



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

E15-微细加工与成形及晶体塑性力学应用

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



E15. 微细加工与成形及晶体塑性力学应用

分会主席：张士宏、喻海良、李落星、夏琴香、李恒

E15-01**Damage and fracture in deformation-based materials processing**

Mingwang Fu*

The Hong Kong Polytechnic University

Deformation of materials and deformation-based materials processing are one of the most practical engineering activities and an efficient materials processing process, respectively. The latter, on the other hand, is widely employed to fabricate net-shape or near-net-shape parts via plastic deformation of materials. In this process, the design of deformed parts, deforming process and tooling, defect prediction and avoidance, and product quality assurance and control are becoming more and more critical. All of these activities need to consider the damage and fracture in the deformation of materials. Scientific insights into the formation and occurrence of damage and fracture and an in-depth understanding of their mechanisms and behaviours are crucial in terms of their prediction, control and avoidance. In this talk, the mechanisms of the initiation, coalesce and growth of voids in the deformation of materials, the formation and occurrence of damage and fracture, and their mechanisms, behaviours, and prediction and avoidance via experiment and simulation will be presented from the aspects of state-of-the-art in damage and fracture research.

E15-02

论文题目(待定)

黄亮

华中科技大学

E15-03

大面积超疏水微结构聚合物功能薄膜成形研究

邓宇君

上海交通大学

E15-04

一种用于预测面心立方金属中纳米空洞结构与能量特性的建模框架

孔祥山*, 陈良, 林军, 张存生, 赵国群

山东大学

理解空位类缺陷的结构与能量特性对于掌握金属中缺陷的演化过程至关重要, 然而, 现有方法在研究面心立方 (FCC) 金属中的纳米空洞时面临诸多挑战。为此, 我们开发了一种稳健的建模框架, 可精确预测 FCC 金属中纳米空洞的结构与能量特性。研究表明, 通过最大化空位之间的配位数, 可以高效地确定稳定的纳米空洞结构, 并揭示了纳米空洞形成能与其致密因子之间的线性关系。值得注意的是, 我们发现纳米空洞与空位之间的相互作用存在六个离散的结合能级, 这些能级仅与致密因子的变化相关。我们的新模型已通过第一性原理计算和实验验证, 在多个方面优于传统方法。该模型能够有效处理任意尺寸的 FCC 金属纳米空洞, 捕捉原子尺度的结构变化, 并为空位相关损伤机制的理解、多尺度建模及新型金属原子间势函数的开发提供了关键的理论支持和工具。

E15-05**Hf15Al10Nb6 高熵合金的晶体塑性可逆相变模型**

汪华苗*, 刘楚昊

上海大学

The high-entropy alloys (HEAs) primarily composed of elements such as Ti, Zr, Hf, and Nb generally exhibit a B2-type crystal structure, contributing to their enhanced strength. However, the limited ability of the B2 lattice structure to accommodate plastic deformation leads to poor plasticity in this type of alloys. The deformation-induced martensitic transformation (DIMT) occurring in the B2 lattice can effectively alleviate the poor plasticity associated with these alloys. Our work focuses on the previously reported Ti49Zr20Hf15Al10Nb6 high-entropy alloy with DIMT mechanism, employing an improved elastic visco-plastic self-consistent model to predict and analyze the macro- and micro-mechanical responses during uniaxial tension and cyclic loading that includes loading, unloading, and reloading. The model results elucidate the stress-strain behavior and volume fraction evolution of the parent phase and martensite phase during tension and cyclic loading, while quantitatively assessing the contributions of transformation and dislocation mechanisms to plastic deformation. Additionally, it explores the influence of back stress—a topic that is rarely addressed on the reverse process of martensitic transformation and recoverable strain in this high-entropy alloy at the microstructural level. This model serves as a theoretical analysis tool for HEAs that incorporate reversible phase transformation (RPT) mechanism, facilitating the understanding of the evolutionary processes governing mechanical behavior at the microstructural level and thereby guiding the enhancement of toughness in B2 lattice HEAs.

E15-06**Ti6554 合金超细纤维晶异质组织制备及低温力学性能**

武川*, 刘宝玺

天津职业技术师范大学

Ti6554 合金属于亚稳态 beta 钛合金具有强度高但韧性弱的特点。通过传统固溶和时效处理对 α 相进行沉淀强化, 总是导致亚稳定 β -钛合金的严重强度-延展性倒置关系。本研究提出采用孔型轧制工艺 (700 摄氏度 12 道次的轧制) 制备 Ti6554 合金的超细纤维晶异质组织, 期望提高其强度和韧性而克服倒置瓶颈。结果显示, beta 纤维组织的体积分数可达 68%, 而且长径比为 2: 1, 并且出现了大量的小角度晶界。这种特殊结构诱导了连续动态再结晶的发生。随后进行 550 摄氏度的时效处理导致超细 alpha 的析出, 最终将材料的抗拉强度提升至 1600MPa, 而且延伸率保持在 11.7%。基于该组织进行了 -180 至室温的拉伸性能测试, 通过 EBSD 和 TEM 对微观特征进行了表征, 并分析其结构对力学性能的影响规律。

E15-07**一种用于钛/碳化钨金属基复合材料的集成计算材料工程 (ICME) 建模框架**

陈天驹*

上海理工大学

本研究致力于钛基 - 碳化钨 / 钨增强金属基复合材料的高温力学性能预测模型开发与验证。通过构建微观结构模型, 将材料结构特征与界面脱粘特性耦合至有效性能预测中, 结合高通量模拟获取包含成分、结构及加工参数的多维数据集, 进而训练高斯过程代理模型。该模型可快速关联材料成分、微观结构与 1200°C 高温力学性能 (如极限拉伸强度、均匀伸长率), 经实验验证显示预测值与高温拉伸测试结果高度吻合。研究成果为复合材料成分优化与加工参数调控提供了高效预测工具, 可精准筛选特定应用场景下的最优材料体系。

E15-08**预应变对 2091 铝合金微观组织的影响及成形失效预测**贾哲^{1*}, 窦欢欢¹, 刘洋¹, 穆磊²

1. 宁夏大学机械工程学院
2. 新墨西哥州立大学机械与航空航天工程学院

金属板材在塑性成形中其应变路径往往是非线性的, 研究非线性加载路径对材料成形性能的影响尤为重要。本文设计 6% – 10% 梯度预应变实验, 通过两步拉伸法实现非线性加载路径, 基于晶体塑性理论和微观表征手段研究了不同预应变 (6%、8% 和 10%) 对材料微观组织和宏观力学性能的影响。研究结果表明: 当预应变增加至 10%, 屈服强度和拉伸强度分别增加了 35.2% 和 5.5%, 伸长率下降了 48.2%。从微观角度分析, 预应变的增加促使材料内部位错密度显著提升, 更高的位错密度增大了位错激活所需的临界应力, 导致屈服应力升高。同时, 位错密度的增加导致试样在二次拉伸过程中其内部位错增殖速度减慢, 最终在宏观上表现为材料伸长率降低。同时, 本文基于晶体塑性和相场损伤建立了铝合金 2091 的成形极限曲线, 利用其准确预测了材料在渐进成形中的开裂失效, 为高精度成形工艺设计提供理论依据。

E15-09**深海管线管多向缩径校准工艺研究进展**齐绍聪^{1,2}, 于高潮^{1,2*}

1. 燕山大学先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室
2. 燕山大学机械工程学院

高精度、低残余应力与高屈强比直缝焊管生产技术, 是保障寒冻地带、超深水等恶劣环境下长距离能源输送的关键。为了提升 JCO 和 UO 焊管的抗压溃性能, 本研究提出了管线管多向缩径校准强化技术, 通过多个周向均布的模瓣同步压缩管道外壁, 使其周长变小, 壁厚增厚, 以提升管道尺寸精度和压缩强度, 降低且均化残余应力, 增强抗压溃性能, 可同时实现矫形和强化双重效果。考虑 X65 管线钢的屈服平台和弹性模量变化建立了 Chaboche 硬化模型及其 UMAT 子程序。继承各工序之间应力-应变的连续性, 开展了 D406mm × t8mm 规格的 JCOC 和 JCOE 管全流程成形力学性能演化的理论解析和实验研究, 采用 Abaqus 进行了成形过程和静水压溃模拟。结果表明, JCOC 管的尺寸精度略优于 JCOE 管, 残余应力更低, 压缩屈服强度更高。在低缩/扩径率范围内, 残余应力和尺寸精度是影响压溃的主要因素; 随着缩/扩径量增加, 残余应力改善、尺寸精度提高, 压缩力学性能成为决定压溃的关键。在 ±0.4%、±0.8% 和 ±1.2% 扩/缩径率下, 相比于扩径管, 缩径管的压缩屈服应力分别提升了 2.5%、8.8% 和 21.4%, 静水压溃压力提升了 28%、12% 和 19%。多向缩径校准工艺显著提升了管线管的抗压溃性能。

E15-10**TWIP 钢冷轧的晶体塑性有限元模拟分析**

吴俊豪, 张旭*

西南交通大学

基于快速傅里叶变换 (FFT) 的频谱求解器使用考虑孪晶的唯象晶体塑性模型进行晶体塑性仿真, 在仿真过程中使用网格重划分技术, 研究了 TWIP 钢的冷轧行为。晶粒内织构演变与 N.K. Tewary 等人使用电子背散射衍射 (EBSD) 实验获得的实验结果一致。晶体塑性模拟表明, 在 TWIP 钢的冷轧变形过程中, 高 KAM 值区域中 Goss 织构占比较高, Brass、Copper 织构占则较低, 低 KAM 值区域中则 Brass、Copper 织构占比较高, 而 Goss 织构占则较低。还发现晶粒在轧制过程中变形程度主要分为三种: (1) 晶粒内部变形异质性很大导致晶粒破碎, 晶粒内部取向趋于分散; (2) 晶粒内部变形异质性较小, 晶粒在变形之后比较完整, 晶粒内部取向非常集中 (3) 在变形时会分裂分为几个区域, 在各自的区域内变形异质性很小、晶粒取向较为集中, 但每个区域之间相比晶粒取向差异较大, 可以认为初始晶粒分裂成为了几个晶粒。此

外还发现了轧制过程中晶粒取向旋转规律，大部分晶粒都会朝着[-1,1,1]、[0,0,1]平行于轧制方向 RD (x) 方向旋转，最终晶粒取向旋转至在[-1,1,1]和[0,0,1]之间的线周围集中分布，其中[-1,1,1]方向分布最为集中。对于平行于轧制厚度方向 ND (Z)，最终取向都是在[0,1,1]和[-1,1,2]之间的线附近集中分布。

E15-11

大面积功能微结构跨尺度成形制造技术

徐杰*, 王晓亮, 丁朝刚, 单德彬, 郭斌

哈尔滨工业大学

表面微结构具有强化传热、超浸润、减阻防污等优异功能，在航天热控系统、舰船多功能蒙皮等领域具有重要的应用前景。然而，大面积微结构制造面临跨尺度制造难、高精度成形难、形性协同调控难三大挑战，远超传统加工技术的边界极限，是成形制造领域的国际难题。本报告针对大面积微结构跨尺度成形制造难题，提出特种能场辅助成形技术，开发了电场辅助的材料-模具-工艺协同优化的阵列微结构跨尺度模压新工艺和面积仿生微结构激光辅助原位加热滚压成形新方法，探讨了微结构跨尺度成形制造过程材料协同流动行为与缺陷演化规律，研制了大面积阵列微结构电场辅助跨尺度模压成形装置与激光原位加热滚压设备，探索了电场、力场、温度场和激光诱导作用下大面积微结构成形缺陷抑制策略与形性调控方法，实现了最大外形 1m²、最小特征结构 100 μm 的大面积蒸气腔和蒙皮样件跨尺度可控制造，为我国新一代高分辨卫星热控系统、大型舰船减阻防污蒙皮制造技术的发展提供理论和技术支撑。

E15-12

纳米孪晶金属的全尺度摩擦磨损行为

林研*

南京理工大学

摩擦和磨损是造成材料性能退化和能量耗散的重要因素，不仅取决于接触界面特性，也与材料的宏观力学响应密切相关。研究已经证实，宏观力学响应与摩擦亚表层塑性变形机制显著影响金属材料的摩擦学行为。这表明，若建立类似于单轴拉伸/压缩加载下孪晶片层厚度依赖的标度律，即可通过调控孪晶片层厚度实现纳米孪晶金属摩擦学性能的定向优化。然而，摩擦加载诱导的塑性变形远比单轴加载（如单轴拉伸和压缩变形）更为复杂，且受外部加载尺度的影响，这导致揭示摩擦加载下孪晶片层厚度依赖的标度律及变形机制面临严重挑战。目前，仅有少量分子动力学模拟与实验研究了纳米孪晶金属分别在单一纳米尺度（nN 级）、微米尺度（mN 级）及宏观尺度（N 级）加载下的摩擦学响应，尚未形成系统认知。因此，迫切需要建立全尺度（不同摩擦加载量级）下孪晶片层厚度依赖的摩擦磨损标度律，以期在不同磨损工况下纳米孪晶金属的性能调控提供理论依据。

本工作以电沉积纳米孪晶 Ni（孪晶片层厚度从 2.9 至 81 nm 精确可控）为研究对象，通过原子力显微镜、微米划擦及宏观摩擦实验，结合亚表层显微结构分析、分子动力学模拟及第一原理计算，系统建立了纳米孪晶金属中孪晶片层厚度相关的摩擦磨损标度律，并揭示了摩擦学中一个基本但常被忽视的原则：摩擦和磨损不仅受表面现象主导，还受接触界面下方材料本体力学响应的显著影响。研究发现，纳米孪晶金属在纳米→微米→宏观尺度加载下的摩擦学响应，本质上取决于其在多尺度摩擦载荷下的结构演变及相应物理变形机制的转变（图 1）。在纳米加载尺度（50 - 190 nN），摩擦诱导的塑性变形主要由位错-孪晶界相互作用和退孪生主导，导致纳米孪晶镍的摩擦系数随孪晶片层厚度减小呈现先增加后降低的趋势。在微米加载尺度（500 - 1000 mN），超细纳米孪晶结构降低相变能垒，促进摩擦亚表层发生由面心立方（FCC）结构向密排六方（HCP）结构的相变，导致摩擦系数和磨损率均随孪晶片层厚度减小而单调下降。在宏观加载尺度（5 N），摩擦系数与孪晶片层厚度无显著相关性，但在临界片层厚度（20 nm）以上时，摩擦亚表层形成稳定氧化膜和梯度纳米结构，使材料呈现低磨损特性；而临界片层厚度以下，摩擦亚表层趋于形成脆性纳米晶结构，导致磨损率急剧增加。

E15-13**金属塑性加工多过程组织演变预测研究**

陈帅峰*

中国科学院金属研究所

金属塑性加工过程中工艺-组织-性能关联性对于制备高性能材料/构件至关重要。提出 Schmid 因子理论构建实际塑性加工中复杂加载特征与组织和织构演变的内在关联性，从力学本质上揭示了剪切变形调控金属材料组织细化和织构弱化的微观变形机制。进一步，以高性能钢铁开发为目标，首次构建了宏观有限元—介观元胞自动机（CA）—相转变模型—宏观力学性能全流程多尺度集成计算新方法，揭示热轧组织特征对冷却相变动力学的遗传性影响。另外，创新性提出了晶界特征影响的“壳幔区”(Mantle region)演变和多滑移机制差异性贡献新准则，建立密排六方金属的连续动态再结晶新模型（HCP-CDRX）。

E15-14**镍基单晶高温合金材料力学性能及结构强度评估**

王佳坡*，梁建伟，彭艳

燕山大学

航空发动机的发展是我国重要的国家战略之一，其中单晶涡轮叶片作为核心部件，其性能与可靠性对发动机整体性能具有决定性影响。目前，航空发动机中应用最为成熟的叶片材料主要为镍基单晶高温合金。深入解析镍基单晶高温合金的高温性能机理，对于优化材料强度和实现精准材料设计具有重要意义。在此背景下，本文开展了镍基单晶中微孔洞缺陷的演化机制研究，并进一步探讨了取向偏差条件下镍基单晶高温合金的蠕变行为。通过高温拉伸与疲劳试验，结合三维无损检测技术和图像处理算法，对试验前后材料中的微孔洞进行了定量分析与空间重构，提取了长宽比、球度、等效直径比等关键三维特征参数。在此基础上，构建了包含不同孔洞三维特征的有限元模型，系统揭示了孔洞形状、尺寸及空间分布对局部应力应变场的非线性影响机制。仿真结果表明，在相同孔洞体积条件下，不规则孔洞产生的应力集中效应显著高于理想孔洞，且理想椭球形孔洞的最大应力低于球形孔洞。双孔模型分析进一步显示，沿载荷方向排列的孔洞之间相互作用较弱，而垂直于载荷方向排列的孔洞相互作用显著增强。基于微孔洞损伤效应建立的蠕变模型研究表明，镍基单晶在高温低应力条件下的取向偏差效应随温度升高逐渐减弱，微观组织演化趋于一致。取向偏差对高温蠕变断裂的失效机制影响较小。本研究成果有望为高强度镍基单晶高温合金的设计提供理论支持，在确保高温性能的前提下，实现材料成本的有效控制。

E15-15**Influences of ultrasonic vibration on the dislocation and texture evolution of pure aluminum subjected to uniaxial compression**

Mao Zhang*, Junru Shi, Lei Deng, Xinyun Wang

Huazhong University of Science and Technology

The influences of ultrasonic vibration on the evolution of dislocation and texture in pure aluminum during uniaxial compression were studied by means of molecular dynamics simulation and experiments. The microstructures under different ultrasonic amplitudes were characterized and simulated by uniaxially compressing pure aluminum specimens. The results show that there is a threshold for the influence of ultrasonic amplitude on dislocations. Less than the threshold, dislocation multiplication plays a dominant role; greater than the threshold, dislocation annihilation becomes dominant. Furthermore, local stress concentration induced by ultrasonic vibration forces grains to rotate. In the early stage of deformation, ultrasonic vibration increases the average misorientation and weakens the texture strength. As the deformation intensifies, a strong texture is formed to coordinate the plastic deformation.

E15-16**超大挤压比下挤压温度对稀土镁合金组织性能影响规律**

王文柯*

哈尔滨工业大学（威海分校）

在超大挤压比挤压过程中，仅 50 摄氏度的挤压温度差异（450℃和 500℃）引起了 Mg-9.5Gd-4Y-2Zn-0.5Zr（wt%）合金的力学性能发生显著变化。为了阐明内在机制，研究了这两个挤压样品的微观组织演变及其对力学性能的影响。结果表明，450℃挤压成形的样品（T450 样品），由于动态再结晶（DRX）的作用，平均晶粒尺寸仅为 2.3 μm，而将挤压温度提高到 500℃后（T500 样品），发生了明显的晶界迁移，晶粒尺寸粗化至 7.9 μm。重要的是，T450 样品中的再结晶晶粒显示出随机取向，这削弱了变形织构，导致了最终样品中形成了弱[10-10]//ED 纤维织构。相反，T500 样品表现出再结晶晶粒的择优成核和生长，最终形成了强[0001]//ED 再结晶织构。与 T500 样品相比（屈服强度：343MPa；抗拉强度 433MPa），T450 样品中更细的再结晶晶粒和残留的变形组织引起了更高的屈服强度（402MPa）与抗拉强度（477MPa）。实际上，如果弱织构不削弱晶界强化和位错强化的效果，T450 样品应该具有更高的屈服强度。

E15-17**Micro-stress and strain analysis of Nickel-based superalloy GH4169 considering δ phase precipitation by crystal plasticity finite element modeling**

Nengyong Ye*, Guangliang Zhang

Taizhou University

The micromechanical deformation behavior of the commercial nickel-based superalloy GH4169 has been investigated in terms of the volume fraction, morphology and distribution of the δ (Ni₃Nb) phase. The main objective of this work was to gain an understanding about the mechanisms of micromechanical deformation of the superalloy at the grain scale. To that purpose, experimental and microstructural observations are relied upon to construct realistic models of the polycrystalline superalloy microstructure using crystal plasticity finite element method. It was found that the volume fraction of δ phase gradually increases from 0.27% to 4.56% with the cold rolling reduction increasing, i.e. 0% to 70%. The dominant morphology transitions progressively from short-rod to spheroidal, and ultimately to needle-like configurations. And the distribution shifts gradually from intragranular (primary location) \rightarrow conventional grain boundaries \rightarrow triple junctions. Stress concentration and strain concentration exhibits characteristic features of Hard-soft Grain Strain Partitioning. The δ phase impedes plastic strain propagation, with markedly distinct affected zones: hard grains exhibit localized strain confinement, while soft grains show extensive strain penetration.

E15-18**增材制造微裂纹的晶体塑性多尺度模拟**

梁准*

清华大学

微裂纹是增材制造金属中一个普遍而关键的问题，严重限制了其安全关键的工程应用。到目前为止，我们目前关于微裂纹的大部分知识都是基于增材制造加工后的观察，微裂纹的实时演变在很大程度上仍未得到探索，这受到了增材制造复杂的多物理和多尺度性质的挑战。为了获得更深入的见解，本研究开发了一个多尺度模型，该模型集成了多物理场流动传热模型来考虑凝固过程和温度的演变，晶体塑性模型来探索位错和应力的演变，以及原子模拟启发的内聚区模型来考虑晶界的微裂纹。模拟结果与钨的原位和非原位增材制造实验非常吻合。捕获了晶界处的实时微裂纹演变。研究发现，贯穿整个晶界的横向微裂纹通常

是在多次扫描轨迹后形成的。获得了一个相图，将微裂纹密度与扫描速度和功率相关联。还系统分析了非施密德效应、晶界强度和基板预热的影响。这项工作推进了对增材制造中微裂纹机制的理解，为改进制造工艺以减轻微裂纹的形成提供了有价值的指导。

E15-19

中锰钢 TRIP 效应的晶体塑性计算

邓智文^{1,2}, 贾春妮^{2*}, 郑成武², 王培², 李殿中²

1. 东北大学

2. 中国科学院金属研究所

中锰钢作为第三代先进高强钢的典型钢种之一，其优异的强塑性匹配能够很好地满足汽车轻量化与安全性方面的要求。本文利用考虑形变诱导相变的晶体塑性模型，系统探究了中锰钢变形过程中介观尺度的非均匀弹塑性变形行为，详细阐述了中锰钢中锰含量对其变形机制的影响规律。针对 0.2C-7Mn 与 0.2C-5Mn 两种典型的中锰钢，基于其临界区热处理过程中碳锰元素配分导致的奥氏体成分差异，结合考虑形变诱导相变的晶体塑性模型，从奥氏体层错能的角度，充分考虑奥氏体机械稳定性对中锰钢力学性能的影响。计算了单轴拉伸过程中奥氏体与铁素体间的应力应变配分及奥氏体发生形变诱导马氏体相变的过程。结果表明，7Mn 钢奥氏体因更高的层错能表现出更强的机械稳定性，与 5Mn 钢奥氏体相比，在更大的外加应变条件下发生形变诱导相变，且马氏体形核呈现更加弥散的特征。5Mn 钢的马氏体相变集中发生在小应变范围内。在外加应变最大时，7Mn 钢获得的马氏体体积分更多。两种钢形变诱导相变行为的不同引起相变诱发塑性(TRIP)效应的差异。同时，两种钢在变形过程中奥氏体相等应力水平始终高于铁素体相，铁素体相承载更多的应变。两相间合理地分配应力与应变是中锰钢具有良好强度与塑性匹配的原因之一。

E15-20

镍基单晶高温合金材料力学性能及结构强度评估

张旭*, 熊宇凯

西南交通大学

在高性能金属材料设计中，异质性结构（如颗粒增强构型与异构层状构型）在提升强度与延展性协同性能方面发挥着关键作用。尽管研究表明异质结构中的应变不均与界面行为对损伤与断裂过程有重要影响，但不同构型下的机制存在显著差异。为此，本研究分别针对金属基复合材料(MMC)与异构结构材料(HS)，构建了两套具有代表性的理论模型，从不同角度探讨异质性对材料损伤演化行为的调控机制。在颗粒增强金属基复合材料中，发展了基于非局域晶体塑性与相场耦合的模拟框架，重点引入几何必需位错(GNDs)对裂纹萌生的影响机制。研究发现，颗粒与晶界交互导致 GNDs 在局域区域聚集，从而诱导裂纹在颗粒界面与晶界处萌生。进一步分析指出，在未考虑颗粒损伤时，颗粒靠近晶界有助于抑制裂纹扩展，提升延展性；而在考虑颗粒损伤后，颗粒位于晶粒内部的构型反而更有利于增强材料韧性，与实验观察趋势相同。而在异构材料研究中，构建了应变梯度晶体塑性与能量驱动相场模型的耦合框架，用以描述异构变形诱导硬化行为及其对裂纹扩展路径的调控效应。模型有效刻画了异构界面处 GNDs 累积诱导的背应力强化现象，模拟结果重现了强度提升与裂纹在细晶区易扩展、在粗晶区受阻的典型特征。此外，调控层状构型中粗细晶比例被证实可有效优化强韧性协同表现。综上，两类材料体系具有不同的构型特征与建模路径，但均表明异质结构中的应变梯度、界面行为与 GNDs 累积对损伤演化具有决定性影响。本研究从理论建模角度揭示了两类典型异质结构的损伤调控机制，为先进金属材料的微结构调控提供了理论参考。

E15-21**钛合金双性能整体叶盘一体化成形及球化机理研究**

徐建伟*, 曾卫东, 李恒
西北工业大学

先进航空发动机的高推重比、高增压比、高涡轮前温度及低油耗要求极为苛刻, 不仅需要采用先进的结构设计, 还强烈依赖于轻质耐热、高效轻量材料的综合应用。钛合金双性能整体叶盘是将轮盘部位设计为片状组织、叶片部位设计为等轴组织的整体件, 可以应对盘件不同部位所处的服役环境差异, 满足盘件不同部位的性能需求, 充分发挥材料潜能, 对先进航空发动机的制备具有重要意义。基于此, 团队提出了“ β 单相区制坯+($\alpha+\beta$)两相区分区控形”的组织控制方法, 并对 α 相球化关键技术进行了全面研究, 在掌握 α 相球化动力学的基础上, 深入解析了基于 β 第二相和 α 晶体取向影响的球化机理。研究发现, α 相球化过程中与 β 相发生耦合作用, β 再结晶能够有效促进 α 球化进程, α/β 偏离初始 Burgers 取向关系是球化的充分条件, 其偏离程度与球化程度呈正相关, 并被量化; 在 α 相与 β 相的协同演变过程中, α 相通过自滑移所引起的晶体转动来实现晶界分离过程, 经 IGMA 方法计算, α 相球化过程中所激活滑移系以柱面 $\langle a \rangle$ 为主。通过该研究, 掌握了钛合金双性能整体叶盘组织控制的技术方法, 成功制备了钛合金双性能整体叶盘, 并通过了全面力学性能测试及地面超转试验。

E15-22**Effect of substrate heat treatment on the microstructure of Hastelloy C276 alloy produced by spinning-additive hybrid manufacturing**

Daoguang He*, Jibo Su, Xiao-yang Chen, Yongcheng Lin
Central South University

The laser-directed energy deposition (LDED) is employed to manufacture annular external ribs of high-strength nickel-based alloys on the spinning matrix. The influences of annealing parameters on the microstructural evolution of thin-walled spinning parts of nickel-based alloys are revealed. Microstructural evolution mechanisms for the thin-walled spinning parts with different annealed microstructures during LDED are analyzed. The results indicate that the formation of the strong $\langle 101 \rangle$ fiber texture of thin-walled spinning parts of nickel-based alloys significantly affects the growth rate and morphology of columnar grains in LDED. With rising of annealed time or temperature, the static recrystallization fraction of thin-walled spinning parts prominently increases, the strength of $\langle 101 \rangle$ texture is greatly weakened. Thus, the proportion of $\langle 001 \rangle$ columnar grains increase, and the grain size in the additive zone and substrate first decreases and then increases.

E15-23**大型高性能镁铝合金复杂构件塑性成形**

董蓓蓓*, 张治民, 王强, 薛勇, 于建民
中北大学

针对航天国防领域对大规格高性能镁铝合金构件的迫切需求和传统挤压技术工序繁琐、材料利用率低、变形不均匀等难题, 研究团队基于“背压式镦-挤-镦”同步耦合变形理论, 首创大规格锭坯短流程制备工艺, 将传统工艺工序简化为 2 道, 抗拉强度提升至 400MPa, 各向异性降至 5% 以内, 制备出 215kg 级超大规格坯料; 提出低静水压力挤压原理, 利用多向分流与拉延耦合技术降低 50% 成形力, 变形均匀性提升 1 倍, 显著改善抗冲击性能; 开发多向加载旋转挤压技术, 结合轴向、径向及旋转运动的协同作用, 控制金属有序流动并产生“隆起-抹平”微区累积剧变形, 实现材料均匀强韧化的同时, 通过凸模“椭圆-圆”的连续变形, 在筒壁上长出高筋, 实现筒形件内环筋构件的高品质成形。

E15-24**深冷轧制与时效处理制备高性能铝合金材料**喻海良*
中南大学**E15-25****基于纳米团簇的 NiTi 合金强度-延性-超弹性协同提升**萧遥*
同济大学

NiTi 合金是一种形状记忆合金，其服役安全性和功能稳定性由强度、延性和超弹性共同决定。本研究通过蒙特卡洛模拟确定纳米团簇的形成条件并阐明其演化机理，揭示纳米团簇诱导的强度-延性-超弹性协同增进机理，创新性地通过纳米团簇的精细调控突破了 NiTi 合金“强度、延性和超弹性难以兼顾”的关键瓶颈，成功制备抗拉强度> 1000 MPa，断裂延伸率>100%，超弹性可回复应变> 8%的高性能 NiTi 合金试样。相关成果对满足该材料在生物医疗、航天航空、土木工程领域的高性能制造与应用需求具有深远意义。

E15-26**AA2B06 铝合金激光局部热处理强化机理及对成形性的影响**杨宝成，张晓嵩，陈帅峰，宋鸿武，张士宏*
中国科学院金属研究所

针对航空用铝合金复杂钣金零件在整体成形过程中，易发生的大变形开裂、圆角贴模率低、成形质量差等问题，本研究采用一种新型的坯料前处理技术—激光局部热处理制备铝合金差性板技术来改善成形条件。以航空中常用的 Al-Cu-Mg 系中 AA2B06 铝合金为研究材料，通过对激光热处理温度场分布特征分析，提出了合理的 AA2B06 激光热处理制度，并针对其在短时固溶时效作用下的微观组织变化，特别是析出相的演化行为进行研究，揭示了激光热处理条件下 AA2B06 铝合金的强化机制；进一步通过二次开发实现了差性坯料材料模型建立和有限元网格梯度性能自动化赋予，并结合拉深成形有限元模拟揭示了激光局部热处理差性板材的成形能力提升的机理；在此基础上将改技术应用于某款典型航空复杂口框类钣金零件，制造出了形状和尺寸精度均满足要求零件，实现了该类零件整体高效成形。

E15-27**碳基材料瞬态高温微纳连接及其结构、功能性质研究**闫耀天，亓钧雷*
哈尔滨工业大学

碳基材料是一种重要的非金属材料，以高稳定性、化学稳定性和卓越的力学性能而闻名。它们。其异形结构制备依赖于界面异质连接将简单结构组合而成复杂结构，且其修复也依赖于界面连接技术。此外，石墨烯、碳纤维、碳纳米管等新型微纳碳材料在能源转化、高效热管理等领域的应用对连接技术提出了新的要求。本报告着眼于典型宏观、微观碳基材料在高温力学承载、高效热疏导、高效能源转化等方面应用对连接技术的迫切需求，开发瞬态高温微纳连接技术实现宏观构件高温连接、微纳构件微连接，深入分析瞬态高温工艺-宏微跨尺度接头界面结构-结构、功能性质间构效关系，为先进碳基材料连接结构在航空航天、电子、冶金机械、新能源等领域的应用提供技术支撑。

E15-28**单晶铜多道次拉拔组织及织构演化多尺度分析**

陈新宇, 陈帅峰*, 杨宝成, 王松伟, 宋鸿武
中国科学院金属研究所

铜及铜合金丝线材由于其优异的导电及导热性能, 广泛应用于电线电缆、电子元器件传输线等领域。多道次冷拔是制备超细铜丝的关键工序, 在拉拔过程中铜丝由于受到复杂的应变路径影响, 导致其截面上的织构不均匀分布。通过 EBSD 实验观察到铜丝表面处和中心位置的织构演化存在着明显的差异性。产生这种差异性的机理通过多尺度计算的方法进行了仔细研究。首先, 自主开发了考虑网格重构、场量传递的适合多道次变形工艺的有限元仿真模拟平台, 深入研究了铜丝多道次拉拔过程中的宏观变形行为。其次, 将模拟得到宏观的力学响应作为边界条件输入 VPSC 中, 全面研究织构演化规律。结果表明, 铜丝织构在截面上呈差异性分布主要是由于受到不同剪切应变造成的。中心位置处铜丝主要受到正应变的作用, 而表面位置主要受到剪切应变的作用, 随着拉拔道次数的增加, 剪切应变作用的影响愈发明显, 最终导致了织构演化的差异。

墙报**E15-P01****原子动力学蒙特卡洛模拟揭示了铝中溶质-空位动力学及其在时效析出过程中的主导作用**

井水清^{1,2}、孔祥山^{1,2*}、张存生^{1,2}、赵国群^{1,2}、陈良^{1,2}

1. 山东大学金属成形先进设备与技术国家重点实验室
2. 山东大学材料液-固结构演化与加工教育部重点实验室

本研究利用原子动力学蒙特卡洛 (AKMC) 模拟系统研究了 50 种溶质元素在铝合金中的溶质-空位耦合扩散机制。计算所得的铝的自扩散系数及溶质扩散系数与第一性原理 (DFT-h-TST) 预测结果及实验数据高度一致, 验证了模拟方法的可靠性。与传统认识相反, 除 IB/IIB 族外的大多数过渡金属因溶质-空位相互作用为排斥型、交换势垒高, 呈现非空位介导的扩散行为。通过溶质-空位拖拽比分析发现, Mg 在所有温度下始终表现为负拖拽比 (对应逆 Kirkendall 效应), 而其他溶质元素的拖拽比则随温度升高由正 (空位拖拽扩散) 转为负 (逆 Kirkendall 扩散), 该转变行为符合 Boltzmann 函数趋势。该拖拽比转变温度与溶质-空位结合能呈线性相关 (Cu 除外)。进一步通过溶质-空位对寿命分析, 识别出一系列适用于时效控制的优选微合金化元素 (如 Ge、In、Se、La), 它们能在自然时效中有效捕获空位, 并在人工时效中实现毫秒尺度的快速释放。本工作揭示了铝合金中溶质-空位耦合扩散的原子尺度机制, 并为合金设计及热处理工艺优化提供了理论指导。

E15-P02**铝合金中锂致晶界脆化的原子尺度机制: 第一性原理研究**

冯国箏, 孔祥山*

山东大学材料学院模拟计算组

本研究基于第一性原理计算, 系统探究了锂 (Li) 原子在铝 (Al) 晶界的偏析行为及其对界面力学性能的影响机制。研究表明, 孤立锂原子与多数晶界呈现弱相互作用, 其结合行为与晶界局域电荷密度分布特征密切相关。随着锂浓度的增加, 不同晶界处呈现出差异化的锂原子聚集行为: 在 $\Sigma 5(310)$ 、 $\Sigma 17(410)$ 和 $\Sigma 13(320)$ 晶界中形成沿倾斜轴分布的一维线性链结构, 而 $\Sigma 5(210)$ 晶界则表现出独特的二维锂单层稳定构型。锂偏析主要通过诱导相邻铝原子间的电子密度局域性降低来削弱界面内聚力。值得注意的是, 不同类型晶界对锂偏析的敏感度存在显著差异: $\Sigma 5(210)$ 和 $\Sigma 43(335)$ 等晶界因锂偏析易发生界面脆化, 而 Σ

3(112)和 $\Sigma 17(223)$ 等晶界则基本保持原有界面结合强度。基于原子尺度机理分析，本研究提出晶界工程优化策略—通过选择性调控晶界结构，优先保留锂耐受型晶界构型，同时抑制锂敏感型晶界的形成。该策略为在保持铝锂合金轻量化优势的同时提升其抗断裂性能提供了理论指导和技术路径。