

中国材料大会 2024
暨第二届世界材料大会
CMC 2024 & WMC 2024

July 8-11, 2024
Guangzhou, China

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

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.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**塑性失稳诱导的加工硬化**

武晓雷

中国科学院力学研究所

C10-02**结构功能一体化镁合金研究与应用**

陈先华

重庆大学

C10-03**MRL 期刊报告**

朱运田

南京理工大学

C10-04**高熵钢纳米双析出相强韧化机制**

王章维

中南大学

C10-05**Bioinspired, heredity-derived hierarchical bulk multifunctional copper alloys**

时培建

上海大学，材料科学与工程学院

C10-06**金属材料局域应变调控方式与微观机制**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

针对金属材料强度与塑性的倒置难题，设计开发了高强韧层状钛/铝复合材料，使用原位拉伸、原位电子背散射衍射、原位同步辐射断层扫描、原位同步辐射高能 X 射线衍射等技术，重点研究了该层状复合材料的“局域”与“全域”行为，发现了层状构型设计直接影响了局域应变的形成与传递规律，建立了局域应变演化与宏观形变损伤之间的力学模型，确立了“局域应变”作为控制金属材料力学性能的新的关键参量。基于上述原理，通过改变层状界面应力影响区、低温加载、高速加载等组织/变形参数，调控了层状金属的位错/孪生机制以及局域应变行为，进而实现了层状金属力学性能的主动调控。

C10-07**SEM 快速晶体缺陷定量定性分析方法**

沙学超

卡尔蔡司（上海）管理有限公司

晶体缺陷研究是材料科学研究中的重要一环，是研究材料变形-失效机理的重要依据。通常晶体缺陷分

析可以通过 XRD、CL、PL、EBSD 等手段实现,而高质量、可视化的晶体缺陷可视化分析,特别是晶体缺陷标定和相互作用分析、材料变形-失效机理的研究往往只能在 TEM 显微镜中进行。具有制样流程长、表征范围小、操作不便、成本高、与宏观样品脱节等缺点。

本报告将介绍特色的,可以在 SEM 中实现的可视化晶体缺陷表征技术,不仅保留了 SEM 研究的特点,如流程简单,易上手,表征面积大等特点,同时又具有 TEM 中精度高,可定性分析、可原位等特点。本技术非常适合在 SEM 中开展宏观样品的可视化、高精度、可定量定性分析的晶体缺陷研究。

C10-08

高温合金复杂纳米碳化物形成及其强韧化机制探索

蒋力*, 王骄阳

中国科学院上海应用物理研究所

由于 C 含量添加极限和显著的晶格错配,碳化物一般不认为是镍基高温合金中有效的弥散强化相。通过成分优化和热处理工艺探索,本研究成功在 Ni-Mo-Cr 基高温合金基体的滑移面上形成与层错共生的纳米 MC 碳化物颗粒,同时在晶界上形成连续分布的 MC 碳化物“膜”。高温拉伸力学表明,晶内析出相能够提升屈服强度达 50%,而晶界碳化物能够使得断裂延伸率翻倍。微观表征发现,晶内层错析出 MC 碳化物能够有效阻碍位错滑移,其强化效果要明显优于相同体积分数和尺寸的 MC 碳化物在均匀分布下的强度贡献。晶界 MC 碳化物能够有效阻碍晶界滑移和三叉晶界处的应变集中,抑制晶界裂纹萌生和扩展。在 750℃ 高温下,晶界 MC 碳化物还能够促进局部再结晶的发生,从而进一步改善合金塑性。本研究结果提供了一种新型的析出强化方式,将为面心立方结构合金材料的发展提供参考。

C10-09

纳米尺度界面结构强韧镍基单晶超合金探索

张志伟*¹, 王军², 卢春生³

1. 兰州大学

2. 中国科学院力学研究所

3. Curtin University

采用合金化方法提升材料性能面临合金化元素添加日益增多而材料性能提升趋缓,且合金化元素添加容易,分离难,因此给材料的回收再利用带来困难。在减少合金化元素甚至不用合金化元素的前提下,诉诸于纳米尺度界面结构提升材料性能有没有可行性?结合浅压痕纳米压入实验、透射电镜和扫描电镜微结构表征技术及分子动力学模拟方法,研究了孪晶界、堆垛层错、反相界、异质界面失配位错网络等界面结构对镍基单晶超合金硬度、强度、韧性的影响。厘清了界面结构的强韧化因素包含界面对位错运动的阻碍及吸收、位错的钉扎、面结构的再生。而弱化因素有面结构的褪去、迁移、退孪晶。提出纳米压入中的 Pop-in 事件与堆垛层错四面体的偶发形成相关联,发现扩展位错成对传播现象,建立了增硬效果的量化模型。该研究为采用界面及组织结构强韧合金材料提供理论支撑。

C10-10

梯度结构材料的裂纹扩展行为研究

曹汝情, liyi*

中国科学院金属研究所

梯度结构广泛应用于天然材料,以产生满足特定功能或机械要求的理想特性。在此背景下,我们描述了这一概念在镍(Ni)中梯度结构(GS)金属材料中的应用,晶粒尺寸范围从大约 30 nm 到 4 μm ,以探索各种加载条件下的裂纹扩展行为:准静态,动态和循环。我们分析了两种特定的配置:从粗晶到纳米晶(CG→NG)的梯度,反之亦然(NG→CG),评估了它们的力学性能。CG→NG 结构始终表现出优异的性能,包括在所有

测试条件下增强的强度、韧性和抗疲劳性。我们进一步阐明了与裂纹萌生和扩展有关的微观机制。考虑到两种梯度结构的断裂韧性和断裂机制的优缺点，我们开发了双梯度结构。这种设计包括从 CG 到 NG 再回到 CG (CG→NG→CG)，实现了抗拉强度(~740 MPa)、延展性(~17%)和断裂韧性(超过 350 MPa·m^{1/2})的最佳组合，同时保持了材料对灾难性破坏的抵抗能力。这些发现不仅证实了 CG→NG 结构作为高性能工程材料的潜力，而且还支持了材料结构的战略设计，以增强机械性能，符合“材料扁平化设计原则”。

C10-11

论文题目待定

范国华

南京工业大学

C10-12

跨尺度异构金属材料的应变传递与配分

黄崇湘

四川大学

金属材料的跨尺度异构(Hetero-structure)是指将具有显著流变应力差异的微/纳米晶粒作为基元进行有序构筑而形成的多级晶粒微观组织，是旨在提高应变硬化能力和拉伸塑性的微结构设计策略，迄今应用于各种金属结构材料并获得了强度与塑性/韧性等力学性能的优异匹配。异构策略的出发点是其特征的力学响应，即塑性变形时在异构基元界面形成的应变梯度，异构的特征应力应变响应是力学迟滞环。与均匀结构材料相比，异构材料在塑性变形时表现出诸多特征：增强的应变硬化、强化的界面效应、显著的应变配分等。报告针对跨尺度异构金属材料在塑性变形过程中的应变传递与配分现象进行讨论，深入剖析应变传递和配分的机理以及温度的影响，揭示其对力学性能的贡献。

C10-13

低层错能面心立方高熵合金在高应变率极端条件下的变形与失效机制

赵士腾

北京航空航天大学

C10-14

ϵ -马氏体对高锰钢断裂韧性的影响：再认识与新性能

赖庆全*

南京工业大学

ϵ -马氏体是高锰钢的重要强化相，能显著提高材料的加工硬化能力。但 ϵ -马氏体被普遍认为对断裂性能有害，对 ϵ -马氏体相变的调控是提升高锰钢综合力学性能的关键。目前的研究主要基于单轴拉伸和缺口冲击实验，缺乏基于断裂力学方法的本征断裂韧性评估，关于 ϵ -马氏体复杂影响的认识尚有待深入。本研究以 ϵ -马氏体含量不同的 Fe26Mn 和 Fe30Mn 合金为模型材料，利用基本断裂功方法对高锰钢薄板材料的断裂韧性进行深入分析。通过分析基本断裂功与厚度的相关性，可以定量评估 ϵ -马氏体对断裂过程区的损伤和颈缩两种过程能量耗散的影响。结果显示， ϵ -马氏体含量更高的 Fe26Mn 的损伤过程能量耗散更高，而裂尖颈缩的能量耗散更低。因此，Fe26Mn 在 1 毫米及以上厚度样品的基本断裂功更低，但在小厚度样品（1 毫米以下）却表现出更高的断裂韧性。利用这一方法检验超细晶铁锰合金的断裂性能，发现在 1 毫米厚度样品中 ϵ -马氏体的超细晶化可通过抑制损伤萌生而提高材料的断裂韧性。因此，高锰钢板材的断裂韧性取决于厚度。在薄板中， ϵ -马氏体因更高的损伤能量耗散而有利于提高断裂韧性。对 ϵ -马氏体进行超细晶化可进一步提升高锰钢的断裂韧性。

C10-15

轻质高刚度铸造 Al-Li 合金微结构调控机理及其强塑性关联性

邵丽雄, 李险峰*, 王浩伟

上海交通大学

铸造 Al-Li 合金因高比强度、高刚度被视为一种前景广阔的结构材料。本研究基于微观结构表征和力学测试等手段系统研究了微量 Ti 组元和热处理对 Al-Li-Cu 合金的晶粒结构、沉淀相、无析出带等微结构以及性能的影响机理。Ti 显著细化合金晶粒, 促进柱状晶-等轴晶转变。这种细化可归结于微米级 Al₃Ti 的异质形核作用和 Ti 溶质对晶粒的生长抑制。添加 0.2wt.% Ti 可有效降低晶粒尺寸至 35 μm 。此外, Ti 影响了合金沉淀相的析出行为。详细的透射电镜观察表示: Ti 的加入抑制了 δ' (Al₃Li)和 δ' -PFZ 的生长, 这可能与 Ti 溶质与空位间的相互作用有关。Ti 溶质优先与空位结合形成 Ti-空位团簇, 从而降低了基体中有效自由空位的浓度, 进一步降低了 Li 原子和空位的扩散速率, 最终抑制了 δ' 和 δ' -PFZ 的生长。此外, 降低时效温度也具有类似效应。0.2 wt.% Ti 改性的合金经过在 175° C@8h 时效后可获得优异性能: 高屈服强度(272 MPa)、高抗拉强度(399MPa)和适宜延伸率(5.9%), 相较于无 Ti 添加的合金分别提高了 8.8%、34.8% 和 293.3%。强度和延伸率的同时提高可归因于细小等轴晶粒、高密度且均匀的 δ' 沉淀、狭窄的 δ' -PFZ 等。微结构及性能演变背后的机理将被进一步讨论分析。

C10-16**金属材料异构分级与异构强化**

曹阳

河海大学

本文通过深度解析常见的金属结构和异构, 探讨异构的分级。通过剖析一系列材料, 包括: 工业纯钛、纯镍、中熵合金、高熵合金、双相材料和金属基复合材料, 研究这些材料内的非均匀变形机制。从非均匀成分分布到晶粒尺寸异构, 再到多相异构, 探讨不同异构中激发异变强化的共性和独特性。实验结果展示了, 异变强化中的背应力源于位错的长程积累, 这类背应力强化在多晶材料中是固然存在的, 但是作为异构材料, 背应力强化的效果必须明显高于均质多晶材料, 与此同时还要确保异质结构能够很好的协调非均匀背应力分布, 以防止开裂。所以, 纯金属材料异构需源于晶粒尺寸异构, 中/高熵合金异构来源于本征的非均匀元素分布, 双相材料和金属基复合材料的异构来源于异质相和相界。随着材料成分和结构的复杂化, 异构可以叠加, 相应的异变强化效应也会发生改变。

C10-17**基于增材制造技术的高性能异构合金设计与制备**

张振波

上海科技大学

金属激光增材制造技术不仅为复杂结构件一体化成形提供极大便利, 其独特的冶金学过程为新合金设计提供了新的自由度。充分利用增材制造过程中的极高温梯度、凝固速率和循环热历史等冶金学特点, 有望设计制备出传统工艺无法获得的合金组织结构, 从而获得具有优异力学性能的新合金。本研究首先以增材制造过程中熔池为组织设计和构筑的基本单元, 通过调节打印工艺控制熔池间的相互影响热历史, 在马氏体/铁素体钢和钛合金等对热处理相变敏感的材料中, 构筑出具有多尺度异构组织的合金。在马氏体/铁素体钢种实现了具有粗大 δ 铁素体、细小马氏体和残余奥氏体的多级异构组织, 在双相钛合金中获得了从原始 β 晶粒到 α 析出相的两级异构组织, 合金的强度和塑性较传统工艺制备的均有显著提升。通过原位拉伸 EBSD 和原位多尺度 DIC 等手段揭示了具有新型组织结构合金的变形特点和强韧化机制, 探讨了利用增材制造技术设计制备高强高韧合金的策略和前景。

C10-18

三维空间结构叠加单原子成份信息的四维成像技术及其在金属材料中的应用

刘吉梓

南京大学, 南京生物与医学电子显微技术研究中心

C10-19**纳米析出和片层结构协同强化钢的组织与性能研究**

杨渤, 何琼, 郭凤娇, 张超, 翟羽, 黄崇湘*

四川大学, 空天科学与工程学院

工业应用的快速发展需要更高强度的钢, 而强度的提升往往导致塑性的降低, 尤其是均匀延伸率。本文介绍了一种纳米析出强化、片层强化和相变诱导塑性 (TRIP) 相协同的超高强度双相钢。通过采用透射电镜、三维原子探针等表征手段, 重点研究了层状结构特征和纳米颗粒的析出, 揭示了其强化机制及变形机理。研究发现, 超细纳米片层结构是强度的主要贡献来源, 马氏体中高密度的共格纳米析出相进一步增加强度, 其中 B2 结构的纳米析出颗粒被认定为 Ni (Al, Fe, Mn) 相。此外, 观察到孪晶和层错的交割使得奥氏体在变形过程中发生了 TRIP 效应, 这种独特的诱发方式使得钢种获得了优良的塑性。本研究关于几种强化途径的协同强化为未来超高强度钢力学性能的提高提供了有用的综合策略。

C10-20**残余奥氏体稳定性对 TRIP 辅助钢延展性和韧性的双重作用**肖柏¹, 喻异双², 胡斌², 刘仕龙², 刘文庆^{*1}

1. 上海大学

2. 上海交通大学

本文研究了残余奥氏体(RA)稳定性对 TRIP 辅助钢延性和韧性的影响。三种实验钢的 RA 稳定性由低到高依次为:C450, C450-ST, C450-LT。热轧-卷取的 C450 钢延性和韧性最低。C450 回火 0.5 小时后得到的 C450-ST 的延展性明显提高。回火 12 小时得到的 C450-LT 与 C450-ST 相比延展性略有下降。但由于 RA 的稳定性显著提高, C450-LT 的韧性较 C450 和 C450-ST 明显提高, 韧脆转变温度(DBTT)显著降低。这些结果表明, 相对稳定的 RA 均匀分布, 可以促进在应变各阶段保持持续的 TRIP 效应, 提高应变硬化率, 提高钢的延性。然而, 稳定性较高的 RA 在冲击过程中会发生先塑性变形, 后发生 TRIP 效应, 使裂纹尖端钝化, 从而抑制脆性断裂, 提高断裂韧性。通过原子探针层析技术 (APT), EBSD 等表征手段说明了 RA 的稳定性对 TRIP 辅助钢的延展性和韧性具有双重作用; 连续均匀的 TRIP 效应提高了材料的延性, 而较强的 TRIP 效应不利于材料的韧性。

C10-21**Tailoring planar defects in nanoprecipitates to deliver high strength and ductility of L12-strengthened multi-principal element alloys**Qing Zhang^{*1}, Yuchi Cui¹, Yixuan Hu¹, Tao Yang², Daisuke Egusa³, Eiji Abe³, Zhe Chen¹, Xiaodong Wang¹

1. Shanghai Jiao Tong University

2. Hong Kong Branch of National Precious Metals Material Engineering Research Center (NPMM), City University of Hong Kong, Kowloon, Hong Kong, China

3. Department of Materials Science and Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Precipitation strengthening enhances the strength is a well-established method to augment the strength of metallic materials but often reduces ductility. In this study, we propose a novel approach to simultaneously improve strength and ductility by altering the planar defects in nanoprecipitates. We employ compositional engineering to

incorporate chemical heterogeneity into the nanoprecipitates of a CoCrNiAlTi alloy, using the CALPHAD approach. A modest substitution of 1% Ti with Ta in this alloy elevates the yield strength from 850 MPa to 1050 MPa while preserving a ductility of 36%. High-resolution scanning transmission electron microscopy (STEM) and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) analyses confirm the preferential localization of Ta within the nanoprecipitates, which fosters local chemical ordering (LCO). Additionally, density functional theory (DFT) calculations reveal that this Ta-enriched LCO substantially alters the formation energies of the nanoprecipitates' planar defects. Specifically, the introduction of LCO heightens the formation energy of antiphase boundaries (APB), thereby increasing the critical stress required for precipitate shearing. Concurrently, LCO lowers the formation energy of superlattice intrinsic stacking faults (SISFs), which promotes the nucleation of dislocation emission during precipitate shearing. This process encourages the development of SISFs within L12 nanoprecipitates and the subsequent formation of a dislocation-SFs network. Such dispersed dislocations and SFs mitigate strain localization, promoting a higher work hardening rate and ensuring the stability of plastic deformation. Our findings elucidate a hierarchical deformation mechanism in nanoprecipitate-strengthened alloys.

C10-22

烯碳铝基复合材料异构组织调控与强韧化研究

谭占秋*, 付晓文, 滕浩宇, 范根莲, 李志强, 张荻
上海交通大学

以碳纳米管、石墨烯为增强相的烯碳铝基复合材料, 由于烯碳的晶界钉扎效应, 使合金基体为超细晶组织、力学性能呈强塑性倒置。基于金属材料异构强韧化原理, 作者开展了烯碳铝基复合材料异构组织调控与强韧化研究, 开发了基元组装与合金化复合制备技术; 以 2A12 铝合金基体为例, 研制了双模态、三模态晶粒结构以及均匀层状、双模态层状晶粒结构的烯碳铝基复合材料, 探讨了应力应变场、界面应变梯度等对铝基复合材料异构强韧化的影响规律。

C10-23

镁合金界面析出行为的原子尺度研究

谢红波
大连理工大学

C10-24

中熵合金共格析出强韧化研究

马彦*
中国科学院力学研究所

发展高强高韧结构材料面临永恒的挑战。为了实现高强度, 通常需要对材料进行冷加工变形使晶粒尺寸降低, 同时提高位错密度。然而, 冷变形金属往往会丧失应变硬化能力。为此, 我们通过对材料进行热变形引入三重相结构, 包括 B2 析出相, 马氏体相和残余奥氏体相。为了获得具有不同体积分数和尺寸的 B2 析出物, 对热轧态 Fe-Ni 合金在临界温度下进行时效和淬火。经过时效处理的样品, 其屈服强度和应变硬化率均高于热轧态样品。时效样品显示出比热轧样品更强的异质变形诱导硬化现象。在拉伸测试中, 时效样品的马氏体相变相较于热轧态样品更为显著。这归因于 B2 相围绕在奥氏体晶粒周围提高了局部应力, 以及时效过程中镍和铝的扩散导致的奥氏体稳定性降低。拉伸变形后可观察到变形诱导的板条马氏体和高密度位错。此外, 拉伸变形后马氏体中的孪晶密度明显增加, 有助于动态 Hall-Petch 效应进一步实现应变硬化。

C10-25

基于析出相和变形带调控的稀土镁合金变形机制研究

张至柔*, 郭恩宇, 陈宗宁, 康慧君, 王同敏

大连理工大学, 材料科学与工程学院

与传统的 AZ 系、ZK 系商用镁合金相比, 稀土镁合金 (Mg-RE 合金) 具有更加优良的强度和塑性, 在中高温恒定载荷下具有更高的耐热性, 在航空航天、汽车、国防领域有广泛的应用前景。本研究以不同 Y 含量的 WE 系列镁合金为基础, 探讨了 Y 元素对 WE 镁合金热变形组织演变和力学性能的影响, 并探讨不同的时效和热处理工艺提升 WE 镁合金的力学性能的机理。通过调控热变形过程中析出相和位错的相互作用, 使得更多的位错缠结点的出现, 从而促进连续动态再结晶行为, 制备得到了组织均匀的并同时兼具高强度和高塑性的高强韧镁合金。

C10-26**层状异构 Al_{0.5}CoCrFeNi_{1.5} 高熵合金韧化机制研究**

张杭州, 杨沐鑫*, 武晓雷, 袁福平

中国科学院力学研究所

五主元 Al-Co-Cr-Fe-Ni 系高熵合金因其丰富的微观结构可设计性而备受关注, 但在具有高强度的同时, 拉伸塑性及断裂韧性偏低是其主要的力学性能短板。本研究提出一种新型合金成分 Al_{0.5}CoCrFeNi_{1.5} (at.%) 高熵合金, 并针对该合金设计、构筑了一种可时效硬化的层状异构 (PHL)。其中, 层状基体由残余变形晶粒 (RDGs) 与再结晶晶粒 (RxGs) 等组成的层状区域交替分布构成, 多级金属间化合物 (B₂-NiAl) 颗粒 (平均粒径呈数十至数百纳米) 非均匀分布于基体内部。与同体系高熵合金相比, 层状异构样品同时具有优异强塑性匹配, 以及较高的断裂韧性。进一步分析表明, 该层状异构样品具有独特的外禀韧化机制, 即, 由于 RDGs 和 RxGs 之间的塑性响应不同, 导致裂纹在异质界面处发生偏转、钝化和分叉等微观韧化行为, 阻碍了裂纹扩展。此外, 裂纹尖端的 B₂ 颗粒作为微裂纹的潜在形核点, 一方面, 诱导裂纹形核和多向扩展, 增加了裂纹扩展的能量耗散; 另一方面, 高密度的 B₂ 颗粒能够容纳大量几何必需位错增殖, 协调裂纹尖端塑性区内基体/沉淀相之间的应变响应差异, 缓解主裂纹尖端应力集中, 提高了外禀韧性。在相应内禀增韧机制方面, 林位错硬化和异质变形诱导 (HDI) 硬化, 共同促使层状异构具有较大的裂纹尖端塑性区尺寸和显著的裂尖微区应变硬化行为, 在起裂过程中消耗更多塑性变形能。本研究提出的层状异构韧化机制可望为先进高强韧合金设计研发提供参考。

C10-27**高强韧纳米奥氏体-马氏体时效钢的微结构与强韧化**郭凤娇¹, 张超¹, 翟羽¹, 程乾¹, 王明赛^{1,2}, 王清远^{1,2}, 梁剑雄³, 曹文全³, 黄崇湘^{*1,2}

1. 四川大学, 空天科学与工程学院

2. 四川大学, 破坏力学与工程防灾减灾四川省重点实验室

3. 钢铁研究总院

本报告提出了一种通过简单热-机械工艺调控马氏体时效钢的微结构工艺。该工艺结合相变诱导塑性和位错剪切机制的优势, 有效提升了马氏体时效钢的强度-塑性协同性。具体工艺如下: (1) 通过高应变量冷轧和临界退火, 在马氏体基体中调控出纳米晶奥氏体和块状/针状的 B₂-纳米沉淀相; (2) 通过二次峰值时效处理, 进一步优化奥氏体-马氏体时效微结构, 即等轴的纳米奥氏体 (~150 nm) 弥散分布在具有高位错密度的片层/板条 α' -马氏体基体 (~130 nm) 中, 且马氏体基体内形成了高数量密度的球形 B₂-纳米共格沉淀相 (~6.5 nm)。单轴拉伸结果表明该纳米奥氏体-马氏体时效钢的屈服强度高达 ~1.65 GPa, 抗拉强度 ~1.9 GPa, 均匀塑性 ~6-7%, 且加工硬化率有显著的“上拐”现象。研究结果表明该纳米奥氏体-马氏体时效钢的高强度主要归因于纳米晶奥氏体的晶界强化、马氏体基体的片层强化以及 B₂ 相的有序强化。多阶段加工硬化行为在超高强度水平上产生较高的均匀塑性, 主要归因于 2 种机制的顺序激活: 变形诱导亚稳

奥氏体向马氏体的转变,使得加工硬化率在屈服后不久($\epsilon \sim 1.5\%-3\%$)产生明显的“上拐”现象;位错剪切机制促进了高塑性应变阶段($\epsilon > 3\%$)位错-析出相的交互作用和累积,从而推迟加工硬化率的衰减并提高材料的均匀塑性。

C10-28

异质结构效应提高纯 Zr 的强度-延展性组合

朱心昆*

昆明理工大学材料学院

在本研究中,通过旋锻后退火制备出含有纳米/超细晶粒和再结晶粗晶粒组成的异质结构 Zr。与粗晶粒的 Zr 相比,由于大量的纳米晶粒和超细晶粒导致旋锻 Zr 的强度明显提高。此外,在旋锻过程中,还产生强烈的 $\langle 1010 \rangle$ 织构。在退火后的 Zr 中发现了强度较弱的 $\langle 1010 \rangle$ 织构。此外,在旋锻过程中观察到 HCP-FCC 相变,并在退火后保持不变。具有异质结构的退火 Zr 表现出高强度和高延展性的优异组合,这归因于多尺度异质结构效应: a) 纳米/超细晶粒和异质形变诱导强化导致高强度; b) 再结晶的粗晶粒产生的加工硬化和异质形变诱导的应变硬化改善了延展性; c) 位错运动在 FCC/HCP 相界面处受到阻碍,从而提高强度; d) 软 FCC 相可容纳 c 轴应变并提供更多滑移系统,从而获得良好的延展性。此外,粗晶粒和超细晶粒界面上的锥面滑移被激活,有助于改善异质结构 Zr 的拉伸性能。

C10-29

增材制造钛合金缺陷调控工艺与力学性能优化机制

阳华杰*

苏州实验室

本报告将简要介绍近几年在激光选区熔化增材制造钛合金、铝合金等方面的一些研究进展。一方面,探索了增材制造合金材料在拉伸变形和疲劳服役过程中缺陷的演化规律,结合多尺度微结构表征和原位表征技术,分析了关键缺陷参量对力学性能的影响规律。另一方面,通过电脉冲技术和电-热-力耦合工艺对增材制造合金的微观组织和缺陷进行调控,揭示出优化微观组织、实现缺陷愈合的工艺条件和强韧化机制。本研究对增材制造合金材料在航空金属构件的适航应用方面也许具有一定参考意义。

C10-30

轻质钢在低温下具有优异的动态剪切性能

王健, 马彦, 袁福平*, 杨沐鑫, 武晓雷

中国科学院力学研究所

制备了一种具有双纳米沉淀和非均匀晶粒结构的轻质钢,并利用霍普金森杆试验研究了其动态剪切性能。发现大部分 B2 纳米沉淀物分布在 FCC 晶粒内部, κ' -碳化物与 FCC 基体相共格,这有助于 FCC 的力学性能。双重非均匀结构钢在室温下表现出较好的准静态拉伸和动态剪切性能,在低温下表现出比室温下更好的动态剪切性能。动态剪切试验后的组织表征表明, FCC 相和 B2 相都是可变形的。通过平面位错揭示了室温下的动态剪切变形机制。在低温下,在 0.5 的动态剪切应变下,观察到平面滑移痕迹。而在低温和高剪切应变为 1 时的动态剪切变形机制主要是两个不同滑移面的滑移带相交、纳米间距网络的形成和变形诱发的层错。对于具有高层错能的合金,在室温条件下,变形引起的层错的观察结果与准静态条件下甚至动态条件下的观察结果有很大的不同。位错、纳米间距网络和层错与 B2 纳米沉淀和相干 κ' -碳化物的相互作用提供了强应变硬化,从而在低温下具有更好的动态剪切性能。

C10-31

两级网状异质结构 TiB/Ti64 钛基复合材料的设计制备与强韧化机理

龚德龙, 安琦, 黄陆军*
哈尔滨工业大学, 材料学院

钛及钛合金凭借其高的比强度被广泛应用于航空航天, 武器装备等领域。为了进一步提升钛及钛合金的强度, 利用第二相强化或载荷传递强化的钛基复合材料可以大幅度提升材料的强度, 但是不可避免会带来塑性的损失。为了解决上述钛基复合材料强塑性倒置的难题, 本研究通过激光粉末床熔化技术制备 Ti64 合金蜂窝状金属框架, 将低能球磨后包覆有 TiB₂ 颗粒的 Ti64 混合粉末填充在合金框架内, 结合热压烧结技术, 实现了两级网状异质结构 TiB/Ti64 钛基复合材料的设计制备。通过改变蜂窝框架结构的几何参数, 探究了异质结构密度对于材料力学性能的影响。结果表明, 当增强相体积分数保持为 3.4% 时, 随着异构界面密度的增加 (1.5mm/mm² 至 5.2mm/mm²), 材料的屈服强度、抗拉强度、均匀延伸率均随之增加, 加工硬化率大幅度提升, 而非均匀延伸率降低, 总体延伸率随之降低。当异构界面密度为 1.93mm/mm² 时, 材料的断后延伸率达到 9.95%, 较纯 Ti64 合金提升了 1.07%, 而抗拉强度达到 993MPa, 较 Ti64 合金提升了 95MPa, 实现了强塑性协同提升。数字图像相关技术表明, 与合金或者纯复合材料相比, 异构钛基复合材料实现了显著的应变去局域化。

C10-32

PdAgCuAuPtZn 多元合金的时效硬化行为研究

周璇*

云南大学材料与能源学院

近年来, 多主元合金的研究已成为材料研究领域的热点之一, 多主元的成分设计思路使得其合金具有独特的微观结构和优异的性能, 引起了广泛关注和积极探索。贵金属多元合金由于其独特的优点, 如优异的化学稳定性、优异的电学性能和良好的加工性, 主要用于电接触材料领域。然而, 缺乏关于 PdAgCuAuPtZn 合金的组织演变及其对合金性能影响的详细信息。结合纳米压痕和透射电镜技术, 我们系统地研究了 PdAgCuAuPtZn 在时效过程中的微观结构演变和时效硬化机制。结果表明, 合金的时效硬化是由于基体中的调幅分解和局部化学短程有序。在时效过程中晶界处发生不连续析出, 不连续析出为富 Cu 和富 Ag 两相层状结构, 并随着时效温度升高, 不连续析出逐渐取代基体, 导致合金时效软化。此外, 我们发现不连续析出也可以通过在富 Cu 相中形成的局部化学短程有序进行硬化, 这为 PdAgCuAuPtZn 合金提供了一种新的时效硬化机制。这些结果将有助于深入了解 PdAgCuAuPtZn 合金的时效行为和设计高性能贵金属多主元合金。

C10-33

Cr 原子在晶界附近偏析的“元凶”——O 原子晶界诱导偏析

彭学诚, 罗乙娟, 郭汉杰*, 郭靖

北京科技大学

Cr 原子作为金属材料中优质“添加剂”在众多领域得到青睐。微量的 Cr 原子将极大地改变金属合金显微组织、力学性能以及耐蚀性。然而, 随着 Cr 原子的过度使用, 人们发现 Cr 原子偏析似乎给合金造成新的重大问题, 这包括在晶内缺陷处偏析以及晶界附近偏析。溶质原子晶界偏析是合金系统降低体系能量的一般手段, Cr 原子在晶界附近偏析促使偏析带与第二相粒子的生成。相比较而言, 合理控制第二相粒子析出可有效防止 Cr 在晶内富集, 而 Cr 原子晶界偏析似乎是不可控的, 这源自于 Cr 在晶界偏析的内在原因和控制机制并不明确。众多学者在研究 Cr 偏析时, 常常将系统进行简化, 并将各溶质原子当成独立个体进行处理。然而合金体系是一个涉及多元多相反应的复杂混合系统, 存在多种原子以及彼此之间的交互作用, 特别是 C/O/N 等轻量原子, 晶界微区同样满足最小自由能原理。一般而言, 轻量原子 C、O、N 在合金制备过程不可避免, ppm 级的溶质含量将会极大地改变了金属溶质原子在合金中的偏析状态, 这一特性预示着 Cr 原子晶界偏析可能与超轻量原子 C、O 之间存在某种强烈联系。

在本研究中,当不考虑其他溶质原子影响时,平衡偏析热力学与扩散动力学结果显示独立 Cr 原子在 Fe-Cr 二元晶界体系中偏析比接近于 1, Cr 在铁素体中扩散速率慢,属于典型的弱偏析原子。进一步采用真空感应熔炼与渣钢平衡反应技术制备了不同氧含量的 Fe-Cr(25%)-Al(5%)-C(0.01-0.02%)-O(0.0005-0.0076%)-N(0.0004-0.0006%)六元系合金样本,并获得具有 $w[\text{O}]\% < 6\text{ppm}$ 的超低氧合金。SEM 与 ASE 结果显示随着晶界上氧原子浓度增加, Cr 原子在晶界偏析程度逐渐加剧,并在晶界附近存在明显的 Cr-O-C 的原子扩散层。研究中将晶界形成过程简单处理为多原子混合过程,建立 Fe-Cr-Al-C-O-N 多元系晶界偏析混合热力学模型。模型中以各溶质原子在晶界过剩偏摩尔偏析混合吉布斯自由能表征晶界上溶质原子 i 偏析对于晶界自由能的贡献值,即是溶质原子 i 向晶界偏析的能力。随着晶界上 O 原子浓度增加, Cr 原子的过剩偏摩尔偏析混合吉布斯自由能负值越大,而 C 原子则相反。这预示着晶界上 C 原子对于 Cr 原子晶界偏析存在抑制作用,而晶界氧原子将会促进 Cr 向晶界偏析。其根本原因在于 C-O 原子之间排斥效应,导致优先占据晶界偏析位点的 C 原子排出 O 原子到晶界附近。被排除的晶界的 O 原子与 Cr 之间的强吸引作用诱导 Cr 原子在晶界附近偏析。这一规律在 Ni 基合金与中以及高 Si 不锈钢中同样具有普适性。这表明有效地控制合金中 O 原子极限浓度,能够解决在晶界附近 Cr 偏析问题。

C10-34

高密度孪晶诱导纯钛强度-塑性协同提升

王帅卓¹, 胡钊华², 黄照文³, 高波⁴, 陈雪飞⁵, 胡佳俊¹, 朱运田⁶, 李玉胜¹, 周浩^{*1}

1. 南京理工大学
2. 鞍钢北京研究院
3. 东莞理工大学
4. 辽宁材料研究院
5. 江苏大学
6. 香港城市大学

长期以来,高性能金属材料的强度和延展性同时优化一直是研究人员面临的挑战,其特点是两种性能之间的互斥性。尽管有大量的研究旨在克服这一挑战,但在强度和延性之间实现理想的平衡仍然难以捉摸。在这里,我们提出了一种新的方法,该方法涉及将高密度孪晶边界引入纯 Ti,同时保持几乎不变的晶粒尺寸。显著提高了纯钛的屈服强度、极限抗拉强度和均匀伸长率。原位电子背散射衍射(EBSD)分析显示,与基体相比,孪晶中的位错密度要高得多,这意味着在高应力水平下,孪晶的应变硬化率显著提高,延展性增强。晶粒内错取向轴(IGMA)分布方法的结果表明,高密度位错是由非基底 $\langle c+a \rangle$ 滑移激活引起的。此外,研究还发现,除了晶体取向和潜在的位错嬗变机制外,孪晶界附近 c/a 比的增加也有助于孪晶内 $\langle c+a \rangle$ 位错的激活。相关研究结果为开发高性能 HCP 金属提供了一条有希望的途径。

C10-35

基于自生-添加纳米相的镁基复合材料基面/非基面位错滑移行为调控

王川云^{*1}, 寇宏超¹, M.T. Perez-Prado², 李金山¹

1. 西北工业大学
2. IMDEA Materials Institute

镁基材料具有密排六方晶体结构,在室温变形过程中表现出迥异的基面非基面位错激活、滑移特征。基面位错临界分切应力远低于非基面位错,因而在变形过程中极易激活,并成为制约镁基材料变形应力水平上升的短板,致使非基面位错无法激活,造成此类材料应变协调能力出现显著的各向异性特征,塑性成形能力有限。为此,本工作分别探究了自生纳米相和添加纳米颗粒对镁基复合材料基面/非基面位错激活性能的影响规律,为探究二者组合对镁基复合材料微观变形行为的影响提供基础。结果表明:自生纳米相与基体界面共格性良好,一方面对基面位错激活阻碍效果好,而另一方面,其对基面位错连续切过阻碍极为有限,导致镁基材料表现出强度和应变集中程度提升的变形特征。而添加纳米颗粒对基面位错连续运动的

抑制效果极为显著，能够显著提升镁基复合材料的加工硬化能力，有效提升此类材料塑性变形能力。通过自生-添加纳米相设计，能够有效调控基面非基面位错滑移行为，提升镁基材料强塑性性能。

C10-36

异构面心立方高熵合金的微结构间交互作用及低温变形机理研究

马新凯*, 李家豪

西南交通大学

异质结构普适的对室温强韧化成效显著，但其在低温加载时能否唤醒面心立方合金的巨大潜力是力学和材料交叉学科面临的挑战。为此，本文以面心立方结构的 $\text{Al}_{0.1}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金为模型材料，基于经典的异构单元域交互效应，通过多种先进原位表征实验和理论推导的研究途径，深入研究异构面心立方高熵合金诱导的低温强韧化机理，并建立其低温下的变形理论。此外，通过预变形耦合低温环境以增加孪晶的含量，从而放大微结构间交互作用（位错和孪晶界/晶界）来更好的理解异构独立单元域的低温变形背后的晶体学机制。研究表明：当加载温度降低到 77 K 时，高密度纳米孪晶被有效激活，一方面使位错在孪晶界处堆积并防止其通过，从而使得屈服强度提高 2 倍，极限抗拉强度提高 10%。另一方面，位错沿着纳米孪晶界移动，导致孪晶界迁移和孪晶耦合剪切带等多重变形机制的产生，这有助于保持 27% 的足够延展性。研究成果将促进异构面心立方合金超低温变形理论的发展，为其作为超低温高强韧合金的应用提供了科学和工程意义。

C10-37

异构结构异常提升钛的低温力学性能

苏武丽¹，王明赛¹，郭凤娇¹，冉昊¹，程乾¹，王清远^{1,3}，朱运田²，马晓龙²，黄崇湘^{*1,3}

1. 四川大学，空天科学与工程学院

2. 香港城市大学

3. 四川大学，破坏力学与工程防灾减灾四川省重点实验室

大多数金属材料在低温下表现出强度和塑性之间的“倒置”矛盾，即强度越高，塑性越低。因此，通过微观结构设计在低温下获得高强高韧的金属材料成为不断探究的重要课题。虽然目前异构微结构（Heterostructure）设计在室温下实现了强度和塑性的同步提升，但其在低温下的应用潜力并未得到充分探索。这份报告表明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%），突破了传统均匀结构的强度-塑性匹配瓶颈。通过与室温变形行为的详细比较，揭示了异构钛具有优异低温力学性能的根本原因在于：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，从而产生较高的 HDI（Hetero-deformation-induced）应力。这一研究成果不仅有助于深入理解低温条件下异构材料的变形行为，还为设计高性能低温材料提供了新的思路。

C10-38

层状与纤维状材料表界面强韧化

庞震乾*

浙江大学

传统低维基元构筑材料主要通过层间与链间的表界面复合，然而表界面力学研究在微纳尺度存在着宏观尺度不具有的微观原子作用信息，因此微纳表界面的物理力学研究已成为当前材料表界面强韧化的热点和难点问题之一。此外，纯天然材料种类繁多，由排列组合所引起的复合差异导致最终复合材料的性能跨度极大，因此对特定优异物理性能（高强、高韧、高透等）的复合材料开发充满了巨大的挑战。机器学习

为高性能材料的开发提供了极大的便利，而传统机器学习手段是通过迭代优化实验来进行性能趋近，这在复合基元庞大的参数空间（尺寸、形状、刚度、强度等），仍然显得效率低下。因此通过机器人技术、机器学习神经网络算法与分子尺度模拟，寻求一种有效的跨尺度模拟方法，以建立微观结构和宏观力学性能的关系成为当前探究微纳结构材料强韧化最高效的手段之一。

C10-39

Optimizing strength-ductility in medium entropy alloys with atomic-scale rapid composition design

Qing Gao*, Xuefeng Lu, Junqiang Ren, Jisen Qiao

Lanzhou university of technology

The growing demand for material properties in challenging environments has led to a surge of interest in rapid composition design. Given the great potential composition space, the field of high/medium entropy alloys (H/MEAs) still lacks effective atomic-scale composition design and screening schemes, which hinders the accurate prediction of desired composition and properties. This study proposes a novel approach for rapidly designing the composition of materials with the aim of overcoming the trade-off between strength and ductility in metal matrix composites. The effect of chemical composition on stacking fault energy (SFE), shear modulus, and phase stability was investigated through the use of molecular dynamics (MD) and thermodynamic calculation software. The alloy's low SFE, highest shear modulus, and stable face-centered cubic (FCC) phase have been identified as three standard physical quantities for rapid screening to characterize the deformation mechanism, ultimate tensile strength, phase stability, and ductility of the alloy. The comparison of stress-strain curves for various predicted components using simulated and experimental results serves to reinforce the efficacy of the method. This indicates that the screening criteria offer a necessary design concept, deviating from traditional strategies and providing crucial guidance for the rapid development and application of MEAs.

C10-40

揭示 Al-Cu-Li 合金中纳米 T1 相的界面调制晶体结构

杨庆波, 贾志宏*, 丁立鹏

苏州国家实验室

Al-Cu-Li 合金中的纳米 T1 相是最主要的强化相，但由于难以确定锂原子的位置和铜原子的顺序，其原子结构仍然难以确定。在这项研究中，结合原子分辨率高角度环形暗场 (HAADF) 和环形明场 (ABF) 扫描透射电子显微镜 (STEM) 技术，可以明确确定 T1 相中锂原子的位置。结果表明，T1 相表现出界面调制的正交晶体结构：无论厚度如何，这些沉淀物始终保持褶皱的 Al(2)/Li(2) 最外层界面层，这与体相中的共面 Al(2)/Li(2) 层有很大不同。与大多数析出相重复的原始晶胞不同，T1 相中非重复的褶皱的 Al(2)/Li(2) 原子界面层导致 c 轴长度和化学计量随析出相厚度的变化而变化。此外，基于实验观察并经密度泛函理论 (DFT) 计算验证，提出了析出相 Al-Cu 亚晶格中原子的新型有序堆垛，这之前 X 射线衍射研究确定的稳定 T1 相的空间群 Cmmm 一致。基于这些研究结果，提出了稳定 T1 相和亚稳态 T1 相的新原子结构模型，与之前的模型相比，这些模型与实验观察结果的一致性更好。DFT 计算表明，当 T1 晶体界面 Al(2)/Li(2) 层嵌入 Al 基体时，其自动褶皱的过程会减小对周围 Al 基体施加的弹性应变。

C10-41

激光熔覆异质结构镍基涂层的组织与性能研究

赵乙霖、战再吉*

燕山大学

异质结构材料是解决金属材料强度-延性失衡的有效方法之一，在金属基复合材料涂层中引入网状异

质结构, 利用其在承受载荷时产生的异质变形诱导 (HDI) 强化和硬化效应, 可获得具有优异强度和延展性的涂层。利用激光熔覆法制备了不同 MoSi_2+C 含量 (10~30 wt%) 的异质结构镍基涂层, 观察其微观组织结构、相组成、元素分布, 研究了其力学性能和显微硬度, 并分析了异质结构在提高涂层性能方面所起到的作用。实验结果表明, 原位生成的碳化物颗粒 (Mo_2C 和 SiC) 沿晶界处分布, 整体呈现出网络状, 构成了异质结构中的“硬相区”, 而基体部分则作为“软相区”; 随着 MoSi_2+C 含量的提高, 涂层中的晶粒逐渐细化, 涂层硬度也随之增大, 当 MoSi_2+C 含量大于 20% 时, 微观结构由柱状晶+等轴晶开始转化为粗大的树枝状组织, 网状异质结构逐渐消失; 当 MoSi_2+C 含量为 18% 和 20% 时, 涂层具有高强度和良好的韧性, 抗拉强度和延伸率分别可达 706.33MPa、10.13% 和 865.93MPa、7.22%, 明显优于其它含量的试样, 这是因为此含量下的涂层具有更加明显的网状异质结构, 软硬两相的机械不相容性使其在界面处储存几何必要位错, 并诱导 HDI 应力的产生, HDI 强化和硬化效应的作用使材料在提高强度的同时保持了较好的延展性。

C10-42

高抗损伤 3D 打印 AlSi 微纳共晶双相三维网络结构

崔宇驰*

上海交通大学

本工作以 3D 打印 AlSi10Mg 合金为研究对象, 开展了从微观到宏观的跨尺度结构成分优化和力学性能表征工作。通过原位力学实验, 证明了快速凝固形成的微纳共晶双相三维网络结构能够有效抑制应变局域化、疲劳裂纹萌生及断裂裂纹扩展, 材料本征强塑性、疲劳强度和断裂韧性优异。特别是通过首创的原位微纳疲劳实验, 证明了微米级样品的疲劳极限达到材料屈服强度, 揭示了微纳共晶三维网络结构可以有效抑制驻留滑移带的形成, 消除疲劳损伤累积的抗疲劳新机制, 文章发表在 Nature Materials。

C10-43

Ni₂Co₁Fe₁V_{0.5}Mo_{0.2} 中熵合金的高温性能研究

姜伟^{1,2}, 曹阳¹, 张勇¹, 赵永好^{*1}

1. 南京理工大学

2. 安徽工程大学

以 Ni₂Co₁Fe₁V_{0.5}Mo_{0.2} 中熵合金为模型材料, 探究耐高温合金材料的设计思路。温度影响 Ni₂Co₁Fe₁V_{0.5}Mo_{0.2} 中熵合金变形过程中的位错密度与位错类型。结合准静态拉伸行为分析、变形动力学分析和微观结构观察, 高浓度固溶原子偏聚于高密度的位错林提供有效的背应力强化。背应力强化和固溶强化效应的共同作用, 使得 Ni₂Co₁Fe₁V_{0.5}Mo_{0.2} 中熵合金在高达 800℃ 的高温下仍表现出优异的加工硬化能力和强塑性匹配。此外, Ni₂Co₁Fe₁V_{0.5}Mo_{0.2} 中熵合金在 700℃ 下的高温蠕变过程中, 应力指数为 3.1, 表明蠕变以粘滞位错滑动机制为主。蠕变激活能为 456.3 kJ/mol, 与 Mo 自扩散活化能相当, 表明 Mo 扩散影响位错粘滞性滑移。增大固溶度和原子尺寸错配、降低剪切模量, 促进位错粘滞性滑移。

综上所述, 原子尺寸差异性设计, 添加原子尺寸显著不同的 V 和 Mo, 调控面心立方结构 Ni₂Co₁Fe₁V_{0.5}Mo_{0.2} 中熵合金晶格畸变、局部化学序和位错林结构, 能够提高位错滑移阻力和增加位错存储能力, 提高合金的高温性能。

C10-44

纳米孪晶镍亚十纳米尺度下力学性能的各向异性

段峰辉¹, 李倩¹, 沈哲灵², 孙李刚³, 吕坚^{*1}

1. 香港城市大学

2. 中国科学院金属研究所

3. 哈尔滨工业大学 (深圳)

纳米孪晶金属材料由于其独特的微观结构,因而具有高强度与韧性、高导电性、高热稳定性以及良好的耐腐蚀性,在航空航天,电子封装,微机电系统和能源技术等领域具有广泛的应用前景。但是纳米孪晶结构的制备与金属或合金的层错能密切相关:层错能越高,纳米孪晶结构越难形成。在具有高层错能的金属(如 Ni 和 Al)中引入纳米孪晶结构一直是一个长期的挑战,阻碍了对其强化机制的深入理解。本研究中,我们通过改进电沉积工艺,可控制备了一系列具有极细纳米孪晶片层厚度($<10\text{ nm}$)的柱状纳米孪晶结构的镍和镍合金,并系统地研究了它们力学性能和变形行为的各项异性。结合微纳力学实验和分子动力学模拟,我们发现在不同的加载取向,柱状纳米孪晶镍表现出不同的强化机制。在特定的加载取向(90° 和 0°),柱状纳米孪晶镍强化机制在某个临界孪晶片层厚度(3-5 nm)也会发生转变,从 Hall-Petch 强化到位错饥饿强化。这种变形机制的转变导致了均匀压缩塑性到局域压缩塑性的转变。以上结果增强了我们对纳米结构金属强化机制的理解,并为优化纳米结构金属的机械性能提供一条新途径。

C10-45

相分离引起的 CuZr 非晶弹性模量增强

祝若君^{1,2}, 潘杰¹, 李秀艳*^{1,3}, 卢柯^{1,3}

1. 中国科学院金属研究所 沈阳材料科学国家研究中心
2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院
3. 辽宁材料实验室

非晶合金通常表现出比其晶态对应物更低的弹性模量。结构弛豫可能会使无定形结构趋向于更低的能量状态,这是迄今为止唯一可以适度提高非晶弹性模量的方法。在本研究中,我们发现二元 CuZr 非晶的相分离可能会大幅增加其弹性模量。通过强烈的塑性变形以及随后的退火处理,淬火态的均匀非晶分解成两个化学成分不同且间隔细密(低于 10 纳米)的非晶相。相分离后的非晶的杨氏模量约为淬火态的 139%,与相应的晶态合金接近。模量的提高可能归因于形成了具有高密度非晶/非晶界面和更有序的无定形相。

C10-46

层状纳米结构 Al-Cu-Sc 合金的时效行为和力学性能

徐虎^{1,2}, 余东平¹, 帅林飞², 黄天林*¹

1. 重庆大学
2. 苏州国家实验室

大应变塑性变形制备的纳米结构金属具有高强度、高耐磨等优良性能,但塑性通常很差。突破由塑性变形本质所决定的“强度-塑性”倒置关系,实现金属材料高强高韧一直是结构材料领域的前沿研究方向。本研究通过大应变量轧制和低温时效工艺,制备了强塑性匹配优异的层状纳米结构 Al-2.2%Cu-0.2Sc(wt.%)合金,抗拉强度为 400 MPa,均匀延伸率和总延伸率分别达到 9%和 14%。利用 SEM-ECC、TEM、HAADF-STEM 和 APT 等系列表征技术,定量表征了形变和时效处理样品的微观组织结构,系统分析了高性能层状纳米结构 Al-Cu-Sc 合金的强韧化机理。结果表明,微量 Sc 元素在层片内部诱发了高密度的纳米级($\sim 4\text{ nm}$)析出相(θ'),产生的析出强化效应与细晶强化、位错强化互相叠加,共同提升了层状纳米结构 Al-Cu-Sc 合金的强度;另一方面,这些纳米尺度的晶内析出相容易与位错产生交互作用,提升材料塑性变形过程中对位错的储存能力,进而显著改善了纳米结构金属的塑性。本研究作为制备综合力学性能优越的纳米金属材料提供了新思路和新方法。

C10-47

在三元纳米晶 Ni-Mo-W 合金中利用热弛豫提高纳米金属结构稳定性

曾冬松*

中国科学院金属研究所

纳米金属材料优异的性能常受制于其较差的结构稳定性，晶界偏析作为一种可有效提高纳米晶体材料结构稳定性的方法，受到普遍关注。然而，晶界偏析在高温下通常会面临第二相析出的挑战，第二相析出消耗晶界溶质原子，破坏晶界偏析，继而导致纳米结构的迅速失稳。本工作通过在 Ni-Mo 二元合金中加入少量 W，抑制了第二相的析出，增加了纳米晶结构的热稳定性。特征小平面对晶界和高比例的 $\Sigma 3$ 重合位置点阵(CSL)晶界表明，大量退火孪晶的形成促进晶界弛豫。W 的加入降低了固溶体的层错能，有利于激发晶界弛豫。弛豫晶界降低了晶界能，将溶质原子“排入”晶内，导致晶界溶质原子的贫化，第二相析出被抑制可能与此相关。

C10-48

循环多向冲击下温度对等原子比 CoCrNi 中熵合金微结构细化的影响

屠向向^{1,2}, 王建军^{*1,2}

1. 太原理工大学, 机械与运载工程学院应用力学研究所

2. 山西省材料与结构冲击重点实验室

中熵合金的概念衍生于高熵合金，作为一类新型的结构材料，因其优异的力学性能而被广泛研究。然而，一些中熵合金较低的强度限制了其在工程上的应用。剧烈塑性变形方法能够大幅地细化合金晶粒，是提高合金强度的有效方法之一。本研究基于分离式霍普金森压杆技术提出了一种新的剧烈塑性变形方法：循环多向冲击 (Cyclically multi-directional impact, CMDI)，该方法利用霍普金森压杆沿正方体金属试样的三个轴向依次进行冲击，可以在试样中累积大量的应变。本研究使用的材料为等原子比 CoCrNi 中熵合金，采用真空磁悬浮感应熔炼炉熔炼，该合金为单相的 FCC 结构，铸态下晶粒尺寸在 1mm 左右，初始硬度约 216Hv。本研究对铸态 CoCrNi 中熵合金在三种温度 (77K, 293K, 1073K) 下进行循环多向冲击，冲击应变率控制在 1500/s 左右。结果表明，在 77K 和 293K 下试样均在 14 个循环 2 个道次后发生破坏，峰值硬度分别达到约 460Hv 和 484Hv。由于材料在高温下会发生软化，CoCrNi 中熵合金在 1073K 下经过循环多向冲击后未发生破坏，经过 15 个循环后峰值硬度达到约 434Hv。微观结果表明，在 77K 下经过循环多向冲击后的 CoCrNi 中熵合金内产生了丰富的纳米变形孪晶，其中包括多向纳米孪晶、二级纳米孪晶和交叉纳米孪晶，同时 FCC 至 HCP 相变也被激活，且 HCP 体积含量随循环次数的增加逐渐提高。293K 下，经过循环多向冲击后的 CoCrNi 中熵合金的微结构细化主要由变形带、变形孪晶以及变形孪晶对变形带的分割主导，该温度下没有相变的发生。1073K 下，经过循环多向冲击后的 CoCrNi 中熵合金的微结构细化机制主要为连续动态再结晶，变形过程中产生的退火孪晶促进了连续动态再结晶，经过 15 个循环后，晶粒尺寸细化至约 1.09 μm 。本研究表明循环多向冲击方法在宽温度范围内可以有效地细化合金晶粒，显著地提升合金硬度。本研究可以为制备块体纳米结构/超细晶金属材料提供一种新的途径，可以为解决金属材料的强韧互斥问题提供一种新的思路。

C10-49

异构材料的多尺度模拟

赵建锋^{*1}, 张旭¹, 康国政¹, Michael Zaiser²

1. 西南交通大学

2. 埃尔朗根-纽伦堡大学

异构材料通过在材料内部构筑性能不同的微结构，可以实现高强、高韧、抗疲劳等优异的综合力学性能。目前关于异质结构材料的制备、表征以及力学性能测试已经有大量的实验研究报道，然而其“微结构-变形机理-宏观力学性能”的定量关联尚有待建立。本研究首先发展了考虑位错与界面交互作用的非局部晶体塑性本构模型，此模型中位错流动项的引入使其可以描述滑移系尺度的非均匀变形诱导的非局部效应。基于此模型对均匀多晶材料、梯度晶粒结构材料以及双峰晶粒结构开展了晶体塑性有限元模拟，结果很好的捕捉到了多晶材料的 Hall-Petch 关系，且揭示了异构材料中的异质结构诱导强化效应。基于晶体塑性模拟揭示的变形机理和强化机制，进一步构建了综合考虑位错机制、应变梯度效应和背应力机制的多机制应

变梯度本构模型，并对不同微结构的梯度晶粒材料和层状材料的单拉力学性能进行了系统研究。模型的模拟结果可以和不同微结构下梯度晶粒材料和层状材料的实验结果定量对应，并且可以定量描述背应力等内变量的演化。本研究所建立的模型和方法可用于其它高性能结构材料“微结构-变形机理-宏观力学性能”的定量关联研究。

C10-50

CoFeNi 基非等原子比中熵合金的多重强化析出机制

李慧^{*1}, 张孟超¹, 刘庆冬², 王泽民³

1. 上海大学
2. 上海交通大学
3. 上海应用技术大学

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。本工作设计并通过增材制造的方法制备了一种添加少量 Mo、Al、Cr 的非等原子比 CoFeNi 基中熵合金,通过合适的热处理工艺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。通过扫描电子显微镜 (SEM),透射电子显微镜 (TEM) 和原子探针层析技术 (APT) 对该合金的微观组织演化进行了分析。合金时效过程中先后析出了富 NiAl 原子团簇、 η -NiAlMo 相、基于调幅分解的 α' 相,且在制备过程中引入了大量稳定的 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的作用,使合金的硬度值最大达到了 693 HV,且硬度平台大于 200 h。基于实验结果,分析了各种析出相的析出机制,及不同析出相之间的交互作用规律。

C10-51

层状金属材料异质界面诱导强韧化机制的多尺度模拟研究

陆晓翀^{*}, 冉昊, 黄崇湘
四川大学

将力学性能迥异的微观单元域有序构筑形成的异质结构,具有显著的额外应变硬化和优异的强韧性协同能力,其核心原因是单元域变形的不相容在异质界面附近产生剧烈的塑性应变梯度。作为典型的异质结构,层状金属材料中的异质界面较为平直,界面两侧单元域的微结构和力学性能差异巨大,是研究异质界面诱导强韧化机制的理想模型材料。虽然大量实验已揭示了层状金属材料界面附近应变梯度、几何必须位错 (GND)、背应力、额外应变硬化之间的重要关联,但诸如界面-位错交互作用、应变配分、应力传递等重要机制的作用仍未得到完全理解。本文以 Cu/CuZn、Ti/Al、Cu/Fe 等多种层状金属材料为对象,基于应变梯度塑性理论、晶体塑性理论和分子动力学方法,从微米、亚微米和纳米尺度对层状结构的变形行为及强韧化机制开展模拟分析。研究发现异质界面所带来的应变硬化效果受到界面间距、界面两侧晶粒尺寸、取向和组分的多重影响。异质界面既是阻碍位错运动的屏障,导致 GND 塞积并产生长程作用力提高应变硬化;也是形核和发射位错的有效位置,协调两侧单元域塑性变形的发展。异质界面两侧的微结构特征差异越大,力学不相容性越显著,界面影响区内的塑性应变梯度越大,GND 密度越高,从而使材料整体具有更好的应变硬化和强韧性匹配。此外,变形过程中跨单元域弥散剪切带的形成,有效延缓了应变局域化及局部塑性失稳的发生,有助于层状材料保持良好的韧性。本文研究成果可为层状金属材料的异质界面设计及强韧性调控优化提供参考。

C10-52

{332}<113>孪晶变形诱导梯度结构 β Ti-12Mo 合金的微观结构演化机制

王悦^{1,2}, 阎丰凯^{*1}, 赖敏杰³, 李秀艳¹

1. 中国科学院金属研究所
2. 中国科学技术大学

3. 西北工业大学

通过严重塑性变形细化晶粒是强化亚稳 β 钛合金的有效策略, 然而亚稳 β 钛合金在变形过程中存在应力诱导马氏体相变、 $\{332\}\langle 113 \rangle$ 及 $\{112\}\langle 111 \rangle$ 孪生、位错滑移等诸多变形机制的耦合作用, 这些复杂的变形机制会显著影响变形诱导钛合金的晶粒细化程度。目前以应力诱导马氏体以及位错滑移为主要变形机制的晶粒细化过程研究较多, $\{332\}\langle 113 \rangle$ 孪生作为 bcc 亚稳 β 钛合金的典型变形机制, 其主导的晶粒细化过程的研究非常有限。

本文通过表面机械滚压 (SMRT) 处理, 在亚稳 TWIP β -Ti-12Mo (wt.%) 合金表层制备了厚度约 800 μm 的梯度纳米结构变形层, 通过对不同层深处的典型变形组织进行表征, 分析梯度结构的微观组织演化机制。结果表明: 在中等应变和应变速率下, 一次 $\{332\}\langle 113 \rangle$ 孪晶主导变形, 在基体中大量生成并将原始粗晶细化至亚微米尺度; 随应变及应变速率增加, $\{332\}\langle 113 \rangle$ 孪晶难以继续生成, 位错滑移主导变形, 位错在高速高梯度的剪切变形下排列成扩展边界, 形成超细层片以及纳米层片结构协调变形; 最终通过纳米层片结构以及剪切带内的结构演化在表层形成平均尺寸为 $34 \pm 8 \text{ nm}$ 的等轴纳米晶组织。此外, 梯度纳米结构 Ti-12Mo 合金的亚表层硬度高达 4.9 GPa, 表层硬度反而下降至 4.4 GPa, 与传统梯度结构的力学行为不同, 分析可知高应变速率引起的表层绝热温升导致发生应力诱导马氏体逆相变而造成表层硬度的反常下降。本研究为调控 bcc 亚稳 β 钛合金变形机制提供了新的视角。

C10-53

增材制造高熵合金的强韧化机制研究

刘艳芳¹, 曹阳^{*1}, 朱运田¹, 朱廷², 陈文³

1. 南京理工大学
2. 佐治亚理工学院
3. 马萨诸塞大学-阿姆斯特分校

本文以多组分 CoCrFeMnNi 高熵合金作为模型材料, 采用激光定向能量沉积 (laser directed energy deposition, L-DED) 和激光粉末床熔合 (laser powder bed fusion, L-PBF) 两种增材制造技术制备高熵合金块体材料, 并对其微观组织、力学行为和变形机理进行了对比研究。在两组 CoCrFeMnNi 高熵合金中都形成了高度不均匀的微观结构, 由柱状晶粒、凝固单元和胞状位错结构组成。然而, 在晶体学织构、单元尺寸和元素分布方面, 二者却存在巨大差异。L-DED 样品中更深的熔池有助于沿堆叠方向形成 $\langle 101 \rangle / \langle 111 \rangle$ 的混合织构, 而 L-PBF 样品具有较浅熔池, 沿堆叠方向形成 $\langle 001 \rangle$ 织构。在 L-DED 样品中, $\langle 101 \rangle / \langle 111 \rangle$ 织构提高了流变应力, 促进了变形孪晶的激活。此外, L-DED 样品中更大的凝固单元尺寸和跨越胞壁的元素起伏增加了位错储存能力和对位错运动的阻碍作用, 诱导塑性变形过程中出现大量的平面滑移带和微带。与 L-PBF 样品相比, L-DED 样品中增强的塑性变形能力产生了更持久的应变硬化, 从而获得更优异的强塑性匹配。我们的工作不仅为增材制造高熵合金的变形机制提供了基本的理解, 还强调了加工条件对增材制造凝固微观结构和材料设计的重要影响。

C10-54

中间退火对纳米结构 Al-4%Cu 合金组织细化与力学性能的影响

刘奇¹, 黄艺家¹, 黄天林^{*1,3}, 张玲^{1,3}, 黄晓旭^{1,2}

1. 重庆大学材料科学与工程学院轻合金材料国际合作联合实验室
2. 重庆大学沈阳材料科学国家实验室
3. 重庆大学电子显微镜中心

金属与合金在塑性变形过程中伴随着显著的组织细化和力学性能的提升, 但是在晶粒细化的同时不可避免地发生动态回复过程, 两种机制的相互作用决定了合金最终的微观组织与力学性能。轧制工艺制备的层状结构组织的片层间距随着应变量的增加显著降低, 但是当应变积累到一定程度后, 片层间距降低缓慢

直至不再发生变化,此时变形组织的动态回复与晶粒细化效果达到平衡。动力学研究表明,大变形轧制纯铝中典型的动态回复机制是 Y 型三叉晶界的迁移,因此抑制变形过程中 Y 型三叉晶界的迁移是降低动态回复的关键。本研究采用的模型合金为高纯铝基体(99.9996%)加入 4 wt.%无氧高导铜。对 Al-4%Cu 合金施加分段式冷轧,即在 75%变形量时对变形合金进行低温短时退火(100℃/30 min)处理后继续冷轧至 98.6%变形量。退火后合金在晶界上富集溶质元素,并且大量第二相颗粒在晶界上非均匀析出,同时晶粒内形成大量的 GP 区。在后续变形过程中,退火后溶质元素的分布显著影响变形组织与力学性能。相比于直接冷轧至 98.6%变形量的 Al-4%Cu 合金,加入中间退火后平均片层间距从 82 nm 降低至 51 nm,位错密度提高近一倍,屈服强度从 417 MPa 提高至 497 MPa。加入中间退火工艺后,合金的微观组织发生显著细化,力学性能得到明显提升。强化机制分析表明,主要的强化机制是晶界强化与位错强化。在变形过程中加入退火处理,显著降低了变形合金的动态回复速率,从而达到进一步细化组织、提高合金力学性能的目的。本研究为传统轧制工艺制备高强、超细铝合金提供了新的方法与思路。

C10-55

微观压痕诱导位错与共格孪晶界 $\Sigma 3$ 的交互作用

夏文真*

安徽工业大学

金属材料中的晶体缺陷对塑性变形过程具有显著的影响。学者已对面心立方(FCC)金属中位错与孪晶界之间的相互作用机制进行了大量的研究,然而尚不完全清楚。在本研究中,我们采用纳米压痕技术系统地采用了不同的压痕中心与孪晶界和样品表面交线之间的垂直距离,研究了共格孪晶界(CTB) $\Sigma 3$ 对奥氏体不锈钢 Fe-25Cr-20Ni 中压痕引起的位错的影响。通过滑移台阶和载荷-位移曲线分析,阐明了孪晶界在压痕过程中对变形行为的影响。通过分析与晶粒有关的汤普森四面体数据,判定了对纳米压痕诱导的位错跨越孪晶界伯氏矢量。此外,本研究利用宏观塑性有限元方法估计了不同伯氏矢量的位错跨越孪晶界所需的临界剪切应力。

C10-56

极小尺寸 Ni-Cr 合金沉淀粗化动力学与强度分析

张博*

中国科学院金属研究所

中国科学技术大学

晶界显著影响过饱和固溶体中沉淀物的形核和生长。然而,由于纳米晶粒金属中晶界的固有不稳定性,在退火过程中,沉淀过程通常与晶粒长大同时发生,因此很难揭示晶粒尺寸对沉淀粗化行为的影响。在本研究中,通过塑性变形制备了晶粒尺寸在约 85nm 至 10nm 之间的纳米晶粒 Ni-48Cr (at.%) 过饱和固溶体合金。在高温退火过程中,Cr 颗粒从纳米颗粒基体中沉淀出来,形成纳米双相结构。超细纳米颗粒结构中 Cr 沉淀物的生长动力学与较大晶粒尺寸的样品不同,表现出变形形成的晶粒尺寸越小,沉淀物粗化速率越慢的趋势。详细的微观结构表征和动力学分析表明,随着晶粒尺寸细化到几十纳米左右,极细的纳米颗粒结构可能会将沉淀物粗化的速率限制过程从晶格扩散改变为晶界扩散,这导致了缓慢的粗化速率。10nm 样品退火后形成的纳米晶粒双相 Ni-Cr 合金在这些样品中表现出最高的强度以及优异的热稳定性,这为高性能合金的设计提供了指导。

C10-57

通过耦合激光表面织构和二维 MXene (Ti₃C₂T_x) 纳米涂层调控钛合金的摩擦学性能

张棋程、李勇、陈翔*

南京理工大学

钛及钛合金具有低密度、高比强度、优异的耐腐蚀性等优势，广泛应用于航空航天、汽车、生物医学等关键领域。然而，由于表面硬度较低和加工硬化能力不足，钛及钛合金极易遭受磨损失效，严重降低了其服役寿命。利用激光加工构筑表面微织构或涂覆固体二维润滑材料是提升材料摩擦学性能的基本途径。但单一的表面微织构或二维润滑材料在复杂磨损工况下仍存在减摩、耐磨效果不佳等问题，其服役可靠性仍然面临挑战。针对上述问题，本研究耦合上述两种表面改性技术，在纯钛表面成功制备出了沟槽微织构，随后涂覆二维 MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) 纳米涂层，系统研究了摩擦磨损性能及摩擦次表层显微结构演化行为。该复合表面改性技术既可保持表面沟槽微织构“捕获”磨屑的优势，又能发挥 MXene 纳米涂层的自润滑特性，从而显著降低摩擦系数和磨损率。摩擦次表层显微结构分析显示，沟槽微织构可“捕获”MXene，并使其在后续摩擦过程中通过摩擦应力的“搅拌”效应在接触界面持续提供润滑作用。此外，MXene 纳米涂层在摩擦应力作用下发生持续分解和重组，形成稳定摩擦膜，可有效抑制基体材料的氧化和塑性变形，从而大幅改善摩擦学性能。本工作为钛合金在苛刻磨损工况下的服役性能提升开辟了新途径。

C10-58

TA15 合金高温逆霍尔佩奇关系及其断裂行为

李少龙^{1,2}，李树丰¹，朱运田^{*2}

1. 西安理工大学

2. City University of Hong Kong

多晶金属材料中，晶界控制着多晶材料的力学性能，同时对材料变形、失效和其他冶金现象至关重要。但是，当晶粒尺寸低于 20nm (dc) 时，材料表现出逆 Hall-Petch 效应，这早在 20 世纪 80 年代已被发现。当晶粒尺寸低于 dc，材料的变形机制由位错介导变形机制转变为晶界介导变形，而以晶界介导变形为主的行为称为逆 Hall-Petch。然而，高温下晶粒尺寸和临界尺寸 dc 与温度之间的关系仍然是个空白。本研究以高温钛合金 TA15 ($\text{Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V}$) 为研究对象，通过晶粒尺寸设计，形成异常粗大的晶粒，进一步放大晶界在高温下的软化现象。根据 TA15 合金的服役温度 (550℃)，在服役温度前后进行高温拉伸实验，结果表明试样的屈服强度和晶粒强度随着温度的升高而降低。EBSD 结果表明高温下晶界和相界作为主要的变形位置，破坏了 α/β 相之间的伯格矢量关系 ($\{110\}\beta // \{0001\}\alpha$ 和 $\langle 1-11 \rangle\beta // \langle 11-20 \rangle\alpha$)，形成了大量的小角度晶界。其次，高温降低了晶粒滑移系的临界剪切应力 (CRSS)，为各个滑移系启动提供了充足的能量。同时，结合高温原位 SEM 和高温纳米压痕等实验，发现在 550℃ 前后材料的变形机制和失效机制发生转变：当温度低于 550℃ 时，试样以晶粒变形（位错介导变形）为主，穿晶断裂；当温度高于 550℃ 时，试样以晶界变形（晶界迁移，晶界滑移；晶界介导变形为主）为主，沿晶断裂；晶界表现出高温逆 Hall-Petch 效应，这表明高温下 TA15 试样的临界尺寸 dc 要远大于 20nm。因此，TA15 试样的临界尺寸 dc 随着温度的升高而变大。该发现为提高多晶金属材料的高温力学性能提供了新的思路。

C10-59

VCoNi 合金的断裂韧性与变形机理

徐博文、武晓雷*

中国科学院力学研究所

通过高温热轧获得了单相粗晶组织，其屈服强度和断裂韧性从室温下的 ~704 MPa 和 ~256 MPa $\times\text{m}^{1/2}$ 同时提高到液氮温度下的 ~944 MPa 和 ~290 MPa $\times\text{m}^{1/2}$ ，在室温和低温下都具有优异的强韧性匹配。裂纹尖端前方塑性区内发生显著的加工硬化，形成了典型的韧性断裂模式：明显的裂尖钝化和微孔形核与聚集。此外，在晶界或孪晶界附近，甚至是晶粒内部，都存在明显的几何必需位错以协调塑性区内的应变梯度。室温下，塑性区内的变形机制为单一的位错介导塑性，晶粒内存在高密度滑移带和明显位错缠结，有效促进了位错交互作用与增殖。低温下，位错和层错主导的塑性变形同时存在，滑移模式由室温

下的波状滑移转变为平面滑移。多个{111}面上的层错和位错之间的交互作用形成了间距更小的泰勒晶格，从而更有效地阻碍位错运动。低温下更优异的断裂韧性归因于额外的裂纹偏折、更大的塑性区以及更高程度的加工硬化。

C10-60

纯钛非均匀结构和织构诱导的强度-延展性协同

王明赛^{1,2,3}, 郭凤娇², 苏武丽², 王清远², Hyoung Seop Kim³, 黄崇湘^{*2}

1. xiangtan university

2. sichuan University

3. Pohang University of Science and Technology

由于加工工艺难度大，通过结合微观结构的不均匀性和有利的晶体取向来优化强度和延展性是一个挑战。本研究中，我们通过控制热挤压、冷挤压和退火处理，制备了一种新的高度定向的非均匀结构纯钛（HOH Ti）。HOH Ti 的微观结构的特征是（i）明显的晶粒尺寸不均匀性；（ii）高度优选的晶体取向，即多数晶粒的 c 轴垂直于轧制方向（RD）。HOH-Ti 沿 RD 拉伸时表现出优异的强度-延展性协同，而沿横向（TD）拉伸时表现出较高的强度但极低的延展性。当样品沿 RD 拉伸时，实验验证了软质域内晶界附近有明显的几何必要位错积累和应变梯度。表明拉伸过程中通过产生异质变形诱导的应力和促进位错储存过程，产生了额外强化/硬化。样品沿 TD 拉伸时，硬质域内观察到{10-12}孪晶，而在软质域没有观察到明显的塑性变形特征。研究进一步表明，沿 RD 拉伸时，硬质域及软质域的柱面、锥面<a>滑移和第一锥面/第二锥面<c+a>滑移都具有较高的 Schmid 因子，表明样品处于软滑移模式。另一方面，沿 TD 拉伸时，柱面<a>滑移的 Schmid 因子非常低，软质域变得很“硬”，导致软质域中的滑移系统较少。这些观察结果表明，具有有利晶体取向的异质结构设计是实现高强度-延性协同的有效方法。

C10-61

一种纤维状铁素体嵌入马氏体基体的超强中锰钢的高断裂韧性

张超¹, 翟羽¹, 苏武丽¹, 杨渤¹, 程乾¹, 王清远¹, 黄崇湘^{*1}, 曹文全²

1. 四川大学

2. 钢铁研究总院

对于结构应用来说，开发具有抗断裂性和经济效益高的超高强度钢，是非常有吸引力的。在本研究中，通过在马氏体基体中引入纤维状铁素体，制造出一种超强且韧的钢。这种钢具有超高的屈服强度和抗拉强度，分别为 1560 和 2103 MPa，且其均匀伸长率可达 7.3%。使用微型侧槽紧凑拉伸（CT）试样，通过弹塑性卸载柔度方法，测量了这种钢的断裂韧性和光滑上升的阻力（J-R）曲线。结果表明，这种材料具有很高的断裂韧性（KIC ~105 MPa m^{1/2}），优于许多具有相同强度的钢材。这种纤维状铁素体嵌入马氏体基体的异质微观结构，使得材料在单周拉伸过程中具有很高的应变硬化率和形成非常多的微孔洞，从而导致更高的断裂应变和局部缩颈。根据断裂能量准则（the energy criterion for fracture），讨论了 CT 试样的潜在增韧机制。扩大的塑性变形区域（固有增韧机制）、偏转和桥接主裂纹扩展以及纤维状铁素体和马氏体之间的界面分层（外部增韧机制）显著提高了材料的整体抗断裂性能。目前的研究结果有助于结构应用领域高强高韧中锰钢的研发。

墙报

C10-P01

具有杰出强度和延性的异构纳米片层氧化弥散强化铁素体合

许利东, 蔡学成, 沈同德*

燕山大学

纳米结构铁素体合金具有优异的机械性能（强度和抗蠕变性）和抗辐照性能。然而，高强度（通常高于 1.5 GPa）总是伴随着有限的延展性。在此，我们报告了一种新型异质结构纳米片层铁素体合金，体积分数约为 35%微米晶分散在超细晶粒基体（约 500 nm）中，从而使合金达到 2 GPa 的超高屈服强度和约 13% 的优异拉伸伸长率。纳米片层状晶粒通过晶界强化作用显著增强了合金的强度。软的微米晶区域可通过局部塑性变形有效抑制微裂纹的产生和沿富含氧化物的原始粉末边界的扩展。此外，线性氧化物带可诱发大量层间裂纹并引发分层增韧，从而共同确保合金具有较大的延展性。本研究为最先进的超高强度纳米结构铁素体合金的高拉伸延展性开辟了一个新领域。

C10-P02**梯度结构高熵合金 Al0.1CoCrFeNi 的最佳强塑性匹配的分子动力学研究**

李元豪*

长安大学

梯度结构高熵合金(GS HEA)比传统的均匀结构高熵合金具有更好的强塑性协同性能，但不同梯度分布(梯度率)的强塑性匹配特性也有较大差异。如何选择最佳梯度速率，使材料发挥最佳的强度-延性协同作用，还有待进一步研究。本文采用分子动力学方法分别比较了梯度和均匀结构下 Al0.1CoCrFeNi 高熵合金力学性能的差异及其原因，分析了不同梯度速率下 GS Al0.1CoCrFeNi 的变形机理和最优梯度分布，发现了梯度结构中特殊的应力梯度、位错密度梯度和多向应力状态是产生高强度-塑性协同效应的原因。在梯度结构中，当梯度率 $n = 3$ 时，材料的力学性能和强度-塑性协同作用最好，这是由最大的应力-应变梯度和 $n = 3$ 时最显著的几何必要位错(GNDs)的形核作用共同造成的。模拟结果为后续研究具有梯度结构的高熵合金提供了新的思路。

C10-P03**Sc 含量对纳米结构 Al-Cu-Mn 合金热稳定性的影响**

黄小愉*

重庆大学，材料科学与工程学院

纳米结构材料因其卓越的室温力学性能而得到广泛应用，然而，其组织的不稳定性限制了其在高温环境下的使用。本研究聚焦于含 0-0.2 wt.% Sc 的纳米结构 Al-Cu-Mn 合金，在 200 °C 和 250 °C 条件下评估了其热稳定性。结果表明微量 Sc 元素的添加，可以使得合金的热稳定性得到显著提升。这一改善主要归因于 Sc 元素能够增加 θ' 析出相的数量密度并提高其稳定性，从而优化了微观结构的热稳定性。然而，值得注意的是，当 Sc 含量增加至 0.2 wt.% 时，合金的热稳定性相较于 0.1 wt.% Sc 的合金反而下降。这主要是因为随着 Sc 含量的提高，Al3Sc 颗粒在均匀化过程中析出并在固溶处理时发生粗化，导致在退火过程中稳定 θ' 相的 Sc 含量降低。由于 θ' 相热稳定性的下降，合金的层状结构稳定性也随之受到影响。综上所述，适量添加 Sc 元素是经济且有效地提高 Al-Cu-Mn 合金热稳定性的关键。

C10-P04**纳米结构 Al-Cu-Mn-Sc 合金析出相与细晶强化调控研究**王孝东*^{1,2}, 黄天林^{1,2}

1. 重庆大学材料学院

2. 轻合金材料国际合作联合实验室

为了提高层状纳米结构金属的强度，常采用细化层状界面间距的方法。然而，在晶粒细化过程中，动

态回复的发生会导致组织粗化,降低变形诱导的组织细化能力,无法继续提高强度。本研究以 Al-Cu-Mn 和 Al-Cu-Mn-Sc 合金为对象,在液氮温度下通过直接轧制实现了 90%, 98%和 99%的变形量, Al-Cu-Mn 合金抗拉强度分别为 434 MPa, 469 MPa 和 492MPa,; Al-Cu-Mn-Sc 合金抗拉强度分别为 482 MPa, 545 MPa 和 548 MPa。对比两种合金可以发现, Sc 的加入使 Al-Cu-Mn 合金强度有了显著的提高。为了进一步提高强度,对轧制至 90%变形量样品进行了不同温度与时间的中间退火处理,退火完成后继续将样品轧制到 99%变形量,合金强度有了一定的提高。这是由于中间退火在层状界面处形成析出相,在轧制过程中有效抑制回复。

C10-P05

精确分子理论模型在基础渣系的应用

王琪鑫, 郭靖*, 郭汉杰

北京科技大学

冶金炉渣活度是研究渣-金间反应的核心课题,此外金属熔体中的活度也十分重要,其表现为杂质元素会严重影响其性能,而金属熔体热力学性质和活度与其结构一致,故活度理论的构建显得尤为重要。目前通常采用分子理论、离子理论和共存理论对组元活度进行计算。其中分子理论符合理想溶液模型,但只考虑了部分的复杂氧化物分子,而且认为酸性氧化物分子和碱性氧化物分子形成复杂氧化物是完全结合的,这与实际存在差异。离子理论虽能较好描述渣金反应,但其忽略不同电荷间的静电势导致离子分配不均,其应用较广的 Masson 模型对于三元及多元渣系却难以计算。共存理论作为目前的主流理论,其同时考虑了分子、离子存在,可以计算所有结构单元的作用浓度,但未考虑一定温度下某些化合物和炉渣实际矿物组成是否一致,也未考虑复杂分子在高温下解离的可能性。因此,本文在分子理论和共存理论基础上提出精确分子理论。

在本文中,精确分子理论认为相图中的复杂氧化物全部存在,并认为渣系中碱性氧化物(CaO、MgO等)均是由一个质点构成。该理论将熔渣看成理想溶液,不需要考虑分子离子问题并且精确性也得到保证。将精确分子理论模型带入 CaO-SiO₂ 和 CaO-Al₂O₃ 渣系中,计算得到的 CaO 活度和实测 CaO 活度具有良好的 1:1 对应关系,显示出该模型具有较好的准确性;通过简单分子理论的应用,认为较大质量作用浓度的复杂分子对模型精确性不可忽视,进一步验证精确分子理论的适用性;在不同理论对精确分子理论中的对比验证中,CaO-SiO₂ 和 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 渣系中该理论与其他理论的计算值接近,对实验值误差率较小,在 CaO-Al₂O₃ 渣系中精确分子理论所得结果更贴近实验值;精确分子理论实际应用中,认为是不同复杂分子的形成与分解,导致 CaO-SiO₂ 和 CaO-Al₂O₃ 渣系中组元活度的变化,并进一步推导出 3CaO • SiO₂ 是由两个步骤所形成,并且各复杂分子浓度最大值与相图中固液相同成分熔点位置一致,说明复杂分子对于炉渣熔点有重要影响。

C10-P06

NiTi 合金纳米压痕力学行为和变形机制的分子动力学研究

闫荣欣*

长安大学

本文采用分子动力学方法研究了晶粒尺寸对 TiNi 合金力学性能及变形行为的影响,为进一步揭示马氏体相变机制,采用 CTIM 方法对马氏体相变过程进行团簇分析,并通过可视化和示踪法跟踪部分原子的行为。研究表明:当晶粒尺寸小于 14.9 nm 时,晶粒尺寸与硬度表现出反 Hall-Petch 关系,马氏体相变和晶界活动共同促使材料发生塑性变形,晶界活动起主导作用。当晶粒尺寸大于 14.9 nm 时,晶粒尺寸与硬度符合 Hall-Petch 关系,马氏体相变主导基体发生塑性变形。此外,还揭示了马氏体相变为共格切变机制,并描述了在压痕过程中从 BCC 结构向缺陷 BCC 结构、再到 HCP 结构和缺陷 HCP 结构的结构转变路径。

C10-P07

间隙元素和热处理工艺对 TRIP 高熵合金组织和力学性能的研究

张成宇, 吴小香*

苏州大学

高熵合金具备广阔的合金范围, 其独特的合金优势为新型高性能合金的设计和开发提供可能性。间隙强化和热处理是改善合金力学性能的有效手段。本文以掺杂 1at.%N 和 0.5at.%C 的非等原子比高熵合金作为研究对象, 利用 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜、背散射电子衍射分析(EBSD)等表征手段, 从组织变化和变形机制两方面研究其在经过冷轧后短时退火(800℃ 5 分钟、800℃ 10 分钟和 900℃ 5 分钟)室温变形机制。结果表明, N 元素的添加可有效稳定面心立方(FCC)相, 使合金呈现 FCC 结构; 而 C 掺杂的高熵合金以 FCC 结构为主, 伴有少量的密排六方(HCP)结构形成。两种掺 C/N 的合金在冷轧短时退火后的初态组织呈现为完全再结晶, 孪晶分数高达 37%以上。N 掺杂的高熵合金的孪晶界以共格孪晶界为主, 而 C 掺杂的高熵合金的孪晶界以非共格孪晶界为主。添加微量的间隙原子后, 合金的强度与塑性同时提高。添加 1at.%N 有效抑制了 σ 相与 HCP 相的形成, 不同热处理下的 N 掺杂高熵合金的断口均呈现韧性断裂, 表现出很好的塑性。C 掺杂的高熵合金在变形过程中发生了马氏体相变。经过 900℃退火处理后, 其断口主要呈现为韧性断裂的特征。而经过 800℃退火处理的掺 C 高熵合金中, FCC、HCP 与 σ 相同时存在, 这导致了合金具有较高的强度但塑性较低, 断口特征表现为韧窝和光滑平面的共存。本文的发现可为高熵合金在组织调控和设计方面提供实验支撑和理论依据。

C10-P08

间隙 C/N 原子对面心立方多主元合金低温力学性能与变形机制影响研究

袁坤权, 吴小香*

苏州大学

多主元合金凭借其独特的成分设计理念及结构特征, 表现出优异的综合性能。尤其是面心立方结构多主元合金, 凭借其较高的相稳定性、越低温越强韧等特点, 具有显著的低温应用潜力。本研究聚焦于间隙强化多主元合金的低温力学性能, 通过 XRD (X-ray diffraction)、扫描电子显微镜、透射电子显微镜等表征手段, 分析掺杂 C/N 元素 CrMnFeCoNi 系多主元合金在室温及低温 (93 K) 变形前后的显微组织特征, 揭示间隙多主元合金的变形组织演变规律及相关的变形机制。研究表明, 间隙 C/N 原子的掺杂能够显著提高合金的屈服强度, 并且屈服强度的增幅随温度的降低呈上升趋势, 同时能够保持良好的低温塑性。此外, 通过分析合金变形前后的组织演变规律, 证明 C/N 原子的掺杂可以调控合金的层错能, 进而改变合金的变形机制。相关研究为深入理解多主元合金的低温变形机制、强韧化方式以及开发高性能的面心立方多主元合金提供了理论基础和实验支撑。

仅发表论文

C10-PO01

异步送粉激光沉积制造高强韧异构锆合金及相变动力学调控

蒋晓军*

石家庄铁道大学

锆 (Zr) 合金作为最具潜力的空间结构材料之一, 面临强塑性矛盾的力学性能瓶颈和成形工艺复杂的制造短板。本论文基于异构组织的背应力强韧化学思想, 采用异步送粉超声辅助激光沉积近净成形技术, 利用多物理场耦合相变动力学条件调控微观组织结构, 制备了具有复合异构组织的高强韧 Zr 合金。论文主要研究了 Zr 合金激光局部快冷非平衡凝固机制及短时热循环非平衡固态相变机制; Zr 合金晶粒形核生长、亚稳相转变和亚结构演变的光-热-声-力多物理场多尺度相变动力学调控机制; 复合异构组织塑性变形

诱发“软区”几何必须位错、孪晶、应力诱发马氏体相变及背应力强化机制。通过揭示激光沉积制造 Zr 合金非平衡相变-亚结构演变机制、多物理场耦合作用下复合异构组织的多尺度相变动力学调控机制和复合异构组织强韧化机制，实现了高强韧 Zr 合金控形控性制备，获得了 1300Mpa 以上的抗拉强度和 10%以上的拉伸延伸率。

C10-PO02

等离子体介导的的化学反应以实现在纳米孔中组装金纳米粒子用于信息加密

肖格*

吉林大学

等离子体介导的化学反应 (Plasma-mediated chemical reactions, 简称 PMCR) 利用等离子体结构作为介质, 重新分配和转化光子能量, 在时间和空间尺度上促进化学反应。然而, 尽管表面增强拉曼光谱 (Surface-Enhanced Raman Spectroscopy, 简称 SERS) 已经被应用于研究这一过程, 但对于 PMCR 过程的物理化学理解仍然不完备, 限制了其在信息加密和其他领域中的应用。本文基于 Au 纳米孔结构, 利用等离子体场效应促进了 PNTF 分子向 PATP 和 DMAB 分子的化学反应转化, 从而实现了选择性的 Au 纳米粒子组装。通过采用 SERS 技术, 我们系统地研究了各种实验条件对 PMCR 过程的影响, 包括反应时间、表面功能化浓度、不同溶液和基底等。此外, 结合简单的光刻技术, 我们将实现微尺度和纳米尺度的大面积图案制备, 从而实现多级信息加密和解密过程。此外, 采用相同的组装策略, 我们成功实现了在金纳米孔上对碳点的组装, 并同时探索了等离子体对碳点荧光性能的影响。这种方法在多分子组装的实现以及防伪技术的应用推进方面具有重要的潜力。

C10-PO03

Effect of Tempering Temperatur on the Carbides Transformation and Strengthening Mechanism of Novel Medium-Alloy Steel at elevated temperature

Yu Ji, Chao Yang, Chundong Hu*, Han Dong

Shanghai University

The effects of tempering temperature on the microstructure and high-temperature strength of the novel medium-alloy steel (25Cr2Ni3Mo2V) were studied. The results of high-temperature tensile tests showed that as the tempering temperature increased from 590 °C to 700 °C, the UTS of 25Cr2Ni3Mo2V at 700 °C decreased from 420 MPa to 290 MPa. Transmission electron microscopy (TEM) results indicated that when the tempering temperature was 590 °C, the higher dislocation density in the matrix provided more nucleation sites for MC. Nano-sized spherical MC carbides were uniformly distributed in the matrix, and the slow diffusion rate of Mo effectively inhibited the rapid coarsening of MC, maintaining a good coherent relationship between MC and α -Fe matrix. Small-sized rod-shaped M23C6 carbides were pinned at grain boundaries and lath boundaries, inhibiting grain boundary migration and grain growth. This resulted in good thermal stability of 25Cr2Ni3Mo2V at elevated temperatures. When the tempering temperature increased to 700 °C, the carbides underwent significant coarsening, and the dislocation density decreased. The solid solution strengthening effect of Mo on the matrix weakened. Based on theoretical analysis and TEM observations, the high-temperature strength of 25Cr2Ni3Mo2V was attributed to the high dislocation density, nano-MC carbide dispersion strengthening, and Mo solid solution strengthening.

C10-PO04

Study on the Crystallographic Mechanism of Microstructural Heredity Interruption in 25Cr2Ni3Mo2V Steel

Chao Yang¹, Chundong Hu^{*1,2}, Han Dong^{1,2}

1. Shanghai University

2. Zhejiang Institute of Advanced Materials, SHU

25Cr2Ni3Mo2V exhibits significant microstructural heredity, making it difficult to refine coarse grains after forging. Optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), and electron backscatter diffraction (EBSD) were used to characterize the microstructure and crystallographic orientation relationships. The results showed that at a subcritical temperature of 690°C, holding for 24 h to 480 h, the non-equilibrium α phase in the forged structure underwent recovery, with the proportion of recovery and recrystallization first increasing and then decreasing. The grain orientation changed from the recrystallization texture $\{111\}\langle 3-41 \rangle$ to the cubic texture $\{112\}\langle 1-42 \rangle$, with no fixed orientation relationship to the original coarse grains, and no merging occurred during growth, breaking the microstructural heredity. Meanwhile, the average grain size of austenite was refined from 103 μm to 63 μm .

C10-PO05**Achieving a superior combination of strength and plasticity by designing a novel multiphase stainless steel with high silicon addition**

Zixiang Wu*

Nanjing University of Science and Technology

Stainless steels are used in a wide range of complex environments due to their excellent corrosion resistance and good mechanical properties. Multiphase stainless steels can offer very attractive combinations between strength, plasticity and corrosion resistance due to the coexistence of different microstructural components and their interactions. In this study, a novel cast stainless steel with high silicon addition was systematically investigated using XRD, SEM, HRTEM, EBSD, μ -DIC, mechanical tests and etc. It has been shown that controlling Si content can promote the formation of ferrite phase, stabilize austenite phase, and obtain martensite phase through quenching, thereby obtaining multiphase structure. In addition, the addition of Si can produce nanoscale G phase in martensite and ferrite during aging process, which increase the strength by a bypass mechanism with dislocations. After aging at 450 °C, the ultimate tensile strength of the sample reached 1350 MPa, the yield strength reached 1100 MPa, and the uniform elongation exceeded 15%. The excellent mechanical properties are mainly attributed to the stronger hetero-deformation induced (HDI) strengthening and nano-scale G phase. The relationships between HDI hardening and multiphase plastic deformation were elucidated based on in-situ tensile testes and digital image correlation analysis. Besides, the interaction between dislocations and nano precipitates were revealed by HRTEM. The insights from the novel steel will provide a reference for the subsequent development of high-performance cast stainless steels.