

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.10.015

超薄 CF 平纹织物复合材料热压罐成型 高型面精度天线反射面

刘明昌, 李建伟, 孙坤, 吴昕雷

(中国电子科技集团公司第二十研究所, 西安 710068)

摘要: 通过对天线反射面的结构工艺特性的分析, 对反射面的制造过程进行研究分析, 通过工艺控制, 实现对抛物面反射面型面精度的成型控制, 可使反射面的型面精度均方根误差控制在 0.15 mm 以下。所成型的反射面可用于电磁波的接收与发射, 完成目标搜索与跟踪, 也可用于电子干扰、无线电通讯等领域。

关键词: 碳纤维平纹织物; 高型面精度; 热压罐成型; 天线反射器

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)10-0081-07

Ultra-Thin Carbon Fiber Plain Fabric Composite the Autoclave Forming High Profile Precision Antenna Reflector

Liu Mingchang, Li Jianwei, Sun Kun, Wu Xinlei

(20th Research Institute of China Electronic Science and Technology Group, Xi'an 710068, China)

Abstract : The forming process of composite materials is complex endothermic and exothermic process accompanied by physical and chemical changes, and the residual stress and deformation caused by the forming is the main factor affecting the accuracy of the final surface, especially the undevelopable surface reflector. the surface accuracy is more difficult to control. Through the analysis of the structure and process characteristics of the reflector, the manufacturing process of the reverse side was studied and analyzed. Through the process control, the forming control of the profile precision of the paraboloid reflector is realized, and the root mean square precision of the reflector can be controlled below 0.15 mm. The formed reflector can be used for receiving and transmitting electromagnetic waves, completing target search and tracking, and can also be used in electronic interference, radio communication and other fields.

Keywords : carbon fiber plain fabric ; high profile precision ; the autoclave forming ; antenna reflector

碳纤维 (CF) 复合材料诞生于 20 世纪 60 年代末, 有高的比强度、比模量、耐热、耐腐蚀、耐疲劳等优点, 是当前先进的复合材料, 在航空、航天、电子、兵器、建筑等领域得到广泛应用。复合材料具有各向异性的特点, 制件的铺层设计是保证制品结构性能的关键, 也是影响制件的型面精度的重要因素, 同时在复合材料成型过程中, 预浸料及夹层蜂窝的裁切、铺贴及固化过程的加热、加压、降温、卸压、脱模等, 都会产生应力和引起制件内部应力分布, 从而造成制件变形。目前, 如何控制复合材料构件成型的形变精度, 降低制件成型带来的内应力和形状误差,

是 CF 复合材料产品开发应用的技术瓶颈, 成为行业发展技术研究的热点, 是一项具有重要意义的关键技术^[1-4]。笔者从热压罐成型复合材料反射器构件特点入手, 分析影响型面精度的因素, 主要从铺层设计均匀性及非均匀结构成型方法的优化处理来解决成型带来的变形问题。

热压罐固化成型是当前大型复合材料构件成型的主要方法之一, 其影响构件成型变形的残余应力主要来源为: 构件成型所用的材料的热膨胀系数不一致产生的应力、构件成型中的化学收缩变形产生的应力、由模具与复合材料构件相互作用产生的

通信作者: 刘明昌, 本科, 高级工程师, 主要从事非金属材料成型工艺技术方面的研究

收稿日期: 2021-07-16

引用格式: 刘明昌, 李建伟, 孙坤, 等. 超薄 CF 平纹织物复合材料热压罐成型高型面精度天线反射面 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(10) : 81-87.

Liu Mingchang, Li Jianwei, Sun Kun, et al. Ultra-thin carbon fiber plain fabric composite the autoclave forming high profile precision antenna reflector[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(10) : 81-87.

应力。具体在成型中影响形变的主要因素为:复合材料热膨胀、固化收缩、铺层方式、固化温度、模具热膨胀、冷却速度、局部变厚或纤维含量变化等^[5-12]。

笔者研究成型的天线反射面为一种不可展的旋转抛物面,内外蒙皮采用新研制的CF T800织成的0.1 mm厚的平纹布预浸料制作,其和铝蜂窝组成A夹层结构,采用热压罐成型方法,主反射面型面精度及误差分布是控制微波传播方向及效率的关键结构,要求主反射面在45 m/s风载下变形是可恢复的弹性形变,金属化反射面型面精度均方根误差 ≤ 0.2 mm。根据反射面的结构特点及要求,针对型面精度影响因素,制定研制技术方案,实现产品制造的有效控制。

1 产品的结构特点

天线主反射面为回转抛物面形式的A夹层CF复合材料制件,由一体成型的法兰反射面(由CF预浸料、铝蜂窝、镶嵌件、填充发泡胶等复合构成)及背部4个凸起的安装支座构成,整个结构形式较复杂,各向异性突出,其结构图见图1。

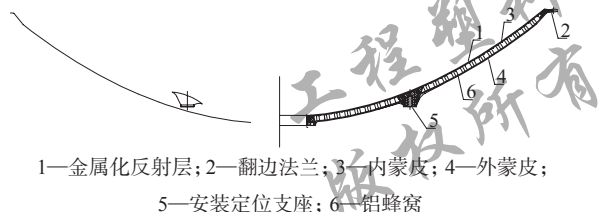


图1 天线主反射面示意图

对于高型面精度要求的复合材料制件来说,成型制造过程易产生应力(包含固化过程中树脂交联反应化学过程产生的应力,制件在升、降温过程中材料本身的热胀冷缩等物理过程产生的应力),这些应力的产生、释放的不均衡是引起制件形变的主要因素,是决定着反射面成型最终型面精度的关键因素。根据复合材料成型应力产生的根源及特点,采用均衡的结构设计及生产过程有效控制就可减小成型应力。主反射面首先是由内外蒙皮和铝蜂窝组成的较均衡的A夹层结构,在制造过程中CF内外蒙皮是产生内应力的主要因素,采用蒙皮的均衡铺层设计就可减小成型应力,是保证型面精度的有效手段之一;复合材料成型的固化过程是应力产生的主要过程,通过固化过程的型面多点形变检测(形变反映应力),优化固化控制参数,减小应力应变,保证型面精度;对于4个突起的支座,结构上破坏了反射面的刚度均衡性,采用中温固化与反射面一体

成型易于产生应力集中而引起型面变形,从而影响反射面型面精度,采用室温固化二次胶接的方式成型,过程化学反应温和,产生的应力小。另外,反射面已成型,具备了一定的强度,支座胶接所产生的应力对反射面型面精度影响较小。

2 技术方案

2.1 等刚度铺层仿真分析与优化设计

主反射面的铺层设计过程采用Fibersim复合材料设计软件,进行铺层分割仿真,以轮廓误差 ≤ 0.5 mm为条件,进行回转抛物反射面的近似平面展开,结合软件运算结果和工艺要求(预浸料幅宽1 m,拼接缝宽度 < 0.5 mm,每层均分的最佳份数仿真确定,每块料样采用对接形式,铺层对接缝 < 0.5 mm,铺层要求从抛物面延伸铺至法兰;内外蒙皮共铺4层,每层料厚0.1 mm,仿真时考虑蒙皮厚度的影响,后面的铺层接缝保证在0.5 mm以内)。铺层方案综合考虑反射面整体结构特点,蒙皮采用瓣状料样拼接完成型面覆盖,蒙皮内各层预浸料拼接缝均布,内/外蒙皮的料样以蜂窝芯材中心层反向旋转对称镜像铺层,保证夹层结构的对称均衡。

(1) 内、外蒙皮铺层设计。

基于反射面成型模胎,考虑新研制的碳纤维薄片平纹织物预浸料经纬性能特点,按照预浸料幅宽1 m、厚度0.1 mm,铺层无皱折,以反射面母线长为基准,利用Fibersim软件对天线反射面四层内蒙皮进行铺层设计,保证夹层结构力学性能和等刚度均匀性满足要求。

由于反射面为口径1200 mm的抛物曲面结构,四层内蒙皮由多块料样对接铺层,料样分块越多,固化应力会越小,但会影响强度,铺层也费时,所以在仿真铺层时,要考虑分块的大小,既要满足强度要求,便于操作,又要尽量利于减小成型固化应力,拼接缝宽度要求小于0.5 mm,铺层仿真既要满足天线反射面的高强度、高刚度的力学特性要求,又要满足反射面成型后的型面精度要求。仿真铺层示意图如图2所示。

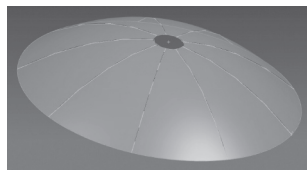
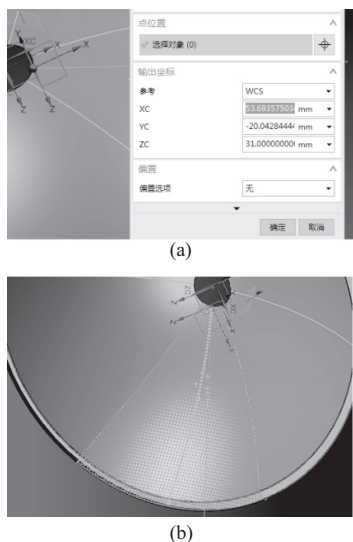


图2 仿真铺层示意图

图3为铺层可展性仿真示意图。按照最佳仿真铺层结果,整个反射面分为9等份,分别生成内蒙皮 $0^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}$ 下料样板,外蒙皮 $90^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}$ 的下料样板。



a—仿真界面;b—仿真实际图

图3 铺层可展性仿真示意图

(2) 法兰加强层铺层设计与仿真分析。

天线反射面法兰部位和反射面通过螺钉连接,是保证反射面整体强度、刚度的重要组成部分,天线反射面法兰部位内外蒙皮均需要加强,内外加强部位均为不可展曲面,为保证该部位平整铺贴,在仿真时对料样需要做剪口处理,最后生成法兰内、外蒙皮加强层下料样板。法兰铺层仿真示意图如图4所示。

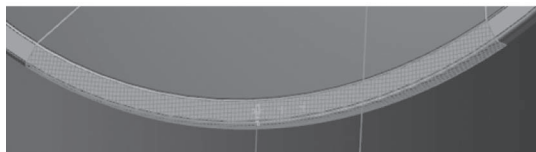


图 4 法兰铺层仿真示意图

(3) 铺层工艺设计方案。

复合材料蒙皮铺层方式是实现 A 夹层结构蒙皮均匀性控制的关键环节,铺层结果直接影响反射面刚度均匀性,由于预浸料蒙皮铺层拼接部位与非拼接部位的厚度不一致,导致蒙皮力学性能的分布异化,从而影响成型的应力分布均匀性,造成形变,影响反射面型面精度。为减小预浸料蒙皮铺层拼接处产生的随机误差,依据软件仿真分析结果,在天线反射面的铺层方案中内外层蒙皮均采用镜像对称的预浸料片材围拼,通过铺层定位工装的方式实现,包括铺层中心定位工装、铺层边缘定位工装,铺层定位工装采用分角度刻线对位法,线宽 0.2 mm,采用点

线中心对齐定位,对位的最低精度可用线宽保证,达到 0.2 mm 以上,保证了铺层的对位精度。图 5 为蒙皮铺层中心定位工装。具体铺层设计步骤如以下所述。

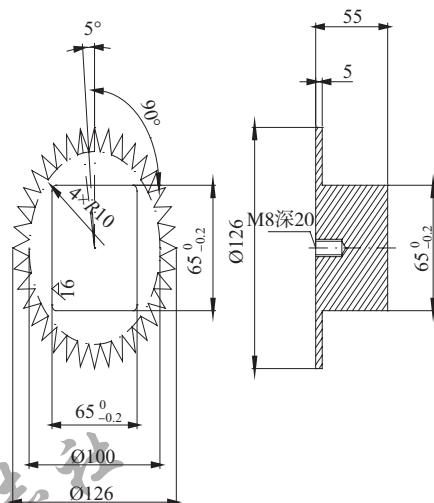


图5 蒙皮铺层中心定位工装

由 6 层新研制材料预浸料依 $0^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}$ 的顺序铺层叠加形成夹层结构内蒙皮。由 6 层新研材料预浸料依照 $90^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}$ 的顺序铺层叠加形成夹层结构外蒙皮,内外蒙皮中预浸料片材采用对接铺层,对接缝沿母线设置,4 层预浸料围绕旋转轴依次对接铺层而成,对接缝 $< 0.5\text{ mm}$,左右相邻两块料样顶点对齐,上下相邻两层料样接缝错开,以保证内蒙皮的对接缝在抛物曲面范围交错对称均匀分布。整体铺层工艺设计为“ $0^{\circ}/0^{\circ}/-45^{\circ}/45^{\circ}/90^{\circ}/90^{\circ}/$ 胶膜/铝蜂窝芯材/胶膜/ $90^{\circ}/90^{\circ}/45^{\circ}/-45^{\circ}/0^{\circ}/0^{\circ}$ ”的整体铺层结构。

2.2 固化匀压工装的设计

蜂窝芯材料的“Z”方向为规则的多孔结构,粘接固化时,柔软的真空封装辅料经常会在空气外压作用下形成应力集中压溃蜂窝芯材孔格,造成报废。外层蒙皮预浸料固化时,下层的蜂窝芯材无法提供均匀的刚性支撑,在树脂凝胶前,随着温度的升高,预浸料树脂的黏度从大变小,在空气外压作用下外层蒙皮会向蜂窝孔格内部凹陷,造成树脂在凹陷处聚集,造成固化后的蒙皮厚度不均,脱模后内应力分布不均造成的形变引起反射型面均方根误差变大。常用的方法是用橡胶板材料拼接形成固化匀压工装,使用时采用透明胶带连接各部分成整体的方法。笔者针对材料铺层后型面为曲面的特点,采用先制作“假件”再使用室温固化玻璃钢材料制作一体化

工装的方法,制作完成蜂窝粘接固化匀压工装。

2.3 4个安装定位支座突起结构的处理方案

主反射器主要以由内外蒙皮和铝蜂窝组成的较均衡的A夹层结构和外蒙皮上胶连4个安装螺柱(安装定位支座)组成,蒙皮铺层边缘定位工装见图6。这4个安装定位支座的突起结构易形成刚性不均衡,在制造过程中会引起应力的不均衡释放,从而带来应力变形,最终影响反射面型面精度。为解决这个问题,在研制中采用先成型带有反射面的均衡A夹层结构,让其具有一定的结构强度和刚性,抵抗后成型的4个安装定位支座产生的应力变形,以减小主反面型面精度受4个安装定位支座突起结构的影响;同时4个安装定位支座采用室温固化的胶粘体系,固化过程化学反应温和,采用玻纤与树脂共混的团状模塑料以及采用造型工装进行支座的填充加固,既保证了填充料的均匀性又保证了四个支座的形状一致性,以降低内应力的产生。

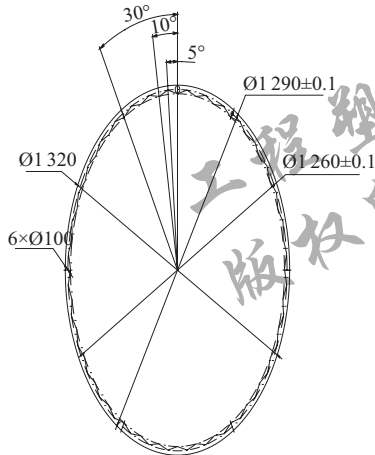


图6 蒙皮铺层边缘定位工装

2.4 填充发泡胶的选择

填充发泡胶的性能影响反射器的结构刚性,因此根据填充试板的性能进行分析选择,选用J-47D(粉状)和SY-P6发泡胶填充蜂窝夹层试板做了性能对比试验,试验数据及破坏情况列于表1。

表1 两种填充发泡胶测试件的力学性能

材料 编号	平面压缩试验		侧压试验		弯曲试验		弯曲刚 度/(kN· mm ⁻³)	离散 数/%
	芯子压 缩强 度/MPa	离散 数/%	侧压强 度/ MPa	离散 数/%	芯子剪 切应 力/MPa	离散 数/%		
J-47D	18.71	5.63	27.15	12.43	3.10	5.02	132 888.97	1.59
SY- P6	21.49	5.69	33.26	13.05	3.74	3.44	139 904.80	2.61

根据表1的实验结果可以看出,SY-P6填充的蜂窝芯比J-47D填充的蜂窝芯力学性能好,图7为夹层结构(J-47D填充)平面剪切局部破坏照片。

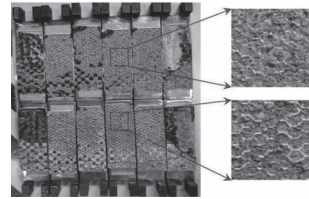


图7 夹层结构(J-47D填充)平面剪切局部破坏照片

图8为夹层结构(SY-P6填充)平面剪切局部破坏照片。从图7、图8的两种填充胶的破坏断面可以看出,SY-P6填充均匀,性能一致性好,因而选择SY-P6。

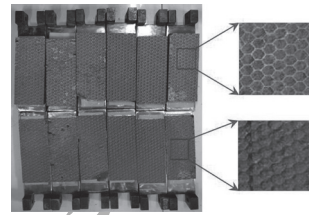


图8 夹层结构(SY-P6填充)平面剪切局部破坏照片

3 制造方法及结果验证

3.1 制造方法

(1) 设备。

热压罐:RYG-23型,西安龙德科技发展有限公司;

电弧喷涂设备:QD-9-300型,上海戎实喷涂机械有限公司;

真空泵:利莱森玛电机科技(福州)有限公司。

(2) 准备。

将制造主反射面所需的内嵌件齐套清理干净表面,水砂纸打磨掉主反射面模胎工装表面上锈迹,用刮板清理掉主反射面模胎及工装工作面上的多余物,棉纱蘸丙酮擦拭干净、晾干。

金属零件脱模剂涂敷。清理干净膜胎体、环中心定位工装、铺层边缘定位工装、插销、填充加压工装上的灰尘和污物,晾干,将各工装在热压罐中50℃烘2h,用蘸有700NC脱模剂的棉布均匀涂擦模具工作面3遍,每遍间隔30min,晾干。

非金属零件脱模剂涂敷。清理蜂窝填充工装、后蒙皮加压工装、嵌件补强修型工装、嵌件补强加压工装表面,用室温固化环氧腻子修补工装表面的缺陷,室温固化24h后,修整光滑。用蘸有700NC脱模剂的棉布足量涂擦各工装的表面5遍,每遍间隔30min,晾干。

备料。预浸料、胶膜和发泡胶使用前从冰柜中取出后,保持密封,室温放置至密封袋表面无冷凝水,方可打开包装,裁切料样、分拣发泡胶。

(3) 金属反射层的制备。

主反射面的反射面采用铝质反射层,采用金属喷涂层固化转移工艺技术实现反射层制备。

(4) 内蒙皮成型。

铺层。按照胶膜、 $0^\circ/0^\circ/-45^\circ/45^\circ/90^\circ/90^\circ$ 铺层。

真空封装。预浸料表面依次铺1层透胶布、1层无孔膜、法兰加压工装、2层透气毡、1块真空薄膜,为了避免固化后的表面皱褶,无孔膜、透气毡均应铺平,皱褶部位裁剪开,搭接铺平,布置真空系统,袋膜边角离开产品料坯剪出小孔,安放2组真空接头,密封,抽真空至真空度不低于 -95 kPa ,关闭真空保压10分钟内真空压下降不大于 10 kPa 。

固化参数控制。升降温速率为 $1^\circ\text{C}/\text{min}$,压力为 0.4 MPa , 130°C 保温3 h。

(5) 粘接蜂窝芯。

按照下料工装载切胶膜、蜂窝芯,打磨修整掉模胎工作型面部位的预浸料表面凸起,清理干净浮灰,棉纱蘸丙酮清理干净污物,晾干,采用等角度旋转法铺贴胶膜一层于预浸料表面,胶膜破损部分修补完整,采用等角度旋转法铺贴蜂窝芯材,一层于胶膜表面,接缝采用条状发泡胶填充,保持蜂格正六边形状,蜂窝芯材表面无皱褶铺1块透胶布、蜂窝填充工装、1块透气毡、1块真空薄膜;按以上操作进行真空封装。

固化参数控制。升降温速率为 $1^\circ\text{C}/\text{min}$,压力为 0.15 MPa , 130°C 保温2.5 h。

(6) 填充蜂窝芯。

将冷冻状态的块状填充发泡胶J-47D2人工粉碎成 $\phi 2$ 以下的粉状,按照定位线与螺钉孔径向重合的方式放置蜂窝填充工装,固定后,将蜂窝芯外露部分用粉碎好的填充发泡胶填充饱满,对位安装蜂窝填充加压工装,按以上操作进行真空封装。

固化参数控制。升降温速率为 $1^\circ\text{C}/\text{min}$,压力为 0.15 MPa , 130°C 保温2.5 h。

(7) 外蒙皮制备。

按照胶膜/ $90^\circ/90^\circ/45^\circ/-45^\circ/0^\circ/0^\circ$ 铺层,真空封装。

固化参数控制。升降温速率为 $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$,压力为 0.2 MPa , 130°C 保温3 h。

(8) 粘接连接支座。

先安装工装,用螺母加垫圈紧固后将定位盘限位安装于膜胎体顶部的矩形定位体上,下底面与连

接套上表面接触,接触面无异物夹杂,将4件嵌件定位画线工装分别安装于支柱顶端,依据工装划线确定嵌块安装位置的边界,去除上述圆圈内的外蒙皮,清理干净内部蜂窝芯,直至内蒙皮完全露出,将4只嵌块分别配装于支柱顶部螺栓,进行安装和加固。

(9) 脱模。

去除辅料拆卸法兰部位的插销,用铲刀、薄环氧树脂板等从四周均匀、缓慢将产品脱模,不可使用蛮力,不得损伤产品表面、修边,打磨去除制件边缘的毛刺、飞边、胶瘤,修补缺陷,保证外表面光滑,无缺损。

3.2 结果验证

(1) 等刚度力学性能验证方案。

主反射器使用时主要受风载荷,要求在 45 m/s 风载下变形可恢复,故采用砂型模拟 45 m/s 风载的压力状况,将反射面和天线罩连接在一起,模拟其实际结构承载状况,测量天线二次反射面形变位移大小及在卸载后能否恢复,若恢复就认为变形在弹性变形范围内。

图9~图12为第一次、第二次加载和卸载的试验曲线。可见,通过两次加载、卸载的试验曲线,考虑复合材料恢复过程存在一定的延迟,第一次卸载后天线残余 0.075 mm 的位移,但是在第二次卸载后,天线完全恢复之前的形变,可以认为天线整体在 45 m/s 风载作用下发生的是完全弹性变形。

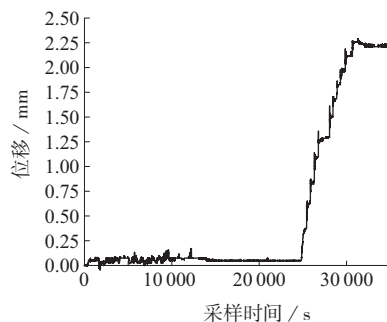


图9 第一次加载

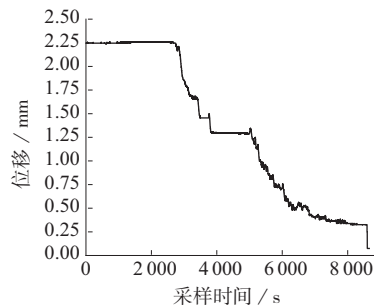


图10 第一次卸载

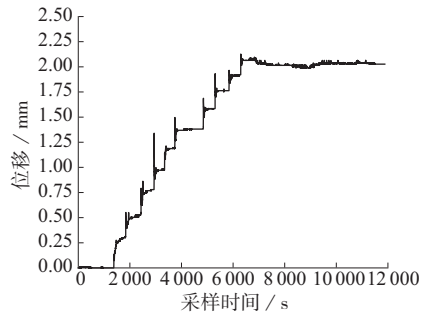


图 11 第二次加载

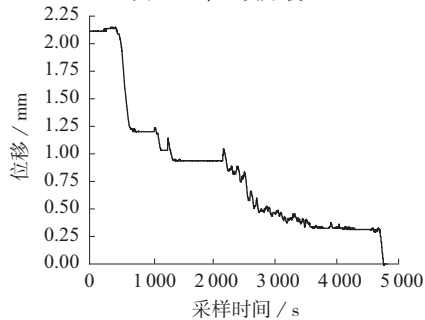


图 12 第二次卸载

(2) 主反射面连接支座粘接变形验证方案。

实施方案:采用室温固化的J-133,J-135 胶粘剂混合短玻纤作为填充料进行优选试验。主反射面连接支座采用室温固化粘接定位和二次补强,通过研制嵌块安装、定位、成型工装,实现粘接部位的一致性。

验证方案:被测主反射面通过支杆固定在高频箱上,其中加载圆筒的法兰放置在被测主反射面法兰上,传力天线罩直接放置在加载圆筒中,其只起传力的作用不起其余任何作用,圆筒周边通过防倾覆支腿固定四周,放置在圆筒内加载时其发生倾覆,最后通过在被测主反射面的支座外表面张贴靶标点,图 13 为测点分布图。

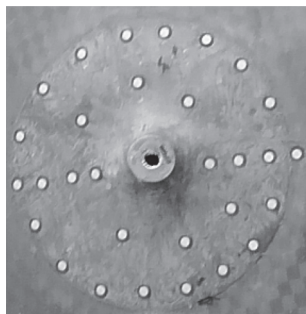


图 13 测点分布图

通过摄影测量的方式测量 4 个支撑位置的形变,依此验证支撑位置加工的一致性,结果见表 2 和表 3。

由表 2 可以看出,在 45 m/s 风载作用下,支撑位置在 3 个方向均有位移, X 方向和 Y 方向的位

移稍小, Z 方向稍大,但是 Z 方向的最大位移都在 0.07 mm 以下,除去弹簧垫片及部分刚体位移可以认为支撑脚位置基本不发生位移。

表 2 内侧点形变测试结果

测点	第一次测试			第二次测试		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0.041	-0.034	0.054	0.019	-0.024	0.06
2	0.051	-0.073	0.059	-0.001	-0.05	0.069
3	0.068	-0.059	0.053	0.033	-0.055	0.051
4	0.06	-0.049	0.059	0.039	-0.063	0.064
5	0.046	-0.01	0.059	0.028	-0.035	0.066
6	0.034	0.018	0.03	0.017	-0.008	0.063
7	0.035	0.028	0.081	0.02	0.007	0.062

表 3 外侧点形变测试结果

测点	第一次测试			第二次测试		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0.022	0	0.072	0.008	0.005	0.074
2	0.032	-0.033	0.057	0.017	-0.02	0.061
3	0.06	-0.086	0.05	0.04	-0.06	0.053
4	0.056	-0.134	0.049	0.059	-0.098	0.039
5	0.104	-0.153	0.056	0.078	-0.124	0.045
6	0.082	-0.091	0.056	0.07	-0.099	0.037
7	0.065	0.007	0.061	0.054	-0.045	0.06
8	0.041	0.064	0.082	0.033	0.011	0.072
9	0.026	0.089	0.075	0.015	0.048	0.07
10	0.034	0.065	0.064	0.01	0.05	0.094

通过表 3 可以看出,相比较于内侧点,外侧点的位移稍大于内侧点各点的位移,总体还是 X,Y 方向的位移较小, Z 方向位移稍大,排除实验测试误差及装配误差可以认为变形在 0.08 mm 以下。

(3) 型面精度验证。

图 14 为待测主反射面。采用摄影测量法,精度可达到 0.01 mm,在反射面内表面粘贴的靶标点数量为 231 个,通过 5 次多项式拟合^[13-15],见图 15,以满足拟合精度的要求,最后根据拟合面求出实际反射面的均方根精度。

评价判据:金属化反射面型面精度均方根误差 ≤ 0.2 。

完成三件反射面的生产,其型面精度与理想抛物面的均方根误差分别为 0.02942,0.08178,0.1284。

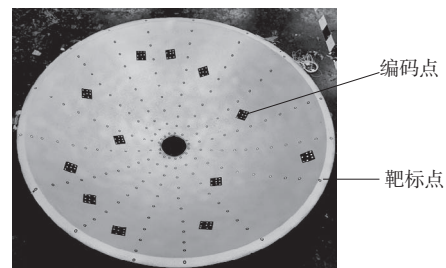


图 14 待测主反射面

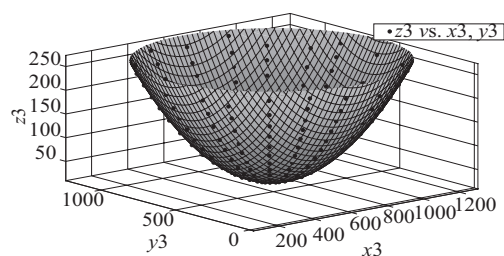


图15 反射面1拟合面

4 结论

(1) 采用等刚度对称铺层可有效减少复合材料制件成型应力,提高成型型面精度。

(2) 对复合材料制件结构突变部位采取单独二次胶接的方法成型是减少成型应力集中,从而降低对型面成型精度影响的一种有效方法。

(3) 制造过程中对复合材料制件等刚度对称铺层实施有效控制,有利于制件型面精度的控制。

参考文献

- [1] 蔡闻峰. 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. Present situation and development direction of forming process of resin-based carbon fibre composite[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(10):54-57.
- [2] 王世勋, 石玉红, 张希, 等. 复合材料格栅结构研究进展与应用[J]. 宇航材料工艺, 2017, 47(1):5. DOI:10.12044/j.issn.1007-2330. 2017.01.002.
Wang Shixun, Shi Yuhong, Zhang Xi, et al. Research progress and application of composite grid structure[J]. Aerospace Material Technology, 2017, 47(1):5. DOI:10.12044/j.issn.1007-2330. 2017.01.002.
- [3] Zeng X, Raghavan J. Role of tool-part interaction in process-induced warpage of autoclave-manufactured composite structures[J]. Composite: Part A, 2010, 41(9):1174-1183.
- [4] 罗永康, 李炜, 胡红, 等. 碳纤维复合材料在风力发电机叶片中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2008, 24(11):53-57.
Luo Yongkang, Li Wei, Hu Hong, et al. Application of carbon fiber composites in wind generator blades[J]. Power System and Clean Energy, 2008, 24(11):53-57.
- [5] 荣吉利, 夏鹏, 冯志伟, 等. 抛物面天线反射面参数化建模与热变形优化分析[J]. 北京理工大学学报, 2017, 37(10):998-1002.
Rong Jili, Xia Peng, Feng Zhiwei, et al. Parabolic antenna reflector parametric modeling and thermal deformation optimization analysis[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2017, 37(10):998-1002.
- [6] 李君, 姚学萍, 刘应华, 等. 复合材料T型整体化结构固化翘曲变形模拟[J]. 复合材料学报, 2009(1):156-161.
- Li Jun, Yao Xueping, Liu Yinghua, et al. Simulation of curing warpage deformation of T-shaped integral composite structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2009(1):156-161.
- [7] 沃西源, 房海军. 碳/环氧树脂复合材料C波段天线反射面研制[J]. 高科技纤维与应用, 2008, 33(2):1-5.
Wo Xiyuan, Fang Haijun. Development of C-band antenna reflector for carbon/epoxy composite materials[J]. Hi-Tech Fibers and Applications, 2008, 33(2):1-5.
- [8] 杜善义, 章继峰, 张博明. 先进复合材料格栅结构(AGS)应用与研究进展[J]. 航空学报, 2007, 28(2):419-424.
Du Shanyi, Zhang Jifeng, Zhang Boming. Application and research progress of advanced composite grille structure (AGS)[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2007, 28(2):419-424.
- [9] 姚科, 杨军, 韦娟芳. 星载固定面反射天线热变形分析[J]. 低温建筑技术, 2016, 38(2):67-69.
Yao Ke, Yang Jun, Wei Juanfang. Thermal deformation analysis of spaceborne solid surface reflective antenna[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2016, 38(2):67-69.
- [10] Arao Y, Koyanagi J, Utsunomiya S, et al. Analysis of thermal deformation on a honeycomb sandwich CFRP mirror[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2017, 37(10):998-1002.
- [11] Frulloni E, Kenny J M, Conti P, et al. Experimental study and finite element analysis of the elastic instability of composite lattice structures for aeronautic applications[J]. Composite Structures, 2007, 78(4):519-528.
- [12] 鞠金山, 王亚峰. 碳纤维天线反射面的热变形仿真[J]. 雷达科学与技术, 2009, 7(4):321-324.
Ju Jinshan, Wang Yafeng. Thermal deformation simulation of carbon antenna reflector[J]. Radar Science and Technology, 2009, 7(4):321-324.
- [13] 钱宏亮, 刘岩, 范峰, 等. 65 m 天线结构主反射面面形精度分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11):3027-3033.
Qian Hongliang, Liu Yan, Fan Feng, et al. Precision analysis of main reflector surface of 65 m antenna structure[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(11):3027-3033.
- [14] 张新盼. 应用数字工业摄影测量实现天线反射体姿态恢复[J]. 宇航计测技术, 2017, 37(6):16-21.
Zhang Xinpan. Using digital industrial photogrammetry to restore antenna reflector attitude[J]. Journal of Astronautic Metrology Measurement, 2017, 37(6):16-21.
- [15] 程志峰, 金超, 孙伟. 数字摄影测量在大型天线主面测量中的应用[J]. 河北省科学院学报, 2019, 36(1):47-50.
Cheng Zhifeng, Jin Chao, Sun Wei. Application of digital photogrammetry in main surface measurement of large antenna[J]. Journal of the Hebei Academy of Sciences, 2019, 36(1):47-50.