

氰酸酯基复合材料雷达天线罩设计研究

魏 婷 王 娆 强 博

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

【摘要】：天线罩直接影响机载雷达天线的工作效率，本文以 A 夹层结构的飞机雷达天线罩为实例，通过力学性能试验探究了某石英纤维/氰酸酯基复合材料的力学性能，通过电性能仿真分析及等效平板电性能测试试验，探究了透波率与入射角的变化关系，进一步验证天线罩结构形式及选材的可行性。研究表明，以某石英纤维/氰酸酯基复合材料为基础的 A 夹层结构天线罩力学性能优异，等效平板及全尺寸天线罩在不同入射角下的透波率均满足电性能指标要求。该罩体的结构形式、选材及电性能可满足工程设计要求，研究成果对同类型天线罩设计具有一定的参考价值。

【关键词】：雷达天线罩；结构形式；材料；电性能仿真

1 引言

天线罩将天线与外界环境进行物理隔离，为雷达天线提供全频段的电磁窗口，简化了天线结构、驱动及阵面设计，延长了天线使用寿命，是雷达系统的重要组成部分^[1]。天线罩是结构功能一体化结构，具有多学科性，气动外形、结构强度与电性能间存在一定的设计矛盾，长细比大的外形气动性能好，但电性能相对变差（瞄准误差大，反射瓣高），强度刚度大的天线罩结构形式，电性能会相对降低。总之，机载天线罩的气动性能、电性能、结构性能、工艺及材料既相互联系又相互制约，需统筹考虑，协同设计^[2]。

本文设计天线罩为机载宽带雷达天线罩，内需能安设各种频率的有源干扰，接收各种频率的无线电信号。要求在满足气动外形的条件下，具有一定的结构强度，且在工作带宽内平均传输效率 $\geq 85\%$ ，最小传输效率 $\geq 75\%$ 。

2 结构形式

为降低空气阻力，提升气动性能，本天线罩设计为双曲面外形。结构形式采用 A 夹层罩壁，由高密度层压蒙皮和低密度中间芯组成。相比于纯层板罩壁，夹层结构反射小、带宽大且质量轻^[3]。罩壁结构剖面图如图 1 所示，上下面板均为 3 层某石英纤维/氰酸酯基预浸料，铺层顺序设计为 $[(90/0)/(+45/-45)/(0/90)]$ ，(0/90)为主受力方向，靠近蜂窝芯的一层玻璃布纤维方向为(90/0)。面板中部为蜂窝芯，蜂窝芯可有效提高结构的强度刚度。在电性能方面，蜂窝夹芯的介电常数低，损耗小，工作带宽大，夹芯的厚度可使蒙皮的反射波相互抵消，从而提高传输效率。面板与蜂窝芯材之间采用结构胶粘剂进行粘接。天线罩与机体结构相连的部位采用层压板结构，便于加工及连接。夹层结构与层压板过渡区域为非透波区域，可使用泡沫胶进行填充。根据环境适应性要求，天线罩外表面需涂敷防雨蚀弹性涂层及抗静电涂层，以降低高速雨滴带来的冲击影响，避免静电累积造成放电击

穿。建立相应的天线罩模型进行力学分析，结果表明天线罩在所载荷作用下可保持稳定的、完整的状态，不发生有害变形或破坏，强度刚度可达到使用要求。

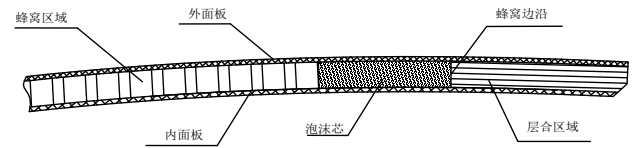


图 1 结构形式

3 材料选择

材料的介电性能直接影响天线罩的透波性能。机载雷达罩一般使用聚合物基复合材料，环氧树脂基复合材料是应用最广泛的雷达罩材料，其综合性能优良，但易老化，耐湿热性能不佳^[4]。有机硅树脂及不饱和聚酯树脂基复合材料电性能及工艺性能良好，但力学性能较差。聚酰亚胺树脂基及酚醛树脂基复合材料成型较为困难^[5]。本文选用某石英纤维/氰酸酯树脂基复合材料，其粘接性能、耐化学腐蚀性能及耐湿热性能更为优异，介电常数和介电损耗极低，具有明显的宽带特性，是未来天线罩复合材料发展的主要方向。

根据相应标准，制造试验件，对选用的某石英纤维/氰酸酯树脂基复合材料进行力学性能研究，包括层压板的拉伸、压缩及剪切性能。实验设备为 CTM9100 型电子万能试验机和 YJ-4501A 智能应变仪，通过粘贴应变片完成试验件力学性能的检测。

3.1 拉伸性能

拉伸试验分为经向拉伸试验及纬向拉伸试验，试验标准为 ASTM D3039，经向试验件铺层顺序为 $[(0/90)]_{10}$ ，纬向试验件铺层顺序为 $[(90/0)]_{10}$ ，试验件厚度为 2.2mm，每项试验取 3 个平行试样，拉伸试验结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 预浸料经向纤维方向的拉伸强度、弹性模量分别高于纬向纤维方向 54%、6%, 材料各向异性明显, 部件的受力方向应与经向纤维方向保持一致。试验时试样的应力-应变曲线线性增长后突然下降, 无明显的屈服极限, 断裂突然发生, 为典型的脆性断裂。本天线罩使用的某石英纤维/氰酸酯基复合材料抗拉性能明显优于常用的玻璃纤维/环氧树脂基复合材料^[6-7]。

表 1 拉伸试验结果

试验项目	经向拉伸	纬向拉伸
最大力 Pmax/kN	39.87 ± 0.67	26.52 ± 0.46
拉伸强度 MPa	736.74 ± 6.46	478.61 ± 8.45
拉伸应变 EpsilonM/%	5.17 ± 0.01	5.11 ± 0.01
拉伸模量 Et/GPa	22.96 ± 0.01	21.66 ± 0.27
宽度方向泊松比 muB	0.13 ± 0.01	0.13 ± 0.01

3.2 压缩性能

压缩试验分为经向拉伸试验及纬向拉伸试验, 试验标准为 ASTM D6641, 经向试验件铺层顺序为[(0/90)]₁₀, 纬向试验件铺层顺序为[(90/0)]₁₀, 试验件厚度为 2.2mm, 每项试验取 3 个平行试样, 压缩试验结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 某石英纤维/氰酸酯基复合材料经向纤维方向的压缩强度、压缩模量分别高于纬向纤维方向 15%和 3%, 数据差异不明显, 但部件的受力方向仍应尽量与经向纤维方向保持一致。试验时试样的应力-应变曲线也是线性增长后突然下降, 为典型的脆性断裂。

表 2 压缩试验结果

试验项目	最大力	压缩强度	压缩模量
	Pmax/kN	MPa	Et/GPa
经向压缩	9.61 ± 1.4	394 ± 62	22.5 ± 0.48
纬向压缩	8.49 ± 1.2	343 ± 40	21.8 ± 2.8

3.3 剪切性能

剪切试验为±45°拉伸试验, 可测量层压板面内剪切强度, 试验标准为 ASTM D3518, 试验件铺层顺序[(45/-45)/(-45/45)/(-45/45)/(45/-45)]_S, 试验件厚度为 1.76mm, 取 4 个平行试样, 极限剪切应变达到 5%时终止实验。剪切试验结果如表 3 所示。由表 3 可知, 预浸料极限剪切应变达到 5%时剪

切强度为 63.56±1.66 MPa, 面内剪切性能也优于某些常用的玻璃纤维/环氧树脂基复合材料。

表 3 剪切试验结果

试验项目	最大力 Pm/kN	极限剪切力 Pb/N	剪切强度 Sb/MPa	剪切弹性模量 G/MPa
剪切	6.53 ± 0.23	6.13 ± 0.14	63.56 ± 1.66	3478.62 ± 29.82

力学性能试验结果表明, 本文使用的某石英纤维/氰酸酯基复合材料, 不仅粘接性能、耐化学腐蚀性、及耐湿热性能及介电性能好, 更具有更优良力学性能, 可满足设计及使用需求。

4 电性能设计

天线罩电性能主要包括功率传输系数、副瓣抬高、反射瓣、瞄准误差及主波瓣宽度等。本天线罩电性能主要关注功率传输系数, 又称透波率, 是天线罩损耗引起的主瓣峰值电平的变化, 关系到机载雷达的探测距离。电性能指标要求在工作频带内平均透波率≥85%, 最小透波率≥75%。

4.1 电性能仿真分析

采用 CST 电磁仿真软件, 将某石英纤维/氰酸酯基复合材料、蜂窝芯、胶膜及漆层的介电常数和损耗角正切作为输入, 分析平板试验件在工作频带内多角度入射时的透波率变化情况。材料的介电参数如表 4 所示。

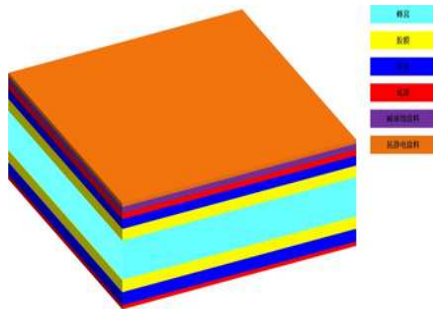
表 4 材料介电参数

介电参数	介电常数	损耗角正切
氰酸酯基复合材料	3.30	0.0044
蜂窝芯	1.08 ± 0.05	0.005
胶膜	3.2	0.01
底漆	2.8 ± 0.2	0.035 ± 0.005
耐雨蚀涂料	3.25 ± 0.25	0.035 ± 0.005
防静电涂料	10.0	0.25 ± 0.05

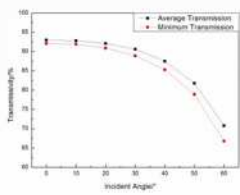
4.1.1 平板电性能仿真

等效平板极化方式分为 TE 极化和 TM 极化, 如图 2 (a) 所示建立平板试验件仿真模型。图 2 (b) 为 TE 极化下平板电性能仿真结果, TE 极化方式下平板试验件的平均及最小透波率随着入射角增大逐渐降低, 主要原因为透波率与介电常数、入射角相关, 根据垂直极化的菲涅尔公式, 可以估算大角度入射时 TE 极化下的透波率会快速下降。入射角达到 50°- 60°时, 平均透波率 < 85%, 最小透波率 < 75%, 不满足

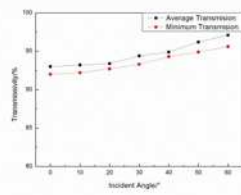
电性能指标要求。图 2 (c) 为 TM 极化下平板电性能仿真结果, 可看出在 0° - 60° 入射角范围内, 透波率均满足指标要求。对于 TM 极化, 当入射角等于布儒斯特角时, 理论上发生全透射, 因此透波率在一定范围内会随着入射角度的增大而升高。



(a) 等效平板仿真模型



(b) TE 极化仿真结果

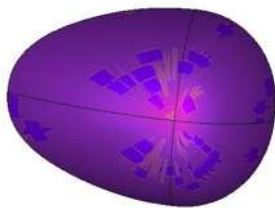


(c) TM 极化仿真结果

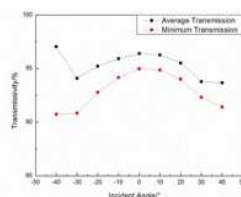
图 2 等效平板仿真模型及仿真结果

4.1.2 全尺寸天线罩电性能仿真

本天线罩极化方式为斜极化, 透波区俯仰角设定为 $\pm 40^\circ$, 俯仰角取值 $\pm 40^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 $\pm 20^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ 和 0° , 探究天线罩在一定工作频带及方位角范围内的透波性能。电磁仿真模型, 如图 3 (a) 所示, 对各天线进行拟合, 将拟合天线放置于天线罩的安装位置上, 进行天线罩电性能仿真。



(a) 全尺寸天线罩仿真模型



(b) 全尺寸天线罩仿真结果

图 3 等效平板仿真模型及仿真结果

仿真结果如图 3 (b) 所示, 俯仰角 0° 时平均及最小透波率分别可高达 96.40%、94.98%。俯仰角逐渐增大时, 透波率会逐渐降低。俯仰角 -40° 时平均透波率突然增大, 是因为该区域反射波及杂波干扰较大, 部分测试点的透波率数值超过

100%, 导致平均透波率数值升高。全尺寸天线罩电性能仿真结果表明, 天线罩的平均透波率及最小透波率均高于 90%, 满足电性能指标要求, 透波性能良好。

4.2 等效平板电性能测试

4.2.1 试验件制备及测试

根据 GJB7954 标准, 制备天线罩等效平板试验件, 如图 4 所示, 验证某石英纤维/氰酸酯树脂基复合材料在一定工作频带内多角度入射时的透波性能。天线罩的制造公差会随机影响天线罩的副瓣, 等效平板试验件的生产采用手糊铺敷, 热压罐固化成型工艺, 厚度控制方便且厚度公差小^[8]。试验件制造过程中发现某石英纤维/氰酸酯树脂基复合材料固化时间在 20 小时左右, 固化时间长, 效率低, 且固化过程放热较为剧烈, 容易发生温度过冲, 后续可进行工艺参数研究, 改善固化效果同时提升固化效率。

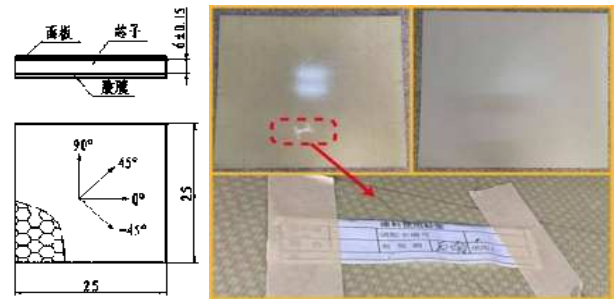
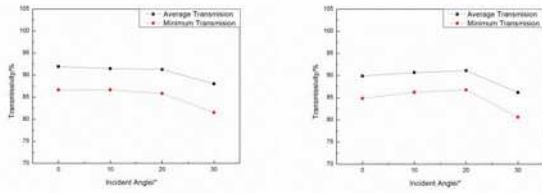


图 4 等效平板试验件

试验测试环境为 86KPa~106KPa 气压, 湿度 25%, 温度 25°C 。检测装置为微波喇叭天线及矢量网络分析仪, 首先测量自由空间直通传输时的功率, 对测量系统进行频响定标, 定标时的接收功率响应为 P_0 , 放置被测材料平板时的功率响应为 P_a , 则透波率 $T=P_a/P_0$ 。

4.2.2 等效平板试验件电性能测试结果

由于本天线罩实际工作时电磁波相对于天线罩的入射角较低, 因此等效平板试验件仅测试入射角 0° - 30° 范围内的透波率。图 5 (a) 为 TE 极化下平板试验件透波率测试结果, 随着入射角的增大, 工作频带平均及最小透波率逐渐下降, 与计算结果变化趋势一致, 测试结果均满足电性能指标要求。图 5 (b) 为 TM 极化下平板试验件透波率测试结果。入射角 30° 时, 平均透波率及最小透波率下降, 与计算结果变化略不一致, 初步估计是试验件生产及测试误差引起的, 但测试结果均满足电性能指标要求。



(a) (b)

图5 等效平板试验件测试结果

5 结语

天线罩直接影响机载雷达天线的工作效率，本文从结构形式、材料选择及电性能设计三个方面对天线罩设计可行性进行探究，结果表明该罩体的结构设计、工艺选材及电性能设计可行，满足工程设计要求，得出结论如下：

(1) A夹层罩壁质量轻，能有效提高结构的强度刚度，且夹层结构损耗小，工作带宽大，反射系数低，电性能较好。

(2) 某石英纤维/氰酸酯基复合材料力学性能优良，粘接性能及耐湿热性能优异，介电常数介电损耗极低，具有明显的宽带特性，是未来天线罩复合材料发展的主要方向。

(3) 平板电磁仿真分析表明，TE极化的透波性能随着入射角增大而降低，TM极化的透波性能随着入射角增大而升高，计算结果满足电性能指标要求，等效平板试验件的电性能试验结果与计算结果基本一致。

(4) 全尺寸天线罩电磁仿真分析结果表明，随着俯仰角的增大，天线罩的透波率逐渐下降。大角度入射时，反射波及杂波干扰较大，会直接影响整罩透波性能。

参考文献：

- [1] 董长胜,王海东,杨杨,霍明亮,李金良.Ku/Ka 双频段防弹天线罩复合材料性能[J].复合材料学报,2018,35(5):260-266.
- [2] 刘汉旭.天线罩力学-电磁性能综合设计研究[J].航空科学技术,2012,(4):73-75.
- [3] 李进杰,李宝鹏,顾小豪,肖虎.电磁波入射角对小型机载天线罩透波率的影响测试[J].计算机测量与控制,2020,28(3):5-13.
- [4] 王飞,石佩洛.树脂基复合材料在雷达天线罩领域的应用及发展[J].宇航材料工艺,2017,(2):10-13.
- [5] 杨洁颖,吕毅,张春波,郝强,郭世峰.飞行器用透波材料及天线罩技术研究进展[J].宇航材料工艺,2015,(4):6-9.
- [6] 张硕,姚宁,吴继平,张广泰.玻璃纤维增强环氧树脂复合材料的力学性能[J].电工材料,2016,(1):11-19.
- [7] 谢菲,夏洪山.石英纤维复合材料作为高频透波雷达天线罩的研究[J].四川兵工学报,2015,36(3):147-164.
- [8] 刘妍,李德里,闫欣怡.复合结构大尺寸天线罩的制备及其性能[J].宇航材料工艺,2017,(5):25-27.