

无机天线罩材料研究进展*

韩 爽, 杜海生

(海军工程大学 天津校区 军港与海防工程系, 天津 300450)

摘要: 对高马赫数导弹天线罩材料的性能要求进行了评述, 综述了国外天线罩材料的研究进展, 特别是重点介绍了美国等军事强国近年来研制的天线罩材料的温度、强度、介电特性以及工艺性能。分析了我国在该领域的研究现状, 并提出了今后的发展方向。

关键词: 导弹天线罩; 无机材料; 材料性能

中图分类号: TN820.8⁺¹ 文献标识码: A

文章编号: 1001-9731(2007)增刊-3084-05

1 引 言

导弹天线罩位于导弹的头部, 它的作用是保护导弹天线能够正常的工作。用于制造天线罩的透波材料主要有有机材料和无机非金属材料两大类。有机材料包括各种纤维增强树脂基体复合材料, 但其耐热性能差, 高温下容易热分解形成自由碳, 不能满足高速导弹防热和透波要求, 一般只用于制造亚音速和低超音速导弹天线罩。无机非金属材料目前主要指耐高温陶瓷, 因其具有工作温度高、抗烧蚀、强度高、不吸水、不吸潮等优点, 已经成为国内外高温透波材料研究的热点。本文主要介绍了各国在高温无机透波材料领域的研究进展。

2 天线罩材料性能要求

由于导弹飞行速度很快, 尤其是再入阶段, 导弹在高马赫数飞行过程中会产生大量的热 (表面温度可达3000℃以上), 同时在转弯和变轨的过程中必须承受一定的力, 而且还要求重量轻等, 对天线罩材料和结构提出了更高要求; 此外, 天线罩还要能够接收发射来的电磁信号。因此, 要求天线罩必须具备耐热、防热、承载、透波等功能。

天线罩的性能主要取决于材料。天线罩对材料的基本要求有^[1]:

电气性能: 具有低的介电常数 ($\epsilon \leq 10$) 和介电损耗 ($\tan \delta \leq 0.001$), 并且不随温度和频率发生明显变化。

热性能: 耐热性能好, 在气动热环境或更高的温度下保持结构的完整性。

力学性能: 具有足够的力学性能, 保证天线罩在飞行过程中由空气动力纵向和横向加速度引起的机械应力作用下不受损伤。

抗侵蚀性能: 具有防雨蚀、防粒子侵蚀能力等。

3 各国天线罩材料研究进展

3.1 美 国

美国从50年代初开始着手高温天线罩材料研究工作, 氧化铝陶瓷是第一种商业化的无机天线罩材料, 成功用于“麻雀III”和“响尾蛇”等导弹上, 它硬度高, 抗雨蚀和抗粒子作用性能好, 但介电常数较高, 抗热冲击性能差, 只适用于3Ma以下的导弹。

1956年, 美国Corning公司开发出了9606微晶玻璃(Pyroceram 9606), 它是一种具有堇青石($2\text{MgO}\cdot2\text{Al}_2\text{O}_3\cdot5\text{SiO}_2$)组成的微晶玻璃, 具有强度高、耐高温和介电性能好的优点, 但工艺复杂, 加工成本较高。后来为了降低成本, Raytheon公司开发出一种与Pyroceram组成相同的堇青石陶瓷(Rayceram III)。这种天线罩使用等静压工艺, 通过严格控制材料的颗粒尺寸、组成以及最终显微结构, 使得Rayceram III具有比Pyroceram 9606更好的热性能和介电性能, 但因其熔点较低, 加之800℃以上损耗角正切 $\tan \delta$ 变化过大, 使其应用受到限制。而后者曾是美国Amraam导弹和大部分Standard导弹用的天线罩材料, 也曾是美国陆军Sam-D导弹天线罩的候选材料, 但最后由于热冲击性能的考虑, Sam-D导弹最终选择了石英陶瓷(SCFS)材料^[2]。

石英陶瓷长期以来都是超音速导弹天线罩的主要材料, 它抗热冲击性好, 介电性能稳定, 已在美国的“爱国者”和“潘兴II”等型号的导弹上得到应用, 但机械强度较低、易吸潮、抗雨蚀能力差。为保持石英陶瓷优异的介电性能, 克服力学性能和抗雨蚀性能较差的缺点, 美国陆军材料和机械研究中心进行了系统性的增强技术研究, 他们选用高纯度绒状绝缘陶瓷纤维, 经高速搅拌切割成短纤维后, 添加到高纯度熔融硅泥浆中并混合均匀, 注凝成型。这种方法使石英陶瓷强度提高了14%。

上世纪70年代, 以中远程导弹天线窗和天线罩为应用背景, 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^[3,4]。这种材料采用无机先驱体浸渍烧成工艺, 即硅溶胶(SiO_2 先驱体)浸渍石英织物并在一定温度下热处理。其中AS-3DX材料介电性能较好, 常温时 $\epsilon=2.88$, $\tan \delta=6.12\times10^{-3}$ (5.841GHz)。石

* 收到稿件日期: 2007-07-27

通讯作者: 韩 爽

作者简介: 韩 爽 (1982—), 女, 天津人, 硕士, 助教, 研究方向为陶瓷金属和材料。

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℃), 是高温状态再入型透波材料的理想选择之一^[5], 已应用于美国“三叉戟”潜地导弹。

在AS-3DX基础上, 美国AMDL(Advanced Materials Development Laboratory)实验室又研制了4D全向高纯石英织物增强石英复合材料ADL-4D6, 其密度1.55g/cm³, $\epsilon=2.8\sim3.1$, $\text{tg}\delta=6\times10^{-3}$ (250MHz), 弯曲强度35MPa, 断裂应变1.0%, 可视为“塑性”陶瓷。

美国航空材料实验室经过5年努力, 开发了一种用于制作天线罩的熔融石英纤维增强氧化硅材料, 该材料在8.52GHz时的介电性能为: 418℃, $\epsilon=2.95$, $\text{tg}\delta=1.4\times10^{-3}$; 995℃, $\epsilon=5.01$, $\text{tg}\delta=4.2\times10^{-3}$ 。其技术关键在于使用严格净化过的胶体氧化硅溶胶浸渍三维编织体的技术, 以及用氟化物处理半成品, 且在氧化物存在下进行烧结^[6,7]。

70~80年代, 氮化硅和氮化硼等一批新的介质材料逐渐引起了人们的兴趣。氮化硅是强共价键陶瓷材料, 原子结合强度高, 热压氮化硅(HPSN)陶瓷介电常数较低, 高温强度高, 抗雨蚀、抗热震和力学性能优异, 反应烧结氮化硅(RSSN)介电常数更低, 但反应烧结产物多孔易吸潮, 且氮化不完全时残余硅粉也影响介电性能。氮化硼具有比氮化硅更好的热稳定性和更低的介电常数、介电损耗, 但强度、模量和硬度较低, 且制备工艺存在一定困难。于是人们对陶瓷材料进行优化设计, 通过各种增韧途径研制出综合性能更加优良的陶瓷基复合材料(CMCs)。

1980年以后, 为发展耐高温、宽带、低瞄准误差天线罩, 美国将以氮化硅为基本组成的复合陶瓷材料列为主要研究目标之一。Georgia技术研究所的试验鉴定将这种材料称为最有希望的天线罩材料。实验发现这种材料有良好的介电、机械特性及高的抗雨蚀、抗热冲击性能。研究集中在反应烧结Si₃N₄(RSSN)和热压Si₃N₄(HPSN)上。HPSN比RSSN更致密, 有更大的介电常数^[2]。

美国波音宇航公司(Boeing Aerospace Company)利用反应烧结Si₃N₄的密度可控性, 研制了多倍频程宽带天线罩。罩壁结构为2层, 低密度Si₃N₄芯层作为厚的基体, 表层是较薄的高密度Si₃N₄材料。这种高密度、高介电常数表层与低密度、低介电常数芯层的组合, 可使天线罩在宽频带范围内满足电性能要求。另外, 厚的芯层也提供了足够的抗弯强度, 而表层提供了抗雨蚀和防潮性能。这种结构的Si₃N₄天线罩比其它宽带天线罩方案的介电性能有明显改善^[2]。

Hughes Aircraft公司采用3层Si₃N₄($\epsilon=6.0$, $\text{tg}\delta=9\times10^{-3}$, 每层厚0.33mm)和2层熔石英($\epsilon=2.1$, $\text{tg}\delta=1\times10^{-4}$, 每层厚度4.06mm)交替排列的复合结构制备宽频天线罩^[8]。其中, 石英层采用熔石英注浆成型并烧结而成, Si₃N₄层则采用低压化学气相沉积工艺, 通过

调节载气流量改变Si₃N₄的气孔率, 制得多孔结构内层Si₃N₄和致密外层Si₃N₄。由于石英层与Si₃N₄层之间存在预应力, 可缓解高速飞行时天线罩内外温差对罩壁的损坏, 显著减少裂纹产生及传播, 且致密的Si₃N₄外层可起到抗雨蚀和防潮作用。该天线罩在10GHz下微波传输效率为71.4%, 可用于超音速($\geq4.5\text{ MPa}$)反辐射导弹。

Boeing公司Gilbert等^[9]设计的天线罩由氮化硼层(气相沉积或热压法制备)与氧化铍层(热压法制备)交替排列而成, 每层厚度约0.75mm, 且层间有真空间隔。该天线罩在微波频率范围内透波, 但对激光频率范围的电磁辐射完全不透明, 当高能激光打到天线罩上时, 激光束能量被材料吸收, 转化成热能, 通过传导、对流和辐射释放, 经过多层难熔材料阻隔, 保护敏感的微波天线正常工作, 缓解了高能激光武器对陶瓷天线罩的威胁。

Lockheed Marti公司Dodds等^[10,11]用热压烧结工艺(1760℃, 26MPa)制备了Si₂Al₄O₄N₄-BN复相陶瓷, 密度为2.74g/cm³, 断裂强度309.72MPa, 热膨胀系数 $2.65\times10^{-6}/\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\epsilon=6.62\sim7.67$, $\text{tg}\delta=3.2\times10^{-3}\sim1.44\times10^{-2}$ (35GHz, RT~1000℃), 可用于制备耐高温天线罩。

Loral Vought Systems公司Paquette^[12]将Si₃N₄-BN、SiO₂和氧化物烧结助剂粉末热等静压(1650~1850℃, 14~103MPa)成型得到整体天线罩, 各原料组分最佳配比为: 22%SiO₂+23%BN+46%Si₃N₄+8%Y₂O₃+1%Al₂O₃。该材料密度为2.4~2.9g/cm³, 拉伸强度138~290MPa, 热膨胀系数($2.5\sim4.0$) $\times10^{-6}/\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\epsilon=4.5\sim7$, $\text{tg}\delta<0.01$, 2350℃下的高温电性能衰减损耗<3dB, 抗烧蚀、抗雨蚀性能非常好, 能在2000℃以上使用。

Aeronutronic Ford公司Place^[13]将氮化硼纤维的三维织物浸渍硼酸, 使硼酸转变成氮化硼基体, 然后经高纯硅溶胶加压($\approx70\text{ MPa}$)浸渍、热压烧成制备了BN/(BN+SiO₂)复合材料, 材料的最佳组成是SiO₂2%~18%, BN 5%~15%。样品的最终密度为1.60g/cm³, 介电性能优良, $\epsilon=3.20\sim3.24$, $\text{tg}\delta=9\times10^{-4}\sim1\times10^{-3}$ (9.375GHz, RT~1000℃), 该工艺制备的透波材料可满足载入温度超过2200℃的环境要求。

1997年, 美国陆军部资助研制出以无压烧结SION纳米复合材料陶瓷天线罩, 应用于超音速飞行器。该材料的介电性能为: 20℃, $\epsilon=4.78$, $\text{tg}\delta=1.4\times10^{-3}$; 1000℃, $\epsilon=5.0$, $\text{tg}\delta=2.5\times10^{-3}$, 介电常数变化不到4.7%, 弯曲强度为190MPa, 是石英陶瓷强度(48MPa)的4倍, 硬度是石英陶瓷的2~5倍, 综合性能显著优于石英陶瓷^[14]。

Raytheon公司针对下一代反辐射导弹($\geq6\text{ MPa}$)短时高温飞行对宽频薄壁型天线罩的需求^[15,16], 用有机先驱体聚合物浸渍裂解(polymer infiltration and pyrolysis, PIP)工艺制备了陶瓷基复合材料天线罩(纤维含量65%), 罩壁弯曲强度 $>35\text{ MPa}$, $\epsilon\leqslant3.0$, $\text{tg}\delta\leqslant$

0.02 (2~18GHz)。天线罩能在 870℃持续 5min 正常工作，其中有数秒钟温度高达 1260℃。图 1 为 Raytheon 公司制备的天线罩三明治结构罩壁示意图，中间部分为多孔材料（二氧化硅蜂窝或二氧化硅、氧化铝、铝硅酸盐纤维布叠层），两侧为石英纤维布叠层（3~6 层，每层厚度约 1.52mm），罩壁外表面为聚硅氧烷（或聚硅氮烷）和聚四氟乙烯等涂层。该天线罩制备工艺流程是：首先将石英纤维布浸渍树脂（聚硅氧烷或聚硅氮烷），然后将纤维布夹在蜂窝两端形成三明治结构，加热使流动的树脂渗透纤维布进入蜂窝，随着温度升高，树脂从液态变成粘弹态，650℃时转变为固态的二氧化硅多孔基体（若是聚硅氮烷则 900℃时裂解形成氮化硅），最后在罩壁外表面涂一层含 TiO_2 的聚硅氧烷进行防潮和密封处理。

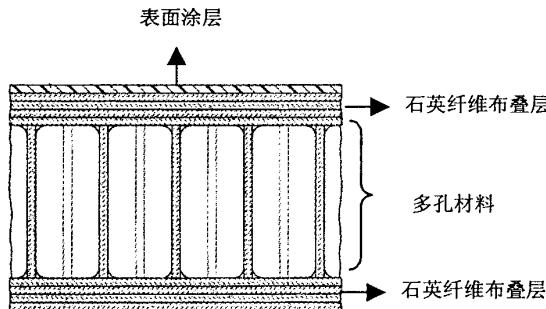


图 1 天线罩罩壁剖面图

Fig 1 The cross sectional view of the radome wall

另外，美国对于磷酸盐基复合材料也进行了较为深入的研究。1995 年，美国海军水上作战中心 Talmy 等人^[17]利用无压烧结制备了以磷酸盐为粘结剂，烧结温度不超过 900℃的氮化硅颗粒增强磷酸盐基复合材料。其中，磷酸锆粘结氮化硅 (Zr-PBSN) 具有低而稳定的介电常数，低热膨胀系数和高抗热震、抗雨蚀特性，在 25~850℃之间的热膨胀系数为 $2.5 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ ，烧结净收缩<1%，表观孔隙率为 16%，1000~1125℃下热震试验强度损失<10%。美国 Virginia 工学院 Medding^[18]开发了一种 1400℃下保持稳定的 Zr-PBSN 材料，制备了天线罩缩比件（基座内径 7.5cm，壁厚 3mm，高 16cm）并对其进行了无损检测。该材料采用了低成本无压烧结技术和净成型工艺，是超过传统天线罩材料的一个重大进步。

最近，美国又开发了无机硅聚合物 (DI-100 树脂和 DI-200 树脂) 基体透波复合材料，与有机硅树脂相比，具有使用温度高、无需高温除碳、复合材料强度高等特点。DI 树脂在 650℃保温 30h 质量损失仅为 4%左右，DI-100 树脂在 1600℃的质量保留率高达 78%。文献[19]报道的石英纤维织物(2D 和 3D 织物) 增强无机硅聚合物的性能如表 1 所示^[20]。

表 1 石英纤维增强无机硅聚合物基体复合材料(Q/DI) 的性能

Table 1 Dielectric properties of quartz fiber reinforced inorganic silicon-based polymers

材料	3DQ/DI-100	2DQ/DI-200
拉伸强度(MPa)	241	269
弹性模量(GPa)	13.1	17.9
压缩强度(MPa)	131	63.4
剪切强度 losipescu (MPa) ILSS	74.5 —	17.2 4.8
室温热导率(W/(m·K))	0.43	—
线膨胀系数($10^{-6}/^{\circ}K$)	<1.8	—
ϵ (室温~1093℃)	<3.5	—
$tg\delta$ (室温~1093℃)	<0.01	—

3.2 俄罗斯

俄罗斯从事天线罩材料研究已有几十年的历史，在天线罩材料的研究方面有着自己的特色，着重进行织物增强有机硅树脂及磷酸盐材料体系的研究。

经过长期研究，俄罗斯制备了高硅氧纤维织物增强无机盐（磷酸铝、磷酸铬和磷酸铬铝等）复合材料制备天线罩^[21]，已在巡航导弹、反导型、战术型导弹及航天飞机上获得了应用。磷酸盐基体的分子式为： $Me(H_2PO_4)_3 \cdot Me(H_2PO_4)_3$ ，其中 Me 为正三价金属离子。天线罩制备工艺流程为：布块或织物准备→磷酸盐溶液准备→先对布块或织物上一层保护膜→真空浸渍→加压固化 (150~200℃, 1~1.5MPa)。其中布块和织物是用高硅玻璃纤维 (SiO_2 含量>94%， Na_2O 含量≤1.2%) 采用三向编织技术编织而成。制备工艺的关键是确定磷酸盐摩尔比，选择合适的 pH 值对纤维进行保护处理及降低固化温度。磷酸铝基复合材料天线罩可在 1500~1800℃下正常工作，石英/磷酸铬复合材料天线罩较低，只能在 1200℃下使用，具体性能见表 2、3^[21]。目前，这类材料在巡航导弹、反导型、战术型导弹及航天飞机上获得了应用。磷酸盐最大的缺点是吸湿性很强，需要在复合材料表面涂覆有机涂层进行防潮处理。

表 2 石英/磷酸铬在不同温度下的介电性能

Table 2 Dielectric properties of quartz/phosphate chrome at different temperature

T(℃)	20	200	400	600	1000
ϵ	3.6~3.7	3.6~3.7	3.65~3.75	3.8~3.9	4.1~4.3
$tg\delta$	0.008~0.015	0.008~0.015	0.008~0.015	0.015~0.025	0.02~0.3

表 3 石英/磷酸铬在不同温度下的力学性能

Table 3 Mechanical properties of quartz/phosphate chrome at different temperature

T(℃)	σ 弯曲(MPa)	σ 压缩(MPa)	σ 拉伸(MPa)
20	120	75	85
400	100	100	95
800	60	—	80
1000	50	50	20
1200	45	40	10

3.3 其它国家和地区

英国电气公司的 Nelson 研究室研制出以磷酸盐为晶核的一种玻璃陶瓷天线罩材料。该材料以五氧化二磷作为硅酸盐玻璃的结晶控制催化剂, 具有很好的力学性能、耐热性能和介电性能, 材料的耐热范围为 700~1200 °C, 在测试频率范围为 103~1010Hz (X 波段) 时, 介电常数 $\epsilon=4.5\sim7.0$, 损耗角正切 $\operatorname{tg}\delta<3\times10^{-4}$ ^[6]。

以色列研制的天线罩材料由低密度多孔 Si_3N_4 外加一层高密度 Si_3N_4 组成, $\epsilon=2.5\sim8$, $\operatorname{tg}\delta<3\times10^{-3}$, 具有足够的机械强度, 抗雨蚀、沙蚀性能良好, 可耐 1600 °C 的温度。此工艺需要 2 次成型及反应烧结^[22]。

日本吉村昌弘等^[23]在 SiO_2 中加入体积分数为 20%~30% 的 Si_3N_4 晶须, 于 1200 °C 及 35MPa 下进行热压烧结, 制得了致密的复合材料, 基体没有析晶, 断裂韧性 K_{Ic} 达到 210~219MPa·m^{1/2}。

3.4 国内

国内天线罩材料研究从 20 世纪 70 年代末开始, 虽然起步较晚, 但也取得一定进展。

中科院硅酸盐研究研制的 3-3 微晶玻璃是国内第一种高温天线罩材料, 已成功应用于超音速中低空防空导弹天线罩上。该材料在组成上与 9606 微晶玻璃极为接近, 除介电损耗相对偏高外, 其它性能与 9606 微晶玻璃非常相似。

北京玻璃钢研究设计院研制了石英玻璃布增强磷酸盐复合材料^[24], 其力学、介电性能较好, 可用于制备环境温度在 1200 °C 以下的天线罩。

哈尔滨工业大学温广武等人用热压烧结法制备了氮化硼颗粒增强熔石英高温天线罩材料, 既改善了氮化硼材料的烧结性能和抗热震性, 降低了烧蚀表面温度 (从 3300 °C 将到 2200~2400 °C), 增大了沿透射方向的温度梯度, 改善了高温介电性能, 同时又提高了熔石英的强度、断裂韧性和耐烧蚀性能^[25]。另外, 哈尔滨工业大学还开发出了一种无机硅氧氮陶瓷先驱体树脂, 用该树脂制备的硅氧氮陶瓷不仅介电性能优异, 而且线膨胀系数低、抗热震性能好, 高温强度高、耐氧化稳定性好。材料的弯曲强度和断裂韧性分别达到 156MPa 和 1.8MPa·m^{1/2}, 比 SiO_2 基体提高了 4.58 倍和 2.25 倍^[26]。

山东工业陶瓷研究设计院对 $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-BN}$ 材料进行了深入研究^[27]。他们分别将 5%, 10%, 20% 和 30% 的 BN 加入到 Si_3N_4 中, 采用冷等静压成型, 在气氛压力烧结炉中烧结, 烧结温度 1680~1780 °C, 保温 1.5~3h。BN 的加入有效降低了材料的介电常数, 增强了材料的抗热震性。从试验结果可以看出, 随着 BN 含量的增加, 复合材料的强度呈下降趋势, 当 BN 质量分数由 5% 增加到 30% 时, 复合材料的强度从 480MPa 下降到 74.7MPa。上海硅酸盐研究所的吴洁华等人对此进行了较深入研究。加入第二相氮化铝颗粒 (30%(体积分数)) 于 1400 °C 下烧结, 所得复合材料的抗弯强度和断裂韧性分别为

200MPa 和 $2.96\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ^[28]。引入 AlN+BN 复合颗粒, 复合材料的热导率提高、热膨胀系数下降, 使其临界热震温度由 600 °C 提高到 1000 °C^[29]。材料性能与第二相的引入量、热压温度和方石英的析出量有很大关系。

国防科技大学利用 PIP 工艺制备了石英织物增强 Si-N-B 陶瓷天线罩材料, 密度 1.71g/cm³, 弯曲强度 130MPa, $\epsilon=3.11$, $\operatorname{tg}\delta=9\times10^{-3}$, 热、力、电综合性能优良。此外, 通过先驱体分子设计, 调节织物形式和复合工艺参数可得到不同性能要求的透波材料。

4 结语

未来高超音速导弹武器系统的发展对天线罩提出了更高要求, 导弹的速度和机动能力要求天线罩必须承受更高的工作温度和更恶劣的环境, 同时具有更好的传输特性和更低的瞄准误差, 以满足精确制导和攻防对抗等作战要求。但是目前材料和工艺水平还跟不上要求, 这已成为制约天线罩发展的瓶颈。我国在这方面研究起步较晚, 与那些发达国家研究水平相差较大, 且由于该领域的敏感性, 国内能获得的有价值的文献也很少, 这就要求我们加大投入, 增进合作交流, 在提高材料性能的同时努力降低成本技术, 将重点放在耐高温无机天线罩材料的研制, 尽快发展有我国特色的天线罩材料体系。

参考文献:

- [1] 彭望泽. 防空导弹天线罩[M]. 北京: 宇航出版社, 1993. 164-173.
- [2] 宋银锁. [J]. 航空兵器, 2003, 1: 42-44.
- [3] Gilreath M C, Castellow S L. High Temperature Dielectric Properties of Candidate Space-shuttle Thermal Protection System and Antenna-Window Materials [R]. Washington: NASA, NASA TND-7523. 1974. 1-53.
- [4] Brazel J P, Fenton R. Proceedings of the 13th Symposium on Electro-Magnetic Windows [C]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1976.
- [5] Place T M, Bridges D W. Proceedings of the 10th Symposium on Electro-Magnetic Windows[C]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1970. 115-119.
- [6] 陈虹, 张联盟, 罗文辉. [J]. 陶瓷学报, 2003, 24(3): 189-192.
- [7] Place T M, Bridges D W. Proceeding of the 10th Symposium on Eelectro-Magnetic[C]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1970. 338-342.
- [8] Leggett H. Ceramic Broadband Radome [P]. US Patent, 4358772. 1982-11-09.
- [9] Gilbert D E, Lee J R, Kramer T J. Multilayer Radome [P]. US Patent, 4180605. 1979-12-25.
- [10] Dodds G C, Tanzilli R A. Boron Nitride-Toughened Single Phase Silicon Aluminum Oxynitride Composite. Article And Method Of Making Same [P]. US Patent, 5925584, 1999-07-20.

- [11] Dodds G C, Tanzilli R A. Silica, Boron Nitride, Aluminum Nitride, Alumina Composite, Article and Method of Making Same [P]. US Patent, 5891815. 1999-04-06.
- [12] Paquette G D. Method of Making a Radar Transparent Window Material Operable Above 2000°C [P]. US Patent, 5627542. 1997-05-06.
- [13] Place T M. Low Loss Radar Window For Reentry Vehicle [P]. US Patent, 4786548. 1988-11-22.
- [14] 张大海, 黎义, 高文, 等. [J]. 宇航材料工艺, 2001, 31(6): 1.
- [15] Purinton D L, Semff L R. Method of Making a Broadband Composite Structure Fabricated From an Inorganic Polymer Matrix Reinforced with Ceramic Woven Cloth [P]. US Patent, 5738750. 1998-07-14.
- [16] Purinton D L, Semff L R. Broadband Composite Structure Fabricated From Inorganic Polymer Matrix Reinforced with Glass or Ceramic Woven Cloth [P]. US Patent, 6080455. 2000-06-27.
- [17] Talmy I G, Martin C A, Haught D A, et al. Electro-magnetic Window [M]. US 5573986, 1996.
- [18] Medding A J. Nondestructive Evaluation of Zirconium Phosphate Bonded Silicon Nitride Radomes[D]. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 1996.
- [19] David W M. [J]. SAMPE Journal, 2001, 37(5): 53.
- [20] 闫联生, 李贺军, 崔红. [J]. 宇航材料工艺, 2004, (2): 15.
- [21] 胡连成, 黎义, 于翹. [J]. 宇航材料工艺, 1994, (1): 48-53.
- [22] 郭文利, 徐廷献, 李爱华. [J]. 硅酸盐学报, 2003, 31(7): 698-701.
- [23] 吉村昌弘, 小笠原尚上. 日本ウミシワヌ协会 1988 年秋季シゾボウム讲演予稿集[C]. 1988, 3-22c: 20.
- [24] 肖永栋, 刘红影, 方晓敏. [J]. 玻璃钢/复合材料, 2002, (3): 46-47.
- [25] Wen G, Wu G L, Lei T Q, et al. [J]. J Eur Ceram Soc, 2000, 20(11): 1923-1928.
- [26] 张俊宝, 温广武, 贾德昌, 等. [J]. 航空材料学报, 2001, 21(3): 39.
- [27] 张伟儒, 王重海, 刘建, 等. [J]. 硅酸盐通报, 2003, 22(3): 3-6.
- [28] 吴洁华, 郭景坤, 李包顺. [J]. 硅酸盐学报, 1999, 27(6): 701-708.
- [29] 吴洁华, 李包顺, 李承恩, 等. [J]. 应用基础与工程科学学报, 2000, 8(1): 38-43.

Research progress in inorganic radome materials

HAN Shuang, DU Hai-sheng

(Navy Logistic Academy, Tianjin 300450, China)

Abstract: Performance requirements of radome materials using in high-mach missile were introduced. Research in this field abroad was summarized. Technologies, mechanical and dielectric properties of radome material in America were especially reviewed. The native progress in the research of radome materials was analyzed. And the development direction of it was proposed.

Key words: missile radome; inorganic material; the property of the material

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>