



**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**

**C16-极端服役环境下材料性能与  
评价**

**C16-Material Properties and  
Evaluation in Extreme Environments**

**Organized by**

Chinese Materials Research Society

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

## C16-极端服役环境下材料性能与评价

分会主席：罗晋如、夏松钦、龙继东、王立华、黄洪涛

### C16-01 最终交流类型：邀请报告

#### 纳米分辨可视化原位测试仪器研制与应用

张跃飞\*<sup>1</sup>, 王晋<sup>1</sup>, 张泽<sup>1</sup>

1. 浙江大学

高温、应力及其耦合作用是金属、陶瓷等材料在热处理、烧结、塑性加工过程中调控微观结构与性能的主要手段，也是航空航天等领域高性能结构材料的服役环境。长期以来对材料加工制备与性能评价中微观结构研究主要依靠事后离位表征，缺乏材料加工或服役条件下微观结构演变和与之相应的性能调控全过程信息。纳米分辨原位高温扫描电镜原仪器的开发，实现了从纳米到宏观尺度可视化研究材料在高温受力条件下微观结构演变与力学性能间量化关系，是优化材料制备工艺、质量检测、服役寿命评估、安全性评价重要科学手段。报告将介绍纳米分辨原位高温扫描电镜仪器进展、原位表征方法发展及其在合金研究中应用的最新成果。

### C16-02 最终交流类型：邀请报告

#### 极端环境 X 射线原位 CT 开发与应用

李仁庚\*<sup>1</sup>, 范国华<sup>1</sup>

1. 南京工业大学

材料基础科学理论研究与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、碳纤维复合材料、陶瓷、混凝土、岩石等材料，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。高性能原位 X 射线 CT 设备的成功研发，将极大提升关键结构材料在服役工况下的可靠性和安全性。

### C16-03 最终交流类型：邀请报告

#### 基于多目标优化的核能用熵合金设计

夏松钦\*<sup>1</sup>

1. 华北电力大学

等原子比 FeCrV 多主元合金作为核能用低活化熵合金的代表，在高温高辐照剂量 ( $>100\text{dpa}$ ,  $500^\circ\text{C}$ ) 下，具有优异的抗辐照肿胀性能，但作为核应用环境下的结构材料，在满足低活化属性条件下，还应兼顾力学性能、耐蚀性能等综合性能的多目标优化。为此，利用不同元素添加，分别开发设计出晶格畸变可调的单相 FeCrVAl<sub>x</sub> 以及含 Laves 相的 FeCrVTi<sub>x</sub> 两类熵合金，重点对晶格畸变对力学性能与抗辐照肿胀性能以及 Laves 相对力学性能与耐铅铋性能的作用进行了研究，基于多目标优化原则，对元素添加对 FeCrV 基合金的综合性能进行了探讨，期望促进多主元合金、成分复杂合金、无基元合金、高熵合金等熵合金在核

材料领域的应用。

#### C16-04 最终交流类型：邀请报告

##### 高温辐照与熔盐腐蚀耦合作用下 SiC 损伤行为研究

李健健\*<sup>1</sup>

1. 中国科学院上海应用物理研究所

由于 SiC 及其复合材料的高温力学性能、高温化学惰性、低感生放射性和强抗腐蚀能力，尤其是低中子俘获界面等特性，使之成为熔盐堆的备选材料之一。在熔盐堆中 SiC 材料面临着高温、熔盐腐蚀、高剂量中子辐照等多重环境的考验，因此辐照损伤对其高温腐蚀性能的影响是不可忽视的关键科学问题。本文利用离子束辐照模拟中子辐照在 SiC 中引入辐照损伤，然后将其放于静态高温 FLiNaK 熔盐（650℃）中进行腐蚀，采用 TEM、SEM、AFM、Raman 和 XPS 等测试表征手段，研究了辐照损伤对 SiC 材料熔盐腐蚀性能的影响。辐照前纯 SiC 具有优异的抗熔盐腐蚀性能，但辐照明显地促进了 SiC 在高温熔盐 FLiNaK 中的腐蚀。研究发现，在 70 keV Si 离子高温（650℃）辐照 SiC 样品（最大损伤处 2.5 dpa）经高温熔盐 FLiNaK 腐蚀 166 h 之后，样品表面发生了腐蚀脱落的现象，而在仅仅辐照或者腐蚀样品中并没有发现此现象。辐照腐蚀样品表面的腐蚀脱落层的深度为  $40 \pm 8$  nm，这与辐照损伤深度基本一致。实验结果表明 SiC 材料的腐蚀与 C-C 化学键和富 C 表面的形成和 Si 离子的流失直接有关。进一步的实验还发现常温低剂量辐照（ $< 0.3$  dpa）的 SiC 样品几乎没有腐蚀现象，但当剂量达到 3 dpa 样品出现非晶化时，辐照显著地促进了 SiC 的腐蚀（Si 和 Xe 离子辐照下都发现此现象），说明辐照促进 SiC 腐蚀的过程存在 dpa 阈值。对腐蚀样品表面和截面的分析表明 O 元素参与到辐照促进 SiC 腐蚀过程中，因此控制 O 杂质的含量是解决辐照促进 SiC 腐蚀的关键。

#### C16-05 最终交流类型：口头报告

##### 轧制变形条件对板材显微组织和力学性能的影响研究

杨帆<sup>1</sup>，宋晓\*<sup>2</sup>，罗晋如<sup>1</sup>

1. 苏州实验室

2. 北京科技大学新金属材料国家重点实验室

钛及钛合金具有比强度高、耐腐蚀性好等优点，被广泛应用于航空、航天、化工等领域。变形加工是钛合金部件的主要成型工艺。作为密排六方结构金属重要的塑性变形机制，形变孪生能够在提高钛强度的同时不损失塑性，因而在钛板中引入高密度孪晶是提高其力学性能的重要思路。不同类型孪生及变体对钛的微观组织与力学性能影响各异，阐明变形过程中孪生择优规律及孪晶与其他界面间的相互作用，是实现变形组织和织构的预测和调控的基础，对设计和开发高性能板材有着重要的理论意义和现实意义。TA2 工业纯钛是应用最为广泛的  $\alpha$  型变形钛合金之一，本文以 TA2 工业纯钛为研究对象，通过深低温轧制和调控初始织构对钛板进行预变形处理，在板中引入不同类型及含量的孪晶，改善板材的性能。在此基础上，利用电子背散射衍射技术（EBSD）着重研究了力学性能最优、孪晶含量最丰富的深低温轧制 A 板（初始织构 ND//c 轴），系统阐述了深低温轧制变形过程中钛的变形机制和孪生行为：利用广义 Schmid 定律研究了深低温轧制 A 板中占主导地位的 {11-22} 和 {11-24} 孪晶的变体择优规律，研究了 {11-22} 和 {11-24} 孪晶在晶粒内的应变协调以及相关的次序孪晶现象，阐述了 {11-22} 和 {11-24} 孪晶在晶界上的应变协调和传播规律，探究深低温轧制 A 板孪晶含量丰富的原因，为开发制备高性能钛板材提供理论支持。

**C16-06 最终交流类型：口头报告****纯钛低温应变速率敏感性研究**刘壮壮<sup>1</sup>, 张宇<sup>2</sup>, 吴昊\*<sup>2</sup>, 范国华<sup>2</sup>

1. 哈尔滨工业大学
2. 南京工业大学

应变速率敏感性是决定材料蠕变, 应力松弛和加工成型的重要特性。在本工作中, 我们发现纯钛在低温下展现出异常的应变速率不敏感性, 并对其内在机理进行了系统的研究。在屈服阶段, 纯钛的变形主要依靠位错滑移。在低温下, 只有柱面滑移启动, 在室温下, 低应变速率启动了柱面滑移, 高应变速率下, 少部分晶粒中启动了<c+a>滑移。在后续塑性变形阶段, 低温下产生大量{11-22}压缩孪晶, 并且在不同应变速率下孪晶含量基本保持稳定, 室温下孪晶含量较少, 但随着应变速率的提升孪晶数量逐渐增多。

**C16-07 最终交流类型：口头报告****应用非平衡态统计力学模型预测合金材料在高温下的本构关系及长时蠕变寿命**宁博元\*<sup>1</sup>

1. 中国科学院上海应用物理研究所

结构材料在高温极端条件下的蠕变服役寿命是关系到新型核能反应堆、航空发动机、燃气轮机等大型设备能否长时稳态运行的重要安全因素之一。由于蠕变实验的测试周期长、成本高等特点, 亟需准确可靠的理论模型能够快速预测目标材料在宽温域、广应力范围内的蠕变服役寿命。与目前所有的蠕变模型不同, 本工作基于非平衡态统计力学提出了一种快速预测材料本构关系及蠕变服役寿命的新理论模型---单原子统计模型。该模型旨在借助材料的短时实验数据(高温、高应力下的蠕变寿命)预测其在其它温度、应力条件下的长时蠕变服役寿命。以目前应用于我国新型钍基熔盐核裂变能反应堆的结构材料镍基高温合金(GH3535)为主要研究对象, 单原子统计模型可利用该合金的短时蠕变数据(最长蠕变寿命~250 小时)预测在其它任意条件下 GH3535 的本构关系及蠕变服役寿命, 模型的预测结果与实验在温度于 650~800° C、应力于 75~380MPa 范围内的蠕变寿命测试结果吻合(最长蠕变寿命~年); 与目前业界广泛使用的幂律(Power-Law)蠕变模型相比, 单原子模型对 GH3535 合金的预测精度提高了 1~2 数量级。同时, 单原子统计模型也被应用于金属铝等其它体系, 其普适性也得到了相关实验结果的验证。单原子统计模型的提出为快速准确评估结构材料在极端条件下的服役性能提供了一条可能的新路径。

**C16-08 最终交流类型：口头报告****揭示受离子辐照金属材料非均匀分布缺陷随温度变化的硬化机制：实验表征和理论建模**夏梁\*<sup>1</sup>, 陈一恒<sup>1</sup>, 黄嘉<sup>1</sup>, 王宇钢<sup>1</sup>, 王晨旭<sup>1</sup>, 薛建明<sup>1</sup>, 肖厦子<sup>2</sup>

1. 北京大学
2. 中南大学

现代核反应堆设施中, 金属基合金作为结构材料得到了广泛应用。尽管已有的工作对金属材料在离子辐照条件下的硬化行为进行了广泛研究, 但其力学测试过程中并未充分考虑温度效应, 致使所获得的结果不能反映材料在服役条件下的性能。为此, 本工作采用实验表征和理论建模相结合的手段, 研究了受离子辐照 9Cr F/M 钢和 Zr-1.0Sn-1.0Nb-0.1Fe 合金随温度变化的硬化机制。实验过程包括晶粒形貌和尺寸分布的电子背散射衍射表征、高能 Au<sup>3+</sup>离子辐照、辐照缺陷的透射电子显微镜观测。此外, 通过高温纳米压痕实验研究了两种材料的力学性能, 结果表明其同时存在辐照硬化和高温软化现象。理论建模方面, 本工作

发展了一种用于分析受离子辐照金属材料硬度-深度关系的力学模型。该模型阐明了受辐照区域中不均匀分布缺陷引起的硬化机制，同时包含了温度效应。对模型的参数标定表明，其能够有效地描述不同辐照剂量和温度下材料的硬度-深度关系。进一步的理论分析表明，随着压痕深度的变化，辐照硬化行为呈现三种不同的演变规律，且温度的升高会加速塑性区的扩展，从而弱化了压痕尺寸效应。此外，随着压痕深度的增加，几何必需位错和辐照缺陷对硬度的贡献逐渐减小。当压痕深度较大时，主要的硬化机制由统计存储位错控制。

#### C16-09 最终交流类型：口头报告

##### 310S 奥氏体不锈钢在超临界二氧化碳中的腐蚀行为研究

邹吉春<sup>1</sup>，李伸<sup>2</sup>，杨万欢\*<sup>1</sup>，王文琴<sup>2</sup>，陈梦瑶<sup>1</sup>，钟巍华<sup>1</sup>

1. 中国原子能科学研究院
2. 南昌大学

研究了 310S 奥氏体不锈钢在 500°C/25 MPa 的超临界二氧化碳 (S-CO<sub>2</sub>) 环境中的腐蚀行为。在高压回路中进行了不同时间的均匀腐蚀实验，分析了试样表面氧化膜的形貌、成分及结构。实验结果表明：310S 不锈钢具有优异的抗 S-CO<sub>2</sub> 腐蚀性能，其 3200 h 的腐蚀增重为 0.049 g/cm<sup>2</sup>。310S 表面氧化物颗粒集中分布在晶内，晶内腐蚀程度大于晶界，基体内部未发现晶界氧渗透；氧化膜为双层结构，外层由结构疏松的 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和连续致密的保护性 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 组成，内层为不连续的尖晶石 (FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)，在氧化膜与基体交界面发现了连续的 SiO<sub>2</sub> 层，并且在 SiO<sub>2</sub> 层上方发现了 C 元素富集的区域，基体内部没有观察到渗碳现象，氧化膜与基体界面处连续的 SiO<sub>2</sub> 层使得 310S 奥氏体不锈钢的抗渗碳性能得到大幅提升。

#### C16-10 最终交流类型：口头报告

##### 磁控溅射制备的新型薄膜热电偶

罗筠龙\*<sup>1</sup>，王启民<sup>1</sup>

1. 广东工业大学

温度是生产、科研和生活中非常重要的物理量。在许多应用场景中具有巨大的意义，如切削工具、高速旋转轴、飞机发动机等等。通过物理气相沉积(PVD)制备的硬质涂层可以应用于工件表面，能显著改善其机械性能，延长使用寿命。因此，本研究旨在设计和制备一种拥有硬质涂层参与的温度传感器，既能实现精确的温度测量，又能对薄膜传感器本身起到耐磨防护的作用。TiB<sub>2</sub> 拥有优异的良好力学性能和优异的导电性、导热性，所以选为传感层起到传感和耐磨防护的作用。另一种传感涂层选择 Cu<sub>55</sub>Ni<sub>45</sub>，起到传感和释放应力的作用。这两种涂层的测温功能是基于热电效应，而对传感器的保护功能是基于最外层的 TiB<sub>2</sub> 层。对制备出的传感器涂层进行测试后结果表面表明，TiB<sub>2</sub> 涂层具有致密和精细的晶体形态，并且两种涂层表现出明显的分层。整个热结点 SEM 截面上无裂纹或损伤。薄膜传感器的塞贝克系数为 38.07 μV/°C，线性度优异。其硬度和弹性模量测量结果分别为 20.5±2.2 GPa 和 315.9±30.6 GPa。薄膜传感器热结点的抗氧化性可达 400 °C。

#### C16-11 最终交流类型：口头报告

##### 钨铼合金辐照析出相浅析

陆柯龙<sup>1</sup>，黄洪涛\*<sup>1</sup>，马海亮<sup>2</sup>

1. 中山大学
2. 中国原子能科学研究院

钼铼合金在较高温度下经中子或重离子辐照后通常形成较多的析出相。其中， $\chi$  析出相普遍存在且为研究者们熟知，但  $\sigma$  相和富铼的 hcp 结构是否存在尚存争议，析出相的形态亦众说纷纭。本文使用 20MeV 镍离子在 580°C 下对 Mo-42Re 和 Mo-14Re 合金展开剂量达 140dpa 的辐照试验，基于 SAED 和 HRTEM 观察到除  $\chi$  相外的 hcp 结构析出相，未发现  $\sigma$  相。研究还发现，钼铼中的针状析出相是一种富含层错的薄片层结构。

### C16-12 最终交流类型：口头报告

#### 超临界二氧化碳环境中 625 合金与 800H 合金的均匀腐蚀行为研究

王明浩<sup>1</sup>、杨万欢\*<sup>1</sup>、彭德全<sup>1</sup>、钟巍华<sup>1</sup>、邹吉春<sup>1</sup>、王志豪<sup>1</sup>

1. 中国原子能科学研究院

进入 21 世纪以来，在核反应体系各种热力循环方式的候选者中，超临界二氧化碳（sCO<sub>2</sub>）布雷顿循环被认为是有希望在第四代反应堆工作温度区域内，兼顾高效性与稳定性，最终提高电力转换系统的效率与可靠性的替代方案之一。但传统商用材料在 sCO<sub>2</sub> 服役过程中易发生严重的氧化与渗碳，为遴选并优化可用于超临界二氧化碳核反应堆的结构材料，通过实验研究并对比了应用于传统反应堆的两种合金（625 镍基合金与 800H 铁镍基合金）在 550°C，25Mpa 的静态 sCO<sub>2</sub> 环境下的长时均匀腐蚀行为。利用微观表征技术，分析材料表面氧化物形貌，结构与化学成分。结果表明：625 合金的腐蚀增重低于 800H 合金，具有更佳的耐腐蚀性能；在 3200h 腐蚀后，800H 合金表面被 Fe 的氧化物均匀覆盖，氧化物厚度较厚，结构疏松，并产生了渗碳的现象；而 625 合金表面 Ni/Cr 的氧化物膜厚度较薄，结构致密，具有保护性，表面零散分布一些氧化物颗粒。同时，625 合金中添加 Nb 元素产生的 NbC 析出相，可加剧局部腐蚀速率。

### C16-13 最终交流类型：口头报告

#### 基于第一性原理数据的氮化铝的深度学习势函数

李涛<sup>1</sup>，付宝勤\*<sup>1</sup>，侯氢<sup>1</sup>，徐贲<sup>2</sup>

1. 四川大学原子核科学技术研究所
2. 中国工程物理研究生院

氮化铝（AlN）因其优异的物理性能在许多领域有重要应用，特别因其出色的耐辐照性能，使得它作为恶劣环境下核设备传感器的功能材料，展现出极为广阔的潜力和前景。在 AlN 的制备过程与服役过程中会产生各种各样的缺陷，这些缺陷会影响 AlN 的工作性能，使用实验方法研究缺陷对材料的影响较为困难，因此从微观层面通过模拟研究缺陷在 AlN 中的产生与演化，以及缺陷对 AlN 性能的影响十分必要。而分子动力学（MD）模拟是研究 AlN 热性能以及缺陷相关性能的有力工具。在 MD 模拟中原子间势的选择对最终模拟结果的准确性起着重要作用。我们使用深度势能（DP）方法开发了 AlN 的原子间势（DP-IAP）模型，训练模型的数据集来自密度泛函理论（DFT）计算。主要结果包括：（1）我们使用第一性原理数据集训练了 DP-IAP，并使用 DP-IAP 计算了 AlN 的力学性能，如晶格常数、体模量、弹性常数等，结果与 DFT 计算高度一致。（2）我们通过求解玻尔兹曼输运方程（BTE）计算 AlN 的声子热导率，结果表明 DP-IAP 计算的热导率、声子散射率等性能与 DFT 结果高度一致。（3）我们使用非平衡分子动力学（NEMD）计算 AlN 的热导率，并通过计算不同尺寸下的热导率减小尺寸效应的影响，结果表明相较于其他 AlN 的势函数，DP-IAP 能更准确计算热导率。（4）我们使用 DP-IAP 计算了 Al 空位和 N 空位平行于基面(a)和垂

直于基面(c)的迁移势垒, 结果与 DFT 计算结果吻合较好。研究结果表明, 我们的 DP-IAP 是推进 AlN 材料研究和相关应用的有前途的工具。

#### C16-14 最终交流类型: 邀请报告

##### 金属材料塑性变形的温度敏感性与速率敏感性

吴昊\*<sup>1</sup>, 范国华<sup>1</sup>, 耿林<sup>2</sup>

1. 南京工业大学
2. 哈尔滨工业大学

本报告以纯钛金属为模型材料, 使用原位电子背散射衍射、中子衍射、晶体塑性有限元等手段, 系统研究了纯钛金属在液氮下的塑性变形行为与调控方式, 发现了液氮下纯钛反常加工硬化、反常应变速率敏感性等系列反常现象, 初步阐明了上述反常现象背后的物理机制。基于上述原理, 通过改变层状结构、晶体取向、应变速率等参量, 调控了纯钛的位错、孪生等变形机制, 进而实现了六方金属低温力学性能的主动调控。

#### C16-15 最终交流类型: 邀请报告

##### 铝基涂层耐铅铋腐蚀行为及其机理研究

匡文军\*<sup>1,2</sup>, 王文<sup>1</sup>, 朱召光<sup>3</sup>, 谭季波<sup>3</sup>, 黄锦阳<sup>4</sup>, 鲁金涛<sup>4</sup>

1. 西安交通大学
2. 华南理工大学
3. 中国科学院金属研究所
4. 西安热工研究院有限公司...

铅铋共晶是第四代液态金属先进反应堆的重要冷却剂, 具有广泛的应用前景。然而液态铅铋对设备材料的强腐蚀性是目前制约该堆型推广应用的关键问题。本研究针对典型结构材料在液态铅铋环境下的腐蚀问题开展研究, 首先基于热扩散工艺在 T91 合金和 316 不锈钢表面制备了铝化物涂层, 然后研究了两种材料制备表面涂层前后在 550 °C 不同氧浓度液态铅铋环境中的腐蚀行为, 发现铝基涂层在铅铋环境中具有良好的稳定性, 并且可以显著提高基体材料在较宽氧浓度范围内的抗腐蚀性能。分析发现涂层表面在液态铅铋中能够稳定形成具有良好保护性的氧化铝膜, 通过热力学计算发现涂层的主要相结构生成氧化铝所需的平衡氧分压很低。该涂层工艺对提升典型结构材料在液态铅铋中的腐蚀抗力效果显著, 具有很好的应用前景。

#### C16-16 最终交流类型: 邀请报告

##### 力热能量密度等效原理及其在热、电、声、辐照、高压、疲劳等极端环境下材料力学性能理论表征上的应用

李卫国\*<sup>1</sup>

1. 重庆大学航空航天学院

随着现代科技的快速发展, 拓展材料服役条件的需求愈发强烈, 材料在极端环境下的力学性能成为各领域关注的核心问题, 亟需建立对极端服役环境下材料力学性能的预测能力。本报告首先对报告人原创性

提出的力热能量密度等效原理进行简要介绍；然后对该原理在热、电、声、辐照、高压、疲劳等极端服役环境下材料力学性能理论表征上的应用进行介绍，包括建立的系列无拟合参数的脆/韧性材料温度相关性断裂/压痕/屈服/撕裂/疲劳/极限拉伸/界面剪切/单晶理想拉伸及剪切强度等理论表征模型，以及温度相关性杨氏模量/体积模量/剪切模量/断裂韧性/基体开裂应力/临界分切应力/疲劳裂纹扩展门槛值/硬度等理论表征模型；最后，对“力热能量密度等效原理”在物理学、机械、材料和土木等多学科交叉领域极端服役环境下材料力学/物理性能理论表征上的拓展应用进行简单介绍。

### C16-17 最终交流类型：邀请报告

#### SiC/SiC 复合材料包壳管研制及应用性能研究

刘昊成<sup>1</sup>，孔淑妍<sup>1</sup>，张华锋<sup>1</sup>，汪峰<sup>1</sup>，涂睿<sup>1</sup>

1. 国家电投集团科学技术研究院有限公司

碳化硅（SiC）具有耐高温、耐腐蚀、抗氧化和较小的中子吸收截面等特点，是理想的包壳管材料。采用连续 SiC 纤维增韧的 SiC 复合材料（SiC/SiC）能够克服单一陶瓷脆性，力学性能得到显著提升，采用 SiC/SiC 复合材料包壳将从源头上提高反应堆的安全性。2012 年，美国、日本、韩国等在福岛核事故后确定碳化硅复合材料为下一代包壳的主要候选方案。2015 年，国家自然科学基金“先进核裂变能的燃料增殖与嬗变”重大研究计划确定碳化硅复合材料作为继承项目重点攻关材料。SiC/SiC 复合材料包壳管研发是国家电投集团事故容错燃料研发战略的重要组成部分，也被列入国家电投集团科学技术研究院有限公司（以下简称“中央研究院”）“十四五”发展规划。

中央研究院与西北工业大学联合开展的 SiC/SiC 复合材料包壳管研发工作，采用国际主流的包壳管中间层制备技术，独立发展了 SiC/SiC 复合材料包壳管封装连接技术、致密化技术和高性能外涂层制备技术，热导率、气密性等关键性能达到国际先进水平；发展了针对 SiC/SiC 复合材料包壳管的常规性能检测方法并搭建了相应的测试平台；在国内率先开展 SiC/SiC 复合材料包壳管散裂中子源辐照，获得辐照数据，并同步开展了材料模拟计算工作。研究工作为后续 SiC/SiC 复合材料的工艺改进、性能测试打下了基础，对推动 SiC/SiC 复合材料包壳管的成功应用有重要意义。

### C16-18 最终交流类型：口头报告

#### MoSiN 纳米复合结构涂层宽温域摩擦学性能

潘子常<sup>1</sup>，吴正涛\*<sup>1</sup>，王启民<sup>1</sup>

1. 广东工业大学

为改善 MoN 涂层在 400° C 下氧化快、磨损率高的问题，提升该涂层在极端环境下的使用寿命，本文使用高功率脉冲磁控溅射技术于 MoN 涂层中添加 Si 元素，制备出 2~7.5 at.% Si 含量的 MoSiN 纳米复合结构涂层，研究了 Si 元素对涂层的微观结构、力学性能和高温摩擦性能的影响。实验结果表明，制备的 MoSiN 涂层仍呈现柱状晶结构，引入 Si 有利于提高薄膜硬度，最高可达 27 GPa。Si 元素在涂层中以 SiN<sub>x</sub> 界面相形式存在，SiN<sub>x</sub> 界面相阻碍了 O 的内扩散及 Mo 组元的外扩散进程，从而提升薄膜抗氧化性。摩擦学能研究结果表明，于 400~600° C 下随着 Si 含量的升高，MoSiN 涂层摩擦系数下降，如在 600° C 下，5 at.% Si 含量的涂层表现出最佳的耐磨性能和较低的摩擦系数，磨损率为  $2.8 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$ 、摩擦系数为 0.487。MoSiN 涂层耐磨损温度比 MoN 涂层高出 200° C。

**C16-19 最终交流类型: 口头报告****多束离子辐照在先进核反应堆材料研究中的运用**陈一恒\*<sup>1,2</sup>, 夏梁<sup>1</sup>, 黄嘉<sup>1</sup>, 王晨旭<sup>1</sup>, 王宇钢<sup>1</sup>, 薛建明<sup>1</sup>, 郭立平<sup>2</sup>

1. 北京大学
2. 武汉大学

材料在反应堆强辐射场下的行为是决定核反应堆运行安全性及经济型的重要因素。在先进核反应堆中, 材料除了受到高能中子辐照产生离位损伤之外, 还会产生氢、氦等嬗变元素, 嬗变元素与离位损伤的协同损伤效应大大影响了材料在反应堆中的服役行为。针对于新型核能反应堆中材料面临的氢、氦及离位损伤协同效应, 采用多离子束同时辐照是一种有效模拟高能中子辐照的方法。多束离子辐照平台以重离子加速器为主, 协同氢、氦离子注入装置组成。高能重离子在辐照过程中引入离位损伤, 氢、氦注入机在材料中引入氢、氦元素, 同时辐照平台设置有高温辐照样平台用以模拟材料在反应堆中的高温服役环境。实验研究发现, 多束离子辐照结果明显区别于单束离子辐照, 主要表现在缺陷形核增加与辐照硬化加剧。在对模型材料纯镍的多束离子辐照研究发现, 相较于单束离子辐照, 有氦存在的多束离子辐照条件下, 空腔的平均数密度大大增加, 同时, 在改变注入氢氦量与离位损伤量比值时, 辐照缺陷的演化行为也会随之改变, 表现出明显的协同损伤效应。对作为聚变堆候选结构材料之一的中国低活化铁素体/马氏体钢进行了多束与单束离子辐照研究, 发现相较于单束离子辐照, 多束离子辐照条件下材料中的位错环平均尺寸及数密度均增加, 且辐照硬化程度更严重。

**C16-20 最终交流类型: 口头报告****Enhancing Hydrogen Embrittlement Resistance in 304 Austenitic Stainless Steel Welds Through Optimized Heat Treatment: Unveiling the Hydrogen Trap Effect**Jinxin Xue<sup>1</sup>, Hao Wu<sup>2,3</sup>, Chilou Zhou\*<sup>1</sup>

1. South China University of Technology
2. Guangdong Key Laboratory of Materials and Equipment in Harsh Marine Environment, School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Guangzhou Maritime University, Guangzhou 510725, China
3. Department of Physics, Department of Materials Science and Engineering, and Department of Biomedical Engineering, City University of Hong Kong, Tat Chee Avenue, Kowloon, Hong Kong, China

The effect of heat treatment on the hydrogen embrittlement (HE) resistance of 304 austenitic stainless steel welds has not been systematically studied. In this investigation, samples were pre-charged with hydrogen for 24 hours. The influence of heat treatment temperatures ranging from 400°C to 800°C on microstructure and HE resistance was investigated by slow strain rate tensile testing (SSRT) and scanning electron microscopy (SEM). Findings indicate that HE resistance initially improves and subsequently diminishes with rising heat treatment temperatures. The optimal HE resistance was observed at 600°C, evidenced by a relative reduction of area (RRA) of 0.84. In order to further elucidate the mechanism of the effect of heat treatment on resistance to HE, hydrogen distribution properties were characterised by Scanning Kelvin Probe Force Microscopy (SKPFM). Remarkably, the contact potential difference (CPD) of the 600°C sample was six orders of magnitude higher than that of other samples, suggesting the highest surface hydrogen concentration. This phenomenon can be attributed to the hydrogen trap effect, where intergranular precipitation phases act as effective hydrogen traps, sequestering diffused hydrogen within the material. Consequently, this mechanism mitigates hydrogen-induced degradation of material properties, thereby enhancing the HE resistance.

**C16-21 最终交流类型：邀请报告****镍基高温合金蠕变缺陷元素偏析及其机理研究**

吴小香\*

1. 苏州大学

单晶镍基高温合金由于其稳定的双相结构是涡轮叶片的核心关键材料。单晶镍基高温合金通常包含十余种元素，关键合金元素对于合金组织演变、服役性能有着重要的影响。随着表征手段的不断优化，镍基高温合金溶质元素在蠕变过程中的晶体缺陷处偏析被广泛关注。目前有关元素的偏析主要涉及基体相富集元素偏析到析出相的缺陷中，如位错、层错、孪晶等。但有关元素偏析的机制、基体相缺陷对析出相缺陷的作用关系等方面尚不明确。本论文结合高分辨透射电镜和三维原子探针技术，精确表征了基体相和析出相层错处元素偏析情况。研究结果表明，析出相层错中有铬、钴以及铌元素的偏析以及镍和铝元素的贫化。而基体相层错中富集的是镍元素、贫化的是铬元素。此外基体相层错处还观测到少量铌和钨元素的富集。相关研究结果表明溶质元素可通过蠕变缺陷的演变影响蠕变性能。深入理解溶质元素偏析可为准确理解合金元素在服役过程中的作用机制提供新的角度，并为新型高性能合金的设计提供新的元素选择机制和优化标准。

**C16-22 最终交流类型：口头报告****超导射频腔的排磁通行为及磁热稳定性研究**何安\*<sup>1</sup>

1. 长安大学

超导射频腔作为探测暗物质、新粒子和引力波的一种研究手段和工具，可以大幅提高探测的灵敏度，显著减少微波功耗和降低运行费用。目前纯铌腔的加速梯度已经接近理论极限，Nb<sub>3</sub>Sn-I-Nb 的多层结构成为未来超导腔的研究热点之一。然而研制超导腔时观测到其内部有俘获磁通，俘获磁通导致超导腔温度升高甚至诱发失超，减少俘获磁通对于提升超导腔性能至关重要。报告主要内容：1) 缺陷的形态、晶粒晶界以及降温速率对超导射频腔磁通排出能力的影响。2) 从磁通涡旋微观角度探究超导腔磁热不稳定的物理机制，分析了影响超导腔磁热不稳定的主要因素。

**C16-23 最终交流类型：口头报告****非孪晶介导密排六方钛的加工硬化**倪新波<sup>1,2</sup>, 吴鹤<sup>3</sup>, 黄猛<sup>4</sup>, 吴昊\*<sup>3</sup>, 范国华<sup>2,3</sup>

1. 哈尔滨工业大学

2. 苏州实验室

3. 南京工业大学

4. OPPO 广东移动通信有限公司...

六方钛在低温下通常表现出优异的强度和延展性组合（主要是由于孪晶引起的显著硬化效应）。大量的工作都是从引入高密度变形孪晶的角度出发来规避强度-延展性冲突，同时也引出了一个科学问题：如果抑制六方金属纳米孪晶的形成会发生什么？在此，我们采用层状结构的方法来抑制六方钛的变形孪晶，并通过原位电子背散射衍射、中子衍射和晶体塑性有限元建模研究无孪晶纯钛的变形特性。值得注意的是，我们观察到无孪晶纯钛在 77K 变形时表现出前所未有的不同于孪晶的超高且加速的应变硬化现象。这一现象归因于高密度位错的累积和柱面<a>滑移的显著增加。我们的研究结果可能挑战了传统观点，即孪晶是

六方金属低温强度-延展性协同效应的主要机制，并为设计既强又韧的金属材料提供了新的策略。

#### C16-24 最终交流类型：口头报告

##### 优化磁通钉扎提高 Nb<sub>3</sub>Sn 临界电流密度

任晗熹<sup>1</sup>，薛存\*<sup>2</sup>

1. 西北工业大学

利用金兹堡-朗道理论的时间相关特性和 GPU 并行技术，我们对大规模多晶 Nb<sub>3</sub>Sn 超导体中的涡流钉扎和临界电流密度进行了理论研究。通过调整不同磁场下的晶界钉扎势和晶粒尺寸，我们发现，与点状钉扎系统不同，多晶体中单纯抑制晶界的钉扎势并不总是能提高临界电流密度。当晶界的超导电性被过度抑制时，磁通涡旋更倾向于沿晶界移动，形成磁通通道。我们发现，最大临界电流密度对应的最佳晶界钉扎势在很大程度上依赖于磁场。在低磁场条件下，减小晶粒尺寸能显著提升临界电流密度；而在高磁场下，减小晶粒尺寸并不能持续增加临界电流密度。最后，我们通过数值模拟研究了人工点钉扎对磁通涡旋钉扎的影响，并探讨了通过优化人工钉扎密度来提高 Nb<sub>3</sub>Sn 的临界电流密度的可能性。

#### C16-25 最终交流类型：口头报告

##### YBCO 超导材料中晶界主导的力学变形机理研究

张瑞<sup>1</sup>，张志伟\*<sup>1</sup>，张兴义<sup>1</sup>

1. 兰州大学

YBCO 超导材料因其高于液氮的临界温度、高的临界磁场与临界电流，特别是高磁场下优异的载流能力，广泛地应用于极低温与强电磁力的极端使役环境中，使其受到拉压、温度、电磁力以及电磁辐照等复杂载荷。同时，YBCO 材料属于氧化物陶瓷，呈现多晶结构，而晶界作为 YBCO 材料的本征缺陷，对 YBCO 的力学变形有着不可忽视的作用。本研究采用分子动力学模拟对 YBCO 超导材料中晶界主导的力学变形机理进行了详细探究。结果表明，晶界主导的 YBCO 超导材料存在着显著的拉压不对称，对拉伸而言，孪晶界会显著增强材料的力学性能，小于 30° 的晶界对材料的杨氏模量影响较小，反之影响更加明显，同时晶界会降低材料的极限抗拉强度，此外，大角晶界会导致温度效应被明显抑制。究其变形机理，发现单晶拉伸时堆垛层错的聚集将形成贯穿的滑移带，而孪晶将产生退孪晶现象并沿孪晶面发生断裂。对于晶界结构而言，位错核的扩展和特征结构单元的变形分别是小角跟大角晶界断裂的主要机制。在压缩破坏的过程中，单晶中产生大量离散分布的堆垛层错造成材料的破坏，孪晶则主要沿厚度方向发生剪切破坏，而对于晶界结构，位错从其特征结构单元形核并随着堆垛层错扩展，进而形成滑移带，同时存在晶界迁移现象。

#### C16-26 最终交流类型：口头报告

##### 脉宽对高功率脉冲磁控溅射制备 Cr 涂层力学性能和高温蒸汽氧化性能的影响

陈定<sup>1</sup>，代伟\*<sup>1</sup>，王启民<sup>1</sup>

1. 广东工业大学

Cr 涂层具有优异的耐腐蚀性能和机械稳定性，可作为 Zr-4 合金包壳耐事故防护涂层，有效避免 Zr-4 合金在冷却剂丧失事故环境中发生析氢反应而导致结构失效。本文采用高功率脉冲磁控溅射 (High-power impulse magnetron sputtering, HiPIMS) 技术在 Zr-4 合金表面制备了 Cr 涂层，并研究脉宽参数对涂层结构、力学性能及耐高温蒸汽氧化性能的影响。结果表明，HiPIMS 制备的 Cr 涂层均以 (200) 择优取向生长，随

着脉宽的增大涂层织构增强，涂层硬度逐渐下降，抗划痕性能降低。宽脉宽下制备的 Cr 涂层具有强织构，为 O 在涂层中扩散提供了通道，使得涂层在氧化初期全部被氧化，形成致密氧化层，阻挡了 O 的内扩散和 Zr 外扩散。而在窄脉宽下，Cr 涂层结构致密，织构不明显，氧化初期只在涂层表层形成致密氧化层，阻挡了氧向涂层内扩散，但残留的 Cr 层无法阻挡 Zr 的外扩散，导致呈网络状的 ZrO<sub>2</sub> 形成，加剧了 Zr 基体氧化。

### C16-27 最终交流类型：口头报告

#### 激光粉末床熔融 TiNbCu 合金的微观结构和强度-塑性协同增强

金剑波、周圣丰\*

1.暨南大学

显微组织的不均匀性是混合粉末制备的钛合金力学性能差的主要原因。在这项工作中，β 型 Ti35NbxCu 合金 (x = 0、1、3、5 和 7 wt%) 是通过激光粉末床熔融法制备的。研究了铜含量对其显微组织和力学性能的影响。结果表明，当铜含量小于 3 wt%，它可以完全固溶到 Ti 基体中而没有出现元素偏析，并且弹性模量显著降低。与 Ti35Nb 合金 (76.7±0.8 GPa) 相比，Ti35Nb1Cu 合金的弹性模量 (49.1±1.6 GPa) 降低了 36%。当 Cu 含量超过 3 wt% 时，共析反应在 LPBF 的循环加热和快速冷却过程中被激活，部分过饱和的 β 相转变为纳米级 α 和 Ti<sub>2</sub>Cu (β→α+Ti<sub>2</sub>Cu) 相。由于纳米级 Ti<sub>2</sub>Cu 颗粒沿 β 晶界析出，产生钉扎效应，抑制了 β 晶粒的生长 (晶粒细化)，阻碍了位错运动，提高了合金的强度。因此，Ti35Nb5Cu 合金的抗拉强度最高为 867.3±24 MPa，延伸率达到 11.7±0.5%。Cu 的固溶强化、β 的细晶强化、位错强化和 Ti<sub>2</sub>Cu 的沉淀强化是 Ti35Nb5Cu 合金具有优异综合力学性能的主要原因。当 Cu 的含量为 7wt% 时，位错密度 (4.179×10<sup>15</sup>(m<sup>-2</sup>)) 和脆性相 Ti<sub>2</sub>Cu 的比例 (8.5%) 过高，及固有微裂纹萌生引起的应力集中是 Ti35Nb7Cu 合金拉伸脆性断裂的主要原因。因此，LPBF 制备的 Ti35Nb5Cu 合金的强塑性得到改善，表明所开发的 TiNbCu 合金具有作为性能增强的植入材料的良好潜力。

### C16-28 最终交流类型：口头报告

#### W 对 Ti-Al-Mn-Nb 基金属间化合物高温抗氧化性的影响

郑皓宇<sup>1,2</sup>, 郝俊杰<sup>2</sup>, 李小兵<sup>\*2</sup>, 李东刚<sup>1</sup>, 刘奎<sup>2</sup>

1. 东北大学

2. 季华实验室

β 凝固 γ-TiAl 合金具有比重轻、比强度高、热加工性和高温性能良好等特点，是一种极具竞争力的新型轻质耐热结构材料。Nb 作为一种典型的固溶强化和抗氧化性改善的合金元素，被广泛用在 TiAl 合金的成分设计上。但是当 Nb 含量较高时 (如 ≥4.0 at.%)，合金中容易析出 ω 脆性相，降低合金高温服役可靠性，而当 Nb 含量较低时，虽降低了 ω 相的析出倾向，但是不利于合金的抗氧化性和热加工性。为此，本文以一种 Nb、Mn 合金化的 Ti-43Al-1.5Mn-3Nb (at.%) 合金为研究对象，采用循环氧化方法，研究了微量 W (0/0.1/0.5at.%) 添加对合金 850℃ 抗氧化性的影响；采用电子探针-背散射电子分析 (EPMA-BSE)、X 射线衍射 (XRD)、透射电镜 (TEM) 等检测手段，分析了 W 添加对合金组织特征，以及对氧化膜结构的影响，探究了 W 对合金高温抗氧化性的作用机制。结果表明：三种合金的动力学曲线均大致遵循抛物线规律，形成的氧化膜未出现开裂或剥落现象。其中添加 0.5 at.% 的 W 可以显著降低氧化增重，合金的氧化反应速率常数 K<sub>p</sub> 从 14.42×10<sup>-3</sup>(mg/(cm<sup>2</sup>n·h)) 降到 8.09×10<sup>-3</sup>(mg/(cm<sup>2</sup>n·h))，降低了 43.9%，改善了 TiAl 合金的高温抗氧化性。本文的研究结果不仅有助于进一步认识 β 型 γ-TiAl 合金的高温氧化行为，而且对发展耐高温 TiAl 合金具有重要的应用价值。

**C16-29 最终交流类型：口头报告****CLAM 钢辐照后的两种位错环相图**

曹俊杰、郭立平\*、罗红泰、林文斌、尹泽鹏、闫睿、林思龙、王子潇

1. 武汉大学

BCC 铁基合金作为先进反应堆的结构材料，面临高温高剂量的严苛服役条件。材料在辐照后会产生两种行为差异很大的位错环，即  $a/2\langle 111 \rangle$  和  $a\langle 100 \rangle$  型。因为  $a\langle 100 \rangle$  型环具有更强的阻碍因子以及更大的位错偏压，所以这两种环对材料的机械性能（硬化和肿胀）影响不同，因此有必要研究两种位错环在不同辐照条件下的占比。利用武汉大学加速器实验室  $2 \times 1.7\text{MV}$  串行加速器上进行系统的  $2.5\text{MeV Fe}^{2+}$  辐照实验，再通过聚焦离子束（FIB）制样以进行 TEM 表征。TEM 结果显示，随着辐照剂量的增加，级联碰撞产生  $a/2\langle 111 \rangle$ ，然后  $a/2\langle 111 \rangle$  环之间通过“111”机制产生  $a\langle 100 \rangle$ ，两种环的密度逐渐升高直到饱和，在此过程中， $a\langle 100 \rangle$  的占比逐渐升高。随着辐照温度的增加， $a/2\langle 111 \rangle$  的移动增强，所以  $a\langle 100 \rangle$  环的产生几率增加，导致  $a\langle 100 \rangle$  环密度上升并在  $450^\circ\text{C}$  达到峰值。尽管在更高温度下， $a\langle 100 \rangle$  环密度下降，但位错环的类别基本是  $a\langle 100 \rangle$ 。基于实验结果，绘制了两种环占比随温度和剂量变化的相图，相图内存在“L”型转变区间。该相图为理解辐照缺陷的演变规律和对力学行为的影响提供了有价值的参考。

**C16-30 最终交流类型：邀请报告****材料变形机制的原位原子尺度研究**王立华\*<sup>1</sup>，韩晓东<sup>1,2</sup>，张泽<sup>3</sup>

1. 北京工业大学
2. 南方科技大学
3. 浙江大学

材料力学性能与其变形过程中微观结构演化的原子机理直接相关。在原子层次认知材料弹塑性变形过程的原子机理，是其力学性能优化的基础。透射电镜具有原子分辨率，然而常规的原位力学实验技术空间分辨率往往只有纳米尺度。本报告介绍团队原创的原子分辨的材料弹塑性力学行为研究方法。并介绍利用该方法研究尺寸，界面金属弹性极限及塑性变形机制的影响。在原子层次研究多晶以及孪晶结构金属材料的变形机制；研究晶界，位错在外力作用下的演变机制；揭示晶界结构，晶粒尺寸对多晶金属材料塑性变形机制以及弹塑性能的影响。最后介绍原子分辨的原位观测技术对解决一些经典科学问题的优势。

**C16-31 最终交流类型：邀请报告****FeMnCoCr 系增材制造亚稳高熵合金**罗晋如\*<sup>1</sup>，耿赵文<sup>2</sup>

1. 苏州实验室
2. 中南大学

亚稳高熵合金可以通过复杂的变形机制构筑多尺度精细结构，具备卓越的强度-塑性组合，是多种极端苛刻环境中的潜在应用材料。增材制造技术作为未来工业化制造的主导发展方向，既有着可比拟的经济效益和研发效率，还可以直接成形复杂的晶格结构，实现轻量化的同时赋予缓冲、减震、能量吸收以及高热交换效率等特性。目前，增材制造技术成形 MHEAs 研究仍处于初级阶段，打印工艺-组织结构-力学性能之间的关联仍未建立，显微结构的组分形态及其对变形行为影响机制有待探究，TRIP/TWIP 机制的激活与扩展对  $\gamma$  相晶体学取向依赖性仍需探索，多种服役环境中的变形行为演变及服役可行性研究未

有定论。本研究分别采用定向能量沉积和激光粉末床熔融技术成型了 FeMnCoCr 系 MHEAs，研究增材制造工艺-组织-性能关联及其相互影响作用；揭示位错滑移、TRIP 和 TWIP 机制的交替演变行为；系统表征析出相、马氏体/孪晶及化学短程有序颗粒组态及相互作用；阐明 LPBF 成形 MHEAs 中不同晶体学取向  $\gamma$  相的变形机制，揭示动态载荷拉伸条件下  $\gamma/\epsilon$  相孪晶类型及占比演变行为；探究化学短程有序结构对 DED 成形 MHEAs 低温环境拉伸变形行为影响。

### C16-32 最终交流类型：邀请报告

#### 高强韧 BCC/B2 强化 FeNiCrMoAl 多主元合金的空蚀-腐蚀行为

付志强\*<sup>1</sup>, 牛佳成<sup>1</sup>, 陈维平<sup>1</sup>

1. 华南理工大学

本研究通过调控成分在 FCC 结构 ( $\gamma$  相) 的 Fe<sub>44.2</sub>Ni<sub>27</sub>Cr<sub>23</sub>Mo<sub>1.8</sub>Al<sub>4</sub> 多主元合金中引入了三种体积分数的 BCC/B2 结构 ( $\beta/\beta'$  相)。重点探究  $\beta/\beta'$  相对力学性能以及 NaCl 溶液中的电化学腐蚀和抗空蚀-腐蚀性能的调控机理。当  $\beta/\beta'$  相含量增加，多主元合金的拉伸强度上升，但是会损失一些延伸率，同时也会降低合金耐腐蚀性能， $I_{corr}$  和  $I_{pass}$  会随着其含量的增加而增加。最重要的是， $\beta/\beta'$  相的引入可以大幅提高合金的抗 CE-C 性能。其中， $\beta/\beta'$  相体积分数为 22.3% 的合金表现出最优的综合性能，其拥有 899 MPa 的抗拉强度，36.4% 的延伸率， $I_{corr}$  为 61.8 nA·cm<sup>-2</sup>， $E_{corr}$  为 -213 mVSCE，空蚀-腐蚀 10 小时后的累计体积损失是基体合金的 0.234 倍。虽然  $\beta/\beta'$  相的引入会导致合金钝化膜高度无序、缺陷较多且保护性较差。但是，空蚀-腐蚀中最主要的损伤机制是空蚀，而  $\beta/\beta'$  相具有高硬度和高抗塑性变形能力，因此能在空化冲击应力下保留下来降低整体体积损失，进而提升抗 CE-C 性能。除此之外，空蚀-腐蚀中，空蚀与腐蚀之间存在协同作用。

### C16-33 最终交流类型：邀请报告

#### 高强韧钨基材料的制备及性能研究

解雪峰<sup>1</sup>, 张艳革<sup>1</sup>, 谢卓明<sup>1</sup>, 吴学邦\*<sup>1</sup>, 刘长松<sup>1</sup>

1. 中科院固体物理研究所

聚变堆材料问题，特别是面向等离子体材料 (PFM) 问题，是制约聚变能发展的瓶颈之一。钨 (W) 具有高熔点、高热导率等优点，成为 PFM 最佳的候选材料。然而，传统钨材料存在低温脆性、高温再结晶脆性和辐照脆性等缺点，因此亟待发展兼具低温韧性和高强度的钨材料。国内外研究人员通过轧制、拉拔等加工方法制备出了具有室温塑性的钨薄片、钨丝等。但是，在纯钨块材中同时实现室温拉伸塑性和高强度仍是一个巨大挑战，这主要是由于在常规的高温烧结和后续热形变过程中，钨晶粒易粗化，难以细化到微米或亚微米级。鉴于此，我们提出了多尺度微结构调控策略，成功制备出兼具室温拉伸塑性和高强度的纯钨块材。首先，通过对活化的 W 粉进行快速两步低温烧结，得到平均晶粒尺寸为 8.9  $\mu\text{m}$  的烧结钨板坯。再利用高能率锻造的温加工动态回复过程，在锻造钨块材中实现了独特的多尺度微结构：层状结构母晶，母晶中含超细亚晶 ( $\sim 1 \mu\text{m}$ )，亚晶中含高比例可动性位错。锻造钨块材在室温下展现出拉伸塑性且抗拉强度高达 1354 MPa；在 100  $^{\circ}\text{C}$  时，延伸率达 4.2%，抗拉强度维持在 1300 MPa。除了优异的低温性能外，高能率锻造纯钨在 600  $^{\circ}\text{C}$  下仍具有优异的力学性能，延伸率和强度分别为 10.2% 和 843 MPa。在微结构调控的基础上，我们向钨基体中引入了第二相 TiC 颗粒，以进一步提升钨材料的低温拉伸强度。通过在 TiC 颗粒和 W 基体之间构建具有 Nishiyama-Wassermann 取向关系的低能半共格界面，结合界面处 W 原子和 C 原子的强共价键结合，极大地提升了 TiC 颗粒的稳定性，使其在高温制备过程中仍能保持细小尺寸 ( $\sim 29 \text{ nm}$ )。稳定细小的 TiC 颗粒在钉扎位错的同时作为弥散强化相，进一步细化了亚晶，达到显著的

细晶强化效果。锻造 W-TiC 合金在室温下的抗拉强度提升至 1590 MPa, 在 100 °C 时, 抗拉强度接近 1.7 GPa。此外, 随温度上升, 锻造 W-TiC 合金仍具有极高的强度, 例如, 200 °C 和 300 °C 时的抗拉强度分别为 1558 MPa 和 1404 MPa。与已报道的块体钨材料相比, 具有明显的优势。

#### C16-34 最终交流类型: 邀请报告

##### Johansson 全聚焦弯晶设计与工艺研究

全琪\*<sup>1</sup>, 杨杰<sup>1</sup>

1. 北京昊楚科技有限公司

在全球科研与工业生产领域, 对高精度材料表征技术的需求日益增长, 其中, X 射线单色技术是 X 射线表征的核心手段之一, Johansson 全聚焦弯晶型通过独特的晶体设计, 具有高通量与高效激发、单波长激发、优异的峰背比、高空间分辨率、灵活性与适应性, 可显著增加 X 射线的通量、提高信号的分辨率。实现了 X 射线的高效单色化与全聚焦, 极大地提高了分析的灵敏度、分辨率与速度, 广泛应用于半导体、新材料、生物医学及地质勘探等多个前沿科学研究和高端制造环节。

#### C16-35 最终交流类型: 口头报告

##### 基于机器学习的 Fe-Cr-Ni-Al/Ti 多主元合金的成分设计及性能优化

徐康<sup>1,2</sup>, 涂坚<sup>2</sup>, 罗晋如\*<sup>1</sup>

1. 苏州实验室

2. 重庆理工大学

多元主元合金 (Multi-Principal Element Alloys, MPEAs) 作为一种新的合金设计理念, 突破了传统合金单主元的限制, 并表现出优异的综合性能。然而, 由于其巨大的成分设计空间, 传统的合金设计方法, 如实验试错和第一性原理计算等, 难以实现高效设计 MPEAs。近年来, 机器学习作为一种数据驱动的设计方法, 在合金设计领域得到了广泛应用, 并为高效开发具有优异性能的 MPEAs 提供了有效的方法。在本工作中, 我们使用机器学习方法, 对 Fe-Cr-Ni-Al/Ti MPEAs 展开成分高效设计和性能优化。针对穷举法在面临高维特征时指数爆炸的风险, 提出一种随机穷举的特征筛选方法, 用于筛选特征子集。此外, 对多种机器学习算法模型在预测屈服强度、抗拉强度和延伸率方面的精度进行了评估。最后, 组织表征和性能测试结果表明, Al<sub>5</sub>(Fe<sub>10</sub>Cr<sub>35</sub>Ni<sub>55</sub>)<sub>95</sub> 和 Al<sub>2</sub>Ti<sub>1</sub>(Fe<sub>10</sub>Cr<sub>35</sub>Ni<sub>55</sub>)<sub>97</sub> 经过 900 °C/15min 退火处理后, 实现了高强度和高延伸率。其中, Al<sub>5</sub> 合金的屈服强度达到 620.66MPa, 断裂延伸率为 32.67%; Al<sub>2</sub>Ti<sub>1</sub> 合金的屈服强度达到 588.29MPa, 断裂延伸率为 33.79%。

#### C16-36 最终交流类型: 口头报告

##### CoCrFeMnNi 高熵合金的氢氦辐照协同效应和硬化行为研究

罗彬<sup>1</sup>, 付雨晨<sup>1</sup>, 黄洪涛<sup>1</sup>, 范平<sup>2</sup>, 马海亮<sup>2</sup>, 袁大庆<sup>2</sup>

1. 中山大学

2. 中国原子能科学研究院

氘与氚是聚变堆的主要燃料, 但氢同位素易于在反应堆材料中渗透而产生安全隐患。本文结合了包埋渗铝法与原位氧化法在 316 不锈钢基体表面制备了铁铝/氧化铝复合阻氘涂层, 通过气相氘渗透装置研究了复合阻氘涂层的氘渗透行为, 研究了氧化气氛、时间、温度、热处理对阻氘涂层性能的影响。包埋渗铝法制备的铁铝层主要为 Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> 相, 经过一定时间热处理后可以完全转变为 FeAl 相, 不同条件的原位氧化在

铁铝层表面进一步形成了氧化铝层，复合阻氧涂层使得 316 不锈钢的渗透率下降了 2~3 个数量级。

### C16-37 最终交流类型：口头报告

#### 金属塑性变形功热转化问题的分子动力学模拟研究

孙佳琪<sup>1</sup>，陈开果\*<sup>1</sup>

1. 国防科技大学

理解塑性功在热和微结构之间的分配对理解和控制塑性过程中的“结构-性能”关联有重要意义。通常用 Taylor-Quinney 因子 (TQC) 来衡量热机械转换的效率，其微分和积分形式分别描述热机械功和功率的转换效率。近年来的计算、模拟和实验发现，将 TQC 定为恒定值 0.9 可能会导致错误的温升估计。本研究基于分子动力学方法模拟了 FCC 结构的单晶铜以及 BCC 结构的单晶钽在简单剪切变形下的热机械塑性变形过程，并发展了一套基于 NVE 系综的分析方法。文章考虑了剪切模量受温度和应力的影响，并进一步讨论了其对 TQC 的影响。研究发现可以将单晶金属变形过程划分不同阶段考虑，不同变形阶段对应不同物理量、塑性功转热系数及微结构变化。

### C16-38 最终交流类型：口头报告

#### 通过功能梯度材料实现应力-应变率可控的准等熵压缩

黄金<sup>1</sup>，张建\*<sup>1</sup>，朱可<sup>1</sup>，张睿智<sup>1,2</sup>，罗国强<sup>1</sup>，沈强<sup>1</sup>

1. 武汉理工大学，材料复合新技术国家重点实验室

2. 中国工程物理研究院，流体物理研究所

在动高压领域，使用梯度飞片 (Graded Density Impactor, GDI) 可以实现对材料的准等熵压缩。然而，制备过程中的副产物以及粘胶的引入会等导致实验的加载曲线与设计不一致，这在很长时间内限制了梯度飞片的应用。在本工作中，设计并制备了一种具有宽密度范围 (4.5~19.3 g/cm<sup>3</sup>) 和高结构可设计性的 W/Ti 梯度飞片。W/Ti 梯度飞片的各个中间层均由 W 和 Ti 组成，没有形成金属间化合物，并且层与层间具有良好的平面性和平行性。这为设计的加载曲线和实验加载曲线之间的良好一致性提供了先决条件。由于梯度飞片的高度可设计性，通过控制梯度飞片的结构，实现了不同应力路径下的准等熵加载。通过控制飞片速度和 W/Ti 梯度飞片的类型，成功地实现了对峰值加载应力和应变率的独立调控。W/Ti 梯度飞片在研究应力应变速率可控准等熵载荷下材料的动力响应行为方面具有巨大的应用潜力。

### C16-39 最终交流类型：口头报告

#### 奥氏体不锈钢表面激光熔覆 FeCoCrNiCu 基复合涂层组织及性能研究

张静怡<sup>1</sup>，柴林江\*<sup>1</sup>

1. 重庆理工大学

中锰奥氏体不锈钢由于具有较高的韧性和塑性、优异的可加工性等优点在核工业、建筑等领域得到广泛应用，但是其表面硬度和耐磨损性能较差限制了服役寿命，为了解决这一问题，本研究采用脉冲激光熔覆技术，在中锰奥氏体不锈钢表面成功制备出了 FeCoCrNiCu、FeCoCrNiCu+TiC 和 FeCoCrNiCu+SiC 三种中高熵合金复合涂层，并采用多种测试分析手段对其相组成、元素分布及微观结构特征进行了细致的表征和分析。结果表明，三种涂层均主要形成单一的 FCC 固溶体，且组织由不规则形状的晶粒组成。其中

FeCoCrNiCu 涂层主要由典型外延生长特征的柱状晶组成; FeCoCrNiCu+TiC 涂层由胞状亚晶及沿晶界和晶内分布的第二相颗粒组成; FeCoCrNiCu+SiC 涂层则由胞状亚晶及树枝状亚晶组成。硬度测试结果显示, FeCoCrNiCu、FeCoCrNiCu+TiC、FeCoCrNiCu+SiC 涂层的硬度相比于基体( $218.5 \pm 5.8$  HV)分别提高了 9.2%、13.0%和 30.8%。结合微观组织特征分析, 涂层硬度的提升可归因于细晶强化、第二相强化和固溶强化的协同作用。摩擦磨损实验结果显示, 基体、FeCoCrNiCu、FeCoCrNiCu+TiC 和 FeCoCrNiCu+SiC 的磨损率分别为  $2.6 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $2.2 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ 、 $1.2 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  和  $1.1 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ , 相比于基体, 涂层的耐磨损性能分别提高了 15.4%、53.8%和 57.7%, 涂层主要的磨损机制包括磨粒磨损、黏着磨损和氧化磨损。

#### C16-40 最终交流类型: 口头报告

##### CoFeNi<sub>2</sub> 中熵合金的摩擦磨损性能及变形机制研究

孟傲<sup>1,2</sup>、梁斐<sup>2</sup>、毛庆忠<sup>2</sup>、陈翔<sup>2</sup>、赵永好<sup>\*2,3</sup>

1. 安徽工程大学材料科学与工程学院
2. 南京理工大学材料科学与工程学院
3. 河海大学材料科学与工程学院

航空航天、武器装备等核心部件结构材料往往处于高温和高速等苛刻服役环境, 对材料的综合力学性能提出了更高要求。中高熵合金因其独特的设计理念具备高熵效应、晶格畸变效应、迟滞扩散效应和鸡尾酒效应等多种独特效应, 进而表现出高强、高塑、高韧、耐高温等优异的力学性能, 具有很强的工业应用潜力。目前, 面心立方结构中高熵合金的室/高温摩擦磨损性能较差, 磨损亚表层微观结构演化与摩擦学性能之间的关系缺乏系统研究。本文围绕中高熵合金的摩擦磨损性能及变形机制展开系统研究。针对性地设计制备了 CoFeNi<sub>2</sub> 中熵合金研究了其在室/高温的摩擦磨损性能, 结合磨痕形貌和亚表层微观结构表征, 深入分析探讨其在室温不同摩擦周次下的变形机制和耐磨机理以及高温下的摩擦磨损机制。主要结论如下:

(1) 在室温摩擦磨损实验中, 载荷为 5 N 时, CoFeNi<sub>2</sub> 中熵合金的摩擦系数和磨损率分别为 0.39 和  $1.48 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$ , 比 CoCrNi 中熵合金摩擦系数降低了 30%, 并且磨损率降低了两个数量级。在起始阶段, CoFeNi<sub>2</sub> 中熵合金的亚表面结构出现了两条位错迹线, 且位错迹线包含的区域相对于基体绕横向 (Transverse direction) 进行旋转。CoFeNi<sub>2</sub> 中熵合金的主要磨损机制为磨粒磨损, 摩擦诱导形成了微米级厚度的由非晶相包围纳米晶组成的致密保护层, 其能协调大塑性应变以抑制应变局域化和材料剥落, 从而实现低摩擦系数和良好的耐磨性。

(2) 在高温往复滑动下, CoFeNi<sub>2</sub> 中熵合金的摩擦系数从 400 °C 的 0.43 增至 800 °C 的 0.61。相比之下, 磨损率则从 400 °C 时的  $3.51 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$  增加到 600 °C 时的  $1.32 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$ , 随着温度的进一步提高到 800 °C, 磨损率大幅下降到  $2.3 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$ 。对于 CoFeNi<sub>2</sub> 中熵合金, 在 400 °C 时, 当摩擦对的接触区域体积较小且材料表面形成光滑保护层时, 摩擦系数最小。在 800 °C 时, 虽然保护层较厚, 但磨痕表面凹凸不平, 粗糙度较大, 摩擦系数达到最大值。CoFeNi<sub>2</sub> 中熵合金的磨损率随着温度由 400 °C 增加到 600 °C 而增加, 这是由于 600 °C 下保护层和再结晶层中的晶粒尺寸较大。800 °C 时磨损率的降低是由于高温氧化形成较厚保护层对耐磨性的积极影响, 同时再结晶层的梯度结构也有助于承载塑性变形。

#### C16-41 最终交流类型: 闪报

##### 湿热及盐雾环境中特 221 润滑脂对金属防护性能及贮存寿命评估研究

丁孝均\*

1. 航天材料及工艺研究所

特 221 润滑脂为硬脂酸钙和乙酸钙稠化乙基硅油而得的一种常用润滑脂, 主要用于摩擦组合件, 如金

属与金属、金属与橡胶的接触面上，起润滑、密封和防护作用。为研究其在沿海湿热、盐雾环境中的贮存寿命，并评价其对润滑部位金属材料的防护性能，对其开展了湿热试验，盐雾试验，热氧老化试验，湿热和盐雾环境中的防护试验。将涂抹特 221 润滑脂的 2A14 铝合金、5A03 铝合金、5A06 铝合金、45#钢、镀锌并铬酸钝化钢 45#、1Cr18Ni9Ti 钢、30CrMnSiA 钢、TC4 钛合金的试验件分别投入到 60°C 热氧老化箱和 60°C、95%RH 的湿热箱中，72h 后取出试样，用显微镜观察试样表面，湿热环境中涂抹特 221 润滑脂的 45#钢试样出现了明显腐蚀锈点，其余材料未发现腐蚀现象，说明特 221 润滑脂对 45#钢不具备防护性能。按 GJB 150.11A 对涂抹特 221 润滑脂的金属试样开展 4 个周期（96h）的盐雾试验，45#钢锈蚀严重，30CrMnSiA 试验件局部出现少量锈斑，说明特 221 润滑脂对这两种材料未起到防护作用，金属表面的特 221 润滑脂难以隔离环境中的水汽和盐雾，其对金属的防护能力较差。分别在温度 80°C、90°C、100°C、110°C 下对特 221 润滑脂开展加速贮存试验，测试钢网分油率，100°C 加速贮存 92 天后，钢网分油率为 9.4%，涂覆特 221 润滑脂的金属试样老化后未发现腐蚀迹象，证实其老化过程中未产生对相接触金属具有腐蚀性的产物，与接触材料的长期相容性合格，对四个加速温度下的分油率数据进行数理统计分析，评估特 221 润滑脂在贮存温度 30°C、置信度 95% 时，下限寿命为 19.6 年。

## C16-42 最终交流类型：闪报

### 铁氮不同顺序辐照致铁马钢肿胀的区别

闫睿、郭立平\*、曹俊杰、尹泽鹏、林文斌、罗红泰、林思龙、王子潇

1. 武汉大学

以一种 12Cr 铁素体马氏体钢为材料，在 550°C 条件下，分别进行单次 He、顺序 He/Fe、顺序 Fe/He 和同时 Fe+He 离子束辐照，以探讨不同辐照方式引起的微观结构差异。观察区域 Fe 离子损伤剂量为 50 dpa，He 离子浓度为 5 appm/dpa，用透射电镜（TEM）观察了辐照后样品的微观特征。在所有辐照方式中，单独注入 He 时，He 泡的数密度最大，随着 He 注入顺序的降低，He 泡的数密度依次降低。He/Fe 的 He 泡的数密度是单独注入 He 的 90%，同时 Fe+He 的 He 泡的数密度是单独注入 He 的 60%，Fe/He 的 He 泡的数密度是单独注入 He 的 43%。顺序 He/Fe 辐照方式下 He 泡的平均尺寸最大且肿胀也是最大。从辐照方式来看，He/Fe 辐照会夸大 Fe+He 辐照引起的缺陷及性能退化，这可能是因为预注入的 He 会起到促进 He 泡成核的作用，后引进的 Fe 会促进 He 泡的长大。Fe/He 的肿胀和 Fe+He 相差不大，Fe/He 的 He 泡数密度较小但尺寸较大。这可能是因为前期 Fe 辐照产生的位错环等缺陷可能会影响后注入的 He 引起的 He 泡的成核。本工作系统比较了不同辐照方式造成的材料微观缺陷，对辐照方式的选择提供参考价值。

## C16-43 最终交流类型：邀请报告

### 核用 NbMoZr 系难熔合金辐照损伤行为研究

潘虎成\*<sup>1</sup>，申志鹏<sup>1</sup>，杨吉军<sup>2</sup>，吴璐<sup>3</sup>

1. 东北大学

2. 四川大学

3. 中国核动力研究设计院第一研究所摘要内容

高熵合金在过去十年间由于其独特的设计理念以及优良的力学和物理性能受到了广泛关注。特别的，高熵合金由于其严重晶格畸变效应展现出极好的辐照肿胀抗性，有望成功第四代反应堆核燃料金属基体候选材料。本研究以非等摩尔比的 Nb50Mo30Zr20 合金为基，通过 350 及 750°C 的 Xe 离子辐照，研究 Al 添加对其辐照行为的影响，发现 Al 能提高合金的相稳定性，并抑制位错环及辐照气泡生长。在上述基础上，研究进一步设计并合成了新型抗辐照 Nb 基合金—NbMoZrCrAlB 合金，其室温压缩强度可达 1.1 GPa。在

350°C 的 Xe 离子辐照下, 无显著 Xe 泡产生, 而 750°C 下, Xe 离子辐照肿胀率仅为 0.04%。同时, 合金的位错环尺寸及密度相较于纯 Nb 均有显著降低。本研究的相关结果对于先进核燃料基体材料设计具有一定的理论参考意义。

#### C16-44 最终交流类型: 邀请报告

##### 气体对耐事故燃料物理性能的影响研究

王园园\*<sup>1</sup>

1. 大连理工大学

耐事故燃料是一种近些年提出的一种新型燃料元件, 致力于满足下一代核电燃料高安全、长寿期和高能耗的发展需求。燃料辐照损伤一直是先进核反应堆燃料研究关心的问题, 它影响着反应堆能否安全运行。尤其是, 裂变反应产生的气体使材料损伤加深。耐事故燃料微结构单元包括各种相、相分布、应力状态及晶粒取向, 这些广义微观组织参量失效过程的演化特征与工程部件服役行为密切相关, 尤其是晶界处原子排列结构多样。如何将宏观化学组成、力学/氧化行为与微观结构变化有效地衔接, 揭示耐事故燃料在服役过程中的失效物理机制, 从而提出改善晶界性能的方法和揭示晶界断裂强度的关键控制因素是本报告关注的问题。报告将汇报我们采用第一性原理计算, 开展 UN、U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> 晶界处气体原子 (如 O、Xe) 和辐照缺陷 (如空位) 偏聚行为及其对晶界物理性能 (如氧化性、断裂性) 影响研究的最新进展。

#### C16-45 最终交流类型: 邀请报告

##### 高温防护涂层氧化行为及力学性能的原子尺度研究

郭芳宇<sup>1</sup>, 令伟栋<sup>1</sup>, 杜勇<sup>2</sup>, 戴佳钰\*<sup>1</sup>

1. 国防科技大学

2. 中南大学

在服役过程中, 因防护涂层的高温氧化、剥落等导致性能急剧下降。然而, 由于高温高应力的复杂工作环境, 防护涂层的失效机理尚不清楚。我们基于第一性原理分子动力学模拟方法 (AIMD) 分析了 Ti-Al-N 涂层氧化行为与温度、元素成分之间的内在关系, 从原子结构角度为氮化物涂层氧化性能的研究提供了新的评估机制。随后, 进一步研究了合金元素 (V、Hf 和 Si) 对 TiAlN 涂层高温结构稳定性及氧化行为, 发现合金元素的添加使表面形成不同结构的氧化物, Hf 和 Si 的加入有利于形层状氧化物, 而 V 的添加会导致双层氧化层结构消失, 从而获得了涂层结构的稳定性、扩散动力学与合金元素之间的相互作用关系。此外, 我们还研究了 Cr<sub>2</sub>AlC 涂层材料中缺陷的形成机制及机械性能的变化, 获得了缺陷的迁移路径及扩散机制, 并提出了缓解 H 脆的有效方法。最后, 为了突破第一原理计算方法在原子尺度上的局限性, 我们通过机器学习势函数方法开发了氮化物涂层机器学习势模型, 可实现宽热力学区间下量子力学精度的大规模原子结构演变过程模拟。机器学习势方法为进一步理解极端条件下核用涂层材料的微观结构和机械性能提供新思路。

#### C16-46 最终交流类型: 邀请报告

##### 颗粒增强 TiAl 基复合材料的组织及性能

邢秋玮\*<sup>1</sup>

1. 郑州航空工业管理学院

TiAl 合金作为一种轻质高温结构材料, 在航空航天、国防军工以及汽车工业等多个高科技领域中备受

瞩目。其卓越的耐热性、高比强度，以及出色的抗高温蠕变和氧化抗性，赋予了它独特的优势。尽管如此，TiAl 合金在低温下塑性欠佳，以及在高温环境中的抗氧化能力不足，在一定程度上制约了其应用。为拓宽其应用范围，本研究通过向 TiAl 合金基体中引入或原位生成强化相，以提升其高温抗氧化能力。利用放电等离子烧结以及真空非自耗电弧熔炼等先进技术，制备出含有石墨烯、氮化硼、碳化硅颗粒的 TiAl 基复合材料。随后，我们对这些颗粒增强的 TiAl 基复合材料进行了组织演变的详尽考察，并对其抗氧化性能进行了全面的探索与研究。随后，本研究对这些复合材料的组织演变进行了系统的显微结构和相分析，深入探讨了不同增强颗粒对 TiAl 合金基体的影响。研究发现加入不同质量比的颗粒可以使复合材料晶粒产生不同程度的细化效果。颗粒增强 TiAl 合金力学性能的提升主要归因于晶粒细化与析出相的沉淀强化。本研究不仅为提升 TiAl 合金的高温抗氧化性能提供了科学依据，同时也为开发新型高温结构材料提供了有益的参考。

#### C16-47 最终交流类型：邀请报告

##### Ti-Zr-Nb-Ta-Al 系轻质难熔高熵合金的微观结构及强韧化机理

廖卫兵\*

1. 深圳大学

#### C16-48 最终交流类型：邀请报告

##### 波动能源水解制氢中关键材料腐蚀行为和防护技术

骆鸿\*

1. 北京科技大学

波动能源水解制氢是一种将可再生能源转化为氢气的高效方法，在实现可持续能源目标中具有重要意义。然而，水解制氢系统中的关键材料常常暴露于极端环境中，易发生腐蚀，影响其性能和寿命。本文研究了波动能源水解制氢过程中关键材料的腐蚀行为及其防护技术。首先，分析了在不同波动能源条件下，关键金属材料的腐蚀机理，包括电化学腐蚀、应力腐蚀等。其次，探讨了各种防护技术，如表面涂层、合金在关键材料防腐中的应用。提出了建议开发新型高性能耐腐蚀材料及优化现有防护技术，以提高波动能源水解制氢系统的整体效率和耐久性。为相关领域的研究人员提供参考，促进波动能源水解制氢技术的发展和應用。

#### C16-49 最终交流类型：邀请报告

##### 非晶合金非均匀年轻化行为研究

时博<sup>1\*</sup>，张赛龙<sup>1</sup>，周敬宇<sup>1</sup>，杨一凡<sup>1</sup>，耿婧<sup>1</sup>

1. 青海大学机械工程学院

非晶合金具有优异的力学、物理和化学性能，是一类具有广阔应用前景的新材料。然而，由于物理老化和剪切局域化，非晶合金的室温塑性变形能力极差，严重制约了其广泛应用。如何实现非晶合金的韧塑化是本领域具有挑战性的前沿课题。本工作分别通过弹性加载及低温热循环对非晶合金进行处理，以实现非晶合金的韧塑化。(1) 通过弹性加载，在 Zr 基非晶合金中调控了非均匀结构：“边缘软化/回春-中心硬化/弛豫”的结构。这种异构结构使得剪切带的取向发生了偏转，难以快速扩展，进而导致非晶合金的塑性提升。同时，我们还发现了“应力诱导型记忆效应”。(2) 我们对变态非晶合金进行了低温热循环处理，发现成熟剪切带区域及非成熟剪切带区域的响应截然相反，即成熟剪切带区域发生了弛豫，而非成熟剪切带区域发生了年轻化。

#### C16-50 最终交流类型：邀请报告

## 反应堆材料氢同位素渗透行为与铝基阻氚涂层技术研究

黄洪涛\*、罗彬、林世建、吴勇进、陆柯龙

1. 中山大学

氢原子及其同位素半径很小，具有很强的渗透性，一旦渗透到反应堆结构部件材料中，会对材料造成不同程度的破坏，可能造成严重的经济损失，甚至引起严重的反应堆安全事故及对环境造成放射性污染。解决办法是在反应堆结构部件表面制备兼具良好热稳定性和抗辐照等综合性能的阻氚涂层材料以阻碍氢及其同位素渗透。

课题组自行设计研制了一套气相氢同位素渗透装置。采用本装置研究了镀钯 316L 不锈钢、CoCrMnFeNi 以及 AlCoCrFeNi 两种高熵合金的氚渗透行为。对镀钯 316L 不锈钢，350°C~650°C 温度范围内，氚渗透测试值与 Forcey 等人的测试值极为接近 (Fusion Eng. Des, 2020, 152: 111469)。另外，测试得到的两种高熵合金的渗透率值与文献报道值也较为接近，CoCrMnFeNi 的渗透率大于 Zr-4 合金、AlCoCrFeNi 和 316 不锈钢 (Int. J. Hydrogen Energy. 2023.02.004)。这间接验证了本测试装置及研究方法的可靠性。

此外，系统研究了由中国自主研发的新型燃料包壳材料 FeCrAl 合金的氚渗透与扩散行为。发现典型工况温度 300°C 下，FeCrAl 氚渗透率约为 316L 氚渗透率的 37 倍，约为 Zr-4 氚渗透率的 95 倍。360°C 下，FeCrAl 氚渗透率约为 316L 氚渗透率的 25 倍，约为 Zr-4 氚渗透率的 32 倍 (J. Nucl. Mater, 2022, 570: 153942)。

本课题组也针对 Al 基阻氚涂层的制备工艺和相关性能开展了一系列的探索性研究。系统探索了 FeCrAl 合金表面选择性氧化制备 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 阻氚涂层的技术。提出一种 Fe-Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合阻氚涂层制备方法：“低温高活性渗铝+原位氧化”工艺。采用一定配比的 Al 粉，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉及 AlCl<sub>3</sub> 粉做渗铝剂。探究了 316L 不锈钢基体表面粗糙度、活化剂种类与含量、渗铝温度以及保温时间等工艺参数对渗铝层显微组织的影响。使用优化的包埋渗铝工艺（渗铝温度为 650°C）在表面制备 Fe-Al 层，并探索了氧化气氛、氧化温度、氧化时间等原位氧化工艺参数对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层制备的影响，最终成功制备出十几微米厚且具有优良综合性能的 FeAl/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 阻氚涂层 (Fusion Eng. Des, 2024, 201: 114266)。该 Fe-Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 阻氚涂层可使 316L 不锈钢的氚渗透率下降 2~3 个数量级。

### C16-51 最终交流类型：口头报告

#### IN625 合金宽幅薄板蠕变损伤依赖性及相析出行为

樊江昆\*<sup>1</sup>，刘栩东<sup>1</sup>，李金山<sup>1</sup>

1. 西北工业大学

IN625 高温合金由于具有良好的抗氧化、抗热腐蚀性能，以及抗蠕变疲劳性能，被广泛应用于飞机管道系统、发动机、核电设施等关键零部件。近年来重大装备研制大型化、一体化趋势明显，发展大尺寸宽幅镍基高温合金薄板对我国航空航天、海洋工程、化工等领域的发展具有重要意义。报告围绕 IN625 合金组织调控及蠕变失效行为，介绍了合金宽幅板材蠕变损伤行为的晶体学取向依赖性以及温度依赖性，阐明了热力耦合作用下合金的相变特征，并提出一种高效强化合金的应力时效热处理工艺，基于前期工作基础实现了典型薄壁构件的工程化试制。

### C16-52 最终交流类型：口头报告

#### Effect of Chemical Fluctuations on the Mechanical Properties of Ti-Zr-Nb-Ta-Mo Refractory Multi-principal Element Alloys

Weiji Lai<sup>1</sup>，Xiaojian Wang\*<sup>2</sup>

1. Jinan University

Ti-Zr-Nb-Ta-Mo refractory multi-principal element alloys (MPEAs), boasting a yield strength exceeding one gigapascal, emerge as promising candidates for demanding structural applications. However, their limited tensile ductility at room temperature presents a significant challenge to their processability and large-scale implementation. This study identifies chemical fluctuations as a critical factor influencing the plasticity of these alloys. microscale chemical fluctuations in these MPEAs during solidification, driven by miscibility gaps, manifests as dendritic structures within grains. Closer examination reveals that the MPEAs with a pronounced thermodynamic propensity for chemical fluctuations are also susceptible to analogous phenomena at the atomic level. The atomic chemical fluctuations are characterized by the localized aggregation of some elements across nanometric domains. It is observed that chemical fluctuations for these MPEAs, occurring at both microscale and atomic scale, adheres to thermodynamic principles and can be predicted using the CALPHAD approach. The impact of chemical fluctuations on the plasticity of MPEAs fundamentally stems from the induced heterogeneities at three distinct levels: 1) Fluctuations in mechanical properties at the micron scale; 2) Variations in the strain field at the atomic scale; 3) Bond polarization and bond index fluctuations at the electronic scale. Consequently, the key to designing high-strength and high-plasticity MPEAs lies in maximizing lattice distortion while simultaneously minimizing the adverse effects of chemical fluctuations on the alloy's plasticity (grain boundary cohesion). This research not only clarifies the mechanisms underpinning the ductile-to-brittle transition in high-strength Ti-Zr-Nb-Ta-Mo MPEAs but also offers crucial guidelines for developing advanced, high-performance alloys.

#### C16-53 最终交流类型: 口头报告

##### 纳米晶和超细晶 W-Y2O3-Ti 的抗热冲击性能研究

王慧<sup>1</sup>, 谢卓明<sup>1</sup>, 吴学邦\*<sup>1</sup>, 刘长松<sup>1</sup>

1. 中国科学院固体物理研究所

磁约束聚变装置中, 面向等离子体第一壁钨(W)材料的服役环境极端苛刻, 通常要面临高通量氦/氢等离子体轰击、高能中子辐照以及稳定/瞬态热负荷等极端环境。特别是一些瞬态事件, 热负荷可达几GW/m<sup>2</sup>。这些瞬态等离子体事件持续时间从亚毫秒到几毫秒不等, 会使材料表面产生非常大的温度梯度, 导致表面粗糙化、再结晶、开裂以及熔化等不可逆转的损伤。此外, W材料在受到高温和热轰击后, 其力学性能会显著退化, 缩短其使用寿命, 并造成等离子体污染。因此, 为提高W材料的抗热冲击性能, 亟需对材料失效机制进行深入研究。本文利用高能球磨、放电等离子烧结(SPS)和可控的退火处理, 制备了块状纳米晶(NC)、超细晶(UFG)和细晶(FG)结构的W-1wt.%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-1wt.%Ti(WYT)合金。与NC-WYT相比, FG-WYT具有更高的热导率(~119 W/m·K), 但强度较低(~0.6 GPa), 而UFG-WYT则兼具良好的力学性能和热导率。1500 °C退火后的UFG-WYT室温(RT)下的抗压强度达~2.3 GPa, 应变~11%, 热导率为109 W/m·K。经受100次0.33 GW/m<sup>2</sup>的瞬态电子束轰击后, UFG-WYT表面仅观察到宽度约为0.29 μm的微裂纹, 展现出优异的抗热冲击性能。然而, 1700 °C退火的FG-WYT样品在仅0.22 GW/m<sup>2</sup>时就出现了明显的裂纹和晶间断裂, 且随着热冲击功率密度的增加, 材料开裂现象更为严重。而NC-WYT在0.22 GW/m<sup>2</sup>热负荷冲击后, 不但出现了许多微裂纹和裂纹网络, 且随着APD进一步增加至0.33 GW/m<sup>2</sup>, NC-WYT表面甚至出现了严重的熔化和剥离现象。这些结果表明, 聚变堆第一壁钨材料要获得良好的抗热冲击性能, 首先需确保其具有高热导率, 在此基础上提升其强度和韧性等。

#### C16-54 最终交流类型: 口头报告

##### Research on Corrosion Mechanism and Application in the Yingzhong Block of Qaidam Basin

Junlin Liu\*<sup>1</sup>

1. Oil & Gas Technology Research Institute of Qinghai Oilfield Company

The Yingzhong block in the Qaidam Basin belongs to a high-temperature, high-pressure, high-sulfur, high-mineralization region with H<sub>2</sub>S content up to 20,000 ppm, CO<sub>2</sub> content up to 20,000 ppm, and an average pH value of 6.5 in the formation water. The average chloride content is 153,785.5 ppm, and the average total mineralization is 2,987,079 ppm. Overall, the Yingzhong block wellbore produced fluid has strong corrosivity, and the corrosion mechanism is extremely complex. The selection of oil tubing lacks scientific basis. To address these issues, we conducted an assessment of corrosion damage and stress corrosion cracking sensitivity (SSC) of oil tubing in H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/high-mineralization formation water medium, an assessment of corrosion damage of oil tubing in high-temperature fresh acid, an assessment of corrosion damage of oil tubing in high-temperature spent acid, and a full-scale corrosion test of oil tubing in a typical H<sub>2</sub>S/CO<sub>2</sub>/high-mineralization formation water medium to study the corrosion grade and characteristics of the tubing material under different service conditions in the Yingzhong block and clarify the corrosion mechanism and law of oil well tubing in service environment. The experimental results show that in the fresh acid condition, as the acidizing temperature increases gradually, the average corrosion rate of the material increases and the corrosion worsens. In the spent acid condition, the temperature reaches 180°C, and N80, P110, C110, and P110SS are all severe corrosion or more severe corrosion. In the simulated formation water environment under two CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S partial pressure ratios, both H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub> promote corrosion. In the high-temperature corrosion system, temperature and H<sub>2</sub>S synergistically promote the aggravation of corrosion. As the temperature increased gradually, the average corrosion rate of the oil pipe material showed an increasing trend; with the increase of PH<sub>2</sub>S, the degree of corrosion increased, and H<sub>2</sub>S played the main control role in the corrosion system; the initial experimental assessment of the corrosion damage performance and stress corrosion cracking sensitivity of the completion fluid was carried out using a simulated saltwater completion fluid with a density of 1.23 g/cm<sup>3</sup> and a temperature of 180°C. P110, C110, and P110SS oil pipe materials were all severely corroded. In the geological environment of the Yingzhong block where the water temperature is  $\leq 120^\circ\text{C}$ , C110 and P110SS oil pipe materials are recommended to be used. In the geological environment where the water temperature is 180°C, BG2532 oil pipe material is recommended to be used. The selection standard is  $V_{\text{corr}} \leq 0.81 \text{ mm/a}$ .

#### C16-55 最终交流类型：口头报告

##### 用嵌入式光纤布拉格光栅量化水泥环第一界面抗拉胶结强度

程永钦\*、赵超杰、靳彦欣、王锐、林雨、夏晞冉

1.中国石化安全工程研究院有限公司

水泥环界面胶结强度是预测水泥环界面密封完整性失效的关键参数，随着当前油气勘探开发向深层、超深层迈进，传统的界面胶结强度测试方法已无法满足当前水泥环界面密封的需要。本研究设计了一种基于光纤布拉格光栅技术的水泥环界面胶结强度原位量化方法，通过理论计算验证了该方法的准确性。基于该新方法，对不同养护工况下的水泥环界面胶结力学性能展开了实验研究。实验结果表明：在量化期间内，试样的湿度变化不仅对水泥环界面的初始应力状态有着重要的影响也会影响水泥环界面的胶结性能，差值可达 17~100%，因此用传统测量方法可能会错误地估计水泥环界面的密封能力。此外，相较于增加养护时间，提高养护温度以及降低杨氏模量更有助于提高水泥环界面的胶结特性，对于现场使用的商业水泥浆体系，48h 的候凝时间足以保证水泥环界面的良好胶结。因此，研发抗高温且具有高强度低碳模力学特性的商业水泥浆体系是提高井下水泥环界面密封完整性能力的有效途径。

#### C16-56 最终交流类型：口头报告

##### 离子辐照 321 不锈钢在模拟压水堆一回路水中应力腐蚀开裂的研究

高俊宣、钟巍华\*、曹晗

1.中国原子能科学研究院

辐照促进应力腐蚀开裂 (IASCC) 是造成堆内构件材料老化乃至失效的重要原因，321 不锈钢 (S.S) 是重要的堆内构件材料，当前亟待研究掌握其 IASCC 行为机理，为核电站 (NPP) 的安全运行提供支撑。

相较于中子辐照，离子辐照具有周期短、成本低、无感生放射性等优势，且在特定辐照条件下可获得与中子辐照相似的微观信息，因此常用于模拟开展堆芯结构材料 IASCC 的行为与机制研究。本文采用 2.5 MeV Fe<sup>2+</sup>开展了 321 S.S 在 450 °C 下的辐照试验，针对辐照前后样品开展了模拟压水堆（PWR）一回路水环境中的慢应变速率拉伸（SSRT）试验，分析了 321 S.S 在不同剂量下的 IASCC 敏感性行为规律与机理。研究表明，IASCC 敏感性随辐照剂量的增加而单调增加，局部变形仍是 IASCC 的首要机制，氧化是 IASCC 的必要前驱步骤，辐照诱导 Ni-Si 团簇的聚集对 IASCC 具有关键性地促进作用。Si 氧化物溶解形成的多孔结构及裂尖氧化物前沿形成的 Fe-Ni 尖晶石在拉应力的作用下易开裂是 IASCC 晶间裂纹萌生的主要原因； $\gamma$  相的严重腐蚀与辐照诱导 Ni-Si 元素的聚集在拉应力作用下形成的点蚀坑是 IASCC 穿晶开裂的主要原因。针对重离子辐照，晶间裂纹由辐照区过渡到未辐照区的过程中伴随着氧化膜类型的转变。本文的研究结果揭示了离子辐照 321 不锈钢的潜在 IASCC 机制，为中子辐照 IASCC 机制研究提供了重要参考。