

# 高温吸波材料研究现状

罗发 周万城 焦桓 赵东林

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室 西安 710072)

**摘 要** 论述了常见的石墨、乙炔炭黑吸收剂、碳纤维和碳化硅高温吸收剂的性能和应用概况,重点论述了碳化硅纤维、纳米碳化硅吸收剂处理方法和性能。综述了高温吸波材料的研究及应用概况。

**关键词** 高温,吸收剂,吸波材料

## Current Study of High Temperature Radar Absorbing Materials

Luo Fa Zhou Wancheng Jiao Huan Zhao Donglin

(State Key Laboratory of Solidification Processing Technology, Northwest Polytechnical University Xi'an 710072)

**Abstract** Properties and applications of some common high temperature absorbers such as graphite, acetylene carbon black, carbon fiber and silicon carbide are reviewed. Treating methods and performance of silicon carbide fiber and nanometer silicon carbide absorber are presented with focus. Development and applications of high temperature radar absorbing materials are also summarized.

**Key words** High temperature, Absorber, Radar absorbing material

### 1 引言

大力发展和应用隐身技术,提高现代武器系统的攻击和生存能力,提高总体作战效能,已成为各国军事发展的重要组成部分。

实现隐身的技术途径主要有两类:一是通过外形设计尽量减少雷达波散射截面<sup>[1,2]</sup>,但因受到战术技术指标和环境条件的限制,进行理想设计有相当大的难度;二是应用吸波材料(RAM)。因研制吸波材料则较为容易,且易于实施,所以吸波材料研究成为隐身技术中的研究“热点”。

武器装备需要隐身的部位按照工作温度来划分,可以分为常温和高温两类。因为绝大部分磁性吸收剂居里温度较低,在高温下失去磁性,从而失去吸波性能,因此磁性吸波材料一般只能用于武器常温部位的隐身。武器高温部位的隐身必须采用高温吸波材料,一般为陶瓷吸波材料,其吸收剂为陶瓷吸

波剂。由于高温吸波材料仅仅依靠材料的电损耗来吸收电磁波,故其吸波效率远低于磁性吸波材料,这就要求高温吸波材料具有较大的厚度。

### 2 耐高温吸收剂

吸收剂是吸波材料中起关键作用的组成部分,吸波材料主要靠吸收剂来吸收和衰减雷达波。要制备性能优异的吸波材料,首先必须研制质轻、吸收频带宽、对雷达波具有强吸收的吸收剂,因此高温吸收剂是高温吸波材料研究的关键。与磁性吸收剂相比,介电常数控制是高温吸收剂研究的重点和难点,而介电常数的频散效应的控制则是宽频带吸收所必须追求的目标。

国内外研究的高温吸收剂主要有以下几种类型。

#### 2.1 石墨、乙炔炭黑吸收剂

乙炔炭黑属介电型吸收剂,由于其粒径为纳米

收稿日期:2001-08-26;修回日期:2001-11-23

罗发,1963年出生,博士后,主要从事无机非金属材料的研究工作

级,不仅能吸收电磁波,还能有效抑制红外辐射;石墨在二战期间就被用来充填在飞机蒙皮的夹层中吸收雷达波,由于其密度低,也常被用来充填在蜂窝夹层结构中。导电炭黑还被用来与高分子材料复合,以调节高分子复合材料的导电率,达到吸波效果。石墨已经应用于结构吸波材料,美国在石墨/热塑性树脂基复合材料和石墨/环氧树脂基复合材料的研究方面取得了很大进展,这些复合材料在低温下(-53)仍保持韧性,只是对高温和高湿度环境比金属稍微敏感,波音公司和洛克希德公司正在推动石墨/热塑性树脂基复合材料的应用,与石墨/环氧树脂基复合材料相比,这种材料具有高的韧性和损伤裕度;另外石墨和炭黑也被用在掺杂高损物吸波涂料中,这类吸波涂料由导电纤维与高损物(如炭黑、陶瓷和粘土等)和树脂组成,其中导电纤维的长度是雷达波波长的一半,高损物的厚度最好是雷达波波长1/4的奇数倍<sup>[3]</sup>。石墨、乙炔炭黑作为高温吸收剂的缺点是高温抗氧化性差。

## 2.2 碳纤维吸收剂

碳纤维电阻率较低约 $10^{-2}$   $\Omega\cdot\text{cm}$ ,是雷达波的强反射体,只有经过特殊处理的碳纤维才具有一定的吸波性能。通过调节碳纤维的电阻率可以使它具有吸波功能,调节碳纤维电阻率使其具备吸波性能的方法有多种,如把碳纤维横截面做成三角形或有棱角的方形,对其进行表面改性,在其表面涂覆含有电磁损耗物质的树脂,沉积一层微小空穴的碳粉,喷涂镍或经氟化物处理等,都能大大提高碳纤维的吸波性能。碳纤维与玻璃纤维、SiC纤维混合使用吸波性能较好,能在宽频范围内有效衰减雷达波<sup>[4]</sup>。碳/碳复合材料也可以制成吸波材料,美国威廉斯国际公司研制的碳/碳复合材料适用于高温部位,能很好地抑制红外辐射并吸收雷达波,还可制成机翼前缘、机头和机尾。特殊碳纤维增强的碳/热塑性树脂基复合材料<sup>[5]</sup>具有极好的吸波性能,能够使频率为0.1 MHz~50 GHz的脉冲大幅度衰减,现在已用于先进战斗机(ATF)的机身和机翼,其型号为APC(HTX)。另外APC-2是Calion G40-700碳纤维与PEEK复丝混杂纱单向增强的品级,特别适宜制造直升机旋翼和导弹壳体,美国隐身直升机LHX已经采用此种复合材料。

## 2.3 碳化硅吸收剂

宇航材料工艺 2002年 第1期

碳化硅是制作多波段高温吸波材料的主要组分,很有应用前景,是国外发展最快的吸波材料之一。这里对碳化硅吸收剂的研究作较为详细的介绍。

### 2.3.1 碳化硅的基本性质

碳化硅的电阻率介于金属与半导体之间,属杂质型半导体。-碳化硅单晶的电阻率为 $10^9$   $\Omega\cdot\text{cm}$ ~ $10^{10}$   $\Omega\cdot\text{cm}$ ,-碳化硅单晶的电阻率 $>10^6$   $\Omega\cdot\text{cm}$ 。碳化硅的导电类型和电阻率值可以通过B、P、Al、Si、O以及退火和中子或电子辐照等方法来调整。-碳化硅的本征电导输出开始于900,而-碳化硅则开始于1200<sup>[6]</sup>。-碳化硅吸波性能优于-碳化硅,作为吸收剂应用的是-碳化硅。

### 2.3.2 碳化硅吸收剂的研究

碳化硅吸收剂具有密度小、耐高温性能好、吸收频带宽的特点,但吸收效率不是很高。国内外在这方面已开展了多方面的研究,常规制备的碳化硅并不能作为雷达波吸收剂,必须对其作进一步的处理,其目的就是要控制碳化硅的电导率,使其具有吸波性能<sup>[6]</sup>,可采取以下两种方法:提高SiC的纯度和对其进行有控制地掺杂。日本利用纯度极高的原料,制得几乎不含任何杂质的SiC粉体,该SiC粉具有很宽的吸波频带和很高的吸波性能,该方法的缺点是纯度极高的原料难以获得,成本高。前苏联利用掺杂的方法研究了SiC的吸波性能。

#### 2.3.2.1 碳化硅纤维吸收剂

碳化硅纤维不仅吸波特性好,而且具有耐高温、相对密度小、韧性好、强度大、电阻率高等优点,是国外发展最快的吸波材料之一。但是一般的SiC纤维的电阻率分布在 $10^0$   $\Omega\cdot\text{cm}$ ~ $10^4$   $\Omega\cdot\text{cm}$ 的范围内变化,SiC纤维必需经过适当的处理,调整其电阻率在 $10^1$   $\Omega\cdot\text{cm}$ ~ $10^3$   $\Omega\cdot\text{cm}$ 范围内才具备较好的吸波效果。一般采用高温处理法<sup>[7]</sup>或掺杂异元素法<sup>[8,9]</sup>来调节其电阻率,SiC纤维在不同热处理温度和时间条件下,通过控制工艺参数,可以对其显微结构和电磁参数进行控制。

研究表明,Nicalon-SiC纤维中Si、O、C的摩尔比为3:1:4,C有一定的过剩。三种元素以SiO<sub>2</sub>、SiC和C的形式存在,SiC约占65%,SiO<sub>2</sub>约15%,其余为自由碳。由于存在SiC和C,所以碳化硅纤维具有一定的电导率,且随着热处理温度的升高,纤维的

电导率升高<sup>[10]</sup>。当碳化硅纤维的电阻率在  $10^1 \sim 10^3 \text{ cm}$  时,吸收雷达波的效果最好。

### 2.3.2.2 纳米 SiC 粉体吸收剂的研究和发展

单纯纳米 SiC 并不能够吸收雷达波,同样需要对其进行一定的掺杂,以提高 SiC 的电导率,通常在 SiC 中能够进行掺杂的元素有 B、P、N 等。

西北工业大学通过对纳米 SiC 进行掺杂,得到了纳米 Si/C/N 吸收剂,具有很好的吸波性能。Si/C/N 纳米吸收剂能够吸波的主要原因是在吸收剂中形成的 SiC 晶格中固溶了 N 原子,固溶的 N 原子在晶格中取代 C 原子的位置形成晶格缺陷<sup>[11]</sup>。在正常的 SiC 晶格中,每一个碳原子分别与周围四个相邻的硅原子以共价键相连接,同样每一个硅原子也与周围的四个碳原子分别形成共价键。当氮原子取代碳原子进入 SiC 中后,由于 N 只有三价,只能与三个 Si 原子成键,而另外的一个硅原子将剩余一个不能成键的价电子,形成一个带负电的缺陷。由于原子的热运动,这个电子可以在 N 原子周围的四个硅原子上运动,从一个硅原子上跃迁到另一个硅原子上,在跃迁过程中要克服一定的势垒,但不能脱离这四个硅原子组成的小区域,因此,这个电子也可以称为“准自由电子”。在电磁场中,这种“准自由电子”的位置随着电磁场的方向而变化,导致电子位移,“准自由电子”从一个平衡位置跃迁到另一个平衡位置,要克服一定的势垒,从而运动滞后于电场,出现强烈的极化弛豫,这种极化弛豫是损耗电磁波能量的主要原因。这种纳米 Si/C/N 吸收剂具有以下优点。

- (1) 吸收剂介电性能可调,可以控制的范围为  $\epsilon': 1 \sim 32$ ,  $\epsilon'': 0 \sim 25$ ,  $\tan \delta: 0 \sim 2$ 。
- (2) 高温稳定,吸收剂在 700 °C 高温下热处理 10 h,微观结构和性能无任何变化。
- (3) 使用温度范围宽,在室温和高温均可使用,最高使用温度可达 1 000 °C。
- (4) 高温反射率稳定,经实际测试,吸波材料在 300 °C、500 °C、700 °C 时的反射率曲线与室温时的反射率曲线几乎完全一致,反射率随温度的变化很小。
- (5) 吸收剂用量少,在基体中掺入 3% ~ 10% (质量分数)的吸收剂即可达到好的吸波效果。
- (6) 介电常数随频率升高有一定程度的降低,有利于增加吸收频带的宽度。

(7) 吸收剂、吸波材料密度  $< 2.4 \text{ g/cm}^3$ 。

## 3 国外吸波材料研究情况

国外高温吸波材料的研制主要集中在陶瓷基复合材料方面,其中又以碳化硅和碳/碳两类复合材料为主。国外较早报道的耐高温吸波材料是 SiC、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 等的复合体,可以通过其各自混合比例调整电磁参数,制备出耐高温吸波材料。此外日本研制的一种 SiC/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/C/BN 耐高温陶瓷吸波材料,在耐高温的同时具有较好的吸波性能。

另据报道,美国已经研究出了 SiC 纤维增强的玻璃陶瓷基复合材料,即使在高温下也具有吸波性能。美国洛克希德公司在 F117 隐身飞机的研制中,用陶瓷基材料研制了吸波材料和吸波结构,可以加在尾喷管后沿,能够承受 1 093 °C 的高温<sup>[12]</sup>。据报道,美国 F22 飞机的发动机推力换向及反推力喷管也可能采用陶瓷基复合材料,以提高隐身能力。

在耐高温吸波材料研究方面,只有 E. Mouchon 和 P. Colomban 对 SiC<sub>f</sub>/Nasicon、Mullitef/Nasicon 复合材料的制备、力学性能和微波频率下的电导率进行了较详尽的报道<sup>[9]</sup>。从直接给出的数据看,该材料具有吸波性能。Nasicon (Na<sub>2.9</sub>Zr<sub>2</sub>Si<sub>1.9</sub>Pi<sub>1.1</sub>O<sub>12</sub>) 基体的气孔率为 0.5%,10 GHz 时的介电常数为  $\epsilon' = 15.3 - j4.0$ 。当 SiC<sub>f</sub>/Nasicon 复合材料中纤维的体积分数分别为 44%、33% 时,复合材料的介电常数分别为  $\epsilon' = 40 - j50$ 、 $\epsilon' = 16 - j50$ 。

此外,据 Philippe Colomban 报道,能够作为高温吸波材料的还有 Co / Aluminate、SiC<sub>wf</sub>/ Zirconosilicophosphateglass / Nasicon、SiC<sub>wf</sub>/ GeO<sub>2</sub>、ZrO<sub>2</sub>·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·2SiO<sub>2</sub>/ mullite 等复合材料<sup>[13]</sup>。

美国威廉斯国际公司研制的碳/碳复合材料适用于高温部位,能很好地抑制红外辐射并吸收雷达波。在发动机部位用致密钨粒和超致密碳泡沫层来吸收发动机排气的热辐射,还可制成机翼前缘、机头和机尾<sup>[11]</sup>。

耐高温吸波材料在国外巡航导弹上已经达到实际应用阶段。目前,国外巡航导弹的尾翼均采用陶瓷吸波材料。如法国的 APTCD 导弹的尾翼由小块六角形陶瓷吸波材料组成,具有较好的吸波效果,且质量轻。采用六角形是因为这种形状的陶瓷吸波材料可获得更好的吸波效果,美国三军通用的 TSSAM 隐身导弹也采用这种技术<sup>[14, 15]</sup>。法国马特拉防御

宇航材料工艺 2002 年 第 1 期

公司研制了一种叫做 Matrabsorb 系列 500 的耐高温陶瓷吸波材料,工作温度可达 1 000 ,可制成砖块状,用于导弹喷管的隐身<sup>[16]</sup>。美国研制的一种新型耐高温陶瓷吸波材料,密度为 25 kg/m<sup>3</sup>,对 3 GHz ~ 30 GHz 的电磁波衰减 - 10 dB,该材料可以直接嵌入火箭头部的隔热层中<sup>[17]</sup>。

#### 4 展望

世界各国武器装备隐身化的发展趋势表明,隐身化已是国防科技发展的重要方向。高温隐身技术的发展在一定程度上会影响到隐身技术的整体发展。在高温吸收剂的研究方面还有待于开发种类更多、吸波性能更好的新型吸收剂,以满足实际应用对吸收剂“轻、宽、高”的要求。在吸波材料研究方面应尽可能使吸收剂的吸波性能得到完美的发挥,开发出高吸波效率的吸波材料,满足国防现代化的要求。

#### 参考文献

- 1 Sweetman Bill 著,徐纹译. 隐身飞机,西安:西北工业大学出版社,1988
- 2 王自容,余大斌等. 雷达隐身技术概述. 上海航天,1999;(3):21
- 3 Stonier A R. Stealth aircraft & technology from world war II to the gulf. SAMPLE Journal, 1991;27(4):9
- 4 刘心慰,欧阳国恩,刘洪滨,刘滨. 结构吸波材料 SiC - C 纤维的研究. 宇航材料工艺,1992;(1):9
- 5 李萍,陈绍杰,朱珊,鞠树生. 隐身复合材料的研究和发展. 飞机设计,1994;(1):29

- 6 吴晓光,车晔秋. 国外微波吸收材料. 长沙:国防科技大学出版社,1992
- 7 王军. 含过渡金属的碳化硅纤维的制备及其电磁性能. 国防科技大学博士学位论文,1997
- 8 宋永才,陆逸,冯春祥. 具有微波吸收功能的掺混型碳化硅纤维的研制. 功能材料,1997;28(6):619
- 9 欧阳国恩,刘心慰,岳曼君. SiC - C 纤维有机先驱体流变可纺性研究. 复合材料学报,1995;12(3):46
- 10 罗发,周万城,赵东林. 结构吸波材料中纤维的电性能和吸波性能. 材料工程,2000;(1):37
- 11 Suzuki M, Hasegawa Y, Aizawa M. Characterization of silicon carbide-silicon nitride composite ultrafine particles synthesized using a CO<sub>2</sub> laser by silicon 2p magic angle spinning NMR and ESR. J. Am. Ceram. Soc., 1995;78(1):83
- 12 罗发. 高温吸波材料的制备及性能研究. 西北工业大学博士学位论文,2001
- 13 Colombari P. Sol-gel control of the micro of functional ceramic-ceramic and metal-ceramic composite. Materials Research Society, 1998;13(4):803
- 14 董月娟. APTGD 巡航导弹的隐身技术分析. 飞航导弹,1996;(5):14
- 15 刘菊艳. 法国新的巡航导弹. 飞航导弹,1995;(7):12
- 16 焦桓. 用 CVD 法制备雷达波吸收剂的探索研究. 西北工业大学博士学位论文,2001
- 17 黄英. 结构吸波材料与飞行器隐身. 战术导弹技术,1995;(3):32

(编辑 马晓艳)

---

## 高效金属过滤技术

本成果采用筒体和过滤介质——微孔镍管。微孔镍管采用特种粉末冶金方法制备,其工艺过程包括粉末制备、处理、筛选、加工成型、烧结、性能测试、参数组合等。通过改变粉末精度及其分布和加工条件,可控制微孔管的孔隙度、孔径分布、强度和尺寸,以适合各种要求。

本技术过滤效率高。可滤除气体中 0.5 μm ~ 0.9 μm 的颗粒,过滤效率达 99.999%;阻力小,初始压降为 5 × 10<sup>3</sup> N ~ 1 × 10<sup>4</sup> N;流量范围大,可由 1 m<sup>3</sup>/h ~ 2 400 m<sup>3</sup>/h;强度高,可承受正向压力差 1 × 10<sup>5</sup> N ~ 1.5 × 10<sup>5</sup> N,反吹压力 5 × 10<sup>5</sup> N 以上;使用寿命长,并且可以再生。

本成果技术性能先进,已在国内众多厂家使用,基本解决了因空气质量不好,造成发酵过程的染菌问题,并能显著降低能耗,节约大量劳动力。经济效益十分可观,目前该项技术已被广泛用于味精、医药行业的空气无菌过滤和电子行业的高纯气体净化,效果良好。

·李连清·

— 11 —