

天线罩材料研究进展

杨薇薇¹ 杨红娜² 吴晓青¹

(¹ 天津工业大学先进纺织复合材料教育部重点实验室, 天津 300387; ² 北京空间机电研究所, 北京 100076)

摘要: 天线罩材料须同时具有力学、介电和抗雨蚀等综合性能。本文以天线罩的发展过程为线索, 简述了从纤维复合材料、陶瓷及陶瓷基复合材料作为天线罩材料的国内外研究现状, 指出了天线罩未来的发展方向。

关键词: 天线罩材料; 纤维增强复合材料; 陶瓷; 陶瓷基复合材料

1 序言

天线罩^[1]的作用是保护下面的天线以及相关电子设备免受来自环境的影响, 由于空气动力学的原因, 对于整个系统天线罩要拥有有利的外形, 减小电磁能量的失真, 同时保证下面的天线性能稳定。天线罩形状和大小多样, 可以使用各种介电材料制备, 广泛应用于海洋、地面、空中和太空, 是每个含有天线系统的必要组成部分。其中对天线罩性能要求最高的就是高超音速导弹天线罩, 它不但需要满足导弹的气动外形要求, 导弹飞行时所承受的热载荷和力学载荷的要求, 还必须满足导弹制导系统所提出的电气性能要求。因此, 对它的研究是一门集导弹空气动力学和热力学、机械结构、电磁场理论、天线技术、制导与控制技术、新材料及其工艺技术、专门的检测设备等复杂技术于一体的边缘学科^[2]。

天线罩的性能与所选材料的性能关系密切, 天线罩材料应具备以下特性^[3]:

(1) 介电常数(<10)和介电损耗(<0.01)小, 低的介电常数会降低反射, 使反射对辐射模式和插入损耗的影响降低到最小, 并且介电性能不随温度和频率产生明显变化。材料在高温条件下性能稳定, 确保在气动加热条件下尽量减少电磁波的失真。此外低介电常数的材料能给天线罩带来宽频带响应, 允许放宽壁厚公差, 降低

制造成本;

(2) 质轻, 材料整体性能的一致性。良好的常温和高温机械性能稳定性, 使飞行中的天线罩能承受导弹的气动加热、加载条件, 满足一定载荷条件下的强度和刚度要求同时保持结构完整性;

(3) 线胀系数低、弹性模量高, 优异的抗热震性能, 以免在温度骤升条件下失效;

(4) 耐冲刷、耐雨蚀能力强, 抗粒子云侵蚀, 以保证导弹在雨水冲刷和辐射等环境下正常使用。耐天线罩内部和外部压差能力强;

(5) 良好的工艺性、可加工性和经济性, 减少后期维修费用和故障。

本文简要介绍了天线罩的发展历程, 对材料体系进行了总结, 并指出了未来材料的发展方向。

2 天线罩材料的发展历程

在 1941 年诞生了第一个用薄壁有机玻璃制备的半球状天线罩, 由美国西方电气公司生产用于飞机 Douglas B-18A 中的 S 波段^[1,4], 由此对于天线罩的研制拉开了序幕。在 20 世纪 40~50 年代, 天线罩一般采用胶合板、聚苯乙烯泡沫、酚醛-环氧浸渍的棉或者玻璃布为原料。第一个 A-夹层天线罩是在 1944 年由麻省理工学院利用低密度聚苯乙烯泡沫为芯子, 玻璃层板为蒙皮制备的天线罩^[1]。迄今为止, 天线罩材料的研究已有 70 年的历史, 其发展历程经历了: 纤维增强

作者简介: 杨薇薇(1987~), 女, 硕士研究生, 主要从事纺织复合材料的研究。

复合材料—氧化铝陶瓷—微晶玻璃—石英陶瓷—氮化物陶瓷—陶瓷基复合材料。目前从 Patentlens 网站查询到世界范围内关于天线罩的专利 7000 多项,其中美国专利就有 5000 多项。在国家知识产权局查到的我国关于天线罩的专利有 400 多项,其中还包括了部分国外专利在我国的注册,我国天线罩起步在 70~80 年代,起步晚,还要加大发展力度才可后来居上。

2.1 纤维增强复合材料

树脂基复合材料是天线罩应用的最早的材料,基本可以满足地面天线罩的需求,目前为止国内外的很多公司仍在从事树脂基复合材料天线罩的设计、研发和生产的工作,可见其应用范围之广。

2.1.1 纤维增强体

用于天线罩的连续纤维主要有玻璃纤维、碳纤维、芳纶纤维、聚丙烯纤维、石英纤维、聚酯—多芳基纤维等。

玻璃纤维增强复合材料广泛用在亚音速或者是低音速飞行的夹层结构中,作为 A—夹层天线罩的蒙皮,具有质轻、成本低的优点,但是不能承受高温环境^[5]。玻璃纤维是导弹天线罩常用的材料,50 年代初波音飞机公司“波马克”导弹 CIM-10 天线罩采用的是玻璃纤维缠绕成型,用

于马赫数 $Ma=3$ 的主动寻的制导导弹^[2]。还有美国的霍克导弹和前苏联的 SA-6 导弹^[6],前苏联的 SA-6 导弹采用的是玻璃纤维增强改性酚醛树脂制备的^[7]。美国 Rogers 公司研制的 Duroid5870 材料由聚四氟乙烯和玻璃微纤维复合而成,介电常数为 2.33 ± 0.02 ,介电损耗为 0.0005,介电性能随频率变化而不变,耐化学腐蚀^[8],用它制备了 $Ma=4$ 的“Sparrow (麻雀 AIM-71)”导弹天线罩^[9]。

石英纤维的介电性能较好,10GHz 下的介电常数仅为 3.74,线胀系数为零,硬度高,可实现天线罩的宽频透波,目前国外导弹天线罩大多已采用此种纤维。石英布/聚酰亚胺 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^[11]。1992 年在获得了美国联邦航空管理局批准的前提下石英纤维/环氧天线罩首次用于商业航空运输。但是石英纤维成本较高,一直很少用于民用产品。

聚丙烯纤维在各种频率下均表现出优异的介电性能,聚丙烯纤维增强的聚丙烯复合材料的介电常数为 2.1,介电损耗为 0.0015,比同频率下的石英纤维/氰酸酯复合材料的介电常数(3.2)和介电损耗(0.005)都要低,但是该纤维使用温度较低,最高使用温度仅仅为 100°C ^[12]。

表 1 天线罩常用纤维性能比较^[13]

性能	石英纤维	E-玻璃纤维	S-2 玻璃纤维	聚酯—多芳基纤维
拉伸强度(10^3 psi)	850	500	665	412
拉伸模量(10^6 psi)	11	10.5	13	9
断裂伸长率(%)	7.7	4.5	5.4	3.3
介电常数	3.74	6.1	5.21	2.09
损耗正切值	0.00025	0.004	0.0068	0.003

注:介电性能是在 10GHz 下测得的

美国 Celanese Acetate LLC 生产了牌号为 Vec-transde 的聚酯—多芳基纤维,这种纤维的线密度为 1500 旦,可用来机织和编织。该纤维有很好的力学性能和硬度,同时可以降低射频传输损耗,源于聚酯—多芳基纤维的介电常数比石英和玻璃纤维都要低^[13],与其他纤维性能的比较如表 1 所示。聚酯—多芳基纤维/氰酸酯复合材料天线罩射频损耗为 0.21dB,石英纤维/氰酸酯复合材料的射频损耗为

0.36dB,射频损耗降低了 41.7%。该纤维有望在天线罩材料中得到广泛的应用。

纤维种类多,每种都有自己的适用场合,为满足高性能需求,纤维要向着力学性能好、介电性能优异并且介电性能随温度的变化小、耐高温的方向发展,同时降低生产成本。

2.1.2 树脂基体

树脂在复合材料中起到粘结增强体并传递

载荷的作用,是决定复合材料耐热性能的基本组分。天线罩材料中常用的热固性树脂主要有环氧树脂(EP)、聚酯树脂(UP)、酚醛树脂(PF)、双马来酰亚胺树脂(BMI)、氰酸酯树脂(CE)、有机硅树脂等;热塑性树脂包括聚四氟乙烯树脂(PTFE)、聚酰亚胺树脂(PMI)、聚砜(PF)、聚醚醚酮树脂(PEEK)等。

环氧和聚酯树脂是地面雷达罩最常用的基体,但通常长期使用温度较低,不能满足材料高性能的要求。在 20 世纪 60 年代初美国 Nangatuck 化学公司用三聚氰酸三烯丙酯 TAC 对普通不饱和聚酯进行了改性,使复合材料长期使用温度由 120℃ 提高到 150℃,波音公司曾将其选用为 Bomarc 导弹天线罩的树脂基体^[14]。环氧树脂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 型夹层结构就是以环氧复合材料为蒙皮,聚氨酯泡沫为芯子制备的^[15]。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^[16]。

酚醛树脂是一种烧蚀隔热基体材料,使用早,用量大,缺点就是脆性大、残炭率低、烧蚀性能不稳定、易吸湿^[17-18],因此国内外进行了大量的改性研究。研制出了硼酚醛树脂、酚三嗪树脂、S-157 酚醛树脂等,S-157 在国内作为烧蚀隔热基体树脂已广泛应用在航空航天领域,如我国的超音速岸舰导弹^[15]。

双马来酰亚胺树脂的优点是耐湿热性能和耐热性良好,但存在韧性不足的缺点^[19],可以满足机载 PD 雷达天线罩和微带天线的使用要求^[4]。Hughes missile systems 公司的 Andrew B. Facciano 等人设计的导弹的弹身就采用了石

墨/BMI 树脂缠绕成型复合材料,导弹天线罩外蒙皮材料是石英纤维/BMI 树脂^[20]。

氰酸酯树脂具有优异的介电性能,介电常数在 9.375GHz 下为 2.8~3.2,介电性能随温度范围变化较小,耐热性高以及成型工艺简易等优点在 20 世纪 80 年代崭露头角。BASF 公司的一种以石英纤维/氰酸酯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^[10]。Ici Fiberite 公司与 Hitex 公司制备的氰酸酯基复合材料已用于雷达天线罩系统中^[19]。

有机硅树脂的优点是介电性能好,但是机械强度较低,高压成型工艺复杂,俄罗斯对这种树脂进行了深度的研究^[10],波音公司的 Bomarc 导弹天线罩把它选为树脂基体^[19]。

聚酰亚胺树脂可在 300℃ 下长期使用,介电常数为 3.4 左右,是一种理想的导弹天线罩基体材料。美国的 Nasa Lewis 研究中心、Du Pont 和 Cyanamid 公司对此进行了深入的研究和改进工作^[10],使其可以满足材料的高性能要求。

聚四氟乙烯树脂具有高度稳定性和优异的防腐性能,介电常数仅为 2.1(10GHz),有利于天线罩的高透波,但其力学性能在常温下较低,不如其他塑料,需对其进行增强改性,而且存在烧结成型工艺复杂的缺点^[10],该树脂基复合材料主要用于极为特殊专业场合的小型微波产品中^[21]。

热塑性树脂基复合材料的优点是浸渍前聚合反应已完成,吸湿率低,缺点就是成型工艺温度高、压力大,因此目前重点应主要研究其预浸料的制备和成型工艺^[19],使其可以得到更广泛的应用。常用树脂基体的性能如表 2 所示。

表 2 常用树脂基体的性能^[10,19,22]

树脂	介电常数	损耗角正切	长期使用温度(℃)
不饱和聚酯树脂	2.8~4.1	0.006~0.026	120
环氧树脂	3.2~5.0	0.010~0.019	110
酚醛树脂	4.5~5	0.015~0.030	250
有机硅树脂	2.9~5.0	0.003~0.030	150
聚酰亚胺树脂	2.7~3.2	0.005~0.008	300
氰酸酯树脂	2.8~3.2	0.002~0.008	315

注:介电性能在 9.375GHz 频率下测得。

目前国内进行天线罩研发和生产的天线罩大多数采用泡沫夹层结构玻璃钢单元件搭接拼装而成,拥有从直径 3m 到 40m 高性能雷达天线罩生产线,工作频段有 P,L,S,C,X,KU,KA,宽频带等,广泛用于民航、气象和国防等领域。另外就是哈尔滨玻璃钢研究院和上海玻璃钢研究院也进行了大量的天线罩的研究和生产工作,并取得了一定的研究成果。

国外进行树脂基天线罩生产的有美国 Essco 公司,该公司采用的增强体主要有玻璃纤维、石英纤维、石墨纤维和芳纶纤维,基体采用聚酯、环氧和氰酸酯树脂,夹层芯子采用蜂窝或者是泡沫。美国的 Pacific Radome, raytheon 英国的 Royal Engineered Composites, Cobham Advance composites, 法国的 Saint - Gobain Performance Plastics 等都是天线罩生产、科研单位。目前树脂基复合材料制备的天线罩仍占有很大的市场,广泛用在航空航天领域中。

2.2 陶瓷天线罩

陶瓷天线罩主要是为满足马赫数比较高的导弹天线罩发展起来的,但存在质脆的缺点。目前陶瓷天线罩材料主要有氧化铝、微晶玻璃、石英陶瓷和氮化物陶瓷。

2.2.1 氧化铝陶瓷

第一种商品化的高温天线罩材料为氧化铝陶瓷,在麻雀 III 导弹和响尾蛇导弹中得到成功应用,优点是强度高、硬度高、抗雨蚀性能好,缺点就是弹性模量和线胀系数大,抗热冲击性能差^[19],仅适用于导弹飞行速度小于 3 马赫的天线罩^[23,24]。为了提高该陶瓷的抗热冲击性,目前采用了氮化硼改性氧化铝获得复相陶瓷,克服了陶瓷质脆的缺点,取得的效果良好。

2.2.2 微晶玻璃

上世纪 50 年代末美国 Corning 公司开发的微晶玻璃应用在“小猎犬”导弹天线罩中。微晶玻璃是一种玻璃陶瓷,堇青石是其主要结晶相。具有强度高,耐热性好,线胀系数低的优点,但成型工艺和条件复杂,难以控制。为提高微晶玻璃的抗热冲击性能,该公司又研制出了 M7 微晶玻璃,可用在 $Ma=5$ 的飞行导弹中,承载能力比原

来的提高 2.5%^[19],微晶玻璃曾广泛用于马赫数为 4 及 4 以下的导弹^[25]。

20 世纪 70 年代末国内开始研究天线罩材料,中科院硅酸盐研究所研制的 3-3 微晶玻璃组成与 Corning 公司的 9606 微晶玻璃极为接近,只是介电损耗相对偏高,是国内第一种高温天线罩材料,已成功应用于超音速中空防空导弹天线罩中^[24]。

2.2.3 石英陶瓷

石英陶瓷的抗热冲击性好,介电性能稳定,制作成本适中,已在美国的“爱国者”和“潘兴”II 导弹得到了应用,适用于马赫数为 3~5 的导弹天线罩。但存在机械强度低,易吸潮,抗雨蚀能力差等缺点。美国陆军材料和机械研究中心进行了改性工作,通过加入短切绝缘陶瓷纤维注凝成型,石英陶瓷的强度提高了 14%^[24],并且纤维增强后的石英陶瓷介电性能稳定。

2.2.4 氮化物陶瓷

20 世纪 70~80 年代,发展了氮化硅和氮化硼陶瓷。氮化硅陶瓷的介电常数低,耐高温,抗雨蚀及抗热震,力学性能优异。其中反应烧结氮化硅的介电常数比热压氮化硅的低,介电性能好,但是强度较低,前者弯曲强度为 20000psi,后者为 58000psi^[5],主要用于马赫数小于 6 的导弹天线罩。氮化硼陶瓷的热稳定性和介电性能比氮化硅更好,但强度和硬度较低,制备工艺难^[24]。常用陶瓷材料的介电性能如表 3 所示。

2.2.5 复合陶瓷材料

1995~1996 年,美国研究出了以磷酸盐为粘结剂,无压烧结,且烧结温度不超过 900℃的氮化硅陶瓷材料,介电常数随温度变化小,能满足多种战术导弹天线罩的需要。

1997 年美国研制的 Sion 纳米复合陶瓷天线罩,应用于高超声速导弹中。该材料在 25℃, 1000℃时的介电常数和介电损耗分别为 4.78, 5.00 和 0.0014, 0.0025;抗弯强度为 190MPa,为石英陶瓷(48MPa)的 4 倍;硬度为 10440MPa,为石英陶瓷的 25 倍,综合性能显著优于石英陶瓷^[19]。

表3 陶瓷材料的介电性能^[26]

天线罩材料	介电常数	损耗角正切	最大使用温度(°C)
氧化铝	9.40~9.60	0.0001~0.0002	1400~1700
微晶玻璃	5.54~5.65	0.0002	680~760
熔融石英陶瓷	3.3~3.42	0.0004	1300~1600
热压氮化硅	7.8~8	0.0020~0.0040	1000~1400
反应烧结氮化硅	5.6	0.0050~0.0010	1150~1500
氮化硼	4.20~4.60	0.0001~0.0002	1500~1800

注:介电性能是在X波段下测试的。

Loral Vought Systems 公司 Paquette 将氮化硅、氮化硼、二氧化硅和氧化物烧结助剂粉末热等静压成型得到整体式天线罩,在 2350°C 下的高温电性能衰减损耗小于 3dB,抗烧蚀、抗雨蚀性能好,可以在 2000°C 以上使用^[27]。

美国的 Ceradyne 公司主要是生产高纯熔融石英和氮化硅天线罩的公司,微波或者是其他能量可以穿过指定的目标,当高速飞向大气层时导弹系统能够承受腐蚀和温度剧增的恶劣环境。

国内哈尔滨工业大学、山东工业陶瓷研究设计院、上海硅酸盐研究所对氮化硼、氮化硅、氮化铝陶瓷及其复相陶瓷进行了深入研究。

复相陶瓷可以改变单一陶瓷质脆、抗热性能差或者抗雨蚀性能差等某方面的缺点,作为陶瓷天线罩的候选材料,具有广阔的研究价值和市场前景。

2.3 陶瓷基复合材料

陶瓷基复合材料天线罩运用的陶瓷基体主要是二氧化硅、磷酸盐和氮化物。纤维增强陶瓷基复合材料可以克服陶瓷质脆的缺点,纤维起到增韧和增强的作用,因此受到了关注。

美国 Philco-Ford 公司和 General Electric 公司开发了 3D 石英纤维增强二氧化硅复合材料,牌号为 AS-3DX 和 Markite 3DQ^[28]。石英纤维织物增强石英复合材料的表面熔融温度与石英玻璃接近(约 1735°C)^[29],已应用于美国“三叉戟”潜地导弹。

上世纪 60 年代,美国通用电器公司研究低成本的磷酸盐基高温天线罩,得到了在 650°C 仍保持良好的力学和电学性能的石英织物增强磷酸铝基复合材料^[24]。

俄罗斯制备的磷酸铝、磷酸铬铝和磷酸铬复合材料天线罩已经在巡航导弹、反导型和战术型

导弹及航天飞机上获得了应用^[30]。

美国的 Hyper-Therm HTC 公司利用独特的化学气相增密过程制备了世界上第一个低介电性能、耐高温的氮化硅(Si₃N₄)基复合材料,该材料可以用在高超音速导弹天线罩中,化学气相增密/半导体掺杂质可以有效的控制材料系统的介电常数和损耗性能。

国内北京玻璃钢研究设计院研究了石英玻璃布增强磷酸盐复合材料,可用于温度在 1200°C 以下的天线罩。国防科技大学对氮化硅基复合材料进行了大量的研究,并取得了一定的成果。

3 结束语

天线罩是导弹的重要组成部分,而我国起步晚,对材料的研究还赶不上国外的水平,国外对这方面的技术封锁严重,因此我国要加大发展和投资力度,高度重视,开发出性能优良的天线罩新材料体系。

未来天线罩的发展要向着能够耐高温的复相陶瓷以及陶瓷基复合材料,主要是氮化物陶瓷的相关产品。同时材料具有较低的介电常数,介电常数随温度的升高变化小,能够具有较高的结构强度和抗雨蚀能力,在保证性能的前体下,尽量降低成本。

参考文献

- [1] Raytheon's Mechanical and Materials Technology - Radomes at Raytheon [J] Technology Today 2005, 3: 5-6.
- [2] 戎华. 导弹天线罩技术简介[J] 声学及电子工程. 2003, (3): 36-38.
- [3] 何利华,张谟杰. 可控密度氮化硅在导弹天线罩上的应用 [J] 制导与引信, 2007, 28(1): 33-36.

- [4] 余景春,王璇,高红梅,等. 地面用雷达罩的发展[J]玻璃钢/复合材料. 2001, (5):46-48.
- [5] G. A. E. Crone, A. W. Rudge, G. N. Taylor. Design and performance of airborne radomes: a review[J]The Institution of Electrical Engineers Proceedings1981, 128(7):451-464.
- [6] 洪皖春. 国外导弹、火箭防热结构综述[J]上海航天, 1986, 2:49-52.
- [7] 彭望泽. 防空导弹天线罩[M]. 北京: 宇航工业出版社, 1993.
- [8] RT/duroid 5870/5880 high frequency laminates. Rogers corporation advanced circuit materials date sheet. 2005.
- [9] 王蜀谦. 高速飞行器的有机天线罩[J]宇航材料工艺, 1989, 4: 72~76.
- [10] 石毓敏,梁国正,兰立文. 树脂基复合材料在导弹雷达天线罩中的应用[J]材料工程. 2000, (5): 36-39.
- [11] 王小群,杜善义,韩杰才. 高速宽频带防空导弹天线罩研制探索[J]宇航材料工艺, 1998, 2: 17~23.
- [12] McNair, Peter A. C., Baker Claire. Antenna radome. Europe EP1852938B1 [P]2007-7-11.
- [13] Marvin I. Fredberg Stoughton, Peter H. Sheahan Grotton, Sharon A. Elsworth Mason, Kaichang Chang Northboro et al. Rigid radome with polyester-polyarylate fibers and a method of making same. USA 20050024289A1[P] 2005-2-3.
- [14] J. D. Walton. [M]Radome Engineering Handbook. New York: Marcel Dekker, Inc., 1970.
- [15] 沈世绵. 飞航导弹材料[M]. 北京: 宇航工业出版社, 1994.
- [16] 邱惠中, 江辉. 国外巡航导弹用材料及工艺[J]宇航材料工艺, 1998, 4: 9~14.
- [17] 李双虎,余训章,刘巍. 烧蚀隔热材料的研究进展[J]玻璃钢, 2011, (4):30-33.
- [18] William D. Deveikis, Robert W. Walker. Effect of moisture content on the structural integrity of glass-fabric-reinforced phenolic-laminate radomes subjected to aerodynamic heating. Langley Research Center Langley Field, Va. NASA, Washington, 1961.
- [19] 刘萝葳,曹运红,王蕾,等. 导弹雷达天线罩用的工艺材料[J]战术导弹技术, 2004, (1):23-28.
- [20] Andrew B Facciano, Ronald N. Hopkins, Rodney H. Krebs et al. Integral missile antenna-fuselage assembly. USA 5483894 [p] 1996-1-16
- [21] 孙大伟,王耀先,王万兴,等. 高性能介电复合材料用树脂的研究进展[J]玻璃钢/复合材料增刊, 2010.
- [22] 李欢,刘钧,肖加余,曾竟成,邢素丽. 雷达天线罩技术及其电性能研究综述[J]材料导报, 2012, 26(8):48-52.
- [23] 姜勇刚,张长瑞,曹峰,等. 高超音速导弹天线罩透波材料研究进展[J]硅酸盐通报, 2007, 26(3): 500-505.
- [24] 韩爽,胡海峰,齐共金. 无机天线罩材料的研究进展[J]纤维复合材料, 2006, (4):64-68.
- [25] 高冬云,王树海,潘伟,等. 高速导弹天线罩用无机透波材料[J]现代技术陶瓷, 2005, (4):33-36.
- [26] 宋银锁. 高速战术导弹天线罩材料综述[J]航空兵器, 2003, (1):42-44.
- [27] Paquette G D. Method of making a radar transparent window material operable above 2000°C USA 5627542. [P] 1997-05-06.
- [28] Gilreath M C, Castellow S L. High temperature dielectric properties of candidate space-shuttle thermal protection system and antenna-window materials[R] NASA TND-7523. Washington:NASA, 1974, 1~53.
- [29] Place T M, Bridges D W. Fused quartz reinforced silica composites Proceedings of the 10th symposium on electro-magnetic windows[C]Atlanta Georgia USA: Georgia Institute of Technology, 1970. 115~119.
- [30] 胡连成,黎义,于翹. 俄罗斯航天透波材料现状考察[J]宇航材料工艺, 1994, (1): 48~53.

Research Progress of Radome Materials

Yang weiwei¹ Yang hongna², Wu xiaoqing¹

(¹Key Laboratory for Advanced Textile Composite of Ministry of Education, Tian jin Polytechnic University, Tian jin 300387; ²Bei jing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100076)

Abstract: The radome material should simultaneously possess the comprehensive properties of the mechanics, dielectric and rain erosion resistance. In this paper, the radome development process was as clues, and we briefly described domestic and overseas research situation of radome materials from fiber reinforced composites, ceramics and ceramic matrix composites, and pointed out the future development direction of the radome.

Keywords: Radome materials; fiber reinforced composites; Ceramics; Ceramic matrix composites

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,一直致力和专注于微波、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>