

树脂基复合材料在导弹雷达天线罩中的应用

Research of Polymer-matrix Composites for Missile Radomes

石毓锬，梁国正，兰立文（西北工业大学化学工程系，西安 710072）

SHI Yu-tan, LIANG Guo-zheng, LAN Li-wen

(Department of Chemical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要：介绍了对导弹天线罩材料性能的要求，并综述了用于导弹雷达天线罩的聚合物基复合材料的研究进展。

关键词：天线罩；透波材料；聚合物基复合材料；介电常数；介电损耗角正切

中图分类号：V258 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-4381(2000)05-0036-04

Abstract: The characters of polymer-matrix composites for missile radomes were presented, and the progress in the research of polymer materials for missile radomes was reviewed.

Key words: radome; transparent material; polymer-matrix composite; dielectric constant; dielectric loss tangent

导弹雷达天线罩是保证雷达天线系统正常工作的一种设施。它既是导弹弹体的组成部分，又是雷达制导系统的组成部分；既要适应导弹气动力、气动热和飞行过程中的恶劣环境，又要满足雷达系统对功率传输系数、瞄准误差和天线方向图畸变等电性能的要求^[1]。天线罩材料有两大类：有机天线罩材料和无机天线罩材料。前者通常指以合成树脂为基体、玻璃纤维或有机纤维为增强材料制成的复合材料，后者一般指耐高温的非金属无机陶瓷。本文主要综述了用于天线罩的树脂基复合材料的研究进展。

1 对导弹天线罩材料的性能要求^[1]

在各种雷达天线罩中，对导弹雷达天线罩的性能要求最高，它除应具备与飞行器雷达天线使用频率耦合的透波性能、最小的插入损失外，还需具备能承受飞行器空气动力载荷和环境热气流、雨流的冲刷及其载荷的振动冲击性能，其电气和机械性能应不受环境（湿度、温度）条件变化的影响。

上述要求反映到材料性能上即为如下性能要求：

(1) 优良的介电性能——介电常数 ϵ 低，损耗角正切值 $\tan\delta$ 小。一般情况下，在 0.3~300GHz 频率范围内，天线罩材料的适宜 ϵ 为 1~4， $\tan\delta$ 为 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ 数量级，这样才能获得较理想的透波性能和瞄准误差特性^[2]。

(2) 足够的机械强度和适当的弹性模量。

(3) 良好的热冲击性和耐热性。天线罩必须承受由于气动加热引起的剧烈热冲击和高温环境。如亚音速导弹天线罩表面温度低于 100℃，速度增加至 $M=2$ 时达 200~250℃， $M=3$ 时，该温度可达 300℃ 以上，

因而要求天线罩材料具备优良的耐热性^[3]。

(4) 经得起雨蚀、辐射等环境条件。

(5) 可生产性和经济性。

但是迄今没有一种材料完全具备上述优良性能。无机陶瓷材料能耐高温、介电性能好以及强度高等，但其质脆、韧性差、耐热冲击性能差并且成型工艺复杂。树脂基纤维增强复合材料有较高的比强度，材料的介电性能、机械性能和热性能具有可设计性，但使用温度受树脂基体耐热性的限制，目前阶段最高使用温度不超过 360℃。当 $M < 3$ 时可以用环氧树脂、聚酰亚胺等玻璃纤维增强的复合材料，但对 $M > 4$ 的高超音速导弹天线罩，这类材料就无法应用。近年来，对新型热塑性树脂复合材料和非碳化烧蚀材料的研究，为有机材料在导弹天线罩制造领域中的应用注入了强大的生命力。

2 天线罩材料

2.1 纤维增强材料

玻璃纤维是导弹天线罩中最常用的增强材料，美苏等国公开的文献中多数导弹仍采用玻璃纤维复合材料，如美国的“霍克”导弹和前苏联的“SA-6”导弹等^[4]。常见的玻璃纤维及其性能见表 1^[5]。其中 D 玻璃纤维是国外专门为天线罩而研制的新型玻璃纤维，介电常数和损耗仅次于石英玻璃纤维，但抗张强度和模量稍低，对于电性能要求高的导弹来说，是制造天线罩较为理想的材料。石英玻璃纤维的介电性能最好，可实现天线罩的宽频透波性，但价格远远高于 E 玻璃纤维。目前国外导弹天线罩大多已采用此种纤维。S 玻璃纤维中由于含有较高的碱金属

氧化物，在高温烧蚀时易离子化，产生尾流，使导弹易被雷达跟踪，因此 S 玻璃纤维在高性能导弹天线罩中的应用不多。芳纶纤维（Kevlar）是一种比较常用的有机纤维。美国 Du Pont 公司生产的 Kevlar 具有高强度和高模量，已用于天线罩的制造。但芳纶的压缩强度差，抗扭剪不强，且易吸潮，在加工过程中应予以注意^[5]。Spectra 1000 为一种商品化的

高模量聚乙烯纤维。由于聚乙烯在各种频率下均表现出优异的介电性能，以及该纤维所具有的低密度、高强度、高模量和高抗冲击性能，使得高模量聚乙烯纤维在高性能天线罩的制造中具有极大的吸引力^[6,7]。但由于聚乙烯纤维表面具有惰性，必须经过特殊的表面处理以增强它与树脂基体间的粘接力。

表 1 用于雷达天线罩的纤维增强材料的物理性能

Table 1 Physical properties of fiber reinforcements for radome application

性能	E 玻璃纤维	S 玻璃纤维	D 玻璃纤维	石英玻璃纤维	Kevlar49	Spectra 1000
密度/(g·cm ⁻³)	2.54	2.49	2.16	2.20	1.45	0.97
拉伸强度/GPa	3.45	4.00	2.40	1.70	3.45	3.0
杨氏模量/GPa	72	85	52	72	137	172
介电常数 ϵ^*	6.13	5.21	4.00	3.78	3.85	2.3
介电损耗 $\tan\delta^*$	0.0038	0.0068	0.0026	0.0002	0.001	0.0004

* $f = 9.375\text{GHz}$

2.2 树脂体系

树脂在复合材料中起粘结剂的作用，是决定复合材料耐热性的基本成分。传统的树脂基体如不饱和聚酯树脂、环氧树脂、酚醛树脂等热固性树脂仍广泛用于各种导弹天线罩，除此之外有机硅树脂、聚酰亚胺（PI）等新型耐高温树脂也逐渐开始投入使用。热塑性树脂近年来在天线罩的制备中崭露头角，其中最引人注目的是美国研制的非碳化烧蚀材料聚四氟乙烯 PTFE。

不饱和聚酯树脂的电性能、工艺性能良好而且价格便宜，是最早用于天线罩的聚合物之一。为了提高树脂的耐热性，美国 Nangatuck 化学公司在 20 世纪 60 年代初用三聚氰酸三烯丙酯 TAC 对普通不饱和聚酯进行了改性，商品名为 Vibrin 135，Vibrin 136，从而将其复合材料长期使用温度由 120℃ 提高至 150℃。该树脂曾被波音公司选用为 Bomarc 导弹天线罩的树脂基体^[5]。

环氧树脂是导弹天线罩最常用的基体树脂之一，它具有优良的粘结性能、耐化学腐蚀性能和电性能，固化收缩率低，能形成尺寸稳定的致密制品。其贮存期、固化条件以及粘度随固化剂的不同而呈多样性。但环氧树脂的使用温度一般较低，可用于亚音速导弹天线罩，如我国的亚音速岸舰、舰舰导弹天线罩采用 A 型夹层结构，以环氧复合材料为蒙皮，聚氨酯泡沫为芯层，功率传输系数不低于 85%^[3]。美国 80 年代先进的潜射型“战斧”巡航导弹天线罩亦采用了环氧复合材料^[8]。

酚醛树脂具有良好的耐热性、力学性能和在各种环境下的耐候性，使用温度可达 250℃。但由于其固化反应会产生低分子挥发物，因而成型压力高，

后固化时间长，另外其介质损耗较大。但考虑其综合性能，在一些对材料耐热性要求较高的场合，常采用改性酚醛树脂，如前苏联的萨姆-6 导弹^[1]、我国的超音速岸舰导弹^[3]等。但酚醛的介电常数因温度的升高而产生明显的增大，从而限制了它在高性能超音速导弹上的应用。表 2 列出了几种玻璃纤维复合材料层压板的性能。

表 2 几种玻璃纤维层压板性能

Table 2 Properties of glass fiber reinforced polymer laminates

性能	Vibrin 135	环氧树脂	酚醛树脂
抗张强度/MPa	379	390	380
抗压强度/MPa	345	380	413
弯曲强度/MPa	466	550	468
弯曲模量/GPa	24	22.7	18
介电常数 ϵ^*	4.05	4.16	5.10
介电损耗 $\tan\delta^*$	0.012	0.012	0.025

* $f = 9.375\text{GHz}$

氰酸酯树脂进入 20 世纪 80 年代后在天线罩方面逐渐得到应用。它的主要特点是：低的介电系数（2.8~3.2），极小的介电损耗角正切值（0.002~0.008），并且在宽广的温度 [-160~(T_g-50)]℃、频率范围（10⁶~10¹¹Hz）变化很小；高耐热性（T_g 240~290℃），瞬时耐热性（热分解温度）远高于环氧树脂；低吸湿率（<1.5%）；小的热胀系数；优良的力学性能和粘接性能；具有与环氧树脂相似的工艺性，可溶于普通溶剂中，易与增强材料复合，固化过程中无低分子物析出，可于 177℃ 固化。目前氰酸酯树脂已成功地应用于雷达天线罩领域^[9]。如 BASF 公司的一种以氰酸酯/石英纤维复合材料做成

的天线罩，比环氧树脂制备的天线罩介质损耗小三倍，介电常数降低 10%，吸湿率更小，湿态介电性能更优。

有机硅树脂的突出优点是耐热性和优良的介电性能，在各种环境条件（高温、潮湿）下的介电性能都比较稳定。其缺点是机械强度较低，且须高压成型。俄罗斯对有机硅树脂进行了多年深入系统的

研究，已将有机硅复合材料成功地应用于战略导弹、火箭以及航天飞机中，所采用的硅树脂为聚二甲基有机硅（商品牌号 MK-9K），再添加少量的高温除碳剂，在 1200℃ 能释放氧，可降低树脂的残碳率，对电性能十分有利。表 3 是俄罗斯有机硅透波材料的主要性能^[10,11]。

表 3 俄罗斯有机硅基透波材料性能

Table 3 Properties of polysiloxane transparent materials in Russia

性能	纤维模压/硅树脂	高厚布模压/硅树脂	有机硅热裂解 $3\text{DSiO}_2/\text{SiO}_2$
密度/（ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ）	1700~1900	1500~1600	1500~1600
抗压强度/MPa	64	120~140	30~40
抗拉强度/MPa	23	30~50	10~15
抗弯强度/MPa	60	60~80	10~25
热导率/（ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ）（50℃）	0.45	0.49	0.36
比热容/（ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ）	0.88	0.88	0.84
线胀系数/（ $\text{K}^{-1}\times 10^{-6}$ ）（20~2737K）	10	3.2	2.0
ϵ （ $10^{10}\text{Hz}, 300\text{K}$ ）	4.0	3.0	3.0
ϵ （ $10^{10}\text{Hz}, 1300\text{K}$ ）	5.0	3.2	3.0
$\tan\delta$ （ $10^{10}\text{Hz}, 300\text{K}$ ）	0.1	0.01	0.01
$\tan\delta$ （ $10^{10}\text{Hz}, 1300\text{K}$ ）	0.15	0.01	0.01

聚酰亚胺树脂是近年来研究报导较多的一种耐高温树脂^[12]。美国 NASA Lewis 研究中心最先研制成功的 PMR-15 预浸料已经获得商品化。针对 PMR-15 贮藏时间短、树脂流动性不够且含有游离 4,4'-二氨基二苯甲烷（MDA）这一致癌物质，NASA 又相继研制了第二代 PMR 树脂，即 PMR-II 和 LaRCTM-160 等。这几种 PI 树脂为加成型树脂，是含有酰亚胺键的可交联树脂，在加热条件下可交联固化成型。另一类为缩聚型聚酰亚胺，如 Du Pont 开发的 Avimid K, Avimid N 系列^[13]，Cyanamid 公司的聚醚酰亚胺 CYPAC 等，这类树脂在加热时由聚酰胺酸脱水亚胺化而成为聚酰亚胺。PI 树脂可在

300℃ 长期使用，短期使用温度达 540℃。它们的介电性能十分优良， ϵ 为 3.4 左右，介电损耗 10^{-3} ，而且在宽广的温度和频率范围内仍能保持较高水平，见表 4 及图 1^[14]。PI 复合材料的机械强度相当或超过环氧复合材料，是一种相当理想的高性能导弹天线罩材料。然而它的缺点是固化困难，常需高温高压和复杂的升温程序；由于反应生成的水或溶剂的存在导致孔隙率较高，从而引起吸潮，使电性能降低。曾采用了一些密封措施来解决吸潮问题，如石英布/PI 复合材料与非炭化烧蚀材料聚四氟乙烯 PTFE 相结合已制得高速宽频带天线罩^[14]。

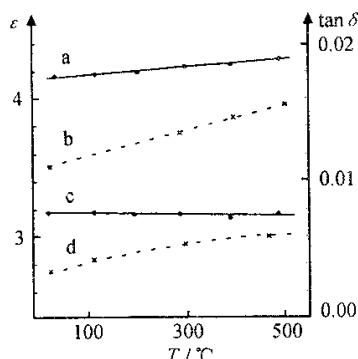
表 4 聚酰亚胺复合材料的性能

Table 4 Properties of fiber reinforced PI composites

增强材料	树脂含量 /wt%	介电常数 ϵ	介电损耗 $\tan\delta$	拉伸强度 /MPa	压缩强度 /MPa	弯曲强度 /MPa	弯曲模量 /GPa
E 玻璃布	24	4.1	0.01	200	190	360	22
石英玻璃纤维	22	3.0	0.006	200	180	300	17
Kevlar 49	35	3.3	0.006	350	180	280	22

随导弹飞行速度的提高，人们正大力研究可用于 $M > 4$ 的高超音速导弹天线罩。介电性能独树一帜的氟塑料已经开始进入天线罩领域。其中以美国 Rogers 公司研制的 Duroid 5870 综合性能较为优越，

并且在材料研制的基础上，用它制作了 $M = 4$ 的“Sparrow（麻雀）AIM-71”导弹天线罩，该公司目前已取得制作这一天线罩的专利权^[15]。



(a) ϵ 聚酰亚胺树脂/玻璃布 ; (b) $\tan\delta$ 聚酰亚胺树脂/玻璃布 ;
(c) ϵ 聚酰亚胺树脂/石英布 ; (d) $\tan\delta$ 聚酰亚胺树脂/石英布

图 1 PI 复合材料的介电性能与温度的关系

Fig. 1 Dielectric properties versus temperature for fabric reinforced PI composites

Duroid 5870 材料由聚四氟乙烯和玻璃纤维复合而成，PTFE 的分子结构是碳和氟原子组成完全对称的无支链的线性高分子，分子不具有极性，碳氟键具有很高的键能，因此具有高度稳定性和很强的防蚀性能。PTFE 具有低的介电常数 2.1 (10GHz)，介电损耗一般为 $(3\sim4) \times 10^{-4}$ (10GHz)，为天线罩的高透波率创造了条件。PTFE 在高温时分解为不导电的氟碳化物，460℃以上时产生蒸发散热，但表面不碳化，是一种非常好的非碳化烧蚀材料。但 PTFE 的力学性能在常温下不如其它塑料，需采用增强剂进行补强；而且 PTFE 不能熔融，一般需要烧结成型，工艺复杂，这在很大程度上限制了它的应用。目前我国在含氟材料的研究与应用方面也已开展了工作^[16,17]。

另外，可用于导弹雷达天线罩的高性能热塑性树脂还有聚砜^[18]、聚醚醚酮树脂 (PEEK)^[19]等。这类复合材料的主要优点是：浸渍前聚合反应已完成，因而预浸料无存放时限；生产过程中无化学反应，加工成型周期短；边角料可重新利用；吸湿率低 ($<1\%$)；韧性好，比热固性树脂高 10 倍以上；耐化学腐蚀。但由于热塑性树脂要求较高的工艺温度 (316~416℃)，且粘度大，要求成型压力高，因此热塑性树脂预浸料的制备和成型工艺是目前研究的重点^[20]。

3 展望

未来导弹武器系统的发展对天线罩提出了更高的要求，导弹速度和机动能力的大大提高要求天线罩必须在更高的工作温度和更恶劣的环境中，承受更大负载和热冲击，并有更好的传输特性和更低的瞄准误差率。加上未来导弹要求能够适用陆、海、空各种不同作战环境，天线罩必须能在其中最恶劣的环境中正常工作。红外/微波、红外/毫米波等双模制导技术、隐身技术、毫米波技术等先进技术的

应用都将对天线罩材料及制造技术提出更高更新的要求。作为未来天线罩的材料除了在电气上继续满足低介电常数、低损耗特性外，还必须具有极为宽的频带特性，具有高的结构强度和抗雨蚀能力，具有经得住 $M>3$ 的高速气动加热的抗热冲击能力和相当高的工作温度以及便于成型加工的特性，这是当前和今后一段时期天线罩材料发展的新方向。依据这个思路，笔者认为，目前热固性树脂中应当重点发展氰酸酯树脂、有机硅树脂等力学性能、耐热性、电性能均优的材料；对于要求更高的导弹，则以高性能热塑性树脂如聚酰亚胺、PTFE、PEEK 等为发展方向，以满足未来导弹的需求。

参考文献

- [1] 彭望泽 . 防空导弹天线罩 [M]. 北京 : 宇航工业出版社 , 1993
- [2] 全毅, 周馨我 . 材料导报 , 1997, 11 (3):1~5
- [3] 沈世绵 . 飞航导弹材料 [M]. 北京 : 宇航工业出版社 , 1994
- [4] 洪晓春 . 国外战术导弹 , 1984 增刊 , 1 : 27~32
- [5] J. D. Walton.Jr. Radome Engineering Handbook , Marcel Dekker, Inc. , New York , 1970
- [6] Robert W. Seibold , James J. Licari and Raymond L. Brown. SAMPE J. 1997 , 33 (2):9~16
- [7] David S. Cordova and Daniel Scott Donnelly. Proceedings of the 33rd International SAMPE Symposium and Exhibition , 1988 : 1027~1038
- [8] 邱惠中, 江辉 . 宇航材料工艺 , 1998 , 4 : 9~14
- [9] 兰立文 . 玻璃钢/复合材料 , 1996 , 6 : 29~33
- [10] 胡连成, 黎义, 于翹 . 宇航材料工艺 , 1994 , 1 : 48~52
- [11] 胡连成 . 宇航材料工艺 , 1992 , 5 : 59
- [12] 丁孟贤, 何天白 . 聚酰亚胺新型材料 [M]. 北京 : 科学技术出版社 , 1998
- [13] Murty S. Tanikella , Joseph A. Mosko and Thomas J. Rafalski. In : The 24th International SAMPE Electronic Conference , Vol. 24 , 1992 : 687~698
- [14] 王小群, 杜善义, 韩杰才 . 宇航材料工艺 , 1998 , 2 : 17~23
- [15] 王蜀谦 . 宇航材料工艺 , 1989 , 4 : 72~76
- [16] 程莲娣 . 宇航材料工艺 , 1993 , 4 : 55~58
- [17] 姜卫陵, 裴肇辉 . 导弹与航天运载技术 , 1996 , 1 : 48
- [18] David H. Leuw. Proceedings of the 8th Meeting on Optical Engineering and Remote Sensing , SPIE , 1993 : 447~459
- [19] C. K. Hall. Proceedings of the International Conference of Fiber Reinforced Composites '84 , 1984
- [20] 李凌, 唐龙贵, 益小苏 . 纤维复合材料 , 1994 , 11 (4):10~17

收稿日期：1999-04-08； 修订日期：1999-12-01

作者简介：石毓锬 (1974-)，女，在读博士生，现师从于蓝立文、梁国正教授从事高性能树脂基复合材料的研究。联系地址：西安市西北工业大学化工系梁国正收转 (710072)

本文编辑：孙常青

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>