

## C09.先进陶瓷材料

分会主席:吴澜尔、王京阳、王战民、王应德、肖鹏、马淑花

### C09-01

#### 耐火材料行业发展现状与展望

王战民

洛阳耐火材料研究院

### C09-02

#### 结构陶瓷材料的振动气蚀

吕晋军

西北大学

### C09-03

#### 基于新型硼热还原法合成超细硼化物( $ZrB_2$ 、 $HfB_2$ )粉体

郭伟明<sup>1</sup>, 吴利翔<sup>1</sup>, 谭大旺<sup>1</sup>, 曾令勇<sup>1</sup>, 林华泰<sup>1</sup>, 张国军<sup>2</sup>

1.广东工业大学

2.东华大学

超高温硼化物( $ZrB_2$ 、 $HfB_2$ )陶瓷具有高熔点、高硬度、高强度和高导热等性能, 高品质硼化物粉体的合成对于进一步提升其性能至关重要。传统硼热还原法合成的硼化物粉体纯度较高, 但粒径较粗。本研究通过探究传统硼热还原法合成硼化物粉体的粗化机制, 创新性地提出了两种新型硼热还原法合成超细硼化物粉体, 将硼化物粉体粒径从微米级(1-3 $\mu m$ )降低到亚微米级(0.3-0.6 $\mu m$ ), 为制备高性能硼化物陶瓷提供了坚实基础。

关键词: 超高温硼化物( $ZrB_2$ 、 $HfB_2$ )陶瓷; 超细粉体; 硼热还原

### C09-04

#### 基于类塑性变形为控制机理的陶瓷材料快速烧结技术

季伟, 傅正义

武汉理工大学

陶瓷烧结的主要目的是制备高致密且细晶的块体陶瓷材料。传统的烧结方法利用高温下长时间保温的工艺获得密实的陶瓷块体材料, 但晶粒生长严重, 导致性能劣化, 且制备过程能耗高。近年来出现了许多有启发性的烧结新技术, 但在要考虑制备时间的条件下, 依然无法很好地解决陶瓷材料致密化和晶粒生长之间的矛盾。针对这些问题, 我们发展了基于类塑性变形为控制机理的快速致密化制备新技术, 获得了密实度高且晶粒不长大的高性能碳化硼陶瓷材料, 为先进陶瓷的制备和应用提供了新的思路和方法。

关键词: 陶瓷材料; 快速烧结; 致密化; 晶粒生长; 类塑性变形

### C09-05

#### $Gd_2Zr_2O_7/GdPO_4$ 复合材料力学性能及韧化机理研究

颜正, 郭磊, 叶福兴

天津大学

$Gd_2Zr_2O_7$  是一种优异的热障涂层候选材料, 但较低的韧性导致  $Gd_2Zr_2O_7$  涂层寿命不理想。本研究采用  $GdPO_4$  掺杂  $Gd_2Zr_2O_7$ , 研究掺杂量对  $Gd_2Zr_2O_7$  相组成、韧性的影响, 采用化学共沉淀方法制备  $Gd_2Zr_2O_7$  和  $GdPO_4$  粉末, 再将两种粉末球磨混合后 1500 $^{\circ}C$  固相反应 10h 得到 0-50mol%  $GdPO_4$  掺杂的  $Gd_2Zr_2O_7$  复合材料( $Gd_2Zr_2O_7-GdPO_4$ )。高温下  $Gd_2Zr_2O_7$  和  $GdPO_4$  两相共存且没有发生化学反应。复合材料的韧性随着  $GdPO_4$  掺杂量增加先增后降, 其中 30mol %  $GdPO_4$  掺杂时韧性最高, 比  $Gd_2Zr_2O_7$  高 96%。讨论了复合材料的增韧机理: $Gd_2Zr_2O_7$  的断裂模式为沿晶,  $GdPO_4$  掺杂引入了韧性相和较强的  $Gd_2Zr_2O_7/GdPO_4$  界面, 增强裂纹扩展阻力, 提高韧性; 但当掺杂量过大时,  $GdPO_4$  晶粒发生粗化团聚, 导致裂纹扩展模式转为  $GdPO_4$  晶粒穿晶, 降低韧性。

关键词: 热障涂层;  $Gd_2Zr_2O_7/GdPO_4$ ; 力学性能; 韧化机理

## C09-06

### 原位微叠层 TiC/Ti 复合材料的制备、微结构和力学性能

谭友德, 程兴旺, 马兆龙, 徐子祁, 才鸿年

北京理工大学

金属/陶瓷微叠层复合材料是根据仿生学原理, 以陶瓷与金属交替叠加而成的新型层状复合材料。这种复合材料具有陶瓷高硬度和金属高韧性的优点相结合, 利用层状结构的多界面效应, 提高陶瓷材料的韧性。本文以 Ti 箔和石墨纸为原料, 采用原位合成法制备 TiC/Ti 微叠层复合材料, 并对复合材料的组织结构和力学性能进行了表征。观察到 Ti 表面有 TiC 陶瓷相生成, TiC 层与 Ti 层交替排列分布。另外对 TiC/Ti 微叠层复合材料的硬度、弯曲强度、断裂韧性和压缩强度等力学性能进行了测试。由于这种层状结构和延性金属 Ti, 使陶瓷的裂纹出现偏转、钝化和桥联, 提高了复合材料的韧性。这种采用原位扩散方法制备金属/陶瓷微叠层复合材料的工艺过程简单, 具有很好的实用性和应用前景。

关键词: 微叠层 TiC/Ti; 原位合成; 仿生学; 金属陶瓷

## C09-07

### 冷冻干燥法制备 SiC 多孔陶瓷

杨必果, 史忠旗

西安交通大学

碳化硅多孔材料因其良好的理化性能及机械性能, 受到广泛的关注。冷冻干燥法, 是一种绿色环保、孔形貌结构可控的多孔陶瓷制备方法, 通过对水系浆料的冷冻以及在低温下干燥来获得多孔陶瓷。本研究以微米级碳化硅为原料, 以氧化铝作为烧结助剂, 采用冷冻干燥工艺制备了 SiC 多孔陶瓷坯体。研究了浆料浓度、冷冻温度等工艺参数对样品微观形貌、孔隙率以及结构因子(相邻片层间的距离)的影响。研究表明, 采用冷冻干燥工艺制备的 SiC 多孔陶瓷具有定向排布的各向异性孔, 这主要取决于冰在存在温度梯度时, 沿着温度梯度方向生长较快, 垂直于温度梯度方向生长较慢; 随着浆料浓度的增加, 孔隙率逐渐降低, 当浆料的固含量为 20vol%时, 孔隙率约为 75%; 而当固含量为升高到 40vol%时, 孔隙率降低到了 50%; 而冷冻温度会导致浆料的过冷度不同, 从而影响冰晶的形核过程, 改变样品的结构。最后, 对所得坯体在空气气氛中、1400℃下保温 3h, 获得了具有较高强度、孔结构可控的各向异性多孔碳化硅陶瓷。因此, 利用冷冻干燥法可以实现一种简便、灵活的多孔陶瓷的制备。

## C09-08

### 粉煤灰基结构陶瓷研究进展及技术创新

马淑花

中国科学院过程工程研究所

## C09-09

### 碳化硅复合材料扩散焊微观结构分析

贾昕磊, 刘建成, 孟莹, 康世栋, 姜辛灏, 单宏祎

中核北方核燃料元件有限公司

碳化硅复合材料具有优异的高温性能和辐照稳定性, 是非常有应用前景的核燃料包壳材料, 端塞与包壳材料间的连接密封是影响其应用的关键问题之一。本研究采用扩散焊的方式实现了碳化硅复合材料间的连接, 通过扫描电镜和 X 射线衍射仪检测分析了连接界面的微观结构和反应产物。研究表明:连接材料 Ti 与碳化硅陶瓷在接触面发生化学反应, 形成了连续致密的界面层, 反应产物为 TiC 和  $Ti_5Si_3$ 。Ti 与 SiC 复合材料的基体相发生反应, 生成了由碳化钛和硅化钛组成的连续界面层; 复合材料中 SiC 纤维表现出更高的化学稳定性, 连接处只有少量纤维参与反应; 纤维与反应产物之间存在微小缝隙, 阻碍了界面反应向复合材料内部的扩展, 使得反应只能在基体中进行, 反应结束后纤维与界面产物形成了锯齿状的结构。

关键词: 碳化硅陶瓷; 扩散焊; 微观结构; 界面层

## C09-10

### SiBCN 陶瓷材料制备与性能表征

向新宇, 李云凯, 吴超  
北京理工大学

SiBCN 陶瓷材料在高于 1400℃ 的高温环境下依然能够保持非晶态结构, 以其相比于其他陶瓷材料优越的抗蠕变、抗氧化和组织稳定等性能使它成为当前结构陶瓷领域的研究热点之一。本研究采用机械合金化方法和放电等离子烧结方法, 通过不同的粉体配比制备了 4 组复合陶瓷材料, 并对其物相、组织结构、开气孔率、抗弯强度等进行了分析表征, 对 SiBCN 陶瓷的烧结进行了探索实验。研究发现对于普通球磨之后的混合陶瓷粉体进行放电等离子烧结, 也会制备出含有 SiBCN 相的复合陶瓷。XRD 结果显示 BN-SiC-C 复合陶瓷和 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合陶瓷中 SiBCN 相最为明显, 并且这两种复合陶瓷在普通球磨完之后的粉末里就检测到了 SiBCN 相的出现。BN-SiC-C 复合陶瓷主要成分 SiC 和 BCN 相, B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 复合陶瓷主要成分为 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和 BCN 相。以 BN、SiC 和 C 粉体为原料, 制备了试样 1 的混合粉末; 以 B<sub>4</sub>C、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和 C 粉体为原料, 制备了试样 2 的混合粉末; 以 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 和 C 粉体为原料, 制备了试样 3 的混合粉末; 以 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Si、AlN 和 C 粉体为原料, 制备了试样 4 的混合粉末。通过球磨和放电等离子烧结得到 4 个样品, 对其进行测试得到其气孔率依次为 8.72%、12.15%、4.15%、3.67%, 抗弯强度依次为 114.52MPa、50.08MPa、84.21MPa、133.031MPa。

关键词: SiBCN 陶瓷; 放电等离子烧结; 机械合金化; 显微组织; 力学性能

## C09-11

### 机械合金化 2Si-B-3C-N 陶瓷的高温性能

张鹏飞<sup>1</sup>, 于仁红<sup>1</sup>, 杨斌<sup>1</sup>, 贾德昌<sup>2</sup>, 杨治华<sup>2</sup>

1. 河南科技大学
2. 哈尔滨工业大学

本文采用机械合金化和热压烧结工艺制备了非晶及纳米晶 2Si-B-3C-N 陶瓷。采用压缩蠕变试验、高温处理、氧化试验等方法详细研究了该陶瓷的高温性能。实验结果表明, 非晶 2Si-B-3C-N 陶瓷的起始晶化温度约为 1500-1800 °C, 烧结致密化温度约为 1800-1900 °C。纳米 2Si-B-3C-N 陶瓷由 α-SiC, β-SiC 和湍层状 BN(C) 构成, SiC 晶粒的平均尺寸约为 58.19 ± 20.86 nm。将该纳米陶瓷在 1500 °C/125 MPa/真空条件下进行压缩蠕变试验, 发现材料的稳态蠕变速率为 3.4×10<sup>-8</sup> /s; 试验 23 小时后, 材料的宏观变形量仅为 0.54%。将该纳米陶瓷在 1800 °C/N<sub>2</sub> 条件下保温处理 3h 后, SiC 晶粒的平均尺寸仅增大至约 86.75 ± 32.56 nm; 材料的弯曲强度、弹性模量、断裂韧度分别约为 286.9 MPa、98.2 GPa 和 2.74 MPa·m<sup>1/2</sup>。该纳米陶瓷在低于 1400 °C 及 1600 °C 的静态空气中, 具有优良的抗氧化性能。上述实验结果表明, 采用机械合金化和热压烧结工艺制备的 2Si-B-3C-N 陶瓷具有优异的组织热稳定性和良好的高温性能, 有望在冶金、能源、化工、航空航天等高温领域获得重要应用。

关键词: Si-B-C-N 陶瓷; 机械合金化; 高温性能; 热压烧结

## C09-12

### 几种 A 位 MAX 相固溶体的制备和摩擦特性研究

蔡乐平, 黄振莺, 胡文强, 雷聪, 翟洪祥

北京交通大学

MAX 材料具有优良的摩擦性能, 这主要是由于 MAX 相材料所特有的层状结构以及在摩擦表面生成的摩擦氧化膜的作用, 而这层摩擦学氧化物薄膜的形成均与 MAX 相中的 A 元素相关。本实验以 Ti、Al、Si、Sn、TiC 粉为原料, 采用热压烧结方法制备了 Ti<sub>3</sub>Al(Sn)C<sub>2</sub>, Ti<sub>2</sub>Al(Sn)C, Ti<sub>3</sub>Al(Si)C<sub>2</sub>, 以及 Ti<sub>3</sub>Al<sub>0.8</sub>Si<sub>0.2</sub>Sn<sub>0.2</sub>C<sub>2</sub> 固溶体, 并探讨了不同种类和含量的 A 位固溶元素对 MAX 材料结构, 力学性能及摩擦性能的影响。实验利用 XRD 和 SEM 技术对几种 A 位固溶体的物相和微观结构进行分析; 利用高速轮-块式摩擦试验机对几种材料的摩擦性能进行测试, 其中对磨体盘材料为低碳钢和 45 钢, 滑动速度在 5~30 m/s 范围内, 法向载荷为 20~80 N。在将不同 Sn 固溶量的 Ti<sub>3</sub>Al(Sn)C<sub>2</sub> 固溶体与低碳钢盘摩擦中发现, Sn 的加入使得该材料体系摩擦系数在 0.1~0.4 的范围内可调, 并保持良好的耐磨性, 摩擦表面形成了一层摩擦自适应的氧化物薄膜主要由 Al、Sn、Ti 和 Fe 的氧化物组成, 其厚度在 0.5~1.5 μm; 对于 Ti<sub>3</sub>Al<sub>0.8</sub>Si<sub>0.2</sub>Sn<sub>0.2</sub>C<sub>2</sub> 固溶体, 多种 A 位元素的固溶使得材料表现出明显的固溶强化作用, 材料的摩擦系数在 0.17~0.53, 磨损率在 1.78~14×10<sup>-6</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m) 范围内, 摩擦表面氧化膜的厚度随着滑动速度的增加而增加, 速度增加至一定程度时, 摩擦膜厚度基本稳定, 保持在 1.46μm 左右, 摩擦膜主要由

Ti-Al-Si-Sn-Fe-O 的混合物组成。实验结果表明:通过固溶添加不同种类和含量的 A 位元素可以改变摩擦学氧化物薄膜的组成和物理形态,从而可以改变 MAX 材料的摩擦特性,使得 MAX 材料的摩擦性能具有可调控性,扩大该材料的应用范围。

关键词: MAX 相; 固溶体; 制备; 摩擦特性

### C09-13

#### 高导热氮化硅陶瓷的气压烧结制备及性能研究

张博, 武雅静, 史忠旗

西安交通大学

氮化硅陶瓷因具有良好的导热性能和机械性能适合用作电子基板,尤其是作为电动汽车的导热基板,但是其常规的制备方法是热压烧结,成本较高、不适合大批量生产。气压烧结法是一种高效低成本的制备氮化硅陶瓷的方法,在促进烧结致密化的同时可抑制氮化硅的分解。但是由于用作导热基板的原材料氮化硅粉末纯度较高、且能够添加的烧结助剂含量不能过多,给烧结致密化造成困难。本研究通过选定合适的烧结助剂种类及含量、调节烧结工艺,来实现高导热氮化硅陶瓷的制备。研究表明,烧结助剂选用  $MgSiN_2$  和  $Y_2O_3$ ,以  $MgSiN_2:Y_2O_3=2:5$  的配比作为烧结助剂,通过气压烧结所得到的氮化硅陶瓷的热导与机械性能最佳,致密度达到 98%,抗弯强度为 890MPa,热导为  $67(W/(m\cdot K))$ 。在此基础上优化烧结工艺,采用两步气压烧结法,在较低的温度下保温促进颗粒重排,并在较高的温度下促进氮化硅晶粒发育,从而实现陶瓷的致密化进一步致密化和性能提升。最终,通过上述方法成功制备出高强、高导热的氮化硅陶瓷,为其作为导热基板材料应用提供了实验基础。

关键词: 气压烧结; 氮化硅; 热导率

### C09-14

#### 模板剂对羟基磷灰石晶体形貌影响及其影响机理研究

罗晶, 王欣宇

武汉理工大学

以硝酸钙、磷酸氢二铵为原料、尿素为缓冲剂,添加不同模板剂,采用均相沉淀法制备羟基磷灰石晶体。结果表明通过改变模板剂的种类与浓度可获得不同形貌的羟基磷灰石晶体,对模板剂表面张力研究可知,模板剂通过改变溶液固液界面能  $\gamma_{SL}$  来控制羟基磷灰石晶体形貌。

#### 1. 引言

为了获得物相纯净,形貌良好且长径比可控的羟基磷灰石晶体,选择了多种不同模板剂,并选取均相沉淀法来制备羟基磷灰石晶体。

#### 2. 实验方法

选取八种模板剂,四氢呋喃(M1)、二甲亚砜(M2)、乙醇(M3)、草酸(M4)、丙酮(M5)、葡萄糖(M6)、山梨醇(M7)、十二烷基磺酸钠(M8),依次用 M1-M8(浓度相同)代替。再分别选取四种不同浓度(0.0175mol/L、0.035mol/L、0.07mol/L、0.105mol/L,依次用 I、II、III、IV 代替)的四氢呋喃(M1)、山梨醇(M7)、十二烷基磺酸钠(M8)作为模板剂。

实验步骤为:分别配制硝酸钙、磷酸氢二铵水溶液,其  $Ca^{2+}:PO_4^{3-}=1.67:1$ ;缓慢混合加入一定量尿素并调节混合液  $pH=3$ ;加入模板剂混合均匀,95℃ 保温 24 小时后冷却;静置 12 小时,洗涤,60℃ 干燥 24 小时。

#### 3. 结果与讨论

XRD 和 FT-IR 测试结果表明所制备的不同形貌羟基磷灰石晶体物相单一,样品纯度高无杂质。SEM 测试结果表明 M1-M4 模板剂的加入增大了晶须长度,其中,四氢呋喃最优,其长径比可达 40-60,而添加 M5 所得晶体为晶须向球体过渡形态,M6 表面由晶须变成细碎小板片,M7 已初步具有球体形态,M8 表面由连续带状板片构成,形成饱满球体。通过不同浓度模板剂 SEM 测试结果可知,随着 M1 浓度增加,晶须长径比减小;随着 M7 浓度增加,晶体形貌更趋近于球体;所有浓度 M8 均为球体。

由表面张力测试结果可知,表面能在 48-51mN/m 时为晶须形态,且长径比随表面能增大递增;表面能在 33-40mN/m 时为过渡形态,随表面能增大由球体向晶须态转变;当表面能为 27 mN/m 时为球体。

固液界面能  $\gamma_{SL}$  对 HAP 的影响主要是通过晶核自由能  $\Delta G^*$  产生作用的。 $\gamma_{SL}$  越高,  $G^*$  越大,从而促进 c 面的生长,最终生成晶须;反之则抑制 c 面的生长,使晶须变短变宽,最终生长为长板片。

#### 4. 结论

(1) 通过改变模板剂的种类和浓度,可以有效实现对晶体形貌的控制。

(2) 模板剂通过对反应溶液表面能和界面能的改变,来影响晶体形貌。

关键词: 羟基磷灰石; 均相沉淀法; 模板剂; 形貌; 表面能

#### C09-15

##### 轨道交通制动系统用高性能碳纤维增强陶瓷基复合材料的研究

肖鹏, 李杨, 李专

中南大学粉末冶金研究院

As the rail transportation, for instance, Chinese high speed train, rapidly developed in the past decades, the high performance brake materials with excellent thermal resistance, light weight and reliable brake properties is be of urgent demand as replacements for metal brake disk. Carbon fiber perform reinforced dual matrix, carbon and SiC, composites (C/C-SiC) were prepared by a combined processes, namely, chemical vapor infiltration, then followed by liquid silicon infiltration. The microstructures, general physical properties, for instance, flexural, compressive, tensile strength and thermal behavior, tribological behaviors under some typical conditions(for instance, simulated emergency brake for high speed train) and fatigue resistance under different loadings of typical C/C-SiC composites fabricated in our group will be presented in this work. The investigation indicated that the C/C-SiC is a very promising candidate for brake system used in Chinese high speed train with a favorable reliability in long term.

#### C09-16

##### 气相碳氧源溅射合成碳掺杂 Ti-O 薄膜及微图形增效

文峰, 张聪, 麦巍, 李娇, 刘洪武

热带岛屿资源先进材料教育部重点实验室, 海南大学材料与化工学院

世界人口的增长和经济的迅速发展使能源紧缺和环境恶化等问题变得日益严重, 治理环境污染以及开发新能源, 已经成为人类社会迫切需要解决的两个重大问题。二氧化钛氧化性高、稳定性好、对人体无毒以及价格低廉, 具有光催化降解污染物和抗菌杀菌的能力而受到广泛关注, 已被应用于废水处理、大气污染治理、太阳能转化、光解水制氢、自清洁玻璃及防腐等领域。然而,  $\text{TiO}_2$  作为宽禁带半导体材料, 只有在紫外光下才能激发光催化活性;  $\text{TiO}_2$  中产生的光生电子与空穴难以有效地分离且复合率高, 无法完全参与氧化还原反应, 导致光催化效率低; 目前  $\text{TiO}_2$  光催化剂主要利用纳米粉末, 催化剂重复利用时分离成本高、困难大。上述不足导致  $\text{TiO}_2$  光催化材料在很多领域的应用受到限制。通过掺杂窄化  $\text{TiO}_2$  带隙以实现光响应红移至可见光区的固载化薄膜涂覆是解决的途径之一。以  $\text{CO}_2$  气体作为碳源和氧源, 采用磁控溅射法制备碳掺杂 Ti-O 薄膜, 研究不同界面工艺对薄膜力学性能的影响和了不同反应气氛条件下合成薄膜的成分、结构、电化学性能和光催化活性, 采用理论计算模拟优化了三种非金属元素单掺和共掺杂的物理结构模型, 利用基于第一性原理的 MS 软件模拟计算和分析多种模型的能带结构、态密度、模拟吸收光谱。利用 MEMS 技术实现了在 Ti-O 薄膜表面微图形可控制备, 使光线能够在薄膜表面产生多次反射, 进一步增强对光照的利用率以增强材料的光催化性能。结果表明, Ti 金属的缓冲过渡层有利于提升薄膜的耐磨性和膜基结合强度。溅射镀膜中采用  $\text{CO}_2$  反应气体能成功制备出碳掺杂的 Ti-O 薄膜, 薄膜中出现 TiO 晶相。反应气氛中通入  $\text{CO}_2$  气体时, 薄膜柱状晶更明显, 薄膜表面光滑致密。合成的 Ti-O 薄膜表现出一定的光催化活性, 碳的掺杂量、紫外光照射强度和降解物初始 pH 值都对 Ti-O 薄膜的光催化活性有很大的影响。与此同时, 碳掺杂可使光生载流子寿命延长, 电子交换阻力减小。理论计算表明, C 无论是单掺杂还是与 Si 或 P 共掺杂  $\text{TiO}_2$ , 在价带与导带之间都会生成杂质能级, 可被用作电子二次跃迁的“桥梁”, 从而相对较小的能量也能激发电子的跃迁, 促使光生电子与空穴的有效分离。共掺杂比单掺杂  $\text{TiO}_2$  具有更高的可见光催化活性。表面微图形化后的 Ti-O 光催化活性同样也得到了增强。

关键词: 钛氧薄膜; 光催化;  $\text{TiO}$ ; 微图形

#### C09-17

##### 电力与增值化学品共生型陶瓷膜燃料电池

符显珠

深圳大学材料学院

陶瓷膜固体氧化物燃料电池(SOFC)作为一种高效的能量转换装置可以直接将燃料的化学能转化为电能,但当以碳氢化合物为燃料时,产生的 CO<sub>2</sub> 会加重温室效应。为了更清洁高效地利用化石资源,我们开发了一种质子导体陶瓷膜 SOFC 被开发用来将乙烷转化成乙烯,输出电能并且没有 CO<sub>2</sub> 温室气体的排放<sup>[1-6]</sup>。而且相对于氧离子电解质,质子传导具有更低的活化能,质子陶瓷电解质在较低温度(500~700 °C)具更高的离子电导率,有利于 SOFC 进行商业化。相对于传统的乙烷脱氢制乙烯的方法,SOFC 反应器具有更高的选择性,产物容易分离,并且无 CO<sub>2</sub> 排放。

参考文献:

- [1] Liu S B, Liu Q X, Fu X Z\*, Luo J L\*. Applied Catalysis B: Environmental. 2018, 220: 283-289
- [2] Lin J Y, Shao L, Shi F Z, Fu X Z\*, Luo J L\*. Journal of Physical Chemistry C 2018, 122: 4165-4171
- [3] Shao L, Shi F Z, Fu X Z\*, Luo J L\*. International Journal of Hydrogen Energy 2018, 43: 7511-7514
- [4] Fu X Z, Lin J Y, Xu S, Luo J L\*, et al. Physical Chemistry Chemical Physics, 2011, 13: 19615-19623
- [5] Fu X Z, Luo J L\*, Sanger A R, et al. Journal of Power Sources, 2010, 195: 2659-2663
- [6] Fu X Z, Luo J L\*, Sanger A R, et al. Chemical Communications, 2010, 46: 2052-2054

### C09-18

#### LaPO<sub>4</sub> 热障涂层的 CMAS 腐蚀行为研究

郭磊, 颜正, 王琪, 叶福兴

天津大学

LaPO<sub>4</sub> 是一种热障涂层陶瓷层候选材料。本研究采用大气等离子喷涂制备了纳米结构 LaPO<sub>4</sub> 热障涂层,研究了涂层在环境沉积物(主要成分 CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>, CMAS)作用下的腐蚀行为,腐蚀条件为 1250 °C, 1300 °C、1350 °C 热处理 0.5h, 2h 和 10h。采用 XRD、SEM、EDS、TEM 等研究腐蚀产物的相组成、形貌、结构等。1250 °C 热处理 0.5h, CMAS 即已与 LaPO<sub>4</sub> 涂层发生化学反应,在涂层表面形成了连续致密的反应层。该反应层主要由 Ca<sub>2+x</sub>La<sub>8-x</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>x</sub>(SiO<sub>4</sub>)<sub>6-x</sub>O<sub>2</sub> 磷灰石、钙长石和尖晶石组成。在反应层下方,涂层中无明显的 CMAS 痕迹。随着热处理时间延长和温度提升,反应层变厚,但 CMAS 在涂层中的渗入深度变化微小。由于 LaPO<sub>4</sub> 涂层能够与 CMAS 快速反应在表面形成致密反应层而阻挡 CMAS 进一步渗入,所以涂层具有良好的抗 CMAS 腐蚀性能。

### C09-19

#### 耐高温磨损的 WC-Co 基涂层的制备与微观机理研究

严细锋, 王海滨, 宋晓艳

北京工业大学

传统 WC-Co 涂层在 450°C 以下的使用环境中具有优良的耐磨性,但高于此临界温度时,由于氧化速率的增加,其耐磨性急剧下降,严重制约了该类材料的高温应用。在前期工作基础上,本研究提出以一定量的 WB 替代 WC,探索改善传统 WC 基涂层耐高温氧化和磨损性能的新途径及其作用机理。结果表明,随 WB 含量增加,制备涂层具有比传统硬质合金涂层明显提高的硬度、断裂韧性和耐高温磨损性能,其中添加 40wt.%WB 的复合涂层在常温和 600°C 下的磨损速率较传统 WC-12wt.%Co 涂层分别降低了 90%和 77%;在 800°C 条件下,其磨损速率相对于商业化的 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-25wt.%NiCr 涂层分别降低了 89%和 51%。结合变温 XRD、TG/DSC 及 EDS 能谱分析了不同涂层的高温相变和氧化规律,发现添加 WB 的涂层中形成的 WCoB 相具有更好的高温稳定性,有效减少了单质 Co 的选择性氧化,使涂层整体氧化速率明显降低,同时形成的 B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 层覆盖在涂层表面,充当了润滑减磨、降低氧化的作用,进而使涂层获得了优良的耐高温磨损性能。

关键词: 硼化钨; WC-Co 涂层; WCoB; 氧化速率; 耐高温磨损

### C09-20

#### 氮气压对磁过滤阴极真空弧技术制备 CrAlN 薄膜结构与性能的影响

李贝贝<sup>1</sup>, 齐福刚<sup>1</sup>, 欧阳晓平<sup>1</sup>, 曹红帅<sup>1</sup>, 罗文忠<sup>1</sup>, 廖斌<sup>2</sup>, 张志强<sup>1</sup>, 袁辉<sup>1</sup>

1.湘潭大学材料科学与工程学院

2.北京师范大学核科学与技术学院

采用磁过滤阴极真空弧技术在 Al-Si 合金上制备了不同氮气压条件下的 CrAlN 薄膜,并利用 X 射线衍射仪、场发射扫描电镜、X 射线电子能谱仪、纳米压痕仪等仪器对薄膜的结构和性能进行测试和研究。研究结果表明:当氮气压小于 4×10<sup>-2</sup>

Pa 时, 薄膜表面光滑致密, 薄膜成分主要由 c-AlN 相和非晶  $\text{Si}_3\text{N}_4$  相组成, 硬度为  $25\pm 2$  GPa; 随着氮气压的升高, 非晶峰  $\text{Si}_3\text{N}_4$  消失, 薄膜表面粗糙度增大, 薄膜形成了 c-CrAlN 和 c-AlN 相的双相竞争机制; 当氮气压为  $8\times 10^{-2}$  Pa 时, 薄膜硬度达到最高 38 GPa。

关键词: 氮气压; 磁过滤阴极真空弧技术; CrAlN 薄膜

## C09-21

### 柔性二维类石墨烯薄膜的热电性能研究

刘鹏<sup>1,2</sup>, 刘聪聪<sup>1,2</sup>, 徐景坤<sup>1,2</sup>

1.江西科技师范大学

2.江西省有机功能分子研究所

近年来, 石墨烯的发现推动了类石墨烯材料(TMDs、MXene 等)的发展。TMDs 是类石墨烯家族的典型代表, 密度泛函理论证明其拥有高的热电潜能, 我们经化学剥离制备出 1T 相  $\text{MoS}_2$ , 然而较低的电导率抑制了其热电性能。于是我们将 TMDs 与 PEDOT:PSS、rGO 等进行复合, 进一步提高薄膜的电导率和柔韧性。而 MXene 是新兴的类石墨烯材料, 因其出众的电导率受到广泛关注。我们对 MXene 进行部分氧化提高 Seebeck 系数, 得到理想的热电材料。类石墨烯材料不仅性能优越, 而且具有好的柔韧性, 可以发展可穿戴器件。

关键词: 类石墨烯材料; 高柔韧性; 热电性能; 薄膜

参考文献:

- [1] T. Wang, C. Liu, *et al.*, *Nanotechnology*, 2016, 19:285703.
- [2] T. Wang, C. Liu, *et al.*, *J. Polym. Sci. Pol. Phys.*, 2017, 55:997-1004.
- [3] F. Jiang, J. Xiong, *et al.*, *J. Mater. Chem. A*, 2016, 4:5265-5273.
- [4] T. Wang, C. Liu, *et al.*, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2017, 19:17560-17567.
- [5] X. Li, C. Liu, T. Wang, *et al.*, *Mater. Res. Express*, 2017, 4:116410.

## C09-22

### 热障/环境障一体化涂层材料热学性能的声音调控策略

王京阳

中国科学院沈阳金属研究所

## C09-23

### 反应烧结制备 TaC-TaB<sub>2</sub>-SiC 复相陶瓷

顾俊峰, 傅正义

武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室

TaC-TaB<sub>2</sub> 陶瓷是一种很有前景的超高温陶瓷材料, 其通常的制备方法是加入  $\text{B}_4\text{C}$  到 TaC 中, 并与之反应, 从而得到 TaB<sub>2</sub> 第二相。但其制备过程中会引入残余碳, 不利于最终样品的机械性能。为了去除残余碳的不利影响, 本工作在添加  $\text{B}_4\text{C}$  的同时引入 Si, 将两者同时加入 TaC 中, 最终得到了一种新的超高温陶瓷材料:TaC-TaB<sub>2</sub>-SiC。本工作主要研究了该体系的制备过程, 不同组份的致密 TaC-TaB<sub>2</sub>-SiC 陶瓷(>99%)均可在 1900°C, 50MPa, 5min 的条件下制备得到。额外加入的 Si 对产物的致密化、显微形貌、机械性能均有明显的影响。反应过程中硅氧化物瞬时液相的形成对致密化起到了重要的促进作用, 原位形成的 SiC 可以钉扎晶界, 抑制陶瓷材料高温下的晶粒生长, 并且最终由于残余碳的除去, 样品的机械性能得到了显著的提高。

## C09-24

### 原位合成法制备 B<sub>4</sub>C-W<sub>2</sub>B<sub>5</sub> 复合陶瓷及其强韧化机理研究

潘登<sup>1</sup>, 李树丰<sup>1</sup>, 张鑫<sup>1</sup>, 潘渤<sup>2</sup>, 周圣银<sup>1</sup>, 付亚波<sup>3</sup>, Katsuyoshi Kondoh<sup>4</sup>

1.西安理工大学材料科学与工程学院

2.西安热工研究院

3.台州学院 物理与电子工程学院

#### 4.大阪大学接合研究所

碳化硼(B<sub>4</sub>C)陶瓷因致密化烧结温度高(>2200 °C)和断裂韧性与硬度不匹配的问题而阻碍了其广泛应用。为了解决以上问题,本文提出采用粉末冶金法(P/M)通过石墨粉(Gr)与硼粉(B)之间的原位反应(*in-situ*)以降低其致密化烧结温度;同时通过添加碳化钨(WC)以生成五硼化二钨(W<sub>2</sub>B<sub>5</sub>)来提高其断裂韧性的研究思路,制备 B<sub>4</sub>C-W<sub>2</sub>B<sub>5</sub> 复合陶瓷。实验以 B 粉、Gr 粉以及 WC 粉为原料,采用放电等离子烧结法(Spark plasma sintering, SPS)对混合粉末进行固化烧结。制备工艺为:压力 30 MPa、烧结温度 1100 °C-1550 °C-1700 °C 三步保温、烧结时间 5 min-5 min-6 min 的条件下,制备出力学性能良好的 B<sub>4</sub>C-W<sub>2</sub>B<sub>5</sub> 复合陶瓷。分析了 W<sub>2</sub>B<sub>5</sub> 对复合陶瓷的微观结构和力学性能的影响,并对增韧机理进行了探讨。结果表明:当 B<sub>4</sub>C:W<sub>2</sub>B<sub>5</sub>=4:1(摩尔比),在 1700°C 下烧结,致密度达到 100%,硬度为 37.9 GPa,断裂韧性可达 7.8 MPa·m<sup>1/2</sup>。原位反应生成的条状 W<sub>2</sub>B<sub>5</sub> 弥散分布于基体中,起到裂纹的桥接与偏转的作用,当裂纹遇到条状的 W<sub>2</sub>B<sub>5</sub> 时,能够阻碍裂纹的扩展或使得裂纹的扩展路径延长,使得复合陶瓷的断裂方式以穿晶和沿晶混合断裂,消耗更多的断裂能,提高复合陶瓷的力学性能。

关键词:碳化硼;原位合成;B<sub>4</sub>C-W<sub>2</sub>B<sub>5</sub>;断裂韧性

#### C09-25

##### 三元烧结助剂对常压烧结氮化硅陶瓷性能的影响

段于森<sup>1,2</sup>, 张景贤<sup>1</sup>, 李晓光<sup>1</sup>, 白海楠<sup>1,2</sup>, 江东亮<sup>1</sup>

1.中科院上海硅酸盐研究所

2.中国科学院大学

高导热氮化硅陶瓷是大功率电力电子器件散热的关键候选材料。但是目前传统的制备方法工艺复杂,成本很高,低成本制备成为产业化应用的关键。本研究选用高纯 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>(SN-E10, α>95 wt%, UBE Industries Ltd, Yamaguchi, Japan)粉体作为原料, TiO<sub>2</sub>, MgO 和 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (purity>98%; Sinopharm Chemical Reagent Co., Lt)粉体作为烧结助剂, PVB 为粘结剂,通过球磨,干燥,过筛,等静压以及脱粘等工艺后,对试样进行烧结。本文对不同烧结助剂含量、烧结温度和保温时间对于氮化硅陶瓷烧结性能的影响进行了系统研究。实验表明,当烧结助剂含量为 12wt%时,1780°C 保温 2 h 制备出致密的氮化硅陶瓷材料,三点抗弯强度和压痕法断裂韧性分别达到 791(±20) MPa 和 5.88 MPa·m<sup>1/2</sup>。当烧结温度进一步提高至 1810°C,所采用配方样品的断裂韧性均达到 5.8 MPa·m<sup>1/2</sup> 以上。尤其当烧结助剂含量为 9wt%时,材料的热导率可达 65 W/(m·K),进一步延长烧结保温时间至 4 h,材料热导率可提高至 69 W/(m·K),该结果在常压烧结高导热氮化硅体系中为较高水平。因此研究表明 TiO<sub>2</sub>, MgO 和 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 是一种有效烧结助剂体系,能够常压烧结制备高性能氮化硅陶瓷,为低成本制备出可使用的氮化硅陶瓷基板材料提供了可能。

关键词:氮化硅;常压烧结;热导率;三元烧结助剂

#### C09-26

##### 几种非氧化物陶瓷的高温摩擦学性能

海万秀, 陈浩, 马进保

北方民族大学

采用反应热压烧结、热压烧结, SPS 烧结等方法制备了 Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>, SiC, TaC-SiC 以及 ZrB<sub>2</sub>-SiC 等材料,评价了不同对偶、温度、速度、载荷、气氛等因素作用下的材料的摩擦磨损性能,通过分析摩擦界面的微观形貌、成分等,结合材料的力学性能,分析了材料的摩擦磨损机制。重点分析了高温条件下材料的摩擦化学与磨损机制转变。

关键词:非氧化物陶瓷;高温摩擦学;摩擦磨损机制;摩擦化学

#### C09-27

##### 透红外 Y-TZP 陶瓷的制备及性能

毛小建

中国科学院上海硅酸盐研究所

钇稳定的四方多晶氧化锆陶瓷(Y-TZP), 因其优异的强度和韧性成为先进结构陶瓷中的佼佼者,而作为研磨介质、轴承滚珠、插芯套筒、耐磨结构件等在工业领域取得广泛应用;同时也被开发成陶瓷表壳、人工义齿、陶瓷刀等产品走入寻常百姓家。本工作通过压力辅助的烧结方法,成功开发了百纳米尺度的透红外 Y-TZP 陶瓷,赋予了结构陶瓷新的功能和潜

在应用。研究了不同的制备工艺条件对材料显微结构、光学和力学性能的影响关系；研究了材料的中波红外光学特性及其潜在优势；并开发透红外光学头罩样件。研究表明透红外 Y-TZP 陶瓷不但保持了 Y-TZP 陶瓷优异的力学性能，还在 3-5 $\mu\text{m}$  中波红外波段具有良好的光学通过率；尤其是在高温环境下 Y-TZP 陶瓷不但能够保持良好的透过性能，而且自身红外辐射很弱，是潜在的高速导弹红外头罩的候选材料。

关键词：氧化锆陶瓷；透红外材料

## C09-28

### 基于石墨烯的结构功能一体化复相陶瓷

范宇驰，江莞

东华大学

石墨烯作为一种具有卓越性能的二维碳材料，非常适合用作增强相以提高陶瓷基复合材料的力学和电性能。我们利用两种适合宏量制备石墨烯/陶瓷复合材料的方法制备的陶瓷基复合材料展现出优异的力学性能。以氧化铝陶瓷复合材料为例，石墨烯的引入使得复合材料的应变容忍度提高近 40%的同时，还保持了很高的强度和断裂韧性。在电性能方面，石墨烯/氧化铝陶瓷复合材料也展现出低至 0.38vol%的渗流阈值和良好的电导。此外，随着石墨烯含量的增加，在氧化铝陶瓷复合材料中观察到载流子类型发生了由 p 型向 n 型的转变，这主要归因于石墨烯与氧化物基体的协同掺杂效应。进一步研究表明，这一掺杂水平可以通过调节氧化物基体中的氧空位浓度来调控，并在钇掺杂氧化锆陶瓷复合材料中得到了证实。因此，基于石墨烯的氧化物陶瓷复合材料有望作为结构功能一体化陶瓷获得应用。

## C09-29

### 原位光学气相过饱和析出法快速生长超薄壁氧化锌单晶微米管的研究

胡烁鹏，王越，闫胤洲，蒋毅坚

北京工业大学

本文首先通过优化光学气相过饱和析出(OVSP)的方法，成功实现了<0001>取向的超薄壁 ZnO 单晶微米管的生长。通过探索实验条件，陶瓷棒的预烧温度为 600 $^{\circ}\text{C}$ --800 $^{\circ}\text{C}$ ，利用光学浮区炉(10000H-HR-I-VPO-PC)，其满额功率为 6000W，采用 60%的功率(即 60%@6000W)，在光学浮区炉中保温时间 9 小时，得到了具有完整形貌的超薄壁 ZnO 单晶微米管，其截面为正六边形，壁厚仅为 450nm，直径为 75-250 $\mu\text{m}$ 。揭示了通过光学气相过饱和析出法生长超薄壁微米管的机制。所得超薄壁的氧化锌单晶微米管结晶质量良好，可以作光学微腔实现低阈值紫外激光激射。之后，为了提高微米管制备效率，提出了一种快速生长氧化锌微米管的工艺---原位光学气相过饱和析出法(IOVSP)，通过对光学预烧参数的系统研究，获得优化工艺参数，即在光学浮区炉中使用 30%的灯功率进行 6 小时的光学预烧，然后将灯功率直接增加到 60%用于微米管的生长，最终生长出的微米管表面光滑，结构完整，壁厚约为 500 nm。原位光学气相过饱和析出法(IOVSP)比 OVSP 的方法总生长时间可以节省 60%，提供了一种省时的简便方法来生长高质量的超薄壁 ZnO 单晶微米管，为实现其工业化生产创造了有利条件。

关键词：氧化锌微米管；光学气相过饱和析出；超薄壁；光学微腔

## C09-30

### 先进仿生构型陶瓷材料及其能量转换应用

周涵<sup>1,2</sup>，范同祥<sup>1,2</sup>，张荻<sup>1,2</sup>

1.上海交通大学材料学院

2.金属基复合材料国家重点实验室

物竞天择，自然界生物经亿万年进化繁衍出精细构型并具有强大的功能特性。借鉴自然界生物结构设计蓝图，设计开发高效光能转换材料和体系具有重要研究意义<sup>[1, 2]</sup>。研究采用三维直写技术构筑跨尺度人工树叶，发展程序化仿生跨尺度人工光合体系的可控构筑技术路线。得到兼具剪切致稀效应又具高比表面积(259 $\text{m}^2\text{g}^{-1}$ )且孔隙率可调控的 TiO<sub>2</sub> 基直写墨水。人工树叶产 CO 和 CH<sub>4</sub> 的效率是同质同比表面积粉体的 2 倍和 6 倍。基于理论模拟发现气体平均扩散速率提高 2~3 倍，达到扩散平衡所需时间减小了 1 个数量级，CO 产出率提高 1-2 个数量级<sup>[3]</sup>。进一步提出了基于 3D 打印技术的混合维

度石墨烯基复合气凝胶的通用墨水配方和复合构型制备技术,实现了多维度(0D、1D、2D)多纳米功能组分在充分连通的石墨烯基气凝胶网络中的均匀杂化,具有优异的离子、电子传输能力<sup>[4]</sup>。该方法突破了传统电极材料单位面积负载量少的限制,在微型储能器件领域具有重要应用前景。提出了基于3D直写技术程序化构筑石墨相氮化碳基气凝胶薄膜的新方法;建立了墨水配方和空气中以及支撑液池中打印的通用途径;证实了3D直写构筑的复合气凝胶具有宽谱光吸收和太阳能污水净化性能,且具有优异的循环稳定性和易操纵性<sup>[5]</sup>。提出生物构型优化构筑宽谱光能转换体系的学术思想和技术路线,揭示其结构辅助增强近红外光能转换物理机制:结构辅助近红外光吸收增强和表面等离子体谐振所致的电场强度增强的耦合效应,使典型空气污染物异丙醇降解效率在700-800nm波段提升2.85倍<sup>[6]</sup>。

关键词:仿生构型;先进陶瓷;能量转换

参考文献:

[1] *Adv. Funct. Mater.* 2018, DOI: 10.1002/adfm.201705309.

[2] *Chem. Eur. J.* 2016, 22, 9870.

[3] *Chem. Mater.* 2018, 30, 799.

[4] *ACS Nano*, 2018, DOI: 10.1021/acsnano.8b00304

[5] *Adv. Funct. Mater.* 2018, Accepted.

[6] *Scientific Reports*, 2016, 6, 20001.

### C09-31

#### 层数调控 Co/Fe 共掺杂 Aurivillius 相取向陶瓷的磁晶各向异性

顾文<sup>1</sup>, 李晓宁<sup>1,2</sup>, 傅正平<sup>1</sup>, 陆亚林<sup>1,2,3</sup>

1.中国科学技术大学

2.国家同步辐射实验室

3.合肥微尺度物质科学国家研究中心

垂直磁各向异性材料由于其独特的结构与优异的性能,在高密度非易失性存储器和逻辑芯片领域具有巨大的应用潜力。目前,设计低成本且具有良好磁电耦合的垂直磁各向异性材料仍然面临着巨大的挑战。本文通过温和的无压烧结法制备出晶粒具有高度[001]取向的 Aurivillius 氧化物陶瓷  $\text{Bi}_7\text{Fe}_{3-x}\text{Co}_x\text{Ti}_3\text{O}_{21}$  ( $x=0.65, 0.75, 0.85$ ), 并且通过改变样品中钴的含量来调控 Aurivillius 相中钙钛矿的层数,最终观察到材料具有独特的垂直磁各向异性和有趣的铁电各向异性铁电。利用场冷-零场冷(FC-ZFC)曲线及室温下的磁滞回线(MH)曲线详细地研究了不同层数 Aurivillius 取向陶瓷不同方向的磁性能。研究表明,取向陶瓷中的磁各向异性来源于材料本身的磁晶各向异性,并且它的易磁化方向沿着 c 轴。这种奇特的磁晶各向异性可能是由于材料中未淬灭的 3d 轨道与它特殊的层状晶体结构相结合产生的,并且随着样品层数的降低,这种磁晶各向异性逐渐弱,而它的铁电各向异性反而逐渐增强。另外,我们还在该 Aurivillius 氧化物陶瓷中观察到磁电耦合现象。这种特殊的各向异性多铁性能为研究 Aurivillius 材料开辟了新的思路。

关键词: Aurivillius; 垂直磁各向异性; 磁晶各向异性; 取向陶瓷

### C09-32

#### 铝掺杂对 PLZT 透明铁电陶瓷的铁电、介电性能影响

朱斌<sup>1,2</sup>, 何夕云<sup>1</sup>, 赵苏串<sup>2</sup>

1.上海硅酸盐研究所

2.上海大学理学院

锆钛酸铅镧(简称 PLZT)透明铁电陶瓷作为一种新型陶瓷材料,自问世起就因其优异的铁电、压电和光电性能备受瞩目。以 PLZT 透明陶瓷为核心的光器件的调制响应速度与材料本身的相对介电常数密切相关,目前 PLZT 陶瓷在常温下的介电常数较高,器件响应速度仍有待提升。为加快光开关在驱动电场作用下的充放电过程,提升器件响应速度,本工作系统性研究 Al 掺杂 PLZT 透明铁电陶瓷的介电性能、铁电性能以及光学性能,对陶瓷材料的微观结构及其相关性能进行探讨。采用通氧热压烧结工艺制备结构致密、成分均匀的 Al 掺杂 PLZT(8.0/69/31)透明陶瓷,Al 掺杂量  $x=0.0, 0.5, 1.0, 1.5$  mol%,对烧结材料进行性能测试。XRD 测试结果表明 Al 掺杂 PLZT 透明陶瓷后没有出现新衍射峰,仍保持钙钛矿相结构;电滞回线测试表明 Al 掺杂改变了 PLZT 陶瓷的铁电特性,材料由反铁电相转变为铁电相;拉曼光谱的吸收峰强度对比

出现变化, 由 B—O 键伸缩振动峰值变化可推测 Al 进入 PLZT 材料晶胞的 B 位; 由介电温谱可知, Al 掺杂能降低 PLZT 陶瓷在室温条件下的介电常数。

关键词: PLZT; 掺杂改性; 透明陶瓷

### C09-33

#### 烧结工艺对钛酸钡体系玻璃陶瓷性能的影响研究

周敏, 张庆猛, 陈均优, 谭飞虎, 孙竹叶

有研工程技术研究院有限公司

高储能密度陶瓷电容器在高功率脉冲源、高压电力设备、高功率微波源等领域具有广泛的应用。钛酸钡玻璃陶瓷由于具有良好的介电特性作为高压陶瓷电容器介质展现出良好的应用前景。本文采用烧结法制备钛酸钡玻璃陶瓷, 并详细研究了烧结工艺对钛酸钡玻璃陶瓷性能的影响, 制得具有高致密度和高介电常数的钛酸钡玻璃陶瓷。本文采用的制备工艺为:将原材料按化学配比后在高温炉中熔融 2h 倒入冷水中水淬, 再将所得玻璃渣球磨压制成型后在烧结炉中进行热处理。通过探究最佳热处理工艺, 控制晶粒生长尺寸, 制得具有高致密度和高介电常数的钛酸钡玻璃陶瓷。研究表明:当热处理温度为 1230℃, 保温时间为 1h 时, 钛酸钡玻璃陶瓷致密度可达 98.5%, 介电常数为 1108。

关键词: 玻璃陶瓷; 介电材料; 固相烧结法; 钛酸钡

### C09-34

#### 陶瓷微成形的表面润湿性可逆调控与缺陷控制

孟军虎

中国科学院兰州化学物理研究所

### C09-35

#### 闪烧 PZT 压电陶瓷

苏兴华, 白鸽, 贾勇杰, 韩晨曦

长安大学

PZT 压电陶瓷因具有优异的性能而在压电陶瓷领域占据了主导地位。但其烧结温度高, 烧结时 PbO 的挥发会造成性能下降, 并且污染环境。因此, 实现 PZT 压电陶瓷的低温烧结具有重要的研究意义。我们采用电场辅助烧结技术, 在 600 V/cm 的直流电场辅助作用下, 在 538 °C 烧结 30 s 制备出了致密 PZT 压电陶瓷, 成功实现了 PZT 压电陶瓷的闪烧。研究发现, 闪烧发生的温度随着施加电场的增大而降低。在电场为 300, 400, 500 和 600 V/cm 时, 闪烧发生的温度分别为 860, 782, 583 和 538 °C; 所制备样品的平均晶粒尺寸随着电场强度的增大而减小, 其平均晶粒尺寸分别为 3.97, 2.83, 1.89 和 1.68  $\mu\text{m}$ 。研究还发现, 当闪烧发生时, 通过样品中的电流大小对样品的致密化程度和平均晶粒尺寸有重要的影响。在 1000 V/cm 的直流电场辅助下, 改变通过样品中的电流为 10, 20, 30 和 50 mA, 所得样品的相对致密度分别为 83.7%, 88.9%, 92.3%和 94.3%, 平均晶粒尺寸分别为 0.269, 0.371, 0.69 和 1.25  $\mu\text{m}$ 。通过黑体辐射理论, 我们计算了闪烧过程中样品中由于电流而产生的焦耳热, 计算结果发现, 焦耳热不足以使得样品在短时间内(30 s)实现完全致密化。除了焦耳热效应, 外部电场还有可能使得样品中产生了弗伦科尔缺陷, 从而使得物质扩散速率加快, 导致了样品的低温快速烧结致密化。

关键词: 闪烧; PZT 压电陶瓷; 电场; 焦耳热; 缺陷

### C09-36

#### 具有负介电常数的复合陶瓷的制备与性能研究

钱磊

山东大学

常规超材料作为新型超材料的一种, 近年来逐渐引起大家的广泛兴趣。具有负介电常数的复合材料是比较容易获得的一类常规超材料, 在电子和光学等领域具有很大的应用潜力。我们课题组在国内较早的开展了基于复合陶瓷来制备负介电常数材料的研究, 通过在氧化铝陶瓷基体中添加适量的金属相, 在射频范围内获得了负介电性能, 但是由于金属材料的电子浓度和导电性偏大, 所获得的负介电常数数值很大, 难于与磁导率匹配。为了解决这一问题, 我们选用了碳纳米材料作

为导电相，制备了石墨烯-氧化铝和石墨烯-氮化铝等复合陶瓷，通过对碳材料含量的调节，获得了具有负介电常数的复合陶瓷，并研究了复合陶瓷的损耗和导电机制等性能，对负介电性能的产生机理也进行了分析。

#### C09-37

##### 激光辐照富受主型氧化锌微米管微纳结构制备及性能调控研究

黄梓含，闫胤洲，蒋毅坚

北京工业大学激光工程研究院

本文采用 248 nm KrF 准分子激光在大气中辐照光学气过饱和析出法(OVSP)制备的本征富受主型 ZnO 单晶微米管，探究激光辐照对富受主型 ZnO 微米管的表面形貌和荧光特性的调控。研究表明该微米管在能量密度低于 20 mJ/cm<sup>2</sup> 的激光辐照下，表面形貌基本不变；当能量密度上升至 150 mJ/cm<sup>2</sup> 时，表面出现 U 型结构凸起及横向裂缝；在能量密度 300 mJ/cm<sup>2</sup>、150 个脉冲数辐照后，管口附近和侧面均生长了 ZnO 纳米线，管壁表面出现大量絮状和颗粒状单晶，并伴随凸起的纳米线结构。微纳结构的生长机制是在温度梯度环境中，激光诱导 ZnO 蒸发随后在缺陷处重新成核自组织生长。通过光致发光谱(PL)分析表明随辐照能量密度上升，微米管近带边跃迁(NBE)和施主受主对(DAP)发光峰随之下降，验证了微纳结构产生了大量表面态缺陷。激光辐照后具有微纳结构的 ZnO 微米管因具有较大的表体比使得其多级复合结构具备优良的光催化降解性能，可用于微流道片上集成光催化结构，本工作为具有多级结构的结构半导体微腔的制备及应用提供了新机遇。

关键词：氧化锌；微纳结构；激光辐照；光致发光；光催化

#### C09-38

##### 原位热压烧结制备 W 掺杂 Nb<sub>4</sub>AlC<sub>3</sub> 陶瓷材料及其力学性能研究

蔡平，何启明，吴西士，刘学建，刘岩，殷杰，黄毅华，黄政仁

中国科学院上海硅酸盐研究所

以铌、铝、石墨和钨粉为原料，采用原位反应热压辅助法成功制备了 W 掺杂的 Nb<sub>4</sub>AlC<sub>3</sub> 陶瓷[(Nb<sub>1-x</sub>W<sub>x</sub>)<sub>4</sub>AlC<sub>3</sub>，x=0-0.0375]材料。XRD 结果表明，当加入 W 时，基体相(Nb<sub>1-x</sub>W<sub>x</sub>)<sub>4</sub>AlC<sub>3</sub> 和第二相(Nb<sub>1-x</sub>W<sub>x</sub>)C 同时生成。SEM 结果显示(Nb<sub>1-x</sub>W<sub>x</sub>)C 分布在(Nb<sub>1-x</sub>W<sub>x</sub>)<sub>4</sub>AlC<sub>3</sub> 基体相中。当 W 的添加量为 2.5 mol%时，样品(Nb<sub>0.975</sub>W<sub>0.025</sub>)<sub>4</sub>AlC<sub>3</sub> 的室温弯曲强度、断裂韧度和杨氏模量达到最大值 483±21 MPa、8.5±0.3 MPa·m<sup>1/2</sup> 和 382±18 GPa，与无添加 W 的样品相比，分别提高了 59%、15% 和 30%。材料的维氏硬度由 Nb<sub>4</sub>AlC<sub>3</sub> 的 2.5±0.2 GPa 提高至 (Nb<sub>0.9625</sub>W<sub>0.0375</sub>)<sub>4</sub>AlC<sub>3</sub> 的 4.8±0.2 GPa。此外，(Nb<sub>0.975</sub>W<sub>0.025</sub>)<sub>4</sub>AlC<sub>3</sub> 样品在 1400℃下的弯曲强度为 344±4 MPa，是其室温下的 71%，并且仍高于无添加 W 样品的室温弯曲强度(303±22 MPa)。分析表明 W 的固溶和第二相(Nb<sub>1-x</sub>W<sub>x</sub>)C 颗粒的生成是对 Nb<sub>4</sub>AlC<sub>3</sub> 基体起显著强韧化效果的原因。优异的机械性能使得 W 掺杂的 Nb<sub>4</sub>AlC<sub>3</sub> 陶瓷有望作为高温结构材料使用。

关键词：W 掺杂 Nb<sub>4</sub>AlC<sub>3</sub>；固溶体；机械性能；微观结构；原位热压

#### C09-39

##### 激光快速成形 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GAP/ZrO<sub>2</sub> 共晶陶瓷凝固组织研究

刘海方，苏海军，申仲琳，王萌，张军，刘林，傅恒志

西北工业大学材料学院

激光快速成形技术以其柔性制造、成形速度快、适用材料广的特点被广泛应用于航空航天等众多领域。本文采用激光快速成形技术制备 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GAP/ZrO<sub>2</sub> 三元共晶陶瓷，并对其凝固组织进行研究。在 125J/mm<sup>2</sup> 的能量密度下获得了表面光滑平整、无宏观裂纹形成的薄壁状试样。试样由 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、GAP 和 ZrO<sub>2</sub> 三种组元组成，无其他相形成。凝固组织呈现外延生长特征，且层间结合区域组织粗大并易形成颗粒状 GAP 初生相。层内组织呈共晶胞结构，胞内组织细小致密并沿堆积方向生长，层片间距为 0.38μm。表层组织尺寸显著细化，由底部到顶部细化幅度达 60%左右，同时组织形貌由层片状转变为棒状，且在顶部区域易形成 GAP 树枝晶。

关键词：激光快速成形；Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GAP/ZrO<sub>2</sub>；共晶；凝固组织

#### C09-40

##### 高温处理对陶瓷基复合材料碳中间体结构影响的研究

郭茹茹

本次研究利用反应熔渗(RMI)法制备陶瓷基复合材料(ceramic matrix composites, 简记为 CMC)主要有三个步骤。首先, 纤维编织预制体涂覆界面层; 第二步, 带有界面的纤维预制体与液态有机先驱体浸渍、固化和热解, 最终生成多孔的  $C_f/C$  中间体; 最后, 在足够高的温度下用液体硅渗透  $C_f/C$  中间体, 液体硅与碳基体反应形成 SiC。对第二步得到的  $C_f/C$  中间体孔隙结构进行适当的调整时, 能够使液体硅完全浸渗和反应最终得到组织均匀 SiC 基体, 与此同时液态硅又不会与界面层甚至碳纤维反应而破坏纤维。本次研究将  $C_f/C$  中间体分别在 1500℃、1800℃和 2400℃进行高温处理, 分别通过 SEM 形貌观察和压汞法定性和定量地观察了  $C_f/C$  中间体的孔隙结构并且对随后制备的 C/SiC 的微观组织和力学性能进行了测试。结果表明, 在一定范围内, 随着高温处理的温度升高,  $C_f/C$  的孔隙数量增多, 尺寸增大。最佳的高温处理温度为 1500℃左右, 多孔碳中间体的孔隙尺寸在 10μm 左右, 孔隙率为 10%~15%。1500℃和 1800℃的 C/C 试样在渗硅后, 样品中只有一些富 Si 的 SiC 或富 C 的 SiC, 而在 2400℃的样品中有大量的残余硅和残余碳。说明 2400℃高温处理后,  $C_f/C$  的孔隙结构不适宜硅的渗入或反应过程。不同高温处理渗硅后的 C/SiC 材料弯曲强度与温度的关系:  $\sigma_{1500^\circ\text{C}} > \sigma_{1800^\circ\text{C}} > \sigma_{2400^\circ\text{C}}$ 。

关键词: RMI; 高温处理; C/C 中间体; 孔隙结构

## C09-41

### 新型二氧化碳稳定的双相透氧膜材料的设计制备及性能调控

罗惠霞

中山大学, 材料科学与工程学院

混合导体透氧膜(MIECM)在高温条件下(特别是温度高于 700 °C 时)是一种同时具有氧离子和电子混合传导性能的无机致密陶瓷膜。当膜两侧存在一定的氧浓度梯度时, 氧以离子的形式通过晶格中动态形成的氧缺陷由高氧分压区向低氧分压区传递, 同时电子通过在可变价金属离子之间的跳跃向反方向移动。由于同时具有高的氧离子及电子传导能力, 此类材料不需要外加电路就可完成氧传递过程, 而且由于氧的传递是通过晶格振动的形式实现的, 因此混合导体透氧膜理论上对氧具有绝对选择性。具有氧分离、催化、能源转化等多种广阔的应用前景的混合导体透氧膜是目前无机膜材料领域研究的热点之一。但其稳定性差、成本高、制备过程繁琐等问题仍是阻碍其工业应用的关键。针对如何提高混合导体透氧膜的稳定性、降低成本、简化合成步骤, 我们发展了一种简易高效的“一锅法”合成路径, 首次设计并成功制备了一系列用于富氧燃烧发电耐  $\text{CO}_2$  的双相透氧膜材料: 如  $\text{NiFe}_2\text{O}_4\text{-Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{2-\delta}$ <sup>[1]</sup>,  $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Ce}_{0.9}\text{Gd}_{0.1}\text{O}_{2-\delta}$ <sup>[2]</sup>,  $\text{Mn}_{1.5}\text{Co}_{1.5}\text{O}_{4-\delta}\text{-Ce}_{0.9}\text{Pr}_{0.1}\text{O}_{2-\delta}$ <sup>[3]</sup>,  $\text{Pr}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{FeO}_{3-\delta}\text{-Ce}_{0.9}\text{Pr}_{0.1}\text{O}_{2-\delta}$ <sup>[4]</sup>,  $\text{Nd}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{FeO}_{3-\delta}\text{-Ce}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{O}_{2-\delta}$ <sup>[5]</sup>,  $\text{Nd}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{CoO}_{3-\delta}\text{-Ce}_{0.9}\text{Nd}_{0.1}\text{O}_{2-\delta}$ <sup>[6]</sup>, 实验证明这些新材料在纯的二氧化碳氛围中能稳定运行 100 小时以上, 部分材料已经成功用于甲烷部分氧化制合成气, 并且有望用于  $\text{CO}_2$  捕获。此研究解决了该类材料稳定性差、制备复杂的关键科学问题, 为新型双相混合导体陶瓷透氧膜材料的设计制备提供了一条普遍适用的方法和新思。

参考文献:

- [1] Luo H. et al. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2011, 50: 759; *AIChE J.* 2011, 57, 2738.
- [2] Luo H. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2011, 50, 13508.
- [3] Luo H. *J. Membr. Sci.*, 2012, 423-424, 450.
- [4] Luo H. *Chem. Mater.*, 2012, 24, 2148.
- [5] Luo H. *J. Mater. Chem. A*, 2014, 2, 7780.
- [6] Luo H. *J. Mater. Chem. A*, 2018, 6, 84.

## C09-42

### 微纳 SiC 纤维制备、改性和应用

雷永鹏<sup>1</sup>, 王应德<sup>2</sup>

- 1.中南大学 粉末冶金国家重点实验室
- 2.国防科技大学 空天科学学院

一维碳化硅(SiC)纳米材料具有强度高、耐化学腐蚀、耐高温、抗氧化、热导率高和电子迁移率快等一系列的优势, 在催化、传感等领域具有应用前景。本文通过静电纺丝结合先驱体转化法和碳热还原等方法, 设计制备了微纳 SiC 纤维、超细  $\text{ZrO}_2/\text{SiC}$  径向梯度纤维、高比表面积的大孔-介孔-微孔 SiC 超细纤维(MMM-SFs), 并在此基础上通过改性, 制备了高柔性的微

纳 SiC 膜、分级结构 TiO<sub>2</sub>/SiC 异质结微纳纤维, 表征分析了其组成与结构, 研究了其组成结构对气敏传感和光催化分解水制氢性能的影响规律及机理。通过引入助纺聚合物和表面活性剂, 设计了一种新的聚碳硅烷(PCS)纺丝溶液体系, 经静电纺丝、不熔化和高温烧成制备出直径为 500 nm 的 SiC 纤维。基于颗粒增强增韧机理, 利用静电纺丝溶液组分可调的优势, 制备了含钡柔性纳米 SiC 纤维膜。在纳米 SiC 纤维内部原位形成的氧化钡和金属钡纳米颗粒, 将含钡纳米 SiC 纤维的平均孔径降至 11.2 nm, 孔体积降为 0.065 cm<sup>3</sup>/g。相比于普通纳米 SiC 纤维膜, 含钡纳米 SiC 纤维膜的柔性有了极大改善。将 PCS 原纤维先进行熟化处理, 然后经空气预氧化和高温烧成等步骤, 制得了超细 ZrO<sub>2</sub>/SiC 径向梯度纤维。具有径向梯度结构的 ZrO<sub>2</sub>/SiC 纤维具有较好的抗碱腐蚀性能。采用 PCS 为先驱体, 结合静电纺丝法和先驱体转化法, 制备了大孔-介孔-微孔 SiC 超细纤维(MMM-SFs)。MMM-SFs 的直径为 3.7~4.8 μm, 比表面积为 86.1~128.2 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>。以钛酸丁酯为原料, 通过水热法在 MMM-SFs 上可控地生长了 TiO<sub>2</sub> 纳米棒(TiO<sub>2</sub> NRs)和 TiO<sub>2</sub> 纳米片(TiO<sub>2</sub> NSs), 制备出分级结构 TiO<sub>2</sub> NRs@MMM-SFs 和 TiO<sub>2</sub> NSs@MMM-SFs 异质结复合纤维。TiO<sub>2</sub> NSs@MMM-SFs 在 450 °C 时对 100 ppm 丙酮的灵敏度最高为 19.2。同时, TiO<sub>2</sub> NSs@MMM-SFs 传感器的灵敏度与丙酮浓度呈线性相关, 还具有超快的响应时间(3 s)、优异的气敏重现性和超低的检出限(<1 ppm), 在高温气敏传感器领域具有很大的应用潜力。光催化性能测试表明, 在模拟太阳光照射下, TiO<sub>2</sub> NSs@MMM-SFs 的产氢速率最高为 1206.1 μmol g<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>, 是 TiO<sub>2</sub> NRs@MMM-SFs 产氢速率的 1.2 倍, 是纯 TiO<sub>2</sub> NSs 的 1.5 倍。

关键词: 微纳 SiC 纤维; ZrO<sub>2</sub>/SiC 径向梯度纤维; 分级结构; 传感; 光催化

#### C09-43

##### 陶瓷晶粒生长新机理——晶粒有序化合并生长

胡剑峰

上海大学

当前烧结理论对晶粒生长行为的解释都是基于以原子扩散为核心的奥斯瓦尔德熟化理论, 即小晶粒的表面原子扩散到大晶粒表面以外延生长的方式生长。近年, 我们在烧结钛酸锶纳米陶瓷过程中, 观察报道了一种全新的晶粒生长机理——晶粒有序化合并, 即晶粒长大是以小晶粒有序化自组装的方式实现长大; 进一步在复相钛酸锶-钛酸钡陶瓷里发现异质晶粒之间也能有序化合并<sup>[1]</sup>, 从而在长大的晶粒内部形成马赛克结构和大量异质结界面<sup>[2]</sup>。紧接着有多个作者在不同材料的烧结中观察和报道了晶粒有序化合并的现象, 如纳米氧化铝和纳米氧化镍陶瓷等。这新机理的发现将晶粒生长的最小建筑单元由 0 维的原子扩展到三维的小晶粒, 然后其动力学过程并不清晰。我们综合运用 SEM/TEM 电镜的微观结构表征和 SPS 烧结制备技术, 研究钛酸锶纳米陶瓷的晶粒生长机理, 进行新机理的动力学研究。研究表明新机理是以晶粒运动的激活为前提条件, 晶粒表面预融化是重要条件, 晶粒运动激活和表面预融化在新机理激活过程中进行相互协同作用。同时, 我们在陶瓷晶粒生长的动力学研究中发现, 晶粒表面的高生长台阶能(如平整的晶粒表面等)将抑制晶粒的原子扩散—外延生长过程, 从而, 有利于晶粒有序化合并机理的激活发生。晶粒有序化合并机理的研究可为陶瓷性能设计提供一个新思考角度, 尤其是复相陶瓷, 可改善原有性能或获得独特的新性能, 同时, 扩展了现有的烧结理论。

关键词: 奥斯瓦尔德熟化; 晶粒有序化合并; 晶粒生长动力学; 晶粒表面预融化

参考文献:

[1] J. Hu, Z. Shen, Grain growth by multiple ordered coalescence of nanocrystals during spark plasma sintering of SrTiO<sub>3</sub> nanopowders. *Acta Mater.* 60, 6405-6412 (2012).

[2] J. Hu, Z. Shen, Intragranular heterojunctions formed by ordered coalescence of strontium and barium titanate nanocrystals. *Scr. Mater.* 107, 14-17 (2015).

#### C09-44

##### 低温流延成型制备羟基磷灰石多孔陶瓷基片及其渗透性能研究

汤玉斐, 毛梦琛, 徐榕, 赵康, 段子豪

西安理工大学

利用低温流延技术制备羟基磷灰石(HA)多孔基片并将其用作过滤或生物材料。对 HA 陶瓷浆料中有机添加剂的配比进行了优化, 使其适用于流延工艺。进一步研究了浆料固含量和冷冻温度对 HA 多孔基片孔结构的影响规律, 并对样品抗压强度和渗透性进行了测量。结果表明, HA 陶瓷浆料的粘度在 200-300 mPa·s<sup>-1</sup> 以内适宜进行低温流延。制备的 HA 多孔基片孔形貌为管状直通孔, 开孔率高, 闭孔孔隙率仅为 5-10%。当冷冻温度从-15 °C 降至-45 °C 时, 孔径逐渐减小至 5 μm 以下。随着 HA 固含量的增加, 单层 HA 多孔基片的渗透值下降至 20 L·cm<sup>-2</sup>·min<sup>-1</sup>; 当冷冻温度降至-45 °C, 基片的渗透值达

到  $9.5 \text{ L}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ 。同时, 采用 35 wt.%固含量浆料在不同冷冻温度下通过多层流延工艺得到孔隙均匀的多层 HA 多孔基片。三层 HA 多孔基片之间没有明显的界面, 当 HA 浆料在 $-45^\circ\text{C}$ 冷冻时, 多层 HA 多孔基片的抗压强度为 34.98 MPa, 渗透值最低可达  $4.1 \text{ L}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ 。分别利用 35 wt.%, 40wt.%和 45wt%固含量的 HA 浆料多次流延制备 HA 梯度多孔基片。当冷冻温度为 $-45^\circ\text{C}$ 时, 渗透率值约为  $1 \text{ L}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{min}^{-1}$ 。综上, 可通过改变低温流延的不同工艺参数, 实现对 HA 多孔基片的孔结构, 抗压强度和渗透率的控制。

关键词: 羟基磷灰石; 低温流延成型; 多孔基片; 渗透性

#### C09-45

##### 氧化钇掺杂对氧化钪陶瓷高温热防护涂层微观组织及热物理性能的影响

李春, 马岳, 郭洪波

北京航空航天大学

传统的 8YSZ 热障涂层材料在  $1200^\circ\text{C}$  因为相变和烧结而不能长时间服役, 发展新一代耐高温高隔热的热障涂层材料势在必行。 $\text{HfO}_2$  陶瓷与  $\text{ZrO}_2$  化学性质相似, 相变温度更高, 但其热导率较高, 热膨胀系数较低, 限制其作为涂层材料的使用。本研究采用固相烧结法制备了一系列  $\text{Y}_2\text{O}_3$  掺杂  $\text{HfO}_2$  ( $\text{Hf}_{1-x}\text{Y}_x\text{O}_{2-0.5x}$ ,  $0 \leq x \leq 0.2$ ) 陶瓷材料, 研究了  $\text{Y}_2\text{O}_3$  部分稳定掺杂量对其微观组织, 相稳定性和热物理性能的影响。研究表明:氧化钇掺杂量在 20%以内, 随着掺杂量增大, 陶瓷相组成由单斜相转变为单斜相与立方相的混合, 当掺杂量达 20%时, 完全稳定为立方相; 在单斜相和立方相中的钇元素含量几乎不随掺杂量变化而变化, 立方相的体积分数随掺杂量线性增加; 所研究的陶瓷材料均在  $1600^\circ\text{C}$  以内无相变发生; 随掺杂量增加, 陶瓷的热导率逐渐下降,  $\text{Hf}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{1.9}$  陶瓷的热导率最低,  $1200^\circ\text{C}$  时约为  $1.8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ; 与 YSZ 相比,  $\text{Hf}_{0.92}\text{Y}_{0.08}\text{O}_{1.96}$  和  $\text{Hf}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{1.9}$  的热导率在  $1200^\circ\text{C}$  至  $1500^\circ\text{C}$  之间均未出现上升趋势; 随掺杂量增加, 陶瓷的热膨胀系数线性升高,  $\text{Hf}_{0.8}\text{Y}_{0.2}\text{O}_{1.9}$  陶瓷的平均热膨胀系数最高, 约为  $10.44 \cdot 10^{-6}/\text{K}$ 。

关键词: 氧化钇部分稳定氧化钪; 高温稳定性; 热导率; 热膨胀系数

#### C09-46

##### N 含量对磁过滤电弧离子镀(Ti,Al)N 薄膜结构和力学性能的影响

罗文忠<sup>1</sup>, 齐福刚<sup>1</sup>, 曹红帅<sup>1</sup>, 李贝贝<sup>1</sup>, 钟向丽<sup>1</sup>, 廖斌<sup>2</sup>

1.湘潭大学材料科学与工程学院

2.北京师范大学核科学与技术学院

通过控制氮气流量, 采用磁过滤真空电弧离子镀技术在 Al-Si 系合金基体上制备不同 N 含量的(Ti, Al)N 薄膜, 利用 X 射线衍射仪(XRD)、场发射扫描电镜(FESEM)、原子力显微镜、表面轮廓仪和纳米压痕仪对薄膜的结构和性能进行研究。结果表明, (Ti, Al)N 薄膜连续、孔隙率低、组织致密, 成膜效果良好; 随着  $\text{N}_2$  流量的增加, 即 N 含量的增加, 薄膜沉积速率先增加后缓慢下降; 薄膜的显微组织也由明显的柱状晶组织转变为致密细小的颗粒状组织, (Ti, Al)N 薄膜由立方晶体结构, 转变为六方晶体结构, 具有强烈的(111)晶面择优取向; 此外, 显微硬度最大值达到 29GPa, 当腔室压强达到  $8.0 \times 10^{-2} \text{ Pa}$  时显微硬度迅速降低。

关键词: 氮气流量; (Ti, Al)N 薄膜; 铝合金; 力学性能

#### C09-47

##### LiF 添加剂对 $0.95 \text{ MgTiO}_3$ - $0.05 \text{ CaTiO}_3$ 微波介质陶瓷烧结性能的影响

袁世逢, 江娟, 甘霖, 章天金

湖北大学

采用常规固相反应法, 在中温阶段( $1000^\circ\text{C}$ ~ $1200^\circ\text{C}$ )下用 LiF(1-4wt. %)作为烧结助剂, 制备了低温烧结和高  $Q \times f$  值的  $0.95 \text{ MgTiO}_3$ - $0.05 \text{ CaTiO}_3$ (表示为 MT-CT)无玻璃相烧结助剂添加的微波介质陶瓷。研究了 LiF 添加剂对 MT-CT 陶瓷的相组成, 微观结构和微波介电性能的影响。证实 LiF 能够在中温阶段有效地加速 MT-CT 陶瓷样品的致密化过程并降低烧结温度而不会显著的劣化样品的  $Q \times f$  值。当添加 2wt.% 的 LiF 时, 仅在  $1150^\circ\text{C}$  烧结的陶瓷样品的最佳微波介电性质为  $\epsilon_r=17.961$ ,  $Q \times f=70572.4 \text{ GHz}$  和  $\tau_f=-18.96 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ , 比传统 MT-CT 陶瓷的烧结温度低约  $250^\circ\text{C}$ , 而样品的  $Q \times f$  值并没有出现明显的下降, 达到预期的降烧目的。

关键词: 微波介质陶瓷; LiF; 降烧; 微波介电性能; 高  $Q \times f$  值;  $\text{MgTiO}_3$ - $\text{CaTiO}_3$

## C09-48

### 氮化铝粉体的形貌可控燃烧合成及典型应用

史忠旗

西安交通大学

## C09-49

### 熔融渗硅法制备碳纤维增强陶瓷基复合材料的微结构与疲劳行为研究

李杨, 肖鹏, 李专

中南大学粉末冶金研究院

熔融渗硅法(LSI)制备的 C/C-SiC 复合材料具有成本适中、低密度、抗热震、耐高温、耐磨损、力学性能优良和摩擦系数稳定等优点, 在高速重载制动系统及空间结构等领域具有巨大的应用潜力。本研究采用 LSI 工艺制备了连续碳纤维增强的 C/C-SiC 复合材料, 系统研究了 C/C-SiC 复合材料的微结构、静态力学性能。此外, 研究 C/C-SiC 复合材料在拉伸疲劳载荷下的疲劳行为、显微结构演变以及疲劳后的拉伸性能。结果表明:C/C-SiC 复合材料具有良好的静态力学性能。预疲劳加载能提高材料的拉伸强度, 但同时不可避免地降低了材料的弹性模量; 预疲劳循环次数与疲劳应力影响试样拉伸强度, 同时预疲劳加载使 C/C-SiC 复合材料具有“应力记忆”特性, 而该特性仅与最大疲劳应力相关, 且不受循环次数的影响。在 100 万次循环后, C/C-SiC 试样剩余强度均发生衰退, 其主要原因是碳纤维承载能力的衰退与界面的过度弱化。

关键词: C/C-SiC; 疲劳; 微结构; LSI

## C09-50

### 有机树脂基多孔碳材料的制备与孔结构调控

吴西士<sup>1,2</sup>, 朱云洲<sup>1</sup>, 黄政仁<sup>1</sup>

1.中国科学院上海硅酸盐研究所

2.中国科学院大学

多孔碳材料是一种孔隙结构优异的碳素功能材料, 具有比表面积高、导电性好、气孔率高以及良好的化学稳定性等优点, 而被广泛应用在燃料电池、气体吸附分离、超级电容器以及碳化物陶瓷制备所需预制体等领域。孔隙结构特征一定程度上决定了材料的有效性能及其应用范围。如:以多孔碳为预制体制备复杂形状碳化物陶瓷中, 孔结构对最终的陶瓷部件的综合性能有较大影响, 因此控制多孔碳的孔结构和孔隙特征参数具有重要意义。目前, 较为常用的多孔碳材料的制备方法包括:(1)物理/化学活化法; (2)硬/软模板法; (3)聚合诱导相分离法。与其它两种方法相比, 聚合诱导相分离法具有工艺简单, 成本低廉, 易于工业化生产等优势。

本研究采用聚合诱导相分离法, 以有机树脂为原料, 乙二醇为溶剂, 添加  $\text{FeCl}_2$  为催化剂, 在惰性气氛中高温碳化, 制备了孔结构分布均匀、孔径可控的多孔碳材料, 并系统研究了  $\text{FeCl}_2$  含量对多孔碳孔结构的影响。所获得的多孔碳材料平均孔径在 10nm~190nm, 孔隙率在 25.6~63.3%, 孔容为 0.2~0.9  $\text{cm}^3/\text{g}$ , 体积密度在 0.4~1.2 $\text{g}/\text{cm}^3$ , 拓宽了其应用范围。研究发现 随着  $\text{FeCl}_2$  含量从 0%增加到 1%, 多孔碳的平均孔径由 14nm 增加至 190nm, 表现孔隙率由 25.6%提高至 63.3%。 $\text{FeCl}_2$  的加入对多孔碳孔结构的影响主要是因为:在树脂/溶剂固化聚合相分离过程中, 亚铁离子可以与树脂中化合物发生催化络合反应, 使得聚合相分离优先在亚铁离子周围发生, 其原理类似于软模板的作用, 使得碳化后产生更均匀的孔径结构。另外, 亚铁离子的加入有利于固化后固化程度增加。固化程度高试样, 在碳化过程中抵抗收缩能力更强, 这势必会加剧碳化后多孔碳孔结构的差异。但当金属离子添加含量较高( $\geq 3\text{wt}\%$ )时, 碳颗粒开始聚集, 碳支架收缩, 孔径开始变小, 导致三维连通孔减少或消失, 主要是因为金属离子含量过高会使得金属离子聚集, 减弱了其催化效果。

关键词: 多孔碳; 有机树脂;  $\text{FeCl}_2$ ; 孔径调控

## C09-51

### $\text{TiO}_2$ 掺杂 ErSZ 的相成分、热导率和力学性能研究

王琪, 郭磊, 颜正, 叶福兴

天津大学

采用化学共沉淀方法制备了 3.5mol% $\text{Er}_2\text{O}_3$  稳定  $\text{ZrO}_2(\text{ErSZ})$ , 采用球磨在 ErSZ 中混入  $\text{TiO}_2$  再在 1500 $^\circ\text{C}$  固相反应 10h。研究  $\text{TiO}_2$  掺杂对 ErSZ 相组成、热导率、力学性能的影响。ErSZ 为亚稳态四方相( $t'$ ), 5mol%和 10mol% $\text{TiO}_2$  掺杂时化合物

依旧为  $t'$  相, 但掺杂量为 15mol% 时出现  $m$  相, 且  $m$  相含量随  $TiO_2$  掺杂量增加而增多。  $TiO_2$  掺杂 ErSZ 的热导率随掺杂量的增多先降低后升高, 当掺杂量为 10mol% 时具有最低的热导率, 其中热导率升高的主要原因是形成了高热导率的  $m$  相。随着  $TiO_2$  掺杂量的增加, 化合物的韧性先提高后下降, 相关机理在于相组成的变化。掺杂量较低时, 化合物为  $t'$  相且四方度增加, 导致韧性增高; 但过多的掺杂导致出现  $m$  相, 使得韧性下降。

关键词: 热障涂层; 掺杂; 相成分; 热导率; 韧性

## C09-52

### 高导热氮化铝陶瓷覆铜板的制备及性能研究

武雅静, 张博, 史忠旗

西安交通大学

氮化铝陶瓷热导率高, 绝缘性能和机械性能良好, 因此成为大功率和高集成模块制作的基础关键材料。直接覆铜法(Direct bonded copper method, 简称 DBC 法)是目前最常采用的、最适用于工业生产的陶瓷覆铜板的制备方法。本研究通过调控氮化铝基板氧化层厚度以及铜箔含氧量、调节烧结工艺, 来制备覆铜厚度可控、高导热、高敷接强度的氮化铝陶瓷覆铜板并对其性能进行分析研究。研究表明, 氮化铝氧化层厚度为  $10\mu m$ , 铜箔厚度  $0.3mm$ 、含氧量  $0.12\%$  时, 通过直接覆铜法制备的氮化铝覆铜板的性能最优: 热导率为  $193W/(m\cdot K)$ , 剪切强度为  $15MPa$ , 气孔率  $0.45\%$ , 界面产物为  $CuAlO_2$ ; 并通过表征为  $AlN-Al_2O_3-CuAlO_2-Cu$  的规则的层状结构。最终, 通过上述方法成功制备出覆铜厚度可控、高导热、高敷接强度的氮化铝覆铜板, 分析覆接机理, 也为工业实际应用提供了参考。

关键词: 氮化铝; 直接覆铜法; 热导率

## 墙展

## C09-P01

### 反应熔渗法制备 2.5D 连续 SiC 纤维增强 SiC 陶瓷基复合材料

李腾, 沙江波

北京航空航天大学

实验分别采用反应熔渗工艺(RMI)和前驱体浸渍裂解工艺(PIP)制备出 2.5D 的连续 SiC 纤维增强 SiC 基体的陶瓷基复合材料。探索不同制备工艺对陶瓷基复合材料力学性能的影响, 包括材料的抗拉强度、杨氏模量、抗压强度、面内剪切强度、层间剪切强度、断裂韧性等。并通过断口分析纤维、界面层和基体在材料形变过程中的作用, 探究陶瓷基复合材料的断裂形式和断裂机理, 并优化制备工艺。

关键词: CMC; PIP; SiC/SiC

## C09-P02

### B 位复合取代对 BNT 微波介质陶瓷结构和性能的改性

安少波, 江娟, 甘霖, 章天金

湖北大学

本文采用固相合成法, 通过 Al 和 Nb 对 B 位的复合取代来制备  $Ba_4Nd_{9.33}Ti_{18-x}(Al_{0.5}Nb_{0.5})_xO_{54}$  微波介质陶瓷, 对样品进行 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、体积密度以及微波介电性能测试。BLT(L=Nd, Sm, La, Pr 等)微波介电陶瓷具有高的介电常数和品质因数, 但其谐振频率温度系数较大, 且烧结温度比较高, 通过对 BNT 微波陶瓷进行 B 位复合取代, 可以减小晶胞体积, 改善其氧八面体扭转程度, 促进样品的致密化, 达到优化其微波介电性能的目的, 而且  $Al_2O_3$  的加入具有降低体系烧结温度的作用。研究表明: 复合取代能在一定程度上降低其烧结温度(从  $1400^\circ C$  降至  $1300^\circ C$ ), 提高品质因数, 减小谐振频率温度系数。当  $x=1.2$  时, 样品可在  $1300^\circ C$  获得最佳微波介电性能:  $\epsilon_r=76.644$ ,  $Q\times f=10634.3GHz$ ,  $\tau_f=26.25ppm/^\circ C$ 。

关键词: 微波介质陶瓷; B 位复合取代; 微波介电性能

## C09-P03

### SiC-MoSi<sub>2</sub>-AlN 复相陶瓷的电学行为研究

郑嘉棋, 陈健, 黄政仁

碳化硅(SiC)陶瓷主要应用于结构陶瓷领域, 针对其导电性能的研究较少, 同时较高的电阻率阻碍了其在电阻元器件领域的应用拓展。本实验选择 AlN 作为掺杂相, 选择 MoSi<sub>2</sub> 作为导电相, 调控 SiC 陶瓷的电阻率。以常压液相烧结 SiC-MoSi<sub>2</sub>-AlN 复相陶瓷材料为研究对象, 研究了 MoSi<sub>2</sub> 含量和烧结温度对 SiC 基复相陶瓷力学性能和电学性能的影响。研究表明:液相烧结 SiC 基复相陶瓷表现出明显的非线性伏安电学特征, 电阻率主要由晶界电阻控制; 当体系中 MoSi<sub>2</sub> 含量增加时, 陶瓷的伏安曲线由非线性逐渐转变为线性, 同时晶界电阻迅速减小, 当含量超过 7.5 wt%时晶界势垒被击穿, 晶界电阻可被忽略; 利用渗流公式拟合发现陶瓷电阻率与 MoSi<sub>2</sub> 体积分数的关系遵循渗流理论; 对于含 15 wt%MoSi<sub>2</sub> 的 SiC 基陶瓷, 随着烧结温度升高, 致密性逐渐提升, 晶粒间接触更加紧密, 晶界电阻逐渐下降, 同时伏安曲线由非线性向线性发生转变。综上所述, 通过调节体系中 MoSi<sub>2</sub> 导电第二相的含量即可调控 SiC 基复相陶瓷的电阻率, 同时将其转变为线性欧姆电阻, 以满足其在导电加工及电子电路领域的使用要求。

关键词: SiC; 液相烧结; 非线性电阻; 渗流

#### C09-P04

##### 热压烧制备自润滑 MCMBs-SiC 复合材料与其性能研究

王晓洁<sup>1,2,3</sup>, 姚秀敏<sup>1</sup>, 刘学建<sup>1</sup>, 黄政仁<sup>1</sup>

- 1.上海硅酸盐研究所
- 2.上海科技大学
- 3.中国科学院大学

在碳化硅基体中引入较软的第二相可有效降低碳化硅材料干摩擦条件下的摩擦系数, 本文采用中间相碳微球(mesocarbon microbeads)与  $\alpha$ -SiC 经球磨混合, 以 B 和 C 为烧结助剂, 经两步加压, 热压烧制备出了高碳含量, 高致密, 低摩擦系数的中间相碳微球-碳化硅(MCMBs-SiC)复合材料。探究了两次加压的温度点及压强对材料致密化的影响, 发现在 900°C 开始加压 40MPa 最有利于材料的致密化, 这是由于在此温度时中间相碳微球中碳-氢键的裂解得以完全进行, 而在此温度之前加压不利于气体排出, 而在此温度之后加压则可能导致碳微球在高温下塌缩为不规则球体, 流动性降低, 颗粒间摩擦力增大, 从而难以紧密堆积, 导致高温下的致密化受阻。同时分别对材料平行于压力方向与垂直于压力方向上的宏观力学性能和微观组织进行了分析, 结果表明, 垂直于热压方向材料的硬度和弯曲强度均略高于平行于热压方向的对值, 而断裂韧性测试结果与之相反。对材料的微观结构进行了分析, 发现在不同方向上, 碳微球的排布具有差异, 这是由于在压力作用下, 碳微球的形状由球形塌缩为片状或棱形, 同时在压力的驱动下定向排列。同时对材料的干摩擦性能进行了表征, 发现垂直于热压方向上材料的摩擦系数较低约 0.22, 磨损面积较小, 而同样实验条件下, 平行于热压方向表面的摩擦系数较高约 0.31, 这是由两个方向上的碳微球排列的方向性导致的。

#### C09-P05

##### 原位合成微叠层 TiC/Ti 复合材料的微观结构和力学性能

谭友德, 程兴旺, 马兆龙, 徐子祁, 唐媛尧  
北京理工大学

金属/陶瓷微叠层复合材料是根据仿生学原理, 以陶瓷与金属交替叠加而成的新型层状复合材料。这种复合材料具有陶瓷高硬度和金属高韧性的优点相结合, 利用层状结构的多界面效应, 提高陶瓷材料的韧性。本文以 Ti 箔和石墨纸为原料, 采用原位合成法制备 TiC/Ti 微叠层复合材料, 并对复合材料的组织结构和力学性能进行了表征。观察到 Ti 表面有 TiC 陶瓷相生成, TiC 层与 Ti 层交替排列分布。另外对 TiC/Ti 微叠层复合材料的硬度、弯曲强度、断裂韧性和压缩强度等力学性能进行了测试。由于这种层状结构和延性金属 Ti, 使陶瓷的裂纹出现偏转、钝化和桥联, 提高了复合材料的韧性。这种采用原位扩散方法制备金属/陶瓷微叠层复合材料的工艺过程简单, 具有很好的实用性和应用前景。

#### C09-P06

##### 超硬磨料表面处理技术的研究与发展

施江<sup>1,2</sup>, 何峰<sup>1,2</sup>, 谢峻林<sup>1,2,3</sup>, 刘小青<sup>3</sup>, 杨虎<sup>1</sup>

- 1.武汉理工大学材料科学与工程学院
- 2.武汉理工大学硅酸盐建筑材料国家重点实验室

### 3.武汉理工大学材料研究与测试中心

超硬砂轮在高效精密加工制造领域发挥着越来越重要的作用，超硬磨料在超硬砂轮加工工件过程中起主要的磨削作用。然而，结合剂对磨料的把持力较弱以及磨料自身高温热稳定性较差却逐渐成为制约高性能超硬砂轮应用与发展的关键问题之一。首先论述国内外超硬磨料(cBN 和金刚石)表面处理技术的方法及研究发展动态，主要包括:表面活化处理(酸洗、碱洗以及表面氧化处理等)、表面金属化镀覆(Ti 和 Cr 等镀覆)以及表面氧化物包覆( $\text{SiO}_2$ 、 $\text{TiO}_2$  以及  $\text{Al}_2\text{O}_3$  等包覆)。通过分析发现以上表面处理方法都能使超硬磨料与结合剂之间形成化学结合，达到增强结合剂对磨料把持力的目的，从而改善超硬砂轮的性能。此外，在论述过程中同时总结和比较了各种超硬表面处理方法的优势与不足之处。最后提出了进一步开展超硬磨料表面处理研究的可行途径，并对超硬磨料表面处理技术的前景进行了展望。

关键词：超硬砂轮；cBN；金刚石；表面处理；镀覆

#### C09-P07

##### 合成路径对锆钛酸钡钙陶瓷性能的影响

王玮，何君宇，赵璐，宋诗雨

辽宁工程技术大学

锆钛酸钡钙陶瓷是一种新兴的无铅压电陶瓷材料，近年来受到了广泛的关注。然而不同研究者合成的锆钛酸钡钙材料在性能上往往存在较大差异，最近有研究者指出这可能和合成该材料时所选择的原材料有关。目前采用固相合成法合成该材料时，研究者选择原料时一个最主要的差别是锆源的选择，统计结果表明采用锆酸钡做锆源的材料在性能上整体要优于采用氧化锆做锆源的材料。但是采用锆酸钡为锆源的一个显著缺点是价格成本过高。而实际上采用锆酸钡为锆源的好处在于预先形成了钙钛矿结构，因此利用氧化物合成钛酸钡、锆钛酸钡等作为前驱体，再合成锆钛酸钡钙从而获得性能良好的材料是可行的。基于以上背景，本研究采用廉价的氧化锆为锆源，利用不同合成路径制备了不同的前驱体材料，在前驱体基础上合成锆钛酸钡钙压电陶瓷。本研究对不同合成路径的锆钛酸钡钙材料的压电性能、介电性能等性能进行了研究。实验结果表明，首先合成钛酸钡做前驱体，再以钛酸钡为原料合成的锆钛酸钡钙陶瓷具有最佳的性能。

关键词：锆钛酸钡钙陶瓷；合成路径；压电性能

#### C09-P08

##### 基于光固化原理的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 陶瓷材料数字光处理增材制造研究

张可强，丁国娇，谢晨，王敏，何汝杰

北京理工大学

基于光固化原理的数字光处理增材制造工艺因其成型精度高、速度快、节省原料等优势，在陶瓷材料复杂结构件的增材制造中具有较为广阔应用潜力。本文发展了适用于光固化成型的了  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -光敏树脂浆料，建立了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷材料的数字光处理增材制造工艺方法。论文首先研究了分散剂种类、用量及陶瓷固含量对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  浆料的流变性能的影响，探索了其分散机理及陶瓷颗粒表面的物理化学问题，结果表明分散剂 KOS110 具有较好的分散作用，添加量为 5wt% 时，浆料的粘度较低，分散性能最好，分散剂与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒间主要通过化学吸附作用。采用数字光处理方法实现了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷浆料的高精度、快速成型，并研究了不同工艺参数对生坯力学性能的影响规律，最终成功实现了固含量高达 60vol% 的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -光敏树脂浆料的复杂结构件增材制造。

关键词：增材制造；光固化；数字光处理； $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷

#### C09-P09

##### 基于放电等离子体烧结的碳化硼陶瓷致密化及晶粒细化研究

周梓良<sup>1,2</sup>，李婧<sup>1</sup>，李波<sup>1</sup>，张帅<sup>1</sup>，王锋<sup>2</sup>

1.中国工程物理研究院激光聚变研究中心

2.重庆交通大学材料科学与工程学院

碳化硼陶瓷具有高硬度、高熔点、低密度和耐磨损等性能，在装甲材料、防火材料、切削材料和耐磨零件等领域有着广泛的应用。本文基于放电等离子体烧结技术，对碳化硼陶瓷制备过程的致密化和晶粒细化进行了研究。通过对放电等离子体烧结过程中的烧结温度(1600-1900℃)、烧结压力(20-100MPa)、升温速率(20-100℃/min)以及保温时间(0.5-8min)进行了

系统研究, 获取了一系列因素对碳化硼陶瓷烧结后的致密度和晶粒尺寸的影响规律。采用密度计和扫描电子显微镜分别对获取的碳化硼陶瓷样品的密度、表面和断面形貌进行了测量和观察。结果表明, 碳化硼陶瓷的密度随着烧结压力和烧结温度的升高而增大, 随着升温速率的增大而降低。此外, 碳化硼陶瓷的晶粒尺寸则是随着烧结温度的提高和保温时间的增加都表现出增大的趋势, 而随着升温速率的增大而减小。当烧结温度为 1700-1800℃、升温速率为 60℃/min、烧结压力为 60MPa 且保温时间不超过 6min 时, 碳化硼陶瓷能够同时具有较高的相对密度和较细的晶粒。

关键词: 碳化硼; 放电等离子体烧结; 致密度; 细晶粒

#### C09-P10

##### Ti 过渡层厚度对铝合金表面 Ti-DLC 涂层结构和机械性能的影响

曹红帅<sup>1</sup>, 齐福刚<sup>1</sup>, 欧阳晓平<sup>1</sup>, 李贝贝<sup>1</sup>, 罗文忠<sup>1</sup>, 钟向丽<sup>1</sup>, 廖斌<sup>2</sup>

1.湘潭大学材料科学与工程学院

2.北京师范大学核科学与技术学院

采用磁过滤阴极真空弧技术, 以 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 气体为前驱体, 99.9%的纯钛为反应靶材, 通过调节 Ti 过渡层的沉积时间, 在铝合金表面沉积得到不同 Ti 过渡层厚度的 Ti 掺杂类金刚石(Ti-DLC)涂层。通过 X 射线衍射仪, 拉曼光谱, X 射线光电子能谱仪, 表面轮廓仪、纳米压痕仪, 摩擦试验和划痕试验研究了 Ti 过渡层厚度对 Ti-DLC 涂层成分、结构、力学性能和膜-基结合强度的影响。结果表明, Ti-DLC 涂层的结构和性能强烈依赖于 Ti 过渡层的厚度。随着 Ti 过渡层厚度的增加, 涂层中 sp<sup>3</sup> 碳含量先升高后降低, 残余应力逐渐减小。当 Ti 过渡层厚度为 1132nm 时, 涂层的纳米硬度达到最大值 37GPa, 并且膜与铝合金基体之间的结合强度提高至 42.4N 以上。此外, 铝合金表面 Ti-DLC 涂层的平均摩擦系数为 0.13, 与铝合金表面相比提高了 50%左右。

关键词: 磁过滤阴极真空弧; Ti-DLC 涂层; Ti 过渡层; 厚度; 机械性能

#### C09-P11

##### CrAlN 基硬质涂层的力学及抗氧化性能研究进展

李贝贝<sup>1</sup>, 齐福刚<sup>1</sup>, 欧阳晓平<sup>1</sup>, 曹红帅<sup>1</sup>, 罗文忠<sup>1</sup>, 廖斌<sup>2</sup>, 张志强<sup>1</sup>, 袁辉<sup>1</sup>

1.湘潭大学材料科学与工程学院

2.北京师范大学核科学与技术学院

综述了以 CrAlN 为基的多元合金涂层和纳米技术涂层在力学性能、高温抗氧化性能上的研究现状, 并简要描述了 CrAlN 涂层的结构和 Al 原子的含量、存在方式对涂层力学和热学性能的影响。研究表明:对 CrAlN 基多元涂层和纳米技术涂层的组成相分析、复杂界面设计及结构设计的研究和探讨是提高 CrAlN 基涂层力学性能、高温抗氧化性能的重要手段。

关键词: CrAlN 基涂层; 力学性能; 高温抗氧化性能

#### C09-P12

##### 先驱体转化法制备 SiCF/SiC 复合材料研究进展

李志坚

北京航空航天大学

随着航空工业的不断发展, 对适用于超高温工作环境下的高性能材料需求十分迫切, 提高复合材料的综合性能十分必要。由于低密度、高强度、高韧性、抗烧蚀等优异特性, 使连续碳化硅纤维增韧碳化硅陶瓷基复合材料成为理想的高温结构材料。连续碳化硅纤维编织成的三维织物, 可保证 SiC<sub>f</sub>/SiC 复合材料在 X、Y、Z 三个方向形成三维整体网络结构, 能较好地解决传统复合材料层间剪切强度较低等问题。介绍了 SiC/C-SiC 复合材料的制备方法, 分析了各种制备方法的优缺点, 尤其对常用的 PIP 法和基于 PIP 法的“CVI+ PIP”组合工艺进行了重点介绍。

关键词: 预制体结构; SiC/SiC; PIP

#### C09-P13

##### 原位自增韧 Ta<sub>0.8</sub>Hf<sub>0.2</sub>C-SiC 超高温陶瓷的微结构调控与性能研究

张步豪<sup>1</sup>, 殷杰<sup>1,3</sup>, 刘学建<sup>1</sup>, 黄政仁<sup>1,2</sup>

1.中国科学院上海硅酸盐研究所

2.中国科学院宁波材料工程与技术研究所

### 3.中国科学院重大科技任务局

超高温陶瓷是临近空间高超音速飞行器热防护系统中具有应用前景的关键热结构材料。碳化钽铪( $Ta_{1-x}Hf_xC_y$ )超高温陶瓷由碳化钽和碳化铪(拥有过渡金属碳化物的缺碳特性即  $TaC_m$  和  $HfC_n$ )在全化学计量比范围内固溶得到。固溶体系中  $Ta_{0.8}Hf_{0.2}C$  固溶体熔点达到 $\sim 3905^\circ C$ , 是目前高温热稳定性最佳的材料.通过原位反应生成的产物通常具有细小的粒子尺寸、较高的缺陷浓度, 另外原位反应产生的颗粒具有新鲜的表面也赋予其较低的氧杂质含量, 原位反应产物所具有的这些特点赋予其较高的烧结活性。SiC 有  $\alpha$  和  $\beta$  两种常见的晶型, 其中,  $\alpha$ -SiC 为六方结构, 在高温下稳定。因此, 选择合适的制备条件, 可以得到各向异性生长的 SiC, 从而起到自增韧的效果。本研究在无压烧结条件下原位引入了晶须状 SiC, 制得  $Ta_{0.8}Hf_{0.2}C$ -27vol%SiC 的复相陶瓷。因 SiC 的原位引入, 材料的性能得到了优化。韧性从  $4.7 \pm 1.0 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  提高到  $5.4 \pm 1.2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ; 强度从  $359 \pm 6 \text{ MPa}$  提高到  $443 \pm 22 \text{ MPa}$ 。但基体和增强相间的热膨胀系数存在差异, 烧结后在材料内部会形成残余应力, 阻碍了材料性能的进一步提升。

关键词: 超高温陶瓷; 无压烧结; 微结构调控

#### C09-P14

##### 单晶蓝宝石纤维制备与表征

马清<sup>1,2</sup>, 罗志远<sup>3</sup>, 刘仁辰<sup>2</sup>, 刘岩<sup>2</sup>, 嵇世山<sup>2</sup>, 高尚<sup>3</sup>

- 1.哈尔滨工业大学深圳研究生院实验与创新实践教育中心
- 2.深圳清华大学研究院
- 3.哈尔滨工业大学深圳研究生院材料科学与工程学院

单晶蓝宝石( $\alpha$ - $Al_2O_3$ )纤维作为强韧化关键基础材料, 在陶瓷、金属、高分子基等复合材料领域具有广泛应用前景。本研究以二氧化硅粉体( $SiO_2$ )和金属铝棒(Al)为原料, 氩气(Ar)为保护气氛、氧化锆陶瓷( $ZrO_2$ )为承烧板, 利用气液固(VLS)反应机理制备单晶  $\alpha$ - $Al_2O_3$  纤维, 通过 SEM、HRTEM、XRD 等表征手段分别对纯化前后的纤维形貌、成分、结构和热学性能进行表征, 结果表明, 单晶蓝宝石纤维表面光滑, 粗细均匀; 纤维平均直径为 $\sim 0.5$ - $1\mu\text{m}$ 、纯化前后纤维为单晶  $\alpha$  相, 主要晶面组成为(104)、(110)和(006)晶面, 纯化后无杂质; 在此基础上, 进一步探讨了单晶蓝宝石纤维的 VLS 生长机理和生长过程, 为单晶蓝宝石纤维规模化可控制备及有效应用奠定了实验基础。

关键词: 单晶蓝宝石; 纤维; 制备; 表征

#### C09-P15

##### 基于先驱体光固化原理的氮化硅陶瓷材料与结构增材制造研究

何汝杰, 王敏  
北京理工大学

先驱体陶瓷材料具有分子结构可设计、化学组成可调控、加工成型方便、力学性能优异、易于成型复杂构件等优点, 在高温、氧化、冲刷、辐射等极端环境下具有广阔应用前景。采用紫外光或紫光为光源的光固化方式, 能够直接利用先驱体的感光活性基团, 实现先驱体陶瓷的增材制造。本文采用基于光固化的数字光处理工艺, 研究了聚氮硅烷先驱体的光固化增材制造工艺, 探索了不同原料组分、成型工艺、裂解温度对裂解产物物相组成、力学性能、微观形貌的影响规律。使用数字光处理工艺, 获得了复杂形状聚氮硅烷先驱体陶瓷及复杂形状氮化硅结构件, 揭示了不同原料组分、成型工艺、裂解温度对聚氮硅烷先驱体陶瓷结构及氮化硅陶瓷结构宏微观结构、力学性能的影响规律。通过本研究, 建立了一种基于先驱体光固化原理的  $Si_3N_4$  陶瓷材料与结构增材制造, 以期为先驱体陶瓷材料与结构的应用提供借鉴与经验。

关键词: 增材制造; 聚氮硅烷; 先驱体陶瓷

#### C09-P16

##### 硅树脂转化制备氧化铝基陶瓷型芯的研究

杨治刚<sup>1,2</sup>, 李倩<sup>2</sup>, 余建波<sup>2</sup>, 任忠鸣<sup>2</sup>, 王志<sup>1</sup>, 任书霞<sup>1</sup>

- 1.石家庄铁道大学
- 2.上海大学

本研究采用干压成型方法, 选用氧化铝粉为基体, 有机硅树脂粉末为粘结剂, 制备出多孔氧化铝基陶瓷型芯试样。从硅树脂添加量和烧结温度角度对氧化铝型芯的物相, 结构和性能进行了分析。结果表明:成型过程中, 有机硅树脂起到很好

的粘结成型性。在烧结过程中,硅树脂会发生裂解,起初形成非晶态二氧化硅,随着温度的升高,非晶态二氧化硅会逐渐析晶,转变为方石英。在 1500℃ 以上,硅树脂转变形成的二氧化硅会与氧化铝基体反应形成莫来石。随着树脂含量的增加,样品的线收缩率逐渐减小,失重率和气孔率逐渐增加,抗弯强度逐渐减小。在树脂添加量 5wt% 时,从 1300℃ 到 1500℃,样品收缩率增大,气孔率减小,抗弯强度增大,当温度超过 1500℃,样品收缩率降低,气孔率增大,抗弯强度减小。  
关键词:氧化铝陶瓷型芯;硅树脂;线收缩;抗弯强度

#### C09-P17

##### 掺杂 Si、Ca、Mg 的 94mol%氧化铝陶瓷的介电击穿强度

杜继实,雷杨俊,唐兵华,黄晓军

中国工程物理研究院电子工程研究所

氧化铝陶瓷是一种被广泛使用的高压绝缘材料,而介电击穿会对其造成不可逆的损伤,产生导电通道而破坏整个绝缘系统。由于陶瓷的微观结构直接影响了其电荷束缚、散射机制及其内部的电场分布,进而影响其介电击穿过程,因此近年来针对氧化铝陶瓷微观结构与介电击穿强度关联性的研究越来越多。氧化铝陶瓷往往需要添加烧结助剂,从而可以获得缤纷多彩的微观结构,其中添加最多的烧结助剂有 SiO<sub>2</sub>、CaO、MgO。众所周知, SiO<sub>2</sub>-CaO 的共掺杂会导致氧化铝陶瓷晶粒的板状生长(晶粒各向异性生长)和晶粒的异常长大,而 MgO 的掺杂会限制晶粒的长大。以前针对氧化铝陶瓷微观结构及其介电击穿强度的关联性研究往往是基于商业的氧化铝陶瓷,而且测试方法也不统一,因此研究结果很难获得系统性。本文报道了我们最近对掺杂 Si、Ca、Mg 的 94mol%氧化铝陶瓷的介电击穿强度研究,比较了不同组分的氧化铝陶瓷的密度、介电常数、介质损耗正切角、导电率等与介电击穿强度之间的关系,并试图找出它们之间的关联性。同时,本文也分析了各个样品的微观结构,讨论了其对介电强度的影响规律。

关键词:氧化铝陶瓷;介电击穿;微观结构

#### C09-P18

##### SiC<sub>f</sub>/HfSiBCN超高温陶瓷基复合材料的氧化行为研究

李麒,刘伟,郭丰伟,谭僖,曹腊梅

中国航发北京航空材料研究院先进高温结构材料重点实验室

本文通过 Hf 改性 SiBCN 前驱体制得 HfSiBCN 前驱体,再经树脂转移模塑法(RTM)和聚合物浸渍裂解工艺(PIP)制备得到 SiC 纤维增强 HfSiBCN 陶瓷基复合材料(SiC<sub>f</sub>/HfSiBCN),研究了 SiC<sub>f</sub>/HfSiBCN 复合材料在 1350℃ 和 1600℃ 的氧化行为。结果表明, SiC<sub>f</sub>/HfSiBCN 的室温热学性能与 Hf 改性前(SiC<sub>f</sub>/SiBCN)相当,但经 1350℃ 空气氧化 50h 后, SiC<sub>f</sub>/HfSiBCN 的强度保持率较 SiC<sub>f</sub>/SiBCN 有大幅提升。 SiC<sub>f</sub>/HfSiBCN 分别在 1350℃ 空气中氧化 50h 和 1600℃ 水汽中氧化 5h 后的氧化皮厚度与 SiC<sub>f</sub>/SiBCN 相比更薄、更致密,可有效阻止材料被进一步氧化, Hf 改性后陶瓷基复合材料的抗氧化性能得到了显著提升。

#### C09-P19

##### Preparation and Properties of ZrB<sub>2</sub> Composite Coatings by CVD

Lijuan Zhou\*, Chuncheng Wei, Tianqi Wang, Yunxia Zhao

College of Materials Science and Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255200, China

ZrB<sub>2</sub> has been attracted much attention for structural materials applications for their unique combination of relative lower density, high melting point, high hardness, strong corrosion resistance, excellent thermal conductivity, good electrical conductivity and so on. However, the preparation of zirconium boride coating is hard to realize. In this paper, zirconium boride was coated on the surface of the silicon carbide substrate by chemical vapor deposition (CVD) and cast molding process. Based on the bonding of the coating with the substrate, the thermal expansion coefficient and high temperature protective properties of the base material, the carbon fibers deposited layer, ZrB<sub>2</sub>-SiC layer and ZrB<sub>2</sub> depositing layer were designed. When the molar ratio of raw materials ZrCl<sub>4</sub> and NaBH<sub>4</sub> was 1:8, zirconium boride deposition layer was the most dense. And the preparation methods, the coating microstructure and the oxidation mechanism of the composite coating were studied.

Keywords: ZrB<sub>2</sub>; composite coating; CVD; tape casting

## C09-P20

### 低熔点钛表面体瓷的溶胶凝胶合成和微波烧结

王文浩, 薛北京, 郭立童, 刘雪梅, 陶雪钰, 曹希传,  
中国矿业大学(徐州)

本文以硼酸盐为体系通过溶胶凝胶的方法合成了钛体瓷, 分别用 XRD, SEM 和三点弯曲试验对瓷体进行了表征。XRD 结果表明瓷体主要由非晶无定型的结构构成, SEM 微观照片显示瓷体颗粒的形状是不规则的, 尺寸范围在 8-25 $\mu\text{m}$ , 而且没有明显的孔洞出现在瓷体表面。当瓷体烧结温度从 600 $^{\circ}\text{C}$ 升到 675 $^{\circ}\text{C}$ 的时候, 其抗弯强度也从 18.9 MPa 显著增加到 70.6 MPa, 然而当烧结温度为 700 $^{\circ}\text{C}$ 时瓷体的抗弯强度降低到 49.1 MPa。瓷体强度的增加主要是因为内部孔洞的减少以及密度的增加。

关键词: 微波烧结; 溶胶凝胶制备; 人体用瓷; 钛; 生物陶瓷

## 仅发表论文

## C09-PO-01

### 环境温度对 Mg、Ga 掺杂 CaS:Eu 红色荧光粉发射光谱的影响

张娜<sup>1</sup>, 程仁菊<sup>1</sup>, 董含武<sup>1</sup>, 李海利<sup>1,3</sup>, 刘文君<sup>1,2</sup>, 蒋斌<sup>1,2</sup>, 杨柳<sup>1</sup>

1.重庆市科学技术研究院

2.重庆大学, 国家镁合金工程技术研究中心

3.四川外国语大学国际商学院

主要研究了环境温度对 Mg、Ga 的掺杂 CaS:Eu 红色荧光粉发射光谱的影响。结果表明:随着环境温度的升高, 掺杂 Mg、Ga 的 CaS:Eu 红色荧光粉的发光强度快速降低, 发射光谱发生蓝移以及出现热致宽化现象。这种现象是电子和声子间的相互作用增强, 非辐射跃迁增强的原因。采用位形坐标曲线讨论认为, 较低激发态到较高激发态的反隧道效应致使发射光谱呈现蓝移现象。

关键词: 发光; 温度; CaS:Eu2+荧光粉; 光致发光

## C09-PO-02

### Ca<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>Cu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub>/PVDF 复合材料的制备及介电性能研究

王行行, 蔡会武

西安科技大学

采用溶胶凝胶法制备了 Ca<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>Cu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub>(x=0.02, 0.05, 0.1, 0.15, 0.18, 0.2, 0.25)陶瓷, 研究 Mg 掺杂和 PVDF 复合对 CaCu<sub>3</sub>Ti<sub>4</sub>O<sub>12</sub> 陶瓷显微结构和介电性能的影响。通过 SEM、XRD 和精密阻抗分析仪做检测, 结果显示:掺杂 Mg 后会引引起化学计量比的偏失, 介电常数随着掺杂量的增加出现降低趋势, 但介电损耗会伴随掺杂量的增加出现降低趋势, 并且掺杂后频率的稳定性得到了提高。PVDF 复合提高了样品的介电介常数, 并且随复合量的增加而增加, PVDF 复合对介电损耗影响较小。PVDF 复合提高了样品的介电介常数, 并且随复合量的增加而增加, PVDF 复合对介电损耗影响较小。

关键词: CCTO; 掺杂; 介电性能; 微观结构

## C09-PO-03

### 偏压对多弧离子镀 MoN 涂层结构与性能的影响

包改磊, 张大童

华南理工大学

MoN 涂层在刀具领域有着广泛的应用前景, 为了研究偏压对多弧离子镀 MoN 涂层结构与性能的影响, 获得较好的涂层制备工艺参数, 本文采用多弧离子镀技术在 YT15 硬质合金及不锈钢片表面制备 MoN 涂层, 通过改变沉积过程中直流偏压获得不同工艺参数的 MoN 涂层。用 X 射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、维氏显微硬度计、UMT 摩擦磨损试验机、表面轮廓仪、划痕仪等对 MoN 涂层的物相结构、表面与截面形貌、显微硬度、摩擦系数与磨损率、膜基结合力等

进行表征。结果表明:随着偏压逐渐增大 MoN 涂层(200)晶面衍射峰值逐渐增强;显微硬度值变化不明显,当偏压达到 200V 时涂层摩擦系数达到最小值 0.35;涂层磨损率随着偏压增大呈现出下降趋势,在 300V 时涂层磨损率达到最小值;涂层与基体的结合强度出现先增大后减小的趋势,在偏压为 120V 时达到最大值为 48N。

关键词:多弧离子镀;MoN 涂层;偏压;摩擦系数;结合强度

#### C09-PO-04

##### 超音速等离子喷涂 $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}$ 透氧膜微观结构及其性能研究

牛少鹏,周克崧,邓畅光,徐丽萍,刘敏,毛杰,曾威

广东省新材料研究所

采用超音速等离子喷涂技术(Supersonic Air-gas Plasma Spraying, SAPS)在多孔支撑上制备了  $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_{3-\delta}$ (LSCF)透氧膜。利用 SEM、TEM 等手段观察 SAPS 膜微观结构。结果反映,SAPS 膜内部存在大量的纳米级淬火裂纹,进一步研究表明这些裂纹在高温时可有效释放膜层应力,避免纵向贯穿性裂纹形成,使膜层具有较高的高温结构稳定性。TEM 结果表明膜层内部富含纳米晶粒,并呈现“微纳晶-纳米晶-超细纳米晶”交叠结构。膜层中纳米结构也产生了一定的“纳米效应”,SAPS 膜常温电导率可达  $0.21(\Omega\cdot\text{cm})^{-1}$ ,高出传统烧结 LSCF 膜一个数量级。

关键词:超音速等离子;透氧膜;纳米结构

#### C09-PO-05

##### 烧结助剂与温度对凝胶注模工艺制备莫来石陶瓷微观结构和力学性能的影响

龙兰,肖鹏

中南大学

以正硅酸乙酯、九水硝酸铝为前驱体、无水乙醇为溶剂,通过溶胶凝胶法制备莫来石粉末,再以此为原料并添加不同含量(0、2、4、6、8、10wt%)的  $\text{Y}_2\text{O}_3$  烧结助剂,采用凝胶注模工艺经 1400、1500、1600℃烧结 2h 制备莫来石陶瓷,研究了烧结助剂与温度对莫来石陶瓷显微结构和弯曲强度的影响。结果表明:相同烧结温度下,随着  $\text{Y}_2\text{O}_3$  含量的增高,陶瓷的弯曲强度也随之增大。当  $\text{Y}_2\text{O}_3$  含量为 8%时,1500℃烧结制得的试样的弯曲强度最高,达到 161.22MPa。但继续增大  $\text{Y}_2\text{O}_3$  的含量超过 8%时,陶瓷晶粒发育充分并沿轴向生长,粗化的晶粒相互搭接,造成强度下降。当  $\text{Y}_2\text{O}_3$  添加量为 8%时,烧结温度越高,陶瓷试样的弯曲强度越大。烧结温度为 1600℃时,莫来石陶瓷的弯曲强度达到 182.86MPa。

关键词:莫来石粉体;溶胶凝胶;凝胶注模;弯曲强度

#### C09-PO-06

##### 石墨烯增韧 $\text{Ta}_4\text{HfC}_5$ 超高温陶瓷的热压烧结制备及性能研究

张健,王松

国防科技大学

本文采用热压烧结工艺在 2000℃、50MPa、30min 制度下成功制备了石墨烯(GNPs)增韧的  $\text{Ta}_4\text{HfC}_5$  超高温陶。其中,GNPs 的引入大幅提升了  $\text{Ta}_4\text{HfC}_5$  陶瓷的致密度,相对密度高达 97.63%。以扫描电镜和拉曼光谱为主要表征手段,研究了 GNPs 在基体中形成的结构及形貌。此外,对  $\text{Ta}_4\text{HfC}_5$ -GNPs 的断裂韧性进行了测试,结果表明其韧性提高了 53%,主要的增韧机制为 GNPs 的拔出和桥联机制。

关键词:石墨烯; $\text{Ta}_4\text{HfC}_5$ 超高温陶瓷;断裂韧性;增韧机制

#### C09-PO-07

##### 利用熔渗工艺原位生成 $\text{Ti}_3\text{SiC}_2$ 相增韧的 $\text{SiC}_f/\text{SiC}$ 复合材料

周怡然<sup>1,2</sup>,刘虎<sup>1,2</sup>,杨金华<sup>1,2</sup>,姜卓钰<sup>1,2</sup>,吕晓旭<sup>1,2</sup>,焦健<sup>1,2</sup>

1.中国航发北京航空材料研究院,先进复合材料国防科技重点实验室

2.中国航发北京航空材料研究院,航空材料先进腐蚀与防护航空科技重点实验室

目前,国内外  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  陶瓷基复合材料的制备工艺趋于成熟,部分技术成果已经成功应用到航空发动机热端部件上,其中熔体渗透工艺(Melt Infiltration, MI)具有制造周期短、成本低等优势而备受青睐。然而,该工艺的缺陷在于生成的复合

材料易富余 Si(10vol%~20vol%)，这将严重影响材料的高温使用性能。因此，拟通过在 SiC 基体中引入第二相，在取代残余 Si 的同时，与 SiC 复合形成高韧性基体，提高材料的力学性能。以  $Ti_3SiC_2$  为代表的三元过渡金属化合物 MAX 相由于自身独特的结构使得其具有高韧性，本文根据 MI 工艺制备陶瓷基复合材料的特点，在生成 SiC 基体的同时原位生成  $Ti_3SiC_2$ ，同时采用 XRD、BSE 等方法表征了产物组成及  $Ti_3SiC_2$  在基体中的分布情况，并研究了不同含量 TiC 对  $SiC_f/SiC$  复合材料力学性能的影响。结果表明:利用 MI 工艺成功地在 SiC 基体中生成了分布较均匀的  $Ti_3SiC_2$  相，同时还有少量  $TiSi_2$  存在，基体内的残余 Si 几乎被完全取代。当 TiC=15%时， $Ti_3SiC_2$  相增韧后的  $SiC_f/SiC$  复合材料弯曲强度为 201 MPa，断裂韧性达到  $15 MPa \cdot m^{1/2}$ 。

关键词:  $SiC_f/SiC$  复合材料;  $Ti_3SiC_2$ ; MAX 相; 熔渗工艺

#### C09-PO-08

##### 熔盐法单相固溶 $La_{1-x}Sm_xB_6$ 纳米粉体的组成与微观结构研究

余艺平, 王松, 李伟

国防科技大学

以  $LaCl_3$  为镧源, 以  $SmCl_3$  为钐源, 以  $NaBH_4$  为硼源, 以  $LiCl/KCl$  共晶盐为熔盐介质, 经熔盐法制备得到了不同元素组成的  $La_{1-x}Sm_xB_6$  纳米粉体( $x=0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ )。采用 XRD、SEM、EDS、XPS 及 TEM 表征了熔盐法  $La_{1-x}Sm_xB_6$  纳米粉体的组成与微观结构。结果表明熔盐法  $La_{1-x}Sm_xB_6$  纳米粉体物相单一, 具有简单立方晶体结构, 其晶格常数随着  $x$  值的增大而不断减小, 且熔盐法  $La_{1-x}Sm_xB_6$  纳米粉体分散性好, 粒径均一, 平均粒径约为 90nm。除此之外, La、Sm 及 B 三种元素均匀分布在单个粉体颗粒上, 表明所制备的  $La_{1-x}Sm_xB_6$  纳米粉体为单相固溶体。

关键词:  $La_{1-x}Sm_xB_6$ ; 熔盐法; 单相固溶

#### C09-PO-09

##### $Bi_2O_3-SiO_2-B_2O_3$ 系凝胶玻璃及熔淬玻璃粉体结构与性能对比

厉佩贤<sup>1</sup>, 袁鹤成<sup>1</sup>, 李倩<sup>1</sup>, 陆正华<sup>1</sup>, 吴其光<sup>2</sup>

1.广东工业大学材料与能源学院

2.广东工业大学分析测试中心

分别采用溶胶-凝胶法和传统的熔融-淬火法制备了同组分配比的  $Bi_2O_3-SiO_2-B_2O_3$  系玻璃粉体, 运用 XRD、SEM、EDAX、FT-IR、Raman、DSC/TG、粒度分析仪、密度测试、“纽扣”实验、热膨胀仪等手段对玻璃粉体进行了结构与性能表征, 对比性地研究了同组分配比两种制备方法下玻璃粉体结构与性能的同异。结果表明, 两种粉体结晶状态均显示典型的非晶态特征, 凝胶玻璃粉体颗粒较易破碎且密度较低, 球磨后可得到粒径范围为 0.1-1 $\mu m$  范围的超细玻璃粉体, 其化学组成与实验设计配比较为接近; 两种粉体的玻璃网络结构极为相似, 主要以  $[BiO_3]$  三角体、 $[SiO_4]$  四面体、 $[BO_4]$  四面体构成基本网络骨架; 凝胶玻璃转化温度略低于熔淬玻璃转化温度且均小于 600 $^{\circ}C$ , 但其软化烧结温度高于熔淬玻璃粉体烧结温度, 且线膨胀系数  $\alpha$  略大于熔淬玻璃线膨胀系数; 凝胶玻璃不易发生析晶行为, 熔淬玻璃在高温下易析出  $Bi_2SiO_5$  等晶相。

关键词:  $Bi_2O_3-SiO_2-B_2O_3$  系玻璃; 粉体; 结构与性能; 对比

#### C09-PO-10

##### 沉积条件对 CVD SiC 涂层微结构的影响

刘泽彦, 肖鹏

中南大学

采用低压化学气相沉积(LPCVD)法将 SiC 涂层沉积在 SiC 复合材料基体上。为了研究稀释气体对 CVD SiC 涂层微观形貌和表面形貌的影响, 我们选择了三种摩尔比的  $H_2/MTS(4, 8, 12)$  来控制  $H_2$  在 1200 $^{\circ}C$  和 1300 $^{\circ}C$  的流量。研究了 CVD-SiC 涂层的相组成, 表面形貌和微观结构, 以及沉积速率。X 射线衍射结果表明, 涂层表现出不同的相, (111)晶面取向优势增加, 稀释气体  $H_2$  流量增加。当  $H_2/MTS$  摩尔比为 12 时, XRD 衍射曲线上的 C 衍射消失, 但保留了  $\alpha-SiC$ 。SEM 结果表明, 不同的微观结构和形态对应于不同的摩尔比。随着  $H_2/MTS$  摩尔比的增加, 小颗粒的形貌由球状变为片状并呈线状。当  $H_2$  作为稀释气体时, 有利于促进反应并实现小颗粒堆积。

关键词: 碳化硅; 化学气相沉积; 稀释气体; 表面形态

## C09-PO-11

### SiC 陶瓷的高温摩擦学性能

海万秀, 陈浩, 马进保

北方民族大学

采用热压烧结法, 以  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Y}_2\text{O}_3$  为烧结助剂制备了致密的 SiC 陶瓷。研究了不同对偶(WC 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 速度(0.01-0.5m/s), 载荷(1.5-20N), 温度(RT-800℃)等条件下 SiC 陶瓷摩擦学性能。研究表明, 分别以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与 WC 两种对偶, 在相同线速度时, 以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为对偶的 SiC 陶瓷的磨损率比 WC 的小。随着线速度的增大, 以 WC 为对偶的平均摩擦系数先增大后减小, 以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为对偶的平均摩擦系数先减小后增大; 两种对偶的磨损率都随速度的增大先增大后减小。随着载荷的不断增大, 以两种对偶的平均摩擦系数都在逐渐减小, 磨损率呈现先减小后增大的趋势。温度对 SiC 陶瓷的摩擦磨损性能影响较大, 随着温度的增大, 与两种对偶的配副的 SiC 陶瓷的平均摩擦系数基本上都呈现减小的趋势。高温下摩擦系数的降低, 与 SiC 陶瓷磨损表面的氧化有关。

## C09-PO-12

### 弛豫型铁电陶瓷非线性性能研究

丛深, 张华, 仝柯, 李娜

中国石油集团石油管工程技术研究院

为了研究弛豫型铁电陶瓷的非线性介电性与压电性能关系, 对弛豫型铁电材料( $\text{NBT}:\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3\text{-xBaTiO}_3$ ,  $x=0.05$  to 0.08)进行微观特性分析、X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)与 X 射线能谱分析(EDX)等试验, 同时利用铁电滞回线测量方法评价其在不同电场水平、频率及温度下的极化性能, 结果表面:弛豫型铁电陶瓷的 P-E 曲线随着电场振幅增加呈现不对称性和非线性特性, 弛豫型铁电陶瓷的 Rayleigh 系数相比传统型铁电陶瓷较低, 其 Rayleigh 系数和介电常数随着频率增幅(0.2 Hz-20 Hz)呈现降低趋势, 同时其非线性性能随着温度增加而增长, 但增幅较平缓。

关键词: 弛豫型铁电陶瓷; NBT; 极化性能; Rayleigh 系数

## C09-PO-13

### 低成本 $\text{SiO}_2$ 基复合材料的制备及性能研究

向阳<sup>1</sup>, 易璐<sup>2</sup>, 彭志航<sup>1</sup>, 王义<sup>3</sup>, 李广德<sup>3</sup>, 曹峰<sup>1</sup>

1.国防科技大学

2.网湖南供电服务中心(计量中心)

3.火箭军研究院

硅溶胶作为氧化硅基体的先驱体, 具有价格低廉、可大批量生产、无毒无害等优点。目前投入应用的氧化硅基复合材料主要有  $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$  和  $\text{SiC}_f/\text{SiO}_2$  复合材料。在工程化应用过程中, 成本成为材料体系应用的制约因素, 而氧化硅纤维、氧化铝纤维以及碳化硅纤维成本偏高。因此, 寻找低成本、快速化的纤维增强氧化硅基复合材料, 成为业内的目标。本文开展低成本  $\text{SiO}_2$  基复合材料的制备及性能研究, 制备出高硅氧纤维增强  $\text{SiO}_2$  基复合材料, 并测试其本征性能。研究表明:高硅氧纤维增强氧化硅基复合材料的密度为  $1.59\text{g}/\text{cm}^3$ , 在追求轻量化的航空航天领域, 这是一个优势; 高硅氧纤维增强氧化硅基复合材料的气孔率为 7.76%; 高硅氧纤维增强氧化硅基复合材料的弯曲强度、剪切强度、压缩强度分别为 56.64MPa、3.59MPa、42.70MPa; 在高温氧化后的力学性能测试中, 高硅氧纤维增强氧化硅基复合材料的弯曲强度为 64.58MPa。

关键词: 陶瓷基复合材料; 高硅氧纤维;  $\text{SiO}_2$ ; 高温; 力学性能