

# 新型高热导率氮化铝基微波衰减陶瓷研究

张永清, 阴生毅, 高向阳, 李秀霞, 金鹤, 张连正

(中国科学院电子学研究所 高功率微波源与技术重点实验室, 北京 101407)

**摘要:** 针对传统氧化铍基微波损耗陶瓷存在毒性大、一致性差和焊接难度大的问题, 发展了一种高热导率氮化铝基的 AlN-FeSiAl 微波衰减陶瓷。该材料在 AlN 基体中添加 FeSiAl, 属环境友好型材料。为获得高热导率和良好的电磁性能, 开展了不同氮化铝粉末、不同 FeSiAl 粉末添加量以及烧结工艺对复合材料性能影响的研究。结果表明, 采用日本东洋氧化铝粉末、添加 10% (质量分数, 下同) 的 FeSiAl, 在 1650 °C 和 85 MPa 下进行真空热压烧结, 获得了衰减性能优异的微波衰减陶瓷, 且材料热导率达到 88.2 W/m·K, 接近美国 Ceradyne 公司 AlN 基微波衰减陶瓷的热导率水平。

**关键词:** 微波; 衰减陶瓷; AlN; FeSiAl; 真空热压烧结

中图分类号: TQ174.75<sup>+</sup>8.12

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)02-0655-06

回旋管放大器, 作为一种新型毫米波相干辐射源, 具有在毫米波段产生高峰值功率和高平均功率能力, 已成为下一代高功率毫米波雷达发射机功率源的理想候选者<sup>[1]</sup>。对于工作在 Ka 波段的回旋行波管放大器, 其相互作用都是通过衰减陶瓷介质加载的方式来抑制振荡的。行波管作为一种宽频带高增益器件, 容易引起自激振荡, 破坏其正常工作。有效抑制自激振荡, 提高稳定性, 是回旋行波管的核心问题, 具有重要的理论意义和实际工程价值<sup>[2,3]</sup>。基于分布损耗加载的相互作用电路结构能够抑制行波管的自激励振荡, 且保证系统具有高增益和宽频带特性。分布损耗电路的实现方式较多, 选用衰减陶瓷构建分布损耗电路衰减特性稳定, 满足抑制自激励振荡的要求<sup>[4-6]</sup>。衰减陶瓷能够通过调节工作模式传输特性达到提升相互作用系统带宽特性的作用。

当回旋行波管放大器工作时, 衰减陶瓷会吸收高频功率, 转化成为热能。因此相互作用系统在高平均功率工作条件下, 衰减陶瓷必须具备高热导率, 及时将相互作用系统的热量耗散出去, 防止系统过热、出气和破坏真空系统。因此性能稳定、热导率高的衰减陶瓷对发展高性能回旋行波管至关重要。目前, 中国研制的高性能回旋管, 普遍采用氧化铍基微波损耗陶瓷, 这种复合陶瓷具有热导率高、成本相对较低的特点, 但是, 该材料同时存在毒性大、一致性差和焊接要求特殊等问题。为了避免氧化铍基陶瓷制备过程中有毒的问题, 材料工作者开展了很多替代氧化铍基陶瓷的研究工作。美

国 Ceradyne 公司研制出了 AlN 基微波衰减复合陶瓷, 该陶瓷的热导率达到了 90~105 W/m·K, 代表了目前国际上环境友好型微波衰减陶瓷的最高水平<sup>[7]</sup>。

在氮化铝基体中引入导电或半导体的第二相, 可以充分发挥氮化铝的高导热性能和第二相对微波吸收衰减的能力<sup>[8-10]</sup>。一般情况下, 引入第二相如 TiO<sub>2</sub>、SiC、钼和钨<sup>[11-15]</sup>均可提高材料的微波衰减能力, 但是复相材料的热导率都大幅低于氮化铝, 其含量增加会使氮化铝基复相材料的热导率急剧下降。因此, 在制备微波损耗陶瓷时, 希望引入的第二相, 其吸波能力应尽可能强, 以更好发挥氮化铝高热导率的优势。基于这一考虑, 本研究提出在氮化铝基损耗陶瓷设计时, 引入一种特殊的强微波吸收剂—FeSiAl 微粉, 通过有效复合, 研制出一种兼具高热导率和高微波吸收性能的微波损耗陶瓷。

引入 FeSiAl 微粉, 主要考虑有三方面: 一是 FeSiAl 材料微波吸收性能优异, 添加少量即可使复合陶瓷获得良好的吸波性能; 二是 FeSiAl 材料在 1400~1450 °C 之间处于熔融状态, 烧结温度超过此范围即可使 FeSiAl 材料完全处于熔融状态; 三是 FeSiAl 材料和基体 AlN 材料都含有 Al 元素, 二者在一定温度下容易形成接触和润湿, 有利于改善两相材料之间的结合。

本工作对新型高热导率氮化铝基微波衰减陶瓷展开了研究, 包括不同氮化铝粉末、FeSiAl 添加量和不同烧结工艺对复合材料热导率的影响, 并给出了相应的热导率及电磁参数。

收稿日期: 2019-02-17

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB1105200); 中国科学院国防科技创新基金 (CXJJ-15S123)

作者简介: 张永清, 女, 1965 生, 博士, 研究员, 中国科学院电子学研究所, 北京 101407, 电话: 010-56535229, E-mail: zyq\_313@163.com

# 1 实验

实验主要采用了 2 种材料，一是 AlN 粉末，二是 FeSiAl 粉体。AlN 粉末有 2 种粒度，AlN-1 为日本东洋氮化铝粉末，其标称粒度为 1.2 μm，AlN-2 为中国产氮化铝粉末，标称粒度（粒径）为 500 nm；FeSiAl 粉体由中国科学院电子学研究所自行研制，成分为 Fe 85%-Si 9.6%-Al 5.4%（质量分数），颗粒尺寸为 1~37 μm。

按一定配比将 AlN 粉末和 FeSiAl 粉体装入盛有玛瑙磨球的玛瑙球磨罐中，在行星式球磨机中混料 1 h。将混合料装入石墨模具内，置于 VHP300/50-2000 真空热压炉中，在  $5 \times 10^{-3}$  Pa 真空度、56~85 MPa 压力、1600~1650 °C 并保温 30 min 的工艺条件下，制备 AlN-FeSiAl 复合衰减材料。

材料制备完成后，依次对其密度、热扩散系数、比热容、电磁参数和显微结构等进行测试及分析。

采用阿基米德排水法测定试样的密度，用 LFA427 型激光导热仪测试试样的热扩散系数，用 PPMS-9T 型物理性能测试系统测试样品的比热容。用于密度、热扩散系数测试的试样尺寸为  $\Phi 10$  mm × 1 mm，用于比热容测试的试样尺寸为 8 mm × 1 mm × 1 mm。

采用美国 Agilent8722ES 型矢量网络分析仪和材料电磁参数测试系统测定材料的电磁参数，微波 Ka 波段（26.5~40 GHz）试样尺寸为 7.12 mm × 3.56 mm × 1 mm。

利用 JSM-6510 型扫描电子显微镜分析不同材料和试样的成分及显微结构。

## 2 结果与讨论

### 2.1 氮化铝粉末状态对 AlN 基衰减陶瓷热导率的影响

首先对中国产氮化铝粉末 AlN-2 和日本东洋氮化铝粉末 AlN-1 的粒度分布、含氧量以及热压 AlN-FeSiAl 材料的致密度和热导率进行了比较。

#### 2.1.1 氮化铝粉末的微观分析

采用扫描电镜对 AlN 粉微粉材料进行了分析，图 1 和图 2 依次给出了中国产氮化铝粉末 AlN-2 和日本东洋氮化铝粉末 AlN-1 的电镜照片。表 1 给出了 2 种 AlN 粉末的能谱分析结果。

比较图 1 和图 2 看出，中国产氮化铝粉末 AlN-2 和日本东洋氮化铝粉末 AlN-1 存在明显差别：中国产氮化铝微粉粒度分布极不均匀，标称粒度（粒径）为 500 nm 的氮化铝粉，仅表示氮化铝粉中较多的粒径在 500 nm 附近，实际上，还含有 20%~35% 粒径为 1~2 μm 的颗粒和 10%~20% 粒径为 5 μm 左右的颗粒；相比之下，日本氮化铝 AlN-1 微粉粒度分布非常均匀，多数

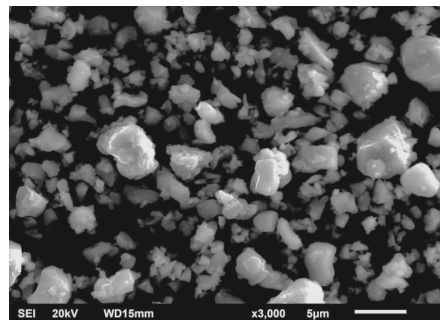


图 1 中国产氮化铝粉

Fig.1 SEM image of AlN powder made in China (500 nm)

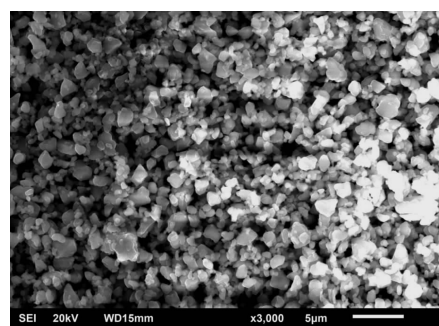


图 2 日本东洋未造粒氮化铝粉

Fig.2 SEM image of Toyo AlN powder (1.2 μm)

表 1 2 种 AlN 粉末 EDS 能谱分析结果  
Table 1 EDS results of two kinds of AlN micro powder (ω/%)

AlN powder	N	O	Al
China AlN-2	26.31	2.30	71.39
Japan AlN-1	33.34	1.07	65.58

颗粒的粒径在 1 μm 附近。

从表 1 能谱分析结果可知，中国产 AlN 微粉颗粒表面的典型含氧量为 2.30%，日本 AlN 粉体的典型含氧量为 1.07%。前者的含氧量是后者的 2.3 倍。

由文献[16]知，从提高热导率出发，必须以纯度高、杂质含量少及烧结活性好的 AlN 粉体为原料，AlN 粉体中的氧杂质会严重降低热导率，而粉体粒度、粒径分布以及粉体烧结活性对成型和烧结有重要影响。为了制备高热导率 AlN 陶瓷，一般要求 AlN 粉体的含氧量控制在 1%。通常亚微米级陶瓷粉体烧结活性较高，容易得到高密度的陶瓷。所以要求粒径小于 1 μm，且颗粒大小均匀一致。

虽然存在上述中国产氮化铝粉的不利因素，但考虑到中国产粉含有纳米粉体，可能对烧结和提高热导

率有帮助, 另外价格相对较低, 因此仍将其作为重要材料选项。

### 2.1.2 不同氮化铝粉末对材料密度和热导率的影响

为选出适宜的氮化铝粉末, 采用 AIN-2 和 AIN-1 制备了 AIN-10%FeSiAl 复合陶瓷, 并对陶瓷的密度和热导率进行了比较。烧结工艺条件为: 真空度  $5 \times 10^{-3}$  Pa、烧结温度 1620 °C/保温时间 30 min、压力 85 MPa。

表 2 为 2 种复合陶瓷的密度和热导率。由表 2 看出, 采用中国产氮化铝粉制备的样品, 密度为  $3.18 \text{ g/cm}^3$ ; 采用日本东洋氮化铝粉制备的样品, 密度为  $3.32 \text{ g/cm}^3$ 。后者的密度明显高于前者。

之所以出现上述结果, 主要原因在于中国产氮化铝微粉粒度分布极不均匀, 烧结时细粉团聚处先开始烧结和长大, 其它处则相对滞后, 收缩过程也是如此, 结果在颗粒间形成很多不规则的孔隙; 相比之下, 日本氮化铝 AIN-1 微粉粒度分布均匀, 在烧结过程中均匀烧结、连接和收缩, 形成了孔隙和缺陷相对较少的微结构。

采用 AIN-1 制备的 AIN-FeSiAl 复合陶瓷热扩散系数为  $31.39 \text{ mm}^2/\text{s}$ , 远高于采用 AIN-2 制备的 AIN-FeSiAl 复合陶瓷热扩散系数 ( $20.35 \text{ mm}^2/\text{s}$ )。对应的 AIN-FeSiAl 复合陶瓷热导率为  $75.58 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  和  $47.03 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , 前者是后者的 1.6 倍。

通过上述比较, 确认采用中国产氮化铝粉对获得高热导率无益, 因此选择日本东洋氮化铝粉作为后续研究的主要粉体材料。

## 2.2 FeSiAl 加入对 AIN 基衰减陶瓷热导率和衰减性能的影响

### 2.2.1 FeSiAl 粉末及其加入量选择

图 3 给出了 FeSiAl 粉体的微观形貌。该粉体粒度范围为  $1\sim 37 \mu\text{m}$ , 微颗粒带有棱角, 呈不规则形状, 且颗粒表面有很多解理面和解理台阶, 伴有河流花样。FeSiAl 烧结涂层是一种宽频带强吸波材料, 在 L、S、C、X、Ku、Ka 和 W 波段大功率真空电子器件中有重

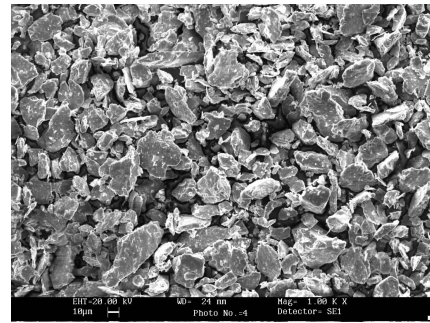


图 3 FeSiAl 粉体的 SEM 像

Fig.3 SEM image of FeSiAl powder

要应用。FeSiAl 烧结涂层是一种电、磁衰减兼而有之的衰减材料, 具有体积小、衰减量大、不占空间、导热迅速等特点。

本研究提出选择 FeSiAl 强吸波材料作为复合陶瓷的第二相, 可大幅降低第二相的质量分数, 对提高氮化铝基微波损耗陶瓷的热导率十分有利。

在前期研究中, 采用 AIN-2 制备出了 4 种成分的复合 AIN-FeSiAl 陶瓷, FeSiAl 添加量 (质量分数) 依次为 5%, 10%, 15% 和 20%。完成了 Ka 波段电磁性能测试。测试结果为: 当 FeSiAl 含量为 5%、10% 和 15% 时, 3 种材料都具有适当的介电常数, 并且在 26.5~40 GHz 宽频率范围内都具有良好的宽频微波衰减性能; FeSiAl 添加量为 20% 时, 虽然材料介电损耗很大, 但介电常数偏大, 难以应用。考虑到第二相含量越少, 材料热导率越高, 故选择添加 5% 和 10% 的 FeSiAl 的衰减陶瓷作进一步研究。

### 2.2.2 FeSiAl 的加入量对复合陶瓷热导率的影响

在真空度  $5 \times 10^{-3}$  Pa、烧结温度 1650 °C/保温时间 30 min 和压力 85 MPa 的烧结工艺下, 制备了 FeSiAl 添加量为 5% 和 10% 的 AIN-FeSiAl 复合陶瓷。表 3 给出了依据实测热扩散系数和热导率计算公式获得的热导率数据。

表 2 1620 °C 烧结后不同 AIN-10%FeSiAl 复合陶瓷的密度和热性能

Table 2 Density and thermal property of hot-pressing sintered AIN-10%FeSiAl at 1620 °C

Property	China AIN-2	Japan AIN-1
Density/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	3.18	3.32
Thermal diffusion coefficient, $\alpha/\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	20.35	31.39
Specific heat capacity, $c_p/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	725	725
Thermal conductivity, $\lambda/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	47.03	75.58

表 3 AIN-FeSiAl 陶瓷的密度和热性能

Table 3 Density and thermal property of AIN-FeSiAl ceramics

Property	FeSiAl addition, $\omega/\%$	
	5	10
Density/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	3.33	3.40
Thermal diffusion coefficient, $\alpha/\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	31.509	35.764
Specific heat capacity, $c_p/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	737.5	725
Thermal conductivity, $\lambda/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	77.4	88.2

热导率可通过将热扩散系数 ( $\alpha$ )、比热容 ( $c_p$ ) 和体积密度 ( $\rho$ ) 代入公式 (1) 求出<sup>[17]</sup>:

$$\lambda = \alpha c_p \rho \tag{1}$$

式中:  $\lambda$  为热导率 (W/m·K);  $\alpha$  为热扩散系数 (m<sup>2</sup>/s);  $\rho$  为密度 (g/cm<sup>3</sup>);  $c_p$  为比热容 (J/kg·K)。

由表 3 可知, FeSiAl 添加量为 5% 时, 复合陶瓷热导率为 77.4 W/m·K; 添加量为 10% 时, 复合陶瓷热导率 88.2 W/m·K。复合陶瓷的热导率随着 FeSiAl 含量的增加而增加。

图 4a 和图 4b 分别为 AlN-5%FeSiAl 和 AlN-10%FeSiAl 复合陶瓷的显微结构。观察发现, 材料断面由白色、灰色及黑色相 3 部分组成。X 射线能谱分析表明, 白色相含有 Fe, Si, Al, N 4 种元素, 对应 FeSiAl 相; 灰色部分只有 Al 和 N 2 种元素, 对应 AlN 基体; 黑色部分为孔隙。

分析认为, 当铁硅铝含量较低时, 其颗粒不规则地弥散在氮化铝绝缘相中<sup>[18]</sup>, 氮化铝晶粒为连续相, 由于氮化铝晶粒具有较高的声子平均自由程, 氮化铝晶粒连续相有利于提高复合材料的热导率。另外, AlN-10%FeSiAl 的密度高于 AlN-5%FeSiAl, 所以 AlN-10%FeSiAl 的热导率较高。

### 2.2.3 FeSiAl 加入量对复合陶瓷微波衰减性能的影响

图 5 给出了 AlN-5%FeSiAl 和 AlN-10%FeSiAl 复合陶瓷在 26.5~40 GHz 下的介电常数  $\epsilon$  和损耗角正切  $\text{tg}\delta_e$

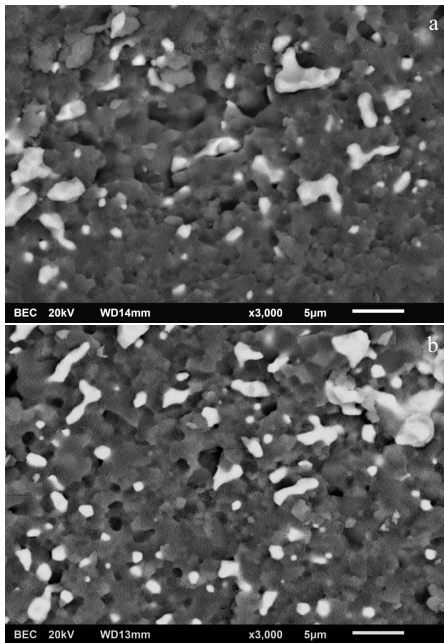


图 4 AlN-FeSiAl 复合陶瓷截面形貌

Fig.4 Cross-section morphologies of AlN-FeSiAl composite ceramic: (a) 5% FeSiAl and (b) 10% FeSiAl

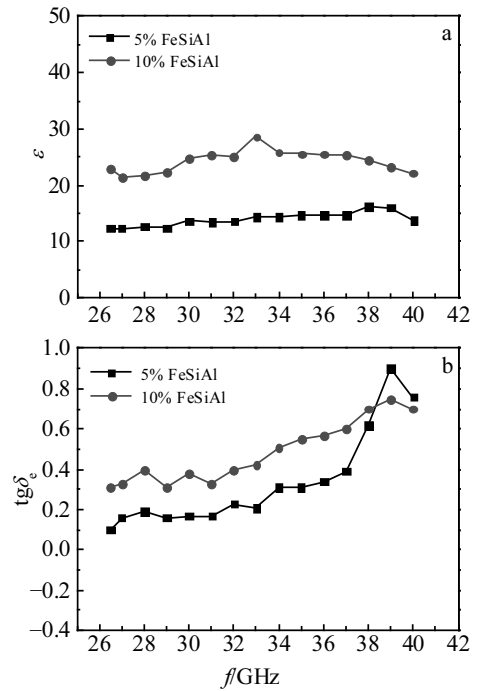


图 5 AlN-FeSiAl 复合陶瓷的介电常数  $\epsilon$  和损耗角正切  $\text{tg}\delta_e$

Fig.5 Dielectric constant  $\epsilon$  (a) and loss angle tangent  $\text{tg}\delta_e$  (b) of AlN-FeSiAl composite ceramics

由图可见, 随着 FeSiAl 含量的增加, 复合陶瓷的介电常数增加, 损耗角正切  $\text{tg}\delta_e$  也增加。2 种材料的介电常数  $\epsilon$  和损耗角正切  $\text{tg}\delta_e$  变化都较为平稳<sup>[19]</sup>。

当 FeSiAl 含量为 5% 时, 复合陶瓷的介电常数  $\epsilon$  为 12.34~16.19, 损耗角正切  $\text{tg}\delta_e$  为 0.10~0.90; FeSiAl 含量为 10% 时, 复合陶瓷的介电常数  $\epsilon$  为 21.36~28.62, 损耗角正切  $\text{tg}\delta_e$  为 0.31~0.75。

以应用较多的 Ka 波段 (26.5~40 GHz) 为例, 其对复合陶瓷的电性能要求为, 介电常数  $\epsilon=10\sim30$ , 损耗角正切  $\text{tg}\delta_e=0.1\sim1.0$ 。对比以上结果得出, 本研究的微波衰减陶瓷在 Ka 波段完全满足对电性能指标要求。就电性能指标而言, FeSiAl 含量为 5% 和 10% 的 2 种 AlN-FeSiAl 衰减陶瓷都可以应用于 Ka 波段的微波电真空器件。

## 2.3 烧结工艺对 AlN 基衰减陶瓷热导率的影响

### 2.3.1 烧结温度对 AlN-FeSiAl 复合陶瓷致密度和热导率的影响

适宜的烧结温度是获得高性能陶瓷的关键。在真空度  $5 \times 10^{-3}$  Pa、保温时间 30 min 和压力 85 MPa 不变的工艺条件下, 选取 1620 和 1650 °C 2 种温度进行了烧结实验。表 2 给出了烧结温度为 1620 °C 时 AlN-10%FeSiAl 复合陶瓷的密度和热导率, 表 3 给出了烧结温度为 1650 °C 时复合陶瓷的密度和热导率。对比

表2和表3知, 烧结温度为1620℃时, AlN-10%FeSiAl复合材料密度为3.32 g/cm<sup>3</sup>, 热导率为75.58 W/m·K; 烧结温度为1650℃时, AlN-10%FeSiAl复合材料密度为3.40 g/cm<sup>3</sup>, 热导率为88.2 W/m·K, 其密度和热导率均较1620℃时明显提高。

图6为1620℃烧结AlN-10%FeSiAl复合陶瓷断面形貌。可以看出, 复合陶瓷存在明显孔隙, 致密度相对较低。图4b是1650℃烧结AlN-10%FeSiAl复合陶瓷断面形貌, 孔隙较少, 试样已基本实现致密化<sup>[20]</sup>。

分析认为, FeSiAl材料的熔点为1400~1450℃, 烧结温度超过此范围即可使FeSiAl材料完全处于熔融状态。当烧结温度达到1650℃时, FeSiAl液体的过热度达到200℃, 其流动性获得极大改善, 可以更有效地填充氮化铝颗粒间的孔隙, 因而可使复合陶瓷的孔隙率明显减少, 致密度得到显著提高。

### 2.3.2 烧结压力对 AlN-FeSiAl 复合陶瓷致密度和热导率的影响

表4给出了含10%FeSiAl复合陶瓷在56和85 MPa压力下烧结后的密度和热性能。其它烧结参数为: 真空度 $5 \times 10^{-3}$  Pa、烧结温度1650℃/保温时间30 min。

由表4可知, 随着压力从56 MPa加大至85 MPa, 材料的密度由3.09 g/cm<sup>3</sup>升至3.4 g/cm<sup>3</sup>。材料热导率也由60 W/m·K升至88.2 W/m·K, 后者是前者的1.47倍。

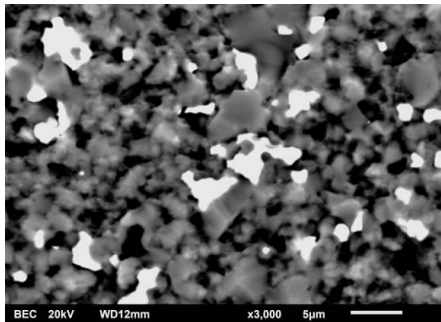


图6 AlN-FeSiAl复合陶瓷截面形貌(1620℃烧结)

Fig.6 Cross-section morphology of AlN-FeSiAl composite ceramic sintering at 1620℃

表4 不同烧结压力下复合陶瓷的密度和热性能

Table 4 Density and thermal property of compound ceramics under different sintering pressures

Property	Pressure/MPa	
	56	85
Density/g·cm <sup>-3</sup>	3.09	3.40
Thermal diffusion coefficient, $\alpha$ /mm <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	26.79	35.764
Specific heat capacity, $c_p$ /J·(kg·K) <sup>-1</sup>	725	725
Thermal conductivity, $\lambda$ /W·(m·K) <sup>-1</sup>	60.0	88.2

分析认为, 随着热压压力的加大, 材料气孔率降低、粉末颗粒重排、塑性流动和晶界滑移增强, 很大程度上提高了复合材料的致密度, 从而导致材料密度和热导率明显提高。

通过上述实验和分析, 将氮化铝基衰减陶瓷烧结工艺确定为: 真空度 $5 \times 10^{-3}$  Pa、烧结温度1650℃/保温时间30 min、压力85 MPa。

### 2.4 AlN-FeSiAl 衰减陶瓷获得高热导率的分析

在上面的实验中, 获得了综合性能优异的微波衰减陶瓷, 其热导率达到88.2 W/m·K, 接近美国Ceradyne公司AlN基微波衰减陶瓷的热导率水平。

之所以获得相对较高的热导率, 分析主要归于以下原因: 首先是选用了粒度较细且分布均匀的氮化铝粉末。这种粉末为获得均匀、致密和高热导率的氮化铝基体提供了前提; 其次, 是选用强吸波剂FeSiAl作为复合材料的第二相。FeSiAl具有远高于SiC、W粉等的微波吸收性能, 在要求吸波性能一定的条件下, 选用FeSiAl可大幅降低第二相在复合材料中的比例, 为提高材料热导率提供了有利条件; 第三, 是选用了真空热压熔融烧结工艺。FeSiAl的熔点为1400~1450℃, 本实验取1650℃的烧结温度, 可使FeSiAl颗粒在复合材料的烧结过程中完全处于熔融和液相状态, 这十分有利于其充分浸润氮化铝基体, 并与基体产生一定的扩散作用。同时, FeSiAl熔融相, 还可以起到填充材料孔隙的作用。另外, 熔融带来的好处还在于, FeSiAl凝固后, 以岛状物形式分布于AlN基体中, 使AlN晶粒之间仍可实现相互接触, 确保获得较高的声子平均自由程, 具有更高的热导率<sup>[21]</sup>。

## 3 结 论

1) 本研究提出将强微波吸收剂FeSiAl微粉作为AlN基微波衰减陶瓷的第二相, 进而研制出了一种兼具高热导率和高微波吸收性能的AlN-FeSiAl微波衰减陶瓷。

2) 以日本东洋氮化铝微粉为基体, 添加10%的FeSiAl, 并取真空度 $5 \times 10^{-3}$  Pa、85 MPa压力和1650℃/保温30 min工艺, 得到的复合材料热导率达到88.2 W/m·K, 接近美国Ceradyne公司AlN基微波衰减陶瓷的热导率水平。

3) 采用真空热压熔融烧结工艺, 使FeSiAl颗粒在复合材料的烧结过程中处于熔融和液相状态, 有利于增强第二相与基体间的浸润和相互扩散, 并可起到填充复合材料孔隙的作用; 烧结后形成的FeSiAl岛状凝固物有利于使AlN晶粒之间实现相互接触。

## 参考文献 References

- [1] Zong Xiaoyu(纵啸宇), Xue Qianzhong(薛谦忠), Du Chaohai(杜朝海). *Journal of Electronics & Information Technology* (电子与信息学报)[J], 2009, 31(6): 1483
- [2] Pershing D E, Nguyen K T, Calame J P *et al. IEEE Transactions on Plasma Science*[J], 2004, 32(3): 947
- [3] Yin Ruijian(殷瑞剑), Liu Pukun(刘濮鲲). *Journal of Electronics & Information Technology*(电子与信息学报)[J], 2008, 30(6):1507
- [4] Du Chaohai(杜朝海), Liu Pukun(刘濮鲲), Xue Qianzhong(薛谦忠). *Journal of Electronics & Information Technology*(电子与信息学报)[J], 2010, 32(8): 1987
- [5] Garven M, Calame J P, Danly B G *et al. IEEE Transactions on Plasma Science*[J], 2002, 30(3): 885
- [6] Calame J P, Garven M, Danly B G *et al. IEEE Transactions on Electron Devices*[J], 2002, 49(8): 1469
- [7] Biljana Mikijelj, David K Abe, Ron Hutcheon. *Journal of the European Ceramic Society*[J], 2003, 23(14): 2705
- [8] Li Xiaoyun(李晓云), Chen Guiqiao(陈贵巧), Qiu Tai(丘泰). *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2006, 30(6): 813
- [9] Ye Fang, Duan Wenyan, Mo Ran *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2019, 48(1): 39
- [10] Wu Huazhong(吴华忠), Xu Qingyan(徐清艳), Li Xiaoyun(李晓云). *Ordnance Material Science and Engineering*(兵器材料科学与工程)[J], 2009, 32(4): 35
- [11] He Yongqin(何永钦), Li Xiaoyun(李晓云), Zhang Jingxian(张景贤). *Journal of Inorganic Materials*(无机材料学报)[J], 2018, 33(4): 421
- [12] Bu Wenbo(步文博), Qiu Tai(丘泰), Xu Jie(徐洁). *Journal of the Chinese Ceramic Society*(硅酸盐学报)[J], 2003, 31(9): 828
- [13] Zhang Yan(张艳), Ma Huina(马会娜), Yang Zhiming(杨志明). *Materials Review*(材料导报)[J], 2008, 22(12): 129
- [14] Chen Guiqiao(陈贵巧), Li Xiaoyun(李晓云), Qiu Tai(丘泰). *China Ceramic Industry*(中国陶瓷工业)[J], 2006, 13(4): 22
- [15] Yang Zhentao, Lu Yanping. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*[J], 2013, 32(9): 1741
- [16] Kuang Jiakai(匡加才), Zhang Changrui(张长瑞), Zhou Xingui(周新贵). *Materials Review*(材料导报)[J], 2003, 17(4): 28
- [17] Chen Feixia(陈馑馑). *Physical Properties of Materials*(材料物理性能)[M]. Beijing: China Machine Press, 2017
- [18] Ru Hongqiang(茹红强), Zhang Xin(张鑫), Zhang Heng(张衡) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 47(S1): 319
- [19] Wang Lingxu(王玲续), Guo Xiaodong(郭晓东), Zhang Fengqing(张丰庆) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 47(S1): 415
- [20] Liu Jian(刘剑), Li Zhijian(李志坚), Luo Xudong(罗旭东) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 47(S1): 241
- [21] Jackson T B, Virkar A V, More K L *et al. Journal of the American Ceramic Society*[J], 1997, 80(6): 1421

## Study on Aluminum Nitride Microwave Attenuation Ceramics with High Thermal Conductivity

Zhang Yongqing, Yin Shengyi, Gao Xiangyang, Li Xiuxia, Jin He, Zhang Lianzheng

(Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China)

**Abstract:** To solve the problems of high toxicity and poor consistency of traditional beryllium oxide microwave attenuation ceramics, a kind of AlN-FeSiAl microwave attenuation ceramic based on aluminum nitride with high thermal conductivity was developed. The material belongs to environment-friendly material by adding FeSiAl to the AlN matrix. In order to obtain high thermal conductivity and good electromagnetic performance, the effects of different aluminum nitride powders, FeSiAl additive amount and sintering process on composite properties were studied. The results show that when adopting Toyo aluminum nitride, adding 10 wt% FeSiAl, and vacuum hot pressing sintering under 1650 °C and 85 MPa, the high attenuation performance of microwave attenuation ceramics is realized, and material thermal conductivity is 88.2 W/m·K, close to that of the microwave attenuation ceramics based on aluminum nitride in Ceradyne company.

**Key words:** microwave; attenuating ceramics; AlN; FeSiAl; hot pressed sintering

Corresponding author: Zhang Yongqing, Ph. D., Professor, Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, P. R. China, Tel: 0086-10-56535229, E-mail: zyq\_313@163.com