

吸波 C_f 和 SiC_f 的制备及其微波电磁特性

赵东林 沈曾民

(北京化工大学碳纤维及复合材料研究所 北京 100029)

文 摘 探讨了吸波 C_f 和吸波 SiC_f 的制备方法和微波电磁特性,降低 C_f 的碳化温度、改变 C_f 的截面形状和大小、对 C_f 进行表面改性以及对 C_f 进行掺杂改性能制备出吸波性能优良的 C_f 。采用高温处理、对纤维进行表面改性和掺杂异种元素可制备出吸波 SiC_f 。

关键词 隐身技术,吸波纤维,碳纤维,碳化硅纤维

Preparation of Radar Absorbing Carbon Fiber and Silicon Carbide Fiber and Their Microwave Permittivity and Permeability

Zhao Donglin Shen Zengmin

(Institute of Carbon Fibers and Composites, Beijing University of Chemical Technology Beijing 100029)

Abstract Carbon fiber and silicon carbide fiber have been widely used in stealth technology, which are two main kinds of fibers to reinforce radar absorbing materials. Preparation methods and microwave permittivity and permeability of radar absorbing carbon fiber and silicon carbide fiber are discussed. Carbon fiber with good radar absorbing can be prepared by decreasing its heat treatment temperature, changing its cross section shape and size, modifying outer surface and doping other elements into the carbon fiber. Silicon carbide fiber with radar absorbing can be prepared by increasing the heat treatment temperature, modifying fiber surface and doping other elements into fiber.

Key words Stealth technology, Radar absorbing fiber, Carbon fiber, Silicon carbide fiber

1 引言

隐身技术作为提高武器生存和突防能力,提高总体作战效能的有效手段,受到世界各军事大国的高度重视。美国在 1991 年的海湾战争中使用了 F-117 隐身战斗机,出动 1 000 多架次无一受损^[1], 1999 年在北约对南联盟的轰炸中首次动用了 B-2 隐身轰炸机,B-2 隐身轰炸机采用第二代隐身技术,隐身性能好,既能从高空也能从低空突防,使其作战能力得以进一步提高,此次对南联盟的轰炸在实战中得以验证。武器系统的隐身能力可以通过外形设计和使用隐身材料来实现,外形设计虽然效果

较好,但受到许多条件的制约,所以隐身材料的研究和应用成为隐身技术发展的关键因素。吸波材料按其成型和承载能力,可以分为涂敷型吸波材料和结构型吸波材料两大类。涂敷型吸波材料工艺简单、使用方便、容易调节。隐身兵器几乎都使用了涂敷型吸波材料^[2],缺点是耐候性差、粘结性差、不能经受高温。结构吸波材料具有承载和减少雷达波反射截面的双重功能,既能减轻质量,又能提高有效载荷,使成本大为降低^[3],并已获得广泛应用。高性能 C_f 和 SiC_f 的出现真正提供了可替代金属作为主承载力构件的结构材料,也为结构吸波材料的迅速发展

收稿日期:1999-12-03;修回日期:2000-04-17

赵东林,1968 年出生,博士后,主要从事纳米材料、新型碳材料、陶瓷基及功能复合材料的研究工作

与应用奠定了基础。本文就 C_f 和 SiC_f 在隐身技术中的应用,吸波 C_f 和 SiC_f 的制备及其微波电磁特性进行探讨。

2 C_f 和 SiC_f 在隐身技术中的应用

复合材料的增强纤维主要有玻璃纤维、Kevlar 纤维、 C_f 、 SiC_f 、石英纤维和 Al_2O_3 纤维等,其中大部分为透波纤维,对雷达波不吸收。而 C_f 和 SiC_f 的微波电磁特性可以通过制备工艺进行控制。

C_f 和 SiC_f 是结构隐身材料最常用的两种增强纤维,在结构吸波材料中已得到广泛应用,并经过实战考验。美国的先进隐身战斗轰炸机 F-117、战略轰炸机 B-2、战斗机 YF-22、YF-23、F-22 以及先进巡航导弹上都大量采用了 C_f 、碳/Kevlar 纤维或碳/玻璃纤维混杂纤维作为增强材料的结构吸波材料^[4-5]。F-117 隐身战斗机,大量采用了雷达波反射小的硼纤维和 C_f 复合材料,在发动机四周、主翼前缘、垂直尾翼及前部机身等的蒙皮材料都使用它^[6]。B-2 大量采用了 C_f 结构吸波材料,如中翼盒段、中后段及外翼段,这不仅解决了 B-2 高度复杂外形的成型问题,亦大幅度减轻了结构质量,达到了超音速巡航(不加油)^[6]。B-2 的机翼蒙皮是一种六角形蜂窝夹芯碳/环氧吸波结构材料,该材料的面板为非圆 Kevlar49 增韧环氧,夹芯为 Nomex 六角蜂窝(表面经特殊处理),底板为非圆石墨增韧环氧^[5]。B-2 隐身轰炸机上采用了 50% 特殊纤维复合材料,而这种结构吸波材料的关键在于研制成功了“隐身”用的特殊 C_f 、“隐身”用的特种 C_f 与传统的 C_f 不同,特种 C_f 的截面不是圆的成腰子形的,而是有棱角的三角形,四方形或多角形截面 C_f ^[7]。Learfan 2100 是用 C_f 制造的小型飞机,碳纤维复合材料是雷达波吸收材料,而且美国考虑使用碳/玻璃纤维和 C_f 蒙皮的隐身战斗机、轰炸机^[8]。F-22 作为美国正在研制的当今世界上最先进的第四代战斗机,具有超音速巡航、隐身和机动敏捷能力,代表着未来战斗机的发展方向,从 YF-22 到 F-22,它们的材料构成有较大变化,前者铝合金、钛合金和复合材料所占比例分别为 32%、27% 和 21%,而后的这类材料比例分别为 16%、39% 和 24%,碳纤维复合材料用于飞机蒙皮壁板、机翼中间梁、机身中间梁、机

宇航材料工艺 2001 年 第 1 期

身隔框、仓门和其他部件^[9]。YF-23 复合材料用量在 30%~50%,除个别部位外,其整个外蒙皮均为 C_f 、玻璃纤维增强的双马来酰亚胺(BMI)吸波材料^[6]。

F-117、B-2 和 F-22 均为全隐身飞机,为了尽快提高飞机的作战和隐身能力,缩短研制周期,节约经费,各国的部分隐身飞机也得到了迅速发展,在部分隐身飞机中, C_f 结构吸波材料得到了广泛应用。采用 C_f 结构吸波材料的部分隐身飞机有法国的“幻影”(Mirage) F-1 战斗机,该机后缘操纵面为蜂窝结构,副翼蒙皮采用 C_f 结构吸波材料;“幻影”(Mirage) 2000 战斗机的垂尾的大部分和方向舵的全部蒙皮用吸波的硼/环氧树脂/碳复合材料制造;法国海军战斗机“阵风”(Rafale)的机翼和两段式全翼展升降副翼用 C_f 复合材料制造,机身采用 50% C_f 复合材料,起落架舱门及发动机舱门为 C_f 复合材料;英、德、意、西班牙四国合作研制的新型 EF2000 的机身大量采用 C_f 复合材料;美国空军轻型战斗机 F-16“战隼”(Fighting Falcon)的机身采用翼身融合技术,尾翼的垂直安定面蒙皮采用 C_f 复合材料,平尾也部分地采用 C_f 复合材料;前苏联战斗机米格-29 的机翼翼尖、襟翼和副翼采用 C_f 蜂窝结构,尾翼的垂尾采用 C_f 复合材料。上述部分隐身飞机所采用的 C_f 及 C_f 复合材料均具有吸收雷达波的性能^[10]。

高性能 C_f 的出现使结构吸波材料真正走向实用化成为可能,但 C_f 抗氧化性差,在空气中难以承受较高的使用温度,因而 C_f 结构吸波材料在使用上受到一定限制。高性能陶瓷纤维的问世,拓宽了结构吸波材料的使用范围。目前,先进复合材料常用的陶瓷纤维有石英纤维、 SiC_f 和 Al_2O_3 纤维,其中石英纤维和 Al_2O_3 纤维为透波材料不适宜制备吸波材料,而 SiC_f 在制备过程中可以通过改变原料组成和制备工艺来调节其电阻率,且电阻率调节范围较大,因而较适合于制备结构吸波材料。日本碳公司已推出了几种牌号的电阻率不同的 SiC_f ^[11,12],见表 1。日本 UBE 工业公司制造的商品牌号为“Tyranno”的 SiC_f 也是一种具有吸波功能的陶瓷纤维,法国 Alcore 塑料公司试制的法国第一架陶瓷纤维复合材料结构的无人驾驶遥控隐身飞机“豺狼”,就大量采用了

“Tyranno” SiC_f^[12]。采用“Tyranno” SiC_f不仅可以提高飞机的隐身性,还可以减少采用复合材料的种类,因而受到了包括美国洛克希德公司在内的许多法国和美国公司的关注。

表1 Nicalon SiC_f的牌号及其微波介电常数^[12]

Tab.1 Microwave permittivity of typical Nicalon fibers at 10 GHz

牌号	电阻率/ Ω·cm	介电常数(10 GHz)
通用级 NL—200	10 ³ ~10 ⁴	9
HVR级 NL—400	10 ⁶ ~10 ⁷	6.5
LVR级 NL—500	0.5~5.0	20~30
碳涂层 NL—607	0.8	12

3 吸波 C_f 的制备及其微波电磁特性

高性能 C_f 的出现真正提供了可替代金属作为主承力构件的结构材料,也迎来了结构吸波材料迅速发展与应用的新时代。高性能 C_f 电阻率较低,约 10⁻² Ω·cm,是雷达波的强反射体,经高温处理的 C_f 的电导率,适合作为吸波材料的导电性反射材料和增强体^[1,13]。只有经过特殊处理的 C_f 才能吸收雷达波^[1,7,13~16],通过调节 C_f 的电阻率可以使其具有吸波功能。1982 年日本专利报道了一种层压平板材料,由 50% C_f 和环氧树脂组成,厚度为 3 mm,密度为 0.7 g/cm³,背面为 1 mm 的金属板,在 8 GHz~12 GHz 范围内,反射衰减大于 15 dB。该技术的关键是采用一种吸波型特种 C_f,在 10 GHz 频率下其介电常数为 (8~12) - j(3~5),即 ε' 为 8~12, ε'' 为 3~5^[4]。有许多方法可以使 C_f 具有吸收雷达波的适宜的电阻率。把 C_f 横截面作成三角形或有棱角的方形,对其进行表面改性,在其表面涂敷含有电磁损耗物质的树脂,沉积一层微小孔穴的碳粉,喷涂镍或经氟化物处理都能大大提高 C_f 的吸波性能^[14]。为了制备吸波性能优异的 C_f 结构吸波材料,就需要研制特殊的吸波型 C_f,制备吸波型 C_f 的工艺主要有以下几种方法。

3.1 降低 C_f 的碳化温度

随碳化温度的升高, C_f 的电导率逐步增大,易形成雷达波的强反射体,但低温处理的 C_f,由于晶化温度低,结构更加疏松散乱,是电磁波的吸收体。

把 500~1000℃ 烧成的聚丙烯腈 C_f 或沥青 C_f (电阻率在半导体范围)与环氧树脂复合,以此作为中间层制备的结构型吸波材料,测得反射衰减大于 20 dB 的频宽是 8 GHz~12 GHz^[13,15]。这种低温烧成的 C_f 与环氧树脂复合后的介电常数可以达到 ε' = 24 - j24 和 ε'' = 15 - j22 (C_f 的体积分数约为 50%),具有非常大的介电损耗。由低温 C_f 的单独织物与树脂组成的复合材料的 ε' = 8~25,用低温 C_f 和玻璃纤维或氧化铝纤维复合织物与树脂组成的复合材料的 ε' = 8~22,用低温 C_f 和通常的 C_f 复合织物与树脂组成的复合材料的 ε' = 25~50^[15],这样在设计 C_f 结构吸波材料时就有更大的选择余地。

3.2 改变 C_f 横截面的形状和大小

改变 C_f 横截面的形状和大小可以精确控制 C_f 的电导率。美国把 C_f 制成有棱角的方形或三角形,这种非圆形横截面 C_f 与 PEEK 等很多树脂的复丝或单丝混杂编织物制成的复合材料,对吸收雷达波非常有效,并能进一步提高 C_f 的韧性和强度。目前,国外结构吸波材料大部分是采用这种有棱角的方形或三角形横截面 C_f 制造的。B-2 战略轰炸机上采用了 50% 特殊 C_f 复合材料,而这种隐身/结构特殊复合材料的关键在于研制成功了“隐身”用的特种 C_f,这种“隐身”用的特种 C_f 改变了纤维的形状和横截面大小,是 B-2 战略轰炸机材料工艺上的重大突破与发展。特种 C_f 与传统 C_f 不同,特种 C_f 的横截面不是圆形的,而是有棱角的三角形、四方形或多边形截面 C_f,用这种非圆形特种 C_f 与玻璃纤维混杂编制成三向织物,这种三向织物就象微波暗室结构一样,有许许多多微小的角锥,具有良好的吸波性能^[7,13,14]。

3.3 对 C_f 进行表面改性

通过表面改性可以使 C_f 具有吸波性能,在 C_f 表面沉积一层有微小孔穴的碳粒或 SiC 薄膜,表面喷涂一层金属镍或把 C_f 表面用氟化物进行处理等,均可改善 C_f 的微波电磁性能,使 C_f 具有一定的吸波性能。C_f 表面沉积一层微小孔穴的碳粒,能有效地提高 C_f 的吸波性能,并能降低 C_f 的热传导性,而且国外结构吸波材料用的 C_f 表面都掺和一层吸波物质(吸波物质可以是 SiC 粉、碳粒、热塑性树脂粉

或其它具有吸波性能的吸剂),美氰胺公司在 C_f 表面喷镀一层金属镍,使 C_f 具有良好的吸波性能,采用 7% 含镍量的 C_f 制成的聚酯复合材料,吸波性能最好^[13,14,16]。文献[16]报道了在含铁氧体损耗介质环氧树脂基体中加入平均长度为 3 mm 的镀镍 C_f (MCF),大大提高了其吸波性能,MCF 在吸波材料中起半波谐振器的作用,在 MCF 近区存在似稳感应场,此感应场激起耗散电流,在铁氧体作用下耗散电流被衰减,从而电磁波能量转换为其他形式的能量,主要为热能。

3.4 对 C_f 进行掺杂改性

C_f 的电阻率很低, SiC_f 的电阻率较高,吸波效果均不佳,将 C、SiC 以不同比例,通过人工设计的方法,控制其电阻率,便可制成耐高温、抗氧化、具有优异力学性能和良好吸波性能的 SiC/C 复合纤维。 SiC/C 复合纤维和接枝酰亚胺基团与环氧树脂共聚改性为基体组成的结构材料,吸波性能都很优异^[12]。欧阳国恩等在各向同性沥青中均匀混入聚碳硅烷,通过熔融纺丝、不熔化处理、烧结准备出 SiC/C_f ,其电阻率为 $10^1 \sim 10^5 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$,而且电阻率可以连续调节,这种纤维与环氧树脂复合制成的复合材料对 8 GHz ~ 12 GHz 的雷达波反射衰减达 10 dB 以上,最大可达 29 dB,是一种吸波性能优良的吸波材料^[17,18]。

3.5 改变 C_f 的原料

改变 C_f 的原料也可以使 C_f 的微波电磁性能发生改变,从而达到吸波的目的,美国潘兴弹道导弹头部玻璃钢的增强体为粘胶基 C_f ^[13]。

4 吸波 SiC_f 的制备及其微波电磁特性

SiC_f 是继 C_f 之后开发的最重要的一种高性能增强纤维, SiC_f 不仅具有高强高模、耐高温、抗氧化、耐化学腐蚀、微波电磁特性可调等特点,而且具有良好的雷达波吸收特性。用 SiC_f 可以制备具有宽频带吸收的结构吸波材料,美国已研制出了 SiC_f 增强的玻璃陶瓷基复合材料,即使在较高温度下该材料也具有非常好的吸波性能^[19]。制备 SiC_f 的常用方法有化学气相沉积法和先驱体转化法,由于化学气相沉积法的成本高,先驱体转化法成为制备 SiC_f 的主要方法。

通常先驱体转化法制备的 SiC_f 是一种典型的 n 型半导体材料,其电阻率为 $10^6 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ 左右^[20,21],是一种典型的透波材料。要使这种 SiC_f 具有良好的吸波性能,必须降低其电阻率或调整其磁导率,提高其电磁损耗。研究表明,当 SiC_f 的电阻率调整为 $10^0 \sim 10^3 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ 时对 X 波段的雷达波具有最佳吸波性能^[17,22]。目前,国内外制备吸波 SiC_f 的方法主要有对 SiC_f 进行高温处理、对 SiC_f 进行表面改性和对 SiC_f 进行掺杂改性。

4.1 对 SiC_f 进行高温处理

Nicalon SiC_f 是用先驱体转化法合成的,是由聚碳硅烷通过纺丝、高温处理制备的,主要由 Si、C、O 组成, Si : O : C = 3 : 1 : 4, C 有一定的过剩^[23,24],在低于 1 200 °C 热处理温度下,纤维中 SiC 为非晶物质,选区电子衍射为非常模糊的晕环, SiO_2 为玻璃态,均匀分布于纤维中, C 以 2 nm 左右的团状物质存在,此外尚有少量 N。Nicalon SiC_f 烧成温度一般为 1 250 °C,这是一种由一些直径 2 nm 左右 - SiC 的微晶和少量游离碳均匀分布于富碳的 Si—C—O 网络中所组成的陶瓷纤维^[25,26]。将这种纤维经 1 400 °C 以上高温处理,网络中析出更多的游离碳粒子,导致纤维电阻率大大降低,介电损耗增加^[21],从而使 SiC_f 对雷达波具有一定的吸收。在这一处理过程中,纤维内部的 O 与 Si、C 等反应生成 CO、SiO 等小分子气体逸出造成纤维失重达 20% ~ 30% (质量分数),会使 SiC_f 力学性能下降。

4.2 对 SiC_f 进行表面改性

对先驱体转化法制备的 SiC_f 进行表面改性,在纤维表面涂敷含损耗介质的树脂或沉积导电层(如碳层、镍层等),降低 SiC_f 的电阻率,提高纤维的电磁损耗和吸波性能。程海峰等通过化学镀方法在 SiC_f 表面镀上一层厚度为 $1 \mu\text{m} \sim 5 \mu\text{m}$ 的镍、钴和铁,调节其微波电磁性能,使 SiC_f 具有吸波性能^[27,28]。用 SiC_f 制备陶瓷基结构吸波材料时有一个突出特征, SiC_f 与玻璃陶瓷基体在热压复合时,纤维与基体之间会发生化学反应生成富碳的界面层,相当于在 SiC_f 表面沉积了一层碳,能有效提高 SiC_f 的吸波性能。法国的 E. Mouchon 和 Ph. Colomban 等人对 SiC_f 表面生成富碳层的情况进行了研究,所用纤维为

Nicalon NLM202 SiC_f , 基体为 Nasicon ($\text{Na}_{2.9}\text{Zr}_2\text{Si}_{1.9}\text{P}_{1.1}\text{O}_{1.2}$), 在热压过程中 SiC_f 表面生成富碳界面层, 使 SiC_f 的电导率增大, 使 $\text{SiC}_f/\text{Nasicon}$ 复合材料具有非常优良的吸波性能以及良好的力学性能和耐高温性能^[29]。表 2 给出 $\text{SiC}_f/\text{Nasicon}$ 复合材料的微波介电常数。

表 2 $\text{SiC}_f/\text{Nasicon}$ 复合材料的微波介电常数 (10 GHz)^[29]

Tab. 2 Microwave permittivity of $\text{SiC}_f/\text{Nasicon}$ composites at 10 GHz^[29]

材料	热压温度 /	热压时间 / min	纤维体积分数 / %	
Nasicon 基体	1 000	30	0	15.3
$\text{SiC}_f/\text{Nasicon}$ 1	1 035	45	44	50
$\text{SiC}_f/\text{Nasicon}$ 2	1 035	45	33	50

4.3 对 SiC_f 进行掺杂改性

常用的先驱体转化法 SiC_f 导电性能较差, 介电损耗低, 是非磁性纤维, $\text{SiC}_f/\text{Nicalon}$ 在 X 波段的微波电磁特性为 $\epsilon = 3 \sim 5$, $\tan \delta = 0 \sim 0.15$, $\mu = 0.98 \sim 1.03$, $\mu = 0 \sim 0.05$ 。通过在 SiC_f 内掺杂一些具有良好导电性或磁性的元素或物相, 可以调节 SiC_f 的复介电常数和磁导率, 提高其电磁损耗和吸波性能。掺杂的方法主要有两种, 一是在先驱体中加入良好导电性或磁性物质 (如沥青和磁性金属微粒)。欧阳国恩等在先驱体聚碳硅烷中均匀混入各项同性沥青制备出 SiC/C 纤维, 与环氧树脂复合制成的材料对 8 GHz ~ 12 GHz 的雷达波反射衰减达 10 dB 以上^[18, 19]。王军等在聚碳硅烷中掺杂 Fe、Co、Ni 等纳米微粉, 制备出具有良好力学性能和吸波性能的 SiC_f , 随纳米金属微粉掺入量的增大, SiC_f 的电磁损耗逐渐增大, 在 10 GHz 频率下, SiC/Fe 纤维的 $\epsilon = 7.12 \sim 24.12$, $\tan \delta = 1.18 \sim 6.22$, $\mu = 1.09 \sim 1.28$, $\mu = 0.09 \sim 0.35$; SiC/Co 纤维的 $\epsilon = 6.37 \sim 14.98$, $\tan \delta = 0.52 \sim 2.85$, $\mu = 1.07 \sim 1.17$, $\mu = 0.05 \sim 0.15$; SiC/Ni 纤维的 $\epsilon = 11.70 \sim 38.32$, $\tan \delta = 1.57 \sim 13.92$, $\mu = 1.10 \sim 1.23$, $\mu = 0.05 \sim 0.18$ ^[30~32]。

另一种是在先驱体中加入有机金属化合物, 在烧成过程中有机金属化合物分解生成金属微粒或金属碳化物, 从而调解 SiC_f 的微波电磁性能, 这种方法

是最为常用的调解 SiC_f 微波电磁性能的方法。Yamamura 等人在先驱体合成过程中, 采用 $\text{Ti}(\text{OR})_4$ 、 $\text{Zr}(\text{OR})_4$ 等有机金属化合物与聚碳硅烷同时热解制得 Ti、Zr 很高含量的聚钛 (锆) 碳硅烷, 制备出 $\text{SiC}/\text{Ti}(\text{Zr})\text{C}_f$, 这种纤维对 8 GHz ~ 12 GHz 的雷达波反射衰减达 15 dB 以上, 最大可达 40 dB^[22]。日本 UBE 工业公司已生产并出售含钛 SiC_f , 商品牌号为“Tyran-no”, 这种纤维可耐 1 200 高温, 电阻率为 $10^0 \sim 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$, 具有良好的吸波性能^[12]。冯春祥等以 $\text{Ti}(\text{OBU})_4$ 与低分子量聚硅烷为原料合成不同钛含量的聚钛碳硅烷, 制备了电阻率不同的 $\text{Si}-\text{Ti}-\text{C}-\text{O}$ 纤维, 这种含钛 SiC_f 的电阻率为 $10^1 \sim 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$, 而且电阻率随 Ti 含量不同可以调节^[33]。宋永才等也开展了含钛 SiC_f 的研制工作, 所制备的陶瓷纤维强度约 1.5 GPa ~ 2.0 GPa, 并具有吸波性能^[34, 35]。

5 结束语

随着航空电子技术的迅速发展, 对材料的吸波性能要求越来越高, 结构吸波材料作为一种多功能复合材料, 经过合理的结构型式设计, 可以满足越来越高的吸波要求, 结构吸波材料成为隐身技术发展的关键, 而吸波 C_f 和 SiC_f 为结构吸波材料的发展奠定了基础。反隐身技术的迅速发展对吸波材料也提出了更高的要求, 例如, 要求吸波材料具备宽频带特性, 即同一种材料对抗多波段电磁波的探测。所以应综合不同方法制备的吸波 C_f 和 SiC_f 的微波电磁特性, 优化设计结构吸波材料的结构型式, 使结构吸波材料满足“薄、轻、宽、强”等性能方面的更高要求。

参考文献

- 1 Stonier R A. Stealth aircraft & technology from word war II to the gulf. SAMPE Journal, 1991; 27(5): 9~18
- 2 赵东林, 周万城. 涂敷型吸波材料及其结构设计. 兵器材料科学与工程, 1998; 21(4): 58~62
- 3 赵东林, 周万城. 结构吸波材料及其结构设计. 兵器材料科学与工程, 1997; 20(6): 53~57
- 4 华宝家, 肖高智, 杨建生. 碳纤维在结构隐身材料中的应用. 宇航材料工艺, 1994; 24(3): 31~34
- 5 曹辉. 结构吸波材料及其应用前景. 宇航材料工艺, 1993; 23(4): 34~37
- 6 李萍, 陈绍杰, 朱珊等. 隐身复合材料的研究和发
宇航材料工艺 2001 年 第 1 期

- 展. 飞机设计, 1994; (1): 29 ~ 34
- 7 赵稼祥. 碳纤维及其复合材料的新进展. 新型碳材料, 1991; 6(3~4): 21 ~ 25
- 8 张常泉. 国外结构吸波材料在巡航导弹上的应用. 宇航材料工艺, 1987; (3): 6 ~ 9
- 9 中国航空信息中心. F-22“猛禽”战斗机专辑. 航空周刊, 1997; (43): 11 ~ 13
- 10 张德文. 飞机隐身技术新进展. 飞机工程, 1996; (2): 28 ~ 32
- 11 Andersson C A, Warren R. Silicon carbide fibers and for use in composite materials. Composites, 1984; 15(1): 16 ~ 22
- 12 王秀春. 国外隐身材料的研究与发展. 隐身技术, 1993; (4): 70 ~ 74
- 13 曾祥云, 马铁军, 李家俊. 吸波材料(RAM)用损耗介质及 RAM 技术发展趋势. 材料导报, 1997; 11(3): 57 ~ 61
- 14 莫美芳. 雷达吸波复合材料和雷达吸波结构(RAS)的研制与发展. 材料工程, 1993; (5): 38 ~ 41
- 15 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: 152
- 16 甘学永. 含谐振子的电磁波功能材料的研究. 北京航空航天大学博士论文, 1992
- 17 欧阳国恩. 碳化硅 - 碳功能纤维. 功能材料, 1994; 25(4): 300 ~ 305
- 18 欧阳国恩, 刘兴慰, 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 ~ 52
- 19 裘镜蓉. 材料隐身技术进展概况. 宇航材料工艺, 1989; 19(4~5): 114 ~ 117
- 20 Muto N, Miyayama M, Yahagida H. Infrared dection by Si - Ti - C - O fibers. J. Am. Ceram. Soc., 1990; 73(2): 443 ~ 445
- 21 Nariswa M, Itoi Y, Okamura K. Electrical resistivity of Si - Ti - C - O fibers after rapid heat treatment. J. Mater. Sci., 1995; 30(10): 3 401 ~ 3 406
- 22 Yamamuna T, Toshikawa T, Shibuya M. Electromagnetic wave absorbing material. USP 5 094 907, 1992 - 02 - 15: 2
- 23 Fareed A S, Fang P, Koczak MJ et al. Thermomechanical properties of SiC yarn. Am. Ceram. Soc. Bull., 1987; 66(2): 353 ~ 358
- 24 Jha A, Moore MD. A study of the interface between silicon carbide fiber and lithium aluminosilicate glass ceramic matrix. Glass Technology, 1992; 33(1): 30 ~ 37
- 25 冯春祥, 谭自烈. 碳化硅纤维研究近况和发展动向. 新型碳材料, 1991; 6(3~4): 78 ~ 88
- 26 Chauveto O, Soto T, and Zuppiroli L. Hopping conduction in a nanometer - size crystalline system: A SiC fiber. Phys. Rev. B, 1992; 46(13): 8 139 ~ 8 146
- 27 程海峰, 陈朝辉, 李永清. 碳化硅纤维表面化学镀改性研究. 功能材料, 1998; 29(增刊): 396 ~ 341
- 28 程海峰, 陈朝辉, 李永清. 碳化硅短切纤维电磁特性改进研究. 宇航材料工艺, 1998; 28(2): 55 ~ 59
- 29 Mouchon E, Colomban Ph. Microwave absorbent: Preparation, mechanical properties and r. f. - microwave conductivity of SiC (and / or mullite) fiber reinforced Nasicon matrix composites. J. Mater. Sci., 1996; 31(2): 323 ~ 332
- 30 王军, 宋永才, 冯春祥. 掺混型碳化硅纤维的研制. 材料工程, 1998; (5): 41 ~ 43
- 31 王军, 宋永才, 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 ~ 622
- 32 王军, 宋永才, 冯春祥. 掺混型碳化硅微波吸收剂的研制. 宇航材料工艺, 1997; 27(4): 61 ~ 64
- 33 冯春祥, 王亦菲, 宋永才, 王应德, 邹治春. 含钛碳化硅纤维的制备及其电性能研究. 功能材料, 1998; 29(增刊): 217 ~ 218
- 34 宋永才, 陆逸, 冯春祥. 含 Ti - 的 SiC 纤维的先驱体的合成. 材料科学进展, 1990; 4(5): 436 ~ 440
- 35 Song Y C, Hasegawa Y, Yang S J et al. Ceramic fibers from polymer precursor containing Si - O - Ti bonds. J. Mater. Sci., 1988; 23(5): 1 911 ~ 1 920

特别启事

从 2001 年 1 月 1 日起, 本刊订刊帐号更改为:

- (1) 外埠信汇至北京市工行东高地分理处 703 所, 帐号 0006509008800374;
- (2) 本市信汇至北京市工行方庄支行东高地分理处 703 所, 帐号 0006509008800374;
- (3) 邮汇(100076) 北京 9200 信箱 73 分箱《宇航材料工艺》编辑部。

未收到订单的读者可来函索取, 联系电话: (010) 68383269, 联系人: 任涛

宇航材料工艺 2001 年 第 1 期

— 9 —