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

C10-微结构与强韧化
C10-Microstructure and Strengthening-toughening

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: https://cmc2025.scimeeting.cn

C10.微结构与强韧化

分会主席：黄崇湘 、李秀艳、张勇、黄天林

C10-01

原子尺度微观结构设计加工获得高应力长蠕变寿命镍基单晶高温合金

韩晓东 [1]
Beijing University of Chemical Technology

C10-02

低合金高性能镁合金析出调控与强韧化机制

王慧远
河北工业大学

C10-03

打破材料性能悖论 - 从成分设计到微观结构调控

赵永好*
Hohai University
Nanjing University of Science and Technology

现代产业的飞速发展需要材料同时具有多种优异性能，但材料的很多优异性能难以相互共存，比如金属的强度和塑性、强度和导电性/热稳定性，电池材料的能量密度和功率密度，热电材料的导热性和导电性，磁性材料的矫顽力和磁化强度，介电材料的击穿强度和极化强度，铁电和铁磁材料的矫顽电场强度和极化强度，阻尼材料的阻尼因子和弹性模量，催化材料的催化活性和催化点数等。报告人针对纳米金属强塑性互斥的科学难题，提出了多种增韧方案(第二相纳米析出增韧、孪生变形增韧、降低位错密度增韧、引入多尺度晶粒分布增韧等等)，是国际上纳米金属强韧化的早期研究者之一；针对强度和导电率/热稳定性难以共存的难题，提出“材料微观结构的宏观设计”和“分形结构的定向构筑”新理念；针对高熵合金，揭示单相 FeCoNiCrMn、FeCoNiMoV 和双相 FeCoNiAlCr 高熵合金的强韧化机理和变形机理，揭示 Ni2Co1Fe1Mo0.2V0.5 中熵合金高温加工硬化机理和蠕变机理；并通过多级有序相实现了 Ni2CoFeV 中熵合金的高强韧化。

C10-04

基于微结构构型化的高强韧硬质材料制备与应用

刘颖*
四川大学

钨、钛等碳/氮化物等制成的硬质材料制品是重大装备及高效制造不可或缺的“工业牙齿”与核心精密功能部件。我国是钨、钛资源及生产大国，但硬质材料产业却大而不强，高端刀具、工模具、轴承等先进工具部件长期依赖进口，难以满足能源化工、航空航天和核能开发等重大装备的创新发展需求。其核心瓶颈在于难以实现硬质材料“高硬、高强、高韧”综合性能的协同发展以及面对极端工况下的跨温域、跨载荷服役考验。为此，团队基于微纳结构构型化制备加工理论，创新发展了高强韧高硬碳化钨基硬质合金、碳氮化钛基金属陶瓷、宽温域高温自润滑复材及其制品的制备理论与加工新技术，并成功应用于我国化石能源开采、核能开发、航空装备制造等国家关键战略领域，为相关领域发展提供材料技术支撑。

C10-05

SEM 中的晶体缺陷定量定性分析方法

沙学超

C10-06

有序-无序核壳纳米结构提高纳米晶金属材料强塑性匹配

段峰辉[1]，李倩[2]，杨涛[3]，吕坚[4]
香港城市大学

基于对“晶内有序超点阵结构”和“晶界纳米无序化”的精细调控，我们在多组元 NiCoFeAlTiB 合金中开发了一种“有序-无序”的核壳复合纳米结构。该合金具有多元素共偏析诱导的超薄无序面心立方 (fcc) 纳米层 (~3 nm)，将有序超晶格晶粒包裹起来。与传统金属间化合物的脆性沿晶断裂相比，该界面 fcc 纳米层具有出色的本征塑性，可有效促进位错成核并协调相邻晶粒的塑性变形兼容性。利用这种“有序-无序”核壳纳米结构，该新型纳米晶合金表现出了高抗拉强度和高均匀伸长率。此外，多组分晶界纳米层有效降低了晶界迁移驱动力和速率，实现出色的强度-延展性-热稳定性组合。综上所述，这一独特的设计策略有望用于开发更多的高性能结构材料。

C10-07

β/β’铬基高温合金的微观结构设计与调控

马衍*[1]、Thomas Blackburn[2]、Alexander J Knowles[2]
1. Department of Mechanical Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong, China
2. School of Metallurgy and Materials, University of Birmingham, Birmingham, United Kingdom

铬基合金作为新一代光热能发电系统候选材料（工作温度＞800℃），兼具高熔点、低成本及优异抗氧化特性。然而，其高温强度、低温韧性及蠕变抗力等性能有待提升。本研究在铬基 bcc-A2 固溶体（β 相）中引入金属间化合物（B2-NiAl）强化相（β'相）,构建出类似于镍基高温合金 γ/γ'强化结构的 β/β'型铬基高温合金体系[1,2]。基于 CALPHAD 计算设计方法，通过引入 Fe 元素进行显微组织调控，提高 Ni、Al 固溶度有效提升了析出相体积分数，研究在 Cr(Fe)基体中通过简单两段式热处理成功制备出晶格错配度约 0.1%的纳米级 B2-NiAl 共格析出相。相较于铁素体合金、钴基及镍基高温合金，该新型铬基高温合金在 1000℃下展现出显著优势：粗化抗力提升，高温抗压强度达到 320 MPa，形变机理主要为 Orowan 机理。本研究为优化铬基合金设计和开发新型高温合金提供了实验基础和理论依据。

C10-08

强度-塑性优异协同的 3D 全梯度结构不锈钢板材

石银冬*
河北工程大学

采用扭转技术构筑的由表及里的全梯度结构赋予了金属棒材优异的强度-塑性协同。但是该技术很难应用到金属板材，因其轴对称性较低。本研究利用循环扭转(CT)在 304 不锈钢板材中成功构筑了一种新型 3D 全梯度结构(3D-GGS)，使得 304ss 板材比全梯度结构 304ss 棒材具有更优异的强度-塑性结合。提升的强度归因于位错、α′马氏体的引入以及新型 3D-GGS 诱发的 HDI 强化。拉伸变形过程中，揭示了一种独特的 TRIP 效应，即先激活反向马氏体相变(α′→γ)，经过一定应变后再转变为正向马氏体相变(γ→α′)。反向和正向 TRIP 效应有助于提高塑性。此外，3D-GGS 产生的 HDI 加工硬化也有助于保持高塑性。本研究开发了一种实用的方法来构建 3D 全梯度结构，以提高金属板和构件的综合性能，而不改变其尺寸规格。

C10-9

异构设计纯钛的低温力学性能及机制

马晓龙*[1]、苏武丽[2]、王明赛[2]、郭凤娇[2]、冉昊[2]、程乾[2]、王清远[2]、朱运田[1]、黄崇湘[2]
1. 香港城市大学
2. 四川大学

异构纯钛在低温下具有极高的强度（屈服强度~1200MPa）和优异的延伸率（均匀伸长率~17%，总延伸率 27%），突破了传统均匀结构在低温服役条件下的强度-塑性匹配瓶颈。系统实验表明，异构钛具有优异低温力学性能的原因在于：低温放大了异构单元域之间的力学不相容性，并同时抑制了位错交叉滑移。首先，与室温环境相比，低温增强了 Hall-Petch 系数，增大了异构单元域之间的力学不相容性，从而强化了异构单元域在塑性变形过程中的应变配分效应。其次，低温抑制了位错交叉滑移，而有利于平面滑移和位错堆积，在不引起裂纹拓展的前提下进一步放大了 HDI-应力的硬化效应。这一研究成果不仅有助于深入理解低温条件下异质结构材料的变形行为，还为设计高性能低温应用材料提供了新的思路。

C10-10

MRL 期刊报告

待定

C10-11

TiAI 合金中碳化物的演变与强韧化机制研究

刘咏[1]，王丽[2]
中南大学粉末冶金国家重点实验室

γ-TiAl 合金由于其优异的力学性能和较低密度，已成功应用于商用航空发动机低压涡轮叶片。为继续提高γ-TiAl 合金的服役温度，通过 P-Ti3AlC 碳化物强化可以进一步提高合金的抗蠕变性能。本研究采用先进微观组织表征手段，系统分析了该碳化物在不同热处理和蠕变条件下的演化及其变形机制。结果表明，P-Ti3AlC 碳化物在热处理初期以针状形貌共格析出于γ基体中，随着热处理的进行，受周围碳化物弹性应变场的影响，其演化随热处理方式不同而发生改变。由于碳化物与基体存在晶格错配，导致沿针状方向出现碳化物成分的周期起伏。在弹性相互作用和成分起伏驱动下碳化物发生分裂，形成片面沿(010)和(100)取向的亚颗粒聚集体。由于γ基体的正交性，分裂后细小碳化物之间的γ基体重新取向。蠕变过程中，碳化物可以被位错剪切形成层错结构，有效阻碍位错运动。同时碳化物分裂构型亦增强位错钉扎效应，提升 TiAl 合金的高温抗蠕变性能。

C10-12

工程合金使役性能的微结构调控

郑士建*
天津市材料层状复合与界面控制技术重点实验室，材料科学与工程学院，河北工业大学，天津 300401

以高温合金和钛合金为代表的工程合金在满足航空等国家重大需求方面发挥了关键作用，但其使役性能仍然受制于塑韧性不足的共性难题。通常微结构调控是改善材料强韧（塑）性矛盾的主要途径。然而，目前对调控机制的认识主要源于理想模型材料室温简单力学加载条件，并不能精确揭示使役条件下导致工程合金断裂等失效行为的微观机制。界面是典型的结构强化元素，也是引发断裂失效的重要源头。因此，本研究以工程合金中的界面为主要研究对象，发展了原位电子显微学技术，解析了（近）使役条件下位错与界面交互作用机制，并建立了工程合金界面塑韧化策略，实现了工程合金的塑韧性倍增。

针对蠕变条件下界面失效问题，发现位错诱发第二相析出以及强化相界面分解开裂现象，阐明位错塞积引起的局部相变及界面开裂微观机理，并通过析出相控制优化了高温合金的组织和性能。针对疲劳条件

下界面增韧需求，发现界面诱发孪晶形核以及孪晶与第二相交互作用产生扭折变形现象，阐明了界面台阶促进位错增殖的界面增韧机理，并开发了 1500 MPa 级界面强韧化钛合金。

C10-13

钛的超高本征断裂韧性

韩卫忠
西安交通大学

C10-14

Developing ultrastrong and ductile ordered intermetallic alloy via 3D printing

Tao Yang*
City University of Hong Kong

Ordered intermetallic alloys are renowned for their impressive mechanical, chemical, and physical properties, making them appealing for various fields. However, practical applications of them have long been severely hindered due to their severe brittleness and poor fabricability. It is difficult to fabricate such materials into components with complex geometries through traditional subtractive manufacturing methods. Here, we proposed a strategy to solve these long-standing issues through the additive manufacturing of chemically complex intermetallic alloy (CCIMA) based on laser powder bed fusion (LPBF). The developed CCIMA exhibits good printability, enabling a crack-free microstructure with a low porosity of 0.005%. More importantly, a good combination of high tensile strength (~1.6 GPa) and large uniform elongation (~35%) can be achieved, which has not been reported in the existing additive-manufactured alloys. Such properties are attributed to the structural and chemical features of highly ordered superlattice grain decorated with disordered interfacial nanolayer, as well as dynamic evolutions and interactions of multiple dislocation substructures. These findings could provide references for developing high-performance intermetallic alloys and accelerating their practical applications.

C10-15

六方金属位错/孪晶调控机制与强韧化

吴昊*[1]、范国华[1]、耿林[2]
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。

C10-16

Mo-14Re 合金电子束焊接接头孔隙缺陷萌生机理

杨俊宙*、胡平、王快社
西安建筑科技大学

Mo-14Re 合金因其优异的高温力学性能与抗辐射性，被广泛应用于航空航天及核能领域，但其焊接接头中孔隙缺陷的存在严重损害了材料力学性能。本研究综合显微表征方法与晶体塑性有限元模拟，揭示了不同区域孔隙缺陷的形成机制及其与位错背应力的关联。实验通过 OM、SEM、EDS 及 TEM 发现：WZ 晶界孔隙源于 MoO 与 CO 气泡的聚集。熔池非平衡凝固引发化学反应，MoO 和 CO 气泡转化为低熔点 MoO3

和 C 并残留于孔隙中，最终形成晶界气孔缺陷；而 FZ 晶内孔隙则源于母材内部气泡进入熔池后因熔池剧烈扰动未能逸出，最终被包裹于晶粒内部。有限元模拟进一步表明，孔隙形成与位错运动和应力分布密切相关。在 FZ，施密特因子差异导致高施密特因子晶粒易发生显著位错滑移与变形，而低施密特因子晶粒变形能力较弱，引发晶界应力集中并抑制孔隙周围位错运动，加剧局部变形不均匀性，促进孔隙形成；在 WZ，晶界应力集中触发位错形核与扩展，导致塑性变形不均，局部区域变形不足形成孔隙。此外，FZ 较低的能量输入限制了亚晶界处位错运动，促使应力与背应力累积，加速孔隙缺陷产生；而 WZ 较高的能量则提升了位错应变能，使位错更易克服亚晶界阻力，减少应力积累。

C10-17

裂尖晶界消除及其本征特性研究

赵志福*
中国科学院力学研究所

具有高抗晶间断裂能力的晶界结构是晶界设计的首选。本文通过分子动力学模拟，研究发现 bcc 铁双晶在 I 型加载下裂纹尖端正前方的晶界能够被孪晶和位错活动消除。所有的孪晶带都是由原子沿孪晶方向的滑移形成的，而所有的位错都是由原子沿反孪晶方向的滑移形成的。晶界消除现象显著依赖于裂纹扩展方向和裂纹面。Rice 提出的经典公式不能解释两个相互依赖特性。通过计算裂纹尖端原子的剪切应力，本文发现晶界消除对裂纹扩展方向的依赖是由于原子滑移特性的改变。晶界消除发生在特定的生长方向，在这些方向下原子滑移由{112}<111>驱动。考虑 T 应力效应，本文对 Rice 经典公式进行了改进，从而很好地解释了晶界消除对晶界面的依赖特性。晶界消除对晶界面的依赖是由于孪晶、位错形核和脆性开裂临界应力强度因子的复杂变化。T 应力使孪晶和位错形核的临界应力强度因子显著低于脆性开裂的临界应力强度因子。此外，本文发现在 I 型加载下，扭转晶界无法被消除，而倾斜晶界可能被消除。研究工作对通过晶界设计提高材料抗断能力具有重要意义。

C10-18

CoFeNi 基非等原子比多主元合金的多重析出机制

李慧*
上海大学

纳米相在材料中高密度的弥散析出能够起到很好的强化效果。单一的强化相有时不能提供足够的强化效果，因此，多重析出强化受到了广泛的研究。本工作设计并通过混合合金粉末法利用增材制造技术制备了一种添加少量 Mo、Al、Cr 的非等原子比 CoFeNi 基多主元合金，通过时效热处理可形成铁素体基体与多种高密度纳米析出相的微观组织特征。利用扫描电子显微镜（SEM），透射电子显微镜（TEM）和原子探针层析技术（APT）对该合金的多种纳米相的析出序列及析出机理进行了分析。合金时效过程中先后析出了富 NiAl 原子团簇、富 NiAlMo 第二相、基于调幅分解的 α′富 Cr 相，且在制备过程中引入了高密度的 AlO 纳米相。这些纳米相在 400℃时效时具有高度的稳定性，并起到了多重析出强化作用，使合金的硬度值最大达到了 693 HV，且硬度平台大于 200 h，合金具有较好的热稳定性。基于实验结果，分析了不同析出相之间的交互作用规律及强化机理。

C10-19

Ti/Nb 层状复合材料各向异性力学行为的原位同步辐射衍射研究

姜爽*、贾楠
东北大学

以具有简单层状构型的 Ti/Nb 复合体作为模型材料，借助基于同步辐射光源的高能 X 射线衍射技术揭示了其在单轴拉伸载荷下的各向异性塑性和损伤行为。综合分析晶格应变、应力配分、微观变形机制、应力状态等演化特征，揭示了两种加载方向下该材料塑性变形的不明显差异（即相近的屈服强度、抗拉强度、

应变硬化）与晶粒形态、残余应力、织构、位错演化的关联性。颈缩后，Ti/Nb 多层材料沿横向加载时所表现出的更快性能退化，归因于 Nb{211}晶粒更大的应力三轴度及 Ti-Nb 异质界面的普遍脱粘，该三轴应力状态促进了 Nb 内部的微孔洞生长。这些结果将有助于推动金属层状复合材料的设计与性能优化，并为异构金属/合金走向实际应用提供理论指导。

C10-20

高层错能纳米晶纯铂的 Schwarz 晶体及其性能

傅皇留、周鑫、高志鹏、金朝辉、李秀艳*、卢柯
中国科学院金属研究所

近期研究者在晶粒尺寸 10 nm 以下的多种金属中发现了由高密度孪晶和极小面晶界网络约束的新型亚稳态结构--Schwarz 晶体，并具有极优异的性能。本工作通过冷轧和低温高压扭转两步变形法，将普遍认为无法产生孪晶的纯 Pt 晶粒从 140μm 细化到数纳米，发现晶粒尺寸小于 17nm 时变形孪晶开始出现，Schwarz 晶体的结构形态在晶粒尺寸小于 4nm 时被发现。Schwarz 晶体在接近熔点的温度下保持稳定，与分子动力学模拟结果一致。另一方面，随着晶粒尺寸细化至极限尺度，显微硬度单调增加到 12.9 GPa，显示出延续的 Hall-Petch 关系。其出色机械稳定性归因于晶粒尺寸极限处的塑性变形仅受孪生过程的限制，该尺度下晶界处孪生不全位错的形核和弓出都极其困难。其超高热稳定性的来源是晶粒的几何形状效应，具有极小面结构特征的 Schwarz 晶体平衡了晶格的各向异性和热涨落带来的驱动力，从而抑制晶界的迁移和滑动。该工作为极限尺寸纳米晶的制备提供了参考并进一步理解了 Schwarz 晶体结构的性能及机制。

C10-21

新型纳米 Hf2N11 相克服核用级 FeCrAl 合金强度-延展性平衡

彭学诚、郭汉杰、罗乙娲*
北京科技大学

新一代的 FeCrAl(FCA)合金作为核燃料包裹层材料在核能领域具有巨大的运用前景，但由于低中子吸收截面限制，要求 FCA 合金具有优异的强韧性以满足超薄层在高温环境的服役要求。本研究提出了在 FCA 合金中利用 Hf 原子的尺寸效应，通过优化 N 原子浓度合成一种新型纳米多氮化物（Hf2N11）。在几乎不损伤 21%的延展性前提下，合金强度提高了近 50%至 800MPa 左右。软质纳米 Hf2N11 粒子强烈地刺激位错增殖，且均匀地分散位错集中。进一步，通过抑制再结晶过程发展，调控合金形成亚微米级超细晶结构，以此来弥补剪切机制强化效应弱的缺点。事实证明，纳米 Hf2N11 属于非稳态结构，合理 N 浓度会诱导大尺寸块状 HfN 向纳米 Hf2N11 转化，促使位错运动机制从绕过机制逐渐转变为剪切机制，避免应力过早集中。这是含 Hf 类的新型纳米氮化物在 FCA 合金中首次成功运用，是对于 FCA 合金强度与韧性矛盾问题的成功挑战。

C10-22

Dynamic hetero-deformation induced hardening through strength reversal between hetero-zones in austenite-ferrite duplex steel

Tengyuan Liu*, Xiao Zhang, Pei Wang, Yuntian Zhu, Dianzhong Li
Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences

The use of heterostructured materials has proven to be an effective strategy for achieving strength–ductility balance, which is attributed to hetero-deformation induced (HDI) hardening between the hetero-zones. However, almost all heterostructured materials face an issue: the inherent contradiction between back stress hardening in soft zones and the damage caused by excessive localized strain in these zones. Using austenite-ferrite duplex steel as a model heterostructured material, we revealed a surprising strength reversal between the hetero-zones during room temperature uniaxial tension. Sample exhibiting this unique phenomenon achieved simultaneous

enhancements in both strength and ductility, offering fresh perspectives for addressing this contradiction. Multi-scale in-situ experiments, combined with crystal plasticity simulations, revealed that the improvement in mechanical properties is attributed to strong strain/stress partitioning between the hetero-zones, as well as a sustainable, dynamically reinforcing HDI hardening mechanism triggered by strength reversal. Strength reversal allows hetero-zones to alternately bear strain, preventing premature damage from excessive strain in the initially soft zone. Importantly, the initially hard zone begins to provide back stress once the initial soft zone exceeds its strength. Alternate back stress between the hetero-zones ensures high sustained HDI hardening rather than exhaustion, thereby increasing strength. We also systematically discuss how the hardening ability of the initial soft zone and its content influence the occurrence of strength reversal and the critical engineering strain at which it occurs. Finally, we propose a novel, dynamic HDI hardening mechanism, which expands the conventional HDI theory and provides new insight for designing heterostructured materials with superior mechanical properties.(Acta Materialia, https://doi.org/10.1016/j.actamat.2025.121120).

C10-23

三级异构 VCoNiAlTi 多主元合金的力学性能及加工硬化机制研究

马彦*

中国科学院力学研究所

金属材料的加工硬化能力是缓解强度-塑性本征矛盾关系的关键。本文通过在 VCoNiAlTi 多主元合金中构筑微米尺度异质晶粒基体耦合纳米析出相和亚纳米短程有序结构实现强化和韧化。该三级异构合金表现出 1.5 GPa 屈服强度和 18%均匀塑性的性能匹配。微结构表征发现基体中超细晶与细晶界面的位错塞积承担主要的塑性变形。短程有序结构和变形孪晶与位错的交互作用共同提高了材料的加工硬化能力。

C10-24

基于压致微结构的 Al-Si-Cu-Mg 合金强化机理研究

方宁*[1,2]、朱冬冬[1]、魏尊杰[2]

1. 台州学院

2. 哈尔滨工业大学

采用 GPa 级超高压打破 Al-Si-Cu-Mg 合金中共晶 Si 生长的平衡状态并构建高密度纳米 Si 沉淀相的亚稳析出环境，实现合金 Si 元素存在形式的双重正向调控。结果表明：随着压力的升高，α-Al 相的分枝倾向逐渐减弱，共晶 Si 出现层片状至珊瑚状的形态转变。在 5GPa 压力下，合金中生成了多层级共晶结构，在 6GPa 压力下可得到超饱和完全固溶体合金。合金经固溶时效处理后，基体中主要生成 θ'相，经第一性原理计算可知 Si 元素倾向于取代 θ'相内部原子从而偏析在 Al/θ'界面处，起到降低界面应力的作用。合金经直接时效处理后，基体中生成了细密且平行于$\{100\}_{Al}$面生长的非常规纳米 Si 沉淀相，经三维原子探针(3D-APT)分析可知 Si 相内部富集 Mg 元素，其与基体界面处存在 Cu 元素偏析。6 GPa 压力下制备的合金在时效处理后表现出最佳的力学性能，硬度达到 259.6 HV，压缩强度达到 1161.8 MPa。

C10-25

层状材料在三维构筑中的跨尺度力学传递机制及界面强韧化研究

庞震乾*

浙江大学

低维基元构筑材料通过层间与链间的界面复合实现结构组装，其力学性能与微观结构间存在复杂的关联机制。由于微纳尺度下特有的原子相互作用，传统界面力学研究需兼顾宏观尺度中缺失的微观效应。尽管层状微纳米材料展现出高强度、高韧性和低密度等优异特性，但将其作为基元构筑宏观三维材料时，材料的整体性能较其低维单元显著下降 2~3 个数量级。本研究聚焦共价有机框架（COFs）材料，揭示其从单

层到三维结构力学性能传递失效的微观机制，通过第一性原理计算，发现传统 COFs 三维构筑中层间依赖弱缠结作用极易导致界面滑移失效。对此引入甲氧基功能化界面，通过构建氢键-共价键协同网络，分析 AA 堆垛 COFs 层间界面滑移的抑制机理提出界面强韧化策略。进一步针对晶格扭转角对界面滑移动力学的影响规律研究，通过分子动力学计算模拟提出普适性的 COFs 材料界面强韧化机制：氢键网络通过动态键重组耗散应变能，协同共价键维持结构完整性，使三维 COFs 在保持单层本征力学性能的同时，兼具结构稳定性，为跨尺度超材料设计提供了理论范式与可扩展的技术路径。

C10-26

多组态 α 相调控实现双相钛合金强韧化

姚凯*、何宝利、王志新、郑士建
河北工业大学

钛及钛合金因其比强度高、耐腐蚀性好、无磁性等优异的综合性能在航空航天、舰船、核电等重要领域及石油、冶金、化工、生物医学等民用市场有着广泛的应用。然而，目前高强钛合金的屈服强度要求是 1300 MPa，延伸率不低于 5%，普遍具有较高的屈强比，展现出有限的加工硬化行为。在钛合金典型的四种显微组织中，等轴组织往往具有最优的塑性，但是其强度受限；而为了进一步提高强度，普遍采取的方法是通过复杂的热-机械处理引入次生 α 相(αs)，但不可避免地引入晶界 α 相(αGBs)，其与 β 转变组织(βt)之间易产生应变失配，导致塑性的显著降低。因此，基于典型的四种显微组织难以实现钛合金强塑性的突破性改善。

本研究基于广泛应用的 Ti-6Al-4V(TC4)合金，通过热-机械处理设计得到具有多组态 α 相分布的 TC4 合金，以期通过提高其加工硬化率的方式实现塑性的提高。研究了不同显微组织(α 相双峰组织、片层组织)的 TC4 合金的拉伸力学行为响应，基于循环加载-卸载拉伸试验、EBSD 和 TEM 对原始/变形显微组织表征阐明了 TC4 合金中多组态 α 相的形成机制以及具有多组态 α 相合金呈现出优异加工硬化行为的作用机理。

对于锻造后的 TC4 合金于 950 ℃ (α+β 双相区)进行热轧后水冷，之后于 800 ℃保温 30 min 后水冷，得到的 TC4 合金由粗大的初生等轴 α 相(约为 40~60 μm)、超细的等轴次生 α 相(约为 1-10 μm)以及等轴残留 β 相(约为 1-5 μm，其中部分晶粒包含细小的片层 αs 相)组成，α 相尺寸呈现出明显的双峰分布特征。具有多组态 α 相的 TC4 合金的屈服和抗拉强度分别达到 786 MPa 和 1002 MPa(屈强比为 0.78)，延伸率达到 20%，呈现出显著的加工硬化率，优于目前使用的 TC4 合金材料。大尺寸初生 α 相以及细小的次生 α 相之间诱发显著的背应力强化是其具有显著加工硬化的主要原因；在均匀塑性变形阶段，在大/小晶粒的 α 相中均诱发大量的<c+a>位错产生；此外，在非均匀塑性变形阶段，粗大的初生 α 相内部诱发{10-12}<-1011>拉伸孪晶，有利于释放局部应力集中，延缓裂纹的快速扩展。本研究成果丰富了钛合金的组织类型，获得的具有双峰分布等轴 α 相的 TC4 合金具有的显著加工硬化行为对高强韧钛合金的组织调控提供了新思路。

C10-27

机理驱动的广义应变梯度本构模型及其在异构材料中的应用

赵建锋、张旭*、康国政
西南交通大学

本研究建立了一种基于位错机制的广义应变梯度塑性本构模型，同时引入了一阶与二阶应变梯度效应，以刻画异构材料中的强化与变形机制。一阶应变梯度效应源于几何必需位错的积累及其与其它位错之间的短程相互作用，并通过 Taylor 硬化模型描述；二阶应变梯度效应则通过一个应变梯度相关的背应力项描述，该项反映了几何必需位错的空间非均匀分布所产生的内应力场。在模型有限元实现中，基于非局部方法求解几何必需位错密度和背应力，有效地捕捉了界面附近的几何必需位错积累及其所带来的强化效应，从而克服了传统低阶应变梯度塑性模型在处理内部边界条件方面的局限性。本模型被应用于多种代表性材料体

系，包括钝化薄膜（硬边界）、由软硬层交替构筑的层状材料（硬-自由边界过渡）以及由软硬相混合组成的双峰结构材料（兼具边界过渡与复杂应力场）。模拟结果成功再现了多尺度异构材料的力学响应，定量关联了其微观结构和宏观力学性能，并揭示了几何必需位错密度、统计储存位错密度和背应力等微观内变量的演化特征与协同强化机制，表明该模型可作为异构材料微结构设计与优化的重要工具。

C10-28

异构 CNTs/2009Al 复合材料的塑性变形行为研究

康庆宇[1,2]、杨沐鑫*[1,2]、刘振宇[3]、袁福平[1,2]

1. 中国科学院力学研究所，超常环境非线性力学全国重点实验室，北京 100190

2. 中国科学院大学，工程科学学院，北京 100049

3. 中国科学院金属研究所，师昌绪先进材料创新中心，沈阳 110016

碳纳米管 (CNT) 增强铝合金复合材料长期面临高强度与高塑性难以兼得的挑战。对此，本研究在传统热等静压和粉末冶金的基础上，开发包覆温轧及后续二次退火方法，制备出一种双模异构 CNT/2009Al 复合材料。相应力学性能测试表明，与传统热等静压态样品相比，双模异构样品的拉伸屈服强度和均匀延伸率分别提高 59%和 73%。微观结构显示，双模异构样品晶粒呈现显著细化的双尺度分布，有效增加强度；形成了以{011}<522>和{113}<332>为主的高施密特因子板织构，其平均 Schmid 因子由 0.31 提升至 0.45，增强变形协调能力；同时，部分 Al_2Cu 相发生回溶、尺寸减小并弥散化，有效抑制裂纹萌生。进一步分析表明，宏观外加塑性应变主要由相对粗大的拉长晶粒承担。这些拉长晶粒的细化、扁平化及局部织构转变促进多滑移系启动，显著增强异质变形诱导变形协调行为。此外，二次温轧促进 CNTs 分散、降低团聚，减小增强相界面局部失稳风险，进一步促使均匀塑性提升。

C10-29

基于第一性原理计算和机器学习的溶质偏聚铝晶界强度预测

张轩[1]、张亮*[1,2]、黄晓旭[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

溶质原子的晶界偏聚对纳米晶铝合金力学性能起着关键作用。本研究通过高通量第一性原理计算和机器学习方法，系统研究了 52 种溶质元素在五种铝晶界的偏聚行为及其对理论强度的影响。研究构建了一个涵盖了晶界结构、溶质-基体相互作用及溶质本征属性等相关特征描述符的数据集。研究发现碱金属、碱土金属以及类金属的偏聚能通常随着原子序数的增加而逐渐降低；而过渡金属的偏聚能则呈现出随原子序数变化的正弦波动趋势，而其晶界强化效应呈现出凸形曲线关系。不同的晶界结构会影响溶质的偏聚行为及其对晶界强度的作用。构建了用于分类（判断溶质为强化或削弱）和回归（预测具体强度值）任务的机器学习模型，其中 XGBoost 分类模型和梯度提升回归模型因其较高的交叉验证准确率而被选为最佳算法。通过 SHAP 方法对模型进行解释性分析，发现电负性、熔点、电荷转移量、自由体积以及体模量是预测强度最关键的特征。电荷转移量和溶质的杨氏模量对晶界强度有正面影响，而较大溶质原子半径和自由体积则会降低强度，突显了电子相互作用与局部结构畸变之间的协同作用。回归模型在铜晶界强度预测时也表现出良好的可迁移性。本研究所提出的第一性原理与机器学习相结合的研究框架，揭示了溶质对晶界强度的影响机制，为通过晶界偏聚工程设计高性能铝合金提供了理论基础与方法支持。

C10-30

三级异构 VCoNi 基中熵合金诱导优越拉伸性能

徐璐珂、马彦、袁福平*

中国科学院力学研究所

本研究通过在 VCoNi 基中熵合金中构建三级异质结构，获得强度与塑性性能匹配。三级异质结构包括

原子尺度化学短程有序 (CSRO) ，纳米尺度 B2 沉淀和微米尺度的晶粒尺寸异构。该种微结构具有优异的力学性能，其屈服强度为 1.1~1.5 GPa，伸长率为 18~35%。与粗晶相比，异构表现出明显的硬化现象，并且由于异质变形诱导硬化而增强了硬化行为。其中，粗晶样品以平面滑移和泰勒晶格来协调变形。三级异构变形机制更为复杂，包括平面和波状位错、变形孪晶、层错和 lomer-cottrell 锁以提供硬化。同时，纳米级 B2 沉淀阻碍位错运动，位错在界面堆积。此外，基体内的 CSRO 有效地延缓了位错的运动，从而产生了硬化效应。异质微观结构可以有效增强应变硬化，并在获得优异强塑性方面具有巨大潜力。

C10-31

溶质原子晶界偏聚对纳米铝合金塑性变形机制影响的分子动力学研究

廖卓晶[1]、张亮*[1,2]、黄晓旭[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

利用溶质原子在晶界偏聚制备高性能铝合金是一种有效的材料设计策略。然而，在极小晶粒尺寸下溶质元素在晶界处的偏聚行为和对铝塑性变形机制的影响尚不清楚。本文通过分子动力学模拟研究了溶质 Cu 和 Mg 原子在多晶铝和双晶铝中偏聚对晶界结构和力学性能的影响。结果表明，溶质 Cu 能够显著提高晶界的体积分数，而 Mg 偏聚对晶界的体积分数影响不大，这与溶质原子在晶界处的偏聚行为不同有关。溶质 Cu 和 Mg 在晶界处偏聚都能通过抑制晶界滑动提高材料的峰值应力，但溶质 Cu 在不同温度下对晶界滑动的抑制作用相比 Mg 都要更强。双晶拉伸结果显示，溶质 Cu 在小角度晶界处偏聚能够抑制本征位错在变形过程中分解，从而抑制晶界处位错形核，而在大角度晶界处偏聚对位错形核很难起到抑制作用。溶质 Mg 在大、小角度晶界处基本没有观察到对位错形核起到显著的抑制作用。

C10-32

异质结构与孪晶协同强化使 CoCrFeNi 高熵合金在极低温下展现出超常力学性能

樊巨川、黄崇湘、陆晓翀*
四川大学空天科学与工程学院

等原子比 CoCrFeNi 面心立方结构高熵合金在低温环境下表现出显著的强化效应和应变硬化能力，因而在航空航天领域具有重要应用前景。然而其强度仍无法满足工程应用需求。本研究通过多步短时退火工艺（总退火时间仅 6.5 分钟）成功制备了一种多级异质结构，该结构由粗晶区（~2.3 μm）、细晶区（~0.9 μm）和未再结晶区组成。该微观结构设计使材料在 293 K 和 77 K 下分别获得~859 MPa 和~1130 MPa 的屈服强度，同时保持~22.6%和~35.2%的均匀延伸率。这种异质结构通过独特的应变分配机制，最大限度地实现了异质变形诱导（HDI）强化和应变硬化。在低温环境下，HDI 效应得到显著增强，不仅促进了变形孪晶的形成，还进一步提升了应变硬化能力，从而实现了强度-塑性的优异协同提升。这些发现揭示了异质结构在调控高熵合金变形机制中的关键作用，为开发高性能低温金属材料提供了重要指导。

C10-33

Al-Cu-Li 合金中析出强化相形核及结构的原子尺度表征

杨庆波[1]、宁娅茹[2]、丁立鹏[1,2]、贾志宏*[1,2]
1. 苏州国家实验室
2. 南京工业大学

本研究通过原子尺度表征与第一性原理计算，系统揭示了 Al–Cu–Li–Mg–Ag 合金中 T1 相自早期 T1p 阶段向成熟 T1 阶段演化的全过程，明确了微合金元素 Mg 与 Ag 在 T1p → T1 转变中的关键作用。除了传统的异质形核路径外，实验首次直接观察到 T1p 在无预先位错参与的条件下，通过其内部形成的位错环或反平行位错对实现均质形核，拓展了对 T1 相形核机制的理解。转变过程始于 T1p 中 Al–Cu 层原子的有序重排，形成 Kagomé网络，并由此诱导肖克利不全位错（SPD）的激活与迁移。界面处 Li 和 Mg 原子的存

在被认为是驱动 SPD 形成的关键，Ag 元素则通过促进 Li 的稳定掺杂在转变过程中起到协同增强作用。该结构转变的后期受慢扩散 Cu 和 Li 元素控制。在结构表征方面，通过结合 HAADF、ABF 与 iDPC 扫描透射电子显微镜技术，清晰解析了析出相中 Li 的原子分布，发现 T1 相呈现一种由不共面的 Al(2)/Li(2)层构成的界面调控正交结构，该界面在不同厚度下均保持一致，与共面体相结构显著不同，并导致析出相的 c 轴长度和化学式随厚度变化。基于实验观测与密度泛函理论分析，建立了与 Cmmm 空间群相符的 Al–Cu 亚晶格新型有序堆垛结构模型，进一步提出了适用于稳定与亚稳 T1 相的统一原子结构模型，与已有模型相比更符合实际观察。此外，Al(2)/Li(2)界面层的自发褶皱机制可有效缓解沉淀物在基体中的应变，揭示了界面结构在调控合金强化机制中的关键作用。上述结果从原子尺度提供了对 T1 相演化路径及其微合金元素调控行为的深层理解，为铝合金高性能设计提供了理论依据与实验支撑。

C10-34

纳米析出异构金属最强析出尺寸的应变率和温度效应

袁福平*

中国科学院力学研究所

金属材料的强度和塑性存在本征矛盾，基于跨尺度力学原理和异构诱导硬化学术思想设计的异构/梯度金属能够突破高强度金属的塑性瓶颈。最近，我们设计和制备了晶粒尺寸和纳米析出相的双重异构/梯度结构，实现了更优越的准静态和动态力学性能，阐明了双重异构/梯度金属的动态变形和强韧化机制。共格纳米析出是强韧化的主要手段之一，在室温和准静态条件下，变形机制与析出相的尺寸密切相关，小尺寸时以位错切过机制主导，而大尺寸时以位错绕过机制主导，存在一个中间关键尺寸获得最高强度。基于位错与障碍物交互作用的热激活理论，我们推导发现最强析出尺寸与应变率和温度相关，应变率越高或者温度越低，最强析出尺寸越大。通过巧妙地控制析出相体积百分比和大小，设计不同应变率和温度的试验，证实了新理论模型。

C10-35

旋锻技术与材料适应性：结构设计的多样化

周凯旋[1]、赵永好*[2]

1. 南京理工大学

2. 河海大学

纳米结构材料可以通过改善微观结构而不改变化学成分来增强材料强度，显著减少了对合金元素的依赖，并展示了在工业应用中的潜力。尽管开发了多种制备方法，但要实现一个集成本低、控制简易、高纯度和大量生产于一体的制备方法仍然具有挑战性，因此纳米结构材料的大规模应用依然受限。为了解决这一挑战并推动纳米结构材料的工业化进程，必须开发能够同时满足上述要求的先进制备技术。为此，本工作采用旋锻为主要成形手段，通过结构调控，在低层错能 Cu-Al 合金中实现了无限长大块纳米晶材料的制备，在中等层错能的 Cu-Cr-Zr 及 Cu-Ni-Be 合金中构筑了分形结构，优化了其强度、延伸率及电导率的综合性能。本研究对大块纳米结构材料的工业应用具有重要的意义。上述结果发表于国际期刊 Composites Part B (2024, 276: 111371); Nano Today (2024, 56: 102234); International Journal of Extreme Manufacturing (2025, 7: 025101); Journal of Materials Science & Technology (2025, 236: 1-18); Journal of Materials Processing Technology (2024, 330: 118489)。

C10-36

Al-Cr-Fe-Ni-V 系高熵合金中多元析出相协同演变及性能调控研究

沈琴*[1]、李方杰[1]、刘敏[2]

1. 上海工程技术大学

2. 上海应用技术大学

高熵合金作为新型多主元合金突破了传统合金设计理念的束缚，具有优异的力学性能，开辟了合金新世界。面心立方（FCC）结构高熵合金塑性好，但强度偏低，通过引入第二相的方法有望提高其强度，使其获得广阔的应用前景。但高熵合金的多主元特性和迟滞扩散效应使第二相的析出演化变得复杂，探究高熵合金中第二相的形成规律及其与位错的作用机制是高熵合金研究领域的难点。本项目基于价电子浓度（VEC）和 d 轨道能级-原子半径差（Md-δ）设计了具有析出相的 Al-Cr-Fe-Ni-V 系高熵合金，研究原子尺寸效应和 Ni/Al 含量比对第二相析出动力学和演变规律的影响，揭示高熵合金中第二相的析出机制以期实现对其调控。在此基础上，探究高熵合金复杂的晶格畸变环境下第二相的析出强化机制。本项目的实施对于深入理解高熵合金中第二相的演变规律和强化机制以及设计兼具强韧性的 FCC 高熵合金具有重要的理论和实际意义。

C10-37

短程有序抑制 CoCrNi 纳米柱中的机械退火

曹阳
1.河海大学

经过 20 年的研究和发展，我们认识到纳米柱的应力-应变响应存在严格的标度定律，包括尺寸相关的位错成核，晶体塑性流动和应变率相关的塑性行为。所有这些标度定律都与非常高的表面积与体积比、非常小的体积以及有限的位错存储能力有关。显然，高表面积与微小体积是纳米柱的几何特征，因此不能随意改变。唯一具有较大可调范围的因素似乎就是位错存储能力。对于由纯金属或稀固溶体（大多数传统合金）制成的纳米柱，一方面塑性流动被限制在短则仅为几十或几百纳米的尺寸内；另一方面，晶格摩擦、溶质钉扎和位错缠结所施加的力不足以抵消镜像力、剪应力和位错间排斥力的综合作用。因此，位错（塑性应变载体）很容易逃离柱表面，导致机械退火。从这个角度来看，纳米柱中的位错存储能力十分有限。我们通过执行大规模原子模拟，研究了不同局部化学顺序和大量不同预先存在的位错密度的 CoCrNi 中熵合金单晶纳米柱的塑性变形，以证明通常观察到的机械退火可以被与化学短程有序相关的强局部 Peierls 摩擦力抑制。此外，我们在具有显著短程有序的 CoCrNi 纳米柱中观察到位错纠缠和累积，我们的工作首次展示了在对角线长度仅为几十纳米的单晶纳米柱中应变硬化的迹象。

C10-38

高强高韧轻质钢的异质结构设计及强韧化机理

程乾[1]、杨渤[1]、张超[1]、陈雪[1]、苏武丽[1]、陆晓翀[1]、梁剑雄[2]、曹文全[2]、黄崇湘*[1]
1. 四川大学
2. 钢铁研究总院

弥散铁素体通常被嵌入轻质钢中并表现出不错的性能，从而引发了一个问题：异质结构设计能否优化其力学性能？在此，我们构建了两种具有代表性的结构，其特征是非连续的纤维状和弥散状的铁素体分别嵌入奥氏体基体中，以解决上述问题。纤维状铁素体异质结构实现了优异的力学性能（强塑积高达 49 GPa %），显著优于其他轻质钢。优异的强度-延性协同作用主要归因于异质变形诱导（HDI）强化和硬化。相边界、奥氏体中密集的滑移带和铁素体内部的位错网络所赋予的丰富异质相互作用是潜在的物理机制。

C10-39

异质晶粒结构和双纳米析出轻质钢的断裂行为研究

王为*、王健
中国科学院力学研究所

Fe-Mn-Al-C 体系奥氏体轻质钢作为新一代轻质汽车用钢被广泛关注。由于其纳米级 κ'-碳化物析出和独特的动态滑移带细化机制，使其具有高强度、大延展性的特点。然而，传统 κ'-碳化物强化轻质钢在塑性变形过程中加工硬化能力较低，限制了其广泛应用。通过合适的冷变形和热处理在晶粒内部引入分散的非

共格 B2 颗粒，可以充分利用其强化效应并避免其带来的室温脆性。近些年来对于异质结构金属的研究表明通过构筑异构可以获得优异的强塑性匹配，原因在于异质变形诱导硬化提供了额外的应变硬化能力。本文在双纳米析出的基础上，在基体内构筑异质结构，研究其断裂行为。相比异质层状结构，多尺度异质结构样品在相似屈服强度水平下具有更高的断裂韧性。研究发现，裂纹尖端相邻区域的塑性变形机制主要为平面位错滑移和两个{111}平面上平行滑移带所形成的网络结构，滑移带网络的细化以及位错与析出相的相互作用提供了持续的加工硬化能力；此外，具有高密度 B2 析出相的样品在裂纹尖端形成了弥散分布的微裂纹，有效降低了裂纹驱动力，增加了能量耗散，从而显著提高了断裂韧性。本研究为高性能轻量化钢的设计提供了新的思路和方法，通过微观结构的精确调控实现了材料性能的显著提升，为轻质钢在航空航天、汽车等领域的应用提供了理论支持和技术储备。

C10-40

超分辨电子叠层成像技术在金属材料微结构解析中的应用

崔吉哲、于荣*
清华大学

近年来，超分辨电子叠层成像技术通过融合扫描透射电子显微术（STEM）与叠层成像算法，超越了像差校正电镜的 HAADF、ABF、iDPC 等传统技术，成为原子分辨结构分析领域的前沿技术 [1-4]。该技术具备四大核心优势：超高空间分辨率（原子/亚原子尺度）[5]、高剂量效率（适用于辐照敏感材料）[6]、高相位精度（定量重构样品相位信息）[7]以及深度分辨能力（三维结构解析潜力）[8]，为材料微结构的原子级解析提供了全新手段。

我们利用该技术研究了金属材料中若干微结构。在氧掺杂钛金属中实现了间隙氧原子的直接观测，并结合其深度方向上的纺锤形分布特征，揭示了间隙氧三维分布及其引发晶格膨胀的各向异性行为。在马氏体材料中对孪晶界面进行三维表征，发现孪晶面存在台阶结构，可能在塑性变形过程中作为位错源。

结果表明，超分辨电子叠层成像技术为金属材料中本征微结构的原子尺度解析提供了有力的工具，为强韧化机制研究提供可靠的结构数据，推动材料设计与性能优化。

C10-41

An Improved In-Grain Misorientation Axes Analysis for Slip Activity: A Case Study in a Magnesium Alloy

Jing Yang[1], Kunyu Xiao[1], Dexin Zhao[2], Chongxiang Huang[3], Xiaolong Ma*[1]
1. City University of Hong Kong
2. Department of Materials Science and Engineering, Texas A&M University, College Station.TX77843.USA
3. School of Aeronautics and Astronautics, Sichuan University, Chengdu 610065, China

In-grain misorientation axes (IGMA) analysis through electron backscatter diffraction (EBSD) microscopy has been extensively employed to unravel dislocation slip activity in deformed materials. Conventional IGMA analysis utilizes neighboring scanning points (i.e., consecutive pair) with low misorientation angles. Such consecutive pairs, however, could be less definite in identifying misorientation axes and dictated by short-range, stochastic and easy slips that do not contribute to the overall grain shape change. To address the issue, we propose an improved IGMA analysis that includes non-consecutive pairs and exemplify it by a highly textured Mg-3Al-1Zn (AZ31) alloy subjected to compression along different directions. With correlative transmission electron microscopy of dislocation nature as a benchmark, this proposed new IGMA analysis is validated to improve accuracy of slip activity in deformed materials.

C10-42

基元强度比对异构金属材料应变硬化行为及强韧性协同效应的影响

陆晓翀*
四川大学

异质结构（heterostructure）通过将软硬金属基元进行有序构筑，为突破传统材料的强韧性倒置关系提供了创新设计范式。现有研究指出，异质界面（HB）诱发的几何必须位错（GND）及其衍生的额外应变硬化，是实现优异力学性能匹配的核心机制。然而，当前异构金属材料仍面临关键瓶颈：基于微结构参量的力学性能定量调控方法尚未完善，特征参数界定模糊，严重限制了材料的定向设计。值得注意的是，HB两侧基元的强度差异直接主导塑性变形时界面区域的应变梯度和 GND 分布特征。本工作以软硬交替层状金属材料为对象，创新提出以层间强度比（R）为核心调控参数，结合多尺度实验表征、晶体塑性有限元（CPFE）模拟和离散位错塑性（DDP）模拟，阐明 R 值对 HB 附近 GND 演化规律及应力场分布的作用机制。研究发现，当 R 增大时，软硬层之间的变形失配度急剧上升，促使界面处形成高强度的应变梯度，进而引发位错塞积和长程内应力，使材料应变硬化能力获得大幅提升。同时，HB 密度被确认为第二关键调控参数，其优化可协同增强材料整体应变硬化能力。本研究成功建立了强度比 R 与材料强塑积之间的定量关系，为高性能异构金属材料的精细化设计奠定重要理论基础。

C10-43

金属材料指数硬化模型推导及其应用

张振军*、张哲峰
中国科学院金属研究所

提出了新的位错湮灭模型，并通过考虑初始组织状态与合金成分对加工硬化的影响，建立了单相金属材料普适性硬化模型—指数硬化模型，并据此首次推导出单相金属材料拉伸应力-应变定量关系。该模型阐明了单相金属材料形变过程中一些重要规律：1）用一个参数(n)统一了五阶段加工硬化规律；2）揭示了极限强度、临界强度、真抗拉强度与成分及变形机制之间关系；3）首次推导出“屈服强度—抗拉强度—均匀延伸率”之间定量关系；4）定量揭示了拉伸强度-塑性同步提升的两个基本原则，即成分优化（提升位错滑移平面性）与组织优化（降低初始高能缺陷）5）实现了单相铜铝合金拉伸强度、塑性及拉伸应力-应变曲线的定量预测。该模型在铝合金、钛合金中得到了初步应用。

C10-44

纳米碳化物析出相增强 CoCrNi 中熵合金的室温及高温力学性能

周泳江、张金钰*
西安交通大学

在低温条件下，NiCoCr 中熵合金展现出卓越的强度和延展性，然而其室温和高温强度相对较低。为了改善 NiCoCr 中熵合金的室温和高温力学性能，通过控制添加不同含量的 Nb 和 C 元素，调节合金的微观结构以形成纳米碳化物，从而优化合金的组织。研究系统探讨了合金的微观结构和力学性能演变规律，研究了室温和高温下的强化机制。主要结论如下：利用热轧-固溶-冷轧-再结晶的加工工艺制备了纳米析出相强化的 NiCoCr 中熵合金。再结晶退火温度的增加，晶体结构发生变化。合金强塑/韧性的增加是由于碳化物促进再结晶形核并且钉扎晶界阻碍晶粒长大，形成小尺寸的等轴晶。1NbC 合金在 750℃退火后室温屈服强度达到 1162MPa，抗拉强度达到 1437MPa，并具有较高的 18.5%的断裂延伸率。同时在高温下，大量的小角度晶界降低了中温脆性，使得高温屈服强度优于其他 NiCoCr 基中熵合金，600、800 和 1000℃的屈服强度分别为 739、433 和 102MPa。相关结果为调控碳化物增强的中熵合金的力学性能提供了一种有效的途径。

C10-45

纳米结构 304NG 离子辐照下的自适应马氏体相变

张澍[1,2]、董怡斌[3]、孙艳涛[4]、刘泳[3]、孙良亭[5,6]、赵红卫[5,6]、高宁[3]、王镇波*[1]
1. 中国科学院金属研究所
2. 中国科学技术大学
3. 山东大学
4. 辽宁材料实验室
5. 中国科学院近代物理研究所
6. 中国科学院大学

核能作为一种可调度性清洁能源，被认为是解决地球上日益增长的生态环境问题的重要能源组成。核电安全问题是发展核电的首要问题，几十年来，从业人员一直致力于提高核反应堆中结构材料的抗辐照性能。尽管已经提出了许多基于微观结构改性的方案，但其中大多数方法无法实现低成本和高辐照剂量的应用。近期，我们通过表面纳米化技术在奥氏体不锈钢 304NG 表层构筑了具有高密度层错的纳米结构，并进行了铁离子辐照实验。我们发现，在辐照下，这种材料中会激活一种全新的抗辐照机制，即大规模自适应马氏体相变机制。并且，这一机制在极高的辐照剂量和高温下仍然有效。并且，与粗晶样品相比，其不仅显著增强了纳米结构样品的抗辐照性能，同时保持了优异的机械性能。

C10-46

针对 Cr/CrAlN 层状复合材料强塑性匹配的多级界面工程设计

左家栋、李娟、王佳宁、王亚强*、张鹏、张金钰、刘刚、孙军
西安交通大学

由软硬相交互层叠组成的异质结构设计策略通常被应用于纳米结构材料中以期实现强塑性的协同提升。本工作延续这一思路并进一步引入界面工程设计，通过在晶体 Cr/非晶 CrAlN 纳米层状复合材料中构建多级结构来打破材料的强度-塑性矛盾。其中多级结构指的是由 Cr/CrAlN 异质界面划分的层状结构和由同质界面（即 Cr 层和 CrAlN 层中的晶界和非晶/非晶界面）界定的柱状结构。当层厚从~20nm 增加至~500nm 时，柱状结构的宽度则基本保持不变（~28nm）。研究发现，材料的塑性变形能力随着层厚的增加而显著增强，但其强度和断裂韧性却仍能保持稳定，未发生显著劣化。分析发现， Cr/CrAlN 的强度主要受 Cr 层内的位错滑移和 CrAlN 层中的剪切带激活两个过程所控制，而以上过程均主要受到同质界面的限制而与异质界面交互作用较少，因此导致了与层厚无关的强化效果。同时，材料的塑性则主要受 CrAlN 中的结晶度所影响，其中 Cr/CrAlN 异质界面通过诱导非晶态 CrAlN 结晶从而主导着材料的塑性变形能力。以上设计策略可实现在 Cr/CrAlN 体系强度稳定的基础上材料塑性的显著优化。

C10-47

通过控制残余界面缺陷介导的元素扩散消除 Cu−9Ni−6Sn 合金的室温脆性

游远琪、刘力源、李才巨*
昆明理工大学

Extending the aging time of Cu−9Ni−6Sn alloy can enhance strength, but simultaneous precipitation of $D0_3$ phases at grain boundaries (GBs) also leads to brittleness. To overcome this problem, the strategy in this work involves remelting pre-nanoprecipitates to generate residual interface defects that control the elements diffusion, allowing the nanoprecipitate forming elements to preferentially precipitate within the grain during reaging process and suppressing the formation of $D0_3$ phases at GBs. Specifically, compared to the aged alloy (ultimate tensile strength (UTS): 750 MPa; fracture elongation (FE): 3.2%), the FE after preaging-remelting-reaging increased by ~480% to 18.6%, and the UTS synergistically increased to ~1,000 MPa.

C10-48

磁控溅射 Al/FeMnCrNi 梯度纳米多层膜微观组织和力学性能研究

艾冰艳、王亚强、张金钰*、刘刚、孙军
西安交通大学材料学院-金属材料强度国家重点实验室

金属 Al 薄膜已成为微纳器件中广泛应用的互连材料，但纯 Al 薄膜通常表现出低强度，在服役过程中易变形损伤。其主要的原因包括：纳米尺度下的反 Hall-Petch 效应以及纳米尺度下位错活动受限的变形机制等。针对这些问题，大量的尝试已经投入了铝基薄膜的调控研究，特别是通过磁控溅射制备出的纳米结构 Al 基纳米多层膜材料，可以引入金属组元强化相，耦合高密度层间界面的约束效应，灵活集成非均质 Al 基复合材料，从而获得可调节的机械性能。高熵合金 （HEAs） 作为一种新兴合金，因其特殊的四大效应及优异的综合性能，成为高性能工程材料的候选者之一。本研究中，基于“基元序构”多层膜的设计理念，选择由 Cantor 合金衍生出的四元非等原子比的经典 Fe30MnCrNi （FMCN）与 Al 作为功能基元，通过巧妙改变非平衡磁控溅射沉积参数，定制“序构梯度”Δh 从 0 增大至 25nm，构筑总厚度为 ~1.4um 的梯度 Al/FMCN 纳米层压复合材料。这种引入 Fe30MnCrNi 增强相以构筑梯度多级序构设计，使得Δh=5nm 复合材料获得最优的异的力学性能（纳米压入硬度 3.67 GPa，微柱压缩强度 1.39GPa），在压入深度为 50% 膜厚时，基元金属层仍表现出均匀的共同变形，并未产生灾难性的剪切带。这种高强度和优异的变形能力源于独特的异质变形诱导应力的强化作用及双组元的协同变形机制。本工作为高强度 Al 基薄膜设计开拓了新的思路，丰富了异质梯度结构对于强化力学性能的理解，协同改善了传统 Al 薄膜的力学性能瓶颈。

C10-49

异质结构纯铜的力学行为及其微观组织研究

堵文启、李聪、朱心昆*
昆明理工大学

摘要：在金属材料科学与工程领域，强度与延展性之间的倒置关系长期构成一项基础性科学挑战。该矛盾源于材料变形机制的本质冲突：强化过程（如晶界/位错增殖）虽提升强度，却同步抑制位错滑移与塑性变形能力，导致延展性劣化，限制了它们在众多高性能应用中的潜能。因此，如何平衡并改善这一基本矛盾，成为金属材料研究的关键所在。本研究采用退火与表面机械研磨处理（Surface mechanical attrition treatment,SMAT）技术结合的工艺，在纯铜中构建出了梯度结构和双异质结构，使其具有优异综合力学性能，通过深入的力学性能测试与微观组织表征，系统阐述了其优异力学性能背后的变形机制。研究结果表明，350-SMAT 和 450-SMAT 样品因其独特的异质化程度和双峰结构，表现出超越单一梯度结构的拉伸性能，实现了强度与延展性的理想平衡。

C10-50

纳米析出物短程有序结构调控缺陷行为实现强韧化

崔宇驰*
上海交通大学

纳米析出相通过阻碍位错运动可显著增强金属材料的强度，但常常伴随塑性的降低。本研究提出一种新策略：在 $L1_2$有序析出相中引入原子尺度的化学短程有序（Short-Range Ordering, SRO）结构，从而在不牺牲塑性的前提下同时提升强度和加工硬化能力。在 $Co_{40}Ni_{30}Cr_{20}Al_5Ti_4Ta_1$多主元合金中首次实验证实了析出相中的 B 位点选择性 SRO 结构，并通过密度泛函理论（DFT）分析揭示了其形成机制与稳定性。研究表明，Ta 元素的引入提升了抗剪切位错的临界应力，同时降低了超晶格本征层错（SISF）的形成能，有利于位错-层错耦合机制的激发，进而构建出致密的位错网络并有效抑制应变局域化。该机制突破了传统强韧性互斥限制，为多主元合金的高性能设计提供了全新的微观调控路径。文章发表于 Nano Letter（封面）。

C10-51

基于 ε-马氏体增韧设计的极低温高锰钢：原位中子衍射与微观力学分析

赖庆全*
南京工业大学/苏州实验室

高锰钢是极低温环境用的低成本高性能结构材料。高锰钢一般具有较低层错能（SFE），通过激活变形孪生或者 ε-马氏体相变来提高加工硬化率和延展性。与变形孪生相比，ε-马氏体相变对加工硬化率的提升更为显著，但 ε-马氏体的产生往往导致材料的过早断裂。对此，本工作通过温轧制备超细晶奥氏体高锰钢，利用相变路径调控获得具有纳米结构尺寸的 ε-马氏体。轧制态超细晶高锰钢在液氮温度下具有优异的拉伸力学性能（真实抗拉强度达 1.8GPa，真实均匀延伸率为 0.3）。中子衍射原位拉伸结果表明，奥氏体的层错概率在加载过程中逐步提升，造成 ε-马氏体的大量形成（70vol.%以上）；超细晶奥氏体的位错密度持续提升并伴随着相应力的增加，即超细晶奥氏体存在位错存储导致的加工硬化。基于 Iso-work 假设的微观力学分析标明，ε-马氏体的纳米化显著提升其本征韧性，在极低温下具有高加工硬化率且能承受高局部应变，是温轧高锰钢具有优异极低温拉伸性能的关键。

C10-52

基于同步辐射 X 射线和中子衍射的铝合金强化机理研究

赵愈亮*
东莞理工学院

Al 合金具有比强度高、耐腐蚀和可回收等优点，在航空航天和工程结构等领域得到广泛应用。为了解决资源和环境问题，采用再生铝代替电解铝。然而，再生铝常含有过量的杂质 Fe 元素，去除 Fe 的成本高且工艺复杂，在凝固过程中会形成粗大且硬脆的富铁相，显著降低合金的力学性能。本报告通过研究合金成分设计、工艺优化和热处理等手段对合金微观组织的影响，运用同步辐射 X 射线衍射和中子衍射技术系统分析了铝基体与第二相在拉伸变形过程中的变形行为及应力承载，探讨了其影响机理，揭示了合金的变形和强化机制。研究发现：拉伸过程中软的 α-Al 基体与硬脆的富铁相第二相产生不均匀变形，富铁相在拉伸过程中起应力承载的作用；在拉伸后期富铁相由于与 Al 基体存在弹性模量和应力失配导致内部开裂，从而引起裂纹扩展至最终样品失效。该研究为新型铝合金材料成分设计提供技术指导和理论基础。

C10-53

高反相畴界能实现超强韧析出相强化合金

代帅、雷智锋*
湖南大学

FCC 析出强化合金中，共格析出相对位错移动的低抗力及位错剪切析出相后易形成的滑移带软化，难以获得超高强度及出色塑性。这里，我们引入具有高反相畴界能的多组元析出相来解决这一难题。在 Ni_3Al 型 $L1_2$ 析出相中通过引入多种元素在 Al 亚晶格占据，降低其反位缺陷及提高有序度，带来 308mJ/m^2 高反相畴界能，显著强化合金。另外，高的反相畴界能调节析出相剪切机制，从位错剪切转变至层错剪切，避免滑移带软化及实现析出相自我硬化。因此，该 FCC 析出强化合金获得优异强塑性组合，拉伸屈服强度 1.6GPa，抗拉强度 2.2GPa，均匀伸长率 10%。

C10-54

NiCoV 中熵合金中半共格纳米层状结构设计优化及力学性能研究

蔡伟金、王章维*
中南大学粉末冶金研究院

析出强化是提高合金强度的有效手段之一，其本质要求析出相具有一定的变形能力、尺寸细小、分布

均匀。本工作展示了 NiCoV 模型合金的沉淀工程。通过降低 V 含量可以避免有害的 σ、μ 和 Heusler 相的形成，并设计了两步短期退火来触发均匀的 κ 成核，同时抑制其快速粗化。发现晶界和相界都可以捕获 V 原子，这不仅固定了这些界面，而且阻碍了 κ 生长所需的 V 分配。因此，$NiCoV_{0.9}$ 合金中呈现出 κ/γ 双相结构。由于异质变形诱导应力和相界的共格性，该合金具有 1.6 GPa 的超高屈服强度和 219 MPa 的总加工硬化量。在此研究基础上，结合相图计算和密度泛函理论，筛选了 Ta 的缓慢扩散，进一步有效地限制了 κ 相增厚，导致 $NiCoV_{0.9}Ta_{0.1}$ 合金内纳米级半共格片层结构的形成，从而在宽温度范围（77-923 K）内实现卓越的强度-塑性协同。超高强度源于纳米层状结构的强化作用，晶粒尺寸强化和基体晶格摩擦应力的协同作用。此外，高温变形过程中共格纳米级 $L1_2$ 析出物的形成弥补了 923 K 时观察到的强度损失。显著的应变硬化行为源于 κ 条与位错之间的相互作用，包括变形初期 κ 相的位错阻碍，及变形中后期 κ 相的位错剪切和层错激活则缓解了应力集中，协同稳定了塑性变形。此外，变形引起的位错亚结构，包括 9R 相、纳米孪晶和位错缠结，有助于在 77 K 和 723 K 之间进行高水平的应变硬化。在 923 K 时，$L1_2$ 析出相与基体中的位错相互作用产生致密的层错，促进了 L-C 锁的形成和层错剪切 κ 相，导致异常硬化。本研究为先进的中高熵合金提供了一种扩散速率介导的半共格纳米层状结构设计范例，在极端温度应用中具备前景。

C10-55

双 B2 纳米析出的分步设计实现微片层双相中熵合金的高强高韧

高少华[1]、张金钰*[1]、王辉[2]、刘帅洋[1]、匡杰[1]、李娇[1]、刘刚[1]、孙军[1]

1. 西安交通大学金属材料强度全国重点实验室
2. 四川大学材料科学与工程学院

异质微片层双相结构为克服合金中的强度-延性权衡提供了一种很有前途的方法，然而，由于界面处的应变不相容性，千兆帕级屈服强度的实现，通常会以牺牲断裂韧性为代价。在这项工作中，我们开发了一种新型铁基中熵合金 （Fe-MEA），通过精确的热机械加工工艺，将有序的体心立方 （B2） 纳米沉淀物逐步嵌入在微米片层的无序体心立方 （BCC） 相和面心立方 （FCC）相 中。这些共格/半共格的析出相/基体界面充当多产、稳定和持久的位错源，大大提高了裂纹的萌生韧性，同时作为强大的位错屏障以增强强度。双 B2 纳米析出物增强的 Fe-MEA 表现出卓越的力学性能组合：屈服强度为 ~1350 MPa，延伸率为 ~18%，断裂韧性为 ~166 MPa $m^{0.5}$。动态晶粒细化和裂纹支化有助于显著增强裂纹扩展过程中的能量耗散，进一步提升裂纹的扩展韧性。不只是在 Fe-MEA 中实现了高强高韧的组合，这种结构设计策略为开发其他具有出色抗断裂性的高强和大延性合金（例如复杂的多元素合金）提供了一条有前途的途径。

C10-56

力学异构性和位错存储能力对叠层异构金属强度-塑性协同的影响

周忠臣[1,2]、李建生[3]、王艳飞[4]、毛庆忠[2]、刘亿[2]、岳玉[5]、黄崇湘[6]、李玉胜*[2]

1. 滨州魏桥国科高等技术研究院，滨州铝产业先进制造山东省实验室
2. 南京理工大学
3. 安徽工程大学
4. 西安交通大学
5. 山东建筑大学
6. 四川大学

因为优异的强韧性协同效应，叠层异构金属获得了众多科研工作者的关注。然而，在力学差异性较弱的叠层异构材料中，软/硬层之间的强度差异对其协同强韧化的影响仍然是一个长期存在的问题；另外，具有不同位错存储能力的软/硬层对强度-塑性协同所起到的作用也知之甚少。因此，本文 通过“扩散焊+锻打+轧制+热处理”的工艺制备一系列叠层异构铜-黄铜材料，并研究其力学异构性和位错存储能力对协同强韧化的影响。结果表明，越大的微观结构差异性和力学差异性越能改善叠层异构金属的强度-塑性协同。软质铜层和硬质黄铜层相对较弱的力学差异性和优异的位错存储能力有利于层间协同变形，这使得异构界面附

近的局部应变和几何必需位错呈梯度分布。对于由高位错密度的亚结构铜层和低位错密度的超细晶黄铜层所组成的叠层异构金属来说，铜层的位错增殖和存储能力均较黄铜层差。当该叠层异构金属发生塑性变形时，铜层起到阻碍位错运动的作用而不是存储位错的作用。因此，铜层在力学性能上虽然属于软质层，但起到硬质层的作用。所以，当界定异构金属中软组元和硬组元时，除了从力学性能上界定，位错增殖和存储的能力也是极其关键的评判标准。

C10-57

B、N 元素对新型盾构机刀盘刀具用高钒高速钢耐磨合金显微组织、力学和耐磨性能的影响

王鼎辰、陶稀鹏*、王新广、周亦胄、孙晓峰、崔传勇
中国科学院金属研究所

近年来我国对高性能大型盾构机的需求越来越迫切，随着刀盘刀具用合金服役环境越来越苛刻，硬度 HRC65 以上的高钒高速钢耐磨合金被广泛研究。本研究系统阐述了 B、N 元素对高钒高速钢的显微组织、力学和磨损性能的影响。实验结果表明，该合金的相组成一般为马氏体+残余奥氏体+VC+M_7C_3 型碳化物。其中 B、N 元素可以显著弥散球状 VC 强化相，促进纳米析出相析出，促进合金弥散强化、细晶强化以及第二相强化。其中 VC 与奥氏体基体的共格相界面和 M_7C_3 型碳化物与奥氏体的半共格相界面有效保证位错运动的容纳和阻碍达到平衡，保证合金韧性的同时提升合金的硬度强度。随着 B、N 元素含量的增加，最优热处理工艺下的合金硬度略微增大（最高为 70HRC），其结果归因于 B、N 元素提升了合金淬透性，马氏体含量增加以及高硬度硼碳化物形成。同时细小弥散的碳化物保证了合金良好的冲击韧性，BN-3 样品表现出最佳的耐磨性能，其表现为最低的稳态摩擦系数 0.42，最小短时（120min）磨损量 0.12mg，以及损伤表面分析结论等。TEM 分析进一步发现，干滑动往复摩擦磨损运动导致了基体中位错塞积和 VC 中大量层错生成，这种高密度的位错网和层错锁，有效阻碍了位错开动，延缓了塑性变形、剥落和开裂的发生，有效提升了合金的耐磨性能。本研究通过成分设计-制备工艺-热处理调控的协同优化，成功开发出兼具高硬度、优异耐磨性和良好冲击韧性的新型高钒高速钢，为苛刻工况材料研发提供了理论支撑。

C10-58

抗冲击钛合金显微组织调控及强韧化机理研究

吴聪*
陕西科技大学

抗冲击钛合金在动静态载荷下的综合性能，尤其是强度、塑性和冲击韧性之间的矛盾，为航空航天、海洋工程及国防领域的材料设计和选材带来了挑战。本文对不同牌号钛合金的冲击韧性进行了研究和综述，重点探讨了近 α 钛合金、α+β 两相钛合金以及亚稳 β 钛合金中典型组织（等轴组织、双态组织以及片层组织）的强度-塑性-冲击韧性的匹配关系。示波冲击结果表明，冲击功主要由裂纹萌生功和裂纹扩展功组成，裂纹萌生功主要消耗于试样的弹性、塑性变形以及裂纹形成，裂纹扩展功主要消耗于裂纹前沿微观塑性变形及裂纹扩展。不同牌号钛合金冲击韧性与显微组织相关性较大，位错增殖、形变孪生、扭折、剧烈塑性变形甚至于破碎的动态变形特征是主要塑性变形机制。通过以上研究，从理论上深入理解抗冲击钛合金的基础变形行为，为抗冲击组织设计调控及强韧化，发展高抗冲击钛合金提供坚实的实验依据和理论基础。

C10-59

晶界微观结构及其塑性变形机理的计算模拟研究

张亮*
重庆大学材料科学与工程学院

晶界的微观结构对于多晶材料的力学性能中具有重要影响。当晶粒尺寸减小到超细晶或纳米晶尺寸时，这种影响变得更加显著。在纳米晶材料中，与晶界相关的变形行为成为塑性变形及影响强韧化的主导机制。报告总结了面心立方金属中晶界变形行为的原子尺度模拟的最新结果。详细介绍了三种不同的晶界模型

（三维纳米晶模型、柱状纳米晶模型和双晶模型）来研究塑性变形过程中晶界主导的多种塑性变形机制，包括晶界处位错形核机制、晶界滑动和晶界迁移机制以及晶界与位错的相互作用机制。介绍了第一性原理计算、分子动力学模拟及机器学习方法在晶界微观结构及其塑性变形机理研究中的应用。

C10-60

基于微观应力视角的层状金属强韧化行为研究

缪克松、夏夷平、吴昊、曹国剑、李学问、范国华*
南京工业大学

层状金属因具有优异的强塑性而广受关注。层状构型设计本质上调控了组元层的微观应力状态，使层状金属呈现新颖的材料变形和断裂特性，例如高于混合定律的强度、不符合施密特定律的变形机制、反常的裂纹萌生和扩展规律等。因此，微观应力分析是理解异构材料高强塑性的关键。通过原位 EBSD、同步辐射等先进表征技术，可以实现对变形过程中微观组织演化、变形断裂机制等材料信息的原位高空间分辨率表征，进而定性/定量揭示层状设计对微观应力的影响，阐明层状金属强韧化的本征机理，为设计和研发新一代高性能层状金属提供方法基础与理论指导。

C10-61

多模式变形协同作用下新型 β 钛合金疲劳损伤行为及其微结构机理

晋会锦*、邴孝新、张嘉琪、石林
陕西科技大大学

亚稳 β 型 TRIP/TWIP（相变诱导塑性/孪晶诱导塑性）钛合金通常具有高强度、高塑性和高加工硬化率，有望成为新一代钛合金被应用于高性能结构材料领域。然而，如何阐明循环形变过程中变形方式与动态跨尺度异构交互耦合作用下疲劳损伤微观机理，实现对其疲劳性能的调控，是该类合金应用面临的关键核心问题。本研究拟采用原位及多尺度实验表征手段探讨 TRIP/TWIP 钛合金在循环形变过程中应力诱导相变、变形孪晶、跨尺度异构等微结构的形成、演变及交互作用机理，阐明多变形方式与动态跨尺度异构交互耦合特性对疲劳损伤行为的影响机理，揭示影响疲劳损伤行为的主控微观机理及物理本质，为抗疲劳损伤能力优异的 β 钛合金设计研发提供重要理论依据和技术支撑。

C10-62

CuZr 金属玻璃纳米尺度相分离诱导塑性提升模拟研究

王宇驰、刘峰、袁福平、武晓雷*
中国科学院力学研究所

金属玻璃由于其高屈服强度和高弹性应变等独特性能受到广泛关注，但由于变形过程中形成高度局域化的剪切带，导致其塑性差易断裂，大幅限制了其实际应用。为了提升金属玻璃塑性，可以通过相分离得到具有不同化学成分的非晶-非晶双相结构，从而阻碍剪切带扩展。在已有的研究中，通过冷却凝固或大塑性变形，可以获得液滴状或互联状的第二相结构，特征尺寸在几纳米到几百纳米。对于纳米尺度互联状结构，当特征尺寸小于剪切带宽度（10-15 纳米）时，其两相和界面在变形过程中的作用机制以及对变形局域化的抑制作用目前仍不清楚。

为了解决这个问题，本研究通过分子动力学方法模拟 CuZr 金属玻璃，通过 Gyroid 极小曲面构建互联状双相结构，特征尺寸在 2.5-10 纳米，分别调控 Zr 原子的百分含量以及形成金属玻璃过程中的冷却速率，获得了具有不同力学性能的两相区。在拉伸变形过程中，其两相界面诱导多处应变集中，并首先在软相中发生塑性变形，同时硬性抑制变形进一步扩展。与单相金属玻璃相比，双相结构使应变分布更分散，可以有效抑制贯穿样品的高度局域化剪切带的形成，使得材料塑性获得显著提升。通过不同应变下的动态热机械分析分别表征双相金属玻璃与对应的两种单相结构的 β 弛豫特征，结果表明变形初期双相结构 β 弛豫特

征与软相相近，塑性变形主要由软相承担，一定塑性应变后则与硬相相近，硬相开始阻碍变形扩展。两相界面处表现出更明显的粘弹性响应，表明界面对塑性变形扩展的抑制作用。本研究首次阐明金属玻璃相分离得到的纳米尺寸双相结构在特征尺寸小于剪切带宽度时，其变形过程中的应变分配机制以及对应变集中的抑制作用，为提升金属玻璃塑性提供新的设计策略。

C10-63

Hall-Petch 关系的电子结构起源

李昕*
吉林大学材料科学与工程学院

Hall-Petch 关系广泛应用于确定金属屈服强度 σ 随晶粒尺寸 d 的变化关系，可表示为 $\sigma = \sigma + kd^{-0.5}$。尽管 Hall-Petch 关系在工程上取得了实际的成功，但揭示系数 σ 和 k 的物理起源并快速确定屈服强度仍面临挑战。我们构建了用于定量预测 Hall-Petch 关系系数的理论模型。受紧束缚理论的启发，我们发现 Hall-Petch 关系中的晶格摩擦项强烈依赖于金属的族数、周期数、价电子数和电负性，而晶界阻力系数则由内聚能决定。该模型不仅与经典的 Hall-Petch 模型兼容，还从电子结构的角度揭示了 Hall-Petch 关系系数的本质——源于 d 带上边缘和 d 带宽度，这些发现为理解金属强度的决定性因素和物理起源提供了全新的视角。

C10-64

基于微观应力表征的异构材料变形与强韧化机制研究

夏夷平*[1]、孙为[2]、缪克松[1]、李学问[1]、吴昊[1]、范国华[1,3]
1. 南京工业大学
2. 西交利物浦大学
3. 苏州实验室

同步提升强度与塑性是金属材料研究的永恒主题之一。近年来，以异构材料为代表的新型金属材料突破了强度与塑性的倒置关系瓶颈，其根源在于异构设计调控微观应力，从而改变了材料的变形与断裂机制。然而，受制于微观应力表征技术的发展，目前对异构材料中微观应力及其作用机制的认识尚不充分。本研究结合了多种同步辐射衍射、聚焦离子束-数字图像关联等微观应力表征技术，从“微观应力”视角解析异构材料的强韧化机制。在细晶/粗晶层状异构铝的研究中，首次揭示变形初期的界面影响区，发现该界面影响区由低施密特因子的滑移系激活所形成，证实复杂的多轴应力状态是其反常变形机制的根源。在钛合金焊接接头的研究中，关注“残余应力”这一常被忽视的微观应力，发现残余应力调控对钛合金焊接接头强塑性的影响作用，阐明残余应力对钛合金焊接接头断裂行为的影响机制。研究有助于丰富与发展以微观应力为核心的金属材料强韧化理论，为高性能金属材料设计与研发提供理论指导。

C10-65

优化 TiAl 合金强度-塑性匹配的微观结构设计策略

郑国明*
宝钛研究院

TiAl 合金是近年来各国争相研究的先进高温合金，受到了航空航天工业的高度重视。提高 TiAl 合金的从室温到最大服役温度范围内的力学性能对其工程化应用非常重要。本次汇报以经典的 TNM 和 TiAl4822 合金为研究对象，提出了三种新型微观结构，分别为纳米全片层组织、新型三相三态（T-T 结构）和蜂窝壳结构。这三种结构很好的优化了 TiAl 合金的室温和高温强度-塑性匹配，蜂窝壳结构还极大提高了 TiAl 合金的抗蠕变性能。这三种结构的设计策略可以拓展至其它类型的 TiAl 合金中，工程价值显著。

C10-66

待定

武晓雷
中国科学院力学研究所

C10-67

超高强度钢的强韧化机理

黄崇湘
四川大学

C10-68

溶质元素对超细晶铝合金组织演化及热稳定性研究

冯曼*
魏桥国科高等技术研究院

剧烈塑性变形技术是实现金属材料晶粒细化的有效手段，而优异的力学性能与组织热稳定性则是超细晶铝合金实现工程应用的关键。本研究以三种二元铝合金（Al-1Si、Al-1Mg、Al-1Cu）为研究对象，采用高压扭转技术制备超细晶结构样品，系统探讨了不同溶质原子在 HPT 加工及后续退火过程中的再分布行为及其对晶粒细化与热稳定性的影响机制。研究结合 TEM、TKD 和 APT 等多种先进表征手段，揭示了溶质原子的晶界偏聚与析出行为在晶界稳定化中的关键作用。研究表明，在 Al-1Cu 合金中，Cu 原子在晶界的显著偏聚以及纳米 Al_2Cu 析出相的形成有效降低了晶界能，抑制了晶界迁移，从而赋予该合金优于 Al-1Si 和 Al-1Mg 合金的热稳定性。同时发现，在低温退火阶段，晶界偏聚、溶质拖拽与第二相拖拽三者对晶粒长大的抑制作用相当；而在高温退火阶段，第二相的尺寸与分布成为主导热稳定性的关键因素。上述结果为提升超细晶铝合金的热稳定性提供了理论支撑和成分设计的新思路。

C10-69

揭示梯度纳米晶粒 CoCrFeMnNi 高熵合金的抗裂性： 分子动力学研究

郑鑫[1]、杜欣[1]、吴俊豪[1]、双思垚[1]、赵建锋[2]、阚前华[1]、张旭*[1]
1. 西南交通大学力学与航空航天学院
2. 西南交通大学材料科学与工程学院

梯度纳米结构高熵合金（HEAs）为同步提升材料强度与韧性提供了有效途径，但其抗断裂的原子机制尚不明确。本研究采用分子动力学（MD）模拟方法，揭示了含中心裂纹和表面裂纹的梯度纳米结构 CoCrFeNiMn 高熵合金（G-HEA）的裂纹扩展行为。与均质高熵合金及纯 Ni 相比，G-HEA 通过裂纹尖端钝化与延性裂纹扩展展现出优异的断裂抗力，其机理源于裂纹前端位错形核与非晶层形成。值得注意的是，梯度结构通过调控双侧位错活性，可有效抑制中心裂纹扩展却促进表面裂纹扩展。随着变形加剧，应变局域化剪切带逐渐削弱梯度结构的增韧优势，导致 G-HEA 与均质高熵合金的裂纹扩展速率趋同。本研究阐明了梯度纳米结构调控断裂行为的重要作用，为高熵合金增韧设计提供了原子尺度理论依据。

C10-70

梯度纳米结构 GCr15 轴承钢室温干摩擦条件下保护性 glaze 层的形成

孙旭、高博、董高尚、韩忠、王镇波*
中国科学院金属研究所沈阳材料科学国家研究中心

摩擦过程中 glaze 层的形成有利于抑制材料的磨损行为，有效提高其耐磨性。然而，这种保护性 glaze 层一般在高温摩擦过程中生成；对于 GCr15 此类服役温度小于 150 ℃的轴承钢来说，保护性 glaze 层的形成很难实现。本工作利用表面机械滚压技术在 GCr15 钢的表面构筑了一层梯度纳米结构，最表层晶粒尺寸

细化至~24 nm；最表层硬度由原来的~8.5 GPa 提升至~10.4 GPa。此种结构的构筑实现了在室温干摩擦条件下保护性 glaze 层的形成，使得梯度纳米结构 GCr15 钢在 110 N 条件下的磨损体积较粗晶降低了~53.2%，表现出优异的抗磨损性能。实验结果及机理分析表明，这种保护性 glaze 层的主要成分为 Fe_2O_3 及 SiC，其形成主要与梯度纳米结构 GCr15 轴承钢的高密度晶界及超高硬度有关。在摩擦过程中，高密度晶界不仅可以作为 O 原子快速扩散的通道，同时也为氧化反应提供了大量的形核位置，确保在摩擦过程中形成了丰富的氧化物；此外，硬度的提升促进了摩擦过程中变形热的产生与积累。二者的共同作用下，保护性 glaze 层得以生成。本报告将阐述梯度纳米结构 GCr15 轴承钢的微观结构、室温干摩擦条件下的磨损行为，以及保护性 glaze 层的形成机理。

C10-71

高性能压制索节材料及热处理工艺研究

杨猛冲[1]、蒋中华*[2]、贾春妮[2]、陈响军[2]

1. 东北大学

2. 中国科学院金属研究所

本研究通过合金优化设计一种高强高韧低合金 CrNiMo 钢，并系统研究了不同热处理工艺对低合金 CrNiMo 钢显微组织及力学性能的影响规律。结果表明：该低合金 CrNiMo 钢在不同淬火冷却速率下可获得先共析铁素体、粒状贝氏体、板条马氏体等多种组织，随着淬火冷速提升，材料强韧性得到显著提高，其中淬火组织为板条马氏体时，抗拉强度和-60 ^{o}C 冲击吸收功最高，分别达 1233 MPa 和 137 J。以板条马氏体为初始组织，随着回火温度的升高(≤640^{o}C),板条结构特征逐渐消失，此时抗拉强度下降，但冲击吸收功却显著提升。在 640^{o}C~680^{o}C 的回火温度区间，-60^{o}C 低温冲击吸收功的值稳定在 320J 左右，回火温度为 680^{o}C 时,抗拉强度达到最低为 612 MPa。可见，低合金 CrNiMo 钢在-60^{o}C 低温冲击吸收功≥137 J 条件下，抗拉强度可在 612 MPa~ 1233 MPa 之间宽域调节，可满足同种成分下低合金钢对高韧性、不同强度性能指标（同质异性）的需求。本报告还将介绍该低合金钢 CrNiMo 钢在高性能压制索具上应用。

C10-72

层状异构镁合金冲击性能及变形机制研究

李磊*

滨州魏桥国科高等技术研究院

通过扩散焊制备了一种新型 AZ31/GW103K(AG)层状异质结构材料。通过夏比缺口冲击试验评价了 AG 的冲击抗力，并系统研究了其断裂机制。AG 的冲击韧性达到均质结构 AZ31 或 GW103K 的近两倍。分层现象能有效抑制高速冲击下裂纹的萌生和扩展，通过消耗高冲击能量显著提升整体冲击韧性。同时，裂纹在界面处穿过 Al2(Gd,Y)相区会消耗大量冲击能量。此外，AG 的力学不匹配性可通过协调塑性变形消耗更多能量。在冲击过程中，GW103K 层主要通过{0001}基面滑移实现塑性变形，而 AZ31 层的变形机制相对复杂，主要包括孪生、多重位错滑移和堆垛层错等机制。

C10-73

通过晶界工程促进变形孪晶提高纯钛的力学性能

付雨*、彭华备、文玉华

四川大学

晶界工程被应用于具有较低层错能的面心立方合金中，以调控特殊的退火孪晶界面提高抗晶间腐蚀、晶间开裂和塑性等性能。然而，基于退火孪晶调控的晶界工程不能应用于具有高层错能的密排六方金属。本研究以密排六方纯钛为模型材料，通过控轧+退火的晶界工程处理，在纯钛中构筑了具有大量小角度晶界的均匀分布的未再结晶晶粒，从而重新激活了纯钛中因晶粒细化和基面织构而被严重抑制的变形孪生。未再结晶晶粒和再结晶晶粒之间的协调变形和局域应力集中激活了额外的几何必须位错和形变孪生，引入

的小角度晶界消除了大角度晶界对孪生扩展的阻碍作用，不仅协同提高了纯钛的强度、均匀延伸率和加工硬化能力，还改善了屈服变形各向异性。以上结果表明，晶界工程可应用于密排六方金属，通过晶界工程调控其晶界特征促进形变孪生而提高力学性能，这为钛、锆、镁等材料的力学性能优化提供了新思路。

C10-74

马氏体时效钢上超硬表层的热机械构筑及其形成机理

牛泽民[1,2]、雷蕴博[1]、高博[1]、孙艳涛[3]、王镇波*[1]

1. 中国科学院金属研究所
2. 中国科学技术大学
3. 辽宁材料实验室

摘要：马氏体时效钢由于其超高强度和优异断裂韧性在现代工业中得到广泛应用。为了提高其表面硬度以及疲劳和耐磨性能，开发了多种表面机械处理强化方法。然而，由于马氏体时效钢在塑性变形能力和加工硬化能力方面的局限性，性能的提升效果通常受到制约。本研究中，采用控温表面机械碾磨处理对 18Ni 马氏体时效钢进行处理，处理温度分别为室温和~400 ℃。结果表明，两种处理均在马氏体时效钢上形成表层梯度纳米结构。与室温处理样品表层硬度（~6.2 GPa）相比，升温处理样品的表面硬度（~8.9 GPa）显著提高。微观结构观察发现，升温处理样品的额外硬化效果主要归因于合金元素在晶界的富集以及近表层纳米片层结构的晶界弛豫。据此，本文提出了一种结合表面机械碾磨处理和加热工艺的热机械变形策略，以实现马氏体时效钢表面层的超硬化。

关键字：18 Ni 马氏体时效钢，表面机械碾压，表面硬化，析出相回溶，晶界偏聚

C10-75

激光辅助制备镍基网状异质结构金属材料

张云淞、战再吉*

燕山大学

异质结构金属材料通过对其微观结构不同区域性能的调控，实现了传统均质材料难以企及的卓越综合力学性能。本研究采用原位合成法成功制备了$(W+Cr)_2C$/Ni 基网状异质结构金属材料，有效实现了强度与韧性的协同增效。本实验运用 XRD、SEM、EBSD、TEM 等多种分析手段，对复合材料的微观形貌及力学性能进行了测试与表征，并考察了在摩擦磨损工况下，网状异质结构对提升材料耐磨性能的贡献。

本研究采用激光熔覆技术成功制备出具有不同网络结构尺寸的镍基网络异质结构。借助液相凝固过程中界面生长的排斥效应，促使析出相向晶界聚集并形成网状结构。当激光功率设定为 2400 W、扫描速度为 4 mm/s 时，所形成的晶胞尺寸达 8.27 μm，网壳厚度则为 233 nm，此时网状异质结构材料展现出最佳力学性能，其抗拉强度高达 841 MPa，延伸率为 24.3%，较未添加增强相的材料性能提升了 29%，且延性未出现下降。EBSD 分析结果显示，拉伸样品中的几何必需位错从网络单元边缘向中心延伸，呈现出梯度分布特征。通过 TEM 观察复合材料微观结构发现，网状结构能够将拉伸过程中的单轴应力转化为多轴应力，有效激活 {112}<110> 和{110}<111> 滑移系，并形成了独特的十字形位错缠结。在摩擦磨损测试过程中，材料展现出优异的应变协调能力和加工硬化能力，使其具备很高的磨粒磨损-粘着磨损转变阈值，即在法向载荷 150 N、滑动速度 30 m/s 的条件下仍能保持磨粒磨损状态。在滑动过程中，大量变形位错形成，并沿着内部网络结构向深度方向转移，有效缓解了应变局部化现象。从表面至深层区域，位错形态依次经历从缠结到交叉滑移，再到单向滑移的演变，影响深度超过 80 μm。即使在单向滑移区域，网络单元之间仍能实现良好的应变协调。

墙报

C10-P01

多相协同强化的高强高导铜钛合金

郑哲帅、谷月峰*、赵新宝、夏万顺、张泽
浙江大学高温合金研究所

Cu-Ti 合金是一种析出强化型铜合金，凭借其卓越的机械强度和高温抗应力松弛性能，被广泛认为是有毒 Cu-Be 合金的理想替代材料。本研究聚焦于一种具有双相结构的铜钛合金展开，旨在通过热-机械复合处理工艺提升其综合性能，以满足铜钛合金在先进电子与电力系统中的应用需求。采用“不连续析出时效+冷轧变形+连续析出时效”的复合工艺对 Cu-3.2Ti-0.2Co (wt.%)合金进行处理，系统考察了该工艺对合金显微组织演化和性能的影响。经过优化处理后，合金形成了由片层状 β-Cu_4Ti 相与 α-Cu 基体交替分布的类珠光体双相结构，两相界面呈共格关系，显著增强了位错钉扎与载荷传递能力。同时，连续析出时效热处理在片层间形成了弥散分布的纳米析出相，进一步提升了合金性能。由此，合金展现出优异的综合性能，硬度、抗拉强度和导电率分别达到 323 HV、1331 MPa 和 24 %IACS。组织观察和力学分析进一步揭示了强化机制主要来源于析出相强化与形变诱导的界面调控效应。本研究结果不仅为铜基高强高导合金的组织设计与优化提供了重要参考，也为推动 Cu-Ti 体系在工程中的实际应用提供数据支撑。

C10-P02

具有电磁屏蔽性能的高吸能半充满气凝胶

谢昊圃、孔颖、胡东梅*
中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所

气凝胶作为动能吸收材料，在交通运输、体育、建筑、施工和航空航天等领域具有至关重要的防护应用。然而，其高度多孔的结构使其在长期使用中极其脆弱。本研究中提出一种半填充结构，并基于剪切增稠流体（STF）和化学气相沉积碳纳米管气凝胶（CNTA）进行了概念验证，其中 CNTA 的外部填充了 STF，而内部核心保持未填充。化学气相沉积显著增强了原始 CNTA 的弹性和电磁屏蔽性能。半填充气凝胶（HFFA）的能量吸收能力比 CNTA 提高了 348%。同时，HFFA 的密度、电导率和电磁干扰屏蔽效能（EMI SE）分别为 0.117 g/cm^3、1213 S/m 和 69.52 dB（与原始 CNTA 相比仅降低了 0.63%，可忽略不计）。综上，HFFA 策略能够制造出性能显著提升的坚固气凝胶，同时保持低密度、高孔隙率和导电性等其他性能。

C10-P03

预变形对 Al-Cu-Mg-Ag 合金组织及性能的影响

李鹤、张雪、于哲、张玲*
重庆大学

Al-Cu-Mg-Ag 是一种具有优异室温及高温性能的耐热铝合金，被广泛应用于航空航天等领域。传统的固溶+时效（T6）处理工艺对 Al-Cu-Mg-Ag 合金室温及高温性能的提升已到瓶颈阶段。本研究对固溶态 Al-Cu-Mg-Ag 合金进行冷轧或温轧变形，利用变形引入的位错调控了合金的后续时效析出行为，使合金由传统的单一 Ω 相强化转变为 Ω+θ'多相强化，由变形引入的位错也在一定程度上提高了合金的室温及高温性能。相较于 T6 处理，在 180℃下温轧 10%后的峰时效样品在 210℃下的高温拉伸屈服强度提高了 38%，在 210℃/190 MPa 应力条件下的蠕变时长提高了 66%。我们相信这种采用形变热处理调控合金析出行为的方法对于拓展 Al-Cu-Mg-Ag 合金的应用范围是一种潜在的策略。

C10-P04

高温合金孔洞演化多尺度机理研究

刘苏杰*
中科院金属研究所

在单晶高温合金热处理过程中，枝晶干与枝晶间溶质元素因互扩散速率差异（柯肯达尔效应）产生非平衡空位，导致枝晶间显微孔洞密度显著升高。这些孔洞在高温服役过程中持续长大并伴随新孔洞形核，成为裂纹萌生源，严重劣化合金力学性能。拉伸试验表明，随变形温度升高断口韧窝密度显著增加，揭示孔洞演变行为对温度的敏感性。本实验选取第二代镍基单晶高温合金，通过不同温度下准原位拉伸实验（25 ℃/850 ℃/1100 ℃）结合 X 射线断层扫描（XCT），系统解析温度对孔洞演化的影响机制。实验结果显示 1100 ℃ 高温下孔洞生长最为显著，最大等效直径自初始 54μm 增至断裂前 94μm，试样颈缩明显且断口呈现典型韧窝形貌；850 ℃ 中温区为孔洞活跃的临界温度，最大等效直径由初始 62μm 增至断裂前 81μm，孔洞沿与应力轴呈 45 °方向择优生长，断口表现为剪切型切断特征；室温条件（25 ℃）下孔洞基本未发生生长（最大等效直径 55μm→56μm），断口为准解理断裂模式。温度对孔洞生长的双重作用机制需通过多尺度实验协同验证：高温显著增强空位扩散驱动力，加速空位向孔洞表面沉积并诱发 Ostwald 粗化过程；同时高温环境促使孔洞周围发射位错环，通过位错滑移实现孔洞扩展。后续研究将结合原子探针（APT）表征孔洞界面溶质偏聚行为，并基于高分辨电子背散射衍射（HR-EBSD）量化孔洞周围应力场梯度及位错组态演化，从而建立温度-扩散-位错协同作用下的孔洞生长动力学模型，定量预测孔洞演化至裂纹萌生的临界阈值。

C10-P05

亚稳态 β-Ti 合金的超高加工硬化：应力诱发马氏体相变和孪生的作用

朱小勇[1]、栾佰峰*[1]、孙焕政[1]、闫安[1]、张志清[1]、寇宏超[2]
1. 重庆大学材料科学与工程学院
2. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室

本文通过初生 α 相调节 β 相稳定性和应力诱导的正交 α″马氏体相变的策略，获得了具有超高加工硬化速率（~12.8 GPa）的亚稳态 β Ti-7Mo-3Al-3Cr-3Nb 合金。研究表明，在低应变下，主要变形机制由应力诱导的 β→α″马氏体相变和$\{111\}_{\alpha''}$ Type I孪晶、$<211>_{\alpha''}$ Type II孪晶和$\{011\}_{\alpha''}$复合孪晶转变为高应变下 α"马氏体的加宽和合并，同时激活$\{130\}<3\text{-}10>_{\alpha''}$compound 孪晶和{112}α″ Type I孪晶。不同变形阶段主导变形机制的变化导致了特殊的微观组织特征，不仅细化了残余 β 晶粒，阻碍了位错运动，还释放了局部应力，最终导致在 3%应变下获得超高的加工硬化率（12.8GPa）和接近 16%的良好总延伸率。本研究为提高基于 β→α″马氏体相变的相变诱导塑性钛合金的加工硬化率提供了一种可行的策略。

C10-P06

低对称性结构半导体材料的室温塑性来源及变形机制研究

任晟弘、李秀艳*
中国科学院金属研究所

塑性多晶材料通常为具有高对称性结构的金属，这些高对称性结构为其提供多个等价滑移系，以协调相邻晶粒的协同变形（至少需要五个独立滑移系)。然而，最近在一系列低对称性半导体中发现了异常的塑性，但其变形机制仍然成谜。本工作以单斜结构的 Ag_4SSe 为例进行研究，结果表明：该单斜体系中阴离子亚晶格具有准体心立方 (BCC) 的高度对称结构，再加上高度扩散的阳离子，导致了多个滑移系的形成，从而解释了通常在低对称性结构多晶半导体材料中无法预期的反常的良好室温塑性。