

中国材料大会 2024

暨第二届世界材料大会

CMC 2024 & WMC 2024

July 8-11, 2024

Guangzhou, China

C09-先进结构陶瓷的制备与表征

**C09-Preparation and
Characterization of Advanced
Structural Ceramics**

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.scimeeting.cn>

C09. 先进结构陶瓷的制备与表征

分会主席：陈宇红、林华泰、张魁宝、邹冀

C09-01

论文题目几种氧化物陶瓷材料的研究进展— Al_2O_3 、ZTA、高熵氧化物

李江涛

中国科学院理化技术研究所

C09-02

硼化物陶瓷烧结致密化、微结构调控与性能提升

邹冀*, 傅正义

武汉理工大学

硼原子间强共价结合的特性赋予了硼化物陶瓷极高的熔点、良好的热稳定性和力学性能,使得它们在工程领域应用广泛。其中以硼化锆(ZrB_2)为代表的超高温陶瓷及其复合材料是高马赫飞行器热防护和超燃冲压发动机耐热部件的重要候选材料;碳化硼(B_4C)及其复合陶瓷是重要的装甲材料;而含六方氮化硼(hBN)复相陶瓷在金属冶炼领域有重要应用。本报告将从报告人在硼化物复相陶瓷的致密化,微结构调控与性能提升等领域的代表性研究工作谈起。通过“ ZrB_2 材料高温强度提升”,“低温反应烧结高性能碳化硼基复相陶瓷”等几个实例,来阐明报告人是如何将物理冶金原理与硼化物陶瓷研究相结合的。通过组元高熵化可以实现硼化物陶瓷性能全面提升,报告中也将简要汇报报告人在高熵硼化物陶瓷领域的一些进展。

C09-03

几种不同组分体系高熵陶瓷晶粒生长行为的研究

刘吉轩*, 梁拥成, 张国军

东华大学

近年来,高熵陶瓷引起了人们的广泛兴趣。这类材料具有多元化组分、高构型熵等特征,其通常会展现出以下四种独特的效应:即,热力学上的高熵效应,可提高材料的热力学稳定性;晶体学上的晶格畸变效应,造成晶格应力;动力学上的迟滞扩散效应,能改变与原子扩散相关的材料性能;以及性能上的鸡尾酒效应,有望使高熵陶瓷的性能远超单组分材料性能的线性累加。其中,迟滞扩散效应被证实有利于陶瓷材料显微组织细化。但是,陶瓷材料的微观结构往往会受元素固溶、第二相、烧结制度等内外因素的共同作用。这些因素与迟滞扩散效应在影响高熵陶瓷的晶粒生长时,是协同合作,还是相互竞争?目前尚不明确。本文无压烧结、高温热处理、放电等离子烧结等方法考察了几种高熵氧化物、高熵硼化物、和高熵碳化物陶瓷的晶粒生长行为。结果显示,迟缓扩散效应有时未能有效地抑制高熵陶瓷的晶粒生长,而第二相、碳空位等对高熵陶瓷晶粒生长的影响更显著。研究结果可为新型高性能高熵陶瓷材料的显微组织设计提供一定的借鉴与参考。

C09-04

高熵非氧化物陶瓷超快速合成与致密化

郭瑞芬*, 毛海荣, 沈平

吉林大学

近年来,高熵非氧化物陶瓷(高熵碳化物(HEC),高熵硼化物(HEB)以及高熵碳硼化物(HEB-HEC)陶瓷)因其显著的成分复杂性和优异的性能而备受关注。然而,它们高熔点和低自扩散系数导致其在常规无压烧结条件下难以形成固溶体和烧结致密化。本研究采用新型超快速高温烧结(UHS)技术,在几分钟总烧结周期内制备了多种致密HEC、HEB和HEB-HEC(含5-8个阳离子)陶瓷,所有陶瓷都表现出高硬度。本研究还明确了材料快速致密化机制,阐明了液相的存在对固溶体的形成以及多组分碳化物和高熵碳硼化物的致密化有重要作用。总之,本文介绍了一种简单、经济、高效的高熵陶瓷合成和致密化方法。这种灵活的技术有望加快高熵材料筛选速度并促进新材料的开发。

C09-05

可视化高温形变分析技术在无机材料领域的应用

张海媛

天津中环电炉股份有限公司

C09-06

非化学计量比 $(\text{TiCrTaNbMo})\text{C}_{0.63}$ 高熵碳化物的制备

崔凤婷, 战再吉*

河北省秦皇岛市燕山大学

高熵过渡金属碳化物陶瓷具有高硬度、良好的高温弯曲强度、低热导率、良好的耐高温磨损和抗氧化性以及抗烧蚀性, 具有巨大的潜力和广泛的工业应用前景。然而, 目前还没有系统研究碳空位含量对高熵陶瓷微观结构和力学性能的影响。本研究通过调节难熔过渡金属碳化物粉末的比例设计合成了具有非化学计量比的高熵碳化物 $(\text{TiCrTaNbMo})\text{C}_{0.63}$ 。研究表明, 碳化学计量偏差导致熵稳定和化学键强度降低的协同效应是形成单相固溶体和促进烧结的原因, 因此成功制备相对致密度较高, 晶粒尺寸较小的高熵陶瓷。通过 XRD、SEM、EDS、位移监测和相图计算等技术手段, 深入了解调节碳化学计量偏差在高熵 $(\text{TiCrTaNbMo})\text{C}_{0.63}$ 的微观结构、机械和热性质中的作用。研究表明, $(\text{TiCrTaNbMo})\text{C}_{0.63}$ 的维氏硬度、抗弯强度和断裂韧性分别达到平均值 2164 HV_{0.5}、380 MPa 和 4.138 MPa m^{1/2}。研究表明, 通过调节碳化学计量偏差制备的高熵碳化物陶瓷具有实现低温合成、促进烧结和可调性能的巨大潜力。

C09-07

高熵硼化物陶瓷的低温致密化及其增韧研究

许亮¹, 邹冀¹, 郭伟明², 刘洋², 邱帅航¹, 林华泰², 傅正义¹

1. 武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室

2. 广东工业大学机电工程学院

高熵硼化物陶瓷被认为是在极端环境中应用中的潜在候选材料, 然而, 其低烧结性和脆性限制了它们的广泛应用。本研究采用放电等离子烧结 (SPS) 在 1500 °C 成功制备了具有高断裂韧性的致密 $(\text{Hf}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ti}_{0.2})\text{B}_2$ 陶瓷 (HEB)。首先, 以 5vol% 的金属钴为添加剂, 在 1500 °C 下对 HEB 进行烧结致密化, 在烧结过程中反应形成了 Co-B 基液相, 该液相通过润湿晶界加速致密化, 所制备陶瓷的致密度达 99.5%。样品的维氏硬度提高至 24.90 ± 1.39 GPa, 但断裂韧性较低, 为 2.79 ± 0.11 MPa m^{1/2}。进一步地, 为了降低液相含量, 避免高温性能的显著恶化, 同时提高断裂韧性, 通过添加金属 W, 原位引入 CoW_2B_2 或 W_3CoB_3 作为增强相。其中, 添加 15vol% W 的样品的断裂韧性提高至 6.63 ± 0.60 MPa m^{1/2}, 相对密度大于 97%, 维氏硬度达 23.62 ± 1.31 GPa。 CoW_2B_2 或 W_3CoB_3 的生成被认为是增韧的主要因素, 裂纹偏转、裂纹桥接、裂纹分支和晶粒拔出为其主要的增韧机制。

C09-08

凝胶注模成型结合自蔓延高温合成工艺制备高性能多孔氮化硅基复合陶瓷

汪长安^{1,2}

1. 清华大学 材料科学与工程学院

2. 清华大学 新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室

氮化硅陶瓷是一种重要的结构功能一体化的陶瓷材料, 具备高强、高韧、耐磨损、耐高温、耐腐蚀、以及良好的电磁透波特性, 在航空航天、国防军事和其它工业领域都有着重要的应用。然而氮化硅具有低的自扩散系数和难烧结的特点, 尤其是高气孔率多孔氮化硅陶瓷在高温烧结过程中较大的收缩、气孔结构难以控制的问题, 使得多孔氮化硅陶瓷的制备仍然是个巨大的挑战。本研究中, 我们提出先采用凝胶注模工艺制备出高气孔率、结构均匀、有较高强度的氮化硅陶瓷坯体, 然后再使用自蔓延高温合成技术制备多

孔氮化硅基复合陶瓷。通过优化原始材料的组分、成型浆料的固相含量、成型坯体的排胶和自蔓延合成的工艺参数，快速制备出收缩变形小、气孔结构均匀、有良好长径比氮化硅晶粒结构的多孔氮化硅基复合陶瓷，具有超高气孔率、高强度和良好透波性能，为高性能透波材料的研制提供实验参考。

C09-09

高熵氮化物陶瓷的制备及力学性能研究

陆有军
北方民族大学

C09-10

烧结致密过程的主烧结曲线的线性回归计算方法及 DATS 软件

杜继实*, 张钊
中国工程物理研究院电子工程研究所

多层陶瓷制备中，提升内电极浆料和功能陶瓷层的烧结收缩匹配性对避免脱层、控制变形等都至关重要。因此，多层陶瓷研制工作中的一个重要内容是分析各陶瓷材料的烧结致密过程，并通过调节组分和温度制度来提高不同陶瓷材料之间烧结收缩匹配性。近年来，应用主烧结曲线 (Master Sintering Curve, MSC) 方法的研究陶瓷烧结致密化过程的研究工作越来越多，并在传统分析方法的基础上发展出了多种分析方法，提升了分析效率和预测精度。MSC 各个方法中对烧结激活能的计算主要基于极大似然估计法 (试解法)，计算效率较低。针对此问题，我们针对 MSC 各个分析方法，发展了烧结激活能的线性回归计算方法，进一步提升了分析效率。并将各个方法集成到了软件“烧结致密化分析工具” (Densification Analyzing Tool of Sintering, DATS)，为烧结工艺研究和设计提供了便利。本报告内容主要包括陶瓷烧结动力学及 MSC 方法的基本原理，MSC 的线性回归计算方法，DATS 1.0 的原理和操作，采用 DATS 中不同方法分析结果的比较。

C09-11

国产 3 代 2D-SiC_f/SiC-SiYBC 的高温蠕变性能及损伤机理研究

张立
西北工业大学

C09-12

(Zr_{0.2}Hf_{0.2}Ta_{0.2}Nb_{0.2}Ti_{0.2})B₂-20SiC 高熵陶瓷高温氧化行为研究

郭茹茹*
北京航空航天大学

以 B、ZrO₂、HfO₂、Ta₂O₅、Nb₂O₅ 和 TiO₂ 粉体为原料，通过熔盐辅助硼热还原法在 1100 °C 下合成了一种具有良好烧结性的纳米双相粉末。将合成的纳米双相粉末通过放电等离子烧结制备成单相 (Zr_{0.2}Hf_{0.2}Ta_{0.2}Nb_{0.2}Ti_{0.2})B₂ 高熵陶瓷 (HEB) 及 (Zr_{0.2}Hf_{0.2}Ta_{0.2}Nb_{0.2}Ti_{0.2})B₂-20SiC 复合材料 (HEB-20SiC)。通过 1100-1400 °C 的空气氧化实验，研究了 HEB 和 HEB-20SiC 的高温氧化行为。与 HEB 相比，HEB-20SiC 的氧化速率较低，氧化激活能更高并且抗氧化性能更好。这是因为在氧化过程中，HEB-20SiC 表面形成了一层结构稳定且致密的 SiO₂ 膜。HEB 和 HEB-20SiC 的氧化膜中还出现了元素层状分布的现象，这是因为陶瓷主动氧化生成的气态氧化物向外扩散并随后在表面进一步氧化。

C09-13

应力诱导氧化铝纳米纤维生长机理及批量化制备工艺研究

胡文强*, 黄振莺
北京交通大学

针对 Al₂O₃ 纳米纤维在先进航空发动机、航天器等应用中高强韧、耐高温、隔热、抗化学侵蚀等性

能需求,本研究探索一种基于 Al-Li 合金去合金化原位转变为一维 Al(EtO)₃ 纳米纤维,并通过煅烧可控合成单晶 Al₂O₃ 纳米纤维的技术路线。利用 Al-Li 合金中 Li 在醇类溶剂中容易解离的特性,通过对反应引起的晶界前端化学驱动力促使 Al(EtO)₃ 纳米纤维原位生长并最终转变为 Al₂O₃ 纳米纤维等关键科学问题的研究,建立高强度、高纯纳米 Al₂O₃ 陶瓷纤维的批量化制备方法;此方法制备的 Al₂O₃ 纳米纤维操作简单、成本低、无需添加任何添加剂或催化剂,为工业化大批量可控合成单晶 Al₂O₃ 纳米纤维提供坚实的技术支撑。

C09-14

SiC 细晶策略对(Hf_{0.2}Zr_{0.2}Ti_{0.2}Nb_{0.2}Ta_{0.2})N 高熵陶瓷致密化行为与力学性能影响

宋武阳, 陆有军*

北方民族大学

采用 SPS 在 2100 °C 下制备(Hf_{0.2}Zr_{0.2}Ti_{0.2}Nb_{0.2}Ta_{0.2})N 高熵氮化物陶瓷 (HEN) 及不同含量 α-SiC (5、10、15 mol%) 的 HEN-SiC 复合陶瓷。在 1800 °C 下以金属氧化物为原料,采用软机械力辅助氮化物热还原法合成了亚微米级单相 HEN 粉体。样品的 X 射线衍射结果显示 HEN 为单相岩盐结构,没有氧化物残留。块体陶瓷的扫描电镜、透射电镜及能谱检测结果显示,加入的 SiC 分布于 HEN 陶瓷晶界处,没有与 HEN 发生固溶,通过钉扎晶界抑制 HEN 晶粒长大促进陶瓷的致密化过程。SiC 添加量从 0 增加到 10 mol% 时,相对密度由 93.08% 增加到 98.32%,同时得益于晶粒细化与 SiC 弥散强化机制,陶瓷表现出优异的力学性能,硬度、断裂韧性、抗弯强度分别达到了 23.34±0.96 GPa、4.35±0.52 MPa m^{1/2}、409±11 MPa。

C09-15

中熵碳化物(Ta_{1/3}Ti_{1/3}V_{1/3})C 陶瓷的微结构、力学和热学性能

张海, 海万秀*, 龚茂园, 刘美玲, 陈宇红

北方民族大学

以二元金属碳化物(TaC、TiC、VC)为原料,采用放电等离子烧结,在不同烧结温度(1500 °C-2000 °C), 40 MPa 下制备了(Ta_{1/3}Ti_{1/3}V_{1/3})C 中熵陶瓷,探究了烧结温度(1500 °C~2000 °C)和保温时间(0 min~30 min)对中熵陶瓷微观结构、力学性能和热学性能的影响。结果表明,在 1900 °C 时形成单相岩盐晶体结构的中熵陶瓷(Ta_{1/3}Ti_{1/3}V_{1/3})C 的维氏硬度约为(16.7~20.8) GPa, 纳米硬度约为 (20.4~39.7) GPa, 断裂韧性约为 (4.1~5.4) MPa m^{1/2} 随着保温时间延长,硬度和杨氏模量都不断提高。烧结温度为 1900 °C 所得的中熵陶瓷(Ta_{1/3}Ti_{1/3}V_{1/3})C 具有最高的致密度,为 99.5%,其维氏硬度和断裂韧性分别为 18.2 GPa 和 4.1 MPa m^{1/2}。烧结温度为 1900 °C,保温 30 min,所得中熵陶瓷(Ta_{1/3}Ti_{1/3}V_{1/3})C 具有最高的断裂韧性 5.4±0.5 MPa m^{1/2}。室温下,中熵陶瓷(Ta_{1/3}Ti_{1/3}V_{1/3})C 具有更低的导热性能(热导率为 7.32 W/(m K))。

C09-16

碳化硅基的金刚石/碳化硅复合材料制备及性能

陈宇红

北方民族大学

采用液相渗硅工艺制备碳化硅基的金刚石/碳化硅复合材料,并研究了金刚石石墨化特性、金刚石体积分数、浸渗温度以及原料级配对复合材料性能的影响。随着金刚石体积分数的增加,复合材料的密度、热导率和抗弯强度均呈增加趋势。当金刚石体积分数达到 17.9 vol% 时,样品的密度为 3.09 g/cm³,热导率为 257 W/m K,抗弯强度为 237 MPa。此外,1480 °C 浸渗温度时金刚石石墨化,随着浸渗温度的升高,石墨化金刚石可与熔融硅发生硅碳反应,生成 β-碳化硅,导致复合材料热导率增加。通过碳化硅级配后的样品密度有所提升,抗弯强度提高了 43.1%,但热导降低了 12.6%。

C09-17

地质聚合物先驱体低温转化高强度高孔隙率莫来石/碳化硅多孔陶瓷研究

白成英*, 马成立, 邵佳欢, 李欣羽, 乔英杰

哈尔滨工程大学

采用直接发泡法制备了含固废 SiC/地质聚合物陶瓷先驱体，并通过原位氧化结合技术转化为莫来石/碳化硅多孔陶瓷。探究了不同铝源及离子交换前后烧结温度对莫来石/碳化硅多孔陶瓷性能的影响。结果表明，三种铝源制备的 SiC/地质聚合物先驱体经烧结后均可成功转化为莫来石为主相的复合陶瓷。其中，以铝矾土为铝源，由于原料中含有的金属氧化物杂质，作为原位助烧剂，实现低温烧结。由于存在较多 Na^+ ，未经离子交换的样品在 1100 °C 时出现过早熔化现象。而经过简单的离子交换去除体系中的碱金属离子，离子交换后的样品随着温度升高，莫来石相含量增加，开孔率和孔隙率先增大后减小，而抗压强度逐渐增大。最终，采用低成本地质聚合物先驱体工艺，在 1200 °C 低温烧结后，制得具有开孔结构高总孔隙率 84 vol% 高抗压强度 2.0 MPa 的莫来石/碳化硅多孔陶瓷。

C09-18

防隔热一体化无机-有机复合碳/酚醛材料研究与应用

牛波^{*}，龙东辉

华东理工大学

陶瓷基复合材料是当前应用最为广泛的航天飞行器热防护材料之一，但其隔热性能较差，且制备工艺复杂、成本高，难以满足飞行器热防护构件对长时隔热、低成本快速应用等方面的严苛要求。树脂基复合材料虽具有成型工艺简单、成本低等优势，但存在服役温度较低、耐烧蚀性能较差等不足。针对上述问题，创新性基于分子-细观尺度的无机-有机复合技术，研制出兼具轻质高强耐烧蚀、长时隔热、低成本、易成型等特性的无机-有机复合碳/酚醛材料。系统研究了该复合材料的力学、隔热和耐烧蚀特性，揭示了服役环境下的多尺度损伤机制。在此基础上，初步探索了无机-有机复合碳/酚醛材料在固体发动机燃气管道等防隔热构件中的应用。

C09-19

高近红外反射钛镍黄云母复合隔热陶瓷色料

潘志东^{1*}，肖珺颖¹，张缙²，王燕民¹

1. 华南理工大学

2. 佛山欧神诺陶瓷有限公司

人口增长和城市化进程加剧了城市热岛效应和全球气候变暖现象，增大了建筑物冷负荷能耗。目前，“碳达峰”与“碳中和”目标已成为我国进入新发展阶段、破解资源环境约束突出问题的关键。提高建筑物隔热性能，是降低其冷负荷的有效方法。具有高近红外反射率的隔热色料可选择性地反射不同波段范围的日光，减少物体表面吸收的能量，降低表面温度和热量积累，从而提高建筑物的热舒适性，有助于实现“双碳”目标。设计复合结构材料，利用两种高反射率材料之间的协同作用，可增强复合材料的近红外反射性能。目前，对于钛镍黄色料的研究多集中于其发色性能，而对钛镍黄及其复合色料近红外反射性能的研究较少。通过机械力化学剥片及热处理合成了具有多层结构的高近红外反射云母/金红石型钛镍黄复合色料。以 NaF 为矿化剂，通过固相法合成金红石型钛镍黄色料时，矿化剂可使固相法合成温度降低 100 °C，且色料具有较好的显色性能和近红外反射率。采用超细研磨对云母进行剥片预处理，可使其产生具有新鲜反射表面、尺寸更小的扁平颗粒，增强剥离云母的近红外反射率。经剥片的云母表面存在游离键，易与色料先驱体颗粒相互粘接，形成多层状复合结构；烧结时，色料先驱体颗粒在晶型转变和晶粒生长过程中，与云母表面形成 Si-O-Ti 键，形成了云母/金红石型钛镍黄复合色料。剥离的云母与金红石型钛镍黄色料颗粒发生协同作用，色料层的反射和折射、云母/色料界面的全反射及云母的多重结构增强了复合色料的反射能力，其近红外反射率提高至 97.72%，获得了更好的隔热效果。被红外灯或太阳光辐射加热时，云母/金红石型钛镍黄复合色料涂覆的铝板表面温度明显低于空白铝板。因此，云母/金红石型钛镍黄复合色料具有良好的色彩装饰功能，且同时具备高近红外反射性能和隔热性能，可直接应用于建筑物外壁和城市基础设施的表面，亦可用于制造其他冷建筑材料。

C09-20

原位 SiC 晶须增强莫来石泡沫陶瓷的制备与性能

周文英, 嵇晓洁, 刘兴硕, 李长存, 赵德刚*

济南大学

以工业氧化铝、广西白泥和单质硅粉为主要原料, 采用直接发泡法制备了原位 SiC 晶须增韧的莫来石泡沫陶瓷。通过改变单质硅的含量调控陶瓷材料中原位碳化硅晶须的生成量, 研究碳化硅晶须的生成和含量对陶瓷抗压强度、抗碱侵蚀性能和导热性能的影响规律。结果表明: 随着单质硅粉含量的增加, 原位碳化硅晶须的生成量增加, 泡沫陶瓷的孔隙率降低, 导热系数提高, 抗压强度先增加后降低。原位碳化硅的生成可降低碱蒸汽在陶瓷基体内部的扩散速率、提高陶瓷基体的稳定性, 从而提高陶瓷的抗碱侵蚀性能。

C09-21**基于剥离微纳米石墨片的低碳 MgO-C 特种耐火材料设计、制备及性能研究**刘明强¹, 黄军同^{1,*}, 孟红涛², 刘诚², 熊庆明¹, 陈智¹, 杨会永¹, 张少伟^{3,*}, 黄朝晖^{4,*}

(1 南昌航空大学材料科学与工程学院;

2 濮阳濮耐高温材料(集团)股份有限公司;

3 The University of Exeter;

4 中国地质大学(北京)材料科学与工程学院)

针对超低碳洁净钢炉外精炼工艺要求的耐火材料低碳、高性能、低成本的迫切需求, 本论文工作采用三辊研磨机 (TRM) 在酚醛树脂 (PF) 中连续剥离鳞片石墨 (FG) 获得结晶性好、纵横比大的微纳米石墨薄片 (GNPs) 来开发新一代低碳 MgO-C 耐火材料。通过对三辊差速研磨剥离技术工艺参数的精确控制, 获得了在 PF 中分散均匀的 GNPs; 以不同粒级的电熔氧化镁 (MgO) 为原料, 金属 Al 粉、Si 粉为添加剂, GNPs 和 GNPs/PF 混合物为碳源, 制备得到 (超) 低碳 MgO-C 耐火材料。探讨了剥离后的 GNPs 对 MgO-C 材料的微观结构性质、强度、抗氧化、抗渣侵蚀等性能的影响。研究结果表明: 尺寸约为 150 μm 、厚度 7-10 μm 的 FG 通过 TRM 剥离减薄制备获得横向尺寸约 10 μm 、厚度 30-50 nm 的 GNPs, 纵横比的增加从而提高了产物总比表面积。将 TRM 剥离减薄得到的 GNPs 和 GNPs/PF 部分或全部代替 FG 作为 MgO-C 耐火材料的碳源在降低产品的碳含量的同时有效提升了耐火材料的综合性能。加入了 1.7 wt.% GNPs 和 0.3 wt.% GNPs/PF 的试样制备的 MgO-C 耐火材料比加入 8 wt.% FG 的试样的常温耐压强度和高温抗折强度值分别提升了 96.4% (48.4 MPa) 和 15.4% (2.1 MPa); 试样的抗氧化性能和抗渣侵蚀性能在碳含量大幅降低的情况下也得到显著提高, 为研发满足低碳洁净钢所需的新型超低碳耐火材料提供了科学依据。

C09-22**仿细胞结构碳化钨增强石墨复合材料制备及力学与抗烧蚀性能研究**

史忠旗*, 魏智磊, 谢文琦

西安交通大学

开发具有轻质、高强、抗循环烧蚀性能的新型热防护材料对于可重复使用的空天飞行器来说至关重要。然而, 传统的陶瓷涂层增强石墨 (碳) 基复合材料的烧蚀性能和使用寿命有限。为解决上述问题, 在植物细胞具有自修复能力的启发下, 本研究通过“熔盐包覆-热压烧结”新工艺成功制备出仿细胞结构碳化钨增强石墨 (C@WC) 复合材料。性能测试结果表明, 该仿细胞结构 C@WC 复合材料不仅具有良好的力学性能, 而且展现出了优异的抗循环烧蚀性能。这种新型陶瓷增强石墨材料不仅可作为新型热防护材料使用, 而且有望作为高温结构部件在其他工业领域应用。因此, 本研究为新型轻质结构/功能一体化石墨基复合材料的设计制备提供了新思路和新方法。

C09-23**2D-C/SiC 复合材料疲劳性能的实验和模型表征**杨成鹏^{1,*}, 冯炜森¹, 贾斐²

1. 西北工业大学

2. 西安电子科技大学

复合材料的疲劳性能是结构安全性和可靠性设计的重要指标。针对平纹织物增强脆性基体复合材料,

即 2D-C/SiC, 在室温下开展了多级应力的静态疲劳实验, 研究了材料的模量退化规律及其循环寿命。实验结果表明, 2D-C/SiC 复合材料的多级疲劳寿命具有较大的分散性, 其剩余刚度整体上呈现“快-慢-快”的三阶段退化行为, 其疲劳损伤形式主要为基体开裂、界面脱粘和分层, 且分层严重的试件其抗疲劳性能较低。为了分析预测多级疲劳寿命, 首先基于常幅疲劳数据对经典疲劳损伤演化模型及 S-N 模型进行了适用性分析论证, 并提出了一个新的 S-N 模型用于疲劳寿命表征, 同时给出了多级疲劳寿命的预测模型和方法。模型应用与验证结果表明: 对于 2D-C/SiC 的常幅疲劳 S-N 曲线, 新提出的模型具有较高的拟合精度; 对于 2D-C/SiC 的常幅疲劳剩余刚度, Mu 模型的拟合精度较高; 而针对 2D-C/SiC 的多级应力疲劳寿命, Wu 模型具有一定的适用性, 预测误差在可接受范围内。

C09-24

不同级配对反应烧结碳化硅性能的影响

刘瑞彬, 陈宇红*

北方民族大学

颗粒级配是提升反应烧结碳化硅陶瓷性能的重要方式, 本文探究不同粒径碳化硅级配对反应烧结碳化硅陶瓷性能的影响。研究表明: 采用单一粒径 SiC 微粉, 改变石墨含量制备碳化硅陶瓷, 但其最高烧结密度仅 2.98 g/cm^3 , 导热系数最高为 108 W/m K , 抗弯强度最高为 320 MPa 。通过添加碳化硅微粉级配, 碳化硅陶瓷的烧结密度有所提高, 但不同粒径级配对反应烧结碳化硅陶瓷的热学及力学性能影响不同。当添加大颗粒 SiC 微粉进行级配后, 导热系数提升 39% 至 150 W/m K , 但抗弯强度降低到 260 MPa ; 小颗粒 SiC 微粉的添加并未导致导热系数的明显降低, 但抗弯强度提升 10% 至 353 MPa , 其抗弯强度提升的原因是添加小颗粒碳化硅, 形成的总界面较多, 试样在力学性能测试中对微裂纹扩展的阻力越大, 应力分布也更均匀。从而有效地提高了抗弯强度。采用小颗粒碳化硅进行级配得到热-力学综合性能良好的碳化硅陶瓷。

C09-25

SiC 蜂窝陶瓷的制备与性能

龚茂园, 张海, 海万秀*, 刘美玲, 陈宇红

北方民族大学

本文以 SiC、AlN、TiB₂、VC 为原料, 以 Al₂O₃ 和 Y₂O₃ 为烧结助剂, 通过挤出成型制备 SiC 蜂窝陶瓷, 研究烧结助剂、造孔剂对多孔 SiC 陶瓷材料结构和性能的影响, 研究塑化剂种类、添加量和水的添加量对挤出成型蜂窝陶瓷的外观和微结构, 以及烧结体的微结构和性能的影响。结果表明, 随造孔剂含量上升, 多孔 SiC 蜂窝陶瓷的相对密度逐渐下降, 抗压强度降低, 孔为通孔, 孔径为 $0.2\sim 0.9 \mu\text{m}$, 并且添加剂不影响蜂窝陶瓷载体的物相组成。以淀粉为造孔剂, 羟丙基甲基纤维素为塑化剂, 水添加量为 21%, 所挤出的 SiC 蜂窝陶瓷表面光滑, 结构规整的, 烧结后所得 SiC 蜂窝陶瓷孔径较大、分布均匀、连通性好、抗弯强度高。通过优化配方, 成功制备出孔道均匀、连通, 机械强度高的多孔碳化硅蜂窝陶瓷载体。

C09-26

高活性 ZnO/BiOBr 基异质结光催化剂的制备与性能研究

税安泽

华南理工大学

C09-27

基于相结构调控的高储能特性 Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO₃ 基弛豫铁电高熵陶瓷研究

刘岗

西南大学

介电电容器基于极高的功率密度被认为是最佳的脉冲储能方式。然而, 当下在器件集成化和小型化的趋势下, 介电电容器需着重考虑其能量密度以及损耗, 使其能应对各种应用环境。因此, 介电电容器急需解决的一大关键问题便是如何有效提升介电电容器的能效, 我们选择了 BNT 基陶瓷材料这种具有高极化

的铁电陶瓷作为研究基体，并希望通过对结构的调控以及工艺的升级改进来充分释放其储能潜力。在这里主要介绍两种对 BNT 基铁电陶瓷的调控策略，一是相结构调控，二是高熵策略。利用相结构调控我们成功地定制了室温弛豫相，在不损失最大极化的前提下延后了饱和极化，并通过轧膜工艺改进使得其储能性能得到极大提升，获得了 7.22 J/cm^3 的储能密度和 88.7% 的效率。借助高熵合金中的高熵策略，我们向陶瓷系统中引入多中离子半径各异元素，由于多种阳离子的填充导致高度的阳离子无序，离子结构的长程有序被破坏，使得陶瓷的弛豫性得到进一步增强，最终获得了 7.39 J/cm^3 的储能密度以及 94.39% 的储能效率，并且展现出优异的温度稳定性 ($\Delta\eta \approx 1.3\%$)。

C09-28

高熵烧绿石陶瓷固化体的制备和稳定性研究

张魁宝

西南科技大学

在核能开发利用过程中不可避免的会产生大量放射性废物，人造岩石固化-深地质处置是一种长期安全性高的高放废物处理途径，烧绿石陶瓷因其优异的辐照稳定性，被认为是晶格固化长寿命锕系核素最理想的宿主矿物之一。与传统陶瓷相比，高熵陶瓷在成分设计、力学性能及结构稳定性等方面表现出色。烧绿石与高熵的结合有可能超越传统局限实现多种核素、多价态混合废物的固化，并在力学性能及结构稳定性方面得到提升，成为新一代固化高放废物的备选材料。本研究采用传统烧结法制备了 $\text{A}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ (A 是稀土元素，是 Gd、Dy、Ho、Er、Yb、Nd 的结合体) 系列陶瓷，对烧绿石 A 位高熵化陶瓷固化体的物理和化学性能的潜在机制或关键因素进行了研究，对制备工艺进行了优化，降低了固相反应的烧结温度并缩短了烧结时间。采用 Au 离子和 Xe 离子评估了 $\text{A}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 高熵烧绿石陶瓷的辐照稳定性，研究了晶格畸变效应对高熵烧绿石抗辐照性能的影响。采用 PCT、MCC-1 静态浸出实验，对 $\text{A}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 高熵烧绿石陶瓷固化体全面进行了化学稳定性评估。首次采用 THMC 动态浸出法研究了 $\text{A}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 高熵烧绿石陶瓷固化体在模拟深地质处置环境下核素浸出规律。

C09-29

基于一体化铸型的空心涡轮叶片快速制造技术

苗恺

西安交通大学

C09-30

变价 $\text{Y}_2\text{Zr}_2\text{O}_7:\text{Tb}$ 透明陶瓷的缺陷调控及光学特性研究

卢开雷，齐建起*，卢铁城

四川大学

$\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$ 体系透明陶瓷具有高熔点、高原子序数、高密度等理化特性，且 A 位易实现稀土离子掺杂，在照明、探测、显像、屏蔽等领域受到了广泛关注。要实现稀土掺杂 $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$ 体系透明陶瓷的广泛应用，获得其高透明度、高效率发光是前提。然而，在消除 F/F⁺ 缺陷中心以实现高透明度的过程中，变价稀土掺杂的陶瓷发光性能显著降低，这为其广泛应用带来了挑战。基于此，本研究选取了 $\text{A}_2\text{B}_2\text{O}_7$ 体系中的 $\text{Y}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ (YZO) 基质作为示范，成功制备了变价稀土 Tb 掺杂的 YZO 高透明陶瓷。系统探讨了 YZO:Tb 陶瓷缺陷化学反应，利用缺陷团簇理论揭示了其着色及发光显著降低的机理。通过调控缺陷团簇含量，使 YZO:Tb 陶瓷的光学透过短波截止边从紫外区域 (~320 nm) 红移到绿光波带 (~545 nm)，实现了透明陶瓷大范围可调的光屏蔽特性。此外，还发展了真空退火缺陷消除策略，成功实现了 YZO:Tb 陶瓷的高透明度和高性能发光。并且利用 YZO:Tb 陶瓷具有随温度变化的激发态布居动力学过程，采用激发强度比及单带发光强度比模式设计了温度反馈窗口，显示了 YZO:Tb 陶瓷作为温度传感窗口的应用前景。该研究为变价稀土掺杂透明陶瓷实现高透明与高性能发光提供了理论与技术支撑。

C09-31

钙钛锆石陶瓷协同固化锕系元素和金属的研究艾曲¹, 孙世宽², 鲍伟超¹, 郭伟明^{1,*}, 林华泰¹

1. 广东工业大学

2. 佛山科学技术学院

随着核能的迅速发展,大量的放射性核废物以及退核电站中的污染金属构件需要安全处置。本工作探索了将钙钛锆石陶瓷($\text{CaZrTiO}_2\text{O}_7$)用于协同固化 PuO_2 和金属的可行性,使用 Fe/Cr/Al 金属与 $\text{CaTiO}_3/\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ 氧化物作为原料,通过固态反应烧结制备了 $\text{Ca}_{1-x}\text{Ce}_x\text{ZrTi}_{(2-2x)}\text{Fe}_x\text{Cr}_x\text{O}_7$ ($x=0-0.30$) 及 $\text{Ca}_{(1-3.87y)}\text{Ce}_{3.87y}\text{ZrTi}_{(2-7.73y)}\text{Fe}_{5.73y}\text{Cr}_y\text{Al}_y\text{O}_7$ ($y=0-0.11$) 钙钛锆石陶瓷固化体。其中两个体系中金属 Fe-Cr 和 Fe-Cr-Al 分别用于模拟受污染的不锈钢 Fe-Cr 金属构件和 FeCrAl 合金包壳, CeO_2 用于模拟 PuO_2 。物相分析和显微结构演变的结果表明金属原料在被氧化后,与氧化锆均成功固溶至基体,形成致密的钙钛锆石陶瓷,化学计量方程式与理论一致,钙钛锆石产率分别为 90.8-95.1 wt.% (Fe-Cr) 和 92.4-94 wt.% (Fe-Cr-Al)。通过 XRD 和 SAED 表征发现钙钛锆石均发生由单斜 2M 向三方 3T 的晶型转变,而 CeFeCrAl 体系 (Ce=0.35 f.u.) 相较于 CeFeCr 体系 (Ce=0.30 f.u.) 具有更高的 Ce 固溶量。XPS 分析表明 Ce^{4+} 部分还原为 Ce^{3+} , 而 Fe、Cr 和 Al 保持三价状态。本研究展示了钙钛锆石陶瓷协同固化放射性元素和金属的潜力。

C09-32**面向先进陶瓷材料制备与服役的 X 射线原位 CT 技术开发与应用**

夏夷平, 李仁庚*

南京工业大学

材料基础科学理论研究与先进表征技术开发是材料科学发展的两条主线,材料表征技术与仪器贯穿材料研发、生产制造、工程应用、服役评价全过程,不可或缺。近年来,随着材料研究的不断深入,现有表征仪器已无法满足材料前沿研究需求,亟需开发三维、原位、可检测材料深部的表征仪器与技术。基于 X 射线强穿透能力和计算机断层扫描(CT)技术,结合亚微米级精密控制转台和机械控制,实现微米级高分辨 X 射线 CT 成像,可实现毫米/厘米级试样的三维无损成像;突破了极端环境与 CT 耦合技术,独创采用非接触式加热模式,可实现超高温、超低温、复杂应力、应力腐蚀、热压烧结等服役环境下材料三维原位表征。目前该技术已应用于先进结构陶瓷材料的研究,为三维量化研究极端环境下关键材料与部件组织与缺陷演变规律提供了有力手段。高性能原位 X 射线 CT 设备的成功研发,将极大提升关键结构材料在服役工况下的可靠性和安全性。

C09-33**A Simple Fabrication of $\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2$ Photo-Anode with Long Wavelength Visible Light Absorption for Efficient Photoelectrochemical Water Oxidation**

Fei Han

North Minzu University

An Sb_2S_3 -sensitized TiO_2 ($\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2$) photo-anode (PA) exhibiting a high photo-electrochemical (PEC) performance in water oxidation has been successfully prepared by a simple chemical bath deposition (CBD) technique. Herein, the Raman spectra and XPS spectrum of $\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2$ confirmed the formation of Sb_2S_3 on the TiO_2 coatings. The $\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2$ photo-anode significantly shifted the absorption edge from 395 nm (3.10 eV) to 650 nm (1.90 eV). Furthermore, the $\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2$ photo-anode generated a photo-anodic current under visible light irradiation below 650 nm due to the photo-electrochemical action compared with the TiO_2 photo-anode at 390 nm. The incident photon-to-current conversion efficiency (IPCE = 7.7%) at 400 nm and -0.3 V vs. Ag/AgCl was 37 times higher than that (0.21%) of the TiO_2 photo-anodes due to the low recombination rate and acceleration of the carriers of $\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2$. Moreover, the photo-anodic current and photostability of the $\text{Sb}_2\text{S}_3/\text{TiO}_2$ photo-anodes improved via adding the Co^{2+} ions to the electrolyte solution during photo-electrocatalysis.

C09-34

以 NITE 相和玻璃陶瓷为连接层的 SiC 陶瓷连接研究进展

郭伟明

广东工业大学

碳化硅 (SiC) 具有高熔点、低中子吸收截面、耐腐蚀和抗辐照等优异性能, 是新型核燃料包壳的重要候选材料。要替代传统的锆合金包壳, 须解决 SiC 包壳与端塞的连接问题。在 SiC 连接技术中, 纳米浸渍瞬态共晶相 (NITE 相) 和玻璃陶瓷分别作为典型的同质和异质连接技术, 有望用于核用 SiC 包壳的密封。基于最近的文献研究进展, 并结合我们团队研究, 本报告全面介绍与分析了上述两种连接技术的原理和研究现状, 并对发展趋势进行了展望。

C09-35**基于加法原理的结构功能一体化陶瓷的智能制造——宏观及微观自组装 3D 打印**

刘伟

东莞理工学院

C09-36**新型铜基自润滑复合材料的设计及摩擦学行为的研究**

李珍

兰州文理学院

C09-37**碳纤维增强凝胶注射成型铝镁尖晶石陶瓷的组织与性能研究**程庆楠^{1,2}, 潜坤², 陈波^{2*}, 王建军¹, 刘奎²

1. 东北大学材料科学与工程学院

2. 季华实验室

纤维增强陶瓷基复合材料 (CFRCMCs) 既保留了单体陶瓷材料高强度、高硬度、耐高温和耐腐蚀等的特性, 同时又能提高陶瓷基体的韧性, 改善其综合力学性能。本文以铝镁尖晶石为基体, 碳纤维为增强相, 采用凝胶浇注成型制备镀镍碳纤维增强铝镁尖晶石复合材料, 以正交试验法研究了碳纤维添加量、干燥温度、催化剂和引发剂添加量、单体与交联剂的比例对陶瓷热物性和力学性能的影响, 获得纤维增强效果最佳的工艺参数。并分析了高温烧结后碳纤维增强凝胶注射成型铝镁尖晶石陶瓷的显微组织, 特别是碳纤维和陶瓷基体结合界面组织形貌。相关研究对提升其使用寿命, 降低使用成本具有重要意义。

C09-38**硼/碳热还原法合成 TaB₂-TaC 纳米复合粉末**

刘欢, 孙文周*

北方民族大学

利用 Ta₂O₅、B₄C 和炭黑作为原料, 采用了硼/碳热还原法, 合成了 TaB₂-TaC 纳米复合粉体并对相关反应进行了热力学计算。研究了不同温度和过量 B₄C 对两相含量的影响, 并通过 XRD、XPS、SEM、EDS 和 TEM 对复合粉体的物相、形貌和化学性质进行了表征。结果表明, 在 1250 °C 至 1550 °C 之间可获得纯相的 TaB₂-TaC 复合粉体。通过改变烧结温度和起始组分中 B₄C 的含量, 可以更容易地调节 TaB₂-TaC 复合粉体中两相的含量。在 1400 °C 下反应并过量添加 20wt% 的 B₄C, 保温 1 h 后得到的复合粉体的氧含量和碳含量分别为 0.326% 和 1.651%。TaB₂-TaC 复合陶瓷在 2000 °C 和 40 MPa 的条件下经过 10 min 的 SPS 烧结致密化, 得到致密的 TaB₂-TaC 复合陶瓷, 其致密度为 94%, 维氏硬度为 21.66±0.5 GPa, 断裂韧性为 5.15±0.2 MPa m^{1/2}。

C09-39**(Ti,W,V) C 多元固溶体粉末的合成及对 Ti(C,N)基金属陶瓷组织性能的影响**

曹雅璟, 刘美玲*

北方民族大学

预制固溶粉的添加有效的缩小了芯环结构之间的相界面错配度, 从而使金属陶瓷力学性能得到改善。以氧化物为原料, 在真空条件下通过碳热还原法成功制备出单相 $(\text{Ti}, \text{W}_{0.06}, \text{V}_x)\text{C}$ 预制固溶体粉体。采用真空烧结法添加 $(\text{Ti}, \text{W}_{0.06}, \text{V}_x)\text{C}$ ($x=0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$) 在 $1550\text{ }^\circ\text{C}$ 烧结温度下制备了高致密 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$ 基金属陶瓷对其进行了测试表征, 电子显微镜 (SEM) 观察发现其主要由黑芯灰环, 灰芯灰环, 白芯灰环以及无环硬质相组成, 粒径统计发现 $(\text{Ti}, \text{W}_{0.06}, \text{V}_x)\text{C}$ 的加入起到了细化晶粒的目的, 黑芯逐渐减小, $(\text{Ti}, \text{W}_{0.06}, \text{V}_{0.05})\text{C}$ 制备 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$ 基金属陶瓷其中黑芯粒径为 $0.29\text{ }\mu\text{m}$, 其中 $(\text{Ti}, \text{W}_{0.06}, \text{V}_{0.02})\text{C}$ 制备 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$ 基金属陶瓷力学性能最佳, 抗弯强度为 1201 MPa 。 $(\text{Ti}, \text{W}_{0.06}, \text{V}_x)\text{C}$ 制备 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$ 基金属陶瓷, 整体具有较低的摩擦系数, 室温下摩擦系数平稳, 无明显波动, 其中 $(\text{Ti}, \text{W}_{0.06}, \text{V}_{0.03})\text{C}$ 制备的 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$ 基金属陶瓷摩擦系数为 0.35 , $(\text{Ti}, \text{W}_{0.06}, \text{V}_{0.05})\text{C}$ 制备的 $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$ 基金属陶瓷磨损率最低为 $1.46 \times 10^{-6}\text{ mm}^3/\text{N m}$ 。

C09-40

原料对反应烧结 SiC 性能影响

陈振祥, 陈宇红*

北方民族大学

反应烧结碳化硅拥有耐高温、耐磨损、抗氧化、力学性能优良、热导率高等特性。本文通过对绿碳化硅和黑碳化硅的原料进行分析, 采用不同粒径原料制备反应烧结碳化硅陶瓷, 研究不同的原料粒度及纯度对碳化硅力学-热学性能的影响。结果表明: 不同碳化硅粒度不同, 杂质 Fe 和 Al 含量不同。绿碳化硅 $61\text{ }\mu\text{m}$ 、绿碳化硅 $38\text{ }\mu\text{m}$ 碳化硅的 Al 含量很低, Fe 含量较高, 黑碳化硅与之相反。绿碳化硅 $13\text{ }\mu\text{m}$ 的 Fe、Al 含量较低。采用 7.5% 石墨粉为碳源, 在 $1650\text{ }^\circ\text{C}$ 温度下与液相硅反应烧结制备碳化硅陶瓷。抗弯强度随着原料粒度的减小, 呈现增大的趋势, 其中绿碳化硅 $13\text{ }\mu\text{m}$ 制备的碳化硅陶瓷抗弯强度大于其他陶瓷, 抗弯强度达到 430 MPa 。热学性能绿碳化硅陶瓷大于黑碳化硅陶瓷, 二者 1:1 制备材料的热导系数介于绿碳化硅陶瓷和黑碳化硅陶瓷热导之间, Al 杂质对材料热导率影响远大于 Fe。

C09-41

退火工艺对碳化硅陶瓷微观结构及热学性能的研究

袁子婷, 陈宇红*

北方民族大学

使用亚微米 $\beta\text{-SiC}$ 粉, 选取 $7\text{ wt.}\%$ MgO 和 Yb_2O_3 作为烧结助剂, 通过放电等离子烧结 (SPS) 制备致密 SiC 陶瓷, 将样品在氩气中退火, 通过 XRD 和 SEM 对烧结和退火后的 SiC 陶瓷的相组成和微观结构进行了分析, 并通过激光闪射法对样品的热导率进行检测。实验结果表明, 通过添加 $7\text{ wt.}\%$ 的烧结助剂, 实现了致密化, 材料的热导率达到 $78\text{ W}/(\text{m K})$ 。退火后热导率进一步提高至 $86\text{ W}/(\text{m K})$ 以上。SiC 陶瓷热导率提高的主要原因在于退火导致晶粒长大、液相含量减少。

C09-42

连续碳纤维增强 ZrB_2 陶瓷基复合材料刘俊^{1,2}, 邹冀^{1,2,*}, 邱帅航^{1,2}, 傅正义¹

1. 武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室
2. 武汉理工大学襄阳示范区湖北隆中实验室

硼化锆 (ZrB_2) 超高温陶瓷密度较低、熔点较高以及抗氧化性优异, 因此在航空航天领域倍受关注。然而, 其断裂韧性低等问题使其应用受到限制, 连续碳纤维的引入有望改善 ZrB_2 陶瓷的本征脆性, 获得断裂韧性大幅提升且自身高温性能得以保持的连续碳纤维增强 ZrB_2 陶瓷基复合材料。本研究采用料浆注射浸渍工艺、通过调整工艺参数制备连续碳纤维增强 ZrB_2 陶瓷基复合材料并对比研究了在两种经典方向 (垂直和水平方向) 上复合材料力学性能、热学性能、电磁屏蔽和吸波性能的各向异性, 探究材料微观结构和性能与工艺参数的关系。首先, 优化出最佳浆料级配比例 (1C1F) 与制备工艺 (二次真空浸渍、热解)。复合材料

密度可高(2.17 g/cm^3), 两组方向上的压缩强度差异不大 ($86.46\sim 89.19 \text{ MPa m}^{1/2}$)。此外。制备的 C_f/ZrB_2 复合材料具有一定的压缩回弹性能, 可以满足装配过程时的它在竖直方向和水平方向的热导率分别为 $1.0\sim 2.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 和 $1.6\sim 4.5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。 C_f/ZrB_2 陶瓷基复合材料在 X 波段具有良好的电磁屏蔽性能, 其竖直方向和水平方向总的屏蔽效能分别为 $18\sim 20 \text{ dB}$ 和 $22\sim 26 \text{ dB}$ 。在竖直方向上, C_f/ZrB_2 陶瓷基复合材料在极窄的频率范围内 (10 GHz 附近) 具有一定的吸波特性和特性, 最大反射损耗为 -25.4 dB , 这些性能的差异与碳纤维预制体的编织方式密不可分。

墙报

C09-P01

直写 3D 打印碳化锆陶瓷

体旭彤, 史小红*

西北工业大学

3D printing of ZrC ceramics by direct-ink-writing (DIW) technology are proposed. With ZrC precursor as adhesive, the ceramic preforms obtained by DIW were heat-treated to create reactive sintering at $2000 \text{ }^\circ\text{C}$. For sintering temperature lower than normal ZrC ceramics, the grains deformed and grew by slipping of the crystal planes, forming slip bands. The slip bands were conducive to the decomposition of ZrC precursor on their surface to produce ZrC, which bonded the grains firmly and achieved activated sintering. The 3D printing ZrC ceramics by DIW technology have excellent mechanical and thermal conductivity properties, which shows potential applications as complex shaped high-temperature structural materials in aerospace and other fields.

C09-P02

ZrB₂ 改性的液相烧结 SiC 陶瓷的高温氧化行为

沈旭, 杨金山*

上海硅酸盐研究所

连续碳化硅纤维增强碳化硅陶瓷基复合材料(SiC_f/SiC)具有低密度、耐磨损、高比强度、高比模量、耐高温、抗氧化、非脆性断裂等优点, 被视为新一代航空发动机热端部件的重要候选材料。由于受制备工艺与基体、纤维、界面之热膨胀系数不匹配以及等因素的限制, 基体内部易出现孔隙与微裂纹, 氧气容易通过这些孔隙与裂纹进入材料内部进而氧化界面与纤维。引入含硼自愈相能在高温氧化过程中产生粘性的硼硅玻璃相愈合裂纹。然而硼硅玻璃相的高温稳定性差, 其高温服役的挥发会破坏氧化层结构, 这限制了其的应用。

针对上述问题, 本工作通过向液相烧结 SiC 基体中引入宽散分布的 ZrB_2 并进行了 $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ 空气氧化 100 h 的测试。 ZrB_2 添加降低了氧化层中硅酸盐网络的聚合度, 减少了氧化层气泡残留, 提高了氧化层稳定性。同时抑制了 LPS-SiC 氧化层中残余气泡引起的穿过氧化层的额外氧化。氧化 100 h 后, 随着 ZrB_2 从 $0 \text{ wt}\%$ 增加到 $10 \text{ wt}\%$, 其氧化层孔隙率从 16.1% 减少到 0% , 额外侵蚀深度从 $125 \mu\text{m}$ 减少到 $0 \mu\text{m}$ 。同时生成的 ZrSiO_4 可以在表面氧化层与 SiC/ZrB_2 基体的界面处迁移和聚集, 形成连续的 ZrSiO_4 屏障提高抗氧化能力。本研究有助于更好地理解 SiC 在氧化环境中的失效机理, 为高温稳定的自愈合的 SiC_f/SiC 设计提供参考。

C09-P03

高强度-韧性 Cr_2AlC 涂层变形机理研究

袁江淮

中国科学院宁波材料所

MAX 相是一类具有热力学稳定性和密排六方结构的层状高性能陶瓷材料, 兼具有金属和陶瓷优异的性能, 在极端苛刻防护领域拥有广泛的应用前景。但是, 由于大的 c/a 比和较少的独立滑移系数数量, 如何同时提高 MAX 相的强度和韧性依然存在挑战。我们采用微柱压缩测试, 研究了高纯 Cr_2AlC 涂层在单轴压

缩条件下的变形行为。结果表明：纳米晶 Cr_2AlC 涂层的屈服强度为 5 GPa，这是报道的块体 MAX 相材料强度的 5 倍以上，并且在超过 12% 的应变量下依然不会失效。变形后微柱的 TEM 结构分析表明， Cr_2AlC 涂层强度和韧性的提高可归因于晶界滑移、非基面滑移、非晶化和孪晶的协同作用。同时研究了结晶度对 Cr_2AlC 涂层力学性能的影响规律。

C09-P04

YTaO₄/NiCoCrAlY 热障涂层体系的温度场及应力场耦合模拟分析

陆天龙, 李祖来, 冯晶, 种晓宇*

昆明理工大学

针对高温环境下钽酸盐热障涂层服役问题，现利用有限元仿真和第一性原理、实验相结合的方法，研究了在高温环境下，孔隙、热导率、对流传热系数、涂层厚度等因素对钽酸盐热障涂层隔热性能的影响，分析了涂层厚度、氧化层厚度、服役温度等因素对钽酸盐热障涂层服役内应力的影响。结果表明：通过提高热导率、适当增加孔隙率的方式可以有效的提高钽酸盐热障涂层的隔热性能，而增加涂层厚度、提高对流传热系数的方式有一定的局限性。热障涂层制备冷却至室温后，热障涂层体系各层均存在残余应力，陶瓷层及氧化层中为残余压应力，氧化层的残余压应力最大。热障涂层服役时，随着涂层厚度的增加，陶瓷层内的热应力也随之减小，而氧化层内的热应力则随之增加，热循环寿命随之缩短。氧化层内的最大拉应力与陶瓷层厚度之间的关系可表示为 $\sigma = 2752 + 5 \times e^{(htc + 0.49)/0.1}$ 。随着氧化层厚度的增加，陶瓷层内的热应力也随之增加，而氧化层内的热应力减小，热循环寿命降低。氧化层内的最大拉应力与陶瓷层厚度之间的关系为 $\sigma = -8419 \times hTGO + 2859$ 。随着服役温度的升高，热障涂层系统内的热应力增大。

仅发表论文

C09-PO01

高熵钙钛矿薄膜材料 $\text{La}(\text{FeCoNiCrMn})_{0.2}\text{O}_{3-x}$ 中的化学短程序

苑鑫, 张富祥*

松山湖材料实验室

高熵钙钛矿材料因其独特的电磁性质和复杂的内部机理备受关注。其中，氧空位的含量在调控晶体结构中发挥关键作用。对不同氧空位浓度下晶体结构的研究，以及对高熵钙钛矿材料内部生长过程的探究，对于深入理解高熵钙钛矿的性能调控至关重要。

在本研究中，我们采用脉冲激光沉积技术，在不同的生长氧压下，成功地在单晶 $\text{SrTiO}_3(001)$ 衬底上外延生长出 $\text{La}(\text{FeCoNiCrMn})_{0.2}\text{O}_{3-x}(\text{L}_5\text{BO}_3)$ 薄膜。随后，我们运用 X 射线衍射 (XRD)、透射电镜 (TEM) 和能谱分析 (EDS) 等手段对薄膜的晶体结构进行了表征。结果显示，随着氧空位浓度的增加， L_5BO_3 的氧八面体结构出现扭曲，并且在薄膜底部观察到了短程有序的 Ni 元素分布。进一步的研究表明，随着氧空位浓度的增加，Ni 元素的短程序范围逐渐扩大。

这些发现从晶体的周期性角度提供了对 L_5BO_3 结构的真实表征，有助于更全面地理解晶体的微观结构。此外，这些研究成果为调节 L_5BO_3 的电磁性能提供了未来的可行方案，为相关领域的进一步研究和应用奠定了基础。

C09-PO02

SiCf/SiC-SiYBC 复合材料的蠕变性能及损伤机理

张立, 王佳璇, 张程煜*

西北工业大学

为满足航空发动机越来越严苛的服役环境，研究人员开始采用自愈合基体改性的方法提升 SiC_f/SiC 的抗氧化和抗蠕变性能。本工作研究了熔体渗透工艺制备的碳化硅纤维平纹布增强的 SiYBC 改性碳化硅复合材料 (MI $\text{SiC}_f/\text{SiC-SiYBC}$) 在空气中的拉伸蠕变性能，蠕变温度为 1300 °C、1350 °C 和 1400 °C，应力范围为 60~120 MPa。用扫描电子显微镜 (SEM) 观察了断口形貌和微观结构，使用电子能谱分析仪 (EDS) 进行了元

素分析。结果表明：在 1300~1400 °C 范围内，2D-SiC_f/SiC-SiYBC 的蠕变断裂时间(t_u)与应力和温度关系密切，其随温度升高或应力增大而降低。当蠕变应力高于比例极限应力(σ_{PLS})时，基体开裂严重，纤维和 BN 界面氧化退化， t_u 大大降低，蠕变行为主要由纤维控制。当蠕变应力低于 σ_{PLS} 时，基体开裂轻微，纤维能够发挥很好的承载作用， t_u 较长，蠕变行为由纤维和基体共同控制。同时，随着温度从 1300 °C 升高至 1400 °C，基体氧化物等物相填充界面间隙，导致界面粘结，促进裂纹张开和扩展。

C09-PO03

Cansas III 纤维增强 SiC 复合材料的高温蠕变行为

郑琪宁，张程煜*

西北工业大学

在 1300 °C~1400 °C，70 MPa~120 MPa 的空气环境中，研究了化学气相渗透 (CVI) 工艺制备的平纹编织 Cansas III 纤维增强 SiC 复合材料(2D-SiC_f/SiC)的高温蠕变行为，发现国产三代 2D-SiC_f/SiC 在 1300 °C/100 MPa，1350 °C/80 MPa，1400 °C/70 MPa 等条件下蠕变时长分别超过了 800 h，1000 h 和 500 h，超过美国 MI-Sylramic-iBN/SiC 复合材料，但与美国 CVI-Sylramic-iBN /SiC 仍有一定的差距。分别对长时 (>500 h) 和短时蠕变 (100 h) 后的试样进行室温拉伸，测量蠕变后的平面拉伸性能。结果表明，短时蠕变后的剩余拉伸性能随蠕变应力或温度的提高而下降，长时蠕变后试样的剩余拉伸强度保持率均低于 30%。结合断面形貌和纤维微观组织观察，讨论了国产三代 2D-SiC_f/SiC 的失效机理和影响蠕变性能的关键因素。

C09-PO04

放电等离子体烧结低温快速制备 Ti₃SiC₂/Cu/SiC 陶瓷基复合材料及其力学性能研究

于泉良^{1,2}，王坤^{1,3,*}，吴秤称¹，张翼^{1,3}

1. 佛山大学材料科学与氢能学院

2. 佛山大学广东省氢能技术重点实验室

3. 佛山大学材料绿色表面技术与功能涂层中国轻工业重点实验室

采用超声化学镀法制备得到的 Cu 包覆 SiC 复相颗粒，按照一定比例与 Ti₃SiC₂ 粉体球磨混匀后，在氩气氛围下通过放电等离子体烧结法 (SPS) 在 1350 °C 下快速烧结制备得到了致密度达 98.6 % 的 Ti₃SiC₂/Cu/SiC 陶瓷基复合材料。根据 XRD、SEM 分析，最后的复合材料主相为 Ti₃SiC₂ 和 SiC，且 SiC 增强相均匀分布在 Ti₃SiC₂ 基体中，部分 Ti₃SiC₂ 与 Cu 在界面处发生互溶现象，增强了不同陶瓷相结合能力。研究了不同 SiC 添加含量及烧结温度对复合材料显微结构和力学性能的影响。研究表明：烧结温度和 SiC 含量对于复合材料致密度和机械性能均有较大影响；当烧结温度为 1350 °C 时，SiC 添加含量为 10% 时，复合材料具有最高的致密度达到了 98.6 %，接近完全致密，其弯曲强度达到 513.9 MPa，断裂韧性达到了 11.88 MPa m^{1/2}；当 SiC 添加含量为 15 %，复合材料具有最高的显微维氏硬度，达到了 8.4 GPa，相比纯相的 Ti₃SiC₂ 陶瓷均有较大程度地提高。