

中国材料大会 2025

暨新材料科研仪器与设备展

7 月 5-8 日, 2025

福建 厦门

C08-超高温结构材料与防护涂层
C08-Ultra-high Temperature Structural
Materials and Protective Coatings

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.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

航天固体动力超高温复合材料发展与需求

张光喜¹

1. 西安航天复合材料研究所

C08-02

多功能吸波/隔热 SiC 气凝胶可控制备及性能研究

范冰冰¹

1. 郑州大学

石墨为原料,结合改进的 Hummers 法、溶胶-凝胶法和冷冻干燥法,制备了氧化石墨烯气凝胶(GOA),再通过碳热还原反应,在 1350 °C 下保温 1-5 h 合成了具有不同石墨碳组份含量的 SiC 基气凝胶。生成的 SiC 纳米片气凝胶获得了优异的吸波性能,在模拟厚度为 1.5 mm 时,其最大有效吸波带宽(EABmax)为 8.6 GHz,最小反射损耗值(RLmin)值为-45.08 dB。为了进一步提升 SiC 气凝胶的力学性能,通过 3-氨丙基三乙氧基硅烷(APTES)对氧化石墨烯(GO)溶液进行了改性,再通过溶胶-凝胶、冷冻干燥和碳热还原等步骤,制备了 3D 多孔、可压缩的多功能 SiC 气凝胶。当海藻酸钠纳米线(SAnw)和改性 GO 的质量比为 1:1 时,获得 SiC 气凝胶-2 力学性能最佳,具有优异的抗疲劳特性。此外, SiC 气凝胶-2 还表现出了优异的 EMW 吸收特性,在模拟厚度为 1.7 mm 时,RLmin 为-61.56 dB, EABmax 为 9.82 GHz。通过化学气相沉积(CVD)法制备了超轻和柔韧的 SiC 纳米纤维气凝胶(SiC NFA)。SiC NFA 还展现出良好的 EMW 吸收特性,在 7.04 GHz 处取得的 RLmin 值为-39.37 dB,相应的模拟厚度为 1.9 mm。为了进一步提升 SiC NFA 的吸波性能,通过氧化作用在 SiC 纳米纤维表面原位生成了 SiO₂ 纳米层,不仅优化了气凝胶的阻抗匹配性能,而且还增强了气凝胶的高温热稳定性。在模拟厚度为 1.6 mm 时,其 RLmin 为-50.36 dB, EABmax 为 8.6 GHz,并探究了 SiC@SiO₂ NFA 的相关吸波机理。

C08-03

反应熔渗制超高温陶瓷复合材料的研究

曾毅¹

1. 中南大学

C08-04

Hf₆Ta₂O₁₇ 热障涂层的力学性能及服役行为研究

程春玉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。

C08-05

C/C 复合材料 HfC 涂层烧蚀过程中成分演变数值研究

晁许江¹, 李伟琪¹, 齐乐华¹

1. 西北工业大学

碳化钨 (HfC) 涂层在极端环境中是碳/碳 (C/C) 复合材料的关键抗烧蚀层, 然而当致密的 $\text{HfO}_{2-x}\text{C}_y$ 相在烧蚀过程中转变为疏松的 HfO_2 时, 其保护能力会下降。为探究烧蚀过程中 HfC 涂层的组分演变规律, 本研究开发了一种新型反应扩散模型, 该模型通过两个独立状态变量将氧扩散与化学反应解耦, 并通过 Abaqus 中的 UEL 子程序进行数值实现。电子探针显微分析 (EPMA) 验证了该模型, 监测了烧蚀后 C、O 和 Hf 的元素分布。结果揭示了不同的演化趋势: HfC 含量单调减少, HfO_2 稳定增加, 而 $\text{HfO}_{2-x}\text{C}_y$ 呈现先增后减的轨迹。此外, 平均氧扩散系数对烧蚀时间表现出非单调依赖性, 在表面氧浓度达到 43.2% 时降低 58.8%, 随后反弹。本研究为 HfC 涂层在烧蚀过程中的组分演变定量预测提供理论指导, 有望推动抗烧蚀超高温陶瓷材料设计研究。

C08-06

硅基陶瓷纳米线构筑的高性能吸波材料

王红洁¹

1. 西安交通大学

C08-07

超高温碳化钨陶瓷及其复合材料

王玉金¹

1. 哈尔滨工业大学

C08-08

机器学习驱动的高熵涂层摩擦与力学性能预测

彭健¹, 许柄权¹, 潘雅文¹, 王传彬¹

1. 武汉理工大学

高性能涂层是提升材料表面性能的核心手段之一, 然而传统试错研发模式存在周期长、成本高等瓶颈。本研究突破经验驱动范式, 建立基于机器学习的涂层性能设计方法, 通过构建成分-工艺-性能多维映射机器学习模型实现性能预测与工艺协同优化。针对高熵合金涂层摩擦系数预测难题, 开发基于随机森林、梯度提升树与 XGBoost 的混合集成投票模型, 结合特征工程策略, 实现摩擦系数的高精度预测, 并揭示工艺参数对摩擦系数的影响规律。面向难熔金属高熵氮化物涂层力学性能优化, 创新设计七算法异构堆叠集成框架, 较传统单一模型预测精度提升超 10%, 并通过本征描述符量化元素特性与工艺参数的协同效应。

C08-09

计算、数据和 AI 协同驱动的高温热障涂层设计与应用

种晓宇¹

1. 昆明理工大学

热障涂层是保障空天飞行器热端部件安全、稳定、长时服役的重要手段, 但导致热障涂层失效的主要原因之一是其制备和服役过程产生的热应力超过界面结合强度和材料损伤容限, 从而诱发裂纹的产生与扩展。鉴于目前尚无高效、准确的试验方法量化热障涂层的热应力, 我们基于材料基因工程的理念与方法, 耦合第一性原理计算、深度神经网络、多场耦合有限元仿真和热冲击试验等多尺度方法, 进行了核心软件的开发, 实现了关键数据的高通量、智能化计算, 搭建了参数数据库、实验数据库和模型数据库, 实现了

数据流的自动传递和关联建模，初步建立了热障涂层热应力快速量化计算与评价方法，为长寿命新型热障涂层材料的筛选、涂层结构设计和涂层工艺提升提供理论、方法和工具支撑。

C08-10

基于热扩散渗的 RE-Al 修饰 SiCf/SiC 复合材料构筑与性能研究

黄辉¹, 陈小武¹, 董绍明¹

1. 上海硅酸盐研究所

SiCf/SiC 复合材料的高温水氧耦合侵蚀问题已成为制约其在燃气轮机领域应用的关键挑战。本研究采用反应熔渗结合热扩散渗技术，设计了一种近乎无损伤的 SiCf/SiC-Al40Y 复合材料制备方法。结果表明，与传统 SiCf/SiC 复合材料相比，SiCf/SiC-Al40Y 复合材料在 1200-1300℃ 水氧耦合侵蚀 80 小时后，不仅表现出更高的弯曲强度，还具有更优异的强度保持率。此外，通过声发射技术进行损伤行为分析，发现侵蚀后力学性能的提升主要归因于材料的非层状断裂及层间结合力的提高。进一步研究发现，SiCf/SiC-Al40Y 复合材料的耐侵蚀机制源于表面形成的 $YAlSi_xO_y$ 保护层。该保护层是 Al^{3+} 和 Y^{3+} 在 SiO_2 玻璃网络中协同作用的结果：两种离子的掺杂能够增加玻璃网络中的桥氧比例从而显著提升其稳定性。与之相反，SiCf/SiC 复合材料的失效机制在于水氧耦合侵蚀过程中生成的 SiO_2 保护层不连续，导致其防护功能丧失，从而受到严重侵蚀。

C08-11

陶瓷基纳米复合材料光热应用探索

殷学民^{1, 2}, 沈曦², 李贺军¹

1. 西北工业大学

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。团队基于自主开发化学气相沉积系统和陶瓷基/碳基纳米材料可控制备技术，实现陶瓷基纳米复合材料的可控构筑、界面结构调控和特性优化，探索了陶瓷基纳米复合材料在光热领域的应用

C08-12

WC 掺杂 Hf-Ta-C 固溶陶瓷的硬度强化机制

李桂芳¹, 景旭珍¹, 朱肖飞¹, 杨丽¹, 周益春¹

1. 西安电子科技大学

Hf-Ta-C 固溶陶瓷是最有前途的极端环境热防护材料之一，其力学性能是决定其能否长期安全使用的关键指标。本文聚焦 WC 掺杂对超高温 HfTaC 固溶陶瓷硬度的提升机制，结合实验与第一性原理计算，系统研究了不同 WC 比例 ($x=0\%, 6\%, 12\%, 18\%, 24\text{mol}\%$) 的 Hf-Ta-C 固溶陶瓷微观结构与力学性能演变规律。结果表明，随着 WC 添加量增加，晶粒尺寸及生长择优取向无明显变化，而晶粒内部的硬度和弹性模量逐渐提升，其中 18 mol%WC 添加时性能最优，其纳米硬度和弹性模量分别达到 35.36 GPa 和 560.06 GPa，较未掺杂陶瓷分别提升 16.73% 和 28.43%。力学性能提升的原因归结于：W 固溶通过晶格畸变阻碍位错运动，以及共价键比例提升及键合强化使得位错运动需跨越更高能垒。该研究为通过组分调控优化过渡金属碳化物固溶体力学性能提供了实验依据和理论支撑。

C08-13

SiC/Si₃N₄ 复合气凝胶的制备与隔热性能研究刘琪¹, 张磊磊¹, 李贺军¹

1. 西北工业大学

气凝胶具有良好的隔热、耐高温和耐火性能,是理想的高温隔热材料。Si₃N₄ 纳米线气凝胶因具有良好的柔性、化学稳定性和耐高温特性而受到广泛关注。然而,纯 Si₃N₄ 纳米线气凝胶的机械强度不足,在室温下仅为 27.1kPa,限制了气凝胶在高强度领域的应用。为提高 Si₃N₄ 纳米线气凝胶的力学性能,本研究选用聚合物海绵作为模板,通过一步前驱体裂解法制备得到硬质 SiC/Si₃N₄ 纳米线气凝胶(SSA)。SSA 在具有较低热导率(0.064W/(m·K))的同时,压缩强度提高至 17.68MPa。SSA 可以耐受 650℃酒精灯和 1300℃喷枪火焰,且在 1400℃氧化条件下材料形状无明显变化。SSA 具有良好的吸波性能,在 X 波段(8.2 GHz-12.4 GHz)可实现全频域吸收。本工作为制备既具有良好隔热性能又具有优异机械强度的气凝胶提供了一种更简单有效的方法和创新思路。

C08-14

耐烧蚀陶瓷基复合材料的反应熔渗工艺数值模拟和实验研究

代吉祥¹, 师艳¹, 赵彤彤¹, 沙建军¹

1. 大连理工大学

陶瓷基复合材料具有优异的高温综合性能、较高的损伤容限和抗热冲击能力,成为有望满足极端环境的首选高温热结构材料,反应熔渗工艺是一类高效制备此类材料的主要工艺,主要过程是高温熔体通过毛细作用进入到碳/碳多孔体中,发生化学反应生成陶瓷相的过程。但由于熔渗过程伴随着高温高活性和短时剧烈的热物理化学相互作用,这使得实验观察和工艺调控充满挑战。本研究基于反应熔渗的微观作用机制,构建反应熔渗工艺的多物理场高保真模型,借助模拟计算技术对碳基多孔体内反应性熔体的输运和传质反应进行仿真分析,并实验验证相关动力学行为,制备了锆基、钎基等典型高温陶瓷基复合材料,对典型材料进行烧蚀测试并分析了其烧蚀机理。本研究旨在深入分析反应熔渗工艺的微观作用机制,实现此类工艺制备陶瓷基复合材料的性能提升。

C08-15

多元硼化物超高温陶瓷涂层成分、结构优化及抗烧蚀机理研究

吕君帅¹, 张雨雷¹

1. 西北工业大学

随着高超声速飞行器的迅速发展,用于其尖端部件的超高温结构复合材料面临极端烧蚀、高温氧化及热震等严苛服役环境,对其表面防护涂层提出了更高要求。多元硼化物超高温陶瓷因其超高熔点、优异的热稳定性与抗烧蚀性、尤其在多元协同效应下展示出的综合性能优势,成为构筑新型涂层体系的理想候选材料。本研究聚焦于多元硼化物基涂层的抗烧蚀性能提升,系统开展了(Hf,Zr,Ta,Ti)B₂、(Hf,Zr,Ta)B₂及(Hf,Zr,Ti)B₂涂层体系的成分调控研究,重点揭示了各过渡金属元素对氧化防护层耐温性与阻氧性的协同影响机制。在此基础上,通过多元硼化物与 SiC 的多层交替与梯度结构设计实现了防护性氧化膜的多界面应力缓释与“耐温-隔热-阻氧”功能一体化,获得了在 2200℃以上环境中稳定服役的高耐烧蚀涂层体系。本研究为超高温极端环境下抗烧蚀涂层的设计提供了理论支撑与应用基础。

C08-16

梯度多层 Cr-N 涂层的恒温氧化行为及微观结构演化

徐书朋¹, 彭健^{1, 2, 3}, 王传彬^{1, 2, 3}

1. 武汉理工大学材料复合新技术全国重点实验室

2. 化学与精细化工广东省实验室潮州分中心

3. 湖北省先进复合材料技术创新中心

该研究系统地考察了沉积于 304 不锈钢基体上的梯度多层 CrN 涂层的恒温氧化行为、氧化动力学特征及其微观结构演化过程。结果表明,相较于传统的 Cr 涂层与 CrN 涂层,梯度 CrN 涂层表现出更优异的抗氧化性能,在长期氧化过程中具有显著较低的氧化增重。涂层内部的梯度结构在氧化过程中演化为相对均匀的多层结构,有效抑制了氧的扩散,从而延缓了氧化进程。此外,Cr 粘结层的引入不仅在涂层与钢基体之间促成了稳定的互扩散区的形成,还显著提升了涂层的结合强度,对其长期服役稳定性起到了关键作用。

C08-17

高熵陶瓷晶格畸变与力热电磁构效机制研究

褚衍辉¹

1. 华南理工大学

高熵陶瓷因具有巨大的组分空间,独特的微观结构以及可调控的性能近年来受到国内外研究学者的广泛关注,然而,高熵陶瓷晶格畸变与力热电磁构效关系和机制尚不明确,限制了高性能高熵陶瓷材料的开发。为此,我们首先建立了高熵陶瓷可迁移的机器学习势函数,实现了分子动力学对其力-热性能的精准预测;在此基础上,借助球差 TEM、XRD 等多种手段相结合,揭示了高熵陶瓷的晶格畸变强化硬化机制以及晶格畸变阻碍热输运机制,阐明了高熵陶瓷中晶格畸变对导电性能的调控机制,即通过与空位浓度竞争来调控导电性能,发现了高熵陶瓷的晶格畸变强化电磁吸波机制,即通过晶格畸变调控材料的空位浓度和金属元素局域化学有序度,借助空位诱发偶极极化损耗机制、空位增强电导损耗机制以及金属元素局域化学有序诱发界面极化损耗机制提升材料的吸波性能;最终开发出耐 2000℃超高强高隔热多孔高熵硼化物陶瓷材料,发展出兼具高强高韧特性的仿生高熵碳化物全陶瓷材料,研制出宽频吸波高熵硼化物陶瓷材料。

C08-18

MoSi₂/mica/HSM 改性 CF/BPR 复合材料的高温承载能力及耐烧蚀性能张建¹, 张诗荃¹, 李俊国¹, 沈强¹

1. 武汉理工大学

热防护材料作为航空航天领域中应对极端热环境条件的关键功能材料,在再入飞行器、运载火箭、超高音速飞行器及其他高温设备中发挥着不可替代的作用。随着近年来航空航天技术的迅猛发展,飞行器任务的复杂性以及其工作环境的苛刻程度显著提升,热防护材料需要在承受极高温、气流冲刷以及剧烈机械载荷的条件下,提供有效保护以确保飞行器的结构完整性和任务的可靠性。

本研究以硼酚醛树脂(BPR)为基体,碳纤维(CF)为增强体,通过引入二硅化钼(MoSi₂)、云母(mica)及空心二氧化硅微球(HSM)协同改性系统研究了可瓷化聚合物基复合材料的高温承载能力、耐烧蚀性能及隔热行为,并提出了防/隔热双层结构设计。研究结果表明当 MoSi₂:mica 质量比为 9:1 时显著提升了复合材料的高温抗氧化性及高温下的承载能力,1500℃静态烧蚀 20 分钟后弯曲强度达 66.91 MPa,提高了 101.05%,同时线烧蚀率(RI)和质量烧蚀率(Rm)分别为 0.006 mm/s 和 0.03402 g/s,较未改性材料显著降低。引入空心微球(HSM)后,进一步提高复合材料的高温承载能力(添加 30 vol.% HSM,1500℃烧蚀后达到 62.96 MPa,1600℃静态烧蚀 20 分钟后弯曲强度也能维持在较高的水平为 62.96 MPa),及隔热能力有效降低背面温度(ΔT=52℃),平衡了轻量化与隔热需求。此外提出防/隔热双层结构设计:表层采用高填料含量的致密层以抵抗烧蚀,底层引入 HSM 实现高效隔热。当耐烧蚀层与隔热层厚度比为 3:1 时在不同烧蚀时间下均有更低的 RI 和背面温度分别为 0.013 mm/s、0.029 mm/s、0.032 mm/s 和 35.6℃、77.3℃、142.1℃,该设计在氧乙炔烧蚀 100 秒后,背面温度较均质材料降低 41.01%,综合烧蚀/隔热性能更好。

C08-19

难熔共晶高熵合金的微观结构与力学性能

魏琴琴¹, 罗国强¹, 沈强¹

1. 武汉理工大学

随着高超声速、聚变反应堆和航空航天等领域技术的飞速发展,对材料的高温强度提出了更高的要求。由于传统合金和共晶高熵合金的熔点低或微观结构不稳定,其高温强度无法满足日益增长的需求。因此,我们提出在难熔高熵合金中引入共晶碳化物以实现微观结构稳定性和高温高强度。由多主元元素混合和互锁的金属-碳化物界面阻碍了位错运动,两者协同强化效应使得共晶高熵合金具有优异的高温强度(1473 K 下 >2 GPa)。同时,层状金属相对微裂纹尖端有钝化作用,有效缓解了室温脆性。这一策略为下一代高温材料的设计提供了理论借鉴,可以克服共晶合金的低熔点限制和传统高温合金中扩散主导的软化现象。

C08-20

多因素耦合作用下 2.5D 机织 SiCf/SiC 陶瓷基复合材料失效行为与性能优化

林红娇¹, 蔡翔宇¹, 温志勋¹

1. 西北工业大学

2.5D 机织连续 SiC 纤维增强 SiC 陶瓷基复合材料(SiCf/SiC)预制体凭借其稳定的力学性能和良好的表面可加工性能,成为目前实现构件级预制体编织的主流技术方案。本研究基于先进的有限元模拟技术,针对 SiC 纤维浅交弯联与浅交直联两种编织方式展开系统性研究。通过结合微观结构表征与多尺度建模方法,构建包含纤维束细观形态、界面层力学特性及基体损伤演化的高精度有限元模型,深入剖析两种编织结构在拉伸、压缩、弯曲等多种载荷工况下的失效模式,从细观尺度揭示裂纹萌生、扩展及材料最终破坏的力学机理与动态演化规律。创新性引入多维参数体系,不仅涵盖不同经纬纱密度比对材料力学性能的影响规律,还深入探究 PIP、CVI 等典型制备工艺参数,以及不同工艺下复合材料内部孔洞、纤维-基体界面脱粘等缺陷的分布特征对性能的耦合作用。基于大量模拟数据与实验结果,通过机器学习算法优化力学性能预测模型,实现对复合材料疲劳寿命、剩余强度等关键指标的精准预测。

C08-21

钽钨合金电子束增材制造研究

魏明¹, 肖邦¹, 咬登治¹, 王建¹

1. 西北有色金属研究院

钽钨合金具有优异的高温强度、良好的延展性、可焊性和优良的耐腐蚀性能,适用于高温、高压、耐腐蚀等工作环境,广泛应用于化工、航空航天、原子能工业和高温元器件等领域。随着钨含量的增加,钽钨合金的强度提高,但是延伸率下降,这增加其加工成形的难度。而增材制造可以实现零件的直接成形,为钽钨合金提供了另一种成形方法。本课题首先进行了 Ta10W 合金等离子旋转雾化(PREP)制粉的研究,获得高球形度的 Ta10W 合金粉末。基于此粉末进行了 Ta10W 合金的电子束增材制造研究,建立了 Ta10W 合金的电子束增材制造成形工艺窗口,获得了其增材制造微观组织和室温、1500℃的拉伸性能,并分析了其组织形成机理及强化机制。

C08-22

Pr₃Si₂C₂-辅助低温液相烧结碳化硅陶瓷的氧化行为沈旭¹

1. 上海硅酸盐研究所

以 Pr₃Si₂C₂ 为烧结助剂,在 1650℃下通过热压烧结制备了近完全致密的碳化硅陶瓷,并在 1200-1400℃

下对其高温氧化行为进行了系统研究,以阐明 Pr^{3+} 迁移在氧化层演变中的作用。结果表明, Pr^{3+} 逐渐向氧化层表面迁移,并与 SiO_2 反应形成 $\text{Pr}_2\text{Si}_2\text{O}_7$,其结构转变与温度有关。当温度超过 1300°C 时,会形成致密的双层结构,包括外部的 $\text{Pr}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ 结晶层和内部的富含 SiO_2 的层,从而有效抑制了氧气的扩散。因此,氧化活化能从 24.1 kJ/mol ($1200\text{-}1300^\circ\text{C}$) 急剧增加到 420 kJ/mol ($1300\text{-}1400^\circ\text{C}$)。机理研究表明, Pr^{3+} 迁移最初是由基体和氧化层之间的浓度梯度驱动的,而随后的表面富集则是由 O_2 诱导的电势梯度控制的。这种双重驱动机制使连续的 $\text{Pr}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ 隔离层得以自组织,从而显著增强了抗氧化性。这些发现为通过控制稀土元素迁移来设计适用于极端环境的碳化硅基陶瓷提供了重要启示。

C08-23

水系浆料注射辅助真空浸渍法快速制备多功能 $\text{Cf/ZrB}_2\text{-SiC}$ 复合材料

邹冀¹, 傅正义¹

1. 西北有色金属研究院

连续碳纤维增强 $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ 陶瓷基复合材料是一类极具应用前景的热防护材料。尽管利用注射辅助真空浸渍(IVI)技术制备这类材料相较传统方法具有加工周期短、成本低和纤维损伤小等优势,但基于酚醛/丙酮体系的 IVI 工艺所制备的复合材料(CPS)陶瓷相含量仍有限。为克服该问题,本文提出了一种基于水基浆料的 IVI 方法,制备得到 CHS 复合材料。通过一次 IVI 循环工艺即可使 CHS 中 ZrB_2 的体积分数达 25 vol.% 以上,较 CPS 提高 47%,同时制备工期缩短了近 49%。随后,采用等温化学气相沉积工艺(CVI)进行 144 小时沉积碳处理,进一步降低孔隙率并增强了碳/陶瓷界面结合强度。CVI-CHS 复合材料在室温下的抗压强度为 $111.38 \pm 10.53\text{ MPa}$,较 CVI-CPS 提升 28%。压缩载荷下裂纹扩展呈不连续锯齿形路径,纤维桥接与拔出为其主要损耗机制。弯曲测试表明两种复合材料都具备优良的力学性能,表现为较高强度($111.15 \pm 12.46\text{ MPa}$, $83.15 \pm 12.03\text{ MPa}$)、低模量($13.00 \pm 2.41\text{ GPa}$, $13.52 \pm 6.99\text{ GPa}$)及高应变容限($1.32 \pm 0.018\%$, $1.07 \pm 0.34\%$)。这主要归因于纤维预制体的各向异性及不同相间弹性模量的不匹配导致了基体对纤维的约束减弱,从而缓解了应力集中。除此之外,与 CVI-CHS(22 - 27 dB)相比,由于基体中裂解碳与 CVI 沉积碳的协同作用,CVI-CPS 在 X 波段具有更优异的电磁屏蔽效能(34 - 36 dB),两种材料的电磁屏蔽效能均随温度升高(最高达 600°C)而增强。综上所述,本研究提出的水基 IVI 工艺路径为实现高陶瓷相负载、低成本且多功能可调控的热防护材料设计提供了新思路。

C08-24

基于增材制造技术的 SiC 点阵结构设计及组织性能研究

王沛¹

1. 河南省科学院碳基复合材料研究院

C08-25

钽的微波等离子体氮化及其结构演变与抗高温氧化机制

徐志刚¹

1. 武汉理工大学

钽及其合金广泛应用于航空航天、生物医学等领域,但其硬度较低、耐磨性不足,而且与氧的亲合力高,易与氧气反应,导致其抗氧化性较差。微波等离子体氮化是对金属表面进行强化处理的有效技术手段,相比于传统氮化方法,微波等离子体的反应活性高,与温度场的协同作用还可加快氮化反应速率。为此,本研究对金属钽进行微波等离子体氮化处理,通过控制氮化温度、时间和氮气流量等工艺参数,实现了对钽氮化层的物相组成、表面形貌、组分分布及其厚度的有效调控;通过评估氮化层的力学性能和摩擦磨损行为,建立起制备工艺-组织结构-服役性能之间的构效关系;在此基础上,进一步研究了其在高温有氧环境下的抗氧化性,重点分析了钽氮化层的氧化行为与抗氧化机制。本研究为金属钽的表面强化、性能提升及其在苛刻工况下的长时间服役,提供了重要的防护材料与技术支撑。

C08-26

服役工况下热障涂层 Co 基粘结层开裂及相变机理研究

刘俊凯¹

1. 西安电子科技大学

热障涂层作为有效的隔热手段,已经成为提高燃气轮机涡轮叶片服役温度和服役性能的关键部件。然而,在实际的服役过程中,由于复杂而苛刻的高温/高速旋转环境,往往会导致热障涂层开裂失效,影响燃气轮机的可靠性和安全性。本工作针对实际服役过程中燃气轮机涡轮叶片表面热障涂层粘结层出现的开裂失效问题,首先通过系统的高温热力学测试,分析影响粘结层开裂失效的关键因素为弹性模量,且通过有限元模拟计算验证弹性模量的影响作用,结合微观结构表征,得出粘结层开裂的主要原因为粘结层内部相变及内氧化。进一步地,通过高温三点弯曲实验,分析粘结层内裂纹扩展和失效机理,以及粘结层和基体互扩散层对裂纹扩展的影响作用。该工作对燃气轮机表面热障涂层的失效行为及可靠性服役提供理论基础,为新型热障涂层粘结层的设计及制备提供理论指导。

C08-27

Phase stability, thermal cycling behavior and CMAS resistance of Gd₂O₃-Yb₂O₃-Y₂O₃ co-doped ZrO₂ EB-PVD thermal barrier coatings田贺¹

1. 中国航发北京航空材料研究院

YSZ thermal barrier coatings (TBCs) face severe limitation above 1200 °C because of phase decomposition, reduced thermal cycling performance and CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS) corrosion. In this study, a novel Gd₂O₃, Yb₂O₃ and Y₂O₃ co-doped ZrO₂ (GYbYSZ) TBC was fabricated by electron beam physical vapor deposition, and its phase stability, thermal cycling performance and CMAS corrosion behavior were investigated. After 100 h at 1250 °C, GYbYSZ coating maintained phase stability. After thermal cycle at 1250 °C and thermal shock at 1400 °C, the overall columnar architecture of GYbYSZ coating remained intact with intercolumnar gaps preserved, while YSZ coating lost its columnar structure and was completely detached from the substrate. The better thermal cycling performance of GYbYSZ coatings is due to its higher toughness. Exposed to CMAS at 1250 °C, GYbYSZ TBCs had higher corrosion resistance than YSZ TBCs, which was attributed to large migration of Gd and Yb to CMAS melt altering its composition and increasing the viscosity.

C08-28

Hf 掺杂 SiOC 陶瓷的结构演变和高温氧化行为

吴秀美¹, 李云平¹, 于澍¹

1. 中南大学

氧化碳化硅(SiOC)陶瓷因其独特的三元亚稳结构而具有优异的高温热稳定性、抗氧化性,但在更高温度(≥1500℃)下的应用仍受到限制。在 SiOC 中掺入异质元素 Hf 形成难熔的 HfO₂ 和 HfSiO₄ 相可以提高陶瓷的高温性能。本文以二甲基二甲氧基硅烷和甲基三甲氧基硅烷为前驱体,乙酰丙酮铅为改性剂采用溶胶凝胶法和高温裂解法制备了 Hf 掺杂 SiOC 陶瓷,分析了 Hf 掺杂量对陶瓷微观结构演变的影响,同时详细研究了 Hf 掺杂 SiOC 陶瓷在 1500℃ 空气中的氧化行为,并深入探讨了其抗氧化机理。研究发现, Hf 掺杂 SiOC 中均匀析出了纳米 HfO₂ 颗粒(≤100 nm),而随着 Hf 掺杂比例的增加,在 0.03Hf (Hf/Si 摩尔比 = 0.03)中还析出了纳米 HfSiO₄ 颗粒(≤100 nm),这抑制了陶瓷中 SiO₂ 的碳热还原,提高了陶瓷的热稳定性。同时发现随着 Hf 掺杂比例的增加,陶瓷的抗氧化性能逐渐增强,0.05Hf 陶瓷表现出最佳的抗氧化性能。这是由于 0.05Hf 中大量 HfSiO₄ 颗粒在表面均匀析出,具有较强的增韧作用,抑制了裂纹的扩展;同时 HfSiO₄ 具有极低的氧扩散系数,0.05Hf 陶瓷形成的氧化层具有较低的氧扩散系数和较强自愈合能力。

C08-29

低成本柔性陶瓷薄膜的制备与阻燃隔热性能研究

宋博士¹

1. 西北工业大学

采用前驱体高温热解渗透的方法制备氧化铝纤维与氮化硅纳米线复合陶瓷薄膜，研究其微观结构、高温稳定性能机形貌变化、隔热与阻燃性能。

采用前驱体高温热解产生的氮化硅与碳化硅纳米线，根据收集的碳化硅和氮化硅纳米线原料与氧化铝纤维冷冻干燥分别制备氧化铝-氮化硅气凝胶薄膜、氧化铝-碳化硅气凝胶薄膜、氧化铝-碳化硅-氮化硅气凝胶薄膜。分别研究其微观形貌、高温热稳定性及对应的微观形貌变化、隔热性能、阻燃性能、弹性恢复能力。

C08-30

交联聚苯乙烯界面设计助力碳化硅基连续纤维复合材料的高保真高强 3D 打印

童明德¹

1. 西北工业大学

连续纤维增材制造（CFAM）技术具有革新陶瓷基复合材料（CMCs）制造模式的巨大潜力。然而，复杂预制体成型性差与力学性能不足仍是制约连续纤维 3D 打印制备 CMC 的两大关键挑战。本研究开发了聚苯乙烯（PS）交联策略，显著提升了 CFAM 制备的素坯预制体在热解过程中的尺寸稳定性。交联反应提高了 PS 热解残碳率，从而促进纤维桥接与粘结。经化学气相渗透（CVI）致密化后，未交联 C/SiC 与交联 C/SiC-CL 样品的力学行为呈现显著差异：交联处理后复合材料弯曲强度从 172.6 ± 11.2 MPa 提升至 314.1 ± 11.2 MPa。弯曲测试与模拟分析表明，交联样品失效模式由伪塑性断裂转变为准脆性断裂，这主要归因于交联作用改变了纤维与孔隙的空间分布，使载荷传递机制从纤维顺序失效转变为协同承载。

C08-31

B-Si 非晶- Al_2O_3 陶瓷复合涂层抗高温氧化性能研究梁天权¹，罗全浩¹，陈鹏彬¹，王昊泽¹，何欢¹，刘焘¹

1. 广西大学

非晶薄膜可有效阻止氧扩散和提高涂层的抗氧化性。本文研究了浆料法制备的不同 B_4C 添加量的 B_4C - SiO_2 -钠长石/ Al_2O_3 (BSA/AO) 双层涂层 900°C 下的抗高温氧化性能。结果表明，BSA 内层含 20wt% B_4C 的复合涂层在高温下表现出优异的抗氧化性，900°C 氧化 196 h 后碳块@BSA/AO 质量损失率仅 0.11%，而无涂层的炭块氧化 24h 后失重率达 90.28%。这归因于复合涂层中的 BSA 内层可在 1h 内快速原位反应形成具有一定流动性、良好自修复能力的薄而致密的玻璃层，并且在暴露过程中该致密玻璃层具有持久性和稳定性。外扩散非晶填充多孔 Al_2O_3 框架外层可有效阻挡氧的内扩散和内层 B 元素的氧化挥发，提高玻璃层的持久性和稳定性、提高复合涂层的抗高温氧化性能。

C08-32

TaC Coating on Porous Graphite via Thermo-Reaction Deposition and Diffusion Fabrication for SiC Crystal Growth

魏天晔¹

1. 浙江大学杭州国际科创中心

With the large-scale application of power devices, the demand for high-quality SiC wafers continue to increase. TaC, a corrosion- and high-temperature-resistant ceramic material, has been used as coating in SiC

crystal growth, significantly enhancing the crystal quality. In this study, TaC was coated onto porous graphite plates using the Thermo-Reaction Deposition and Diffusion and subsequently characterized using scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, and X-ray diffraction for morphological, crystal structure and valence states analysis. SiC crystal growth experiments using TaC coatings showed reductions in micropipe defects and threading edge dislocations by up to 99.7% and 80.5%, respectively, compared with the uncoated porous graphite. Finally, we analyzed the failure mechanism of the TaC coating. Overall, the TaC-coated porous graphite exhibits considerable potential for use in SiC growth by physical vapor deposition.

C08-33

混杂编织 C/C 复合材料的力、热性能

杨启谦¹

1. 西北工业大学

本研究旨在揭示杂化碳/碳编织体系中力学-热物理性能协同效应。不同于玻璃纤维或玄武岩与碳纤维混编, PAN, MP 纤维都属于碳材料家族, 利用碳纤维、碳基体具有高的化学亲和力, 与碳基体形成的化学键更强, 适配于 CVI 工艺。通过构建力学骨架与导热通道设计一种高导热-高承载一体化混杂碳/碳编织复合材料。并结合原位表征和多尺度建模探究混杂编织碳/碳复合材料失效机理以及混杂效应影响机制。

研究结果表明材料具备“导热性能小损伤、力学性能大增强”的调节特征, 并实现大量程范围内的性能调控。特别的, 材料的力学性能在小掺杂比下, 正混杂效应特征明显, 大掺杂比下, 性能调节接近线性, 且高于混合定律计算值。此外, 材料对热力性能的调节, 对提高抗烧蚀能力也体现出一定的优势。研究结果将为混杂碳/碳编织复合材料的设计与材料的性能调控提供一种思路。

C08-34

基于 Mo₂B 层的 Mo-Si-B 涂层稳定性协同增强: 扩散阻挡与界面强化作用

陈秋言¹, 宿冉冉¹, 张宏亮², 尹琦¹

1. 上海交通大学

2. 复旦大学

具有优异抗氧化性能的涂层开发对于下一代超高温系统至关重要, 此类涂层需在极端热-力耦合条件下维持结构完整性。虽然 Mo-Si-B 涂层通过自愈合的 B 掺杂 SiO₂ 氧化层和多层结构展现出应用前景, 但其长期稳定性根本上受到不连续扩散阻挡层和不兼容界面应力的限制。本文展示了一种界面工程策略, 通过两步包渗法引入 Mo₂B 层, 协同增强了 Mo-Si-B 涂层的稳定性。该 Mo₂B 层作为初始扩散阻挡层, 通过反应控制型 Mo₅SiB₂ 的形成抑制了 Si 的快速扩散, 同时提供 B 元素以形成厚实致密的 Mo₅SiB₂ 阻挡层, 从而提升了热化学稳定性。此外, Mo₂B 层将最大分层倾向位置从 Mo/Mo₅SiB₂ 界面转移至 Mo₂B/Mo₅SiB₂ 界面, 该新界面具有较大的黏附功 (4.41 J/m²) 和较低的界面能 (2.01 J/m²), 从而增强了机械兼容性。这些结果突显了定制化界面工程在平衡 Mo-Si-B 涂层的抗氧化保护能力和应力耐受性方面的关键作用, 为设计适用于极端环境的强韧超高温防护系统提供了一条有效途径。

C08-35

新型 C/C-ZrC-Zr_xCu_y 复合材料在极端烧蚀环境下的长期热防护

张欣¹, 郭领军¹, 殷学民¹

1. 西北工业大学

碳/碳 (C/C) 复合材料因其优异的高温力学性能被认为是临近空间飞行器关键热防护部件的理想候选材料之一。然而, 该类材料存在高氧化敏感性的问题, 尤其是在尖锐、薄壁构件中, 其抗烧蚀性能与力学

承载能力面临严峻挑战,难以满足极端工况下的应用需求。为缓解制造过程中尖端部位的侵蚀问题,并实现微观结构的定制化设计,开发了一种基于真空驱动的改进反应熔渗技术。该技术通过将 Zr-Cu 熔体渗透至多孔 C/C 复合材料的连通网络中,成功制备出 C/C-ZrC-Zr_xCu_y 尖锐前缘复合材料。复合材料表现出致密的 ZrC-Zr_xCu_y 基体结构。在该结构中,由于载荷能够在 ZrC-Zr_xCu_y 基体与碳纤维之间有效传递,复合材料的抗弯强度提高至 205.68 MPa,弹性模量达 14.72 GPa,力学性能显著增强。经 2.4MW/m² 氧乙炔火焰烧蚀 60 s 后,该材料的质量烧蚀率为 0.16 mg/s,平均线性烧蚀速率为-1.17 μm/s,表现出优异的抗烧蚀性能。其卓越性能主要得益于 Cu 的“发汗冷却”以及 Cu-Zr-O 层的动态自愈的协同抗烧蚀机制。进一步的 300 s 长时烧蚀试验验证了该复合材料在极端环境下的结构稳定性。微量残留的 Cu 与原位烧结形成的 ZrO₂ 共同作用,有效实现了长期保护。在该条件下,材料的质量烧蚀率和平均线性烧蚀速率分别为 4.53 mg/s 和 1.83 μm/s。该研究成果为开发适应特定使用环境的抗烧蚀材料和系统提供了一条可靠且具有实际应用前景的路径。

C08-36

热循环处理对 NiW 合金涂层的力学性能影响研究

张锦柏¹, 杨万欢¹, 李晓泉¹

1. 中国原子能科学研究院

本文研究了磁控溅射镍钨合金涂层在沉积态和热循环条件下的微观结构及力学性能。采用直流磁控溅射(DC)技术在镍基合金基体上制备了三种不同成分的 NiW 涂层。然后在 800℃下保温 30min,并进行 10 次循环。使用维氏硬度和划痕法研究了 NiW 涂层的硬度和结合力。沉积态 NiW 合金涂层均表现为非晶结构,且显微硬度与结合力均随着 W 含量的增加而增加。研究发现,热循环处理对涂层的微观结构有很大影响,包括物相组成、表面形貌和晶粒尺寸。热循环处理导致了涂层的晶粒长大、非晶相晶化和纳米沉淀物的析出。纳米沉淀物的存在和非晶相的晶化使热循环涂层的硬度和结合力比沉积前显著提高。

C08-37

超韧多功能陶瓷涂层

陈舟¹

1. 无锡聚合高新材料科技有限公司

C08-38

高温可视化原位观测在热障涂层中的应用

焦思慧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℃~1300℃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。

C08-39

多尺度结构演化与成分调控对 Al₂O₃/Al₂O₃ 复合材料高温稳定性的影响研究

孙中原¹, 林红娇¹

1. 西北工业大学

本研究围绕 Al_2O_3 连续纤维增强 Al_2O_3 陶瓷基 ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$) 复合材料的高温稳定性与多尺度结构演化机制展开, 分别从纤维与陶瓷基体两个层面进行成分调控与结构分析。在纤维部分, 通过调控 SiO_2 的掺杂比例, 有效抑制了热诱导相变与晶粒异常生长, 增强了纤维结构稳定性。陶瓷基体方面, 引入 SiO_2 与 ZrO_2 进行第二相改性, 研究其在 $900 - 1400^\circ\text{C}$ 热处理过程中的物相演变及界面调控效应。结果表明, 非晶 SiO_2 可作为柔性隔离界面, 缓解晶化初期的缺陷积聚与孔洞生成。 ZrO_2 的引入展现出与 Al_2O_3 的双向抑制效应, 有效抑制高温相变, 并推迟基体致密化温度, 改善烧结动力学过程。此外, 在裂纹区域可观察到 Zr 元素的局部偏析现象, 表现出一定的自修复潜能。为深入揭示成分调控与结构响应之间的内在关联, 本研究结合分子动力学模拟, 从原子尺度评估了非晶 SiO_2 和 ZrO_2 对局域结合能、应力场分布与界面结构演化的影响, 明确其在稳定物相结构、抑制缺陷形成中的关键作用。研究成果为构建高稳定性的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合材料体系提供了理论支撑与设计依据。

C08-40

大气等离子喷涂制备 $\text{Hf}_6\text{Ta}_2\text{O}_{17}/\text{YSZ}$ 双陶瓷层可磨耗封严涂层的热循环及可磨耗性卫首印¹

1. 西安电子科技大学

双陶瓷层结构的可磨耗封严涂层可实现更高的耐温能力。采用大气等离子喷涂技术制备了 YSZ 和 $\text{Hf}_6\text{Ta}_2\text{O}_{17}$ 单陶瓷层涂层, 以及 $\text{Hf}_6\text{Ta}_2\text{O}_{17}/\text{YSZ}$ 双陶瓷层涂层。在 1200°C 的高温热循环测试中, $\text{Hf}_6\text{Ta}_2\text{O}_{17}/\text{YSZ}$ 封严涂层的热循环寿命为 200 次循环, 超过了单陶瓷层 YSZ 封严涂层 (20 次循环) 和 $\text{Hf}_6\text{Ta}_2\text{O}_{17}$ 封严涂层 (90 次循环)。通过密度泛函理论 (DFT) 计算表明, $\text{Hf}_6\text{Ta}_2\text{O}_{17}/\text{YSZ}$ 的界面粘附功为 $770.5 - 806.4 \text{ mJ}/\text{\AA}^2$, 明显超过了 YSZ 晶体表面能。进一步通过透射电子显微镜 (TEM) 分析表明 $\text{Hf}_6\text{Ta}_2\text{O}_{17}/\text{YSZ}$ 界面没有缺陷或相互扩散, 有效抑制了横向裂纹的形成。YSZ 层的垂直裂纹偏转在耗散能量的同时延长了传播路径, 显著提高了热循环阻力。可磨耗性定量分析揭示了 $\text{Hf}_6\text{Ta}_2\text{O}_{17}/\text{YSZ}$ 双陶瓷层封严涂层具有出色的可磨耗性, 其具有光滑且无碎屑的磨损表面。与 YSZ 封严涂层相比, $\text{Hf}_6\text{Ta}_2\text{O}_{17}/\text{YSZ}$ 双陶瓷层封严涂层的磨损性能显著降低, 质量损失率为 $1.06 \times 10^{-7} \text{ g/s}$, 体积损失率为 $1.73 \times 10^5 \mu\text{m}^3/\text{s}$, 磨损系数为 $1.62 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$, 磨损率为 2.714。总体而言, $\text{Hf}_6\text{Ta}_2\text{O}_{17}/\text{YSZ}$ 可磨耗封严涂层表现出良好的性能, 无疑是一种极具前景的可磨损密封涂层, 具有广泛的应用潜力。

C08-41

高导热和高承载 C/C 复合材料层压碳/碳复合材料的研究

彭景雅¹

1. 西北工业大学

碳/碳 (C/C) 复合材料具有高导热性和高承重性, 是超高温应用领域理想的热防护材料。单一纤维增强的 C/C 复合材料很难满足性能要求。在这项研究中, 通过对高导热沥青基碳纤维 (CFMP) 布和高承载聚丙烯腈基碳纤维 (CFPAN) 布的混合堆叠进行致密化, 制备了 CFPAN/CFMP 混合增强层状 C/C 复合材料。通过 CFMP 和 CFPAN 的混合堆叠, PyC 基体受到压应力的作用, 从而提高了 PyC 基体的粘结性能和混合层压 C/C 复合材料的机械性能。压应力提高了 PyC 基体的有序度, 改善了 PyC 基体的导热性。CFMP 的引入和 PyC 基体热导率的改善提高了混合层压 C/C 复合材料沿 X-Y 平面和 Z 轴的热导率。热导率的提高减弱了氧化过程, PyC 基体的强结合力提高了抗机械侵蚀能力, 因此 CFPAN/CFMP 增强的混合层压 C/C 复合材料具有最佳的抗烧蚀性能。这项研究为通过 CFMP 和 CFPAN 混合堆叠提高高导热性和高承载能力提供了可靠的指导。

C08-42

空天极限高温热力学传感测试技术

刘志春¹

1. 厦门大学航空航天学院

空天高速飞行器因其大空域、超高速、长距离、高精度等特点，有着巨大的战略价值和潜在经济价值，成为各国争相发展的战略技术之一。空天高速飞行器最大的挑战来自于“热”，高达 3000℃ 极限高温的热载荷带来气动、结构和推进等方面亟待解决的系列科研难题，其中首要解决的是极限高温热力学参数传感测试难题。现有非接触式光学测试方法存在精度低、抗振差、体积庞大、难安装等问题，接触式测试方法具有测试精度高、安装容易等优点，但仍存在耐温性差、测量上限低、响应时间慢、探头直径大等问题。

针对空天高速飞行器接触式极限高温测试难题，本团队开展了极限高温热力学传感器及系统前沿研究，从基础敏感原理、传感结构系统到标定测试实现理论和技术创新，开发了系列极限高温热力学传感器及系统，突破现有接触式热力参数测试手段耐温、量程和响应速度等局限，推动极限高温传感测试理论技术发展。

C08-43

碳化硅纳米线的红外-雷达协同隐身设计策略

张倩¹，魏剑¹，张妍彬¹，李雪婷¹，姚毅¹，侯甲一¹，尹乐¹

1. 西安建筑科技大学

碳化硅纳米线（SiC NWs）因其优异的高温稳定性、耐腐蚀性及可调控的电磁特性，广泛应用于吸波材料领域，尤其适用于航空航天发动机、高超音速飞行器等极端环境。然而，随着探测技术的多元化和智能化，单一隐身手段已无法应对复杂的战场环境，红外/雷达兼容隐身材料成为当前隐身技术研究的重点。本工作通过复合材料策略成功构建了红外雷达隐身相容性的多功能花状镍颗粒/碳化硅纳米线（SiC NWs）复合材料，在复合材料掺量为 50wt% 时，石蜡基质混合物的最小反射损耗（RL_{min}）可达 49.26 dB，其厚度为 1.9 mm，有效吸收带宽（EAB）为 4.85 GHz，进一步提高复合材料掺量至 60wt% 时，Ku 波段的 EAB 可以在 1.8 mm 厚度下达到 5.0 GHz。引入花瓣状镍颗粒可以改善阻抗匹配特性，增加电磁波的界面极化和多重散射，进而增强微波吸收性能。同时，与镍颗粒复合后，红外（IR）反射率在三个波段都得到改善，这项作为多功能和高性能电磁波吸收和红外隐身材料的设计开辟了新的途径。

C08-44

Enhanced Thermal Shock Resistance of YSZ Thermal Barrier Coatings via Matched Porosity Gradient Design

向阳¹

1. 电子科技大学

Yttria-stabilized zirconia coatings, as thermal barrier coatings, require high bonding strength, low thermal conductivity and emissivity, and long thermal shock lifetime to provide superior long-term high-temperature protection for alloy substrates. Matched gradient pore YSZ coatings, featuring a low-porosity inner layer and high porosity outer layer, were designed by adjusting spray power during atmospheric plasma spraying and optimizing interlayer porosity gradients. The results showed that YSZ coatings with matched porosity gradients exhibited excellent bonding strength, moderate thermal conductivity, and infrared emissivity, alongside outstanding thermal shock resistance. The thermal shock lifetime exceeded 900 cycles at 1000 °C, representing a 9-times improvement compared to conventional coatings. This enhancement in thermal shock resistance was attributed to the optimized porosity gradient design. The matched gradient effectively suppressed crack propagation during the early stages of thermal cycling, promoted the formation of a dense Al₂O₃ layer at the interface, and further

inhibited the diffusion of Al into the coating。

C08-45

碳碳复合材料表面激光定向能量沉积氧化钇改性碳化锆-碳化硅涂层的抗烧蚀性能

吕龙雪¹, 史小红¹

1. 西北工业大学

碳碳复合材料表面保护涂层的致密性对其使用寿命至关重要。本研究采用激光定向能量沉积(L-DED)技术, 利用其高能量密度、精确可控及快速成形的优势, 高效地设计并制备了 Y_2O_3 改性 $ZrC-SiC$ 复合涂层(YZS)。实验结果表明, 相较于未改性的 $ZrC-SiC$ 涂层, YZS 涂层表面粗糙度显著降低, 并展现出优异的抗激光烧蚀性能和抗热震性能。在 500 W 激光功率下连续烧蚀 30 秒以及烧蚀 5 秒/冷却 5 秒、循环三次的热震测试下, YZS 涂层的线烧蚀率分别为 $-2.49 \mu m/s$ 、 $-3.27 \mu m/s$, 远优于未改性涂层(30s, $-7.63 \mu m/s$)。这是因为 Y 元素的引入部分削弱了 $Zr-O$ 键, 诱导形成更多氧空位, 从而促进 ZrO_2 的烧结, 最终增强了涂层中 $Zr-Y-O$ 层的致密性并稳定了其相结构。

C08-46

高温涂层与高温合金互扩散行为研究

孙晓瑜¹

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

金属涂层被广泛应用于提升高温合金的抗氧化性能。然而, 涂层与基体合金间的互扩散会导致合金基体组织的严重退化。一些关键的退化机制仍不清楚, 例如高温合金中 γ' (Ni_3Al) 强化相的退化现象——尽管涂层中 Al 元素的扩散增加了合金基体的 Al 含量, 但大量 γ' 析出相仍溶解于 γ 基体。本文通过热力学计算和微观组织表征的方法, 研究了 Amdry365 涂层与 IN792 高温合金在 $1100^\circ C$ 下的互扩散行为。研究表明快速扩散的 Al 元素主导了初始的组织相变。我们提出 Al-Cr 交互作用理论, 来解释涂层/合金界面处 Cr 元素聚集与 Al 元素贫化的现象。局部相平衡计算验证了高温合金中 γ' 相耗竭主要归因于 Ti、Ta 等 γ' 相形成元素的损失。本研究为抑制涂层/高温合金互扩散的导致的基体组织退化提供了新的思路。

C08-47

碳/碳复合材料表面 $ZnO@TiO_2$ 热管理涂层及制备方法

李卓琳¹, 张守阳¹

1. 西北工业大学

碳/碳复合材料因其低密度、优异的力学性能和良好的导热性, 在航空航天领域具有重要应用价值。然而, 其表面辐射散热能力不足, 在空间高温环境下易因热量积累引发热损伤和性能退化。因此, 开发兼具低太阳吸收(减少热量输入)和高红外发射(增强热量输出)的热管理涂层, 实现“边导边散”的热调控, 对提升碳/碳复合材料的高温稳定性至关重要。

本研究采用溶胶-凝胶法制备 $ZnO@TiO_2$ 复合粉体, 通过料浆涂刷法在碳/碳复合材料表面构建热管理涂层。目标制备出在 $0.3\sim 2.2 \mu m$ 波段平均反射率超过 0.9 (低太阳吸收)、 $1\sim 22 \mu m$ 波段平均发射率大于 0.9 (高红外辐射) 的高性能涂层。通过调控材料组分与微观结构, 优化涂层的热反射与热发射特性, 为碳/碳复合材料在极端环境下的热防护提供新思路。

C08-48

真空中 MoCu 合金表面 NiW 涂层耐热冲击循环和抗挥发性能

李晓泉¹

1. 中国原子能科学研究院

为提高 MoCu 合金材料在高温真空环境中的抗挥发能力,本研究采用磁控溅射技术在 MoCu 合金表面沉积了纯 Ni 涂层和 NiW 合金涂层,于真空中高温热处理后进行热冲击循环实验和长时挥发实验,探究了热冲击循环实验和长时挥发实验对涂层微观组织结构及性能的影响。结果表明,纯 Ni 涂层经热处理后形成稳定的 CuNi 固溶相;NiW 涂层为非晶态,经热处理后转变为晶态,并形成纳米多孔结构;所涂覆两种涂层均具有抗挥发作用,经长时挥发厚度无明显减薄,且耐热冲击性能良好,相较于纯 Ni 涂层, NiW 涂层的抗挥发性能和力学性能略有提升。

C08-49

Hf 基陶瓷反应熔渗改性 C/C 复合材料的制备及性能研究

许东方¹, 卢锦花¹

1. 西北工业大学

采用化学气相浸渗 (CVI) 工艺制备了低密度 2.5D 针刺和 3D 穿刺结构 C/C 复合材料,经反应熔体浸渗 (RMI) 得到改性后的 C/C-HfC-SiC 复合材料。研究了两种改性材料在不同方向上的压缩和弯曲性能,并评估了在氧乙炔考核环境下 (4.18MW/m²,40s×3 循环) 抗热震烧蚀性能。结果表明:①在 X 方向 (无纬布层方向) 压缩测试中,两种材料均产生了无纬布层与网胎陶瓷层的分离,呈现为曲折的破坏曲线,其强度分别为 213.91±8.48 MPa、242.63±26.11 MPa;在 Z 方向 (针刺/穿刺纤维方向) 压缩测试中,两种材料均为斜角式破坏,其强度分别为 228.78±6.94 MPa、245.95±20.30 MPa, X 方向上的压缩模量高于 Z 方向。②弯曲测试中,2.5D C/CHS 复合材料 X 方向及 3D C/CHS 复合材料 Z 方向呈现脆性断裂模式,两种材料的 X 方向的弯曲强度均高于 Z 方向,由于 3D 穿刺复合材料中引入了穿刺纤维束,显著增强了 Z 方向的弯曲性能,同时 X 方向弯曲性能相比 2.5D C/CHS 复合材料性能略微下降。③在保持反应熔渗工艺试样表面产生原位涂层的情况下,3D C/CHS 复合材料相比 2.5D C/CHS 复合材料具有较低的质量烧蚀率和优异的线烧蚀率。

C08-50

YSZ 可磨耗涂层的高温磨损断裂现象与机制分析

杜飞¹

1. 西安电子科技大学

研究结合实验与数值模拟,研究了钇稳定氧化锆 (YSZ) 封严涂层的高温磨损行为及裂纹扩展机制。采用等离子喷涂,在镍基高温合金上制备 YSZ 涂层样品,进行了 1000℃ 高温往复滑动磨损实验和常温高载对照实验。利用扫描电子显微镜 (SEM)、能量色散谱 (EDS) 和三维形貌分析仪表征了磨损形貌、裂纹特征及元素分布。建立了高温磨损-断裂耦合有限元模型模拟涂层在高温磨损中的应力状态、磨损演变及裂纹萌生与扩展。结果表明:高温磨损下,YSZ 涂层的垂直裂纹扩展主要由材料自身热膨胀及涂层-粘结层-基底间的热膨胀系数失配产生的热应力主导;一定范围内的接触磨损应力本身不会引发垂直裂纹扩展。模拟与实验均显示,当垂直裂纹扩展至涂层-粘结层界面时,界面处的平行反向剪应力使裂纹路径偏转,沿界面横向扩展,导致界面分层失效。高温磨损中,涂层表面存在三种协同作用的磨损机制:磨粒磨损、黏着磨损、循环接触应力诱发的疲劳磨损。这些机制共同塑造了最终磨损形貌。本研究揭示了 YSZ 封严涂层在高温磨损环境下的损伤演化与裂纹扩展行为,阐明了热失配应力在裂纹扩展中的核心作用。

C08-51

钛合金表面 YSZ 热障涂层 APS 成形特性与热震性能研究

王佩^{1,2,3}, 胡泽启^{1,2,3}, 华林^{1,2,3}, 谢乐春^{1,2,3}

1. 武汉理工大学汽车工程学院

2. 高温轻合金与应用技术全国重点实验室, 武汉理工大学, 湖北 武汉 430070

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

为提升钛合金部件在高温环境下的服役性能,本研究采用大气等离子喷涂 (Atmospheric Plasma Spraying, APS) 技术在 TC4 (Ti-6Al-4V) 基底上制备了氧化钇稳定氧化锆 (YSZ) 热障涂层,为了改善陶瓷层和合金基体的热不匹配和提高抗高温氧化腐蚀性能,在合金基体和陶瓷层之间加一层金属粘结层,金属粘结层采用 CrNiAlY。系统设计并实施了 8 组不同的 APS 工艺参数组合 (喷涂距离、加工电流、气体流量),探究工艺参数对涂层微观结构、力学性能及热震性能的影响规律。通过分析涂层微观结构,测量孔隙率参数,优化 APS 工艺参数。研究表明,不同参数组合下制备的涂层在微观结构 (孔隙分布、层状结构特征) 方面存在显著差异,在喷涂距离 110 mm、加工电流 600 A、气体流量 55 L/min 时界面结合良好,厚度均匀 ($405.1 \pm 4.5 \mu\text{m}$),孔隙率约为 6.31%。本研究旨在建立 APS 工艺参数与 YSZ/TC4 涂层体系关键性能指标 (微观结构、孔隙率、热震性能) 之间的关联,为优化钛合金表面高性能 YSZ 热障涂层的 APS 制备工艺提供依据。

C08-52

基础元素 Al 与改性元素 Hf 对 NiCoCrAlY 黏结层合金相组成及等温氧化行为的影响

薛瑞¹, 辛文彬¹, 张婧¹, 王凯¹

1. 内蒙古科技大学 稀土产业学院

热障涂层的服役性能与使用寿命受黏结层合金相组成、结构及抗高温氧化性能的直接影响。本文采用 Thermo-Calc 热力学计算分析基础元素 Al 与改性元素 Hf 对 NiCoCrAlY 合金平衡相组成和结构的影响,并利用 X 射线衍射仪、场发射扫描电镜、能谱仪等研究不同 Hf 含量条件下黏结层合金的室温组织、Hf 元素分布特征及 1100 和 1150℃ 等温氧化行为。结果显示,随着 Al 含量从 12wt% 增加到 14wt%,合金的相组成均以 FCC_L12 结构 γ' -Ni₃Al 相和 BCC_B2 结构 β -NiAl 相为主,还有少量 Ni₅Y 及 α -Cr 相, γ' -Ni₃Al 相析出温度由 900℃ 降低到 886℃,最大析出量 (摩尔分数,下同) 由 0.683 减少到 0.498, β -NiAl 相的析出温度从 1366℃ 升高到 1424℃,最大析出量从 0.613 增加到 0.776,同时室温组织中 β -NiAl 相含量增多;当合金中 Hf 含量由 0wt% 增加到 0.5wt% 时,相组成和结构变化不明显,凝固区间温度均为 129℃,且 Hf 元素主要在 γ' -Ni₃Al/ β -NiAl 相界面处富集。随着温度由 1100℃ 升高到 1150℃,0Hf 和 0.5Hf 合金 0~200h 平均氧化速率分别由 0.045 和 0.086 g·m⁻²·h⁻¹ 增加为 0.061 和 0.153 g·m⁻²·h⁻¹,速率常数 k_p 分别从 0.393 和 1.412 g²·m⁻⁴·h⁻¹ 增大到 0.654 和 4.163 g²·m⁻⁴·h⁻¹;尽管掺杂 Hf 能够在氧化过程中优先生成 HfO₂ 颗粒,起到阻碍氧向内扩散及钉扎氧化膜的有益作用,但 Hf 原子半径较大,在合金中分布不均匀,导致 HfO₂ 颗粒聚集长大成为裂纹源,加剧内氧化,最终对合金的抗高温氧化性能不利。

C08-53

Zr 改性 NiCoCrAlY 粘结层合金相组成、结构及抗高温氧化性能

陈旭阳¹, 张婧¹, 辛文彬¹, 周元焱¹

1. 内蒙古科技大学

粘结层合金的相组成和结构在很大程度上影响其高温氧化行为,具有优异抗氧化性能的粘结层合金是制备高性能热障涂层的基础。本文以 Zr 改性 NiCoCrAlY 粘结层合金为研究对象,将热力学计算与实验分析相结合,系统研究 NiCoCrAlYZr 粘结层合金平衡相组成结构,非平衡条件下合金的室温组织、Zr 元素的分布特征及 1050~1150 °C 等温氧化行为。结果表明, NiCoCrAlYZr 合金 200 °C 平衡相组成以 FCC_L12 结构 γ' -Ni₃Al 和 BCC_B2 结构 β -NiAl 为主,还有少量 α -Cr 和 Ni₅Y 相,掺杂 Zr 促进了富 Zr 的 H_L21 相析出。该合金的室温组织以 β -NiAl 和 γ' -Ni₃Al 相为基体,少量 α -Cr 析出相分布于 β -NiAl 相上, H_L21 与 Ni₅Y 相主要分布于 β -NiAl/ γ' -Ni₃Al 相界面处。当氧化温度由 1050 °C 升高到 1100 和 1150 °C 时, NiCoCrAlYZr 合金 0~200 h 平均氧化速率由 0.24 g·m⁻²·h⁻¹ 增大到 0.42 和 0.60 g·m⁻²·h⁻¹,速率常数 k_p 由 11.50 g²·m⁻⁴·h⁻¹ 增加到 35.38 和 74.23 g²·m⁻⁴·h⁻¹,等温氧化反应的活化能 E_a 为 187.73 J/mol。同时,氧化膜主要由致密的 Al₂O₃ 组成,以及少量的 ZrO₂。

C08-54

高导热 C/C 复合材料与不锈钢的钎焊连接接头力学性能及微观结构研究

秦培涵¹, 张守阳¹, 闫晋凯¹

1. 西北工业大学

轻质高导热 C/C 复合材料用于空间热管理系统可有效降低航天器重量, 提高散热效率。某新型航天器要求实现高导热 C/C 复合材料与不锈钢换热器件的可靠钎焊, 以确保其在服役过程中的可靠连接与高效传热。本论文采用不同厚度的铜箔改性 AgCuTi 钎料, 通过真空钎焊在 900℃ 下保温 10min 成功连接了 C/C 复合材料和 316 不锈钢。使用 SEM 等表征方法研究了铜箔厚度对钎焊接头显微组织与剪切强度的影响, 结果表明: 钎焊接头的相组成为 C/C/TiC/Ag(s.s) + Cu(s.s)/TiFe2/316 不锈钢; 在钎料中活性元素 Ti 的作用下, 液态钎料可以很好地润湿 C/C 复合材料表面, 并与之反应生成 TiC; 同时, Ti 元素与不锈钢中扩散进钎料的 Fe 元素反应生成 TiFe2 相。分析添加不同厚度的铜箔的钎焊接头的微观形貌可以发现: 加入的 Cu 箔会溶解在液态钎料中, 降低钎料层的热膨胀系数, 提高其塑性变形能力。随着 Cu 箔厚度的增加, 接头的剪切强度先上升后下降, 其中溶解的铜箔逐渐靠向 C/C 母材一侧。当 Cu 箔厚度过高时, C/C 复合材料一侧的 Cu(s.s) 会占据钎料的位置, 使 C/C 附近的 Ti 元素减少, 钎料与 C/C 表面的反应减弱, 使得钎焊接头连接强度降低。当加入的 Cu 箔厚度为 30 μm 时, 钎焊接头的剪切强度达到最高, 为 27.07MPa。

C08-55

ZrO₂ 短切纤维增韧氧化层显著提升 C/C-ZrC-SiC 复合材料的抗烧蚀性能李甜¹, 贾瑜军¹

1. 西北工业大学

采用反应熔渗法制备了 ZrO₂ 短切纤维增韧氧化膜的 C/C-ZrC-SiC 复合材料, 同时制备了 C/C-ZrC-SiC 复合材料作为对比, 将 C/C-ZrC-SiC 记为 CZS, 将 ZrO₂ 短切纤维增韧氧化膜的 C/C-ZrC-SiC 复合材料记为 CZSf。研究了两种材料在热流密度为 4.12 MW/m² 的氧乙炔焰中的烧蚀性能。经过 40 s 和 40 s×2 的氧乙炔烧蚀后, CZS 的烧蚀率分别 2.15 mg/s、-3.09 $\mu\text{m/s}$ 和 1.61 mg/s、-2.69 $\mu\text{m/s}$, CZSf 的烧蚀率为 -1.2 mg/s、-5.18 $\mu\text{m/s}$ 和 -0.31 mg/s、-3.36 $\mu\text{m/s}$ 。烧蚀后的 CZSf 表面存在 ZrO₂ 纤维, ZrO₂ 纤维有效抑制了复合材料在烧蚀过程中形成的氧化膜中的裂纹扩展, 提高了氧化膜的韧性, 增强了氧化膜的致密度和完整性, 完整致密的氧化膜可以有效隔绝氧气和其他氧化性气体向基体内部的渗透, 避免氧化气氛与基体材料直接接触, 降低氧化反应的进行速度从而延缓材料烧蚀。此外, ZrO₂ 纤维与氧化膜形成的“骨架结构”提高了氧化膜的机械强度, 使氧化膜在高温烧蚀和气流冲刷下不易剥落, 保持了材料的结构完整性, 显著提升了材料的抗冲刷能力, 使材料在高温气流环境中具有更长的服役寿命。

墙报

C08-P01

高温下 CoCrAlY 涂层合金中的氧化促进疲劳裂纹萌生和扩展机制

李谦¹, 刘俊凯¹

1. 西安电子科技大学

研究了 CoCrAlY 涂层超耐热合金在 900 °C 空气中的低周疲劳行为。研究考虑了应变幅度和退火处理对疲劳寿命的影响, 以及氧化行为对疲劳裂纹扩展的促进作用。涂层的表面氧化会导致铝耗尽即 γ 相层的形成, 并促进疲劳裂纹的产生。涂层/基底界面可有效抑制裂纹的生长。在涂层/基底内的裂纹尖端, 氧化引起的 $\beta/\gamma' \rightarrow \gamma$ 转变加速了裂纹的扩展。此外, 退火处理会软化样品并降低应力幅, 从而减少裂纹的产生, 但会加速裂纹的扩展。

C08-P02

力热耦合失效机制下涡轮叶片热障涂层的可靠性评价

闫维亮¹, 杨丽¹, 周益春¹

1. 西安电子科技大学先进材料与纳米科技学院

由于复杂的服役环境和多物理场失效机制, 旋转涡轮叶片热障涂层(Thermal barrier coatings, TBCs)的寿命预测仍然是一个重要挑战。基于自适应高斯过程开发了一种计算高效的多尺度不确定性量化模型。该模型在微观上考虑了热失配、界面氧化和蠕变的耦合效应, 同时在宏观上考虑了燃气热冲击和高速旋转的交互作用。该模型用于量化旋转涡轮叶片 TBCs 的损伤演化和服役寿命的不确定性。同时分析了影响 TBCs 失效的关键因素。预测结果表明, 经历 600 次循环后, 旋转叶片吸力侧顶部区域和压力侧中部区域 TBCs 的失效概率达到了 80%。这表明这些区域的 TBCs 将发生剥落, 其面积大约为 9%。实验结果的剥落位置和面积与预测结果相对一致。热生长氧化物的热膨胀系数和温度是 TBCs 寿命变化的最重要因素。这项工作作为航空发动机涡轮叶片热障涂层寿命的准确预测提供了宝贵的见解。

C08-P03

基于放电等离子烧结法制备 SiC 晶须增韧 HfTaC2 复合材料: 同步强化机械性能和烧蚀性能

贺冉¹, 杨丽¹, 周益春¹

1. 西安电子科技大学

超高温 HfTaC2 固溶体陶瓷由于其超高熔点和高模量有望成为航天器系统的热防护涂层材料。然而, HfTaC2 陶瓷固有的脆性显著限制了其在航空航天领域的应用。为了解决这个问题, 通过一步放电等离子烧结技术制备了碳化硅晶须增韧的 HfTaC2 复合材料方法, 并分别研究了 SiCw-HfTaC2 复合材料的力学性能和抗烧蚀性能。结果表明, SiCw-HfTaC2 复合材料的致密化、硬度和断裂韧性也随着晶须含量的增加而先增加后降低。引入 30 vol% SiCw 使其断裂韧性从 2.67MPa m^{1/2} 至 5.33 MPa m^{1/2}, 这是由于相对致密化程度的提高、晶粒尺寸的减小以及晶须对裂纹扩展的阻碍作用。在 2.38MW/m² 的热流密度下, SiCw-HfTaC2 复合材料的抗烧蚀性能优于 HfTaC2 陶瓷。由于 SiCw 氧化产生的 SiO₂ 玻璃可以填充 Hf-Ta-O 烧蚀层中的微孔, 从而在 SiCw-HfTaC2 表面诱导形成致密的 Hf-Ta-Si-O 氧扩散阻挡层烧蚀过程中的 HfTaC2 复合材料。

C08-P04

考虑应变梯度效应的热障涂层界面氧化大变形力热耦合模型

马雪飞¹, 周芊骞¹, 杨丽¹, 周益春¹

1. 西安电子科技大学

先进燃气涡轮发动机热障涂层(TBCs)在运行过程中会不可避免的发生氧化现象。由于热生长氧化物(TGO)的厚度接近晶粒尺寸, 其生长过程呈现显著的尺度效应。针对现有耦合理论在描述氧化行为在尺度依赖性方面的不足, 本研究建立了考虑应变梯度效应的大变形力-热-化耦合理论框架。通过将格林应变作为额外独立场变量处理, 应用混合有限元法实现了数值求解。结果表明: 应变梯度效应显著提升了 TGO 生长区域内的压应力水平, 并随着尺度参数增大促使应力分布更加均匀, 有效地发挥了应力对扩散的抑制作用, 进而显著减缓了 TGO 的生长速率和非均匀生长行为。在 TGO 非均匀生长受抑制的情况下, 涂层表面对褶皱的敏感性随尺度参数增大而降低。同时, 应变梯度效应使陶瓷层和粘结层均承受拉应力, 且在较高尺度参数下缓解了局部应力集中。本研究为阐释热障涂层氧化动力学提供了理论支撑。

C08-P05

通过掺杂 WC 提高 Hf-Ta-C 固溶体陶瓷的致密性和机械性能

于宛弘¹, 李桂芳¹, 朱肖飞¹

1. 西安电子科技大学

HfC 与 TaC 固溶形成的 Hf-Ta-C 以其极高的熔点和显著提升的机械性能被认为可应用于高超声速飞行器表面潜在的涂层材料。为进一步研究其成分、结构并获得在超高温环境下性能更佳的 Hf-Ta-C 固溶体陶瓷, 通过引入 WC 作为第二相以提高其致密性和机械性能。结果表明, 随着碳化钨掺杂量从 0% 增加到 20%, Hf-Ta-C 陶瓷的致密性从 92.4% 提高到 99.1%。其中, 掺杂了 15% WC 的 Hf-Ta-C 的纳米硬度值最高, 达到 36.41 GPa, 而掺杂了 20% WC 的 Hf-Ta-C 拥有最高的维氏硬度 (38.75 GPa) 和断裂韧性 ($3.76 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)。这归因于 WC 的掺杂有效地去除了陶瓷中的氧杂质, 提升致密度的同时对陶瓷的机械性能产生积极作用; 由于固溶强化机制和 W 在晶界处的析出提高了晶界强度, 固溶体陶瓷的机械性能得到了提升。

C08-P06

钨钽碳超高温陶瓷高温力学性能表征

景旭珍¹, 李桂芳¹, 朱肖飞¹

1. 西安电子科技大学

HfTaC₂ (HfC-TaC 固溶体) 陶瓷因其具有超高熔点和高温结构稳定性, 在高超声速飞行器、核聚变装置等超高温部件领域具有重要应用价值。然而, 其高温力学性能的快速衰减 (如强度骤降、脆性断裂) 仍是制约工程化的核心瓶颈。本研究采用放电等离子烧结 (SPS) 技术制备单相 HfTaC₂ 固溶体, 结合高温真空三点弯曲试验、断裂韧性实验、SEM 表征, 系统揭示 HfTaC₂ 陶瓷在高温真空环境 (室温~1900℃) 下的力学性能、微观结构的演化规律及断裂机理。研究表明, 随着温度的升高, HfTaC₂ 陶瓷的力学性能逐渐降低, 在 1900℃时表现出韧性和强度的反向提高。本研究旨在突破超高温陶瓷真空环境中强度-韧性失衡难题, 为开发下一代耐极端热力耦合环境材料提供了实验支撑。

C08-P07

A novel ultrafine FCC Ti-based alloy studied by microstructure and nanoindentation methods

Wen Su¹

1. Xi'an Jiaotong-Liverpool University

The aerospace coating application is prominent. The related research focuses on extreme service environments withstanding lightweight nature, thermal stability, and mechanical wear resistance. In this research, a novel class of Ti-based superalloy (Ti-Fe-W) is presented. The metastable phase stabilization, nanosized grain refinement, and the compositional design lead to exceptionally high hardness of $21.18 \pm 2.15 \text{ GPa}$ and ideal thermal stability that retains more than 99% of the mechanical integrity after long-term exposure under high temperatures. The synergistic interplay between interfaces and incoherent precipitates facilitates working hardening mechanisms. The cooperation of the outstanding properties and the low dissolvability of the Ti-Fe-W gives the potential for the use in aerospace coating. This research establishes a fundamental and innovative work for the aerospace coatings, offering a viable pathway to extend service lifetimes, improve fuel efficiency, and reduce maintenance costs in extreme environments. This research set an example for the design strategy of the refractory superalloys for the work hardening contribution.

C08-P08

高熵碳化物陶瓷纳米线生长机理及功能应用

刘慧敏¹, 李贺军¹, 殷学民¹

1. 西北工业大学

近年来, 高熵陶瓷作为一种新型陶瓷材料体系, 因其独特的高熵效应而受到广泛关注。一维高熵陶瓷材料则因其独特的几何结构和物理化学性能成为当下研究热点。本研究通过聚合物热解法成功地在柔性棉

织物基底上合成了高熵金属碳化物($\text{Hf}_{0.2}\text{Zr}_{0.2}\text{Ta}_{0.2}\text{Nb}_{0.2}\text{Ti}_{0.2}\text{C}$) (HEC) 纳米线。HEC 纳米线在碳化后的棉纤维表面呈随机分布, 无固定取向, 直径介于 $0.05\sim 0.1\ \mu\text{m}$ 之间。棉织物作为 HEC 纳米线的原位生长基底, 在浸渍过程中均匀吸附前驱体溶液, 并为纳米线生长提供碳源。纳米线的生长由经典的气-液-固过程控制。高熵前驱体中的金属经氧化、氟化形成气态氟氧化物 (TMO_xF_y), 棉织物及前驱体热解产生碳基气体。在高温下, 催化剂热解形成 Fe-Ni 合金液滴。气态 TMO_xF_y 被碳基气体还原为金属单质, 与碳共同溶入合金液滴, 过饱和后析出形成 HEC 纳米线。同时, HEC 纳米线中的电导损耗、晶格畸变产生的偶极子极化损耗以及材料中丰富异质界面产生的极化损耗也赋予材料优异的电磁屏蔽性能, 其在 X 波段内的电磁屏蔽效能达 57.55 dB。本研究不仅在高熵纳米材料的制备和形成机制方面取得了重要进展, 还为其功能化应用提供了新的方向, 为未来高性能材料的设计和开发提供指导。

C08-P09

力化耦合的钨钽碳陶瓷固溶机理研究

刘齐羽¹

1. 西安电子科技大学

本研究围绕钨钽碳陶瓷的力化耦合固溶机制展开, 通过第一性原理计算与实验相结合, 系统揭示了压力调控固溶行为的内在规律。理论计算表明, 金属原子的扩散能垒在一定范围内随压力增加呈现线性降低趋势, 最高降幅达 36%, 压力诱导金属原子电荷再分配及削弱金属键键强是扩散能垒降低的主因。实验上, 采用放电等离子烧结制备不同压力下的钨钽碳陶瓷块体, 微观上证实了压力的增大有利于钨钽碳晶粒中扩散程度的提升, 与理论预测的固溶行为一致。

C08-P10

基于分步等离子喷涂的 HfTaC 单相涂层的可控制备与性能调控

谷仓¹, 李桂芳¹, 朱肖飞¹, 杨丽¹, 周益春¹

1. 西安电子科技大学

HfTaC 固溶体陶瓷涂层由于超高熔点、宽温域抗烧蚀和高硬度等特性, 在众多超高温陶瓷材料中脱颖而出, 有望成为下一代高超声速飞行器表面的热防护材料。但由于陶瓷本征脆性和高熔点特征的限制, HfTaC 固溶涂层往往存在成分不均、固溶不充分、缺陷较多等问题, 这严重限制了其以涂层形式走向应用并进行长寿命服役的潜在可能。因此, 本研究采用感应等离子球化(IPS)预处理与真空等离子喷涂(VPS)工艺联用策略, 针对 TaC-HfC 团聚粉体等离子球化烧结、HfTaC 固溶涂层的制备及其力-热性能开展研究, 揭示了 HfTaC 粉体的球化机理与固溶涂层的沉积机理, 建立涂层微观组织结构与力-热协同性能的定量关系。

涂层的显微组织与性能密切依赖于前驱体粉末的晶粒细度、颗粒流动性及致密化水平等关键物性参量。为实现高性能陶瓷涂层的可控制备, 本研究采用喷雾造粒结合感应等离子球化的粉体处理工艺, 通过调控粉体表面熔凝动力学行为成功制备出不同固溶度的 HfTaC 球形粉末。实验结果表明: 经 IPS 工艺处理后, 粉体内部 HfC 与 TaC 组元间发生原子尺度扩散并形成亚稳态固溶相, 同时颗粒表面光滑度与几何球形度显著改善(流动时间 24.7 s/50 g, 松装密度 4.57 g/cm³), 有效满足了热喷涂工艺对送粉稳定性的要求。在此基础上, 系统探究等离子炬功率与转盘转速对颗粒熔融状态的影响规律, 发现当功率提升至 80 kW 且转速设定为 3 RPM 时, 可在保障固溶反应程度的同时最大化粉体致密度与流动性能, 为构建单相致密化 HfTaC 涂层奠定了良好的微观结构基础。

借助数值模拟方法研究了不同熔融态颗粒在碰撞铺展时对固溶涂层微结构的影响, 揭示了真空等离子喷涂涂层的沉积机制。基于喷雾造粒结合感应等离子球化的粉体, 在数值模拟的基础上, 通过改变真空等离子喷涂工艺参数制备 HfTaC 固溶涂层。系统阐明等离子喷涂工艺参数对 TaHfC 涂层相组成演化及微观结构形成机制的调控规律, 当功率为 50 kW 且送粉速率为 20 g/min 时, 微观上, 涂层中 Hf、Ta 元素扩散行为显著增强, 晶界相分布纯度同步优化。宏观上, HfTaC 固溶单相固溶涂层层间结合紧密, 无明显缺陷, 孔隙率仅有 13.00%, 其硬度和断裂韧性分别为 28.56 GPa 和 3.22 MPa·m^{1/2}。该工艺条件通过平衡热能输

入与材料沉积效率,为获得相稳定性与显微结构均匀性协同提升的 TaHfC 基高温防护涂层提供了基础实验依据。

C08-P11

二氧化硅气凝胶中湿度驱动的热传递调制:通过多尺度表征对微观结构转变的机理见解

简洋¹, 姜勇刚¹, 姜震东¹, 黄睿名¹, 冯军宗¹, 李良军¹, 胡艺洁¹, 冯坚¹

1. 国防科技大学空天科学学院

作为一种典型的纳米多孔超级绝热材料, SiO₂ 气凝胶卓越的隔热性能与湿度敏感的纳米结构重构共存, 这是开发其高湿度环境中应用需要系统研究的问题。本文系统研究了水湿环境下氧化硅气凝胶的性能衰减机制, 通过实验分析了具有代表性的 SiO₂ 气凝胶在高湿环境及泡水-烘干循环下的性能变化。研究表明, 当气凝胶暴露于高水湿环境时, 其比表面积基本保持不变, 但孔体积显著增大, 室温热导率随时间缓慢升高, 10 小时后由 0.0410 W/(m·K) 增至 0.05389 W/(m·K), 此过程中羟基随暴露在水湿环境中的时间延长而增加。表面形成的硅醇键增加了热桥效应, 从而导致热导率的升高。进一步的泡水-烘干处理导致气凝胶纳米颗粒团聚, 孔结构坍塌, 比表面积下降, 孔体积减小至原体积的 50%, 室温热导率显著升高至 0.1035 W/(m·K)。同时对两种条件下的非平衡分子动力学的界面热传递进行模拟, 揭示骨架热导率的演变受界面接触面积与连接点密度协同调控。本研究结果为理解 SiO₂ 气凝胶在水湿环境下的隔热性能调节提供了理论基础, 并为气凝胶材料的耐水改性和应用提供了科学依据。

C08-P12

HfTaC 超高温陶瓷改性 C/C 复合材料微观结构及抗烧蚀性能

李雨彤¹, 苏秉尧¹, 朱肖飞¹, 杨丽¹, 周益春¹

1. 西安电子科技大学

HfTaC 超高温陶瓷改性 C/C 复合材料由于超高熔点、宽温域抗烧蚀和高硬度等特性, 有望成为下一代高超声速飞行器表面的热防护材料。反应熔渗工艺(RMI)制备 HfTaC 改性 C/C 复合材料由于具有制备周期短、成本低、样品致密度高等优点而受到广泛关注。但是传统反应熔渗中存在基体熔渗损伤、熔渗深度不足、致密化困难等问题, 影响复合材料性能, 限制了其极端环境服役的可能。因此, 本研究通过引进金属硅化物、参数调控改进反应熔渗工艺制备了 C/C-HfTaC-SiC 复合材料, 并对其微观形貌分析和抗烧蚀性能考核。研究发现 HfTaC 成功固溶、材料与基底紧密结合, 块体熔渗均匀。高温下, 熔渗过程反应完全, 材料外表面成分以 HfTaC 为主, 截面基体相中存在 HfTaC 固溶体、SiC 等。采用氧乙炔试验对所制备复合材料进行了超高温的烧蚀考核, 结束后试样结构保持完整, 表现出优异的抗烧蚀性能。

C08-P13

用于热障涂层的新型高断裂韧性单相 Zr-Hf-Ta-O 陶瓷

苏秉尧¹, 陈龙¹, 杨丽¹, 程春玉¹, 周益春¹

1. 西安电子科技大学

Hf₆Ta₂O₁₇ 因其优异的超高温热稳定性和低热导率, 在航空发动机热障涂层(TBCs)领域引起了极大关注。然而, 其断裂韧性低于 7-8 wt%氧化钇稳定氧化锆(YSZ), 限制了其应用。本研究采用固相反应法将 ZrO₂ 掺杂到 Hf₆Ta₂O₁₇ 中, 形成 Zr-Hf-Ta-O 陶瓷, 旨在提高其断裂韧性。通过实验和第一性原理模拟, 研究了掺杂 Zr 对 Hf₆Ta₂O₁₇ 结构以及 Zr-Hf-Ta-O 陶瓷力学性能的影响。结果表明, 在高温下, Zr 原子扩散进入 Hf₆Ta₂O₁₇ 结构并取代 Hf 原子, 使得所制备的 Zr-Hf-Ta-O 陶瓷呈现单一正交相结构。被取代的 Hf 原子可能占据间隙位置。随着 ZrO₂ 含量的增加, 实现了晶格参数的梯度升高, 且掺杂后的 Hf₆Ta₂O₁₇ 结构沿 a 轴方向生长。此外, ZrO₂ 的引入显著提高了 Hf₆Ta₂O₁₇ 陶瓷的硬度和断裂韧性。当 HfO₂、Ta₂O₅ 和 ZrO₂ 的摩尔比为 6:1:3 时, Zr-Hf-Ta-O 陶瓷的断裂韧性提升最为显著(达到 2.41±0.05 MPa·m^{1/2})。

引入的 Zr 原子增强了其在 Zr-Hf-Ta-O 结构中相邻的 Ta-O 键和 Hf-O 键的共价性，从而提升了材料的力学性能。通过理解掺杂 Zr 对 $\text{Hf}_6\text{Ta}_2\text{O}_{17}$ 结构和性能的作用机制，未来可设计引入其他元素至该陶瓷结构中，以进一步调控其力学性能。

C08-P14

Hf 基超高温陶瓷改性 C/C 复合材料抗烧蚀性能研究

范倩倩¹, 张雨雷^{1,2}, 付艳芹²

1. 西北工业大学

2. 河南省科学院碳基复合材料研究院

本研究采用低熔点硅化物 (HfSi_2 、 TiSi_2 和 TaSi_2) 作为 C/C 复合材料的改性体系，通过反应熔渗法制备了 C/C-(Hf, Ti, Ta)-SiC 复合材料。当 HfSi_2 : TiSi_2 : TaSi_2 =8:2:1 时，改性 C/C 复合材料的密度达到 4.15 g/cm^3 ，开孔隙率仅为 5.81 %。经热流密度为 2.4 MW/m^2 的氧乙炔火焰烧蚀 120 s 后，试样表面温度高达 2400°C ，但表现出优异的抗烧蚀性能，质量烧蚀率低至 -0.18 mg/s 。通过系统研究不同烧蚀时间下复合材料的微观结构演变，揭示其抗烧蚀机理及 Hf、Ti、Ta 元素的协同作用机制。烧蚀初期，材料表面生成 HfO_2 、 TiO_2 以及 Ta_2O_5 等氧化物，三者发生反应生成多相氧化物 $(\text{Hf, Ti, Ta})\text{O}_2$ 与 HfTiO_4 ，这些氧化产物的协同作用显著提高了氧化膜的致密性。随着烧蚀时间的延长， HfTiO_4 挥发，而 Ta_2O_5 与 HfO_2 反应生成 $\text{Hf}_6\text{Ta}_2\text{O}_{17}$ ，继续作为液态愈合相维持氧化层的保护作用。本研究结果为反应熔渗法制备具有优异抗烧蚀性能的 C/C 复合材料提供了理论依据和优化策略。

C08-P15

Influence of nitriding time on the microstructural evolution, mechanical properties, and tribological performance of Ti-N nitrided layers via microwave plasma nitriding

Junhui Zhang¹, Zhigang Xu¹, Chuanbin Wang¹

1. Wuhan University of Technology

Microwave plasma nitriding is an effective technique for enhancing the surface properties of titanium, particularly its hardness and wear resistance. This study systematically investigates the influence of nitriding time (1 – 5 h) on the phase transformation, microstructure, mechanical properties, and tribological behavior of the nitrided layers. The results reveal a phase transition from α -Ti to a dual-phase composition of TiN and Ti₂N with increasing nitriding time, accompanied by a shift in the preferred orientation of TiN from the (111) plane to the (200) plane. Surface morphology transitioned from smooth and dense at short durations to rough and porous with extended treatment. Furthermore, the nitrogen concentration gradient across the nitrided layer became progressively more uniform as nitriding time increased. Mechanical testing showed significant improvements in hardness and elastic modulus, peaking at 30.52 and 333.53 GPa, respectively, after 5 h of nitriding. Tribological analysis indicated that a nitriding duration of 3 h achieved the optimal balance of low friction and wear resistance, attributed to the formation of a compact and well-adhered nitrided layer with favorable surface characteristics.

C08-P16

A machine learning approach to predict coefficient of friction of laser cladding high-entropy alloy coatings

Yawen Pan¹, Jian Peng¹, Chuanbin Wang¹

1. Wuhan University of Technology

Traditional method for evaluating the coefficient of friction (COF) of laser cladding high-entropy alloy (HEA) coatings, relying on extensive experiments, is costly and inefficient. To address these limitations, this study proposed an efficient machine learning (ML) approach. Random Forest, Gradient Boosting Decision Tree, and

XGBoost models were developed as base models to predict the COF of HEA coatings. Feature engineering and a voting strategy were employed to enhance model accuracy and generalization ability, yielding substantial improvements in performance. The optimal model achieved a testing R2 of 0.97. A satisfactory agreement was achieved between the predicted COFs and the experimental measurements as well as their trend. Additionally, the impact of each feature on the COF was clarified using SHAP (Shapley Additive Explanations). The results indicate that this ML approach is a promising tool for predicting the COF of HEA coatings and can serve as a valuable aid in the design and optimization of coatings.

C08-P17

CVI 与 PIP 不同工艺下 SiCf/SiC 原位微结构力学性能及热损伤机理研究

张璐¹, 林红娇¹, 温志勋¹, 蔡翔宇¹

1. 西北工业大学

本研究系统对比了 CVI 与 CVI+PIP 工艺制备的 SiCf/SiC 复合材料的微观结构演化、力学性能及热损伤机制。结果显示, PIP 工艺在致密化过程中引入的内部氧气会加剧纤维损伤, 其氧化前损伤率达 13.8%, 氧化后升至 21.9%。TEM 表征结果表明, CVI 工艺材料主要受外部氧气影响, 表现为纵向渗透氧化; 而 PIP 工艺引入的氧源导致氧化沿横向扩散, 两者协同作用下材料形成了均匀氧化结构。微柱压缩实验表明, PIP 工艺样品中纤维与基体的断裂载荷明显下降, 揭示其内部存在更多微裂纹与结构缺陷。热重-差示扫描量热分析 (TG-DSC) 进一步揭示, PIP 工艺降低了氧化起始温度, 并加快了氧化反应速率。XRD 与 EDS 分析证实, PIP 工艺制备的 SiC 基体中氧元素含量更高, 且氧化产物中石英相分布存在差异, 反映出氧化路径的变化。该研究阐明了 PIP 引入的内部氧气与外部氧气共同作用下的复合氧化机制, 为优化 SiCf/SiC 复合材料的制备工艺与提升其高温抗氧化性能提供了理论支撑。

C08-P18

Cf/SiC 复合材料表面 SiC 涂层的异常高温氧化行为: 1200 °C 至 1400 °C 的衰退机制和微观结构演变

蔡翔宇¹, 林红娇¹, 温志勋¹, 张璐¹

1. 西北工业大学

对含有 SiC 涂层的 Cf/SiC 复合材料 (Cf/SiC-SiC) 表面进行预氧化处理有助于形成保护性氧化层, 从而显著提高复合材料的长时抗氧化性能。本研究使用基于反应力场 (Reax-ff) 的分子动力学 (Molecular Dynamics, MD) 开展了 SiC 涂层在 1200 °C-1400 °C 形成氧化保护膜的模式。基于过程模拟获得的氧化层增长速率, 原子均方位移 (Mean Square Displacement, MSD) 和应力数据。从气体扩散和原子应力变化两个角度分析了不同预氧化温度对氧化层防护性能的影响。同时创新地使用板壳力学理论与原子应力模拟相结合, 解释了高温下因产物气体在氧化层中扩散导致的氧化层损伤行为。模拟结果表明, 复合材料的失重率自 1200 °C 至 1300 °C 降低后开始明显增加, 在 1300 °C 达到最小值, 此时涂层氧防护性能最佳。并采用了长时氧化实验验证, 揭示了材料的微观结构演变和成分变化机制。

C08-P19

HfTaC2 力热化烧蚀本构模型与数值模拟

张逸凡¹, 徐光楠¹, 周益春¹, 杨丽¹

1. 西安电子科技大学

HfTaC2 固溶体因其高熔点、优异的力学性能及卓越的高温稳定性, 已成为新一代高超声速飞行器热防护系统的理想候选材料。飞行器的服役寿命与可重复使用性取决于该材料在极端环境下的烧蚀行为特性。HfTaC2 的烧蚀过程涉及化学反应和相变等物理化学因素引起的质量损失和液态层流动等力学因素引起的质量损失。针对 HfTaC2 烧蚀过程中的质量损失机制和吸热机制, 本研究基于力热化耦合框架构建固体响

应本构模型, 利用湍流模拟氧乙炔火焰提供边界条件, 结合 Adams 提出的液态层流动模型描述液态 Ta_2O_5 质量流失和化学反应动力学方程描述烧蚀过程中的物理化学变化, 构建了包含热化学烧蚀、热机械剥蚀等多物理场耦合烧蚀模型。数值模拟结果表明: 所建立的烧蚀模型能准确再现实验观测的烧蚀形貌特征和温度场演化规律, 并分析了不同烧蚀机制在总烧蚀过程中的相对贡献度及烧蚀过程中的应力分布。

C08-P20

$\text{Zr}_6\text{Ta}_2\text{O}_{17}/\text{YSZ}$ 双层涂层 CMAS 腐蚀机制研究

罗俊辉¹, 曹可¹, 杨丽¹, 周益春¹

1. 西安电子科技大学

高熵氧化物陶瓷报道出具有极佳的高温稳定性和抗 CMAS 腐蚀能力。通过大气等离子喷涂, 成功制备了高熵 $\text{Zr}_6\text{Ta}_2\text{O}_{17}/\text{YSZ}$ 双层涂层。分别研究了该涂层在 1250℃ 下分别经 0.5、1、2、5 和 8 小时的 CMAS 腐蚀过后, 涂层的剥落失效、化学反应与微结构演化规律, 揭示了该双层涂层较好的抗 CMAS 腐蚀能力。CMAS 腐蚀导致钽元素的析出, 涂层不断退化为以氧化锆为主的球状颗粒弥散于熔融非晶态的 CMAS 中, 并通过孪生和相变形式协调热膨胀应力。CMAS 快速渗透导致粘结层快速氧化增厚, 伴随陶瓷层逐渐地分层剥落, 最终导致涂层整体失效。

C08-P21

从超分子醇盐到 3D 打印超高温陶瓷

体旭彤¹, 史小红¹

1. 西北工业大学

The 3D printing of refractory materials with melting points exceeding 3500 °C has always been challenging. A supramolecular alkoxide with a complex cross-linked structure was designed to inhibit atomic volatilization loss during heat treatments. Subsequently, 3D printed ultra-high temperature ceramics were successfully active sintered at temperatures far below their melting point. This research used zirconium alkoxide supramolecules and 3D-printed ZrC ceramics via direct ink writing as examples to demonstrate the feasibility of extending the melting point limits of 3D-printed materials. Bond changes similar to those in metal materials occur during the sintering and densification of 3D-printed ZrC ceramics, involving phenomena such as slip and recrystallization. The densification by zirconium alkoxide supramolecules after sintering further enhances the hardness of the ZrC ceramics. The approach of designing ceramic precursors as sintering binders in this research is beneficial for expanding the sintering technology of refractory ceramics and the range of 3D-printed high-melting-point materials for the aviation and nuclear industries.

C08-P22

Phase Stability of Hierarchical Microstructures in High-Temperature Structural Materials

Florian Vogel¹

1. Hainan University

Understanding phase separation phenomena enables tailoring microstructures of high-temperature structural materials to develop better materials with improved properties. High resolution characterization techniques are used to understand the link between structure-property relationships and the 3D nanochemistry of hierarchical microstructures in high temperature structural materials. Hierarchical microstructures form when additional g' particles form within g' precipitates and pose a novel concept to strengthen high-temperature structural materials. However, these g' particles are metastable and two possible metastability pathways have been indentified: (1) continuous growth and split of g' and (2) Growth and dissolution, both resulting in a loss of the strengthening

effect.

This talk presents how high-resolution characterization techniques such as TEM, APT and synchrotron XRD are used to gain insight into microstructural behavior and phase stability. The combined results inform alloy design strategies to tailor fundamental properties of γ particles to enhance their temporal stability and thereby retain the strengthening effect. APT offers unique insights into the 3D nanochemistry of phases in hierarchical microstructures with γ' precipitates only ~ 100 nm in size and nanoscale γ particles (~ 8 nm). The results suggest that by phase targeted alloying, supersaturation and evolution of phase separation can be controlled to tune the properties of such materials. To create new materials strengthened by hierarchical microstructures, the phase stability of γ particles needs to be enhanced.

C08-P23

Optimizing the gradient pore distribution of YSZ coatings to achieve excellent thermal shock resistance

Yang Xiang¹, Li Zhang¹

1. University of Electronic Science and Technology of China

Yttria-stabilized zirconia coatings, as thermal barrier coatings, require high bonding strength, low thermal conductivity and emissivity, and long thermal shock lifetime to provide superior long-term high-temperature protection for alloy substrates. Matched gradient pore YSZ coatings, featuring a low-porosity inner layer and high porosity outer layer, were designed by adjusting spray power during atmospheric plasma spraying and optimizing interlayer porosity gradients. The results showed that YSZ coatings with matched porosity gradients exhibited excellent bonding strength, moderate thermal conductivity, and infrared emissivity, alongside outstanding thermal shock resistance. The thermal shock lifetime exceeded 900 cycles at 1000°C , representing a 9-times improvement compared to conventional coatings. This enhancement in thermal shock resistance was attributed to the optimized porosity gradient design. The matched gradient effectively suppressed crack propagation during the early stages of thermal cycling, promoted the formation of a dense Al_2O_3 layer at the interface, and further inhibited the diffusion of Al into the coating.

C08-P24

送粉激光熔覆 SiC-Si 涂层在 C/C 基体上的抗激光烧蚀行为与防护机制

吴全亮¹

1. 西北工业大学

为了降低涂层制备对碳/碳复合材料力学性能的影响, 进一步提高涂层的抗激光烧蚀性能, 采用激光熔覆法在碳/碳复合材料表面制备了 SiC-Si 涂层(LC-SiC-Si)。为了进行比较, 通过包埋固渗法制备了 SiC-Si 涂层(PC-SiC-Si)。结果表明, LC-SiC-Si 涂层具有相对较低的粗糙度、较好的机械性能和抗激光烧蚀性能。LC-SiC-Si 涂层样品保持了 C/C 复合材料的 98.3% 的抗弯强度, 而 PC-SiC-Si 涂层样品中的 C/C 基底被严重硅化。在 31.20MW/m^2 下烧蚀 50s, LC-SiC-Si 涂层样品的质量损失率(0.07%)仅为 PC-SiC-Si 涂层的 58.3%, LC-SiC-Si 涂层样品的表面温度为 2718 K, 比 PC-SiC-Si 涂层高 309 K, 这是由于高硅含量的 LC-SiC-Si 涂层成功形成了具有高发射率的致密 SiO_2 保护层, 该层有效抑制了氧化烧蚀(低质量损失)。

C08-P25

碳/碳复合材料表面高热发射率涂层制备工艺及微结构研究

李文杰¹

1. 西北工业大学

随着航天领域的迅猛发展, 服役材料的性能面临更为严苛的要求, 航天用电子器件的热流密度因向微

型化、集成化发展而增加，工作时积累的热量影响其正常工作，因此，航天用热管控材料必须具备良好的散热性能。

碳/碳复合材料因其密度低、耐高温和高热导率，被认为是理想的航天热管控材料。然而，真空的服役环境必然要求材料通过辐射传热，但是导热用碳/碳复合材料由于表面的热发射率低而散热效果较差。研究表明，其热辐射性能可以通过改变基体和增强体种类来提升，但这种改变势必会影响其导热性能，此外，通过提高表面粗糙度来提升发射率的方法效果有限，因此亟须在碳/碳复合材料表面涂覆高热发射率的散热涂层，以充分发挥其热管控能力。

近年来，纳米碳材料因其优异的热辐射性能被广泛应用于涂层领域。纳米碳材料与碳/碳复合材料具有相似的热物理性质，将其涂覆于碳/碳复合材料表面，不仅可以实现良好的界面匹配，还能有效提升材料的热发射率。本文选择两种纳米碳材料为主要填料，采用超声分散法、压缩空气喷涂法和化学气相沉积(CVD)工艺将复合涂层制备于碳/碳复合材料表面，综合分析了涂层的表面形貌及微观结构对表面热发射率和涂层结合力的影响机理。

C08-P26

环境障碍涂层用 $(Yb_{1-x}Sc_x)_2Si_2O_7$ 固溶体的性能研究

孙永翔¹

1. 西北工业大学

稀土硅酸盐作为碳/碳(C/C)复合材料的环境障碍涂层可以有效地抵御高温环境下水蒸气和氧气的侵蚀。我们设计了 $(Yb_{1-x}Sc_x)_2Si_2O_7$ 固溶体陶瓷材料，并对其热性能、物理性能以及抗水氧腐蚀性能进行了研究。通过无压烧结法合成了不同成分的粉末，采用热压烧结法制备了块状样品。固溶体仍然维持着单一 β 相，不会发生相转变。Sc元素的掺杂提高了材料的维氏硬度以及弹性模量；此外，固溶体的热导率相较于其组元二硅酸盐材料而言变得更低。在所有样品中 $(Yb_{3/4}Sc_{1/4})_2Si_2O_7$ 固溶体表现出了最优异的抗水氧腐蚀性能，是环境障碍涂层的理想材料。

C08-P27

动态循环热冲击对热解碳微观结构的影响

王昕¹，沈庆凉¹

1. 西北工业大学

为了研究动态循环激光热冲击对 MT C/C 复合材料、HT C/C 复合材料微观结构的影响，本研究表征了它们的结构特征及差异，对比分析了激光热冲击前后微观结构变化对其热导率的影响。在 0-400 次动态循环激光热冲击后，MT C/C 复合材料中出现了明显纤维拔出和基体分层，纤维拔出数量和长度随激光热冲击次数的增加而增加，存在较大的基体裂纹和激光点蚀凹槽；HT C/C 复合材料中纤维拔出现象不明显，热解碳基体在激光热冲击后被分成许多亚层碳片，基体形貌变粗糙且存在较多微裂纹。不同次数激光热冲击后，MT 热解碳的结构有序度、微晶尺寸和石墨化度增加趋势均小于 HT 热解碳。不同次数激光热冲击后，HT C/C 复合材料的热导率提高幅度（41%）大于 MT C/C 复合材料（29%）。

仅发表论文

C08-PO01

陶瓷基复合材料弹簧的技术进展及应用研究

史永科¹

1. 西北工业大学超高温结构复合材料重点实验室

随着高温技术的发展,对耐高温弹簧材料的需求日益增加。传统金属弹簧在高温环境下性能显著下降,无法满足应用要求。陶瓷基复合材料因其卓越的耐高温、抗氧化和抗辐照性能成为理想的替代选择。本文综述了陶瓷基复合材料弹簧的技术进展及应用研究,重点探讨了其在航空航天和核能领域的应用潜力。文章详细介绍了陶瓷基复合材料的制备工艺,包括化学气相渗透(CVI)、先驱体浸渍裂解(PIP)和反应熔体浸渗(RMI)等方法,并分析了这些工艺的优缺点。此外,本文还讨论了陶瓷基复合材料弹簧的设计与性能优化,以及在高温环境下的力学行为和失效机理。通过实验研究和数值模拟,揭示了材料参数和结构参数对弹簧性能的影响规律,为陶瓷基复合材料弹簧的工程应用提供了理论支持。

C08-PO02

原位自生氮化硼界面 SiC/SiC 复合材料的性能研究

夏苏瑞¹

1. 西北工业大学

SiCf/SiC 复合材料凭借其高比强度、高比模量、耐高温、抗氧化及低密度等特性,在航空航天领域的高温结构部件中展现出广阔应用前景。作为复合材料的关键结构单元,界面相通过载荷传递、纤维保护及裂纹偏转等机制显著影响材料性能。其中,氮化硼(BN)界面相因高温稳定性优于传统热解碳(PyC),成为当前研究热点。本研究通过原位自生法(iBN)和化学气相渗透法(CVI)分别制备自生 BN(iBN)与沉积 BN(cBN)界面相,并结合二者构建复合界面(icBN),系统对比了 2D SiCf/cBN/SiC、2D SiCf/iBN/SiC 及 2D SiCf/icBN/SiC 复合材料的单向拉伸性能及其失效机理。实验结果表明:当界面层厚度为 300~600 nm 时,三种材料均表现出优异的拉伸强度(>200 MPa),且拉伸应力-应变曲线均呈双线性特征,说明界面制备工艺对失效模式的影响较小。微观分析表明,三种界面相具有相似的脱粘与滑移机制,但其均匀性、厚度及界面结合状态的差异导致纤维拔出长度和滑移应力不同,进而影响材料强度。失效过程主要表现为基体周期性开裂、纤维桥联、界面脱粘及纤维拔出。研究表明,iBN 与 cBN 界面相在力学行为中表现出高度相似性,为优化界面设计提供了理论依据。

C08-PO03

SiC/SiC 陶瓷基复合材料制备工艺研究进展

贾晨晨¹

1. 陕西省西安市碑林区西北工业大学

SiCf 纤维增强 SiC 基陶瓷复合材料(SiCf/SiC)凭借其卓越的高温力学性能、抗氧化及耐腐蚀能力,成为航空航天与核能等领域的关键材料。它具有结构设计性强、比强度高和断裂韧性好等优势,是一种极具应用前景的高温结构材料。然而,界面调控难度大、制备成本高以及部分制备工艺周期长等问题,限制了其大规模应用。本文综述了近年来 SiCf/SiC 复合材料的研究进展,阐述了其组成结构与性能特点。在制备技术方面,重点介绍了四种主要方法:化学气相渗透法(CVI)、先驱体浸渍裂解法(PIP)、熔融浸渍法(RMI)和增材制造技术,并对各自的优缺点进行了分析。文章还深入探讨了通过界面设计和微观结构优化来提升材料性能的最新研究成果。最后,从实际应用角度对 SiCf/SiC 复合材料的制备、改性和应用前景进行了展望,以推动其在航空发动机热端部件等关键领域的应用发展。

C08-PO04

基于生成对抗网络的氧化铝气凝胶数据增强研究

张路佳¹

1. 国防科技大学空天科学学院

在材料科学领域,氧化铝气凝胶因其独特的物理和化学性质而备受关注。然而,实验数据获取困难和数据量不足常常限制了机器学习在该领域的应用。为了解决这一问题,本研究提出采用生成对抗网络(GAN)

对小样本数据集进行数据增强。基于前期工作收集了 166 组包含实验和文献数据的氧化铝气凝胶小样本数据集，利用 GAN 对该数据集进行处理，生成了 2000 组新的虚拟合成数据。生成的数据在统计特性上与原始数据集保持一致，且通过了主成分分析（PCA）等多种统计检验。随后，将新生成的数据与原始数据集合并，用于训练不同的机器学习模型，包括支持向量机（SVM）、随机森林（RF）和神经网络（NN）等。在模型训练过程中，重点关注了决定系数（ R^2 ），作为评估模型性能的关键指标。结果显示，未经过数据增强的数据集在模型上决定系数均未超过 55%，而采用数据增强方法的数据集在模型的交叉验证中达到了超过 85% 的决定系数，表明模型具有较高的预测准确性。本研究证实了 GAN 在小样本数据集增强中的有效性，并为氧化铝气凝胶的性能预测提供了新的策略。

此外，结合领域知识，我们初步筛选了熔点、化学键长、热膨胀系数、形成能、赫尔能、晶胞体积、原子密度、能带等物理化学特征量作为描述符。通过 Materials Project 数据库检索相关词条，构筑了包含 16 种描述符、96 组数据的数据集。初步进行描述符排序后发现，平均热膨胀差异系数与氧化铝的 α 相变温度关联程度最高。通过特征方差以及皮尔逊相关系数对高维参数进行筛选和降维，采用 SHAP 模型获得本征物性参数对气凝胶 α 相变温度的影响规律及定量影响权重，确定了影响气凝胶 α 相变温度的关键因素，为模型提供了全局和局部的可解释性。