



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

C08-超高温结构材料与防护涂层

**C08-Ultra-high Temperature
Structural Materials and Protective
Coatings**

Organized by

Chinese Materials Research Society

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

C08. 超高温结构材料与防护涂层

分会主席：李贺军、张联盟、董绍明、周益春

C08-01

航天动力热防护用复合材料研究进展与需求分析

张光喜¹

1. 西安航天复合材料研究所

C08-02

航天复合材料发展与展望

李俊宁¹

1. 航天材料及工艺研究所

C08-03

陶瓷基纳米复合材料结构设计及热管理应用

殷学民^{1,2}, 沈曦², 李贺军¹

1. 西安航天复合材料研究所
2. 香港理工大学

航空航天、建筑和人类日常生活中涉及到众多极端热应用环境，因此开发有效的热管理材料是非常有必要的，以实现高效隔热、热转换等应用。陶瓷基纳米材料因其熔点高、热稳定性好、比表面积大、力学性能优异和耐腐蚀等优点，在热管理应用领域被广泛关注。调控陶瓷基纳米材料形性、与其他材料进行复合和宏微结构设计，是进一步改善陶瓷基纳米复合材料性能、拓展其应用的重要手段。基于自主开发 CVD 系统和陶瓷基/碳基纳米材料可控制备技术，实现多级结构陶瓷基纳米复合材料的可控构筑，合理调控、优化设计界面特性，探索了陶瓷基纳米复合材料在多种热管理场景的应用。

C08-04

脆性陶瓷的铁弹增韧机制

杨丽¹

1. 西安电子科技大学

杨丽，中国青年科技奖特别奖获得者，国家级领军人才，国家级青年人才，陕西省科技创新团队及湖南省自然科学基金创新群体负责人，西安电子科技大学先进材料与纳米科技学院执行院长。长期从事空天热防护涂层及其服役行为的研究。断裂韧性陶瓷材料如热障涂层抗剥落能力评价的关键指标，也是其设计与应用面临的关键难题。本报告提出陶瓷材料的铁弹增韧机制，实现了铁弹畴结构陶瓷单晶薄膜、块体与涂层的制备，基于压痕、高分辨 TEM、原位 TEM 等方法发展了铁弹及其翻转行为的实验方法，发现了其铁弹畴结构、畴变变体及其非弹性变形行为，找出了热障涂层铁弹畴结构的择优取向。进一步提出了铁弹畴变及裂纹诱导畴形核的跨尺度力学模型，分析了畴结构、畴尺寸、畴壁能等参数对畴变行为的影响规律，揭示了畴变非弹性变形与增韧的规律。在此基础上，提出了陶瓷材料铁弹畴增韧的几种机制与调控方法。

C08-05

碳/碳复合材料的高导热设计及影响因素

侯向辉¹, 宋强¹, 李伟¹, 张守阳¹, 李贺军¹

1. 西北工业大学材料学院

碳/碳复合材料作为一种重要的高温结构材料，具有低密度、低热膨胀系数、优异的高温力学性能和摩

擦磨损性能，在航空航天、核工业和民用工业领域都有广泛的应用。近年来，受热管理和高温热疏导应用的驱动，高导热碳/碳复合材料的研究受到越来越多的重视。与传统的金属材料相比，高导热碳/碳复合材料由于其超高热导率、轻质和良好的力学性能，是更为理想的导热、散热候选材料。我们将从材料结构角度讨论高导热碳/碳复合材料的设计及影响其导热行为的主要因素，包括碳纤维的种类和微观结构特点、预制体制备、碳基体的织构，以及纤维/基体的界面改性；并对国内外高导热碳/碳复合材料的研究进行了总结和展望。

C08-06

多功能陶瓷基复合材料结构设计及性能研究

杨金山¹

1. 中国科学院上海硅酸盐研究所

C08-07

机器学习辅助超高温碳化物涂层 CVD 工艺的热力学分析与优化

彭健^{1,2}, 黄炜^{1,2}, 许柄权^{1,2}, 徐志刚^{1,2}, 涂溶^{1,2}, 王传彬^{1,2}, 章嵩^{1,2}

1. 武汉理工大学 材料复合新技术国家重点实验室, 湖北武汉
2. 化学与精细化工广东省实验室潮州分中心, 广东潮州

化学气相沉积技术 (CVD) 是目前制备高质量超高温碳化物防护涂层的重要方法之一，但是 CVD 工艺参数复杂且制备周期较长，实验难以对某个系统进行高效系统研究。本研究基于热力学计算与高通量计算技术在短时间内实现了对碳化物 CVD 沉积过程的全面系统分析，阐明了沉积参数与沉积相图、气相组分、沉积纯度、沉积效率和前驱体利用率等关键指标之间的联系，确定了最优沉积窗口。并进一步利用机器学习技术，将热力学分析效率提高了 15 倍以上，确定了最佳的样本数，为优化 CVD 工艺提供理论指导。

C08-08

氧气渗透传质模型和“类洋葱”微观力学模型预测多层界面对复合材料抗氧化性能和力学性能的影响

冯涛¹, 丁家辉¹, 童明德¹, 林红娇¹

1. 西北工业大学

本文提出了多层界面的氧气渗透传质模型和“类洋葱”微观力学模型，用于预测高温有氧环境下界面和纤维的氧化损伤以及氧化损伤前、后复合材料的机械强度。上述两个模型根据氧气传质理论和 PyC 界面氧化损伤理论建立，将 PyC 界面的氧化损伤扩展到 (PyC-SiC)_n 多层界面，同时考虑了因热失配而引起的微裂纹；揭示了“碳纤维/(PyC-SiC)_n 多层界面”区域氧气渗透传质规律和纤维氧化损伤的演化过程；类比洋葱从芯部向外层层包裹，研究了复合材料在不同界面层数下的机械强度。此外，采用化学气相渗透 (CVI) 法制备了 Cf@(PyC-SiC)_n/SiC (n=1/2/3/4) 复合材料，测试了其氧化前、后的力学性能，并将氧化前、后抗拉强度的实验值与预测值进行了对比。结果表明，抗拉强度的预测结果与实验结果吻合良好。PyC-SiC 多层界面对复合材料抗拉强度表现出积极影响，主要归因于多层界面实现了裂纹的偏转和枝化，促进了纤维的多级拔出。界面层数的增加延长并曲折了氧气的扩散路径，减少了纤维和界面的氧化损伤。

C08-09

陶瓷增强难熔高熵合金超高温力学性能研究

万义兴¹

1. 中国矿业大学

航空发动机、燃气轮机、核电站等高温工业领域急需 1800°C 以上温度具有使用价值的新型高温结构材料。这一温度远高于传统镍基高温合金的熔点，必须在传统高温合金以外寻找新的高温结构材料。而主要

由难熔金属元素组成的难熔高熵合金(RHEAs)在 1200 °C 以上仍具有很高的强度,引起了研究者的广泛关注,如 NbMoTaW 难熔高熵合金在 1600°C时仍具有大于 400 MPa 的屈服强度。以 NbMoTaW 合金为基础,添加难熔金属元素或非金属元素,调控陶瓷相含量与形态,设计出新型陶瓷增强难熔高熵合金,并通过真空电弧熔炼法制备这些合金,表征其组织结构和不同温度力学性能,探究其高温强化机制。这种合金在 1000 至 1800 °C 范围内具有极高的压缩屈服强度,其中 NbMoTaWHfN 难熔高熵合金 1800 °C 强度达到 288 MPa,实现了耐高温与高强度的双重效果,在测试温度和强度方面高于其它合金,包括高熵合金、难熔金属和高温合金。这种优异的性能使陶瓷增强难熔高熵合金在超高温下具有广泛的工程应用潜力。

C08-10

高温腐蚀条件下 MCrAlY 合金组织模拟及实验研究

孙毅¹, 原慷¹

1. 矿冶科技集团有限公司

本文以热力学模拟软件 Thermocalc 对 MCrAlY 合金在典型 I 类热腐蚀高温下的相组织及氧含量对相组织的影响进行了研究,结果呈现出在氧含量逐渐升高的过程中,合金内部 Al₂O₃ 的含量递增,β 相含量递减的趋势,对合金组织组成产生变化。并通过耦合多个数据库模拟了在相同温度下 Na₂SO₄+NaCl 作为腐蚀介质时相组织的变化。同时进行了 MCrAlY 合金的高温静态热腐蚀试验,在原有氧化物的基础上尖晶石的含量明显提高,热力学模拟的结果较好的预测了实验数据变化趋势,表明热力学模拟可以在一定程度上作为热腐蚀试验的预期手段。

C08-11

长期时效过程中 GH3617 合金的组织演化及性能退化特征

管现军¹, 王佳祺¹, 吴云胜¹, 侯介山¹, 周兰章¹

1. 中国科学院金属研究所

GH3617 合金是本课题组仿制 IN617 合金形成的国产化合金牌号,是我国高温气冷堆中间热交换器最重要的候选材料,其组织和力学性能的长期热稳定性对高温气冷堆设计寿命及服役安全性具有重要意义。与 IN617 合金不同, GH3617 合金去掉了晶界强化元素——硼(B),以防止嬗变产生的“氢脆”行为;在此情况下, GH3617 合金在长期服役过程中的组织稳定性及其力学性能衰退行为是否能够满足高温气冷堆 40 年设计寿命的要求是非常值得关注的。鉴于此,本工作以无硼 GH3617 合金为研究对象,通过不同温度(750°C~1000°C)下的长期(最长 10000 h)时效及时效后的拉伸性能测试,探究了无硼 GH3617 合金的热稳定性及其性能退化特征。结果表明,随时效时间延长, GH3617 合金的室温强度变化不大,说明长期时效对合金室温强度影响较弱;但在高温气冷堆主要服役温度(950°C)下,合金强度明显随时效时间延长而表现出先快速下降后缓慢下降的变化特征。长期时效对合金室温及 950°C 下的塑性影响较为明显,均表现出先快速下降后缓慢下降的特征。这主要是由合金在长期时效过程中的晶界析出引起的。在 750°C~1000°C 时效过程中, GH3617 合金中发生了明显的碳化物析出现象,碳化物多分布于晶界附近,形成连续膜状结构,导致时效后合金发生明显的沿晶断裂。对比不同温度时效合金的显微组织发现, 750°C~1000°C 时效 GH3617 合金中的碳化物多为 M₂₃C₆ 型碳化物,少量为 MC 和 M₆C 型碳化物;此外,随时效温度升高,合金中碳化物的尺寸增大,对性能影响加剧。

C08-12

硅基陶瓷气凝胶的力学性能设计与调控

王红洁¹

1. 西安交通大学材料学院

C08-13

陶瓷基复合材料的工艺优化及性能研究

李爱军¹

1. 上海大学

C08-14

耐高温低烧蚀可陶瓷化聚合物基复合材料

石敏先¹

1. 武汉理工大学

耐高温低烧蚀可陶瓷化聚合物基复合材料融合了聚合物基复合材料低密度、易成型、可设计性强的特点，以及陶瓷基复合材料抗氧化、耐高温等性能优势，常温时具有聚合物基复合材料性能特点，高温时发生原位陶瓷化转变成陶瓷基复合材料。主要介绍可陶瓷化聚合物基复合材料原理内涵、技术特点、性能优势以及可陶瓷化碳基耐高温复合材料、可陶瓷化硅基耐热复合材料涂层、可陶瓷化气凝胶复合材料等主要体系的研究进展。

C08-15

增材制造碳化硅复杂构件及其 CVD 表面处理

刘凯¹

1. 武汉理工大学材料科学与工程学院

碳化硅陶瓷是一种密度低、导热系数高、热膨胀系数小、化学稳定性好和机械强度高的陶瓷材料，常被应用于航空航天、半导体、交通运输等领域。随着上述领域的快速发展，要求陶瓷构件结构越来越复杂，增材制造技术基于逐层叠加原理，赋予构件设计更高的自由度，近年来逐步成为碳化硅陶瓷复杂构件整体制造的重要方法。但增材制造陶瓷构件表面存在孔隙多、相分布不均、台阶效应等问题，严重限制了增材制造碳化硅的进一步工程应用。本报告提出建立碳化硅复杂构件的固-气联动增材制造方法，研究了侧壁角度对增材表面气相反应沉积 SiC 的生长取向影响，探讨了增材制造陶瓷表面层的致密性、均匀性与组织结构演变规律，为高性能碳化硅陶瓷材料复杂构件整体制造提供了新思路。

C08-16

高质量碳化硅纳米线的制备及红外雷达兼容隐身性能

魏剑¹

1. 西安建筑科技大学

目前，现代军事信息技术不断发展，电子设备几乎涵盖了所有可以利用的电磁波段，隐身技术的研究对国防安全至关重要。红外和雷达波长的隐身要求在材料的电磁特性方面是相互制约的，制备这两者兼容性能的材料仍是必要且艰巨的。磁性金属具有大的磁导率和介电常数，在吸波和红外屏蔽领域得到了广泛的研究。SiC 作为一种宽禁带半导体具有吸波带频宽、密度低、良好的抗氧化性能和抗腐蚀性能，是很有前途的高温电磁波吸收材料。SiC 纳米线 (SiC NWs)，能为耗散电流提供更长的路径，提供除本征吸收外的额外衰减，具有优异的极化损耗。将磁性金属花状 Ni 颗粒与 SiC NWs 复合，不仅能改善材料的阻抗匹配特性，还能在增加材料的损耗机制的同时提升红外屏蔽性能。Ni/SiC NWs 复合材料在厚度为 1.9 mm 时最低反射损耗可达到 -49.26 dB，EAB 为 4.25 GHz；在厚度为 1.8 mm 时有效吸收带宽为 5.0 GHz，几乎可覆盖整个 Ku 波段；同时该复合材料还具有一定的红外屏蔽能力。

C08-17

自旋电子磁性纳米薄膜异质结

高藤华¹

1. 武汉理工大学

自旋轨道矩磁随机存储器具有皮秒量级超高的数据读写速度, 可靠的读写稳定性, 以及与现代半导体器件高集成性等优势, 使其在半导体芯片存储领域极具应用潜力。然而, 由于自旋轨道矩器件存在高写入电流的技术瓶颈, 需适配大尺寸选择晶体管提供电源, 难以满足芯片小型化的发展需求。本研究从纳米薄膜异质结材料设计的角度出发, 磁控溅射制备金属/绝缘体氧化物、金属/半金属等磁性功能薄膜。利用材料本征的结构与电学特性, 探索发现基于电子自旋量子态激发与传输的新基础理论, 以期解决自旋轨道矩器件高能耗的科学难题。

C08-18

新型 Hf6Ta2O17 热障涂层的服役性能研究

程春玉¹, 杨丽¹, 周益春¹

1. 西安电子科技大学

Hf6Ta2O17 具有低热导率、高热膨胀系数和优异的断裂韧性, 很有可能成为新型热障涂层 (TBCs) 材料。采用大气等离子喷涂法制备了 Hf6Ta2O17/YSZ 双陶瓷层热障涂层, 研究了其微观结构和力学性能对热循环性能和抗 CMAS 腐蚀性能的影响。结果表明, Hf6Ta2O17 在喷涂过程中发生了快速分解。随着喷涂功率的增加, 在 Hf6Ta2O17/YSZ TBCs 中观察到更多的 HfO2 相。此外, Hf6Ta2O17 的孔隙率随着喷涂功率的增加而降低, 导致其弹性模量提高。对于具有最低弹性模量和最少 HfO2 相的 Hf6Ta2O17/YSZ TBC, 在 1200°C 下获得了最高的循环次数, 是单 YSZ TBCs 循环次数的两倍。本工作为 APS 制备和开发三元氧化物提供了新的选择。

C08-19

高温钼基合金系统与防护涂层系统设计

宿冉冉¹, 张宏亮¹

1. 上海交通大学

适用于高温应用的钼基合金需要具备优异的结构性能和环境耐受性。Mo-Si-B 体系合金和难熔多元合金 (RMPEA) 展示了巨大的潜力, 但在改善延展性、降低密度和增强环境耐受性方面仍存在一些挑战。Mo-Si-B 体系中的研究主要集中在具有 Mo 固溶体 (Moss)、Mo3Si 和 Mo5SiB2 (T2) 相的微结构上。然而, Moss 相中 Si 的溶解度降低了合金的延展性和韧性。为解决这一问题, 一种新设计基于 Moss、Mo2B 和 T2 相, 通过降低 Moss 中 Si 的溶解度来提高延展性, 同时 T2 相保持了抗氧化性能。添加铝和钛使密度降低到 8 g/cm³ 以下。对于富 Mo 合金的 RMPEA 设计, 虽然其结构性能优异, 但复杂的氧化产物无法提供足够的保护。为此, 我们提出了一种新的涂层设计, 增强了合金的环境耐受性。

C08-20

基于分步等离子体制备的钨钽碳基固溶体陶瓷涂层力学及烧蚀性能研究

朱肖飞¹, 李桂芳¹, 杨丽¹, 周益春¹

1. 西安电子科技大学

HfTaC 固溶体陶瓷因具有超高熔点、优异的抗烧蚀性能等特性, 有望解决航天飞行器耐 3000°C 热防护材料的重大需求。然而, 因 HfC 和 TaC 所具备的极强共价键特性和较低的自扩散系数, 大气热喷涂制备的 HfTaC 涂层存在氧化、固溶不充分、缺陷多等问题, 严重限制了其作为航天热防护涂层的应用。因此, 本文首先采用喷雾造粒、放电等离子烧结、感应等离子球化技术分别合成了一系列 HfTaC 粉体, 再采用真空等离子喷涂方法制备 HfTaC 固溶涂层, 结果表明, 基于感应等离子球化粉体所制备的涂层是 HfTaC 单相固溶体且涂层层间结合紧密, 孔隙率低, 其硬度和断裂韧性分别为 35.64 GPa 和 3.66 MPa·m^{1/2}。

为了进一步提高涂层致密度、固溶度和抗烧蚀性能，基于上述制备方法，引入 WC，系统研究了 WC 对 HfTaC 涂层的微观结构、力、热物理及烧蚀性能影响。结果表明，所制备的 HfTaWC 单相固溶涂层结构致密，物相单一，元素分布均匀。涂层的硬度和断裂韧性分别为 40.54 GPa 和 4.25 MPa·m^{1/2}，热导率为 7.42~15.81W·m⁻¹·K⁻¹。涂层在 2.38 MW m⁻² 热流密度下烧蚀 120s 后质量烧蚀率和线烧蚀率分别为 -0.550 mg/s、-2.083mm/s，表现出较好的抗烧蚀性能。

C08-21

基于原位声发射的 SiCf/SiC 复合材料高温疲劳损伤失效机理研究

吴晓晨¹，郑瑞晓¹，李露¹，马朝利¹

1. 北京航空航天大学

SiCf/SiC 复合材料具有低密度、高强度和耐高温等优点，是先进航空发动机热端构件的理想材料。疲劳损伤是 SiCf/SiC 复合材料及构件的主要失效形式之一，深入探明其在近服役环境下的疲劳损伤失效行为及其机理至关重要。本文首先采用声发射(acoustic emission, AE)技术原位研究了 SiCf/SiC 复合材料在室温和 1350°C/空气环境下的拉伸损伤失效行为。基于 AE 信号建立了 SiCf/SiC 复合材料损伤模式识别方法，并验证了该方法应用于高温 AE 监测的有效性。结合 AE 原位监测和微观组织分析，研究了 SiCf/SiC 复合材料在疲劳峰值应力高于比例极限(proportional limit, PL)时的高温疲劳行为，阐明了在不同峰值应力水平下由基体开裂和基体裂纹自愈竞争相互竞争的疲劳损伤失效机理。本研究开发的原位 AE 监测方法为理解 SiCf/SiC 复合材料在近服役环境下的损伤失效行为提供了技术支撑，为航空发动机用 SiCf/SiC 复合材料的抗疲劳设计提供了理论基础。

C08-22

钽的微波等离子体氮化及其结构演变与性能研究

李家成^{1,2}，徐志刚^{1,2,3}，彭健^{1,2}，王传彬^{1,2}

1. 材料复合新技术国家重点实验室，武汉理工大学，湖北 武汉，430070

2. 化学与精细化工广东省实验室潮州分中心，广东 潮州，521000

3. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室，武汉理工大学，湖北 武汉，430070

钽及其合金的熔点高，化学性质稳定，并具有良好的耐腐蚀性，是航空航天、核工业和汽车工业等领域的重要基础材料。然而，钽及其合金存在硬度低、耐磨性和抗氧化性能差等缺点，在服役过程中表面易遭受破坏。鉴于此，本研究利用微波等离子体氮化技术，通过调控氮化温度，在纯钽金属表面制备出性能优异的 Ta-N 层以改善其表面力学性能。研究表明，沿氮化层厚度方向，形成由 Ta₂N 表面层、Ta(N)固溶体和 TaN_{0.04} 次表层组成的梯度结构；并且，所制备的 Ta-N 层具有纳米晶结构。在性能方面，具有梯度和纳米晶结构的 Ta-N 层硬度达到 26.89GPa，显著高于传统氮化方法制备的 Ta-N 强化层；摩擦磨损测试表明，Ta-N 陶瓷层的磨损轨迹窄且浅、磨损量小，表现出优异的耐磨性能；此外，微波等离子体氮化处理能够显著增强钽基体的抗氧化性。

C08-23

高温可视化原位观测在热障涂层抗 CMAS 腐蚀过程中的应用

张海媛¹

1 天津中环电炉股份有限公司

热障涂层(TBCs)具有耐高温、高隔热的优异性能，是航空发动机热端部件不可或缺的关键隔热防护材料，可以显著降低了合金表面温度，对金属部件起到保护作用。然而随着航空发动机燃气进口温度不断提高，热障涂层在高温服役过程不免会受到大气中 CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂(CMAS)熔体腐蚀，导致其剥落，这也成为热障涂层服役环境中最危险的失效形式。本文采用了一种高温可视化原位观测法，来表征热障涂层

高温过程中熔化、润湿、熔渗腐蚀系列行为。研究过程中选用高熵稀土锆酸盐陶瓷作为热障涂层材料，采用典型 CMAS 组分，模拟 1200°C~1300°C 高温高真空服役环境，原位观察 CMAS 腐蚀行为。结果表明高熵稀土锆酸盐是一种理想 TBC 材料，高温可视化原位观测法可以为 CMAS 高温腐蚀机制的分析提供直接的实验依据。

C08-24

稀土钽酸盐热障涂层研究进展

陈琳¹

1. 昆明理工大学

先进航空发动机的燃油利用效率、能量转换效率和推重比与燃烧室工作温度成正比，热障涂层是提高燃烧室工作温度最有效的方式从而成为特种陶瓷领域的研究热点。当前的 YSZ 体系热障涂层由于存在高温相变、高热导率和耐 CMAS 腐蚀能力差等问题已经无法满足先进航空发动机的应用需求，必须开发新一代的耐高温、高隔热、长寿命热障涂层材料。铁弹性稀土钽酸盐 RE₂TaO₇ 具有无体积差的铁弹性二级相变，结合其铁弹性增韧、低热导率、高热膨胀系数和耐 CMAS 腐蚀等特点被广泛作为下一代超高温热障涂层进行研究。作者从晶体结构、显微组织、力-热学性质调控机制、抗 CMAS 腐蚀和涂层服役性能等角度出发综述了过去 20 多年来稀土钽酸盐的研究进展，为进一步推动钽酸盐涂层的开发与应用提供思路，相关成果发表在 Progress in Materials Science (IF=37.4) 和 Acta Materialia 等期刊。

C08-25

热障涂层与叶片基底间互扩散行为研究

刘俊凯¹

1. 西安电子科技大学

针对燃气轮机中由表面热障涂层诱导的涡轮叶片失效问题，研究了叶片外侧热障涂层及内腔渗铝涂层与高温合金基底间的元素互扩散行为，分析了互扩散对基底微观结构及基本力学性能的影响。结果表明：互扩散后由基底内的相变导致互扩散层和二次反应层的产生，二次反应层中析出富含 Cr、W、Mo 等元素的拓扑密堆 (TCP) 相。通过球差校正透射电子显微镜的进一步表征，发现三种类型的 TCP 相：σ 相、μ 相、P 相，且 σ 和 μ 相、σ 和 P 相之间存在共格析出行为。这些 TCP 相的析出增大了基底内的硬度，可能成为服役过程中的裂纹起始源，对叶片力学性能造成影响。

C08-26

ZrO₂-SiO₂ 气凝胶高温热稳定性增强策略研究

韩宇晴¹，吴幼青¹

1. 华东理工大学

本研究在溶胶-凝胶过程中将二甲基二乙氧基硅烷 (DDS) 作为共前驱体的方法改性 ZrO₂-SiO₂ 气凝胶 (ZSA) 得到 DDS/ZSA。随后在 Ar 氛围下以 1000°C 对有机-无机前驱体气凝胶 (DDS/ZSA) 进行热解制备 SiZrOC 气凝胶。

DDS/ZSA 相比于 ZSA，物理性质和耐温性能得到双重提升。由于 Si-C 键被均匀地引入到三维网络结构中，改变了气凝胶的交联性。同时气凝胶表面羟基数量被有效的降低，烧制时羟基缩合引起的颗粒生长受到了抑制。气凝胶的相变温度得到了明显提高，结晶度和晶面种类都明显降低。经 1000°C 有氧热处理 (煅烧) 0.5h 后，DDS/ZSA 的多孔微观结构仍然保持良好，具备高比表面积 (259.6 m²/g)、高孔体积 (1.51 cm³/g) 和低热导率 0.04206 (W·m⁻¹·K⁻¹)。是目前对 ZSA 改性研究中经过 1000°C 煅烧后最高的比表面积。但比表面积保留率仅 48.93%。

进一步的热解处理实现了 Si-O 和 Si-C 键的再分布过程并生成高热稳定性的 Si-O-C 结构。SiZrOC 具

备优异的孔隙结构和热稳定性。经 1000°C 煅烧 0.5h 后 SiZrOC 具备 76.8% 的比表面积保留率和 75.8% 孔体积保留率, 超过了目前所有最先进的 ZrO₂-SiO₂ 气凝胶。同时 SiZrOC 始终具备着优异的隔热性能, SiZrOC 气凝胶在室温下和经 1000°C 煅烧后热导率分别 0.0273 W·m⁻¹·K⁻¹ 和 0.0332 W·m⁻¹·K⁻¹。我们首次发现热解处理存在类似于“钥匙”的作用。经过热解导致的 Si-C 和 Si-O 键的重排松动了气凝胶中的 SiO₄ 结构, 使得在后续的有氧煅烧过程中, SiZrOC 存在着一段时间的深化相分离阶段, 使得高热稳定性的 Si-O-C 结构数量进一步增加。煅烧 2.0h 后, SiZrOC 的比表面积和孔体积仍高达 220.5 m²/g 和 1.49 cm³/g。这为制备高热稳定性 SiOC 气凝胶提供了思路, 在高温隔热材料具有广阔的应用前景。

C08-27

AlMo0.5NbTa0.5TiZr 基难熔高熵合金涂层的成分、微观结构优化与力学性能的研究

耿子健¹, 彭健^{1,2}, 逯文君³, 王传彬^{1,2}, 张联盟¹

1. 材料复合新技术国家重点实验室, 武汉理工大学, 湖北 武汉, 430070
2. 化学与精细化工广东省实验室潮州分中心, 广东 潮州, 521000
3. 机械与能源工程系, 南方科技大学, 广东 深圳, 518055

难熔金属高熵合金涂层是一种近年来新开发的防护涂层体系, 因其具有熔点高、化学性质稳定以及高熵合金所带来的多主元特性, 因此在力学、抗腐蚀、抗氧化等性能方面具有一定的优势。本研究采用磁控溅射技术制备了 AlMo0.5NbTa0.5TiZr 基难熔金属高熵合金非晶涂层, 其硬度可达 12.7 GPa, 相较于传统防护涂层体系, 即 Cr 及 α -Ta 涂层, 有明显提升, 且具有更佳的塑性以及抗裂性能。此外, 通过调整 AlMo0.5NbTa0.5TiZr 基难熔金属高熵合金涂层中 Al 元素的含量以及沉积温度, 可在不损失该非晶涂层优异抗腐蚀性能的前提下沉积得到具有结晶-非晶异质结构的 Al0.5Mo0.5NbTa0.5TiZr 难熔金属高熵合金涂层, 其力学性能相较于同成分的单一非晶结构涂层提升达 39.08%。

C08-28

连续纤维陶瓷复合材料的表面致密化与抛光研究

巩文昊¹, 王志军¹

1. 西北工业大学

连续纤维增韧陶瓷基复合材料 (CFCC) 以其低密度, 高比强度, 耐高温以及较好的抗氧化性能, 在高温结构材料领域有着广泛的应用。本文针对 CFCC 材料致密度低, 表面粗糙度高的问题进行了研究。采用凝胶注模-反应烧结和化学气相沉积的方法, 对 CFCC 表面进行了致密化, 表面致密度达到了 99.9% 以上。对致密化后的材料进行了磨削抛光, 材料整体的表面粗糙度 Sa 降低至 10nm 以下, 无明显抛光缺陷。重点研究了凝胶注模过程碳化硅颗粒粒径对反应过程和抛光潜力的影响。随着 SiC 粒径的降低, 浆料的粘度急剧增加, 密度和孔隙率更接近理论结果, 导致反应烧结后的密度更高, 机械性能和热匹配性能也得到了提高。这项研究表明, 结合使用凝胶注模-反应烧结+化学气相沉积工艺可以制备出适用于空间光学应用的高质量涂层。

C08-29

基于无机盐前驱体的超高温陶瓷改性碳/碳复合材料制备及性能研究

欧阳海波¹, 李翠艳¹, 陈子浩¹, 申天展¹, 祁思怡¹

1. 陕西科技大学

新一代高超音速飞行器大空域、再入飞行时间长等特点使其热防护材料面临严峻挑战。超高温陶瓷改性碳/碳复合材料 (C/C-UHTCs) 具有良好的耐腐蚀、抗热震、高比强、高比模等特性, 是高超声速飞行器热结构部件最有前途的候选材料之一。有机前驱体液相浸渍裂解技术 (PIP) 是制备该复合材料的一个有效的方法。为了提升复合材料的抗烧蚀能力, 超高温陶瓷向着多组元发展, 对低成本、高效制备 C/C-UHTCs

带来了挑战。基于此,本研究提出了一种基于无机盐前驱体的 C/C-UHTCs 制备技术,并开发了 C/C-HfC-SiC, C/C-(HfZrTi)C, C/C-(HfZrTiTaNb)C, C/C-ZrC-CuNi 等一系列复合材料,验证了无机盐前驱体在 PIP 技术制备 C/C-UHTCs 的普适性,并对所制备复合材料的致密化过程及微观结构演变进行了分析,对其力学性能和抗烧蚀性能进行了评价。采用无机盐前驱体制备的复合材料陶瓷相分布均匀,弥散分布的陶瓷相能有效提升复合材料的力学性能和抗烧蚀性能。

C08-30

可抵抗高达 1300 °C 高温的隔热阻燃 Si₃N₄ 纳米线

李海洋¹, 张磊磊¹, 李贺军¹

1. 西北工业大学材料学院

C08-31

船用燃气轮机涡轮叶片 EB-PVD TBC 服役后性能评估及失效模式研究

谢雨琪¹, 刘俊凯¹, 杨丽¹

1. 西安电子科技大学

热障涂层在服役后的失效行为是一个具有挑战性的问题。为了解决以往研究的局限性,采用电子束物理气相沉积制备了一种由 CoCrAlY 和 YSZ 组成的 TBC,并对其服役后的性能和失效模式进行了表征。扫描电镜结果表明,YSZ 在凹面处高度致密。并对服役后的热物性参数和基本力学性能进行了评价。采用压痕法和三点弯曲试验分析了 TBC 中各层的断裂行为,并计算了各层的断裂韧性值。YSZ 表面的残余应力测量使用拉曼光谱,揭示了局部剥离和开裂的潜力。采用有限元方法对某型涡轮叶片进行了建模,并对叶片服役后的应力场进行了数值模拟。实验结果与有限元模拟结果吻合较好。

C08-32

TiN/TiSiN 多层涂层的梯度结构设计及其增韧机制的有限元研究

刘炜¹, 沈强¹, 杨迈¹, 高藤华¹, 吉柏锋², 涂溶^{1,3}, 章嵩^{1,3}

1. 武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验室

2. 武汉理工大学土木工程与建筑学院

3. 化学与精细化工广东省实验室潮州分中心

硬质涂层的硬度和韧性在很大程度上存在对立关系,高硬度往往伴随着低韧性。因此,切削刀具会因硬质涂层的低韧性导致其在加工过程中过早损伤破坏,甚至灾难性断裂。如何保持硬质涂层高硬度的同时提高其韧性是刀具行业面临的巨大挑战。本文基于有限元模拟方法研究了 TiN/TiSiN 多层涂层的调制结构、梯度结构变化对其硬度和韧性的影响,阐明了梯度结构的增韧机制,为多层涂层保持高硬度的同时提升其韧性提供了理论基础和梯度化的技术途径。结果表明,低调制比结构和高调制比结构各有优势。在外加载荷的条件下,低调制比结构涂层内的主应力较低,高调制比结构涂层内剪切应力较低。在此基础上进行梯度结构设计可以同时降低涂层内的主应力和剪切应力。一方面,梯度结构能够将涂层受到外部载荷所产生的主应力扩散到更大的表面积上,从而抵抗更大的载荷并获得较高的硬度。另一方面,梯度结构能够将涂层受到外加载荷所产生的剪切应力有效的过渡并均匀地分散在涂层内部,从而降低涂层的最大剪切应力。其中,调制比由表面向内部梯度增大结构的硬度为 34 GPa,受到外部载荷时涂层内的最大主应力和剪切应力分别降低 45%和 10%,能够有效阻止涂层产生纵向和横向开裂,提高多层涂层的韧性。

C08-33

X 射线原位 CT 技术在超高温结构材料领域的应用

戴峰¹

1. 南京工业大学

近年来材料表征技术快速发展，在材料研发、生产制造、工程应用、服役评价全过程发挥着越来越重要的作用。陶瓷基复合材料、碳/碳复合材料等超高温结构材料的服役环境复杂严苛，普通的表征仪器已无法满足材料前沿研究需求，三维、原位、极端环境下的表征仪器与技术成为了新的研究热点。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，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。

C08-34

γ -TiAl 合金电沉积镀镍涂层制备及界面表征

马飞鸿^{1,2}, 薛鹏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

γ -TiAl 合金具有轻质高强的优点，广泛应用于航空航天、先进内燃机等领域，但其耐磨性不足，如 TiAl 气门与导管之间耐磨性较差是制约其发展的原因之一。材料表面镀铬既能提高表面硬度，又能提高其耐磨性和耐蚀性，但 TiAl 材料镀铬镀层与基体结合力很差。本文拟采用镍作为中间过渡层，研究了 TiAl 合金电沉积镀镍涂层的制备工艺并对涂层/基体界面进行了分析。采用低成本、易变形 Ti-42Al-5Mn 合金为基体，通过正交试验方法研究了电沉积镀镍过程中电流密度、镀液温度和镀液添加剂对镀层结合力、显微硬度等影响，优化获得了表面光滑平整、结合力良好的镀层工艺参数。并利用电子探针 (EPMA)、扫描电子显微镜 (SEM)、电子背散射衍射分析技术 (EBSD) 等手段对镀层进行了分析。本文研究成果对提高 γ -TiAl 合金的表面耐磨性、耐腐蚀性具有重要的学术价值，实现了提高 TiAl 合金基体耐磨、减磨、耐腐蚀性能的效果。

C08-35

RETaO₄ 热障涂层隔热性能及热应力分布的数值模拟研究

陆天龙¹, 李祖来¹, 冯晶¹, 种晓宇¹

1. 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、提高表面对流传热系数的方式有一定的局限性。在涂层从制备冷却至室温后，各层均存在残余应力，陶瓷层及氧化层中都有残余压缩应力，氧化层的残余压缩应力更大，这是导致热障涂层失效的原因之一。随着热障涂层厚度的增加，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 $\sigma=-8419 \times hTGO+2859$ 。随着使用温度的升高，隔热涂层系统内的应力也随之增加。

C08-36

Si 含量及合金化元素对 AISi 合金抗腐蚀性和耐磨性能的影响

孙志慧¹, 欧阳佩旋¹, 张淑婷¹

- 1 北方工业大学

Al-12Si 合金因其优异的综合力学性能而作为中低温封严涂层材料, 被广泛应用于航空发动机中。然而, 随着海洋服役需求日益增多, Al-12Si 涂层面临严峻的腐蚀挑战。因此, 本研究采用真空铸造法制备了不同 Si 含量 (6wt.%、8wt.%、10wt.%、12wt.%) 的 AlSi 合金, 以及添加不同合金化元素 Cr (2wt.%)、Mo (2wt.%) 的 Al-12Si 合金, 以研究 Si 含量和 Cr、Mo 合金化元素对 AlSi 合金抗腐蚀性和耐磨性能的影响。研究表明, 当 Si 含量为 8wt.% 时, 合金自腐蚀电位最大, 腐蚀电流密度最小, 耐腐蚀性能最佳, 且中性盐溶液浸泡腐蚀 168h 后腐蚀类型以点蚀为主, 但当 Si 含量为 10wt.% 及 12wt.% 时, 合金出现晶间腐蚀。随着 Si 含量的增加, 摩擦系数逐渐减小, 当 Si 含量增大至 12wt.% 时, 合金的摩擦系数下降了约 31%。随着合金化元素 Cr 或 Mo 的加入, 合金的自腐蚀电位正移, 腐蚀电流密度减小, 耐腐蚀性能提高, 且 Cr 元素提升效果强于 Mo 元素; 中性盐溶液浸泡腐蚀 168h 后腐蚀类型同样以点蚀为主; 加入合金化元素后, 摩擦系数均略微下降, 分别下降了 17% 及 19% 左右, 耐磨损性能提升。

墙报

C08-P01

基于机器学习的涂层材料物性数据库及预测系统

许柄权¹, 彭健¹, 徐志刚¹, 章嵩¹, 涂溶¹, 王传彬¹

1. 武汉理工大学

高熵氮化物涂层突破了传统涂层设计理念, 性能较传统氮化物涂层有显著优势。然而, 常见的氮化物形成元素众多, 体系成分变化复杂, 潜在的高熵氮化物数量庞大, 传统的“实验试错法”无法对高熵氮化物进行系统发掘。此外, 现有技术主要通过调整成分来优化某一性能, 难以实现多种性能的协同提升。因此, 亟需构建完善的高熵氮化物涂层成分设计策略, 实现兼具多种优异性能的高熵氮化物涂层的主动高效开发。本研究通过构建氮化物涂层物相物性数据库, 基于机器学习技术对数据库进行相关性分析并探究多种回归算法预测氮化物涂层物相的准确度与内在机理, 得到高精度高熵氮化物物相及物性机器学习模型。在此基础上开发涂层材料物性数据库及预测系统, 实现了已报道氮化物涂层物性的高效查询以及新型氮化物涂层物性的可靠预测。

C08-P02

Research on the repair of ultra-high temperature anti-oxidation SiC coating on the surface of carbon/carbon composites and its anti-oxidation property

Hui Peng¹, Xiao Hong Shi¹

1. Northwestern Polytechnical University

The SiC coated C / C composites with mechanical damage were repaired by pack cementation (PC) and slurry painting-oxidation (SPO). The effects of different process parameters on the microstructure, interface bonding and oxidation resistance of the repaired samples at 1773 K for 10 h were studied. The results show that the repair coating is tightly bonded to the original coating and the C / C substrate, and there is no obvious interface. Under the optimal parameters, the weight loss of the repaired sample was only 0.54 % after oxidation at 1773 K for 10 hours, and the mass loss was 76.2 % lower than that of the damaged sample, which was close to that of the undamaged sample. This work provides an efficient method for the repair of coatings with large size defects, which greatly prolongs the service life of the material.

C08-P03

CVD 碳化物涂层制备工艺的热力学分析与机器学习优化

黄炜¹, 彭健¹, 许柄权¹, 徐青芳¹, 杨梅君¹, 刘凯¹, 王传彬¹, 涂溶¹, 章嵩¹

1. 武汉理工大学材料复合新技术国家重点实验

碳化物涂层如 SiC、TaC 和 ZrC 等因其高熔点、高硬度、良好的高温物理化学稳定性等特点, 被广泛用作 C/C 复合材料和石墨等材料的防护涂层。化学气相沉积技术 (CVD) 能制备具有高结晶度、高致密性和高纯度的涂层, 是目前制备高质量超高温防护涂层的主流方法之一。但是由于 CVD 工艺参数复杂且制备周期较长, 大多数实验报道的沉积条件较为分散, 难以总结出系统性的规律进而指导实验。本研究基于热力学计算技术 (CALPHAD) 在短时间内实现了对碳化物 CVD 沉积过程的全面系统分析, 阐明了沉积参数与沉积相图、气相组分、沉积纯度、沉积效率和前驱体利用率等关键指标之间的联系, 确定了最优沉积窗口, 并在此基础上结合机器学习技术将热力学分析效率提高了 15 倍以上, 为 CVD 工艺的调整与优化提供了理论指导。

C08-P04

ZrB₂ 基超高温陶瓷的微结构设计及强韧化机制

封波¹, 周俊祥¹, 孙勇¹, 王钰登¹, 朱瑞超¹, 郭嘉琛¹, 蒋进明¹

1. 空军工程大学

ZrB₂ 基超高温陶瓷是一种综合性能优异的超高温耐热结构材料, 但强韧化问题导致其抗损伤容限和极端环境服役可靠性差。本研究采用聚合物转化陶瓷 (PDCs) 技术将多元硅基 PDCs 原位引入 ZrB₂ 陶瓷中, 通过设计第二相和主晶相随机分布、网状分布、层状分布三种微结构, 从而显著提高 ZrB₂-PDCs 复合陶瓷的强韧性。详细研究不同微结构的制备方法、物相和形貌、界面结合, 并测试表征其强度和韧性, 进一步揭示微观结构设计对复合陶瓷强韧性的影响规律。结果表明: 聚合物前驱体经高温裂解在 ZrB₂ 基体中原位生成 SiC、Si₃N₄、SiCN 和 BN 等纳米陶瓷添加剂, 这些添加剂在钉扎主晶相颗粒、抑制其过度生长方面发挥作用, 有效改善了 ZrB₂ 基陶瓷的结构强化; 同时, 裂解产物中包含具有玻璃属性的无定形软相, 在其与刚性 ZrB₂ 颗粒结合的微区, 形成具有塑性变形能力的界面, 促进 ZrB₂ 基陶瓷在微纳尺度下的结构韧化。

C08-P05

AlCr_xMoNbTi 难熔高熵合金的成分结构优化和强化机理研究

郭翔^{1,2}, 彭健^{1,2}, 徐志刚^{1,2}, 王传彬^{1,2}

1. 武汉理工大学

2. 化学与精细化工广东省实验室潮州分中心

难熔高熵合金因其优异的力学性能、抗腐蚀性能和结构稳定性受到广泛关注, 部分高熵合金具备较传统的镍基高温合金更加优异的高温力学性能, 在航空、航天、航海、核工业等领域具有广阔的应用前景。高温使用环境要求材料兼具优异的力学性能和抗氧化性能。AlCrMoNbTi 难熔高熵合金具有极佳的抗氧化性能 (1000 °C, 48 h 增重为 11 mg/cm²) 和中等的高温力学性能 (25 °C, 1010 MPa)。本研究通过电弧熔炼法制备不同 Cr 含量 AlCrMoNbTi, 并通过退火处理调控 Laves 相的大小、含量、分布以改善其力学性能。研究表明铸态样品均呈现体心立方单相结构, 退火后呈现 BCC+Laves 相结构。由于固溶强化和第二相强化作用, 获得具有压缩强度 2245 MPa 和 7.43% 压缩性能的 AlCr₂MoNbTi 难熔高熵合金具有优异的抗压性能 (2245 MPa@7.43%), 显著高于原始 AlCrMoNbTi 难熔高熵合金; 恒温氧化测试表明 Cr 元素的加入对于其抗氧化性能具有一定的提升作用。

C08-P06

YB4-MgO 改性 Cf/ZrB₂-SiC 复合材料在 2600°C 的烧蚀损伤机理刘付晨¹, 陈博文¹, 董绍明¹

1. 中国科学院上海硅酸盐研究所

连续纤维增强超高温陶瓷基复合材料具有低密度、优异的力学性能和抗烧蚀性能, 在航空航天热防护领域具有重要的应用价值, 受到广泛关注。然而, 典型的 Cf/ZrB₂-SiC 复合材料在烧蚀过程中, SiO₂ 挥发、ZrO₂ 相变, 导致氧化层结构稳定性差, 降低了复合材料的耐烧蚀性能。本研究开发了 YB4-MgO 改性的 Cf/ZrB₂-SiC 复合材料, 利用空气等离子体烧蚀系统研究了复合材料在 2600°C 下的长期烧蚀行为, 并通过扫描电镜和 XRD 对复合材料的烧蚀形貌和物相进行了表征, 通过分析复合材料微观结构和组分揭示烧蚀行为和损伤机理。

C08-P07**C 含量对 HfC_x 薄膜结构、力学和光学性能影响研究**邹高鹏¹, 王倩倩¹, 沈宝龙¹

1. 东南大学

设计兼具超高熔点、高反射率和高硬度的薄膜对于军用卫星、高超声速飞行器等关键零部件高能激光防护至关重要。本研究使用脉冲直流磁控共溅射技术在 Si 衬底上沉积了 HfC_x 薄膜, 通过调整 C 含量优化 HfC_x 薄膜微观组织和电子结构, 从而改善其综合性能。研究表明, 随着 C 含量增加, HfC_x 薄膜的相结构发生如下转变: 从 hcp-Hf(C) 固溶体和 fcc-岩盐 HfC 的混合相转变为单相岩盐 HfC 相, 最终转变为岩盐 HfC 和无定形 C 的混合相。相结构转变导致薄膜硬度和反射率显著变化。Hf(C) 固溶体相和无定形 C 相的存在显著增加薄膜表面粗糙度, 并且其固有的低硬度和低反射率特性对 HfC_x 薄膜的反射率和力学性能均产生负面影响。在研究的薄膜中, 具有单相结构和最低 C 空位浓度的 HfC_{0.71} 薄膜具有最高硬度值, 约为 30 GPa, 以及对 2000 nm 波长光具有最高反射率, 约为 70%。通过多尺度表征技术和第一性原理计算研究发现, HfC_{0.71} 薄膜的优异性能归因于晶粒细化、高共价键密度和低空位浓度的协同作用。本工作凸显了过渡族金属碳化物薄膜在重大装备关键零部件高能激光防护领域的应用潜力。

C08-P08**基于预训练模型的低热导率稀土钽酸盐热障涂层材料设计**魏毅炜¹, 种晓宇¹, 何京津¹

1. 昆明理工大学

稀土钽酸盐(RETaO₄)由于其具有低热导率、高热膨胀系数等优点被认为是一种十分有前景的热障涂层材料。本工作首先基于包含稀土钽酸盐、稀土锆酸盐、稀土铈酸盐等多种材料体系的大数据集训练了深度神经网络基模型, 并利用迁移学习技术对基于稀土钽酸盐小数据集训练的机器学习模型进行优化, 事实证明, 对比传统机器学习模型, 该策略更优, 并且具有良好的泛化性。该方法以组成元素的物理特征为描述符, 快速、直接预测输出温度-热导率完整曲线。利用该迁移学习模型对 RETaO₄(RE=Y, Ce, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy~Lu)体系所构成的包含 2508 种元素组成, 三十万种不同元素配比的成分空间进行预测, 快速筛选出了具有较低热导率的多组元稀土钽酸盐材料, 并在 4 种典型成分中得到了实验验证。有效地解决了复杂成分空间与传统方法计算效率间的矛盾, 模型性能与稀疏小样本间的矛盾, 为多组元稀土钽酸盐材料的设计提供了新的思路。

C08-P09

(Hf_{0.2}Zr_{0.2}Ta_{0.2}Nb_{0.2}Ti_{0.2})-SiC 复合材料的制备与力学及抗烧蚀性能研究申天展¹

1. 陕西科技大学

以过渡金属卤化物(TiCl₄、ZrCl₄、HfCl₄、NbCl₅、TaCl₅)和糠醇为金属源和碳源,采用液相前驱体法合成单相高熵碳化物(HEC)纳米粉体。以 SiC 颗粒为第二相,使用火花等离子烧结制备了具有不同 SiC 颗粒粒径(10 μ m、5 μ m、1 μ m、0.5 μ m)的致密(Hf_{0.2}Zr_{0.2}Ta_{0.2}Nb_{0.2}Ti_{0.2})-SiC 复合材料,研究了其微观结构、力学性能和抗烧蚀性能。结果表明, SiC 粒度的减小增强了致密化进程,抑制了高熵碳化物相的晶粒粗化现象。复合材料的力学性能随着 SiC 粒度的减小得到了综合提升,其中抗弯强度和断裂韧性分别由 331.01MPa 和 3.51 MPa·m^{1/2} 增加到了 530.97MPa 和 5.48 MPa·m^{1/2},强度和韧性的协同提升可归因于高熵碳化物基体的细晶强化机制和 SiC_p 的多种增韧机制,包括大粒度 SiC 的颗粒破碎机制和小粒度 SiC 的界面脱粘机制。氧乙炔烧蚀性能测试结果表明,随着 SiC 颗粒粒度的减小,质量烧蚀率由-0.25mg/s 变为 0.05mg/s,线烧蚀率由 5.88 μ m/s 减小到 0.67 μ m。优异的抗烧蚀性能与高温下的 SiO₂ 自发汗冷却以及抑制氧在 SiO₂ 熔融层中的扩散密切相关。

C08-P10**ZrC 晶须合成及 ZrC 晶须增韧 ZrC 涂层烧蚀性能的研究**顾东晴¹, 姚西媛¹, 李贺军¹

1. 西北工业大学

The ZrC coatings toughened with ZrC whiskers are prepared on C/C composites by chemical vapor deposition (CVD). As a reinforcing phase, ZrC whiskers optimize mechanical and ablative properties of coatings. The in-situ growth of ZrC whiskers and following ZrC coatings are prepared using ZrCl₄-CH₄-H₂-Ar as the deposition process at 1100 $^{\circ}$ C-1300 $^{\circ}$ C. The whiskers grown in an upright position and create more nucleation site for the coating, increasing its density and deposition rate. During the ablation, ZrC whiskers are oxidized and roughened, and ultimately act as a ZrO₂ skeleton structure which provides a stable support to oxide layers. The addition of ZrC whiskers effectively improves the ablation properties of coatings, which shows potential as a high temperature coating for aerospace and other application.

C08-P11**C/C-ZrC-HfC-SiC 复合材料的微观结构和抗烧蚀性能**段淼¹, 史小红¹, 李伟¹, 李贺军¹

1. 西北工业大学

In order to improve the ablation properties of the C/C-ZrC-SiC composites, HfC doped C/C-ZrC-SiC composites were fabricated by reactive melt infiltration using ZrSi₂ and HfSi₂ in a 2:1 molar ratio. The ablation resistance of ternary complex-phase ceramic-modified C/C composites were investigated. After introducing the HfC, the ablation resistance of the C/C-ZrC-SiC composites was improved with reduced linear and mass ablation rates. The excellent ablation properties are mainly attributed to the formation of a continuous and intact ZrO₂-HfO₂-SiO₂ film on the composite surface during the ablation process.

C08-P12**基于第一性原理计算的韧性二元 (Ti, M)B₂ 合金设计**

林洋¹

1. 昆明理工大学

作为一种极具前景的超高温陶瓷材料, TiB₂ 被广泛应用于耐磨涂层、高超音速飞行器和航空航天领域。然而, TiB₂ 由于易开裂而表现出较高的脆性, 因此需要改进其韧性。本研究通过第一性原理计算, 系统地研究了 3d、4d 和 5d 过渡金属以及 Al 和 La 合金元素对 TiB₂ 性能的影响。我们考察了弹性常数、机械模量、硬度、断裂韧性和电子结构。结果表明, 掺杂 Sc、Nb、Ta、Mo 和 Tc 在混合焓和声子频率方面是稳定的。大多数合金元素与纯 TiB₂ 相比提高了韧性。具体来说, 掺杂 0.25 浓度的 V、Hf、Nb 和 Zr 在不显著降低韧性的情况下提高了 TiB₂ 的硬度。掺杂 Mo、W、Nb、Ta 和 Hf 在不显著降低硬度的情况下增强了韧性, 使它们成为有效的合金元素。这些发现为改进 TiB₂ 的延展性和工业应用提供了指导。

C08-P13

Encapsulation of High Temperature PCMs with Controllable Shell Structure and Super Thermal Properties张美杰¹

1. 华中科技大学

Thermal energy storage (TES) has been developed in recent years to reduce the CO₂ emission. High temperature phase change materials are extensively studied to increase the thermal efficiency of TES using their latent heat with relative steady phase change temperatures. Metals and their alloys show great potential due to their high latent heat storages and thermal conductivities. Encapsulation of metals is the effective technique to solve high temperature leakage and corrosion. Commercial micro powders of Al-Si alloys and Al-Si-Fe alloys were encapsulated with ceramic shells. Different shell structures including Al₂O₃ shell with controllable shell thickness, double-layer ceramic shells with sponge effect, AlN fibers network structure embedded with α -Al₂O₃/AlN shell were obtained. Thermal stability was evaluated by thermal cycle test. The microcapsules treated at 1000 °C achieved zero heat loss after 5000 thermal cycles, whose latent heat absorption/ release were 448.3 J·g⁻¹/ 456.8 J·g⁻¹. the microcapsules possessed a giant heat storage density of 938.8 J·g⁻¹ within 300-700 °C, and the figure of merit was $6336.9 \times 10^6 \text{ J}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-4}$, about 15 times higher than that of commercial solar salt. This work solves the defects of Al-Si alloy as phase change material and ensures its high-performance and service life.

C08-P14

复合涂层提高钽钨合金抗高温氧化性能朱帅¹, 徐一¹

1. 南昌大学

钽钨合金在高温下抗氧化性能差, 限制了其作为航空航天热部件理想候选材料的发展。本研究采用料浆反应烧结和卤化物活性包埋 (HAPC) 相结合的方法, 在 Ta-10W 合金表面制备了包括内层 TaSi₂-WSi₂ 层和外层 ZrB₂-MoSi₂-ZrSi₂ 层的复合涂层。复合涂层结构致密, 涂层样品在 1500°C 氧化 6 小时后仍保持完整, 而未受保护的基材在 3 分钟内氧化成粉末。涂层样品还经受了从室温到 1500°C 的 300 多次冲击加热循环。其显著的抗高温氧化性能归因于在氧化过程中形成了致密均匀的 SiO₂ 氧化层, 其中含有由 ZrSiO₄、ZrO₂ 和 Ta₂O₅ 组成的氧化物晶体, 有效地减缓了氧气向涂层内部的扩散。

C08-P15**Enhancing the oxidation resistance of TZM alloy by laser-cladding MoSi₂-TiVAIZrNb composite coating**Weiguo Zhao¹, Li Wang¹, Ping Hu¹

1. 西安建筑科技大学

1.Introduction

Molybdenum alloys are prone to rapid oxidation in high-temperature service environments, resulting in structural component failure and the loss of excellent high-temperature properties. Therefore, it is important to improve the oxidation resistance of molybdenum alloys to ensure long-term safe service. The single MoSi₂ coating is prone to element diffusion and cracking in a high-temperature environment, which reduces the protective effect of the coating on the substrate.

(1)Materials

1)The TZM alloy was used as the base material with a size of 15×11×140 mm, the content of Mo, Ti, Zr, C was roughly 99.4 %, 0.5 %, 0.08 %, 0.02 %.

2)Pure MoSi₂ powder and TiVAIZrNb multicomponent alloy powder were selected as the original powder materials. Then, pure MoSi₂ powders and MoSi₂-TiVAIZrNb mixed powders were selected as coating materials.

(2)Experimental methods

1)The TZM alloy was ground by 2000# SiC sandpaper to remove rust deposits on the surface of the sample.

2)The MoSi₂ coating and MoSi₂-TiVAIZrNb composite coating were prepared on all surfaces of TZM matrix by laser cladding.

2.Results and Conclusions

(1)There was an obvious cracking phenomenon at the interface of the coating and the matrix surface.

(2)The addition of TiVAIZrNb could reduce the difference in the thermal expansion coefficient between the MoSi₂ coating and matrix.

(3)The mass loss of the MoSi₂-TiVAIZrNb composite coating samples was lower than that of the MoSi₂ coating samples at low temperatures of 1000 °C-1100 °C or high temperatures of 1200 °C-1400 °C, showing better oxidation resistance.

(4)There were multiple oxides of Si, Ti and Al, which improved the high-temperature oxidation resistance of the composite coating

(5)In contrast, the addition of the TiVAIZrNb multicomponent alloy could reduce the number of cracks, make the structure more uniform, and reduce the probability of oxygen diffusion to the matrix.

C08-P16**C/C 复合材料的分区域改性及烧蚀性能研究**李伟¹, 史小红¹, 吕君帅¹, 李贺军¹

1. 西北工业大学

Selectively modified composites were obtained by precursor infiltration pyrolysis (PIP) combined with chemical vapor infiltration for potential hypersonic applications. The selective modification achieves a double gradient distribution within the composites. From the top to the bottom of the leading edge, the content of the modified element (HfC-SiC) decreases and the PyC content increases. The gradient structure gives the sharp leading edge the advantages of low density (1.85 g/cm³) and high thermal conductivity. After an oxyacetylene ablation for 120 s at ~2300 °C, the composite retains its original sharp shape. The excellent ablation resistance results from the synergistic effect of various areas of the sharp leading edge. The top of the composites resists high temperatures and airflow, while the bottom transmits the heat out.