

# 天线罩电性能分析及涂层影响研究

白增 闫书峰 梁嘉瑞

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

**【摘要】**：随着雷达天线产品的不断升级，其电磁窗口随之不断改进，表面防护涂层对于电磁窗口的影响更加不容忽视。本文以蜂窝夹芯天线罩为例，通过电性能仿真及测试，研究了表面防护涂层对于产品电性能的影响。

**【关键词】**：涂层；电性能；天线罩

## Analysis of Electrical Properties of Radome and Study of Coating Effect

Zeng Bai, Shufeng Yan, Jiarui Liang

AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Co. Ltd. Shaanxi Xi'an 710089

**Abstract:** with the continuous upgrading of radar antenna products, its electromagnetic window is constantly improved, and the influence of surface protective coating on the electromagnetic window can not be ignored. In this paper, taking honeycomb sandwich radome as an example, the influence of surface protective coating on the electrical performance of the product is studied through electrical performance simulation and test.

**Keywords:** Coating; Electrical performance; Radome

### 1 概述

雷达天线作为飞行器的“眼睛”，其工作的稳定性和可靠性对于飞机安全具有重要意义。作为雷达天线的保护者，天线罩扮演着“眼镜”的作用。天线罩可用于内部天线的遮蔽、防护与飞行器外形的整流，保证气动外形，保护天线免受气动力及外部恶劣环境条件的影响，为天线提供电磁透波窗口。

对于天线罩而言，其功能实现的首要意义在于雷达天线的高效稳定工作，因而其功能主要体现在电磁窗口功能上，不同类型的天线罩对于电磁窗口功能的侧重点有所区别，机载火控雷达的天线罩在高传输效率的基础上更注重于小的瞄准误差；预警机雷达对天线罩的透波率、插入相位移要求较高<sup>[1]</sup>；高速导弹天线罩则要求具有优异的耐高温性能<sup>[2]</sup>。在天线罩的众多电性能指标中，功率传输系数（也称透波率）是天线罩的基础指标。透波率的高低是评价天线罩优劣的决定性因素之一。

天线罩作为暴露在外部的复合材料零件，其表面一般会进行表面防护，就功能而言，一般需要有耐雨蚀涂层和防静电涂层。为增强附着力，一般需涂覆底漆。涂层体系的引入对于天线罩的实际使用具有一定保护作用，同时也可能对于天线罩自身的性能有一定影响，为探究这种因素的影响，现选用蜂窝夹芯天线罩作为研究对象，通过电性能仿真和测试，探讨表面防护涂层对于产品透波率的影响。

### 2 结构简介

天线罩为A夹层蜂窝夹芯结构，其结构示意图见图1。预浸料和蜂窝夹芯组成“三明治”结构，外侧依次涂底漆、耐雨蚀涂层和防静电涂层，内侧仅涂底漆。此处底漆、耐雨蚀涂层和防静电涂层即为该产品表面防护涂层。蜂窝夹芯采用芳纶纸蜂

窝，预浸料采用石英纤维/氰酸酯树脂预浸料，胶膜和泡沫胶匹配预浸料选取。

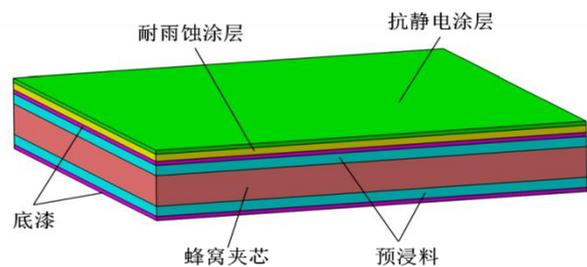


图1 产品结构示意图

### 3 仿真分析

为与测试结果对照，采用全波电磁仿真软件（CST Microwave Studio）将拟合天线和天线罩放置在相应安装位置上，对涂有表面防护涂层天线罩的透波率进行仿真分析，结果见图2和图3。图2为垂直极化（TE极化）条件下不同入射角对应的透波率仿真，图3为水平极化（TM极化）条件下不同入射角对应的透波率仿真，其结果汇总见表1。

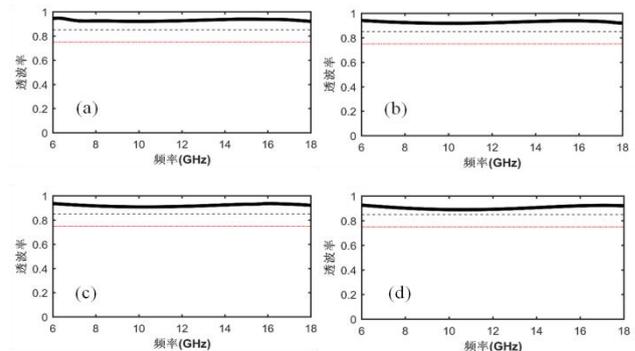


图2 TE极化：入射角分别为（a）0°；（b）10°；（c）20°；（d）30°。

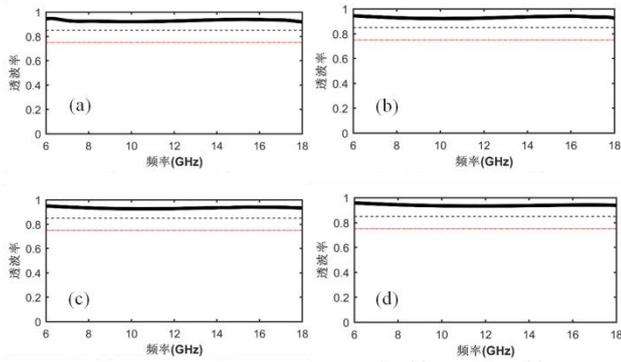


图3 TM极化：入射角分别为 (a) 0°；(b) 10°；(c) 20°；(d) 30°。

表1 仿真结果汇总

极化方式	入射角	平均透波率
垂直极化 (TE极化)	0°	93.0%
	10°	92.8%
	20°	92.1%
	30°	90.6%
水平极化 (TM极化)	0°	93.0%
	10°	93.2%
	20°	93.4%
	30°	94.0%

由表1可知，该产品在TE极化和TM极化条件下均表现出优良的透波性能。TE极化时，透波率随入射角度的增大而减小，符合垂直极化的菲涅尔公式<sup>[3]</sup>。而对于TM极化，当入射角等于布儒斯特角<sup>[4]</sup>时，理论上发生全透射，因此对于TM极化，透射率在一定范围内会随着入射角度的增大而增加。

## 4 电性能测试

### 4.1 试验件

为对比分析，共设置2款试验件，试验件1涂覆表面防护涂层，即底漆、耐雨蚀涂层和防静电涂层，试验件2除无表面防护涂层外其余与试验件1保持一致。

### 4.2 测试环境

测试气压为86KPa~106KPa，湿度为25%，温度为25℃。测试装置为安立MS46322A矢量网络分析仪(1MHz~40GHz)、微波喇叭天线(1GHz~18GHz)和相应测试电缆。

### 4.3 测试原理

透波率的测试布置示意图如图4所示。

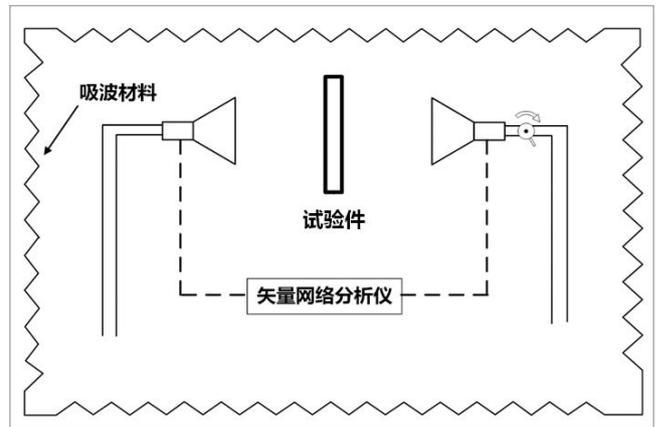


图4 电性能测试布置示意图

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<sub>0</sub>，放置被测材料平板时的功率响应为P<sub>a</sub>，按式(1)计算得出透波率。

$$T = \frac{P_a}{P_0} \quad (1)$$

式中T表示透波率，P<sub>0</sub>表示接收天线在测试位置接收到的系统发射功率，P<sub>a</sub>表示透射功率。

若以dB为单位表示，则透波率计算见式(2)。

$$T = 10 \lg \frac{P_a}{P_0} \quad (2)$$

## 4.4 测试结果及分析

### (1) 测试频率对电性能的影响

产品透波率随频率的变化见图5。由图可知，产品的透波性能和测试频率并非简单的线性关系，而是呈现出周期性的波动。相比TM极化，TE极化时透波率对频率的增加更为敏感，呈现明显的振荡下降趋势。

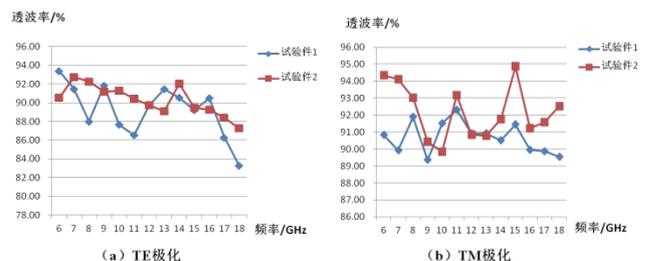


图5 透波率随频率变化图

### (2) 入射角对电性能影响

产品透波率随入射角度的变化见图6。由图可知，试验件1随着入射角度增大，产品透波率整体呈现下降趋势，而试验件2随入射角度增大，产品透波率先上升后下降。同时，TM极化时产品的透波性能明显优于TE极化。测试与仿真结果对比见表2，由表可知，测试结果与仿真结果数值较为接近。

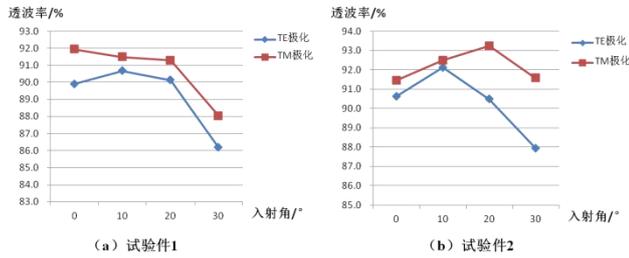


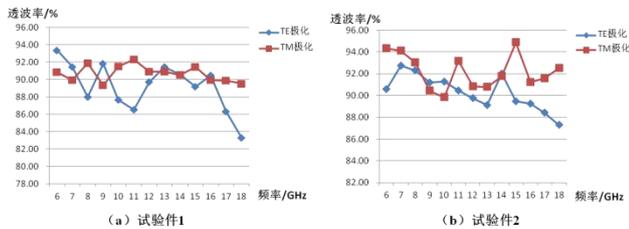
图6 电性能随入射角度变化图

表2 测试与仿真结果对比

极化方式	入射角	仿真结果	试验件1 测试结果
垂直极化 (TE极化)	0°	93.0%	89.9%
	10°	92.8%	90.7%
	20°	92.1%	90.1%
	30°	90.6%	86.2%
水平极化 (TM极化)	0°	93.0%	91.9%
	10°	93.2%	91.5%
	20°	93.4%	91.3%
	30°	94.0%	88.0%

(3) 极化方式对电性能影响

极化方式对产品透波率的影响见图7。由图可知，TM极化时产品的透波性能优于TE极化。试验件1在TE极化时透波率波动幅度大，呈现显著下降；在TM极化时波动平缓，无明显下降趋势。试验件2在TE极化时透波率变化比较平稳，呈现显著下降；而在TM极化时透波率波动比较剧烈，无明显下降趋势。由此可知，极化方式不同时，透波率的变化趋势不同。TM极化时，产品透波率无明显下降。TE极化时，产品透波率呈现显著振荡下降。同时可知，增加表面防护涂层对于产品透波率的整体趋势无影响，但对于透波率的波动幅度有一定影响。



参考文献:

[1] 李淑华,李宝鹏,彭志刚,等.机载雷达罩进水对其电性能影响仿真分析[J].电子设计工程,2019,27(4):98-102.  
 [2] 蔡德龙,陈斐,何凤梅,等.高温透波陶瓷材料研究进展[J].现代技术陶瓷,2019,40(1-2):4-120.  
 [3] 卢中昊,尹家贤.电磁波反射折射能量守恒定律推导及应用[J].电气电子教学学报,2016,38(2):56-59.  
 [4] 宋雪峰.新型宽频透波材料技术研究[D].中国运载火箭技术研究院.2019.

图7 极化方式对产品透波率影响

(4) 表面防护涂层对电性能影响

图8所示为不同状态产品的透波率，其测试结果汇总见表3。由图8可知，在两种极化方式下，试验件2的透波率基本均优于试验件1。由表3可知，试验件1在TE极化和TM极化时的平均透波率分别为89.2%和90.7%，试验件2在TE极化和TM极化时的平均透波率分别为90.3%和92.2%。由此可见，表面防护涂层对于透波率有一定的负面影响，但这种影响不大。

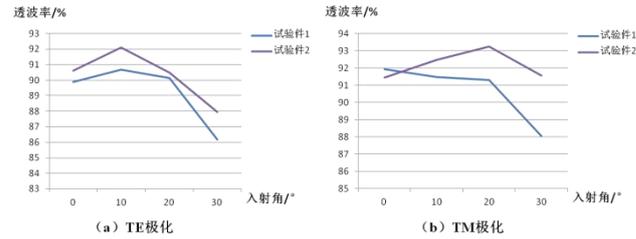


图8 不同状态产品的透波率

表3 透波率测试结果

极化方式	入射角	试验件1	试验件2
垂直极化 (TE极化)	0°	89.9%	90.6%
	10°	90.7%	92.1%
	20°	90.1%	90.5%
	30°	86.2%	87.9%
	平均	89.2%	90.3%
水平极化 (TM极化)	0°	91.9%	91.4%
	10°	91.5%	92.5%
	20°	91.3%	93.2%
	30°	88.0%	91.6%
	平均	90.7%	92.2%

5 结论

本文针对蜂窝夹芯天线罩的透波率进行了相应的仿真和测试，并研究了表面防护涂层对透波率的影响。在相应测试条件下，有表面防护涂层时，该产品TE极化和TM极化时的平均透波率分别为89.2%和90.7%；无表面防护涂层时，该产品TE极化和TM极化时的平均透波率分别为90.3%和92.2%。因此，表面防护涂层对于产品的透波率有轻微负面影响。