

机载宽频雷达罩的研制

崔 溢¹ 赵继承² 杨 明¹ 蔡良元¹

(1 中国航空工业第一集团公司北京航空材料研究院,北京 100095)

(2 海军装备部驻上海地区军事代表局,上海 201206)

摘 要 为满足耐高温(150℃)宽频带(18~40 GHz)的需要,选用石英纤维织物、聚砜改性环氧树脂和 Nomex 蜂窝芯为主要原料研制机载雷达罩,其单程平均功率透过系数 $\geq 87\%$,单程最小功率透过系数 $\geq 76\%$,力学性能满足飞行安全要求。

关键词 石英纤维织物,聚砜改性环氧,耐高温,宽频,机载雷达罩

Study of Broadband Radome

Cui Yi¹ Zhao Jicheng² Yang Ming¹ Cai Liangyuan¹

(1 Beijing Institute of Aeronautical Materials, AVICI, Beijing 100095)

(2 The Navy Equipment Department Representative Bureau in Shanghai, Shanghai 201206)

Abstract To satisfy a radome that can resist the temperature of 150℃ and work at the band from 18 GHz to 40 GHz, the quartz fabrics, polysulfone modified epoxy resin and honeycomb core were selected and used to prepare the radome. The average single pass power transmission efficiency can reach greater than or equal to 87% and the minimum efficiency can reach greater than or equal to 76%, the mechanical strength can meet the flight safety demand.

Key words Quartz fabrics, Polysulfone modified epoxy resin, Heat resistant, Broadband, Airborne radome

1 前言

雷达罩是雷达天线系统的重要部件之一,它在雷达天线周围形成一个封闭空间,以保护雷达天线系统免受大气环境的直接作用。

现代雷达技术已由早期探测、火控、气象和导航功能,进一步发展出电子侦察、电子干扰、精确制导等功能。雷达天线的工作频率逐渐由单频率发展为宽频带,直至多波段(UHF、L、C、S、X、Ku 等)全频带^[1]。而这些先进雷达天线系统,不仅要求雷达罩有高透波率,而且要有低吸收率^[2]。材料的低介电常数和低介质损耗是满足新型雷达要求的必要条件。

目前,国内报道雷达罩的应用多为低频、窄频和倍频天线系统,高频率天线系统只是点频。雷达罩要想获得宽频带性能,一般有以下几种途径:(1)采用极低介电常数的介质材料;(2)采用薄壁结构;(3)采用特殊的夹层结构;(4)采用含特种金属物的介质材料。本文主要采用途径(1)和(2)。

2 雷达罩选材及结构设计

2.1 选材

选材的主要依据是介电性能指标,主要有介电常数(ϵ)和损耗角正切($\text{tg}\delta$)。 $\text{tg}\delta$ 越大,电磁波能量在穿透天线罩过程中转化为热量而损耗的能量就越多; ϵ 越大,电磁波在空气与天线罩壁分界面上的反射就越大,这将增加镜像波瓣电平并降低传输效率。因此要求雷达罩罩体材料的 $\text{tg}\delta$ 低至接近于零, ϵ 尽可能低,以达到“最大传输”和“最小反射”的目的^[3]。

2.1.1 增强体纤维材料选择

目前,国内机载雷达罩罩体材料体系中使用的增强材料,大都为 E 或 S 玻璃纤维。图 1、图 2 是几种常用增强纤维的介电性能比较^[4~5]。可以看出:石英纤维具有 ϵ 值较低, $\text{tg}\delta$ 极小的特点,并且介电性能随频率变化较小,故石英纤维是最为理想的宽频带透波增强材料。另外,石英纤维的线胀系数较小,而且具有弹性模量随温度增高而增加的特性。因此,本文选用石英纤维织物做增强材料。

收稿日期:2008-09-20;修回日期:2009-01-13

作者简介:崔溢,1976 年出生,工程师,主要从事功能复合材料的研究。E-mail: yicuiyi@yahoo.com.cn

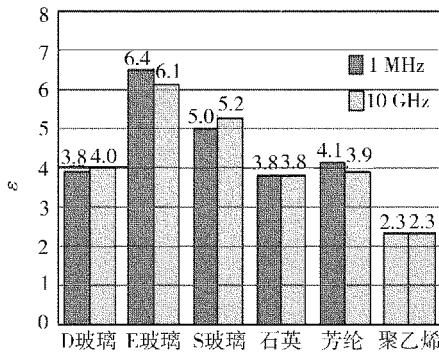


图1 常用纤维的ε值比较

Fig. 1 Comparison of commonly used fiber's ε

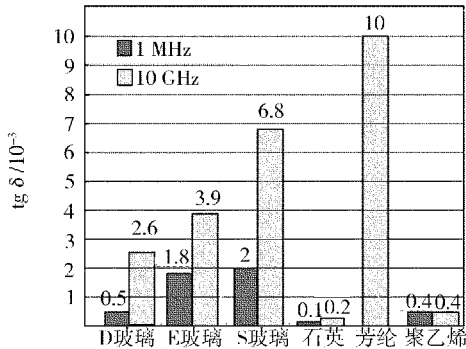


图2 常用纤维的tgδ比较

Fig. 2 Comparison of commonly used fiber's tgδ

2.1.2 基体材料选择

环氧树脂由于具有优良的电性能、界面性能、耐化学腐蚀性能以及尺寸稳定性,故广泛应用于雷达罩的制备中。但纯环氧树脂耐热性差,固化物脆性大,不耐冲击和震动,容易开裂,使其应用受到一定限制。故本文采用聚砜改性环氧树脂,这是因为聚砜韧性较好,模量较高,耐热性较高,电性能较好,采用聚砜改性可以有效的提高环氧树脂的韧性和耐热性。改性后的石英织物层压板的ε和tgδ值分别为3.37和0.013。

2.1.3 纤维体积分数的确定

通常树脂基复合材料的平均纤维体积分数在50%~70%,不同纤维体积分数对剥离强度的影响见表1。按照强度分析计算结果,蒙皮和芯材之间的剥离强度需在38 N·mm/mm以上方可满足机载雷达罩的强度许可。由表1可以看出,纤维体积分数为52%时的剥离强度可以满足此要求。

表1 不同纤维体积分数对剥离强度的影响

Tab.1 Effect of different fiber volume fraction on impact peeling strength

纤维体积分数/%	剥离强度/N·mm·mm ⁻¹	
	平均值	方差
62	20	0.10
52	45	0.11

本文研究了织物不同厚度、纤维体积分数对电性能的影响,结果见表2。可以看出,纤维体积分数越大电性能越差,织物厚度越厚电性能越差。综合考虑剥离强度和电性能,最终选择纤维体积分数为52%,织物厚度为0.22 mm的QW220。

表2 不同织物厚度和纤维体积分数对电性能的影响¹⁾

Tab.2 Effect of different fabric thickness and fiber volume fraction on electrical properties

纤维体积分数/%	QW220(0.22 mm)		QW280(0.28 mm)	
	ε	tgδ/10 ⁻³	ε	tgδ/10 ⁻³
52	3.35	8.14	3.39	8.15
62	3.48	7.54	3.51	7.95

2.1.4 夹芯材料选择

目前,国内雷达罩的夹芯材料大多采用芳纶蜂窝芯和玻璃布蜂窝芯。由于芳纶纸蜂窝芯相对于玻璃布蜂窝具有质量轻,较高的压缩强度、剪切强度和良好的耐疲劳性能,与复合材料胶接和组装工艺性好等优点,故选用芳纶蜂窝芯——Nomex。

2.1.5 层间粘接材料的选择

按照常规制造方法,雷达罩蒙皮和蜂窝芯材之间需要使用胶膜粘接,但胶膜对电性能影响较大,故在雷达罩设计过程中,采用高含胶量(质量分数为48%)预浸料替代胶膜。

2.2 结构设计

目前,雷达罩常用的结构形式有三种即实芯半波壁、A夹层和C夹层结构。由于天线系统为超宽频带,故雷达罩只能采用A或者C夹层结构,对二夹层结构雷达罩透过系数仿真计算和优化筛选,雷达罩罩壁各夹层厚度设计最优化结果见表3。相应透过系数仿真计算结果见图3和图4。可以看出,A夹层结构的功率透过系数要好于C夹层结构。另外,由于高频天线对罩壁厚度的公差要求非常严格,且构成罩壁材料界面的数量越多,传输效率越低,同时插入相位移随入射角变化越敏感。综合考虑以上因素,最终确定雷达罩罩壁结构形式采用A夹层结构,各层材料厚度见表3。

表3 雷达罩罩壁各夹层厚度优化设计结果

Tab.3 Optimum thickness of radome's different layers

部位	材料	A夹层结构各	C夹层结构各
		层厚度/mm	层厚度/mm
蒙皮	树脂:聚砜改性环氧 增强体:QW220	0.3~0.5	0.3~0.5
芯材	蜂窝芯:Nomex 蜂窝	7.5~8.5	3.8~4.2

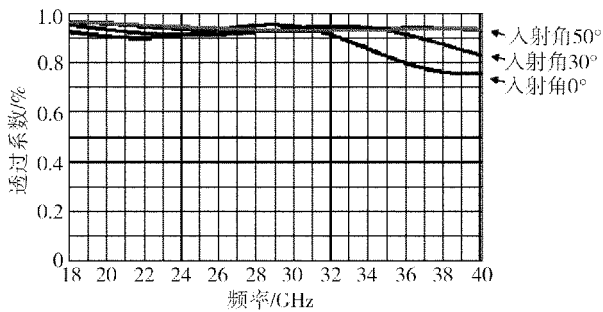


图3 A夹层结构在不同频率下功率透过系数

Fig. 3 Power transmission efficiency of A sandwich at different frequencies

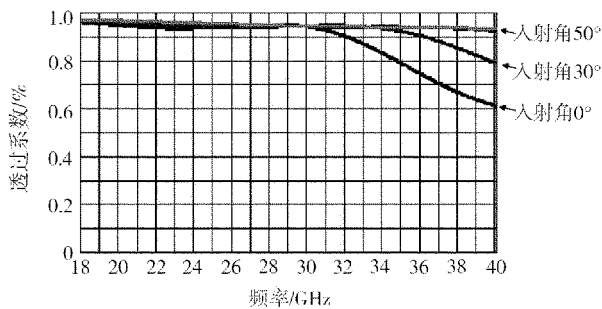


图4 C夹层结构在不同频率下功率透过系数

Fig. 4 Power transmission efficiency of C sandwich at different frequencies

3 雷达罩的研制

3.1 仪器设备

WD-5、WDS-100型万能试验机;天线自动方

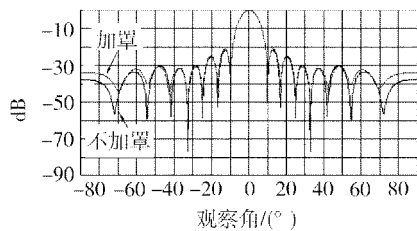
表4 雷达罩随炉件的力学性能

Tab.4 Mechanical properties of radome processing control panel

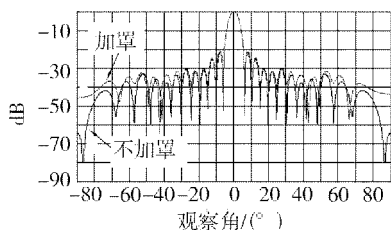
温度	弯曲强度/MPa	弯曲模量/GPa	层剪强度/MPa	抗拉强度/MPa	抗拉模量/GPa	压缩强度/MPa	压缩模量/GPa
25℃(经向/纬向)	810/605	31/29	72/63	640/420	26/21	506/352	26/21
150℃(经向/纬向)	340/312	18/15	46/33	260/190	13/12	210/180	12/11
150℃保持率/%	42/52	58/52	64/52	41/45	50/57	42/51	46/52

4.2 电性能

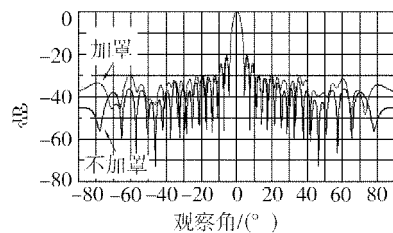
雷达罩电性能测试结果见图6。



(a) 18 GHz



(b) 29 GHz



(c) 40 GHz

图6 不同频率下天线方向加与不加罩测试结果对照

Fig. 6 Comparison results of antenna pattern at different frequencies

向图幅相测试系统(HP8350C)和矢量网络分析仪(HP83752)。

3.2 工艺流程

图5为雷达罩制造工艺流程。

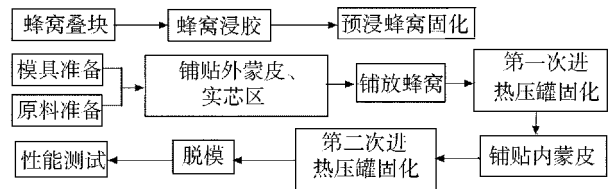


图5 雷达罩制造工艺流程

Fig. 5 Manufacturing process of radome

3.3 固化工艺

室温(抽真空) → 110℃/0.5 h, 0.3 MPa → 180℃/2 h → 自然冷却至60℃以下出炉。

3.4 性能测试

抗拉、压缩、弯曲、剪切及电性能分别按ASTMD3039M、ASTMD695、ASTMD796、ASTMD2344和ATCA-4测试。

4 结果及分析

4.1 力学性能

对雷达罩进行力学性能测试,结果见表4。可以看出,所研制的雷达罩具有良好的力学性能。150℃下的力学性能保持率为41%~57%,而普通环氧在150℃下的力学性能保持率通常<15%。

从图6可看出:在18~30和30~40 GHz频段内,雷达罩单程最小功率透过系数分别≥87%和≥76%,满足设计要求。

5 结论

(1)以聚砜改性环氧树脂、石英织物(QW220)和

芳纶蜂窝芯(Nomex)为主要原材料制备宽频带雷达罩,在18~40 GHz频段内,雷达罩单程平均功率透过系数 $\geq 87\%$,单程最小功率透过系数 $\geq 76\%$ 。

(2)通过聚砜改性后的环氧树脂,耐热性大大提高,150℃下的力学性能保持率为41%~57%,可以用于高温(150℃)雷达罩的研制。

(3)在该宽频带雷达罩制备中,选用高含胶量的预浸料(质量分数为48%)替代胶膜,力学和电性能均可满足使用要求。

参考文献

1 杜耀惟. 天线罩电信设计方法. 北京:国防工业出版社,1994

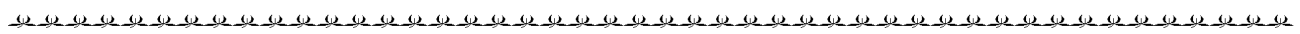
2 沈伋,吕继淮. 飞行器雷达罩设计方法的研究. 南京航空航天大学学报,1999;31(5):594~598

3 杜建春. 发射天线罩抗微波烧毁理论分析. 电子对抗技术,2002;17(2):17~22

4 Walton J O. Radome engineering handbook. Marcel Dekker, Inc., New York, 1970

5 Roger S A. Stealth aircraft & technology from World War II to the Gulf. Part I. History and background. SAMPE Journal, 1991;4(27):91~1062

(编辑 吴坚)



(上接第48页)

参考文献

1 Naslain R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview. Composites Science and Technology, 2004;64(2):155~170

2 Beyer S, Strobel F. Development and testing of C/SiC components for liquid rocket propulsion applications. AIAA-99-2896:1

3 柯晴青, 成来飞, 童巧英等. 连续纤维增韧陶瓷基复合材料的连接方法. 材料工程, 2005;(11):58~63

4 李树杰, 张利. SiC基材料及其与金属的连接. 粉末冶金技术, 2004;22(2):91~97

5 Panlasto M, Van Loo F J J, Kivilahti J K. Thermodynamic and experimental study of Ti-Ag-Cu alloys. Journal of Alloys and Compounds, 1995;220(1~2):136~141

6 ASM International Handbook Committee. Asm Metals Handbook Vol. 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and

Special-Purpose Materials, 10th ed. Materials Park, 1992:2635~2636

7 范康年主编. 物理化学. 第二版. 北京:高等教育出版社, 2005:674

8 Wang G, Lamutti J J. Chemical thermodynamics as a predictive tool in the reactive metal brazing of ceramics. Metallurgical and Materials Transactions A, 1995;26(6):1499~1505

9 ASM International Handbook Committee. Asm Metals Handbook Vol. 3: Alloy Phase Diagrams, 10th ed. Materials Park, 1992:380

10 蒋志国, 罗新锋, 邹家生. Ti-Zr-Ni-Cu非晶钎料在Si₃N₄陶瓷上的润湿性研究. 焊接技术, 2006;35(6):37~40

11 Wu A P, Zou G S, Ren J L et al. Heat-resistant joints of Si₃N₄ ceramics with intermetallic compounds formed in situ. Journal of Materials Science, 2001;36:2673~2678

(编辑 李洪泉)