

# 平面等角螺旋天线阵列/树脂复合材料的吸波性能研究

Microwave Absorbing Properties of Composites with the Planar Equiangular Spiral Antenna Array Embedded in Them

邹田春<sup>1,2</sup>,赵乃勤<sup>2</sup>,师春生<sup>2</sup>,李家俊<sup>2</sup>

(1 中国民航大学 适航审定技术研究与管理中心,天津 300300;

2 天津大学 材料科学与工程学院,天津 300072)

ZOU Tian-chun<sup>1,2</sup>, ZHAO Nai-qin<sup>2</sup>, SHI Chun-sheng<sup>2</sup>, LI Jia-jun<sup>2</sup>

(1 Airworthiness Certification Technology Research and Management Center,

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2 School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**摘要:**研究了含平面等角螺旋天线阵列复合材料的微波吸收特性,并对天线阵列的吸波机理进行了初步的探讨。结果表明:含平面等角螺旋天线阵列复合材料的吸波性能与天线的起始半径、外半径和两臂间电阻阻值密切相关,经合理设计,吸波材料的有效带宽达 6.64GHz,最大吸收峰值-19dB。

**关键词:**复合材料;平面等角螺旋天线;吸波性能

**文献标识码:**A   **文章编号:**1001-4381(2009)Suppl2-0179-03

**Abstract:** Microwave absorbing properties of composites containing the planar equiangular spiral antenna array are investigated, and the absorbing mechanism of the planar equiangular spiral antenna array is briefly discussed. Results show that the absorbing performances of composites are affected greatly by the initial radius, the outer radius and the magnitude of resistance connecting two arms. If properly designed, the composite containing the antenna array can show a reflection loss blow-10dB in the frequency bandwidth 6.64GHz and the maximum absorption reaches-19dB.

**Key words:** composites; planar equiangular spiral antenna; microwave absorbing properties

天线是电子信息系统中常用的部件,它的基本功能是将由发射机送来的高频电流能量转变为无线电波并传送到空间;在接收端,则将空间传来的无线电波能量转变为向接收机传送的高频电流能量。因此,天线可认为是导波和辐射波的变换装置,是一个能量转换器件<sup>[1,2]</sup>。作为接收天线时,天线将电磁波能量转化为天线臂中的高频电流(电压),在天线臂间适当的位置接入电阻,可将电磁能量经电阻损耗转化为热能,进而对电磁波进行衰减。本工作将这一原理首次应用到吸波材料的设计中,将平面等角螺旋天线作为吸收体,研究了天线的尺寸参数、电阻等因素对吸波性能的影响,并对天线的吸波机理进行了初步的探讨。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

本工作中在制作平面等角螺旋天线时,天线臂的铜箔厚度为 0.03mm,采用印刷电路技术制成所需结

构(见图 1)。平面等角螺旋天线两臂的四条边缘为四条等角螺旋线,其方程分别为

$$r_1 = R_0 e^{a\varphi} \quad r'_1 = R_0 e^{a(\varphi-\delta)} \quad (1)$$

$$r_2 = R_0 e^{a(\varphi-\pi)} \quad r'_2 = R_0 e^{a(\varphi-\pi-\delta)} \quad (2)$$

式中:  $r_1, r_2$  分别为两臂的内边缘;  $r'_1, r'_2$  分别为两臂的外边缘;  $a$  是一个与  $\varphi$  无关的常数,本实验中取为 0.22;  $\delta$  为螺旋天线的角宽度,本实验中取为  $\pi/2$ 。

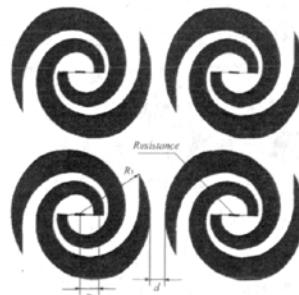


图 1 平面等角螺旋天线阵列结构示意图

Fig. 1 Geometry of the planar equiangular spiral antenna array

复合材料基体为环氧树脂, 型号 E244 (无锡树脂厂生产), 固化剂为低分子聚酰胺, 型号 203\* (天津延安化工厂生产), 并在电磁波入射的方向上辅以玻璃纤维布以实现材料与自由空间的阻抗匹配<sup>[3]</sup>。

## 1.2 试样制备工艺

试样的制备采用压缩模塑工艺, 在四柱式手动油压机上热压成型。将预先准备好的成型模具预热。先

加入部分环氧树脂, 逐一放入玻璃纤维布、平面等角螺旋天线阵列, 继续加入环氧树脂, 随后开始缓慢加压, 在加压过程中不断减压放气, 在 60℃, 10MPa 条件下固化 2 h, 保持一定压力冷却至室温, 开模获得试样。根据测试标准, 试样尺寸为 180mm×180mm×4mm。试样剖面图如图 2 所示。试样中所含螺旋天线阵列的结构参数如表 1 所示。

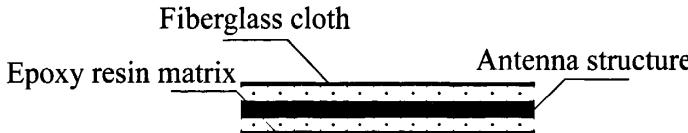


图 2 试样剖面示意图

Fig. 2 Cross-section of the sample

表 1 试样所含螺旋天线阵列的结构参数

Table 1 Structure parameters of the spiral antenna arrays embedded in samples

试样编号	两臂间电阻阻值/Ω	$R_0$ / mm	$R_1$ / mm
1#	150	12.5	40
2#	150	6.25	40
3#	150	4.69	40
4#	150	4.17	40
5#	150	3.75	40
6#	150	6.25	37
7#	150	6.25	43
8#	400	6.25	40
9#	650	6.25	40
10#	900	6.25	40

## 1.3 吸波性能测试

吸波性能测试在北京航空材料研究院进行。该工作方式为扫频测量, 测量范围为 2~18GHz, 测量动态范围 -40dB。

## 2 结果与讨论

### 2.1 天线起始半径和外半径对吸波性能的影响

图 3 是试样 1#—5# 的反射衰减曲线。由图 3 可见, 随天线起始半径  $R_0$  的减小, 复合材料的吸波性能先提高而后逐渐降低, 具体表现为有效带宽和最大吸收峰值均先增大后减小。天线起始半径  $R_0$  为 6.25mm 时(2# 试样), 材料具有较好的吸波性能, 最大吸收峰值 -19dB, 有效带宽 6.64GHz。

在天线的起始半径  $R_0$  和两臂间电阻保持一致的情况下, 研究了天线外半径  $R_1$  变化对吸波性能的影响, 结果见图 4。由图 4 可见, 随外半径  $R_1$  的减小, 最大吸收峰位置向高频方向移动, 可见天线外半径的减

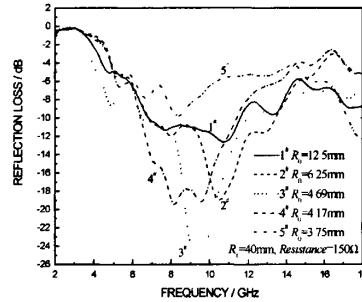


图 3 天线起始半径对吸波性能的影响  
Fig. 3 Effect of the initial radius of the antenna on the reflection loss

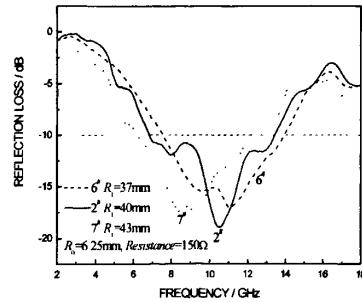


图 4 天线外半径对吸波性能的影响  
Fig. 4 Effect of the outer radius of the antenna on the reflection loss

小提高了材料高频段的吸波性能, 而其低频段性能有所降低。

### 2.2 天线两臂间电阻值对吸波性能的影响

图 5 为天线两臂间电阻值不同试样吸波性能的比较。由图 5 可见, 随天线两臂间电阻值的增加, 复合材料的最大吸收峰值先增大后减小, 转折点为天线两

臂间电阻值  $400\Omega$  时 (8# 试样), 最大吸收峰值达  $-21\text{dB}$ 。同时, 可以看到天线两臂间电阻值的改变对试样最大吸收峰的位置影响不大, 五个试样最大吸收峰均在  $10\sim12\text{GHz}$  之间。

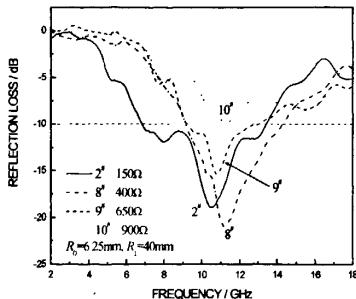


图 5 天线两臂间电阻对吸波性能的影响

Fig. 5 Effect of the resistance connecting the two arms of the antenna on the reflection loss

### 2.3 吸波机理

平面等角螺旋天线阵列对入射的电磁波有选择性(极化特性), 即将特定频带(工作频带)的电磁波从空间中检出, 把其变成为高频电流信号在天线中通过电阻损耗转化为热能, 从而对电磁波进行衰减。天线工作频带的存在是反射衰减曲线有吸收峰(吸收频带)的原因。随天线的起始半径、外半径和两臂间电阻值的改变, 天线阵列的阻抗特性和极化特性等电指标均发生变化, 从而造成天线阵列吸波性能的差异<sup>[4-6]</sup>。

根据电磁场理论<sup>[7-10]</sup>, 平面等角螺旋天线的工作频带主要受限于天线的臂长。当频率很低, 以波长计的螺旋线臂长很短时, 其辐射场几乎是线极化的。随着工作频率的升高, 辐射场逐步过渡到椭圆极化, 并最终达到圆极化。因此, 极化特性可作为选择可用频带的下限频率的一个标准。在最大辐射方向上获得轴比  $|AR| < 2$  时, 螺旋线的臂长约等于一个工作波长, 这相当于天线外半径  $R_1$  约为下限频率所对应波长的  $1/4$ 。工作频率的上限则受到馈电端, 也就是天线起始半径  $R_0$  的限制。平面等角螺旋天线工作频带的近似计算公式均为

$$\Delta f = f_H - f_L = \left( \frac{A}{R_0} - \frac{B}{R_1} \right) \quad (3)$$

式中:  $f_H$ ,  $f_L$  分别为天线的最大和最小工作频率;  $A$ ,  $B$  为常数。由(2)式可知:

1) 天线的工作频带只与起始半径  $R_0$  和外半径  $R_1$  有关, 而与天线两臂间电阻无关, 这是含平面等角螺旋天线阵列吸波复合材料的吸收频带(吸收峰)的位置受天线两臂间电阻阻值影响很小的原因。

2) 随  $R_0$  的减小, 天线的吸收频带向高频扩展, 工作频带呈宽化的趋势, 这种趋势对扩宽吸收频带是有利的。但是, 在外半径  $R_1$  不变的情况下, 随  $R_0$  的减小, 天线螺旋臂的总长度增大, 圈数增多, 试样中铜箔的含量增加, 显示出强的反射特征, 反射衰减减弱。两个因素交替起作用, 试样的吸波性能出现转折点(见图 3)。

3) 同样, 天线外半径  $R_1$  减小时对复合材料的吸收频带和吸收率均有影响。随  $R_1$  的减小, 天线的最小工作频率增大, 工作频带向高频扩展。同时, 试样中铜箔含量减少, 入射波易于进入吸波材料进行衰减, 吸收率增大。这与图 4 中吸波性能的变化规律是一致的。

天线两臂间电阻的大小在一定程度上影响着其对入射电磁波的损耗。电阻较小时, 天线的输入阻抗较小, 电磁波能够大部分进入天线而转变为高频电流, 但此时电阻损耗作用不明显, 削弱了材料的吸收率; 同样, 当电阻显著增大后, 天线两臂近似断开, 输入阻抗显著增大, 而且天线内无法形成连续的电流, 材料的吸波性能下降。因此, 电阻阻值对复合材料最大吸收峰值的影响存在一个最佳值<sup>[11]</sup>。

### 3 结论

平面等角螺旋天线阵列嵌于环氧树脂基体中制成的吸波材料具有十分优异的吸波性能。随天线起始半径  $R_0$  的减小, 平面等角螺旋天线阵列/环氧树脂复合材料的吸波性能先提高而后降低, 天线的起始半径  $R_0$ 、外半径  $R_1$  和两臂间电阻分别为  $6.25, 40\text{mm}$  和  $150\Omega$  时, 吸波材料的有效带宽  $6.64\text{GHz}$ , 最大吸收峰值  $-19\text{dB}$ , 随天线外半径  $R_1$  的减小, 复合材料的最大吸收峰向高频方向移动。平面等角螺旋天线阵列具有吸波性能好、质量轻、易于设计和成本低廉的特点, 有望成为一种新型电磁波吸收体。

### 参考文献

- [1] Thomas A. Milligan. Modern Antenna Design[M]. New York: McGraw-Hill, 1985. 2-6.
- [2] Samuel Silver. Microwave Antenna Theory and Design[M]. London: P. Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1984. 3-5.
- [3] Tianchun Zou, Chunsheng Shi, Naiqin Zhao, et al. Microwave absorbing properties of the Archimedean plane spiral antenna array/epoxy resin composites[J]. Materials Science and Engineering, B, 2007, 142(1): 51-54.
- [4] 廉行健. 天线原理与设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993. 36-42.

(下转第 185 页)

这表明对接铺层对其弯曲强度影响不是太大。

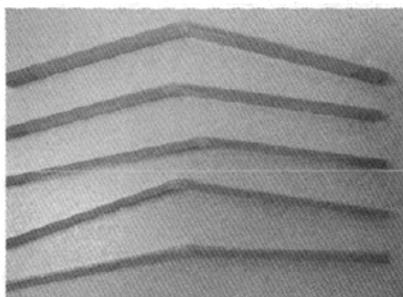


图 6 试件弯曲破坏图

Fig. 6 Flexural damage of specimen

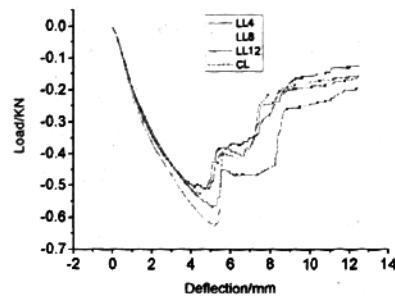


图 7 不同对接长度层合板弯曲强度

Fig. 7 The flexural strength of laminated with the different splicing interval length

表 4 弯曲试验结果

Table 4 The result of the flexural tests

The splicing interval length	Dispersion coefficient /%	Flexural load/kN	Flexural strength/MPa
4mm	3.4	0.5387	229
8mm	4.6	0.5425	231
12mm	2.9	0.5487	233
Continue laminated composite	2.1	0.6083	259

### 3 结论

(1) 本试验中对接间隔长度的精确控制和铺层过程中经纬纱的不相互滑移滑脱是试验数据有效性和准确性的关键, 这里我们采用了自制的增粘剂, 使经纬纱交织点相互粘接, 2D 织物质地变硬经纬纱之间相对位置固定, 实现了对接间隔长度的精确控制。

(2) 与连续铺层相比, 对接间隔长度为 4mm 的层合板拉伸强度的强度损失率约为 46%, 对接间隔长度为 8, 12mm 的层合板拉伸强度降低率约为 36%。表明对接铺层给层合板造成了很大的强度损失。

(3) 与拉伸强度不同, 三种不同对接间隔长度试件的弯曲强度的强度损失率均为 10%, 说明对接铺层对试件的弯曲强度影响不是太大。

### 参考文献

- [1] 王玲, 贾普荣等. 铺层拼接层合板的抗拉强度[J]. 材料科学与工程学报, 2009, 27(1): 104-124.
- [2] 王强, 贾普荣, 王文贵等. 铺层拼接层合板抗拉强度研究[J]. 科学技术与工程, 2008, 8(11): 2874-2876.
- [3] 王文贵, 程旭, 匡载平等. 应对取向制约作用的铺层切断拼接模型及实现[R]. 哈尔滨: 2008 年第十五届全国复合材料学术会议, 2008.
- [4] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1): 1-12.
- [5] 杨乃宾, 章怡宁. 复合材料飞机结构设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2004.

基金项目: 天津市应用基础及前沿技术研究计划 (09JCYBJC03800)

作者简介: 陈光伟(1964—), 男, 高工, 主要从事纺织结构复合材料成型理论与加工技术, 联系地址: 天津市河东区成林道 63 号天津工业大学复合材料研究所(300160), E-mail: chenguangwei@tjpu.edu.cn

\*\*\*\*\*

(上接第 181 页)

- [5] B S Guru, H R Hiziroglu. Electromagnetic Field Theory Fundamentals[M]. Boston: PWS Publishing Company, 1998.
- [6] W L Stutzman, G A Thiele. Antenna Theory and Design[M]. second ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1998.
- [7] Z N Chen, M Y W. Chia. Broadband Planar Antennas: Design and Applications[M]. New York: John Wiley & Sons, 2006.
- [8] 李连辉. 自补型阿基米德平面螺旋天线的设计与分析[J]. 遥测遥控, 2003, 24(4): 31-36.
- [9] 王元坤, 李玉权. 线天线的宽频带技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995. 111-116.
- [10] 林昌禄. 天线工程手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002. 382-385.
- [11] 潘仲英. 电磁波、天线与电波传播[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003. 254-268.

基金项目: 教育部博士点基金项目(20050056041)

作者简介: 邹田春(1976—), 男, 讲师, 博士, 主要从事电磁功能材料的研究, 联系地址: 中国民航大学适航审定技术研究与管理中心(300300), E-mail: zoutianchun@yahoo.com.cn

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



### 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

### 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

### 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>