

碳纤维天线的材料设计及试验研究

薛伟峰 鞠金山 陈该青

华东电子工程研究所,合肥,230031

【摘要】本文分析了天线反射面及骨架的材料及结构形式,并做了相关的性能试验,试验结果表明采用碳纤维/铝蜂窝的夹芯结构具有较高的粘接强度,且成本大幅降低;以 $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]$ 铺层形式成型的碳纤维骨架蒙皮满足构件对弯曲强度和弯曲刚度的设计要求。

【关键词】碳纤维;天线反射体;平拉强度;弯曲试验

Material Design and Experimental Research of Carbon Fiber Antenna

Xue Wei-feng, Ju Jin-shan, Chen Gai-qing

East China Research Institute of Electronics Engineering, Hefei 230031, China

【Abstract】The paper describes the materials and structural forms of antenna reflector and framework, and interrelated experiments are also performed. The results of the experiments prove that sandwich structure of preimpregnated carbon fiber/Al honeycomb has high stucked strength, and the cost reduces remarkably; the mask of antenna framework layed with $[0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ]$ form meets the design demands of flexual strength and flexual modul.

【Key words】carbon fiber;antenna reflector;tensile strength;bending test

1 引言

早期的天线反射体大多采用铝合金塑性加工的方法制造^[1]。近年来,随着复合材料,尤其是碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)的发展,CFRP以其热膨胀系数小、比强度和比模量高、力学性能的可设计性等优点深得设计者的青睐。由于其弹性模量与密度、热膨胀系数之积的比值($E/\rho * CTE$)远远高于金属材料,因此完全符合电子设备领域的高精度、轻型化、小型化和结构/功能一体化的要求。

目前星载天线的结构材料已是CFRP一统天下。地面各种口径的毫米波、亚毫米波高精度、高稳定性抛物面CFRP天线反射体,也已在世界发达国家启用。可以说,采用碳纤维增强树脂基复合材料是制造高精度反射面天线的一种非常有效的途径。

2 天线反射面设计与试验

2.1 天线反射面的结构形式

天线反射面常用材料及性能如表1所列^[2,5]。比较可知,碳纤维/环氧复合材料具有极高的比强度、比模量及极低的热膨胀系数,是制造天线反射面的最佳

材料选择。

表1 天线反射面常用材料的基本性能比较

材料性能	密度/(g/cm ³)	拉伸强度/MPa	弹性模量/GPa	比强度/(×10 ⁶ cm)	比模量/(×10 ⁸ cm)	膨胀系数/(×10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹)
碳钢	7.8	1370	210	1.8	2.7	12
铝合金	2.8	460	74	1.7	2.6	23
钛合金	4.5	940	110	2.1	2.5	9
SMC材料	1.9	80	15	0.42	0.75	—
GF/EP	2.0	1000	39	5.3	2.1	5.2
CF/EP	1.6	1800	128	11.3	8.0	0.2
Kevlar49/EP	1.4	1400	98	10.0	5.7	1.8

夹层板在雷达天线结构中应用较多,它是层合板的一种特殊形式,具有较高的抗弯刚度。夹层板一般由三部分组成:上下两层薄的面板或蒙皮,中间较厚的芯材,粘接面板和芯材成为整体的胶合层。面板多采用玻璃钢层合板、碳纤维层合板、薄铝板等材料。芯材多采用泡沫芯材(热绝缘性能好)、蜂窝芯材和波纹芯材(力学性能好)。胶合层常采用0.1mm~0.2mm厚的环氧胶膜,胶层剪切强度约为10MPa~20MPa。

目前,碳纤维复合材料制造天线反射体主要采用三种结构形式:单层板加加强筋和背架、夹层结构、夹层结构面板简易背架^[3]。对于天线反射体,若尺寸很小,则采用板状 CFRP 制造;而对于本文所研究的天线反射体由于口径较大,故采用 A 型夹芯结构加加强筋和背架的结构形式,以提高天线的刚性和稳定性。其中,反射面形状为偏置抛物面,采用蜂窝夹芯结构形式。背面的加强筋和骨架也是夹层结构,采用碳纤维/环氧为蒙皮、泡沫为芯材的结构形式。

反射面和加强筋及骨架均采用夹层结构形式,这是因为轻质的蜂窝芯材与泡沫芯材把高强度碳纤维复合材料面板和蒙皮隔开,使得结构惯性矩大大提高。这样在减轻天线整体重量的条件下,结构刚度显著提高。

2.2 CFRP 电磁波反射性能分析

对于雷达天线来说,其功能性要求就是天线反射面对电磁波的反射^[4]。石墨化程度更高的碳纤维具有更好的导电性。在反射损耗允许的范围内,利用碳纤维自身的反射能力制造天线,可以简化成型工艺,降低制造成本。

据报道,CFRP 天线已用于 20GHz 以下的电磁波的反射。但对于使用频段较高的天线,如 20GHz 以上的天线产品,碳纤维复合材料的反射损耗会使天线增益降低,电气性能变坏,则必须考虑 CFRP 天线形面的金属化。

有关研究表明,在 X 波段范围内,金属化的 CFRP 天线与纯 CFRP 天线反射损耗相当,增益、3dB 频率宽度、副瓣电平、零深等各项技术指标都差别不大。

碳纤维复合材料的电磁波反射性能测试结果如表 2 所列^[5]。由反射性能测试结果看,在 10GHz 以下频段,CFRP 材料的功率反射系数在 97 以上,具有良好的电性能,可直接使用。对用于 10GHz 以上的天线,可以采用表面金属处理的方法提高电性能,效果与铝板完全相当。

表 2 CFRP 电磁波反射性能测试结果

测试频率/GHz	4	6	7	7.5	8	10	12
功率反射系数	99.7	98.6	98.6	97.7	97.7	97	96
损耗/dB	0.01	0.06	0.06	0.10	0.10	0.13	0.15

本文研究的天线频率在 10GHz 以下,因此无需将碳纤维复合材料金属化即可满足反射特性的要求。

2.3 天线反射面性能试验

天线反射面面板材料可选的有两种:冲孔($\Phi 3\text{mm}$)的碳纤维预浸料和碳纤维编织网板预浸料;蜂窝芯材可选 NOMEX 纸蜂窝和铝蜂窝。考虑蜂窝与

面板之间预浸料中树脂含量可能较低,为了使两者粘接牢固,因此考虑蜂窝与面板之间用 0.1mm 厚的 J-47A 胶膜连接。

蜂窝夹层结构的性能包括平拉性能、滚筒剥离性能、压缩性能、剪切性能和弯曲性能等。其中,蜂窝夹层结构中的平拉强度是用来评价蒙皮和芯层胶接质量控制和成型工艺质量控制的常用试验方法之一,许多构件的破坏都是由于平拉强度不足而引起的,因此研究蜂窝夹层结构的平拉强度是十分必要的。

参考国标 GB/T 1452—2005 做了夹层结构的平拉强度试验,试验夹具如图 1 所示。试验设备为 MTS 809。试样尺寸为 60mm×60mm。

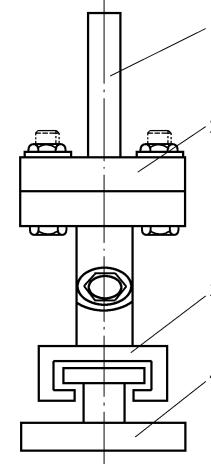


图 1 蜂窝夹层结构平拉试验夹具示意图

1—拉杆; 2—万向节; 3—T 形卡头; 4—加载块。

天线反射面蜂窝夹层结构平拉强度试验结果如表 3 所列,可得出如下结论:

表 3 天线反射面蜂窝夹层结构
平拉强度试验结果

面板材料	夹层材料		胶膜材料		试样尺寸/mm×mm	平拉强度/MPa
	类型	高度/mm	类型	厚度/mm		
带 $\Phi 3\text{mm}$ 孔 预浸料	NOMEX 纸 蜂窝铝蜂窝	4.8 3	J-47A	0.1	60×60	1.76 2.47
带 $\Phi 3\text{mm}$ 孔 预浸料	NOMEX 纸 蜂窝铝蜂窝	4.8 3	—	—		1.63 3.02
碳纤维编织 网板预浸料	NOMEX 纸 蜂窝铝蜂窝	4.8 3	—	—		1.57 2.32

(1) 蜂窝类型对平拉强度的影响。在其它试验条件同等的情况下,铝蜂窝与碳纤维预浸料的粘接强度远高于 NOMEX 纸蜂窝,高出幅度达 40% 以上。

(2) 预浸料类型对平拉强度的影响。同等条件下,冲孔($\Phi 3\text{mm}$)的碳纤维预浸料 MTM28 与蜂窝芯

材的粘接强度要高于碳纤维编织网板预浸料。

(3) J-47A 胶膜对平拉强度的影响。加入胶膜之后,NOMEX 纸蜂窝与预浸料的粘接强度稍有增加,而铝蜂窝与预浸料的粘接强度下降达 20% 之多。由此可见,使用胶膜对蜂窝与预浸料的粘接影响不是很大,而且对于铝蜂窝有负面的影响。

(4) 破坏形式分析。平拉强度试验中出现从NOMEX 纸蜂窝中间处断裂的现象,而铝蜂窝夹层结构的破坏均出现在蜂窝与碳纤维面板的粘接界面处,分析原因可能主要是 NOMEX 纸蜂窝的抗拉强度较低的缘故。

综上试验结果分析,带 $\Phi 3\text{mm}$ 孔预浸料与铝蜂窝构成的夹层结构具有较大的平拉强度,这表明带 $\Phi 3\text{mm}$ 孔预浸料与铝蜂窝的粘接情况较佳。并且考虑到铝蜂窝具有以下几方面的特性和优势:

(1) 铝蜂窝材料具有良好的剪切性能,质量轻、刚性好、导热性和成型工艺性好等特点;

(2) 铝蜂窝芯材的导热系数高,传热快,可增加内外蒙皮的热通道,平衡内外蒙皮温差,减小制品热应力,有利于型面精度的稳定;

(3) 铝蜂窝价格低,成型方便,可大幅降低成本。

因此带 $\Phi 3\text{mm}$ 孔预浸料与铝蜂窝构成的夹层结构是天线反射面的较佳结构形式。

3 天线骨架设计与试验

天线骨架的主要作用是支撑反射面、提高天线整体刚度、稳定制品工作型面、补充力学性能,尽可能地限制反射面的变形。它的重量占天线整体重量的很大一部分,因此骨架的重量及刚度是设计的关键。天线骨架受力时产生弯曲,因此要求具有较好的抗弯刚度。采用碳纤维蒙皮/泡沫夹芯结构,满足了刚度好、重量轻的设计要求。

表 4 是对两种单向碳纤维预浸料拉伸性能的试验结果。综合考虑各方面因素,HR46 碳纤维预浸料具有较高的拉伸强度和模量,能达到设计所需的要求。泡沫芯材采用 PMI 泡沫,泡沫与碳纤维蒙皮之间用 0.2mm 的 J-47A 胶膜进行粘接。

表 4 天线骨架蒙皮材料的拉伸性能试验结果

蒙皮材料	试验方法	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa
HR40	GB/T 3354 - 1999	917	182.7
HR46		980	223.5

铺层设计是复合材料结构设计特有的重要内容,其目的是充分利用铺层的正交各向异性特性和结构的层压特性,通过优化设计,选取最佳的铺层角、铺层百

分比和铺层顺序,以得到满足性能要求的最佳结构。工程上采用的一种有效的铺层设计方法是假定(0° , $\pm 45^\circ$, 90°)层板能有效地承受各种载荷,实际上从设计、制造和减重的观点看,这种铺层接近于最佳状态。

天线骨架蒙皮采用 [$0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ$] 的铺层形式,这样保证了骨架拥有足够的强度以抵抗弯曲及其他各种形式载荷的作用。HR46 碳纤维预浸料层压板三点弯曲试验结果如表 5 所列。弯曲强度及弯曲模量均能满足设计的要求。

表 5 HR 46 碳纤维层压板三点弯曲试验结果

材料	铺层方式	试验方法	跨距 /mm	弯曲强度 /MPa	弯曲模量 /GPa
HR 46	$0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ$	GB/T1449 - 2005	24	356.4	25.6

4 结束语

采用碳纤维复合材料制造天线构件可减轻天线重量,提高天线性能。高精度碳纤维天线反射体的制造技术是整个雷达系统的关键制造技术之一,碳纤维/蜂窝(或泡沫)夹芯结构是大型碳纤维天线理想的结构形式。

相关试验表明:与碳纤维/NOMEX 纸蜂窝相比,采用碳纤维/铝蜂窝的夹芯结构具有更高的粘接强度,且生产成本大幅降低。以 [$0^\circ/45^\circ/90^\circ/-45^\circ$] 铺层形式成型的碳纤维骨架蒙皮满足构件对弯曲强度和弯曲刚度的要求。

参 考 文 献

- [1] 肖道荣,江万松,高红成. 碳纤维增强天线反射体. 玻璃钢学会第十五届全国玻璃钢/复合材料学术年会论文集,2003:181-184.
- [2] 敦辽辉. 碳纤维复合材料在天线上的应用[J]. 电讯技术,1998,38(2):41-44.
- [3] 颜万生,方芳,张京,程培忠. 碳纤维复合材料天线反射面研制[J]. 现代雷达,1996,21(3):100-104.
- [4] 李志君,李学成. 先进复合材料在雷达天线技术中的应用与前景[J]. 通信与测控,1995,(2):58-63.
- [5] <http://www.sxttx.com/service/info.php?inid=1199715852>.

作 者 简 介

薛伟锋 男,1982 年生,硕士研究生,主要研究方向是树脂基复合材料的设计、工艺与应用。

鞠金山 男,高级工程师,主要研究方向是复合材料的设计与工艺技术。

陈该青 男,1980 年生,本科,主要研究方向为电子装联工艺和雷达整机装配工艺。

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)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)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)，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>