

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

C01-粉末冶金
C01-Powder Metallurgy

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



C01. 粉末冶金分会

分会主席：刘文胜、曲选辉、钟景明、程继贵、徐涛、钟可祥、马运柱

C01-01

粉末冶金高强韧钛合金及其近终形制造技术

曲选辉

北京科技大学

C01-02

CVD 法构筑非原位 WC 界面向调控 CNTs/Cu 材料的组织与性能研究

易健宏

昆明理工大学

C01-03

高强韧“合金钨”研制

刘文胜

中南大学

C01-04

Semi-Coherent and Coherent Precipitate Strengthening in Additively Manufactured CoCrMoW Alloy for High Performance

Canjuan Xiao, Min Song and Song Ni *

State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China

The mechanical properties of metallic materials, including strength and ductility, are strongly influenced by the coherence of precipitate/matrix interfaces—ranging from coherent to semi-coherent or incoherent. Tailoring these interfaces allows for an optimal balance between these characteristics. In this work, 1 wt.% and 2 wt.% TiN nanoparticles were incorporated into a CoCrMoW alloy fabricated via laser powder bed fusion (LPBF) to enhance its performance. The addition of 1 wt.% TiN notably increased the yield strength, ultimate tensile strength, and fracture elongation from 876 MPa, 1190 MPa, and 15% to 1071 MPa, 1421 MPa, and 17%, respectively, compared to the unreinforced alloy. While the average grain size remained largely unaffected, the TiN nanoparticles suppressed fine grain formation at fusion boundaries and altered the overall grain size distribution. Crucially, the LPBF process facilitated the in-situ formation of semi-coherent Ti- and N-rich precipitates, along with coherent Ti-N-O-enriched phases. The semi-coherent precipitates, featuring distinct orientation relationships and periodic misfit dislocations, strengthened the alloy by impeding stacking faults and ε laths. Simultaneously, they maintained ductility by enabling self-relaxation through twinning at intersection zones, thereby mitigating interfacial crack initiation. Additionally, the chemical contrast between the coherent phase and the matrix hindered dislocation cutting, further boosting strength without sacrificing elongation. Wear behavior comparisons between undoped and doped samples showed distinct mechanisms: the undoped alloy experienced oxidation wear, accompanied by severe plastic deformation, fragmented debris, and loose oxides. In contrast, the doped samples exhibited smoother wear surfaces, with abrasive wear being the dominant mechanism.

C01-05

基于 UHS 结合液相烧结制备钨铜合金的研究

陈鹏起*、宋文轩、黄承决、程继贵

合肥工业大学

钨铜合金兼具钨和铜的特性，在具备高强度、高硬度的同时拥有良好的导电导热性，被广泛应用在电子封装、航空航天和国防军工等领域。由于钨和铜巨大的物理性质差异，传统的粉末冶金方法难以制备高致密度的钨铜合金。而超快高温烧结技术(UHS)作为一种新兴的烧结技术，能在数十秒内实现材料致密化，为钨铜合金的制备提供了新的方向。本文以 W-30Cu 合金为研究对象，探究 UHS 技术制备高性能钨铜合金的工艺和致密化机理，在烧结温度为 1050 °C-1200 °C，保温时间为 1、3、5 和 10 min 进行样品烧结。结果表明，烧结温度为 1150 °C，保温时间为 10 min 的样品具有最高的致密度和热导率，分别为 95.4 %和 234.2 W m⁻¹ K⁻¹。UHS 技术形成的温度梯度和 Marangoni 效应，样品不同区域的致密化程度不同，短时间内较好地促进了样品的致密化。

C01-06

放电等离子烧结法制备高性能金属结构材料

蔡泽云、陈嘉寅、刘烨、向涛、陈洁、谢国强*

哈尔滨工业大学（深圳）

放电等离子体烧结（SPS）制备金属结构材料的优势在于快速低温高效致密化，兼具节能、微观组织可控和性能优异的特点。本文采用放电等离子烧结法制备钛合金、高熵合金与铜基复合材料，并通过改变工艺参数来调控材料的微观组织，以实现合金的强韧化。通过结合轻质元素在钛合金、高熵合金晶格间隙固溶强化，利用 SPS 制备得到高强度合金，发现轻质固溶元素在强化合金的同时，会导致合金的脆化和脆断。本文结合 SPS 和机械合金化法，实现 TiZrNbTa 双相高熵合金的制备，并引入造孔剂设计多孔结构，实现合金杨氏模量的优化、完美匹配人骨杨氏模量。为获得高强高导复合材料，本文以通过机械合金化合成的纳米晶 TiZrNbTa 相在 Cu 基体中具有优异的增强效果。通过调节烧结温度实现两相之间的受控元素扩散，进一步优化了界面结合，从而产生了具有超高强度和优异导电性的 Cu-20 wt% TiZrNbTa 复合材料。放电等离子体烧结法提升了金属结构材料的性能研究，拓宽了其应用潜力。

C01-07

快速致密化过程中 AlN 陶瓷的晶格氧瞬态变化及导热性能研究

傅斌、秦明礼*

北京科技大学

氮化铝(AlN)陶瓷因其卓越的热导率、高绝缘性、耐腐蚀性及与半导体硅片相匹配的热膨胀系数，成为高功率电子器件散热的理想基板材料。然而，氧元素是影响导热性能的关键因素——粉体表层氧在烧结过程中易溶入 AlN 晶格，形成声子-散射缺陷，导致热导率下降。目前，对于氧溶入晶格的机制尚未深入研究，尤其在放电等离子烧结（SPS）、闪烧等快速致密化技术发展的背景下，氧的瞬态行为更需重点关注。本研究利用 SPS 工艺短暂可控制的特点，系统探究了 AlN 陶瓷致密化行为以及晶格氧在烧结过程中的动态变化，结合 XRD、激光闪射法、TEM 及自主研发的晶格氧测试方法，归纳了 AlN 陶瓷致密化行为与氧溶入晶格规律。通过对比两种粒径和氧含量的 AlN 粉体发现：AlN 陶瓷在致密化过程中以粉末颗粒重排及晶界扩散为主要机制，提高烧结温度将促进氧进入晶格，若粉体氧含量过高还会使晶格氧在高温下与表面氧化铝反应生成 γ -AlON 缺陷相，严重影响热导率。因此采用低氧粉末在较低的烧结温度下增加保温时间，可有效抑制过量晶格氧缺陷的形成，热导率从 55 W/m k 提高到 78 W/m k，同时保持陶瓷的细晶粒结构，抗弯强度可达 490 MPa、维氏硬度 13.68 GPa。

C01-08

超高强度硬质合金棒材制备工艺调控与综合高性能机理

尚慧俊、王海滨、陈佳怡、吕皓、刘雪梅、宋晓艳*

北京工业大学，材料循环低碳再生全国重点实验室，新型功能材料教育部重点实验室，
材料科学与工程学院，北京 100124

C01-09

石墨烯铝基复合材料：多尺度结构设计与性能调控前沿进展

吴玉程*、黄俊

合肥工业大学 材料科学与工程学院，合肥 230009

石墨烯铝基复合材料是轻量化结构-功能一体化材料的重点发展方向，在航空航天和新能源汽车等领域均具有重大战略意义。近十年来，伴随制备工艺的持续创新，该材料制备工艺从初期机械混合法，演进至原位生长法，并进一步发展到近年采用的超声辅助-放电等离子体烧结联用等先进技术。不仅显著提升了材料的致密度，而且结合界面纳米层设计，可有效抑制石墨烯添加过程中的团聚现象并优化界面结合强度。研究表明，构建石墨烯三维网络结构，能有效促进载荷传递，抑制裂纹偏转和动态再结晶，实现强韧化多级协同机制；同时，复合材料基体的导电与导热性能亦获得协同提升。然而，该领域仍面临三大核心挑战：规模化生产中如何保持石墨烯的结构完整性（ $ID/IG < 0.15$ ）、如何解决高温服役条件下的界面退化、以及如何构建多场耦合性能预测模型。鉴于此，本文认为未来需发展融合原子制造与跨尺度仿真融合的“精准界面工程”路径，该策略有望为下一代高性能复合材料的研发奠定理论基石。

C01-10

超间接增材制造技术与粉末冶金的融合与创新

熊翔

中南大学

C01-11

耐热钢中析出相结构演化及其对力学性能的影响

张鹏、庄园、梁元辰、章林*、曲选辉

北京科技大学新材料技术研究院

与具有 γ/γ' 结构的镍基高温合金类似，有序 B2-NiAl 相及 L21-Ni₂AlTi 相强化铁素体合金因其突出的高温力学性能、高导热性和低热膨胀性而被广泛应用于高温领域。合金的高温力学性能与沉淀相体积分数及沉淀/基体复杂界面结构密切相关，而高体积分数 B2/L21 相导致合金极差的室温塑性（ $< 1\%$ ），如何同时实现高温强度和室温塑性是该合金面临的主要难题。本研究基于热力学计算模拟探究了元素对合金基体相和沉淀相结构的影响。设计的合金成分在 550°C~700°C 区间内为双相组织，全铁素体化温度为 1200°C；沉淀相的实际回熔温度在 1100°C~1150°C，较低合金成分提高了近 100°C，体积分数高达 32.5%。通过调控基体的 γ/α 两相结构，改善了合金室温塑性。基于高温冷却过程中的 γ 相变晶界形核优先机制以及时效过程 Co 元素偏聚造成的 $\alpha \rightarrow \gamma$ 相变过程，通过 1200°C 固溶缓冷促使铁素体晶界处生成 10%~15% 的奥氏体骨架相，后续 550°C 时效过程中保持沉淀相特征不变的情况下诱导奥氏体回复，最终奥氏体峰值含量达到 16.1%，室温延伸率由全铁素体组织的 2.3% 提高到 7.3%，屈服强度因主要由沉淀相结构决定而保持不变。通过调控沉淀/基体界面结构的共格畸变引导产生弹性应变场，提高了共格沉淀强化效果，强化了合金的高温力学性能。通过 700°C 时效将共格界面的错配度从 0.41% 提高到 0.86%，错配度过高会产生半共格界面，释放弹性应变场导致强化失效，最终在界面错配度为 0.55% 时得到最佳弹性应变场，700°C 下的屈服强度为 453MPa，抗拉强度 482MPa，延伸率 45.5%，屈服强度约为 FBB8 合金（120MPa）的四倍，比 FBB8-2Ti 合金（280MPa）高出 61.8%，且兼具 9.1% 的室温延伸率。

C01-12

电镀镍中间层钨合金/钢高强度扩散连接接头的界面组织演变与失效行为研究

韩一帆、蔡青山*

中南大学

本研究通过设计电镀工艺, 调控 Ni 中间层厚度, 结合真空热压扩散技术, 系统研究钨合金/Ni/30CrMnSiNi2A 钢接头的界面组织演化与失效机制。结果表明, 碳元素促使钨合金/Ni 界面形成薄层 $\text{Ni}_2\text{W}_4\text{C}$ 及间隔分布的 WC 小块, 且随着 Ni 层增厚, WC 块体逐渐减少。接头强度随 Ni 层厚度先升后降, 在 80 μm 处时接头抗拉强度达到 697 MPa。研究揭示了中间层厚度对接头组织与性能的调控作用, 验证了电镀 Ni 中间层实现高强度钨合金/钢接头的可行性, 为后续工艺设计与材料集成提供理论依据与技术支持。

C01-13

粉末冶金法制备 Al_3Fe 纳米颗粒增强铝基复合材料的显微组织与性能

潘薛帆、徐尊严、李才巨*

昆明理工大学

在铝基复合材料中, 变形过程中增强相与基体之间位错堆积引起的应力集中是材料失效和断裂的主要原因。在本研究中, 我们利用均匀分散的高含量纳米颗粒诱导的高界面剪切应力, 在变形过程中激活纳米尺度堆垛故障 (SFs)。SFs 的生成在塑性变形初期有效缓解了增强相与基体之间的应力集中, 同时通过后续变形过程中的相互作用进一步提升了铝基复合材料的应变硬化能力。拉伸试验结果表明, 该复合材料在保持与纯铝样品相近的均匀伸长率的同时, 实现了高达 380MPa 的拉伸强度。本研究首次提出了利用 SFs 调节铝基复合材料变形的新策略, 为高性能铝基复合材料的开发提供了理论指导。

C01-14

3D 打印低成本高性能钛合金研究

丁旺旺^{*1,2}、陈刚²、秦明礼²、曲选辉²

1. 电子科技大学(深圳)高等研究院

2. 北京科技大学

钛及钛合金具有比强度高、抗腐蚀性能优异等特点, 在航空航天、海洋船舶等领域具有巨大的应用前景。目前, 钛及钛合金作为结构材料应用的主要瓶颈在于其强度与塑性的权衡问题。为了提升其强度和塑性, 本研究提出了氧诱导增强增韧钛合金的新方法, 通过相变与界面工程, 实现在不牺牲塑性的条件下有效增强钛合金的强度。结合 XRD、SEM、TEM 等表征手段, 通过对组织系统分析, 揭示其强韧化机理, 为低成本高性能钛合金开发提供新思路。

C01-15

高性能铁基粉末冶金减摩材料的研制

舒云祥^{1,2}、李佳欣^{1,2}、陈鹏起^{1,2}、程继贵^{*1,2}

1. 合肥工业大学材料科学与工程学院, 中国合肥, 230009

2. 安徽省粉末冶金工程技术研究中心, 中国合肥, 230009

为了改善 Fe-15Cu-0.8C 铁基减摩材料 (FAMs) 的性能, 分别通过直接加入 MoS_2 粉末和引入表面包覆 Mo 的 MoS_2 (Mo@MoS_2) 粉末的方式制备成形混合料, 经压制成形和烧结制得烧结体试样。对添加不同形式 MoS_2 的烧结体试样的微观组织和力学性能进行测试分析, 研究材料的高温 (600 $^{\circ}\text{C}$) 性能。结果表明, 与直接添加 MoS_2 粉末相比, 采用 Mo@MoS_2 粉末可抑制烧结过程中 MoS_2 的分解, 提高 MoS_2 与基体的结合强度, 提升 Fe-15Cu-0.8C 烧结体样品的硬度。 Mo@MoS_2 的引入显著降低了 FAMs 在高温下的平均摩擦系数和磨损率, 在 600 $^{\circ}\text{C}$ 下, 直接添加 MoS_2 粉末和添加 Mo@MoS_2 粉末试样的摩擦系数分别为 0.49 和 0.23, 磨损率分别为 $45.08 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 和 $13.01 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 。此外, 添加 Mo@MoS_2 粉末的试样高温氧化动力曲线均呈抛物线规律, 添加 Mo@MoS_2 粉末烧结体中形成的 FeMoO_4 有助于提高材料的抗氧化性能, 材料高温下的磨损机制以氧化磨损为主。

C01-16

钼铍合金的力学性能研究

王广达*

安泰科技股份有限公司

钼铌材料比纯钼金属具有更好的高温强度和室温塑性，与碱金属和核燃料具有良好的化学相容性。它是航空航天设备能源系统中非常有潜力的候选材料。通过粉末冶金制备了 MR5、MR14 和 MR41 三种钼铌合金棒材。在锻造变形和应力消除退火后，对钼铌材料在室温和高温下的力学性能进行了测试和分析。研究发现，随着铌含量的增加，拉伸强度显著增加，室温伸长率降低，900℃伸长率略有增加。通过金相、SEM 和 EBSD 观察了材料的微观结构和断裂形态。研究发现，材料的微观结构对材料的室温和高温性能有不同的影响。

C01-17**AlON/ZrON 和 TiAlON/ZrON 多层涂层的微结构与性能研究**

胡春、杜建伟、陈利*

中南大学粉末冶金全国重点实验室

金属氮化物涂层因其独特的化学键合特性在切削刀具领域具有广泛应用前景，但严苛的工作环境对涂层性能提出了更高的要求。构建多层结构是涂层改性的一种有效方式。本研究采用阴极弧蒸发技术分别制备了 AlON/ZrON 和 TiAlON/ZrON 纳米多层涂层，并通过调控氧含量及界面结构改善涂层性能。首先，系统分析了氧含量及界面结构对 AlON/ZrON 多层性能的影响。AlN/ZrN 和 AlON/ZrON_25O 多层具有显著的共格界面强化效应，硬度分别为~30.5 GPa 和~29.2 GPa。然而，随着 O 含量增加，AlON/ZrON_50O 多层涂层中氧化物的生成破坏了共格界面，导致涂层的硬度降低至~22.4 GPa。多层涂层断裂韧性均优于对应单层涂层，且随氧含量增加不断提升。但多层涂层的热稳定性和抗氧化性能则介于对应的单层涂层之间，并随 O 含量的上升而下降。随后，基于共格界面强化效应，通过调控 TiAlON 层的调幅分解行为获得了兼具优异力学性能和热稳定性的 TiAlON/ZrON 多层体系。得益于界面强化效应，所有多层涂层展现出高硬度（30.5 GPa-31.9 GPa）和良好的断裂韧性。同时，TiAlON/ZrON 多层因调幅分解的发生，在高温退火过程中表现出时效硬化效应。其时效硬化能力随氧含量增加而提高，退火硬度最高可升至 1100℃的~33.1 GPa，表现出优异的热稳定性。尽管 TiAlON 层的引入抑制了涂层氧化过程中 ZrO₂ 的马氏体相变，使多层涂层经 550℃氧化 10 h 后仍保持结构完整性，但其抗氧化性仍然较低。

C01-18**通过共格/半共格界面平衡 W-Al₂O₃ 合金的机械特性**

樊峰嵩、贾宝瑞、吴昊阳、秦明礼*

北京市海淀区学院路 30 号北京科技大学

在开发高性能金属结构材料的过程中，强度和韧性之间的权衡一直是一个具有挑战性的问题。在金属 W 中引入坚硬、不变形的颗粒可以有效提高强度。然而，在弥散强化材料中异相界面上严重的应力集中往往会导致应变不相容，从而降低韧性。在此，我们构建了坚固的共格/半共格的 W/Al₂O₃ 界面，以实现 W/Al₂O₃ 材料强度和变形性之间的平衡。在 15%压缩变形条件下，我们的材料强度超过 2200 MPa，硬度高达 HV_{0.2} = 637.4，是目前所报道的最佳烧结态弥散强化 W 合金之一。经 TEM 观察和 DFT 计算证实，W 和 Al₂O₃ 之间的强共格/半共格界面有效地阻碍了裂纹沿相界面的扩展，相反，裂纹撕裂了分散在 W 晶界的 Al₂O₃ 颗粒，这被认为是高延展性的原因。这项研究为分散强化 W 合金的协同强化提供了新的见解。

C01-19**硬质合金应力应变的多尺度计算模拟**

宋晓艳

北京工业大学

C01-20

高品质氮化铝研究、应用与产业化

秦明礼

北京科技大学新材料技术研究院

C01-21

The influence of heat treatment at different stages on the synthesis of Cu-Y₂O₃ via mechanical alloying and spark plasma sintering

Jiaqin Liu*, Junying Wei, Bing Ma, Yucheng Wu

Hefei University of Technology

This work synthesized Cu-Y₂O₃ alloys via mechanical alloying and spark plasma sintering, and the impact of heat treatment at various stages of ball milling on the microstructure, mechanical, and physical properties of Cu-Y₂O₃ alloys was systematically examined. Results indicate that heat treatment during the early stage of ball milling promotes Y₂O₃ particle agglomeration, leading to a substantial increase in particle size to 112.8±19.6 μm. In converse, heat treatment during the middle and late stages of ball milling effectively refines powder particles, enhancing material density and overall properties. Furthermore, post-heat treatment, Y₂O₃ particles can be further refined through ball milling, reducing crystal particle size from 6.4±2.8 nm to 4.2±1.7 nm. This process mitigates cold welding effects, prevents local enrichment, and ensures a more uniform distribution of Y₂O₃ particles.

C01-22

电子束增材制造高温合金的成形研究

林彦*、刘海彦、刘楠、李烨、马军、王建

西北有色金属研究院

摘要：具有优异的高温综合力学性能和组织稳定性的高温合金是航空发动机燃气轮机等热端部件使用的重要关键材料。对于高温合金复杂构件的制备，传统方法主要包括有铸造成形，成形过程较为繁琐。增材制造技术具有一体化成形的优势，为高温合金复杂构件的制备开辟了新的路径，开展高温合金增材制造技术成形研究对推进增材制造高温合金复杂构件的工程化应用具有重要意义。

本工作采用电子束选区熔化增材制造技术，对 Mar-M247, CMSX-4 及 In718, GH5188 多个牌号高温合金进行相应成形研究。结合 X 射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、能谱分析(EDS)等技术研究了电子束成形过程高温合金的显微组织、裂纹形态演变规律，掌握了高温合金成形过程相变机理，确立高温合金增材制造过程裂纹形成、脆性相析出等控制方法，研究结果为增材制造高温合金复杂构件的制备提供理论依据和技术指导。

感谢西北有色金属研究院应用基础类项目（No: YK2108）及陕西省重点研发一般项目（No: 资助号：2023-YBGY-108）国家自然科学基金青年基金项目（No: 52301023）的支持。

关键词：高温合金；增材制造；相关关系；微观组织

C01-23

碳源种类对碳热还原-碳化法制备纳米 WC 粉性能的影响

鲍阔阔、马运柱*

中南大学

纳米 WC 粉末是制备高性能纳米晶硬质合金的关键原料。研究纳米 WC 粉末粒径影响因素以及形核长大机制，对实现高品质纳米 WC 粉末的可控制备有着重要意义。本文分别将乙炔炭黑、色素炭黑和石墨烯三种碳源粉末与 WO₃ 粉末混合通过碳热还原-碳化法制备纳米 WC 粉末。利用 XRD、SEM、TEM 和 BET 等表征手段，揭示了碳源形貌和结构对 WC 形核生长过程及粉末性能的影响规律。结果表明，碳源的比表面积是影响 WC 粉末粒径的关键因素。由纳米炭黑粒子相互连接形成锁链结构的乙炔炭黑具有较高的比表

面积,使得 WO_3 通过挥发-沉积在炭黑表面形成大量纳米晶核,并在炭黑内部进行生长,最终形成与炭黑结构相似的锁链状纳米 WC 粉末。以乙炔炭黑为碳源,在 1100-1300°C 下,可制备出比表面积为 $4.92\text{-}3.01\text{m}^2/\text{g}$, 平均粒径为 77-126nm 的纳米 WC 粉末。本研究为高品质纳米 WC 粉末的制备提供了指导。

C01-24

高强度氮固溶强化型钛合金的制备与性能研究

陈嘉寅、蔡泽云、谢国强*

哈尔滨工业大学(深圳)

钛及其合金由于优异的机械性能、良好的生物相容性和耐腐蚀性以及无磁性等特点,是一种理想的生物医用植入金属材料,现在广泛应用于牙科、支架、关节等医学领域。纯钛和 Ti-6Al-4V 作为当前最为常用的两种钛合金材料,纯钛存在强度较低的问题,Ti-6Al-4V 则存在 Al 和 V 元素的毒性问题,因此,无毒高强度钛合金成为钛合金研究热点之一。本研究将 CP-Ti 粉末与 TiN 粉末进行不同时间的球磨混合,之后将混合粉末进行放电等离子体烧结技术固化成形,并对钛氮合金进行一系列微观性能和机械性能表征,探究分析了晶粒尺寸对钛氮合金机械性能的影响。当球磨时间为 40 h 时,钛氮合金的综合机械性能最为优异,屈服强度达到 1606 MPa,压缩塑性应变达到 14.44%,为制得无毒高强度钛合金提供了一种易制备、低成本的方法。

C01-25

二级网状纳米(TiC+Ti₅Si₃)/Ti 复合材料的构型设计及强韧化机理研究

陆琼*¹、李才巨¹、易健宏¹、冯培忠²、范景莲³

1. 昆明理工大学

2. 中国矿业大学

3. 中南大学

(TiC+Ti₅Si₃)/Ti 复合材料在航空航天领域高温环境极具应用前景,但存在增强相易团聚、界面结合弱及基体连通性差等问题,严重恶化其力学性能,限制其应用和发展。针对以上问题,本文创新提出“活化助烧结+热轧促分解+时效析出”工艺,实现 TiC 和 Ti₅Si₃ 增强相尺寸纳米化、空间构型二级网状化,制备的二级网状纳米(TiC+Ti₅Si₃)/Ti 复合材料,在变形过程中,产生的固溶强化效应、细晶强化效应、相变强化效应等协同作用,大幅提升钛基复合材料的强度(极限拉伸强度和屈服强度)与塑性,使得复合材料的强度可达 1300 MPa 以上,塑性大于 8%。与烧结态复合材料相比,强度提升 200MPa,断裂延伸率提升 3 倍以上,突破复合材料强-塑性倒置“魔咒”。

C01-26

低压 CVD AlTiN 基涂层技术研究

王社权

中钨高新材料股份有限公司

C01-27

Irradiation damage mechanism and in-situ micro-mechanical properties of advanced first-wall W-Y₂O₃ material

Jun Huang*¹, Yucheng WU^{1,2,3}

1. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, 230009, China

2. China International S&T Cooperation Base for Advanced Energy and Environmental Materials, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

3. Engineering Research Center of High Performance Copper Alloy Materials and Processing, Ministry of Education, Hefei 230009, China

Tungsten with 0.5% Y2O3 was chosen for the first wall material in this study. After exposure to helium plasma, thick fuzz tendrils were observed on the surface. The tendril dispersion was obtained using ultrasonic dispersion and examined through TEM. The fuzz tendrils were found to have a tungsten crystal structure with bubbles of varying sizes. The outer layer of the tendrils consisted of an amorphous material, likely a result of damage from helium plasma exposure. Fuzz tendrils were only found on the W matrix, while Y2O3 particles caused nano-protrusions and small cracks on the surface. The lack of Y in fuzz tendrils, along with the nano-protrusion morphology and EDS analysis, suggests that Y2O3 particles could not form a fuzzy structure. Helium plasma exposure altered the distribution of defects in the W matrix and Y2O3 particles. Fewer but larger bubbles were observed near the surface of Y2O3 particles, while smaller but denser bubbles were seen further away. The formation of bubbles in the W matrix was deeper and larger than in the Y2O3 particles, likely due to lower migration energy. The response of W matrix and Y2O3 particles to helium plasma exposure reveals the potential to increase plasma exposure resistance in tungsten-based materials. Stress-induced amorphization in the alloy matrix at the interface with the second phase leads to a different distribution of helium bubbles compared to those inside the crystal. This suggests the formation of potential barriers due to lattice distortion at the interface, allowing for self-trapping of defects. Nano-sized pillar compression samples of the matrix and second phase prepared using FIB before and after irradiation showed distinct irradiation characteristics. Unlike bulk tungsten-based specimens, the nano-sized pillar specimens did not demonstrate irradiation hardening but instead exhibited irradiation softening. The distribution of defects on crystal planes and within the crystal directly influences the in-situ micro-mechanical properties of tungsten-based materials.

C01-28

通过高熵填料设计高强度 Si_3N_4 覆铜材料以及界面表征

徐海峰、贾宝瑞、吴昊阳、秦明礼*、曲选辉

北京科技大学新材料技术研究院

由于化学反应性和热膨胀的内在差异，氮化硅 (Si_3N_4) 和金属之间的直接键合构成了一个严峻的挑战。为了解决这个问题，我们通过系统改变 Ti 含量和 Si_3N_4 颗粒的比例，开发了 $\text{CuSnNiTi}+\text{Si}_3\text{N}_4$ 高熵填料。连接策略采用混合方法，将部分瞬态液相键合与反应性复合材料键合相结合，以实现高强度的陶瓷-金属界面。润湿性和电导率评估表明，增加 Ti 含量减轻了陶瓷颗粒添加对填料性能的负面影响。使用 $\text{Cu/CuSnNi12Ti 5Si}_3\text{N}_4/\text{Si}_3\text{N}_4$ 的预制接头表现出最高的剪切强度，达到 $103.0 \pm 4.5 \text{ MPa}$ 。微观结构表征揭示了一个多级界面，包括 Cu/Cu 、 Cu_6Sn_5 、 $\text{Ni}_4\text{Ti}_3@/\text{Ti}_5\text{Si}_3@/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ni}_4\text{Ti}_3/\text{Ti}_5\text{Si}_3/\text{Si}_3\text{N}_4$ 。动力学分析表明， Ti_5Si_3 和 Ni_4Ti_3 过渡层分别通过反应控制和扩散控制过程演变。界面粘附能的第一性原理计算得出， $\text{Si}_3\text{N}_4(001)/\text{Ti}_5\text{Si}_3(001)$ 的值为 0.57 J/m^2 ， $\text{Ti}_5\text{Si}_3(001)/\text{Ni}_4\text{Ti}_3(001)$ 为 2.15 J/m^2 ， $\text{Cu}_6\text{Sn}_5(001)/\text{Ni}_4\text{Ti}_3(001)$ 为 7.05 J/m^2 ，突出了多层结构中可变的键合强度。

C01-29

磁性对 TiAlN/CrN 多层涂层结构和热分解行为的影响

章杰^{1,2}、胡春^{1,2}、陈利*^{1,3}、孔毅¹、王社权³、Paul H. Mayrhofer²

1. 中南大学粉末冶金研究院

2. 维也纳工业大学

3. 株洲钻石切削刀具股份有限公司

TiAlN 涂层具有高硬度、高熔点及优异的热稳定性能，是目前应用最广泛的切削刀具涂层材料之一。向 TiAlN 中引入 CrN 共格界面层可以进一步改善涂层的力学和热性能，但其界面结构和高温相演变受到 CrN 磁性状态的影响。本工作结合实验和理论计算研究了不同磁性状态的 CrN 层对 TiAlN/CrN 多层涂层相结构和热分解行为的影响。结果表明： TiAlN/CrN 多层涂层为面心立方结构，相比于反铁磁构型，顺磁性构型的 CrN 层提高了多层涂层的共格界面稳定性和界面结合强度，而但其对 TiAlN 层中 Al 的固溶度的提升效果不如反铁磁构型。高温下 CrN 层的顺磁特性降低了 TiAlN 层内 Al 的扩散激活能，促进了 Al 向内上

坡扩散过程。实验进一步证实多层涂层在 900 °C 退火后于 TiAlN 两侧近界面处出现富 Al 层；伴随着 TiAlN 层中心位置 Al 发生上坡扩散，在两侧富 Al 层之间形成了富 Ti 层。同时，TiAlN 层和 CrN 的互扩散行为导致较多的 Ti 和少量的 Al 固溶于 CrN 层形成(Cr,Ti,Al)N 层。混合焓计算进一步证明 TiAlN/CrN 顺磁构型的最优分解产物为 TiCrN 和 AlN，因此在 1000 °C 退火后(Cr,Ti,Al)N 中的 Cr 会越过富 Al 层向(Ti, Al)N 的内部富 Ti 层持续扩散形成富(Ti,Cr)层，而 Al 则向邻近的富 Al 层上坡扩散，导致层状结构扭曲和坍塌。

C01-30

钛颗粒增强 AZ91 基复合材料的界面设计与力学性能研究

张玉松^{1,2}、韩胜利¹、郑开宏¹、潘复生^{*2}

1. 广东省科学院新材料研究所

2. 重庆大学

本研究采用粉末冶金法制备了锌修饰钛颗粒 (Zn@Ti) 增强的 Mg-9Al-1Zn (AZ91) 合金。锌纳米颗粒有效溶入镁基体，导致铝固溶度降低并析出亚微米级 Mg₁₇Al₁₂ 相。由此获得的 Zn@Ti/AZ91 复合材料呈现出双峰晶粒结构，实现了强度与塑性的优异协同。该复合材料的强度提升主要源于三重强化机制的协同作用：亚微米级 Mg₁₇Al₁₂ 与 Al₈Mn₅ 析出相强化、锌固溶强化以及晶界强化。在塑性机制方面，Mg₁₇Al₁₂ 和 Al₈Mn₅ 析出相能有效阻碍裂纹扩展从而提升延展性。这种创新方法为开发高强高塑镁基复合材料提供了新策略。

C01-31

Study on the Vacuum Arc Modes of CuCr55 Contacts in 252 kV Vacuum Interrupters Based on Deep Learning Image Recognition

Siyuan Liu*

Xi'an Jiaotong University

Copper-chromium alloy material, as one of the most important electrode contact materials in the field of electrical contact, has been widely used in vacuum interrupters. CuCr55 contacts are used in 252kV vacuum interrupters because of their outstanding resistance to erosion. Replacing traditional SF₆ circuit breakers with environmentally friendly 252 kV vacuum circuit breakers effectively reduces SF₆ greenhouse gas emissions. Understanding the evolution of vacuum arc modes under different conditions is crucial for analyzing vacuum interruption. However, the existing vacuum arc modes recognition mainly relies on manual, time-consuming, subjective methods, and lacks an efficient and accurate image recognition technology for the mode of vacuum arc. This paper built a test platform using a detachable vacuum chamber and a motor-driven operating mechanism to investigate the vacuum arc modes of a 252 kV single-break vacuum interrupter with CuCr55 contacts under varying arc currents. The arc modes were classified, and a deep learning network was developed for arc mode image recognition. This paper constitutes an arc mode image dataset by pre-processing and feature extraction of a large number of vacuum arc experimental images, and categorizing the vacuum arc mode into intense arc mode, diffuse arc mode, and anode active arc mode. A convolutional neural network is used to train the dataset, and the trained network can quickly recognize the duration and evolution of the vacuum arc mode of any arcing process, and form a correspondence between the arc mode and the instantaneous value of the current at any moment. The results show that the accuracy of arc mode image recognition reaches more than 88%. The results revealed the evolution characteristics of vacuum arc modes at a hundred-millimeter range contact gap and demonstrated the influence of arc current from 10 kA to 45 kA on the duration of arc modes. The vacuum arc mode evolution can be regulated according to the results of image recognition, assessing the risk of current interrupting failure, optimizing the switching characteristics of the vacuum circuit breaker, and efficiently guiding the design of the 252kV vacuum interrupter.

C01-32

金属材料高温熔化及润湿性能的原位表征

张海媛*

天津中环电炉股份有限公司

金属材料广泛应用在工业成产、钢铁冶金、航空航天、焊接、复合材料制造等领域，而这些领域中的很多现象都与材料高温特性及界面润湿行为相关，所以高温下固-液之间的润湿，尤其是高温下金属与金属/金属与其他材料的之间润湿性对整个流程的研究解析十分重要。本工作采用高温原位座滴法，将熔融金属/合金等的高温润湿行为可视化，研究了高温高真空条件下几种金属/合金体系的表面润湿性及高温特性，有助于了解材料的高温热物性能。

C01-33

弧爆法制备 Cu 基金属粉末及其组织性能研究

赵炳戈*、王晨辉、罗锦涛

上海大学

Cu 合金粉末因其出色的导电导热性以及较好的力学性能在新能源以及半导体领域具有广泛应用。本研究利用自主设计开发的弧爆设备制备了高品质 T2 纯铜以及磷青铜粉末，并运用多种分析表征手段对金属粉末的凝固特性与力学性能进行了系统研究。结果表明，弧爆法制备的 Cu 基金属粉末具有球形度高、空心粉含量低、卫星粉少等特点，其凝固组织主要为 α -Cu 和 δ -Cu₄₁Sn₁₁。弧爆制粉过程中较高的冷却速率使粉末凝固组织比较均匀，缩松、缩孔等凝固缺陷明显减少，显著降低元素偏析。粉末粒径对晶粒尺寸与枝晶生长速率具有显著影响：随着粒径减小，枝晶生长速率提升，二次枝晶臂间距减小，凝固组织细化。单颗粒压缩实验表明，Cu 基金属粉末硬度随粒径的减小而显著提高，磷青铜体系因层错容易形成而在加工硬化率曲线上出现了极大值

C01-34

生物医用纯钽材料增材制造及热等静压研究

刘辛^{*1,2}、秦奉^{1,2}、谭冲^{1,2}

1. 广东省科学院新材料研究所

2. 国家钛及稀有金属粉末冶金工程技术研究中心

近年来，随着生物医学领域对骨修复材料需求的不断提升，开发具有类骨特性的金属植入体材料已成为研究热点。传统医用金属材料因高模量、潜在细胞毒性等问题难以满足长期植入要求，钽以其优异的生物相容性和成骨特性，被视为新一代理想骨植入体材料。然而，作为难熔金属，钽的高熔点特性使得传统加工方法难以实现复杂钽植入体结构的精密制造，难以满足骨植入体的个性化定制需求。本研究采用激光粉末床熔融技术，系统构建了“粉末特性-成形工艺-热处理”全流程调控方法，成功实现实体钽和多孔钽材料的性能优化。通过射频等离子体制粉工艺优化，实现了 3D 打印钽粉末的高球形度和粉末氧含量调控（最低 150ppm），并发现高氧粉末会造成激光粉末床熔融钽样品非平衡晶界氧偏聚及晶界脆性断裂。在调控适宜氧含量窗口的基础上，采用基于双层扫描策略的原位热处理工艺实现了激光粉末床熔融过程中钽样品的晶粒细化，并协同提升了钽样品的强塑性。此外，创新性地开发了低温热等静压工艺，850°C 和 1350°C 热等静压工艺在闭合钽样品内部微孔的基础上，均未造成显微组织粗化，实现激光粉末床熔融钽样品强塑性和高周疲劳性能的同步提升，尤其是 1350°C 热等静压工艺将钽样品在 300MPa 应力下的疲劳寿命由 105 提升至 107。针对多孔钽材料，850°C 热等静压工艺在保持多孔钽样品结构完整性的同时显著提升了静态力学性能和高周疲劳性能，而在 1350°C 热等静压过程中多孔钽样品氧化严重，性能恶化。

C01-35

高端芯片封装基板用精密微型钻头及微孔加工解决方案

付连宇*

深圳市金洲精工科技股份有限公司

面向高端芯片封装基板对孔位精度、孔壁质量和断钻率的严苛要求及加工难度越来越大的挑战, 研究精密微型钻头设计、加工和涂层关键技术及封装基板微孔加工解决方案。研究了微型钻头的结构和参数设计技术, 实现了微钻刚度、强度和排屑空间的精准平衡。研究了微型钻头精密磨削加工技术, 实现了极细径大长径比微型钻头的高效高精度加工。研究了微型钻头的超硬涂层技术, 提出了微型钻头精准预处理技术, 实现了极小径微钻的金刚石涂层。研究了钻孔条件和钻孔参数对封装基板微孔质量的影响机制, 实现了高端封装基板微孔的高质量超高转速钻削。

C01-36

激光增材制造高性能铝合金材料设计及成形验证

李瑞迪*

中南大学

针对航空航天及轨道交通对增材制造用铝合金材料的需求, 开发了面向增材制造用高强度铝合金、耐热铝合金、修复用铝合金三类材料。首先, 针对增材制造易裂问题, 研究热裂机理与抑制方法, 揭示了合金成分与凝固应力敏感性因子关系。而后, 针对增材用高强铝合金的研发, 提出基于层错能效应发展增材制造铝镁合金新型强韧化机理; 针对增材制造用耐热铝合金的研发, 提出基于“溶质-位错交互”计算对位错线周围的溶质原子浓度随应变率的变化进行研究, 筛选高强抗蠕变成分。针对激光修复用铝合金的研发, 提出氢孔形成机理与抑制方法。同时, 开展了粉末雾化制备及粉体理化性能优化等研究。开发了增材制造用高强、耐热、修复三类铝合金材料, 并进行成形验证。

关键词: PVD 涂层; 刚玉结构氧化铝; $(Al,Cr)_2O_3$; 红硬性; 抗氧化性

C01-37

“铋代铅”趋势下的增强铜合金材料摩擦学性能研究及其在泵马达摩擦副上的应用

赵更锐*、李振宇、李佳骏、王宏刚

中国科学院兰州化学物理研究所

高压联体泵马达是军用装甲车辆、重型机械装备的核心动力元件。自上世纪 70 年代, 其主要组件缸体的减摩层材料为铜锡铅合金。但随着泵马达额定压力不断提高、环保政策的持续收紧以及对人体健康的危害性, 铅逐渐被同样具有润滑性的铋所取代。然而, 含铋的铜合金材料在摩擦过程中会使低熔点的铋析出到基体表面, 导致基体表面更容易因受力而剥落。这意味着含铋铜合金试样无法满足高速、高压的使用要求, 从而限制了其在苛刻工况下的使用。因此, 亟需针对铜锡铋合金进行摩擦学性能改性增强。本研究中, 针对泵马达柱塞副、滑靴进行服役工况分析, 通过有限元模拟计算, 将泵马达服役过程中的典型工况等效换算为试验室材料级测试工况。对掺杂镍、二硼化钛等粉末烧结的铜/钢双金属试样在不同油润滑环境、不同载荷速度工况下的摩擦磨损性能进行了考察, 发现经过掺杂的粉末烧结的铜锡铋复合材料在润滑性、耐磨性以及抗咬合性等方面明显提升。对试样磨痕表面进行分析, 发现了镍的有限塑性变形机制以及改性铜锡铋复合材料摩擦过程中界面的第三体层生长演变机制。该研究结果对建立泵马达双金属摩擦副材料的摩擦学性能考核评价方法、双金属无铅铜层减摩耐磨材料的应用起到参考与基础支撑作用。

C01-38

ZrC 颗粒强化 WC 相的超粗晶硬质合金的制备及力学性能研究

任彤彤、刘雪梅、宋晓艳*

北京工业大学

WC 晶粒尺寸大于 $5\ \mu\text{m}$ 的超粗晶硬质合金, 因具有优异的抗冲击性和热疲劳性等特点而广泛应用于钢材轧制、冲压模具和凿岩等领域。然而, 虽然超粗晶硬质合金具有良好的韧性, 但硬度和强度性能相对较低。如何在保持高韧性的前提下提高其硬度和强度是业界难题。鉴于超粗晶硬质合金中 WC 占比大、失效过程中 WC 穿晶裂纹比例高且 WC 内有位错产生, 本研究提出颗粒强化 WC 相的新思路, 以期实现超粗晶硬质合金硬度和强度的提高。本研究以 Co 含量较低的 WC-6Co 硬质合金为例, 通过原料和制备工艺综合调控, 制备出 WC 内含有 ZrC 颗粒的超粗晶硬质合金。研究了 ZrC 粉末特性、添加量、添加方式及烧结

工艺等对超粗晶硬质合金微观组织和力学性能的影响规律。研究结果可为高性能超粗晶硬质合金的开发提供新的思路和方法。

C01-39

Y2O₃ 与 VC 协同改性 WC-10Co 硬质合金的组织结构及性能增强

鲁振运 1, 2, 3, 秦永强 1, 2, 3, 罗来马 1, 2, 3, 吴玉程 1, 2, 3

1 合肥工业大学材料科学与工程学院, 合肥, 230009, 中国

2 有色金属与加工技术国家地方联合工程研究中心, 合肥, 230009, 中国

3 高性能铜合金及加工成形教育部工程研究中心, 合肥, 230009, 中国

硬质合金凭借高硬度、高强度、以及出色的耐磨耐蚀特性被广泛应用于金属切削工具、矿山设备和耐磨零件等领域。然而, 随着制造业的快速发展, WC-Co 硬质合金本身的硬度与韧性难以兼顾问题, 也一直制约着硬质合金的广泛应用。在硬质合金中加入第二相(如稀土氧化物、难熔金属碳化物)是改善合金微观组织、提高综合性能的有效途径。然而加入的添加剂主要是单一的难熔金属碳化物或其混合物, 以及稀土氧化物或其混合物。关于难熔金属碳化物与稀土氧化物复合添加对 WC-Co 硬质合金影响的研究较少。此外, 添加剂通常在混合球磨阶段加入, 因其添加量是微量的, 难以实现基体中的均匀分散。因此, 需要长时间的球磨才可能解决均匀分散问题, 但这无形中又增加了杂质含量, 最终难以获得性能稳定的优质硬质合金。为此, 本研究通过液-液掺杂法将难熔金属碳化物与稀土氧化物引入硬质合金中, 从根本上解决了添加剂的均匀分散问题, 进而阐明了难熔金属碳化物与稀土氧化物复合添加对 WC-Co 硬质合金整体性能的影响规律, 并最终成功制备出组织均匀、性能优异的 WC-Co 硬质合金。

关键词: 硬质合金, 微观结构, 机械性能, 液液掺杂

C01-40

挤压态新型镍基粉末高温合金热变形行为的研究

赵格格、王二鹏*

烟台大学

为了研究挤压态新型镍基粉末高温合金热变形行为及组织演变, 对挤压态新型粉末高温合金以 0.001~1 s⁻¹ 的应变速度在 1040~1100 °C 温度下开展了单轴热压缩实验。根据不同条件下的流变曲线建立了描述应变量、温度和应变速率的本构方程和组织演变规律的热加工图, 并对其变形后组织进行表征。结果表明: 在温度为 1080 °C、1100 °C, 应变速率为 0.1 s⁻¹ 时, 应力应变曲线出现不连续软化现象, 对曲线进行修正获得该合金的激活能为 889.53 KJ/mol。热加工图中失稳区随着应变的增加而增大, 且主要分布在高应变区域。对该区域进行表征后, 发现其内部存在孔洞, 微裂纹等缺陷。在低温高应变速率条件下, 连续动态再结晶(DRX)是动态再结晶的主要机制, 随着温度的升高应变速率的降低, 不连续动态再结晶(DDRX)开始主导动态再结晶过程。

C01-41

激光粉末床熔融技术制备高性能铜合金的工艺及组织性能研究

卜馨、雷前*

中南大学粉末冶金研究院

激光粉末床熔融技术(L-PBF)因其高设计自由度、节约资源和快速生产等优点, 迎合了国家对制造业绿色化发展的要求以及高端装备的整体性和多功能性需求。但是, 由于铜合金对激光反射率高, 制造缺陷少、成形质量好的铜合金具有挑战性。本文综述了课题组目前通过激光粉末床熔融工艺制备铜合金的研究进展, 主要结论如下:

1. 构建取向和热处理对 L-PBF 制备 Cu-Cr-Zr 合金微观组织和性能的影响。采用 L-PBF 技术制备了长轴与构建方向平行和垂直的圆柱形样品, 构建方向影响了 Cu-Cr-Zr 合金的晶粒取向和织构, 长轴与构建方向平行的样品在制造的 Cu-Cr-Zr 合金表现更强的<110>织构。时效析出的与铜基体成立方对立立方关系的 Cr 相提高了 Cu-Cr-Zr 合金的强度, 时效后样品屈服强度达到 540MPa, 电导率 62.1%IACS。

2.热处理对 LPBF 制备 Cu-15Ni-8Sn 合金微观组织和性能的影响。研究了不同时效工艺(直接时效和固溶时效)对 L-PBF 制备的 Cu-15Ni-8Sn 合金微观组织和力学性能的影响,在 400 ℃ 下直接时效 0.5h 可得到最高的极限抗拉强度 943MPa,延伸率 5.5%,性能提升的主要贡献为析出强化。

3.工艺参数和热处理对 L-PBF 制备 Cu-Cr-Si 合金的影响。通过正交实验获得了 L-PBF 制备 Cu-Cr-Si 合金的最佳参数为激光功率为 450-475W,扫描速度为 400-500mm/s,扫描间距 45 μm,铺粉层厚 30 μm。在 500 ℃ 下直接时效处理 45min 后,性能显著提升,得到了 63%IACS 的导电率、686 MPa 的极限拉伸强度和 16% 的伸长率,大量细小弥散分布的 Cr 相是强度和电导率提高的主要原因。

课题组的研究为 L-PBF 制备高性能铜合金提供了理论指导。

C01-42

单相合金与陶瓷中的晶格畸变效应

吴正刚

湖南大学

C01-43

铌钨和钼钨球形粉末等离子旋转电极制备工艺研究

王建*、赵少阳、咬登志

西北有色金属研究院

铌钨和钼钨合金因具有优异的高温力学性能,在航天领域具有重要的应用。近年来,随着增材制造技术日趋成熟,新一代航天发动机在研发中提出了采用增材制造技术制造铌钨和钼钨复杂构件的设计方案,进而对高品质球形铌钨和钼钨球形粉末提出了迫切的需求。论文分析了现有技术制备球形铌钨和钼钨球形粉末的优缺点,重点介绍了本课题组近年来在等离子旋转电极制备铌钨和钼钨球形粉末方面开展的相关工作,分析了工程化制备球形铌钨和钼钨球形粉末存在的困难和挑战,并对未来发展趋势进行了展望。

C01-44

一种制备具有冶金结合界面三明治结构泡沫铜的新策略

何艳平 1, 肖健 1*, 龚佳昊 1, 邱贵宝 2**

1. 材料科学与工程学院, 江西理工大学;

2. 材料科学与工程学院, 重庆大学

针对传统泡沫金属界面结合弱的问题,提出成分设计与分段烧结法制备三明治泡沫铜。表层铜粉、芯层铜粉/尿素(造孔剂)逐层压制后分段烧结(400℃造孔、800℃扩散),制得表层致密多孔、芯层 85%高孔隙率结构。界面分析显示,层间通过 Cu 原子扩散形成无杂质烧结颈,实现冶金结合。力学性能:抗压 12.6 MPa(与单层相当),抗剪 43.2 MPa(单层 10 倍、钎焊法 13 倍),突破界面强度瓶颈。该材料为锂电池集流体及热管理器件提供新方案,抗剪强度突破为界面设计提供新思路。

关键词: Cu/Cu 泡沫/Cu; 层状复合材料; 界面结构; 冶金结合; 力学性能

C01-45

雾化介质对高钒钢粉特性的影响:氮气和氩气的比较研究

石雅贤¹、黎兴刚²、葛昌纯*¹

1. 北京科技大学

2. 南方科技大学

本研究就不同雾化介质对高钒钢粉末颗粒形貌、相组成和冷却速率的影响进行了研究。X 射线衍射和电子背散射分析表明,氮气雾化粉末中的 bcc-Fe 含量明显高于氩气雾化粉末,EBSD 结果表明氩气雾化粉末中的 bcc-Fe 含量比氮气雾化粉末高 24.72%。正如计算流体动力学计算所示,这种差异与氮气自身更高的导热性和比热容有关,导致氮气雾化过程中表现出更高的冷却效率和更快的冷却速率。氮气雾化粉末的

更快冷却速度导致颗粒的表面形态和内部晶体结构更精细。当雾化介质发生变化且所有其他参数保持不变时，氮气雾化粉末比氩气雾化粉末具有更高的氮浓度和更少的空心颗粒。不同的雾化介质会显著影响雾化粉末的微观结构，氮雾化有助于晶粒细化和 $V(C, N)$ 化合物的原位合成。提出了在氮气或氩气作为雾化介质液滴冷却速率的预测方程，该方程将冷却速率描述为液滴直径和气体固有特性的函数。对于相同直径的液滴，氮气雾化过程中的传热效率大约是氩气雾化的 1.5 倍。氩气雾化在液滴碎裂时表现出优异的动能分布，而氮气雾化过程的相对热传递效率分布更强，大大提高了传热效率，从而表现出氩气雾化熔滴颗粒尺寸分布更小，而氮气雾化熔滴内部晶体结构更细小的特征。这些发现极大地促进了对气体雾化过程中凝固动力学的理解。

C01-46

不同轧制温度和轧制量对 ODS 铜机械性能与微观组织及再结晶行为的影响

刘家琴*、丁文杰、周宇生、吴玉程

合肥工业大学

本研究系统探讨了轧制温度与轧制量对氧化物弥散强化 (ODS) 铜合金力学性能、微观组织及再结晶行为的协同调控机制。通过机械合金化与放电等离子烧结制备 ODS 铜合金，结合微观表征与力学测试发现：室温轧制 (80% 轧制量) 因晶粒细化与高位错密度，抗拉强度高达 508.5 MPa，但塑性受限 (延伸率 3.7%)；高温轧制 (500℃) 通过动态再结晶与纳米孪晶生成显著提升塑性 (延伸率最高 16.4%)，但晶粒粗化导致强度降低至 382.64 MPa。电导率随温度升高从 84.3% 提升至 89.2% IACS，主要归因于高温下晶界密度减少与 Y_2O_3 颗粒的择优排列。微观分析表明，低温轧制以位错滑移主导，形成强变形织构；高温轧制则通过动态再结晶弱化织构，同时孪晶与弥散颗粒协同作用缓解晶粒粗化的软化效应。此外，高轧制量 (80%) 通过增强变形储能促进再结晶完全性，优化颗粒分布并抑制空洞缺陷，从而综合提升材料性能。研究结果揭示了轧制参数对 ODS 铜合金多尺度结构的调控机制，为核聚变装置等极端环境下高性能铜基材料的开发提供了重要理论支撑。

。

C01-47

氧化铝-莫来石双相纤维蠕变行为及失效机制研究

邹丰忆、姚树伟*、马运柱、刘文胜

中南大学

氧化铝-莫来石双相纤维凭借其优异的力学强度、热稳定性及抗氧化性能，已成为航空航天高端装备热端部件的关键结构材料。在长期高温服役条件下，蠕变是导致该类纤维主要失效模式。受限于纤维形态特征，现有研究多聚焦于温度单因素对纤维力学性能衰退的影响，而对应力-温度耦合作用下纤维微观组织结构演变与蠕变机理研究尚显不足。本研究基于自主研发的高温原位拉伸蠕变测试系统，系统考察温度与拉伸应力耦合作用下氧化铝-莫来石纤维的蠕变特征，并结合透射电镜表征技术，揭示蠕变过程中纤维组织结构演变规律与失效机制。研究表明，当温度由 1200 提升至 1400℃，纤维稳态蠕变速率提高三个数量级。在 1400℃ 条件下，纤维呈现显著“塑性”变形特征，是其抗蠕变性能衰退的主要原因。

C01-48

粉末结构设计和表面改性：解决激光难成形材料打印难题

伍子纯、叶楠*、唐建成

南昌大学 物理与材料学院

激光增材制造材料主要包括高反射率金属、难熔金属及合金、金属基复合材料等，由于高反射率、高熔点、裂纹敏感性高等特性导致激光成形时易产生裂纹、能量使用率低下，最终生产的零件质量低，极大地限制了材料领域的发展。研究从粉末结构设计出发，对激光难成形材料粉体分别进行表面纹理化、表面修饰、结构定制和合金化，实现激光难成形材料的 3D 打印制造。针对高反射率的铜、铝及其合金，采

用高比重颗粒辅助声共振混合技术,分别对其进行表面纹理化修饰和纳米 ZrO_2 包覆,显著的提高了激光吸收率和打印件质量。针对高熔点差的 W-Cu、WC-Co 复合材料,采用喷雾球化结合阻隔烧结技术,制备高球形度、高致密度复合粉末制备,有效地改善了组元之间的润湿性,宽裕了激光成形工艺窗口,提高了打印件致密度和性能。针对高熔点、高导热以及较高的氧化敏感性等特性的难熔金属,采用喷雾干燥结合射频等离子球化技术制备球形钨钼合金粉末,能够有效地抑制裂纹,提高了打印件质量。

C01-49**硬质合金烧结用涂料的研究与应用**

蔡晓康

厦门钨业股份有限公司/国家钨材料工程技术研究中心

C01-50**高性能 TA15 基复合材料热等静压制备与强韧化机理**

王帅*、黄陆军、耿林

Harbin Institute of Technology

钛基复合材料作为航空航天结构材料具有优异的高温性能,且与钛合金密度相近。但是,在制备钛基复合材料过程中,存在加工困难和材料成本高的问题。热等静压法作为一种先进的材料制备方法,可以同时实现材料的制备成形,因而材料利用率可以大幅提升。因此,热等静压法适合用于钛基复合材料研制。本研究针对热等静压 TA15 基复合材料的原材料、制备工艺和力学性能开展研究。开发了基于等离子旋转电极的钛基复合粉末制备方法,阐明了复合粉末的组织形成机理和 TiB 增强相的分布规律。进一步研发了低温热等静压钛基复合材料的制备方法,并针对钛基复合材料的致密化机理和力学性能开展了研究。研究表明,制备的热等静压态 TiB/TA15 复合材料,具有优异的均匀变形能力,室温抗拉强度超过 1000MPa,延伸率可达 20%,断裂韧性超过 40MPa $\text{m}^{1/2}$,且 700°C 拉伸强度较 TA15 合金提高超过 60MPa。分析认为, TiB/TA15 复合材料优异的力学性能,与纳米 TiB 增强相引入促进几何必需位错增殖有关,纳米 TiB 也会通过阻碍位错运动和促进 $\langle c+a \rangle$ 位错开动改善材料的强韧性。不仅如此,纳米 TiB 会影响裂纹扩展路径,提升裂纹尖端的均匀变形能力和塑性区尺寸,从而有效钝化裂纹尖端,保证了 TiB/TA15 复合材料的断裂韧性。

C01-51**不同烧结温度和 Mn 含量对多孔镁合金结构和性能的影响**

梁冬梅*

西南石油大学

多孔镁合金是一种密度低、比强度高、降噪减震效果好的材料,为探究多孔镁及镁合金的温度和合金元素制备条件,采用粉末冶金法,以纯镁粉末为基材,尿素为造孔剂,在 40MPa 压力下将粉末压成生坯。通过 X 射线衍射仪和扫描电子显微镜、万能试验机、电化学工作站对不同温度和不同 Mn 含量下多孔镁及镁合金的微观形貌、压缩性能、抗腐蚀性能进行测试分析,研究了多孔镁及镁合金的孔隙率和孔隙尺寸分布。结果表明,烧结温度为 540°C~600°C 时,孔隙率随着温度升高而升高,孔隙尺寸分布更均匀,但抗压强度先升高后降低,优选出的烧结温度为 580°C; Mn 含量在 1.0-2.5wt% 时,孔隙率随含量增大而减小,孔隙尺寸分布更均匀,抗压强度和耐腐蚀性先增高后降低,优选出的 Mn 含量为 2.0wt%。该研究结果为多孔镁及镁合金的制备和应用提供了参考依据。

C01-52**粉体颗粒的流化床包覆改性**

杨亚锋

中国科学院过程工程研究所

C01-53

WC 晶粒级配对硬质合金性能影响的探索

刘超

厦门钨业股份有限公司/国家钨材料工程技术研究中心

C01-54

电热合金用 FeCrAl-xY₂O₃ 合金的制备及性能评价刘伟斌¹、许哲峰^{*1,2}、张成玉¹、方智超¹、董嘉润¹、孟日欣¹

1. 燕山大学亚稳材料全国重点实验室

2. 燕山大学河北省金属产品工艺与性能综合优化实验室

随着国内外冶金行业的发展,金属热处理电阻炉用的电热合金的高温耐久性和可靠性提出了越来越高的要求。传统的 FeCrAl 系电热合金在高温使用中出现脆化和保护性氧化膜失效等现象,限制了其进一步应用。为了改善 FeCrAl 系电热合金的力学性能和抗氧化性能,本研究采用机械合金化和放电等离子烧结技术制备了添加纳米氧化钇颗粒(Y₂O₃)的 FeCrAl 系电热合金,并对其力学性能和物相结构进行了测试,同时在 800℃下每 100h 进行了间断氧化试验测试其抗氧化性能。结果表明:FeCrAl 系电热合金的极限抗拉强度(σ_{UTS})和断裂应变(ϵ_f)均随着 Y₂O₃ 含量的增加逐渐增加,当达到一定值后趋于平缓的趋势,含有 0.4 wt.% Y₂O₃ 的 FeCrAl 系电热合金具有最优的力学性能, σ_{UTS} 和 ϵ_f 分别为 833.5 MPa 和 18.1%,相较于传统电热合金的分别提升了 57.7%和 75.7%;FeCrAl 系电热合金的氧化增重随着 Y₂O₃ 含量的增加呈现出先减少后增加的趋势,含有 0.4 wt.% Y₂O₃ 的 FeCrAl 系电热合金具有最优的抗氧化性能,其氧化增重为 0.41 mg,与传统 FeCrAl 系电热合金的氧化增重相比减少了一个数量级。

C01-55

La₂O₃ 含量对 W-La₂O₃ 合金热稳定性的影响杨军军^{*1,2}、于瀛²、陈铮³、曲选辉²、陈刚²、秦明礼²

1. 北京科技大学国家材料服役安全科学中心

2. 北京科技大学新材料技术研究院

3. 西安理工大学材料科学与工程学院

在本研究中,通过无压烧结(PW、WL05 和 WL10 烧结工艺为 1500 °C/2 h, WL20、WL35、WL50 和 WL80 烧结工艺为 1650 °C/2 h)制备了不同 La₂O₃ 含量(0-8.0 wt.%)掺杂的 W-La₂O₃ 合金。采用常规热处理(1600°C~1900°C, 0 h~10 h)系统地研究了所制备的 W-La₂O₃ 合金的热稳定性。在 1650 °C下烧结 2 h 后 WL20 合金的相对密度、平均晶粒尺寸和维氏显微硬度分别为 97.0±0.6 %、0.59±0.20 μ m 和 694.7±8.7 HV0.2。W-2.0 wt.%La₂O₃ 合金表现出优异的热稳定性,即使在 1900 °C下退火 10 h,仍能保持其最小的晶粒尺寸(1.74±0.66 μ m)和最大的显微硬度(543.4±14.2 HV0.2)。W-La₂O₃ 合金的再结晶温度显著提高到约 1700 °C~1800 °C。此外,本研究还建立了烧结态 W-La₂O₃ 合金的维氏显微硬度与平均晶粒尺寸之间的定量关系,其表达式为: $H_v = 390.72 + 178.01 \cdot d^{-1/2}$ 。

C01-56

增材制造 AISI 321 不锈钢的组织调控与各向异性行为研究

邹亮*

中南大学

AISI 321 不锈钢是一种钛稳定化奥氏体合金,具有优异的高温强度、耐腐蚀性及良好的抗晶界腐蚀性,在航空航天、石油化工、核能等领域具有广泛应用价值。尽管其性能优越,但实际工程应用仍面临两方面关键挑战:一是传统凝固路径下易析出的粗大 Ti(C,N)碳氮化物会引发显著的组织不均和力学性能退化,尤其在高温和腐蚀环境中更为敏感;二是传统铸锻工艺对构件几何形状的限制,难以满足新一代复杂结构与轻量化设计的需求。提出利用增材制造技术,以其快速凝固与逐层构建优势,一方面实现细化组织、

抑制 Ti(C,N)粗化, 另一方面显著提升复杂结构的设计与制造自由度。本报告将聚焦 LPBF 条件下 AISI 321 不锈钢的显微组织调控机制、Ti 元素的稳定性与分布行为, 以及力学性能的各向异性表现。通过系统表征和机制分析, 旨在为高性能、复杂结构 321 不锈钢构件的工程化制造提供理论支撑与技术路径。

C01-57

通过电子束粉末床熔融成形的 GRCop-42 铜合金实现了强度和导电性能的协同提高

闫清波、李云哲、魏瑛康、刘世锋*

西安建筑科技大学

通过增材制造制备的 GRCop-42 铜合金有望应用于火箭发动机燃烧室内衬。然而, 使用传统激光粉末床熔融增材制造技术制备 GRCop-42 铜合金时能量吸收率较低, 制备的样品综合性能难以满足应用需求。本研究通过电子束粉末床熔炼 (EB-PBF) 成形了 GRCop-42 铜合金。研究了成形样品的相对密度、维氏硬度、电导率和机械性能。通过调控工艺参数制备出综合性能相对较高的样品。研究结果表明随线性能量密度的增加, 样品的相对密度先增加后降低, 最大相对密度为 99.65%。在最佳成形参数下制备的样品极限拉伸强度和电导率分别为 300 MPa 和 70% IACS。此外, 样品 XY 面表现出分级微观结构特征, 细晶粒和粗晶粒结构沿熔池边界向中心依次分布, 基体中发现大量纳米沉淀, 主要由 Cr₂Nb 相、Cr₂O₃ 沉淀物和纳米 Cr 沉淀物组成。最后, 本工作发现为 EB-PBF 制备的 GRCop-42 铜合金在火箭发动机领域提供了性能参考。

C01-58

刀剪用马氏体粉末不锈钢材料的制备和热处理研究

刘文彬*

阳江职业技术学院

本文采用气雾化金属粉末进行热等静压制备 50Cr15MoVCu4 粉末不锈钢块体, 并轧制成高端刀剪材料板材, 研究了退火、淬火、深冷和高温时效等热处理工艺以及热变形对材料组织和性能的影响。实验表明, 通过高温时效, 材料可以获得 99.9% 抗菌率, 而硬度能够保持在 54HRC 以上, 实现了结构材料的功能化, 为批量生产抗菌不锈钢刀剪材料奠定了基础。

C01-59

固液复合扩散的 Al/Mg 双金属界面微观组织及性能调控

马运柱

中南大学

C01-60

阳极氧化结合放电等离子烧结改善 ODS-W/Cu 接头的界面组织和力学性能

桑长城¹、许荡¹、付凯超¹、陈睿智¹、陈鹏起^{1,2,3}、鲁颖炜^{1,2,3}、朱大焕⁴、徐虬⁵、程继贵^{*1,2,3}

1. 合肥工业大学材料科学与工程学院, 中国合肥, 230009

2. 安徽省粉末冶金工程技术研究中心, 中国合肥, 230009

3. 高性能铜合金材料及成形加工教育部工程研究中心, 中国合肥, 230009

4. 中国科学院等离子体物理研究所, 中国合肥, 230031

5. 京都大学综合放射与核科学研究所, 日本大阪, 590-0494

氧化物弥散强化钨 (ODS-W) 和铜 (Cu) 之间的界面结合性能对其在未来核聚变反应堆中的应用至关重要。ODS-W 和 Cu 之间的互不溶性和热膨胀系数的显著差异给这两种材料的连接带来巨大挑战。本研究利用阳极氧化和氢还原工艺在 ODS-W 表面形成纳米多孔结构, 并通过放电等离子烧结 (SPS) 实现 ODS-W 和 Cu 的有效结合。考察了阳极氧化参数对 ODS-W 表面形貌的影响, 以及连接温度对 ODS-W/Cu 接头界面微观结构和力学性能的影响。结果表明, 在 50V-40 min 的阳极氧化条件下, ODS-W 表面形成平

均孔径约为 90 nm 的纳米多孔结构。这一结构增加了表面粗糙度,从而在 SPS 过程中增强了 ODS-W 与 Cu 的界面结合。随着连接温度的升高,界面微观结构从直线型变为锯齿形,可有效抑制了裂纹的扩展,并在 ODS-W 和铜之间形成了更牢固的机械互锁,有效提高接头的力学性能。特别地,在 1000 °C 的连接温度下,阳极氧化 ODS-W/Cu 接头的拉伸强度达到 245.2 MPa,比直接连接接头的拉伸强度提高了 157.9 %;发现接头拉伸断裂主要发生在 Cu 基基体内部,其断裂模式由脆性断裂过渡到韧性断裂。

C01-61

高模量 Ti₂C-Ti 复合材料设计制备与变形行为研究

孙枫泊*

哈工大苏州研究院

围绕国家航天战略与产业安全,面向航空航天、汽车工业、电子通讯等领域的精密构件对高弹性模量、高强度、各向同性材料的需求,基于复合材料理论与金属热加工理论,提出金属陶瓷互镶嵌结构与协同变形机理。发明了互镶嵌结构高模量 Ti₂C-Ti 复合材料的制备方法,反应生成相互连通的 Ti₂C 骨架,通过载荷传递提高力学性能,含 75 vol.%Ti₂C 复合材料弹性模量最高可达 220.1GPa,比模量达 47.7GPa·cm³·g⁻¹。反应烧结过程中 Ti₂C 颗粒内未反应 Ti 长大形成大尺寸 Ti 片层,降温过程中过饱和 Ti₂C 内 Ti 原子直接析出形成小尺寸 Ti 片层。当 Ti₂C 含量为 75vol.%时,Ti₂C 承载并发生应变局域化,引发动态再结晶,由于晶粒细化、颗粒内 Ti 片层的减少以及变形过程中产生位错,热变形后材料纳米硬度提升。通过热加工变形实现了复合材料弯曲强度的提高。并揭示了 Ti₂C 内 Ti 片层形貌对复合材料断裂行为的影响规律。

C01-62

高导热氮化铝陶瓷中氧元素的赋存状态及调控

张智睿、吴昊阳*、李涛、傅斌、韩丽辉、秦明礼

北京科技大学

近年来微电子、航空航天等高技术行业飞速发展,功率模块与器件向小型化、高电压、大电流、高功率密度的方向发展,在工作过程中产生更高的热量,对系统散热效率的需求逐年递增。氮化铝(AlN)陶瓷因其高的热导率和绝缘特性常被用做散热基板。但受氧元素限制,目前商业制备的导热性距离理论值仍有很大的差距。氧对 AlN 陶瓷的导热性影响机制复杂,规律不清,并难以调控。本文发明了一种精确定量测量 AlN 陶瓷中氧元素含量及其分布的方法,将陶瓷内晶界相中氧含量(晶界氧)与固溶在 AlN 晶格中的氧含量(晶格氧)进行区分,定量研究了氧的赋存状态对热导率的影响规律。结果表明晶格氧是限制陶瓷热导率的主要因素,并据此提出三种控制晶格氧方法,最终制备了热导率 220 W m⁻¹ k⁻¹,抗弯强度 340MPa 的 AlN 陶瓷。

C01-63

Enhanced Sintering of Silicon Carbide Pellets via Rare-Earth Doping and Atomic Layer Deposition Modification

Jiquan Wang^{*1,2},Jiangping Du^{1,2},Yumeng Zhao^{1,2},Wenqing Wang³,Xiao Liu³,Yu Li^{1,2},Zongshu Li^{1,2},Rong Chen³

1. CNNC Key Laboratory on Fabrication Technology of Reactor Irradiation Special Fuel Assembly

2. China North Nuclear Fuel Co., Ltd.

3. School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology

Silicon carbide (SiC) ceramics exhibit exceptional properties that make them suitable for demanding applications such as nuclear reactors, where they are promising candidate materials for accident-tolerant fuel (ATF). Conventional SiC sintering processes typically employ aluminum oxide (Al₂O₃) and yttrium oxide (Y₂O₃) as sintering aids to enhance densification.

This study aims to advance existing sintering methodologies by improving performance metrics while reducing process demands. Specifically, this study targets reductions in sintering aid content, processing

temperature, and applied pressure. To achieve this, SiC powder was modified through two approaches: (1) doping with additional rare-earth oxides as sintering aids, and (2) surface modification via atomic layer deposition (ALD). Modified powders were subsequently densified using spark plasma sintering (SPS). Microstructural characterization was performed using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD). Sintering performance was evaluated through relative density measurements and thermal conductivity analysis of the sintering pellets.

Results demonstrate that both rare-earth oxide doping and ALD modification independently improve the relative density and thermal conductivity of SiC pellets. Significantly, the combined approach - integrating rare-earth doping with ALD treatment - yielded the most pronounced enhancement in sintering performance. This work provides valuable guidance for optimizing sintering aid formulations in next-generation accident-tolerant nuclear fuels.

C01-64

铜合金的高通量实验制备工艺、成分设计与性能研究

王怡含、雷前*

中南大学粉末冶金研究院

不同的成分和工艺对铜合金的组织 and 性能有着显著的影响。传统“试错法”大多依赖于研究人员的经验，耗时长、成本高，往往只能研究一种或几种成分及工艺，缺乏连贯性和系统性。数据驱动（基因工程）在材料设计和新材料开发方面显示出巨大的优势。高通量实验方法作为材料基因工程要素之一，可以快速获取大量数据，建立材料“成分-工艺-组织-性能”数据库。本研究针对几种典型的铜合金体系，围绕着工艺优化和成分设计进行了高通量制备、表征和分析，主要研究内容与结论概况如下：

(1) 结合 Cu-Ni-Si 合金的热变形、冷变形和时效过程分别设计了高通量实验方法，并利用机器学习辅助预测，建立了 Cu-Ni-Si 系合金的成分-工艺-性能数据库。其中，Cu-10Ni-1Si 合金在 550 °C 下时效 2 h + 冷轧 87.5% 后，其极限抗拉强度为 1364 MPa，屈服强度为 1295 MPa，导电率为 38.7% IACS。

(2) 采用扩散多元节技术制备关于 Cu-Ni 系的“九宫格型”扩散多元节样品，并对其固溶（900 °C/1 h）和时效（450 °C/1 h）热处理，结合电子探针，扫描电镜和纳米压痕测试等技术，获得了近千条关于成分-组织-工艺-性能铜合金数据，为铜合金成分设计和开发提供数据支撑。

(3) 激光辅助定向能量沉积技术制备了高通量梯度成分 Cu-Fe-Cr 合金，并采用 7 种算法模型进行机器学习，优化了不同退火时间的高硬度 Cu-18.6Fe-5Cr 合金。探索了一种 3D 打印技术和机器学习相结合的策略，以加速梯度铜合金的设计和制造。同时，也可作为高通量实验在粉末冶金中的应用提供新思路。

C01-65

石墨烯增强多主元合金基粉末冶金减摩耐磨材料的可控制备及润滑强化机理分析

叶雯婷¹、胡平*¹、周青²、王海丰²

1. 西安建筑科技大学

2. 西北工业大学

多主元合金由于其新颖的结构和优异的性能而成为航空航天等国防关键领域服役材料的理想选择。然而，面心立方单相多主元合金仍存在屈服强度低、摩擦系数高等问题而难以满足实际工程应用需求。石墨烯作为新一代碳纳米材料，是一种理想的自润滑增强相。将石墨烯作为增强相加入多主元合金有望显著提升多主元合金的力学与摩擦学性能。通过沉淀强化调控和叠层结构设计实现对石墨烯/多主元合金复合材料力学性能和摩擦学性能的深入研究，并结合多尺度计算模拟和 Tabor-Bowden 理论模型揭示了其潜在的润滑耐磨机制和强化机制，为多主元合金基复合材料的减摩抗磨设计和力学性能增强提供了技术指导和理论支撑，对推进自润滑耐磨多主元合金基复合材料的结构设计、应用和发展具有重要意义。

C01-66

热等静压温度对镍基粉末高温合金热变形行为及动态再结晶的影响

周靖程、阮晶晶、张华、朱礼龙*

精准材料高等研究院, 烟台大学, 烟台, 山东 264005

本研究以两种不同热等静压温度(1190°C与1230°C)制备的镍基粉末高温合金为研究对象,采用电子万能实验机进行等温压缩实验(温度范围1095-1155°C、应变速率0.001-0.1 s⁻¹),通过摩擦修正的真实应力-应变曲线,建立应变速率、流动应力和变形温度相关联的Arrhenius本构模型。通过电子背散射衍射(EBSD)和透射电镜(TEM)对压缩后的试样进行表征,分析合金的微观组织演变规律。基于动态材料模型(DMM)构建热加工图,揭示加工参数与微观组织演变的相互关联。本研究系统研究了两种热等静压制度对合金在热变形过程中流变行为、热加工图、微观组织演变和动态再结晶(DRX)机制的影响规律。为镍基粉末高温合金热加工工艺参数优化和微观组织调控提供了一定理论和数据支撑。

C01-67**NbC 钢结硬质合金的制备及其性能研究**

文明*

内蒙古科技大

钢结硬质合金是一种新兴的复合材料,它结合了硬质合金和钢的优点,不仅拥有硬质合金的高硬度、高强度和高耐磨性,同时还具备钢的可加工性、可热处理性和可焊接性,填补了两者之间的空白,因此在刀具、模具和耐磨零件等领域得到广泛应用。由于其优异性能,近年来在国内外受到广泛关注并取得重要进展。本文通过结合微波烧结和外加颗粒法,成功制备出了NbC钢结硬质合金,并对机械合金化、微波烧结、NbC含量以及羰基铁粉对其显微组织和力学性能的影响进行了系统研究。

机械活化可以减小合金粉末粒径,促进烧结进程。NbC的添加可显著提高钢结硬质合金的力学性能,随着NbC含量的增加,钢结硬质合金的密度、硬度和抗弯强度均呈现上升的趋势,当NbC含量为40wt%时,NbC钢结硬质合金力学性能达到最大值,密度、硬度以及维氏硬度分别为7.6g/cm³、603HV和734MPa。

微波烧结制备NbC钢结硬质合金时,使用一定比例的羰基铁粉代替还原铁粉可以有效提高NbC钢结硬质合金的力学性能,并降低烧结温度。随着羰基铁粉含量的增加,合金组织细化,致密化程度增加,密度和维氏硬度呈现上升趋势,加入30wt%羰基铁粉的NbC钢结硬质合金密度、硬度值最大,为7.71g/cm³和738HV。抗折强度在加入20wt%羰基铁粉时达到最大值,为764MPa。羰基铁粉对NbC钢结硬质合金有细化组织、促进材料致密化的作用

C01-68**Cf/SiC 表面 HfSi₂-ZrSi₂ 改性 SiC/ZrB₂-SiC/SiC 涂层的自致密行为、界面结合以及循环抗烧蚀性能研究**

唐鹏举*

中国矿业大学

料浆-高温烧结工艺简单、易操作且过程不受样品尺寸和外形等限制,同时所制备涂层的成分与结构具有良好的可设计性与调控性。但烧结过程中,刷涂于基材表面料浆内低熔点溶剂的挥发与分解以及常压/无压惰性环境烧结时烧结驱动力(压力)的缺失会导致烧结后涂层内部大量孔隙的出现。因此我们发明了一种Cf/SiC表面采用改进料浆和CVD工艺制备的HfSi₂-ZrSi₂改性SiC/ZrB₂-SiC/SiC三层涂层。添加的HfSi₂和ZrSi₂在创新性的有氧烧结工艺过程中可与O₂优先反应,生成具有流动性和粘度的SiO₂玻璃以封添修补裂纹与孔隙进而实现涂层的自致密。该涂层与基材结合良好,界面结合强度高达14.7MPa,可在1800°C高温下经受长达600s的等离子烧蚀考核。

C01-69**无粘结相硬质合金研究进展与应用新型**

张太全

厦门钨业股份有限公司/国家钨材料工程技术研究中心

C01-70

Al-Cu-Li 合金复杂环境服役行为及耐损伤机理研究

汤娅

湘潭大学 机械工程与力学学院, 湖南 湘潭, 411105

Al-Cu-Li 合金凭借其低密度、高比强度/模量等优异性能, 在航空航天领域应用前景广阔, 但其强度与耐损伤性能 (如断裂韧性、疲劳、腐蚀抗力) 之间的矛盾限制了其应用潜力。特别是在高温、高载荷、高盐等复杂服役环境下, 损伤行为与演化规律尚不明晰。本研究基于航空损伤容限设计准则, 通过系统考察高温强度、热暴露稳定性、断裂韧性、疲劳及腐蚀疲劳性能, 深入探究了自主研发新型 Al-Cu-Li 合金在 T6、T8 两种热处理状态下的复杂环境服役行为, 揭示了特征微结构与强韧性、疲劳及腐蚀性能的关联机制。研究表明: 随着温度升高, 合金抗拉强度显著下降而伸长率上升, 250°C 时分别为 283 MPa 和 12%; 经 150°C/1000h 热暴露后, 抗拉强度与伸长率分别为 599 MPa 和 4.2%。在载荷与腐蚀耦合作用下, T8 态合金展现出优异的抗应力腐蚀性能和高腐蚀疲劳抗力, 其腐蚀疲劳寿命可达 1.0×10^6 次。微观分析揭示, 腐蚀疲劳裂纹源区发生 T_1 相 (阳极) $\rightarrow$ AlCu 相 (阴极) $\rightarrow$ Al₄Cu₉ 相 (阴极) 的转变, 导致腐蚀坑处应力集中并引发裂纹。本研究阐明了 Al-Cu-Li 合金在复杂服役条件下多因素耦合损伤行为及内在机理, 为优化合金损伤容限设计、协同提升强韧性与耐损伤性能提供了关键理论依据。

关键词: 铝锂合金; 显微组织; 腐蚀疲劳

墙报**C01-P001****钴基合金层错能温度依赖性的第一性原理**

钟正*

湖南大学

钴 (Co) 及其合金因其优异的高温力学性能、耐腐蚀性和耐磨性, 广泛应用于涡轮叶片、硬质合金和生物医用植入体等关键领域。其中, 堆垛层错能 (SFE) 作为连接微观缺陷与宏观力学行为的关键参数, 在调控塑性变形机制和相变行为中起着重要作用。然而, 实验上对 SFE 的准确测量存在困难, 尤其在亚稳态金属体系中不确定性较大。因此, 本研究采用第一性原理方法系统研究纯 Co 及其合金的 SFE 与相变行为。本研究首先计算了掺杂 27 种过渡金属元素的 Co 在 0 K 下的本征 SFE, 发现晶格失配体积是主导因素之一, 而 3d 元素的强磁性效应也对 SFE 产生显著影响。ANNNI 模型成功预测了 SFE 的变化趋势。进一步地, 我们引入电子、声子、磁性和纵向自旋涨落贡献, 预测纯 Co 的相变温度为 660 K, 与实验值 690 K 高度一致, SFE 的温度依赖性也得到了验证。随后我们选取 V、Cr、Mn、Fe、Ni、W、Mo 和 C 等典型合金元素, 计算其在不同温度下的 SFE 和相变温度, 结果与实验数据良好吻合, 如 Co-6 at.% Fe 在 300 K 下的 SFE 与实验值一致, Co-0.93 at.% Cr 的预测相变温度为 750 K, 与相图数据相符。本研究为 Co 基合金的设计提供了可靠的理论依据。

C01-P002**碳化硼对金刚石钻头性能的影响研究**

徐强*

北京安泰钢研超硬材料制品有限责任公司

将碳化硼用于金刚石钻头烧结中, 探索碳化硼对干钻钢混金刚石钻头的机械性能和胎体的组织形貌的影响。选择掺入碳化硼浓度、成型压力、烧结温度作为影响金刚石钻头机械性能的工艺参数, 选择切割速度和钻头寿命比作为检测指标, 设计了正交实验方案, 并对实验结果进行了分析, 结果表明: 碳化硼在胎体中起到了骨架元素的作用, 因其比铁等骨架元素更耐高温、耐磨等优良性能, 使得胎体的耐磨性能进一步提高。碳化硼和其中的游离态单质可以通过直接作用或间接作用达到改善金属胎体烧结性能、促进金属胎体与金刚石之间界面反应的目的, 使得金属胎体与金刚石复合材料的界面结合性能得到提高; 对胎体合金起到组织均匀、细化的作用, 也有利于强化胎体合金与金刚石颗粒之间的黏结。掺入碳化硼的金刚石锯

片胎体对金刚石的把持力有所提高,随着掺入碳化硼浓度的增大把持力也相应增大。在钻切条件相同的条件下,掺碳化硼钻头的钻切速度均快于未掺碳化硼钻头,随着掺入碳化硼浓度的增大钻切速度相应加快。在钻切相同的长度后,掺碳化硼金刚石钻头的磨耗比较小,相对于掺碳化硼钻头寿命明显提高,随掺入碳化硼的浓度增大寿命延长。

仅发表论文

C01-PO001

铁含量对粉末冶金电磁兼容 Cu-Fe 合金组织和性能的影响

陈志鹏¹、李佳欣¹、桑长城¹、陈鹏起^{1,2}、程继贵^{*1,2}

1. 合肥工业大学材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009
2. 安徽省粉末冶金工程技术研究中心, 安徽 合肥, 230009

以还原铁粉和电解铜粉为原料,制备成形混合料,经压制和不同温度烧结制得 Fe 含量为 10-30wt.%的 Cu-Fe 烧结体试样。对烧结体试样的密度、硬度、显微组织、电性能和磁性能等进行测试分析。结果表明,随着 Fe 含量的增加,合金的密度降低。Cu-20Fe 试样的硬度随烧结温度的升高而增大,最高可大 79 HV5。同时,随着 Fe 含量的增加,试样电导率逐渐减小,最大的电导率为 72.5 %IACS;合金的饱和磁化强度逐渐增大,最大饱和磁化强度为 6.1 emu/g。随着烧结温度的升高,烧结体试样电导率先增大后减小,而 Cu-30Fe 试样的电导率呈略微增大的趋势,试样的最小电导率为 36.6 %IACS。Cu-Fe 烧结体试样的饱和磁化强度随烧结温度的升高先增大后减小,最小的饱和磁化强度为 1.8 emu/g。

C01-PO002

粉末热等静压与增材制造 GH4099 合金性能的对比研究

尹一峰^{1,2}、吴杰¹、卢正冠¹、徐磊^{*1}

1. 中国科学院金属研究所 师昌绪先进材料创新中心
2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院

本研究基于等离子旋转电极雾化法(Plasma rotating electrode process, PREP)制备高洁净度 GH4099 预合金粉末,系统对比了热等静压(Hot isostatic pressing, HIP)与选区激光熔化(Selective laser melting, SLM)两种成形工艺制备的合金经标准热处理后的综合性能。结果表明:相较于增材制造技术,热等静压制备的粉末 GH4099 合金在关键力学性能上具有显著优势——室温条件下其抗拉强度(1154 MPa)与屈服强度(714 MPa)均高于增材制造试样(1136 MPa/672 MPa),同时 900℃高温环境下在保持相当屈服强度(302 MPa)的前提下,延伸率(30.3%)较增材制造试样提升超 10%。机理分析表明,粉末热等静压工艺通过精准调控显微组织均匀性,显著优化合金高温变形能力,实现室温强度与高温塑性的协同提升。本研究证实热等静压技术在高温合金领域具备优异的组织-性能调控能力,为 GH4099 合金高性能化制备及复杂构件工程应用提供重要依据。

C01-PO003

Ti2AlNb 合金与钛合金箔材点焊强度与参数研究

刘洪成^{1,2}、尹一峰^{1,2}、卢正冠¹、徐磊^{*1}

1. 中国科学院金属研究所 师昌绪先进材料研究中心
2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院

本研究自主设计了一种电阻点焊(Resistance spot welding)强度拉伸测试工件,用于研究 Ti2AlNb 合金基底与钛合金箔材点焊强度。通过热等静压(Hot Isostatic Pressing, HIP)制备粉末 Ti2AlNb 合金基底,利用电阻点焊技术,将 TC4、TA15 和 Ti65 三种不同的钛合金箔材固定在 Ti2AlNb 合金测试工件底座上,分别在室温、100℃、200℃、300℃、400℃、500℃、600℃、650℃下进行强度测试。结果表明:三种箔

材均在 100-200°C 的温度范围内达到了载荷的峰值, 其中 TC4 在 100°C 达到峰值 180.9 N, TA15 在 200°C 达到峰值 276.3 N, Ti65 在 200°C 达到峰值 183.5 N; 当温度超过 200°C 后, 三种箔材最大载荷均呈现出逐步递减的趋势。综上所述, 应用温度为 200°C 以内推荐使用 TC4 箔材, 200°C-400°C 推荐 TA15 箔材, 400°C 以上推荐 Ti65 或 TA15 箔材; 对不同热输出功率的焊点进行分析, TC4 箔材在小于 60 W 时无缺陷, TA15 和 Ti65 分别在大于等于 36W 和 48 W 时出现咬边。结果表明 TC4 箔材工艺适应性最优, 同时热输入功率在 36-48 W 内箔材焊点不易出现咬边。本研究为 Ti2AlNb 合金与钛合金箔材的电阻点焊工艺提供了参考, 表明电阻点焊工艺能够实现钛合金基底与箔材的高强度焊接, 为航空发动机高温传感器封装等应用提供工艺依据。

C01-PO04

低能高通量 He⁺辐照条件下 W-La₂O₃ 复合材料的组织性能研究

付凯超^{1,2}、舒云祥^{1,2}、许荡^{1,2}、桑长城^{1,2}、陈睿智^{1,2}、陈鹏起^{1,2,3}、程继贵^{*1,2,3}

1. 合肥工业大学材料科学与工程学院, 安徽合肥, 230009

2. 安徽省粉末冶金工程技术研究中心, 安徽合肥, 230009

3. 高性能铜合金材料及成形加工教育部工程研究中心, 中国合肥, 230009

低能高通量氦离子(He⁺)辐照会使钨(W)表面发生严重的侵蚀和损伤, 在 W 表面形成缺陷、孔洞和 Fuzz 结构。Fuzz 结构的出现会降低热导系数, 改变表面的可耐受温度分布, 劣化材料表面从而降低材料的抗辐照性能。在辐照过程中 He⁺倾向于在大角度晶界处聚集形成 He 泡, 引入氧化镧(La₂O₃) 第二相, 能有效降低材料表面的大角度晶界占比, 阻碍了 He 泡的形成。相较于纯钨(PW), 含有 1%(质量分数)La₂O₃ 第二相的 W-La₂O₃ 复合材料表现出更高的抗 He⁺辐照能力。在 He⁺能量为 34 eV、束流为 2.9147×10^{21} ions/m²s 且剂量达到 3.498×10^{24} ions/m² 的辐照条件下 PW 表面局部已经形成了 Fuzz 结构, 但 W-La₂O₃ 复合材料表面并未形成 Fuzz 结构, 而是出现了一种类似于波浪状的表面结构。采用 SRIM 软件的全损伤模式对离子注入过程进行模拟发现, La₂O₃ 第二相能将聚集在 W 表面的 He⁺转移到材料远离辐照表面的更深处, 能有效延缓 He 泡在辐照表面的形成, 延迟了材料表面 Fuzz 结构的生成。