

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.04.015

赋型复合材料天线反射器制造技术研究

徐小伟, 李奇辉

[航空工业西安飞机工业(集团)有限责任公司, 西安 710089]

摘要:重点从材料选择、模具设计、工艺方案及过程控制等方面对赋型复合材料天线反射器的成型加工方法进行了分析。选择碳纤维单项带作为赋型天线反射器的面板材料。赋型天线反射器选用较为成熟的热压罐成型方法,可有效提高反射器的表面质量和加工精度。反射器成型方法选择干蒙皮与蜂窝芯组合固化的方法,由于反射器曲率变化大,蜂窝芯采用整张贴贴时容易发生翘曲变形,产生较大的残余应力,因此需对蜂窝芯进行预成型处理;蜂窝芯采用分块拼接法。结果表明:选用高性能的碳纤维复合材料,采用热压罐成型工艺,进行铺贴过程控制与时效处理能够实现赋型天线反射器的精度加工。

关键词: 复合材料; 反射器; 碳纤维; 热压罐

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)04-0080-04

Study on Manufacturing Technology of Shaped Composite Antenna Reflector

Xu Xiaowei, Li Qihui

[Avic Xi'an Aircraft Industry(Group) Company Ltd., Xi'an 710089, China]

Abstract: The forming and processing methods of the antenna reflector with composite materials were analyzed from the aspects of material selection, mold design, process plan and process control. Carbon fiber single band was selected as the panel material of antenna reflector. The surface quality and machining precision of reflector can be improved effectively by using the more mature autoclave forming method for shaped antenna reflector. The combination curing method of dry skin and honeycomb core was selected as the forming method of reflector. Due to the large curvature change of reflector, the honeycomb core is prone to warping deformation and large residual stress when the honeycomb core is laid with the whole sheet. Therefore, it is necessary to preform the honeycomb core; the honeycomb core adopts the block splicing method. The result show that the shaped composite antenna reflector can achieve high precision machining when choosing the high-performance carbon fiber composite materials, using the autoclave moulding technology and carrying out the paving process control and aging treatment.

Keywords: composite material; reflector; carbon fiber; autoclave

赋型复合材料天线反射器是近年来兴起的一种新型天线反射器,它是为了达到发射和接收特定频率信号,而设计的特定不规则形状、曲率变化的复合材料反射器。相比普通反射器,它能减少信号之间的相互干扰,从而获得更高的增益性能,其在航天通讯卫星领域具有广泛的应用前景。

赋型天线反射器表面为自由曲面,与常见的规则几何曲面的反射器不同,它不能使用一个数学解析式准确表达完整的型面信息,曲率变化大,表面一

般凹凸不平(见图1),其结构一般采用高模量的复合材料蒙皮/蜂窝芯夹层结构,蒙皮与蜂窝芯间使用胶膜进行胶接(见图2)。与传统金属材料相比,该结构零件具有密度小、比强度比模量高、热膨胀系数小等特点^[1-2]。笔者选择碳纤维单项带作为赋型天线反射器的面板材料。赋型天线反射器选用较为成熟的热压罐成型方法。重点从材料选择、模具设计、工艺方案及过程控制等方面对赋型复合材料天线反射器的成型加工方法进行了分析。

通信作者: 李奇辉,高级工程师,主要从事复合材料制作技术方面的研究, E-mail:465746132@qq.com

收稿日期: 2021-01-26

引用格式: 徐小伟,李奇辉. 赋型复合材料天线反射器制造技术研究[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(4): 80-83, 114.

Xu Xiaowei, Li Qihui. Study on the manufacturing technology of shaped composite antenna reflector[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(4): 80-83, 114.

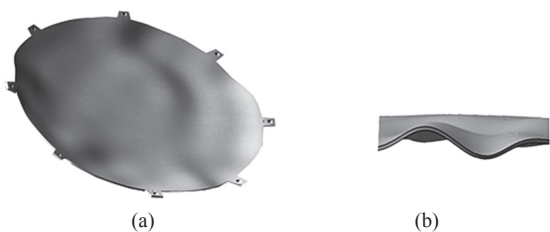


图 1 赋型天线反射器示意图及赋型区域剖视图

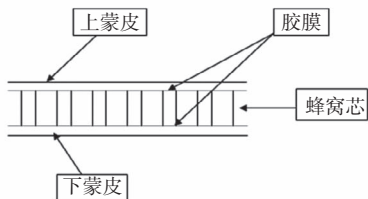


图 2 赋型天线反射器结构

1 天线反射器材料选择

材料是天线反射器研制的重要基础,目前,反射面常用的复合材料有玻璃纤维、Kevlar 及碳纤维 3 种材料,玻璃纤维复合材料基体多采用环氧树脂,该材料性能稳定、工艺成熟,但玻璃化转变温度较低,介电性能较差等缺点。Kevlar 纤维复合材料力学性能优良,但与其配合使用的 Nomex 蜂窝芯不同规格性能差异很大,主要应用于微带阵天线及一些型面曲率变化较小的反射器中。此外,玻璃纤维、Kevlar 纤维复合材料其自身不导电,当用于反射器面板时,必须对其表面进行喷铝,这些都增加了反射器的加工难度。

碳纤维复合材料热膨胀系数较低^[3-5]、导电性能优良,工艺成熟度高,在航空、航天零件制造领域具有广泛应用,是较为理想的尺寸稳定性材料。表 1 为玻璃纤维、Kevlar 纤维及碳纤维 / 环氧树脂的性能对比,赋型天线反射器选择碳纤维单项带作为天线反射器的面板材料。

表 1 三种材料性能比较

材料	拉伸强度 / MPa	拉伸弹性模 量 / GPa	密度 / (g · cm ⁻³)	导电性能
环氧树脂 / 玻璃纤维	1245	126	2.0	差
环氧树脂 / Kevlar	1373	78.4	1.4	差
环氧树脂 / 高强度 碳纤维	1471	137.3	1.45	优良

天线反射器蜂窝芯选择有孔铝蜂窝芯(见图 3),透气孔孔径 $\varnothing 0.1 \sim \varnothing 0.3 \text{ mm}$,这是因为天线从大气层进入空间真空环境,在真空度为 $10^{-2} \sim 10^{-8} \text{ Pa}$ 太空环境下,使用传统的无孔蜂窝芯与蒙皮粘接时,蜂窝孔孔格内外会形成气压差,造成孔格内

部受力破损,影响蜂窝芯与面板之间的粘接强度,不利于蜂窝板的牢固、稳定。

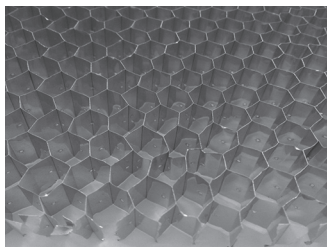


图 3 有孔铝蜂窝芯

2 成型模具设计

2.1 模具材料选择

复合材料的成型模具^[6-7]构型决定了制品的几何形状,对于构件的表面状态、产品性能影响也很大。碳纤维复合材料成型模具较多使用金属材料模具,常用材料有铝、钢、铸铁和殷钢等,其主要性能见表 2。

表 2 四种金属材料模具的比较

材料	密度 / (kg · m ⁻³)	热膨胀系数 / (10 ⁻⁶ · °C ⁻¹)	相对复合材料热 膨胀系数
铝合金	2.7×10^3	22.5	大
钢	7.8×10^3	12.5	较大
铸铁	7.3×10^3	10.8	较大
殷钢	8.0×10^3	1.7	相近

采用铝合金、钢和铸铁作为模具材料时,其热膨胀系数与碳纤维相差较大,构件经过高温固化后往往产生较大的结构变形。而选用殷钢作为工装材料时,其热膨胀性能与复合材料接近,能够承受 200 °C 以上高温、0.5 MPa 以上固化压力,最大限度减少制件的热应力变形。殷钢材料自身含镍量高,造成切削性能差,加工制造难度高,但通过设计合理的工艺方法,能够保证模具的加工精度,因此选择殷钢作为成型模原材料。

2.2 成型模具结构设计

复合材料成型模具一般有阳模、阴模和组合模三种形式^[8],赋型天线反射器内表面为天线工作面,为保证反射器工作面质量选择凸模成型方式,如图 4 所示。

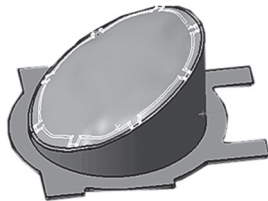


图 4 赋型天线反射器成型模具

如图 4 所示,反射器成型模具为中空结构,厚度不大于 30 mm。为保证反射器模具结构稳定性,成型模具带有刚性金属框架,经过室温时效、高温应力释放,成型模具精加工完成后,需经过数控测量机检测和气密试验,确保反射器成型模具型面精度和气密性满足要求。

3 工艺方案选择

复合材料成型方法有热压罐成型、模压成型和液体成型等工艺方法^[9-13],其中热压罐成型方法能够提供较为稳定、均匀的温度场和压力场,其加工的产品重复性好、纤维体积含量高。赋型天线反射器选用较为成熟的热压罐成型方法,可有效提高反射器的表面质量和加工精度。反射器成型方法选择干蒙皮与蜂窝芯组合固化的方法,碳纤维单向带在成型模具上进行铺贴,后制袋抽真空压实,按照固化参数在热压罐内一次固化,出罐后进行脱模。上下蒙皮制造完成后,分别对胶接面进行轻微打磨,后铺贴胶膜,在成型模具蒙皮与蜂窝芯进行组合,后制袋真空压实,在热压罐内进行二次固化,出罐后切割修整,其工艺流程见图 5。

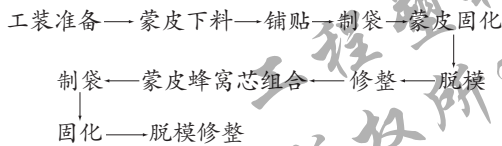


图 5 赋型天线反射器成型流程图

由于反射器曲率变化大,蜂窝芯采用整张贴贴时容易发生翘曲变形,产生较大的残余应力,因此需对蜂窝芯进行预成型处理:蜂窝芯采用分块拼接法,将蜂窝芯裁切为四等分在成型模具上进行拼接,在曲率较大区域允许对蜂窝芯进行局部开刀,并使用压敏胶带对蜂窝芯进行固定,在拼缝处及开刀位置填充 FM410 泡沫胶,后将在烘箱内对蜂窝芯进行稳定化处理。预成型后的蜂窝芯残余应力充分释放,与蒙皮组合固化后型面精度显著提高。

4 过程控制

4.1 铺贴过程控制

赋型天线反射器型面曲率大,为保证铺贴精度和质量,铺贴时使用激光投影定位的方法。激光投影仪扫描工装上的定位头(光敏元件),建立工装三维空间中的准确位置,后投影出预浸料铺贴的轮廓线(见图 6),预浸料根据轮廓线进行铺贴。蒙皮铺贴过程中易出现空腔、分层、褶皱等缺陷,为避免以上问题,要求每层预浸料铺贴完成后都必须进行抽

真空压实,避免夹杂气泡,保证蒙皮与模胎型面完全贴合。

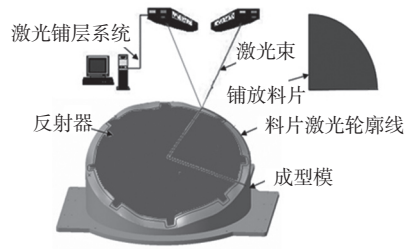


图 6 激光投影示意图

4.2 时效处理

复合材料固化成型过程中,预浸料在高温环境下发生剧烈化学反应^[14-18],构件内部产生复杂的温度变化,这种不均匀温度场造成构件内部产生残余应力和变形。为了减少残余应力和变形,可采用时效处理法。高温时效是将零件在较大升降温速率和真空环境下,进行频繁的高、低温变化的时效处理。室温时效是将反射器室温条件下进行时效,零件在模胎上进行内应力释放,应力释放一定的周期。高温时效和室温时效的目的是为了让树脂体系完全固化,使反射器内应力在人为环境下进行释放,减小反射器在热真空测试、真空环境冷热交替测试和空间环境下的变形,图 7 为赋型天线反射器时效处理图。

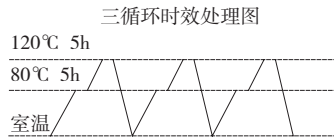


图 7 赋型天线反射器时效处理图

5 分析验证

5.1 型面分析

上述成型工艺方法反射器在固化成型过程中应力释放均衡,减少了成型、装配及高低温实验后反射器的变形,经检测,使用该技术方法天线反射器型面精度可控制在 0.2 mm 以内,满足高精度反射器设计要求,加工精度的提高改善了产品的电性能测试效果。表 3 为某投影口径 $\varnothing 1500$ mm 赋型天线反射器各阶段型面精度测试结果。

表 3 各阶段测试结果

阶段	型面精度/mm
反射器成型后	0.124
反射器高低温时效后	0.086
反射器装配后	0.106
+120℃下反射器变形	0.131
-120℃下反射器变形	0.099

型面测试采用摄影测量法,反射器精度分析见图 8。

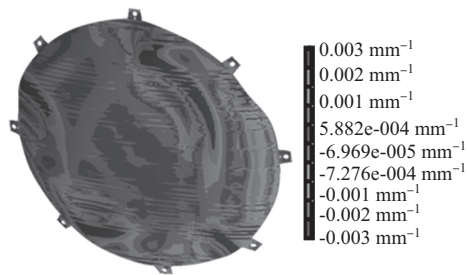


图 8 赋型天线反射器精度分析

5.2 振动实验

进一步验证工艺方法和材料的合理性,随后对零件进行了振动实验,实验条件振动频率分别选择 20 ~ 50 Hz、50 ~ 300 Hz、300 ~ 500 Hz、500 ~ 2 000 Hz 四种范围内进行,如表 4 所示(Z 方向为轴向,X、Y 分别为纵、横轴方向),振动试验后对反射器进行敲击检查 and 无损检测,无脱粘、裂纹等缺陷问题。

表 4 振动试验参数

频率范围 / Hz	功率谱密度	
	X, Y 方向	Z 方向
20 ~ 50	+5 Db/oct (频率增强)	+5 Db/oct (频率增强)
50 ~ 300	0.55 ~ 0.078 gn ² /Hz	0.65 ~ 0.078 gn ² /Hz
300 ~ 500	0.068 gn ² /Hz	0.075 gn ² /Hz
500 ~ 2 000	-14 Db/oct (频率衰减)	-14 Db/oct (频率衰减)

6 结论

相比传统的金属材料,复合材料具有密度小、比强度高、可设计性强等优点,其对空间遥感技术性能的提升起到了重要的作用。从材料性能、模具设计、工艺方法等方面介绍了赋型复合材料天线反射器的加工制造方法,工程应用表明,所加工反射器型面精度和结构稳定性均达到设计要求,开拓了天线反射器的制造方法。

参考文献

- [1] 程德级,李晓星,周国峰,等. 赋型天线反射面的成型质量检测与评价方法[J]. 航天制造技术,2012,5(1):39-43.
Cheng Deji, Li Xiaoxing, Zhou Guofeng, et al. An evaluation methodology and quality detection based on bicubic interpolation fitting method for fu-type antenna reflective surface[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2012(1):39-43.
- [2] 张璇,沈真. 航空航天领域先进复合材料制造技术进展[J]. 纺织导报,2018(S1):73-79.
Zhang xuan, Shen zhen. Progress in manufacturing technology of composite materials in the aerospace field[J]. China Textile Leader, 2018(S1):73-79.
- [3] 房海军,涂彬. 碳纤维复合材料卫星天线反射器型面精度稳定性分析[J]. 航天返回与遥感,2007,28(1):67-71.
Fang Haijun, Tu Bin. Stability analysis of CFRP reflecting surface in satellite antenna[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2007,28(1):67-71.
- [4] 王恩青,张斌. 复合材料在航空航天中的发展现状和未来展望[J]. 科技信息,2011,28(33):290-295.
Wang Enqing, Zhang Bin. The development status and future prospect of composite materials in aerospace industry[J]. Science & Technology Information, 2011,28(33):290-295.
- [5] 李威,郭树峰. 碳纤维复合材料在航天领域的应用[J]. 中国光学,2011,4(3):201-212.
Li Wei, Guo Quanfeng. Application of carbon fiber composites to cosmonautic fields[J]. Chinese Journal of Optics, 2011,4(3):201-212.
- [6] 蔡闻峰,周惠群,于凤丽. 树脂基碳纤维复合材料成型工艺现状及发展方向[J]. 航空制造技术,2008(10):54-57.
Cai Wenfeng, Zhou Huiqun, Yu Fengli. Current status and development trend of epoxy resin carbon fiber reinforced composites forming process[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(10):54-57.
- [7] 晏冬秀,刘卫平,黄钢华. 复合材料热压罐成型模具设计研究[J]. 航空制造技术,2012(7):49-52.
Yan Dongxiu, Liu Weiping, Huang Ganghua. Design study for composites autoclave forming mould[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(7):49-52.
- [8] 王永贵,梁宪珠,王巍. 先进复合材料构件成型模具和工装技术发展趋势[J]. 航空制造技术,2009(S1):13-18.
Wang Yonggui, Liang Xianzhu, Wang Wei. Development tendency of molding and tooling technology in advanced composites component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2009(S1):13-18.
- [9] 景婷婷. 典型先进树脂基复合材料成型工艺的发展综述[J]. 现代工业经济和信息化,2016(6):69-70.
Jing Tingting. Development of molding process of typical advanced resin matrix composites[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2016(6):69-70.
- [10] Wen Binyoung. Compacting pressure and cure cycle for processing of thick compositel aminates[J]. Composites Science and Technology, 1995,54(3):299-306.
- [11] Jong Woon Kim, Hyoung Geun Kim, Dai Gil Lee, et al. Compaction of thick carbon / phenolic fabriccomposites with autoclave method[J]. Composite Structures, 2004,66(1-4):467-477.
- [12] 苏鹏,崔文峰. 先进复合材料热压罐成型技术[J]. 现代制造技术与装备,2016(11):165-166.

- 38(5):346-348.
- [8] Unnikrishnan K P, Thachil E T. Toughening of epoxy resins[J]. *Designed Monomers and Polymers*, 2006, 9(2):129-152.
- [9] 胡传群, 万式青. 环氧树脂增韧技术进展[J]. *化工新型材料*, 2017, 45(1):4-6.
- Hu Chuanqun, Wan Shiqing. Progress in toughening technology of epoxy resin[J]. *New Chemical Materials*, 2017, 45(1):4-6.
- [10] 白云起, 薛丽梅, 刘云夫. 环氧树脂的改性研究进展[J]. *化学与粘合*, 2007(4):289-292, 304.
- Bai Yunqi, Xue Limei, Liu Yunfu. Research progress on modification of epoxy resin[J]. *Chemistry and Adhesion*, 2007(4):289-292, 304.
- [11] 李山剑, 邓双辉, 冯云龙, 等. 活性稀释剂对环氧树脂结构和性能的影响[J]. *河北大学学报: 自然科学版*, 2016, 36(6):604-613.
- Li Shanjian, Deng Shuanghui, Feng Yunlong, et al. Effect of reactive diluent on structure and properties of epoxy resin[J]. *Journal of Hebei University: Natural Science Edition*, 2016, 36(6):604-613.
- [12] Chen Zhenkun, Yang Guo, Yang Jiaoping, et al. Simultaneously increasing cryogenic strength, ductility and impact resistance of epoxy resins modified by n-butyl glycidyl ether[J]. *Polymer*, 2009, 50(5):1 316-13 23.
- [13] 张黎芳, 李穆. 几种活性稀释剂对 BPA 型环氧树脂 / IPDA 体系性能的影响[J]. *广东化工*, 2016, 43(16):74-76.
- Zhang Lifang, Li Mu. Effect of several active diluents on properties of BPA epoxy resin / IPDA system[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2016, 43(16):74-76.
- [14] 刘蕊, 乔英杰, 林宇雷. 聚丙二醇二缩水甘油醚对 E51 树脂力学性能的研究[J]. *功能材料*, 2018, 49(8):8 124-8 130.
- Liu Rui, Qiao Yingjie, Lin Yulei. Study on mechanical properties of E51 resin treated with polypropylene glycol diglycidyl ether[J]. *Journal of Functional Materials*, 2018, 49(8):8 124-8 130.
- [15] Jing Xianghai, Liu Yuyan, Liu Yuxi, et al. Toughening-Modified Epoxy-Amine System: Cure Kinetics, Mechanical Behavior, and Shape Memory Performances[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2014, 131(19):1-7.
- [16] Kissinger H E. Reaction Kinetics in Differential Thermal Analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 1957, 29(11):1 702-1 706.
- [17] Shanku R, Vaughan J G, Roux J A. Rheological characteristics and cure kinetics of EPON 862 / W epoxy used in pultrusion[J]. *Advances in Polymer Technology*, 1997, 16(4):297-311.
- [18] Ozawa T. Kinetic analysis of derivative curves in thermal analysis[J]. *Journal of Thermal Analysis*, 1970, 2(3):301-324.
- [19] Sourour S, Kamal M R. Differential scanning calorimetry of epoxy cure: isothermal cure kinetics[J]. *Thermochimica Acta*, 1976, 14(1):41-59.
-
- (上接第 83 页)
- Su Peng, Cui Wenfeng. Molding technology of advanced composites pressing[J]. *Modern Manufacturing Technology and Equipment*, 2016(11):165-166.
- [13] 刘望子, 汪心文, 李萌. 狭窄翻边蒙皮复合材料热压罐成型技术研究[J]. *航空制造技术*, 2017(20):79-83.
- Liu Wangzi, Wang Xinwen, Li Meng. Research on forming technology of narrow flanging skin composite material by autoclave[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017(20):79-83.
- [14] 李艳夏. 先进复合材料热压罐成型固化仿真技术研究进展[J]. *航空制造技术*, 2016(15):79-83.
- Li Yanxia. Reserch progress on simulation during autoclave processing of advanced composites[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016(15):79-83.
- [15] 程文礼, 邱启艳, 陈静. 热压罐成型复合材料固化变形机理及控制研究[J]. *材料导报*, 2012, 26(20):410-414.
- Cheng Wenli, Qiu Qiyan, Chen Jing. Study on the cure-induced deformation mechanism and control of composite structures in autoclave process[J]. *Materials Review*, 2012, 26(20):410-414.
- [16] 马如飞, 李嘉, 桂佳俊. 真空成型与热压罐成型复合材料的性能对比[J]. *航空材料学报*, 2017(37):23-28.
- Ma Rufe, Li Jia, Gui Jiajun. Comparison of composites properties manufactured by vacuum process and autoclave process[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2017(37):23-28.
- [17] 张纪奎, 关志东, 酆正能. 热固性复合材料固化过程中温度场的三维有限元分析[J]. *复合材料学报*, 2006, 23(2):175-179.
- Zhang Jiku, Guan Zhidong, Li Zhengneng. Three-dimensional finite element analysis for the temperature field of thermoset composites during cure process[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, 23(2):175-179.
- [18] Twigg G, Poursartip A, Fernlund G. Tool-part interaction in composites processing. Part1: Experimental in vestigation and analytical model[J]. *Compos Part A*, 2004, 35(1):121.