

# 遥感相机复合材料镜筒的工程化研究

## Study on Engineering Application of Composites Lens Barrel in Remote Sensing Camera

北京空间机电研究所 章令晖 周宏志 李明珠  
中国空间技术研究院神舟学院 韩宇

**[摘要]** 本文介绍了一种碳纤维复合材料/铝蜂窝夹层结构遥感相机镜筒的研制技术,针对镜筒的结构特点和技术要求,重点讨论了材料选择、力学分析、工艺方案及主要工艺过程及措施。研制结果表明,该镜筒具有耐湿热及尺寸稳定性好、相比传统的方案减重效果明显等优点。

**关键词:** 复合材料 遥感相机 镜筒 设计与制造工艺

**[ABSTRACT]** The design and manufacture process of CFRP/ aluminum honeycomb sandwich structure lens barrel in remote sensing camera are introduced. Material selection, mechanical analysis, technique, technical difficulties and its solutions are discussed mainly, based on the structure characteristic and requirement of baffle. The results show that the composites lens barrel has good hygrothermal resistance properties and dimensional stability. The weight of composites lens barrel can be reduced greatly, comparing with conventional structure.

**Keywords:** Composites Remote sensing camera Lens barrel Design and manufacture process

随着空间遥感技术的发展,高分辨率、长焦距、大视场的对地观测相机推陈出新,对相机结构轻量化和稳定性的要求也越来越高。镜筒是相机的主要承力部件,其性能直接关系到相机的性能甚至功能的实现。因此,镜筒要有足够的强度和刚度以及良好的各向等刚度特性,还要有良好的尺寸稳定性,以确保能经受卫星发射时震动、过载冲击和噪声等恶劣环境的考验,以及在卫星在轨运行时稳定地工作<sup>[1-3]</sup>。

相机结构通常采用比刚度较高的铝合金、镁合金、钛合金及复合材料<sup>[2]</sup>。本文介绍了一种采用碳纤维/氰酸酯复合材料蒙皮-铝蜂窝夹层结构镜筒的研制技术。

### 1 主要技术要求

镜筒通过两端的法兰分别与承力环和热门连接,最大外径  $\phi 1480\text{mm}$ ,高  $860\text{mm}$ ,结构形式如图 1 所示。

主要技术要求如下:

重量小于  $35\text{kg}$ ;在负载情况下,镜筒的一阶模态不小于  $180\text{Hz}$ ;重力引起的挠度小于  $0.1\text{mm}$ ;热膨胀系数小于  $3 \times 10^{-6}\text{K}^{-1}$ ;机械接口要求;在真空中材料挥发性能满足总质损小于  $1\%$ ,收集的可凝挥发物小于  $0.1\%$ 。

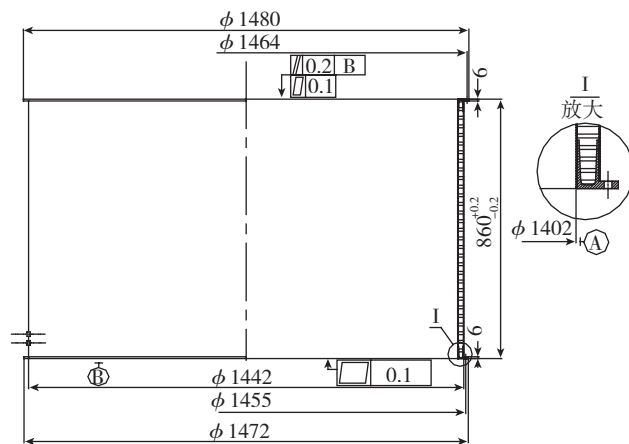


图1 镜筒结构简图

Fig.1 Structure of lens barrel

## 2 结构设计

### 2.1 材料选择及性能试验

与薄壁加筋壳相比,蜂窝夹层圆筒结构具有较高的整体刚度、抵抗失稳的能力强,在同等结构质量的情况下材料的利用效率较高,容错性好可适当增添机械接口,因此镜筒采用蜂窝夹层圆筒结构形式。

空间光学系统结构除必须具有密度小、刚度和强度高、断裂韧性高等特性外,还须满足光学要求,如尺寸精度高、干湿及热稳定性好、高热导等。目前,航天器复合材料结构所用的树脂基体多为环氧树脂,存在韧性差、吸湿性大等缺点,增韧环氧能够改善复合材料微裂纹的产生,但湿热稳定性较差。氰酸酯具有优良的电绝缘性能、极低的吸湿率、较高的耐热性、优良尺寸稳定性、良好的力学性能以及与环氧树脂相近的工艺适应性<sup>[4]</sup>,详见表 1。因此,采用  $177\text{℃}$  固化氰酸酯树脂作为镜筒蒙皮的基体材料。

表1 氰酸酯树脂与环氧树脂的比较

性能	环氧树脂	中温固化氰酸酯	高温固化氰酸酯
热膨胀系数	中/高	中	中
吸湿性	高	低	低
固化收缩率	中/高	低	低
低温特性	差	很好	好
工艺稳定性	很好	中	好

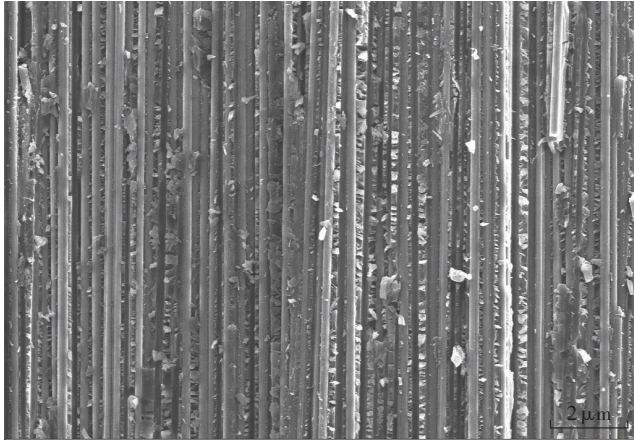


图2 M46J/氰酸酯复合材料SEM照片

Fig.2 SEM micrograph of M46J/cyanate ester composites

表2 M46J/氰酸酯单向板性能

拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa	弯曲强度 /MPa	弯曲模量 /GPa	泊松比	层间剪切强度 /MPa	±45° 面内剪切强度 /MPa	±45° 面内剪切模量 /MPa
2070	262	1263.4	164.2	0.27	64.9	59.6	4.69

根据实际承载情况,面内载荷是作用在外镜筒上的主要载荷,而面内载荷主要由蒙皮承受。此外,外镜筒的横向刚度、轴向刚度及扭转刚度,也主要取决于夹层结构蒙皮的力学性能。M46J高模量碳纤维不仅具有较高的模量、强度和热导率以及较低的热膨胀系数,而且与氰酸酯树脂的界面状态良好(图2)。综合考虑,蒙皮采用M46J/氰酸酯复合材料,其主要性能详见表2。

蜂窝芯的壁厚、边长及高度决定着镜筒的临界失稳载荷,在满足重量前提下采用LF2Y 0.04mm×4mm有孔铝蜂窝。

蒙皮与蜂窝芯子的界面是夹层结构的薄弱区域,提高粘结强度才能发挥夹层结构高比刚度、比强度的特点。为减少热变形对筒体形位精度的影响,选择90℃固化的J-78胶粘剂。

## 2.2 铺层设计

复合材料是一种各向异性的材料,尽管纵向性能优异,但横向性能和层间性能较差。因此,如何合理地进行铺层设计,扬长避短,是复合材料结构设计中的重要

环节<sup>[5]</sup>。原则上说,纤维铺层方向应根据载荷条件来确定。由于蒙皮的分瓣成型,为了避免拉剪耦合和拉弯耦合引起的翘曲变形,同时降低操作难度,内、外蒙皮皆选择 $[+\theta/-\theta/0/-\theta/+\theta]$ 的铺层方式, $0^\circ$ 方向为镜筒轴向。

为了获得较好的热物理特性,采用经典层合板理论

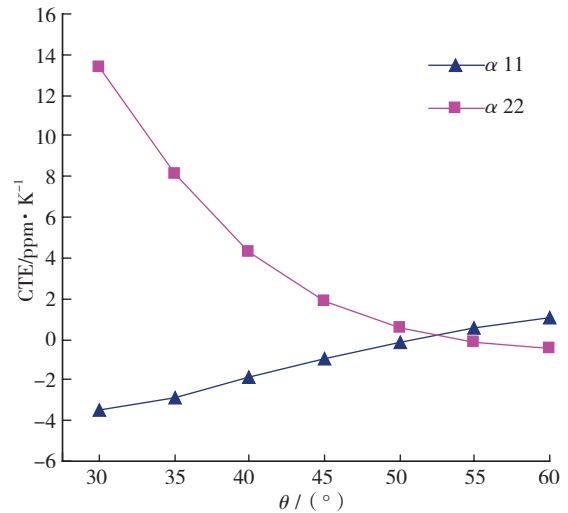


图3 热膨胀系数随铺层角度的变化

Fig.3 Change of coefficient thermal expansion with orientation angles

计算了不同角度下的热膨胀系数,如图3所示。

可以看出,当θ值大于40°时,镜筒轴向和环向的热膨胀系数较为理想。

考虑到45°层能够提高承担剪切载荷的能力,最终铺层形式确定为 $[+45/-45/0/-45/+45]$ ,单层厚度0.2mm,蒙皮总厚度1mm。

## 2.3 力学分析

假定夹芯能够抵抗横向剪切变形并具有一定的面内刚度,蒙皮服从克希霍夫(kirchihoff)假设,忽略其抵抗横向剪应力的能力,则铝蜂窝芯可以等效为一均质的厚度不变的正交异性层<sup>[6-7]</sup>。在MSC/Patran中建立镜筒

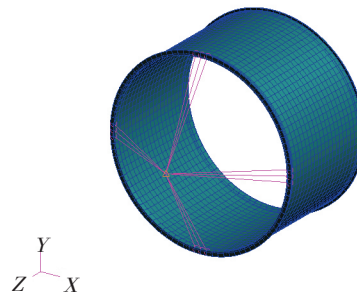


图4 镜筒有限元模型

Fig.4 Finite element model of lens barrel

的有限元模型,如图4所示。夹层结构简化为4节点复合材料壳单元,上、下端框简化为2节点梁单元。遮光罩及热门组件等简化成一个质点,质心距外镜筒上端面

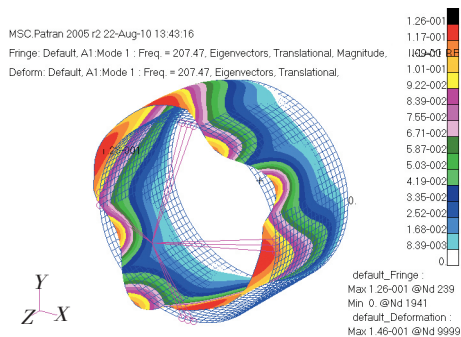


图5 镜筒1阶振型

Fig.5 One modal shapes for lens barrel

430mm。

在负载且与主承力框环连接点固支的状态下,镜筒的一阶频率为 207.47Hz,一阶振型如图5所示。

分别沿 X 方向和 -Z 方向施加 1g 惯性载荷,计算外镜筒的静力变形,结果如图6所示。

可以看出,镜筒在底部固支的状态下,重力引起的变形为: X (或 Y) 方向最大变形为 0.0048mm, Z 方向最大变形为 0.0015mm。

### 3 制造工艺及产品质量情况

#### 3.1 工艺方案

对于蜂窝夹层圆筒结构的制造工艺,主要有二次固化法和共固化法<sup>[8-9]</sup>。由于镜筒的蒙皮较厚,成型过程既要使蒙皮充分受压变得致密,又要避免蒙皮在蜂窝格

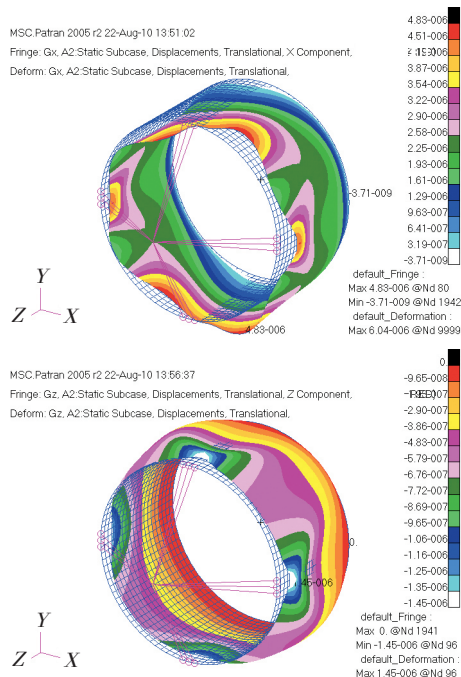


图6 镜筒在重力作用下的变形

Fig.6 Deformation of lens barrel under gravity load

内架空。为了保证蒙皮的性能和易于组装,选择传统的二次固化法,其主要工艺流程如图7所示。

#### 3.2 主要工艺过程及措施

##### (1) 预浸无纬布制备。

预浸料是产品制造过程中重要的中间材料,其性能优劣直接影响着产品的质量。M46J/ 氰酸酯预浸无纬布采用滚筒式排线浸胶机制备,厚度 0.2mm,由于 M46J 高模量碳纤维的单丝直径小、丝束大,且经高度石墨化,表面光滑、不易浸胶,因此制备预浸无纬布有一定难度,尤其是厚度、树脂含量及表面质量不易控制。在制备预浸无纬布过程中,要严格控制胶液比重、滚筒转速、螺距等工艺参数,稳定纤维张力,保持碾轮的

压力在合适的范围,减少纤维的损伤,以确保预浸料的各项技术指标,才能保证最终产品的表面质量和力学性能。

##### (2) 蒙皮制备。

镜筒的蒙皮较厚,各叠层材料在吸胶压实的过程中沿厚度方向的压缩量较大。由于受压过程中树脂的流动,碳纤维

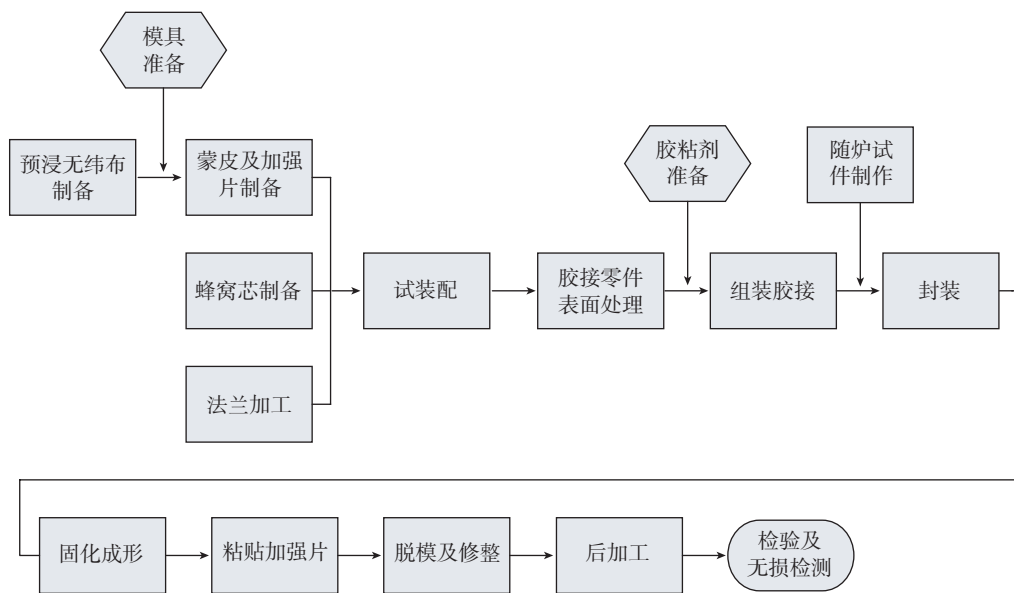


图7 镜筒制造工艺流程

Fig.7 Manufacture process chart of lens barrel

容易受影响而改变方向。为了避免这种现象,可以在铺叠数层后增加一次预压实过程。这可以保证碳纤维的角度方向,减小固化后的变形,还可以提高蒙皮厚度的均匀性,降低孔隙率。

在组装胶接过程中,为了使法兰能够顺利安装,以及蒙皮与蜂窝芯紧密贴合提高其胶接性能,将内外蒙皮均分成数瓣,相邻两瓣之间采用楔形口搭接,如图8所示。

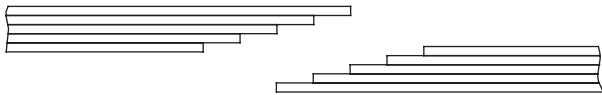


图8 蒙皮搭接示意图

Fig.8 Overlapping diagram of skins

(3) 组装胶接。

法兰与主体夹层结构的连接也很重要,考虑到内外蒙皮均已等分成数瓣,降低了装配过程的难度,因此法兰采取与主体结构一体胶接成型的工艺方法。通过在模具两端增加补偿量的方法,解决法兰宽度尺寸不稳定的问题。

由于法兰胶接面为封闭圆柱体,其与蒙皮间隙过小则装配困难,反之间隙过大必然脱粘。在组装胶接过程中,采用温差法,可提高装配质量,也能够杜绝脱粘缺陷。

(4) 固化成形。

由于模具为铸铁材料,受热时模具和端框的膨胀量相同;在模具和端框的装配间隙合适并装配时预先加压的情况下,筒体固化成型过程中,模具始终对内蒙皮和端框施加压力,使端框与蒙皮的脱粘现象得到有效的改善。具体固化工艺如图9所示。

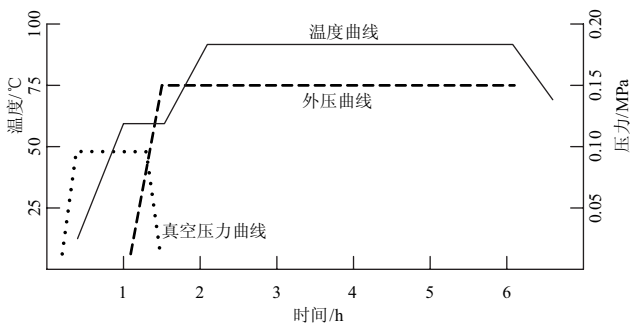


图9 镜筒固化工艺曲线

Fig.9 Curing curve of lens barrel

(5) 后加工。

考虑到固化成形过程中的变形,为了保证镜筒的形位精度,法兰在零件状态不加工各连接孔,端面预留加工余量,待镜筒固化成形后再加工两端面并打孔。

3.3 产品质量情况

镜筒固化成型后,对尺寸、形位公差及胶接质量

等进行了检验,筒高度、内外径、端面的平面度和平行度、端面与筒轴线的垂直度等均满足设计要求,重量31.3kg,经无损检测未发现胶接缺陷。

4 结束语

镜筒作为光学遥感系统最大的部件,如何兼顾光学遥感器的特殊要求和复合材料特点是工程化应用中要重点考虑的问题。本课题采用两次固化法制造了碳/氰酸酯蒙皮-铝蜂窝夹层结构镜筒,其各项性能满足设计要求,与传统的金属方案或者碳纤维复合材料薄壁加筋结构相比,尺寸稳定性和容错性好,减重效果明显。

参考文献

- [1] 谭维焯,胡金刚. 航天器系统工程. 北京:中国科学技术出版社,2009.
- [2] 陈世平. 空间相机设计与试验. 北京:宇航出版社,2003.
- [3] 林再文,刘永琪,梁岩,等. 碳纤维增强复合材料在空间光学结构中的应用. 光学精密工程, 2007, 15(8):1181-1184.
- [4] 王晓洁,梁国正,张伟,等. 氰酸酯树脂在航空航天领域应用研究进展. 材料导报, 2005, 19(5):70-72.
- [5] 盛磊,陈萍. 碳纤维复合材料在光学遥感器中的应用探讨. 航天返回与遥感, 2008, 29(3):33-37.
- [6] 夏利娟,金成定,汪庠宝. 卫星结构蜂窝夹层板的等效计算. 上海交通大学学报, 2000, 37(7):999-1001.
- [7] 徐胜今,孔宪仁,王本利,等. 正交异性蜂窝夹层板动、静力学问题的等效分析方法. 复合材料学报, 2000, 17(3):92-95.
- [8] 益小苏,杜善义,张立同. 复合材料手册. 北京:化学工业出版社,2009.
- [9] 高慎斌,杨庭相,赵仪,等. 卫星制造技术(下). 北京:宇航出版社,1998.

(责编 三丰)

(上接第76页)

参考文献

- [1] 高宏志,周贤宾. 新淬火状态铝合金板的成形极限. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(9):1083-1086.
- [2] 高宏志,周贤宾. 新淬火状态硬铝合金板的成形性能及数值模拟[J]. 航空材料学报, 2008, 28(5):27-31.
- [3] 李小强,李东升. 淬火状态2B06铝合金板塑性成形各向异性行为研究. 塑性工程学报, 2008, 15(6):29-33.
- [4] Ashbridge M T J, Leacock A G. The effect of solution heat treatment and natural ageing on the yield characteristics of 2024-O aluminum alloy. American Society of Mechanical Engineers, 2000, 11 :675-686.
- [5] Wagoner R H, Li K P. Simulation of springback. Mechanical Sciences, 2002, 44:103-122.
- [6] 刁法玺,张凯峰. 板料V形弯曲回弹的动力显式有限元分析. 材料科学与工艺, 2002, 10(2):171-174.
- [7] 林巨才. 现代硬度测量技术及应用. 北京:中国计量出版社, 2008:180-187.

(责编 良辰)