·综述·

高温天线罩材料研究进展

张大海　黎　义　高　文　陈　英　方　超
(　航天材料及工艺研究所先进功能复合材料技术国防科技重点实验室　北京　100076　)

文　摘　对目前主要几种高温天线罩材料体系,包括氧化铝陶瓷、石英陶瓷、微晶玻璃、纤维增强二氧化硅基复合材料、纤维增强磷酸盐基复合材料以及硅氧氮陶瓷等材料的研究发展和应用情况进行了简要的综述。

关键词　天线罩,介电常数,陶瓷,复合材料

Development and Application of High Temperature Radome Materials

Zhang Dahai　Li Yi　Gao Wen　Chen Ying　Fang Chao
(　National Defence Science & Technology Key Laboratory of Advanced Functional Composites,
Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology　Beijing　100076　)

Abstract　Development and applications of some main high temperature radome materials, such as alumina ceramic, slip cast fused silica, pyroceram, fiber reinforced silica composite, fiber reinforced phosphate composite and Sion ceramic are briefly reviewed in this paper.

Key words　Radome, Dielectric constant, Ceramic, Composite

1　引言

天线罩既是寻的制导武器弹头结构的重要组成部分,又是保护天线系统不受高速飞行造成的恶劣气动环境影响、正常进行信号传输工作的屏障,是一种集透波、防热、承载和抗蚀等多功能于一体的部件。目前,各类先进战术导弹的飞行速度多在 4 Ma 以上,地地中导的再入速度已达到 8 Ma～12 Ma,甚至更高。根据不同的使用环境,天线罩的耐温要求在 500 ℃～2 400 ℃以上不等。除耐高温性能外,对天线罩材料的基本要求还包括:较低的介电常数和介电损耗,介电性能具有较好的温度稳定性;材料具有足够的常温和高温结构强度,能同时承受高速机动飞行带来的强过载和热冲击。此外,材料还应具有良好的抗雨蚀和抗粒子侵蚀能力。这些苛刻的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。高温天线罩材料技术是高速精确制导航天武器的基础,是发展末制导中导、高超音速地空导弹、反辐射导弹和巡航导弹不可缺少的关键技术之一,它直接制约着先进型号的发展。

2　国外高温天线罩材料发展与应用情况

国外从 50 年代初开始着手高温天线罩材料研究工作,至今已有约 50 年的历史,已开发出一些综合性能优良的天线罩材料,应用于多种型号,其中有些材料品牌已商品化。

氧化铝陶瓷是第一种商业化高温天线罩材料,

收稿日期:2001 - 08 - 26
张大海,1968 年出生,博士,主要从事耐高温透波材料研究工作

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

成功应用于麻雀 III 和响尾蛇等导弹上,具有强度高、硬度高、抗雨蚀性能好的优点。缺点是材料弹性模量和膨胀系数大,抗热冲击性能差,只适用于 3 Ma 以下导弹。另外,天线罩采用半波壁厚设计,由于氧化铝介电常数较大(约 9.6),对天线罩壁厚公差要求很严。为提高氧化铝材料抗热震性能,国外对 BN 改性氧化铝复相陶瓷进行了大量研究,并取得良好的效果[1],弥散的 BN 颗粒显著改善了氧化铝陶瓷的脆性,获得了较好的抗热冲击性能。

配合美国海军的"小猎犬"导弹计划,1955 年～1956 年,美国康宁公司开发出以 TiO_2 为晶核剂的 Mg - Al - Si 系微晶玻璃,牌号 9606。该材料介电常数约为 5.7,具有耐高温、强度高、电性能好的优点,从 60 年代起被广泛用来代替氧化铝陶瓷用于 3 Ma～4 Ma 导弹天线罩,包括海军的"鞑靼人"、"小猎犬"、"百舌鸟"和"Typhon"及空军的 GarIX 和 GarXI 等。此后为进一步提高微晶玻璃的抗热冲击性能,又进行了大量的改性工作[2],并在 80 年代初研制出膨胀系数比 9606 微晶玻璃低 78 %的 M7 微晶玻璃,用 M7 材料制造的天线罩在大于 5 Ma 飞行的气动加热条件下的承载能力比原来提高了 25 %。

60 年代初开始,美国海军航空局资助通用电器公司着手研究低成本磷酸盐高温天线罩材料,得到了能在 315 ℃以下固化,650 ℃仍保持较好力学和电性能的石英织物增强磷酸铝基复合材料。德国 Brunswick 公司在空军航空电子设备实验室资助下,也于 1963 年开始研制能在 698.7 ℃长时间(1 000 h)工作的磷酸盐天线罩材料[3],并采用缠绕法制备出长度 1.6 m、综合性能与微晶玻璃相近的天线罩样件。70～80 年代,美国空军实验室等单位进行了磷酸盐材料的常温、高温电性能的详细测试。前苏联在 50 年代就以防热材料为目的进行磷酸盐材料研究,后将该项技术推广到耐热透波材料领域,研究工作逐步深入,并在型号上获得应用。到 80～90 年代,磷酸铬铝系复合材料的固化温度已降低到 170 ℃,介电常数 3.2～3.8,使用温度可达 1 200 ℃。

50 年代末 60 年代初,应航天器防热和通讯发展的要求,美国乔治亚理工学院研制出了石英陶瓷材料,它是以石英玻璃碎块为原料,经磨细、制浆、浇注成型后烧结制备而成,可生产出各种形状和规格的制品。石英陶瓷材料具有石英玻璃的许多优良性能,特别是突出的高温电性能稳定性和抗热冲击性能,使其能在 5 Ma 以上条件下使用,并且生产成本显著低于氧化铝陶瓷和微晶玻璃,因此得到各国的重视和大力发展,70 年代以后,被应用于多种型号导弹上,包括美国的爱国者、意大利的"Aspide"导弹等。石英陶瓷的缺点是室温强度低,含 5 %～8 %气孔,易吸潮,硬度低,抗雨蚀能力差。甲基硅树脂表面封孔、火焰抛光或陶瓷密封涂层等手段是解决防潮问题的几种主要方法。

为保持石英陶瓷材料的优点,同时克服其力学和抗侵蚀性能较差的缺点,在 70～80 年代,以中远程导弹天线窗和天线罩为应用背景,美国通用电器公司和菲格福特公司分别研制了不同结构三维多向石英或氮化硼织物增强二氧化硅基复合材料,该材料一方面具有石英陶瓷优异的电性能,同时又具有明显好于石英陶瓷的力学性能、抗热冲击性能和抗雨蚀性能。由于受编织技术的限制,当时难以获得大尺寸整体织物,没能在大型天线罩上获得应用。

以高温天线罩和天线窗为应用背景,近年国外还对氮化硼陶瓷、氮化硅陶瓷等材料的常温、高温力学和电性能,以及烧蚀性能进行了大量的研究[4～7]。为发展耐高温、宽带、低瞄准误差天线罩,近十几年来,以氮化硅为基本组成的复合陶瓷材料天线罩是西方研究的主要目标之一,除继续改进热压氮化硅、反应烧结氮化硅制造工艺和技术外,在无压烧结工艺和材料的基础组成上又进行了卓有成效的工作。1995 年～1996 年,在美国海军部资助下,研究出以磷酸盐为粘结剂,无压烧结,且烧结温度不超过 900 ℃的氮化硅陶瓷材料[8],其 20 ℃时的介电常数为 4.03,到 1 000 ℃时介电常数的变化为 5.2 %,抗弯强度达 85 MPa,能满足多种战术导弹天线罩的需求。1997 年,在美国陆军部资助下,又研制出无压烧结的 Sion 纳米复合陶瓷天线罩,应用于极超音速飞行器。该材料在 25 ℃和 1 000 ℃下的介电常数和介电损耗分别为 4.78、5.00 和 0.0014、0.0025,介电常数变化不到 4.7 %,抗弯强度 190 MPa,为石英陶瓷(48 MPa)的 4 倍,硬度 10 440 MPa,为石英陶瓷

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(2 120 MPa～5 000 MPa)的 2～5 倍,综合性能显著优越于石英陶瓷。

天线罩材料是一种多功能材料,不同天线罩材料具有各自不同性能优势和不同的适用环境,以及不同的生产制造成本和周期,对天线罩的选材要根据实际使用要求进行综合考虑。在上述材料中,介电性能最好的是石英陶瓷和石英纤维增强二氧化硅基复合材料,不仅介电常数最小(分别为 3.4～3.5 和 3.1～3.2),而且介电性能随温度的变化也非常小,从电性能角度看,是现有耐热透波材料中最好的。纤维增强磷酸盐基复合材料在 800 ℃以下具有与石英类材料相近的介电性能(介电常数小于 4),也是一种性能很好的耐热透波材料。类泡沫氮化硅陶瓷材料是一种具有很大发展潜力的高温宽带天线罩材料,但技术发展相对不成熟。从力学性能看,采用纤维增强的复合材料不仅具有较好的强度,更重要的是极大地改善了陶瓷材料的脆性,使天线罩的结构可靠性、抗热冲击性能大幅度提高,是耐热天线罩材料的重要发展方向。

美国、俄罗斯及其它发达国家在高温天线罩材料领域一直有较大投入,但由于该领域的敏感性,关键材料技术一直保密较严,特别 80 年代中期以后的研究工作,国内能获取的有价值资料十分有限。

3 国内高温天线罩材料发展现状

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,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,性能上除介电损耗相对偏高外,其它性能与 9606 微晶玻璃非常相似。为发展 5 Ma 以上防空导弹,国内采用石英陶瓷天线罩制造技术,研制出增强型石英陶瓷天线罩,目前已应用于某型号高速防空导弹,多次飞行试验获得成功。与俄罗斯同类材料相比,国内石英陶瓷的性能,特别是介电性能还有一定差距,目前正在进一步改进,以满足更先进型号的需求。为满足中、远程地—地战术和战略导弹天线窗需求,国内先后研制和发展了石英玻璃材料、高硅氧穿刺织物和正交三向石英织物增强二氧化硅基复合材料,这些材料已经在多种型号上获得成功应用。为满足精确末制导中程导弹天线罩的需求,国内以高硅穿刺和三向石英天线窗材料为基础,已研究发展出整体石英织物增强二氧化硅基复合材料。

4 结束语

从目前现状看,国内不同高温天线罩材料体系的发展是不平衡的,有些材料技术与国外接近,并具有自己一定的技术特色,而另一些材料体系则基本没有开展过研究工作,国内高温天线罩总体技术水平与国外军事大国相比仍然存在较大差距。高性能天线罩材料技术是发展精确末制导中导、高超音速和极超音速防空导弹、反辐射导弹和巡航导弹必不可少、无可替代的关键技术,是发展先进型号首先必须解决的重点问题。即使以成熟天线罩材料技术为基础,进行具体天线罩研制也是一个集电气性能设计、力学结构设计、气动外形与防热设计以及天线罩材料工艺于一体的系统工程,有关工作不仅难度大,而且牵涉面广,需要多个研究单位相互协调,投入也非常大,及早开展和增加先期的材料技术预研投入,提前为将来先进型号的发展作必须的技术储备非常重要。

参考文献

1 Rice R W, Mcdonough W J, Freiman S W et al. Ablative-resistant dielectric ceramic composite. US4304870, 1981

2 Lewis D, Spann J R. Assessment of new radome materials as replacement for pyroceram 9606. Electromagnetic Window. 1980; 165～169

3 Chase V A, Copeland R L. Development of a 1200 °F radome. Interim Engineering Report 3, AD 429387 1963

4 Dodds G C, Tanzilli R A. Boron nitride-toughened single phase silicon aluminium oxynitride composite. Article and Methed of Making Same. US5925584, 1999.

5 Dodds G C, Tanzilli R A. Single phase silicon alumium oxynitride for use as electromagnetic window for high speed aircraft. US 5925584, 1999

6 Dodds G C, Tanzilli R A. Silica, boron, aluminum nitride, alumina composite, article and method of making same. US5891815, 1999

7 Hsieh M Y. Low dielectric loss silicon nitride based material. US4654315, 1987

8 Talmy I G, Martin C A, Haught D A et al. Electromagnetic Window. US5573986, 1996

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net