

先进陶瓷及陶瓷基复合材料作为新材料的重要分支，支撑着我国空天技术、国防工业、高端装备制造以及国家重大工程等领域的跨越式发展，是我国七大战略新兴产业和“中国制造2025”重点发展的十大领域之一。先进陶瓷及陶瓷基复合材料正向着高性能、高可靠性、低成本、绿色友好、结构功能一体化等方向不断发展。

## 先进陶瓷材料结构功能一体化的探索与实践

### ——先进陶瓷及陶瓷基复合材料分论坛侧记

文 / 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 王袁杰 龚 坚



“2021新材料国际发展趋势高层论坛——先进陶瓷及陶瓷基复合材料分论坛”于10月18日在宁波顺利召开，由中国科学院宁波材料技术与工程研究所、中国科学院上海硅酸盐研究所、武汉理工大学、西北工业大学、北京航空航天大学 and 《中国材料进展》杂志社承办。分会论坛邀请了13位知名专家就高品质陶瓷原材料合成、复合材料组成与结构设计、多功能复合原理与应用、新材料体系与新结构设计等方面研究进展和关键问题做了精彩报告。马朝利教授和成来飞教授，王京阳研究员和黄庆研究员分别主持了上午和下午的学术报告环节。

### 精彩报告



**航天一院703所冯志海研究员** 介绍了高熵陶瓷体系设计、制备方法及相关性能表征等领域的研究进展，并以本单位相关研究成果为例，介绍了通过反应熔渗等途径将高熵陶瓷引入碳/碳多孔体内，形成了超高温耐烧蚀性能好、兼具一定承载能力的碳纤维增强高熵陶瓷基复合材料，展示了高熵超高温陶瓷在新型热防护材料领域的应用潜力。



**中国航发北京航空材料研究院焦健研究员** 介绍了碳化硅纤维的基本性能及其在高温条件下性能的演变机理，分析了氮化硼在碳化硅表面的生长模型及氮化硼界面对纤维性能的影响研究，讨论了“预浸料-熔渗”工艺和“化学气相渗透+先驱体渗透裂解”杂化工艺制备的碳化硅纤维增强碳化硅复合材料室温、高温力学性能及断裂形式。



**中国科学院金属研究所王京阳研究员** 介绍了新型高熵稀土硅酸盐环境障涂层的多层次构筑研究，利用高熵稀土主元协同效应提升涂层材料的关键性能，基于大气等离子喷涂技术构筑高熵稀土单/双硅酸盐复相涂层，建立了下一代环境障涂层的材料设计、粉体制备、制备控制等全流程技术。



**中国科学院上海硅酸盐研究所刘学建研究员** 通过向 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷引入少量 $\text{FeSi}_2$ ，实现了 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷材料晶粒尺寸分布的有效调控；设计、制备了W- $\text{Fe}_3\text{Si}_3$ 核壳结构，进一步优化了 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷的力学性能；探索了一种新的增韧相金属W，实现了W- $\text{Si}_3\text{N}_4$ 复相陶瓷制备， $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷断裂韧性显著提升。



**中国科学院上海硅酸盐研究所章健研究员** 以无压烧结结合热等静压处理的方法，结合致密化过程微结构调控，实现了高强度和高光学质量 $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 、AlON和 $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ 透明陶瓷的制备；从素坯均匀性出发，采用首创的自发凝固成型技术，突破纳米晶粉体高固含量浆料制备、大尺寸干燥与成型缺陷控制、烧结变形和开裂等关键，实现 $210\text{mm} \times 420\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的 $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 透明陶瓷制备，为工程应用奠定了坚实基础。



**中国科学院宁波材料技术与工程研究所黄庆研究员** 介绍了具有路易斯酸性质的高温熔盐与传统MAX相之间的拓扑化学反应行为；揭示了熔盐阳离子和阴离子会与MAX相相互作用，并存在“同晶置换”和“阴离子配位”两种不同的化学反应机制；通过绘制元素依赖的吉布斯自由能映射图谱和结构映射图谱，实现了MAX相材料的结构稳定性预测和新材料预测，并合成了层间为副族元素的新型MAX相材料。



**武汉理工大学王皓研究员** 以MAION ( $M=\text{Mg}, \text{Li}$ ) 四元尖晶石型固溶体为对象，通过组成设计和材料制备获得高品质的透明陶瓷，系统评价了材料的光学、机械、热学等性能；分析了固溶体的长程与局域晶体结构，揭示 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Li}^+$ 在尖晶石结构中独特的占位特征；通过理论与实验相结合，全面构建了MAION透明陶瓷的组成-结构-性能关系。



邹冀教授



王连军教授



张雨雷教授



胡成龙研究员



梅辉教授

**武汉理工大学邹冀教授** 介绍了 $\text{ZrB}_2$ 基复相陶瓷的致密化、微结构调控与性能（力学和抗氧化烧蚀性能）提升等领域的代表性研究工作；还简要介绍了连续碳纤维增强超高温陶瓷基复合材料的研究工作，尤其是在实现超高温陶瓷和陶瓷基复合材料贯穿式研究等方面的初步实践。

**东华大学王连军教授** 通过选择不同能量状态微米尺度粉体取代纳米粉体为原料，包括具有高反应活性粉体、高能态粉体、介孔粉体等不同系列粉体，利用烧结动力学调控实现了微结构的调控，提出了高能态粉体的烧结机理，成功制备了多种结构-功能一体化的高性能材料。

**中南大学熊翔教授团队** 针对材料制备过程中高温纤维损伤、残留低熔点金属相等问题，提出了熔盐辅助反应熔渗新技术，实现了超高温陶瓷基复合材料高效低温熔渗制备、炭/陶多层界面设计与调控，解决了极端力热耦合环境材料高性能综合响应难题，为实现战略型、革命性超高温结构材料在国家重大工程中的应用奠定基础。

**西北工业大学张雨雷教授** 介绍了团队在采用化学气相沉积工艺制备抗氧化/烧蚀涂层的最新研究进展，着重介绍了通过涂层结构设计发展的单相、复相、纳米线增韧及多层交替等涂层体系，分析了涂层的形成机制及不同服役环境下的氧化/烧蚀行为。

**中国科学院金属研究所胡成龙研究员** 针对不同的服役环境，设计和制备了多种C/C-SiC复合材料涂层。其中，设计和制备的SiC/硼硅酸盐- $\text{Al}_2\text{O}_3$ 双层复合涂层，实现了中低温长时抗氧化防护；设计和制备的SiC/ $\text{ZrB}_2$ -SiC-X/SiC三层复合涂层，实现了中高温长时抗氧化防护；还提出了预氧化提升界面结合强度的策略，实现了 $(2050 \pm 50)^\circ\text{C}$ 多次循环烧蚀。

**西北工业大学梅辉教授** 通过热处理、致密化、引入晶须、短纤维、连续纤维等多尺度增强体等方法可有效提升打印陶瓷的力学性能；在3D打印中引入功能性原料，探索了3D打印CMC材料在电磁屏蔽、气体传感、超疏水、光催化、储能、润滑和零膨胀等方面的应用。