

# 航天透波多功能材料研究进展

黎 义 张大海 陈 英 高 文

( 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** 综述了航天透波多功能材料的应用需求、使用环境和相关的研究领域,对透波复合材料在研究过程中面临的增强结构、材料体系等技术问题进行了分析,讨论了在不同使用温度、飞行马赫数、高温使用时间等特殊环境条件下材料的性能,并介绍了在多功能透波材料研究中采用的材料设计、材料研究系统工程方法。

**关键词** 天线窗,天线罩,多功能复合材料

## Progress in High Performance Radome & Antenna Materials for Aerospace

Li Yi Zhang Dahai Chen Ying Gao Wen

( Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology Beijing 100076 )

**Abstract** Application requirement, service environment and relevant research areas of radome materials is summarized here. A number of questions such as reinforcement, material systems is analyzed. Material performance under specific conditions of different service temperature, mach number and high temperature service time is discussed, and employment of material design and systems engineering methods in the material research is also introduced in this paper.

**Key words** Radome, Antenna, Multifunctional composites

### 1 前言

航天透波材料是保护航天飞行器在恶劣环境条件下通讯、遥测、制导、引爆等系统能正常工作的一种多功能介质材料,在运载火箭、飞船、导弹及返回式卫星等航天飞行器无线电系统中得到广泛的应用。不同飞行器所处的工作环境不同,使用的无线电设备也不同,因而对透波材料的要求差异很大。航天透波材料按其结构件的形式主要分为天线窗和天线罩两大类,其中天线窗一般位于飞行器的侧面,通常为平板或带弧面的板状,主要用于保护天线窗后面的无线电设备,使其在恶劣环境下能正常工作;天线罩位于飞行器的头部,多为锥形,有时也有半球

形,具有导流、防热、透波、承载等多种功能。天线罩材料种类和结构种类较多,但适用于制作超高速精确制导雷达天线罩的材料并不多,主要是对材料防热、承载和电气性能的要求都极高,限制了材料结构组份的设计与选择。

航天透波材料,经过几十年的研究、应用与发展,已经从单纯的透波材料发展到了具有防热、承载、透波、抗冲击等多功能材料,并正在向宽频、多模通讯与制导方向发展。

### 2 应用需求

透波材料在航天器中具有重要的地位,是航天器“眼睛”的重要组成部分,主要应用的航天器系统

收稿日期:2000-05-19

黎义,1960年出生,研究员,主要从事航天透波多功能复合材料的研究工作  
宇航材料工艺 2000年 第5期

有:

- (1) 高马赫数飞行器遥测、引信、通讯天线系统;
- (2) 卫星遥测天线系统;
- (3) 战术导弹制导系统;
- (4) 航天飞机再入天线控制系统等。

### 2.1 天线窗材料

在战略弹头小型化、多弹头化和核弹头战术化的发展趋势下,高速再入天线窗恶劣的使用环境对材料性能提出了苛刻的要求。一般认为,二氧化硅基和氮化硼基材料是针对远程战略导弹使用天线窗的最佳选用对象,其中二氧化硅在高温烧蚀下仍能保持良好的使用性能。用作天线窗时可以有几种结构形式,包括石英玻璃、三向石英织物增强二氧化硅基复合材料、高硅氧穿刺织物增强二氧化硅基复合材料等,其中高纯均质的石英玻璃被认为是介电性能最好的材料。

### 2.2 天线罩材料

一些武器系统出于未制导、提高锁定目标准确性和打击准确性的需要,把相关的电气系统放在了弹头的头部,从而提出了研制各种透波天线罩、端头帽的需求,其中小烧蚀量或不烧蚀薄壁宽频高透波率端头帽是主要的应用需求。如美军在海湾战争中使用的“铜斑蛇”智能炮弹,头部装有激光制导系统和透波风帽,使弹头准确打中目标。随着各种战术导弹智能化和精确制导技术的发展,透波风帽的需求逐渐增大。对于高马赫数飞行导弹用大尺寸天线罩,主要选用具有优良耐热性能的无机材料。随着航空航天技术发展,天线罩材料经过了如下的发展路线:纤维增强塑料 氧化铝陶瓷 微晶玻璃 石英陶瓷 复合材料。目前各军事强国都在研制发展新型精确制导地/地、地/空、高马赫数巡航导弹、反辐射和反弹道导弹,促使天线罩材料向高性能、多功能方向发展。

### 3 透波材料技术研究现状

航天透波材料是一典型的多功能材料,恶劣的使用环境对航天透波材料提出了防热隔热、承载、抗核(抗冲击)、透波、耐候、气密等多方面高性能要求。

#### 3.1 增强结构

对于高马赫数飞行器抗冲击型透波材料,增强结构是一关键技术。在航天透波复合材料中,获得成功应用的典型增强结构是三向正交织物增强结

构。三向正交积木式织物的理论结构构架空域(V)由关系式(1)确定<sup>[1]</sup>。

$$V = 2 \sqrt{[(x+1)(y+1)(z+1)]} \times 100\% \quad (1)$$

式中  $V = (N_z/N_x)^{1/2}$   
 $= (N_x/N_y)^{1/2}$

其中,  $N_x$ 、 $N_y$ 、 $N_z$  为三向织物中  $x$ 、 $y$ 、 $z$  各向织物的平均单丝数。

三向正交积木式织物的结构参数由下列关系式给出:

$$dz_y = [N_x \cdot N_z \cdot \nabla f_y \cdot A_f / (N_y \cdot \nabla f_x \cdot \nabla f_z)]^{1/2} \quad (2)$$

$$dz_x = [ \nabla f_x \cdot N_y / (\nabla f_y \cdot N_x) ] \cdot dz_y \quad (3)$$

$$dx(y) = N_y \cdot A_f / (\nabla f_y \cdot dz_x) = N_x \cdot A_f / (\nabla f_x \cdot dz_y) \quad (4)$$

式中  $\nabla f_x$ 、 $\nabla f_y$ 、 $\nabla f_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  向纤维束的体积分数;

$A_f$  为纤维单丝的平均截面积;

$dz_{x(y)}$  为  $z$  向  $x(y)$  向中心距;

$dx(y)$  为  $x(y)$  向纱的层间距。

根据使用需求,通过调整织物结构参数,可以对织物结构进行优化,并获得不同编织密度的织物。

为了设计、研制各种结构形状的航天器功能构件,在三向正交织物编织技术的基础上,又研究和发展的各种类型的编织、机织和针织物,从织物结构来分类有 2D、2.5D、3D、S3D、4D、5D 等,其中 2.5D 和三维四向织物是比较成功应用于大尺寸多功能复合材料构件的增强结构。

#### 3.2 材料体系

综合性能较好、适用于超高速飞行器的透波材料品种并不多,经过几十年的发展,国内外都把注意力集中在如下几种材料体系上<sup>[2,3]</sup>:

(1) 二氧化硅体系,主要为石英玻璃、石英陶瓷材料(SCFS)与硅质纤维织物增强二氧化硅基复合材料;

(2) 氮化硼体系,主要为氮化硼陶瓷与氮化硼/二氧化硅复相陶瓷;

(3) 氮化硅体系,主要为单相和复相的氮化硅陶瓷和硅氧氮陶瓷;

(4) 磷酸盐体系,主要为硅质纤维增强磷酸铝、磷酸铬、磷酸铬铝等复合材料;

(5) 有机硅树脂体系,主要为硅质纤维或织物增强有机硅树脂;

(6) 其它体系,如玻璃纤维增强氟塑料材料,主要应用于低马赫数飞行器。

陶瓷材料电气性能好,工艺相对简单,生产成本低,但材料脆性大,损伤容限低,成品率低。引入增强织物后,复合材料具有较高的损伤容限,在极端恶劣条件下使用可靠性高,一直受到国内外航天界的高度重视。

### 3.3 使用温度

材料的最高使用温度是评价航天透波材料使用性能的重要参数,也是设计选材的主要依据之一。除了要考虑材料的高温介电性能能否满足使用要求外,还要考虑材料的防热性能和高温承载性能能否满足要求。在高温作用下,材料性能会发生改变,如组织结构改变,反应引起化学成分改变,组份质量比改变,材料热物性改变等。当飞行器高速飞行时,材料表面急剧升温,使材料沿厚度方向存在温度梯度,在厚度方向上同样存在相应的介电常数和损耗角正切  $\tan \delta$  梯度。图 1、图 2 是几种典型透波材料在加热过程中介电性能的变化情况。图 1、图 2 中 2F 表示聚二氟乙稀涂层,SP 表示有机硅涂层,测试频率为 9.5 GHz。通常情况下,设计选择透波材料时,一方面要考虑材料性能的适用范围,另一方面要考虑材料的性能/价格比。一般来讲,对于纤维增强透波复合材料,当使用温度低于 1 200 时,可选用高硅氧纤维增强复合材料;使用温度高于 1 200 时,采用石英纤维增强复合材料更合适。

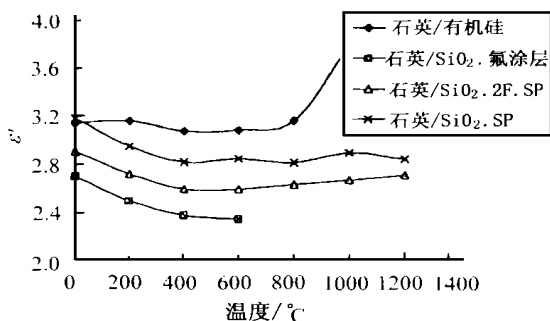


图 1 材料介电常数与温度关系

Fig. 1 Relative dielectric constant of candidate materials as a function of temperature at a frequency of 9.5 GHz  
宇航材料工艺 2000 年 第 5 期

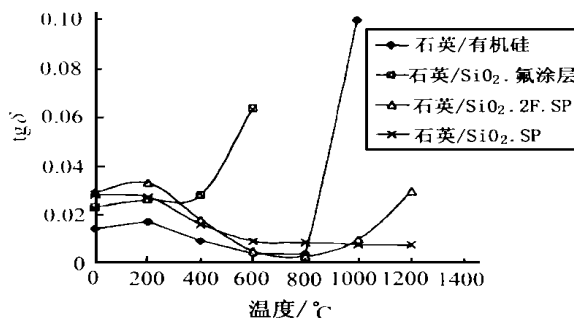


图 2 材料介电损耗与温度关系

Fig. 2 Loss tangent of candidate materials as a function of temperature at a frequency of 9.5 GHz

### 3.4 飞行马赫数

弹头飞行马赫数的高低是透波材料研制选材及研制需要考虑的主要因素之一。在进行材料与工艺方案的设计时,必须考虑透波材料的防热性能和承载能力,首先需要满足弹头的热结构要求。当弹头飞行的马赫数  $M < 6.5$  时,SCFS 是非常优秀的天线罩材料<sup>[3]</sup>,但当  $M > 6.5$  时,SCFS 的抗热性能差,难于满足可靠性要求,国外已逐渐发展复合材料和增韧陶瓷代替 SCFS。在进行高马赫数飞行器异型透波构件的制作时,复合材料体现出较大的优越性<sup>[4]</sup>。

### 3.5 高温使用时间

飞行时间,特别是加热时间对于选择及评价航天透波材料是关键因素之一。一般来讲,加热时间  $t < 1$  min 的称为短时间飞行,如地地战略导弹的再入飞行是高马赫数、短时间加热。加热时间  $t > 1$  min 的称为长时间飞行,如航天飞机、载人飞船的小攻角返回飞行及高马赫数巡航导弹飞行都是长时间飞行。长时间飞行时,气动热产生的热能先是沉积在天线罩的表面,随着加热时间的延长,热能逐渐传递进材料内部,使内部温度升高,当温度大于 600 时,有机硅类材料材质开始变化,其介电常数及损耗角正切也相应变大,产生高温透波率下降、材料强度下降等问题。

中程导弹机动飞行弹头,不仅飞行马赫数高,且加热时间相对较长(约 1 min),条件非常苛刻,采用石英陶瓷材料,不能满足热应力的承载要求。据文献[2]报道,从 70 年代开始,俄已在几种中程精确制导导弹中淘汰石英陶瓷罩,改用复合材料天线罩或复相陶瓷。采用复合材料天线罩也存在选择何种基

体材质的问题。一般来讲,高马赫数短时间飞行可采用硅质纤维增强二氧化硅基复合材料、有除碳剂的硅树脂基复合材料或复相陶瓷,中低马赫数长时间飞行的必须选用不碳化的陶瓷基复合材料,如织

物增强磷酸盐和二氧化硅基体等。复相陶瓷也是一优良的侯选材料,但必须解决抗冲击问题。当使用温度小于 400 时,可采用有机类材料。表 1 是近几年国内外复合材料天线罩性能水平。

表 1 国内外复合材料天线罩性能水平

Tab.1 Properties of radome composites from several countries

国家及材料	密度/ $\text{g cm}^{-3}$	弯曲强度/MPa	断裂应变率/%	介电常数	损耗角正切 $\text{tg} / 10^{-3}$
美国,织物/ $\text{SiO}_2$	1.65 ~ 1.75	60 ~ 110	0.5 ~ 1	2.8 ~ 3.0	5 ~ 8
俄罗斯,2.5DQ/有机硅	1.60 ~ 1.70	50 ~ 110	0.4 ~ 1.7	3.2 ~ 3.4	7 ~ 8
俄罗斯,2.5DQ/磷酸盐	1.65 ~ 1.85	40 ~ 110	0.3 ~ 0.9	3.2 ~ 3.4	7 ~ 8
中国,3DQ/ $\text{SiO}_2$	1.70 ~ 1.85	60 ~ 110	0.2 ~ 0.7	3.0 ~ 3.4	5 ~ 8

#### 4 材料设计与材料研究

航天透波材料的三功能特征及其三功能匹配设计的矛盾性是材料设计与材料研究面临的主要课题,其中在织物增强二氧化硅基透波复合材料研究中存在如下问题:

- (1) 材料烧蚀对透波的影响和热结构与透波要求的矛盾;
- (2) 材料致密度与力学性能要求的矛盾;
- (3) 电性能稳定处理方法与高温烧蚀透波要求的矛盾。

增强纤维、大尺寸织物及增强结构、基体组成设计、成型工艺、致密化工艺、防潮钝化工艺及机加工等制造工艺因素、环境与成本因素等,形成了错综复杂的关系,如图 3 所示。航天透波材料研究是一项系统工程,图 4 描述了航天透波多功能复合材料的材料设计、材料研究的系统方法过程。

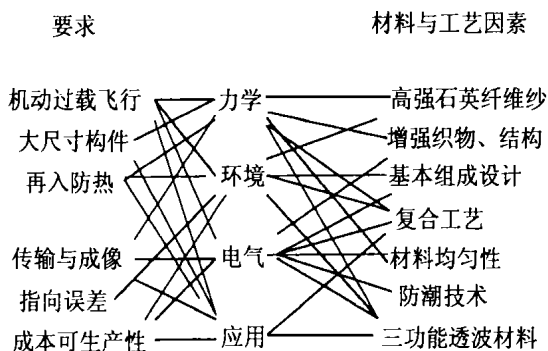


图 3 三功能透波材料与工艺研究面临的各种问题  
Fig.3 Several problems in high performance radome & antenna materials and processing studies

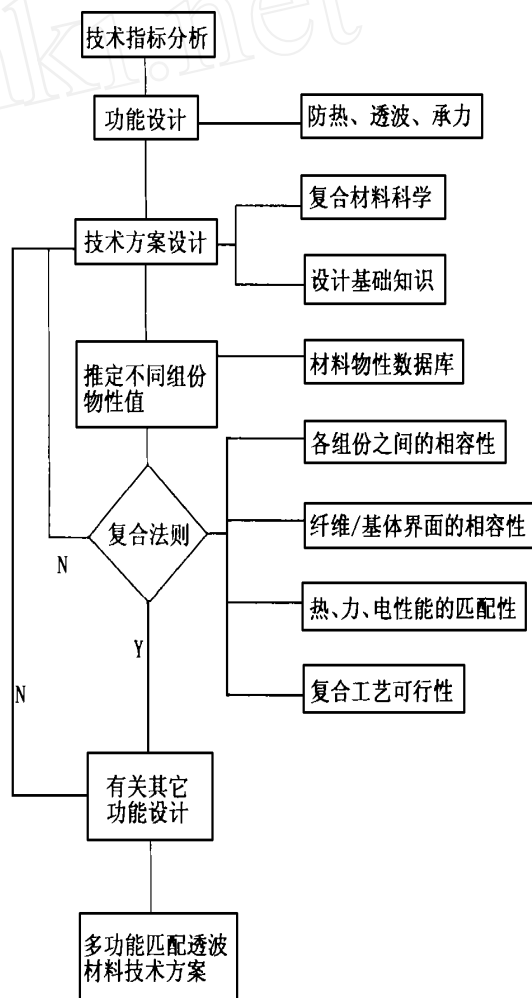


图 4 材料设计、材料研究过程

Fig.4 Flow chart of materials research and materials design

综上所述,航天多功能透波材料研究涉及到许多专业技术,包括气动防热、热力学、机械结构、电磁

场理论、特种纤维、编织技术、复合材料与工艺、专业检测技术及可靠性工程等,透波材料的这种特殊要求,促使研究工作必须以理论分析、原理探讨、功能设计、结构设计、工艺探索、试验验证为核心的材料设计、材料研究的系统工程方法,对防热/透波/承力三功能航天透波复合材料进行材料、组成及工艺方案的设计开展工艺攻关,联合各专业按飞行器的要求不断协调与创新,方能向前发展。

## 5 发展趋势

### 5.1 小烧蚀量天线窗材料

小烧蚀量天线窗材料主要应用于地/地远程洲际导弹,在满足力学、电气性能、抗冲击性能的同时,主要强调解决材料的防热难题和再入通讯中断问题,提高耐烧蚀性能是研制高性能天线窗材料的技术关键,而通讯中断问题是材料在再入环境下热、电、等离子体等因素综合作用下产生的电磁波屏蔽效应,需要有关方面联合攻关。在核弹头小型化、多弹头化和强突防要求的发展趋势下,天线窗材料的局部防热和透波功能设计要求将成为弹头技术关键。

### 5.2 高性能天线罩材料

研制小烧蚀量、具有优良高温物理、力学和电气性能的新型天线罩材料,为打击远程机动目标和战略目标导弹提供高性能天线罩材料。

为得到宽频透波材料,设计通常提出采用低密

度或薄壁结构作为透波材料,如厚度  $d < 5 \text{ mm}$ ,在频率  $f = 2 \text{ GHz} \sim 18 \text{ GHz}$  或更高频率的某个范围内具有优良的电气性能。研制高性能宽频高透波率端头帽材料,以满足反辐射小弹头、突防电子干扰机等智能弹头技术的需要<sup>[4]</sup>。

### 5.3 低成本陶瓷基复合材料

陶瓷基复合材料具有优良的高温电性能、热物理性能和高温力学性能,研制成本相对较低的新型陶瓷基复合材料是扩大航天透波材料应用领域的必然趋势。

### 5.4 透波隐身材料

在未来的战争中,突防与隐身技术是决定战争胜负的关键技术之一。突防与隐身技术有很多种方式,透波隐身材料是把防热、透波、吸波结合为一体,外表层透波、内层逐渐弥散和吸波,而达到减小飞行器反射截面的有效手段。

#### 参考文献

- 1 《导弹与航天丛书》编辑工作委员会. 材料工艺,北京:宇航出版社,1993:62
- 2 于翹,胡连成,黎义. 俄罗斯航天透波材料现状考察. 宇航材料工艺,1994;24(1):48
- 3 Place T M, Bridges D W. Fused quartz reinforced silica composites. In: Proceedings of the Tenth Symposium on Electro-Magnetic Windows, 1970
- 4 BRYTE. High performance Radome & Antenna Materials. High Performance Composites, 1999:15

---

## 欢迎订阅《腐蚀与防护》

月刊 每册6元 邮发代号4—593

1980年创刊。由上海市腐蚀科学技术学会和上海材料研究所主办。主要报道内容有:各类腐蚀理论及防护对策,各种先进、实用的耐蚀材料和产品,缓蚀、表面处理、电化学保护技术、失效分析和腐蚀监测控制等。全国各地邮局收订。

地址:上海市邯郸路99号

邮编:200437

电话:(021)65420775 x263

传真:(021)65449079

E-mail:mppnc@81890.net