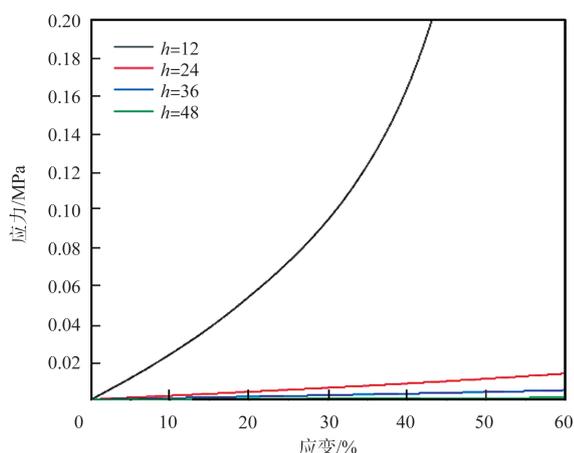


图 14 不同高度关系系数  $h$  下 U 形蜂窝材料的面内拉伸力学响应曲线

Fig.14 In-plane tensile mechanical response curves of U-shaped honeycomb material under different height relation coefficients  $h$

表 5 不同高度系数  $h$  下 U 形蜂窝材料的弹性模量

Table 5 Elastic modulus of U-shaped honeycomb material with different height coefficients  $h$

$h$	弹性模量/MPa	60%应变下应力集中情况/MPa
0.5	0.270	59.470
1.0	0.025	21.800
1.5	0.010	15.170
2.0	0.003	6.607

加,胞元顶点处和胞元与支撑梁连接处的应力集中得到改善,蜂窝材料的面内拉伸性能得到提升,即拉伸性能与高度系数  $h$  成正比。

(3)折线形蜂窝和 U 形蜂窝材料随着蜂窝厚度  $t$  的增加,蜂窝材料的应力集中情况加剧,弹性模量增加,蜂窝材料的面内拉伸变形性能下降,即拉伸性能与蜂窝厚度成反比。

柔性可变形飞行器的应用不仅需要材料结构具有优异的面内拉伸变形性能,还需要具有一定的刚度以应对飞行过程中的气动压力,同时也要考虑到可变形材料结构的服役寿命,这均需进一步研究。



参考文献

[1] 刘凯,曹晓飞,李营,等. 基于手性超结构设计的可变形机翼研究进展[J]. 航空科学技术,2022,33(1):20-36.  
Liu Kai,Cao Xiaofei,Li Ying,et al. Research progress of deformable wing based on chiral superstructure design[J]. Aeronautical Science & Technology,2022, 33 (1) : 20-36. (in Chinese)

[2] 赵仕伟,阚梓,李道春. 柔性后缘可变形机翼气动弹性分析方法研究[J]. 航空科学技术,2022,33(12):62-69.  
Zhao Shiwei,Kan Zi,Li Daochun. Study on aeroelastic analysis method of deformable wing with flexible trailing edge[J]. Aeronautical Science & Technology,2022,33(12):62-69. (in Chinese)

[3] 翟宏州,芦吉云,王帮峰,等. 具有 SMA 驱动层的柔性蒙皮主动变形特性研究[J]. 兵器材料科学与工程,2014,37(4):1-3.  
Zhai Hongzhou, Lu Jiyun, Wang Bangfeng, et al. Initiative deformation properties of flexible skin driven by SMA layer[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2014, 37(4): 1-3. (in Chinese)

[4] 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. (in Chinese)

[5] 沈元,昂海松,刘卫东. 用于变形机翼夹心式柔性伸缩蒙皮的梯形蜂窝支撑结构[J]. 复合材料学报,2015,32(3):815-822.  
Shen Yuan, Ang Haisong, Liu Weidong. Trapezoidal cellular support structure applied to flexible telescopic sandwich skin of morphing wing[J].Acta Materiae Compositae Sinica,2015,32 (3):815-822. (in Chinese)

[6] 冷劲松,孙健,刘彦菊. 智能材料和结构在变体飞行器上的应用现状与前景展望[J].航空学报,2014,35(1):29-45.  
Leng Jinsong,Sun Jian,Liu Yanju.Application status and future prospect of smart materials and structures in morphing aircraft [J].Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2014,35(1):29-45. (in Chinese)

[7] 彭海峰,董二宝,张世武,等. 超弹性蒙皮蜂窝芯的设计及等效模量研究[J]. 中国机械工程,2012,23(6):717-720.  
Peng Haifeng,Dong Erbao,Zhang Shiwu,et al.Design on flexible honeycomb and research on its equivalent modulus[J]. China Mechanical Engineering,2012,23(6):717-720. (in Chinese)

[8] 李天齐,李永新,吴金玺,等. 基于遗传算法的蒙皮蜂窝芯结构参数优化与选型分析[J]. 现代制造工程,2016(1):11-15,150.  
Li Tianqi,Li Yongxin,Wu Jinxi, et al. Parameter optimization and selection analysis of skinned honeycomb core structure based on genetic algorithm[J]. Modern Manufacturing Engineering,2016(1): 11-15,150. (in Chinese)

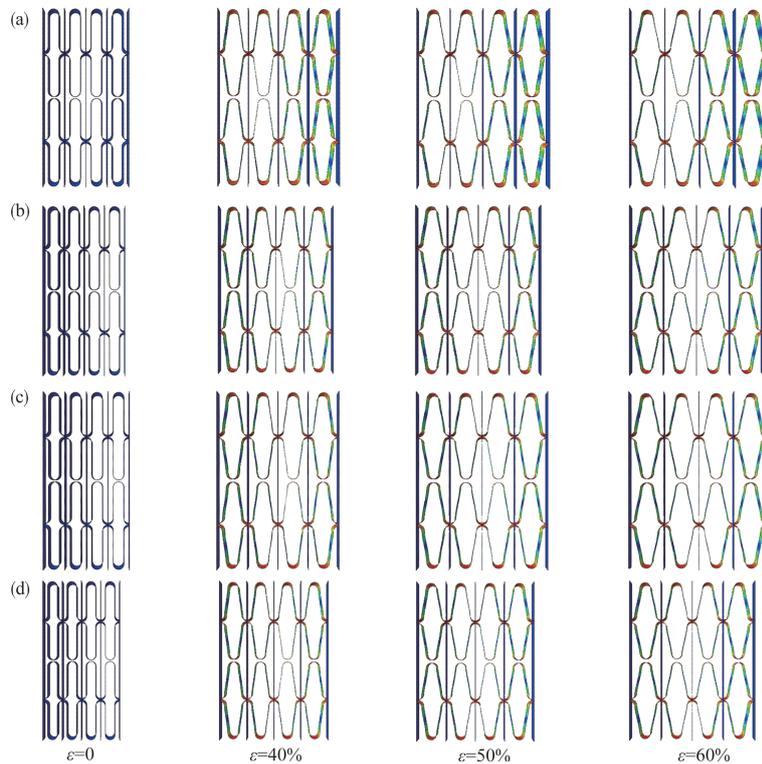


图 15 U形蜂窝材料不同厚度  $t$  下的不同时刻面内拉伸变形模式

Fig.15 In-plane tensile deformation modes of U-shaped honeycomb material at different thicknesses  $t$  at different times

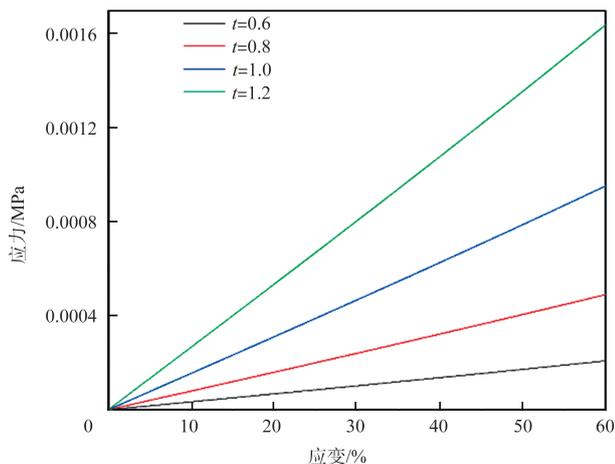


图 16 不同厚度  $t$  下 U形蜂窝材料的面内拉伸力学响应曲线

Fig.16 In-plane tensile mechanical response curves of U-shaped honeycomb material with different thicknesses  $t$

表 6 不同蜂窝厚度  $t$  下 U形蜂窝材料的弹性模量

Table 6 Elastic modulus of U-shaped honeycomb material with different honeycomb thicknesses  $t$

$t/\text{mm}$	弹性模量/MPa	60%应变下应力集中情况/MPa
0.6	0.0002	4.024
0.8	0.0006	5.326
1.0	0.0016	6.607
1.2	0.0026	7.908

性研究与试飞[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(6):726-732.

Wu Dawei, Wu Zheng, Zhang Landing, et al. Research and test flight of a propeller-propelled flexible sing aircraft [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(6):726-732. (in Chinese)

[11] 易定操. 可变后掠角机翼结构与仿真分析 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2019.

Yi Dingcao. Structure design and simulation analysis of variable sweep angle wing[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)

[12] 孙淼, 许瑛, 李隆. 基于 ANSYS 的可变后掠角机翼结构稳定性分析[J]. 航空科学技术, 2016, 27(1):15-20.

Sun Miao, Xu Ying, Li Long. Structural stability analysis of

[9] 刘兵飞, 张超, 张威. 形状记忆合金驱动可变形机翼的设计优化[J]. 中国民航大学学报, 2021, 39(3):34-38.

Liu Bingfei, Zhang Chao, Zhang Wei. Design optimization of shape memory alloy driven deformable wing[J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2021, 39(3):34-38. (in Chinese)

[10] 吴大卫, 吴征, 张兰丁, 等. 螺旋桨推进式柔性翼飞机操稳特

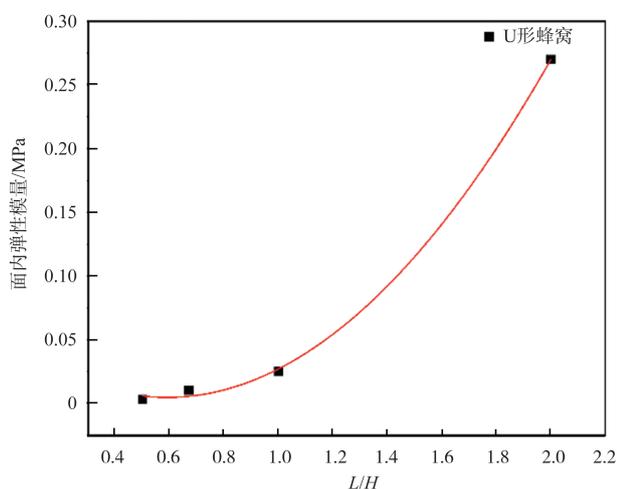
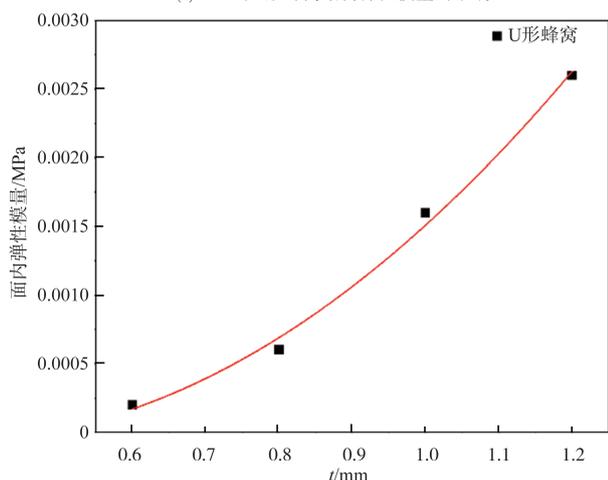
(a)  $L/H$ 对U形蜂窝结构弹性模量的影响(b) 蜂窝厚度  $t$ 对U形蜂窝结构弹性模量的影响

图17  $L/H$ 及蜂窝厚度  $t$ 对U形蜂窝结构弹性模量的影响  
Fig.17 Effect of  $L/H$  and honeycomb thickness  $t$  on elastic modulus of U-shaped honeycomb structure

variable sweep angle wing based on ANSYS[J]. Aeronautical Science & Technology, 2016,27(1):15-20. (in Chinese)

- [13] 陈钱,尹维龙,白鹏,等. 变后掠变展长翼身组合体系统设计与特性分析[J]. 航空学报,2010,31(3):506-513.

Chen Qian, Yin Weilong, Bai Peng, et al. Design and characteristic analysis of variable swept-extended-length wing-body composite system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010,31(3):506-513. (in Chinese)

- [14] 王臻,杨智春,崔高伟,等. 变后掠伸缩变体机翼的受控运动[J]. 机械科学与技术,2010,29(10):1314-1319.

Wang Zhen, Yang Zhichun, Cui Gaowei, et al. Kinematics of a morphing wing with variable span and sweep[J]. Mechanical

Science and Technology for Aerospace Engineering, 2010,29(10):1314-1319. (in Chinese)

- [15] 朱文庆,仲唯贵,张威. 倾转旋翼机小速度前飞的尾迹涡演化及其对平尾的影响[J]. 南京航空航天大学学报,2022,54(3):203-210.

Zhu Wenqing, Zhong Weigui, Zhang Wei. Wake vortex evolution of tiltrotor aircraft flying forward at low speed and its effect on flat tail[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 54(3): 203-210. (in Chinese)

- [16] 周攀,陈仁良,俞志明. 倾转四旋翼飞行器直升机模式操稳特性分析[J]. 西北工业大学学报,2021,39(3):675-684.

Zhou Pan, Chen Renliang, Yu Zhiming. Stability analysis of tilting quadrotor helicopter model[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021,39(3):675-684. (in Chinese)

- [17] 马铁林,张子伦,刘振臣,等. 倾转旋翼机巡航状态旋翼滑流影响[J]. 北京航空航天大学学报,2021,47(6):1124-1137.

Ma Tielin, Zhang Zilun, Liu Zhenchen, et al. Influence of rotor slipstream on tiltrotor aircraft in cruising condition[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021,47(6):1124-1137. (in Chinese)

- [18] 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 properties analysis and structure design of flexible skin based on deformable honeycomb[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2013, 34(5):433-440. (in Chinese)

- [19] 翟宏州,芦吉云,梁晨. 蜂窝结构柔性机翼蒙皮变形特性研究[J]. 科学技术与工程,2014,14(9):261-264.

Zhai Hongzhou, Lu Jiyun, Liang Chen. Research on deformation characteristics of honeycomb flexible wing skin[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(9): 261-264. (in Chinese)

- [20] 刘卫东. 变形机翼关键技术的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.

Liu Weidong. Research on key technologies of deformed wing [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)

## Finite Element Simulation of In-plane Tensile Mechanical Response of Honeycombs with a Zero Poisson's Ratio

Wang Tingting<sup>1</sup>, Gao Junpeng<sup>1</sup>, Hu Xu<sup>1</sup>, Zhang Baoyan<sup>1</sup>, Han Niudong<sup>2</sup>, Zhang Diantang<sup>2</sup>

1. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 101300, China

2. Laboratory of Eco-Textiles, Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214112, China

**Abstract:** Adaptive aircraft are becoming a key area of aerospace research due to their aerodynamic adaptability for different phases of flight. Deformable skins not only need to have good in-plane tensile deformation properties, but also need to have a material structure with a certain degree of stiffness to cope with the loads during flight. This paper propose the use of polyether ether ketone (PEEK), a high performance engineering plastic, as the skin structure for folded honeycomb and U-shaped honeycomb materials. The in-plane tensile deformation pattern of the flexible skin and the effect of the shape and size parameters of the two honeycomb materials on their in-plane tensile deformation mechanical response are determined through numerical simulations. The results show that the in-plane deformation patterns of the bending honeycomb and U-shaped honeycomb materials are highly consistent, and the in-plane tensile deformation performance of both materials is proportional to the length and height of the honeycomb cells, and inversely proportional to the thickness of the honeycomb.

**Key Words:** deformable skins; honeycomb cell elements; tensile mechanical response; structural optimization; numerical simulation

---

**Received:** 2022-12-18; **Revised:** 2023-04-06; **Accepted:** 2023-05-07

**Foundation item:** Aeronautical Science Foundation of China(2020Z055025003)