

中国材料大会 2025

暨新材料科研仪器与设备展

7月5-8日, 2025

福建 厦门

C16-极端服役环境下材料性能与评价

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



C16. 极端服役环境下材料性能与评价

分会主席：罗晋如、王立华、黄洪涛、陈开果、夏松钦

C16-01

基于极宽应变率统一晶体塑性模型的冲击-准等熵加载的介观尺度模拟

沈耀^{*1}、杨舒晴¹、叶常青¹、胡建波²、俞宇颖²、祝文军²、刘桂森¹

1. 上海交通大学

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理重点实验室

材料在宽广压力、温度和应变率条件下的强度特性与塑性变形机理研究对工程应用具有重要意义，然而现有本构模型多受限于特定应变率区间，难以满足复杂服役条件的分析需求。针对这一挑战，本研究建立了面向面心立方（FCC）晶体的跨尺度统一晶体塑性模型框架，通过创新性地整合位错运动的热激活与声子拖曳双机制、应力/应变率敏感的总位错密度演化模型，特别是基于位错链长度分布规律构建的可动位错占比模型，成功实现了从准静态到冲击加载的全应变率覆盖。此外，模型还考虑了晶界阻力、几何必需位错和背应力等多晶效应。

针对动态屈服行为对加载路径的敏感特性，研究重点对比了准等熵加载与冲击压缩两种典型高压路径。模型不仅展现了量化屈服强度、温度贡献等参数的路径依赖性的能力，还能可视化研究分析位错演化、晶界效应与局部温升的空间交互作用。具体而言，通过耦合非线性热弹性本构与晶体塑性模型的三维有限元框架，系统研究了热力学路径差异导致的宏-介观响应分化：模型准确捕捉到两种加载路径下屈服强度与温度演化的差异，即等熵加载的线性应变硬化、冲击加载先强化后弱化的非线性响应、以及冲击加载下的显著温升，与实验观测结果吻合。进一步揭示了两者温升演化差异的来源，对于等熵加载，温升主要源于弹性功；而冲击加载中温升主要来自于剧烈的黏性耗散。

材料冲击加载过程中的屈服行为与剪应力快速松弛紧密相关，本质上是应变率软化效应的体现。根据 Orowan 方程，塑性应变率的快速提升（进而导致材料屈服）源于可动位错密度和/或位错速度的增加。我们的模拟结果表明，在冲击加载特有的极端条件下（极高局部应变率、窄波剖面、显著温升），可动位错密度的显著升高是主导高压段屈服强度非线性下降的关键微观因素。这种可动位错密度的增加是多种微观机制协同作用的结果：首先，冲击波阵面处的极端条件极大提高了热激活位错均匀形核的概率。这种形核率与加载应变率呈正相关、与波剖面宽度呈负相关的特性，是冲击加载路径下屈服强度呈现先增后减非线性响应（区别于准等熵加载的线性硬化）的关键物理起源。其次，冲击加载路径的变化显著改变了位错增殖、滑移受阻等机制的相对强度及其与温升的耦合作用，也会导致可动位错密度的演化行为与等熵有所不同。另一方面，位错速度的变化（受声子拖曳效应强度、热激活过程影响）也深刻影响着剪应力松弛过程与宏观屈服行为。不同于静载下温升促进位错运动，冲击加载下温升引起的微观结构热振动加剧，倾向于降低位错滑移速度（尤其在声子拖曳主导的高应变率区），这不利于实现应变率软化。综合以上两方面的系统分析和数值模拟研究，冲击高压段观察到的屈服强度下降主要归因于可动位错密度的显著增加。

本研究构建的统一模型体系突破了传统本构的应变率局限，实现了从位错运动微观机制到宏观力学响应的跨尺度关联，既能准确预测 FCC 材料在极宽应变率范围内的力学行为，又可解析不同动高压加载路径下的微结构演化规律。研究成果为抗冲击材料设计、高效加工优化提供了理论支撑，同时为极端条件下材料动态行为的介观尺度数值模拟提供了可视化分析工具。

C16-02

ATF 燃料技术研究及其验证应用

周毅^{*}、陈平、张坤、高士鑫、何梁、尹春雨

中国核动力院

燃料组件作为反应堆的第一道安全屏障，运行时处于高温、高压、高流速、强辐照的环境下，其研发技术难度高、研制周期长，需要有完备的堆外验证和充分的辐照考验。同时，燃料组件作为反应堆的核心

部件，也直接决定了核电站的安全性、经济性。而现役的 $\text{UO}_2\text{-Zr}$ 燃料体系在压水堆中的进一步发展面临着寿期末包壳腐蚀吸氢接近限值、事故工况包壳高温脆化和锆水反应产氢风险等技术瓶颈，这制约了经济性和安全性的进一步提升，研发相比当前燃料体系服役性能和耐事故性能更好的 ATF 燃料成为了国内外核电燃料研发的热点。综合对比美国的西屋公司、法国的法马通以及国内的核动力院等研发机构的 ATF 燃料研发进展，通过先进成熟的商用燃料组件融合 ATF 技术，以实现经济性与安全性的兼顾成为了共同的研究路径。针对近中期研发预期的 Cr 涂层技术方面，核动力院已具备批量生产 Cr 涂层包壳管的能力，开展了详细、完整的涂层堆外性能评价，制备能力、抗腐蚀性能、高温氧化性能等均与国外先进的涂层技术相当，并在 2021 年实现了国内首次 ATF 特征化燃料组件入商用堆辐照并顺利出堆，通过多次池边检查验证了 Cr 涂层的优异性能，后续将加快 Cr 涂层先导组件的研制和堆内验证。在中远期技术方面，核动力院采用了内 CVI 复合材料层+外 CVD 涂层的双层 SiC 包壳结构，目前已经突破了 1.5m 长 SiC 复合包壳制备技术，掌握了焊接、腐蚀、热物性等重要的堆外性能，并通过研究堆考验获得了关键的辐照数据；在高铀密度燃料方面，掌握了 UN 燃料、 U_3Si_2 燃料、复合燃料芯块实验室规模制备技术，搭建了国内首套复合燃料制备平台，建立了高铀密度燃料系统全面的堆外性能检测方法，获得了典型芯块辐照后检查数据。为对标国际领先的核燃料技术发展趋势，核动力院通过自主商用燃料组件融合 ATF 技术，逐步实现自主化燃料在国内核燃料市场的推广应用。

C16-03

先进热防护复合材料超高温力学性能与原位表征技术

邓勇*、张超
西北工业大学

先进热防护材料是近年来航空航天、深空探测、载人登月等高新技术领域的重要研究方向，它们具备出色的耐高温、轻质高强和防隔热性能，能够适应极端的热环境和复杂的飞行条件。本文系统开展了陶瓷基和可陶瓷化树脂基复合材料在常温到 1500°C 环境下的高温力学性能研究，重点探究了高温预载荷和环境气氛对其高温强韧性能的影响，阐明了典型多场耦合服役环境下的失效机理及影响高温力学性能的关键因素。发展了原位高温测试技术，实现了内部结构与损伤扩展的实时监测。研究成果为先进热防护复合材料的高温性能评价、预测以及失效机理分析提供了有力的技术手段。

C16-04

高性能工业化 X 射线分光晶体研究

全琪*
北京工业大学

近年来，支持国产科学仪器与关键元器件技术攻关与产业应用的国家政策不断落地，国产 X 射线谱仪及其关键元器件技术持续创新、市场需求日益增长。X 射线弯晶在光通量、分辨率、检测速度上显著优于平晶，尤其适合痕量分析、快速检测、高精度结构解析场景。弯晶单色器聚焦性能强、灵敏度高、适配紧凑型谱仪设计，是高端 X 射线谱仪升级的关键。针对国内谱仪制造商多采用进口弯晶组装整机的现状，我们聚焦高端科仪市场，以高性能单色器替代设备原有部件，提升设备性能，助力国内制造商打造核心弯晶器件国产化的高端产品。

C16-05

高温高压下铀铌合金结构相变的原子尺度研究

郭芳宇，包南云，陈开果，戴佳钰

1. 国防科技大学理学院
2. 极端条件下物理及应用湖南省重点实验室

金属铀 (U) 及其合金作为核反应堆关键燃料材料, 在极端高温高压服役环境下的相变行为直接影响其结构稳定性和安全性能。然而, 铀的强 f 电子关联效应和显著的非谐晶格振动特性, 使得传统理论方法难以准确预测其高压高温相边界, 这一直是铀系材料研究的重大挑战。本研究针对这一难题, 开发了基于第一性原理计算的机器学习势分子动力学势函数模型, 实现了高精度、大规模的多尺度计算方法, 系统研究了铀在 0-100 GPa 压强范围内 α - γ 相变机制, 并定量揭示了非谐效应对相边界的调控作用。此外, 进一步结合热力学积分, 揭示了铀铌 (U-Nb) 化合物在 0-200 GPa 压强范围内的结构演化规律与稳定性机制。本研究建立了"电子结构-晶格动力学-宏观性能"的关联模型, 为极端服役环境下核材料的结构稳定性和性能评估提供了可靠的理论工具, 对核材料设计和安全评估具有重要指导意义。

C16-06

钨铜复合材料的层状构型设计与综合高性能化

韩铁龙*、侯超、宋晓艳

北京工业大学

钨铜复合材料在高压电触头、电子封装、武器装备等前沿领域得到了广泛应用, 科技发展对其力学-物理综合性能提出了更高的要求。近年来, 因在改善材料性能权衡方面的突出效果, 构型或异构设计的理念得到了持续关注。有限元模拟结果表明, 钨相的分布形式会显著影响钨铜复合材料中的应力应变配分和电流密度配分, 进而对其综合性能产生决定性影响。本报告将分别介绍连续层状钨铜复合材料、自组装非连续层状钨铜复合材料和异质层状钨铜复合材料的设计制备方法及其综合性能。结果表明, 层状构型更加有利于钨铜复合材料传导性能和钨相载荷配分能力的提高, 同时能够抑制裂纹的扩展, 但层厚较大时复合材料的力学性能提高有限, 结合液相球磨和化学镀等技术制备的自组装超细层状钨铜复合材料则能表现出协同提高的强度、塑性和传导性能。此外, 通过钨相的非均匀分布制备的异质层状钨铜复合材料表现出协同提高的电导耐磨性能。本研究将为钨铜复合材料乃至其他金属基复合材料的构型设计提供新的思路和见解。

C16-07

碳化硅材料的氦致辐照损伤

刘敏*、魏郁林、李淇淇

中山大学

SiC 具有耐高温、耐腐蚀、耐辐照、中子俘获截面小和氦渗透性低等优点, 是核反应堆中理想的候选结构材料。但中子辐照会造成离位损伤, 并产生嬗变产物 He。He 聚集形成氦泡, 会导致 SiC 发生肿胀、硬化等损伤。本报告系统研究了 SiC 的氦致辐照损伤, 并利用引入晶界、界面及元素 Mg 来抑制辐照损伤及氦泡的形成。

C16-08

Mo-42Re 合金离子辐照析出行为研究

黄洪涛*¹、陆柯龙¹、罗彬¹、刘丽婷¹、马海亮²、范平²、李可²、袁大庆²

1. 中山大学

2. 中国原子能科学研究院

Molybdenum-rhenium (Mo-Re) alloys are regarded as important candidate structural materials for nuclear reactors. Apart from the known χ phase, limited research has been conducted on other precipitate phases, particularly hcp-Re. In this study, the Mo-42Re (wt.%) alloy was irradiated using 20 MeV Ni⁺ ions at 853 K, reaching a maximum dose of 140 dpa. Five indirect evidences supported that there is a kind of phase different from the χ phase and that it is probable to be hcp-Re. Distinct radiation-induced precipitation (RIP) phenomenon

is observed, with the χ phase commonly appearing as a radiation-induced precipitate and two shapes of probable hcp-Re. The two shapes of hcp-Re are the needle-like hcp-Re formed during growth and the small, near-equiaxed hcp-Re formed during nucleation. Explaining the different shapes of hcp-Re from the perspectives of nucleation and growth may help clarify past debates on the existence and morphology of hcp-Re.

C16-09

极端环境材料的热物性测试研究

刘钟

林赛斯（上海）科学仪器有限公司

材料热物性分析在科学研究、工程应用和工业发展都有重要作用。在高温新材料研发、热管理设计、新能源材料开发等方面有广泛应用。本报告主要列举极端环境条件材料热物性分析的应用案例，包括深低温环境、辐射样品或放射环境、高温高压环境条件下材料的热分析测试案例。

C16-10

高强韧深低温用无镍多主元合金的微结构设计与其力学行为研究

何竹凤*、孙利芳、贾楠

东北大学

高强韧深低温用金属结构材料在航空航天、能源储存、极地科考以及低温超导等领域的关键承力部件中具有广泛而重要的应用。近年来，以面心立方（FCC）结构为主相的多主元合金被发现在室温至深低温的宽温域范围内均表现出优异的综合力学性能，极具开发潜力。然而，FCC 多主元合金普遍存在屈服强度较低的弊端而无法满足实际工程需求。为此，本文采用严重的 N 合金化、中等形变量冷轧和部分再结晶退火的热机械处理制备了具有多重异质结构特征的 Fe₄₉Mn₃₀Co₁₀Cr₁₀N₁ (at.%) 多主元合金。该合金在室温和 77 K 下的屈服强度分别达到 1170 MPa 和 1836 MPa，抗拉强度分别达到 1224 MPa 和 2048 MPa，均匀延伸率分别保持为 8.2%和 11.6%。室温下超高的屈服强度主要得益于在 FCC 基体中形成了密集的具有局部化学有序结构（LCO）的板条组织。这种具有显著强化作用的 LCO 板条是在冷轧过程中由间隙原子 N 驱动的局部化学序与位错滑移相互促进而形成，板条内部则由小于 1 nm 尺度的短程有序（SRO）结构、约 2 nm 尺度的中程有序（MRO）结构以及 FCC 晶格共同组成。该合金在 77 K 下屈服强度的提升则被归因于晶格摩擦力的提升以及在弹性阶段即已发生的相变诱发塑性（TRIP）效应和孪生诱发塑性（TWIP）效应。良好的韧性和加工硬化能力则被归因于 TRIP、TWIP 效应、LCO 板条的动态演化以及受 LCO 偏聚引起的位错交滑移。这些发现不仅揭示了 LCO 板条在深低温塑性变形过程中的演化及其对位错行为的影响，还将为开发无 Ni 深低温用超高强金属结构材料提供新的思路。

C16-11

纳米多层 FeAl/Al₂O₃ 涂层的阻氦性能与 TOF-SIMS 表征

陆柯龙¹、黄洪涛*¹、石倩²

1. 中山大学

2. 广东省科学院新材料研究所

FeAl/Al₂O₃ 是一种主流的核反应堆阻氦涂层候选材料。传统单层 FeAl 加上单层 Al₂O₃ 的阻氦涂层，存在辐照后阻氦性能显著下降的不足。将涂层多层化能提高抗辐照性能，但能否兼顾或提高涂层的阻氦性能，目前尚无研究结论。本研究基于气相氦渗透测试，证明纳米多层化能提高 FeAl/Al₂O₃ 涂层的阻氦性能，在调制周期 40nm-200nm 范围内，随着调制周期减小，涂层阻氦性能逐渐提升。低温沉积和高温沉积的纳米多层 FeAl/Al₂O₃ 涂层在 360°C和 450°C氦渗透测试条件下的性能相近，但在 550°C和 600°C氦渗透条件下，高温沉积涂层的阻氦性能更好。TEM 结果表明，低温沉积的试样在高温下晶化程度增加且晶粒长

大明显,致使涂层致密性下降,弱化了高温阻氙性能。本研究还讨论了飞行时间-二次离子质谱(TOF-SIMS)在表征纳米多层 FeAl/Al₂O₃ 涂层三维结构和氙、氢元素分布的应用前景。

C16-12

晶界属性变形行为的原位原子尺度研究

王立华¹, 张泽², 韩晓东¹

1 北京工业大学, 材料科学与工程学院

2 浙江大学, 材料科学与工程学院

如何在微观水平上表征和测量晶界现象是最基本的问题之一。在这里,我们将介绍我们团队开发的机械热电原位仪器,该仪器能够获得材料的原子尺度变形过程[1-4]。通过上述原位装置,我们能够在微观水平上,特别是在原子尺度上动态观测晶界的塑性机制。通过在原子层次上观测和测量晶界的塑性,我们发现大角度非对称倾斜晶界的滑移是通过晶界位错攀移和滑动实现[1]。这两种不同的晶界位错外在晶界处相互作用产生了位错锁。解锁和重新锁定过程导致晶界滑动。同时晶界滑移伴随着原子转移和扩散。对于晶界迁移机制,我们发现晶界迁移机制取决于晶界的类型[5-7]。一般(混合)晶界周围的晶粒通过晶界的位错行为(包括晶界位错爬升、滑动、解锁)以及晶界原子重新排列,自我调整位置共同协调晶粒转动,这种机制导致晶粒的旋转总是伴随着晶界迁移 [5-6]。当晶界是倾斜晶界的是和,它们的旋转几乎完全是通过晶界位错活动完成的[7]。我们发现,晶界位错的爬升、滑移和反作用往往导致 Lomer 位错的形成和破坏,这种晶界位错在晶界塑性中起着重要作用。

C16-13

Study on QPQ process and enhanced properties of high-quality steel for umbrella frames

Jiajie Li, Jingxian Chen, Bingshu Wang*

Fuzhou University

Low-carbon thin strip steel is widely used in umbrella manufacturing due to its excellent base properties and cost-effectiveness. However, its inherently low strength, poor corrosion resistance, and limited wear performance restrict the structural stability and service life of components. The Quench-Polish-Quench (QPQ) process has emerged as an effective method to overcome these limitations. In this study, a typical as-annealed Q195 thin strip steel (thicknesses: 1.2 mm and 0.8 mm) was selected to systematically investigate the effects of QPQ parameters on the microstructure and properties of the surface strengthened layer. The results reveal the formation of a multilayered composite structure after QPQ treatment. Despite comparable diffusion coefficients, thinner samples exhibited thicker nitriding layers due to shorter diffusion paths. Electron back-scatter diffraction (EBSD) analysis uncovered gradient variations in grain size, dislocation density, and texture along the nitriding direction, with finer grains observed in the nitriding layer compared to the diffusion zone. These structural differences became more pronounced under low-temperature or short-duration nitriding. Fracture behavior varied across the layers, transitioning from cleavage in the nitriding layer to quasi-cleavage in the middle zone, and mixed ductile-brittle modes in the core. Wear resistance improved markedly, dominated by adhesive wear. Notably, deep QPQ-treated samples exhibited enhanced corrosion resistance over conventional QPQ, attributed to the protective effect of corrosion product layers. Benefit from structural optimization, the 0.8 mm sample showed superior performance, with ultimate tensile strength reaching ~607 MPa (a ~276% increase) and self-corrosion current density reduced to 0.29 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ (a ~5414% improvement). This work highlights the potential of QPQ treatment for tailoring the high-quality thin strip steels, offering a promising approach for developing high-strength, corrosion- and wear-resistant steels for umbrella frame applications.

C16-14

镍基高温合金辐照损伤评估及氦泡演化机制研究

吕沙沙*

北京师范大学

第四代堆的运行参数都高于现今商业堆，高温往往伴随着高的中子剂量，导致结构材料中 dpa 及核反应气体产物(H、He)的浓度远高于现役反应堆情形，造成严重的辐照损伤问题。镍基合金与中子的(n,α)反应引入了氦原子，高温下氦在晶界处的积聚严重破坏材料的力学性能，威胁反应堆的安全运行。

对于镍基合金开展不同温度和剂量下 He/Ne 离子注入，分析氦泡的演化机制与力学性能变化，结合断裂力学分析得到不同服役温度的力学数据支撑。通过氦离子辐照模拟中子辐照在材料内部嬗变出的氦，开展了室温离子辐照、室温辐照后退火、高温辐照等系列研究。探究不同辐照能量和辐照剂量对镍基合金辐照后性能的影响。将从结构形貌、空位型缺陷、内部晶格畸变、纳米硬度及氦在高温下的脱附研究五个方面论述辐照对镍基 617 合金的影响。利用正电子湮没、透射电镜、热脱附表征辐照后样品内部缺陷的演化。结合 X 射线衍射和纳米压痕对材料辐照后的晶格畸变和硬度进行测试，评估氦离子辐照对材料力学性能的影响。

C16-15

高温纳米压入技术及在材料离子辐照研究中的应用

马海亮^{*1}、范平¹、张乔丽¹、李可¹、刘聪¹、杜爱兵¹、冯伟¹、任媛媛¹、佟振锋²、王灏洋¹、袁大庆¹

1. 中国原子能科学研究院

2. 华北电力大学

离子辐照是模拟高剂量中子辐照损伤的一种快速有效手段，离子辐照损伤仅有微米级的薄层区，纳米压入技术广泛应用于离子辐照样品的力学性能评价。由于材料力学性能与温度密切相关，且堆芯结构材料在高温下服役，高温力学性能是评价材料服役性能的重要参数。纳米压入仪器需要对 nN 的力和 nm 的位移进行测量，但高温下的热漂移限制了仪器精度，传统的金刚石压头在高温下会发生石墨化，也限制了使用温度，因此高温力学性能测试是材料抗辐照性能离子辐照研究中基础性的难题。经过多年发展，随着热漂移抑制技术和耐高温压头的发展，高温纳米压入装置逐渐成熟，商业化的纳米压痕仪已能开展最高 1000℃ 高温纳米压入测试。

基于电镜原位高温纳米压入力学测试装置，开展了高温力学性能的微尺度测试方法研究。建立了多周期纳米压入硬度测量技术，获得了快堆 12Cr 铁马钢和 ODS 钢的辐照硬化随测试温度的变化规律。建立了屈服强度平压头压入的直接压入测量方法，提出采用双线性函数拟合位移时间微分曲线获得屈服点的方法，并采用参考样验证了该方法，利用该方法获得了辐照对一批快堆铁马钢高温屈服强度的影响数据。高温力学性能微尺度压入测试方法的建立为结构材料的辐照效应评价提供了先进的技术手段，推动了国产先进核能系统材料的工程化开发进程。

C16-16

湿度条件下 CsPbBr₃ 生长及光学性能的原位 ESEM 研究

宋晶*

北京工业大学

全无机 CsPbBr₃ 钙钛矿因其优异的光电特性在光电领域展现出巨大潜力，但其长期结构稳定性仍是挑战。水分子对 CsPbBr₃ 的影响复杂，既可能导致分解和性能下降，也可能促进成核和改善性能。本研究旨在利用环境扫描电镜 (ESEM) 进行原位研究，揭示湿度对 CsPbBr₃ 钙钛矿生长和性能的影响机制，并定量分析电子束对材料辐照损伤的影响。本研究利用 ESEM-humidity-MMI-CL 探测系统、阴极荧光谱 (CL) 以及微操纵电学性能测试技术 (MMI) 在不同湿度环境下原位研究 CsPbBr₃ 钙钛矿的生长过程。深入理解了

湿度对 CsPbBr₃ 钙钛矿生长和性能的影响机制，并建立了电子束能量-作用区域-光学性能的定量关系。研究表明，水分子可以促进 CsPbBr₃ 钙钛矿的成核和生长，但过量的水分会导致材料分解和性能下降。此外，ESEM 电子束对 CsPbBr₃ 钙钛矿的辐照损伤会影响其结构和光学性能。本研究为 CsPbBr₃ 钙钛矿器件的设计和 optimization 提供了理论指导，并为其在湿度环境下的应用拓展了可能性。

C16-17

电子束作用下相对论返波管材料击穿损伤形成机制研究

谭弄潮*

国防科技大学

相对论返波管具有结构紧凑、高功率、高效率等优点，是一类极具应用潜力的高功率微波产生器件。当相对论返波管向更高功率和更大脉冲能量发展时，器件内部发生强电磁场真空击穿的风险将急剧升高。强电磁场真空击穿引发的大量非预期等离子体扩散进入束波相互作用区域，导致模式竞争、脉冲缩短甚至微波截止，严重影响器件的物理性能和使用寿命。本文开展了电子束打靶实验和某型相对论返波管高功率微波产生实验，揭示了电子束作用下相对论返波管材料击穿损伤形成机制。首先开展了电子束打靶实验，实验结果表明：相同电流下低能电子较高能电子更易导致材料烧蚀；高能电子的轰击倾向于使材料产生范围较小、深度较深的单点坑状形貌，低能电子则更容易使材料产生范围较大、深度较浅的皱褶波纹状破坏痕迹。而后，比较了相对论返波管击穿损伤和电子束打靶痕迹，提出了高频结构金属材料在低能电子轰击下皱褶波纹、“火山口”蚀坑和飞溅液滴的形成机制，揭示了强引导磁场下相对论返波管击穿损伤源自 100 keV 级以下能量电子的轰击。

C16-18

离子辐照模式对纯铁辐照微结构演化的影响：扫描束及其频率与散焦束

李绅^{1,2}、曹子奇^{1,2}、钟庆鸿^{1,2}、黄金池^{1,2}、冉广*^{1,2,3}

1. 厦门大学能源学院

2. 福建省核能工程技术研究中心

3. 厦门大学材料学院

离子辐照作为模拟中子辐照的高效方法，具有实验参数可控，所需时间短以及无放射性等优点。但是离子辐照具有扫描束和聚焦束两种辐照模式，从已有结果可以得知，两种模式引起的辐照微结构演化及特征具有差异。然而，对于造成这种差异的物理机制未得到系统解决，深入理解束流模式效应对于更好采用离子技术模拟中子辐照具有重要意义。本研究在 723K 下对纯铁进行了 30 keV 氢离子原位辐照，对比研究了扫描束及其不同频率与散焦束在铁中产生辐照微结构的差异及机制。发现了扫描束会导致位错环的尺寸增大和密度降低，并且这一影响会随着扫描频率的提高而提高。这归因于扫描束模式中存在周期性的无辐照间隙，在此阶段中辐照缺陷处于无级联碰撞的退火回复中，导致位错环数量的下降与位错环对点缺陷捕获长大。然而，这一“扫描束效应”的效果将会在频率上升超过某一阈值后而受到抑制。这是因为无辐照时间作为退火阶段的角色随着频率的进一步上升逐渐遭到抑制，缺陷的迁移、位错环的生长以及缺陷的回复在无碰撞级联窗口中行为降低。研究结果对于理解离子束不同辐照模式下的辐照缺陷演化行为提供了实验数据和理论参考。

C16-19

SiC-TRISO 复合燃料热导率及元素扩散行为的研究

王晓姣¹、朱丽兵²、尤堯²、王群¹、范武刚¹、张兆泉*¹

1. 中国科学院上海硅酸盐研究所

2. 上海核工程研究设计院股份有限公司

SiC-TRISO (Tri-structural Isotropic) 复合燃料被广泛应用于高温气冷堆, TRISO 颗粒的包裹层具有保护内核和屏障裂变产物的作用, 但是, 碳化硅基体中的烧结助剂会与 TRISO 包裹层发生不同程度的反应, 致使包裹层被破坏。研究碳化硅基 TRISO 复合燃料热导率及复合燃料中元素扩散行为对于开发高装载量、高热导率的 SiC-TRISO 复合燃料具有重要意义, 同时可以有效预测反应堆的安全性。

文章通过研究不同温度下 SiC 相转变、热导率、微观结构、元素扩散的关系, 选择热导率最高的温度, 热压烧结制备出 SiC-TRISO 复合燃料, 并测试计算得出其热导率。采用 X 射线衍射仪 (X-Ray Diffraction, XRD)、扫描电镜 (Scanning Electron Microscopy, SEM) 对 SiC 和 SiC-TRISO 复合燃料的物相、形貌和微观结构进行表征, 结合 EDS 统计了碳化硅晶粒内部各个元素的含量。结果表明, 随着烧结温度的增加, 基体中 β -SiC 相向 α -SiC 转变速度加快, 且 Al、Y、Ca 在碳化硅晶粒内部的含量也随之降低; 碳化硅 1750°C 烧结后其热导率最高, 其室温和 500°C 的热导率分别为 75.51 W/(m·K) 和 43.36 W/(m·K)。TRISO 的加入使得 SiC-TRISO 复合燃料的热导率降低, 其室温和 500°C 的热导率分别为 57.96 W/(m·K) 和 34.51 W/(m·K)。这是因为, TRISO 最外侧的碳层与碳化硅基体和液相发生反应, 加速了 $3C-SiC \rightarrow 6H-SiC \rightarrow 4H-SiC$ 的转变进程, 促进了 Al、Y、Ca 在碳化硅晶粒内部的扩散和挥发, 增大了晶粒尺寸, 同时造成了游离碳含量的增加, 降低了复合燃料的热导率。

C16-20

重离子辐照预拉伸应力单晶铜微结构和压缩性能的变化规律与机理

叶想平*、王静、李英华、叶素华、吴凤超

中国工程物理研究院流体物理研究所

辐照导致金属材料性能退化的规律与机理研究一直是核能安全领域十分关注的问题。本研究采用 <100> 单晶铜为研究材料, 自主设计低温预拉伸应力装置, 结合近物所重离子加速器制备了 3 种预拉伸应力和 3 种辐照剂量的单晶铜样品。采用 SEM 原位压缩实验技术获取了单晶铜微柱样品沿预应力方向的压缩性能随辐照剂量和预拉伸应力的变化规律, 单晶铜依旧表现出典型的辐照硬化效应, 但预拉伸应力能够延缓辐照硬化。采用 TEM 分析了预拉伸应力和辐照剂量对单晶铜内部辐照缺陷尺寸、数密度和取向性分布的影响规律, 结果表明位错环是辐照单晶铜内部主要的缺陷类型; 辐照剂量增加位错环数密度和尺寸, 预拉伸应力增加其数密度; 且位错环外法向倾向于沿预拉伸应力方向择优取向性排布, 这也是预拉伸应力延缓辐照硬化的主要原因。

C16-21

激光粉末床熔融 Al-Mn 基合金显微组织及力学性能研究

李丹、宋森、周科朝、陈超*

中南大学

本研究系统探讨了 Mg 含量 (1.5-3.5 wt.%) 对激光粉末床熔融 (LPBF) 制备的 AlMnScZr 合金在室温及高温条件下的组织演化与力学性能的影响。结果表明, 在打印态合金中, Mg 主要以固溶原子的形式存在于合金中, 添加 Mg 元素的 AlMnScZr 合金晶粒呈现双峰结构, 由交替分布的熔道边界等轴晶 (581.3 nm) 和熔道内部柱状晶 (宽 3.8 μ m) 构成。Mg 通过降低 Mn 的固溶度, 将初生 Al₆Mn 颗粒的体积分数由 7.2% 提升至 13.8%, 但 Al₆Mn 颗粒的直径由 54.0 nm 增加至 114.6 nm。合金高温时效后引入了高密度的次生 Al₆Mn 和 Al₃Sc 纳米粒子。Mg 的固溶强化作用和晶粒细化效果, 叠加双纳米粒子的第二相强化作用显著提升了合金的强度, 添加 3.5 wt.%Mg 的合金的室温屈服强度和抗拉强度分别提升至 528 MPa 和 626 MPa。但 Mg 降低 Mn 在铝基体中的扩散势垒, 加速了 Al₆Mn 粒子的粗化, 添加 3.5 wt.%Mg 的合金在 300°C 时屈服强度仅为 108 MPa。

C16-22

核用锆合金辐照硬化行为的实验表征与理论分析

夏梁*, 陈一恒、王宇钢、王晨旭、薛建明

北京大学

锆 (Zr) 合金以其良好的力学性能、优异的耐腐蚀和耐辐照性能以及与核燃料良好的兼容性, 已成为现代核工业中重要的结构材料。在服役过程中, 锆合金会受到强烈的机械应力影响并承受剧烈的辐照, 其辐照硬化行为会严重退化材料的性能, 限制其结构可靠性和使用寿命。虽然现有的工作已针对 Zr 合金的硬化行为开展了一系列研究, 但目前该领域仍存在部分尚未解决的关键问题。为此, 本工作对两种核级 Zr 合金 Zr-1.5Sn-0.2Fe-0.1Cr 和 Zr-1.0Sn-1.0Nb-0.1Fe 在 6 MeV Au³⁺ 离子辐照下的微观结构演化和辐照硬化效应进行了研究。通过 SEM-EBSD 对两种 Zr 合金样品的晶粒形貌和尺寸分布进行了表征, 并通过 TEM 对其微观结构进行了观察。利用纳米压痕实验获得了不同辐照剂量下的硬度-深度关系, 结果表明受离子辐照的 Zr 合金会出现明显的辐照硬化行为。随后, 建立了相关的力学模型来分析受离子辐照 Zr 合金的硬度-深度关系, 模型中涵盖了辐照缺陷、位错网络、SPPs、晶界、固溶体和晶格摩擦对体硬度的贡献, 并进一步考虑了辐照层与未辐照基体中塑性区域的不同扩展速率对 Zr 合金硬度-深度关系的影响。分析结果表明, 合金元素的添加会促进基体中 SPPs 的形成, 且 SPPs 在离子辐照条件下的非晶化转变程度与其中的元素种类和所受的辐照剂量密切相关。同时, 受离子辐照的 Zr 合金中存在着显著的辐照硬化行为, 这主要源于不均匀分布的辐照缺陷对硬度的贡献。当压入深度较浅时, Zr 合金中的硬化主要源于辐照缺陷、几何必须位错的贡献, 直至压入深度较大时, Zr 合金中的硬化主要源于统计存储位错的贡献。

C16-23

超大回弹弯曲应变及其在镍纳米线中的原子机制

赵玉峰¹, 王占鑫¹, 杨成鹏², 王立华¹, 韩晓东³

1. 北京工业大学固体微结构与性能北京市重点实验室
2. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所
3. 南方科技大学材料科学与工程系

回弹是弯曲金属在释放应力/应变后趣味性的力学现象之一。以往大多数研究仅探究了金属在小弯曲角度下的回弹行为, 对于大弯曲角度下的研究则鲜有涉及。在此项研究中, 我们通过原位实验和分子动力学 (MD) 模拟, 对孪晶结构镍纳米线 (NWs) 在多种弯曲角度下的回弹行为展开了深入探究。结果表明, 孪晶结构镍纳米线的回弹角度与变形模式可划分为三个阶段, 这一发现此前甚少被报道。研究结果揭示, 随着最大弯曲角度的增加, 镍纳米线的塑性变形机制经历了从平行于孪晶界 (TBs) 的部分位错, 到多个滑移系统上的扩展位错和全位错, 再到晶界 (GB) 生成的转变过程。与之前认为变形诱导产生的位错和晶界不可逆的观点不同, 我们的研究表明这些缺陷在卸载时是可逆的。这些变形诱导缺陷的不同可恢复能力, 导致了依赖于弯曲角度的回弹现象。

C16-24

极端环境下工程材料应用选型与评估需求

钟卫洲*

中国工程物理研究院总体工程研究所

报告基于工程材料服役过程中潜在极端环境条件, 提出工程材料选取过程中涉及的性能匹配、性能稳定、加工便利和经济节约的基本选用原则, 简要介绍高比强度、高比吸能、耐高温、耐辐照、隔热防火等功能性材料研究进展, 梳理极端环境下材料性能测试评估的基本需求, 探讨高适配先进材料未来发展方向。

C16-25

镍基高温合金微结构相粗化及相应力学性能变化研究

李继承

中国工程物理研究院总体工程研究所

镍基高温合金广泛应用于军事和航空航天领域中的热端部件,在服役过程中其沉淀相容易发生粗化并导致合金力学性能劣化。本工作通过试验研究、材料微结构检测、数值模拟和理论分析相结合,系统深入地研究镍基高温合金相粗化行为对材料力学性能的影响机制。首先利用 SEM、XRD 等表征手段深入分析不同相粗化程度合金微结构特征演化规律,并针对不同微结构特征镍基单晶高温合金,系统开展了静态拉压试验,重点考察微结构特征与加载条件对材料力学行为的影响;同时,基于实际材料微观结构,构建了细观有限元模型,并结合包含损伤演化的弹塑性本构模型,对不同微结构合金力学性能进行了数值模拟,研究了沉淀颗粒体积分数、几何特征及分布对材料变形与破坏行为的影响机理。模拟结果表明,沉淀相粗化会显著降低材料强度,但在一定程度上提高其延性;沉淀颗粒的增加虽然强化了材料,但也增加了脆性断裂的风险。相关工作可为镍基高温合金材料的服役性能评估和结构设计等奠定了良好基础。

C16-26

多机制扩散下的微孔洞形貌演化与失稳研究

赵彭阳*

上海交通大学

理解极端环境(如高温、辐照)下微纳米尺度孔洞的生长机制,对预测金属材料的失效行为至关重要。在当前研究中,我们创新性的发展了一个耦合表面扩散,体扩散以及非均匀应力场的微观力学模型,用于研究微孔洞的生长、连通以及形貌演化行为。首先,通过对比经典的孔洞生长解析解,验证了新模型的可靠性与精确性。再通过模拟研究揭示了表面扩散和体扩散在控制孔洞形貌转变与失稳中的竞争机制:表面扩散倾向于维持孔洞的规则形貌(圆形或椭圆形),而体扩散在非均匀应力场中会促进孔洞的各向异性生长并导致不规则形貌。随着孔洞长大,表面扩散的影响会进一步下降,促使孔洞发展出极端不规则形貌。研究还发现,多机制扩散的竞争能深入影响孔洞连通行为:当孔洞间不存在空位源且仅存在体扩散时,孔洞边界对空位的屏蔽效应导致孔洞间难以发生连通;反之,表面扩散的存在能显著促进孔洞连通,且连通速率随表面扩散系数的增大而加快。最后,当表面扩散的影响远小于体扩散时,孔洞的生长是不稳定的,即使非常微小的表面扰动也会导致微裂纹形核。以上模拟预测与现已有的实验观测高度一致。该研究工作不仅揭示了微观孔洞的扩散控制生长机制,同时为极端环境服役下金属材料损伤的早期诊断提供了重要的理论基础。

C16-27

核用增材制造不锈钢高温氦致损伤行为研究

李健健*

中国科学院上海应用物理研究所

增材制造由于一体化成型、适应复杂结构设计等优势,非常契合未来核能构件智能制造的趋势。不锈钢广泛应用在商业压水堆之中,而且也是第四代裂变堆及聚变堆等先进核能系统的重要候选结构材料之一。因此,本文瞄准增材制造材料在先进核能系统中应用的研究前沿,选择反应堆常用不锈钢(316 和 304 不锈钢)为研究对象,利用选区激光熔化技术(SLM)对其进行加工,通过离子辐照技术并结合测试表征方法,开展 SLM 成型不锈钢高温氦致损伤行为及其机制研究,重点探索 3D 打印材料特殊本征结构-辐照缺陷-力学性能的关联性。

在 700 °C 氦离子辐照实验下开展的有关高温氦致硬化脆化研究中发现,SLM 和传统制造(TM) 316L 不锈钢的辐照硬化程度都随着离子剂量的增加而增大,但 SLM 316L 展现出优异的抗高温氦致硬化能力:

当 TM 316L 硬化程度为 32%-75% 时, SLM 316L 仅为 6%-47%, 并且 TM 316L 在 5×10^{16} ions/cm² 剂量下就呈现了硬化饱和的现象, 而 SLM 316L 直到最高剂量 1×10^{17} ions/cm² 都没有明显的硬化饱和。对两种不锈钢的辐照缺陷观察中发现, TM 316L 中明显存在更高密度氦泡 ($7.06 \times 10^{23}/\text{m}^3$), 远大于 SLM 316L 中 ($3.33 \times 10^{23}/\text{m}^3$), 而通过 DBH (Dispersed Barrie Hardening, DBH) 模型衡量了辐照缺陷对硬化的贡献能够证实, SLM 316L 中存在大量的纠缠位错网络壁和晶界等特殊本征结构对氦具有抑制作用, 明显降低了体系内氦泡的密度, 这是 SLM 316L 具有更好的抗高温氦致硬化能力的微观解释。在 350-900 °C 温度区间内, 进一步开展的有关于 SLM 316L 中氦泡演化机制等研究中发现: 低温阶段 (350-550 °C), 氦泡的演化可能受制于氦原子的空位扩散机制; 而高温阶段 (700-900 °C), 氦泡整体迁移合并机制的激活, 将会影响氦原子受置换机制调控的迁移行为。而特殊本征结构对氦泡演化影响的差异在温度升高的过程中得以被证实: 700-900 °C 的高温下, 位错结构附近存在明显的氦泡非均相形核现象; 而只有在 900 °C 时, 氦泡的聚集行为才在氧化物-基体界面处被发现; 而晶界对氦泡的影响在单独开展的薄片样品氦离子辐照 (150-450 °C) 下被能够被观察到; 另外针对 350-900 °C 温度段 SLM 316L 中氦致肿胀的分析发现, SLM 316L 中存在比 TM 316L 更低的肿胀程度。上述结果表明了 SLM 316L 不锈钢中特殊本征结构对辐照缺陷的演化具有显著影响, 能够显著降低氦泡对材料性能的影响。

C16-28

YBCO 超导材料的微观力学行为研究

张志伟*、张瑞、张兴义

兰州大学

YBCO 超导材料属于氧化物陶瓷, 实用化的 YBCO 主要是多晶结构, 大量的晶界存在一方面显著降低了临界电流密度, 另一方面作为位错源直接决定了变形特征, 进而影响了超导材料的安全应用。目前实验上使用电镜表征其微观结构以及纳米压痕测量其杨氏模量等手段均无法考虑晶界微结构的演化及其对力学性能的影响规律。本研究采用分子动力学模拟探究了 YBCO 超导材料中晶界对其力学性能的影响及相应的变形机理。结果表明 YBCO 存在显著的拉压不对称特性, 对拉伸而言, 孪晶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。究其变形机理可知, 单晶模型拉伸过程中堆垛层错的堆积使得产生贯穿滑移带, 孪晶模型则发生退孪晶后沿孪晶面的断裂, 而位错核的扩展和特征结构单元的变形分别是小角和大角晶界模型断裂的主要变形机制。在压缩破坏的过程中, 单晶模型中产生大量离散分布的堆垛层错造成破坏, 孪晶则主要沿厚度方向发生 45° 的剪切破坏, 而晶界模型首先从 B 型特征结构单元形核位错, 并拖曳着堆垛层错, 层错扩展形成滑移带并导致发生晶界迁移现象。相关研究结果对揭示 YBCO 超导材料的变形机制及调控其力学行为具有一定的理论指导意义。

C16-29

高温极端环境下材料性能评价新技术

年肖月*

天津中环电炉股份有限公司

在高温环境下的材料和构件性能测试技术, 包括表面与界面性能、整体性能、局部性能、静态和动态等对于服役构件的可靠性和耐久性至关重要, 但同时又是国内外测试领域的难点。而当前的直接测试方法很难达到极端高温测试条件, 且往往在超过一定温度段时, 测试系统的相关性能测试精度等都大幅下降, 同时, 温度过高可能导致测试系统使用寿命大大降低, 甚至破坏夹具等关键部件。为了实现高温极端环境材料的物理性能评价表征, 我们提出一种间接测试的相对法技术, 通过可视化高分辨摄像试验机解决高温受力-变形和高温裂纹张开的精密监测, 主要解决常规方法难以解决的各种性能检测难题, 对于材料的烧结变形、蠕变、陶瓷涂层热应力分析、高温硬度、高温能量耗散等高温性能分析和直观了解具有重要实用价值。

C16-30

基于机器学习的锆中 bcc/hcp 结构相变势函数开发

王波、付宝勤*、侯氢、崔节超、李敏

四川大学

针对核用锆合金在极端工况下因结构相变引发的性能退化问题，本研究基于深度神经网络构建了高精度机器学习势函数（MLP），系统揭示了金属锆中温度驱动 bcc/hcp 相变的原子机制。通过第一性原理计算数据训练获得的深度势能模型，精确表征了 α /hcp、 β /bcc、 γ /fcc 及 ω 四种相的相对稳定性，其预测的平衡晶格常数和弹性模量与 DFT 计算结果偏差小于 10%。声子谱分析发现 β 相存在虚频特征，揭示了其向 α 和 ω 相转变的结构失稳机制。基于热力学积分法计算的 Gibbs 自由能表明， $\beta \rightarrow \alpha$ 相变临界温度预测值为 1167 K，与实验值（1136 K）吻合良好。本研究开发的 MLP 模型成功实现了从量子力学到介观尺度的跨尺度模拟，为核用锆合金的多尺度设计提供了理论基础。

C16-31

(Al7.5Co21.9Cr10.9Ti5.0Fe21.9Ni32.8)100-xCu_x 高熵合金 800°C 氧化行为研究

王泽民*、刘昕洋、田怡童、王海龙

上海应用技术大学 材料技术学部

本课题组设计并制备了 FCC+L12 相组成的一系列 (Al7.5Co21.9Cr10.9Ti5.0Fe21.9Ni32.8)_{100-x}Cu_x ($x=0.5, 2.5, 5.0$) 高熵合金具有优异的力学性能。本文对该系列铸态高熵合金在 800°C 下空气中氧化最长时间至 100h，计算氧化增重及动力学，利用 XRD, SEM 以及 EDS 研究氧化膜结构，表面及截面形貌和元素分布，综合分析该合金的氧化行为，同时探讨 Cu 含量对其抗氧化性的影响。结果表明：铸态高熵合金显微组织为树枝晶结构，Cu 可通过粗化枝晶组织为氧提供扩散通道，降低合金界面氧浓度以及改变尖晶石氧化物结构，改变铸态高熵合金抗氧化性能。树枝晶组织合金元素分布不均匀导致氧化产物类型和分布存在差异。从截面元素分布来看，氧化膜中元素出现分层现象。外层以 Fe 和 Co 为主，内层以 Ti、Cr 和 Al 为主，内部氧化区以 Al 为主。随着 Cu 含量增加，合金的抗氧化性能先升高再下降。

C16-32

自主锆合金关键服役行为机理模型研究进展

邱玺*、孙志鹏、李垣明

中国核动力研究设计院

核燃料元件包壳是反应堆的第一道安全屏障，承载着包容裂变产物，导出热量的重要功能，是反应堆最核心的结构部件。锆合金由于其优异的力学性能，良好的耐腐蚀性能以及低中子吸收截面特性，是目前主流压水反应堆核燃料元件包壳材料。准确预测核燃料元件在反应堆高温、高流速、强辐照及复杂应力状态下的行为，是目前核燃料元件设计研发的重点，而包壳锆合金材料的关键服役行为模型则是其中的关键。本文介绍了团队基于商用堆辐照考验数据及材料多尺度模拟技术，针对中国核动力研究设计院自主研发的 N36 锆合金，在服役工况下塑性、蠕变及腐蚀等关键性能的机理性分析模型的研究进展，并对后续的研究方向及工程应用思路进行了展望。

C16-33

激光粉末床熔融 316L 不锈钢氢致软化和脆化研究

李世豪*¹、赵亚凯²、Upadrasta Ramamurty^{2,3}

1. 郑州大学材料科学与工程学院

2. 新加坡科技局

3. 南洋理工大学机械与航空工程学院

氢脆广泛存在于金属材料中, 表现为氢引起的显著塑性和断裂韧性下降。为探究氢对增材制造金属材料力学性能的影响, 本研究以激光粉末床熔融 316L 不锈钢 (LPBF316L) 为研究对象, 采用块体拉伸、纳米压入和微柱压缩等实验手段分别对充氢前后试样进行力学性能测试。微观结构表征发现充氢对 LPBF316L 晶粒、相组成和位错密度几乎没有影响。然而, 充氢会导致 LPBF316L 中位错网出现解钉扎现象。力学测试结果表明, 充氢导致 LPBF316L 屈服强度和硬度轻微降低, 表现出氢致软化现象。这一氢致软化现象是氢致弹性应力屏蔽效应导致位错之间的交互作用力下降引起的。氢致弹性应力屏蔽和氢致平面滑移导致氢沿滑移带和孪晶富集, 进而引起氢致局部塑性和裂纹的萌生, 导致 LPBF316L 中氢脆现象。

C16-34

耐铅铋腐蚀涂层研制及其运行限值研究

周明扬^{*1}、邱玺¹、龙子尧¹、周毅¹、杨吉军²、张伟²

1. 中国核动力研究设计院

2. 四川大学

铅铋共晶 (LBE) 因其良好的物理性能和低化学活性, 成为加速器驱动次临界系统 (ADS) 和铅基快堆 (LFR) 冷却剂的优选材料, 但高温下 LBE 对结构材料的腐蚀十分严重, 影响燃料包壳等薄壁件在服役过程中保持结构完整性, 而涂层技术能有效结合涂层材料的耐 LBE 腐蚀和基体材料的高成熟度优势, 是目前解决包壳材料 LBE 腐蚀问题方案中技术成熟度最高、工程应用潜力最大的包壳技术方案。本报告从铅铋快堆需求出发, 制定了耐铅铋腐蚀涂层材料及其制备方法选择原则, 结合大量文献调研、热力学计算及相图计算, 完成了耐铅铋腐蚀涂层成分设计, 然后采用磁控溅射方法完成了涂层制备, 并从微观组织、力学性能、高温液态铅铋腐蚀以及离子辐照-腐蚀耦合等四个方面系统研究了影响涂层服役的关键性能, 结果表明, 涂层表现出优异的耐高温铅铋腐蚀能力, 相比于 F/M 钢基体, 腐蚀速率降低超过一个数量级, 同时在辐照-腐蚀耦合条件下表现出良好的稳定性, 为后续耐铅铋腐蚀涂层包壳的研制奠定了良好的基础。

C16-35

亚稳高熵合金强韧化调控研究

李方杰¹、刘敏^{*2}、沈琴¹

1. 上海工程技术大学

2. 上海应用技术大学

强韧化是金属结构材料永恒的课题。面心立方结构 (FCC) 高熵合金因优异的低温韧性, 成为在低温环境应用极具潜力的候选材料, 但是其较低的强度成为工程应用的瓶颈。为了充分发挥相变诱导塑性 (TRIP) 效应对合金强韧化的作用, 本项目拟基于热力学和第一性原理计算设计富 Fe 亚稳高熵合金, 明确“成分—层错能—相变路径及程度”之间的依赖关系; 然后通过解耦应变速率与绝热温升对马氏体相变的独立作用, 研究应变速率与温度对马氏体相变路径和相变动力学的影响规律, 并通过理论计算温度对层错能的影响, 建立马氏体相变预测模型; 最后基于温度补偿的原则, 通过感应加热动态调控合金的层错能, 有序激发位错滑移、形变诱导孪生 (TWIP) 和 TRIP 等多重塑性变形机制, 量化它们对强化的贡献, 并揭示它们对强韧化的协同机理, 构建亚稳高熵合金的强韧化调控准则。本研究对丰富高熵合金的强韧化机理, 促进高熵合金在极端环境工程装备中的应用具有重要意义。

C16-36

高温多轴变幅载荷下疲劳-蠕变寿命预测方法

王晓玮^{*}

上海工程技术大学

多轴疲劳-蠕变交互作用是高温环境下工程部件 (如航空发动机叶片、核电站管道及化工设备等) 失

效的主要原因之一，其寿命预测对结构安全性和可靠性至关重要。本文提出了一种基于临界面的多轴疲劳-蠕变寿命预测模型。通过分析拉伸载荷和压缩载荷对蠕变持久寿命的影响，拉伸载荷保持会明显降低蠕变-疲劳寿命，而压缩载荷对蠕变-疲劳寿命的影响很小，基于时间-温度参数法，提出一种多轴蠕变损伤模型来计算高温下的多轴蠕变损伤。通过采用基于应变的多轴疲劳损伤模型，综合考虑了非比例加载路径、蠕变应变累积及疲劳损伤演化的耦合效应，提出了一种多轴蠕变-疲劳模型来计算高温下的疲劳寿命。为验证模型有效性，利用 GH4169 多轴疲劳-蠕变试验，对比了不同载荷路径及相位差条件下的寿命预测结果。结果表明，在多轴恒幅和变幅载荷条件下，该模型均有较好的预测效果。

C16-37

γ 辐照条件下冷却剂辐照分解对结构材料 ECP 的影响规律

闫奥、张鹏、曹晗*、邢国真、钟巍华

中国原子能科学研究院

在反应堆运行期间，压水堆一回路冷却剂系统的水暴露于强 γ 辐照条件下会发生辐射分解，产生一系列活性自由基和分子产物，这些强氧化性产物不仅对其他水化学行为、反应堆结构材料和燃料包壳材料的腐蚀有显著影响，还会影响堆内反应性控制及辐射场强度。因此，水的辐射分解成为评估反应堆老化与保障安全运行的关键因素。本工作采用开路电位监测、电化学阻抗谱、动电位极化曲线测量和 SEM 分析方法，研究 316Ti 奥氏体不锈钢在不同伽马辐照剂量下不同浓度含氢水环境中(硼锂调节 $\text{pH}_{@25^\circ\text{C}}=7.2$)的电化学性能。试验结果表明：在低剂量条件下（1kGy），氢气浓度对于腐蚀电位与腐蚀电流的影响较小，氢气浓度由 8ppm 上升到 80ppm，腐蚀电流仅减小了不到 2E-7A，在高剂量条件下（30kGy），氢气对于腐蚀的抑制作用较强，氢气浓度由 8ppm 上升到 80ppm，腐蚀电流减小了约 2.5E-6A。但在更高的剂量条件(50kGy)下，溶解氢浓度的升高会导致腐蚀电流的增加，结合液相色谱仪、电化学阻抗谱和扫描电镜结果可以得到，氢气的存在确实对于水的电化学腐蚀有抑制作用，但超量溶解氢的存在会使腐蚀电流有所提高。而且氢气的加入会使水辐解产生的过氧化氢浓度，由 10^{-6} 下降到 10^{-5} 数量级。但在氢气浓度大于 8ppm 时，氢气浓度的变化对过氧化氢含量的影响不大。

C16-38

熔盐堆用镍基高温合金微结构与服役性能的关系研究

刘程鹏*、叶祥熙、黄鹤飞

中国科学院上海应用物理研究所

GH3535 合金由于长期服役过程中抗辐照性能的恶化，无法满足新一代熔盐堆对关键结构材料的更高要求。研究表明添加 Nb 元素能够提高合金的抗辐照性能。然而，截止到目前，GH3535-Nb 合金微结构与服役性能的关系尚未完全建立，Nb 元素作用的微观机制尚未完全明确。

本研究通过对比 GH3535 合金和 GH3535-Nb 合金，系统揭示合金微观结构特征与关键服役性能（力学性能及抗辐照性能）之间的内在关联。阐明 Nb 在改善材料性能中的具体作用，为新一代熔盐堆用先进材料的设计提供科学依据。本工作综合运用了先进电子显微学技术，对合金的微结构演变、力学性能及抗辐照损伤行为进行了深入分析。结果表明，Nb 元素的引入影响了合金的微观结构，与 Mo 协同调控了碳化物的析出类型与分布，并有效细化了晶粒。这些微结构特征直接关联到服役性能的改善：一方面，通过细晶强化、固溶强化及促进形变过程中纳米孪晶的形成，提升了合金的强度；另一方面，固溶 Nb 原子通过捕获空位、降低 He 扩散速率等机制，有效抑制了 He 泡的形核与粗化，从而显著增强了合金的抗辐照损伤能力。此外，原位 TEM 实验为 Nb 促进纳米孪晶的形成以及 He 泡在应力作用下形变、合并和长大的复杂机制提供了直接的动态观察证据。这些发现为优化熔盐堆用 GH3535 合金的成分设计与性能调控提供了理论依据。

C16-39

Cf-SiC/ZrB₂ 的 He 辐照损伤协同抵抗机制：界面与相重组的关键作用

魏郁林、刘敏*

中山大学中法核工程与技术学院

通过 800 °C 梯度剂量 ($1-5 \times 10^{16}$ ions/cm²) He 离子辐照实验与第一性原理计算, 揭示了碳纤维增韧 ZrB₂-SiC 复合材料 (C_f-SiC/ZrB₂) 的多层次辐照损伤抵抗机制。主要包括 C 纤维-基体 (C_f-M) 界面主导的缺陷湮灭、多元界面主导的应力平衡、辐照激活的相重组三种协同机制。低剂量辐照时, He 离子被容纳于 C_f-M 界面并诱导 C 纤维产生 C 原子扩散, 这于相界形成富 C 环境。中、高剂量时, ZrB₂ 和 SiC 分解的 Zr、B、Si、C 元素在热激活、辐照激活下获得较高动能。又在富 C 环境催化下重组为 ZrB₂、SiC 和少量新相 B_xC_y、Zr₃Si₂, 实现了缺陷恢复。这使晶粒减小并产生新相界、晶界, 以促进界面对 He 原子的容纳。高剂量辐照下, 界面与晶格内缺陷产生的应力平衡维持晶胞参数稳定。这三种机制湮灭、容纳了大量缺陷, 恢复了部分原子离位损伤, 消耗了 He 离子动能, 并削弱了晶胞畸变。这不同于传统核结构材料抵抗辐照损伤的模式, 显著增强了 C_f-SiC/ZrB₂ 复合材料的性能, 为设计下一代核反应堆结构材料提供了全新策略。

C16-40

高温高压水条件下离子辐照 321 不锈钢的应力腐蚀开裂研究

高俊宣、贾乐洋、曹晗*、钟巍华

中国原子能科学研究院

321 不锈钢 (SS) 是一种重要的压水堆堆芯材料, 其辐照促进应力腐蚀开裂 (IASCC) 的机理尚不明确。本研究基于 Fe 离子辐照模拟开展了 321 SS 在高温高压水环境中的 IASCC 行为机理研究。结果表明, Fe 离子辐照后的损伤情况与近似剂量下的中子辐照损伤基本一致, 证实了 Fe 离子辐照模拟中子辐照研究 IASCC 的可行性。321 SS 的 IASCC 敏感性随剂量增加而增加, 其变化趋势与滑移台阶平均宽度的剂量依赖性高度一致, 表明局部变形是 IASCC 的主要机制之一。具体而言, 一方面, 辐射诱导 Ni-Si 团簇在晶界处偏析, 促进晶界氧化, 弱化晶界强度, 在拉应力的作用下, 诱发沿晶开裂; 另一方面, 辐照诱导 Ni-Si 团簇局部富集并在晶粒内形成 Ni 氧化物和 Si 氧化物, Si 氧化物膜在高温高压水中极易发生溶解, 形成的缺陷结构在拉应力作用下产生点蚀坑, 而 Ni 氧化物作为 O 扩散的快速通道, 促进 O 沿着 NiO 向腐蚀区扩散, 与 Cr 结合削弱 γ 相, 点蚀坑底部应力集中和 γ 相弱化在拉应力作用下的诱发穿晶开裂。

C16-41

极端服役环境耦合显微原位 CT 的研发与应用

李仁庚^{*1}、杨尚京²、李思纯²

1. 南京工业大学

2. 长三角先进材料研究院

随着轻质合金材料在航空、航天、军工等关键领域的应用, 在高温、低温和复杂应力等极端服役条件下对关键材料和构件的内部缺陷形成、演变和裂纹扩展进行可视化、量化、数字化原位研究, 成为评估部件服役可靠性和预测剩余寿命的重要实验手段。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, 可实现毫米/厘米级试样的三维无损成像。通过配置超高温模块、低温模块、高载荷模块 (拉伸/压缩/弯曲/疲劳), 构建热-力耦合系统, 实现超高温变形、超低温变形以及热冲击、疲劳、蠕变等复杂工况下轻合金材料与部件的原位 CT 成像。极端服役环境 X 射线显微原位 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。

C16-42

铜表面高温耐磨涂层的激光熔覆制备技术与性能研究

刘敏¹、杨凡¹、李文勇¹、李光石^{*2}

1. 上海应用技术大学

2. 上海大学

为改善铜及铜合金硬度低、耐磨性差及高温易失效等问题，本研究采用激光熔覆技术在铜表面制备高性能高熵合金涂层。通过单因素及正交试验优化，确定直接熔覆高熵合金涂层的最佳工艺参数，获得面心立方结构的高硬度涂层（596 HV0.1），且 Cu 与高熵合金相互稀释形成成分梯度及半共格界面。该涂层在 400 °C 和 600 °C 耐磨性分别为铜基体的 1.8 倍和 7.6 倍以上。为进一步减小 Cu 稀释影响，引入 Ni60A 过渡层制备复合涂层，显著减小富铜区面积并促进富 Cr 的 BCC 相和富 Ti 相形成。复合涂层平均显微硬度提升至 624 HV0.1，且在 400 °C 和 600 °C 的耐磨性进一步改善。基于涂层形貌和成分的分析可知，复合涂层耐磨性提升归因于高硬度、富铜区良好的变形能力以及含 Ti 氧化层的形成。随温度从 400 °C 升至 600 °C，磨损机理由磨粒磨损、剥层磨损和氧化磨损或粘着磨损转变为磨粒磨损和氧化磨损。该技术显著提升了铜基构件在高温领域的耐磨性和服役能力，为延长铜合金部件的使用寿命及拓展高熵合金涂层应用场景提供了理论支撑和技术支持。

C16-43

金属激光增材制造多物理场模拟仿真平台的构建及应用

唐旭、蒋小武、施荣沛*

哈尔滨工业大学（深圳）材料学院

金属构件激光增材制造过程中存在强烈的物理、化学变化以及复杂的物理冶金过程，同时伴随着复杂的形变过程，以上过程影响因素众多，涉及材料、结构设计、工艺过程、后处理等诸多因素，这也使得增材制造过程的材料-工艺-组织-性能关系难以准确把握，形/性的主动、有效调控较难实现。本报告以激光粉末床熔融(L-PBF)增材制造工艺为对象，介绍多尺度、多物理场的高保真仿真平台的构建：集成有限元流体力学模拟粉末-激光相互作用、熔池动力学，元胞自动机(cellular automaton)模拟介观尺度下凝固过程柱状晶外延生长与等轴晶形核长大的相互竞争，以及相场方法模拟多重热循环条件下的固态相变组织演化及其动力学。利用该平台，从物理机制上揭示了光斑形貌(beam shaping)-冶金缺陷-熔池形貌-凝固组织的依存关系，阐明了激光光斑形态对凝固组织的形核生长的调控机制。该工作为突破在微米、微秒介观时/空尺度上对凝固组织的时空调控技术瓶颈提供了新的思路。

C16-44

HR3C 奥氏体耐热钢时效脆化及其风险管控技术研究

金晓*、朱保印、夏咸喜、李远飞、董海涛

苏州热工研究院有限公司

HR3C 耐热钢是超超临界机组的重要材料。HR3C 钢冲击功的退化会影响其结构部件在长期服役过程中的安全性。报告统计了 HR3C 工程服役中失效案例及原因。研究了 HR3C 钢在 650 °C 时效过程中微观组织和力学性能的演变，并探讨了微观组织演变与性能变化之间的关系。结果表明，影响冲击功的主要原因是晶界处析出的 I 型 $M_{23}C_6$ 碳化物，冲击功的降低与晶界上形成的 $M_{23}C_6$ 链状结构有关，而非 $M_{23}C_6$ 的尺寸。报告提出了一个模型并结合晶体塑性有限元模拟，证实 $M_{23}C_6$ 相相连成链状结构是冲击功迅速下降的根本原因。同时，研究得出结论，在 HR3C 耐热钢中，报告基于修正 Option 1 失效评定曲线，研究典型表面裂纹的临界裂纹尺寸，并结合表面环向裂纹临界尺寸和轴向尺寸分别约为 1.5mm 和 0.7mm。

C16-45

液态铅铋环境下碳化硅溶解腐蚀的模拟研究

许依春*

中国科学院合肥物质科学研究院

碳化硅(SiC)具有低中子活性、抗高温蠕变和氧化、耐辐照以及高热导率等特性,成为铅冷快堆包壳或新型燃料元件涂层的候选材料。然而,高温、辐照环境,液态铅铋(PbBi)仍然会溶解 SiC 表面形成非晶 Si 表面,并渗透 SiC 基体,导致晶粒脱落,使得 SiC 服役性能退化。因此,厘清 LBE 环境下碳化硅腐蚀的机理,对碳化硅在铅冷快堆中的应用至关重要。

基于第一性原理计算方法研究了液态金属原子在碳化硅表面吸附、溶解过程,以及渗入基体后在晶界区域的扩散和聚集行为。结果表明,Pb、Bi 和 O 原子都容易吸附在 SiC 表面,并促进表面 C 的溶解,且 O 原子促进 Pb、Bi 的吸附和表面 C 原子的溶解,加速 SiC 的溶解腐蚀,从而形成富 Si 非晶层。当 Pb、Bi 渗入 SiC 基体中,更容易替代硅原子,且 Pb 比 Bi 更容易进入到 SiC 中,与被替代原子体积和电子相互作用密切相关;同时,替代 Pb 会降低近邻 C 空位形成能及其远离 Pb 原子的扩散能垒,从而促进周围碳空位的产生,且沿着远离铅原子路径扩散,从而揭示 LBE 腐蚀环境下 SiC 中 Pb、C 局域富集实验现象。

C16-46

基于机器学习的耐 Nd-Fe-B 熔体侵蚀化合物筛选及侵蚀行为研究

王璐*、董渊、刘颖

四川大学

Nd-Fe-B 稀土永磁体凭借其高磁能积,高矫顽力等优势,已成为风力发电,新能源汽车,医疗设备等领域不可或缺的功能材料。目前,Nd-Fe-B 磁粉及磁体的成分设计及工艺优化已经得到了广泛的研究,并且取得了显著的进展。在 Nd-Fe-B 磁粉快淬生产过程中,常常面临着喷嘴内流道表面剥落,熔体堵塞流道等问题,导致连续生产中断。然而,目前针对喷嘴材料与熔融态 Nd-Fe-B 磁体的相互作用相关研究相对匮乏。因此,对适合用于喷嘴的材料进行快速筛选,并对其与 Nd-Fe-B 熔体之间的侵蚀行为进行系统研究,探讨其侵蚀特性及反应机制,揭示大规模生产中快淬喷嘴的失效机制具有重要意义。

本研究借助机器学习方法,建立化合物与 Nd-Fe-B 合金熔体侵蚀预测模型,快速筛选潜在的喷嘴材料。并依据模型预测结果,通过侵蚀实验系统地研究合金熔体与候选喷嘴材料之间的侵蚀行为,并揭示了多种化合物的侵蚀失效行为与机理,为喷嘴材料的选材提供了理论依据和技术指导。

C16-47

初始织构对工业纯钛低温变形机制及孪晶行为的影响

王岳乾*

南京工业大学

本研究对不同初始织构的工业纯钛板(TA1)在液氮温度下进行小应变冷轧处理。采用 X 射线衍射(XRD)、电子背散射衍射(EBSD)和高分辨透射电子显微镜(HRTEM)对轧后显微组织、孪晶类型及几何必要位错(GND)分布进行系统表征,阐明初始织构对低温变形机制的调控作用。结果表明,即使在极小应变下,样品亦发生显著孪晶变形,且孪晶类型随织构演变呈规律性变化。CRA 以 {11-22} 收缩孪晶为主,变体基本符合施密德准则;随织构取向演变和强度减弱,CRB 与 CRC 中 {11-22} 孪晶活性显著下降,并激活大量 {10-12} 拉伸孪晶和 {10-11} 收缩孪晶。HRTEM 直接证实了 {10-11} 孪晶的形成。几何相容性分析显示 {10-11} 与 {11-22} 孪晶之间匹配度高,有利于孪晶变体间扩展。GND 结果表明 CRA 以基面位错为主,变形机制相对单一;而 CRB 和 CRC 因多滑移系共同活跃,呈现更复杂的 GND 分布及非施密德行为。

C16-48

奥氏体不锈钢在聚变堆超临界二氧化碳冷却系统中的腐蚀行为研究

田朝阳、杨万欢*

中国原子能科学研究院

超临界二氧化碳（S-CO₂）是一种潜在的先进核聚变堆冷却剂，为探究聚变堆超临界二氧化碳冷却系统中典型材料的腐蚀行为，开展了奥氏体不锈钢（316H、302B）在 410°C、9Mpa 超临界二氧化碳环境中的均匀腐蚀行为研究。采用扫描电镜、能谱分析、三维轮廓仪以及辉光放电光谱仪对腐蚀产物进行表征。结果表明：两种不锈钢均发生不均匀腐蚀，表面氧化膜主要成分为 Cr₂O₃，局部出现大面积富 Fe 氧化物颗粒，Mo 元素对 316H 富 Fe 氧化物颗粒的出现起关键作用。且两种样品均发生渗碳。316H 腐蚀 3200h 后腐蚀增重为 $0.02014 \pm 0.00463 \text{ mg/cm}^2$ ，略低于 302B ($0.02245 \pm 0.00366 \text{ mg/cm}^2$)。此外，316H 渗碳深度也低于 302B，316H 的抗腐蚀性能和抗渗碳能力明显优于 302B。结果可为聚变堆超临界二氧化碳冷却系统的选材和腐蚀防护提供一定数据支撑。

C16-49

时效处理对 Al_{0.4}Cr_{0.7}FeNi₂V_{0.2}高熵合金微观组织和力学性能的影响许成波¹、沈琴^{*1,2}、李方杰¹、刘敏³

1. 上海工程技术大学

2. 上海交通大学四川研究院

3. 上海应用技术大学

本研究对 Al_{0.4}Cr_{0.7}FeNi₂V_{0.2}高熵合金进行了固溶、冷轧、完全再结晶处理，并在 600°C 下进行了不同时间的时效处理。利用电子背散射衍射（EBSD）、原子探针层析技术（APT）、显微硬度测试和拉伸实验，系统研究了合金的显微组织演变与力学性能。显微组织表征结果表明，所有时效态样品均析出硬质 BCC 相，但 L1₂相仅在 48h 和 96h 样品中被观察到；并且随时效时间延长，合金晶粒尺寸先减小后增大，同时 BCC 相及 L1₂相逐渐粗化。力学性能测试结果表明，经 48h 时效处理的合金展现出最优的综合力学性能，其屈服强度达 1020MPa 且延伸率为 23%，这归因于超细晶组织与析出相强化之间的复合强化效应。

C16-50

面向极端高低温环境的熵合金柔性传感

李伟伟*、王学文

西北工业大学

在航空航天、医疗健康等领域中，核心参数的智能感知是保障设备与系统安全运行的重要基础。与传统刚性传感器相比，柔性传感器凭借本征柔韧性可完美贴合复杂曲面，精准感知温度、应变等物理参数；其轻质薄型特性还能显著降低传感系统的质量与体积，助力小型化与轻量化发展。然而，受限于功能材料与结构设计，现有柔性传感器难以在高温、高压等极端环境下稳定工作，限制了其应用范围。

针对上述挑战，开发了基于二维过渡金属硫化物、熵合金薄膜，从敏感材料设计、性能调控与增材制造等方面提出了新型高低温柔性传感器解决方案。本报告重点围绕柔性传感器中二维材料及熵合金薄膜的制备与结构调控、传感器及阵列的构建、高低温场景典型应用展开。具体包括以下内容：1）材料制备与器件构建：结合喷墨打印与热退火技术，在柔性衬底上直接合成大规模二硫化钼及熵合金图案，该技术无需复杂光刻与转移工艺，大大提高了界面的力学和热学稳定性。基于该技术，在较低温热处理条件下实现了柔性传感器的直接制备，其具有极佳的机械柔性与耐久性，且具备超高稳定性；2）高低温柔性传感研究：提出合金化策略增强薄膜热稳定性，通过喷墨打印制备超薄连续的熵合金薄膜柔性传感器，其工作范围覆盖 20–1273K，响应时间达微秒级，可实现高低温度的瞬态检测，此外，传感器阵列能在弯曲状态下实现复杂形状的空间映射。

C16-51

42CrMo 脱碳现象与机制研究

张尚文*

北京科技大学

本文通过 SXL-1200C 电阻加热炉, 系统探究了 42CrMo 合金钢在不同加热温度 (750~1100 ℃) 和不同保温时间 (1~8 h) 下的脱碳行为及其机理。通过显微组织观察与定量分析, 揭示了脱碳层形貌演变规律: 在 750~800 ℃ 保温时, 表面形成完全脱碳层, 铁素体呈柱状垂直表面生长; 在 850~900 ℃ 保温时, 同时存在完全脱碳层和部分脱碳层; 在 950~1100 ℃ 保温仅生成部分脱碳层。基于菲克第二定律建立的动力学模型表明, 完全脱碳层深度与保温时间呈抛物线关系, 且在 800 ℃ 时达到最大值。部分脱碳层深度随着保温时间和保温温度的增加而增加。

C16-52

高温合金微纳结构调控及其空天动力领域应用

甘斌*

苏州国家实验室

由于具有优异的高温强度以及长期的显微组织稳定性, 高温合金成为制造航空发动机热端部件不可或缺的材料。作为合金化程度最高的一类材料, 其发展已逐步陷入瓶颈, 对成分设计和工艺的优化均带来了巨大挑战, 急需在明晰金属材料原理和制备技术上实现突破。本报告以高温合金为研究对象, 通过合金成分调控, 降低层错能, 有利于引入微纳米孪晶结构, 结合对纳米析出相尺寸、分布和显微结构稳定性的精准调控, 从而构筑高强高热稳定性的新型高温合金, 为设计出强度和承温能力同步提高的高温合金提供科学依据, 进而为开发出兼具更高服役性能与良好工艺特性的新一代高温合金奠定坚实的理论基础。

C16-53

宽能谱多束流高仿真空间辐照环境地面模拟装置

李翔城*

国防科技大学

据统计, 空间环境诱发的航天器故障占比 40% 左右。当前材料或器件辐照效应研究主要基于效应等效原则开展, 如总剂量效应、单粒子效应、位移损伤效应、充放电效应等, 主要利用的地面辐射源包括钴源、重离子源或质子源、反应堆中子源等, 虽然能够较好地解决大多数空间材料或器件耐辐照需求, 但受到粒子种类单一、准单能、单方向等限制, 与多束流、宽能谱、立体角辐射的真实辐射空间环境有较大差异, 出现对实际辐射性能的评价“过于保守”或“过于低估”的问题。本研究团队基于激光粒子加速技术, 利用 45TW 激光器、激光粒子加速靶室平台, 产生具有空间辐射环境特征的电子能谱、质子能谱、电子-质子混合能谱, 相比传统地面辐射源, 具有体积小、加速梯度高 (比传统加速器高 3-4 个量级)、辐射种类粒子可调、运行成本低的优势, 为抗辐射加固地面模拟源研究提供了新的思路, 也为材料或器件长周期在轨安全提供地面耐辐照考核环境。

C16-54

多束离子辐照在先进核反应堆材料研究中的运用

陈一恒*

北京大学

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品台用以模拟材料在反应堆中的高温服役环境。多束离子辐照实验的研究发现,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。

C16-55

基于实验方法和理论计算的化学反应速率研究压气机环境下钛铝合金可燃性

杨漾、喻文添、鹿润林、郑丽丽*

清华大学航天航空学院

钛铝合金因其低密度、高比强度、高比刚度以及优异的高温蠕变性能,成为航空发动机高压压气机轻量化的理想替代材料。然而鉴于其在高压压气机环境中潜在的“钛火”风险,本研究采用数值模拟方法系统研究了适航条件下钛铝合金的可燃性判据。研究结合基于实验的能量平衡方法和基于第一性原理的计算方法,深入分析了钛铝合金的表面化学反应动力学特性。针对压气机高压段典型的高温、高压、高速气流工况,对钛铝合金的可燃性进行了系统评估。研究表明,在特定工况参数范围内,钛铝合金展现出比传统钛合金更优的抗点燃特性。该研究为钛铝合金在航空发动机中的安全应用及适航符合性评估提供了重要的理论基础。

C16-56

铝中位错与晶界相互作用的分子动力学研究

徐星¹、廖卓晶¹、张亮^{*1,2}

1. 重庆大学材料科学与工程学院

2. 重庆大学高端装备机械传动全国重点实验室

位错-晶界相互作用显著影响金属材料的力学行为。然而,纳米尺度下晶界与复杂位错组合的相互作用机制及其宏观力学响应尚不清楚。本研究采用分子动力学模拟,系统研究了铝单晶和具有不同类型晶界的双晶模型在纳米压痕过程中的位错行为及其与晶界的相互作用。研究重点分析了棱柱位错环的形成及其在不同晶界结构特征下的动态演化过程,揭示了晶界对位错的调控作用以及这一过程对材料力学性能的影响。研究表明,晶界显著阻碍了位错的运动,其中大角度晶界对位错运动的阻碍作用显著强于小角度晶界。位错-晶界相互作用取决于晶界结构特性。模拟分析表明,棱柱位错环在大角度晶界处被显著吸收,导致晶界原子结构发生局部重构。而在小角度晶界中,棱柱位错环则通过晶界并继续扩展,发生了复杂的位错合成与分解反应。不同晶界类型通过对位错行为的不同调控,显著影响了材料的屈服强度、硬化行为以及塑性变形特性。

C16-57

石墨基三维渗流复合材料抗烧蚀性能研究

康鹏超*、罗涛、常磊、韩秋晨、卫增岩、武高辉

哈尔滨工业大学

本文以多孔石墨为基体,以 SiMoZr 作为浸渗剂,采用反应融渗法制备了石墨基三维渗流复合材料。

研究了不同密度, 不同孔隙率和孔径大小的石墨基体对浸渗的影响, 研究了耗散剂中 Si、Zr、Mo 原子的不通的比例对复合材料力学性能及氧乙炔烧蚀条件下抗烧蚀性能的影响, 通过分析烧蚀前后的形貌, 物相等变化, 确定了 SiMoZr/石墨耗散防热复合材料的理想成分, 并对其烧蚀机理进行了探讨。

C16-58

增材制造 AFA 钢的耐铅铋腐蚀性能研究

万莉、龚星*

深圳大学

本研究系统比较了增材制造铝含量为 3 wt.% 的含铝奥氏体不锈钢(AFA 钢)与 316L 不锈钢在显微组织和铅铋腐蚀行为方面的差异。结果表明, 由于 DED-AFA 试样在层间区域存在明显的未熔合缺陷和气孔, 其室温力学性能低于 DED-316L。两种材料在含氧量为 10^{-6} mass%、温度为 550 °C 的液态铅铋中腐蚀 2000 h 后, 截面分析显示, DED-316L 的腐蚀深度约为 DED-AFA 的 5 倍, 平均腐蚀深度分别为 107.96 μm 和 22.05 μm , 最大腐蚀深度分别为 241.69 μm 和 55.97 μm 。两者均在表面形成氧化层, 其中 DED-316L 以 Cr 为主导, DED-AFA 则以 Al 为主导, 且后者氧化层更薄、更致密。此外, 在 DED-AFA 钢的溶解区域, 不同相之间呈现 Nishiyama-Wassermann (N-W) 和 Kurdjumov-Sachs (K-S) 晶体学取向关系。

C16-59

基于光热反射技术的耐事故核燃料导热性质研究

王宇舟*

中山大学

开发耐事故核燃料需要从多方面评估新型材料的堆内服役性能, 这其中燃料导热性能是影响反应堆安全的重要因素和开发耐事故核燃料的主要改进方向。随着测量材料种类增加和测量样品的尺寸的减小, 当前普遍采用的激光闪光法已无法满足高通量研究的需求。光热反射技术具有的超过空间分辨率可以为高通量研究耐事故核燃料提供有力工具。本报告介绍了光热反射技术的基本原理, 以及针对核燃料的研究所做的技术改进。对于离子辐照样品的不均匀损伤分布, 开发了多层传热模型用来更准确地表征材料导热性质。在此基础上, 利用光热反射技术研究了包覆核燃料涂层的导热性质, 探究了辐照损伤和结构缺陷对于热量传输的作用, 为进一步改进燃料性能、开发高保真的模拟燃料提供了基础。

C16-60

900°C 下 NaCl 与 Na₂SO₄ 对 HVOF/APS 热障涂层的腐蚀行为对比分析

杨晋、李超*

昆明理工大学

本研究系统对比了大气等离子喷涂 (APS) 与高速氧燃料喷涂 (HVOF) 制备的热障涂层在 900 °C 高温 NaCl/Na₂SO₄ 熔盐环境中的耐腐蚀性能及失效机制。通过微观结构表征、物相分析和腐蚀动力学研究, 揭示了两种涂层的性能差异及腐蚀演化规律。结果表明, APS 涂层因其层状结构和较高孔隙率 (孔隙和层间间隙显著), 导致熔盐通过毛细作用快速渗透, 加速了 Cl⁻ 和 SO₄²⁻ 的扩散。腐蚀过程中, APS 涂层表面 Cr₂O₃ 氧化层局部增厚至 22.535 μm , 但因内应力引发裂纹扩展, 氧化层出现剥落, 导致结构疏松。而 HVOF 涂层得益于致密结构 (孔隙率低、裂纹少), 表面形成连续均匀的 Cr₂O₃-Al₂O₃ 复合氧化层, 有效抑制了腐蚀介质的渗透。研究发现, APS 涂层中 S 元素沿 Cr₂O₃ 晶界富集, 引发硫化反应, 而 HVOF 涂层中铝的持续扩散促进次表层 Al₂O₃ 层的动态修复。研究证实 HVOF 工艺在高温熔盐环境中具有更优的长期服役性能, 为热障涂层的工艺选择提供了理论依据。

C16-61

ZrO₂/SBA-15 复合颜料抗原子氧侵蚀的第一性原理研究王忻毓¹、张茂斐^{1,2}、章俞之^{*1,2}、谷红宇¹、孙瑞^{1,2}、马佳玉¹、宋力昕¹

1. 中国科学院上海硅酸盐研究所, 中国科学院特种无机涂层重点实验室

2. 中国科学院大学材料与光电研究中心

在低地球轨道（LEO）苛刻环境中，原子氧侵蚀是航天器热控涂层性能劣化的一大威胁。介孔分子筛 SBA-15 凭借其高比表面积、宽带隙特性及热稳定性，在航天器热控涂层领域具有独特的优势。现有研究表明共聚合法构筑的 ZrO₂/SBA-15 复合颜料展现出抗原子氧侵蚀潜力，但其微观原子氧防护机制尚未明晰。本研究基于密度泛函理论（DFT）和分子动力学模拟，构建了 ZrO₂ 与 SBA-15 孔道及骨架结构的原子氧轰击模型，系统分析了两者的抗原子氧侵蚀机理。通过提取轰击模拟过程中不同时间节点的结构及体系的动能数值，分析发现氧化锆结构释放原子氧动能能力有限，Zr-O 键轰击位点在原子氧撞击后出现结构的变形。分子筛结构可以大量释放原子氧动能，原子氧轰击孔道后会逐渐被表面羟基吸引最终撞上孔壁骨架，原子氧作用于 SBA-15 骨架形成 SiO₂ 惰性层，并且均会在特定节点生成 Si-O-Si 加强键或 Si-O 环。因此，ZrO₂/SBA-15 复合颜料在 SBA-15 为主要载体的情况下有望获得更好的抗原子氧侵蚀性能。

C16-62

近场冲击波与爆轰产物耦合作用下扩张管力学响应及吸能特性研究

祁子真*、陈开果、林玉亮

国防科技大学

扩张管结构（ETS）广泛应用于防护结构中的能量吸收构件，但其在近场爆炸下的动态响应仍未得到充分理解，这限制了其在防爆装置中的应用。本文通过爆炸实验研究了 ETS 的响应，测试了爆炸载荷的超压历史和爆炸产物的传播过程。在实验验证后，建立了有限元模型以获取爆炸载荷的特性和 ETS 的力学响应。研究表明，随着滑块速度的增加，当 ETS 的嵌入位移超过其极限时，会引发薄壁管从一端屈曲到两端同时屈曲的变形模式转变。当比例距离小于 $0.4 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时，ETS 的吸能量随比例距离的增大而快速降低；比例距离范围为 $0.4\text{-}0.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时，尽管爆炸载荷的峰值压力下降，ETS 在不同爆炸质量下的能量吸收随着比例距离的增加表现出不同的趋势。这是由于爆炸冲击波和爆炸产物之间的耦合作用，导致随着比例距离的增加，质量不同的炸药爆炸产生的比冲量发生了不同的变化趋势。在爆炸载荷的倾斜冲击情况下，近场范围（ $Z < 0.8 \text{ m/kg}^{1/3}$ ）内的能量吸收下降百分比高于中远场范围，这是由于近场爆轰产物的不均匀和随机喷射造成的。本研究阐明了在爆炸波和爆炸产物耦合载荷作用下 ETS 的动态响应，为优化近场防爆结构中 ETS 的设计提供了重要借鉴。

C16-63

选区激光熔化 GH3535 合金辐照缺陷演化研究

张雯朝、赵霖、张建峰、杨金蕾、李健健*

中国科学院上海应用物理研究所

选区激光熔化（Selective laser melting, SLM）技术具有高精度、高致密度以及优异的力学性能等优势，为熔盐堆的构件制备提供了智能制造方案。GH3535 合金因其具有相当高的力学性能、耐中子辐照和耐熔盐腐蚀性能，被认为是我国钍基熔盐堆的候选结构材料之一。本研究采用选区激光熔化技术，通过优化扫描策略和扫描参数，成功制得了 SLM GH3535 合金样品。基于多尺度表征手段（如 SEM、EBSD、EDS 和 TEM 等）观察了其特殊的本征结构（如位错胞、亚/晶界和析出相等），并通过显微硬度测试（约 $280 \text{ HV}_{0.2}$ ）和拉伸测试（屈服强度约 700 MPa ，抗拉强度约 900 MPa ）验证了其优异的力学性能。为进一步评价 SLM GH3535 合金是否适用于熔盐堆辐照工况，开展了氦离子辐照实验。基于 GIXRD 测试结果，发现辐照后 SLM GH3535 合金出现峰位偏移，说明材料存在晶格畸变，且在 700°C 50 dpa 的条件下出现杂峰，证明辐

照诱导产生了析出相。进一步通过 TEM 观察 700°C 50 dpa 的样品, 发现存在大量氦泡和析出相 (数密度分别约为 $6.15 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ 和 $4.11 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$, 尺寸分别约为 2.26 nm 和 19.65 nm), 基于 SAED 确定析出相为六方密堆积结构, 并通过 EDS 确定其为富 Mo、富 Cr、贫 Ni 的 M₂C 型碳化物。最后, 利用 DBH 模型分析验证了辐照缺陷与力学性能的关联性。研究表明, SLM GH3535 合金在氦离子辐照下诱导产生了氦泡和 M₂C 型析出相, 进而出现了辐照硬化现象, 并初步分析了本征界面结构-辐照缺陷-力学性能的关联性。本研究为 SLM GH3535 合金的微观结构、力学性能和辐照缺陷演化提供了实验数据, 对选区激光熔化技术在熔盐堆中的开发与应用提供了依据。

C16-64

热室内小样品拉伸及蠕变测试技术的实现及应用

柯艺璇

中国原子能科学研究院

随着全球能源低碳转型的加速, 核能作为重要清洁能源具有广阔前景。当前, 快堆/新质反应堆的设计研发亟需大量辐照数据支撑, 但受限于热室资源有限、辐照空间不足及样品剂量高等问题, 标准试样难以满足工程需求的测试效率。为此, 开发利用了小样品技术, 显著提升了辐照空间利用率和测试效率。然而, 该项技术当前面临两大平静: 一是缺乏统一测试标准导致数据难以直接评价材料性能; 二是热室内依赖机械手操作小样品存在适配性挑战。针对此, 本研究聚焦于: 1) 建立小样品标准化拉伸与蠕变测试技术; 2) 优化小样品与热室机械手的适配性操作流程。最终成功开发出适用于热室环境的小样品标准化测试装置及方法, 并通过对比实验验证了小样品与标准样品测试结果的一致性, 为小样品技术的工程化应用提供了关键支撑。

C16-65

核电厂高温高压水环境镍基 690TT 合金传热管的冲击-微动复合磨损行为规律及损伤机制

辛龙*, 郭保利, 陆永浩

北京科技大学 国家材料服役安全科学中心

冲击-微动复合磨损已逐渐成为核电厂蒸汽发生器传热管破坏和失效的主要原因之一。利用本课题组研制的能够模拟核电厂高温高压水环境冲击-微动复合磨损试验装置, 本文对比研究了传热管的冲击磨损、切向微动磨损以及冲击-微动复合磨损行为规律和损伤机制。研究结果表明, 冲击-微动复合条件下, 传热管的磨损体积、磨损深度以及磨损宽度均最高, 而单一冲击条件下, 传热管的磨损体积、磨损深度以及磨损宽度最低; 切向微动和冲击-微动复合条件下的损伤机理主要为磨粒磨损、严重氧化和材料转移, 而单一冲击条件下的损伤机理主要为材料的塑性变形、疲劳磨损、轻微氧化、材料转移; 不同运动模式下, 传热管的组织结构演变呈梯度分布: 最表层的氧化膜、纳米晶结构的摩擦学转变结构 (TTS) 层、塑性变形层以及基体; 冲击-微动复合条件下, 还存在氧化膜与 TTS 的混合层。冲击-微动复合条件下的氧化层和 TTS 层最厚, TTS 层的晶粒尺寸最小, 动态再结晶演变速度最快; 而单一冲击条件下的氧化层最薄, 动态再结晶演变速度最慢; 切向微动条件下的情况处于中间。本研究成果能够为核电厂蒸汽发生器传热管的安全可靠运行提供重要的理论和技术支撑。

C16-66

Mg-Gd-Zn 合金中不连续长周期堆垛有序结构诱导锯齿状孪晶界形成

段志萌, 王立华, 韩晓东

北京工业大学

近年来, 具有特殊强度重量比的高强度镁合金因其节能潜力和环保意义而受到广泛关注, 其中含有长周期堆垛有序 (long-period stacking ordered, LPSO) 结构的稀土镁合金表现出了优异的力学性能, 而这归

因于 LPSO 结构可通过阻碍位错运动和抑制形变孪晶来强化镁合金。由于 LPSO 结构对孪晶的阻碍，孪晶界通常呈现锯齿状的形貌，然而其形成的原子机制目前仍未知。针对上述本工作报道了室温变形的 Mg-Gd-Zn 合金中由 LPSO 阻碍孪晶而诱发的锯齿状孪晶界，并结合球差校正的扫描透射电子显微镜（Spherical aberration-corrected transmission electron microscope, Cs-corrected TEM）在原子尺度揭示了其形成机制。对于基体中呈非连续或随机空间分布的 LPSO 结构，孪晶界会绕过不连续的 LPSO 结构，形成 LPSO/孪晶界（basal-prismatic, BP）界面。界面处形成的富锌错配位错对孪晶界产生钉扎作用；基体位错与孪晶界的反应产生孪晶位错，同时伴随部分基体位错的发射及孪晶域内堆垛层错的形成。这些堆垛层错同样对 BP 界面产生钉扎效应。上述因素的协同作用最终形成锯齿状{10-12}变形孪晶，合理地解释了本研究和其他实验中观察到的具有高度不规则性的孪晶界，为 LPSO-孪晶相互作用机制提供了新见解，对阐明稀土镁合金的变形机制、促进具有优异综合性能的新型镁合金发展具有重要的理论指导意义。

C16-67

基于深度学习的金属锆势函数的开发与验证

万雨萱¹、张轩¹、张亮^{*1,2}

1. 重庆大学材料科学与工程学院
2. 重庆大学高端装备机械传动全国重点实验室

分子动力学模拟可在原子尺度上动态揭示锆在高温与辐照等复杂服役条件下的结构演化与力学响应。然而，传统经验势函数受限于固定函数形式与参数，难以准确描述锆在多相结构、强非线性变形等条件下的多体相互作用，限制了势函数的精度与泛化能力。本文基于高通量第一性原理计算与深度学习方法，开发了锆的深度学习势函数，计算了锆的晶格常数、表面能、晶界能、熔点、弹性常数等基本物理性质和力学性能曲线，并与 DFT 计算和经验势函数的计算结果进行比较。结果表明，与传统经验势相比，深度学习势在晶格常数等多个关键物理性质上的预测结果与 DFT 高度一致，更能反应锆原子之间的相互作用。其中 HCP 锆的熔点（2111 K）与实验值（2128 K）最为接近，表明深度学习势具有较强的高温结构重排与相变行为建模能力，能够准确捕捉锆在热激发下的原子迁移、局域结构演化及晶体结构转变过程；此外，深度学习势还能精准捕捉锆在大应变条件下的塑性变形与应力软化行为，再现拉伸过程中的屈服、流动及结构重排特征，展现出良好的物理一致性与数值稳定性。

C16-68

高分辨多模态动态观测系统的研制与应用

张子萱，翟亚迪，王立华，王丽
北京工业大学

随着材料科学与生命科学等学科向微纳米尺度内部表征及动态过程研究深入，传统扫描电镜（SEM）的表征模式难以满足对材料内部结构日益增长的分析需求。为突破这一技术瓶颈，本研究在 SEM 基础上创新性地集成 X 射线成像、X 射线激发发光光谱（XEL）、能谱分析（EDS）及 CL 等多模态分析系统，构建了具备原位多场调控功能的 SEM-X 射线-EDS-XEL/CL 综合分析平台。研究建立了电子束激发靶材的 X 射线多模态成像理论模型，优化了关键成像参数（如以高 X 射线透过率 Si_3N_4 为基底溅射 Au 薄膜靶材），并成功获取了样品的 X 射线成像。该系统成功应用于发光材料的 XEL 光谱量化分析。本平台显著拓展了传统 SEM 的功能，丰富了跨尺度（微米-纳米）、多模态（成分-结构-形貌-发光）原位分析技术体系，实现了从高真空（ 10^{-2} Pa）到近常压（ 10^2 Pa）、静态到动态的全工况覆盖，为新材料研发与检测、生物成像、工业检测及生物矿化机理研究等提供了强大的原位动态分析工具。

C16-69**20CrMnTi 汽车差速器齿圈开裂原因分析**

王志楠*、胡家秀、于佳音、冯东一、盖秀颖、张重远

中国科学院金属研究所

20CrMnTi 汽车差速器齿圈在未使用前发生开裂，为确定齿圈开裂的原因，对其进行了宏观检验、断口分析、金相检验及裂纹形成机理分析。结果表明：原材料（铸态组织）中存在切头切尾不足，有较多的未轧合的疏松、孔洞等缺陷，后续加工难以消除，是齿圈发生开裂失效的主要原因。

C16-70**P92 再热蒸汽管道长期服役后组织性能研究**

夏云峰*、周仲成、胡、林雨

内蒙古北方重工业集团有限公司

研究了规格为 ID749*45mm 的 P92 再热蒸汽管道在 608℃，压力为 7.237MPa 的蒸汽环境下服役约 5 万小时后的组织性能变化情况，研究结果表明，P92 再热蒸汽管道经 5 万小时服役后，钢管内、外表面氧化层厚度为 150-200μm，内表面局部存在 5-10mm 氧化剥落痕迹，钢管室温屈服强度下降约 12.8%-17.5%，抗拉强度下降约 3.0%-7.9%，室温夏比 V 型缺口冲击下降约 47.0-64.7%，从 80J-120J 降低至 40J 左右，600℃高温非比例延伸强度 Rp0.2 下降 11.8%，抗拉强度下降 20%。通过扫描电镜观察，发现大量沿马氏体板条呈链状分布的析出相，尺寸为 700-900nm 之间，经能谱分析，其成分富 Fe、Cr、Mo、W。