

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

C11-金属材料强韧化与损伤失效

**C11-Strengthening/Toughening and
Damage/Failure of Metallic Materials**

Organized by

Chinese Materials Research Society

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

C11. 金属材料强韧化与损伤失效

分会主席：张金钰、吴渊、岳永海、王江伟、张振军、安祥海

C11-01

面心立方金属孪生机制

张哲峰*

中国科学院金属研究所

面心立方金属形变过程中位错与孪生共同承担塑性变形，当发生变形孪生时，对其加工硬化能力和强度-塑性关系具有重要作用。本报告主要探讨面心立方金属中典型孪生机制。首先，通过揭示晶体取向、层错能和晶粒大小对孪生萌生的不同作用，提出了孪生萌生取向-层错能-晶粒尺寸判据；其次，通过对孪生机制原子运动过程分析，结合不同面心立方金属第一原理计算模拟，提出孪生萌生判据；基于 TWIP 钢及 Cu-Al 合金拉伸-压缩过程孪生观察分析，发现孪生面上法向拉应力抑制孪生萌生，而法向压应力促进孪生萌生。

C11-02

超声振动强韧化金属材料

张涛*，李足，邓皓玮

广州大学

近年来，先进结构材料领域迅速发展，但是同时提高传统合金的强度和塑性仍然非常具有挑战性，而高/中熵合金拥有独特的成分组成和微观结构，为设计和制备高强韧合金提供了新的思路。在最近的报道中，固溶强化、晶粒细化、析出强化、异质组织构建等方法，能够显著提高高/中熵合金的强度和塑性。然而，在固溶强化和析出强化中，脆性相的析出往往会恶化合金的塑性。在我们的工作中，避开“轧制+退火”的传统制备加工方法，报道了一种基于超声振动辅助成形的新方法，以同时提高双相高/中熵合金的强度和塑性，该工作为实现高/中熵合金的强度-塑性协同提升提供了一条有效的新途径。

C11-03

动态滑移带细化诱导轻质难熔高熵合金的高拉伸塑性

付志强*，王浩，陈维平，黄丽冉

华南理工大学

本文系统研究了高机械稳定性的 Ti_{1.6}ZrNbAl_{0.15} 轻质难熔高熵合金 (LRHEA) 的强化机制及应变硬化行为。通过冷轧及再结晶退火工艺对样品进行处理，获得了平均晶粒尺寸在~25 μ m 至~244 μ m 之间的单相体心立方 (BCC) 结构试样。室温拉伸力学测试表明，细化晶粒尺寸对合金屈服强度的影响较小，但能有效地提高了拉伸塑性。测得该合金具有非常低的低霍尔-佩奇系数，值为 45MPa $\cdot\mu$ m^{1/2}，表明晶界强化较弱；但其晶格摩擦应力非常高，值为 751MPa，表明固溶强化较强，该发现为强化 LRHEA 提供了重要参考作用。此外，TEM 下观察到位错结构呈平面滑移模式，未观察到变形引起的孪晶和相变。随着应变的增加，动态滑移带细化成为应变硬化的主要机制，从而产生优异的拉伸塑性。

C11-04

基于微孔结构影响的韧性断裂机理及 C-L 断裂模型修正

吴欢，韩金全，孟宝*，门明良，万敏，吴双鑫

北京航空航天大学

由于微孔结构存在应力集中效应，会极大弱化材料的力学性能，因此相较于无孔构件，开孔构件很容易发生破裂损伤失效。本研究利用 SUS304 不锈钢薄板，并基于晶体塑性有限元模型，揭示了微孔排布方

式对薄板断裂机理的影响,提出了适用于预测开孔薄板断裂损伤的韧性断裂模型。微孔间的应力干涉效应所带来的影响被纳入模型,断裂应变与最大主应力的积分值被用于预测裂纹扩展的指标。宏观上对不同微孔间距的试样进行单向拉伸断裂实验,旨在表明微孔结构及排布方式对试样力学性能存在显著影响,且结果表明微孔排布方式还会影响试样的断裂剪切角。对不同断裂剪切角的试样进行电镜扫描(SEM),观察断口的微观组织形貌特征,并结合晶体塑性模拟应力及应变分布规律、裂纹萌生位置,结果表明微孔间距越小,孔间高应力区重叠,进一步促进晶体滑移系的激活。孔间应力干涉效应的强弱是影响微孔边缘位错累积程度的关键。以无孔薄板的临界断裂损伤阈值为标准参数,对 C-L 断裂损伤模型进行修正,引入表征微孔排布的影响因子,建立了能预测不同间距比薄板的临界损伤阈值的 C-L 韧性断裂模型。最后对微型折叠滤网零件的成形制造进行有限元模拟,多维度比较了不同韧性断裂模型的预测结果,验证了本文所提模型的准确性。

C11-05

FV520B 钢中第二相演化及析出强化行为研究

张丽琴, 刘文庆*

上海大学材料科学与工程学院

将固溶态 FV520B 钢样品在 850℃调整处理后,在 470℃时效不同时间,测量其硬度,用原子探针层析技术(APT)、高分辨透射电子显微镜(HRTEM)进行分析。硬度测试结果显示:时效初期样品硬度快速上升,1h 达到峰值,随后逐渐下降,8h 后再次上升,128h 达到第二个峰值后趋于稳定。APT 结果表明:时效 1h 样品中析出的大量细小的富 Cu 相导致硬度升至第一个峰;随时效时间延长,样品中富 Cu 相粗化,数量密度降低,导致硬度下降;继续时效,NiMnSi 团簇和富 Cr 区的形成导致样品硬度达到第二个峰值。NiMn 团簇在时效初期偏聚于富 Cu 相附近,随后与富 Cu 相逐渐分离,同时 Si 元素不断向 NiMn 团簇富集,形成 G 相的前驱体 NiMnSi 团簇。TEM 结果表明时效 128h 样品中富 Cu 相为 FCC 结构,与基体的位相关系为: [011]Cu // [001]M, (111)Cu // (110)M。

C11-06

钇微合金化对 AISI 321 奥氏体不锈钢氢环境和超临界水环境下性能的影响研究

付永强*

江西理工大学

AISI 321 不锈钢是一种奥氏体钢,具备优异的力学性能、耐腐蚀和高温性能,在不同工业中广泛应用。随着氢能源的规模化发展,制氢、储氢、运输等方面的需求大幅提升。超临界气体制氢技术以反应效率高、产氢纯度高等特点具有极大的能源领域应用价值,但由于超临界水制氢反应器长期在富氢和超临界水复杂环境中服役,反应器材料容易失效,为使设备长期安全可靠运行,其抗氢脆性能和抗超临界水环境应力腐蚀性能需要得到提升。钇(Y)作为稀土元素之一,能显著改善钢中的晶粒、孪晶和第二相等有效影响抗应力腐蚀性能的因素。作者及研究团队通过在稀土 Y 微合金化改善了 AISI 321 奥氏体不锈钢的组织,系统研究了在氢环境和超临界水环境下稀土 321 钢的慢应变速率拉伸性能,并对比分析了 Y 对晶粒尺寸、孪晶分数和碳氮化物的影响,以及其对两种环境下的应力腐蚀性能增强机制。主要研究结果如下:(1) Y 微合金化使 321 钢的平均晶粒尺寸从 15.73 μm 细化到 12.83 μm ,孪晶界分数从 29.8%增加到 38.4%,对初生方形 Ti(C,N)起到球化作用并使纳米级 Ti(C,N)析出相的数量从 20.7 PCS/ μm^2 增加到 30.9 PCS/ μm^2 。(2) Y 微合金化令 321 钢的氢致塑性损失从 25.7 \pm 1.1%降低到 18.4 \pm 1.1%,氢脆敏感程度大幅下降,一方面是因为晶界数量增加和方形 Ti(C,N)的球化起到降低应力集中水平,另一方面析出相数量和孪晶界数量增加降低了氢扩散速率。(3) 在 650℃的超临界水环境下,含 Y 拉伸试样断口有明显缩颈现象。Y 添加后,断面收缩率从 70.2%增加到 79.6%,抗拉强度、屈服强度均有提高,伸长率有所下降。在高温高压的水蒸气中,321 钢应力腐蚀开裂主要起源于微米级碳氮化物,Y 微合金化改性析出相令应力腐蚀抗性增强。结果表明,稀土 Y 微合金化对改善不锈钢的组织结构和性能具有显著影响。这为设计和合成新型耐蚀合金提供了重要的启示,特别是在需要高强度、高耐腐蚀性能的极端工作环境下。通过提高抗氢脆性能和超临界水环境抗应

力腐蚀性能，可以更好地应对氢环境对材料性能的影响。这对于氢能源技术中的制氢、储氢、输氢等工程应用以及核电站、化工设备等在高温高压水蒸气环境中工作的设备具有重要改进意义。

C11-07

20Si2MnCrNi 高强钢的冲击韧性与裂纹扩展特性

蔡新宇, 安胜利, 侯渊, 王波尧, 高占勇*

内蒙古科技大学材料科学与工程学院

对 20Si2MnCrNi 高强钢分别进行等温淬火和淬火回火热处理工艺, 获得低温无碳化物贝氏体组织及回火马氏体组织。测试其力学性能、显微组织、断口形貌、微观组织及取向关系, 并研究了其裂纹扩展路径, 分析微观组织对裂纹扩展的阻碍作用。结果表明, 试验钢回火马氏体组织冲击功为 116.3J, 平均裂纹扩展速率为 12.09×10^{-5} mm/cycle。断口形貌中含有河流花样、解理平台和韧窝, 呈现混合断裂机制。而低温无碳化物贝氏体组织冲击功达到 211J, 约是回火马氏体钢 2 倍左右, 平均裂纹扩展速率仅 10.29×10^{-5} mm/cycle, 且到达裂纹失稳扩展阶段也较为滞后。断口形貌中未发现解理断裂特征, 以韧窝为主, 还含有大量撕裂棱等较好韧性特征的形貌。高韧性主要与低温无碳化物贝氏体组织有关, 且疲劳裂纹扩展轨迹于低温无碳化物贝氏体处出现分支或沿片层方向偏折较大角度, 无碳化物贝氏体的高韧性归因于片层处的纳米级残余奥氏体薄膜在相变时发生的 TRIP 效应, 消耗更多能量, 降低疲劳裂纹扩展速率。

C11-08

复合材料强韧化新途径探索

宋晓艳*, 吕皓, 刘雪梅, 王海滨, 韩铁龙

北京工业大学

以硬质合金和难熔金属基合金为例, 介绍本研究团队在探索实现复合材料高综合性能方面的工作进展。随着航空航天、军工、电子信息等前沿科技领域的发展, 对硬质合金和难熔金属基合金制品的性能要求越来越苛刻, 其综合性能的瓶颈是在高硬度的基础上兼具高强度和高韧性。韧性和断裂强度仍然是限制硬质合金和难熔金属基合金实现高端应用的瓶颈, 韧性和强度的协同提高是获得硬质合金和难熔金属基合金制品高质量、长寿命服役的关键。本报告重点介绍近年来本团队在上述两种典型复合材料协同强韧化新途径方面的探索, 相关设计和研制思路可望推广应用于其他复合材料的综合高性能化。

C11-09

镍基高温合金疲劳损伤原位 SEM 研究

张跃飞, 王晋, 张泽

浙江大学

镍基高温合金在服役过程中会受到复杂的载荷-时间-温度的影响, 导致疲劳引起失效。在疲劳损伤早期, 微观组织结构特征对于材料局部塑性变形的累积具有不可忽视的作用。通过 SEM 原位疲劳实验, 在微纳米尺度研究微裂纹萌生、扩展行为, 揭示微观结构演变对疲劳性能影响, 对于全面理解和预测镍基高温合金服役过程中的疲劳失效行为至关重要。基于自主开发的原位 SEM 疲劳测试系统, 研究了镍基高温合金低周疲劳行为, 结合 SEM 数字图像相关分析 (DIC) 方法, 研究了疲劳早期材料的应变演化与微观组织结构间的关系, 直接揭示低周疲劳微裂纹的萌生与扩展过程中微观组织损伤与变形规律。

C11-10

晶体/非晶纳米多层膜的辐照损伤与力学行为

王亚强*

西安交通大学

本报告主要介绍 He 离子注入 Ag/Cu-Zr 晶体/非晶纳米多层膜的辐照损伤行为和力学性能。辐照后的多

层膜产生了奇异的 He 气泡分布行为：只存在于晶体 Ag 层内部，而在界面和非晶 Cu-Zr 层无气泡分布，且 He 气泡密度随 η 减小逐渐增大，这归因于界面和非晶层的强辐照缺陷陷阱作用。力学性能结果显示，多层膜具有尺寸依赖的辐照硬化现象，硬化量随调制比 η 先减小后增大，相应的强化机制由 He 气泡强化转变为自由体积湮灭强化。此外，随着 η 增大，辐照后多层膜的应变速率敏感性先快速由正值减小为负值，随后缓慢增大，而未辐照样品由正值单调减小为负值。基于位错-气泡的交互作用，阐明了位错弓出钉扎效应和动态应变失效的塑性变形机理。

C11-11

高温 MEMS 构件用超细尺度镍/镍钨层状复合材料的结构设计和强韧化研究

梁斐¹，张滨²，张广平^{*3}

1. 南京理工大学

2. 东北大学

3. 中国科学院金属研究所

设计和制备了面向高温 MEMS 实际需求的纳米晶 Ni/Ni-W 层状复合材料，研究了厚度比和组元层厚对其室/高温拉伸行为的影响。室温拉伸结果表明，随着 Ni 层对 Ni-W 层厚度比的增加，界面约束下稳定的晶界滑移行为对于初始厚度较小的 Ni-W 层塑性流变的贡献增强从而使其在拉伸过程中的薄化程度更高。针对 Ni-W 层的断裂行为由通道裂纹和微剪切带的并存模式向微剪切带模式的转变，提出了基于能量准则的理论模型。随着层厚的同步减小，层状材料的强度和韧性同步提高，抗拉强度达到 1.9 GPa 的同时断裂延伸率为 5.5%。切应力主导的稳定晶界迁移促进了初始厚度较小 Ni 层的晶粒长大，加工硬化能力的回复导致层状材料出现了由微剪切带向局部应变区转变的应变去局域化过程。高温拉伸结果表明，Ni/Ni-W 层状材料在 400 °C 下的高温拉伸强度能够达到 400 MPa-620 MPa，为传统 LIGA Ni 高温强度的 2-3 倍，且其断裂延伸率可达到 10% 以上。这可以归结于 Ni 层中受界面约束的晶粒长大和 Ni-W 层内晶界弛豫带来晶界热稳定性和高温强度的提升。这为发展和制备具有优异高温性能的高温 MEMS 构件用材料提供了一种新的设计思路。

C11-12

晶体-非晶 TiN 增强双相 FeMnCoCr 中熵合金复合材料的力学性能

范晓轩，沈如翠，张金钰*

西安交通大学

双相高/中熵合金 (DP-H/MEA) 因其在恶劣环境中的优异性能而引起广泛关注，而 FeMnCoCr DP-H/MES 的屈服强度较低。金属/陶瓷纳米层压 (MCNL) 复合材料，由作为软/韧性金属基体以提高延展性的母相和阻碍位错运动以提高强度的硬/脆性陶瓷相组成，由于其独特的界面驱动性能而引起了极大的关注。在这里，为了减轻纳米晶 TiN 的脆性并增加其金属/陶瓷界面的应变相容性，将晶体玻璃 TiN 纳米层与 FeMnCoCr DP-H/MEA 进行纳米层压，以通过磁控溅射技术构建具有从 5 到 125nm 的相同单个层厚度的 FeMnCoCr/TiN-MCNL 复合材料。在 FeMnCoCr 和 TiN 层中观察到元素扩散和双相结构，显示出强烈的厚度依赖性。多层膜在临界厚度 $h \sim 10\text{nm}$ 时表现出最大硬度，这是由 FMCC 层中的部分位错发射引起的。与理论强度相比，由于扩散元素的固溶强化作用和两相界面的强化，在 $h \geq 25\text{nm}$ 时硬度的实验值约增大 1.0GPa。具体而言，FeMnCoCr/TiN 多层膜表现出退火硬化，这与元素扩散和结晶行为密切相关。

C11-13

铁素体-马氏体-奥氏体复相不锈钢变形机制及点蚀行为研究

柳蒙浩，杜翠薇*，李晓刚

北京科技大学

本研究通过原位拉伸 EBSD 研究了一种铁素体-马氏体-奥氏体复相不锈钢的变形机制，并通过电化学手段研究了其点蚀萌生和扩展行为，得到的结论如下：在屈服阶段，复相不锈钢的变形机制为残余奥氏体

相向马氏体相转变的相变诱导塑性变形；在应变硬化阶段，塑性来源于奥氏体的相变诱导塑性和铁素体相发生的位错滑移，其中在局部应力较大的马氏体相中可能也有少量的位错增殖；在颈缩和应变局部化阶段，奥氏体相相马氏体转变完毕，马氏体相发生位错滑移，局部应力进一步增加。固溶温度从 1000℃ 升高到 1150℃，复相不锈钢的点蚀电位降低约 140 mV，极化电阻降低约 40%。点蚀在铁素体和奥氏体/马氏体相界面萌生，并且优先沿着奥氏体/马氏体相扩展。

C11-14

Abnormal strain rate sensitivity in steel

黄明欣*

香港大学

The present talk discusses recent findings on the abnormal strain rate sensitivity of several high strength steels. Conventionally, yield stress or flow stress of metals and alloys increase with the increase of strain rate, which is known as positive strain rate sensitivity. Recently, negative strain rate sensitivity, i.e., flow stress decreases with the increase of strain rate in various new steel grades such as twinning-induced plasticity steel and medium Mn transformation-induced plasticity. The present work finds out the key mechanism controlling the negative strain rate sensitivity is the interaction between dislocations and carbon solid solution. Detailed mechanisms will be discussed in this talk.

C11-15

基于大范围塑性变形的超高强度钢塑韧化研究

蒋虽合*

北京科技大学

超高强度钢通常采用纳米析出等易于工业化实施的强化手段获得超高强度，但是常见的析出相往往极大的破坏了材料均匀变形能力；以典型的二次硬化钢和马氏体时效钢为例，该类合金的断裂过程通常表现为频繁的起裂和剧烈的局部塑性主导，但是当材料强度进一步提升时这种断裂模式似乎难以保障高的韧性；本文以可与基体剪切变形的共格析出为研究对象，分析了共格析出致脆性原因，再次基础上，通过共格析出获得的良好变形能力使得超高强度钢在断裂过程中中可以激发裂纹附近大范围跨晶粒尺度塑性变形和变形诱导的二次开裂获得了良好强韧性匹配，为超高强度材料强韧化提供新思路。

C11-16

高熵钢的微观结构和强韧化机制研究

王章维*

中南大学

高熵合金作为一种全新的合金设计理念，打破了传统材料以 1 到 2 种元素为主的设计思路，吸引了广泛的关注。本报告将介绍利用高熵合金这一全新的理念，重新设计传统轻质钢，从而得到一种高性能的轻质高熵钢。借助高熵合金的理念，在奥氏体高熵钢中形成了独特的碳化物和 B2 双纳米析出相结合，集成了共格析出的位错切过和非共格析出相位错绕两种强化机制的优势，从而得到了高强度，高韧性，低密度的新型高熵钢铁材料。本报告还将介绍高熵钢中的微滑移带强韧化机制、高应力孪晶机制、低温下析出相韧化机制，重点介绍高熵钢中变形微观结构的演变规律，揭示强韧化机制形成的必要因素，阐明其加工硬化本质。

C11-17

面向金属材料的极端环境 X 射线原位 CT 技术开发与应用

夏夷平，李仁庚*

南京工业大学

材料基础科学理论研究与先进表征技术开发是材料科学发展的两条主线，材料表征技术与仪器贯穿材料研发、生产制造、工程应用、服役评价全过程，不可或缺。近年来，随着材料研究的不断深入，现有表征仪器已无法满足材料前沿研究需求，亟需开发三维、原位、可检测材料深部的表征仪器与技术。基于 X 射线强穿透能力和计算机断层扫描 (CT) 技术，结合亚微米级精密控制转台和机械控制，实现微米级高分辨 X 射线 CT 成像，可实现毫米/厘米级试样的三维无损成像；突破了极端环境与 CT 耦合技术，独创采用非接触式加热模式，可实现超高温、超低温、复杂应力、应力腐蚀、热压烧结等服役环境下材料三维原位表征。目前该技术已应用于高温合金、镁合金、铝合金、钛合金等先进金属材料，为三维量化研究极端环境下关键材料与部件组织与缺陷演变规律提供了有力手段。高性能原位 X 射线 CT 设备的成功研发，将极大提升关键结构材料在服役工况下的可靠性和安全性。

C11-18

残余奥氏体稳定性对 TRIP 辅助钢的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。

C11-19

高强度冷轧中锰钢奥氏体逆相变对组织性能的影响研究

王镜^{1,2}，陈蓬*^{1,2}，李小武^{1,2}

1. 东北大学材料科学与工程学院材料物理与化学系
2. 东北大学材料各向异性与织构教育部重点实验室

以高强塑性汽车钢为开发目标，设计了一种高强中锰钢 Fe-0.3C-5Mn-2Al-0.8Cr-0.15V，经热轧、冷轧后在 600°C~800°C 进行两相区退火处理，以研究不同退火温度对冷轧钢的组织演变以及力学性能的影响。结果表明：随着退火温度的升高，回火马氏体逐渐分解，残余奥氏体体积分数先增加后降低，750°C 退火后得到 31.5% 的残余奥氏体，形成了超细晶铁素体、奥氏体和新生马氏体多相组织。变形过程中残余奥氏体显著的 TRIP 效应对力学性能的贡献较大，当退火温度为 750°C 时获得了较为优异的综合力学性能，极限抗拉强度为 1316 MPa，延伸率为 15%，强塑积为 19.7 GPa %。

C11-20

316LN 奥氏体不锈钢温度依赖棘轮行为及微观组织演变研究

杨文浩，刘刚*

西安交通大学

本文对 316LN 奥氏体不锈钢分别在 300°C、400°C、500°C、和 600°C 进行单轴拉伸试验和棘轮试验，研究动态应变时效(DSA)对单轴拉伸及棘轮变形行为和棘轮变形微观组织演变的影响。在单轴拉伸试验和棘轮变形试验中，所用 316LN 奥氏体不锈钢的 DSA 温度范围均为 $\geq 400^\circ\text{C}$ 。特别是在棘轮测试中，当温度从 300°C 升高到 400°C 时，棘轮应变累积以及稳态棘轮应变速率明显降低。而在 DSA 温度范围内，棘轮行

为对温度不敏感。微观组织观察发现, 在 300°C(非 DSA 温度区间)时, 棘轮后试样中位错组织呈现位错胞和位错缠结形态。而在 $\geq 400^\circ\text{C}$ (DSA 温度区间)时, 棘轮试样中存在复杂的位错结构, 主要由高密度位错墙、平面滑移带和 Lomer-Cottrell 位错结构组成。微观组织结构表明, 随着温度升高, 棘轮变形机制从无 DSA 温度区间 (300°C) 的交滑移模式转变为 DSA 温度区间 (400°C-600°C) 的平面滑移模式。进一步证明, 在 400°C到 600°C的温度范围内, DSA 诱导的硬化效应与热激活的软化效应的动态平衡, 这种动态平衡产生棘轮变形行为对温度的不敏感性。最后, 定量估算了棘轮变形后试样 DSA 引发的位错结构, 阐述了其与棘轮变形行为的联系。

C11-21

共格纳米析出相强化多主元合金的设计、制备及磨损机理研究

任富增*, 杨璐
南方科技大学

接触并相对运动的金属构件不仅需要高强度、良好的延展性, 同时需要高耐磨性。然而, 实现超高强度通常会导致显著降低延展性, 且高强韧并不必然超耐磨。因此, 本研究基于热力学计算, 利用相分离原理, 开发了共格纳米析出相强化的多主元合金, 实现了强韧性的协同, 阐明了强韧化机理, 并利用表面处理技术在合金表面构筑梯度纳米结构和残余压应力, 实现超高耐磨性, 揭示了干滑动摩擦条件下材料的磨损机制以及表面梯度结构的演化规律。

C11-22

金属材料指数硬化模型推导及其应用

张振军*
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。

C11-23

超高硬度 FeMnAl 基中熵合金及其硬化机制研究

彭华备*, 左阳, 孙礼鑫, 付雨, 文玉华
四川大学

超硬且耐磨的特性对于合金在工程应用中持续承受摩擦磨损至关重要。然而, 设计和制造具有不同硬度水平的多个部件会给成分设计、加工优化及硬化技术的应用带来挑战。本研究提供了一种简便的方法, 通过常规时效处理制备出了硬度可调的超硬 Fe-37.8Mn-6.9Al 和 Fe-36.5Mn-6.5Al-7.7Cu 中熵合金。Fe-37.8Mn-6.9Al 经时效处理的相变顺序为 $\alpha \rightarrow \alpha + \text{D03} + \alpha\text{-Mn} \rightarrow \alpha + \text{D03} + \alpha\text{-Mn} + \beta\text{-Mn} \rightarrow \beta\text{-Mn} + \text{BCC}$ 结构富 Fe 相 + BCC 结构富 Mn 相, 而 Fe-36.5Mn-6.5Al-7.7Cu 的相变顺序为 $\alpha \rightarrow \alpha + \text{D03} + \alpha\text{-Mn} + \text{FCC}$ 结构富 Cu 相 $\rightarrow \alpha + \text{D03} + \alpha\text{-Mn} + \text{FCC}$ 结构富 Cu 相 + $\beta\text{-Mn} \rightarrow \beta\text{-Mn} + \text{FCC}$ 结构富 Cu 相。时效硬化效应主要源自于 $\beta\text{-Mn}$ 的析出行为, 我们通过在短时时效过程中控制 $\beta\text{-Mn}$ 的析出量, 实现了在同一种材料体系内硬度从软 (210 HV) 至超硬 (1042 HV) 的可调控性。另外, 经时效处理获得的超高硬度 FeMnAl(Cu) 中熵合金具有优异的耐磨性。本研究不仅为开发新型超硬耐磨合金提供了可能, 也大大简化了传统钢材在成分设计和硬化处理中所需的复杂步骤。

C11-24**CoFeNi 基非等原子比中熵合金的第二相析出机制**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, 因此, 纳米相在各种合金体系中的析出强化机制受到了广泛的研究。常见的强化相包括: 碳氮化物, L12 相, B2 相, 富 Cu 相等, 这些强化相都需要额外添加合金元素, 如能开发出一种新型纳米析出相将对进一步提升材料的服役性能具有参考意义。本工作设计并通过增材制造的方法制备了一种非等原子比 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高密度富 Ni 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。合金在 400 °C 时效过程中析出具有密排六方结构的纳米级层片状富 Ni 相, 纳米相与基体间存在共格取向关系。富 Ni 相在热处理过程其成分、结构不变, 并保持高度的稳定性, 赋予合金较强的硬度, 其硬度值最大达到了 555 HV, 相较于原始态硬度提升了 58.74%。本合金与以往析出强化合金的主要区别是: 不需要添加合金元素形成金属间化合物, 既可直接形成高密度的纳米析出相, 获得足够的析出强化效果。本工作为后续设计新的析出强化合金提供新的研究思路。

C11-25**B2 相增强异质结构 NiCoCr 基中熵合金的强韧化与变形断裂行为**张东东*^{1,2}, 张金钰¹, 陈子斌²

1. 西安交通大学
2. 香港理工大学

In this work, we designed heterogeneous NiCoCr-based duplex medium-entropy alloy (MEA) comprising the face-centered-cubic (FCC) matrix and the B2 phase towards outstanding cryogenically mechanical responses. The mechanical properties of this MEA are strongly temperature-dependent, i.e., when temperatures decrease from 298 down to 77 K, the yield strength, ultimate strength and tensile ductility are increased from ~1.1 GPa, 1.4 GPa and 20% to ~1.5 GPa, 1.8 GPa and 25%, respectively. In the studied temperature-range, the plasticity mechanisms, involving the cooperation of planar slip, stacking fault and twinning, are temperature-independent for this MEA, whereas the low temperature (or high stress) promotes stacking fault and twinning at initial plastic deformation assisted by the significant B2-driven hardening. Multi-strengthening mechanisms coupled with the superior strain hardening capability render this alloy excellent strength-ductility synergy, especially for the 77 K stretched MEA involving temperature-dependent B2 cracking behavior. This unique B2 cracking behavior was uncovered for the first time in multi-component alloys, rationalized in terms of the competition between the intensity of the stress field ahead of the B2-crack tip and the crack-arresting capabilities of the FCC matrix at different temperatures.

C11-26**梯度组织塑性变形行为原位 EBSD 表征及强韧化协同机制**潘鑫磊¹, 周留成^{1,2}, 何卫锋^{1,2}, 梁晓晴¹

- 1 空军工程大学航空工程学院航空动力系统与等离子体技术全国重点实验室
- 2 西安交通大学机械工程学院航空发动机研究所

梯度组织具有优异的强度-塑性匹配, 但由于其多尺度分布特征导致对其变形行为试验表征难度大, 其中强韧化机制认识不清楚, 目前主要采用数值仿真或离线表征研究, 缺乏试验数据支撑, 难以指导梯度结构的优化。本文采用飞秒激光诱导超高压冲击波在 1Cr18Ni10Ti 奥氏体不锈钢表层制备了梯度晶粒和梯度

位错结构，采用原位拉伸 EBSD 技术表征了梯度组织在不同应变阶段的演化特征，阐明了梯度组织非均匀变形行为，揭示了梯度组织材料强韧化机制，认为梯度组织优异的强度-塑性匹配源于非均匀变形诱导的背应力对软质层的强化和前应力对硬质层软化的共同作用，为梯度组织强韧化理论提供了试验数据支撑。

C11-27

增材制造多尺度退火孪晶助力中熵合金优异的强塑性

郭博静，王锦程，何峰*

西北工业大学

共格孪晶界作为材料内部的面缺陷，为设计具有优异“强度-塑性”协同作用的先进金属材料提供了一条有效途径。然而，在未经严重塑性变形的情况下，将纳米级孪晶引入到增材制造组织中极具挑战性。本研究创新性地利用增材制造合金中的特征胞状组织，在激光选区熔化 Ni₃₅Co₃₅Cr₂₅Ti₃Al₂ 中熵合金中引入了高密度的多尺度退火孪晶。多尺度退火孪晶协同纳米析出网络以及大量位错，实现了~1.4 GPa 的抗拉强度和~25%的优异拉伸塑性。研究发现激光选区熔化工艺诱导的胞状组织，其胞壁具有高密度位错和 Ti 元素偏析共存特征，通过与再结晶迁移界面的交互作用，促进了多尺度退火孪晶的形核。此外，胞状纳米析出网络增强了退火孪晶的热稳定性。塑性变形过程中频繁的位错和退火孪晶相互作用有助于提高合金加工硬化能力，实现优异的塑性。高强度来源于界面强化、析出强化及位错强化等多种强化机制的耦合作用。目前研究结果推动了增材制造新型微观组织的设计和探索，为开发具有优异力学性能金属材料提供了指导。

C11-28

材料强韧化策略的原位解析

岳永海*

北京航空航天大学

随着科技的进步，人们对高强韧结构材料提出了更高的要求，如何通过新的结构设计提升材料的性能并从微纳尺度甚至是原子尺度揭示材料结构与性能之间的“构-效”关系至关重要。在本次报告中，报告人将重点介绍近年来针对上述问题所做的研究工作，报告人提出非晶/晶体双相增强、多级结构增强等策略来重新设计材料并从微纳尺度甚至是原子尺度动态揭示了材料的强韧化机制，为新型高强韧复合材料的设计提供了指导。

C11-29

成分调制异构钛合金的微结构设计和强韧化

张天隆*

香港科技大学

设计高强韧的结构材料一直是科学研究和工业应用中备受关注的话题和挑战。为了实现这一目标，研究人员提出了通过创建多尺度的异质结构来制造具有优异综合性能的结构材料的思路。然而，在钛合金等材料中，设计多尺度晶内异构微观结构仍然面临许多困难。此外，将小规模实验室技术扩展到大规模工业应用也存在一定的挑战。因此，我们提出了一种新颖的方法，将热力学数据库、相场模拟和增材制造相结合，用于异构材料设计和力学性能提升。首先，通过相场模拟，我们展示了设计异构微观结构的前驱相分离组织和双步时效过程，成功地设计出具有多尺度分层异构双相结构的材料。我们利用增材制造技术，在微米尺度上实现了一种全新的亚稳态异构双相组织。这种新型的微米尺度成分调制组织展现出了优秀的力学性能。基于增材制造的方法为设计成分调制异构合金创造了新路径，可应用于各种结构和功能材料的设计和开发。

C11-30

柔性抗疲劳共格梯度金属薄膜导体

吴凯*

西安交通大学

可拉伸金属薄膜导体是柔性电子器件中重要的组成单元。然而，由于微观组织的不稳定，实际应用中纳米晶金属薄膜往往在较小的交变载荷作用下发生疲劳损伤，导致电学性能退化，影响器件性能和寿命，严重制约了柔性金属薄膜的实际应用。鉴于此，我们构筑了共格梯度结构，通过有效抑制裂纹的萌生和扩展，开发了一种具有超高疲劳抗力的金属薄膜材料。晶界/相界约束、可控晶粒粗化和界面应力释放抑制局部损伤积累、延迟疲劳裂纹的萌生；适度的界面结合诱发的界面剥离和裂纹偏转抑制了疲劳裂纹的扩展。纳米共格梯度金属薄膜展现出极高的循环不敏感的高电导率。该共格梯度设计独立于现有通过调控膜基界面粘合、应变释放结构设计等改善疲劳寿命的策略，可与传统制造技术良好兼容。并证实了纳米共格梯度金属薄膜在电致发光、生物电极领域的应用。

C11-31

位错胞亚结构对温轧高锰钢低温力学性能的影响

黎雨¹，李伟²，金学军*²，徐春¹

1. 上海应用技术大学

2. 上海交通大学

异质纳米结构的被用于各类金属材料以实现综合强度-延展性。然而，低于 1 千兆帕斯卡的低屈服强度和在不均匀变形使其在低温环境等恶劣的极端条件下应用受到限制。在本文中，我们提出了一种双非均匀结构，即冷热轧高锰钢中的非均匀位错分布和分级晶粒，与单一非均匀晶粒结构相比，在低温下同时提高了屈服强度（~1.2GPa）和出乎意料的延展性（~70%）。位错梯度促进了低应变下微带的形成，从而诱导了软粗晶粒的强烈动态结构细化。此外，晶粒细化效应导致在变形后期激活分级纳米孪晶带，有助于可持续的应变硬化和大的均匀延伸率。

C11-32

高碳铬轴承钢多步有序相变工艺及强韧性匹配优化

徐彬迅^{1,2}，王培*¹，李殿中¹

1. 中国科学院金属研究所

2. 中国科学技术大学材料科学与工程学院

本研究基于高碳铬轴承钢 GCr18MoM，提出了一种创新的微观组织构建和力学性能优化理念，并基于此，设计了一系列按照马氏体-贝氏体-马氏体相变次序的多步有序相变工艺（MBM 工艺）。研究发现，多步有序转变过程中各相之间存在强烈的相互作用（催化、多级分割细化，应变强化等），可显著影响复相组织的微观结构和力学性能。因此，本研究利用这些交互作用构建出了多级细化的马贝复相组织，细化程度甚至超过了轴承钢的传统纯马氏体组织。新工艺在保证复相组织硬度与纯马氏体相同的情况下，冲击功提高为传统纯马氏体的 2.7 倍，韧性大幅提高，耐磨性也比马氏体提高了 27%，大大优化了轴承钢的强韧性匹配与磨擦磨损性能。此外，针对多步相变过程中各步相变量难以测定的问题，开发了一种以热膨胀为主，SEM、XRD 等表征手段结合计算各步相变量与研究贝氏体相变动力学的方法，探明了多步相变过程中的相变规律，以及马氏体分布特征、含量对贝氏体相变过程催化加速作用的影响。

C11-33

Custom 455 不锈钢 480 °C 时效过程中析出强化行为研究

孙光岩，彭剑超，刘文庆*

上海大学

Custom 455 不锈钢的超高强度源于高密度、弥散分布的纳米尺寸析出相。本研究将以 Cu、Ti、Si 作为主要强化元素的 Custom 455 马氏体析出强化不锈钢在 850 °C 固溶 0.5 h 后水淬，在 480 °C 回火不同时

间, 得到硬度变化曲线。利用透射电子显微镜(transmission electron microscopy,TEM)和原子探针层析技术(atom probe tomography, APT)研究时效过程中析出相演变规律和成分变化对其硬度的影响。主要结果如下: 时效 5 min, Cu、Ni、Ti 原子偏聚在一起形成球状团簇, 导致硬度迅速上升; 时效 0.5 h, 富 Cu 相与富 Ni 相发生分离, 形成两类富 Ni 相(棒状富 Ni 相尺寸大, 密度低, Ni、Ti 原子比接近 3:1, 应为 Ni₃Ti 相, 球状富 Ni 相尺寸小, 密度高, Ni、Si、Ti 原子比接近 15:5:5, 应为 G 相前驱相); 时效 4h, 富 Cu 相数量密度降低, 棒状 Ni₃Ti 相数量密度升高, G 相形成(Ni、Si、Ti 原子比接近 16:7:6), 导致硬度达到峰值; 时效 128h, 富 Cu 相、Ni₃Ti 相和 G 相尺寸均发生粗化, 数量密度下降, 导致硬度下降。富 Cu 相、Ni₃Ti 相、G 相和马氏体间存在如下的位向关系: (111)Cu // (0004)Ni₃Ti // (011)G // (011)M, [0-11]Cu // [-12-10]Ni₃Ti // [100]G // [100]M。

C11-34

稀土 Y 对 D2 冷作模具钢组织及力学性能的影响

熊雨康*

江西理工大学

冲击韧性和耐磨性能的优良匹配是解决冷作模具钢应用于大锭型宽幅冷加工模具的关键技术, 突破 D2 钢中大尺寸网状分布共晶碳化物与马氏体基体细化是技术瓶颈。本文以添加稀土钇 (Y) 的 D2 (Cr12Mo1V1) 冷作模具钢为研究对象, 利用扫描电镜、电子探针、透射电镜、激光共聚焦、ASPEX 和热模拟、内耗仪、热膨胀仪等手段系统研究了稀土 Y 对 D2 碳化物及力学性能的影响, 重点研究 Y 对三种工艺下的初生碳化物的影响, 初步揭示了稀土 Y 对 D2 钢组织的调控机理。主要研究结论如下: (1) 稀土 Y 对铸态 D2 钢中夹杂物种类、大小和数量均有较明显影响。夹杂物类型由 Al₂O₃ 和 MnS 变为 Y₂S₃ 和 Y₂O₂S, 夹杂物数密度由 83.13/mm² 降至 24.14/mm², 富 Y 夹杂物平均晶粒尺寸小于 10 μm, 且易与共晶碳化物形成“包裹体”复合组织。富 Y 夹杂物 (Y₂O₃、Y₂O₂S、Y₂S₃) 优先于 M₇C₃ 型共晶碳化物形成, 故能促进 D2 钢中共晶碳化物的异相形核。稀土添加使得共晶碳化物析出温度降低, 从而降低 D2 钢中共晶碳化物尺寸。(2) 在热压缩过程中, 随压缩温度降低, D2 钢基体发生动态回复与动态再结晶的程度减弱, 无法完全抵消因变形产生的加工硬化。随着温度升高, 出现明显峰值应力, 且在低应变、高变形温度下更易发生动态再结晶。变形温度和变形量均会影响 D2 钢中共晶碳化物 M₇C₃ 的尺寸和形貌。随变形温度升高, M₇C₃ 碳化物平均尺寸增加; 随变形量加大, 网状共晶碳化物由条带状向颗粒状转变。同等变形条件下, 含 Y-D2 钢中 M₇C₃ 的平均尺寸要小于 0Y-D2 钢。(3) 经球化退火后, D2 钢中碳化物分为三种: 沿晶界分布的大尺寸块状 Cr₇C₃、晶粒内部分布的球状 Cr₂₃C₆ 以及基体上弥散分布的亚微米级 VC。稀土 Y 的加入降低了 Cr₂₃C₆ 碳化物与基体的界面能, 促进了碳化物的形核与生长, 更多的碳化物沿晶界析出。当稀土 Y 添加 210ppm, Cr₂₃C₆ 数量相比于不添加稀土 D2 钢增加 40%。添加稀土 Y 后, 球化退火态 D2 钢的冲击韧性得到改善。当稀土添加量为 150ppm 时, 相比于不添加稀土 D2 钢纵向冲击功提升了 46.9%, 横向冲击功提升了 9.9%。添加稀土 Y 后, 稀土夹杂物促进 D2 钢断裂方式由脆性断裂向韧性断裂转变, 且在韧窝中发现富 Y 夹杂物与碳化物, 说明夹杂物改性和碳化物球化有利于 D2 钢韧性改善。。

C11-35

Ca 微合金化对 Mg-Y 合金微观结构和力学性能的影响

陈厚文*, 任王瑞, 张爱平

重庆大学材料科学与工程学院

稀土镁合金的成本相对较高, 不利于它的大规模应用。廉价的 Ca 元素作为微合金化元素添加到稀土镁合金中不仅可以降低稀土镁合金的成本, 还可以进一步提高合金的力学性能。研究发现, 添加 0.6 wt.% Ca 可以显著提高 Mg-7Y-0.5Zr (wt.%) 合金在 200 °C 和 350 °C 下的时效硬化效果。Mg-7Y-0.6Ca-0.5Zr 合金在 200 °C 时效下的最大硬度值可达 128.2 ± 1.5 HV, 比不含 Ca 合金的峰值硬度高出 23.9 HV。在含 Ca 合金的峰时效状态微观组织中可以同时观察到柱面析出相 β' 和一种基面盘状相, 它们可以有效阻碍位错在基面和柱面上的移动, 从而有效提升合金的强度。Mg-7Y-0.6Ca-0.5Zr 合金在 350 °C 时效下的最大硬度值为 80.5 ± 1.7

HV, 高出不含 Ca 合金 15.3 HV。含 Ca 合金的峰值硬度和一种新的柱面盘状相 β_p 的析出有关。 β_p 相具有 Cd45Sm11 型结构, 单胞参数 $a = 2.24$ nm, 化学成分为 Mg₅Y_{0.8}Ca_{0.2}。时效后期, β_p 相会原位转变为平衡相 β -Mg₂₄Y₅。

C11-36

Strain Rate Sensitivity of Different Slip Modes in a Mg Alloy

Leyun Wang*

Shanghai Jiao Tong University

Strain rate sensitivity (SRS) is a material property that measures how the flow stress in a material changes with the strain rate. Among common metals, Magnesium (Mg) exhibits a high SRS value, and the SRS value varies significantly with the texture. In this work, the underlying mechanism is studied by examining how the activation of each slip mode is affected by the strain rate. To this end, in-situ three-dimensional X-ray diffraction (3DXRD) was employed to investigate the tensile deformation of a Mg-3wt.%Al alloy at strain rates of 10⁻⁴, 10⁻³, and 10⁻² s⁻¹, respectively. 3DXRD enables the characterization of more than 500 grains in each sample. From the observed grain orientation rotation and the broadening of the associated diffraction peaks, slip system activations were identified in individual grains; from the grain-specific stress tensor, the critical resolved shear stress (CRSS) of the activated slip systems were determined. CRSS for basal, prismatic, and pyramidal $\langle a \rangle$ slips all increase with the strain rate. SRS of the three slip modes were estimated to be 0.0036, 0.0226, and 0.0106, respectively. Basal slip being less strain rate sensitive than non-basal slips explains the texture dependence of SRS in wrought Mg alloys.

C11-37

Al-Cu-Mg 合金高压扭转变形原子团簇强韧化与腐蚀机理

陈莹*¹, 张厚安¹, 王乾廷¹, Nong Gao², 沙刚³, Marco J Starink²

1. 厦门理工学院

2. University of Southampton

3. 南京理工大学

通过溶质原子团簇与剧烈塑性变形产生的超细晶/纳米晶微观组织耦合结构调控, 有望实现增强铝合金强度, 同时优化材料的腐蚀性能。Al-Cu-Mg 在 6GPa 压强下反复周期扭转变形, 发现 Mg-Cu 原子团簇在晶界处的偏聚现象, 偏聚情况随着变形周次的增加而增加, 合金强度由 T351 状态 143HV 增加至最高 246HV; 由于几何必须位错在周期高压扭转变形湮灭, 加速形成超细晶结构, 合金的位错密度先增加至 $3 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$, 后随周期变形的增大至 5 周次而减小至 $2.2 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ 。超细晶晶界作为氧化膜的形核位点, 加速电化学腐蚀反应过程中保护膜的形成, 阻碍腐蚀持续进行。高压扭转周期变形大幅度协同提高了 Al-Cu-Mg 合金的强度与腐蚀性能。

C11-38

变形铝合金强度-塑性关系定量研究

曲展, 张振军, 张哲峰*

中国科学院金属研究所

变形铝合金作为典型的析出强化型合金, 其强度塑性主要受基体成分和两种析出强化方式(位错切过机制和位错绕过机制)的耦合影响, 例如 UA 状态主要以高固溶强化和位错切过型析出强化为主, 而 OA 状态主要是以低固溶强化和位错绕过型析出强化为主。通过系统研究变形铝合金不同时效状态的强塑性匹配揭示了三种不同合金成分的变形铝合金普遍呈现出“倒钩”形的强塑性变化规律。通过加工硬化率分析、饱和应力、饱和位错组态、表面损伤形貌等揭示了这一共性规律背后的共性机制(滑移方式的差异)以及共性的主导因素(相界面的湮灭效应差异而不是基体成分)。结合 ESH 模型, 建立了含有第二相变形合金

的加工硬化模型，模型揭示了基体成分和第二相形状、尺寸、分布等性质对变形铝合金加工硬化行为的影响。同时，ESH 模型对倒置关系的位置和倾斜程度进行了定量描述，并且和强度塑性的实验数据之间吻合较好，定量揭示不同析出强化方式以及变形铝合金的强度-塑性匹配规律。

C11-39

Al-Mg 合金组织调控与性能优化的微合金化研究

蒋盛宇, 刘刚*

西安交通大学

Al-Mg 合金是一种不可时效型铝合金，主要通过 Mg 溶质固溶进行强化，因此屈服强度相对偏低。提高 Mg 含量可以提高 Al-Mg 合金的强度，但是在高 Mg 含量下容易导致 β -Al₃Mg₂ 金属间化合物颗粒沿晶界析出，导致合金塑性大幅降低的同时，还减弱了合金的耐腐蚀性能和敏化抗力。如何抑制晶界上 Al-Mg 相颗粒的析出，是高 Mg 含量 Al-Mg 合金发展迫切需要解决的关键问题。本研究提出了微合金化调控析出的微观组织设计策略，在 Al-Mg 合金中添加微量 Sc 原子，通过热处理工艺的多级优化，形成 Al₃Sc 弥散相颗粒钉扎晶界、抑制再结晶，获得了以小角晶界为主的晶粒组织，降低了晶界析出的热力学驱动力；通过促进 Mg 与 Sc 之间的原子交互作用，稳定 Mg 原子在晶粒内部，减缓了 Mg 原子向晶界扩散的动力学速率。基于 Sc 微合金化及其热处理匹配，在 Al-Mg-Sc 体系合金中实现了高 Mg 含量下强度的显著提升，却没有损失材料塑性和耐腐蚀性能。最后对微观组织的演变以及强韧化机理进行了简要讨论。

C11-40

VW73B 镁合金的动态再结晶模型及 CA 法模拟

钟晨*

北京有色金属研究总院

本研究将宏观有限元法 (FEM) 与介观元胞自动机法 (CA) 相耦合，研究热变形过程中 Mg-7Gd-3Y-1Zn-0.5Zr (VW73B) 镁合金的组织演化行为。通过 440°C~500°C 以及 0.01~0.1s⁻¹ 范围内的热压缩实验构建了合金的本构方程以及动态再结晶动力学预测模型，同时获得相对应的 CA 模型参数。将本构方程以及 CA 模型输入至 DEFORM-3D 软件中，模拟在不同变形条件下 VW73B 镁合金的晶粒演化行为。结果表明，该动态再结晶动力学模型能够有效预测合金的再结晶体积分数，CA 模型能够准确预测合金的平均晶粒尺寸与晶粒尺寸分布。CA 模型和有限元模拟组合方法的预测结果与实验结果误差较小，验证了耦合方法的有效性和预测前景，为合金的实际热变形行为提供理论支撑与实验数据。

C11-41

晶界自由体积与晶界塑性

王江伟*, 祝祺

浙江大学

晶体材料中，晶界处原子堆积相对疏松，具有本征的自由体积。理论上，晶界更倾向于优先通过自身结构的调整来响应外场激励。相比于不断完善的经典晶界塑性变形理论，如剪切耦合晶界迁移和晶界蠕变等，本征自由体积激活的晶界塑性机制由于时间和空间分辨率的限制难以被有效观测，相关理论亦长期缺失。本报告结合先进原位电子显微学实验和理论计算，揭示了自由体积激活晶界塑性的新路径，为构建全面的晶界塑性理论提供了新视角。

C11-42

The role of oxygen in additively manufactured titanium alloys

Zibin Chen*

The Hong Kong Polytechnic University

Additive manufactured Ti alloys have been extensively studied and used widely in many industries. For a long time, oxygen has been referred to as the 'kryptonite' to Ti, capable of invoking a strong hardening effect but resulting in dramatic embrittlement. Here, we demonstrate that the precision control of oxygen addition can significantly benefit the mechanical properties of additive manufacturing Ti alloys. On the one hand, the oxygens could be incorporated into an additive manufactured Ti-6Al-4V alloy to improve its mechanical properties by forming an oxygen-containing FCC solid solution phase. It was revealed that the oxygen-stabilized FCC-phase dramatically enhances the strength and ductility of the material. On the other hand, the introduction of oxygen in Ti-Fe alloys during additive manufacturing can lead to unexpected performance, in which the interstitial oxygen complex gathers near grain boundaries and impedes dislocation motion inside the material, significantly improving the strength of the alloy. These results provide a significant step towards fabricating low-cost and high-performance alloys using additive manufacturing.

C11-43

原位 SEM+EBSD 拉伸研究 SLM 成形 Inconel 718 合金各向异性力学行为

朱嘉冕¹, 吕国森¹, 王昊¹, 吕俊霞^{*1}, 张跃飞², 张泽²

1. 北京工业大学
2. 浙江大学

Inconel 718 合金因具有良好的高温持久性能、抗氧化性和耐腐蚀性能而广泛应用于航空发动机部件, SLM 增材制造工艺造成 Inconel 718 合金内应力高、显微组织和力学性能不均匀、缺陷多等特点。本文对 SLM 成形 Inconel 718 合金的多尺度组织进行了表征, 对不同取向截取样品室温力学性能和强化机理开展了研究, 采用原位 SEM+EBSD、DIC 拉伸手段对室温变形过程中显微组织演化、织构变化、裂纹形成和扩展机理进行了研究, 并对强韧化机理进行了定量计算。结果发现, 成形态 SLM Inconel 718 合金呈弱 $\langle 001 \rangle // BD$ 织构, 沿堆积方向呈外延生长的柱状晶, 晶间分布着细小的杂晶, 组织和力学性能各向异性, 拉伸强度由高至低排序分别为 $45^\circ > 90^\circ > H > 0^\circ$, 延伸率变化则相反。拉伸过程中工艺缺陷和熔池边界处析出的 Laves 相易形成微裂纹并引起断裂。塑性变形早期, 晶粒的变形主要以位错滑移为主, 而在塑性变形中后期, 硬取向晶粒增多, 主要以晶粒转动来协调变形。计算表明引起不同取向强韧性差异的主要原因是位错强化和晶界强化。

C11-44

高强韧含氧双相钛合金及其强韧化机理研究

付雨^{*1}, 王辉^{1,2}, 彭华备¹, 文玉华¹, 肖文龙³, 赵新青³, 马朝利³

1. 四川大学
2. 中国核动力研究设计院
3. 北京航空航天大学

作为有害杂质元素, 少量间隙氧添加即可大幅降低钛合金的塑性, 甚至使合金变脆。本研究通过合金成分设计和微观组织构筑, 成功制备了含 0.66% (质量分数) 间隙氧元素的 Ti-Nb-Fe-O 细晶等轴双相钛合金。0.66% 间隙氧添加大幅提高合金的屈服强度至 1390 MPa, 屈服强度提高 644 MPa, 但仅轻微降低塑性。利用 XRD、EBSD 和 TEM 系统研究了间隙氧添加对合金的微观组织和强韧化机理的影响。氧元素添加的有益作用为: 间隙氧导致的晶格畸变与位错交互作用大幅提高位错滑移临界应力, 从而大幅提高屈服强度, 即间隙固溶强化; 强的 α 基面织构和间隙氧均促进 $\langle c+a \rangle$ 位错滑移, 从而提高了 α 与 β 相间的协调塑性变形能力, 赋予合金良好的塑性。结果表明, 通过合金成分和微观组织设计, 可在利用氧元素大幅提高钛合金强度的同时, 避免其导致的脆化现象, 进而充分利用氧元素的间隙固溶强化制备高强韧钛合金。

C11-45

基于分子动力学模拟的准三维 Ni 样品在单轴拉伸过程中位错滑移诱导的晶格旋转

张祥*

同济大学

晶格旋转机制在纳米晶金属的塑性变形和微观结构演化中起着重要作用。它有助于晶粒生长和多晶结构的形成。本文采用分子动力学模拟方法研究了准三维 Ni 样品在单轴张力下的晶格旋转。为此，建立了双晶和多晶模型，并进行了系统的分子动力学模拟来模拟单轴拉伸试验。基于 Schmid 剪切滑移理论，建立了不同滑移体系的 Schmid 因子与晶粒取向角之间的关系。研究发现，滑移系统的起始角与晶粒的初始取向角是一个固定的角。此外，还对颗粒滑移系统的累积旋转和滑移系统的初始角度进行了统计分析。结果表明，滑移体系的偏转角越大，晶格旋转也越大。

C11-46**利用 LST-RA 制备梯度等轴晶的强韧化新策略研究**

胡朝丹, 柴林江*

重庆理工大学材料科学与工程学院

梯度结构金属和合金因具有卓越的强-延协同作用、高抗疲劳、耐磨损和耐腐蚀性能而在近年来备受关注。但在以往研究中，通过局部不均匀变形使材料从表层至心部晶粒尺寸呈梯度变化的结构局限于铜和钢等立方结构金属，而难以将其推广应用到密排六方金属。本研究应用一种新型梯度等轴晶加工策略（激光表面处理-轧制退火复合工艺(LST-RA)）在 Zr702 板材中成功获得了稳定的梯度等轴晶结构，并有效提升了材料的力学性能。重点利用基于场发射枪扫描电镜(FEG-SEM)的电子通道衬度(ECC)成像和电子背散射衍射(EBSD)技术分别对激光表面处理(LST)、50%轧制(Roll)和退火(Anneal)（550 °C 保温 10-600 min）后样品表层和心部区域的微观组织和织构进行细致表征，探究 LST-RA 工艺获得稳定梯度等轴晶的组织演变过程和再结晶机理。结果表明，经 LST 处理后，Zr702 板材表层因 $\beta \rightarrow \alpha$ 相变产生高密度的大角度晶界(HABs)，通过轧制变形累计大量应变和位错，在随后的退火过程中使表层较心部区域产生更多的再结晶晶核，最终形成表层细晶而心部粗晶的梯度等轴晶结构。性能测试结果显示，相较于常规轧制退火样品（对照组），经 LST-RA 加工样品的强度和硬度均获得明显提升，且塑性相差不大，说明该加工策略具备提升材料强塑性的能力。最后，基于微观组织特征，对不同样品区域的强度和硬度差异进行分析和讨论，建立了梯度结构与性能之间的联系，为获得具有优异强塑性协同能力的铝合金和其它金属材料提供了重要参考。

C11-47**挤压温度对 Mg-7Gd-3Y-1Zn-0.5Zr 合金组织与力学性能的影响**

李一伟*

北京有色金属研究总院

采用光学显微镜(OM)，扫描电子显微镜(SEM)、电子背散射衍射(EBSD)、透射电子电镜(TEM)和 SANS 万能试验机，分析了挤压态 Mg-7Gd-3Y-1Zn-0.5Zr 合金微观组织与力学性能，旨在探索挤压温度(460°C和 520°C)对于合金性能影响的微观机制。结果表明：相较于 520°C，在 460°C 保温 1.5h 后合金基体中会产生大量基面层错结构(SFs)，经过挤压变形后，动态再结晶比例和织构强度增加。未动态再结晶区为纤维织构，而动态再结晶区出现 $\langle 0001 \rangle$ Mg 平行于挤压方向的异常织构。合金表现出强度和塑性的良好平衡组合，抗拉强度、屈服强度和延伸率分别为 365 MPa、276 MPa 和 14%。综合力学性能的提升主要归因于晶粒细化、SFs 结构、织构和位错共同作用的结果，并定量计算了合金中各强化机制对屈服强度的贡献。经过 T5 时效处理后，合金析出高密度 β' 相，抗拉强度进一步提升，延伸率略有下降。

C11-48**低密度难熔高熵合金的固溶强化行为**

操振华*, 胡瑶瑶, 汪晓天

南京工业大学

高熵合金复杂化学成分使其具有强晶格畸变效应，展现出高强度、高塑性等优异的力学特性。本工作

中，我们设计并制备了一系列具有单相 BCC 结构的 TiZrVNb 难熔高熵合金，通过改变 Zr 元素含量调节合金晶格畸变。结果表明，随着 Zr 含量的增加，高熵合金的屈服强度从 680 MPa 增加到 998 MPa，当 Zr 含量达到 15 at.% 时，合金强度与塑性达到最优组合，屈服强度为 918 MPa，延展性达到 16%。通过计算单位原子尺寸差引起的固溶强度变化确定合金的固溶强化能力，随着原子尺寸差的增加固溶强化显著提高，严重晶格畸变引起强固溶强化是高强度与高塑性的内禀原因。

C11-49

纳米结构 Cu 薄膜力学性能与热稳定性的合金化调控

张金钰*

西安交通大学

Manipulating coherent twin boundaries (CTBs) opens an avenue to design strong nanostructured materials. However, below a critical TB spacing, these inherently defective CTBs decorated with kink-like steps (abbreviated by kinks) and intersected with grain boundaries (GBs) will suffer from the thermal/mechanical instability, leading to the degradation of material properties. Here, utilizing Cr-segregation at kinks and GBs via a minor (1 at.%) Cr-doping, we report the nanocrystalline-nanotwinned (NNT) Cu-Cr alloy manifests continuous strengthening reaching 1.2 GPa at extremely fine TB spacing of ~ 2 nm, associated with excellent structural-mechanical stability after high-temperature ($0.5T_m$ of Cu) annealing. The underlying mechanism mainly originates from the highly stabilized defective CTBs controlled by Cr-segregation at kinks and TB-GB junctions, which facilitates the plastic deformation mode transition: from detwinning dislocation nucleation to stacking faults (SFs) accumulation for ultrahigh strength. Under elevated temperature, the stabilized TBs inhibit GB motion and therefore result in enhanced thermal stability of NNT Cu-Cr alloys, which is quantitatively explained via a modified Zener pinning model. Our findings not only deepen the understanding of deformation mechanisms in nanotwinned metals, but also provide a new perspective to design plainified Cu alloys with high performances.

C11-50

难熔元素合金化提升 CoNi 基多主元合金力学性能

鲁凯举*, 黄涛, 梁秀兵

军事科学院国防科技创新研究院

In the past two decades, multi-principal element alloys (MPEAs) (also called medium/high-entropy alloys) have been gaining increasing interest. The most investigated face-centered cubic (FCC) single-phase MPEAs are the CoNi-based MPEAs (such as CoCrNi, CoNiV and CoCrFeMnNi alloys) due to their excellent ductility, fatigue and fracture toughness. However, FCC single-phase MPEAs often suffer from insufficient strength, which limits their wide applications. Here a CoNi-based FCC MPEA (Co₄₄Ni₄₄Mo₉W₃, at. %) was designed by alloying with refractory Mo and W. The Co₄₄Ni₄₄Mo₉W₃ alloy possesses an ultrahigh yield strength of ~ 1050 MPa and good ductility of $\sim 30\%$ at ambient temperature. The excellent mechanical properties were correlated to its superior lattice friction stress and grain boundary strengthening compared to most reported FCC MPEAs and conventional alloys. By density functional theory calculations, such extraordinary mechanical properties were further attributed to its high lattice distortion, low intrinsic stacking fault energy and high unstable stacking fault energy due to the addition of Mo and W. Transmission electron microscopy investigations revealed that the high ductility arises from the synergistic effect of planar slip bands, stacking faults and deformation nano-twins.

C11-51

面心立方金属孪晶界调控塑性与断裂的微观机制

祝祺^{1,2}, 周昊飞³, 王江伟², 高华健^{*1,4}

1. 新加坡南洋理工大学机械与宇航工程学院

2. 浙江大学材料科学与工程学院
3. 浙江大学航空航天学院
4. 清华大学力学与工程交叉研究院

低层错能面心立方金属中丰富的孪晶结构对于材料的强韧化具有重要意义。相比于传统纳米孪晶强化理论，多级孪晶结构的构建及其对材料形变的影响仍缺乏系统的机理研究。结合原位 TEM 微纳力学测试、分子动力学模拟和理论计算，本文揭示了一种共格孪晶界调控低层错能面心立方金属塑性变形与断裂行为的微观机制。塑性变形过程中，共格孪晶界上的原子尺度台阶通过激活二次甚至高阶纳米孪晶的形核与长大，释放局部应力集中；该形核机制表现出明显的台阶尺寸依赖性。断裂过程中，二次纳米孪晶可有效阻碍裂纹扩展，并通过二次孪晶界滑移与子裂纹形核的耦合机制将沿位错滑移面快速扩展的主裂纹转变为连续锯齿状扩展，有效提升材料的断裂抗力。上述发现揭示了孪晶界协调塑性变形和断裂行为的微观机制，完善了变形孪晶与材料断裂韧性之间的构效关系，为面心立方金属的强韧化提供了新视角。

C11-52

超强韧钛合金的间隙溶质梯度设计

张航，张金钰*
西安交通大学

钛 (Ti) 合金作为重要的轻质结构材料，其高比强度和优异的机械性能主要来源于调控晶界 (GBs) 和相界 (PBs) 的数量或排列。与典型的等轴、双态、片层或网篮组织的双相 Ti 合金相比，具有微米尺度的等轴初生 α 颗粒 (α_p)、亚微米尺度的 α 板条 (α_{BM})、纳米尺度的次生 α 片层 (α_s) 和残余 β 基体的三态组织通常表现出低的屈服强度和良好的塑性。因此，我们提出一种间隙溶质梯度设计策略在三态组织中实现高强度与大塑性的良好匹配。间隙溶质共掺杂不仅可以实现逐步可控的 α 相析出次序，而且可以在软的 β 转变组织 (β_{trans}) 中形成 α_s/α_s 共格孪晶界 (CTBs)，从而促进位错传递，缓解应力集中，延缓微裂纹萌生；此外，梯度间隙溶质还能强化 α 相，并促进多形态 α 相之间的共同变形，使合金具有良好的塑性。该策略可以应用到现有的工业路线，甚至适用于设计其他高性能结构材料。

C11-53

Si 添加对 Fe-Co-Ni-Cr-Al 高熵合金异质结构组织和力学性能的影响

李维，张建宝，王海丰*
西北工业大学

高熵合金由于其优良的机械性能和其他功能特性，作为一种新型结构材料正受到人们的广泛关注。本研究设计并制备了两种 Fe-Co-Ni-Cr-Al 基多主元合金，揭示了少量 Si 元素添加对于 FeCoCrNiAl 双相合金塑性机制、沉淀强化和相稳定性的影响。随着 Si 元素的添加，面心立方 (FCC) 相的体积分数降低，异质晶粒尺寸从 FCC/BCC 双相等轴晶粒变为 FCC/BCC 纳米沉淀和超细晶。在 298K 进行单轴拉伸实验，结果表明，合金的强度随 Si 含量的增加而增加 (298K 下屈服强度从 672.46 MPa 增加到了 997.34 MPa，极限抗拉强度从 1163.16 MPa 到 1488.35 MPa)。研究发现，Si 替代 Ni 增加了原子尺寸差异和晶格畸变程度，促进了合金中 FCC 向 BCC 的相转变，并且促进拉伸过程中的转变速率，改变了相稳定性。此外，Si 的引入同时降低了合金的层错能，抑制了动态回复，使得合金中累计了大量位错无法在热处理阶段完全消失，并在拉伸过程中进一步大量繁殖。Si 的添加降低层错能 (SFE) 和大面积纳米沉淀的溶质钉扎作用使得多主元合金具有优异的强塑性匹配性能。

墙报

C11-P01

基于热激活微结构演化和强化机制的可计算力学本构建模方法

雷明雨, 温斌*

燕山大学

材料力学本构关系可综合定量反映材料微结构与力学性能的关联, 也是材料强度、韧性及材料损伤与破坏预测的基础。因此, 开发不依赖于任何经验参数的机械本构模型对于实现机械材料的设计和优化已知材料的机械性能至关重要。常用于描述多晶金属材料力学本构关系可分为宏观本构关系和晶体塑性本构关系两类。宏观本构关系以一般的数学列式来表征、解释和预测材料的宏观力学性能。根据其数学列式是否考虑变形的物理机制, 又可以将其分为传统唯象本构关系和物理型本构关系两类。传统唯象本构关系, 尽管形式简单、应用较方便, 但由于没有考虑变形物理机制, 致使其无法准确描述材料塑性变形与微结构演化的关系。因此, 传统唯象本构关系适用范围受到很大的限制。另一类是基于物理机制的本构关系, 在构建时考虑了热变形的内在物理机理, 能描述加工硬化和温升软化效应等, 在一定程度上反映了材料宏观力学性能与微结构演化的关系。然而由于数学列式本身的局限性, 很难对复杂微结构时空演化进行统一描述。此外, 宏观本构关系的数学列式中往往含有多个难以通过实验准确标定的待定系数, 使其应用受到很大的限制。晶体塑性本构关系是基于晶体材料塑性变形的微观机制, 通过对微观塑性机理进行数值化描述而构建的力学本构关系。多晶材料晶体塑性本构关系构建包括两个基本步骤: 第一步是单晶体塑性本构关系的构建, 基于单晶体的塑性变形机制, 引入滑移/孪生的动力学描述, 考虑位错与障碍及位错间相互作用, 结合硬化准则和流动法则, 获得位错滑移所需临界分切应力, 即可构建单晶体的晶体塑性本构关系; 第二步为多晶体均匀化方法, 通过 Sachs 模型、Taylor 模型、自洽模型和晶体塑性有限单元模型等均匀化规则, 对多晶材料中不同取向单晶体进行统计平均, 从而建立多晶材料的晶体塑性本构关系。这种基于位错滑移机制的模型, 可对复杂微结构时空演化进行描述。但由于位错长程应力场的存在, 同时考虑到晶粒尺寸和计算能力, 周期边界条件的第一性原理计算已不再适用于含位错体系的模拟。因此, 位错芯结构、位错芯能量、位错滑移模式和临界分切应力等物性很难通过计算获得。而宏观实验测量又很难独立区分不同微观变形机制的贡献, 所以利用宏观实验结果标定参数存在较大的困难, 使其适用范围受限。针对上述问题, 本文提出了一个可计算参数力学本构关系构建方法。通过分析位错与晶体缺陷的相互作用, 基于格林函数边界条件的位错结构计算和位错滑移的热激活模型, 对多晶材料的应变硬化、动态回复和再结晶行为进行了数学物理建模, 该模型中所有参数均可通过计算获得。与以前基于经验观察或数据拟合的模型相比, 我们开发的模型利用具有物理起源和意义的计算参数来模拟金属材料在各种外部/内部条件下的机械行为。这是我们的计算力学本构建模方法具有普适性的根本原因。本构关系明确考虑了塑性状态下微观结构演化过程中基于物理的相互作用机制, 并用实际物理意义取代了经典模型的经验参数。通过整合位错理论和热激活模型, 我们将位错的运动视为机械效应和热效应的组合, 并重建了力和激活能之间的关系。最终, 我们在不依赖传统实验和经验方程的情况下, 建立了金属变形的微观结构演化与相应强化机制之间的数学关系。利用该可计算参数力学本构关系, 对 Cu、Al-Mg 固溶强化合金和 Cu-W 合金的应力-应变关系进行了计算, 其计算结果与实验结果非常吻合, 证明了该模型的有效性。

C11-P02

原位生成陶瓷颗粒增强 FeCrB 合金热疲劳性能

韩富年, 王奎*

上海交通大学材料科学与工程学院

本研究通过引入原位生成陶瓷颗粒的方式显著提高了 FeCrB 合金的热疲劳性能, 并通过多种表征技术系统地研究了原位陶瓷颗粒提高合金热疲劳性能的机理。结果表明, 在 500 次热循环实验中, 含有陶瓷颗粒 FeCrB 合金的热疲劳性能为普通 FeCrB 合金和 QT150 铸铁的 3.1 倍和 5.4 倍。原位微米及纳米 TiB₂ 和

TiC 陶瓷颗粒的引入通过细化 FeCrB 合金微观组织、提高力学及抗氧化性能和减少应力集中的机制提高了 FeCrB 合金的热疲劳性能。

C11-P03

声子风与速度相关的位错阻力

李彦贤*

燕山大学

在材料科学中，固体金属动态响应中的一个基本问题是高应力和应变下对位错阻力系数贡献的机制：可动位错（金属晶体结构中的线缺陷）由于与晶体结构的相互作用而受到阻力，对于理解材料强度是一个重要因素。在高应力状态下，应力水平变得足够高，很容易克服最高势垒，位错阻力变得粘性，应力-速度依赖性发生显著变化，典型的位错速度在横向声速的几个百分之几内，对位错阻力系数（在德拜温度附近和温度以上）的主要贡献是声子散射的耗散效应。目前，这种效应还没有一个很好的理论解释，我们考虑晶体和滑移平面的几何形状来强调晶体各向异性对位错阻力的影响，建立了一种声子风引起的速度依赖的位错阻力模型。

C11-P04

纳米析出相和应力诱导孪晶协同强化 Cu-20Ni-20Mn 合金

游远琪，金奎，李才巨*

昆明理工大学

Cu-20Ni-20Mn 合金以其环保、无毒性 and 超高强度弹性特性成为精密电子元件制造的理想材料。由于不连续 NiMn 相析出导致晶界脆化，降低了塑性和成型性能。在本研究中，通过添加 Nb 元素，形成了 Ni₃Nb 相来细化晶粒，阻止了不连续的 NiMn 相析出，有效提升了合金的屈服强度。添加的 Nb 不仅促进了固溶和沉淀强化，还改善了合金的整体力学性能。在 80% 冷变形后，合金的屈服强度超过 900 MPa，表明冷变形显著提高了合金的位错密度和强度。同时，该合金在未进行时效处理前，主要通过细晶强化和固溶强化达到强化效果。通过优化时效处理参数（400℃ 时效 12 小时），研究成功获得了 Cu-20Ni-20Mn-0.4Nb 合金的最佳强塑性匹配，强度达到 1624 MPa，延伸率为 7.3%。这项成就得益于纳米级共格 NiMn 相的弥散强化作用及变形孪晶的增韧。此外，通过 TEM 分析明确了 NiMn 相的取向关系，进一步阐明了合金的强化机制。

C11-P05

不同析出相强化的 AlMgScZr 合金的流动应力和加工硬化行为研究

陈翔*

上海交通大学特种材料研究所

作为材料力学行为的两个重要组成成分，流动应力和加工硬化行为受到了研究者们广泛的关注，并且通过位错理论对纯金属的流动应力和加工硬化行为进行了较为深入的解释。然而析出相的引入不可避免地会影响材料的流动应力和加工硬化率，这主要是因为析出相会明显地改变位错行为，包括但不限于位错的滑移和储存机制。因此，不同的析出相-位错的相互作用模式（即剪切机制和绕过机制）会导致不同的位错行为，从而产生不同的流动应力和加工硬化行为。在本研究中，我们通过实验对位错模型进行修订，研究了可剪切析出相、不可剪切析出相和可剪切/不可剪切混合析出相对 AlMgScZr 合金流动应力和加工硬化行为的影响。本研究通过对铸态 AlMgScZr 合金进行不同温度和时间的热处理，从而得到含有不同析出相（可剪切、不可剪切及混合）的 AlMgScZr 样品，对其流动应力曲线和加工硬化曲线从位错角度进行深入分析，优化了传统析出相强化模型在可剪切/不可剪切混合析出相的情况下的适配度，并在基于位错的 Kocks-Mecking 和 Kocks-Mecking-Estrin 本构模型的基础上进行修订使其适配多种析出相类型，并对其位错

行为进行深入讨论。

C11-P06

具有超高温强度的碳化物增强共晶 Nb 合金

魏琴琴, 沈强, 罗国强*

武汉理工大学

Nb合金在航空航天技术中有着广泛的应用。传统的Nb合金存在高温强度不足或室温塑性有限的问题。我们借鉴多主合金和碳化物共晶合金的设计概念, 通过引入难熔合金元素和碳化物, 开发了新型Nb₂Mo_{0.5}W_{0.5}C_x共晶Nb合金。合金含有体心立方(BCC)固溶体和碳化物相组成的共晶结构, 相界面具有强键合半相干关系。通过优化成分, 由BCC和Nb₂C组成的Nb₂Mo_{0.5}W_{0.5}C_{0.25}Nb合金表现出高强高塑的特性, 室温屈服强度为1.27GPa、断裂应变为17.8%, 1200℃高温屈服强度为0.7GPa。多主元固溶强化和碳化物相强化共同提高强度, 层状金属相对微裂纹尖端有钝化作用, 有效缓解了室温脆性。这一策略为设计新型高温材料提供了理论借鉴, 可以克服共晶合金的低熔点限制和传统高温合金中扩散主导的软化现象。

C11-P07

增材制造铝锰合金的力学性能与强韧化机理研究

李丹, 宋淼, 陈超*

中南大学

增材制造铝合金由于轻量化、复杂构件定制化以及材料利用率高等优势, 在航空、航天、汽车等领域具有广阔应用前景。随着增材制造技术的发展, 对新型铝合金性能提出更高的要求。本研究利用增材制造中特殊温度梯度构建双峰结构, 并通过引入纳米级共格沉淀相构建了强塑性协同的Al-Mn-Fe-Sc-Zr合金。利用激光粉末床熔融技术(L-PBF), 获得由熔池内部粗晶层以及相邻两个熔池边界的超细晶层共同构成的粗细晶交替的双峰结构。Al-Mn合金的主要强化相为共晶相-Al₆Mn, 高含量的Sc和Zr元素在打印态合金中引入了初生Al₃(Sc, Zr)颗粒以及过饱和Sc和Zr固溶体, 其中初生Al₃(Sc, Zr)颗粒有助于稳定超细晶的晶界。峰值时效处理在打印态合金中引入高密度纳米级共格Al₃(Sc, Zr)相。Fe元素的添加增加了共晶相的体积分数, 促进共晶相的弥散析出, 并导致L-PBF Al-Mn-Fe-Sc-Zr合金的极限抗拉强度达到529MPa, 伸长率为15%。

仅发表论文

C11-PO01

热过程对四代核用电寿命铁镍基高温合金组织和强韧化机制的影响

王佳祺^{1,2}, 秦学智⁴, 赵志鹏⁵, 伍金荣^{1,2}, 吴云胜^{1,3}, 管现军^{1,3}, 周兰章^{*1,3}

1. 中国科学院金属研究所 师昌绪先进材料创新中心
2. 中国科学技术大学 材料科学与工程学院
3. 中国科学院金属研究所 中国科学院核用材料与安全评价重点实验室
4. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 中国科学院海洋关键材料重点实验室
5. 东北大学 材料科学与工程学院

快堆金属材料面临着液态金属腐蚀-中子辐照-摩擦磨损强耦合损伤, 通常需在构件表面制备抗磨蚀的特种防护涂层, 以保障其在堆内高可靠和长寿命服役。然而, 涂层处理时的苛刻热过程会导致合金的组织性能发生严重退化, 折损构件服役寿命, 具体影响机理目前尚不明确。因此掌握合金在涂层制备热过程中的组织演变规律, 揭示其对力学性能退化的作用机制具有重要意义, 能够为快堆构件的实际生产过程工

艺流程优化和安全服役提供理论基础。本工作以自主研发的快堆用铁镍基高温合金 GH1059 为研究对象，模拟涂层制备时的两阶段高温长时热过程，对合金进行相应热处理，采用炉冷或空冷方式冷却，对比研究热处理前后显微组织的变化，并进行室温冲击和 750 °C 拉伸实验。结果表明，热过程对合金的晶粒特征产生双重影响，既有导致晶粒尺寸增加，呈现“混晶”组织的不利影响，又有提高低 Σ CSL 晶界比例，稳定高温性能的有利影响。冷却方式也是决定合金性能变化的关键因素，炉冷会促进晶界连续棒状 M23C6 型碳化物析出和晶内球状 MC 型碳化物溶解后的再析出，而空冷时并不会发生相析出行为。晶粒特征和晶界形貌显著影响室温冲击韧性，炉冷热过程导致的“混晶”组织和晶界连续碳化物，降低晶界结合强度，减小协调变形能力，是冲击韧性降低的直接因素；空冷会避免晶界形貌改变，一定程度抑制性能劣化。热过程显著降低 750 °C 拉伸强度，而冷却方式对其无明显影响，根据强度计算结果，晶粒尺寸减小和晶界碳化物析出带来的弱化作用远大于低 Σ CSL 晶界比例升高和晶内球状 MC 析出产生的强化作用，最终导致强度下降，延伸率变化较小。综合上述研究结果，提出堆内构件进行涂层处理时的工艺流程若能够降低温度或采用更快的冷却速度会有效抑制合金性能的退化，已用于指导快堆用铁镍基合金实现高强韧与耐磨蚀一体化控制技术的发展。