

高精度碳纤维复合材料副反射面天线制备工艺

张娟娟 李宗周 沈辉 刘图远 朱荣峰

(1 上海复合材料科技有限公司,上海 201112)

(2 上海航天树脂基复合材料工程技术研究中心,上海 201112)

文 摘 分析了模具选材、装配工艺过程及机加工工艺对高精度 CFC 副反射面天线制备的影响,研究了高精度 CFC 副反射面制备工艺的关键技术,进行了模具材料比较、装配工艺优化及机加工验证试验。结果表明,殷钢是制备高精度 CFC 副反射面天线的较理想模具材料;在夹层结构装配时采用外蒙皮原位装配技术并单独适配过渡区的蜂窝可有效避免天线型面精度超差;机加工辅助工装与三维摄影测量系统相结合的措施可有效确保装配基准点的高形位精度并大幅缩短天线加工周期。

关键词 高精度,副反射面天线,碳纤维复合材料,模具材料,原位装配,三维摄影测量

中图分类号:TB33

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2018.03.010

Preparation of High Precision Carbon Fiber Composite (CFC) Secondary Reflector Antenna

ZHANG Juanjuan LI Zongzhou SHEN Hui LIU Tuyuan ZHU Rongfeng

(1 Shanghai Composite Material Science & Technology Co., Ltd, Shanghai 201112)

(2 Shanghai Engineering Technology & Research Center of Aerospace Resin Based Composites, Shanghai 201112)

Abstract The effects of selection of mold materials, processing of assembly and machining on the manufacturing of high precision CFC-made secondary reflector antenna were analyzed through researching the key assembly techniques, compared mold material, optimized assembly process and machining verification experiment. The results show that invar is an ideal mold material for the manufacturing of high precision CFC-made secondary reflector antenna. When the sandwich structure is assembled, adopting the in situ assembly technique for the external covering and individual adoption of the cellular around transitional region of the antenna covering can effectively avoid the poor surface accuracy of the antenna. A comprehensive application of an auxiliary mould for the machining and the 3D image measurement system can effectively ensure the high positional accuracy of the assembly reference point and significantly shorten the manufacturing period of the antenna.

Key words High precision, Secondary reflector antenna, Carbon fibre composites, In situ assembling, 3D image measurement system

0 引言

与金属材料相比,碳纤维复合材料(CFC)具有密度低、线胀系数极小、比强度及比模量高、物理及力学性能可设计性佳等特性,被证实是航天领域理想的的天线结构材料^[1]。随着航天制造及新材料技术的不断进步,星载天线结构均由 CFC 制备。CFC 及其应用技术的研究,已引起高精度曲面天线结构设计及成型工艺的巨大变革^[2]。在星载天线中双反射体曲面天线是常见的天线结构,见图 1。副反射面天线接收到主反射面的反射信号后会将其不等倍数放大后再传输,若其反射区域型面精度存在超差,则反射误差也会被放大,如何保证副反射面天线高型面精度要求一

直是双反射体曲面天线制备研究热点。

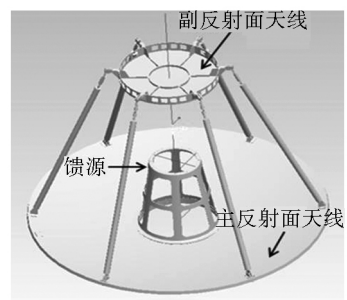


图 1 双反射体天线结构

Fig.1 Structure of double reflector antenna
此外,为了后续双反射体曲面天线装配时顺利完成

收稿日期:2017-08-14

第一作者简介:张娟娟,1987年生,硕士研究生,工程师,主要从事复合材料构件的成型及胶接装配工艺研究。E-mail:13651790789@139.com

主-副面对焦,副反射面天线制备时需预留装配基准点,如何保证该装配基准点的高形位精度要求是其制备工艺的技术难点。本文将着重从模具材料的比选、装配关键技术点的控制以及高形位精度装配基准点的加工等方面,讨论如何制备高精度 CFC 副反射面天线。

1 副反射面天线结构精度要求

复合材料天线反射面的结构形式主要有两种:夹层结构和薄板(壳)结构。夹层结构是由内/外蒙皮与轻质蜂窝或泡沫材料复合形成的截面较厚的非均质夹芯结构,具有质轻、刚性好、抗应力变形能力佳的特性,是保证天线型面精度的理想结构形式,被天线设计者广泛采用^[3-5]。与泡沫塑料芯材相比,蜂窝芯材剪切强度与剪切模量更高,可使夹层结构刚性更强,且制造加工方便,故本文选取蜂窝芯材作为夹层结构芯材。欲制备的副反射面天线由曲面和柱面两部分构成,两个面交接处通过 R_3 圆角过渡,见图 2。曲面为工作面,由双曲线 $\frac{x^2}{93.4^2} - \frac{y^2}{117.36^2} = 1 (0 \leq y \leq 190 \text{ mm})$ 沿其中心轴线旋转得到。柱面上有三个金属预埋件为后续装配以及对焦提供基准点和基准面。

欲制备的副反射面天线主要精度要求为:(1)整体型面精度 $< 0.1 \text{ mm}$,任意 100 mm^2 反射区域型面精度 $< 0.1 \text{ mm}$;(2)三处基准点上侧面组合平面度优于 0.04 mm ,与反射面中心轴线的垂直度优于 0.08 mm ,外端面与反射面中心轴线的同轴度优于 0.05 mm 。

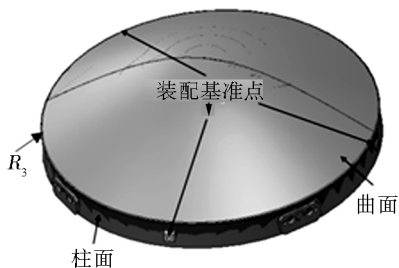


图 2 副反射面天线的结构

Fig.2 Structure of secondary reflector antenna

2 高精度副反射面天线制备工艺流程

高精度副反射面天线制备工艺流程见图 3。

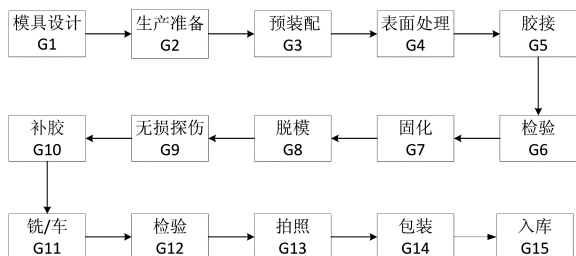


图 3 副反射面天线成型工艺流程图

Fig.3 Production process flow chat of secondary reflector antenna

副反射面天线先夹层结构胶接,基准点通过模具粗定位预埋成型,后续通过机床保证基准点的行位精度。

3 高精度副反射面天线制备关键技术

鉴于副反射面天线精度要求结合成型工艺以及 CFC 的热变形特点,须从模具的选材、装配工艺关键点的控制及装配基准点的加工方式等方面综合考虑才能有效确保以上指标的实现。

3.1 模具材料比选

模具是高精度天线的依托,天线型面精度很大程度上取决于模具材料,因此,模具材料的选择十分重要。在天线成型温度范围内,因线胀系数差异所造成的成型热应力引起的结构变形不容忽视^[6]。表 1 给出了几种常用模具材料的线胀系数。

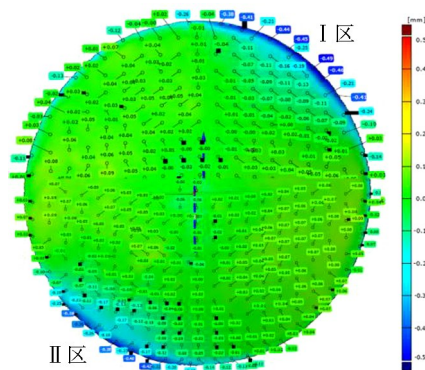
表 1 常用模具材料的线胀系数

Tab.1 Coefficient of thermal expansion of common mould material

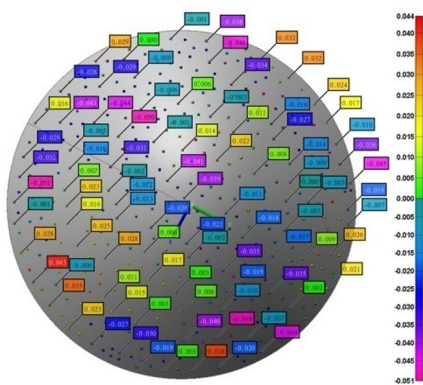
材料名称	线胀系数/ 10^{-6} K^{-1}
铝合金	22.5
钢	12.5
球墨铸铁	10.8
耐热玻璃	3.20
碳/环氧(T100/环氧)	2.80-3.60
单块石墨	2.70-3.00
殷钢	1.70
碳/环氧(P55/环氧)	< 1.00

根据已有研究结果^[7],本文选取球墨铸铁和殷钢两种模具材料进行比对实验,各成型一件副反射面天线,并分别命名为 1[#]天线和 2[#]天线。随后,对其型面精度进行测量。结果表明,1[#]天线整体型面精度为 0.051 mm ;2[#]天线整体型面精度为 0.022 mm ,均能满足副反射面天线整体型面精度 $< 0.1 \text{ mm}$ 的要求。

图 4 给出了 1[#]和 2[#]副反射面天线的型面点云图。从图 4(a)可看出,1[#]天线存在 2 处超差区域,命名为 I 区和 II 区。I 区尺寸约为 $350 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,型面偏差峰-峰值为 $-0.11 \sim -0.49 \text{ mm}$ 。



(a) 1[#]天线



(b) 2# 天线

图4 副反射面天线型面点云图

Fig.4 Scatter and counter diagram of the surface accuracy for the secondary reflector antenna

II 区尺寸约为 280 mm × 120 mm, 型面偏差峰-峰值为 -0.1 ~ -0.42 mm, 不满足任意 100 mm² 反射区域型面精度 < 0.1 mm 的要求。由图 4(b) 可看出, 2# 天线无超差, 同时满足整体和局部的高型面精度要求。基于上述实测型面精度数据, 确定选用殷钢作为制备本副反射面天线的模具材料。

3.2 装配工艺控制

在副反射面天线装配过程中, 零件的装配工艺对产品的精度也有较大影响。确定模具选材的同时, 结合本副反射面天线的结构及工艺实践, 本文重点讨论如何通过减小零件装配应力来进一步提升整体和局部型面精度。

3.2.1 外蒙皮原位装配

除共固化工艺外, 大多数复合材料蜂窝夹层结构天线都采用内/外蒙皮单独成型再与蜂窝二次装配固化成型的工艺方法进行制备。为了节约成本, 工艺实践中, 外蒙皮成型与夹层结构装配往往共用同一副模具。为了消除两次装配位置不一致对产品型面精度造成的不利影响, 提高蒙皮与模具完全的贴合度, 采用原位装配技术。具体措施为: 外蒙皮脱模时在蒙皮和模具上进行标记, 随后, 在夹层结构装配成型时根据所做标记使外蒙皮在模具上位置还原, 见图 5。即保证外蒙皮两次装配时与模具的相对位置保持一致, 从而有效减小两者局部型面不匹配造成的型面偏差。

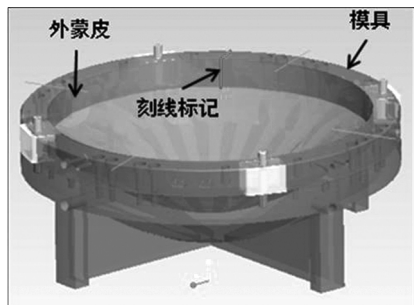


图5 外蒙皮原位装配图示

Fig.5 Diagram of the in-situ assembly for the external covering

3.2.2 蜂窝适配

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2018 年 第3期

本副反射面天线的内/外蒙皮通过高温负压固化成型的方式成型, 内/外蒙皮真空固化时柱段和曲段过渡区域受压最小, 预浸料中的树脂不能有效挤出, 导致该处蒙皮偏厚, 见图 6。若不对过渡区域的蜂窝高度进行单独适配, 该处蜂窝会将内蒙皮局部架空, 内蒙皮不能与蜂窝芯子有效贴合。若强制装配, 则会产生较大装配应力, 内蒙皮受迫变形导致型面精度超差, 且超差区域最易出现在过渡区域处。

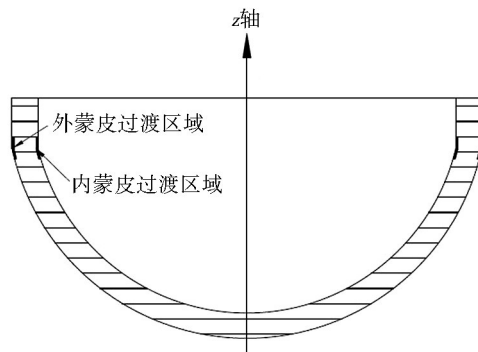


图6 过渡区域内/外蒙皮局部变更后示意图

Fig.6 Schematic of the thickened internal/external covering around transitional region

实验表明, 不对过渡区的蜂窝进行单独适配, 过渡区域型面精度超差。A 区域尺寸为 10 mm × 70 mm, 型面偏差峰-峰值为 -0.275 ~ -0.132 mm; B 区域尺寸为 10 mm × 20 mm, 型面偏差峰-峰值为 -0.140 ~ -0.126 mm, 见图 7。为有效解决过渡区域型面精度超差的问题, 在制备本副反射面天线时, 采取以下措施:

- (1) 采用测厚仪实测内/外蒙皮过渡区处厚度, 并据此计算适配该位置处蜂窝高度;
- (2) 将内蒙皮柱面段沿其圆周均匀裁切 4 条缝并向曲面段延伸 15 ~ 20 mm 以进一步减小内蒙皮装配应力。

结果表明, 上述两种工艺措施有效解决了过渡区 A、B 两处区域型面精度超差问题, 最终所制备的副反射面天线整体型面精度为 0.022 mm, 任意 100 mm² 反射区域的型面精度优于 0.1 mm。

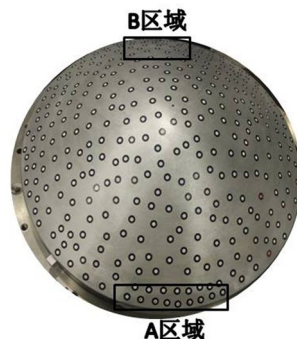


图7 局部型面精度超差图示

Fig.7 Diagram of the overproof of the local surface accuracy

3.3 装配基准点加工

副反上的三处基准点为主-副调焦的初始基准,故保证其形位精度是双反射体曲面天线装配和对焦的关键,基准点分布见图2。由于装配基准点的形位精度以副反射面天线虚拟不可见的中心轴线为参照,且其结构机加工装夹易变形,故如何在机床上准确定位该中心轴线以保证装配基准点的高形位精度是工艺难点。将通过1[#]、2[#]和3[#]试验件对几种加工方法进行比较分析,尝试解决此工艺难点。

试验件1[#]将副反射面天线连同模具整体装夹,以模具上的基准孔确定中心轴线,进而对基准点进行机加工。由于材料热膨胀差异,在常温下天线与模具的型面贴合较差,连接固定时引起副反射面天线强制变形。此时,通过模具上基准孔确定的中心轴线不是副反射面天线的中心轴线,从而产生加工误差。

试验件2[#]车床卡盘夹持在副反射面天线的柱面位置,并通过三维图像测量设备对其曲面进行拍照拟合以确定中心轴线,进而对基准点加工。柱面在卡盘径向力作用下会产生0.01~0.03 mm的形变。此外,加工的切削力将改变副反的位置,切削力的大小随单次进刀量的增加而增大。为了减少副反射面天线因径向力和切削力产生的机加工误差,工艺上采用多次加工、反复测量的方法来实现。具体措施为:(1)控制单次进刀量在0.05 mm以内;(2)单次进刀后重新确认天线的位置并实时调整,确保基准点上侧面与车床轴线的垂直度 ≤ 0.02 mm,天线中心轴线与车床中心轴线的同轴度 ≤ 0.03 mm。

试验件3[#]在试验件2[#]的基础上增加了机加工辅助工装,见图8。天线连同辅助工装整体装夹,车床卡盘夹持在辅助工装上,避免了卡盘直接夹持在副反射面天线上产生的0.01~0.03 mm形变。此外,加工时通过辅助工装上的预留基准点快速找到中心轴线,单次加工后通过调节螺钉对天线进行快速调校,大大缩短了调校时间,提高了生产效率。

3件试验件加工完成后,实测基准点的形位精度,结果见表2。

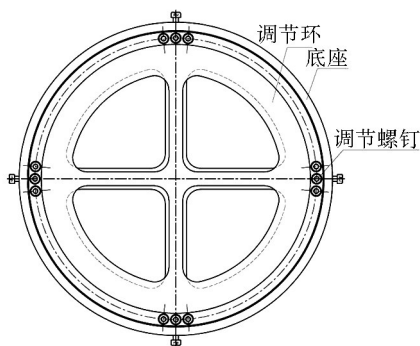


图8 机加工辅助工装示意图

Fig.8 Schematic of the auxiliary mould for the machining

表2 三件试验件基准点的形位精度和加工周期

Tab.2 Positional accuracy and manufacturing period of the assembly reference point for the three test pieces

试验件	上侧面组合	上侧面与中心	外端面与中心	加工周期
	平面度/mm	轴线垂直度/mm	轴线同轴度/mm	
1 [#]	0.12	0.76	0.50	3.0
2 [#]	0.030	0.050	0.050	7.0
3 [#]	0.015	0.015	0.012	2.0

由表2数据可看出,副反射面天线连同胶接装配模具整体装夹的加工方法(试验件1[#])不能保证装配基准点的高形位精度要求;副反射面天线直接装夹并通过三维摄影辅助测量的加工方法(试验件2[#])能保证装配基准点的高形位精度要求;副反射面天线连同辅助工装夹并利用三维图像辅助测量的机加工方法(试验件3[#])可进一步提高装配基准点形位精度。

需指出的是,试验件2[#]的加工方法,耗时长、调校困难,一次调校需3~5 h,整个装配基准点加工完成一般需7 d,在工程应用上有一定局限性。试验件3[#]在试验件2[#]基础上增加了辅助工装可大大缩短调校时间,加工周期从7 d缩短为2 d,提效250%。

4 结论

(1)对比试验表明殷钢是制备副反射面天线的较理想模具材料,能同时满足天线整体和局部型面精度要求。

(2)在夹层结构装配时采用外蒙皮原位装配技术可有效减少外蒙皮与模具局部型面不匹配对副反射面天线型面精度造成的不利影响。

(3)在夹层结构装配时单独适配副反射面天线蒙皮柱段和区段过渡区域的蜂窝可有效解决过渡区域型面精度超差问题。

(4)综合采用机加工辅助工装与三维摄影测量的措施可有效确保副反射面天线装配基准点的高形位精度并大幅缩短天线加工周期。

参考文献

- [1] 赦辽辉. 高精度碳纤维复合材料抛物面天线制造技术[J]. 工程塑料应用, 2002, 30(7): 16-18.
- [2] 房海军, 涂彬. 碳纤维复合材料卫星天线反射面型面精度稳定性分析[J]. 航天返回与遥感, 2007, 28(1): 67-71.
- [3] 沃西源, 房海军. 碳/环氧复合材料C波段天线反射面研制[J]. 高科技纤维与应用, 2008, 33(7): 1-5.
- [4] 冯贞国, 郑元鹏. 一种高精度天线反射面制造方法[J]. 天线与伺服技术, 2009, 35(1): 39-41.
- [5] 夏文干, 杨洁. 高精度碳纤维复合材料天线的研制[J]. 高科技纤维与应用, 2002, 27(1): 27-34.
- [6] 何晓蓉, 高建军. 复合材料副反射器模具的设计和制造[J]. 航天制造技术, 2002, 8(4): 14-17.
- [7] 范铁军. 精密殷钢薄壁件制造工艺[J]. 航天工艺, 2000, 13(1): 42-45.