



综述

SiO₂气凝胶材料的特性及其在夹层结构天线罩上的应用

尹正帅¹ 刘义华² 雷 宁¹

(1. 湖北三江航天江北机械工程有限公司, 孝感 432000;

2. 第二炮兵驻 8610 厂军代室, 远安 444200)



摘要: 分析了 SiO₂ 气凝胶高温隔热特性和透波特性, 与常用的隔热材料和透波材料对比, SiO₂ 气凝胶具有较低的热导率和较小的介电常数, 是一种高温隔热透波性能良好的材料。分析了夹层结构天线罩宽频带透波的原理, 介绍了夹层结构天线罩的研究进展。结果显示, SiO₂ 气凝胶材料因其良好的高温隔热透波特性能够满足夹层结构天线罩内层材料的需求, 必将在夹层结构天线罩上得到广泛的应用。

关键词: SiO₂ 气凝胶; 高温隔热; 高温透波; 夹层结构天线罩

Characteristics of SiO₂ Aerogel and Its Applications on Sandwich Structure Radome

Yin Zhengshuai¹ Liu Yihua² Lei Ning¹

(1. Jiangbei Machinery Engineering Co. Ltd., Xiaogan 432000;

2. The Second Artillery Military Representative of Plant 8610, Yuanan 444200)

Abstract: The high temperature insulation and wave-transparent characteristics of SiO₂ aerogel were analyzed. Compared to insulation materials and wave-transparent materials commonly used, SiO₂ aerogel material has a lower thermal conductivity and a lower dielectric constant, is a kind of material with good performance on high temperature insulation and wave-transparent. The principle for wide-band transparent of sandwich structure radome was analyzed, and research progress of the sandwich structure radome was reviewed. The results showed that, because of its high temperature insulation and wave-transparent characteristics, SiO₂ aerogel material can meet the needs of the inner materials of the sandwich structure radome, and is bound to be widely used in the sandwich structure radome.

Key words: SiO₂ aerogel; high temperature insulation; high temperature wave-transparent; sandwich structure radome

1 引言

随着导弹技术的发展, 新型武器系统向高马赫数、高精度、高机动性以及高突防能力等方向发展,

以提高军事打击效率, 实施战略威胁。与传统导弹相比, 新型导弹的飞行速度更快, 飞行时间更长, 打击范围更广、精度更高。这就要求导弹的关键部件天线罩不仅要有较好的高温隔热性能, 能够承受高速飞行

作者简介: 尹正帅 (1986-), 硕士, 高分子复合材料专业; 研究方向: 复合材料技术研究。

收稿日期: 2013-03-22

带来的气动加热及恶劣的热环境,保证导弹的正常通讯、遥测、制导等功能,而且还要具备宽频带透波性能,使得导弹能够在较宽的频段范围内准确捕获和跟踪目标,提高打击精度。因此,迫切需要研制一种新型的质轻、低热导率、低介电常数且具有一定力学性能的导弹天线罩用材料,以便满足新型导弹发展的需要。

SiO_2 气凝胶材料具有高比表面积、低密度、高孔隙率、低热导率、低介电常数等优点,与常规的隔热材料相比,其隔热性能更优越,而且其透波性能很好,耐高温性能和减震效果良好。因此,气凝胶材料在新型导弹武器系统的高温隔热透波领域具有广阔的应用前景。

2 SiO_2 气凝胶材料的特性

气凝胶通常指以纳米量级超微颗粒相互聚集成纳米多孔网络结构,并在孔隙中充满气态分散介质的一种高分散纳米固态材料。 SiO_2 气凝胶是具有超低密度和多孔性的固体材料,孔隙率可达到 80%~99.8%,孔径一般为 1~100nm,密度在 0.001~0.5g/cm³,具有很低的热导率,可达到 0.005W/(m·K)^[1]。图 1 为 SiO_2 气凝胶的结构示意图。由图可知, SiO_2 气凝胶的孔隙尺寸均在纳米级。虽然其看似脆弱不堪,却可承受 1300℃ 的高温,因其特殊的结构能大大降低固态传导、气态传导及红外辐射,成为导热系数最小的材料^[2]。

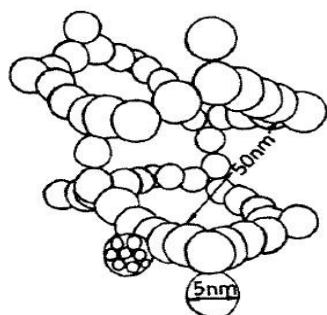


图 1 SiO_2 气凝胶的结构示意图

2.1 SiO_2 气凝胶材料的高温隔热特性

SiO_2 气凝胶独特的多孔结构使其热量传递是通过固体热传导、气体热传导和辐射热传导三种方式共同完成的,如图 2 所示,因此其导热系数也是三种导热方式的导热系数的总和^[2, 3]。

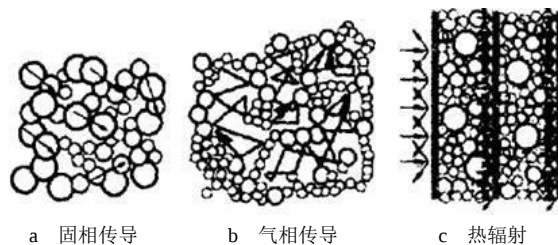


图 2 SiO_2 气凝胶的三种热传导方式

a. 固体热传导

SiO_2 气凝胶独特的纳米多孔结构使得其孔隙率高达 80%~98%,固态气凝胶占总体积比例非常小,大大增加了热量在孔隙内部传递的通路,有效地限制了局部热量的传播,使其固体热导率极低,即所谓的“无限长路径效应”。

b. 气体热传导

气体热传导依赖于气体分子的流动,而气凝胶内部纳米气孔的孔径多小于 50nm,低于空气主要成分氮气和氧气的自由程(一般在 70nm),极大地限制了气孔内气体分子自由流动的能力,材料内部近似于真空状态,从而使气凝胶气体热导率极低,即所谓的“零对流效应”。

c. 辐射热传导

气凝胶的纳米多孔结构使其具有很大表面积,对热辐射的遮挡效率很高,因此具有很低的辐射导热系数,即所谓的“无穷隔热板效应”。

以上特性使 SiO_2 气凝胶的导热系数非常低,且其耐高温性能好,在 800℃ 下结构、性能均无明显变化,因此成为理想的超级高温隔热材料。气凝胶高温隔热的主要优越在于其超低的密度和高热稳定性。图 3 为气凝胶隔热材料和常见隔热材料的导热系数的对比。由图可知,气凝胶隔热材料的导热系数明显低于目前常用的隔热材料。

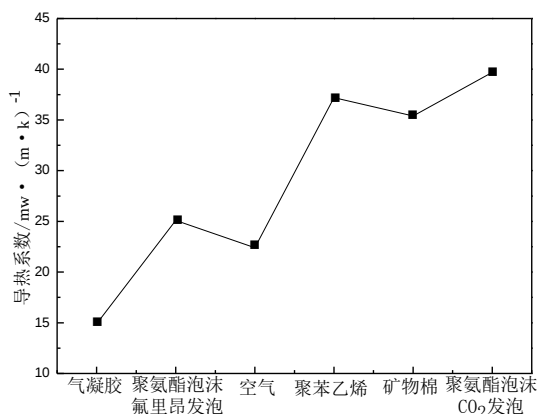


图 3 气凝胶隔热材料和常用隔热材料的导热系数

2.2 SiO₂气凝胶材料的透波特性

根据麦克斯韦第一方程和第二方程可知,材料的微波吸收系数 α_p 与相对介电常数 ε_1 和损耗角正切值 $\tan\delta$ 有如下关系^[4]:

$$\alpha_p \approx 2\pi\sqrt{\varepsilon_1} \frac{\tan\delta}{\varepsilon_0\lambda_0}$$

其中, ε_0 和 λ_0 是常数。由上式可知,材料的介电常数和介电损耗越低,其透波性能就越好。一般来说,透波材料适宜的介电常数值为 1~4, 损耗角正切值为 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ 。

研究显示, SiO₂ 气凝胶材料的介电常数在 1.0~3.5 之间, 且其介电性能与材料的孔隙率、疏水性及杂质含量有着密切的关系。目前, SiO₂ 气凝胶材料介电性能的研究对象主要集中在 SiO₂ 气凝胶薄膜。王娟^[5]等采用 MIS 结构研究了 SiO₂ 气凝胶薄膜的介电性能, 介电常数在 2.03~2.82 之间, 损耗角正切值在 0.014~0.024 之间, 验

证了薄膜的介电常数与孔隙率的关系, 并认为薄膜的低介电常数是由其纳米多孔结构和疏水性共同决定的。同小刚^[6]等研究了 SiO₂ 气凝胶薄膜的疏水性对其介电性能的影响, 结果显示经疏水改性后薄膜的介电常数由 2.39 降低至 2.08。国内高校率先开展了 SiO₂ 气凝胶透波性能的研究, 其制备的气凝胶材料介电常数在 1.26~1.43 之间, 耗损角正切值在 0.0027~0.0038 之间。

表 1 是部分陶瓷透波材料的基本性能^[7~9]。通过与 SiO₂ 气凝胶材料的性能对比可知, SiO₂ 气凝胶材料的介电常数低于绝大部分常用的陶瓷透波材料, 损耗角正切值在 10^{-3} 数量级, 而且其热导率远远低于上述陶瓷透波材料。由此可知, SiO₂ 气凝胶材料是一种具有低介电常数和较小耗损角正切值, 且热导率非常低的高温隔热透波材料。

表 1 部分陶瓷透波材料的基本性能^[7~9]

性能	99%Al ₂ O ₃	AlN	SCFS	HPBN	IPBN	HPSN	RBSN
密度/g cm ⁻³	3.9	3.26	2.2	2.0	1.25	3.2	2.4
介电常数(10GHz)	9.6	8.6~9.0	3.42	4.5	3.1	7.9	5.6
损耗角正切(10GHz)	0.0001	0.0001	0.0004	0.0003	0.0003	0.004	0.001
热导率/W(m K) ⁻¹	37.7	320	0.8	25.1	29.3	20.9	8.4
热膨胀系数(10 ⁻⁶ /K)	8.1	4.7	0.54	3.2	3.8	3.2	2.5

3 SiO₂气凝胶材料在夹层结构天线罩上的应用研究

目前国内高校已制备出 SiO₂ 气凝胶高温隔热透波天线罩, 其具有较好的隔热透波性能, Ku 波段的透波率高达 96%。但在实际的应用方面却一直未能取得进展, 主要原因是 SiO₂ 气凝胶材料高孔隙率、低密度的特点导致其力学性能急剧下降, 强度低、脆性大。目前引入晶须、纤维等增强相制备 SiO₂ 气凝胶复合材料取得了较大进展, 使得 SiO₂ 气凝胶材料的力学性能有了较大的改善, 但依然不能满足新型导弹天线罩材料高弹性模量、高断裂强度和韧性的要求。为了解决这个问题, 国内外一般将 SiO₂ 气凝胶材料作为新型夹层结构天线罩的内层隔热透波材料, 这种结构的天线罩不仅具有较好的力学强度, 而且能满足宽频带透波性能的要求^[10]。

3.1 特殊夹层结构天线罩宽频带透波原理

特殊夹层结构主要有三种类型, 即 A 型夹层、B 型夹层、C 型夹层等, 如图 4 所示。A 型夹层结构是

由低介电常数、低密度的泡沫层或蜂窝状结构层和高介电常数、高密度的内外两层(蒙皮层)组成。B 型夹层结构是由高介电常数、高密度的中间层和低介电常数、低密度的内外两层组成。C 型夹层结构是由两层或多层 A 型夹层结构组合而成的。其中以 A 型和 C 型夹层结构最为常用。

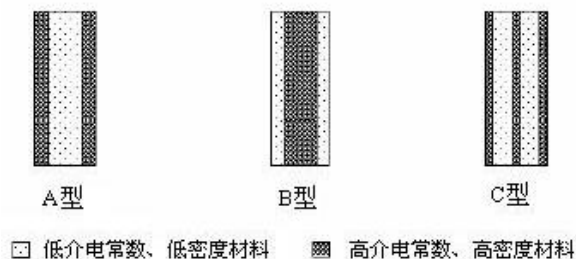


图 4 三种夹层结构示意图

电磁波在介质中传输的过程中, 除了一小部分的介质损耗外, 大部分是因为反射和折射而造成的能量损耗。夹层结构天线罩实现宽频带透波的原理是^[10, 11]: 将单层结构具有的较大阻抗突变分散成三个或多个较

小阻抗突变,通过合理地选择突变材料的等效特性阻抗和厚度,使其产生的反射在特定的频带范围内能够部分抵消,将所需求的特定频带范围内的反射降至最小。因此夹层结构天线罩可以通过合理地选择不同介电常数的内外层和中间层材料,控制其厚度将反射和折射的能量损耗保证在较低的水平,从而保证其在宽频带内的透波率。

3.2 夹层结构天线罩的研究进展

鉴于夹层结构天线罩的诸多优势及较好的应用前景,国内外均对其做了大量的研究工作,并取得了许多成果,其中一些已成功应用于型号武器上。

美国的哈姆导弹天线罩成功地运用了 A 型夹层结构^[12],内层材料介电常数为 3.5,厚度为 0.7mm;中间层采用蜂窝状材料,介电常数为 1.2,厚度为 3.0mm;外层材料介电常数为 3.5,厚度为 1.37mm。但材料和成型工艺的详细信息未见报导。Puriton^[13]等人研究了 PIP 工艺制备 A 夹层结构天线罩(如图 5 所示),内外两层材料为石英纤维布增强二氧化硅,中间层材料为二氧化硅蜂窝多孔材料。美国 Hughes Aircraft 公司 Leggett^[14]等人研制出了 C 型夹层结构天线罩(如图 6 所示),材料为 $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$,总厚度为 9mm,在 6~18GHz 宽频范围内显示了良好的透波性能。

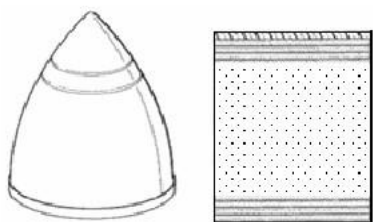


图 5 A 型夹层结构天线罩

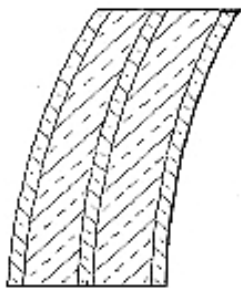


图 6 C 夹层结构陶瓷天线罩剖面图

国内闫法强^[15]研究了 $\text{ZrP}_2\text{O}_7/\text{SiO}_2/\text{ZrP}_2\text{O}_7$ 体系 A 型夹层结构平板试样的宽频透波性能,各层平板之间采用磷酸盐进行粘接,测试结果显示,该平板试样在 2~5GHz 和 9~12GHz 频带范围内透波率大于 90%。

国内某大型相控阵雷达天线罩也采用了 A 型夹层结构,内外蒙皮采用纤维增强树脂基材料,中间层采用芳纶蜂窝材料。但此树脂基复合材料不能承受高速导弹带来的高温,因此其应用受到了极大限制。

3.3 SiO_2 气凝胶材料在夹层结构中的应用前景

夹层结构天线罩能够有效实现宽频带透波,提高武器系统的突防能力和精确制导能力,多应用于反辐射及新一代高端武器系统,涉及到各国的高端军事机密,故出于保密原因,各国关于新型夹层结构天线罩材料和工艺的研究报导很少,对于 SiO_2 气凝胶材料在夹层结构中的应用的文献和报导几乎没有。

但根据报导的资料显示,目前夹层结构芯层材料主要有 Si_3N_4 (介电常数为 1.8)、多孔 Al_2O_3 (介电常数为 2~5)、多孔石英(介电常数为 2.6~2.8)。而 SiO_2 气凝胶材料的介电常数为 1.2~1.6,低于上述芯层材料。此外, SiO_2 气凝胶材料高孔隙率、低密度等特点使其高温隔热性能远优于上述芯层材料。通过对比不难看出, SiO_2 气凝胶材料是一种更为理想夹层结构的内层材料,在夹层结构天线罩材料中具有较好的发展和应用前景。

4 结束语

目前,国内在 SiO_2 气凝胶复合材料的制备技术和理论研究方面的发展相对较为成熟,但其在新型导弹天线罩上的应用方面还未取得实质性的突破。原因主要有以下几个方面^[10]: a. SiO_2 气凝胶材料自身力学性能不足的缺陷,使其无法单独作为一种天线罩材料; b. 夹层结构天线罩的制备工艺较为复杂,各层材料体系的不同导致整体成型较为困难,分别成型时,气凝胶材料与内外层材料的层间结合强度不高,在高马赫的恶劣环境下易造成层间剪切破坏; c. 加工要求较高,由于材料本身介电常数的分散性和几何厚度偏差,导致电厚度精度指标很难达到要求,从而对夹层结构天线罩宽频带透波性能的稳定性造成影响。

上述的这些问题严重制约着 SiO_2 气凝胶材料在夹层结构天线罩上的应用,同时也是新型夹层结构天线罩发展的桎梏。目前,国内有众多的天线罩生产厂家、研究所及一些高校致力于上述问题的研究,并且积累了许多宝贵的经验,并取得了一定的成果。可以预计,随着工艺技术的不断改进, SiO_2 气凝胶材料必将在新型导弹天线罩上获得广泛的应用。

(下转第 9 页)

