

# 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

## A Flexible Skin Design Technology and the Application on Variable Camber Trailing Edge

张音旋 邱涛 王健志 / 沈阳飞机设计研究所

**摘要:** 变体飞机可在飞行包线内的不同飞行状态下获得最优气动效能, 增强执行多种任务目标的能力, 实现变体飞机结构的关键技术之一是柔性蒙皮的设计。本文介绍一种基于可变形蜂窝的柔性蒙皮结构, 并研究了这种柔性蒙皮在后缘变弯度机翼结构上的应用, 通过仿真分析和全尺寸原理样件地面试验验证, 该结构满足真实飞行载荷条件下对变形能力和承载能力的要求。

**关键词:** 变体飞机; 柔性蒙皮; 自适应机翼; 柔性机翼

**Keywords:** morphing; flexible skin; self-adaptive wing; flexible wing

### 0 引言

变体飞机可以在飞行过程中根据需要改变布局或机翼形状, 使飞机在不同飞行状态下都能获得较理想的气动特性, 兼顾飞机在不同速度的使用性能, 解决了现代飞机气动布局设计中的矛盾。从改变升力的角度考虑, 机翼变形的效果最好, 多数研究集中在可变形机翼方面, 如改变机翼的弯度、厚度、扭转、展长、面积、后掠角等, 或者组合变形模拟鸟类飞行时翅膀的形状变化。

变体飞机的研究中, 最关键的技术之一是柔性蒙皮设计技术。柔性蒙皮在承受飞机气动载荷的同时, 蒙皮面内能够实现较大变形, 从而满足变体飞机的设计要求。目前国内外变体技术的研究主要集中在智能材料和机翼结构设计上, 对于柔性蒙皮设计的研究很少。本文介绍了一种柔性蒙皮设计方案, 并将其应用在后缘变弯度

机翼结构中, 其结构的变形和承载能力可满足变体飞机的使用要求。

### 1 柔性蜂窝设计

后缘变弯度机翼结构不仅要求机翼后缘结构重量轻, 而且在承载气动载荷时能够产生连续光滑的变形。为此, 在进行后缘变弯度机翼柔性蒙皮设计时必须解决两个矛盾, 一是结构重量与承载能力之间的矛盾, 二是柔性蒙皮面内变形与面外承载之间的矛盾。前一个矛盾可以通过合理结构布局、选择蜂窝结构等轻质高强度材料来解决; 后一种矛盾的化解则需要通过巧妙的结构设计方法对传统蜂窝结构形式进行优化设计, 使其同时满足承载和变形的设计要求。

普通蜂窝的设计要求蜂窝承载能力强、变

形小, 常见的蜂窝结构为六边形截面形式, 如图1所示。但是普通蜂窝变形能力较差, 不能满足后缘变弯度机翼结构的设计要求。因此, 通过对蜂窝形状、尺寸、材料以及排列方式的设计与优化, 使其在变形能力上得到突破, 从而设计出满足变形和承载要求的柔性蜂窝结构。

邱涛等设计了一种自适应结构单元, 其结构简图如图2所示。该单元通过巧妙的结构设计, 利用自适应结构单元垂直边弯曲变形以及四个直角

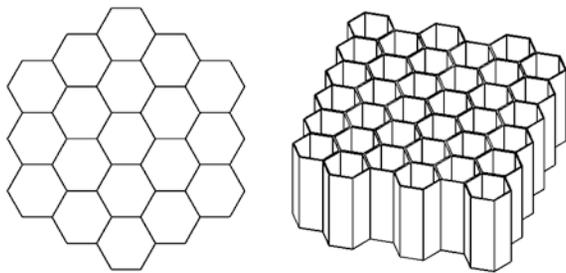


图1 普通六边形蜂窝结构

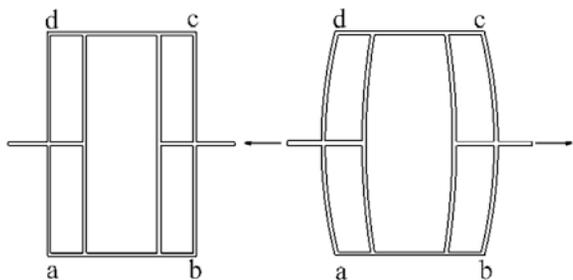


图2 自适应结构单元

边角度的变化,使自适应结构单元在面内具有较强变形能力的同时,在面外具有一定的承载能力。经地面试验验证,这种自适应结构单元在结构变形率达到10%时仍然有一定的承载能力。

自适应结构单元虽然具备了良好的变形能力,但由于结构重量较重,限制了其在变体飞机领域的应用。考虑到蜂窝结构和自适应结构单元的各自特点,设计出一种新的柔性蜂窝结构,在面内具有很大的变形能力,同时在面外又能承受一定载荷。新的柔性蜂窝结构由自适应结构单元形式演化而来,为了便于制造,将自适应单元结构的两条垂直边合并为一条,形成如图3(a)所示的类四边形蜂窝结构。由于采用传统制作方法难以制作出这种蜂窝结构,因此在制造时采用了一种新的方法,制作过程如图3所示。(a)为四边形蜂窝结构,(b)是(a)的另一种表现形式。将铝片叠成(c)所示形状,通过在A面和B面涂胶,使它们粘在一起,形成如(d)所示结构。将(e)中圆圈内的结构去除,就得到(f)所示的柔性蜂窝结构。

图4(a)为柔性蜂窝结构的实物样本,在柔性蜂窝上下表面布置弹性胶膜后就构成了柔性蒙皮结构,对其在拉伸、压缩、剪切、弯曲和扭转单一载荷下的变形能力进行了测试,如图4(b)所示,从图中可以看出,柔性蒙皮结构在不同受载状态下均具有良

好的变形能力。此外,对弹性胶膜与蜂窝的连接强度也进行了试验验证,结果证明,在胶膜上施加0.3MPa均布载荷时结构不会破坏,说明这种柔性蒙皮具有承受机翼后缘气动载荷的能力。

## 2 基于柔性蒙皮的后缘变弯度机翼结构

选择某无人机的机翼后缘翼型,采用上述柔性蜂窝结构建立一段变弯度机翼后缘蜂窝夹芯模型,如图5所示。该模型沿弦向长600mm,沿展向长600mm,蜂窝单元边长为2mm,蜂窝壁厚为0.05mm。

后缘变弯度机翼结构不仅要产生一定的弯曲变形,而且还要承受飞行中的气动载荷。根据结构的承载特点,在后缘的弯曲中性面上布置3mm厚的芯板,以承受机翼后缘气动力产生

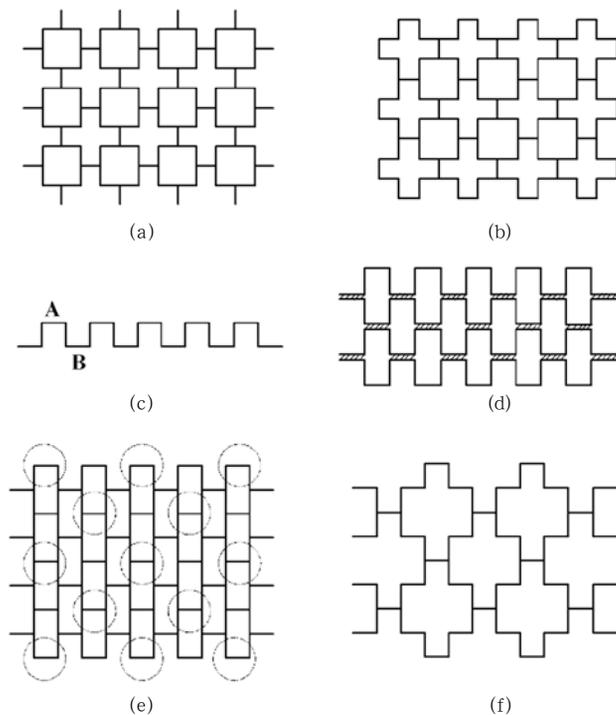
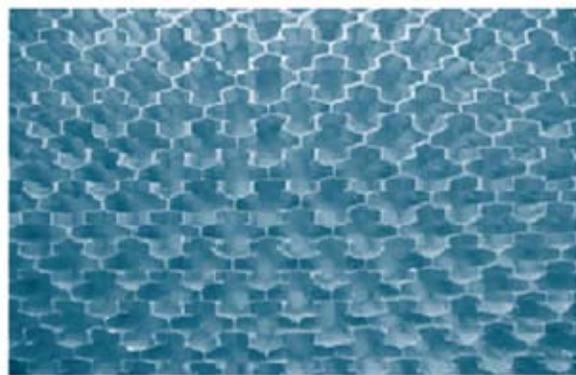
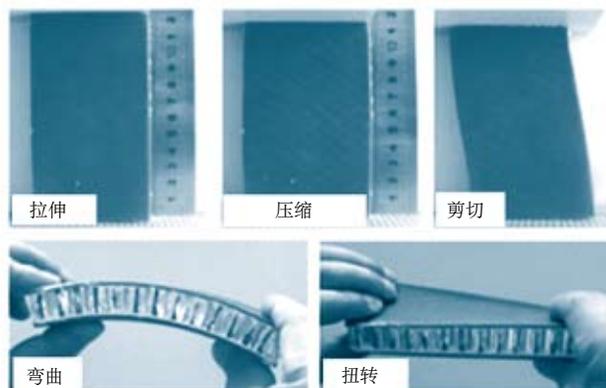


图3 柔性蜂窝制作方法



(a) 柔性蜂窝



(b) 柔性蒙皮

图4 柔性蜂窝样本和变形展示

的剪力、扭矩和部分弯矩；驱动系统采用伸缩式充压管驱动器，其径向保持不变，只在长度方向上产生伸缩变形，通过调节上下翼面冲压管的压差，为后缘变弯度机翼结构提供驱动力并承担气动载荷产生的部分弯矩。芯板上沿厚度方向布置3mm厚的腹板，上下蒙皮之间用柔性蜂窝结构填充，将蒙皮上的气动载荷传给芯板，并为柔性蒙皮结构提供支持；后缘结构上下蒙皮采用一种弹性胶膜材料，其特点是在面内伸缩方向上可以产生很大的变形，垂直表面方向又具有一定的刚度。

对基于柔性蒙皮的后缘变弯度机翼结构样件在地面试验台上进行了变形能力测试，如图6所示。后缘变弯度机翼结构样件最大偏转角度可以达到 $\pm 8^\circ$ ，证明该柔性蒙皮的变形能力明显优于普通蜂窝结构，可以在变体飞机领域得到应用。

### 3 总结

本文设计了一种柔性蒙皮结构，它由柔性蜂窝和弹性胶膜组成，在面内具有较好的变形能力，在面外具有一定的承载能力，能够满足后缘变弯度机翼的变形和承载要求。基于这种柔性蒙皮结构，探索了一种后缘变弯度机翼结构的设计方案，该结构由芯板、腹板、柔性蒙皮组成，采用分布式冲压管驱动器驱动。通过地面试验台试验，证明了这种柔性蒙皮具有较好的变形能力，能够应用于变弯度机翼后缘结构。

AST

### 参考文献

- [1] 张平, 周丽, 邱涛. 一种新的柔性蜂窝结构及其在变体飞机中的应用[J]. 航空学报, 2011, 32(1): 156-163.
- [2] 邱涛, 何刚. 自适应机翼后缘变弯度机翼结构设计原理初探[C]//中国航空学会2006航空飞行器与空气动力学研讨会. 2006.
- [3] Rodriguez A R. Morphing aircraft technology survey [R]. Nevada:45th AIAA Aerospace Science Meeting and Exhibit, 2007.
- [4] Kudva J N, Sanders B, Pinkerton-Florance

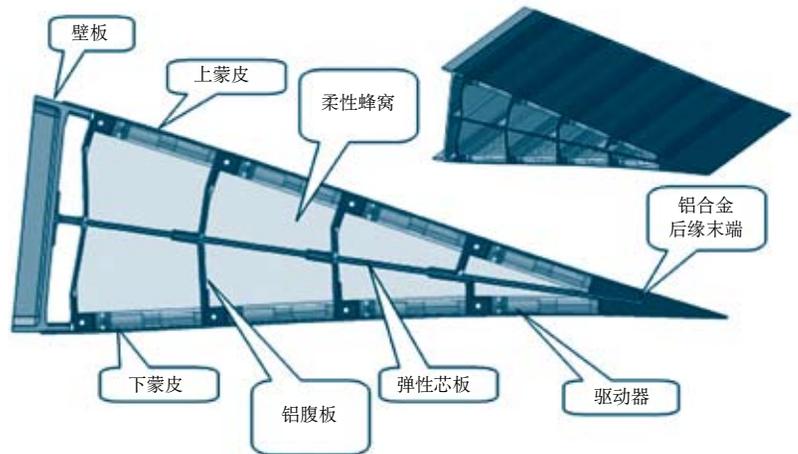


图5 基于柔性蒙皮的后缘变弯度机翼结构

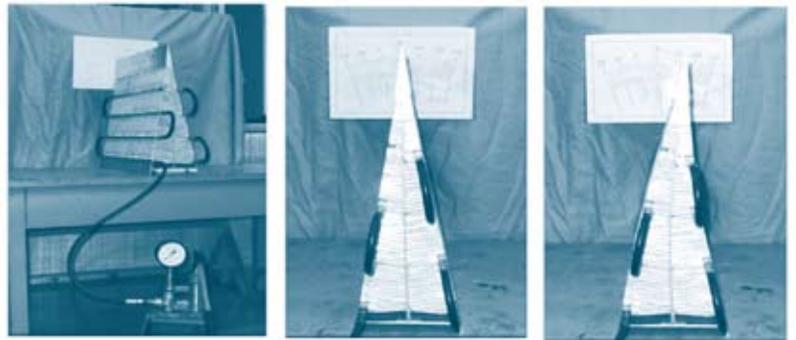


图6 后缘变弯度机翼结构样件变形能力测试

J, Garcia, E. Overview of the DAPA/AFRL/NASA smart wing phase 2 program[C]//Smart structure and materials 2001: Industrial and commercial applications of smart structures technologies. 2001: 383-389.

[5] Ramrakahyini D S, Lesieutre G A, Frecker M, Bharti S. Aircraft structural morphing using tendon actuated compliant cellular trusses [R]. California: 45th AIAA/ASME/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, 2004.

[6] Perking D A, Reed J L, Havens J E. Morphing wing structure for loitering air vehicles[R]. California: 45th AIAA/ASME/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics &

Materials Conference, 2004.

[7] Wlezien R W, Homer G C, Mc Gowan A R, Padula S L, Scott M A, Silcox R J, Simpson J O. The aircraft morphing program[R]. AIAA-98-1927.

[8] Anderson E H, Lindler J E, Regelbrugge M E. Smart material actuator with long stroke and high power output[R]. 43th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, 2002.

### 作者简介

张音旋, 工程师, 主要从事飞机强度、变体飞机结构设计、疲劳分析等研究工作。