



中国材料大会 2024
暨第二届世界材料大会
CMC 2024 & WMC 2024

July 8-11, 2024
Guangzhou, China

C01-粉末冶金
C01-Powder Metallurgy

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.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、钟可祥、王社权、刘辛、马运柱

C01-01**铁基粉末冶金制品高性能化与应用**

曲选辉

北京科技大学

C01-02**纳米碳构型设计与铜基复合材料性能协同提升研究**

易健宏

昆明理工大学

C01-03**钨合金高应变率动态加载变形行为与机制**

刘文胜

中南大学

C01-04**CrTaVW 难熔高熵合金相组成和力学性能研究**

付晓雨、李昱嵘、侯超、宋晓艳*

北京工业大学材料科学与工程学院，新型功能材料教育部重点实验室

难熔高熵合金 (RHEAs) 在中温条件易发生相变，导致相组成偏离预期设计，从而显著影响其性能。在较宽的温度范围内准确预测相组成和调制相稳定性对于开发性能优越的 RHEAs 至关重要。在本研究中，通过热力学模拟和第一性原理计算相结合研究了 CrTaVW 合金体系的相组成和相变温度，评价了 V、W 原子占据位置和掺杂量对 Laves 相 TaCr₂ 稳定性的影响。在 TaCr₂ 中，V 或 W 原子都倾向于占据 Cr 位点。由于费米能级的电子密度降低，V 比 W 表现出更强的合金化能力。随着掺杂量的增加，V 和 W 对 TaCr₂ 相的形成和结构稳定性的影响趋势相反。计算了不同元素组成的 Laves 相和固溶体相的吉布斯自由能，预测了相变的临界温度，合金在 1645 K 以下生成 C15 立方结构的多组元 Ta(CrVW)₂ Laves 相。通过实验验证了预测的相变行为，同时分析了 Laves 相对 CrTaVW 合金力学行为的影响规律，与单相固溶体合金相比，Laves 相的存在可以显著提高合金的硬度和耐磨性，但降低压缩强度，且 Laves 相含量与硬度和耐磨性呈正相关趋势，与强度呈负相关趋势。该研究为调制 RHEAs 相组成、实现理想的相稳定性，进而提高力学性能提供了指导。

C01-05**通过超声流变成型制备超低磁损耗和高直流偏置的局部自适应绝缘非晶粉芯**

李泓臻，杨超*

华南理工大学

非晶粉芯具有优异的高电阻率和高频特性，是下一代电力电子设备（电机和发电机）中的首选材料之一。然而，非晶粉芯存在着许多难以克服的挑战，特别是内部大量气隙存在和冷压实过程中内应力累积，这两点都会显著降低软磁特性。在此，我们报告了通过超声流变成型在非晶粉芯中形成双凹透镜的局部自适应绝缘结构。与传统的冷压非晶粉芯相比，新型非晶粉芯的磁导率从 32.4 提高到 43.3，并且，其直流偏置从 69% 提高到 87% (100 Oe)，克服了磁导率和直流偏置之间的权衡问题。特别是，在 100 mT 的磁场和 100 kHz 的高频率下，新型非晶粉芯损耗低至 13.73 kW/m³，约为冷压非晶粉芯的二十分之一 (282.84 kW/m³)。双凹透镜绝缘结构可有效缓冲高应力对磁粉颗粒磁化的影响，使制造出的非晶粉芯保持更好的

磁化效率，从而在极低内应力和较低孔隙率的共同作用下获得优异的软磁特性。新型非晶粉芯可跳过复杂耗时的传统绝缘包覆过程，有望作为下一代电力电子器件的替代核心元件，实现高频微型化和低损耗。

关键字：非晶磁粉芯；超声流变成型；软磁性能

C01-06

先进钨基复合材料制备与应用研究进展

吴玉程
合肥工业大学

C01-07

钼-铼合金辐照硬化行为的铼偏析效应

丁向东
西安交通大学

C01-08

核用 SiCf/SiC 复合材料及包壳制备技术研究

熊翔，陈招科，张红波，吴宗绪，徐振男，谢冯旻煜
中南大学 粉末冶金国家重点实验室

SiCf/SiC 复合材料因具有优异的高温强度、良好的化学惰性及强中子辐照环境中的优异稳定性，是压水堆核燃料包壳的最佳候选材料。报告介绍了中南大学近几年在核包壳用 SiCf/SiC 复合材料方面取得的一些进展，主要涉及包壳所用纤维的高温稳定性、新型界面、预制体结构、基体设计及致密化以及高纯高结晶涂层的关键问题研究，以及小批量米级 SiCf/SiC 复合材料包壳的制备技术及平台能力。

C01-09

粉末冶金 Ti-Al-Mo-Zr 钛合金的制备和力学性能研究

叶子立，谭亚宁，张卫文，刘乐华，杨超，王智*
华南理工大学

钛及钛合金具有高比强度、良好的耐高温性、耐腐蚀性和生物相容性等特性，目前广泛应用于航空航天、海洋工程、船舶制造和化工工业领域。粉末冶金钛合金具有致密度高、组织均匀、成分可控、可近净成型和材料利用率高等优点。然而在高温保温过程中原始 β 晶粒容易发生粗化，恶化力学性能，对此，本报告将介绍一种新型 Ti6Al3Mo1Zr 钛合金，该合金基于 Ti6Al4V 合金，利用 Mo、Zr 元素高温扩散速率较慢的特点，在相似铝-钼当量的基础上，以 Mo 和 Zr 元素替代贵重 V 元素，采用热压烧结工艺和热挤压工艺制备，获得组织细小的粉末冶金钛合金，从而提高钛合金的室温及高温力学性能，并进一步降低钛合金的成本。所制备 Ti6Al3Mo1Zr 合金通过 α/β 界面强化、Hall-Petch 细晶强化和固溶强化，所得合金的室温抗拉强度、屈服强度和断后伸长率，均显著高于 Ti6Al4V 合金。此外，还在 Ti6Al3Mo1Zr 合金的基础上，添加少量 B 元素以细化晶粒，改善微观组织并提高力学性能，TiB 颗粒弥散分布在组织中，所制备 Ti-6Al-3Mo-1Zr-0.1B 合金晶粒尺寸进一步细化，且从较为粗大魏氏组织变为较为细小均匀的等轴组织，具有较为优异的力学性能。

C01-10

超快速高温烧结制备金属铜及机理研究

陈鹏起^{1,2}，杨建¹，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

与传统粉末冶金法相比，快速烧结可将传统烧结时间大幅度缩短，近年来新兴的超快速高温烧结（UHS）技术更是在短时间内实现材料致密化，在金属材料制备上前景巨大。本文以纯 Cu 粉末作为烧结对象，探究 UHS 技术制备金属铜材的工艺与致密化机理。选取不同形貌但粒度接近的电解铜粉、不规则铜粉和球形铜粉作为原料，采用 UHS 技术在 1050 °C 下进行烧结。三者中球形 Cu 粉烧结体致密度最高，达到了 96.35%。由球形 Cu 粉烧结制备的试样显微硬度达到 64.23 HV，拉伸强度为 195.12 MPa，同样远高于其他两种粉末。证明了球形的纯铜粉末适合进行 UHS 烧结。烧结动力学结果显示，在 UHS 烧结前期，致密化激活能（19.04 kJ/mol）低于晶粒生长激活能 38.83 kJ/mol，致密化进程占据优势；在 UHS 烧结后期，致密化激活能（103.43 kJ/mol）与晶粒生长激活能（113.82 kJ/mol）数值均与纯铜晶界扩散激活能数值接近，致密化与晶粒生长均受晶界扩散控制。

C01-11

烧结及退火工艺对铁基软磁材料磁性能的影响

吴乔越*

合肥工业大学

掺磷的铁基软磁材料可广泛应用于新能源、信息、交通及航空航天等领域。然而，磷元素的引入虽能提升铁基软磁材料的力学性能，但会导致其饱和磁感应强度的降低。本工作以工业生产的 FY-4500 (含磷 0.45% 的铁磷软磁材料)为研究对象，探讨了烧结气氛及退火温度对 FY-4500 材料磁性能的影响规律。结果表明，与采用分解氨烧结的产品相比，采用 10%H₂+90%N₂ 混合烧结气氛结合 700 °C 退火工艺所得产品的磁性能获得显著提升，其饱和磁感应强度比前者高 10%，矫顽力低 35%。

C01-12

WC 内含颗粒相超粗晶硬质合金的制备及力学性能研究

刘雪梅*、王庆腾、王海滨、吕皓、宋晓艳

北京工业大学

超粗晶硬质合金因具有较好的耐磨性、抗冲击性及抗热疲劳性等特点而广泛应用于掘进、开采等领域。为进一步提高硬质合金工件的服役性能，急需在保持其韧性的同时显著提高其强度、硬度和耐高温性能。目前常用的 Co 相强化方法在一定程度上提高了硬质合金的力学性能，但硬质合金中 Co 含量较少，靠强化 Co 相对力学性能提高有限。课题组前期研究表明，外力作用下超粗晶硬质合金中出现大比例的 WC 穿晶裂纹，且 WC 发生了较大的塑性变形。本研究拟通过制备在 WC 中产生析出颗粒相的粗晶/超粗晶硬质合金，探索其力学性能提高的新途径。研究表明，在原料粉中添加纳米尺度的 ZrC 颗粒和超细晶 WC-Co 复合粉，可制备出 WC 晶粒内析出富 Zr 颗粒的粗晶/超粗晶硬质合金。富 Zr 颗粒尺寸分布和数量主要受超细晶 WC-Co 复合粉添加量、原料粉末碳含量及 ZrC 粉末的添加量的影响。富 Zr 颗粒相对位错的钉扎使 WC 强化是超粗晶硬质合金具有优异的室温和高温性能的主要原因。

C01-13

增材制造 Ti-1Al-8V-5Fe 亚稳 β 钛合金组织性能调控研究

张学哲 周全 王建

西北有色金属研究院 金属多孔材料国家重点实验室 西安 710016

Ti-1Al-8V-5Fe (Ti-185) 合金作为一种典型超高强度亚稳 β 钛合金在 20 世纪 50 年代被美国开发，但采用传统的熔炼方法制备时，易产生铁元素偏析，形成“β”斑，严重降低合金的力学性能。通常情况下，该合金需采用多次熔炼、热变形加工、后续热处理等方法来防止这种成分偏析，增加了制备工序和成本，同时也不利于制备该合金的复杂构件。增材制造技术具有微熔池、高冷却速率、无模具、周期短等一系列优点，有望制备成分均匀的 Ti-185 合金。本次报告将首先根据 Ti-185 合金的强化特点，以 PREP 制备的球形粉末

为原料，采用电子束粉末床熔融技术（EB-PBF）制备 Ti-185 合金，并研究了固溶时效热处理对 EB-PBF 成形 Ti-185 合金显微组织和力学性能的影响。根据获得的时效温度，采用合金成分设计和调控底板温度两种技术方法，均直接获得高强 Ti-185 合金。

C01-14

γ/γ' 高温合金中成分依赖的示踪扩散和相变互扩散的第一性原理研究

罗海玉、刘文胜、马运柱、梁超平*

中南大学轻质高强结构材料国家级重点实验室

互扩散是固体材料中最重要的原子过程之一，与许多材料行为密切相关，如时效、腐蚀、蠕变等。在过去的一个世纪中，扩散理论的研究者们，如 Kirkendall、Darken、Matano 等人，对晶体固体中的互扩散的现象学和原子机制做出了重大贡献。尽管目前可以通过基于 Matano 的方法或数值逆方法提取扩散系数，但互扩散背后的物理本质仍有待深入挖掘。目前，第一性原理计算在获得原子自扩散和杂质扩散系数方面取得巨大成功。然而，对 $L1_2$ 结构中成分依赖的示踪扩散的原子理论或第一性原理计算都还不完整和自洽。基于此，本次工作系统地总结和推导了 γ/γ' 超合金（ $A1/L1_2$ 体系）中随成分变化的示踪扩散系数和互扩散系数的计算公式。其中影响扩散系数的各个因素，如扩散能垒、跳跃频率、缺陷浓度、关联因子、溶剂增强因子等，都能通过第一性原理计算结合 CI-NEB 方法和准谐热力学准确获得。我们发现，反位桥（ASB）和五频率模型（FFM）能够指导 γ/γ' 中原子扩散，且不同的 γ/γ' 体系中原子扩散行为各不相同。通过分析两种扩散模型的简并态及其电荷密度分布规律，我们提出了指导优先扩散模型选取的解耦规则。此外，通过 Matano-Boltzmann 方程的解析解，我们获得了 γ/γ' 超合金的成分和相界面迁移规律。本次研究结果不仅与实验扩散结果高度一致，且揭示了新推导的扩散公式在互扩散及相关物理现象中的本质和作用。

C01-15

粉末挤出 3D 打印装备研发及其在超细晶钨合金复杂构件增材制造中的应用

刘业^{1,2}、熊心润²、吴敏^{1,2}、马宗青³、熊翔*¹

1. 中南大学
2. 深圳升华三维科技有限公司
3. 天津大学

钨是典型的难熔金属和难成形材料。具有超高的密度、硬度、光泽度和质感，耐腐蚀性、延展性及导热性好，电性能优良，抗拉强度高，低热膨胀，吸收射线能力强。目前钨合金制造主要采用粉末冶金方式，其生产投入成本高、工艺开发周期长、受到模具的限制，无法制备出形状复杂的钨结构。而 3D 打印技术可以实现无模化生产，钨合金的 3D 打印一直是业内研究热点和攻克难点；粉末挤出打印技术是融合“3D 打印”和“高分子”交叉学科的新方法，经数字模型构建，通过熔融挤出钨合金混合喂料，在低温下（200°C）可以成型复杂生坯，再经过高温烧结，最终实现成分均匀、孔隙率低、高性能的产品，其性能与传统模压水平接近。研究表明：粉末挤出打印（PEP）技术是通过“3D 打印”和“高温烧结”相结合的新技术，可以制备高比重钨合金。在 h_2 气氛下通过两步烧结法，可获得最佳烧结性能。96W-2.7Ni-1.3Fe 的密度可达 99.1%，且拉伸强度为 801MPa，延伸率为 22.1%。经过适当的热处理后，性能进一步提高拉伸强度为 838MPa，延伸率达到了 26.1%。成分精确可控，无论是在烧结过程还是热处理过程，都不会产生脆性相。钨基合金和/或其他耐火金属的增材制造提供了一种新的技术方法。

C01-16

稀土钨基材料研究进展

王金淑

北京工业大学

C01-17**稀有金属钽铌合金及涂层材料在航天领域的应用**

周小军
中色东方集团

C01-18**高催化活性耐腐蚀 Fe-Ti-O 磁流变复合粉末的制备与性能表征**

陈峰
广东省科学院新材料研究所

磁流变加工是高效抛光单晶碳化硅的候选技术之一。在保障磁性能的同时，提高铁基磁性粒子的催化活性及其耐腐蚀性能，对于提高磁流变加工效率，降低加工成本具有重要意义。本工作以 Fe_2O_3 和 TiH_2 为原料，采用球磨+还原(R1)、球磨+煅烧(R2)和球磨+煅烧+还原(R3)3种工艺制备 Fe-Ti-O 复合粉末，研究了 TiH_2 含量(5 wt.%-15 wt.%)对复合粉末物相组成、微观形貌、催化活性和耐腐蚀性能的影响。结果表明，经过球磨处理可以获得成分均匀的亚微米级 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiH}_2$ 两相混合粉末。采用R1工艺制备的粉末由2微米左右的 Fe 颗粒和异常长大的 FeTiO_3 颗粒组成。随着 TiH_2 含量增加， FeTiO_3 颗粒的尺寸变大，致密度增加。采用R2工艺制备的粉末主要由 Fe_3O_4 和 Fe_2TiO_4 组成。随着 TiH_2 含量增加， Fe_2O_3 逐渐向 Fe_3O_4 、 FeO 和 Fe 转变，同时 Fe-Ti-O 颗粒异常长大现象得到抑制。采用R3工艺制备的粉末由500-800 nm的 Fe_2TiO_4 颗粒团聚而成，30-200 nm的富铁颗粒均匀地分布在 Fe_2TiO_4 颗粒中，形成独特的费列罗结构。磁性测试、甲基橙降解实验和电化学测试结果表明，当 TiH_2 含量为15 wt.%时，采用R3工艺制备的 Fe-Ti-O 复合粉末的比饱和磁强度满足磁流变加工要求($\geq 50 \text{ emu/g}$)，且具有最优的催化活性和耐腐蚀性。本研究可为高性能磁流变粉末的设计与制备提供借鉴。

C01-19**POM基原料压缩成型高密度 7075 铝合金的组织与力学性能**

邹恒、孙亿、熊慧文、陈梦熊、康潇*
中南大学

金属注射成型铝合金(MIM-Al)因其轻质、耐腐蚀、导热性好而备受关注。然而，由于其粉末难以烧结，力学性能差，因此难以制备出高质量的MIM-Al。在此文中，我们报告了一种使用聚甲醛(POM)与7075铝合金粉末为基础的原料制造高密度7075Al合金零件的简单压缩成型工艺。采用高氮流量无压烧结促进烧结致密化过程。对原料的润湿行为、流变性能和形貌进行了表征，结果表明，该原料具有剪切减薄的特性，黏度适宜于POM-PP-SA粘结剂。通过控制压紧压力、模具温度和保温时间，获得了形状保持良好、组织致密的绿色齿轮件。研究了工艺因素和烧结温度对7075Al合金显微组织和力学性能的影响。值得注意的是，在 610°C 下烧结的铝合金部件表现出优异的性能，相对密度达到97.6%，抗拉强度达到214.8 MPa。这一成果为通过压缩成型工艺实现复杂形状铝合金部件的工业应用奠定了基础。

C01-20**极端制动速度($\geq 350\text{km/h}$)下高铁用铜基制动闸片的摩擦磨损行为研究**

张鹏、章林*、曲选辉
北京科技大学新材料技术研究院

铜基粉末冶金制动闸片在时速200至350公里的商用高速列车制动系统中发挥着关键作用，而其在 350km/h 及以上的极端高速下紧急制动性能却少有研究。在本研究中，通过使用1:1台架，我们研究了铜基制动闸

片在 350km/h 及以上紧急制动时的制动性能和摩擦磨损机制。结果表明, 具有更强润滑性的片状石墨和加速氧化膜生成的铁颗粒的增加反而导致了摩擦磨损性能和噪声性能的恶化, 比如对制动压力高度敏感、严重的摩擦系数衰退现象、高声压级和高频噪声。这是因为片状石墨削弱了摩擦面的强度, 加剧了摩擦界面的不稳定性, 导致片状石墨和氧化膜不能稳定存在于摩擦表面。而在 400km/h 的重复紧急制动条件下, 平均摩擦系数可以保持在 0.3 左右, 并在六个制动循环内保持稳定。随后, 随着制动距离的显著增加, 平均摩擦系数出现了衰减现象, 而在整个测试过程中, 平均磨损损失相对较高。摩擦膜和基体的微观结构特征表明, 强氧化在刹车片的失效过程中起着重要作用。主要由氧化物组成的摩擦膜表现出许多缺陷, 这些缺陷在制动过程中容易剥落, 从而影响耐磨性。此外, 随着制动循环的积累, 氧化逐渐侵入并削弱基体, 导致富铜摩擦膜在摩擦界面上剧烈迁移, 导致摩擦性能恶化。这项工作为铜基制动片在更高制动速度下的失效行为提供了有价值的见解, 同时认为高性能铜基制动片的设计原则应努力实现多种性能的平衡, 如强韧性、润滑性以及与配合盘的匹配, 单独考虑一个方面往往不能保证取得最佳结果。

C01-21

球形 W-ZrC 粉末制备及其 LPBF 成形性能研究

高雪妮^{1,2}、莫哲^{1,2}、郝振华*^{1,2}、马如龙^{1,2}、王培³、舒永春^{1,2}、何季麟^{1,2}

1. 郑州大学 材料科学与工程学院
2. 中原关键金属实验室
3. 河南工业大学

添加纳米颗粒是降低激光粉末床熔融制备钨构件中裂纹密度的有效手段。然而目前研究中纳米颗粒通常是通过机械混合的方法引入原料球形钨粉中, 导致粉末流动性和松装密度等性能下降, 不利于后续的打印过程。针对此问题, 本研究以 3 μm 钨粉和纳米 ZrC 粉末为原料, 利用喷雾造粒得到多孔近球形粉末, 再通过射频等离子体球化得到致密的球形 W-ZrC 粉末, 对球化粉末的物相组成、微观形貌、元素分布、粒度分布、流动性以及松装密度进行了检测分析, 研究了球形粉末中 ZrC 的分布和存在形式。最后, 以射频等离子体球化所制备的球形 W-ZrC 粉末为原料经激光粉末床熔融得到了 W-ZrC 零件, 重点研究了打印工艺对成品构件的致密度和力学性能的影响, 探究了 ZrC 的增强效果及强化机理。研究表明, 采用喷雾造粒结合等离子球化的方法制备所得的球形 W-ZrC 粉末的 Zr 元素自内而外均有分布, 且在表面产生富集。其流动性和松装密度分别为 7.5 s/50g 和 9.36 g/cm³, 粒度分布窄, 集中分布在 15-33 μm , 适用于激光粉末床熔融工艺。此外, ZrC 经等离子球化后进入钨晶粒中, 导致钨晶粒产生位错。用球形 W-ZrC 粉末经激光粉末床熔融过程制得的 W-ZrC 打印件相对密度可达 98.82%, 明显优于相同工艺下制备的纯钨零件, 且与纯钨零件相比, 开裂问题得到明显改善, 显微硬度达 591.89 Hv, 抗压强度为 1.6 GPa。

C01-22

铍铝合金技术发展与展望

谢焱 王东新 李军义 康宝宁 万庆峰 张新辉 李志年 张健康 罗文 钟景明*

西北稀有金属材料研究院宁夏有限公司

本文概述了铍铝合金的性质与用途, 分析了国内外铍铝合金的研究和应用现状。研究了雾化制粉新技术, 制备了球形度高、氧含量低的铍铝预合金粉末, 采用粉末冶金的方式成形高性能铍铝合金, 合金的拉伸强度可达到 385.5MPa, 屈服强度达到 305.9 MPa, 延伸率大于 5%; 根据第一性原理计算结果, 设计了铸造铍铝合金的成分, 研究了铍铝合金的热物性参数, 实现了铍铝合金凝固过程中的温度场和流动场的模拟仿真, 准确率可达到 85%以上, 基于仿真的结果, 优化浇铸系统设计, 提高了合金的力学性能, 改善了铍铝合金铸件的内部质量, 合金的拉伸强度可达到 250MPa, 屈服强度达到 190 MPa, 延伸率大于 3%, 内部缺陷小于 4 级; 完成铍铝合金表面防护技术的研究并实现产业化应用, 提高铍铝合金在复杂环境下的服役寿命。

关键词: 铍铝合金、成分设计、雾化制粉、热物性参数、表面防护

C01-23**元素固溶对超细晶硬质合金高温性能的影响**

宋晓艳*、罗磊、王海滨、吕皓、刘雪梅
北京工业大学

超细晶 WC-Co 硬质合金在切削加工服役过程中因高温工况常导致硬度、强度、耐磨性等性能明显下降。本报告介绍研究团队关于超细晶硬质合金高温力学行为研究的新进展。探索了固溶元素对超细晶硬质合金微观组织结构、力学性能的影响规律和强化机理，结合计算预测了不同的添加元素对 Co 基固溶体和 WC 基固溶体的结构稳定性、变形能力和高温抗氧化性的影响。研究结果为满足高温承载条件下具有优越综合性能的 WC-Co 类超细晶硬质合金的成分设计提供参考。

C01-24**国内热等静压装备与技术发展现状**

王铁军
安泰科技股份有限公司

C01-25**粉末冶金一步制备 SPTAs/CLAM 连接件及其性能评价**

谭晓月*，刘树远，徐晨钧，高照，陈昱溟，罗来马，吴玉程

1. 合肥工业大学 材料科学与工程学院 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 有色金属加工与国家地方联合工程研究中心 安徽 合肥 230009

从安全运行的角度考虑，自钝化钨合金(SPTAs)和中国低活化马氏体钢(CLAM)分别有望成为未来核聚变反应堆的第一壁和结构材料。然而，由于 SPTAs 与 CLAM 钢之间存在冶金反应，且熔点和热膨胀系数差异大，制备 SPTAs/CLAM 构件面临微观组织控制难、不可避免的残余应力和脆性金属间相形成等挑战。采用放电等离子烧结(SPS)技术直接固相制备 SPTAs/CLAM 接头，并引入钒中间层来缓解热应力。

粉末冶金一步制备 SPTAs/CLAM 接头的关键是梯度温度场的设计。在建立电热接触模型的基础上，利用 COMSOL Multiphysics 软件模拟 SPTAs/CLAM 连接件 SPS 固结过程中的温度场，并对石墨模具的几何形状和尺寸进行优化。发现在阶梯型石墨模具中可以实现 251°C 的急剧温度梯度。在此模拟结果的基础上，利用 SPS 技术制备 SPTAs/CLAM 和 SPTAs/V/CLAM 连接件。具有波浪界面的 SPTAs/CLAM 连接件可承受 20 次热疲劳试验(300~700°C)，其抗剪强度为 246±11 MPa; SPTAs/V/CLAM 连接件只能承受 10 次热疲劳试验，其抗剪强度为 295±6 MPa。通过微结构表征，可以发现这是由于波界面可以有效地缓解热应力，而 V 夹层可以避免脆性金属间化合物(Fe-W)的形成。此外，还讨论了电流方向对界面处脆性相形成的影响。这些探索都是为实现高性能 SPTAs/CLAM 连接头而开发的可靠技术，有望在未来的聚变反应堆中得到应用。

C01-26**氧化钇的添加对铜基钢背自润滑轴承材料组织与性能的影响**

尹宁康*
江西理工大学

铜基钢背自润滑材料具备自润滑、耐腐蚀和承载能力强的特性，具备广阔的发展前景。本文研究了机械合金化法下氧化钇的添加量对铜基钢背自润滑材料冶金层的显微组织、硬度、摩擦磨损等性能的影响。研究表明，氧化钇的添加能够对铜基冶金层进行弥散强化，在冶金层中形成 Cu-Y₂O₃ 支撑骨架，从而增强

铜基钢背自润滑材料整体强度，表面硬度提高 15-30HB；提高冶金层摩擦性，摩擦系数最低为 0.08；改善铜基冶金层与钢基体间的结合力，结合面剪切强度提升 20-40Mpa。综合氧化钇的最佳添加量为 1%。

C01-27

X 射线原位 CT 在粉末冶金领域中的应用

李仁庚*

南京工业大学

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

C01-28

(Nb, V, Ta, Mo, W)C 高熵陶瓷的制备与组织性能研究

胡强、常贺强、宋晓艳*

北京工业大学材料科学与工程学院，新型功能材料教育部重点实验室

难熔金属碳化物高熵陶瓷具有独特的微观组织结构、庞大的成分调控空间及诸多潜在的优越性能，近年来受到国内外研究人员的广泛关注。针对目前难熔金属碳化物高熵陶瓷制备中烧结温度高、晶粒粗大、组织均匀性差、致密化困难、力学性能较低等问题，本研究以(Nb, V, Ta, Mo, W)C 高熵陶瓷为研究对象，提出了一种快速热压结合二步烧结法制备难熔金属碳化物高熵陶瓷的新工艺。研究表明，提高烧结压力能有效降低难熔金属碳化物高熵陶瓷的致密化温度和固溶温度。此外，基于二步烧结工艺，先在较高压力及特定较高温度下短时间内实现难熔金属碳化物高熵陶瓷的初始致密化和元素固溶，随后降低烧结温度，在较低烧结温度下通过较长时间的保温、保压，实现了难熔金属碳化物高熵陶瓷的完全致密化和金属元素的充分固溶。制备得到了具有全致密度、均匀固溶且晶粒尺寸相对较小的难熔金属碳化物高熵陶瓷。制备的(Nb, V, Ta, Mo, W)C 高熵陶瓷的维氏硬度达到 19.93 GPa、显微硬度达到 29.02 GPa、压缩强度达到 4256 MPa，且耐磨损性能显著提升。

C01-29

高强韧新型钨基固溶体合金显微组织和力学性能研究

樊沛源、王焱、刘嘉怡、刘文胜、马运柱、黄宇峰*

中南大学

钨 (W) 具有高密度、高熔点、高强度等优异性能，因此 W 合金材料现被广泛应用于国防军事、航天航空及核工业等极端环境领域。目前与固溶钨基材料相关的研究大多集中于传统的二元合金，然而单一的溶质元素使性能的提升受限，多组元相互作用的复合效应尚未明晰。为解决这一问题，使用放电等离子烧结制备了具有不同 Ta、Re 浓度的新型均匀致密 W-xTa-xRe 合金，通过固溶形成单体心立方 (BCC) 相 W-Ta-Re 基体，显著提高了合金的强度和延展性。研究了 Ta、Re 浓度对 W-xTa-yRe 合金显微组织和机械性能的影响，并探讨了 Ta、Re 元素协同强化机制对 W-xTa-xRe 烧结行为的影响。Ta 的引入主要对基体产生强化、硬化效果，Re 则增强了基体塑性变形能力。合金总体屈服强度提高提高了 170% 以上。合金的极限压

缩强度和应变率分别大于 2940 MPa 和 42%。该研究为改善 W 材料强韧性提供新思路，对于钨材料的强韧化具有重要意义。

C01-30

球磨工艺对放电等离子烧结碳纳米管增强 GH4169 宏微性能的影响

冯秋硕^{1,2}、孟宝^{*1,2}、韩子健^{1,2}、马立勇^{1,2}、万敏^{1,2}

1. 北京航空航天大学

2. 北京航空航天大学宁波创新研究院

碳纳米管增强镍基高温合金复合材料兼具高温合金良好的高温力学性能和碳纳米管高强度、高模量的特点，有望应用于航空发动机和高超声速飞行器的耐高温结构。采用行星球磨实验，固定球磨转速 300r/min、球料比 8:1，在不同球磨时间下将碳纳米管与 GH4169 粉末混合，并利用放电等离子烧结(SPS)方法制备复合材料。通过金相显微镜、扫描电子显微镜(SEM)、能谱仪(EDS)、力学性能测试等研究球磨时间对复合粉末的混合情况及烧结的复合材料性能的影响，进而确定最佳的球磨时间。结果表明，球磨 8 小时的混合粉末分散性较好，球磨时间过短会导致碳纳米管不能完全分散，而球磨时间过长易导致 GH4169 粉末颗粒团聚，甚至出现冷焊和机械合金化的现象，不利于 SPS 制备的复材性能提升。在合适球磨参数下，通过 SPS 制备的复合材料相较于基体材料屈服强度和弹性模量分别提升 49%和 50.9%。

C01-31

粉末热机械固结制备 AA6061-10Cu 杂化材料的显微组织与力学性能

张德良

Northeastern University

C01-32

增材制造用难熔粉末射频等离子球化

刘辛^{*1,2}、谭冲^{1,2}、施麒^{1,2}、谢焕文^{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

增材制造难熔材料零部件目前已在各领域广泛应用，同时也对球形难熔粉末提出了更高的要求。本研究通过氢等离子体还原和微纳米粉末湿法流化床超声分离分级技术，实现了低氧球形钽粉和钨粉的射频等离子球化制备，钽粉和钨粉的氧含量分别为 150ppm 和 60ppm；通过铸造碳化钨粉原料碳含量和含碳等离子气氛调控，实现高硬度（2850Hv0.1）球形细晶铸造碳化钨粉的射频等离子体球化制备；对等离子球化后的球形 WC-Co 粉体进行高温热处理，Co₃W₃C 脆性相转变为 WC 相和 Co 相，游离碳含量小于 0.1 wt.%；采用高能振动球磨制备了高径厚比的片状前驱体难熔高熵合金粉末，强化粉末在氢等离子体还原过程，球化后 WMoTaNbV 合金粉末碳氧含量分别低至 110ppm 和 300ppm；采用射频等离子球化制备了球形 Ti-25Ta 合金粉，球化粉末主要为 α' -Ti 相，氧含量为 1600ppm。

C01-33

粉末冶金和增材制造多孔金属材料研究新进展

王建，杨坤，张学哲，张宝光、樊永霞

西北有色金属研究院 金属多孔材料国家重点实验室，陕西 西安 710016

多孔金属是一类明显孔隙特征的结构功能一体化材料,在现代工业过滤分离、流体分布与控制、生物医用、电极催化、吸声降噪等领域具有广泛的应用。粉末冶金、熔体发泡、模板沉积和增材制造是多孔金属材料的主要制备方法。论文介绍了金属多孔材料国家重点实验室近年来在粉末冶金和增材制造多孔金属材料方面的新进展,主要包括共烧梯度多孔金属材料、粉末轧制宽幅超薄多孔带材和增材制造高强多孔金属点阵材料,并对多孔金属材料未来的需求和发展方向进行了展望和讨论。

关键词: 多孔金属材料; 粉末冶金; 增材制造

C01-34

稀土掺杂 WC 陶瓷颗粒增强钢铁基复合材料界面微观组织、力学性能及磨损性能研究

张飞、李祖来*、韦贺、种晓宇、山泉、石一凡

昆明理工大学

以 WC 陶瓷颗粒增强钢铁基复合材料为研究对象,通过粉末冶金真空烧结法制备了掺杂稀土的复合材料,采用第一性原理计算复合材料界面结构性质,利用扫描电子显微镜 (SEM)、能谱仪 (EDS)、X 射线衍射 (XRD)、背向散射电子衍射技术 (EBSD)、透射电子显微镜 (TEM) 等对复合材料的界面微观组织进行表征,测试了复合材料的硬度、强度、杨氏模量等力学性能和磨损性能。结果表明: WC 陶瓷颗粒增强钢铁基复合材料的物相组成主要为 WC、W₂C、 α -Fe、Fe₃W₃C,在粉末冶金真空烧结过程中 WC 陶瓷与钢铁基之间形成明显的界面层,界面相主要是 WC 溶解后与基体形成 Fe₃W₃C,稀土掺杂量较少时并没有促使界面反应区产生新的物相,但是增加了复合材料界面宽度。WC 颗粒和界面反应区的 KAM 值比基体等区域更高,稀土元素取代 Fe₃W₃C 中的 W 原子时,稀土 Nd 的界面结合强度最大且界面最稳定,当取代 Fe₃W₃C 中的 Fe 原子时,稀土 Ce 界面结合强度最大且最稳定,稀土元素的掺杂加强了界面处 Fe、W 和 C 原子之间的电荷转移,使得界面处成键方式发生改变。掺杂稀土可以降低复合材料的杨氏模量,增加复合材料的强度和硬度,抗压强度从 571MPa 提高到 858MPa,复合材料的耐磨性明显提高。研究丰富了 WC 陶瓷颗粒增强钢铁基复合材料界面及性能研究,为稀土改性陶瓷颗粒增强钢铁基复合材料奠定理论基础。

C01-35

Nb 添加量和烧结温度对元素粉末反应烧结制备 NiTiNb 形状记忆合金显微组织、相变行为及力学性能的影响

杜昌海*、李东阳、李益民

中南大学

元素粉末反应烧结是一种重要的低成本 NiTiNb 形状记忆合金制备方法。但由于成分不均以及液相流失造成的宏观缺陷导致其整体性能较差。在本研究中,通过元素混合粉末制备了高强度无宏观缺陷的 NiTiNb 合金。烧结温度和 Nb 添加量的增加使原子扩散速率加快,对致密化、晶粒尺寸、相组成和 Nb 固溶产生了强烈影响,并进一步改变合金的相变温度和力学性能。相变温度随着 Nb 在 NiTi 晶格中固溶度的增加而降低。通过诱导 β -Nb 纳米析出相析出获得了 72-75 °C 的宽温度滞后。1150 °C 烧结制备 NiTiNb 合金的抗压强度最高可达 2185 MPa,远高于文献数据。随着基体中微米级 Nb 相的增加,形状回复能力逐渐降低,这需要在进一步研究中加以优化。总之, Nb 的添加大幅降低了元素混合粉末的烧结温度,有利于避免液相流失和促进均匀化,改善合金性能。这为制备高性能、近致密、低成本的镍钛基合金提供了新思路。

C01-36

切削刀具用 PVD-(Cr_{1-x}Al_x)₂O₃ 复合涂层的研究与应用

王社权¹, 刘喆人¹, 李佳¹, 陈利^{1,2}

¹ 株洲钻石切削刀具股份有限公司, 湖南 株洲, 412000

² 中南大学 粉末冶金研究院, 湖南 长沙, 410000

化学气相沉积 (CVD) 方法制备的刚玉结构氧化铝 (α -Al₂O₃) 涂层具有较高的硬度和耐磨性及优异的热稳定性和化学惰性, 是目前常用的切削刀具涂层材料之一。然而, CVD 法制备涂层的沉积温度 (~1000°C) 较高, 限制了基体材料的选择和应用范围。近来, 采用物理气相沉积 (PVD) 技术 (沉积温度 ≤600°C) 制备 α -Al₂O₃ 涂层受到广泛关注。本研究通过 a-Cr₂O₃ 调控 Al₂O₃ 生长, 研究表明: (Cr_{1-x}Al_x)₂O₃ 涂层的结构和性能与 Al 含量密切相关, 当 $x \leq 0.3$ 时, 涂层为单相刚玉结构; 当 $x \geq 0.52$ 时, 涂层向面心立方/刚玉/非晶混合多相结构转变; 为了进一步提升 α -(Cr_{1-x}Al_x)₂O₃ 涂层中的 Al 含量, 基于纳米多层涂层的“模板效应”, 使 (Cr_{0.48}Al_{0.52})₂O₃ 层在 α -(Cr_{0.70}Al_{0.30})₂O₃ “模板层”上共格生长, 获得具有出具有优异的热稳定性和高的红硬性的单相刚玉结构的 (Cr_{0.70}Al_{0.30})₂O₃/(Cr_{0.48}Al_{0.52})₂O₃ 纳米多层涂层; 并以此为基础开发出难加工材料用的专用涂层刀具。

C01-37

流态化颗粒功能改性强化粉体烧结/打印形性一体化调控研究

杨亚锋*, 李少夫, 张磊

中国科学院过程工程研究所

基于粉体颗粒的粉末冶金和 3D 打印近净成形是实现复杂构件低成本制造的重要技术。然而, 部分粉体受自身物化特性限制导致其烧结或打印件存在密度低、精度差、性能衰退等问题。对此, 本研究提出了流态化颗粒功能改性强化粉体烧结/打印形性一体化调控的研究思路, 首先探明了流化床中超细粉体颗粒的粘聚力与破碎力之间的协调竞争关系, 确立了不同粉体的失流诱发条件与稳定流化操控窗口; 然后探明了目标改性相的形成反应条件及其在流态化颗粒表面沉积行为的调控规律, 实现了不同类型、结构、形态的功能改性相在粉体颗粒表面的均匀定量包覆。在形性调控方面, 分别在难烧结钛粉或难打印成形粉体 (如高激光反射率铝、铜等粉体) 包覆烧结助剂和激光吸收增强相, 实现了复杂构件的高致密、高精度成形; 在组织调控方面, 在钛合金、不锈钢等粉体表面包覆晶粒细化剂, 打印后形成了全等轴晶组织, 在不经热处理前提下获得优异力学性能并消除各向异性, 大幅简化了 3D 打印生产流程; 在材料复合化方面, 流态化颗粒功能改性实现了增强相与粉体间的匀质化复合, 解决了金属基复合材料存在的典型增强相分布不均、强化效果不佳等问题。流态化颗粒功能改性技术不但为传统技术制粉产业链的完善和延伸开辟了一条深加工路线, 并且为新材料设计开发以及粉末成形器件的形性一体化调控提供了重要技术支持。

关键词: 粉体颗粒; 表面改性; 流态化; 化学气相沉积; 粉体成形

C01-38

基于氢烧结的高强韧钛与钛基复合材料

杨超

华南理工大学

C01-39

具有三维结构的 Al/Mg 双金属界面特性研究

杨伦*

中南大学粉末冶金研究院

在当前节能降耗的大环境下, 结构轻量化已成为交通运输和航空航天等领域的重要发展趋势, 铝合金(Al)、镁合金(Mg)两种轻质金属材料的应用比重逐年增加。因此, 结合两者优异性能且应用场景更为广泛的 Al/Mg 双金属复合材料成为了目前的研究热点。但连接过程中 Al/Mg 界面处极易反应并形成难以调控的脆性金属间化合物, 导致界面结合质量低, 成为 Al/Mg 双金属材料应用的最大阻碍。本研究通过在 Al/Mg

界面处引入具有三维结构的 Ti 中间层, 得到具有三维互锁结构的 Al/Mg 界面结构, 其力学性能较传统的 Al/Mg 界面有大幅提升, 并深入研究了该界面的结构特性。为高性能 Al/Mg 双金属材料的制备提供了重要的技术和理论基础。

C01-40

激光定向能量沉积 (L-DED) 制备细晶 W-Cu 复合材料及组织性能研究

毛杰¹, 唐建成^{1, 2}

¹ 南昌大学物理与材料学院

² 南昌大学国际材料创新研究院

针对增材制造制备 W-Cu 复合材料采用混合粉末为原料所导致的典型缺陷问题, 本文提出通过喷雾干燥法制备球形复合粉末, 成功解决了增材制造过程中流动性差、晶粒粗大、组织不均匀等问题, 系统研究了激光定向能量沉积 (L-DED) 功率对 W-Cu 复合材料微观组织及综合性能的影响。首先以 WO_3 和 CuO 为原料, 结合离心喷雾干燥和三阶段氢气还原法制备出球形度高、分散性好、粒度分布集中、组织致密且晶粒细小的 W-20wt.%Cu 复合粉末。通过 L-DED 获得了具有高连通性 Cu 网络状组织的细晶 W-Cu 复合材料(相对密度 96.2%)。复合材料组织分布均匀且综合性能优异: 导电性(37.93 %IACS)、导热性(215.35 W/mK)、硬度(260.6 HV0.5) 和抗拉强度(512.57 MPa), 综合性能高于目前报道的同类型复合材料。优异的综合性能得益于复合材料中高连通性 Cu 网络结构的形成以及高均匀高致密的微观组织。本文提出的思路和策略为发展增材制造制备细晶 W-Cu 复合材料提供了有益的实验参考和理论依据。

C01-41

基于功能基元设计的 NiTi 基复合材料

蔡淮锶、杨超*

华南理工大学

NiTi 形状记忆合金因其超弹性和形状记忆效应在驱动装置、生物医疗、航空航天等领域得到了广泛关注。开发具有宽服役窗口、高承载能力和大回复应变的形状记忆合金对扩展其在极端场景中的应用具有重要意义。在这项工作中, 基于功能基元序构的材料设计新范式, 制备了含有双记忆合金基元的 NiTi-NiTiZrCu 复合材料。该复合材料由 NiTi 基体和 NiTiZrCu 增强体组成, 并采用激光粉末床熔融结合粉末热挤压技术制备。本工作系统研究了挤压态和热处理态复合材料的微观组织、马氏体相变和超弹性, 发现该复合材料在 1.4 GPa 的高应力、零下 50°C 的低温下均表现出优异的超弹性。其高强度和大应变归因于基元内部有序启动的渐进式马氏体相变和线弹性变形的耦合作用, 且蜂窝状序构确保了应力的均匀传递。其低温回复源于 B2-NiTiZrCu 的热力学稳定性, 同时其相变回复释放的内应力为 B2-NiTi 相变提供机械驱动力。这一创新为高强度、宽温域、大回复应变形状记忆合金的设计和开发提供了重要的支持。

C01-42

材料挤出打印 CuSn10 零件的性能研究

晋凯^{1,2}、陈睿智^{1,2}、李革民^{1,2}、王浩^{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

2. 安徽省粉末冶金工程技术研究中心

青铜材料因具有良好的力学性能、耐腐蚀性等, 广泛应用于机械、电子和船舶等领域, 特别是在耐海水腐蚀方面, 青铜材料具有更显著的优势。随着高端复杂零件需求量的不断增大, 增材制造技术受到越来越多的关注。本研究以 CuSn10 粉末和石蜡基粘结剂为原料制备青铜喂料, 采用材料挤出 (MEX) 打印制备出零件生坯, 经脱脂和烧结后得到青铜试样。研究了粉末装载量、打印温度、烧结温度和粉末特性对青铜零

件微观组织和力学性能等的影响。试验结果表明,粉末装载量为 55%、打印温度为 160°C 获得生坯的致密度可达 99.89%。脱脂烧结后试样的相对密度达 97.97%,硬度达 65.6HB,抗拉强度达 286.5MPa。在不同原料粉末打印的样品中,由气雾化 CuSn10 粉末(-1000 目)得到的 MEX 打印零件具有最高的硬度,可达 76.5HB。采用双粒度 CuSn10 粉末(80%/400-500 目+20%/-1000 目)打印的零件综合性能最佳,其相对密度和抗拉强度分别可达 98.88%和 355.46MPa。试验中还在优化的工艺条件下成功打印出多种齿轮零件,生坯烧结体具有较小的尺寸偏差,表明材料挤出打印是一种潜在的制备高性能青铜零部件的方法。

C01-43

双相钨合金异质变形的差异性和协同性

薛诤义、李作胜、唐赛*、马运柱、刘文胜

中南大学

钨合金因其高密度、热稳定性及优异的力学性能被广泛应用于军事航空等领域。由硬质钨和软质粘结相组成的双相钨合金因其两相杨氏模量及屈服强度等存在较大差异,变形过程中相界面及其两侧易出现明显的力学不相容。本研究通过压缩实验结合晶体塑性模拟,系统揭示了双相钨合金等温压缩后的显微组织演化、内部及相界面微结构特征和应力分布状态,并最终提出其潜在变形机制。研究表明,两相的变形差异性和强度比息息相关。室温下,钨颗粒逐渐压扁并最终呈现纤维状,内部出现大量裂纹和位错。粘结相内部位错在界面附近塞积,出现变形孪晶。温度升高后,钨相和粘结相内部分别发生动态回复和再结晶,两相异质性程度加剧,钨颗粒纤维化趋势减缓。模拟发现变形过程中应变主要集中在界面偏粘相一侧,相界面附近形成了显著的应变梯度。应力集中程度随强度比增加而增加,钨相主要受来自粘结相的剪切应力推动,逐步被压扁和旋转。我们认为位错塞积和孪生是相界面应变调节的两种主要机制。最终基于组织与力学性能的关系,从力学角度提出了多相或者异质结构的设计策略。此研究将有助于揭示钨合金变形机理,进而为改进新型钨合金的设计提供指导。

C01-44

串联激光打印钛铝合金温度场调控及应力松弛研究

魏明

西北有色金属研究院

激光选区熔化具有表面光洁度高、尺寸精度高、物理性能优良的优点,可以快速制造形状复杂的零件。但是,激光选区熔化温度梯度大、冷却速度快的特点导致打印低塑性金属时容易开裂。裂纹是激光选区熔化打印低塑性金属材料亟需解决的难题。本文提出了一种串联激光束的方案,即三道串联激光束围绕一个熔池分别进行预热、打印和后加热,并通过仿真模拟研究了串联激光束不同工艺设置对钛铝合金温度场、流场和应力场的影响。研究发现,通过合理设置串联激光调控温度场,可以避免匙孔相互干扰和熔池失稳,并有效地松弛打印件表面的残余应力。

C01-45

Si 含量和烧结温度对粉末冶金 Al-Cu 合金的组织 and 性能的影响

张朝阳、邓正华*、杨青峰、李博、袁成龙、寿德荣

重庆三峡学院

随着环保和节能要求的不断提高,Al-Cu 粉末合金在减轻机器重量方面发挥着重要作用,然而采用粉末冶金制备的 Al-Cu 合金还存在致密度低及力学性能较低等问题,因此本研究采用合金粉的形式向 Al-Cu 粉末合金中添加 Si 元素来提高合金的综合性能,并研究不同烧结温度对 Al-Cu 合金的组织、密度及力学性能的影响,研究发现,随着 Si 含量的增加,合金的相对密度呈先降低后逐渐增加然后再下降的趋势,硬度和抗拉强度均呈先增加后降低的趋势,当 Si 含量为 1.5%时,合金的相对密度和硬度最大,当 Si 含量为 1%时,

合金的抗拉强度最大。随着烧结温度的逐渐升高，合金的相对密度和硬度呈先减小后增大的趋势，抗拉强度呈逐渐增大的趋势，在 570°C 时，合金的相对密度、硬度和抗拉强度均达到最大值。

C01-46**极细径硬质合金微型钻头及其超高转速钻削研究**

付连宇

深圳市金洲精工股份有限公司

。

C01-47**高均匀性超细晶硬质合金制备技术研究与应用**

曾瑞霖

株洲硬质合金集团有限公司

C01-48**粉末冶金弥散纳米 TiB 增强 Ti64 复合材料组织及力学性能研究**

刘文齐

哈尔滨工业大学

。

C01-49**丝材等离子雾化技术研究进展**

何鹏江，潘超梅，符乃科

1. 国家钛及稀有金属粉末冶金工程技术研究中心
2. 广东省科学院新材料研究所

低氧球形粉末具有优异的性能，在国防军工、航空航天和生物医疗等领域获得了广泛的关注。报告介绍了丝材等离子雾化技术（Plasma Atomization: PA）及其在细粒径粉末制备方面的最新进展，同时介绍了新材料所设计的超音速紧耦合等离子炬和丝材等离子雾化装备。采用丝材等离子雾化技术，成功雾化钛合金 TC4 粉末和低模量 β -Ti2448 粉末，同时通过等离子体的高焓，实现复合材料在等离子射流中的合金化，成功雾化制备 TiAl 合金粉末。等离子雾化粉末形貌呈球形，几乎不含卫星球和空心粉缺陷，为激光/电子束增材制造、金属注射成型、冷/热喷涂工艺提供了新的选择。

关键词：丝材等离子雾化技术；原位合金化；钛合金粉末；TiAl 合金粉末；锆合金粉末

C01-50**不同添加方式下钨合金中难熔固溶元素的扩散行为**

李梓怡

中南大学

C01-51**离散元模拟在粉体成型过程中的应用与思考**

刘超

厦门钨业股份有限公司

采用离散元的方式对硬质合金成型过程中的布粉、压制动作中的颗粒运动进行了模拟，研究了成型部件的几何形态、运动参数对颗粒填充过程、堆积状态、密度分布等特性的影响。

C01-52

高强高热稳定性氧化铝基纤维设计制备研究

马运柱*, 伍超众, 王娟, 刘文胜, 姚树伟*

中南大学轻质高强结构材料国家级重点实验室, 中国, 长沙 410083

兼具高强高热稳定性的氧化铝基纤维能满足航空航天领域热结构件、热防护等材料日益增长的高温性能需求。为了获得高性能氧化铝基纤维, 本文提出采用 La₂O₃ 添加形成晶界偏析辅助双相结构热稳定性改性的策略。研究发现, La₂O₃ 添加形成晶界偏析能有效改善 γ , θ -Al₂O₃/mullite 双尺寸双相纤维的热稳定性, 但该纤维拉伸强度较低; 在此基础上, 先后添加铁溶胶来诱导 α -Al₂O₃ 生成和优化硅源来协调双相晶粒生长, 设计制备出威布尔强度高达 1.70 GPa 且在 1200 °C 下拥有强度保留率超 90% 的高强高热稳定性 α -Al₂O₃/mullite 双相纤维, 揭示了受 Si 元素影响的 α -Al₂O₃ 晶粒{0001}基面取向生长机制以及晶界偏析机制。

关键词: 氧化铝基纤维; 双相结构; 晶界偏析; 高强高热稳定性

C01-53

金属表面改性钛颗粒增强镁基复合材料微观组织与强韧化机理的研究

张玉松^{1,2}、韩胜利*¹、高鹏飞¹、陈鹏举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

在本工作中, 采用粉末冶金技术制备金属颗粒表面改性 Ti 颗粒增强 Mg-9Al-1Zn (AZ91) 合金。研究结果表明, Metal@Ti/AZ91 复合材料呈现双峰晶粒结构, 在强度和延展性之间达到显著平衡, 极限抗拉强度为 378MPa, 屈服强度为 256MPa, 伸长率为 15.0%。这些数值明显超过了 AZ91 合金和 Ti/AZ91 复合材料的力学性能。Metal@Ti/AZ91 复合材料强度的提高归因于显著体积分数的亚微米级析出物的沉淀强化与晶粒细化的协同作用。关于增韧机制, 发现粗晶粒区位错储存能力的增加和异质变形机制诱导生成的孪晶。此外, 亚微米级沉淀物的存在有效地阻碍裂纹的扩展并提高了延展性。这种创新方法为开发高强塑镁基复合材料提供一种创新的策略。

C01-54

WC 对 TiB₂-CoNi 金属陶瓷显微组织和力学性能的影响

薛凤丹、吴宁*

中南大学

本研究通过 X 射线衍射仪 (XRD)、扫描电镜 (SEM)、电子探针 (EPMA) 和透射电镜 (TEM) 分析, 研究了真空烧结的 (80-x) TiB₂-xWC-10Co-10Ni (x = 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5 wt.%) 金属陶瓷的显微组织和力学性能。结果表明, TiB₂-7.5 wt.% WC 基金属陶瓷表现出优异的综合性能, 其相对密度、硬度、弯曲强度和断裂韧性分别为 99.44 ± 0.18 %, 17.50 ± 0.71 GPa, 2108 ± 29 MPa 和 12.21 ± 0.29 MPa·m^{1/2}。在添加 WC 的金属陶瓷中, 检测到了 TiB₂、W₂CoB₂、WB 和 CoNi 粘结相。形成了 TiB₂ 核芯-(Ti, W, Co, Ni)(B, C) 环形相的典型“芯-环”结构。其中, TiB₂ 核芯为 HCP 结构, (Ti, W, Co, Ni)(B, C) 环形相为 FCC 结构, CoNi 粘结相为 FCC 结构。TiB₂ 核芯与 (Ti, W, Co, Ni)(B, C) 环形相之间, 形成共格的两相界面, 环形相与粘结相的界面处

形成非晶态的金属薄层。共格界面和非晶态的金属薄层，均有利于提升界面结合强度，进而提升 TiB₂-WC 基金属陶瓷的强度和韧性。

C01-55

高能球磨-放电等离子体烧结相结合原位制备非均质晶粒结构 CoCrFeMnNi 高熵合金实现强度-塑性平衡

蒋飞龙、任富增*

南方科技大学

强度与延性的矛盾一直是金属合金的难题。在此，我们提出了一种简单的策略来克服面心立方高熵合金 (HEAs) 的强度-延性权衡，使用高能球磨强制合金化和放电等离子体烧结相结合，利用放电等离子体烧结过程中的高局部温度梯度和 HEAs 的“缓慢扩散”，通过原位形成的非均质晶粒结构。所制备的 CoCrFeMnNi HEA 的晶粒尺寸在 140 nm ~ 5 μm 范围的非均质晶粒结构，其屈服强度超过 1 GPa 和均匀延伸率达到了 9.5%。

C01-56

固体润滑剂对铜铝镍粉末合金组织和性能的影响

李博、邓正华*、寿德荣、张朝阳、杨青峰、袁成龙

重庆三峡学院

Cu-10Al-4Ni 粉末合金的力学性能和耐腐蚀较好，但是 Cu-10Al-4Ni 的自润滑性能较差。因此本文在 Cu-10Al-4Ni 粉末合金中添加石墨和二硫化钼来提升合金的润滑性能。首先研究烧结温度对合金组织和性能的影响，结果表明，在 950°C，合金的组织致密，综合性能最佳。其次研究了添加石墨和二硫化钼对合金的组织 and 性能的影响，结果表明，随着石墨的添加，合金烧结密度、硬度和强度均逐渐减小；随着 MoS₂ 的添加，合金烧结密度、硬度和强度均先增后减。最后在合金中复合添加两种固态润滑剂，研究了合金的性能和组织最优时的复合配比，以期进一步提升材料的性能。

C01-57

La₂O₃ 含量对 La₂O₃ 第二相强化 W 合金组织及性能的影响

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

1. 合肥工业大学材料学院

2. 安徽省粉末冶金工程技术研究中心

第二相强化 W 合金具有高强度、良好的抗蠕变和抗辐照等优异性能，是一种极具潜力的聚变堆面向等离子体材料。本文以偏钨酸铵和硝酸镧为主要原料，采用溶液燃烧合成法制备不同 La₂O₃ 掺杂量 (w(La₂O₃) = 0~1.5%) 的 W-La₂O₃ 复合粉末，并通过放电等离子体烧结 (SPS) 制备 La₂O₃ 第二相强化 W 合金，研究 La₂O₃ 含量对 W 合金微观组织与力学性能的影响。结果表明，通过 SCS 法可制备出平均粒径约 200 nm、分散性好、La₂O₃ 均匀分布的 W-La₂O₃ 复合粉末。适量 La₂O₃ 的加入可有效改善 W 合金的物理和力学性能。随 La₂O₃ 含量增加，La₂O₃ 第二相强化 W 合金的显微硬度和抗拉强度均呈现先升高后降低的趋势，而相对密度则逐渐降低。w(La₂O₃) = 0.5% 时，W5La 合金的显微硬度达到最大值 524.1 HV。引入 La₂O₃ 第二相后，W 基体的断裂方式由 W 晶粒断裂为主转变为沿晶断裂和穿晶断裂共同存在的混合型断裂，并且晶粒尺寸有所减小，平均晶粒尺寸为 4.1 μm。与纯 W 合金相比，W5La 合金具有更高的抗拉强度和更低的韧-脆转变温度 (DBTT)，其室温和 500 °C 下的抗拉强度分别为 279.6 MPa 和 498.9 MPa，DBTT 为 200~300 °C。

C01-58

多相准连续网状增强 TiAl 基复合材料的组织与力学性能

康文武*

在 $B_4C/TiAl$ 基复合材料中, 创新性地设计了一种由碳化物和硼化物组成的准连续网状强化结构, 用于高温强化。同时也揭示了这种增强结构对复合材料微观组织和力学性能的影响。 $B_4C/TiAl$ 复合材料的 $TiAl$ 基体单元是由 $(\alpha_2+\gamma)$ 层片和 γ 晶粒组成的双相组织。 B_4C 含量的增加引发 $TiAl$ 基体单元层内网状增强结构的形成。当 B_4C 含量增加到 0.1 wt% 时, $B_4C/TiAl$ 复合材料的弹性模量和极限抗压强度由 10.944 GPa 和 723.10 MPa 提高到 16.052 GPa 和 774.611 MPa。当 B_4C 含量达到 5.0 wt% 时, 弹性模量和极限抗压强度分别达到 17.244 GPa 和 799.19 MPa。准连续网状增强结构中的硼化物和碳化物以带状和针状 TiB (B27 结构) 和 Ti_2AlC (MAX 结构) 的形式展开。部分 Ti_2AlC 颗粒以 TiB 为核形核生长。此外, TiC 相通常作为 Ti_2AlC 粒子形核的核心。这些增强体的取向关系分别为 $[011]_{TiC} // [010]_{TiB}$ 、 $(1-11)[011]_{TiC} // (0006) [-2110]_{Ti_2AlC}$ 、 $[100]_{TiB} // [0001]_{Ti_2AlC}$ 、 $[010]_{TiB} // [-2110]_{Ti_2AlC}$ 和 $[001]_{TiB} // [01-10]_{Ti_2AlC}$ 。 TiB 的裂缝通常沿或垂直于 $[010]_{TiB}$ 方向。同时, TiB 断面始终平行于 $(100)_{TiB}$ 或 $(010)_{TiB}$ 面。此外, 位错在 Ti_2AlC 颗粒中滑动, 导致 Ti_2AlC 晶格中的面 $(0001)_{Ti_2AlC}$ 分离和滑动。 TiB 和 Ti_2AlC 交替分布可以稳定 $B_4C/TiAl$ 复合材料的网状增强结构, 提高复合材料的性能。

C01-59

WC/TiC 的添加对 TiB2 基金属陶瓷烧结过程中热力学行为的影响

吴宁¹、薛凤丹²、王宸²、何嘉怡²、吴子恺²、罗丰华^{*2}

1. 中南大学冶金与环境学院
2. 中南大学粉末冶金研究院

采用热重-差热-质谱联用仪(TG-DSC-QMS)系统研究了 WC、TiC 和 WC-TiC 的添加, 对 TiB2 基金属陶瓷混合粉末在烧结过程中的吸热、热重变化及排气行为的影响。通过热膨胀法研究了 TiB2 基金属陶瓷烧结过程的致密化行为。烧结过程中排气顺序为: 水蒸气, 吸附氧的还原排出 CO_2 , Co、Ni、WC、TiC 和 TiB2 粉末表面氧化物杂质被还原放出 CO 和 CO_2 。WC、TiC 和 WC-TiC 的添加加速了 Co 和 Ni 粉末表面氧化物的还原, 降低了 TiB2 基金属陶瓷中液相形成的温度点。在烧结过程中, WC、TiC 在液态 CoNi 粘结相中溶解, 然后在未溶解的 TiB2 颗粒上析出, 形成典型的“芯-环”结构。本研究有望为今后基于 TiB2-CoNi、TiB2-WC-CoNi、TiB2-TiC-CoNi 和 TiB2-WC-TiC-CoNi 金属陶瓷, 开发具有优异综合力学性能 TiB2 基金属陶瓷奠定坚实的理论基础。

C01-60

增材制造具有大可恢复应变的稳定超弹性 NiTi 形状记忆合金

颜安, 蔡潍锶, 李泓臻, 卢海洲, 杨超*

华南理工大学

本文报道了用激光粉末床熔合(LPBF)增材制造 $Ni_{51.2}Ti_{48.8}$ (at.%) 形状记忆合金(SMA) 具有大可恢复应变的稳定超弹性。微观结构分析表明, LPBFed SMA 样品具有粗大的柱状和细小的胞状两种不同晶粒带的非均匀微观结构。其中粗柱状晶粒区占主导, 含量高达~79 vol.%, 位错密度相对较低。相比之下, 胞状晶粒内的位错密度高, 但含量低, 约为 21 vol.%. 特别是, 所有 LPBFed 非均匀 SMA 样品都具有强(100)织构, 强度高达 40.2-56.1, 并伴有均匀的 Ti_4Ni_2O 纳米沉淀物。恒应力循环压缩表明, 在 1200 MPa 高加载条件下, 具有 79 vol.% 粗柱状晶粒区和 52.8(100)织构的 LPBFed 试样在 15~30 次循环下表现出稳定的超弹性, 可恢复应变大, 为 5.71%。这种大的可恢复应变优于各种方法制备的 NiTi SMA。稳定的超弹性主要是由于在循环加载过程中, 强织构(100)具有抗塑性变形的和均匀共格 Ti_4Ni_2O 纳米沉淀物对位错运动的钉住作用。同时, 大的可恢复应变源于高含量柱状晶粒区对新位错的高容错能力。这项工作可以为高性能 NiTi sma 的设计提供重要见解, 并通过增材制造进一步加速其工程应用。

C01-61

Y 前驱体对机械合金化和放电等离子烧结合成 Cu-Y₂O₃ 的影响

许杰、刘家琴、罗来马、马冰、吴玉程*

合肥工业大学

本研究通过机械合金化和放电等离子烧结制备 Cu-Y₂O₃ 合金，基于原位反应原理，采用 Y 盐代替纯 Y 粉末作为 Y₂O₃ 弥散相前驱体，并系统性探究了不同 Y 盐对铜基体微观结构以及力学、物理性能的影响。结果表明：Y 盐能够有效避免纯 Y 金属粉末的冷焊效应，提高了合金化的均匀性和细化效果。而在不同种 Y 盐样品中，Y(NO₃)₃·6H₂O 和 Y₂(SO₄)₃·8H₂O 会对铜基体造成不同程度的污染，影响材料性能。相比之下，Y₂(CO₃)₃ 具有分解温度低，且分解产物 CO₂ 不与铜基体发生反应等优点，成功将 Y₂O₃ 平均粒径从 8.79±3.73 nm 细化至 5.48±2.82 nm，数密度由 2.37×10²¹/m³ 提高到 7.46×10²¹/m³，得到抗拉强度为 291 MPa，延伸率为 19.8%，在 400°C 时的热导率为 322 W/(m·K) 的 Cu-Y₂O₃ 合金，验证了 Y 盐与机械合金化相结合的可行性。

C01-62

原位纳米 Al₂O₃/Al₂Cu 复相增强高硅铝基复合材料制备及其性能研究

邓显贤、李才巨*

昆明理工大学

在这项工作中，我们报告了一种原位纳米 Al₂O₃/Al₂Cu 复相增强高硅铝基复合材料制备方法。采用变速球磨工艺将过共晶铝硅合金粉与 CuO 粉体进行均匀分散和片状化后使用真空热压烧结和热挤压工艺制备出原位纳米 Al₂O₃/Al₂Cu 复相增强高硅铝基复合材料。结果表明：利用原位反应制备出的纳米 Al₂O₃/Al₂Cu 复相增强高硅铝基复合材料的抗拉强度为 464.51 MPa，相比于基体抗拉强度提升了 201.58 MPa；形成 Al-Al₂O₃-Si 三明治界面相比于 Al-Si 界面错配度更低，界面强度更高，提高了铝基体到硅颗粒的载荷传递能力，从而大幅提高了屈服强度。纳米 Al₂O₃/Al₂Cu 复相增强高硅铝基复合材料较高的力学性能是载荷传递效应、Orowan 强化、晶粒细化和位错强化共同作用的结果。

C01-63

增强纤维对无石棉有机制动材料制动粉尘排放特性的影响机制

魏龙*

中国石油大学（华东）

制动器是汽车的关键部件，其性能关系着汽车行驶的安全性和舒适性。近年来，随着汽车尾气排放标准的日趋严格以及电动车销量的快速增长，汽车的非尾气颗粒物排放占机动车整体颗粒物排放的比例越来越高。作为非尾气颗粒物排放中的主要污染源之一，汽车制动磨损所产生的粉尘排放受到了越来越多的重视。本研究利用销盘式摩擦磨损试验台和密封舱，系统研究了五种典型增强纤维材料（铜纤维、碳纤维、钢纤维、陶瓷纤维、碳纳米管）对无石棉有机制动材料摩擦学性能、表面摩擦层形貌以及制动粉尘排放特性的影响。研究发现，与含有铜纤维的制动材料相比，使用碳纤维可显著增大摩擦层覆盖率，抑制摩擦层中微裂痕的生成，从而提升制动材料的耐磨性，降低制动粉尘排放；使用钢纤维和陶瓷纤维会降低摩擦层覆盖率，增大制动材料的磨损率和制动粉尘排放。制动粉尘的数量浓度在 20-400 #/cm³ 之间，颗粒平均几何直径为 70-120 nm，制动粉尘的质量浓度为 59-957 μg/m³。本研究系统分析了无石棉有机制动材料中增强纤维对表面摩擦层形貌、摩擦学性能和制动粉尘排放特性的影响机制，可为研制绿色环保制动材料提供理论支持。

C01-64

高催化活性耐腐蚀磁流变复合粉末的制备与性能表征

贺冰洋、陈峰*

广东省科学院新材料研究所

磁流变加工是高效抛光单晶碳化硅的候选技术之一。在保障磁性能的同时,提高铁基磁性粒子的催化活性及其耐腐蚀性能,对于提高磁流变加工效率,降低加工成本具有重要意义。本工作以 $\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 和 TiH_2 为原料,采用球磨+还原(R1)、球磨+煅烧(R2)和球磨+煅烧+还原(R3)3种工艺制备 Fe-Ti-O 复合粉末,研究了 TiH_2 含量(5 wt.%-15 wt.%)对复合粉末物相组成、微观形貌、催化活性和耐腐蚀性能的影响。结果表明,经过球磨处理可以获得成分均匀的亚微米级 $\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{TiH}_2$ 两相混合粉末。采用R1工艺制备的粉末由2微米左右的 Fe 颗粒和异常长大的 FeTiO_3 颗粒组成。随着 TiH_2 含量增加, FeTiO_3 颗粒的尺寸变大,致密度增加。采用R2工艺制备的粉末主要由 Fe_3O_4 和 Fe_2TiO_4 组成。随着 TiH_2 含量增加, Fe_2O_3 逐渐向 Fe_3O_4 、 FeO 和 Fe 转变,同时 Fe-Ti-O 颗粒异常长大现象得到抑制。采用R3工艺制备的粉末由500-800 nm的 Fe_2TiO_4 颗粒团聚而成,30-200 nm的富铁颗粒均匀地分布在 Fe_2TiO_4 颗粒中,形成独特的费列罗结构。磁性能测试、甲基橙降解实验和电化学测试结果表明,当 TiH_2 含量为15 wt.%,制备工艺为R3时,粉末的比饱和磁强度满足磁流变加工要求($\geq 50 \text{ emu/g}$),且具有最优的催化活性和最好的耐腐蚀性。

C01-65

淬火工艺提高钨丝绳高温抗拉强度实验

吕方*

安泰天龙钨钼科技有限公司

摘要:钨丝绳是重要的工业材料,在熔炼铸造、单晶炉设备等冶炼行业中扮演着关键角色。钨丝绳的特点包括耐高温、耐磨、抗拉等,使其成为这些领域中的理想选择。钨丝绳的规格和结构也在不断发展和优化中,以满足不同应用的需求,在 1000°C 如何提升钨丝绳抗拉强度作为目标通过淬火工艺的实施达到了目的,淬火的温度与时间的调节完成了最终实验。

墙报

C01-P01

直写成型水基 WC-Co 浆料的配制及流变性能研究

李小飞¹、孙国栋¹、李哲¹、任颖熙¹、王涵琦¹、廖军²、鲁颖炜^{*1}

1. 合肥工业大学 材料科学与工程学院
2. 自贡硬质合金有限公司 研发中心

WC-Co (YG) 硬质合金被誉为“工业牙齿”,被广泛应用于切削、钻探等工业领域。然而,硬质合金生产中常规的模压成形工艺难以满足特种加工领域对超硬工具异形件的需求,3D 打印技术则可以通过结构设计和工艺控制来解决这一难题。近年来,直写型 3D 打印(DIW)结合烧结技术因其既无须使用激光或电子束等高成本装置,又可获得高密度制品而受到广泛关注。DIW 工艺中,浆料的配置至关重要。本工作以水基 YG8 (Co wt.%为 8%)浆料为研究对象,探究了固含量、添加剂种类及其含量对浆料流变性及稳定性的影响规律,制备出了固含量可达 88 wt.%的水基 YG8 浆料。打印结果表明,该浆料具有良好的挤出连续性,高固化速率和保持自身形状的能力,适用于 DIW 工艺。

C01-P02

一种新型粉末高温合金热变形过程中的开裂行为的研究

赵格格、刘文涛、滕剑威、赵天浩、江亮*

烟台大学

为了研究新型粉末高温合金在热变形过程中的开裂行为，我们分别对热等静压态和热挤压态的新型粉末高温合金以 $0.001\sim 1\text{ s}^{-1}$ 的应变速度在 $1040\sim 1100^\circ\text{C}$ 温度下开展了热压缩实验。结果表明：热等静压态的粉末高温合金热压缩后开裂严重，而热挤压态粉末高温合金热压缩后只发现少量的开裂现象。这是由于热等静压态合金中存在大量的原始颗粒边界(Prior particle boundary, PPB)，在热变形过程中在 PPB 的位置极易造成应力集中，产生裂纹，导致开裂。而热挤压态的合金，在热挤压过程中 PPB 被破碎减小或部分消除，因此，其开裂的现象明显低于热等静压态高温合金。除此之外，我们发现，当对热挤压态合金进一步退火处理后，热变形过程中的开裂行为进一步降低，这是因为经过退火处理，合金晶粒更加均匀，且释放了热挤压过程中的部分应力集中，减小了可以作为裂纹源开裂的位置。

C01-P03

Ta addition enhances adiabatic shear sensitivity of tungsten alloys

夏振杰

中南大学

C01-P04

Preparation mechanism, hydrodynamics and composite sintering of wrinkled

李盼桢

中南大学

Conductive silver paste plays a crucial role as an interconnecting material between electrodes and circuits in electronic circuits and solar cells. The quality of silver paste is greatly influenced by the preparation of the conductive-phase silver powder and the sintering process. This study investigated the impact of fluid dynamics on the preparation of silver powder, and the formation mechanism of wrinkled silver powder was explained. The wrinkled silver powder replaced the traditional smooth spherical silver powder, and the point contact between the smooth silver powder turned into the line and surface contact. After mixing and sintering with the micron flake silver powder, the electrical conductivity and sintering morphology of the silver paste were improved. Compared with the silver content of conventional silver paste ($\geq 75\text{wt}\%$), the silver paste of $(9.23\pm 0.68) \times 10^{-6}\ \Omega\cdot\text{cm}$ can be prepared by curing at 250°C for 45 min when wrinkled powder : flake powder = 1:1 and silver paste content was only 66.7 wt%. This research work provides a new idea for the morphology control of submicron silver powder, which has important applications in the field of low temperature silver paste for new N-type batteries.

C01-P05

碳热还原-碳化法制备高纯纳米 WC 粉末

鲍阔阔

中南大学

本研究以黄钨 (WO_3) 和炭黑为原料，通过一步碳热还原-碳化法成功制备出高纯纳米碳化钨 (WC) 粉末，并研究了反应气氛、反应温度和保温时间对产物相转变和形貌演变的影响。结果表明，反应气氛对碳热还原-碳化反应的影响较大，相比于氩气气氛，真空气氛可以有效降低碳热还原反应的起始温度，提高反应速率。反应温度和保温时间影响产物纯度和粒度，反应温度较低或保温时间较短，产物中存在缺碳相 W_2C ，反应温度较高，产物粒径发生明显长大。在 1100°C 真空气氛下保温 5h，可以制备出平均粒径为 80nm 左右的高纯 WC 粉末。

C01-P06

纳米氧化铝纤维热稳定性的尺寸效应研究

张夏雪, 伍超众, 姚树伟*, 马运柱, 刘文胜
中南大学

纳米氧化铝纤维以其优异的力学性能和化学稳定性在高温领域备受关注。然而, 在高温环境下, 纳米氧化铝纤维晶粒粗化造成纤维结构破坏, 导致纤维力学性能迅速下降。为获得高热稳定性纳米氧化铝纤维, 本文采用溶胶凝胶法结合静电纺丝技术制备纳米氧化铝纤维, 研究了 La 元素和纤维直径对氧化铝纤维稳定性的影响。研究表明, 1-10 wt% La_2O_3 的添加影响纳米氧化铝纤维相变和高温晶粒生长行为, 有助于改善纤维热稳定性。对于相同成分的纳米氧化铝纤维, 纤维稳定性存在尺寸效应, 直径越小, 纤维热稳定性越高。在高温下, 直径 100 nm 以下的氧化铝纤维能够有效抑制晶粒恶性生长, 1200 °C 保温处理 1 h 后, 纳米纤维维持细晶组织, 未见明显损伤。

C01-P07

新型钨合金相图热力学数据库高效创建

郑芊宸
中南大学

C01-P08

微量 Co 添加对 90(W-3Ta)-7Ni-3Fe 合金显微组织和力学性能的影响

王金胤
中南大学轻质高强结构材料国防科技重点实验室

C01-P09

WC 晶内含纳米颗粒的低 Co 超细晶硬质合金

周缤, 吕皓, 王海滨, 刘雪梅, 宋晓艳*
北京工业大学

C01-P10

微柱压缩测试在硬质合金研究中的应用

王庆腾, 刘雪梅*, 宋晓艳
北京工业大学

C01-P11

Nb,Ni 复合中间层扩散连接钨合金/钢界面行为研究

韩一帆
中南大学

本工作通过设计“Nb+Ni”复合中间层, 结合热压扩散与热等静压扩散对钨合金/“Nb+Ni/30CrMnSiNi2A 钢的界面组织及失效行为进行了研究, 结果表明: 虽然 NbNi 界面会因为钢中的碳扩散而形成大量的块状 Nb₃C..., 但钨合金/Nb 界面生成的 Nb(Ni, Fe): 才是接头失效的关键, 本工作为高性能钨合金/钢复合中间层扩散连接的原料选取及工艺参数设定提供了一定的指导。

C01-P12

注射工艺对不锈钢金属粉末注射成型两相分离的影响研究

李艳, 咎祥*, 何高勇, 罗来马, 吴玉程
合肥工业大学

金属粉末注射成型是一种先进的制造工艺，通过将金属粉末与粘结剂混合后注射到模具中来形成零件生坯，然后经过脱脂、烧结等步骤得到最终产品。注射过程中，粉末与粘结剂的分离是常见的难题，这会导致零件的粉末分布不均匀，尺寸收缩时产生变形，引起局部性能不稳定。本研究旨在探究注射工艺参数对粉末注射成型过程中两相分离的影响，并通过调整工艺参数以降低分离程度。通过对喂料充填阶段进行的数值模拟分析结果表明，注射坯浇口处附近以及最后充填的部分会发生比较严重的两相分离现象。通过对粉末体积分数的结果分析表明，浇口周围浓度较低，随着远离浇口的距离增加浓度逐渐上升，并且可通过提高模具温度和注射速度、降低熔体温度可以有效改善两相分离现象。

C01-P13

超导用超高 Sn 含量高强塑性 Cu-18Sn-0.3Ti 合金的直流辅助热压烧结制备及热挤压研究

石林、邹军涛*、张喆、孙利星、宋大拙、王宇轩
西安理工大学

为了解决传统铸造技术制备的青铜（Cu-Sn 合金）晶粒粗大，富 Sn 相偏析严重导致的强塑性差问题，以满足长程距高临界电流密度 Nb₃Sn 超导线材的青铜法制备需求，本工作基于微米级气雾化球形 Cu-18Sn-0.3Ti 合金粉末在 Sn 固溶度高、 α 基体晶粒细小以及富 Sn 相细小分散等方面的先天优势，结合直流辅助热压烧结（DCHP）和传统固溶处理制备了具有细小等轴晶粒、高密度退火孪晶及富 Sn 相弥散分布的 Cu-18Sn-0.3Ti 合金（DCHP 样品）。DCHP 样品的极限抗拉强度（UTS）、屈服强度（YS）和伸长率分别为 507.2MPa，229.4 MPa 和 23.4%，远高于目前已报导的同成分合金。随后采用热挤压对 DCHP 样品进行了进一步的组织和力学性能优化。挤压态合金（HE 样品）经固溶处理后，其 UTS、YS 和伸长率分别进一步提高至 683.5 MPa，414.3 MPa 和 33.3%。合金粉末在 DCHP 的热-力-电三场协同作用下的微观组织演变机制、固溶态 DCHP 样品和 HE 样品的强塑性协同增强机制及断裂机制等被揭示。结果表明：在 DCHP 焦耳热、电子风力和外部载荷的共同作用下，富 Sn 相由晶界向 PPBs 偏析，粉末由于发生晶界扩散和幂律蠕变机制形成良好烧结颈，先验颗粒边界（PPBs）消失，位错不断产生并作为动态再结晶的驱动力被消耗；烧结工艺的优化使合金逐渐由 PPBs 处的脆性断裂与粉末内部韧性断裂的混合断裂形式向烧结颈处的韧性断裂与粉末内部沿晶断裂的混合断裂形式转变；高应变速率的热挤压诱导了更加细小的 α 基体晶粒和更为弥散的富 Sn 相的形成；特别是位错与退火孪晶之间发生了强烈的相互作用，表现为位错在孪晶界处的堆积、位错在退火孪晶内的多方向滑移和位错在退火孪晶内的储存。同时，高应变速率诱导部分晶粒内部形成孪晶。 α 基体晶粒的进一步细化、更加分散富 Sn 相的形成和晶体缺陷的强相互作用是合金强度-塑性进一步增强的主要原因。研究结果不仅为长程距高临界电流密度 Nb₃Sn 超导线材的制备奠定了原材料基础，同时为多组元合金的强度-塑性增强提供了理论指导。

C01-P14

不同冷却速率下 P-Ti₃AlC 碳化物的形貌演变及其对 TiAl 合金蠕变性能的影响

曹娴丽、王丽*
中南大学粉末冶金研究院

本文探究了不同冷却速率下 TiAl 合金 γ 相中碳化物的形貌演变及其对蠕变性能的影响和蠕变过程中碳化物与位错的相互作用。其结果表明，碳化物的形貌演变主要取决于不同温度下形成的 γ 相的成分差异。在慢冷下，碳化物经过 800 °C 退火 336 h 后分裂成亚颗粒构型。而在快冷下， γ 相中存在大量缺陷为碳化物提供形核位点，且大部分碳化物退火 336 h 后保持长条状形貌，这是由于快冷的 γ 相晶格错配度下降导致。双态组织 γ 相中碳化物与慢冷的全片层组织具有相似的形貌演变，且在 800 °C 下退火 336 h 后试样获得了最佳的蠕变性能，这是由于碳化物分裂成亚颗粒团簇，从而提供了更多的界面来阻碍位错滑动。800 °C 下长时间退火 1054 h 后，基体晶粒变粗，片层组织分解，抵消了碳化物分裂的促进作用，导致抗蠕变性能降低。在 800 °C 蠕变过程中，Ti₃AlC 碳化物与位错发生了明显的相互作用，其中大多数为 $\frac{1}{2}\langle 110 \rangle$ 普通位

错。这些位错的滑动受到了强烈的阻碍，因此碳化物的析出可以改善合金的蠕变性能。综上所述，通过后续热处理调控碳化物的形貌，使其在服役温度下保持有益的形貌，可以改善 TiAl 合金的蠕变性能。

C01-P15

高压电容器钽粉制备工艺研究

段兴云、徐一*

南昌大学

金属钽是一种难熔金属 (2996 °C)，化学性质稳定，可用于制备钽电容器。据统计，世界上每年生产的钽超过 70 % 用于制备钽电容器。因其工作温度范围宽，安全性和可靠性高，广泛地应用于航空航天、国防、军工等高科技领域。电容器钽粉作为制备钽电容器的核心材料，其制备工艺长期被封锁。而高压钽粉是用来制备高压钽电容器的，因其纯度高、击穿电压高、可靠性高，成为电容器钽粉发展的一个重要方向。因此，对高压钽粉制备工艺的研究具有重要的现实意义。本研究以电子束熔炼的高纯钽锭作为原材料，通过氢化的方式使其开裂，经过破碎制得粉末，再进行脱氢、团化和降氧等工艺，最终得到高压钽粉。目前的工作主要研究了钽锭的氢化、脱氢和降氧。对于氢化，钽锭在氢化过程中容易在其表面形成一层阻隔层，可通过提高氢气压力并同时采用氢化-脱氢-氢化工艺来打破这层阻隔层，最终制得氢含量为 0.427 wt. % 的氢化钽粉体。对于脱氢，研究了温度对含氢钽粉脱氢的影响。结果表明，在真空条件下 500 °C 开始出现 TaH_{0.1} 相和 Ta 相，在 600 °C 反应 1 h 即可实现大部分脱氢，此时钽粉中氢含量为 0.0305 wt.%。对于降氧，研究了温度、时间和还原剂用量对降氧效果的影响，设计了一个三因素三水平的正交试验。

仅发表论文

C01-PO01

热处理工艺对粉末冶金 9V 高速钢组织和性能的影响研究

殷军伟、周健、谷金波、马党参、李向阳、迟宏宵*

钢铁研究总院有限公司

粉末冶金高 V 高速钢由于具有高的硬度、强度和耐磨性，被广泛用作刀具、模具和轧辊材料。在实际应用中为了优化组织，进一步提高它的力学性能，往往需要进行热处理，因此研究热处理对粉末冶金高 V 高速钢组织演变和机械性能的影响十分必要。本文以粉末冶金高 V 高速钢的典型产品 9V 高速钢为研究对象，通过 Thermo-Calc、TEM、SEM 和力学性能测试研究了淬火温度 (1065-1230°C) 和回火温度 (450-620°C) 对粉末冶金 9V 高速钢组织演变和机械性能的影响。研究表明，热处理后 9V 高速钢组织为：马氏体+残余奥氏体+碳化物。碳化物主要由一次和二次 MC (富 V) 和 M₂₃C₆ (富 Cr) 组成，尺寸分布在 0.2-5μm。微米级 (>1μm) MC 型一次碳化物主要分布在晶界和亚微米级 (<1μm) MC 和 M₂₃C₆ 二次碳化物分布在晶内、原始奥氏体晶界和马氏体亚结构边界。相同回火温度 (550°C) 条件下，随淬火温度升高 9V 高速钢一次 MC 型碳化物尺寸和分布变化不大，二次碳化物数量和残余奥氏体体积分数逐渐减小，马氏体板条宽度逐渐增加。经 1120°C 淬火后随回火温度升高二次碳化物体积分数逐渐增加，残余奥氏体体积分数逐渐减少。9V 高速钢抗弯强度和冲击韧性主要和二次碳化物体积分数、马氏体板条宽度和残余奥氏体含量有关，高体积分数的二次碳化物能够提高 9V 高速钢抗弯强度，较宽的马氏体板条和高的残余奥氏体含量对钢的冲击韧性有利。研究结果可为揭示其他高 V 高速钢热处理、组织和机械性能之间关系以及优化热处理工艺提供一定参考。

C01-PO02

表面纳米活化与 SPS 技术制备 ODS-W/Cu 接头的微观结构与力学性能

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

1. 合肥工业大学材料学院

2. 安徽省粉末冶金工程技术研究中心

基体表面处理技术对于提升异种金属接头的连接性能至关重要。本文采用阳极氧化结合氢还原工艺在氧化弥散强化钨 (ODS-W) 表面制备了纳米多孔结构, 随后利用放电等离子烧结 (SPS) 技术在真空环境中实现了 ODS-W 与铜 (Cu) 的高效扩散连接。通过探究阳极氧化过程对 ODS-W 表面特性以及连接温度对 ODS-W/Cu 接头微观结构与力学性能的影响, 本文揭示了优化的表面处理和连接工艺对接头性能的显著提升作用。结果表明, 通过调控阳极氧化条件 (50 V, 40 min), 在 ODS-W 表面形成了平均孔径约 90 nm 的均匀纳米多孔结构, 这种独特的表面构造显著增强了基体的表面活性。较高的温度有助于改善接头界面的连续性和结构完整性。随着连接温度的提高, 界面结构由直线型逐渐过渡为锯齿型, 这一变化有效地阻止了裂纹的扩展, 从而显著提升了接头的力学性能。特别是, 在 1000 °C 的连接温度下, ODS-W/Cu 模块的最大拉伸强度和伸长率超过 Cu 基体 (245.2 MPa, 15.2 %), 比直接扩散连接 (DDB) 的接头分别提升了 157.9% 和 56 倍。断裂模式从纯脆性断裂转变为韧性断裂模式。

C01-PO03

316L 和 Fe3Al 材料在含 Cl⁻、CO₂ 及 H₂S 环境中的腐蚀情况

曹卜元*

西部宝德科技股份有限公司

本文主要针对生物制氢、多晶硅生产、煤化工等行业用到的过滤分离产品的耐蚀性进行了研究。选取两种常见材质 316L 及 Fe₃Al, 研究了在含 Cl⁻、CO₂ 及 H₂S 环境中的腐蚀情况, 并对以上单一环境及共存状态下的两种材质的耐蚀性进行分析, 并给出不同环境下的使用材质建议, 同时也给出了提高材质耐蚀性的解决办法。

研究发现: 在相同的条件下, 316L 材质在 CO₂ 腐蚀比盐酸的腐蚀反应剧烈; 当钢材处于含 H₂S 的腐蚀环境中时, 钢材将会发生均匀腐蚀和局部腐蚀, 而局部腐蚀又包括点蚀、氧致开裂或应力导向的氧致开裂、氧鼓泡、氧脆以及硫化物应力腐蚀等。其反应的机理是 H₂S 在水中解离成 HS⁻、H⁺、S₂⁻ 同时还存在 H₂S, 经吸附, 脱附和水解反应; 钢材在 Cl⁻ 腐蚀介质中常常发生的腐蚀类型有点蚀、晶间腐蚀和应力腐蚀开裂等, 它通常体现在两个方面: 一方面 Cl⁻ 能破坏金属的钝化膜进而产生点蚀; 另一方面是氯离子直接参与阳极溶解。

虽然不同条件下铁铝化合物形成的钝化膜有所不同, 但还是有以下一些共同点: 在钝化形成的表面上形成三价铝的氧化物和氢氧化物, 并且表面的铝产生富集, 表面铝含量超过基体中铝含量, 钝化膜中铝含量的随着合金中铝含量的增加而增加, 钝化过程是铁的氧化物和铝的氧化物的共同作用形成的。

酸性溶液中的电流密度比碱性溶液中大的多, 并且含铝量不同的铁铝化合物差异比较大。基本上 Al 含量至少 10% 时, 铁铝化合物拥有较好的抗腐蚀性或保护性氧化膜。而查阅文献知, 生物制氢的环境基本 PH 在 3.5~6 之间, 因此该环境中的腐蚀反应相对碱性环境中剧烈。

有序化结构会影响 Fe₃Al 的耐蚀性, DO₃ 相的 Fe₃Al 要稍微优于 B₂ 相的 Fe₃Al, 这是因为 DO₃ 相的 Fe₃Al 的有序度要比 B₂ 相的 Fe₃Al 高一点。

在 CO₂ 和 H₂S 共存的实验条件下, 哪种腐蚀占据主导地位取决于 CO₂ 和 H₂S 的分压之比。当 H₂S 腐蚀占主导地位时, 腐蚀产物应以硫化物为主。由于生成的硫化物腐蚀产物膜是无规律的且不连续地局部生长, 同时还存在高密度缺陷, 某些地方易于破裂, 导致钝化膜的不连续性进而导致局部腐蚀的发生。

在 H₂S-CO₂-Cl⁻ 共存条件下, 材料表面局部出现点蚀, Cl⁻ 对腐蚀反应的影响较大。

Cr 元素的加入和预氧化处理都会使 Fe₃Al 基体耐蚀性提高, 主要原因是在 Fe₃Al 基体表面形成钝化膜或氧化膜, 抑制了原子对基体的腐蚀。

C01-PO04

制粉工艺对粉末热等静压 TA15 钛合金组织和性能的影响

倪瑞丰^{1,2}、张鹏杰²、车立达²、吕周晋²、陈硕²、李向阳^{*2}、章林¹

1. 北京科技大学新材料技术研究院
2. 钢研昊普科技有限公司

粉末原料是保障热等静压粉末冶金技术 (HIP-PM) 制备出高质量零部件的关键因素, 粉末特性对成形零部件的组织 and 性能有着较大影响。对于 TA15 钛合金, 采用氢化脱氢技术 (HDH) 制备的粉末进行热等静压粉末冶金的研究较少, 同时很少有学者系统研究对比不同工艺制备的 TA15 钛合金粉未经热等静压粉末冶金成形后的组织和性能差异, 因此本文以氢化脱氢(HDH)、气雾化(GA)和等离子旋转电极(PREP)工艺制备的粉末为原料, 在 920°C, 130MPa 的热等静压工艺下, 制备了 TA15 钛合金坯料, 并对其组织及力学性能差异进行了系统研究。研究表明, HDH 粉末显微组织中包含板条 α 相和较多的细小等轴 α 相, GA 和 PREP 粉末多由针状 α 相组成, 且成形后的坯料有着不同的力学性能表现, 其中 HDH 有着高强度 (抗拉强度 1066MPa) 低韧性 (延伸率 1.3%) 的特点, PREP (抗拉强度 956Mpa, 延伸率 16.5%) 和 GA (抗拉强度 912MPa, 延伸率 16.83%) 表现出较好的强韧性匹配。氧含量对 HDH 粉末压坯的韧性造成了影响, GA 和 PREP 粉末压坯的组织均为典型的“网篮组织”, 并观察到有原始粉末颗粒边界 (PPBs) 存在, 而 HDH 粉末压坯几乎由细小等轴晶组成, 并伴有少量粗大的板条组织。压坯与粉末颗粒的组织有很大的相似性, 在粉末热等静压过程中, 发生了“组织遗传”现象。虽然, HDH-TA15 钛合金粉末压坯存在韧性较低的问题, 但有望通过调整热等静压工艺和增加热处理等方式来改善, 同时发挥其较大的成本优势, 实现在结构件方面的应用。