

# 大口径高精度复合材料反射器制造技术

江文剑 施锦文 禹旭敏

(空间电子信息技术研究院空间天线技术研究所,西安,710000)

**摘要:** 为满足星载碳纤维蜂窝夹层结构天线反射器的大口径、高精度要求,提出了一种基于设计、工艺和测量的高精度反射器制造方法。该方法通过高热稳定性、高精度模具来提高反射面形面精度,通过蜂窝拼接来降低反射面固化时残余应力,通过高低温时效来降低固化后反射器部件残余应力,通过优化测量方法来提高反射器测量精度。实测结果表明,该技术能有效提高反射器制造精度和改善反射器热变形。

**关键词:** 反射器;复合材料;高精度;制造技术

**中图分类号:** V462; TN823

**文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2019)S-0022-05

## Manufacture of Large Aperture and High Precision Composite Reflector

JIANG Wenjian, SHI Jinwen, YU Xumin

(Institute of Space Antenna Technology, Academy of Space Electronic Information Technology, Xi'an, 710000, China)

**Abstract:** To meet the requirements of the large aperture and high precision of space-borne carbon fiber honeycomb sandwich reflectors, a manufacturing method based on design, process and measurement is presented. In this method, the shape accuracy of the reflector is improved by means of a high thermal stability and high precision mould, the residual stress during curing is reduced by a honeycomb splicing method, the residual stress of the reflector parts after curing is reduced by a high and low temperature aging method, and the measurement accuracy of the reflector is improved by optimizing the measuring method. The result shows that the manufacturing accuracy and the thermal deformation of the reflector can be improved effectively by the manufacture technology.

**Key words:** reflector; composite; high precision; manufacture technology

随着卫星使用频段提高,人们对天线形面精度提出了越来越高的要求<sup>[1]</sup>。高精度天线在遥感、气象、通信和深空探测等卫星领域中也开始得到广泛研究和应用<sup>[2-5]</sup>。文献[6]针对夹层结构的蒙皮、胶膜和蜂窝固化时的材料匹配性提出了一种内应力控制方法;文献[7-8]则通过模具形面补偿提出了一种反射器精度改善的方法;文献[9]则采用热膨胀系数更低的殷钢模具来改善反射器形面精度;文献[10]还提出了一种形面调整的方法来提高反射面形面精度;在热变形方面,文献[11-12]通过优化反

射面结构(如二维三轴碳纤维编制物结构)和支撑结构热稳定性来改善反射器热变形;文献[13]则从反射器材料离散性分析提出了热变形控制方法和要求。

笔者注意到,文献[6-10]未考虑蜂窝芯拼接残余应力和模具材料与热稳定性,同时文献[6-13]未研究残余应力释放和形面测量的影响。本文将从成型模具选择、蜂窝芯拼接、残余应力释放、形面测量等进行研究,保证高精度反射器在工程中的实现。

**基金项目:** 国防科技工业局稳定支持基金(2018SSFNKLSMT-15)资助项目。

**收稿日期:** 2019-04-09; **修订日期:** 2019-06-20

**通信作者:** 江文剑,男,高级工程师, E-mail: hellojian88@126.com。

**引用格式:** 江文剑,施锦文,禹旭敏. 大口径高精度复合材料反射器制造技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(增刊): 22-26. JIANG Wenjian, SHI Jinwen, YU Xumin, et al. Manufacture of Large Aperture and High Precision Composite Reflector[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(S): 22-26.

1 产品结构及要求

高精度、大口径反射器结构如图1所示,由反射面、环形背架、展开臂三大部分组成。其中,反射面通过L形碳纤维角片与背架进行粘接,展开臂通过金属接头与背架内金属埋件进行螺接,展开臂与背架连接可靠、热匹配良好且在高低温下无滑移。

反射面和环形背架为碳纤维铝蜂窝夹层结构,铝蜂窝高15 mm,规格为BC1.8-3/8P-0.038(5024);展开臂为碳纤维叠层结构,两端设计有金属接头;碳纤维为高模量的M40J/环氧系列预浸料。

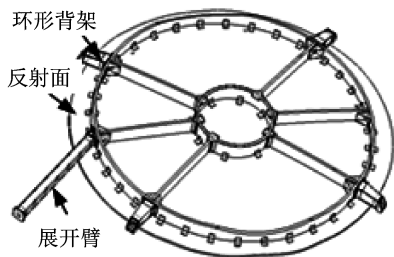


图1 反射器结构组成  
Fig.1 Reflector structure composition

赋形抛物反射面口径2.1 m,焦距3.6 m,形面均方根(Root mean square,RMS)偏差要求如下:

- 制造精度 $\leq 0.1\text{ mmRMS}$ ;
- 热变形 $\leq 0.13\text{ mmRMS}$ 。
- 按照该要求将制造精度误差分配如下:
- 模具加工误差 $\sigma_a \leq 0.025\text{ mmRMS}$ ;
- 模具热稳定性 $\sigma_b \leq 0.006\text{ mmRMS}$ ;
- 测量误差 $\sigma_c \leq 0.010\text{ mmRMS}$ ;
- 工件变形误差 $\sigma_d \leq 0.010\text{ mmRMS}$ 。

2 制造精度控制

2.1 成型工艺流程

反射面铺层为 $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ/C7.5]$ ,采用共固化成型工艺,即先预成型蜂窝芯,然后成型后蒙皮,再成型前蒙皮,最后通过 Redux312UL 胶膜将前后蒙皮与蜂窝芯进行共固化热压胶接成型,如图2所示。采用激光投影仪将纤维铺层角偏差控制在 $\pm 0.5^\circ$ 内。反射器装配时应严格控制装配引入的残余应力,螺接或铆接间隙应小于0.1 mm。

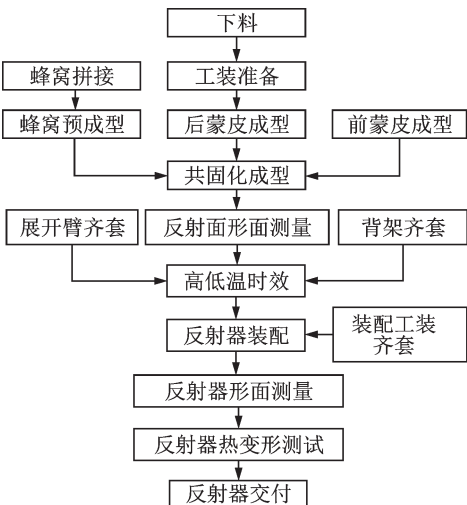


图2 反射器工艺流程  
Fig.2 Reflector processing flow

2.2 成型模具

铸铁通常作为反射器成型模具材料,具有热导率高、机加性能好、成本低等优点,但其热膨胀系数高,与反射面热膨胀系数(为 $1.5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )不匹配。殷钢模具热膨胀系数低、热导率适中,与反射面热膨胀系数匹配,可作高精度反射器模具材料,如表1所示。

表1 模具材料选择

Tab. 1 Mould material selection

材料	热胀系数/ $(10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	热导率/ $(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	热导率/热胀系数	成本
铸铁	10.8	39.2	3.6	低
殷钢	1.7	13.7	8.1	较高
T300/环氧	3	9 <sup>[14]</sup>	3	高

殷钢模具通过分块焊接而成,壁厚10~15 mm,以满足模具刚度和温度均匀性要求。通过摄影测量测得模具加工误差为0.024 mmRMS、测点为4 950个,则模具总误差为

$$\sigma_{\text{总}} = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_c^2 + \sigma_d^2} = \sqrt{0.024^2 + 0.010^2 + 0.010^2} = 0.028\text{ mmRMS}$$

按照反射面固化温度对模具进行3次升温、回温后的测量结果如图3所示。可见,殷钢模具的加工误差和热稳定性均满足要求。

2.3 反射面蜂窝芯拼接

蜂窝芯拼接设计目的是为减小蜂窝芯由平面展为曲面时的残余应力,以降低共固化成型时对反射面形面精度的影响。设蜂窝由平面展为曲面时

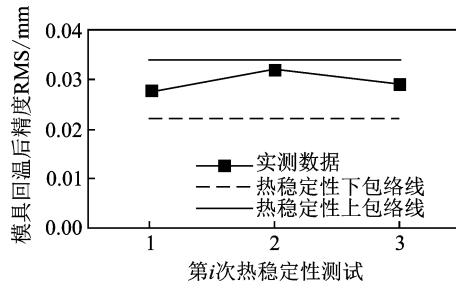


图3 模具热稳定性测试

Fig.3 Mould thermal stability test

空间曲面为 $S$ ,如图4所示,则对蜂窝进行残余应力分析时,需优化寻找空间切平面 $A$ ,使得曲面 $S$ 到切平面 $A$ 的最大距离 $d_{\max}$ 有最小值,如式(2)所示。则蜂窝由平面展为曲面,即为切平面 $A$ 展开曲面 $S$ 。

$$d_{\max} = \max(d_1, d_2, \dots, d_i) \quad (1)$$

$$d_{\max} = \min((d_{\max})_j) \quad (2)$$

式中: $i$ 为曲面 $S$ 上任意一点, $j$ 为任意切平面 $A$ 。

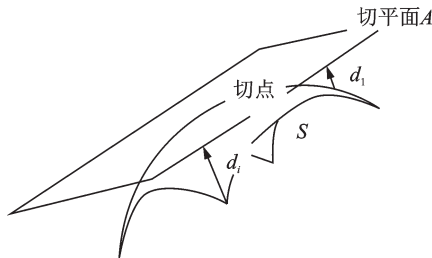


图4 蜂窝由平面展为曲面简化模型

Fig.4 Simplified model of honeycomb expansion from plane to surface

### (1) 蜂窝芯无拼接成型

当蜂窝芯整张无拼接成型时,随着蜂窝直径的增大,最大残余应力减小;当蜂窝直径 $\geq 1$  m时,最大残余应力趋于一致,为0.64 MPa,如图5所示,此应力大于蜂窝芯横向剪切强度0.27 MPa,不满足要求。

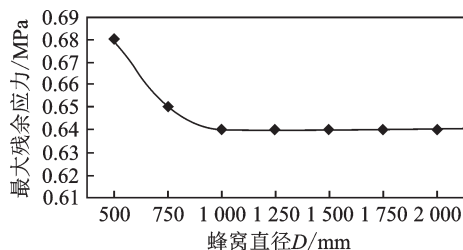


图5 蜂窝无拼接成型时最大残余应力

Fig.5 Max residual stress of no honeycomb splicing

### (2) 蜂窝芯分块拼接成型

随着拼接数量的增加,如图6所示,最大残余

应力减小且趋于稳定;蜂窝芯拉伸方向沿反射面径向拉伸时的最大残余应力小于沿反射面周向拉伸时的残余应力,为0.42 MPa,如图7所示,但仍大于蜂窝芯横向剪切强度0.27 MPa,不满足要求。同时,由于蜂窝芯幅宽为1 m,故按照幅宽尺寸将蜂窝芯按6块进行拼接。

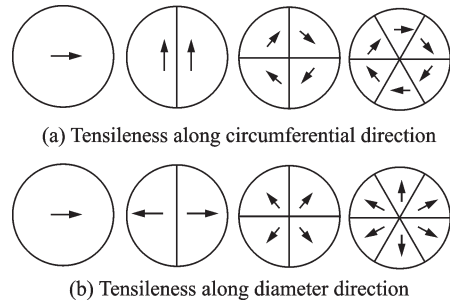


图6 蜂窝芯分块拼接

Fig.6 Piecing honeycomb together by blocks

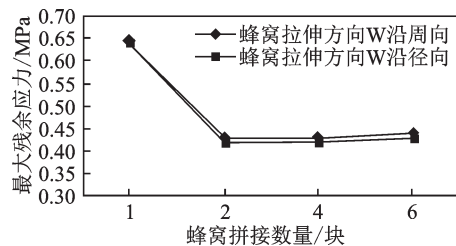


图7 蜂窝按块拼接成型时最大残余应力

Fig.7 Max residual stress of honeycomb splicing by block

### (3) 蜂窝芯组合拼接成型

蜂窝按照直径为 $D$ 的中心块和周边6块组合方式(图8)进行拼接的最大残余应力如图9所示。当中心块直径为1 m并按两块拼接时最大拼接应力为0.2 MPa,小于蜂窝横向剪切强度0.27 MPa,满足要求。

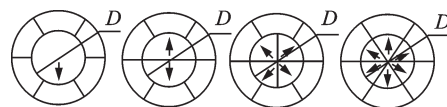


图8 蜂窝芯组合拼接

Fig.8 Piecing honeycomb together by a compound method

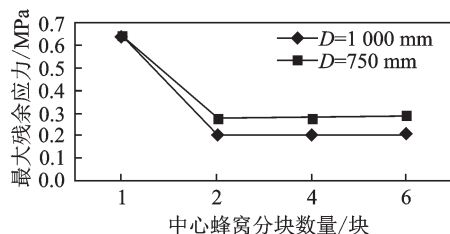


图9 蜂窝芯组合拼接时最大应力

Fig.9 Max residual stress of honeycomb splicing by compound method

2.4 零部件级高低温时效处理

为降低反射面、背架和展开臂固化、粘接或装配过程中产生的残余应力,需在反射器装配前分别对反射面、背架和展开臂进行高低温时效处理,其中反射面时效前、后形面精度分别为0.099 mmRMS、0.106 mmRMS。

- 高低温时效处理条件如下:
- 压力:常压;
- 高温: +100 ℃,低温: 不低于-60 ℃;
- 保持时间:4 h;
- 循环次数:3.5次;
- 升降温速率:1 ℃/min。

2.5 形面测量

形面测量时工件变形为自重引起的变形,应满足

$$\sigma_d \leq 0.010 \text{ mmRMS} \tag{3}$$

2.5.1 反射面测量

反射面按口面垂直于地面进行测量,如图10所示,通过约束工艺支撑耳处支撑点1、2的X、Y、Z向位移和支撑点3的Z向位移,所得反射面自重对形面精度影响为0.010 mmRMS,满足要求。此时工艺支撑夹角 $\alpha=105^\circ$ ,如图11所示。

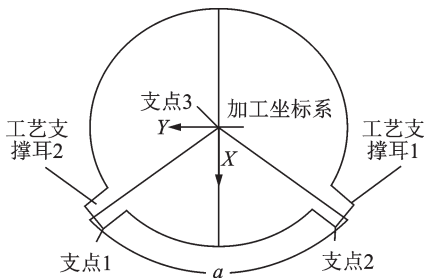


图10 反射面形面测量状态  
Fig.10 Measuring condition of reflector

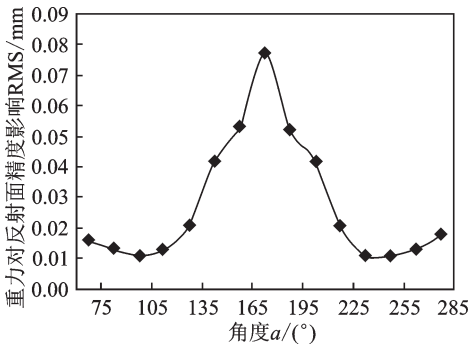


图11 工艺支撑耳夹角对形面测量精度影响  
Fig.11 Relation between measurement accuracy of reflector and the angle of process support

2.5.2 反射器测量

反射器按口面垂直于地面进行测量,通过吊挂点1、点2或点3(图12)的分析结果如图13所示,均小于0.010 mmRMS。

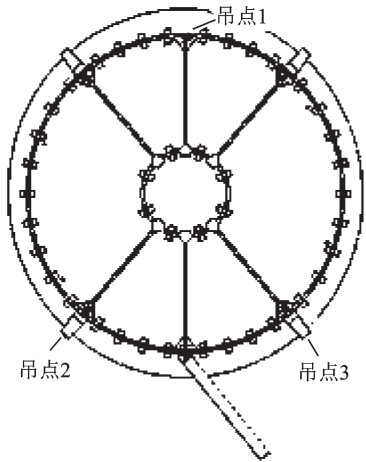


图12 反射器形面测量状态  
Fig.12 Measuring condition of reflector assemblies

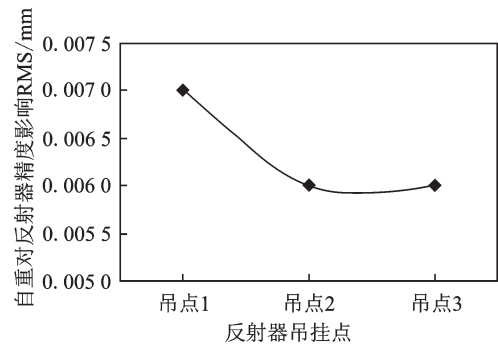


图13 反射器吊点对形面测量精度影响  
Fig.13 Relation between measurement accuracy of reflector and suspending points

3 产品测试

产品过程履历测试结果如表2所示,变形云图如图14所示,长度为1 172.81 mm的展开臂最大位移变形为0.69 mm,由此引起的指向偏差为

$$\varphi \approx \arctan \frac{0.69}{1\,172.81} = 0.03^\circ \tag{4}$$

表2 各阶段测试结果	
Tab. 2 Test results in each stage	
阶段	形面精度 RMS/mm
反射面成型后	0.099
反射面高低温时效后	0.106
反射器装配后	0.075
反射器湿热变形	0.037
+110 ℃下反射器热变形	0.131
-110 ℃下反射器热变形	0.056
热变形测试前后反射器变化	0.017

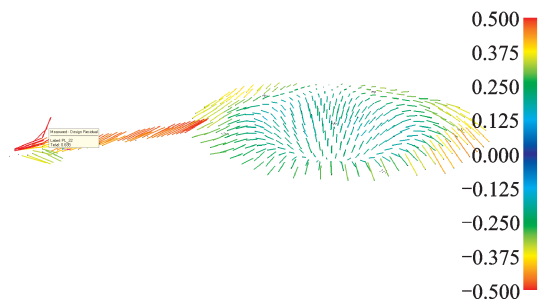


图14 反射器热变形测试云图

Fig.14 Cloud chart of reflector thermal deformation test

## 4 结 论

针对高精度天线反射器的制造精度和热变形要求,本文结合工程经验通过仿真分析提出了一种高精度反射器制造方法。按照这种方法加工得到的反射器可满足制造精度和热变形要求。文中给出的测试结果说明了该方法的有效性。

### 参考文献:

- [1] 江文剑,宋燕平,黄志荣.半刚性可调整曲面调整特性与调整装置刚度关系研究[J].空间电子技术,2013,10(2): 63-67.  
JIANG Wenjian, SONG Yanping, HUANG Zhirong. Research on relations between semi-rigid adjustable surface adjusting effect and actuators stiffness[J]. Space Electronic Technology, 2013, 10(2): 63-67.
- [2] 万继响,弓金刚,叶文熙,等.我国星载通信天线的发展与趋势[C]//2017全国天线年会.西安:西安电子科技大学出版社,2017: 1410-1414.  
WAN Jixiang, GONG Jingang, YE Wenxi, et al. Development and trend of satellite communication antenna in China[C]//2017 National Conference on Antenna. Xi'an, China: XIDIAN University Press, 2017: 1410-1414.
- [3] FANG Houfei, HUANG Pumeng, ZHOU Yang, et al. Analytical investigation of a high precision reflector [C]//Spacecraft Structures Conference. [S. l.]: AIAA, 2014: 1-12.
- [4] 方芳,桂涛.高精度碳纤维反射器制造技术[J].电子机械工程,2012,28(5): 53-56.  
FANG Fang, GUI Tao. Manufacturing technology of high-precision CFRP reflector[J]. Electro-Mechanical Engineering, 2012, 28(5): 53-56.
- [5] 周卫来,凌闽河,朱培芸.深空探测天线技术发展现状及趋势[J].空间电子技术,2011,8(2): 17-21.  
ZHOU Weilai, LING Minhe, ZHU Peiyun. Progress and prospect of antenna technology in deep space exploration [J]. Space Electronic Technology, 2011, 8(2): 17-21.
- [6] LEI Yan, YI Chen. Finite element simulation in fabrication of high precision reflector panels [C]//Modern Technologies in Space and Ground-based Telescopes and Instrumentation II. [S. l.]: SPIE, 2012.
- [7] 江文剑,史明,杨亚宁.一种高精度度偏置反射面天线模具设计[J].太赫兹科学与电子信息学报,2018,16(4): 187-191.  
JIANG Wenjian, Shi Ming, YANG Yaning. A high-precision mould design method of offset-reflector antennas [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(4): 187-191.
- [8] 李成贝.高精度旋转抛物面反射面模具的设计[J].玻璃钢/复合材料,2005(2): 26-28.  
LI Chengbei. Mould design for rotation parabolic reflector of high precision[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2005(2): 26-28.
- [9] 王学春.碳纤维复合材料高精度天线反射器的制造技术研究[J].科技资讯,2017,15(15): 97-100.  
WANG Xuechun. Study of the high-precision CFRP reflector antenna manufacture technology [J]. Science & Technology Information, 2017, 15(15): 97-100.
- [10] GILES D, KULICK S. Semi rigid and adjustable CFRP membrane for radio telescope applications [C]//Deep Millimeter Surveys Implications for Galaxy Formation and Evolution. [S. l.]: SPIE, 2000: 523-530.
- [11] OHMINE H, KOBAYASHI Y. High performance reflectors for telecom space antennas in MELCO [C]//EuCAP 2011. [S. l.]: IEEE, 2011.
- [12] NICOLAS E, VALERIE D. Industrial antenna reflector at EADS space [C]// EuCAP 2006. [S. l.]: IEEE, 2006.
- [13] MICHAEL L, HORST B, THOMAS E. Surface accuracy prediction and optimization of a high precision Q/V-Band reflector [C]//47th Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. [S. l.]: AIAA, 2006: 1-14.
- [14] 李仕通,彭超义,邢素丽,等.导热型碳纤维增强聚合物基复合材料的研究进展[J].材料导报,2012, 26(7): 79-84.  
LI Shitong, PENG Chaoyi, XING Suli, et al. Research progress on thermal conductivity of carbon fiber polymer matrix composites [J]. Materials Review, 2012, 26(7): 79-84.

(编辑:胥橙庭)