

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

C19-难熔金属
C19-Refractory Metal Materials

Organized by

Chinese Materials Research Society

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

C19. 难熔金属

分会主席：罗来马、王金淑、章林、徐流杰

C19-01**钼基功能材料研究进展**

王金淑*

北京工业大学

C19-02**基于原位反应合成的氮化物强化难熔金属制备及性能研究**

章林*

北京科技大学

C19-03**钨的导电导热行为研究**

谭晓月*、高照、刘楠、陈昱溟、罗来马、吴玉程

合肥工业大学

钨(W)原子序数高、熔点高,导电导热性能又好,在电子、医疗、光伏、军工和核能等领域已经得到广泛地应用。基于现有的理论框架,主导金属导电导热的载流子是电子和声子,任何能散射载流子的因素均会影响金属的传导性。目前,商用W基本上是变形加工后的多晶材料,涉及影响其导电导热的因素主要包括晶体取向和晶界。

本报告将通过对有、无表面变形层的单晶W、烧结W、轧制W和再结晶W样品在不同温度下进行导电和导热性能表征,来阐述晶体取向、晶界以及机加工引起的变形层对W的导电导热行为的影响。发现W的电、热导率均随温度的升高而降低。温度升高,强振动的晶格原子对电子散射加强,降低了W电导率对晶体取向的依赖性。相较于电导率,W的热导率关于取向各向异性更为明显。晶向指数越大,相应的电子散射越强。[211]单晶的高热导率源于晶体取向决定的声子热导的贡献。晶界对W的电导率和热导率影响反相关于其密度,晶界密度越高,W电、热导率越低。然而,单晶W具有最大电导率和最低热导率。这意味着晶界对电子起散射作用,但对声子传导产生积极的影响。机加工引入的变形层弱化了W电导率和热导率的各向异性,会明显降低了单晶W的导热性能。由于轧制W的变形组织,表面变形层对其导电、导热性能基本无影响。对于烧结W来说,畸变层对其电导率有积极作用,但对其热导率表现为消极影响。本报告研究结果将对高导电、导热性能的W材料设计提供参考。

C19-04**钨铜合金制备与性能研究**

李秀青*

河南科技大学

C19-05**多晶高熵合金热压烧结聚结动力学:分子动力学和相场模型**赵宇宏^{*1,2}

1. 北京科技大学
2. 中北大学

利用经验参数预测高熵合金硬度时,特征计算和组合筛选是必要而繁琐的。为简化预测过程,提出了

一种基于成分的高熵合金硬度预测策略，为快速设计高硬度高熵合金提供了便利。以合金成分为输入，建立了基于随机森林的硬度预测模型。在训练集和测试集上，模型的 Pearson 相关系数分别达 0.956 和 0.954。随后，通过实验对反投影设计和高通量筛选得到的优选合金进行验证。Al_{41.68}Cr_{24.72}Fe_{8.02}Ni_{5.8}Co_{19.78} 高熵合金的硬度高达 802.03 HV。Shapley 值证实 Al、Ti、Mo、Cr、V 等元素可以提高高熵合金硬度，Ni、Cu、Co、Mn 和 Hf 会弱化高熵合金硬度。然而通过实验研究热压烧结 Al_{41.68}Cr_{24.72}Fe_{8.02}Ni_{5.8}Co_{19.78} 高熵合金在纳米压痕过程中存在的软化-硬化机制仍存在困难，需要借助分子动力学及相场等模拟手段。但现有的基于分子动力学的热烧结模型主要针对单晶合金，因此提出了一种基于分子动力学的多粒子模型，以多晶 Al_{0.3}CoCrFeNi 高熵合金为例，结合烧结相场模型验证了多粒子模型的准确性和有效性。利用该模型发现，当颗粒接触区由压力诱导演化为指数幂蠕变区时，颈缩、孔隙形成/填充、位错积累/分解、颗粒旋转/重排等现象的发生速度加快。烧结态 Al_{0.3}CoCrFeNi 高熵合金的杨氏模量为 214.11±1.03 GPa，与实验值偏差仅为 0.82%。这一模型为热压烧结 Al_{41.68}Cr_{24.72}Fe_{8.02}Ni_{5.8}Co_{19.78} 高熵合金在纳米压痕过程中存在的软化-硬化机制研究提供了基础。

C19-06

高韧性难熔高熵合金的断裂微观机制

屈瑞涛^{*1}、陈红¹、王绍钢²、刘峰¹

1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室
2. 中国科学院金属研究所

难熔高熵合金具有十分优异的高温力学性能，然而多数难熔高熵合金表现出严重的室温脆性，这制约着这类合金的工程应用。前期研究发现，HfNbTaTiZr 难熔高熵合金尽管拉伸强塑性并不突出，但是具有十分优异的断裂韧性，与高韧性的面心立方 CoCrFeMnNi 相近。为了揭示 HfNbTaTiZr 高韧性难熔高熵合金的断裂微观机制，我们开展了 X 射线准原位研究，对微孔形成及发展演化等断裂损伤机制进行了深入研究，发现高熵合金中微孔长大缓慢，颈缩区不断扩展而非迅速集中，为此能延缓裂纹萌生及断裂。该结果深入了对延性难熔高熵合金断裂机理的认识，也对于难熔高熵合金的韧化设计有一定指导意义。

C19-07

轻质难熔高熵合金的制备及其高温力学特性

操振华^{*}、开明杰、赵伟亮
南京工业大学

轻质难熔高熵合金具有高熔点和高强度，在航空航天等领域具有广泛应用潜力。在本工作中，我们制备了一种新型单相 TiAlVCrMo 系低密度难熔高熵合金，系统地研究了该合金的高温力学性能及其塑性变形机制。研究表明，在室温和高温下都表现出优异的强度与塑性。在 600 °C 时，该样品的屈服强度高达 760 MPa，同时有显著的应变硬化能力。当温度升高到 800 °C 时，屈服强度仍保持在 530 MPa。Mo 元素有效地稳定了高熵 BCC 相，抑制了基体相中有序沉淀的形成。严重的晶格畸变增加了位错移动障碍，促进了高温塑性变形过程中的位错增殖，导致显著的应变硬化行为。原子尺寸和模量错配产生的强固溶强化是其高温抗软化性能的主要原因。

C19-08

增材制造高熵合金层错能效应的阻裂与强韧化

李瑞迪^{*}
中南大学

激光增材制造高熵合金 (High Entropy Alloys, HEAs) 由于具有超细晶组织、优异力学性能与复杂形状的独特优势，在航空航天及核能领域具有潜在应用前景。然而，HEAs 激光粉末床熔融 (Laser Powder Bed Fusion, LPBF) 增材制造往往难兼具“高强度”与“低裂纹敏感性”，成为技术应用的瓶颈。基于此，本文选择

$\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ ($x=0\sim 1$) 高熵合金为研究对象, 着重探讨合金成分对晶体结构类型、裂纹行为及强韧化的影响规律。当 $x=0.7\sim 1$ 时, LPBF 制备 HEAs 为 BCC 晶体结构, 具有较低的应变协调性, 难以适应激光快速凝固热应力, 产生可目视的宏观裂纹 (裂纹密度高达 6.8 mm^{-1}), 甚至影响 LPBF 成形; 当 x 降至 0.5 以下时, LPBF 制备 HEAs 转变为 FCC 晶体结构, 宏观裂纹消失, LPBF 宏观试样成形性良好, 但还存在应力变形或少量微观裂纹 (裂纹密度为 0.05 mm^{-1})。基于此, 本文提出了通过降低 FCC 高熵合金层错能, 减缓应力变形与微裂纹的思路。第一性原理计算和透射电镜弱束暗场分析表明, FCC 结构 $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ ($x=0\sim 0.5$) 高熵合金层错能随 Al 含量增加呈现出先减小后增大的趋势。在 $x=0.1$ (Al 含量为 2.4 at.%) 时具有最低的层错能, 而此时 LPBF 试样表现出最低的翘曲变形量且无微观裂纹, 其原因是低层错能促进 LPBF 热应力诱发层错等晶体缺陷, 消耗了热应力; 同时低层错能合金变形过程中更易发生 TWIP 和 TRIP, 因此可协同提升打印样品的强塑性。

C19-09

TiZrHfNb 块体难熔高熵合金燃烧动力学性能研究

刘和灵*

北京理工大学

作为高熵合金的一个重要分支, 难熔高熵合金在高温结构材料和结构释能材料等极端环境服役领域展现出了很好的应用潜力。因此, 难熔高熵合金的燃烧性能是必须要考虑的重要因素。本文基于自行组建的激光点火燃烧测试平台, 测试了块体 TiZrHfNb 难熔高熵合金的燃烧性能, 并研究了元素组成、样品尺寸、氧气浓度对材料燃烧动力学性能的影响。通过对燃烧产物的形貌表征和物相分析, 分析了 TiZrHfNb 难熔高熵合金燃烧过程中的元素反应及扩散顺序。

C19-10

Superior wear resistance in a TaMoNb compositionally complex alloy film via in-situ formation of the amorphous-crystalline nanocomposite layer and gradient nanostructure

Jiasi Luo, Fuzeng Ren*

Southern University of Science and Technology

Metallic alloys with exceptional wear resistance have long been an attractive prospect for their enhanced safety, reliability, and service duration. Herein, we propose a strategy to achieve superior wear resistance via the in-situ formation of an amorphous-crystalline nanocomposite layer and gradient nanostructure during wear at elevated temperatures. This strategy was demonstrated in a compositionally complex alloy TaMoNb film with a columnar grain structure upon sliding wear at 300 °C. In contrast to the surface layer formed at room temperature (RT), which consists of irregularly shaped TaMoNb nanograins with non-uniform size and distribution in the amorphous oxide matrix, a dense 300 nm-thick nanocomposite layer comprising equiaxed nanograins of only ~6 nm embedded in the amorphous oxide matrix is formed during wear at 300 °C, below which is a 600 nm-thick plastic-deformation region that exhibits gradient nanostructure. The microstructure induced by wear at 400 °C shows the presence of a 30 nm-thick amorphous layer below the nanocomposite surface layer but no appreciable plastic deformation in the base film. Consequently, the TaMoNb film exhibits a remarkably low wear rate upon wear at 300 °C that is less than 25% of those at RT and 400 °C. Such superior wear resistance is attributed to the specific wear-induced microstructure generated at 300 °C, which has high strength and large homogeneous deformation. Thus, this work offers a new strategy for designing self-adaptive wear-resistant alloys for application in extreme thermo-mechanical service environments.

C19-11

激光增材制造面心立方高熵合金位错组态调控与强塑性协同提升机制研究

牛朋达、李瑞迪*

中南大学

激光增材制造 (Additive Manufacturing, AM) 过程中复杂的热历史、大的温度梯度和高的冷却速率可在材料中诱导高的位错密度和独特的位错结构。这种独特的位错结构不仅能够有效阻碍位错运动,从而显著提高材料的强度,还能通过促进位错的滑移和交叉滑移,增强材料的塑性变形能力。但目前为止,关于影响激光增材制造样品位错组态、位错密度的机制尚不清楚。本研究以面心立方 $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ ($x=0\sim0.5$) 高熵合金 (High Entropy Alloys, HEAs) 为研究对象,研究了激光粉末床熔融 (Laser Powder Bed Fusion, LPBF) 制备 HEAs 中 Al 含量对位错组态的影响,以及对强塑性协同提升的作用规律。对于 $x=0$ 的 HEA 合金,显微组织呈现由大量波状位错组成的位错胞结构 (直径约 500 nm); 而少量铝元素的加入 ($x=0.1$), HEA 开始出现平面位错,位错胞结构消失。随着 Al 含量的进一步提高 ($x=0.2\sim0.5$), 位错由波状滑移→平面滑移转变的趋势逐渐增大。表明低层错能或高晶格摩擦阻力均可促进位错从波状滑移 (位错胞) 向平面滑移 (非胞) 转变。而位错组态的转变 (胞状位错→非胞) 协同提升了 LPBF- $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ ($x=0\sim0.5$) 合金的强塑性,使屈服强度从 548 MPa ($x=0$, 胞状位错) 提升到 730 MPa ($x=0.5$, 平面位错) 的同时,仍保持较高的均匀延伸率 (从 22% 到 25%)。表明可通过层错能和晶格摩擦阻力对位错组态的调控,实现 LPBF 样品强塑性的协同提升。

C19-12

钨钼系高熵合金力学性能提升途径探讨

徐流杰*

河南科技大学

C19-13

NbZrTi 基难熔高熵合金辐照效应及力学行为影响研究

卢晨阳*

西安交通大学

C19-14

ZrO₂ 增强钨基复合材料耐辐照性能研究

罗春阳^{1,2}、崔博¹、戚麟¹、徐流杰^{2,3}、宗乐³、周晓松¹、申华海^{*1}

1. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所

2. 河南科技大学金属材料磨损控制与成型技术国家地方联合工程研究中心

3. 河南科技大学河南省高温结构与功能材料重点实验室

金属钨因其在核反应堆第一壁候选材料中的潜在应用而备受关注,其耐辐照性能的提高对材料的安全与可靠至关重要^[1-4]。本研究系统评估了 ZrO_2 的加入对钨基复合材料在不同离子辐照条件下的组织与力学性能的影响。通过透射电镜与纳米压痕法,比较了纯钨与 W-1.5% ZrO_2 合金在 700 °C 下的碳离子辐照损伤 (0.25 至 2.0 dpa 范围内) 以及室温下金离子辐照后的组织演变 (80 至 100 dpa 范围内)。发现 W-1.5% ZrO_2 合金中位错环的尺寸和密度均小于纯钨,且硬度变化小,揭示了 ZrO_2 相的添加显著提高了钨材料对辐照缺陷的吸收能力,降低了辐照硬化。进一步的显微结构分析显示,锻压的 W-1.5% ZrO_2 合金由于具有高密度的析出界面和晶界,能够吸收更多的辐照位错,表现出最低的辐照硬化效应和最高的综合硬度 (4.52 GPa)。这些结果验证了通过引入 ZrO_2 相和优化加工工艺,可以有效改善钨材料的耐辐照性能,对核能源设备的材料设计具有重要意义。

参考文献

- [1] Maisonnier D, Cook L, Pierre S, et al. Fusion Engineering & Design, 2006, 81: 1123.
- [2] Rieth M, Armstrong D, Dafferner B, et al. Advances in Science and Technology, 2010, 73: 11.
- [3] Fukuda M, Yabuuchi K, Nogami S, et al. Journal Nuclear Materials, 2014, 455: 460.
- [4] Tanno T, Hasegawa A, He J C, et al. Materials Transactions, 2007, 48: 2399.

C19-15

平面显示用钼合金溅射靶材的发展及应用现状

陈立甲*

丰联科光电（洛阳）股份有限公司

C19-16

Advanced Wear Protection at High Temperatures: A Study of $\text{Al}_{20}\text{V}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Nb}_{(40-x)}\text{Mo}_x$ RHEA Coatings on Ti6Al4V by Laser Cladding

Hao Liu

Chongqing University of Technology

$\text{Al}_{20}\text{V}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Nb}_{(40-x)}\text{Mo}_x$ Refractory High Entropy Alloys (RHEAs) coatings were applied to Ti6Al4V surfaces via laser cladding. These coatings, primarily in a single BCC phase with dendritic microstructures, demonstrated varied wear resistance. Notably, the $\text{Al}_{20}\text{V}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Nb}_{10}\text{Mo}_{30}$ exhibited the highest wear resistance, achieving a wear rate reduction of 98.35% and 99.28% compared to uncoated Ti6Al4V and the $\text{Al}_{20}\text{V}_{20}\text{Cr}_{20}\text{Nb}_{30}\text{Mo}_{10}$ coating, respectively. This superior performance is attributed to the formation of a dense oxide film and the beneficial presence of rod-like $\text{Al}_2(\text{MoO}_4)_3$ and $\text{Cr}_2(\text{MoO}_4)_3$ oxides, which enhance mechanical clamping at the surface. The study highlights the critical role of rapid oxide film formation at 600°C in enhancing the high-temperature wear resistance of Ti6Al4V, offering insights into the tribological behaviour of RHEA coatings under extreme conditions.

C19-17

轧制钾钨的制备及性能表征

马晓磊^{1,2}、王宇钢^{1,2}、燕青芝^{*3}

1. 北京大学物理学院重离子物理研究所
2. 北京大学物理学院核物理与核技术国家重点实验室
3. 北京科技大学材料科学与工程学院核材料研究所

钾掺杂钨（Potassium-doped tungsten, KW）被认为是未来核聚变反应堆中最具应用潜力的面向等离子体材料（Plasma-facing materials, PFMs）之一。本工作采用粉末冶金和塑性变形技术制备了 KW 板材，K 泡尺寸 ~ 71 nm，数密度 $\sim 7.6 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ，且呈串状分布。系统评价了 KW 的微观组织、高温力学性能、再结晶行为；在此基础上，开展了 KW 的 D 等离子体辐照、高能重离子辐照、重离子-D-He 等离子体耦合辐照、瞬态和稳态高热负荷冲击实验，系统评价了 KW 作为第一壁材料的使用性能。结果表明：K 掺杂显著提高了 W 材料的强韧性和再结晶温度，200 °C 下的极限抗拉强度 ~ 1137 MPa，断后伸率 $\sim 26\%$ ；1800 °C 退火 1 小时后的再结晶比例仅为 $\sim 13.2\%$ 。此外，K 掺杂还能够显著抑制辐照过程中 W 间隙原子和空位的产生和聚集，从而抑制空位型和位错型缺陷的发展；重离子辐照后 KW 的位错线数密度和尺寸分别为 $\sim 1.52 \times 10^{14} \text{ m}^{-3}$ 和 ~ 73 nm，低于同样条件的纯钨。最后，制备了两组 KW-Cu 通水穿管模块，并进行了 20 MW $\text{m}^{-2}/300$ 次、20 MW $\text{m}^{-2}/1000$ 次、23 MW $\text{m}^{-2}/300$ 次、25 MW $\text{m}^{-2}/300$ 次四种循环高热负荷冲击，KW 模块表面仅在 25 MW $\text{m}^{-2}/300$ 次循环条件下发生了开裂，这是目前国内外所报道的最高稳态开裂值。这些结果均符合聚变堆 PFMs 的服役要求，为聚变堆的工程化应用提供了材料支持和数据积累。

C19-18

钨表面液膜剪切抛光新方法研究

陈泓谕*、洪彬彬、吴锚喜、万红兵、吕冰海

浙江工业大学

针对多晶钨去除均匀性差、晶界优先去除和加工损伤等问题，本文提出了一种钨表面液膜剪切抛光新方法研究：基于非牛顿流体抛光液的剪切流变特性，拟通过表面结构化抛光盘的强化作用在工件与抛光盘之间形成液膜剪切效应，利用高速剪切液膜增大磨粒对工件表面粗糙峰的水平剪切去除，减少法向力作用，避免晶界的优先去除，进而提高加工效率和加工表面均匀性，实现工件表面高效高质量低损伤抛光。通过

理论分析、数值仿真、实验研究,揭示了液膜剪切抛光的去除机理,探索了抛光参数对材料去除率与表面质量的影响,对比分析了机械抛光与液膜剪切抛光对材料钨的加工损伤行为。结果表明,在液膜间距 1 mm,抛光速率 110 r/min,磨粒粒度 1 μm 以及磨粒浓度为 4%时,钨表面效果最佳,平整且无划痕,表面粗糙度 Sa 为 16.7 nm。相较于机械抛光,液膜剪切抛光后的钨亚表面缺陷浓度更低、更加均匀。研究结果验证了液膜剪切抛光可实现钨表面高质量、低损伤抛光,成果有望为难熔硬脆金属超精密加工提供一种新的抛光技术和理论体系。

C19-19

液态金属诱导制备难熔金属基功能材料及性能研究

崔云涛*

中国科学院理化技术研究所

镓基液态金属具备表面张力大、表界面活性强及热导率、电导率高等优异特性,特别是在酸性或碱性环境中,呈现优异的还原能力,可还原诱导钨、钼、铌、钛、铜等多种难熔金属基功能材料。在酸性溶液中, WO_3 和 MoO_3 可快速被还原成氢钨青铜材料 (H_xWO_3)。实现了室温一步法制备氢钨青铜结构材料,与传统氢钨青铜结构材料的制备方法相比,显著降低了合成温度,简化了制备工艺,并且呈现优异的光电催化性能。镓基液态金属还能够将偏钨酸盐、钼酸铵中的高氧化态钨离子、钼离子部分还原为低价钨离子,由于电子能级发生跃迁,溶液颜色由无色状变为蓝色。在液相显示、酸性气氛传感器、可逆复写纸等方面有着潜在的应用前景。在碱性溶液中,由于静电作用力,氧化铜纳米颗粒被吸附到液态金属的光滑表面上,可以被还原成单质铜膜。不同于离子置换反应,反应过程不涉及离子,氧化铜提供了产物生成的模板与框架,避免了无规则的析晶现象,使得铜膜整体光滑而致密。此外,还制备了氧化钨/液态金属/铜泡沫 ($\text{WO}_3\text{-LM-Cu}$) 复合材料,可以用于重金属离子检测,具备工艺简单、可检测性与可靠性良好。

C19-20

基于冰模板法构筑层状 W-Cu 复合材料

陈铮*、高艺蕾、张乔、梁淑华

西安理工大学

通过微结构设计来提升复合材料的性能受到越来越多的关注,其中层状结构因具有优异的力学及物理性能在多种复合材料中均取得了优异的效果。本文通过冰模板法和熔渗法成功制备了层状 W-Cu 复合材料。研究表明,冰模板法制备的 W 骨架片层梯度结构,片层厚度和孔隙率沿冷冻方向递增;经熔渗后得到的层状 W-50Cu 复合材料中 W 和 Cu 相平行排列,沿片层方向的导电和压缩强度较商业 W-30Cu 复合材料高,说明片层结构能同时提升 W-Cu 复合材料的力学和传导性能。

C19-21

A Study on the Performance and Microstructure of Nb-Si Alloys with Computational-Aided Materials Design

Chengkang Qi¹, Fei Li^{*1}, Shenlu Yang¹, Shurong Li², Shudong Huang¹

1. Shanghai Jiaotong University

2. State Key Laboratory of Special Rare Metal Materials, Northwest Rare Metal Research Institute

Using computational software platforms such as VASP, atomate, and the Materials Project (MP), we conducted high-throughput first-principles calculations to investigate the effects of various alloying elements on the lattice constants, mechanical properties, and solid solution strengthening of the Nbss matrix and precipitate strengthening phases $\alpha\text{-Nb}_5\text{Si}_3$, $\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3$, and Nb_3Si in Nb-Si alloy. Nine alloying elements were considered, including the main group elements (B, C, and Al) and transition metals from the 3d (Sc, Ti, and Cr), 4d (Zr), and 5d (Hf and W) series.

The results indicate that Cr exhibits superior solid solution strengthening in the Nbss phase compared with most other alloying elements. Additionally, the segregation of Zr at the grain boundaries enhances the

high-temperature creep resistance of the alloy. Based on these computational results, the alloy composition was determined as Nb-16Si-24.7Ti-8.2Hf-2.0Cr-1.9Al (at.%). This alloy has a density of only 6.63 g/cm³, which is significantly lower than that of Ni-based superalloys.

XRD and EBSD analyses confirmed that the alloy consists solely of the Nbss and γ -Nb₅Si₃ phases, with orientation relationships of $\langle 111 \rangle_{\text{Nbss}} // \langle 0001 \rangle_{\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3}$, and $\{110\}_{\text{Nbss}} // \{10\bar{1}0\}_{\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3}$. The alloy exhibits a room-temperature tensile strength of 376.13 MPa and a fracture toughness of 15.37 MPa·m^{1/2}. At 1200°C and 80 MPa, the creep life is 6.25 h. This study provides valuable insights into the compositional design and processing of large high-performance Nb-Si alloy ingots.

C19-22

合金化对轴承用 60NiTi 合金微结构及性能的影响研究

魏雨菲、陈诗瑶、张利军*

中南大学粉末冶金研究院

60NiTi 合金具有高耐蚀性, 高弹性, 摩擦自润滑能力等优良性能, 在航天用高性能轴承合金领域极具潜力。目前, 60NiTi 合金有限的耐磨性能是限制其使用寿命的主要原因之一。采用合金化的方法是提升 60NiTi 合金耐磨性能的有效手段, 然而, 采用传统“试错法”耗时耗材, 难以快速定位最佳添加元素及其添加量。

本研究采用二步扩散偶法高通量筛选具备优异耐磨潜力的 60NiTi-X 合金。首先, 制备了一系列扩散偶样品 Ni-Ti/Ni-Ti-X (X = Hf、Cr 和 Al), 高温退火后扩散区域可获得连续变化的成分梯度。其次, 对扩散偶样品进行时效处理, 并通过电子探针、扫描电镜、透射电镜、纳米压痕等检测手段表征合金微区的成分、组织和力学性能, 进一步构建 60NiTi-X 合金成分-组织-性能关系, 探究了 Hf、Cr 和 Al 3 种合金元素的添加对 60NiTi 合金微结构与力学性能的影响。最后, 高效筛选出了具有高硬度, 低杨氏模量的新型 NiTi 基合金 Ni_{64.7}Ti_{23.7}Hf_{11.6}。所设计的新型合金硬度达 860Hv, 较 60NiTi 合金提升超 200Hv, 提升幅度约为 35%。

C19-23

体心立方金属钨强韧化机制探索

韩卫忠*

西安交通大学

体心立方金属钨具有高熔点、高温强度、高导热性、低溅射率、低氢 (H/D/T) 滞留率和抗辐照损伤等优异性能, 被誉为核聚变反应堆第一壁和偏滤器的首选材料。但金属钨的低温韧性差, 韧脆转变温度高, 极大地限制了钨及钨合金的加工和应用。然而, 由于金属材料韧脆转变机理长期存在争议、关键机理不清, 使得钨的低温韧化长期困扰着学术界。报告将介绍近期开展的关于钨的韧脆转变机制、钨中的“铼效应”及通过引入轧制预变形和双相复合调控金属钨的低温韧性的研究进展。报告将以位错源效率为切入点, 以体心立方金属的韧脆转变机制为例, 阐述从调控位错源效率和位错源数量角度实现难熔金属强韧化的新策略。参考 PNAS 118 (2021) E2110596118, Acta Mater 220 (2021) 117332, Acta Mater 248 (2023) 118788, Acta Mater 264 (2024) 119586。

C19-24

Effect of Electrolyte on the Phase composition and Microstructure of Micro-Arc Oxidation Ceramic Coating on the Surface of Tantalum

Pei Zhao¹, Aijuan Wang^{*1}, Zhaobo Li^{*2,3,4}, Kai Wang^{3,4}, Dongliang Ge¹

1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology

2. Ningxia Orient Tantalum Industry Co, Ltd

3. State Key Laboratory of Rare Metal Special Materials, Northwest Rare Metal Material Research Institute
Ningxia Co, Ltd

4. CNMC Ningxia Orient Group Co., Ltd

The ceramic coating on the surface of tantalum was fabricated using micro-arc oxidation technology. The surface properties as well as the microstructure, phase composition and bonding force of the ceramic coating fabricated in different kinds of electrolytes were studied. The growth behavior was also discussed by studying its electrochemical impedance spectroscopy (EIS) characteristics. The results showed that the ceramic coating could be fabricated in the electrolyte of Na_2SiO_3 , Na_3PO_4 and NaAlO_2 , respectively. Ta_2O_5 is the main phase composition of the ceramic coating when fabricated in Na_2SiO_3 and Na_3PO_4 electrolytes. The ceramic coating formed in NaAlO_2 electrolyte was mainly composed of Ta-O amorphous phase. The bonding force of the ceramic coating is the best when fabricated in NaAlO_2 electrolyte. Compared with the ceramics coating fabricated in other electrolytes, the impedance value R_2 was the largest when fabricated in NaAlO_2 electrolyte, indicating that the ceramic coating is the densest. In conclusion, ceramic coating on the surface of tantalum could be fabricated in selected electrolyte successfully, but different phase compositions and density appeared with different kinds of electrolyte.

C19-25

高含量掺钾钨块材的微观组织及力学性能研究

梁孟霞¹、颜彬游^{2,3}、代少伟^{2,3}、宋久鹏^{*1,2,3}、封范⁴、王建豹⁴、练友运⁴、刘翔⁴

1. 西华大学

2. 厦门钨业股份有限公司

3. 国家钨材料工程技术研究中心

4. 核工业西南物理研究院

掺钾钨 (AKS-W) 具有高熔点、高硬度、高导热、高温强度及优异的氦滞留性能等优点, 是极具潜力的面向等离子体材料之一。但由于大尺寸掺钾钨块材的制备加工技术尚不成熟, 要实现其在未来聚变堆中的工程应用还需要进一步提升该材料的性能。为优化大尺寸掺钾钨块材的综合物理及力学性能, 本研究基于工业化的粉末冶金工艺制备了钾 (K) 掺杂含量较高 (87ppm-96ppm) 的 AKS-W 烧结坯。分别通过高温旋锻及高温轧制结合中间退火的热加工工艺, 获得了不同变形量的棒材和板材。研究了不同变形量对 AKS-W 棒材及板材的微观组织、钾泡形态、热导率、高温拉伸性能以及高温再结晶性能的影响。为了研究不同 K 含量对材料性能的影响, 采用相同的工艺制备了与 AKS-W 块材相同尺寸及变形量的纯钨 (PW) 棒材及板材。结果表明添加了高 K 含量的 AKS-W 可获得与 PW 相当的致密度, 并在保持了 PW 优异的热导率的同时, 通过细化晶粒使 AKS-W 块材具有更高的硬度和高温强度。随着变形量的增加, PW 及 AKS-W 的密度、硬度及强度均升高。在对数应变为 2.95 时, AKS-W 棒材的再结晶温度 (RCT) 达到 1820°C。而对于 AKS-W 板材, 最高 RCT 达到 1780°C。在室温-1100°C 采用高温拉伸法测得 AKS-W 棒材的韧脆转变温度 (DBTT) 明显低于 PW, 为 50°C-100°C。通过分析发现, K 泡在高温旋锻及高温轧制过程中均发生了 K 管的“动态分裂”, 该动态分裂对热加工后 K 泡串的形态和分布、材料的微观组织以及 AKS-W 块材的综合物理及力学性能有关键作用。采用该工艺制备 AKS-W 厚板制造的一类 ITER 穿管模块在 1500 次 20 MW/m² 的超高热负荷下, 钨块表面温度最高稳定在 1500 °C 左右, 没有出现宏观裂纹和失效。

C19-26

金属钨的室温塑性探索

李星宇

北京科技大学

C19-27

纯铼的超高温拉伸蠕变性能及蠕变机理

杨承昊、应雯清、张程煜*

西北工业大学

铼作为一种难熔金属，在很宽的范围内具有较高的抗拉强度和抗蠕变性能，为了满足纯铼在 MOCVD 加热器等苛刻超高温服役环境的应用，研究了粉末冶金制备的纯铼的拉伸蠕变行为，蠕变温度为 1700~2000 °C，蠕变应力为 20~50 MPa，测试环境为真空。采用 SEM 观察蠕变断口，采用 EBSD 观察蠕变前后晶粒取向及晶粒尺寸变化，采用 TEM 表征位错在蠕变过程中的演变规律。结果表明，纯铼的蠕变速率范围为 $4.56 \times 10^{-8} \sim 1.13 \times 10^{-6}$ ，断裂应变范围为 1.9%~3%，蠕变应力指数~3。纯铼在蠕变过程中晶粒发生明显长大，纯铼在超高温下蠕变断裂机制主要为孔洞的萌生和聚合以及裂纹的扩展。纯铼的蠕变变形主要由位错滑移控制，蠕变诱导产生动态回复与动态再结晶，发挥软化作用。

C19-28

高纯钨材料的制备技术与应用

纪人一、聂志华*、于晓东、谭成文

北京理工大学

钨作为原子能行业及半导体制造中的重要材料，需要具备高纯度，高致密度等性质以及均匀的微观结构，以确保在高温、高真空等极端环境下的稳定性。因此，为获得满足需求的高品质高纯钨材料，开发高效可控的制备工艺和后续加工技术至关重要。本研究采用常压化学气相沉积法，通过氢气还原六氟化钨制备高纯钨材料，并利用电子背散射衍射技术和晶体塑性有限元模拟，研究化学气相沉积钨在轧制变形过程中的微观结构演变。结果表明，所制备的化学气相沉积钨的纯度大于 6N，致密度高于 99.5%。通过轧制变形处理，成功实现了化学气相沉积钨的组织调控。本研究旨在为高品质高纯钨的稳定制备提供关键技术支持。目前，化学气相沉积钨及其轧制态产品已在偏滤器、发射极、溅射靶材等多个领域得到广泛应用。

C19-29

MXene 相 (Mo₂TiC₂) 掺杂钼合金的制备及其初化机制研究

张国君*、陈璇

西安理工大学

掺杂碳化物的钼合金，如 TZM 合金，因其具备良好的室温强度、延性以及高温抗蠕变性能，已作为高温结构材料应用于航天航空、军工、核能和冶金等领域。但随着各应用领域对材料性能要求越来越苛刻，传统碳化物强化钼合金的性能，尤其是室温延韧性已难以满足现代科技应用的需求。亟待探索和研究新型高强韧钼合金。本研究采用具有 MXene 相结构的 Mo₂TiC₂ 颗粒作为增强相，利用粉末冶金技术制备了具有不同碳化物添加量的钼合金。研究了所制备合金的微观组织与力学性能，探究了 MXene 相结构的 Mo₂TiC₂ 碳化物颗粒对钼合金微观组织、室温和高温力学性能的影响规律。通过将微观组织-变形机理-力学性能相关联，揭示了 Mo₂TiC₂ 掺杂钼合金的初化机制。

研究发现，添加 Mo₂TiC₂ 的钼合金中，颗粒与钼基体之间存在厚度为纳米级的啮合界面层。随着 Mo₂TiC₂ 颗粒掺杂量的增加，合金的致密度逐渐提高，晶粒尺寸逐渐减小。Mo₂TiC₂ 颗粒的添加在钼基体中引入了更多的小角度晶界和更大的相界面积，提高了钼合金的塑性变形协调能力。当 Mo₂TiC₂ 颗粒的掺杂量为 2 wt% 时，合金的延伸率达到 46.5 %，断裂韧性值达到 123.3，分别较相同条件制备的纯钼材料性能提高了 172 % 和 143 %。初化机制分析表明：Mo₂TiC₂ 颗粒掺杂钼合金的高延性主要源于以下四个因素的协同作用：合金的高致密度、第二相颗粒的微尺度塑性变形松弛了相界面处的应力集中、钼晶粒细化以及合金的高应变硬化率。Mo₂TiC₂ 颗粒掺杂钼合金的高断裂韧性主要源于以下四个方面：合金的高致密度、钼基体的局部塑性变形、裂纹偏转和颗粒拔出以及次生裂纹的产生。特别是 Mo₂TiC₂ 颗粒中存在的碳化物片层间隙导致钼合金中的相界面积和小角度晶界比例增大，进一步提高了钼合金的协调塑性变形能力，使 Mo₂TiC₂ 颗粒掺杂钼合金具有优异的延韧性。

C19-30

Ta-W-Hf 合金的室温力学行为研究

李苏植*、薛敏涛、丁向东、孙军

西安交通大学

研究了 W 和 Hf 对 Ta 合金韧脆转变行为的影响。对于 Ta-W 二元合金, 当 W 含量增加到 14% 时, 合金在室温下发生显著的韧脆转变。在 Ta-W 合金基础上添加合金元素 Hf, 在不降低合金强度的同时显著提升了延伸率。微观结构表征显示 Hf 有少量固溶在基体中, 在晶界附近有明显的成分偏聚, 还易与基体和晶界的氧结合形成氧化物。分子动力学模拟表明, Hf 有助于螺位错扭折的形成, 促进螺位错运动及位错增殖, Hf 在晶界的偏聚提高了晶界结合强度。另外, HfO_2 第二相对位错运动产生显著交互作用, 且自身还能够在变形中诱发层错, 辅助塑性应变。以上研究有助于设计力学性能优异的 Ta-W-Hf 合金。

C19-31

难熔金属材料钎焊界面行为分析及性能调控

胡胜鹏

哈尔滨工业大学(威海)

C19-32

轻质高强钨基合金计算设计基础研究

刘永利*、王子龙、郭新伟、马禅玉、冯博宇、祁阳

东北大学

难熔金属钨具有熔点高、硬度大的优点但性能偏脆, 因此难熔金属的韧化和强化研究非常重要。添加 Re 可显著改善钨的脆性, 添加 Mo 可以有效降低钨合金的比重, 陶瓷颗粒相的弥散强化可有效保持高温强度。但看似简单的固溶-弥散复合强化的思路中仍然存在一些疑难科学问题。合金元素在基体金属中的分布以及颗粒相-基体界面匹配对合金力学性能的影响相关的研究却极其有限。我们对不同元素分布所导致的微观结构甚至原子、电子层次键合等相关方面的变化知之甚少, 尤其是合金元素分布对力学性能的影响值得探究。本工作分别从合金元素分布对钨合金力学性能的影响和弥散强化颗粒相的选择和处理方面进行了探究, 系统研究了 Mo 和 Re 在钨基体中以高对称分布、团簇分布和随机固溶分布时对合金的相稳定性、力学以及热力学性能的影响, 并重点从价键相互作用的角度去探讨不同分布所致的合金化效果, 发现不同分布的 W (Mo, Cr)-Re 中存在着迥然不同的构效关系; 研究了颗粒相-基体的界面匹配对界面结合力和稳定性的影响, 筛选出强韧性俱佳的颗粒相种类和含量。该研究不但能指导高性能 W 基合金的设计和研发, 也可以为其他固溶-弥散强化体系研发和性能的优化提供参考。

C19-33

钼合金熔盐法 Mo-Si-B 表面涂层体系开发及服役性能研究

王力、胡平*、王快社

西安建筑科技大学

钼合金由于在高温条件下具有高的强度和硬度、良好的导电导热性能, 被广泛应用于航空航天、核能电力等高温服役结构件。然而, 在高温服役环境下, 钼合金极易发生快速氧化, 引起结构件失效。目前二硅化钼涂层由于其较低的氧扩散速率, 阻挡 O_2 向涂层内部扩散, 所以被广泛应用于钼合金表面抗氧化设计。但依然存在涂层开裂、第二相析出、制备成本较高等缺点。因此, 需要开发新型硅化物涂层制备工艺, 获得优异均匀性、高结合力及高温抗氧化性能的硅化物涂层。本文采用熔盐法制备改性硅化物涂层并针对其抗氧化机理展开研究。首先优化了熔盐法工艺参数, 实现了无开裂、无第二相析出的 MoSi_2 涂层成功制备; 进而, 采用原子型渗入, 实现硅化物涂层 Hf 合金的原位改性, 最终制备的 Hf 改性硅化物涂层剧烈氧化温度高于 1300°C , 较好的氧化性能主要归因于 Hf 元素氧化形成 Hf 的氧化物, 促进硅化物涂层致密化。该研究成果为高性能致密抗氧化涂层提供了思路。

C19-34

纳米 HfC 掺杂钼合金强度-塑性协同提升的机理研究

张婉婷、周增林*

北京有色金属研究总院

钼及其合金的高熔点及良好的高温性能使其在航空航天、电子电力、核工业等领域广泛应用。针对目前钼合金室温与高温强度与韧性难以兼顾的问题,采用粉末冶金和连续热形变工艺制备具有优异机械性能和热稳定性的 Mo-xHfC 合金棒材,研究了 HfC 含量对钼材料显微组织和力学性能的影响。结果表明,掺杂 0.5wt.%纳米 HfC 的钼合金棒的室温抗拉强度高达 950MPa,同时有 42.0%的总延伸率;1000°C 高温拉伸的抗拉强度 442MPa,总延伸率 35.9%,具有优异的室温与高温强度-塑性协同。此外,HfC 的添加显著提高了钼合金的再结晶温度,掺杂 0.5wt.%HfC 钼合金的再结晶完成温度为 1300~1400°C,比纯钼高约 200~300°C。经 1200°C,1400°C,1600°C 退火后,钼合金的总延伸率均高于 85%,展现出优异的韧性。钼合金机械性能和热稳定性的提升来源于热变形强化及纳米 HfC 粒子的弥散强化,第二相粒子能够细化晶粒并抑制晶粒长大,同时与位错交互作用阻碍位错运动等。HfC 还与间隙 O 反应,形成稳定的 Hf-C-O 或 HfO₂ 颗粒,净化晶界,显著降低 O 对钼合金的脆化。

C19-35

钼铼合金制备及性能研究:从机器学习到制备工艺探索

宋辉煌

北京科技大学

C19-36

热力学引导原位构建 Mo₂C-Mo₂N 异质结构/氮掺杂碳纳米带阵列及电催化析氢性能研究

郑雍智、巩鑫宇、胡鹏*

北京工业大学

如何原位合成异质结构以提高 Mo₂C 基催化剂的性能仍然是一个挑战。在此,我们提出了一种新的策略,通过在不同气氛下对含钼的有机-无机杂化物前驱体进行热处理,在碳布上原位合成 Mo₂C-Mo₂N 异质结构嵌入氮掺杂碳复合材料。系统研究了退火条件对催化剂结构的影响。原位形成的 Mo₂C-Mo₂N 异质结构界面上的电子相互作用改善了 H 中间物种的吸附和解吸过程,导致大量活性位点的产生。催化剂在大电流条件下的表面重构过程进一步增加了活性位点的数量。氮掺杂的碳在碱性条件下加速了水分子的裂解过程,促进了电子和物质的转移速率,进一步提高了催化剂的性能。得到的 Mo₂C-Mo₂N/NC@CC 催化剂在碱性条件下仅需要 70 mV 和 218 mV 的过电势来实现 10 mA cm⁻² 和 100 mA cm⁻² 的电流密度,催化剂在 100 mA cm⁻² 的电流密度下可稳定运行 100 小时以上。

C19-37

纳米结构钨基抗辐照材料及偏滤器靶板模块研制

刘瑞*、谢卓明、解雪峰、方前锋、王先平、吴学邦、刘长松

中国科学院合肥物质科学研究院

钨被认为是最有前景的聚变堆面向等离子体材料,但纯钨存在室温脆性、再结晶脆性和辐照脆化等不足。为此,我们基于纳米弥散和界面(晶界/相界)调控研制了高性能的纳米结构 W-ZrC 合金,其强韧性、耐高温及抗中子辐照性能均优于 ITER 纯钨。裂变中子辐照结果表明,W-ZrC 合金具有比 ITER 纯钨更低的韧脆转变温度和辐照硬化率。研发了 W-ZrC 合金批量化制备技术,有效克服成分偏聚、板坯开裂、晶粒粗化等问题,实现了不同规格 W-ZrC 板材的制备。围绕中国聚变工程实验堆(CFETR)高热负荷工况需求,开展了基于 W-ZrC 的偏滤器靶板模块设计制备及高热负荷性能研究,实现了 W-ZrC 合金与铜合金热沉材料的可靠连接,其中 W-ZrC 穿管模块可承受 1000 次 10MW/m² 稳态热负荷,平板型模块在 1000 次 20MW/m² 稳态高热负荷后无宏观裂纹。相关研究为未来聚变堆关键部件研制提供了良好基础,对于其它高性能难熔金属材料如钼合金的研发也具有指导意义。最后,探讨钨基材料在聚变堆中应用面临的挑战,尤其是中子辐照脆化问题,分析了进一步改善钨基材料抗辐照性能的方法。

C19-38

W/RAFM 面向等离子体部件增材制造技术一体化成型及其稳态热负荷行为研究

唐军*

四川大学

面向等离子体部件 (PFCs) 是现代磁约束核聚变装置的重要部分之一。但传统的冶金制备方法 (也被称作减材制造) 难以实现复杂结构的整体成型, 对原材料浪费严重以及制作周期长, 且界面强度也不易控制。相反, 增材制造是一种非常有前途的技术, 可以实现各种复杂结构的一次性成型, 可以缩短制造周期并大幅节省材料用量及成本。本工作主要是采用激光熔融 (SLM) 工艺制备钨-低活化钢连接的 PFCs, 并结合热疲劳载荷试验、热力学模拟和微观力学实验对 PFCs 的性能进行分析。模拟结果表明, 与传统圆管冷却结构相比, 超汽化结构的冷却温度降低了 20.6% 以上。同时, 通过增材制造实现了钨与钢的有效连接。热负载区域元素 (Fe, W, Cr, C 等) 在热冲击下会进行相互扩散, 会导致界面的力学性能逐渐降低。在热负荷过程中, 界面处会存在应力集中和阈值, 在边界的集中应力会在 1.59 ~ 1.82 GPa 之间变化, 当界面材料的强度低于该阈值时, 界面处会发生开裂事件。最后, 澄清了增材制造的 PFC 能够承受 5 MW/m² 的低周疲劳热负荷。本工作可为下一步 PFCs 的开发提供一些关键的参考和数据。

C19-39

高纯难熔金属靶材的高效气相制备及其在集成电路制造中的应用

朱灏¹、聂志华¹、于晓东^{1,2}、谭成文^{*1,2}

1. 北京理工大学

2. 海朴精密材料 (苏州) 有限责任公司

高纯难熔金属靶材是集成电路制造中金属化过程的关键原材料。随着集成电路线宽的不断减小和靶材尺寸的不断增大, 对难熔金属靶材纯度和微观组织结构均匀性的要求也在不断提高。然而, 传统的靶材制备技术需要联合使用多种方法, 工艺流程复杂, 极大地限制了大尺寸靶材品质的进一步提升。化学气相沉积作为材料的气相制备方法, 能够有效去除杂质, 并在原子层面对材料的微观组织结构进行精细调控。同时, 通过优化基体和设备结构, 可以实现大尺寸难熔金属板材甚至靶材坯料的一步制备。本报告总结并探讨了高纯难熔金属在集成电路制造中的应用和制备工艺, 重点介绍了气相提纯技术的原理及其实际应用。

C19-40

基于超声能场的 W90 钨合金与 AZ31B 镁合金低温钎焊研究

张旭东^{1,2}、付伟^{*1,2}、宋晓国^{1,2}、胡胜鹏^{1,2}、李卓霖^{1,2}

1. 哈尔滨工业大学

2. 哈尔滨工业大学 (威海)

随着核技术和电子技术的不断发展, 电子器件对核辐射屏蔽材料的要求逐渐提高, 钨/镁双层金属结构将替代铅/钢结构成为新一代的核辐射屏蔽体。由于钨与镁的物理和化学性质上存在差异, 提出超声辅助钎焊方法实现 W90 钨合金与 AZ31B 镁合金的低温钎焊连接, 利用超声空化效应产生的高温、高压、微射流等非平衡环境, 去除镁合金表面氧化膜, 促进锡基钎料在钨合金表面的润湿铺展, 最终实现 W90 钨合金与 AZ31B 镁合金的低温、可靠焊接

C19-41

氧化锆强化钨合金制备与力学性能研究

李洲

河南科技大学

C19-42

钨钽混合基阴极的研究

刘政、蔡永丰、杨韵斐、王金淑*

北京工业大学

新型大功率电真空器件的发展对作为电子注源的阴极提出了更高的要求。本研究采用钨钽二元混合粉

体制备得到的阴极材料作为研究对象。当 Os 含量为 12.5 wt% 时, 在 1500°C 下烧结后得到阴极基体, 经浸渍、水洗最终得到的混合基阴极能够获得较好的电子发射性能, 在 1100°C 时拐点电流密度为 46.33 A/cm²。同时, Os 不会参与活性物质的生成反应过程, 则通过 WO₃ 相 (σ 相) 在表面吸附更多活性物质从而提高阴极性能。

C19-43

基于“等效减量”原则的贵金属难熔合金集成计算设计与实验验证

种晓宇*

昆明理工大学

针对现阶段姿态控制发动机喷管用 Pt 基高温合金强度低、成本高的问题, 基于传统 Ni 基高温合金的强化机理, 采用自主研发的高通量多尺度集成计算平台, 从服役性能需求出发, 进行材料生成-制造成形-构件性能全流程并行式设计, 旨在获取保持性能指标的同时大幅度降低原料成本的合金成分、工艺窗口。首先, 系统评估合金元素对 γ/γ' 相热力学性质的影响, 并将结果作为 AutoCalphad 软件的输入, 采用马可夫链蒙特卡洛算法同时对多个热力学参数进行自动优化, 获取变组分多相热力学模型。其次, 通过高通量第一性原理计算耦合相图热力学模型, 获取多元合金成分依赖的弹性模量、扩散系数和堆垛层错能, 并对不同氧分压和温度下的氧化反应热力学平衡常数进行预测, 评估合金的抗蠕变和抗氧化性能, 基于优化得到的 γ/γ' 两相共格 Pt 基超高温合金配方, 考虑试样结构进行服役行为预测, 缩短研发周期, 节约研发成本, 形成贵金属高温合金研发范式。

C19-44

弥散强化钼铌合金的研究

王广达*、熊宁、况春江

安泰科技股份有限公司

钼铌合金具有优良的力学性能和机加工性能, 是电子、核工业等领域关键的结构材料。在钼铌基体中添加氧化铪, 结合铪效应和弥散强化作用, 研究氧化铪含量对显微组织和力学性能的影响, 实验结果发现: 晶粒尺寸则随着氧化铪含量的增加先减小后增大, 室温抗拉强度随含量增加而提高, 延伸率则在氧化铪含量为 0.6% 时延伸率最高, 高温拉伸性能显示在 1300°C 时, 材料的断口形貌由韧窝断裂变成了沿晶脆断和河流状韧性的复合断裂形态。在钼铌合金中加入 ZrO₂, 形成弥散强化作用, 并结合形变强化来提高材料的力学性能。研究发现, 合金粉粒度随着 ZrO₂ 含量的增加而减小, 在含量为 0.7% 时晶粒尺寸最细小均匀; ZrO₂ 颗粒在合金的变形和断裂过程中表现出钉扎效应, 显著提升合金的抗拉强度、屈服强度和断后延伸率等力学性能; ZrO₂ 强化钼铌合金的抗拉强度和断后延伸率在 ZrO₂ 含量为 0.7% 时达到最高值, 随后减少; ZrO₂ 基本弥散分布在晶界处并与钼基体形成良好结合界面, 可以抑制晶界的迁移, 提高钼合金的变形抗力。通过比较不同种类的氧化物强化钼铌合金的研究, 结果发现都可以明显细化钼铌合金的晶粒, 其中 La₂O₃ 粒子直径小于 ZrO₂, 且弥散分布位置略有差异。不同种类氧化物对钼铌合金力学性能均有明显提升, La₂O₃ 韧性强化效果较好, 而 ZrO₂ 则强度强化效果较好, 两者共掺杂则综合性能最佳。

C19-45

丝电爆法制备球形 W-25%Re 合金粉末的组织 and 性能研究

张莹莹*

钢铁研究总院有限公司, 安泰科技股份有限公司

丝电爆法常用于金属纳米粉的制备, 本文以直径为 0.3 mm 的 W-25%Re (质量分数, 下同) 合金丝为原料, 采用丝电爆法制备微米级球形 W-25%Re 合金粉末, 对获得的粉末进行组织和性能表征。结果表明: 丝电爆法制备的粒径 <5 μm、5~35 μm、35~60 μm、60~165 μm 和 >165 μm 球形 W-25%Re 合金粉末球形度高, 球化率几乎可达 100%。5~35 μm、35~60 μm 和 60~165 μm 三种粉末的流动性良好, 松装密度和振实密度较高。粒径 <5 μm 粉末的物相为四方晶系 W_{0.4}Re_{0.6} 相、立方晶系 W_{0.8}Re_{0.2} 和 W₃Re 相, 粒径 5~35 μm、35~60 μm、60~165 μm 和 >165 μm 粉末物相均为立方晶系 W₁₃Re₇ 相。粉末粒径从 8.945 μm 增大到 217.98 μm,

粉末颗粒表面组织从无明显晶态、胞状晶逐渐转变为树枝晶, 粉末粒径 d 与二次枝晶间距 λ 的关系为: $\lambda=0.727+5.59\times10^{-3}d$ 。球形 W-25%Re 合金粉末颗粒内部较为密实, 无明显孔洞缺陷。丝电爆法制备的微米级球形 W-25%Re 合金粉末综合性能良好, 其中粒径 5~35 μm 球形 W-25%Re 合金粉末球形度好、粒度分布集中、氧含量低、流动性好、松装密度和振实密度高, 可以很好地满足 SLM 技术对粉末性能的要求。

C19-46

难熔金属及其合金的电子束熔炼

赖奇*, 赵曦光

攀枝花学院

采用了电子束冷床熔炼方法, 进行了金属 V、Nb、Cr、Ti 等金属及 ZrTiTaNb、VTiNi 等合金的熔炼, 并研究了这些金属及合金的成分、组织与性能的影响。实验结果发现电子束冷床熔炼与电子束直熔各有其熔炼特点。电子束冷床熔炼适合难熔金属及其合金。电子束直熔适合带有一定易挥发元素的难熔合金。

C19-47

Re 及 Re-0.1ZrO₂ 拉伸性能与变形机理

应雯清、杨承昊、张程煜*

西北工业大学

作为重要的战略金属材料, 铼及铼合金被广泛应用于火箭发动机燃烧室、航天卫星肼电弧推力器、MOCVD 加热器、空间核反应堆电源包壳和回路系统中。为研究铼及铼合金的拉伸性能及变形机理, 本文选取了粉末冶金工艺 Re 及第二相弥散强化铼合金 Re-0.1ZrO₂ 作为研究对象, 开展了室温及 1700°C~2000°C 超高温拉伸试验, 利用 SEM、EBSD、TEM 等对试样的拉伸断口以及拉伸前后的微观组织形貌进行了观察。试验结果表明: Re-0.1ZrO₂ 合金的室温抗拉强度和塑性较 Re 得到了明显提升, 而在高温条件下, 其强度甚至低于纯铼, 两者的高温塑性均远低于室温塑性。室温及高温条件下, 两者的主要拉伸断裂模式均为沿晶断裂, 室温拉伸过程中, 试样以孪晶变形为主, 高温条件下仅形成极少孪晶, 主要通过位错滑移调节变形。ZrO₂ 颗粒的添加使得晶粒尺寸大大减小, 从而提高了室温抗拉强度及塑性; 而在高温条件下, ZrO₂ 颗粒与基体结合力变差, 裂纹沿存在第二相的晶界处不断扩展并连接, 直至试样断裂, 导致高温下 Re-0.1ZrO₂ 合金拉伸性能低于 Re。

C19-48

湿化学法钨铼合金的制备与性能研究

徐旺之、罗来马*、孙建、咎祥、吴玉程

合肥工业大学材料学院

钨(W)因具备高熔点、高强度、高硬度以及良好的耐摩擦磨损性能等优势而被认为是高熔点金属搅拌摩擦搅拌头的理想候选材料。但纯 W 因高的佩尔斯应力及较低的晶界结合强度和晶粒协同变形能力而导致其产生低温脆性以及高温结构弛豫行为。铼(Re)合金化是实现钨基材料强韧化的关键手段。而高性能 W-Re 合金的制备面临很多关键问题。球磨法和固液掺杂作为制备 W-Re 合金粉体的主要方式有杂质含量高、Re 分布不均匀等问题, 因此高性能 W-Re 合金粉体的制备仍面临诸多挑战。

利用湿化学法结合喷雾干燥工艺制备 WRe 前驱体, 发现随着前驱体溶液固体含量的升高, 干燥后球形粉壁厚逐渐增加, 松装密度也随之提高。WRe 前驱体还原温度须 $\geq 1000^\circ\text{C}$, 否则会存在少量的钨氧化物无法被彻底还原, 还原过程中 Re 在热力学的驱动下固溶进 W 基体中, 可实现超细 WRe 粉体的制备, 并保持良好的预合金化效果。

旋锻态 WRe 合金室温极限抗拉强度(UTS)高达 1413 MPa, 500 $^\circ\text{C}$ 时依然保持高 UTS(>950 MPa), 经退火后综合力学性能得到优化, 1000 $^\circ\text{C}$ 下退火后的 WRe 在 200 $^\circ\text{C}$ 时 UTS 为 1253 MPa, 总延伸率(TE)为 9.8%, 相较于旋锻态 TE 提高了 48%。旋锻导致高比例小角度晶界(LAGBs)的产生, 提高了 WRe 应变相容性, 且经 1400 $^\circ\text{C}$ 退火后 LAGBs 比例并未出现明显下降, 表明合金具备优异的抗结构弛豫能力。WRe 在 1000 $^\circ\text{C}$ 、1200 $^\circ\text{C}$ 条件下, 经受 1~4 h 热负荷保持高抗弯强度(>2000 MPa)和显微硬度(>500 HV), 在 1400 $^\circ\text{C}$

热负荷 4 h 后抗弯强度依然保持 1898 MPa。WRe 经 600 °C 高温摩擦磨损实验后其磨损量仅为 0.0024%，平均摩擦系数为 0.4438，表现出优异的耐磨性。WRe 在室温(RT)、500 °C、900 °C 热导率分别为 30.6 W/(m·K)、49.1 W/(m·K)、61.0 W/(m·K)，其热导率随温度增加而升高的变化规律有益于 WRe 合金在服役时的热量传导。

墙报

C19-P01

新一代难熔高熵合金的设计及高温力学性能研究

张子晗、袁福平*

中国科学院力学研究所

难熔高熵合金是新一代适用于极端高温环境的先进金属材料，能够满足高温的使役性能要求。本文通过自行设计五主元 BCC 体系的难熔高熵合金以及多道次加工处理，构建出了不同于常规固溶态难熔高熵合金的微观组织结构，实现了优异的准静态力学性能并且在高温下(1000°C)保持极高的屈服强度，同时观察了变形后的微观结构，建立不同环境温度下微结构和力学性能以及变形机制的关联。

C19-P02

MoNbVTa_{0.5}Cr_x 难熔高熵合金高温抗氧化行为

郭明宜、徐流杰*

河南科技大学

采用放电等离子烧结技术 (SPS) 制备了 MoNbVTa_{0.5}Cr_x (x=0.25, 0.5, 0.75, 1) 难熔高熵合金，探究了 Cr 含量对 MoNbVTa_{0.5}Cr_x 合金高温氧化性能的影响规律，并研究了 MoNbVTa_{0.5}Cr 合金在 800°C-1100°C 下高温氧化行为。结果表明，在 MoNbVTa_{0.5}Cr_x 合金的氧化过程中，氧气扩散进入基体内部后率先与扩散层中的 Nb 和 Ta 发生氧化反应，在合金表面生成针棒状 Nb₂O₅ 和 Ta₂O₅ 氧化物，之后与氧化生成的 Cr₂O₃ 发生氧化反应生成致密的 CrTaO₄ 和 CrNbO₄ 氧化层。随着 Cr 含量的升高，氧化层中的 CrTaO₄ 和 CrNbO₄ 含量逐渐增多，合金的抗氧化性能逐渐增强。x=1 时，合金表面能够形成致密的 CrNbO₄ 和 CrTaO₄ 层，具有优异的抗氧化性能。

C19-P03

难熔高熵合金纳米粉末制备及烧结实践

郭晨光

北京科技大学

C19-P04

强韧性协同提升的 ODS-W 材料制备过程及性能改善机理研究

魏国庆、罗来马*、咎祥、吴玉程

合肥工业大学

钨因其具备高抗溅射性、高导热性和高熔点等特征，被视为聚变装置中面向等离子体材料 (PFMs) 的首选候选材料。然而，钨的高韧脆转变温度和低再结晶温度限制了其能否完全满足未来 PFMs 的性能需求。鉴此，本研究针对我国聚变工程发展中的重大材料需求，对高性能钨基材料的制备技术和性能进行了深入探究。通过引入钼元素，成功实现了钨晶粒的细化，并以此批量制备出纳米级超细氧化物弥散强化钨 (ODS-W) 粉末。生产的纳米级 ODS-W 粉末均匀分布且具备良好的烧结性能，可在 1400°C 的氢气环境中烧结达到 95% 的致密度。粉末的优异烧结性能和较低的烧结温度大大简化了大塑性变形前的预烧结工艺。同时，采用旋锻工艺成功制备出变形量达 75.5% 的钨-钼-钇 (WVY) 复合棒材。拉伸测试结果显示，WVY 复合材料在室温下即可开始屈服，在 100°C 时，其强度超过 1100 MPa，延伸率超过 12%。这一结果打破了传统的强度与韧性不能并存的理论，实现了强度和韧性的协同提升。相应的，WVY 的韧脆转变温度 (DBTT)

低于 100°C，这为 ODS-W 复合材料在核材料和航空航天等领域的应用提供了强有力的推动。

仅发表论文

C19-PO01

石墨烯增强含镍 W-Cu 复合材料的组织性能研究

邓楠、宋芙蓉、谭欣雨、张乔、陈铮、梁淑华*

西安理工大学

钨铜复合材料（W-Cu composite）结合了钨的高熔点、低膨胀系数、耐电弧烧蚀和铜优异的导热导电性能，应用于热管理部件中的热沉材料和高压断路器中的触头材料。石墨烯具有独特的二维蜂窝状结构和较高的电子迁移率，这种高导电性和良好的机械柔韧性使其作为增强体广泛应用于金属基体中。本论文研究了石墨烯对微量 Ni 添加的 W-Cu 复合材料的组织和性能的影响。研究结果显示：随着石墨烯含量的增加，烧结组织变得更加均匀，W 颗粒粒径呈现先增加后降低的趋势，生成的碳化钨相减少了 W 颗粒粒径。石墨烯的添加有利于提高复合材料的密度、硬度、导电率和抗弯强度。耐电弧烧蚀性能测试发现：石墨烯提高了材料的传导性能和 W 骨架强度，烧蚀形貌变得平坦且龟裂纹细小，烧蚀的深度变浅，击穿后截面的孔隙减少。相比未添加的样品，烧蚀质量损失减少 33%。