

## AlN-BN 复相陶瓷的热等静压制备与性能研究

彭 旭, 朱德贵, 李杨绪, 周加敏, 吕 振, 郭鹏超

(西南交通大学 材料先进技术教育部重点实验室, 成都 610031)

**摘 要:** 以氮化铝(AlN)和氮化硼(BN)为原料, 无烧结助剂、热等静压烧结制备了 AlN-BN 复相陶瓷, 研究了热等静压温度和压强对两种不同原料配比(摩尔比)烧结试样的微观结构和性能的影响。结果表明: 增加 BN 的添加量对复相陶瓷的烧结致密化影响较小, 但逐渐降低硬度和热导率、增大体积电阻率。相同原料配比下, 复相陶瓷的密度越高, 其热导率、体积电阻率、硬度越高。热导率和体积电阻率的实测值与两相复合模型方程  $\lambda_{\text{com}} = \frac{\lambda_2(\lambda_1 + F)(1 - \Phi)(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_2 - (1 + F)(1 - \Phi)(\lambda_2 - \lambda_1)}$

较为符合。当  $n_{\text{AlN}}:n_{\text{BN}}=75:25$  时, 在温度为 1600℃、压强为 90 MPa、保温 3 h 的热等静压工艺下可以制备出相对密度达 98.03%、热导率为 77.29 W/(m·K)、体积电阻率为  $1.35 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$  的复相陶瓷。

**关 键 词:** AlN-BN 复相陶瓷; 热等静压; 热导率; 体积电阻率

**中图分类号:** TB332 **文献标识码:** A

## Fabrication and Property of AlN-BN Composites by Hot Isostatic Pressing

PENG Xu, ZHU De-Gui, LI Yang-Xu, ZHOU Jia-Min, LV Zhen, GUO Peng-Chao

(Key Laboratory of Advanced Technology of Materials, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** AlN-BN composites were fabricated by hot isostatic pressing (HIP) without sintering aid, using aluminum nitride (AlN) and boron nitride (BN) powders as raw materials. The effects of HIP temperature and pressure on microstructure and properties of composites with two different raw material ratios (molar ratio) were investigated. The results show that increasing amount of BN has little impact on densification, but decreases the hardness and thermal conductivity while increases the volume resistivity. The higher the density of the composite is, the higher thermal conductivity, volume resistivity and hardness are. The thermal conductivity and volume resistivity values conform the formula:  $\lambda_{\text{com}} = \frac{\lambda_2(\lambda_1 + F)(1 - \Phi)(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_2 - (1 + F)(1 - \Phi)(\lambda_2 - \lambda_1)}$ . AlN-BN composites with the ratio of  $n_{\text{AlN}}:n_{\text{BN}} = 75:25$

were prepared at 1600 °C, 90 MPa and a dwell time of 3 h by HIP, achieving density of 98.03%, thermal conductivity of 77.29 W/(m·K) and a volume resistivity of  $1.35 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ .

**Key words:** AlN-BN composite ceramics; HIP; thermal conductivity; volume resistivity

氮化铝(AlN)陶瓷具有高热导率、高绝缘性、耐高温、无毒、良好的力学性能等优良特性, 是大规模集成电路和大功率器件的理想散热和封装材料。但 AlN 硬度高、脆性大、韧性低、加工难等缺点, 使传统加工方法难以制备出形状复杂的材料<sup>[1-2]</sup>。因此,

通常在 AlN 中加入加工性良好的材料与其进行复合以降低 AlN 的硬度, 提高其韧性和加工性能。六方氮化硼(h-BN)是良好的润滑剂, 质地柔软, 具有易加工、高绝缘性、耐磨、耐腐蚀等优点。因此将 BN 加入到 AlN 中可有效改善 AlN 的加工性能, 同时也

收稿日期: 2015-10-15; 收到修改稿日期: 2015-11-24

基金项目: 四川省科技支撑计划(2014GPTZ0002) Science and Technology Pillar Project of Sichuan(2014GPTZ0002)

作者简介: 彭 旭(1989-), 女, 硕士研究生. E-mail: 1149595751@qq.com

通讯作者: 朱德贵, 副教授. E-mail: dgzhu@swjtu.edu.cn

可以增强材料的韧性<sup>[3-4]</sup>。

制备 AlN-BN 复相陶瓷一般以高纯的 AlN 和 BN 粉末与烧结助剂混合均匀, 采用热压烧结<sup>[5-7]</sup>、放电等离子烧结<sup>[8]</sup>、无压烧结<sup>[9-10]</sup>等制备。为了获得高致密的 AlN-BN 复相陶瓷, 研究者采用不同的烧结工艺, 并加入  $Y_2O_3$ 、CaO 等烧结助剂<sup>[11]</sup>, 发现烧结助剂在烧结初、中期可提高烧结体的致密度, 但随后进入 AlN 晶粒内部, 对维持 AlN 陶瓷晶格完整性不利。此外, 烧结助剂可产生有毒气体污染环境, 也不利于大规模生产<sup>[12]</sup>。热等静压烧结(HIP)具有降低烧结温度、纯净度高、组织均匀、提高材料致密度、能耗低等特点<sup>[13-14]</sup>, 在制备高性能粉末冶金和陶瓷产品中得到了广泛应用。但至今尚未见采用 HIP 烧结制备 AlN-BN 复相陶瓷的报道。本研究采用 HIP 工艺, 在不添加烧结助剂的情况下制备高致密 AlN-BN 复相陶瓷, 并探讨了 HIP 工艺和原料配比对复相陶瓷的显微组织、热导率、体积电阻率的影响。

## 1 实验方法

### 1.1 AlN-BN 复相陶瓷的制备

本研究采用的 AlN 粉末(纯度>99.0%, C<0.1%, Fe<0.2%, O<0.1%, 平均粒径 5~6  $\mu m$ )、BN 粉末(纯度>99.99%,  $B_2O_3$ <0.01%, 平均粒径 5~7  $\mu m$ )均为市售粉末。将 AlN、BN 按  $n_{AlN}:n_{BN}$  为 75:25 和 50:50 的比例分别称量, 置于双锥混料机中, 加入聚氨酯包裹的钢球, 均匀混合 2 h 筛分。采用冷等静压, 使粉末初步致密(冷等静压压力 60 MPa, 保压 5 min, 乳胶包套)。获得的素坯装入内径为 50 mm 的纯钛包套。高温真空(1000℃,  $1.0 \times 10^{-1}$  Pa)脱气、封焊。将封焊好的包套放入 QIH-15 型热等静压设备(ABB 公司)中, 进行热等静压烧结, 升温速度 10℃/min, 烧结温度为 1550℃和 1600℃, 压强分别为 80、90、120 MPa, 保温 3 h 后以 10℃/min 的速度冷却出炉, 去掉纯钛包套, 获得致密复相陶瓷。使用金刚石切割片, 将各种复相陶瓷切成不同厚度的  $\phi 35$  mm 的试样进行性能测试。

### 1.2 复相陶瓷的组织表征与性能测试

试样的实际密度用 Archimede 法测量, 采用 DRL-II 型热流法导热系数测定仪测定导热率( $\phi 35$  mm); 用 PC68 型数字高阻计测定体积电阻; 用数字式显微硬度计测定硬度; 用 JSM-7001F 型场发射扫描电镜分析试样的微观形貌。

## 2 结果与讨论

### 2.1 物相分析

图 1 是 AlN-BN 复相陶瓷的 XRD 图谱, 从图中可以看出采用不同热等静压工艺烧结的两组六个试样(见表 1)的衍射峰基本一致, 试样中有 AlN 和 h-BN 两个主晶相, 未发现其他杂相衍射峰, 获得了纯净的 AlN 和 BN。所有试样中 AlN 和 BN 衍射峰均较尖锐, 随着烧结温度和压强的变化, 峰强和峰宽变化不明显, 说明 AlN 和 BN 的结晶性均较好。从图中还可以看出当  $n_{AlN}:n_{BN}$  为 50:50 时, h-BN 的衍射峰更加明显。

### 2.2 AlN-BN 复相陶瓷的相对密度和硬度

表 1 给出了  $n_{AlN}:n_{BN}$  分别为 75:25 和 50:50 的两种复相陶瓷的热等静压烧结工艺及其相对密度和硬度的测试结果。由表 1 可知, 样品的相对密度都在 95%以上, 采用 HIP 烧结, 在无烧结助剂的条件下也可以得到较高致密度的 AlN-BN 复相陶瓷。在相同的温度下, 随着 HIP 压强的增加, 样品的相对密度增加, 而 BN 的含量对材料的烧结致密化结果影响较小。由表 1 可以看出 3#的压强比 2#的压强低, 但相对密度却比 2#高, 3#的烧结温度比 2#高 50℃。因此随着 HIP 温度的升高, 样品的相对密度提高。因为温度的升高促进了试样的扩散传质<sup>[8]</sup>, 利于粉末的烧结, 相对密度提高。对比 HIP 温度和压强的作用可以看出: 压强提高 40 MPa 时, 相对密度提高较少, 而温度提高 50℃、压强提高 10 MPa 时, 相对密度提高较大, 表明 HIP 温度对 AlN-BN 复相陶瓷的致密化更为重要。因为随着温度升高, 试样中的晶粒不断发育、长大并趋于生长完善, 颗粒间形成紧密接触, 连通状态好, 烧结体相对密度显著提高。

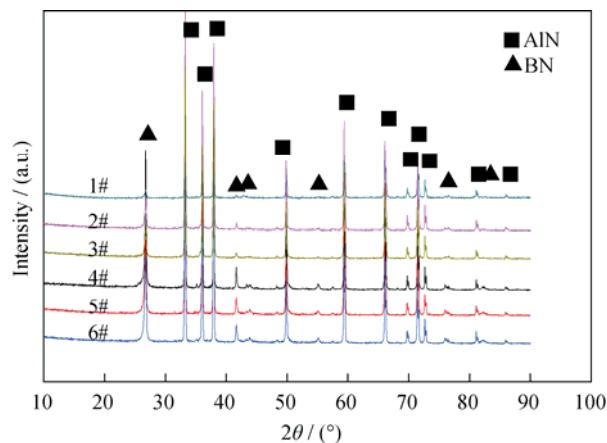


图 1 AlN-BN 复相陶瓷的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of AlN-BN composite ceramics

表 1 AlN-BN 复相陶瓷的制备工艺与致密度和显微硬度

Table 1 Relative density and hardness of AlN-BN composite ceramics prepared by different HIP processes

$n_{\text{AlN}}:n_{\text{BN}}$	Sample number	Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Pressure/MPa	Relative density/%	Vickers hardness/GPa
75:25	1#	1550	80	95.01 $\pm$ 0.05	2.89 $\pm$ 0.08
	2#	1550	120	96.21 $\pm$ 0.03	3.15 $\pm$ 0.13
	3#	1600	90	98.03 $\pm$ 0.05	3.69 $\pm$ 0.09
50:50	4#	1550	80	95.46 $\pm$ 0.03	1.13 $\pm$ 0.15
	5#	1550	120	96.70 $\pm$ 0.06	1.65 $\pm$ 0.12
	6#	1600	90	97.98 $\pm$ 0.08	1.84 $\pm$ 0.10

相同成分的复相陶瓷烧结体, 其相对密度越大, 硬度越高。对比两种不同 BN 含量的复相陶瓷, 还可以看出随着 BN 的增加, 维氏硬度降低。因为 AlN 的硬度显著高于 BN。BN 属于软相, 因此随着 BN 的增加试样的硬度降低, 同时也可以改善复相陶瓷的加工性能。

2.3 AlN-BN 复相陶瓷的微观形貌

图 2 为 AlN、BN 的原始粉末 SEM 照片, 可以看出 AlN 呈现颗粒状, 最大尺寸约为 5~6  $\mu\text{m}$ (图 2(a)), BN 呈现片状, 片直径约为 5~7  $\mu\text{m}$ , 片层厚度为纳米级(图 2(b))。

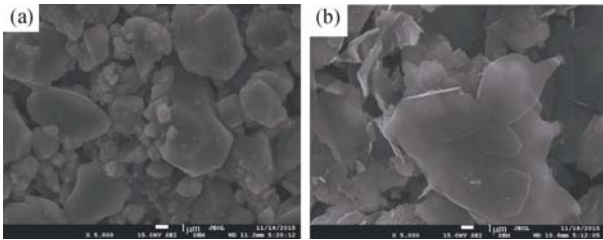


图 2 AlN、BN 粉末的 SEM 照片  
Fig. 2 SEM images of AlN (a) and BN powders (b)

由图 3(a~d)可以看到样品由颗粒状的晶体和细小层片状的晶体组成, 断口表现为穿晶(大颗粒和细小层片)和沿晶(颗粒)的混合, 通过 EDS 分析(图 3(e,f))可知, 颗粒状晶体为 AlN(尺寸约 3~10  $\mu\text{m}$ ), 层片状晶体为 h-BN, 与粉末原料相比, 尺寸没有明显的变化。

从图 3(a)可以看出, 1550 $^{\circ}\text{C}$  HIP 的 AlN-BN 复相陶瓷( $n_{\text{AlN}}:n_{\text{BN}}$  为 75:50)中, 在 AlN 晶粒间存在较大的空隙。同时在一些 AlN 颗粒内部存在着小空隙, 这是多颗 AlN 晶粒合并长大后在其内部形成。当 HIP 温度升高到 1600 $^{\circ}\text{C}$ (图 3(c))时, 复相陶瓷的致密度提高, AlN 晶粒间的空隙大大减少, 但仍可以看出 AlN 晶粒间局部地方存在有小的空隙。 $n_{\text{AlN}}:n_{\text{BN}}$  为 50:50 的 AlN-BN 复相陶瓷具有相似的变化规律(图 3(b,d))。对比图 3(a~d)可以看出, HIP 温度升高

50 $^{\circ}\text{C}$ , 颗粒长大不明显, 但图 3(c,d)中的空隙明显比图 3(a,b)中的少, AlN 与 BN 结合更加紧密, 致密度得到了提高。可见温度的升高对复相陶瓷的致密化作用明显。

叶乃清等<sup>[15]</sup>认为, h-BN 在热压(HP)烧结时, 易形成“卡片式”结构, 导致致密化困难。而在 HIP 条件下, BN 晶粒的“卡片式”结构不明显, 由于 HIP 是各向均匀施压, 且 HIP 的压强明显大于一般 HP 的压强, 可以有效消除这种“卡片式”结构, 从而有利于复相陶瓷的致密化。但是局部区域仍可以看出有这种结构存在(图 3(c)中 A 处), 这是受到 AlN 生长的影响所致。当 AlN 含量较多时, 由于较为粗大的 AlN 晶粒形成骨架, 导致骨架内空隙处 BN 所受热等静压压力减少, 从而出现“卡片式”生长。

2.4 AlN-BN 复相陶瓷热导性能

图 4 为不同厚度的 AlN-BN 复相陶瓷热导率曲线, 从图 4 可以看出, 随着厚度的增加, 复相陶瓷的热导率逐渐下降, 但是下降很少。热导率是材料的固有属性, 不随厚度改变, 造成上述结果的可能原因是在测定过程中由于厚度增加, 试样向环境散发的热量较多, 因此测得的值会有少量的下降。从图 4 可以看出, 样品厚度与测试热导率近似呈线性变化, 厚度增加, 热导率的测试值下降, 因此, 按照线性拟合, 可以得到各样品的实际热导率, 结果列于表 2 中, 相对密度为 98.03% 的 3#( $n_{\text{AlN}}:n_{\text{BN}}$ =75:25)试样的热导率可达 77.29 W/( $\text{m}\cdot\text{K}$ )。相对密度为 97.98% 的 6#( $n_{\text{AlN}}:n_{\text{B}}$ =50:50)试样的热导率为 51.65 W/( $\text{m}\cdot\text{K}$ )。

由 1#和 4#, 2#和 5#, 3#和 6#对比可以看出, 随着 BN 的增加, 热导率明显降低。因为 BN 的热导率本身比 AlN 的低, 因此两者复合热导率降低。

同一配比试样随着烧结温度和压强的升高表现为相对密度的升高, 其材料的导热性能也就越好。因为 AlN-BN 复相陶瓷的热导率主要受晶界厚度、氧杂质含量、第二相的种类、气孔率等因素影响<sup>[16]</sup>, HIP 的温度和压强越高, 所制备的复相陶瓷中 AlN

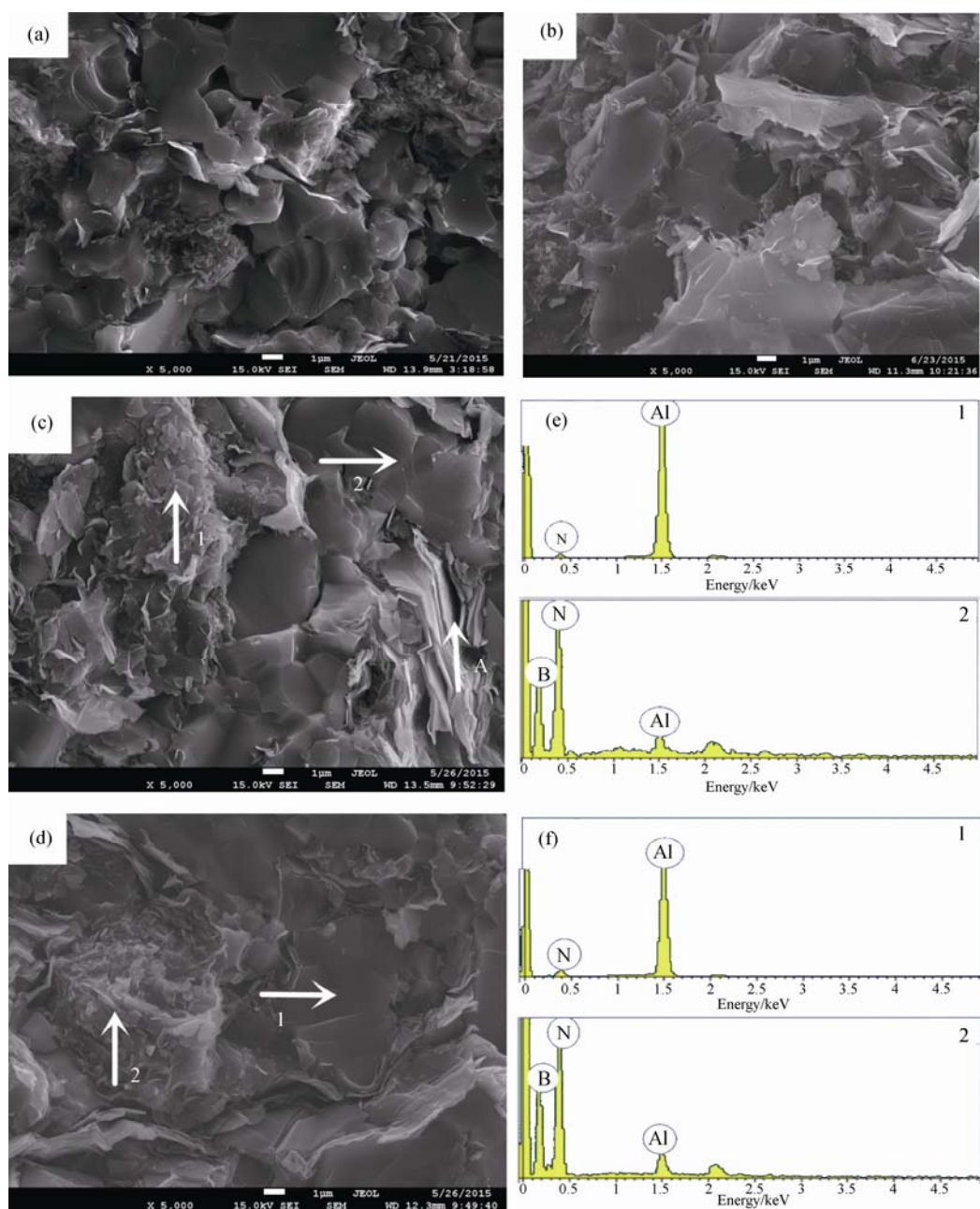


图 3 AlN-BN 复相陶瓷断口的 SEM 照片和 EDS 图谱  
Fig. 3 SEM morphologies and EDS patterns of AlN-BN composites  
(a) 2#; (b) 5#; (c) 3#; (d) 6#; (e) 3#EDS; (f) 6#EDS

表 2 AlN-BN 复相陶瓷的热导率和体积电阻率  
Table 2 Thermal conductivity and volume resistivity of AlN-BN composite ceramics

Sample number	Thermal conductivity/ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	Volume resistivity/ (Ω·cm)
1#	57.39	8.40×10 <sup>14</sup>
2#	68.10	1.10×10 <sup>15</sup>
3#	77.29	1.35×10 <sup>15</sup>
4#	40.21	7.73×10 <sup>16</sup>
5#	40.11	9.15×10 <sup>16</sup>
6#	51.65	1.18×10 <sup>17</sup>

与 BN 晶粒大小均匀、气孔较少、接触紧密连通好, 热导率高。另一方面, Tajika 等<sup>[17]</sup>研究表明, 连续分布的 AlN 晶粒的热导率比孤立分布的 AlN 晶粒高, 因为连续分布的晶粒为声子提供了更为直接的通道, 由图 3 得出相对密度高的 3#试样, AlN 晶粒连续且发育完善, 颗粒接触更紧密, 因此热导率高。

图 5 中曲线 a( $n_{\text{AlN}}:n_{\text{BN}}=75:25$ )和 b( $n_{\text{AlN}}:n_{\text{BN}}=50:50$ )为不同密度样品的热导率变化曲线, 呈现线性的变化关系, 由此得到完全致密的 AlN-BN 复相陶瓷的实际热导率分别为 90.76 W/(m·K)和 59.31 W/(m·K)。



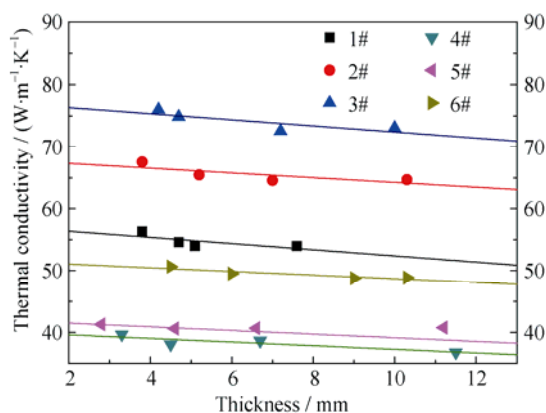
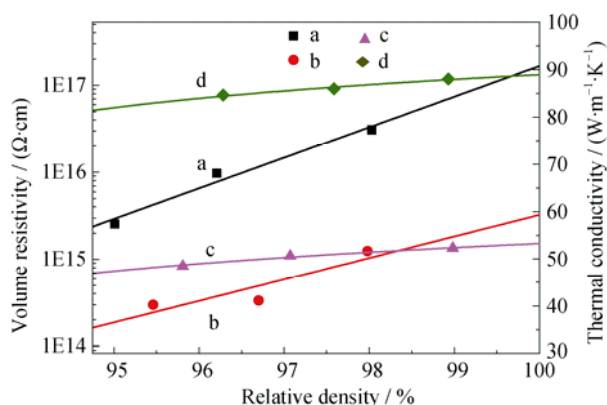


图4 不同厚度的 AlN-BN 复相陶瓷热导率曲线

Fig. 4 Thermal conductivity vs sample thickness curves of AlN-BN composite ceramics

图5 致密度对 AlN-BN 复相陶瓷热导率和体积电阻率的影响  
Fig. 5 The influence of the density of AlN-BN composite ceramics on thermal conductivity and volume resistivity

## 2.5 AlN-BN 复相陶瓷体积电阻率

图6为不同厚度的 AlN-BN 复相陶瓷的体积电阻率曲线,从图6可以看出,同一材料的 AlN-BN 复相陶瓷随着厚度的增加,体积电阻率变化很小,体积电阻率是材料的固有属性,不会随厚度的变化而改变。从图6可知,同一配比的 1#、2#、3#( $n_{\text{AlN}}:n_{\text{BN}}=75:25$ )样品中,2#体积电阻率最高,为  $1.35 \times 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ ,而同一配比的 4#、5#、6#( $n_{\text{AlN}}:n_{\text{BN}}=50:50$ )样品中,6#体积电阻率最高  $1.18 \times 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$ ,因此 AlN-BN 复相陶瓷随着相对密度的升高,其体积电阻率越高。由王得敏<sup>[18]</sup>研究表明,空气的体积电阻率约为  $6.5 \times 10^4 \sim 5.2 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ ,比 AlN 和 BN 的体积电阻率低很多。因此,相对密度升高时,AlN-BN 复相陶瓷的孔隙就越少,粘接更加紧密,电流流过空气比 AlN-BN 复相陶瓷更容易,因而材料的体积电阻率升高。图5中曲线 c( $n_{\text{AlN}}:n_{\text{BN}}=75:25$ )和 d( $n_{\text{AlN}}:n_{\text{BN}}=50:50$ )给出了两种样品的电导率与致密度的关系,呈现线性变化关系,因此可以得到完全致密的两种材料的体积

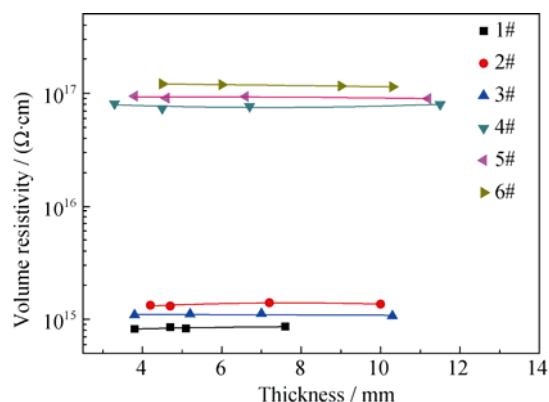


图6 不同厚度 AlN-BN 复相陶瓷体积电阻率曲线

Fig. 6 Volume resistivity vs sample thickness curves of AlN-BN composite ceramics

电阻率分别为  $2.23 \times 10^{15}$  和  $1.49 \times 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$ 。

从图6中的 1#、2#、3#和 4#、5#、6#还可以得出随着 BN 的增加,AlN-BN 复相陶瓷的体积电阻率呈上升趋势。因为高纯的 BN 体积电阻率( $10^{16} \sim 10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$ )大于 AlN( $10^{13} \sim 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ )的体积电阻率<sup>[19]</sup>,因此 BN 增加,进一步阻碍了导电网络的形成与连通,体积电阻率也逐渐增大。

## 2.6 AlN-BN 复相陶瓷复合模型讨论

根据复合材料的复合原理,可以由组成复合材料的各相的性质,得到两相复合材料的性能。但由于复相陶瓷的第二相数量和形态不同,所适用的计算公式差别很大。如前面关于空隙率(致密度)对性能的影响可以使用基于连续介质的稀溶液模型,如文献[20]中的公式(3),结果呈现线性变化关系,与实测结果相符。但对于非连续的基体,则不能利用该公式,由于本文研究的 AlN-BN 复相陶瓷的第二相(BN)体积百分数分别达到 22.5%和 46.6%,并且为非球形颗粒,因此采用文献[20]中的公式(4)、(6)、(8)进行计算,即下列计算公式

$$\lambda_{\text{com}} = \frac{\lambda_2(\lambda_2 + \Phi^{2/3}(\lambda_1 - \lambda_2))}{(1 - \Phi^{1/3})\Phi + \Phi^{2/3}(\lambda_1 - \lambda_2) + \lambda_2} \quad (1)$$

$$\lambda_{\text{com}} = \lambda_1^\Phi \times \lambda_2^{(1-\Phi)} \quad (2)$$

$$\lambda_{\text{com}} = \frac{\lambda_2(\lambda_1 + F(1-\Phi)(\lambda_2 - \lambda_1))}{\lambda_2 - (1-F)(1-\Phi)(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (3)$$

其中(3)式的  $F = \exp[-\varepsilon(\lambda_2 / \lambda_1)^{1/3}]$ ,  $\varepsilon=1$ ,  $\lambda$  为热导率或电导率,  $\Phi$  为第二相所占体积分数,  $\lambda_1$  代表第二相,  $\lambda_2$  为基体相。由于本文研究的 AlN-BN 复相陶瓷中, AlN 相的体积分数分别占到 77.5%和 53.4%,因此将 AlN 作为基体相。根据配比,可以计算出完全致密的 AlN-BN 两相复合材料的  $\lambda$  或  $\sigma$  理论值,由于电导率  $\sigma$  和电阻率  $\rho$  互为倒数,即可得到复相陶瓷的

电阻率  $\rho$ 。

AlN 的热导率取为  $200 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})^{[21]}$ ; h-BN 热导率取为  $33 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})^{[22]}$ , AlN 的体积电阻率取为  $10^{14} \Omega\cdot\text{cm}$ , BN 的体积电阻率取为  $10^{18} \Omega\cdot\text{cm}^{[19]}$ , 可以计算出完全致密的复相陶瓷的理论体积电阻率和热导率, 图 7、8 给出了两种 AlN-BN 复相陶瓷的热导率和体积电阻率的理论值和实测值与 AlN 含量的关系曲线(Act 为实测值, 1、2、3 分别为公式(1)、(2)、(3)式计算值)。

从图 7 可以看出通过(1)、(2)、(3)式算出的热导率实际值均比实测值大。因为 AlN、BN 存在微量的杂质, 杂质将在很大程度上降低复合材料的热导率。通过(3)式两相复合模型计算得到的理论值与实际较为符合。

从图 8 可以看出复相陶瓷电阻率的理论值和实际值都在  $10^{14}\sim 10^{17} \Omega\cdot\text{cm}$ , 变化的范围不算太大, 表明 AlN-BN 复相陶瓷具有良好的绝缘性。通过(1)、(2)式计算出的体积电阻率理论值小于实测值, 而(3)式大于实测值。因为材料中的杂质会增加其导电性,

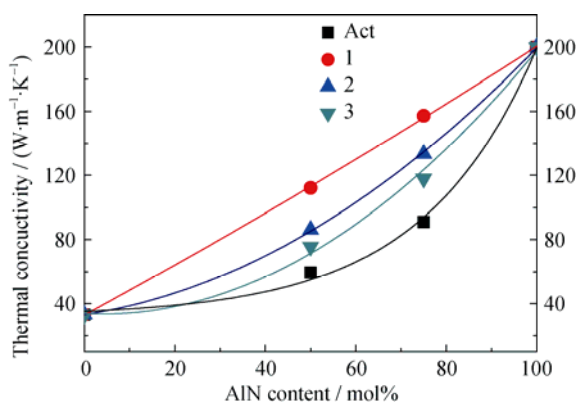


图 7 AlN-BN 复相陶瓷理论与实际热导率

Fig. 7 Theoretical and practical thermal conductivity of AlN-BN composite ceramics

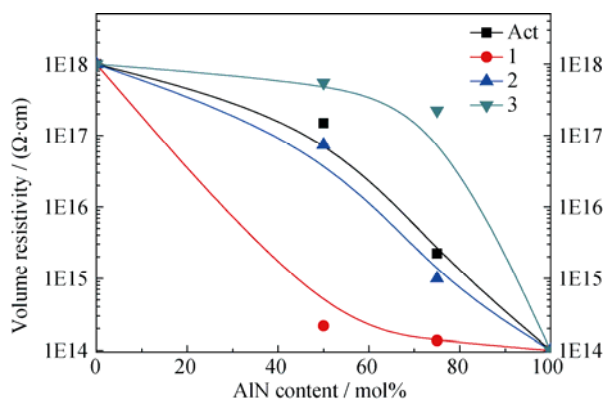


图 8 AlN-BN 复相陶瓷理论与实际体积电阻率

Fig. 8 Theoretical and practical volume resistivity of AlN-BN composite ceramics

实际值应该比未考虑掺杂作用的体积电阻率的理论值要小, 因此(3)式的复合模型较为符合。

### 3 结论

1) 以高纯的 AlN 和 BN 粉末为原料, 采用热等静压烧结工艺在无烧结助剂条件下制备出了高致密的 AlN-BN 复合陶瓷( $n_{\text{AlN}}:n_{\text{BN}}$  分别为 75:25, 50:50)。

2) 研究了原料配比、热等静压工艺对烧结试样的微观结构和性能影响。结果表明:BN 的添加量对材料的烧结致密化进程影响不大, 硬度和热导率随着 BN 的添加量增加而逐渐下降, 体积电阻率增大。对于同样的原料配比, 其相对密度越高, 导热率、体积电阻率、硬度越高。由两相复合模型:

$$\lambda_{\text{com}} = \frac{\lambda_2(\lambda_1 + F(1 - \Phi)(\lambda_2 - \lambda_1))}{\lambda_2 - (1 - F)(1 - \Phi)(\lambda_2 - \lambda_1)}$$

计算得到的复相陶瓷的热导率和电导率(电阻率)的理论值与实际测量结果较为符合。

3) 在  $1600^\circ\text{C}$ 、90 MPa、3 h 的热等静压工艺下, 可以制备出相对密度达 98.03%, 热导率为  $77.29 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 体积电阻率为  $1.35 \times 10^{15} \Omega\cdot\text{cm}$  的 AlN-BN 复相陶瓷。

### 参考文献:

- [1] WANG QI, CUI WEI, GE YI-YAO, *et al.* Carbothermal synthesis of spherical AlN granules: effects of synthesis parameters and  $\text{Y}_2\text{O}_3$  additive. *Ceramics International*, 2015, **41**(5): 6715–6721.
- [2] TIAN ZHUO, DUAN XIAO-MING, YANG ZHI-HUA, *et al.* Effects of AlN content on the thermal properties and thermal shock resistance of BN matrix composite ceramic. *Journal of Inorganic Materials*, 2014(5): 503–508.
- [3] TIAN ZHUO, DUAN XIAO-MING, YANG ZHI-HUA, *et al.* Ablation mechanism and properties of insitu SiAlON reinforced BN-SiO<sub>2</sub> ceramic composite under an oxyacetylene torch environment. *Ceramics International*, 2014, **40**(7): 11149–11155.
- [4] FIRESTEIN KONSTANTIN L, STEINMAN ALEXANDERE, GOLOVIN IGORS, *et al.* Fabrication, characterization, and mechanical properties of spark plasma sintered Al-BN nanoparticle composites. *Materials Science and Engineering*, 2015, **642**: 104–112.
- [5] ZHAO HAI-YANY, WANG WEI-MING, FU Z HENG-YI, *et al.* Effect of combined additives of  $\text{CaF}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  on microstructure and thermal conductivity of AlN-BN composite ceramics. *Journal of Inorganic Materials*, 2008(5): 496–500.
- [6] CHO WONG-SEUNG, CHO MYEONG-WOO, LEE J AE-HYUNG, *et al.* Effects of h-BN additive on the microstructure and mechanical properties of AlN-based machinable ceramics. *Materi-*

- als Science and Engineering, 2006, **418**: 61–67.
- [7] ZHAO HAI-YANG, WANG WEI-MING, FU ZHENG-YI, *et al.* Thermal conductivity and dielectric property of hot-pressing sintered AlN-BN ceramic composites. *Ceramics International*, 2009, **35**(1): 105–109.
- [8] LI YONG-LI, ZHANG JIAN, ZHANG JIU-XING, *et al.* Fabrication and thermal conductivity of AlN/BN ceramics by spark plasma sintering. *Ceramics International*, 2009, **35**(6): 2219–2224.
- [9] KUSUNOSE TAKAFUMI, SEKINO TOHUR, ANDO YOICHI, *et al.* Fabrication of machinable AlN-BN composites with high thermal conductivity by pressureless sintering turbostatic BN-coated AlN nanocomposite powders. *Journal of Materials Research*, 2008, **23**(1): 236–244.
- [10] QIN MING-LI, QU XUAN-HUI, DUAN BO-HAI, *et al.* No pressure sintering high density AlN-BN composite ceramics. *Journal of Inorganic Materials*, 2005(1): 245–250.
- [11] WU YU-BIAO, ZHAN JUN, ZHANG HAO, *et al.* Present situation on low temperature sintering additives of high thermal conductivity AlN ceramics. *China Ceramics*, 2013, **9**: 2.
- [12] KANAI TAKAO, TANEMOTO KEI, KUBO HIROSHI, *et al.* Reaction-bonded boron nitride-aluminum nitride ceramic composites. *Japanese Journal of Applied Physics*. 1991, **30**: 1235.
- [13] BOCANEGRA M H. Hot isostatic pressing (HIP) technology and its applications to metals and ceramics. *Journal of Materials Science*, 2004, **39**: 6399–6420.
- [14] DADBAKHSH S, HAO L. Effect of hot isostatic pressing (HIP) on Al composite parts made from laser consolidated Al/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powder mixtures. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, **212**(11): 2474–2483.
- [15] YE NAI-QINQ, ZENG ZHAO-QIANG. The main obstacle BN matrix composite densification. *Modern Technical Ceramics*, 1998 (1): 10–22.
- [16] KIM W. Morphological effect of second phase on thermal conductivity of AlN ceramics. *J. Am. Ceramic Soc.*, 1996, **79**(4): 1066–1072.
- [17] TAJIKA M, MATSUBARA H, RAFANIELLO W, *et al.* Effect of grain contiguity on the thermal diffusivity of aluminum nitride. *J. Am. Ceramic Soc.*, 1999, **82**(6): 1573–1575.
- [18] WANG DE-MIN. Moist air conducting it? *Wuxi Education Journals*, 2001(3): 79–80.
- [19] 魏鏊钉. AlN/nano-BN 复相陶瓷的 SPS 制备与性能研究. 武汉: 武汉理工大学硕士学位论文, 2007.
- [20] BELOVA I V, MURCH E, MONTE C, *et al.* Simulation of the effective thermal conductivity in two-phase material. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, **153-154**: 741–745.
- [21] LI FA, LIU ZHENG. High thermal conductivity AlN ceramic materials and its application research. *Vacuum Electronic Technology*, 2002(3): 56–58.
- [22] ZHOU WEN-YING, QI SHU-HUA, WU YOU-MING, *et al.* BN/HDPE thermal conductivity of thermal conductive plastic. *Polymer Materials Science And Engineering*, 2008(02): 83–86.