

天线罩用宽频透波材料的发展现状

余娟丽¹ 陈磊² 吕毅¹ 赵英民¹ 裴雨辰¹

(1 航天特种材料及工艺技术研究所,北京 100074)

(2 陕西应用物理化学研究所,西安 710061)

文 摘 综述了天线罩用宽频透波材料的发展现状,分析了影响透波材料性能的因素,系统讨论了宽频透波天线罩的制备方法。研究指出介电性能是评价材料透波性能的一个重要标准,选用低介电材料和提高材料孔隙率可实现材料宽频透波,新的介质材料的开发和研究将是今后天线罩制造技术发展的一个主要发展方向。

关键词 宽频透波,陶瓷材料,天线罩,多孔陶瓷

Progress of Broadband Wave-Transparent Materials for Radome

Yu Juanli¹ Chen Lei² Lü Yi¹ Zhao Yingmin¹ Pei Yuchen¹

(1 Research Institute of Aerospace Special Materials and Technology, Beijing 100074)

(2 Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an 710061)

Abstract Research progress of broadband wave-transparent ceramic radome materials is reviewed. The influencing factors of wave-transparent materials performance are analyzed, and the preparation methods of ceramic radome materials are systematically discussed. It is suggested that the dielectric properties is an important criterion for evaluating wave-transparent performance. Broadband wave-transparent performance of ceramic radome can be achieved by selecting a low dielectric material and increasing porosity, and the development and research of novel dielectric materials is an important direction of next-generation radome material preparation.

Key words Broadband wave-transparent, Ceramic materials, Radome, Porous ceramics

0 引言

宽频透波材料对波长为 1 ~ 1 000 mm 和频率为 0.3 ~ 300 GHz 的电磁波的透过率 > 70%, 常用于保护航天飞行器在恶劣环境下通讯、遥测、制导、引爆等系统能够正常工作^[1-3], 在运载火箭、飞船、导弹及返回式卫星等领域得到了广泛应用。

根据不同的使用环境, 天线罩的耐温要求在 500 ~ 2 400℃。随着现代战争的需要以及导弹技术的发展, 未来高超声速导弹武器系统的发展对天线罩提出了更高的要求, 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。目前, 耐高温、抗烧蚀、高承载、宽频带新型多功能透波材料成为材料领域的研究重点和发展方向^[4-5]。

制造航天天线罩用透波材料主要有有机材料和无机非金属材料两大类^[6]。有机材料主要包括各种纤维增强树脂基复合材料, 由于有机材料耐热性能差, 高温下容易热分解形成自由碳, 不能满足高速导弹的防热和透波要求, 一般只用于制造亚声速和低超音速导弹天线罩。无机天线罩材料一般指耐高温的无机非金属材料, 由于陶瓷材料具有工作温度高、抗烧蚀、性能稳定、不吸水不吸潮、热胀系数低、并且有足够的强度和适宜的介电性能等优点, 已成为国内外高温天线罩材料研究的热点。

Si₃N₄ 陶瓷是一种综合性能优良的透波材料, 在高温和常温下都具有良好的力学性能, 同时还具有良好的热稳定性、低的介电损耗、高的耐冲蚀性能。1980 年以后, 为发展耐高温、宽带、低瞄准误差天线

收稿日期: 2012-11-29

作者简介: 余娟丽, 1978 年生, 博士, 高级工程师, 主要从事陶瓷基透波材料研究。E-mail: yujuanli@126.com

罩,美国将以氮化硅为基本组成的复合陶瓷材料天线罩列为了研究的主要目标之一。1992年,美国陆军战略防御司令部^[7]启动了高超声速导弹天线罩研究计划,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。

本文综述了天线罩材料的性能要求以及影响材料透波性能的主要因素,从天线罩的结构设计、低介电材料的选择以及多孔陶瓷的性能特点等角度分析了宽频透波材料的制备及氮化硅陶瓷透波材料的研究现状。

1 天线罩用透波材料性能要求及影响因素

1.1 天线罩用透波材料性能要求

天线罩材料一般应满足以下基本要求^[8-10]。

(1)稳定的高温介电性能。天线罩材料不仅要具有低的介电常数($\epsilon < 10$)和损耗角正切值($\tan\delta < 10^{-2}$),并且这种材料的介电性能不随温度、频率有明显的变化(如温升 100°C , ϵ 变化 $< 1\%$),以便保证在气动加热条件下,尽可能不失真地透过电磁波;

(2)低的热胀系数,以利于抗热冲击和满足壁厚

公差;

(3)抗侵蚀性能。具有防雨蚀、防粒子云侵蚀的能力等;

(4)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;

(5)低的材料密度;

(6)低的电导率,要求介质材料的电导率 σ 为 $10^{-20} \sim 10^{-10} \text{ S/m}$ 。

以上的苛刻要求限制了高温天线罩候选材料的种类,目前还很难获得一种耐热、透波、承载综合性能十分理想的天线罩材料。另外,制造天线罩时,对材料性能的均匀性和壁厚公差要求极为严格,故在天线罩成型、加工全工艺过程中必须采取种种技术保障措施,包括各种检测设备、手段,以保证质量。在设计和研制天线罩时,必须根据材料的性能,对其成型、加工工艺、批产量以及成本综合考虑。陶瓷基复合材料以其优越的性能成为了天线罩的首选材料。表1列出了几种主要的陶瓷基天线罩材料的基本物性。

表1 几种陶瓷基天线罩材料的基本物性^[11]

Tab. 1 Basic physical properties of several ceramic radome materials^[11]

材料	$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	$\epsilon(10\text{GHz})$			$\tan\delta(10\text{GHz})/10^{-3}$			弯曲强度/MPa			弹性模量/GPa			$\nu(0\sim 800^\circ\text{C})$	$\lambda/W\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	$\alpha/10^{-6}\text{K}^{-1}$	$c_p/\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	吸湿性/%	耐雨蚀性
		25 $^\circ\text{C}$	500 $^\circ\text{C}$	1000 $^\circ\text{C}$	25 $^\circ\text{C}$	500 $^\circ\text{C}$	1000 $^\circ\text{C}$	25 $^\circ\text{C}$	500 $^\circ\text{C}$	1000 $^\circ\text{C}$	25 $^\circ\text{C}$	500 $^\circ\text{C}$	1000 $^\circ\text{C}$						
Al_2O_3	3.9	9.6	10.3	11.4	1.4	0.5	1.4	270	250	220	380	350	285	0.28	37.7	8.1	1.17	0	很好
SiO_2	2.2	3.4	3.5	3.8	0.2	1.0	-	44	54	66	48	48	-	0.15	0.8	0.45	0.75	5	差
BN	2.0	4.5	4.6	4.78	0.3	0.6	0.8	100	60	-	70	50	-	0.23	25.1	3.2	1.3	0	-
Si_3N_4	3.2	7.9	8.2	-	4.0	4.5	-	400	400	-	300	300	-	0.26	20.9	3.2	0.8	-	-

1.2 影响材料透波性能的主要因素

介电性能是评价材料透波性能的一个重要标准^[12]。介质材料被引入到交变电磁场以后,将被反复极化,材料的介电性能是由极化引起的。由电介质物理学可知,介质极化之后产生受敷电荷,进而产生退极化电场,这个电场的方向与外加电场的方向相反,进而削弱了外电场。当作用于介质材料的电场强度一定的情况下,材料的极化程度越高,介电常数越大。电介质的一个重要特性是其介电性能随温度、频率和其他因素的变化规律与极化有关^[10]。介电性能一般用3个参数来描述^[13]:电阻率、介电常数和损耗角正切。但电阻率是一个宏观物理量,并不能反映微观电输运机制,因此在判断材料透波性能的优劣时,一般不用电阻率,而是用 ϵ 和 $\tan\delta$ 。优良的航天透波材料,一般要求 $\epsilon < 4$ 。

电磁波在传播过程中遇到介质材料时,能量损耗(主要是热损耗)、反射系数和透波率有如下关系

式^[14]。

$$\text{能量损耗: } A = \frac{2\pi d \epsilon \tan\delta}{\lambda(\delta - \sin^2\theta)^{1/2}} \quad (1)$$

$$\text{反射系数: } \Gamma = \frac{(\epsilon - \sin^2\theta)^{1/2} - \epsilon \cos\theta}{(\epsilon - \sin^2\theta)^{1/2} + \epsilon \cos\theta} \quad (2)$$

$$\text{透波率: } |T|^2 = \frac{(1 - \Gamma^2)^2}{(1 - \Gamma^2)^2 + 4\Gamma^2 \sin^2\varphi} \quad (3)$$

式中, d 为介质材料的厚度, λ 为电磁波的波长; θ 是电磁波在介质材料表面的入射角, $\varphi = \frac{2\pi d}{\lambda}(\epsilon - \sin^2\theta)^{1/2}$ 。

由上可知:(1)透波材料的 ϵ 越大,电磁波在空气与天线罩界面的反射就越大,这将增加镜像波瓣电平从而降低传输效率,并且材料的 ϵ 较大,对应的单层半波壁结构天线罩的壁厚要求就越薄,从而影响天线罩的力学性能;(2) $\tan\delta$ 越大,电磁波能量在透过天线罩的过程中转化为热量而损耗掉的能量就越

多^[15-16]。因此透波材料要求其 ε 及 $\tan\delta$ 尽可能低, 以达到最小反射和最大传输的目的。

2 宽频透波天线罩的制备及氮化硅陶瓷透波材料的研究进展

2.1 采用特殊结构实现宽频透波

要获得宽频透波性能,使天线罩能在微波或毫米波段范围内实现更宽频带的高透波要求,一种方法是使天线罩具有特殊的结构。如薄壁结构、夹层结构等。

2.1.1 薄壁结构

薄壁结构一般指天线罩壁厚小于波长的 $1/20$, 设计薄壁结构的宽频天线罩时,若透波频带在 $2 \sim 18$ GHz,则天线罩壁厚最小应 < 1 mm,这样的天线罩本身的强度没有保障,也无法承受导弹高速飞行产生的气动载荷^[17],采用薄壁结构可以实现天线罩的宽频化。但由于壁厚较小,只能用在对力学性能要求不高的场合。

2.1.2 特殊的夹层结构

传统天线罩的频带要求较窄,在设计中采用单层半波壁结构天线罩即可满足电性能要求。而根据现代宽频带天线罩的要求,在设计时必须利用多层罩壁结构来满足频带宽度的要求。常用的多层罩壁结构类型有 A、B、C 型等^[17](图 1)。A 型是由两层比较致密的表面层(如玻璃纤维增强树脂)和较厚的低 ε 的多孔中间芯层(如泡沫或蜂窝状结构材料)组成;B 型与 A 型相反,B 型是由两层低 ε 多孔的表面层和比较致密的芯层组成;C 型即所谓多夹层结构,由两个 A 型夹层结构组成,加在一起共五层。一般来说,随着层数的增加,罩壁结构强度有所改善,且有较好的宽频带特性。

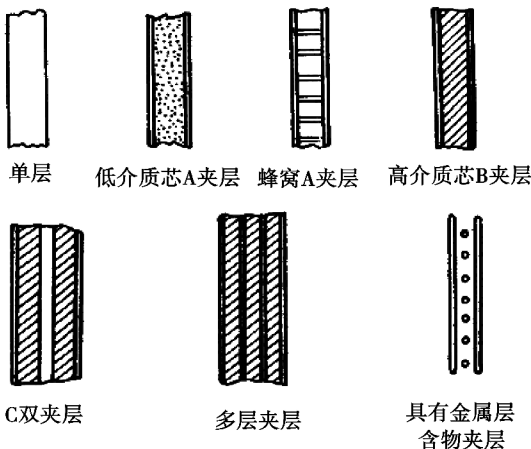


图 1 夹层结构类型^[18]

Fig. 1 Types of sandwich^[18]

此外,为获取宽频带性能或减小天线罩厚度,还可以在介质层中使用金属含物,金属含物通常呈球粒宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2013 年 第 2 期

状或薄带状对称分布,调节金属含物的形状及分布,可有效的改善介质层导纳特性。近几年,还出现了关于在天线罩介质层表面或内部嵌入频率选择表面(FSS)的报道。

2.2 采用低 ε 及 $\tan\delta$ 小的多孔材料

2.2.1 多孔材料实现宽频透波的基本原理

为了获得宽频透波性能,另一种方法是采用极低 ε 及 $\tan\delta$ 小的介质材料制备宽频透波天线罩。目前主要通过选用低 ε 和提高材料孔隙率来制备宽频透波天线罩。使多孔陶瓷材料在具有较高力学性能的同时,又具有较低的 ε ,为宽频透波材料的应用提供了一种较理想的选择。

对于介电常数为 ε_d 的球形颗粒均匀地分散在介电常数为 ε_m 的基体相中,Maxwell 推导出:

$$\varepsilon = \frac{\varphi_m \varepsilon_m \left(\frac{2}{3} + \frac{\varepsilon_d}{3\varepsilon_m} \right) + \varphi_d \varepsilon_d}{\varphi_m \left(\frac{2}{3} + \frac{\varepsilon_d}{3\varepsilon_m} \right) + \varphi_d} \quad (4)$$

式中, φ_m 和 φ_d 分别为基体和颗粒的体积分数。

在同一透波复合材料体系中,也可运用 Lichtenecker 的对数混合法则,材料的介电性能会随着各组分的比例变化而变化。对于复合材料,设材料各组分的体积分数为 φ_i ,各组分的介电常数为 ε_i ,则其介电常数 ε^n 可表示为:

$$\varepsilon^n = \sum_i \varphi_i \varepsilon_i^n \quad (5)$$

式中, n 为常数,当 n 趋于 0 时,可得:

$$\lg \varepsilon = \sum_i \varphi_i \lg \varepsilon_i \quad (6)$$

由此可得均匀的两相复合材料的 ε 如(7)式:

$$\lg \varepsilon = \varphi_1 \lg \varepsilon_1 + \varphi_2 \lg \varepsilon_2 \quad (7)$$

式中, φ_1 和 φ_2 分别为复合材料中 1 相和 2 相的体积分数, ε_1 和 ε_2 分别为 1 相和 2 相的介电常数。

根据 Bruggeman 的等效介质理论,多孔陶瓷可看作气-固型复合材料,气孔可以看作分散相存在于陶瓷基体中。设陶瓷基体为 1 相,气孔相为 2 相;考虑在常压条件下,空气的 $\varepsilon \approx 1$, $\tan\delta \approx 0$,而陶瓷材料 $\varepsilon_1 > 1$,故对于多孔陶瓷体,式(7)可化为:

$$\lg \varepsilon = \varphi_1 \lg \varepsilon_1 \quad (8)$$

由式(8)可知,若气孔相的体积分数越高,意味材料孔隙率越高,该复合材料的 ε 和 $\tan\delta$ 就越小。因此,气孔的存在能有效地降低材料的 ε 和 $\tan\delta$ ^[19],即材料的 ε 会随着其中孔隙率的增加而降低。

邵颖峰等^[20]通过实验证明了陶瓷材料的 ε 和 $\tan\delta$ 随着孔隙率的增加而减少,而相比于混合法则,材料 ε 与 Maxwell-Garnet 关系符合得较好。

李军奇等^[21]同样利用实验证明:随着材料中孔隙率的增加, ε 和 $\tan\delta$ 都明显降低。这是由于气孔可以看作是低 ε 相分散于高 ε 基质中,整个材料的介电特性表现为主晶相、晶界、气孔和多晶混合物的作用,介质中的偶极子会在具有不同电阻率特性的成分混合物中形成。

综上所述,无论是根据 Maxwell-Garnet 关系还是 Lichtenecker 的对数混合法则,多孔材料中都存在 ε 和 $\tan\delta$ 随孔隙率的升高而降低的规律。选取低 ε 和 $\tan\delta$ 的材料能获得较理想的微波透波性能,新的介质材料的开发和研究将是今后天线罩制造技术发展的一个主要发展方向。

2.2.2 多孔陶瓷实现宽频透波

多孔陶瓷除了具有陶瓷的耐高温、耐磨损、耐腐蚀以及良好的抗热冲击性等基本特性外,同时具有孔隙率高、密度低,并可以通过改变孔隙率对材料 ε 进行调节等特点,因而在航天透波材料方面有很大的应用空间,是一种理想的新型天线罩候选材料。

目前,研究者已经成功地开发出多种制造多孔陶瓷的方法,多孔陶瓷形成孔的机理主要包括^[22]:(1)机械挤出成孔;(2)颗粒堆积留下空隙形成气孔;(3)利用添加易挥发物产生气孔;(4)利用发泡形成气孔;(5)利用多孔模板复制形成气孔;(6)利用凝胶结构形成气孔。基于以上成孔机理,发展了一系列多孔陶瓷制备工艺,表2为不同多孔陶瓷制备工艺的比较。

表2 多孔陶瓷制备工艺的比较^[23-24]

Tab.2 Comparison of porous ceramic preparation processes^[23-24]

工艺	制备方法	孔径	孔隙率/%	优点	缺点
添加造孔剂法	加入造孔剂高温燃尽或溶解,留下孔洞	10 μm ~ 1mm	0 ~ 50	气孔大小,形状可控,工艺简单	分布均匀性差,不适合制备高孔隙率的制品
有机泡沫浸渍法	有机泡沫挂浆,高温燃尽	100 μm ~ 5mm	70 ~ 90	高孔隙率,孔径大小可调,制品强度高	制品形状密度不易控制,有机物燃烧污染环境
发泡法	加入发泡剂,悬浮体内发泡成孔	10 μm ~ 2mm	40 ~ 90	适合制备闭气孔陶瓷,孔隙率大,强度高	原料要求高,工艺条件不易控制
溶胶-凝胶法	凝胶化过程中胶体粒子的堆积以及凝胶处理等过程中留下的小气孔	2nm ~ 100nm	0 ~ 95	适于制取微孔制品和薄膜材料,气孔分布均匀	生产率低,工艺条件不易控制
挤压成型法	泥饼通过多孔模具挤出成型	>1mm	<70	孔形状大小可控,易于连续生产	不能制备小孔径的材料,模具加工困难
凝胶注模法	造孔剂	孔径可控	0 ~ 90	适于制备微孔陶瓷,气孔分布均匀	工艺条件不易控制,生产率低
颗粒堆积法	粗骨料粘结堆积而成	0.1 μm ~ 600 μm	20 ~ 30	工艺简单,制品强度高	孔隙率低
气凝胶	溶胶-凝胶过程结合超临界干燥	1nm ~ 100nm	>80	高孔隙率,适于制备微孔制品	强度低、韧性差,工艺复杂,成本高

2.2.3 制约多孔陶瓷透波材料发展的主要因素

对于多孔陶瓷材料,Ryshkewich 提出了有关强度与孔隙率关系的经验公式^[25]。

$$\sigma_f = \sigma_0 \exp(-np) \quad (9)$$

式中, σ_f 为多孔陶瓷试样的强度, σ_0 为致密试样强度, p 为孔隙率, n 为与材料有关的常数,约为4~7。由式(9)可知,陶瓷材料的强度随孔隙率的提高呈指数规律下降。

孙银宝^[26]结合 Phani 建立的多孔陶瓷孔隙率和

弹性模量的半经验关系式,建立了多孔氮化硅基陶瓷材料显孔隙率与弯曲强度的公式见式(10):

$$\sigma = \sigma_0(1 - \alpha p)^n \quad (10)$$

式中, σ 和 σ_0 分别为孔隙率为 p 和0时的弯曲强度, α 、 n 是与材料性质有关的常数。 σ_0 通过材料体系计算可得值为77.8 MPa;通过数据拟合, α 和 n 的数值分别为1和1.32,与实验数据拟合很好,即随着孔隙率增加,体系弯曲强度显著降低。

张晓霞^[27]采用部分烧结工艺成功的制备出了材

质比较均匀、弯曲强度 >160 MPa、孔隙率 $>50\%$ 的多孔氮化硅陶瓷;结果表明孔隙率与弯曲强度之间的关系符合: $\sigma = \sigma_0 \exp(-bp) + 73$,式中 b 为常数,一般取为 $4 \sim 7$, σ 为陶瓷致密体的弯曲强度,而 σ_0 为孔隙率为 0 时的强度。

余娟丽^[28-31]通过凝胶注模技术制备微多孔氮化硅材料,所得多孔氮化硅陶瓷的孔中径均 $<1 \mu\text{m}$,孔隙率和强度分别为 $49.5\% \sim 62\%$ 、 $234.2 \sim 54.5$ MPa,并从试验和神经网络模拟的角度证实了所制得的多孔氮化硅陶瓷的强度随孔隙率增加而下降。

因此可知,较高孔隙率的存在有效降低了陶瓷材料的 ε ^[19],但较高孔隙率容易产生吸潮现象,在复杂环境下,抗雨蚀能力差,导致电学性能不稳定;另外,多孔结构也不可避免地降低了材料的弯曲强度。这一系列问题的解决可以通过在多孔材料的表面形成致密化层或者通过夹层结构设计来处理来实现,在保证材料具有良好透波性能的同时,通过对表面气孔的密封、强化及功能化,不仅使材料具有优良的防潮抗水性能,而且进一步提高了材料强度、耐磨、耐大气冲蚀、抗雨蚀等综合性能。

2.3 氮化硅陶瓷基透波材料的研究现状

20世纪70到80年代, Si_3N_4 和氮化硼等一批新的介质材料以其优良的综合性能受到高温透波领域研究者的普遍关注。 Si_3N_4 陶瓷是一种综合性能优良的透波材料,在高温和常温下都具有良好的力学性能,同时还具有良好的热稳定性、低的介电损耗、高的耐冲蚀性能。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天线罩列为了研究的主要目标之一。目前研究氮化硅材料体系较多的是通过设计天线罩的结构(一般多利用对称的夹层结构),以充分发挥氮化硅材料的优势。

20世纪80年代,美国Boeing宇航公司^[32]利用反应烧结 Si_3N_4 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($0.6 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$)氮化硅芯层作为厚的基体,表层是较薄的高密度氮化硅材料。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,可在宽频范围内满足电性能要求。另外,厚的芯层提供了足够的弯曲强度,而薄的致密表层提供了抗雨蚀和防潮性能。

1992年,美国战略防御司令部^[7,33]启动了高超声速导弹天线罩研究计划,重点提出 Si_3N_4 天线罩的研究计划。同时,美国空军开发了一种 Si_3N_4 宽频天线罩^[34],罩体分为三部分,其前部密度为 $0.75 \sim 1.0$ 宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2013年 第2期

g/cm^3 ,后部密度为 $1.6 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$,中间过渡段的密度介于二者之间。该天线罩材料中加入了一种填料,使其在高温下升华形成多孔结构,通过控制加入填料的量来调节产物在不同部位的密度。1995~1997年^[34-35],美国海军水面作战中心利用无压烧结技术制备了磷酸盐粘结氮化硅(Al-PBSN, B-PBSN, Si-PBSN和Zr-PBSN)。其中Zr-PBSN具有低而稳定的 ε 、低线胀系数和高抗热震、抗雨蚀特性。它在 $25 \sim 850^\circ\text{C}$ 线胀系数为 $2.5 \times 10^{-6}/\text{K}$,烧结净收缩 $<1\%$,表观孔隙率为 16% ,抗热震性能优异, $1000 \sim 1125^\circ\text{C}$ 热震试验强度损失 $<10\%$ 。美国Virginia工学院^[36]也采用成本低的无压烧结技术开发了稳定于 1400°C 的Zr-PBSN材料。1997年,美国陆军部资助研制出以无压烧结 Si_3N_4 纳米复合材料陶瓷天线罩,应用于超声速飞行器。该材料弯曲强度为 190 MPa,在 20°C 下, $\varepsilon = 4.78$, $\tan\delta = 1.4 \times 10^{-3}$;在 1000°C 下, $\varepsilon = 5.0$, $\tan\delta = 2.5 \times 10^{-3}$, ε 变化不到 4.7% ^[37]。

Leggett等人^[38]采用3层 Si_3N_4 ($\varepsilon = 6.0$, $\tan\delta = 9 \times 10^{-3}$,每层厚 0.33 mm)和2层熔石英($\varepsilon = 2.1$, $\tan\delta = 1 \times 10^{-4}$,每层厚度 4.0 mm)交替排列的复合结构制备了宽频天线罩。其中,石英层采用熔石英注浆成型并烧结而成;氮化硅层则采用低压化学气相沉积工艺,通过调节载气流量改变氮化硅的孔隙率,制得了多孔结构的内层氮化硅和致密的外层氮化硅。该天线罩在 10 GHz下微波传输效率为 71.4% ,可用于超声速(≥ 4.5 MPa)反辐射导弹。

其后,美国和以色列利用反应烧结结合其他工艺联合研制了一种双层结构的类泡沫氮化硅天线罩材料,其 $\varepsilon = 2.5 \sim 8$, $\tan\delta < 3 \times 10^{-3}$,而且强度高、耐雨蚀、砂蚀性能良好,可耐 $1600 \sim 1850^\circ\text{C}$ 。它是由低密度($1.0 \sim 2.2 \text{ g/cm}^3$)多孔结构氮化硅,外加一层高密度($2.8 \sim 3.2 \text{ g/cm}^3$)氮化硅蒙皮层组成。高密度氮化硅采用液相无压烧结技术制得,多孔氮化硅层的主要成分是氮化硅和氮氧化硅,主要通过反应烧结过程中气体的逸出形成多孔结构^[39-40]。

2000年,美国Raytheon公司在MIT的帮助下,采用有机先驱体聚合物(聚硅氮烷或聚硅氧烷)浸渍裂解(PIP)工艺制备了三明治结构的氮化硅材料,中间部分为多孔材料,两侧为石英纤维布叠层,叠层外表面为致密的含 TiO_2 聚硅氮烷涂层。2010年5月,Raytheon公司针对可控密度氮化硅材料申请了专利,以宽频天线罩为应用背景,对氮化硅梯度多孔材料结构进行了重新设计,其详细参数未见公开报道。这些典型的天线罩结构都采用了内部多孔结构和表层致

密结构相结合的方式。

日本 Tomoji Goto 等^[41]于 2000 年通过常压烧结技术制得多孔氮化硅透波材料(ϵ 为 2.7 ~ 3.3, $\tan\delta$ 为 0.05 ~ 0.1, 弯曲强度最高达 196 MPa)。然后通过喷雾或溶液浸渍等方法在多孔氮化硅的多孔表面涂覆一层具有抗热性能的有机树脂以提高材料的力学、耐热和抗氧化性能,研制出了完全满足新一代超声速飞行器要求的雷达天线罩。

为满足未来导弹发展型号天线罩的使用需求,近 30 年以来,美、俄等军事发达国家对氮化硅材料进行了系统的研究工作,持续投入了大量的研究力量,但由于该领域的敏感性,关键技术和资料,特别 80 年代中期以后的研究工作,一直严格保密。

国内对氮化硅陶瓷基透波材料的研究起步较晚,早期的研究工作是围绕均质氮化硅透波材料展开的,先后开发了 $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-BN}$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-BN-SiO}_2$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 等材料体系,并采用多种手段实现多孔化来降低其 ϵ 。对这些材料力/热/电性能的测试结果表明,均质氮化硅透波材料体系具有优异的综合性能,但由于多孔陶瓷材料的组织结构均匀性难以控制和增韧技术未能取得实质性的突破,导致研制出的大尺寸陶瓷天线罩的安全可靠性降低,因此,在大尺寸构件研制过程中,粉料组成、混合以及构件成型、烧结、加工和无损检测方面仍面临一些技术问题亟需解决。目前多孔氮化硅陶瓷透波材料的应用水平距其应有的地位还相差甚远,如何调控和优化多孔氮化硅陶瓷力学和介电性能是获得高性能透波材料迫切需要解决的关键。

近年来,国内数家研究单位在颗粒(晶须)增强复合材料和纤维增强陶瓷基复合材料方面进行了较系统的研究工作,先后采用 BN 短切纤维、 SiO_2 、BN、SiBN 和 Si_3N_4 连续纤维等作为增强材料,通过浸渍填充低碳含量或全氢氮化硅先驱体,然后在惰性气体或氨气中高温裂解得到纤维增强氮化硅材料。上海硅酸盐研究所、山东工业陶瓷研究设计院和国防科技大学等单位在这方面做了大量的工作。但由于 SiO_2 纤维高温($>1\ 000^\circ\text{C}$)处理时容易析晶,导致复合材料力学性能下降,而 BN、SiBN、 Si_3N_4 等纤维的制备工艺尚不够成熟,因此,研制耐高温、性能稳定的高强度纤维仍是制备纤维增强氮化硅陶瓷材料有待突破的关键技术之一,而此关键技术的突破仍需时日。

可见,国内对氮化硅材料的研究工作多数集中在材料制备的基础研究方面,对材料综合性能评价、天线罩性能评价以及材料应用的安全可靠性研究较少,

因此,现有成果与实际应用需求尚有一定的差距。

3 结语

随着现代战争的需要以及导弹技术的发展,未来高超音速导弹武器系统的发展对天线罩提出了更高的要求,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。目前,耐高温、抗烧蚀、高承载、宽频带新型多功能透波材料成为材料领域的研究重点和发展方向。

(1) 实现宽频透波,除了使材料具有特殊的结构外,可通过选用低介电材料和提高材料孔隙率来制备宽频透波天线罩。多孔陶瓷材料作为一种新型的陶瓷材料以其优异的性能在天线罩领域有着广阔的应用前景;

(2) 实现夹层结构和表面致密化处理,将是多孔陶瓷天线罩领域今后发展的重点,也是实现我国现代高性能天线罩应用的关键所在。国内由于先进设备及理论探讨等方面的不足,在多孔陶瓷透波材料上开展表面致密化研究方面的工作才刚刚起步;

(3) 陶瓷基复合材料在改善单一陶瓷材料上述缺点的基础上,保持优异的耐高温、力学和电学性能,且可以根据使用要求对材料性能进行设计,因此,陶瓷基复合材料将成为新一代导弹天线罩材料的首选。

(4) 新的介质材料的开发和研究将是今后天线罩制造技术发展的一个主要方向。

参考文献

- [1] Chase V A, Copel R L. Development of a 1200°F radome[R]. Interim Engenmering Report 3, AD 429387, 1963
- [2] 李超, 刘建超, 陈青. 航天透波复合材料的研究进展[J]. 高科技纤维与应用, 2003, 28(6): 34-39
- [3] 黎义, 张大海, 陈英, 等. 航天透波多功能材料的研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2000, 30(5): 1-5
- [4] 艾涛, 王如敏. 航天透波材料最新研究进展[J]. 材料导报, 2004, 18(11): 12-15
- [5] 胡连成, 黎义, 于翘. 俄罗斯航天透波材料现状考察[J]. 宇航材料工艺, 1994(1): 48-52
- [6] 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
- [7] Clark W H. Millimeter wave seeker technology[R]. ADA-345819, 1992
- [8] 韩桂芳, 陈照峰, 张立同. 高温透波材料研究进展[J]. 航空材料学报, 2003, 23(1): 57-61
- [9] 张漠杰. 超音速导弹天线罩及其设计[J]. 制导与引信, 2000(5): 1-5
- [10] 刘丽. 天线罩用透波材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008

- [11] 陈虹,胡利明,贾光耀,等. 陶瓷天线罩材料的研究进展[J]. 硅酸盐通报,2002(4):40-44
- [12] 于技强,刘敬松,霍冀川. 透波介质材料的介电性能及测试方法[J]. 四川兵工学报,2011,32(4):99
- [13] 刘顺华,刘军民,董星龙. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京:化学工业出版社,2006:108-134
- [14] 夏文干,韩养军,杨浩,等. 高功率高透波材料的研究[J]. 高科技纤维与应用,2003,8(2):39-108
- [15] 王峰,王继辉,肖永栋. 透波复合材料的研究进展[C]//第16届玻璃钢/复合材料学术年会论文集,2006:285-289
- [16] Crum S. Wireless devices set new criteria for high frequency materials [J]. Electronic Packaging Producing, 1999, 39(4):32-35
- [17] 杨备. 宽频透波陶瓷基复合材料夹层结构设计、仿真与验证[D]. 国防科学技术大学,2010
- [18] 杜耀惟. 天线罩电信设计方法[M]. 北京:国防工业出版社,1993:10
- [19] 徐洁,罗发,朱冬梅,等. 孔隙率和孔径对反应烧结多孔氮化硅陶瓷介电性能的影响[J]. 硅酸盐学报,2007,35(10):1327-1331
- [20] 邵颖峰,贾德昌,周玉. 孔隙率对20%BN/Si₃N₄复合多孔陶瓷力学与介电性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程,2009,38(增刊2):479-482
- [21] 李军奇,罗发,朱冬梅,等. 氮化硅多孔陶瓷的制备及微波介电性能研究[J]. 稀有金属材料与工程,2006,35(增刊2):173-176
- [22] 朱新文,江东亮,谭寿洪. 多孔陶瓷的制备、性能及应用:多孔陶瓷的制造工艺[J]. 陶瓷学报,2003,24(1):40-45
- [23] 刘富德,陈森风,张书政. 多孔陶瓷材料的发展状况[J]. 材料导报,2000,14(6):33-34,51
- [24] 王慧,曾令可. 多孔陶瓷-绿色功能材料[J]. 中国陶瓷,2002,38(3):6-8,19
- [25] Ryshkewitch E. Compression strength of porous sintered alumina and zirconia[J]. Journal of the American Ceramic Society,1953,36(2):65-68
- [26] 孙银宝. 氮化硅基多孔透波材料制备及其性能表征[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009
- [27] 张晓霞,山玉波,张伟儒,等. 高气孔、高强 Si₃N₄ 陶瓷材料的研究[J]. 稀有金属材料与工程,2008,37(增刊1):713-716
- [28] Yu J L, Wang H J, Zhang J, et al. Gelcasting preparation of porous silicon nitride ceramics by adjusting the content of monomers[J]. J. Sol-Gel. Sci. Technol., 2010,53(2):515-523
- [29] Yu J L, Wang H J, Zhang J, et al. Effect of monomer content on physical properties of silicon nitride ceramic green body prepared by gel casting [J]. Ceramics International, 2009, 35(3):1039-1044
- [30] Yu J L, Wang H J, Zhang J, et al. Neural network modeling and analysis of gel casting preparation of porous Si₃N₄ ceramics[J]. Ceramics International,2009,35(7):2943-2950
- [31] Yu J L, Wang H J, Hou J M, et al. Investigation of flexural strength and porosity of porous Si₃N₄ ceramics through orthogonal experimental design[J]. Journal of Ceramic Processing Research, 2008,9(6):624-629
- [32] Frederick H S, Juris V. Controlled density silicon nitride material[C]//Huddareston G K ed. Proceeding of the 16th Symposium on Electromagnetic Windows. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 1982:81-86
- [33] Clark W H. Millimeter wave seeker technology[R]. AD A345819, 1999
- [34] Verzemnicks J, Simpson F H. Silicon nitride articles with controlled multidensity regions[P]. US, 5103239,1992
- [35] Talmy I G, Martin C A, Haught D A, et al. Electromagnetic window[P]. US, 5573986,1996
- [36] Medding J A. Nondestructive evaluation of zirconium phosphate bonded silicon nitride radomes[M]. Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996
- [37] 张大海,黎义,高文,等. 高温天线罩材料研究进展[J]. 宇航材料工艺,2001,31(6):1-3
- [38] Leggett H. Ceramic broadband radome [P]. US, 4358772,1982
- [39] Barta J, Manela M. Si₃N₄ and Si₂N₃O for high performance radomes [J]. Materials Science and Engineering A, 1985,71:265-272
- [40] Barta J, Manela M. Preparation and properties of silicon nitride for radome applications[C]//Proceedings of the 16th Symposium on Electromagnetic Windows, 1982:87
- [41] Goto T, Fujii A, Kawai C. Radome [P]. US, 6091375,2000

(编辑 吴坚)