

机载大曲率多频段天线罩的研制

温磊 王峰 蔡良元 嵇培军 白树城

(北京航空材料研究院,北京 100095)

文 摘 选用玻璃纤维织物/环氧树脂预浸料以及配套体系材料,采用三步成型的球墨铸铁阴模热压罐固化工艺和专用模具固化蜂窝的方法,研制了机载大曲率、多频段 C 夹层结构天线罩。经过电性能测试和静力试验,结果表明,该罩体的选材、结构设计和工艺过程是可行的。电性能测试中天线罩最小透波率为 84%,全部电参数均满足要求;静力试验中天线罩通过了 200% 设计载荷的加载,满足结构设计要求。

关键词 机载,大曲率,多频段,天线罩,C 夹层结构

Development of Large Curvature Multi-Frequency Airborne Radome

Wen Lei Wang Feng Cai Liangyuan Ji Peijun Bai Shucheng

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

Abstract By applying three steps autoclave cure process with female mold and preimpregnation honeycomb cure process with special mold and selecting glass fabric reinforced epoxy prepreg and corresponding material, a large curvature multi-band airborne C-sandwich radome was developed. The results of electric property testing and static testing show the selection of material, structure design and process are feasible. The minimum power transmission efficiency of the radome is 84%; all parameter meet the requirement. The 200% designing load testing was successful; the radome is in agreement with structure designing specifications.

Key words Airborne, Large curvature, Multi-frequency, Radome, C-sandwich

1 引言

机载天线罩作为雷达系统的组成部分是一种集电气性能、结构强度、刚度、气动外形和特殊功能要求于一身的功能复合材料构件^[1],其作用在于保护雷达的同时也为其提供发射和接收的窗口。

近年来高新技术在航空领域的应用,产生了隐身飞机和机载火控系统的技术革命,相继诞生了有源和无源相控阵雷达、新一代合成孔径雷达、未制导雷达、双基地雷达等^[1],雷达的工作频率逐渐由单频率发展为宽频带,直至多波段全频带^[2]。

要满足这些先进雷达系统的要求,应选用低损耗角正切值和低介电常数的天线罩材料,以减少天线罩对雷达波的吸收和反射,最终达到“最大传输”和“最小反射”的目的^[3]。同时设计天线罩的结构时采用三种途径使得雷达波尽量接近零反射:(1)薄壁结构,一般指天线罩罩壁厚度小于波长的 1/20;(2)多层罩壁结构,常用的多层罩壁结构类型有 A、B、C 型夹层和切比雪夫渐变型等;(3)选择反射面结构^[2,4]。

本文所研制天线罩工作在高中低三种频段,位于飞机的背部,根据气动要求天线罩外型为钢盔型,因此天线罩具有大曲率、多频段透波的特点。为保证天线罩具有较高的强度和飞行可靠性以及优良的电性能,此天线罩选择了多层罩壁结构来实现多频段透波。

2 方案设计

2.1 材料选择

多层罩壁结构的天线罩主要材料包括蒙皮材料、芯材、胶膜和漆层。各种玻璃纤维织物和石英纤维织物广泛运用于天线罩的蒙皮增强材料。石英纤维织物造价约为高强玻璃纤维织物造价的近百倍,其与环氧树脂复合后的损耗角正切和介电常数比高强玻璃纤维织物与环氧树脂复合后的损耗角正切和介电常数仅低 30% 左右。而且石英纤维织物的国产化仍在进行中,性能不稳。因此天线罩采用了国产高强玻璃纤维增强的改性环氧树脂预浸料作为蒙皮材料的原材料。相应的配套材料见表 1。

收稿日期:2010-05-18;修回日期:2010-06-28

作者简介:温磊,1977 年出生,工程师,硕士,主要研究方向为功能复合材料(透波材料)及其制品。E-mail:w_l_ww2007@yahoo.com.cn

Nomex 蜂窝芯的密度比用于热压罐固化工艺的减小 10%。胶膜材料比常规粘接蜂窝结构的胶膜薄 30%，并进行了胶膜载体的选定，测试结果见表 2。结果表明：200 g/m² 尼龙载体的胶膜能够满足使用要求。防静电涂层材料电损耗较大，在保证防静电涂层喷涂连续的条件下，厚度减小到 20–30 μm。

表 1 罩体主要材料

Tab. 1 Main materials of radome

材料	材料类别	ϵ	$\tan \delta$
蒙皮材料	高强玻璃纤维/改性环氧树脂	4.20	0.020
芯材	Nomex 蜂窝芯	1.10	0.003
蒙皮与芯材的粘接	改性环氧胶膜	3.05	0.023
内外表面的	防静电涂层	6.70	0.350
保护层	抗候涂层	3.60	0.030

表 2 胶膜 Nomex 蜂窝滚筒剥离试验结果

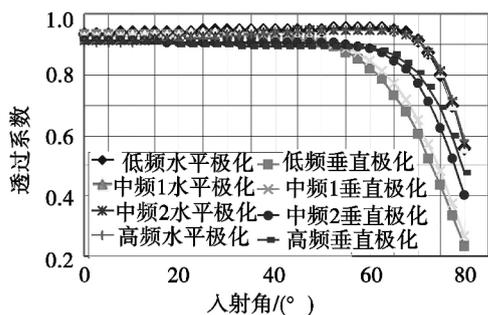
Tab. 2 Test results of Nomex honeycomb sandwich peel of different adhesive N·mm/mm

胶膜类型	下板剥离强度	上板剥离强度
300 g/m ² 无纺布载体	55.3	65.8
300 g/m ² 尼龙载体	81.8	107
200 g/m ² 无纺布载体	37.4	67.4
200 g/m ² 尼龙载体	70.8	81.2

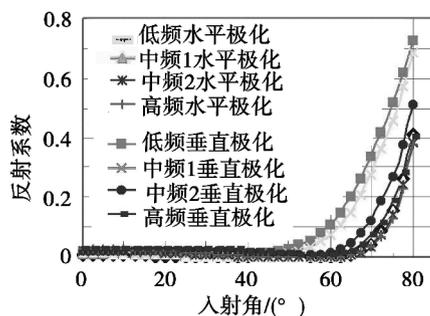
2.2 天线罩结构设计及等效平板试验

天线罩工作在高中低三种频段，根据气动要求天线罩外型为大曲率钢盔型，电波对罩壁的入射角为 0°–60°，罩壁横断面结构形式采用了频带性能较宽、大入射角性能较好的 C 夹层结构，天线罩具体结构由内向外分别是内蒙皮/蜂窝/中蒙皮/蜂窝/内蒙皮/涂层。根据材料选择的结果，利用平板透波率优化仿真软件得到其优化后的 C 夹层横断面结构各层的厚度，天线罩结构采用的是薄蒙皮厚蜂窝的结构；三层蒙皮厚度均小于 1 mm，制造公差控制在 0.05 mm；蜂窝厚度为 4 mm，制造公差控制在 0.2 mm。

为保证电设计的可靠性，制造了一块等效平板验证电设计结果，等效平板测试的功率透过系数和功率反射系数结果如图 1 所示。



(a) 功率透过系数



(b) 功率反射系数

图 1 等效平板的功率透过系数和功率反射系数

Fig. 1 Test results of wave transmission ratio and wave reflection ratio of equivalent radome plate

等效平板电性能测试结果表明：在入射角 0°–60°，在 4 个频段，电磁波的功率透过系数全部在 85% 以上，功率反射系数全部在 10% 以下，满足电性能要求。

3 制造工艺

3.1 罩体成型工艺

罩体成型采用三步成型的球墨铸铁阴模热压罐固化工艺。三次固化分别是：内蒙皮加第一层蜂窝的固化，中蒙皮加第二层蜂窝的固化，内蒙皮的固化。三步成型固化工艺使得可以在每一步固化完成后对固化质量进行检查，控制每层厚度和均匀性。罩体厚度和均匀性是天线罩成型工艺中的重要指标^[5]。

为保证蒙皮的厚度均匀性，固化前对蒙皮进行 60℃ 的预压实。用于罩体固化的蜂窝进行了厚度挑选，并且在完成每层罩体固化后，对蜂窝拼接缝进行打磨，减小蜂窝的厚度阶差，以保证蜂窝厚度的均匀性。

3.2 蜂窝的成型

此天线罩是不规则的大曲面，如图 2 所示，尺寸为：长 1.7 m，宽 1.2 m，深 1 m。采用预浸蜂窝在专用模具上对称分块分层定型固化。专用模具的型面与罩体型面一致。固化后的内外层蜂窝分块对接切割后缝合，然后铺贴到蒙皮上用于罩体固化。

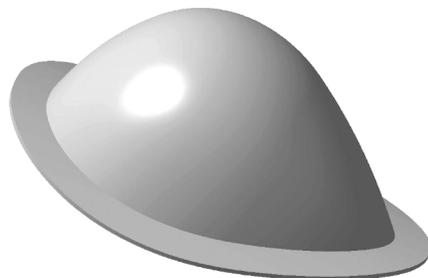


图 2 天线罩外型

Fig. 2 Figure of radome

3.3 固化工艺

对复合材料而言，温度、时间和压力在其固化过程中是很重要的三个因素^[6]。根据此天线罩的结构

特点:周边实芯玻璃钢厚度较厚,胶膜减薄等,升温速率为1-3℃/min,在开始升温后40-50min加压较为适合。具体工艺为:保持真空,升温至模具所测最高温度60℃,加压至(0.3±0.02)MPa,最后升温至模具

所测最低温度为(130±5)℃时保温120min。

4 结果及分析

4.1 随炉件力学性能

单体随炉件力学性能见表3。

表3 单体随炉件力学性能测试结果

Tab.3 Mechanical properties of radome process control panel

阶段	层间剪切强度/MPa		弯曲强度/MPa		弯曲模量/GPa		滚筒剥离强度/ (N·mm)·mm ⁻¹
	0°	90°	0°	90°	0°	90°	
第Ⅰ次固化	69.9	70.1	879	750	24.3	24.0	98.5(下板)
第Ⅱ次固化	65.6	65.9	806	688	24.0	23.3	84(上板),103(下板)
第Ⅲ次固化	66.3	64.7	832	669	23.9	22.3	99.9(上板)
指标值	≥50	≥50	≥650	≥580	≥22	≥20	≥35

单体随炉件与单体同工艺同材料,反映了单体工艺下的材料性能。随炉件检测结果表明:三次固化材料性能很稳定满足指标要求。

4.2 电性能试验

采用比较法远场测试,原理见图3,结果见表4。

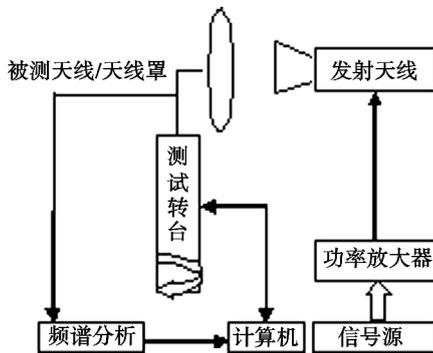


图3 远场测试原理框图

Fig.3 Electric test schematic

表4 天线罩电性能设计指标和测试结果

Tab.4 Comparison of electric design and test properties of radome

项目	功率损耗/dB	第一副瓣电平升高最大值/dB	交叉极化/dB	差方向图零值深度升高/dB	天线罩带来的天线瞄准误差/(°)
最大值	0.76	0.9	-28.2	2.8	0.16
指标值	≤1	≤1	≤-25	≤3	≤0.2

天线罩造成的功率损耗和通过测量远场方向图得到的第一副瓣电平升高主要受罩体选材和厚度及其均匀性的影响。测试结果中最大功率损耗0.76dB,相当于最小透波率为84%。天线罩罩体对称性直接影响天线的幅相分布,从而影响交叉极化、差方向图零值深度升高和天线罩带来的天线瞄准误差。天线罩透波率试验结果表明:罩体的选材和天线罩结构设计合理可行,采用的三步固化的工艺过程和曲面蜂窝成型技术能够保证天线罩厚度的均匀性及材料和结构的对称性,此天线罩满足电性能要求。

4.3 静力试验

对没有喷漆的试验罩,采用胶布带法进行静力试

验。试验罩体装配模拟罩体与机身相连,共选用了14个测量点,其中应力测量点13个,位移测量点一个。静力试验采用三路作动器对试验件同时加载的方式。试验时,先进行预载试验,以10%设计载荷为步长逐级加载至40%设计载荷;然后进行67%设计载荷的使用载荷试验,保载3s;接着做100%的设计载荷试验,保载3s;最后做200%设计载荷的试验,保载3s。

试验结果表明:该试验在加载到200%设计载荷时,天线罩罩体无塑性变形及连接部位无破坏现象,罩体强度及其连接强度符合要求。

5 结论

(1)选择高强玻璃纤维织物增强的改性环氧树脂预浸料及其配套材料,采用三步成型的球墨铸铁阴模热压罐固化工艺和专用模具固化蜂窝的方法可以较好地控制天线罩的均匀性和对称性,研制的C夹层结构天线罩能够实现多频段透波。

(2)使用与罩体型面一致的专用模具分块分层固化预浸蜂窝的技术,可以用于大曲率天线罩成型。

(3)通过随炉件测试、电性能测试以及静力试验,表明该罩体的选材、结构设计和工艺过程是可行的,研制的天线罩完全满足要求。

参考文献

- [1] 轩立新,李勇,刘增祥,等. 机载雷达罩技术发展展望[C]//第十三届全国复合材料学术会议论文集,2004:1227-1232
- [2] 杜耀惟. 天线罩电信设计方法[M]. 北京:国防工业出版社,1994:155-185
- [3] 敖辽辉. 天线罩技术的发展[J]. 电讯技术,2000(2):14-15
- [4] 姜勇刚,张长瑞,曹峰,等. 宽频天线罩结构设计及制备工艺进展[J]. 材料导报,2006,20(8):1-4
- [5] 杨鲜锋. 影响天线罩性能的主要工艺因素[J]. 纤维复合材料,2007,24(2):30-33.
- [6] 舒卫国,杨博. 大尺寸高性能雷达天线罩的研制[J]. 玻璃钢复合材料,2006(1):51-52

(编辑 吴坚)