

覆盖 X 波段到 Ka 波段的超宽带天线罩

蔡良元¹ 王青海¹ 张强²

(1 北京航空材料研究院,北京 100095)

(2 南京电子技术研究所,南京 210013)

文 摘 通过采用了口径积分—表面积分—自适应网格(AI-SI-AG)分析方法进行天线罩的电性能设计,选用先进透波材料体系,优化制造工艺,研制了一种覆盖 X 波段到 Ka 波段超宽频天线罩,测试结果表明该天线罩在宽频范围内电性能稳定,满足了总体性能指标要求。

关键词 超宽带,天线罩,C型泡沫夹芯,分步固化工艺

Fabrication of Ultra-Wideband Radome From X-band to Ka-Band

Cai Liangyuan¹ Wang Qinghai¹ Zhang Qiang²

(1 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

(2 Nanjing Research Institute of Electric Technology, Nanjing 210013)

Abstract An ultra-wideband radome covering X-to Ka-band was developed by using AI-SI-AG analysis method for the design of the electric property of the radome, by selecting advanced wave-transmission materials and by optimizing the manufacture technology. The results show that electric properties in wide band are stable, also are in agreement with general specifications of the radome.

Key words Ultra-wideband, Radome, C type foam sandwich structure, Step cure process

1 引言

超宽带天线罩是电子战系统的重要组成部分,天线罩内布置多种频段的天线,频率覆盖很宽的范围。天线罩的作用除了保护天线外,还起到了减小风阻的效果,而且天线设计中多采用天线罩作为其密封设计的一部分,它的性能直接影响天线的技术指标,其透波率的好坏对天线的增益、波束宽度、波束指向、零值深度等较大的影响。

相对国外超宽带天线罩的发展,国内的研究对电气性能的理论分析比较多,实用的宽频带天线罩很少^[1],对于天线罩部分频段位于宽频毫米波区域,对天线罩材料一致性、宽频范围内介电性能、制造公差及均匀性等方面要求更高,因此必须严格控制天线罩的设计、材料选择、加工工艺,以保证其具有良好的电性能。本文进行了天线罩设计分析,材料和制造工艺步骤选择研究,并对制造的天线罩进行了性能测试。

2 实验

2.1 原材料

石英纤维布:牌号 QW120,荆州菲利华公司生产。树脂体系:牌号为 5258,高温固化改性环氧树脂体系;预浸料:牌号为 QW120/5258,均为北京航空材

料研究院制造。泡沫材料:聚甲基丙烯酸酯亚胺刚性闭孔泡沫,密度 71 kg/m^3 ,德国制造。

2.2 模具和成型设备

模具材料为 45# 钢,阳模结构,配套脱模环,加工的模具必须热处理,防止变形;成型设备: $\Phi 1 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 热压罐,温度可达 200°C ,压力可达 1 MPa 。

2.3 性能测试

拉伸性能按照 ASTM D3039M—2000 进行测试,压缩性能按照 ASTM D695—2002 进行测试,弯曲性能按照 ASTM D790M—2003 进行测试,层间剪切按照 ASTM D2344—2000 进行测试,材料电性能按照 GB/T 5597—1999(波导腔谐振法)进行测试。环境性能按照 GJB 150—86 进行试验,整罩的电性能采用暗室远场方法测试。

3 结果与讨论

3.1 超宽带天线罩电性能设计

采用简单的结构设计不能满足宽频带和超宽带天线罩性能要求,必须利用多层罩壁结构来拓天线罩宽频。多层结构既可以满足结构刚度的要求,又可以通过适当选择和布置每层材料的介电常数和损耗以及厚度,使整个结构具有良好的电磁匹配特性。常用

收稿日期:2009-09-20

作者简介:蔡良元,1971 年出生,硕士,高级工程师,主要从事天线罩和复合材料天线等功能复合材料的研究。E-mail: cly21@sohu.com

宽频带天线罩的多层罩壁结构类型为 C 型夹层, C 型夹层是由三层蒙皮比较致密的薄的表面层和两层低介电常数、低损耗、低密度的中间芯层组成。如图 1 所示。



图 1 天线罩 C 型夹层结构示意图

Fig. 1 Schematic of C-type sandwich structure of radome

由于本天线罩内布置多种天线,罩内天线电尺寸较小而天线罩相对于波长尺寸较大,给天线罩电性能分析计算带来困难,如采用几何射线跟踪方法、矩量法(MoM)及有限元法(FEM)或有限时域差分法(FDTD),都受到很多制约,不能很好的实现宽频带天线罩的设计^[2]。经过分析比较,以物理光学为基础,采用了口径积分—表面积分—自适应网格(AI—SI—AG)分析方法对天线罩的电性能进行设计分析。具体为:用口径积分方法计算入射到天线罩内表面的切向场,用等效平板网络理论计算天线罩外表面的切向场,用表面积分计算远场,用自适应网格进行表面积分的数值计算。经过优化设计,按照给出的电介质电性能参数,确定了天线罩的基本结构形式为 C 夹层,另外经过优化计算,计算出各层厚度,经过理论计算和实测数据进行了比较,二者符合较好。

3.2 材料选择

天线罩选用 QW120 石英纤维布 5258 高温固化环氧树脂体系作为天线罩的蒙皮材料,芯材选用 IG71 泡沫材料。

3.2.1 蒙皮材料选择

制造天线罩的纤维材料一般有 E 玻璃纤维、S 玻璃纤维、D 玻璃纤维、石英纤维和芳纶纤维,其基本性能如表 1 所示^[3~4]。本文的天线罩有宽频带透波要求,并且包含了毫米波段。这样不仅要求天线罩材料在宽频范围内介电性能稳定,而且由于毫米波波长短,天线罩的壁厚公差要求严格,壁厚及其公差与材料的介电常数密切相关^[5],低的介电常数可以增大

罩壁厚度和制造的公差,一般通用的低频段或窄频带可用的蒙皮材料如 E 玻璃纤维和 S 玻璃纤维一般不适合本天线罩的研制。

表 1 各种纤维的基本性能

Tab. 1 Basic properties of fibres

纤维	密度 /g·cm ⁻³	拉伸强度 /MPa	弹性模量 /GPa	介电 常数	介电 损耗
E 玻璃	2.57	3058	71.5	6.6	0.0011
S ₂ 玻璃	2.54	4020	83.3	5.6	0.0072
D 玻璃	2.14	2000	48.0	3.9	0.0010
Kevlar49	1.45	3400	130	3.9	0.0010
石英	2.20	3600	78.0	3.6	0.0002

从表 1 可以看出,在所有的纤维材料中,石英纤维是具有优异性能的介电材料,其介电常数和介电损耗都是最好的。尽管 D 玻璃纤维的电性能与石英纤维接近,但其较低的强度和模量会影响天线罩的结构强度。相对 S 纤维材料,石英纤维的密度比较低,强度相当。石英纤维的线胀系数较低,特别是具有较低的吸湿率,这样在湿热环境下强度保持率较高,由于水的介电常数为 81,损耗为 0.55^[6],少量的水会大幅度提高复合材料的介电常数,从而大大影响电磁波的透射率,湿度对石英纤维影响较小,而芳纶纤维具有较高的吸湿率,如采用芳纶纤维作为该天线罩的研究,由于芳纶的吸湿会造成天线罩的电性能大幅下降。另外石英纤维从低频 100 MHz 到高频 100 GHz 以上,电性能稳定,故对于频段如此宽的天线罩,石英纤维作为增强材料具有不可比拟的优越性。

另外一般夹层结构需要胶膜将蒙皮和夹芯材料粘接起来,由于胶膜的影响会造成蒙皮厚度计算的不准,从而引起电性能的计算失准,这对毫米波来说非常重要,而且胶膜对天线罩的刚度贡献比同厚度的蒙皮材料要小得多。本研究采用了具有胶接性能的 5258 树脂体系,该树脂体系既是蒙皮材料的树脂基体,又可作为胶膜材料,可以胶接蒙皮和芯材。

选择的 QW120/5258 蒙皮材料的基本性能如表 2 所示,可以看出该材料密度低、力学性能优良、介电常数低、介电损耗小,且在较宽频带范围内介电常数和介电损耗变化值小。

表 2 QW120/5258 蒙皮材料基本性能

Tab. 2 Basic properties of QW120/5258 skin material

密度 /g·cm ⁻³	ε (2~18 GHz)	tanδ (2~18 GHz)	拉伸强度/MPa		拉伸模量/GPa		压缩强度/MPa		压缩模量/GPa		弯曲强度/MPa		弯曲模量/GPa		层剪强度/MPa	
			0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°	0°	90°		
1.59	3.39~3.54	≤0.0098	568	523	18.0	17.7	460	451	18.4	18.0	761	723	18.3	18.2	73.1	70.9

3.2.2 芯材选择

作为高性能的透波芯材有 Nomex 纸蜂窝和泡

沫,蜂窝材料有 L 向和 W 向,导致对电磁波特别是毫米波入射角方向和极化角影响不一样,不同的极化方

向产生不同的影响,从而影响了天线罩的整体电性能。而泡沫具有各向同性的性能,这样天线在不同极化方式下通过天线罩后电性能基本一致,从而提高了天线罩的透波性能。在相同密度下,PMI 是强度和刚度最高的泡沫材料。高温下蠕变性能使得该泡沫能够适用高温固化的树脂和预浸料。PMI 泡沫能满足

足 180℃的固化工艺对泡沫尺寸稳定性的要求,适用 QW120/5258 预浸料共固化的夹层结构构件中。PMI 泡沫是采用固体发泡工艺制作,为孔隙基本一致、均匀的 100% 闭孔泡沫,能够起到防水的作用。几种常见泡沫的剪切性能、压缩强度见图 2。IG71 泡沫基本性能见表 3。

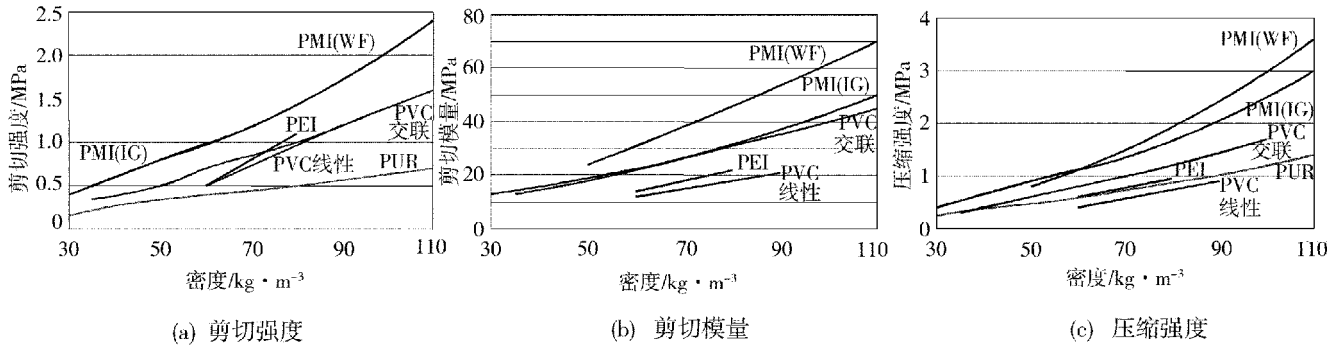


图 2 几种泡沫的性能比较

Fig. 2 Comparison of properties of several types of foam

表 3 IG71 聚甲基丙烯酸酯亚胺泡沫基本性能

Tab. 3 Basic properties of IG71 PMI

密度 /kg·m ⁻³	拉伸强度 /MPa	压缩强度 /MPa	剪切强度 /MPa	剪切模量 /MPa	弹性模量 /MPa	弯曲强度 /MPa	ϵ (2~18 GHz)	$\tan\delta$ (2~18 GHz)	热变形温度 /℃
75	2.8	1.5	1.3	29	92	2.5	1.1	≤ 0.0015	180

3.3 天线罩等效平板的性能研究

在设计完成后,为验证天线罩设计与制造的吻合性、工艺制造均匀性,采用热压罐工艺制造了一块 1 m×1 m 的等效平板,在微波暗室内进行了透波率的测试,在 8~40 GHz 透波率测试结果如表 4 所示。通过等效平板的左右步进,在等效平板不同部位测试在 9.5 和 20 GHz 的透波率,测试结果如表 5 所示。从等效平板透波率测试结果可以看出,每个角度下从 8~40 GHz 平均透波率大于 80%,在入射角 60°和高频率下垂直极化最小透波率为 69%,满足天线罩性能指标要求。由于水平极化时存在无反射的布儒斯特角,其在大角度高频情况下功率反射系数低,故在相同状态下垂直极化透波率要好。

表 4 等效平板透波率测试结果

Tab. 4 Test results of wave transmission ratio of equivalent radome plate

水平极化		垂直极化	
入射角/°	透波率/%	入射角/°	透波率/%
9	91~103	0	92~104
15	93~101	15	91~103
30	89~100	30	88~104
45	94~103	45	83~96
60	93~105	60	69~90

表 5 等效平板不同部位透波率测试结果

Tab. 5 Test results of wave transmission ratio of different places in equivalent radome plate

测试 点数	透波率/%			
	9.5 GHz		20 GHz	
	水平极化	垂直极化	水平极化	垂直极化
1	99	93	95	93
2	95	94	92	96
3	97	91	93	95
4	96	95	92	92
5	104	92	101	97
6	98	93	95	103
7	96	93	93	96
8	99	91	97	95
9	98	93	98	97
10	100	94	97	93

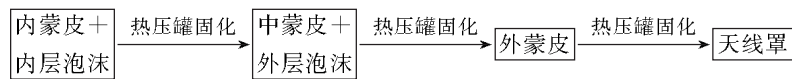
从表 6 可以看出,等效平板在不同部位透波率较高,完全满足天线罩透波率要求。在同一状态下透波率变化在 10% 以内,等效平板具有较好的工艺制造均匀性。

3.4 工艺方案的选择

由于毫米波天线罩对各功能层的电厚度精度要求高,为保证超宽带天线罩的全频段范围内性能,要求蒙皮材料厚度控制在 ± 0.05 mm,整个天线罩的厚度公差控制在 ± 0.5 mm以内,通过天线罩等效平板的初步研究,采用热压罐多步固化工艺进行天线罩的

固化。

设计的天线罩蒙皮厚度为 0.4 mm,采用树脂质量分数 40% 的 QW120/5258 通过热压罐成型,其厚度公差可以控制在 ± 0.04 mm。多步固化工艺流程如下:



先铺上内蒙皮,预压实后铺上内层泡沫,固化后通过卡板检测外形,然后铺上中蒙皮,预压实后铺上外层泡沫,固化后同样通过卡板检测外形,最后铺上外蒙皮及工艺蒙皮等进行热压罐固化。

通过对制造的多个天线罩的厚度测试,表明采用本工艺制造的天线罩其厚度公差控制在 ± 0.5 mm 范围内。

3.5 天线罩性能研究

研制好的天线罩进行了电性能测试、温度冲击试验、淋雨试验和整机环境试验。电性能测试结果如表 6 所示。从表 6 可看出完全满足本超宽频带天线罩的指标要求。

表 6 天线罩电性能设计指标和测试结果

Tab.6 Comparison of electric design and test properties of radome

性能项目	平均透波率 /%	最低透波率 /%	方向图波束起伏 (方位 $\pm 60^\circ$)/dB
设计指标	≥ 80	65	≤ 1
测试结果	86	67	0.8

温度冲击试验按照 GJB150.5—86 进行,试验完成后进行了外观检查和无损检测,表面状态与试验前无变化,蒙皮与泡沫无脱粘现象。

天线罩罩体淋雨试验:将天线罩内部抽真空—0.1~—0.07 MPa 之间,用潜水泵抽水对罩体表面淋水 40 min,试验后观察罩体内表面,无渗水和湿润迹象,表明天线罩防水性能良好。

天线罩随整机进行振动冲击试验,试验后天线罩无任何异常变化,其结构强度满足整体的环境要求。

4 结论

(1)通过口径积分—表面积分—自适应网格(AI—SI—AG)分析方法对天线罩的电性能进行了分析,采用 C 夹层泡沫结构能够拓宽天线罩的频段,满足了超宽带天线罩的电性能要求。

(2)选用 QW120 石英纤维布 5258 高温固化环氧树脂复合材料作为天线罩的蒙皮材料,IG71 泡沫材料作为芯材能够满足天线罩的制造工艺均匀性和性能稳定性。采用分步固化工艺能够精确控制天线罩各功能层的厚度,达到天线罩电性能指标要求。

(3)超宽带天线罩进行了电性能、温度冲击试验、淋雨试验和整机环境试验,试验结果表明研制的超宽带天线罩满足了总体要求,特别是满足了从 X 波段到 Ka 波段超宽频带高电性能要求。

参考文献

- 姜勇刚,张长瑞等.宽频天线罩结构设计及制备工艺进展.材料导报,2006;20(8):1~4
- 张强,曹伟.机载超宽带天线罩物理光学分析方法.电子与信息学报,2006;28(1):100~102
- 张耀明等.玻璃纤维与矿物棉全书.北京:化学工业出版社,2001:53,860,864,872
- 张军等.电磁透波功能复合材料的研究.材料导报,2003;17(7):23~28
- 鲁玉琴,杨鸿昌等.复合材料塑料 8 mm 波雷达天线罩.宇航材料工艺,1991;(4):82~86
- 张佐光.功能复合材料.北京:化学工业出版社,2004:71

(编辑 李洪泉)