

某新型航天器返回舱舱门共形天线研制

蔡良元 白树成 曲建直 张 华

(北京航空材料研究院 北京 100095)

李德洪

(中国航天科技集团空间技术研究院北京空间飞行器总体设计部 北京 100086)

文 摘 介绍了通过对返回舱舱门共形天线的材料和结构选择,结合热压罐和对模成型工艺方法研制了一种舱门共形天线。该天线已通过各项性能测试,性能稳定,已进行了装船,满足设计要求。

关键词 共形天线,泡沫夹层结构,微带

A Study of Return Module Hatchdoor Conformal Antenna

Cai Liangyuan Bai Shucheng Qu Jianzhi Zhang Hua

(Institute of Aeronautical Materials Beijing 100095)

Li Dehong

(ISSE of Chinese Academy of Space Technology Beijing 100086)

Abstract Material and structure selection of return module hatchdoor conformal antenna is introduced in this paper. An excellent return module hatchdoor conformal antenna is developed by combining autoclave process and match die process methods. The antenna has passed a series of property tests, and has been fixed to a experimental module, which shows stable properties and meets design requirements.

Key words Conformal antenna, Foam sandwich structure, Microstrip

1 前言

返回舱舱门共形天线^[1]应用于新型航天飞行器上,既作为返回舱的舱门主要部件,又作为返回时的天线使用。作为复杂的电信器件,返回舱舱门共形天线承担语音通讯、国内救援信标(供救援直升机搜索用)、国际救援信标(供国际救援卫星定位搜索用)、下行电视图像等通讯功能,故所用的材料须有良好的电性能,且材料的组成、厚度及工艺制造精度须严格控制,以满足其电信要求;作为返回舱的舱门主要部件,该制件须有高隔热性和结构强度的稳定性,隔离返回时由于高速产生的热量,保持返回舱内温度,保障宇航员的生命安全。该舱门天线有三个

工作频点,比通常的舱门天线多出一到二个工作频点,增大了通讯容量,但给制造上带来了很大的难度,要求工艺控制非常严格,调试出三个频点导致组件中的零件胶接步骤复杂,给舱门天线的整体胶接带来了相当大的工艺难度。作为航天返回舱器件,必须在大温差(-100~180)、高空气动力载荷、大压差(0.13 MPa)下工作。故为了保证该器件在恶劣的环境条件下保持良好的电性能稳定、舱门结构强度及保温隔热性能^[2],设计对结构、材料及材料匹配、制造工艺及组装精度等提出了非常严格的要求。

2 返回舱舱门共形天线结构和技术要求

返回舱舱门天线的基本结构形式为双层微带形

收稿日期:2000-06-01

蔡良元,1971出生,工程师,主要从事功能复合材料的研究工作

式^[3,4],双层金属微带贴片均选用0.4 mm厚的不锈钢冲压成型。上层和下层介质基片均选用由石英纤维增强树脂基复合材料制成蒙皮的WF110泡沫A夹层结构,介质基片都装配金属微带贴片,最后胶接于舱体内板上,体系中有许多预埋件,见图1。

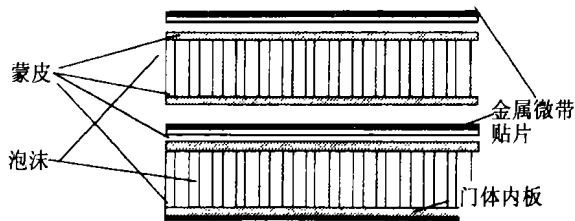


图1 返回舱舱门共形天线结构示意图

Fig. 1 Structure sketch of return module hatchdoor conformal antenna

主要的技术要求如下。

(1) 舱门天线的工作频率范围为220 MHz~320 MHz,有三个工作频点。

(2) 介质材料的热导率 $0.042 \text{ W/m}\cdot\text{K}$,使用温度 $-100 \sim 180$ 正常工作,瞬时温度500 天线不破坏。

(3) 所用材料电性能 $\epsilon_r / 0.01$, $\text{tg} \delta 0.01$ 。

(4) 蒙皮:剪切强度 40 MPa ,弯曲强度 450 MPa ,弯曲模量 20 GPa ;夹芯材料:剪切强度 1.1 MPa ,剪切模量 $E = 50 \text{ MPa}$ 。

(5) 制件不存在异常缺陷。

(6) 电压驻波比:确保频点1、3的 $\text{VSWR} < 2.0$; 兼顾频点2的 $\text{VSWR} < 3.0$ 。

(7) 制件须通过空间环境试验性能试验等。

3 试验部分

3.1 材料选择

我们根据返回舱舱门天线的技术要求,选定了该舱门天线的材料体系,确定了材料的结构形式,舱门天线所包含的组件、构成材料和结构形式。

3.1.1 顶层微带贴片夹层微带贴片

顶层微带贴片夹层微带贴片为1Cr18Ni9Ti不锈钢片。

3.1.2 上层介质基片和底层介质基片

介质基片的结构形式为A夹层结构,蒙皮材料为石英布/双马树脂复合材料,夹芯材料为WF110泡沫,蒙皮与夹芯材料用SY-14胶膜胶接。

宇航材料工艺 2000年 第5期

3.1.2.1 蒙皮材料

根据制件耐高温性和电性能要求,选择石英布增强4501A改性耐高温的双马来酰亚胺树脂作为蒙皮材料^[5],4501A改性双马来酰亚胺树脂主要性能如下。

弯曲强度: 112 MPa (RT), 70 MPa (150°C), 60 MPa (180°C);弯曲模量: 2.9 GPa (RT);电性能(9.375 GHz , RT):介电常数为2.94,损耗角正切为0.0117;玻璃化温度/热变形温度: $274 / 268$ 。

石英玻璃纤维布是一种耐烧蚀材料,尺寸稳定,抗热震性好,高温下强度损失小^[6],其电性能是所有增强纤维中较好的,选用国产石英玻璃布QW140主要性能如下。

密度:纬向 14.2 根/cm ,径向 10.3 根/cm ;单位面积质量: 119.6 g/m^2 ;厚度: 0.143 mm ;拉伸断裂强力($20 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$):纬向 582 N ,径向 525 N ; SiO_2 含量: 99.93% 。

石英布QW140和双马树脂预浸料面板的主要性能如下。

弯曲强度: 570 MPa (RT), 500 MPa (150°C)。

弯曲模量: 22 GPa (RT), 20 GPa (150°C)。

剪切强度: 60 MPa (RT), 45 MPa (150°C)。

电性能(9.375 GHz , RT):介电常数为3.78,损耗角正切为0.005。

3.1.2.2 夹芯材料

选用丙烯酸泡沫材料作为介质基片芯材保证了设计指标的实现,丙烯酸泡沫的主要性能如下。

密度为 $(110 \pm 10) \text{ kg/m}^3$;拉伸强度为 3.7 MPa ;压缩强度为 3.6 MPa ;剪切强度为 1.4 MPa ;弯曲强度为 5.2 MPa ;剪切模量为 70 MPa ;热变形温度为 200°C ;弹性模量为 100 MPa 。

该材料是专门设计用于航空航天材料的,在国外航空航天器上已使用,该材料有如下优点:

(1) 其作为介质材料,均匀性好,介电常数稳定,介电常数一般在1.18左右,损耗角正切为0.0046左右,介电均匀性比玻璃布蜂窝好;

(2) 隔热性能优越,其热导率 -100°C 时为 $0.019 \text{ W/m}\cdot\text{K} \sim 0.021 \text{ W/m}\cdot\text{K}$; $+20^\circ\text{C}$ 时为 $0.028 \text{ W/m}\cdot\text{K} \sim 0.034 \text{ W/m}\cdot\text{K}$; $+140^\circ\text{C}$ 时为 $0.042 \text{ W/m}\cdot\text{K} \sim 0.048 \text{ W/m}\cdot\text{K}$;

(3) 使用该材料制造的介质基片容易进行机加

预埋件孔位,介质基片的加工性能好;

(4)可直接使用胶膜与预埋件胶接,能够保证整个舱门介质介电的稳定性;

(5)用该材料制造的介质基片电性能测试稳定,调试电性能相对简单。

3.1.2.3 胶膜材料

胶膜材料选用 SY-14 高强度膜状环氧结构胶粘剂,其胶接强度高,适用范围广,已在航空航天器件上使用,其主要性能如下。

密度:1.159 g/cm³。

剪切强度: - 55 , 27.5 MPa;室温, 29.4 MPa;150 , 17.7 MPa;175 , 15.7 MPa。

挥发份含量 1.0 %。

厚度:(0.35 ±0.05) mm。

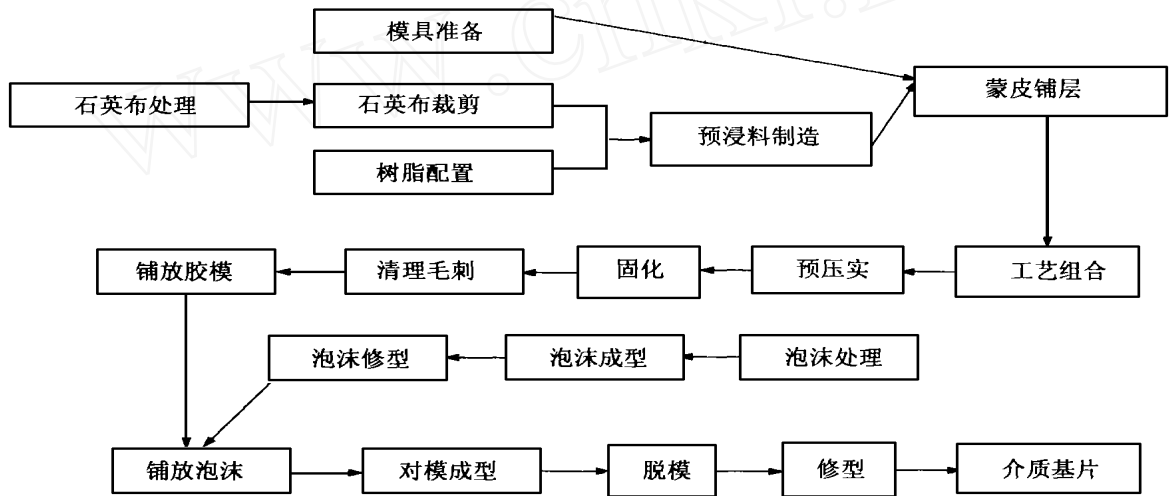
高频馈电组件、热密封组件、埋置紧固件组件、门体内板组件、电性调配圈和平衡阀衬套通过选择已批量生产的民品材料机加工而成。

3.2 研制内容

舱门天线的电性能调试需通过调节夹层和顶层微带贴片结构尺寸来实现,这样不允许舱门天线整体固化。先研制加工介质基片和微带贴片,然后在介质基片和微带贴片上打出相应孔位,与加强套、平衡阀衬套及馈电杆衬套配合,模拟胶接固化好的状态,与门体内板配合调试电性能,确定好夹层微带贴片的尺寸后与门体内板胶接固化,控制流胶,再调节顶层微带贴片结构形状调试电性能^[7],满足电信要求后,螺丝孔涂上防松胶,成为整体舱门天线。

3.2.1 介质基片制造工艺

介质基片有上层和底层两种,设计两套模具,共四片,按 1-1 和 2-2 对模配合,1-1 模具为底层介质基片固化模具,其阳模的球面的直径与门体内板球面的直径一样,2-2 模具的阳模球面直径与 1-1 阴模球面直径 + 0.4 mm(微带贴片的厚度)。介质基片的成型制造工艺如下。



3.2.2 微带贴片研制

金属微带贴片有两种,即顶层和夹层。通过模型试验,确定了顶层金属微带贴片的材料成分和结构尺寸,为调整电参数,将制造多种结构尺寸的顶层微带贴片进行试验,最终选定一种。夹层金属微带贴片,与顶层金属微带贴片制造方法相似,只是不带突起,也做多种结构尺寸进行电测调节。

金属微带贴片采用冲压工艺制造,首先设计制造顶层和夹层微带贴片两套冲压模具和其它工装,该模具和工装适于用在高吨位压机上,用不锈钢板

冲制成顶层和夹层微带贴片。由于冲压制品存在反弹特性,而微带贴片的尺寸精度要求高(以保证它能与介质基片紧密配合),另外用平板不锈钢片冲压成双曲面形状,容易形成皱纹和折痕。为解决之,先严格按制件尺寸进行模具设计,调节高吨位压机的压力,在冲压过程中,根据制件的反弹量对模具进行再修正加工,如此反复,直到制件尺寸达到精度要求。经过多次试验,证明了这种工艺能制造出合格的舱门天线金属微带贴片。

3.2.3 介质基片和微带贴片打孔及顶层微带贴片

的压窝

介质基片和微带贴片孔位的准确性直接影响到装配的精确和电性能的稳定性。为了使介质基片和微带贴片上预埋加强套、平衡阀衬套和馈电杆衬套能够紧密配合,特别是能让平衡阀和馈电杆孔位与门体内板紧密配合,设计了一套钻模和压窝工装,利用该工装按角度和尺寸打好孔。

3.2.4 胶接前电性能调试

进行舱门天线的电性能初步调试,以确定夹层微带贴片的尺寸,为了模仿胶接后的状态,在门体内板上铺放未固化的SY-14胶膜,将装好加强套放置于门体内板上,依次装配好高频馈电组件、热密封组件和平衡阀衬套组件,连接电性能测试头,进行电测试验、拆卸,按规律调节夹层和顶层微带贴片的形状,直到电性能的三个频点在理想位置。

3.2.5 介质基片、组件与门体内板的整体胶接

介质基片、组件与门体内板的整体胶接为关键步骤,由于电性能的要求有的部位胶接,有的部位不能胶接,而且门体内板很多部位不允许流胶,防止胶接后频点的偏移,因此胶接工艺难度大,通过多次试验,对电器元件和门体内板要求洁净的部位进行严格的脱模处理,选定适当的胶接压力、温度段和加压温度点,研制的整体舱门共形天线外观光滑平整,尺寸准确,无贫富胶和分层脱胶等现象。

3.2.6 电性能最终调试

出罐后重新测试电性能,如频点位置不够理想,就先拧出微带贴片的螺钉,调节顶层微带贴片的外径和耳宽,使频点位置完全满足要求。

4 舱门天线试验结果

4.1 鉴定级试验

舱门天线返回舱舱门共形天线随舱门机构一起进行了鉴定级试验,试验次序为:热真空(含交变三次)试验;冲击试验;振动试验;加速度试验;湿热交变试验,试验前后分别进行了真空检漏试验。鉴定试验前后的结果发现,天线在经过鉴定试验后,谐振点基本未变。说明试验对电性能影响很小,也说明舱门天线的材料体系能满足强度要求。从可靠性分析该天线工作在飞船返回着陆段,天线本身与舱门胶接成一体,只要胶接部位不脱落,飞船运行正常,天线即可正常工作,鉴定级试验舱门门体内板与介

质基片等组件胶接未出现松动或裂纹。

4.2 舱门天线的电性能试验

电性能试验舱门天线胶接前后的电性能测试结果非常令人满意,只要对顶层微带贴片稍微调节,三个频点位置无变化,装载于新型航天器上现场测试,测试结果如下:

天线在频点1的VSWR < 1.5;

天线在频点2的VSWR < 2.5;

天线在频点3的VSWR < 1.5。

天线方向图测试结果比较理想,天线工作在频点1时的增益约为5.0 dB,天线工作在频点2时的增益约为4.5 dB,天线工作在频点3时的增益约为5.0 dB,完全符合电性能要求。该舱门天线在180的电性能测试表明在高温下,电性能保持稳定。

5 结论

(1) 确定了舱门天线的材料体系,确定了舱门天线的制造工艺,包括介质基片制造工艺,金属微带贴片的冲压工艺,介质基片及金属微带贴片的打孔工艺和整体胶接工艺。

(2) 通过鉴定级试验说明该材料体系能满足舱门天线的空间环境技术要求。通过电性能试验舱门天线的频点测试和方向图测试,说明此舱门天线能满足电性能的要求,从而说明舱门天线的结构、材料和工艺是合理的。

(3) 确定了电性能调试步骤,掌握了电性能调试规律。

(4) 研制的返回舱舱门共形天线通过了新型试验航天器的考核。

参考文献

- 1 Munson R E. Conformal microstrip antennas and microstrip phased arrays. IEEE Trans. Antennas Propagat, 1974; AP. 22(1): 74 ~ 78
- 2 高技术新材料要览. 中国科学技术出版社, 1993: 587
- 3 Campi R M. Design of macrostrip linear arrays antennas. Proc. Antenna App. Symp., Robert Alerton Park, University of Illinois, Urbana, 1981: 23 ~ 25
- 4 Richard C Johnson third eds. Antenna engineering handbook. Chapter 1993; 7: 7 - 2
- 5 Cory R H. Avionic Radome Material, ADA 007756, 1974
- 6 高技术新材料要览. 中国科学技术出版社, 1993: 507
- 7 毛乃洪等著. 天线测量手册. 国防工业出版社, 1987: 234 ~ 267