

含 Mo 金属陶瓷微波吸收材料的制备与性能

俞 雨^{1, 2}, 程继贵^{1, 2}, 梁槟星¹

- (1. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009;
2. 安徽省粉末冶金工程技术研究中心, 合肥 230009)

摘 要: 以 Mo、AlN 以及 TiO₂ 粉末为原料, 添加适当的烧结助剂, 制备出成形混合料, 通过模压成形和烧结分别得到了不同 Mo 含量的 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 金属陶瓷烧结体。采用 X 射线衍射仪、扫描电镜、万能材料试验机 and 矢量网络分析仪等对烧结体的相组成、显微组织、力学性能和微波吸收性能等进行测试分析。结果表明: Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 成形压坯分别在 1 750 °C 和 1 350 °C 下烧结 4 h, 可以获得相对密度分别高于 97% 和 94% 的 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 金属陶瓷。Mo/AlN 金属陶瓷的力学性能随 Mo 含量的增加而提高, 而 Mo/TiO₂ 金属陶瓷的力学性能随 Mo 含量的增加先升高后降低。Mo 的加入明显改善 AlN 和 TiO₂ 陶瓷的微波吸收性能, 含 40%Mo(质量分数)的 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 试样在 14~18 GHz 频率范围最大反射衰减量分别达到 22 dB 和 19 dB。

关键词: Mo/AlN; Mo/TiO₂; 金属陶瓷; 显微组织; 力学性能; 微波吸收性能

中图分类号: TQ174.75

文献标志码: A

Preparation and performance of Mo-contained microwave-absorbing cermets

YU Yu^{1, 2}, CHENG Ji-gui^{1, 2}, LIANG Bin-xing¹

- (1. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Powder Metallurgy Engineering and Technology Research Center of Anhui Province, Hefei 230009, China)

Abstract: Mo/AlN and Mo/TiO₂ cermets were manufactured by a conventional pressing-sintering process using Mo, AlN and TiO₂ as raw materials. The phase composition, microstructure, mechanical and microwave-absorbing properties of the sintered cermets were characterized by XRD, SEM, universal testing machine and network analyzer, respectively. The results show that Mo/AlN and Mo/TiO₂ cermets with relative density of more than 97% and 94% can be obtained by sintering their compacts at 1 750 °C and 1 350 °C for 4 h, respectively. While the mechanical properties of the Mo/AlN cermets increase with Mo contents increasing, the mechanical properties of the Mo/TiO₂ cermets first increase and then decrease with Mo content increasing. Mo addition improves the microwave-absorbing behaviors of AlN and TiO₂ ceramics. Mo/AlN and Mo/TiO₂ samples with 40% Mo (mass fraction) show a maximum reflection loss of 22 dB and 19 dB, respectively, in the frequency range of 14~18 GHz.

Key words: Mo/AlN; Mo/TiO₂; cermets; microstructure; mechanical property; microwave-absorbing property

微波吸波材料通常是将半导体材料或易于极化的材料分散于介质基体内, 依靠半导体材料的电荷载流子或极化材料的偶极子在高频场中移动或摆动来消耗

高频能量, 转化为热量传输出去^[1]。随着微波电真空器件功率的增大, 对其工作稳定性等提出更高的要求, 从而促使新型高热导吸波材料的研究开发。目前, 高

功率微波电真空器件(如行波管等)多采用高导热型的吸波材料,主要包括氧化铍基复合衰减陶瓷、SiC 基材料、渗碳多孔陶瓷以及新型金属陶瓷等^[2]。

金属陶瓷具有高温稳定性好、导热率高、机械强度高、易于机械加工、金属化和焊接等优点。金属陶瓷用作微波吸材料,其吸波性能不受居里温度限制,且多种吸波机理共同作用使其微波吸收性能更强、吸收频段更宽,更符合微波吸收材料的“轻、薄、强、宽”的发展要求。因此,高热导的金属陶瓷成为目前吸波材料研究开发的热点之一^[3-4]。

AlN 陶瓷由于具有良好的力学性能、较高的导热率和适中的介电常数等,是优良的微波吸收基体材料^[5]。但其脆性大、介电常数可调范围小等也使其应用受到一定的限制。通过向 AlN 中填加适量的金属 W 等第二相,可以改善其微波性能,如研究表明, W、TiC 和 C 等的加入可以明显改善材料 AlN 材料的微波吸收性能^[6-7]。但高密度 W 的加入使成形料难以混合均匀,增大了材料制备的工艺难度。与 W 相比, Mo 密度较小、导热率较高,且热膨胀系数与 AlN 很接近(Mo 和 AlN 在 300~1 200 K 范围内热膨胀系数分别为 $7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 与 $6.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)^[8-9]。若复合 Mo 和 AlN 制得 Mo/AlN 复合吸波材料,可望进一步改善 AlN 性能,获得性能更为优异的吸波材料,同时减小制造工艺难度。目前,国内外对于 Mo/AlN 复合材料的研究主要集中在力学、电学和热学性能上,如通过热压烧结法制备出致密度超过 97%,导热系数和抗弯强度分别达到 100 W/(m·K)和 500 MPa 的 AlN/Al 复合材料^[8-9],而对于其微波吸收性能的研究却鲜有报道。由于 AlN 基(金属)陶瓷难以烧结致密化,而吸波材料通常要求较高的气密性(致密度),因此,为了获得高致密度 AlN 基陶瓷,国内外对此进行了较多的探索,如通过热压和添加烧结助剂等提高 AlN 基陶瓷的致密度^[9-10]。但热压工艺的成本较高,而烧结助剂若选择不当,则易导致材料导热性能等的降低。

TiO₂ 作为一种禁带较宽、结构稳定的半导体材料也常用于改善材料的吸波性能^[11]。如对添加 TiO₂ 的 AlN-C 复合材料吸波性能的研究结果表明:TiO₂ 的加入明显改善 AlN-C 复相材料的吸波性能^[12],但迄今有关以 TiO₂ 作为基体的金属陶瓷吸波材料的研究报道仍极少。因此,本文作者尝试以 AlN 和 TiO₂ 为基体, Mo 为金属吸收剂,采用常规的压制成形和烧结工艺,制备高致密度的 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 金属陶瓷,通过对其组织和性能进行测试分析,探索获得新型高性能 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 金属陶瓷微波吸收材料的新途径。

1 实验

1.1 试样制备

实验采用的 AlN、TiO₂ 和 Mo 粉末的平均粒度分别为 1.5、0.3 和 4.5 μm ;复合烧结助剂由氧化钇(Y₂O₃, 纯度 99.95%)、氧化钙(CaO, 纯度 98.5%)和碳酸锂(Li₂CO₃, 纯度 99.99%)等组成;采用聚乙烯醇缩丁醛(PVB)为成形剂,乙醇为溶剂。实验中将 AlN、TiO₂ 和 Mo 粉末和烧结助剂按计量称取,与适量的成形剂(PVB)一起在无水乙醇中球磨 24 h,干燥、造粒后,在 100 MPa 压力下压制尺寸分别为 d 15 mm×5 mm 和 40 mm×10 mm×5 mm 的圆柱状和条状压坯。所得 Mo/AlN 成形压坯先在 N₂ 气氛中预烧脱除成形剂后,再在碳管炉中于 N₂ 保护下进行烧结,烧结温度和保温时间分别为 1 750 $^{\circ}\text{C}$ 和 4 h。Mo/TiO₂ 成形压坯先在 H₂ 气氛中预烧脱除成形剂,再在碳管炉中于 Ar 保护下烧结,烧结温度和保温时间分别为 1 350 $^{\circ}\text{C}$ 和 4 h。实验中分别制备了 Mo 含量为 30%、35%及 40%(质量分数)的 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 金属陶瓷复合材料。同时制备了未添加 Mo 的纯 AlN 和 TiO₂ 陶瓷材料,与含 Mo 金属陶瓷试样作性能对比实验。

1.2 性能测试

采用 Archimedes 法对 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 烧结体的密度进行测量,并计算其相对密度。采用 DCS-5000 型岛津万能材料试验机进行三点弯曲实验测试 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 烧结体试样的抗弯强度和断裂韧性。分别采用 Sirion200 型场发射环境扫描电镜(美国 FEI 公司)以及 D/Max-rB 型 X 射线衍射仪(日本理学)对烧结体试样的微观组织和相组成等进行测试。采用 Agilent8722ET 矢量网络分析仪测定不同 Mo 含量的 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 试样在不同频率下的反射衰减率来表征其微波吸收性能。

抗弯强度采用三点弯曲测试,试样尺寸 $b \times h \times L$ 为 3 mm×4 mm×35 mm(b 为试样厚度, h 为宽度, L 为长度),跨距 l 为 30 mm,加载速率为 0.5 mm/min。由下式求抗弯强度 σ_f :

$$\sigma_f = \frac{3Fl}{2bh^2} \quad (1)$$

式中: F 为载荷; l 为跨距。

断裂韧性采用单边切口梁法测试,试样尺寸 $b \times h \times L$ 为 3 mm×4 mm×35 mm,缺口深(a)为 2.5 mm、

缺口宽 0.1 mm 的凹槽, 采用三点弯曲加载方式, 跨距为 30 mm, 则断裂韧性 K_{IC} 为

$$K_{IC} = Y \frac{3Fl}{2bh^2} \sqrt{a}$$

(2)

式中: Y 为缺口几何因子。

$$Y = 1.93 - 3.07 \frac{a}{h} + 14.53 \left(\frac{a}{h} \right)^2 - 25.11 \left(\frac{a}{h} \right)^3 + 25.80 \left(\frac{a}{h} \right)^4$$

(3)

2 结果与讨论

2.1 金属陶瓷压坯的烧结致密化

吸波材料必须有高的致密度, 以保证其在真空环境下长期稳定地工作。表 1 所列为不同 Mo 含量 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 烧结体的相对密度的测定结果。由表 1 可以看出, 不同 Mo 含量 Mo/AlN 烧结体的相对密度都在 97% 以上, 且相对密度随 Mo 加入量的增加而提高。这可能是由于在制备 Mo/AlN 试样时, 成形料中添加了约 2%(外加)的复合氧化物烧结助剂, 而随着试样中 Mo 含量的增加, 烧结助剂的体积含量相对增加, 这有利于促进烧结致密化的进行^[13]。相反地, Mo/TiO₂ 烧结体的相对密度随 Mo 含量的增加有降低的趋势。这是由于 Mo/TiO₂ 金属陶瓷中 Mo 较 TiO₂ 难以烧结, Mo/TiO₂ 金属陶瓷的致密化主要取决于 TiO₂ 陶瓷的烧结, 而随着 Mo 含量的增加, 其对烧结致密化的阻碍作用增强, 结果导致烧结体相对密度的降低。

表 1 不同 Mo 含量的金属陶瓷的相对密度
Table 1 Relative density of cermets with different Mo contents

Material	Relative density/%			
	Without Mo	30%Mo	35%Mo	40%Mo
Mo/AlN	97.35	97.83	98.22	98.89
Mo/TiO ₂	96.45	95.66	95.27	94.10

图 1 所示为 Mo 含量为 35% 的 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 金属陶瓷样品的 SEM 像。由图 1 中可以看出, 烧结体组织致密, 没有明显的气孔。这与表 1 的测试结果相一致。图 1(a)表明, Mo/AlN 试样中, Mo 颗粒(浅色)均匀分散于 AlN(深色)基体中, 且两相结合良好。图 1(b)则显示 Mo/TiO₂ 金属陶瓷烧结体组织致密, Mo 颗粒同样均匀分散于 TiO₂ 基体中。Mo/AlN 和 Mo/TiO₂

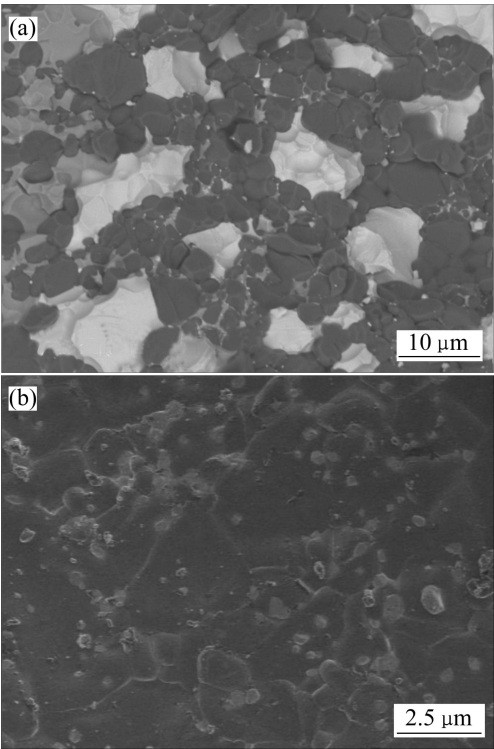


图 1 Mo 含量为 35% 的 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 样品表面的 SEM 像
Fig.1 SEM images of Mo/AlN(a) and Mo/TiO₂(b) cermets surfaces with 35% Mo

金属陶瓷高的烧结致密化和良好的晶粒结合有利于其力学性能的提高, 并可以提高其在真空环境中工作的稳定性。

2.2 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 金属陶瓷的相组成分析

图 2 所示为不同 Mo 含量的 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 金属陶瓷烧结体试样的 XRD 谱。图 2(a)表明, Mo/AlN 烧结体主要由 AlN 和 Mo 相所组成。同时, 复合氧化物烧结助剂在烧结过程中通过反应生成了少量 YAG(Y₃Al₅O₁₂)相。另外, 在含 Mo 的试样中出现少量的 Mo₂C 相, 这可能是由于实验中采用石墨烧舟, 在高温烧结时, Mo 发生碳化反应所致。由图 2(b)可见, 不同 Mo 含量 Mo/TiO₂ 试样仅由 Mo 和 TiO₂ 两相组成, 且 TiO₂ 是以最稳定的金红石状态存在。在 Mo/TiO₂ 金属陶瓷的 XRD 谱中未出现 Mo₂C 相, 可能因其烧结温度较低, 碳化反应程度较轻所致。

2.3 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 金属陶瓷的力学性能

表 2 所列为不同 Mo 的含量 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 金属陶瓷试样抗弯强度与断裂韧性(K_{IC})的测量结果。从表 2 中可以看出, Mo/AlN 烧结体的抗弯强度与断裂韧性(K_{IC})均随着 Mo 含量的增加而提高。这主

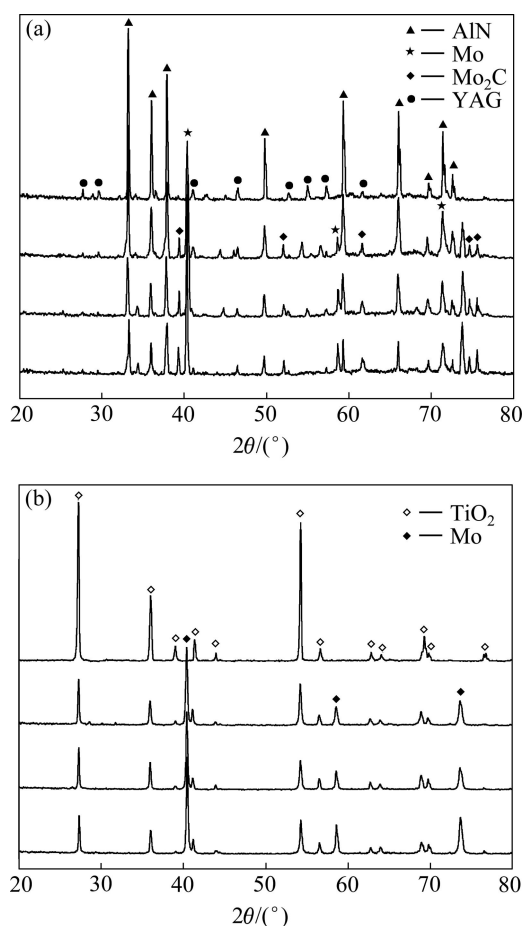


图2 不同 Mo 含量的金属陶瓷烧结体的 XRD 谱

Fig.2 XRD patterns of cermet sintered bodies with different Mo contents: (a) Mo/AlN; (b) Mo/TiO₂

表2 不同 Mo 含量的金属陶瓷的力学性能

Table 2 Mechanical properties of cermets with different Mo contents

Mass fraction of Mo/%	Bending strength/MPa		Fracture toughness/(MPa·m ^{1/2})	
	Mo/AlN	Mo/TiO ₂	Mo/AlN	Mo/TiO ₂
0	246.89	167.12	1.97	1.56
30	406.12	215.64	3.53	2.16
35	436.37	238.47	4.09	2.37
40	530.61	230.32	4.61	2.01

要是由于金属 Mo 颗粒可以阻碍材料断裂时裂纹的扩展,起到增韧补强的作用^[14]。Mo 含量为 40%时 Mo/AlN 金属陶瓷的抗弯强度和 K_{IC} 分别达到 530.61 MPa 和 4.61 MPa·m^{1/2}。Mo/TiO₂ 试样的抗弯强度和 K_{IC} 则在 Mo 含量为 35%时最高,分别为 238.47 MPa 和 2.37 MPa·m^{1/2}。当 Mo/TiO₂ 金属陶瓷中 Mo 含量从 30% 增加到 35%时,Mo/TiO₂ 金属陶瓷的致密度仅下降了

0.39%, Mo 含量的增加起到增韧补强的作用并抵消少量气孔对于力学性能的不利影响,所以随着 Mo 含量增加,Mo/TiO₂ 金属陶瓷的力学性能随之提高;当 Mo/TiO₂ 金属陶瓷中 Mo 含量从 35%增加到 40%时,Mo/TiO₂ 金属陶瓷的致密度下降了 1.17%,致密度的大幅下降不但抵消了 Mo 增韧补强的作用,还大大增加了裂纹扩展的途径,从而导致 Mo/TiO₂ 金属陶瓷力学性能的下降^[15]。

2.4 Mo 含量对金属陶瓷的微波吸收性能的影响

金属陶瓷微波吸收材料是由基体材料与衰减剂复合而成,吸波性能可以通过反射衰减量来表征。把烧结体加工成 3 mm 厚的块状试样后,在 Agilent8722ET 矢量网络分析仪上用测量线方程获得驻波系数(ρ)^[16]

$$\rho = \sqrt{\frac{I_{\max}}{I_{\min}}} \quad (I_{\max} \text{ 和 } I_{\min} \text{ 分别为检波最大和最小电流}),$$

计算出反射系数 $\Gamma = \left| \frac{\rho - 1}{\rho + 1} \right|$, 最后获得反射衰减量 $R = 20 \lg |\Gamma|$ 。

图3所示为不同 Mo 含量 Mo/AlN 试样在 6~24 GHz 频段内的反射衰减量—频率(R—F)曲线。从图3可以看出,Mo 的加入明显改善 AlN 材料的吸波性能。纯 AlN 的微波吸收性能较差,最大反射衰减量也只有 10 dB。且随着 Mo 含量的增加,试样的吸收性能随之增强,最低谐振频率向高频段偏移。当 Mo 含量为 35%时,试样的最低谐振频段在 9~10 GHz 之间,且吸收频谱特性呈现多频段吸收特性,最大反射衰减量达 18 dB,表现出良好的选频吸收性。而当 Mo 含量为 40%时,吸收频段最宽,在 14~18 GHz 的频段内,吸收效果较佳,最大反射衰减量达 22 dB,表现出良好的宽频吸收特性。

图4所示为不同 Mo 含量的 Mo/TiO₂ 试样在 6~24 GHz 频段内的 R—F 曲线。由图4可以看出,试样最低谐振峰都在 19~20 GHz 之间,吸收性能随着 Mo 含量的增加而提高,反射衰减量含 Mo 量为 40%时,最大反射衰减量达 19 dB。和 Mo/AlN 试样相比,Mo/TiO₂ 在 19~20 GHz 之间有着很强的微波衰减性能,但在其他的波段,并没有表现出宽屏吸收。

2.5 含 Mo 金属陶瓷微波吸收机理

在含 Mo 金属陶瓷吸波材料中,Mo 是很好的导电相,属于电阻型损耗吸波材料^[17-18]。因此,吸收剂的 Mo 含量是影响金属陶瓷复相材料微波吸收性能的主导因素。由于电磁波在损耗只取决于电损耗而没有磁损耗的媒质中传播的复波数 k 为^[19]

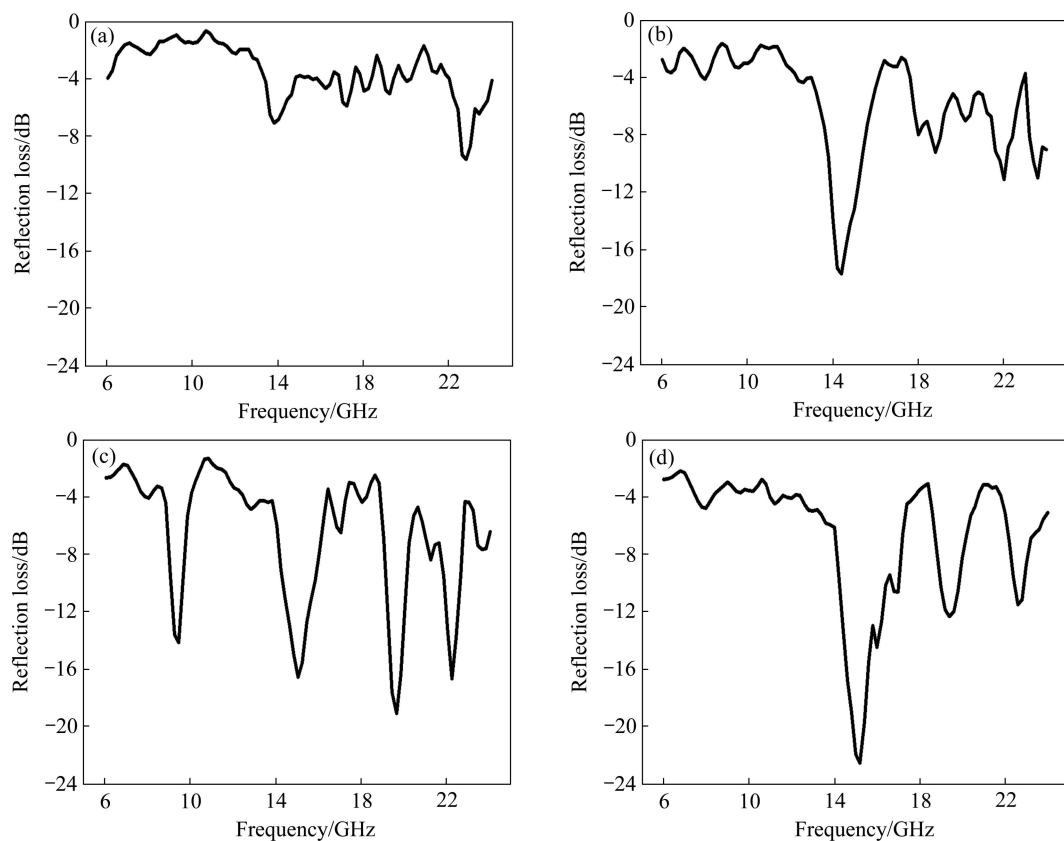


图 3 不同 Mo 含量 Mo/AlN 金属陶瓷的 R—F 曲线

Fig.3 R—F curves of Mo/AlN cermet with different Mo contents: (a) Without Mo; (b) 30%Mo; (c) 35%Mo; (d) 40%Mo

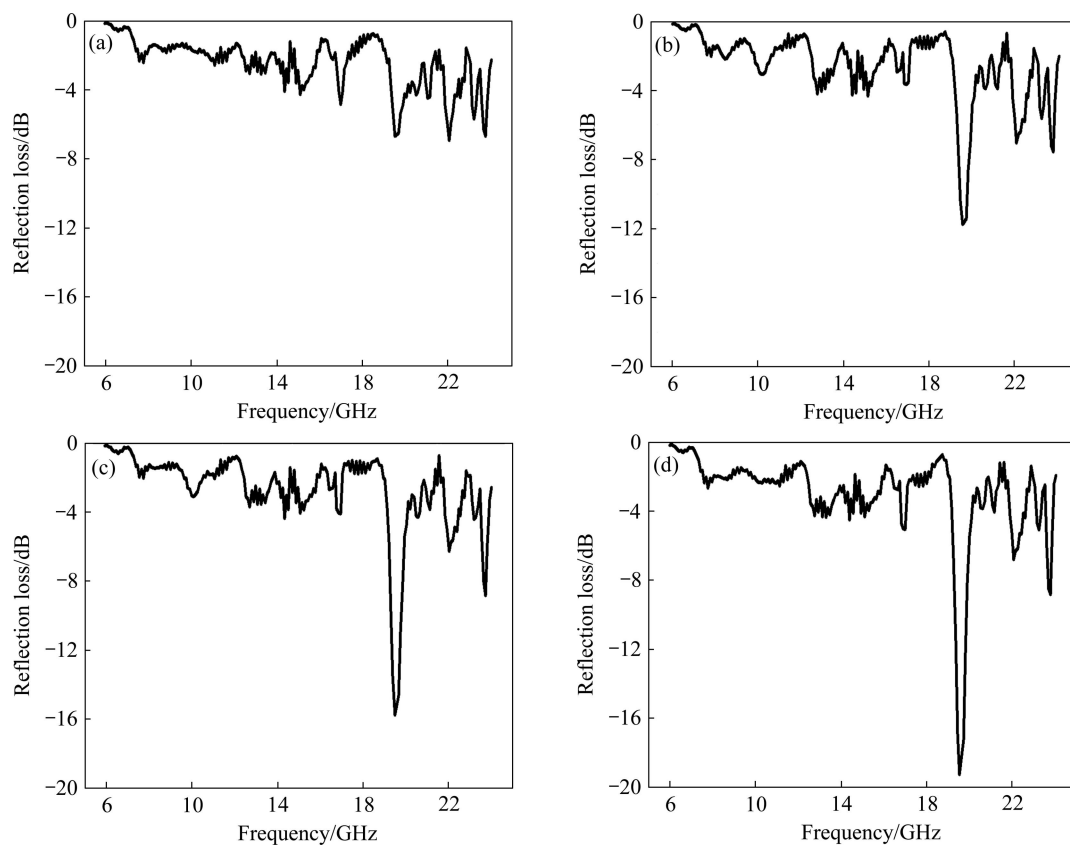


图 4 不同 Mo 含量 Mo/TiO₂ 金属陶瓷的 R—F 曲线

Fig.4 R—F curves of Mo/TiO₂ cermet with different Mo contents: (a) Without Mo; (b) 30%Mo; (c) 35%Mo; (d) 40%Mo

$$k = k' - jk'', \quad k' \approx k'' \approx \sqrt{\frac{\sigma\omega\mu\mu_0}{2}}$$

式中: k' 为实波数; k'' 为衰减系数; σ 为电导率; ω 为角频率; μ 为介质磁导率; μ_0 为真空磁导率。

由此可见, 媒质的电导率增大, 衰减系数增大。但金属是微波的导体, 微波只能在其表面反射电磁波, 电磁波不能到达导体的深处, 电磁波会在材料表面激发高频振荡电流向外辐射电磁波, 形成反射波。因此, 完全的高电导率金属材料很难成为微波吸收材料, 且将全部反射电磁波。

AlN 和 TiO₂ 陶瓷介质属于微波绝缘体可透过微波且对微波的吸收也很少^[8], 这和图 5 和 6 中纯 AlN 和 TiO₂ 所反映出的吸波性能不佳是一致的。Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 金属陶瓷是通过在陶瓷介质 AlN 和 TiO₂ 中添加金属相 Mo 弥散质点。导电颗粒相当于偶极子, 微波在其间产生多次反复的阻尼震动, 使得电磁波损耗转化成热能传导出。另一方面, Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 金属陶瓷是由晶粒和晶界相、位错、反相畴界和多型体等多种结构缺陷形成的非均质体系, 主晶相 AlN 或 TiO₂ 与晶界相间和 Mo 相间电导率的差异会成为自由电荷(间隙离子、空位和引入的电子等)运动的障碍^[17]。因此, 当 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 金属陶瓷处于微波电磁场中, 必将在不同相的界面上产生电荷堆积, 形成空间电荷极化, 这种极化形式致使 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 金属陶瓷在电磁场的弛豫时间较长, 同时需要吸收一定的微波能量, 从而能起到一定的微波衰减作用。

研究结果显示, 不同 Mo 含量的 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 复合材料表现出不同的微波吸收性能, 其原因可能在于 AlN 是一种电绝缘材料, 而 TiO₂ 是一种半导体材料。Mo 的加入增加了微波在 AlN 陶瓷中的阻尼震动, 从而提高了微波吸收性能; 而在 TiO₂ 陶瓷中, Mo 的加入不仅增加了微波的阻尼震动, 还增加了 TiO₂ 陶瓷的电导, 使得电阻损耗增加, 从而提高陶瓷的微波吸收性能。随着 Mo 含量的增加, Mo/AlN 表现出一定的宽屏吸收, 而 Mo/TiO₂ 却没有, 这主要是由于 Mo/AlN 金属陶瓷中含有一定的烧结助剂, 这些烧结助剂增加 Mo/AlN 金属陶瓷中的非均质体系, 从而使得 Mo/AlN 金属陶瓷具有一定宽屏吸收的特点。

3 结论

1) 通过添加复合烧结助剂, 以常规的压制烧结工艺, 在较低的烧结温度下可以制备出相对密度分别高于 97% 和 94% 的 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 金属陶瓷烧结

体。

2) Mo 含量对 Mo/AlN 和 Mo/TiO₂ 金属陶瓷的力学性能有明显的影响, Mo/AlN 金属陶瓷的力学性能随 Mo 含量的增加而提高, 而 Mo/TiO₂ 金属陶瓷的力学性能随 Mo 含量增加呈现先提高后下降的趋势。

3) Mo 的加入明显改善 AlN 和 TiO₂ 的微波吸收性能。含 40%Mo 的 Mo/AlN 试样的最大反射衰减量可达 22 dB, 且吸收频段较宽。含 40%Mo 的 Mo/TiO₂ 试样的最大反射衰减量为 19 dB, 表现选频吸收的特性。因此, Mo/AlN 材料的微波吸收性能优于 Mo/TiO₂ 材料的。

REFERENCES

- [1] 王海滨, 刘树信, 霍翼川, 吕淑珍. 无机吸波材料研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2008, 27(4): 754-758.
WANG Hai-bin, LIU Shu-xin, HUO Ji-chuan, LÜ Shu-zhen. Progress on inorganic wave-absorbing materials[J]. Bulletin of The Chinese Ceramic Society, 2008, 27(4): 754-758.
- [2] 孟建华, 杨桂琴, 严乐美, 王秀宇. 吸波材料的研究进展[J]. 磁性材料与器件, 2004, 35(4): 11-14.
MENG Jian-hua, YANG Gui-qin, YAN Le-mei, WANG Xiu-yu. Research progress in microwave absorbing materials[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2004, 35(4): 11-14.
- [3] 高陇桥. 高热导率陶瓷材料的进展[J]. 真空电子技术, 2003(2): 49-53.
GAO Long-qiao. The progress of high thermal conductivity ceramic materials[J]. Vacuum Electronics, 2003(2): 49-53.
- [4] 孙晶晶, 李建保, 张波, 翟华璋, 孙格靓. 陶瓷吸波材料的研究现状[J]. 材料工程, 2003(2): 43-47.
SUN Jing-jing, LI Jian-bao, ZHANG Bo, ZHAI Hua-zhang, SUN Ge-liang. Current status of ceramics materials in electromagnetic wave absorbing[J]. Journal of Materials Engineering, 2003(2): 43-47.
- [5] 郇玉含, 李晓云, 丘泰. 氮化铝基微波衰减材料在高频行波管中的应用[J]. 材料导报, 2008, 22(10): 22-27.
GAO Yu-an, LI Xiao-yun, QIU Tai. AlN-based microwave loss materials used for high frequency traveling wave tube[J]. Materials Review, 2008, 22(10): 22-27.
- [6] 陈贵巧, 李晓云, 丘泰. AlN-W 复相微波衰减材料的性能研究[J]. 中国陶瓷工业, 2006, 13(4): 22-25.
CHEN Gui-qiao, LI Xiao-yun, QIU Tai. Study on performance of AlN-W composites with microwave attenuation characteristics[J]. China Ceramic Industry, 2006, 13(4): 22-25.
- [7] 程卫华, 李晓云, 丘泰, 贾妙蕾. AlN-TiC 复相微波衰减材料性能的研究[J]. 电子元件与材料, 2008, 27(1): 26-25.
CHENG Wei-hua, LI Xiao-yun, QIU Tai, JIA Miao-lei. Study on performance of AlN-TiC composites with microwave attenuation

- characteristics[J]. *Electronic Components and Materials*, 2008, 27(1): 26–25.
- [8] KHAN A A, LABBE J C. Aluminium nitride/molybdenum ceramic matrix composites. influence of molybdenum addition on electrical, mechanical and thermal properties[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 1997, 17: 1885–1890.
- [9] KHAN A A, LABBE J C. Aluminium nitride/molybdenum ceramic matrix composites: Characterization of ceramic-metal interface[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 1996, 16: 739–744.
- [10] 乔 梁, 周和平. Li_2O 对低温烧结 AlN 陶瓷热导率的影响[J]. *材料科学与工程*, 2002, 20(4): 490–498.
- QIAO Liang, ZHOU He-ping. Effect of Li_2O on the thermal conductivity of AlN ceramics sintered at low temperature[J]. *Materials Science and Engineering*, 2002, 20(4): 490–498.
- [11] 田雨霖. TiO_2 陶瓷的复合功能特性[J]. *硅酸盐通报*, 1994, 13(6): 32–34.
- TIAN Yu-lin. Composite function characteristics of TiO_2 ceramic[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 1994, 13(6): 32–34.
- [12] 吴华忠, 李晓云, 丘 泰. TiO_2 对 AlN-C 复相材料性能的影响[J]. *电子元件与材料*, 2009, 28(7): 61–64.
- WU Hua-zhong, LI Xiao-yun, QIU Tai. Effect of TiO_2 on characteristics of AlN-C composite material[J]. *Electronic Components and Materials*, 2009, 28(7): 61–64.
- [13] QIU J Y, HOTTA Y, WATARI K, MITSUISHI K, YAMAZAKI M. Low-temperature sintering behavior of the nano-sized AlN powder achieved by super-fine grinding mill with Y_2O_3 and CaO additives[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2006, 26(4/5): 385–390.
- [14] SBAIZERO O, PEZZOTTI G. Residual stresses and R-curve behavior of AlN/Mo composite[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2001, 21(3): 269–275.
- [15] 王业亮, 傅正义, 王 皓, 张金咏. $\text{TiB}_2\text{-TiC}$ 复相陶瓷的结构与性能研究[J]. *复合材料学报*, 2003, 20(1): 22–26.
- WANG Ye-liang, FU Zheng-yi, WANG Hao, ZHANG Jin-yong. Study on the structure and properties of $\text{TiB}_2\text{-TiC}$ multiphase ceramics[J]. *Acta Material Compositae Sinica*, 2003, 20(1): 22–26.
- [16] 吴明忠, 赵振声, 何华辉. 结构型 RAM 对斜入射电磁波的反射和透射[J]. *功能材料*, 1999, 4(30): 366–368.
- WU Ming-zhong, ZHAO Zhen-sheng, HE Hua-hui. The reflection and transmission coefficients of structural RAM on oblique incidence electromagnetic wave[J]. *Journal of Functional Materials*, 1999, 4(30): 366–368.
- [17] 马会娜, 杨志民, 杜 军. 氮化铝/导电颗粒复合微波衰减陶瓷的研究现状[J]. *材料导报*, 2008, 22(4): 5–9.
- MA Hui-na, YANG Zhi-min, DU Jun. Research situation of AlN/conductive particles microwave attenuation composite ceramics[J]. *Materials Review*, 2008, 22(4): 5–9.
- [18] 李黎明, 徐 政. 吸波材料的微波损耗机理及结构设计[J]. *现代技术陶瓷*, 2004, 25(2): 31–34.
- LI Li-ming, XU Zheng. Physical mechanisms of the absorbing function in microwave-absorbing material and its composite design[J]. *Advanced Ceramics*, 2004, 25(2): 31–34.
- [19] 康 青. 新型微波吸收材料[M]. 北京: 科学出版, 2006: 1–2.
- KANG Qing. Novel microwave-absorbing materials[M]. Beijing: Science Press, 2006: 1–2.

(编辑 李艳红)