

# 真实蜂巢的力学分析和航天载荷结构仿生设计

董永进<sup>1,2</sup>, 朱光武<sup>1</sup>

(1. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100190)

**摘要:** 自然界的真实蜂巢与工业上常用的蜂窝三明治夹层结构存在构型上的差异。对比二者的差异并分别进行三维建模。然后利用有限元分析方法,对二者因结构差异而导致的力学性能的差异进行对比分析,得到两种结构在受到轴向力和径向力时其变形和内部应力分布的区别。通过对仿真结果的分析,揭示真实蜂巢在力学性能方面所具备的独特生物学智慧,且将真实蜂巢独特的力学性能特性应用到某些航天载荷的结构设计上,取得了良好的效果。

**关键词:** 真实蜂巢; 航天载荷; 结构设计; 仿生设计

**中图分类号:** TH122      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1328(2016)03-262-06

**DOI:** 10.3873/j.issn.1000-1328.2016.03.003

## Mechanical Analysis and Bionic Structure Design of Astronautic Payloads Based on Natural Honeycomb

DONG Yong-jin<sup>1,2</sup>, ZHU Guang-wu<sup>1</sup>

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The honeycomb sandwich structure which is widely used and researched in the field of navigation is different from the natural honeycomb in terms of structure. Research focused on the mechanical performance of natural honeycomb is rarely found. In this paper the 3-D models of the two types are established and the finite elements analysis is implemented to find whether the natural honeycomb is better than the common honeycomb sandwich in some aspects. The deformation and stress of the two types under axial and radial applied forces are found out and then the bionics intelligence of the natural honeycomb is brought to light. The mechanical performance unique to the natural honeycomb is applied to the structure design of some astronomic payloads, and good effects are got.

**Key words:** Natural honeycomb; Astronautic payload; Structural design; Bionic design

## 0 引言

在航天航空领域,蜂窝夹层结构因为其轻质和高强度的显著优点而得到广泛应用,在航天器上的应用部位主要有舱盖、太阳电池壳体、整流罩、防热底等。美国双子座载人飞船底部采用了玻璃钢材质的蜂窝夹层烧蚀防热结构,阿波罗载人飞船的3个舱(指挥舱、服务舱、登月舱)全部采用了多层蜂窝夹层结构<sup>[1]</sup>。

生物学家研究发现,蜜蜂巢房为正六边形,一个个紧密排列,每个巢房的截面是正六边形,如图1(a)所示,但其整体不是正六棱柱,因为其底面不是平的,而是由3个相等的菱形组成的锥形,每个菱形的钝角均为 $109^{\circ}28'$ ,锐角均为 $70^{\circ}32'$ ,如图1(b)所示。每个巢房的体积几乎都是 $0.25\text{ cm}^3$ 。巢房的壁很薄,平均不到 $0.1\text{ mm}$ 。两边巢房的底相互嵌合,如图1(c)所示<sup>[2]</sup>。

航天器结构中常用的蜂窝夹层结构多为三明治

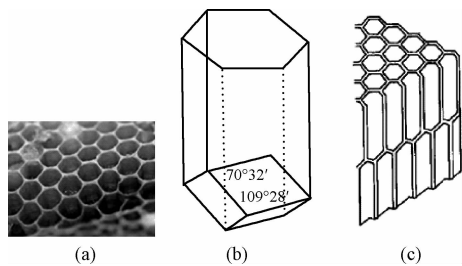


图1 蜜蜂巢房结构

Fig.1 Structure of natural honeycomb

结构,即在上下两层平板之间夹有正六棱柱形状的芯材,如图2所示<sup>[3]</sup>。此种蜂窝夹层结构与真实蜂巢结构的区别在于其底部,真实蜂巢的六棱柱结构底部为锥形,而此种常用夹层结构的六棱柱底部为平板

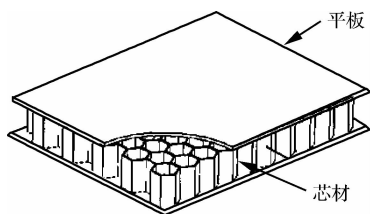


图2 航天器中常用蜂窝夹层板结构

Fig.2 Honeycomb sandwich structure used in aircraft

国内外学者对常用的正六棱柱形状的蜂巢结构(芯层)的特性和应用等开展了广泛和深入的研究。在蜂窝芯层特性研究方面,Gibson等<sup>[4]</sup>对蜂巢芯层的力学参数进行了深入的研究,在20世纪80年代提出了胞元模型理论,并推导出蜂窝结构的二维等效力学参数的数学表达式。国内很多学者在此基础上对Gibson公式进行了完善和改良。王颖坚<sup>[5]</sup>认为Gibson在对承受面内剪切力的胞元模型进行分析的时候,其分析模型并不满足力的平衡。1991年他在力的平衡基础上重新推导了蜂窝夹芯结构面内等效剪切模量公式,并通过试验校验了该公式。1999年富明慧和尹久仁<sup>[6]</sup>提出Gibson在分析过程中忽略了蜂窝芯层胞元壁板伸缩变形的影响,在此基础上对蜂窝芯层等效力学参数公式进行了修正,与Gibson公式相比有了更好的准确性。Tanimoto等<sup>[7]</sup>对三明治夹芯结构的振动特性进行了研究,发现结构的振动特性与面板材料和蜂窝芯层的尺寸有重要的关系。Kimura等<sup>[8]</sup>对铝合金蜂窝三明治结构在弯曲和冲击载荷下的失效模式进行了研究,借助计算机X线断层成像技术分析了两种不同形式的蜂窝夹层板在弯曲和

低速冲击下的失效模式。

在蜂窝结构应用方面,蒋万松等<sup>[9]</sup>、陈金宝等<sup>[10]</sup>和朱汪等<sup>[11]</sup>对以铝蜂窝为主结构的月球探测器软着陆机构的性能进行了研究,通过三维建模以及有限元分析验证了蜂窝结构在缓冲性能方面所具有的优越性。顾元宪等<sup>[12]</sup>将蜂窝结构应用到大型通信卫星主结构-中心承力筒的设计中,对蜂窝夹芯材料采用了一种离散材料变量连续化处理方法,为承力筒结构研制设计提出了指导性结论。黄洁等<sup>[13]</sup>对卫星上常用的带隔热层蜂窝夹层结构的超高速撞击特性进行了研究,发现蜂窝芯能够限制碎片云的径向膨胀以及碎片云轴向流的导流和分流。

虽然国内外学者对六面体蜂窝以及三明治夹层结构进行了广泛的研究,但是对真实蜂巢结构力学性能的研究却几乎空白。此两种结构在力学性能上存在何种区别以及真实蜂巢结构是否能够体现某种力学性能方面的生物学智慧,是本文的主要研究目标之一。

### 1 两种结构的三维建模

借助有限元分析(Finite elements analysis, FEA)手段,可以快速有效地了解两种结构在力学性能方面的区别。为进行有限元分析,首先需要对两种结构进行建模。

#### 1.1 平底蜂窝结构建模

图3是对平底蜂窝结构的建模,为便于充分对比,所建立的三维模型包括单个蜂巢结构模型(单元)、蜂巢单元的二维组合形式和三维组合形式。

单个蜂巢单元模型的壁厚为2 mm,边长为16 mm,高度为20 mm。二维组合单元数量为7,三维组合单元数量为14。其中三维组合高度为40 mm。

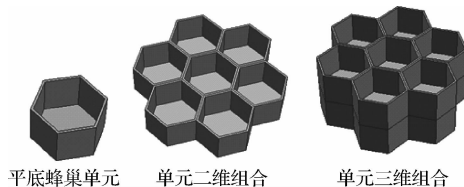


图3 平底蜂巢结构建模

Fig.3 Model of flat-bottom honeycomb

#### 1.2 真实蜂巢结构建模

与平底蜂窝结构建模一样,对真实蜂巢结构的建模也包括单元模型建立、单元的二维组合以及三

维组合。下文也称此种真实蜂巢结构模型为锥底蜂窝结构模型。

单个蜂巢单元模型的壁厚为 2 mm, 边长为 16 mm, 最大高度为 25.6 mm。二维组合单元数量为 7, 三维组合单元数量为 13。其中三维组合高度为 40 mm, 与平底单元组合高度一致。

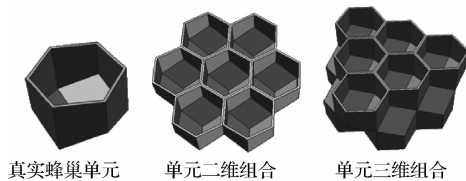


图 4 真实蜂巢结构建模

Fig. 4 Model of natural honeycomb

## 2 两种结构的力学仿真分析

### 2.1 力学分析目标和边界条件

本文主要研究真实蜂巢结构在抗外力方面是否具有某种独特的优越性, 结合自然界真实蜂巢的实际情况, 这里主要分析蜂巢结构在受到轴向力和径向力时的力学性能。轴向力的受力方向平行于蜂巢单元的轴向中心线(垂直于正六边形所在平面), 径向力的方向垂直于蜂巢单元的轴向中心线。

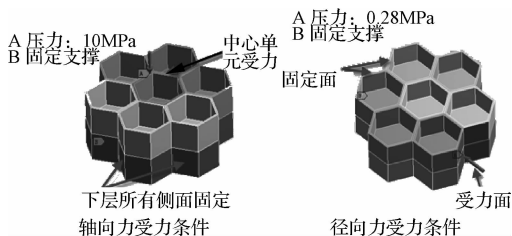


图 5 轴向力和径向力受力条件

Fig. 5 Conditions of axial and radial forces

由于单元模型的三维组合形式更加接近于真实蜂巢结构, 因此这里主要针对三维组合进行力学仿真分析。轴向力和径向力的受力方向如图 5 所示。

有关有限元分析中涉及的材料属性和其他边界条件如表 1 所示。

### 2.2 力学分析结果

在受到轴向力时, 锥底蜂窝结构在内部平均应力和变形方面的仿真分析结果如图 6 所示, 平底蜂窝结构的相应仿真分析结果如图 7

所示。

表 1 有限元分析边界条件

Table 1 Boundary conditions of FEA

边界条件	明细
外力形式	压强
外力方向和受力部位	图 5 所示
外力大小	径向力: 锥底 0.3 MPa, 平底 0.28 MPa; 轴向力: 10 Mpa (说明: 径向力压强不一致是因为两种单元侧面积不一样, 压强不同以便于获得同样的压力。)
固定部位	施力面相对表面
材料名称	铝合金 6061
材料密度	$2.7 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
材料杨氏模量	71.7 GPa
材料剪切模量	26.7 GPa
材料泊松比	0.33
模型重量	平底 88 g, 锥底 82 g

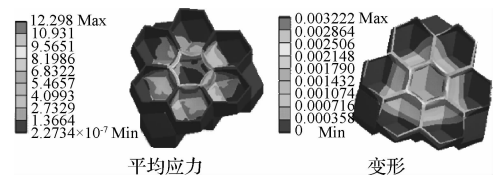


图 6 锥底蜂窝受轴向力时的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of natural honeycomb under axial force

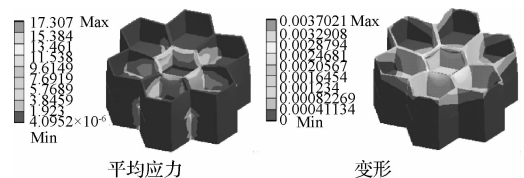


图 7 平底蜂窝受轴向力时的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of flat-bottom honeycomb under axial force

在受到径向力时, 锥底蜂窝结构在内部平均应力和变形方面的仿真分析结果如图 8 所示, 平底蜂窝结构的相应仿真分析结果如图 9 所示。

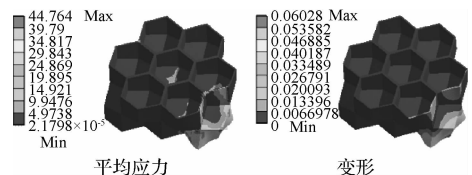


图 8 锥底蜂窝受径向力时的仿真结果

Fig. 8 Simulation results of natural honeycomb under radial force

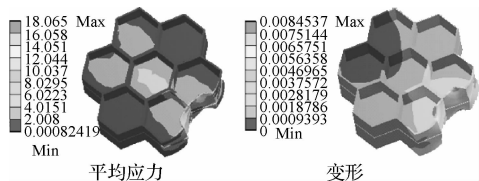


图9 平底蜂窝受径向力时的仿真结果

Fig.9 Simulation results of flat-bottom honeycomb under radial force

以上分析结果表明,锥底蜂窝单元组合除了在承受轴向力时具有较小的应力和变形水平外,另外一个突出特性就是对径向外力(侧向力)的缓冲作用。锥底蜂窝的底部为三个三角形拼接而成的锥形,对径向力(侧向力)能起到类似弹簧缓冲的作用,弱化了力在结构中的传递效果,从而使得大部分的变形和应力都集中在外力作用点附近的几个单元处,其他多数单元则能保持相对较小的应力和变形水平。

具有这一特点的自然界蜂巢,如图10所示,在有利于蜜蜂生存和繁衍的某些方面体现了独特的生物智慧。

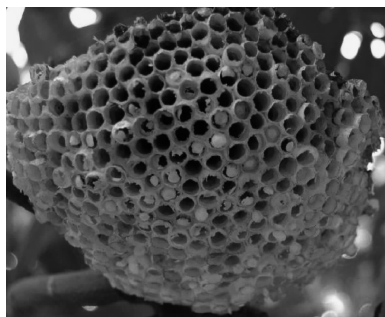


图10 真实蜂巢

Fig.10 Natural honeycomb

首先,蜂巢受到的外界攻击大部分属于轴向力范畴,根据仿真分析结果可知,真实蜂巢结构在受到轴向力的时候,其内部平均应力和变形相对于平底单元蜂窝组合来说维持在相对较小的水平,从而最大程度上保证蜂巢内部蜂卵的安全。

其次,在受到径向力攻击的时候,尽管承受外力的蜂巢单元可能会承受较大的应力和变形容易导致损坏,但是蜂巢的其余大部分单元具有很小的应力水平和变形量,这样就保证了大部分单元内部蜂卵的安全,有利于整个蜂群种族的保全。

### 3 真实蜂巢对航天产品结构设计的启示

真实蜂巢这种突出的力学方面的特点对于某些

航天产品结构设计有着重要的启发价值。例如某些航天仪器内部安装有精密传感器如硅半导体传感器等,此种传感器的抗压、抗拉、抗变形等力学性能较差。由于传感器一般通过螺钉等紧固件固定在其安装结构上,因此在进行安装结构设计的时候,必须保证此安装结构在承受外力时的变形量应尽量小。如果其变形过大并且传递到与其固连的传感器上,则很可能导致传感器的损坏。

图11是某航天载荷中硅半导体传感器的安装座原始结构设计方案,为带有加强筋的圆盘结构,四周有安装凸耳与载荷本体固定,传感器通过中心处四个安装孔与安装座固连。

当此种安装结构的边缘处(包括安装凸耳)受到外力导致结构整体发生变形的时候,传感器安装位置处的变形量水平决定了传感器的安全系数,下面通过有限元分析来进行校验,图12是有限元分析的结果。

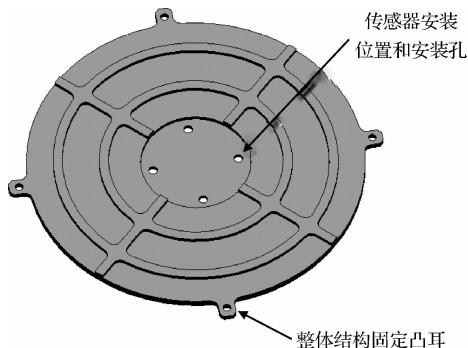


图11 某传感器安装座的原始设计方案

Fig.11 Prototype of a sensor base

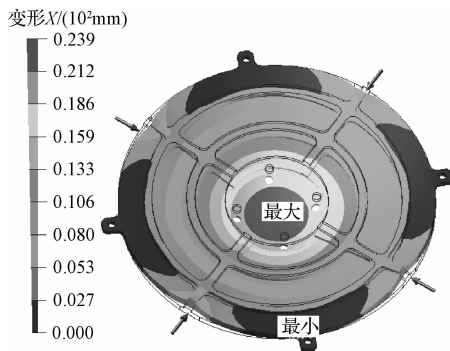


图12 安装座原始方案的有限元分析结果

Fig.12 Simulation results of the prototype

从分析结果可以看出,安装结构边缘处受力导致的变形将传递到结构中心处,即传感器安装位置处将存在最大的变形,从而十分容易导致传感器的

损坏,可见这种设计存在致命的缺陷。

考虑到真实蜂巢结构的力学优点,将此安装结构进行了改进,改进后的方案如图13所示,然后对此改进结构进行了有限元分析,结果如图14所示。

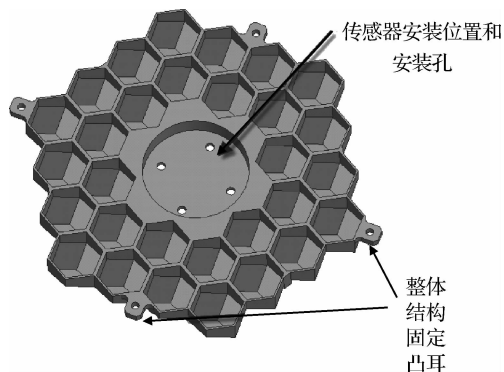


图13 改进后的安装结构

Fig. 13 Improved design of the sensor base

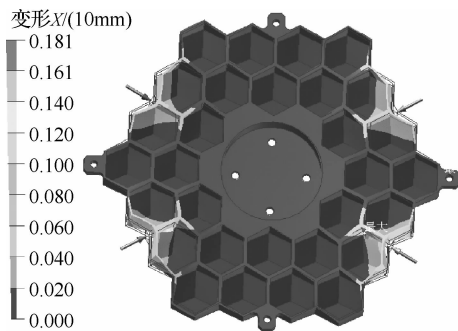


图14 改进结构的有限元分析结果

Fig. 14 Simulation results of the improved design

从图13~14可以看出,改进后的结构在传感器安装部位几乎不存在变形,这就大大降低了传感器损坏的风险,因此这种改进结构最大程度上利用了真实蜂巢结构在力学方面的特点,具有明显的优越性。

## 4 结论

自然界真实蜂巢底部为锥形的特点决定了其结构形式在力学方面的显著特性,即能够很大程度上缓冲外力尤其侧向力对蜂巢整体的不良影响,大部分的应力和变形都集中在了受力点附近的单元处,其他大部分单元则能够保持相对很小的应力和变形水平。

某些航天载荷在进行结构设计时,往往在轻量化、抗变形方面有特别的要求,如一些精密传感器的安装座,大型光学成像设备的镜头基座等,均要求其结构轻巧,某些特定部位要求在整体受外力发生变

形时能保持相对较小的变形量,以免损坏与其相连的传感器或镜头等精密元件。基于真实蜂巢的仿生学结构设计在一定程度上可以满足此方面的要求,结构轻量化且具有良好的抵御变形的能力,具有显著的工程意义和实用价值。

## 参 考 文 献

- [1] 赵金森. 铝蜂窝夹层板的力学性能等效模型研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006. [Zhao Jin-sen. Study on the equivalent models of aluminum honeycomb sandwich plates [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006.]
- [2] 彩万志. 蜜蜂巢房的结构与仿生[J]. 昆虫知识, 2001, 38(2): 151 - 153. [Cai Wan-zhi. Bionics on the structure of honeycomb [J]. Entomological Knowledge, 2001, 38(2): 151 - 153.]
- [3] 王玉瑛, 吴荣煌. 蜂窝材料及孔格结构技术的发展[J]. 航空材料学报, 2000, 20(3): 172 - 177. [Wang Yu-ying, Wu Rong-huang. Development of honeycomb cell structure and materials [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2000, 20(3): 172 - 177.]
- [4] Gibson L J, Ashby M F. Cellular solids: structure and properties [M]. Cambridge, UK: Cambridge university press, 1999.
- [5] 王颖坚. 蜂窝结构在面内剪力作用下的变形模式[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1991, 3(27): 301 - 307. [Wang Ying-jian. Deformation models of honeycomb cell under in-plane shear [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1991, 3(27): 301 - 307.]
- [6] 富明慧, 尹久仁. 蜂窝芯层的等效弹性参数[J]. 力学学报, 1999, 31(1): 113 - 118. [Fu Ming-hui, Yin Jiu-ren. Equivalent elastic parameters of the honeycomb core [J]. Acta Mechanica Sinica, 1999, 31(1): 113 - 118.]
- [7] Tanimoto Y, Nishiwaki T, Shiomi T, et al. A numerical modeling for Eigen vibration analysis of honeycomb sandwich panels [J]. Composite Interfaces, 2012, 8(6): 393 - 402.
- [8] Kimura T, Itoh T, Fusazaki T, et al. A honeycomb-like structure in the right coronary artery visualized by three-dimensional optical coherence tomography [J]. Coronary Artery Disease, 2015, 26(4): 356 - 360.
- [9] 蒋万松, 黄伟, 沈祖炜, 等. 月球探测器软着陆动力学仿真 [J]. 宇航学报, 2011, 32(3): 462 - 469. [Jiang Wan-song, Huang Wei, Shen Zu-wei, et al. Soft landing dynamics simulation for lunar explorer [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(3): 462 - 469.]
- [10] 陈金宝, 聂宏, 赵金才, 等. 月球探测器软着陆缓冲机构着陆性能分析 [J]. 宇航学报, 2008, 29(6): 1729 - 1732. [Chen Jin-bao, Nie Hong, Zhao Jin-cai, et al. Research of the factors of buffering performance in lunar lander [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(6): 1729 - 1732.]
- [11] 朱汪, 杨建中. 月球探测器软着陆机构着陆腿模型与仿真分

- 析[J]. 宇航学报, 2008, 29(6): 1723 - 1728. [Zhu Wang, Yang Jian-zhong. Touchdown stability simulation of landing gear system for lunar lander [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(6): 1723 - 1728. ]
- [12] 顾元宪, 亢战, 赵国忠, 等. 卫星承力筒复合材料结构的优化设计[J]. 宇航学报, 2003, 24(1): 88 - 91. [Gu Yuan-xian, Kang Zhan, Zhao Guo-zhong, et al. Optimal design of composite structure of satellite bearing cylinder. Journal of Astronautics, 2003, 24(1): 88 - 91. ]
- [13] 黄洁, 马兆侠, 兰胜威, 等. 带隔热层蜂窝夹层结构的超高速撞击特性研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(8): 2043 - 2049. [Huang Jie, Ma Zhao-xia, Lan Sheng-wei, et al. Study on hypervelocity impact characteristics for honeycomb sandwich with multi-layer insulation [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(8): 2043 - 2049. ]

作者简介:

董永进(1979 - ),男,博士生,主要从事空间环境探测类仪器的结构设计、仿真等相关工作。

通信地址: 北京海淀中关村南二条一号(100190)

电话: (010)62582633

E-mail: dyj@nssc.ac.cn

(编辑:牛苗苗)