

文章编号: 1000-3851(2002)02-0065-06

# 纳米 Si/C/N 复相粉体的微波吸收特性

赵东林, 周万城

(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

**摘要:** 采用双反应室激光气相合成纳米粉体装置, 以六甲基二硅胺烷( $(Me_3Si)_2NH$ ) ( $Me: CH_3$ ) 为原料合成了纳米 Si/C/N 复相粉体, 粒径为  $20\text{ nm} \sim 30\text{ nm}$ 。研究了纳米 Si/C/N 复相粉体在  $8.2\text{ GHz} \sim 18\text{ GHz}$  的微波吸收特性, 结果表明: 纳米 Si/C/N 复相粉体介电常数的实部( $X$ )和虚部( $X'$ )在  $8.2\text{ GHz} \sim 18\text{ GHz}$  随频率增大而减小, 介电损耗( $\operatorname{tg}\varphi X/X'$ )较高, 是较为理想的微波吸收材料; 纳米 Si/C/N 复相粉体在不同基体中的微波吸收特性出现很大差异。纳米 Si/C/N 复相粉体中的 SiC 微晶固溶了大量的 N 原子, 形成大量带电缺陷, 极化弛豫是吸收微波的主要原因。根据纳米 Si/C/N 复相粉体与石蜡复合体的实测介电参数, 设计出多组在  $8\text{ GHz} \sim 18\text{ GHz}$  范围内微波反射系数  $R < -8\text{ dB}$  的吸波涂层结构。

**关键词:** 纳米 Si/C/N 复相粉体; 微波吸收特性; 微观结构; 界面作用

中图分类号: TB332; TM25 文献标识码: A

## MICROWAVE ABSORBING PROPERTY OF NANO Si/C/N COMPOSITE POWDER

ZHAO Dong-lin, ZHOU Wan-cheng

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The microwave absorbing property of nano Si/C/N composite powder has been studied in the frequency range of  $8.2\text{ GHz} \sim 18\text{ GHz}$ . The nano Si/C/N composite powder with its size in the range of  $20\text{ nm} \sim 30\text{ nm}$  was synthesized from hexamethyldisilazane ( $(Me_3Si)_2NH$ ) ( $Me: CH_3$ ) by a laser-induced gas-phase reaction. The dissipation factors of the nano Si/C/N composite powder were high at the microwave frequencies. The microwave permittivity of the mixtures of nano Si/C/N composite powder and paraffin wax or epoxy resin can be tailored by the content of this composite powder. The unusual  $X$ ,  $X'$  and dissipation factor  $\operatorname{tg}\varphi(X/X')$  of the nano Si/C/N composite powder suspended in different matrixes were attributed to the interface effects between the nano Si/C/N composite powder and matrix. The  $X$  and  $X'$  of the nano Si/C/N composite powder decreased with frequency in the frequency range of  $8.2\text{ GHz} \sim 18\text{ GHz}$ . The difference being that the microwave resonance was not sharply peaked but rather smeared out over a large frequency range. The promising features of nano Si/C/N composite powder would be due to the more complicated Si, C and N atomic chemical environment than in a mixture of pure SiC and  $Si_3N_4$  phase. So charged defects and quasi-free electrons moved in response to the electric field, diffusion or polarization current resulted from the field propagation. The high  $X$  and  $\operatorname{tg}\varphi$  of nano Si/C/N composite powder were due to the dielectric relaxation. The nano Si/C/N composite powder would be a good candidate for microwave absorbing materials. The microwave absorbing coating structure was designed on the basis of measured  $X$  and  $X'$  of the composites composed of nano Si/C/N powders and paraffin wax. Several three-layer microwave absorbing coatings with the reflection coefficient less than  $-8\text{ dB}$  in the frequency range of  $8\text{ GHz} \sim 18\text{ GHz}$  were designed with depth of three millimeters.

**Key words:** nano Si/C/N composite powder; microwave absorbing property; microstructure; interface effect

自从日本大阪大学以新原浩一(K. Niihara)为首的研究组采用纳米 Si/C/N 复相粉体经热压烧结制备的纳米  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$  复合材料, 性能较单体  $\text{Si}_3\text{N}_4$  和 SiC 不仅韧性和高温强度有所提高, 室温强度增加了三倍, 且表现出超塑性能和可切削性能之后<sup>[1, 2]</sup>, 对纳米 Si/C/N 复相粉体的研究受到人们极大的关注。研究者们对纳米 Si/C/N 复相粉体的化学组成、相组成、粒径分布、缺陷、比表面积、晶格常数和微晶的微观结构已经进行了详细研究, 纳米 Si/C/N 复相粉体的合成、烧结和热处理也进行了大量研究<sup>[1~11]</sup>, 但其微波介电特性和微波吸收特性还未见报道, 本文作者对纳米 Si/C/N 复相粉体在不同基体中的微波吸收特性进行了研究。

## 1 实验

### 1.1 纳米 Si/C/N 复相粉体的制备

采用双反应室激光气相合成纳米粉体装置, 以六甲基二硅胺烷( $(\text{Me}_3\text{Si})_2\text{NH}$ ) ( $\text{Me} = \text{CH}_3$ )为原料, 用激光诱导气相反应法合成纳米 Si/C/N 复相粉体。采用双反应室结构主要是为了提高  $\text{CO}_2$  激光的利用率, 提高纳米粉体的产率(单反应室纳米粉体合成装置激光的能量利用率只有 10% 左右, 90% 左右的能量被浪费掉), 具体制备工艺详见文献[12]。纳米 Si/C/N 复相粉体中 N, C, O 元素含量分别用定氮仪(LECO-TN-114), 定氧仪(LECO-RO316), 碳硫分析仪(LECO-CS334)测量, 剩余的量全部按 Si 元素计算。用透射电镜观察纳米粉体的形貌和结构, 用 X 射线分析(XRD)对纳米粉体进行物相分析, 根据 X 衍射图谱中衍射峰宽, 用 Scherrer 公式计算粉体中 U-SiC 晶粒的尺寸, 用 X 射线衍射谱中 U-SiC (311) 晶面的衍射峰计算 U-SiC 的晶格常数, 并用高纯度的 Si(99. 99%) 进行矫正。用高分辨透射电镜(HRTEM)附带的 X 射线能谱分析仪分析微晶的化学组成。

### 1.2 微波介电常数的测量

用波导法对纳米 Si/C/N 复相粉体在 8. 2 GHz ~ 18 GHz 频率范围的介电常数进行了测量, 把截面积为  $(10. 16 \times 22. 86) \text{ mm}^2$  (用于测量 8. 2 GHz ~ 12. 4 GHz 的电磁参数) 和  $(7. 90 \times 15. 80) \text{ mm}^2$  (用于测量 12. 4 GHz ~ 18 GHz 的电磁参数) 的待测试样分别放入具有同样截面尺寸的波导中, 测试反射和透射系数, 用 HB8510B 网络分析仪计算试样的介电常数和磁导率。纳米 Si/C/N 复相粉体在石蜡基

体中介电常数测试样品的制备过程如下: 把纳米 Si/C/N 复相粉体均匀分散在熔化的石蜡中, 然后把处于液态的石蜡和纳米粉体的混合物浇注到铜质标准法兰( $(10. 16 \times 22. 86 \times 2) \text{ mm}^3$  和  $(7. 90 \times 15. 80 \times 2) \text{ mm}^3$ ) 中, 连同法兰一起测试纳米 Si/C/N 复相粉体与石蜡复合体的介电常数, 以消除由试样与法兰之间的缝隙产生的测试误差。纳米 Si/C/N 复相粉体在环氧树脂基体中介电常数测试样品取自二者组成的吸波涂层材料。石蜡、环氧树脂和纳米 Si/C/N 复相粉体属于电介质材料,  $\epsilon_r = 1$ ,  $\mu_r = 0$ 。

### 1.3 微波反射系数的测量

首先将纳米 Si/C/N 复相粉体润湿, 润湿剂由二甲苯和正丁醇组成, 二者的配比为 7:3, 然后加入环氧 601 树脂, 均匀搅拌, 使纳米粉体与环氧 601 树脂胶粘润湿; 搅拌均匀后, 再加入固化剂, 固化剂为聚酰胺, 制成吸波涂料, 环氧树脂和聚酰胺的配比为 100:35。然后把吸波涂料涂覆于  $(180 \times 180) \text{ mm}^2$  铝板上, 固化后测试其在 8 GHz ~ 18 GHz 的反射率曲线。采用 RCS 空间反射法测试, 吸波材料对微波的反射系数以分贝(dB)数为单位给出。

## 2 结果和讨论

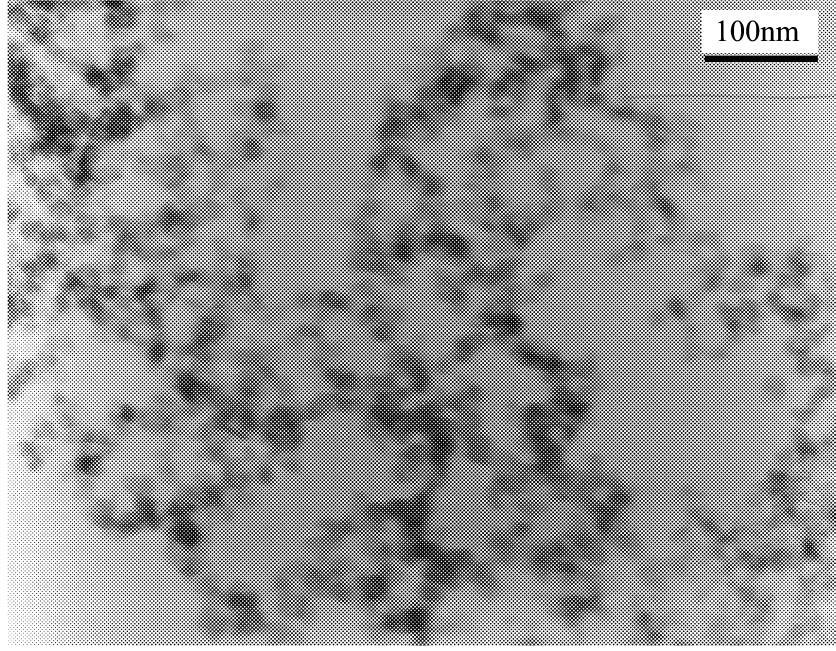


图 1 纳米 Si/C/N 复相粉体的透射电镜照片

Fig. 1 TEM photomicrograph of the nano Si/C/N composite powders

图 1 为纳米 Si/C/N 复相粉体的透射电镜照片, 图 2 为 XRD 图谱。从图中可以看出, 纳米粉体呈球形, 无严重团聚, 粒径为 20 nm ~ 30 nm。纳米 Si/C/N 复相粉体的 XRD 谱上只出现了 U-SiC, T-SiC 和石墨的衍射峰, 没有出现  $\text{Si}_3\text{N}_4$  的衍射峰, 根据 Scherrer 公式计算的 U-SiC 的晶粒尺寸为 5. 9 nm,

根据 USiC(311) 晶面衍射峰计算的 USiC 的晶格常数为 4.324, 纳米 Si/C/N 复相粉体化学组成为 Si 54.5wt%, C 26.4wt%, N 10.1wt%, O 9.0wt%。

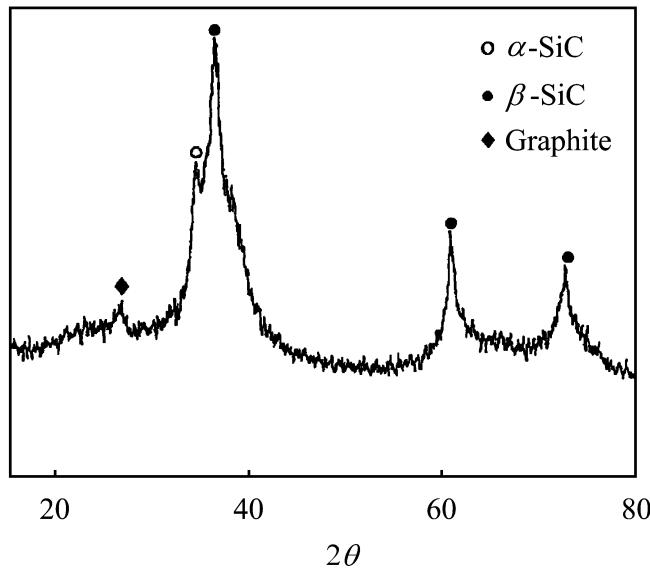


图 2 纳米 Si/C/N 复相粉体的 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of the nano Si/C/N composite powders

微波与凝聚态物质之间的作用可以用复介电常数  $X^*$  ( $X^* = X + iX$ ,  $X$  为复介电常数的实部,  $X$  为虚部) 和复电导率  $\epsilon^*$  来描述, 复电导率的实部  $\epsilon(k)$  与复介电常数虚部  $X(k)$  之间的关系为  $\epsilon(k) = k X(k)$ ,  $k$  为电磁波的角频率<sup>[13~15]</sup>。

由于 Si/C/N 复相粉体为纳米态, 比表面积非常大, 很难压实, 所以无法准确测量纯纳米 Si/C/N 复相粉体的微波介电常数。在实际应用过程中, 微波纳米粉体将与不同的基体进行复合, 制成吸波材料。本文作者对纳米 Si/C/N 复相粉体在石蜡和环氧树脂基体中的介电特性和吸波性能进行了对比研究, 在 8.2 GHz ~ 18 GHz 所用石蜡的介电常数为  $X=2.26$ ,  $X=0$ , 环氧 601 树脂和固化剂聚酰胺固化后的介电常数为  $X=2.56$ ,  $X=0$ 。

图 3 描述了纳米 Si/C/N 复相粉体与石蜡和环氧树脂复合体(纳米粉体在两种基体中的体积分数均为  $v=0.029$ )的  $X$ ,  $X$  以及  $\text{tg}W$  随频率的变化曲线, 纳米复相粉体在石蜡基体中的重量掺入比为 7.4 wt%, 在环氧树脂中的重量掺入比为 6 wt%。从图中可以看出, 当纳米粉体在两种基体中的体积分数相同时, 纳米粉体与石蜡复合体的  $X$ ,  $X$  和  $\text{tg}W$  明显高于与环氧树脂复合材料的  $X$ ,  $X$  和  $\text{tg}W$

仅就基体而言, 环氧树脂的  $X$  比石蜡的大, 按照 Maxwell Garnet 和 Bruggeman 有效媒质理论公式<sup>[16, 17]</sup>, 同一种纳米 Si/C/N 复相粉体以相同的体积分数与上述两种基体混合时, 与环氧树脂复合体的  $X$  应大于与石蜡复合体的  $X$ , 但测试结果却得出

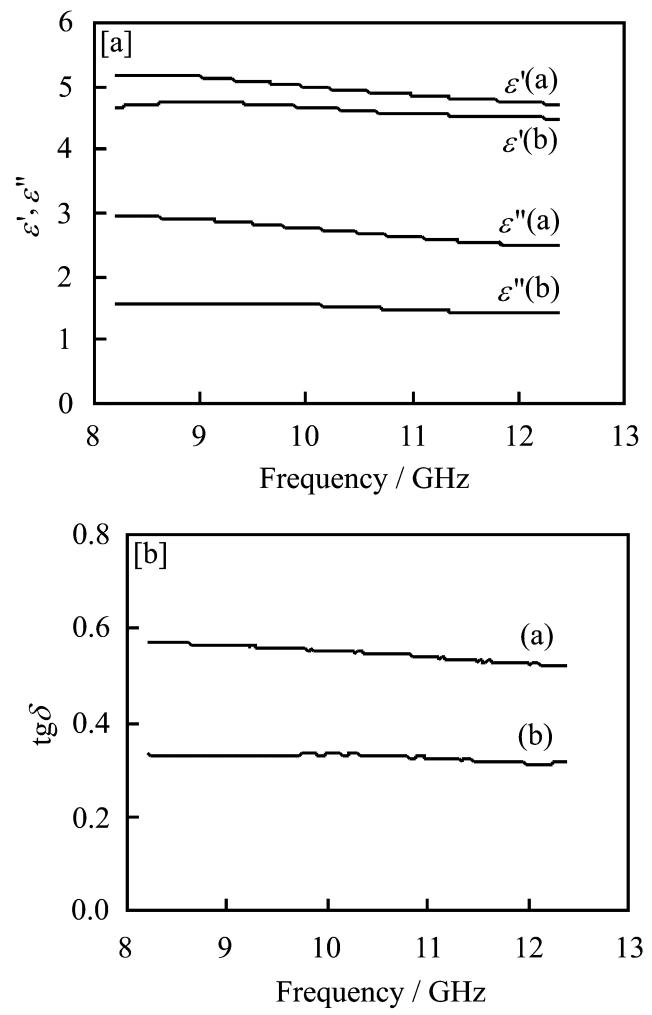


图 3 纳米 Si/C/N 复相粉体与不同基体组成的复合材料的  $X$ ,  $X$  和  $\text{tg}W$

(a) 石蜡基体( $v=0.029$ ); (b) 环氧树脂基体( $v=0.029$ )

Fig. 3 The  $X$ ,  $X$  and  $\text{tg}W$  of composites composed of nano Si/C/N composite powder and different matrixes

(a) Paraffin wax matrix ( $v=0.029$ );

(b) Epoxy resin matrix ( $v=0.029$ )

相反的结论。这主要是因为纳米粉体处于纳米态, 比表面积大, 表面原子比例高, 悬挂键多, 在与基体复合过程中, 不同的基体和纳米粉体发生不同的界面作用, 以不同方式改变纳米粉体颗粒表面原子的结合状态和颗粒表面的缺陷, 从而影响复合体的介电常数( $X$  和  $X$ ), 这也就使得有效媒质理论不适合于纳米 Si/C/N 复相粉体。环氧树脂与纳米 Si/C/N 复相粉体之间的界面作用使复合体的  $X$  和  $X$  明显降低, 尤其是使复合体对电磁波的损耗因子  $X$  和  $\text{tg}W$  显著减小, 这对微波吸收材料的吸波性能极为不利。

基体对纳米 Si/C/N 复相粉体的微波吸收性能也有非常大的影响, 图 4 给出了分别以环氧树脂和石蜡为基体的吸波涂层的 R-f 曲线。图 4 中曲线 b 为纳米 Si/C/N 复相粉体与环氧树脂吸波涂层的实测 R-f 曲线, 曲线 a 为根据纳米 Si/C/N 复相粉体与环氧树脂吸波涂层介电常数实测值(图 3 中的曲线 b)计算的 R-f 曲线, 曲线 c 为根据纳米粉体与石蜡复合体的介电常数实测值(图 3 中的曲线 a)计算

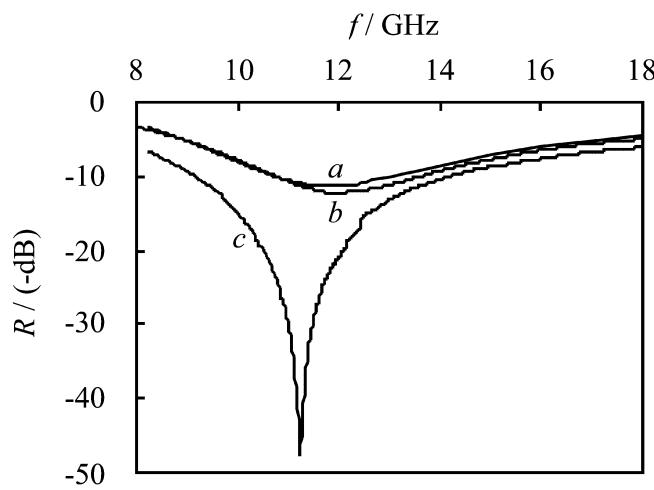


图 4 纳米 Si/C/N 复相粉体在不同基体中的 R-f 曲线

a——纳米粉体在环氧树脂中的计算值；

b——纳米粉体在环氧树脂中的实测值；c——纳米粉体在石蜡中的计算值(体积分数相同  $v = 0.029$ , 涂层厚度为 3.0mm)

Fig. 4 R-f curves of composites composed of nano Si/C/N composite powder and different matrixes with the same nano powder volume filling factor ( $v = 0.029$ ) and depth ( $d = 3.0$  mm)

a——in epoxy resin matrix (calculated value);  
b——in epoxy resin matrix (measured value);  
c——in paraffin wax matrix (calculated value)

的 R-f 曲线, 计算公式采用文献 [18] 中的计算公式, 纳米 Si/C/N 复相粉体在两种基体中的体积分数  $v$  均为 0.029, 涂层厚度为 3.0 mm。纳米 Si/C/N 复相粉体与环氧树脂和石蜡吸波涂层的面密度分别为  $2.94 \text{ kg/m}^2$  和  $2.53 \text{ kg/m}^2$ 。可见, 纳米 Si/C/N 复相粉体与环氧树脂吸波涂层的实测 R-f 曲线(曲线 b)与根据其介电常数实测值计算的 R-f 曲线(曲线 a)基本一致, 实测的微波吸收性能略高于计算值, 计算值与实测值的最大误差不超过 5 %, 说明文献 [18] 中的反射系数计算公式适用于这类含纳米 Si/C/N 复相粉体的复合材料。在  $8.2 \text{ GHz} \sim 18 \text{ GHz}$  所用石蜡的介电常数为  $X = 2.26$ ,  $X = 0$ , 环氧 601 树脂和固化剂聚酰胺固化后的介电常数为  $X = 2.56$ ,  $X = 0$ , 二者在  $8 \text{ GHz} \sim 18 \text{ GHz}$  反射率实测结果表明它们的反射率均为 0, 对微波不吸收。当纳米 Si/C/N 复相粉体的体积分数相同( $v = 0.029$ )时, 与石蜡复合体的吸波性能(曲线 c)比与环氧树脂复合体(曲线 a 和曲线 b)要好, 说明环氧树脂使复合体的吸波性能降低。

另外根据纳米 Si/C/N 复相粉体在石蜡和环氧树脂中重量掺入比相同(均为 15 wt%)时的介电常数实测值, 计算了吸波涂层厚度为 2.8 mm 时的 R-f 曲线(图 5), 纳米粉体的重量掺入比相同, 均为 15 wt%, 涂层厚度为 2.8 mm。图 5 表明, 当纳米粉体在石蜡和环氧树脂中的重量掺入比相同时, 而且纳

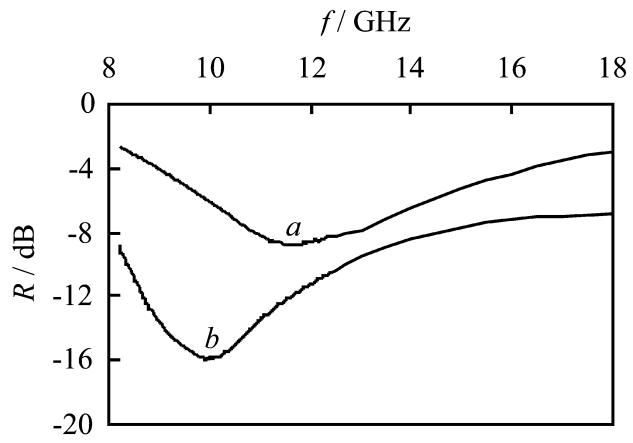


图 5 纳米 Si/C/N 复相粉体在不同基体中的 R-f 曲线

a——纳米粉体在环氧树脂中(体积分数  $v = 0.076$ );b——纳米粉体在石蜡中(体积分数  $v = 0.063$ )

Fig. 5 R-f curves of composites composed of nano Si/C/N composite powder and different matrixes with the same nano powder content (15wt%) and depth ( $d = 2.8\text{mm}$ )

a——in epoxy resin matrix ( $v = 0.076$ );b——in paraffin wax matrix ( $v = 0.063$ )

米粉体在石蜡中的体积分数(0.063)比纳米粉体在环氧树脂中的体积分数(0.076)小的情况下, 纳米粉体与环氧树脂复合体的吸波性能仍明显低于与石蜡复合体的吸波性能, 再次说明环氧树脂使纳米 Si/C/N 复相粉体的吸波性能显著降低。

综上所述, 不同基体对纳米 Si/C/N 复相粉体的介电性能和吸波性能有非常大的影响。纳米粉体与环氧树脂复合体的介电常数值明显低于与石蜡复合体的介电常数值, 而环氧树脂的  $X$  比石蜡的  $X$  还略高, 说明纳米 Si/C/N 复相粉体与基体在复合过程中的界面作用对吸波材料的介电性能和吸波性能产生了很大的影响。纳米 Si/C/N 复相粉体中的 SiC 微晶固溶了大量的 N 原子, N 原子有以下几种存在形式<sup>[11]</sup>: 一种是在晶格结构中 N 原子与四个 Si 原子键联( $\text{SiC}_{3/4}\text{N}_{1/4}$ ); 另一种是三价 N 原子与三个 Si 原子键联( $\text{SiC}_{3/4}\text{N}_{1/3}$ ), 由于这种结构会使 SiC 晶格发生扭曲, 所以这种结构存在于 SiC 微晶的晶界上; 再一种可能形式是一个带正电的 N 原子和四个 Si 原子键联( $\text{N}(\text{Si})_4$ ), 与带负电的缺陷如  $\text{Si}(\text{C})_3$  或  $\text{C}(\text{Si})_3$  配对, 这样在纳米 Si/C/N 复相粉体的表面就形成大量的未成对的电子, 构成悬挂键, 在与不同基体复合成复合材料时, 界面作用将非常明显。不同基体由于结构的不同界面作用也有很大差异。环氧树脂与纳米 Si/C/N 复相粉体之间的界面作用使复合材料的介电常数明显降低, 尤其是使复合材料对微波的损耗因子  $X$  和  $\text{tg}\delta$  显著减小, 这使复合材料的吸波性能显著降低。表明树脂体系对纳米 Si/C/N 复相粉体的吸波性能有显著影响。

C/N 复相粉体的吸波性能有非常大的影响, 树脂对纳米粉体介电参数及吸波性能的影响是不容忽视的, 树脂基体与纳米 Si/C/N 复相粉体之间的界面作用是导致复合材料吸波性能显著降低的主要原因。

根据不同含量的纳米 Si/C/N 复相粉体与石蜡复合体的实测电磁参数, 对吸波涂层进行了优化设计, 优化设计采用爬山法, 涂层厚度限定为 3 mm, 层数限定为 3 层。优化设计的结果表明, 在 8 GHz~18 GHz 反射系数 R 小于 -8 dB 的涂层结构有多组, 图 6 为其中六组的 R-f 曲线。本文作者给出其中一组涂层(图 6 中箭头所指)结构的构成, 该组各层的介电常数随频率的变化曲线如图 7 所示。各层的组成为分别为第一层 30 wt% 纳米粉体和 70 wt% 石蜡, 第二层 5 wt% 纳米粉体和 95 wt% 石蜡, 第三层 10 wt% 纳米粉体和 90 wt% 石蜡。各层的厚度分别为第一层 1 mm, 第二层 0.7 mm, 第三层 1.3 mm。涂层的面密度为 2.65 kg/m<sup>2</sup>。

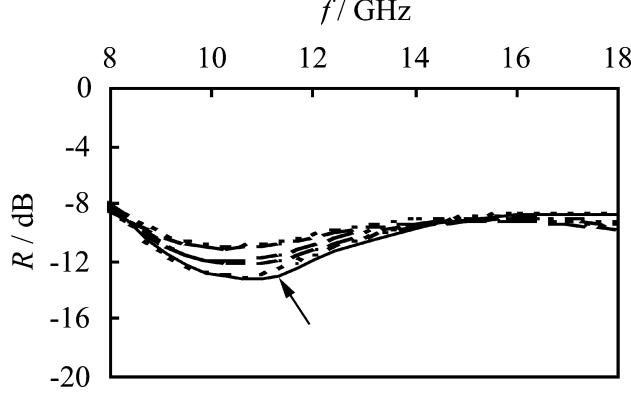


图 6 涂层厚度限定为 3 mm 设计的三层吸波材料的 R-f 曲线

Fig. 6 R-f curve of three-layer microwave absorbing material designed with depth of three millimeters

纳米 Si/C/N 复相粉体的 XRD 谱上只出现了 U-SiC, T-SiC 和石墨的衍射峰, 没有出现 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 的衍射峰, 但纳米 Si/C/N 复相粉体化学组成表明, 其 N 含量为 10.1 wt%, 而且 HRTEM 附带的 X 射线能谱分析仪对 SiC 微晶的成分分析结果表明, 在纳米 Si/C/N 粉体中, SiC 微晶的化学组成为 Si 54.86 wt%, C 33.58 wt%, N 9.53 wt%, O 2.03 wt%, 所以纳米 Si/C/N 复相粉体中的 SiC 纳米微晶中固溶了大量的 N 原子。N 原子在 SiC 中以固溶体的形式存在, N 原子取代 C 原子的位置<sup>[10, 11]</sup>, 在固溶了 N 原子的 SiC 微晶中, 在晶格结构中 N 原子取代 C 原子的位置与四个 Si 原子键联(SiC<sub>3/4</sub>N<sub>1/4</sub>), 在这种情况下, 由于 N 原子和 C 原子化合价的不同, Si 原子剩余一个未成对的电子, N 原子成为未成对电子的

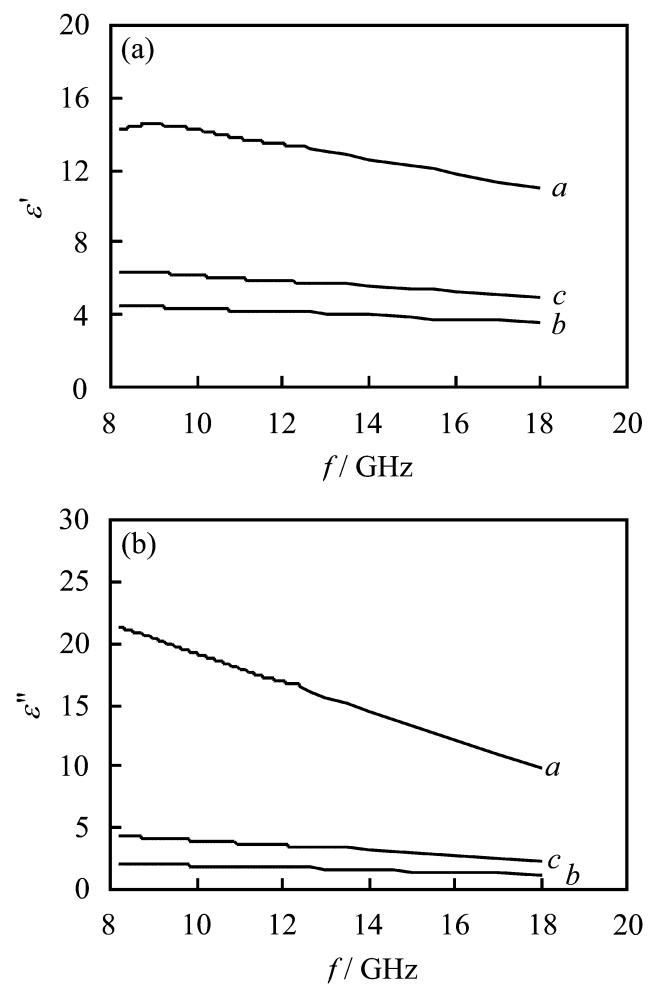


图 7 涂层厚度限定为 3 mm 设计的三层吸波材料中各层的 X 和 X'

Fig. 7 The X and X' of per layer in the three-layer microwave absorbing material designed with depth of three millimeters  
a—first layer; b—second layer; c—third layer

顺磁中心, 形成负的带电缺陷。由于 N 原子在 SiC 晶格中的位置是固定的, 这个未成对电子也是定域束缚的, 在微波交变电场的作用下, 未成对电子产生极化作用。由于未成对电子是定域束缚的, 电子极化要越过一定的势垒, 这样电子极化逐渐落后于微波电场变化, 出现极化驰豫, 所以极化驰豫是纳米 Si/C/N 复相粉体损耗电磁波的主要原因, 从而把微波能量转化为其它形式的能量, 主要为热能。

### 3 结 论

(1) 用双反应室激光气相合成纳米粉体装置, 制备出了粒径为 20 nm~30 nm 的纳米 Si/C/N 复相粉体, 纳米 Si/C/N 复相粉体在微波段的介电损耗较大, 介电常数的实部(X)和虚部(X')在 8.2 GHz~18 GHz 随频率的增大而减小, 是较为理想的微波吸收材料。纳米 Si/C/N 复相粉体与不同基体之间的界面作用使其吸波性能出现很大差异。

(2) 纳米 Si/C/N 复相粉体中的纳米 SiC 微晶固溶了大量的 N 原子, 在纳米 Si/C/N 复相粉体中形成大量的带电缺陷, 在电磁场作用下形成极化耗

散电流, 极化弛豫是吸收电磁波的主要原因。

(3) 根据纳米 Si/C/N 复相粉体与石蜡复合体的实测电磁参数, 设计出多组在 8 GHz ~ 18 GHz 微波反射系数 R - 8dB 的吸波涂层结构。

### 参考文献:

- [1] Niihara K, Izakik K, Kawakami N. Hot-pressed  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -32% nanocomposite from amorphous Si-C-N powder with improved strength above 1200 [J]. *J Mater Sci Lett*, 1990, 10(2): 112- 116.
- [2] Wakai F, Kodama Y, Sakaguchi S, et al. A superplastic covalent crystal composite [J]. *Nature*, 1990, 344(1): 421- 423.
- [3] Chen I, Xue L A. Development of superplastic structural ceramics [J]. *J Am Ceram*, 1990, 73(11): 2585- 2591.
- [4] Cauchetier M, Croix O, Luce M, et al. Nanometric Si/C/N composite powders: laser synthesis and IR characterization [J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 1991, 8(1): 215- 218.
- [5] Bahloul D, Pereira M, Goursat P. Preparation of silicon carbonitrides from an organosilicon polymer: — thermal behavior at high temperature under argon [J]. *J Am Ceram Soc*, 1993, 76(5): 1163- 1171.
- [6] Bendeddouche A, Berjoan R, Beche E, et al. Structural characterization of amorphous  $\text{SiC}_x\text{N}_y$  chemical vapor deposited coatings [J]. *J Appl Phys*, 1997, 81(9): 6147- 6156.
- [7] Li X, Chiba A, Nakata Y, et al. Characterization of ultrafine  $\text{SiC}$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  composite powder after heat-treatment in  $\text{Ar} + \text{N}_2$  [J]. *Materials Science and Engineering A*, 1996, 219(1): 95- 102.
- [8] Dong S, Jiang D, Tan S, et al. Preparation and characterization of nano-structured monolithic  $\text{SiC}$  and  $\text{Si}_3\text{N}_4$ / $\text{SiC}$  composite by hot isostatic pressing [J]. *J Mater Sci Lett*, 1997, 16(10): 1080- 1083.
- [9] Li Y, Liang Y, Zheng F, et al. Laser synthesis of ultrafine  $\text{Si}_3\text{N}_4$ - $\text{SiC}$  powders from hexamethyldisilazane [J]. *Materials Science and Engineering A*, 1994, 174(1): L23- L25.
- [10] Suzuki M, Maniette Y, Nakata Y, et al. Synthesis of silicon carbide-silicon nitride composite ultrafine particles using a carbon dioxide laser [J]. *J Am Ceram Soc*, 1993, 76(10): 1195- 1202.
- [11] Suzuki M, Hasegawa Y, Aizawa M, et al. Characterization of silicon carbide-silicon nitride composite ultrafine particles synthesized using a  $\text{CO}_2$  laser by silicon-29 magic angle spinning NMR and ESR [J]. *J Am Ceram Soc*, 1995, 78(1): 83- 91.
- [12] Zhao D L, Zhou W C. Laser synthesis of nanometric Si/C/N composite powders from hexamethyldisilazane and microstructure characterization [A]. In: Yan D S, Guan Z D, eds. *Proceedings of the First China International Conference on High-Performance Ceramics* [C]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. 138.
- [13] Jonscher A K. *Dielectric Relaxation in Solids* [M]. London: Chelsea Dielectric Press, 1983. 138.
- [14] Debye P. *Polar Molecules* [M]. New York: Dover, 1945. 257.
- [15] Mouchon E, Colombe Ph. Microwave absorber: preparation, mechanical properties and rf-microwave conductivity of  $\text{SiC}$  (and/or mullite) fiber reinforced Nasicon matrix composites [J]. *J Mater Sci*, 1996, 31(2): 323- 331.
- [16] Garnett J C M. Colours in metal glasses in metallic films [J]. *Philosophical Transaction of The Royal Society of London*, 1904, 203(2): 385- 391.
- [17] Sihvola A H, Kong J A. Effective permittivity of dielectric mixture [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1988, 26(4): 420- 427.
- [18] 梁兵. 结构型吸波材料研究 [J]. *航空材料学报*, 1993, 13(4): 34- 39.