

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

D03-非晶与高熵合金
D03-Amorphous and High-Entropy
Alloys

Organized by

Chinese Materials Research Society

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

D03. 非晶与高熵合金

分会主席：姚可夫、张勇、沈宝龙、乔珺威、王成勇

D03-001

双相 FCC + BCC 异质结构 FeCrNiV_x 中熵合金

桑鹏、梁宁宁、顾雷、张赞、李永胜*

南京理工大学

单相面心立方(FCC)晶体结构中熵合金(MEAs)具有良好的延展性,但强度不足制约了其工程应用。本文设计并制备了非均相 FCC 和体心立方(BCC)双相 FeCrNiV_x MEAs ($x = 0, 0.1, 0.2$ 和 0.3 , 摩尔分数),以提高其力学性能。BCC 相是 FCC 相中通过加入 V 元素固溶形成的。FeCrNiV_{0.3} MEA (V3)的屈服强度($\sigma_{0.2}$)和极限抗拉强度(σ_{UTS})分别达到 357 MPa 和 855 MPa,相比于 FeCrNi MEA (V0)分别提高了 113.77% 和 94.32%。同时,应变硬化能力($\sigma_{UTS}-\sigma_{0.2}$)由 283 MPa 提高到 498 MPa,塑性仍保持在 19.5%。这种强度-塑性协同作用是由于第二相和异质变形诱导强化(HDI)的协同作用,软 FCC 基体相和硬 BCC 相组成的双相异质结构提供了大量的相界(PBs),阻碍了位错滑移,增加了位错密度,促进了应变硬化。研究结果为提高材料力学性能的非晶结构 MEA 的设计提供了新的思路。

D03-002

金属材料强度首次超过 E/10 —非晶合金的脉冲激光冲击实验

朱文清^{1,2}、李智³、舒桦⁴、高华健⁵、韦小丁^{*1}

1. 北京大学,工学院,力学与工程科学系
2. 香港城市大学,工学院,机械工程系
3. 新加坡科技研究局,高性能计算研究院
4. 中国工程物理研究院,上海激光等离子体研究所
5. 清华大学,航空航天学院,工程力学系

追求材料的理论极限强度是材料科学领域的长期目标。从首次测量单层石墨烯的本征强度以来,碳纳米管、金刚石和硅等一系列准脆性材料陆续被实验证实其拉伸强度可以达到理论极限。然而,对于传统金属材料而言,由于其内部位错等缺陷的形核和运动,材料的强度远低于理论极限。本工作通过开展纳秒激光脉冲诱导的超高应变率($> 10^7 \text{ s}^{-1}$)加载实验,发现非晶合金在该极端条件下的层裂拉伸强度高达 11.5 GPa,约为杨氏模量 E 的 1/6。通过一系列的电镜表征和大规模分子动力学模拟,发现非晶合金在超高应变率下的断裂机制为孔洞形核长大,并非准静态加载下常见的剪切带失稳扩展。本工作提出的孔洞动力学模型成功解释了非晶合金强度的应变率效应。此外,通过考虑纳米尺度非均匀性及原子流动重排,作者进一步提出了力-化-热耦合的连续介质力学模型,成功描述了非晶合金的跨时间尺度断裂行为,准确模拟了非晶合金在不同应变率下的孔洞演化过程。上述成果对于理解极端应变率下非晶合金的力学行为有重要参考意义,为非晶合金及其复合材料在极端条件下的工程应用提供了启示。

D03-003

动态加载下非晶合金的损伤演化及非近邻相互作用

唐晓畅*

华南理工大学

非晶合金是基于现代冶金技术和熵调控理念,通过抑制合金熔体结晶以保持液体无序结构的一类新型金属材料。良好的综合性能使其在国防军事、航空航天、轨道交通等战略核心领域都具有广阔的应用前景。这些领域常要求结构装备能够承受连续冲击载荷,因此材料在复杂载荷作用下的动态力学响应和损伤演化过程是研究者关注的首要问题。

非晶合金在极端加载条件下具有独特的损伤演化机制，冲击速度提升会诱导层裂面形貌上的自发性“韧脆转变”，表明非晶合金在复杂应力状态下具有特殊的塑性流动机制。通过开展系统的动态加载实验，我们指出了已有研究物理图像存在的根本问题，并创造性地提出了一种细观缺陷统计分析方法。通过明确提出初始成核源和后续成核源的新概念，揭示了杯锥结构在动态失效研究中的潜在价值，为损伤成核领域开辟了新的研究方向。通过定量统计层裂断口上“杯锥结构”形貌的间距演化规律，我们提出了一套更为合理自洽的机制阐述，指出“韧脆转变”并非来源于成核密度过大引起的应力场相互干扰，而是源于非晶体系典型的应变软化行为。同时，我们发现冲击速度提升带来的初始成核源密度增大和层裂强度提高主要是由应变率控制的，两者存在相关性但并不强耦合。

进一步研究中，我们通过联合自由体积理论和微细观层裂损伤演化理论，引入材料软化对损伤演化的加速效果，构建了一套用于描述非晶合金动态拉伸断裂的跨尺度本构模型。该层裂模型综合考虑了复杂应力状态和动态损伤演化，可在微细观损伤分布和宏观动态力学响应两方面重现“韧脆转变”行为。这一理论框架所运用的耦合材料塑性变形理论和孔洞扩展理论的方法，同样适用于其它材料模型。

最近，针对平均场理论在描述塑性事件相互作用方面的局限性，我们提出了一个在有限元框架内、考虑材料非近邻效应的通用方法。通过引入中长程关联机制，可为塑性事件演化注入竞争性，使材料系统具备自组织临界性。对于非晶体系，这一模型可在连续力学框架内模拟微观剪切转变区运动，并实现三维复杂应力状态下剪切带的自组织演化，为中长程范围的结构演化-性能关联提供一些新认识。同时，该机制是一种实现单元物理量交互的普适性方法，可适用于大部分平均场模型，并不局限于非晶合金本身。对于晶态金属，可用于考虑化学短程序对晶格畸变的影响。对于聚合物，可将局部力学行为与交联、键断裂或者分子滑移等过程关联。对于混凝土等复合材料，可将界面过渡区与骨料分布或强度分布相互关联，从而描述混凝土在非均匀构型下的动态特征。

D03-004

非晶合金的结构不均匀性调控与性能优化

朱凡^{*1}、严珍珍¹、王国行¹、叶杰宇¹、温文馨¹、陈明伟²

1. 复旦大学

2. Department of Materials Science and Engineering, Johns Hopkins University

非晶合金的空间非均匀性与 β 弛豫行为、动力学脆度（fragility）、力学行为以及热力学稳定性等宏观性能存在紧密的关联。上述研究表明，空间非均匀性可作为非晶合金的微观组织，可通过调控其微观结构从而优化性能。报告人围绕这一思路，通过高压淬火、球磨处理等一系列的处理方法调控了非晶合金的空间非均匀性，研究了空间非均匀性不同的几何特征的变化对性能的影响，发展了优化非晶合金性能的方法。本研究表明，空间非均匀性的特征关联长度可作为非晶合金性能的关键性指标，通过调控微观结构以优化性能，可成为开发新型高性能块体非晶合金的新途径。

D03-005

基于团簇加连接原子模型的高熵型不锈钢成分规律探索

张爽^{*}、董闯、邹存磊、赵亚军

大连交通大学

本报告针对不锈钢的成分特征，通过引入“团簇加连接原子”模型，指出其高熵合金化特征，并给出基于近程序结构的高熵合金定义。通过全面分析现有不锈钢的成分特征及化学近程序结构，澄清不锈钢成分配方的根源，给出典型不锈钢的类似于分子式的化学成分式。首先，介绍固溶体中的化学近程序结构模型，即“团簇加连接原子”模型，把近程序描述成第一近邻配位多面体（这里简称团簇）以及位于团簇之间的连接原子，看似复杂的合金成分可表述为简单的成分式：[团簇](连接原子)。我们从理论上证实，这种描述方式给出了类似于分子的结构单元，满足特定结构单元的成分式实现了溶质的均匀分布。各种不锈钢虽然成分各异，均满足特定原子个数的团簇加连接原子成分式。我们把典型工业不锈钢的成分均做了解析，指出

它们只是数种团簇加连接原子成分式的体现，在团簇成分式的框架下，通过控制当量，能实现钢的组织设计。尤其重要的是，我们发现，奥氏体不锈钢实质上就是高熵型不锈钢，按照“团簇加连接原子”模型，这类不锈钢的特点在于第一近邻由多种主组元构成，例如 304 不锈钢的成分式可表述为 $[(\text{Ni}, \text{Mn})\text{-Fe}_{11.5}(\text{Ni}, \text{Mn})_{0.5}](\text{Cr}, \text{Si})_{3.0\sim 3.5}$ ；而普通铁素体不锈钢的第一近邻仅由 Fe 构成，例如 1Cr13 不锈钢的成分式可表述为 $[\text{Cr-Fe}_{14}]\text{Cr}_1$ 。

D03-006

(MoNbTa_xZrTi)_{Aly} 难熔高熵合金成分设计及热机械处理

董福宇*、申向阳、郭子鹤、关金源、刘峰、张悦、袁晓光

沈阳工业大学

BCC 结构的难熔高熵合金具有高强度、高硬度和优异的高温性能，受到了广泛的关注。然而有限的室温塑形限制了其应用进程。本工作选取电弧熔炼技术制备的 Al-Ti-Zr-Ta-Nb-Mo 高熵合金体系作为研究对象，采取减少 Ta 和添加 Al 含量的策略来实现其强塑性匹配，并探讨了高温变形对微观组织的影响。研究表明：（1）TiZrTa_xNbMo 难熔高熵合金由双相(BCC1+BCC2)组成，呈现典型的枝晶结构。随着 Ta 含量的减少，BCC1 相含量逐渐降低，枝晶臂由连续的细等轴状转变为不连续的不规则球状，而合金的室温屈服强度虽然略有下降，但室温塑性却大幅提高。TiZrTa0.7NbMo 合金的塑性最高，为 34.8%，然而屈服强度依然能保持在 1276MPa。固溶强化模型表明计算值与实验值保持高度一致性。（2）在 TiZrTa0.7NbMo 合金基础上，加入不同含量的 Al 元素后，(MoNbTa0.7ZrTi)_{Aly} 合金中有 AlZr₃ 析出相产生，元素微观偏析程度加深。随着 Al 含量的升高，室温屈服强度提高，而塑性应变降低。力学模型表明合金的高屈服强度主要来源于固溶强化与析出强化。此外，(MoNbTa0.7ZrTi)_{Aly} 合金在高温下不易发生软化，在 1000℃ 仍然具有 400~500MPa 的屈服强度。（3）(MoNbTa0.7ZrTi)Al_{0.1} 的高温流变曲线都呈现出先急剧升高后缓慢下降的趋势。低应变速率($5\times 10^{-4}\text{s}^{-1}$, 10^{-3}s^{-1})下的曲线出现了明显的锯齿状结构，这归因于位错的重复锁定及解锁过程。此外，利用 Arrhenius 关系进行了流变应力分析，并得出了本构方程。根据动态材料模型理论，建立了热加工图，选取了最佳热加工工艺参数（变形温度为 1180~1250℃，应变速率为 $5\times 10^{-4}\sim 10^{-2.75}\text{s}^{-1}$ ）。（4）(MoNbTa0.7ZrTi)Al_{0.1} 合金的流变组织呈现典型的项链状结构，表明软化机制为动态再结晶。值得注意的是，随着变形温度的升高，合金的偏析程度减弱，尤其是熔点较低的 Al、Zr、Ti 元素均匀化现象更加明显，这说明热加工可以有效改善合金的元素微观偏析。综上所述，本工作中 (MoNbTa0.7ZrTi)_{Aly} 合金的成功研制及热变形行为能够为高熵合金的机械化热处理及工程化应用提供指导作用。

D03-007

通过超常晶格畸变在高熵金属间化合物中实现高强度和高塑性

杨勇*

香港城市大学机械工程系

由于其缺乏足够的滑移系统和应变硬化机制，传统金属间化合物以其固有的脆性而闻名。然而，我们最近开发的一种单相 B2 高熵金属间化合物（high entropy intermetallic）既具有高强度又具有高塑性。与传统的金属间化合物不同，这种高熵金属间化合物具有高度扭曲的晶格结构和复杂的化学有序性，导致多种滑移系统和高流变应力。最值得注意的是，该合金表现出一种异常的由位错滑移触发的动态硬化机制，使其在广泛的温度范围内保持强度。因此，与传统体心立方和 B2 合金不同，这种高熵金属间化合物避免了急剧的热软化，在同质温度(homologous temperature)下仍能展现广泛的塑性流动。这些发现揭示了一个设计可应用于不同工程实践中高强高韧高熵金属间化合物的新思路。

D03-008

沿应变梯度探索非晶合金均匀流变行为

张浪淳、乔吉超*

西北工业大学

非晶合金因其独特的力学行为和功能特性而受到固体力学、凝聚态物理和材料科学等领域的广泛关注。非晶合金变形行为及其机制是固体力学领域的研究难点和重要课题之一。本研究借助动态力学分析仪(dynamic mechanical analysis, DMA)基于自由体积(free volume, FV)理论探究了非晶合金的高温流变行为,在过渡态理论框架下将非晶合金拓扑结构与应变相关联,探测了多种典型非晶合金非稳态蠕变机制。在玻璃转变温度以下,非晶合金力学响应受次几弛豫过程和构形熵影响,激活体积与激活能随应变增加而准线性增大。达到玻璃转变后,激活体积与激活能保持恒定,与应变无关。这些新发现有助于增进对非晶合金非稳态变形行为的进一步认识。

D03-009**Improved mechanical properties of Al_{0.3}CoCrFeNiTi_{0.15} high entropy alloy by laser powder bed fusion without post-treatment**Yao Lu^{*1}, Xianping Dong^{1,2}, Lanting Zhang^{1,2}, Bingbing Zhao^{1,2}, Kazuhiro Ito³

1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University

2. Shanghai Key Laboratory of Advanced High-temperature Materials and Precision Forming

3. Joining and Welding Research Institute, Osaka University

Additive manufacturing (AM) has garnered great attention owing to its exceptional reliability, flexibility, and accuracy, which enables the fast production of metal parts with complex geometries and outstanding properties. We designed a high entropy alloy (HEA) with the composition Al_{0.3}CoCrFeNiTi_{0.15}, introducing a small amount of Ti to obtain a better balance of strength and ductility. To streamline the actual production process of the Al_{0.3}CoCrFeNiTi_{0.15} workpiece, and steer clear of labor-intensive pressure processing and intricate heat treatment procedures, AM processes can make a great difference. The investigation unveils distinct precipitation formation and strengthening mechanisms. Additionally, we have introduced remelting technology as an alternative to post-treatment to enhance the properties. The mechanical properties of laser power bed fusion (LPBF)-processed Al_{0.3}CoCrFeNiTi_{0.15} HEAs were notably improved. The product (29.7 GPa%) of strength and elongation of LPBF-processed Al_{0.3}CoCrFeNiTi_{0.15} HEAs was nearly doubled at room temperature under the optimum processing parameters compared to the cast alloy (15.9 GPa%). We found that LPBF processing not only refines the grain size but also leads to the absence of the L1₂ phase and a decrease in the B2 phase content. The segregation of Ti and Al elements on the dislocation cellular structure enhances dislocation-solute entanglement and greatly improves the yield strength at room and elevated temperatures. As the remelting process changes the molten pool geometry, grain refining occurs due to rapid cooling and limited space for grain growth, which further improves the mechanical properties. The LPBF-processed alloy without any post-retreatment achieves a tensile strength of 979.6 MPa with an elongation of 30.3 %. The study involves a comprehensive comparison between Al_{0.3}CoCrFeNiTi_{0.15} parts processed via LPBF and other post-treated FCC HEAs, which demonstrates the feasibility of improving the mechanical properties of HEAs via the LPBF process. The potential to directly integrate LPBF-processed parts into production has the capability to substantially decrease costs related to post-processing and significantly shorten the development cycle of the production.

D03-010**应变依赖的非晶合金应力弛豫行为转变及其物理机制**

韦小丁*

北京大学

非指数弛豫在非晶体系中普遍存在,这与非晶体系材料独特的热力学特征密切相关,如玻璃化转变和老化。迄今为止,这种非指数弛豫行为的背后微观机制仍不清楚。非指数弛豫的时间尺度超出了经典分子动力学模拟的时间限制。本工作采用基于 **autonomous basin climbing (ABC)** 方法的长时间分子动力学计算对 **CuZr** 非晶合金长时间应力松弛行为的模拟。同时,我们采用所发展的非晶合金力化耦合连续介质本构对 **CuZr** 非晶合金在大于 100 s 的时间尺度上进行了应力松弛模拟。结合原子尺度和连续介质尺度的模拟,我们证明了非晶合金的应力弛豫行为会随着加载应变的增加发生从压缩弛豫到拉伸弛豫的转变,这与最近在非晶合金上的实验观察一致。应力和塑性应变的时空相关性揭示了非晶合金应力弛豫的两个主要驱动力:热能梯度在压缩弛豫(小应变)下起主导作用,并导致局部内应力的释放;在拉伸弛豫(大应变)下,弛豫由应变能梯度主导,引起长程的结构重排。两种驱动力之间的竞争的发现促进了我们对无序固体老化动力学本质的理解。

D03-011

金属玻璃中纳米尺度粘弹性不均匀结构及其与宏观力学行为的关联性研究

高萌^{*1}、许福²、黎明灿³、霍军涛¹、王军强¹

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所
2. 湘潭大学
3. 新疆大学

金属玻璃作为一种典型的非晶态材料,是由合金熔体通过急速冷却过程得到的。但是,由于原子排列的无序性,而且缺乏精确表征其原子结构的实验手段,目前金属玻璃的原子结构依然是未知的。最近很多科学研究表明,尽管原子结构依然是未知的,但是,在宏观尺度上各向同性的金属玻璃在纳米尺度粘弹性上呈现出非均匀的特征。如何定量地表征这些微纳米尺度的不均匀结构并探究其与宏观力学性能的关联性成为非晶合金领域的热点之一。首先,报告人及其合作者基于可以精确探测微纳米尺度局域区域的力学曲线的静态力学测量仪,定量表征了非晶合金在纳米尺度不均匀结构的粘弹性能,研究了不均匀性结构在退火引起的老化和冷热循环导致的年轻化过程中的演化规律,发现了非晶合金中类液态区和类固态区的含量与能量状态存在密切关系。其次,通过在静态力学测量仪上搭建力学变形平台,原位探测了纳米尺度不均匀结构随外加应变的演化规律,发现当外加应变增加到 2% 时,不均匀结构会发生类似逾渗的转变行为,并形成了带状的剪切带结构。最后,研究不同冷却速率下铁基金属玻璃的纳米尺度粘弹性和剪切带形核动力学的定量信息,发现了铁基金属玻璃纳米尺度结构非均匀性、微尺度剪切带成核动力学与宏观脆韧转变行为之间的多尺度关联性。这些结果将促进人们对非晶合金不均匀结构的全面认识,加深对其变形机理的理解,为非晶合金中微观结构和宏观力学性能本构关系的建立提供重要的实验数据。

D03-012

液态金属快凝过程中径向分布函数第一峰的反常扩展

蒋元祺*

南昌师范学院

热胀冷缩是自然界的常见现象,但在液态金属的快凝过程中,其径向分布函数(RDF)第一峰的位置(r)会随着温度的降低而出现反常的扩展行为,对于造成这一反常现象背后的原因,目前学术界仍有很大争议。报告人以液态金属为例,针对不同冷却速率下液态金属 **Ta** 的非平衡凝固过程,系统研究了径向分布函数第一峰的反常扩展行为。我们的研究表明,随着温度的上升(下降),原子团簇的有序度逐渐降低(升高),中心原子与其处于最近邻区域内的其它原子的平均距离确实逐渐变短(变长),RDF 第一峰的确出现了反常的收缩(扩展)行为。深入分析电子局域函数表明,液态金属 **Ta** 熔融状态下键合长度异常收缩不仅是由局部原子构型的改变引起,更为重要的是在温度逐渐升高(降低)的情况下,最近邻原子之间强烈的电

荷相互作用导致了金属原子之间键长的显著收缩（扩展）。这应该是液态金属在凝固（熔化）过程中出现上述反常物理现象的最根本原因。

D03-013

非晶合金蠕变及循环拉伸行为与结构演化机制

梁淑一、乔吉超*

西北工业大学

微观结构非均匀性作为非晶合金的固有特征之一，是目前非晶合金研究领域热点问题之一。建立非晶合金微观结构非均匀性与力学性能之间的内在联系是研究非晶合金的一大挑战。本研究借助动态力学分析仪(dynamic mechanical analysis, DMA)研究非晶合金蠕变及循环拉伸行为与变形机制。研究表明在临近玻璃转变温度条件下，远低于屈服强度的弹性循环拉伸作用使得非晶合金缺陷浓度在达到稳态前逐渐降低，棘轮应变与平均应力下的蠕变应变演化趋于一致，而蠕变老化引起的结构均匀性增强进一步证实了循环拉伸下微观结构的演化特征。采用修正的原子分级关联蠕变模型，可以阐明时间相关的滞弹性变形分量的微观演化机制。定性地确定变形过程中两种变形机制之间的强度比率，有助于区分 β 弛豫的形式（单峰，肩膀峰，过剩尾），从而揭示不同类型非晶合金的内在特性。通过这种方法，有助于识别非晶合金结构老化和年轻化的状态，揭示不同调控工艺对非晶合金热力学行为和结构演化特征中的作用。

D03-014

基于纳米压痕方法揭示非晶合金微观结构非均匀性和塑性机制

陶凯^{1,6}、李福成^{2,3}、柳延辉^{2,3}、E. Pineda⁴、宋凯凯⁵、乔吉超^{*6}

1. 江苏海洋大学

2. 中国科学院物理研究所

3. 松山湖材料实验室

4. 加泰罗尼亚理工大学

5. 山东大学

6. 西北工业大学

微观结构的非均匀性是理解非晶合金的物理和力学行为的重要因素。为了调控非晶合金的能量状态，玻璃化转变温度以下的结构弛豫和室温冷轧是有效的方法。我们通过纳米压痕技术，表征了典型的 $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ 非晶合金在不同能态下的局部折合模量和硬度，证实了微观结构的非均匀性对调控其力学行为的重要性。借助有限元模拟拟合实验载荷-位移曲线，我们得出了内摩擦系数。研究显示，内摩擦系数随着流动缺陷浓度的增加而降低。在蠕变阶段测得的应力指数对非晶合金的结构状态非常敏感，这可能是由于结构弛豫和回春过程对结构状态的影响。通过统计分析变形过程中的离散位移突进，我们发现位移突进行为对结构能态具有敏感性。在观察到的位移爆发现象中，弛豫态的行为特征明显，而在回春态中则不太明显。通过提供一个物理示意图，我们可以清楚地展示局部塑性区域中的位移突进大小和剪切带大小之间的相关性，这有助于更深入地理解非晶合金在不同能量状态下的塑性行为。

D03-015

CoCrNi 中熵合金的变形机制及晶界作用研究

华东鹏、周青、王海丰*

西北工业大学材料学院

针对 CoCrNi 中熵合金变形机制及界面作用不明晰的问题，本文通过分子动力学模拟阐明了 CoCrNi 中熵合金中化学非均匀性对分级孪晶形成机制的影响，以及分级孪晶的温度依赖性和应变速率敏感性。进一步，通过纳米压痕模拟揭示了化学非均匀性对材料初始塑性和位错行为的影响，并考虑了温度效应。在

此基础上, 澄清了 CrCoNi 中熵合金中晶界的化学特征及其对变形机制的影响, 特别强调晶格畸变和短程有序在位错塑性中的作用。最后, 通过纳米压痕模拟, 揭示了晶界类型决定的晶界-位错相互作用机制, 实验结果与模拟结果具有良好的一致性。

D03-016

铁基无磁中熵合金的组织结构及力学行为研究

赵燕春^{*1,2}、马虎文¹、于志琦¹

1. 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室

2. 兰州理工大学温州泵阀工程研究院

本文研究了多次低温预处理对铁基中熵合金的力学性能和变形机制的影响, 研究表明多次低温预变形处理显著提高了位错密度, 并促进位错类型由刃型向混合型位错转变。热力学计算揭示了低温预处理使得堆垛层错能降低, 从而激活了 TRIP、TWIP 和位错强化机制的协同效应, 导致合金的强度和塑性同时增强, 并且即使在断裂后, 高熵合金仍保持顺磁性。

D03-017

脉冲激光诱导 Fe-基金属玻璃多相纳米结构通过活化过硫酸盐有效降解活性红 195 染料

陈其、王伟民*

山东大学

以 $\text{Fe}_{73.5}\text{Si}_{13.5}\text{B}_9\text{Cu}_1\text{Nb}_3$ 非晶条带作为前驱体合金, 采用脉冲激光加工制备了两相和多相纳米结构催化剂。催化剂的纳米结构非均质性、表面光吸收能力、表面亲水性和光热转化率的提高, 促进了一系列催化性能的提高, 包括: 高的 k 值、强的 TOC 去除率和低的 ΔE 值等。对活性红 195 分子在过硫酸盐体系中的降解途径进行了推测。DFT 模拟结果表明, 脉冲激光催化剂具有优异的催化性能是由于其独特的多相纳米结构, 导致 $\text{S}_2\text{O}_8^{2-} \rightarrow \text{SO}_4^{\cdot-}$ 速率决定步骤的能垒从 2.74 eV 降低到 1.34 eV。该催化剂具有极高的催化性能 $k_{\text{SA}} \cdot C = 7733 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$, 且可重复使用 28 次无效率衰减。研究表明, 调节催化剂的纳米结构是获得高催化性能的有效策略

D03-018

通过耦合部分再结晶和分级析出制备强韧中熵合金

吕蓉*

湖南大学

开发具有高强度和大延展性的合金一直是人们不懈的追求。采用多级微观结构是实现这一目标的高潮。部分再结晶和分级析出是制备分层显微组织的两种常用方法。然而, 采用其中一种通常会使材料变脆并降低加工硬化能力。本文报道了通过局部再结晶和分层析出相结合的方法, 成功地制备了一种强韧性的中熵合金。在模型 $(\text{Ni}_3\text{CrV})_{100-x}\text{Al}_x$ ($x = 0, 3, 6$ 和 $9 \text{ at.}\%$) MEAs 中, 增加 Al 含量不仅由于溶质阻力和 Zener pinning 而延缓再结晶, 而且通过元素分配促进分级析出, 使分级析出物嵌入部分再结晶的基体中。结果表明, 双分级组织使 $(\text{Ni}_3\text{CrV})_{91}\text{Al}_9$ 合金的屈服强度为 $1151 \pm 33 \text{ MPa}$, 极限抗拉强度为 $1448 \pm 17 \text{ MPa}$, 均匀伸长率为 $17\% \pm 1\%$ 。复杂的分级结构带来了多种强化机制, 即异质变形诱导强化、析出强化和位错强化, 从而获得了较高的强度。同时, 这种复杂的组织非均匀性促使合金在不同加载阶段表现出平面滑移、波状滑移、层错、位错网络和孪晶变形等多种变形行为, 使合金具有较大的延展性和显著的加工硬化能力。

D03-019

FeCoNi 系中、高熵合金软磁性能和耐腐蚀性能的研究

徐晖*、夏玉冰、陈梦雅、谭晓华

上海大学

一些 FeCoNi 系中、高熵合金在具有较好的力学性能的同时,也表现出良好的软磁性能,有望成为一类新型的软磁材料。但这些中、高熵合金的软磁性能与目前商用的软磁材料相比还存在一定的差距,且材料的耐腐蚀性能也是该类材料发展的关键之一。本文选取了具有较优异软磁性能的三元 FeCoNi 中熵合金、四元 FeCoNiAl 中熵合金和五元 FeCoNi(CuAl)0.8 高熵合金,通过少量添加 Mo、Ni 和 Cr 调节其成分,期望在提高合金软磁性能的同时,也能够改善合金的耐腐蚀性能。得到的主要结果如下:

对合金软磁性能的研究发现:FeCoNiMox 中熵合金中 Mo 的增加明显提升了合金的交流软磁性能。FeCoNiYAl 中熵合金中 Ni 的增加不利于合金的直流软磁性能,而对交流软磁性能影响不大。FeCoNi(CuAl)0.8Crz 高熵合金中 Cr 的增加提升了合金的直流软磁性能和交流软磁性能。

对合金在 3.5 wt% NaCl 溶液中的电化学耐腐蚀性能的研究发现: Mo、Ni 和 Cr 的添加对三种中、高熵合金的腐蚀电位(E_{corr})影响不大,但明显改善了腐蚀电流密度(I_{corr})。各合金体系的 I_{corr} 的范围在 $0.267 \sim 1.555 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 优于 FeSiB 非晶合金、304 不锈钢和大部分 FeCoNi 系中、高熵合金。

对合金微观结构进行观察,结合其软磁性能和耐腐蚀性能分析发现:三元 FeCoNi 中熵合金中少量添加 Mo 使合金的组织均匀化并抑制了合金中位错的形成,进而改善了合金的软磁性能和耐腐蚀性能。四元 FeCoNiYAl 中熵合金中 Ni 含量的增加使合金中大的 BCC 相晶粒被生成的 FCC 相分割成细小的晶粒,同时减弱了合金中的应力集中程度,进而使合金的耐腐蚀性能得到明显改善。五元 FeCoNi(CuAl)0.8 高熵合金中少量添加 Cr 会使合金 BCC 相中纳米析出物的尺寸减小,增大了合金的磁畴宽度,从而改善了合金的软磁性能和耐腐蚀性能。

D03-020

结构-功能一体化高熵合金

王明亮*

大连理工大学

兼具高强塑、耐腐蚀、防污等结构-功能一体化合金材料是深海装备、生物医用等领域的重大需求,传统以单一组元为主的合金材料多性能相互矛盾,难以兼顾,亟需突破传统设计桎梏,开发新型合金材料及制备技术。高熵合金将合金成分设计扩展至相图的中心区域,极大拓展了合金成分设计范围,具有显著的鸡尾酒效应,有望同时兼具优异的力学和功能特性。本学术团队基于高熵合金设计思想,结合 CALPHAD 方法和实验验证,成功开发出系列结构-功能一体化新型高熵合金,包括高强塑-抗菌-耐蚀高熵合金、高强塑-软磁-耐蚀高熵合金、高强塑-低模量-抗菌-生物相容性高熵合金等,并系统分析了多性能平衡机制,从而为开发新型结构-功能一体化合金材料开辟了新思路。

D03-021

金属玻璃中动态弛豫与粘弹性变形之间的关联

邢光辉、乔吉超*

西北工业大学

金属玻璃是由合金熔体通过极快的冷却速率淬火到玻璃转变温度以下而产生的非晶态固体,其处于能量上的非平衡状态,并表现出丰富的弛豫行为。玻璃中的弛豫动力学涵盖了极宽的温度域和频域,对理解非晶态物质的结构、玻璃转变、力学行为等非常重要。然而目前学界仍然对金属玻璃中动态弛豫和变形行为之间的关联仍不清楚。我们通过动态力学分析、高分辨应力松弛与蠕变实验探测了三种具有不同 β 弛豫形式金属玻璃的粘弹性特性,我们发现了应力松弛和蠕变过程中由于 β 弛豫与 α 弛豫解耦导致的两步弛豫。通过双扩展指数方程对粘弹性弛豫过程进行建模,建立了金属玻璃中普遍存在的从室温至玻璃转变温度的动力学演化。通过激活能谱分析发现弛豫时间谱中的双峰分布,分别对应着 β 与 α 弛豫,通过对扩展指数 β 的分析发现由 β 弛豫导致的快过程存在拉伸指数弛豫到简单德拜弛豫的过渡,而慢弛豫则保持恒定的形

状。我们的研究扩展了金属玻璃中粘弹性变形的动态图像的理解，对于建立玻璃系统中弛豫动力学与粘弹性变形之间的联系具有重要意义，并且为从粘弹性角度探讨玻璃的复杂弛豫行为提供了新的策略。

D03-022

(Ni₄₅Co₂₃Fe₉Al₁₁Ti₁₂)_{1-x}B_x 合金激光熔化沉积制备及其组织性能调控研究

刘学*

中国工程物理研究院材料研究所

多组元合金具有出色的力学性能、良好的耐蚀性能及热稳定性能等优异的综合性能，是潜在的新型结构材料，在航空、深海等极端服役环境中应用前景广阔。鉴于纳米 γ' 相可有效强化 γ 结构高熵合金的力学性能，我们开发了 γ/γ' 相共格析出的 (Ni₄₅Co₂₃Fe₉Al₁₁Ti₁₂)_{1-x}B_x (x=0, 0.5, 1.5, 2.5) 系列金属间化合物基多组元高温合金，并通过激光熔化沉积技术 (LMD) 成功制备。此外研究了硼元素含量对 γ' 相的析出形貌的影响，并在此基础上探讨了微观组织演变与力学性能、耐腐蚀性能、抗高温氧化性能之间的关联关系。研究发现，未添加硼元素时，亚枝晶和枝晶间区域均由基体 γ 相和尺寸相近的纳米 γ' 有序相组成，随着硼元素的增加，亚结构枝晶和枝晶间的组织不均匀性加剧，当硼含量超过一定阈值时，枝晶间析出 Laves 有害相，并在亚枝晶外层形成 γ' 相包络。对合金进行室温拉伸试验，并依托合金的微观组织形貌进行沉淀强化、固溶强化等强度计算，发现合金的室温屈服强度与 γ' 相的体积分数直接相关。此外，对高温力学性能进行测试，发现当温度小于 700°C 时，合金的屈服强度随着温度升高而升高，900°C 时屈服异常现象虽然消失，但该系列合金仍具有 600 MPa 以上的屈服强度。通过对动电位极化曲线进行分析，发现该系列合金的耐腐蚀性能随着硼含量的增加而下降，该现象源于硼的引入导致合金枝晶与枝晶间区域组织不均匀现象加剧。通过循环氧化实验发现合金的氧化层抗剥落能力随着硼含量增加而提高。揭示了合金的氧化机制：在氧化初期，活泼元素 Al、Ti 发生选择性氧化，并且 Al 在氧化膜中的扩散速率比 Ti 慢，往往氧化在 Ti 下方。随后 Ni、Co、Fe 元素向表层扩散，与 O 元素进一步发生氧化。接着 Al 和 Co 的氧化物，Ti 和 Ni 的氧化物在氧分压作用下进一步发生反应，且在氧化过程中氧化膜受到热应力的影响发生剥落。

D03-023

Fe₃₅Ni₃₅Cr₂₀Mn₁₀ 高熵合金丝材和珠光体丝材在中高温环境下组织和力学性能的热疲劳稳定性研究

史梦川*

东南大学

本文研究了 Fe₃₅Ni₃₅Cr₂₀Mn₁₀ 高熵合金 (HEA) 丝材和珠光体丝材在 400~700°C 温度区间内低循环条件下组织和力学性能的热疲劳稳定性。通过 XRD、扫描电镜、透射电镜和万能试验机，系统考察了不同状态丝材的微观组织结构和力学性能。结果表明：珠光体丝材的显微组织和强度稳定性较差，且随温度增高发生明显变化；HEA 丝材具有优异的热疲劳稳定性。HEA 丝材经 400°C 和 500°C 热疲劳实验后，微观组织和屈服强度基本没有发生变化，只有经 600°C 以上的热疲劳实验后，微观组织和强度才发生较大变化。尽管拉拔状态下 HEA 丝材的 UTS 值和 YS 值远低于珠光体丝材，但经 500°C 和 600°C 热疲劳试验后，HEA 丝材的 UTS 值和 YS 值均高于珠光体丝材。此外珠光体丝材经 500°C 和 600°C 的热疲劳实验后会发生明显的回火脆性，这增加了其在工业生产应用中的危险性。

D03-024

钴基非晶材料研发及其在电流传感器中的应用研究

黎嘉威*、庄妍、胡礼梦、贺爱娜、董亚强、满其奎、沈保根

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

电流传感器广泛应用于工业自动化、新能源、电力系统等领域，帮助实现设备的监测、控制和保护，提高系统的安全性和效率。但是，我国高精度磁通门电流传感器用的新型钴基非晶软磁材料仍依赖进口，

有关钴基非晶材料与电流传感器之间的性能关联性研究也十分缺乏。针对上述问题，研究了 Cr 元素掺杂和等温退火热处理对 CoFeMoSiB 合金的热稳定性、软磁性能、耐蚀性能、巨磁阻抗效应、微观结构和磁畴结构等的影响，并将该合金作为磁芯制备了磁探头和磁通门电流传感器，研究了传感器的精度、线性度误差和温漂系数等性能。研制出矫顽力 H_c 为 0.48 A/m，饱和磁感应强度 B_s 为 0.28 T 的钴基非晶带材；利用其制备的磁通门电流传感器样品具有高精度 ($\pm 0.28\%$)、低线性度误差 (小于 0.02%) 和低温漂系数 (小于 ± 10.3 ppm/K) 等优异性能。本工作为钴基非晶合金的性能提升提供了思路，也为磁探头和磁通门电流传感器的设计与制备提供了参考。

D03-025

Strong and tough additively manufactured NiCoCrFeTiAl high-entropy alloy

潘杰*、殷玉朕、柳林

华中科技大学材料科学与工程学院

Additive manufacturing technology has gained popularity for fabricating high-entropy alloys (HEAs) due to its inherent design flexibility and the ability to create unique structural features. However, it often introduces defects such as micro-cracks, which hinder the achievement of optimal mechanical performance. This study unveils a novel NiCoCrFeTiAl HEA, suitable for the laser powder bed fusion (LPBF) technique, demonstrating a wide processing window and exceptional mechanical properties. The optimized HEA exhibits a yield strength of 811 MPa, an ultimate tensile strength of 1071 MPa, and a tensile elongation of 29%. Notably, this HEA displays remarkable fracture toughness, with a KIC value reaching 279 MPa·m^{1/2}. The dislocation networks introduced by additive manufacturing, along with stacking faults and nanotwins, coordinate the plastic deformation at the crack tip. This coordination allows the crack tip to withstand high stress while enabling the plastic deformation to extend beyond the immediate vicinity, thus preventing further crack propagation and enhancing fracture toughness.

D03-026

高温钼基非晶合金的形成机理及其氧化行为

郭胜锋*

西南大学

非晶合金处于热力学亚稳态，在一定温度下会发生老化或转变为晶态合金，从而丧失非晶态的优异性能，这极大地限制了非晶合金服役温度和时间。最近发展的系列高温块体非晶合金 (Ir、Os 等) 为克服这一难题带来了曙光，然而，极其高昂的材料成本导致其实际应用受限。本报告基于团队近期发展的钼基高温块体非晶合金，借助特殊金属间化合物与非晶形成关联，通过合理的成分设计发展兼具良好非晶形成能力和热稳定性的钼基块体非晶合金。通过中子衍射、纳米束电子衍射、分子动力学模拟等手段，揭示钼基高温块体非晶合金基本结构单元特征，深入理解其桥接特殊金属间化合物和非晶形成的本质。在此基础上，系统研究不同类型元素对钼基块体非晶合金氧化行为，阐明表面氧化层的成分、结构、生长动力学以及形成机制等，揭示钼基非晶合金抗氧化机理，这将为钼基非晶合金在高温服役提供实验指导和理论依据，对推进高温块体非晶合金的工程化应用具有重要意义。

D03-027

电化学噪声(EN)评估含类金属元素的铁基非晶合金腐蚀模式

王兆萱、王伟民*

山东大学

采用多种工艺研究了 $\text{Fe}_{60}(\text{P}_{0.3}\text{C}_{0.7})_{40}$ 和 $\text{Fe}_{83}(\text{P}_{0.3}\text{C}_{0.7})_{17}$ 条带(Fe_{60} 和 Fe_{83}) 在 0.6 M NaCl 中的腐蚀模式和钝化行为。P 和 C 的减少会减弱合金的非晶形成能力, 提高合金的液相温度。电化学噪声(EN)和微观结构研究表明, Fe_{60} 表现为局部腐蚀模式, 形成稳定致密的钝化膜, 具有较高的耐蚀性; Fe_{83} 表现为局部和全局腐蚀模式的结合, 具有较低的耐蚀性。控制纳米晶相的析出和增加钝化膜中 POx 的含量对提高铁基玻璃合金的耐蚀性有显著影响。

D03-028

共晶高熵合金腐蚀性能研究

姜慧*

山东科技大学

高熵合金因其独特的设计理念而具有高硬度/强度、良好耐磨性、高低温韧性等优异性能, 而共晶高熵合金同时具备共晶合金及高熵合金的特点, 有望突破高熵合金工业化应用所带来的瓶颈问题, 具有重要的经济价值和理论研究意义。当前, 进一步提高共晶高熵合金耐蚀性能是解决其工业化应用所面临的关键问题。双相 FCC + B2 结构的 AlCrFeNi_3 共晶高熵合金同时具备良好强度和塑性, 成为极具工业应用潜力的共晶高熵合金之一。因此, 本文以 AlCrFeNi_3 共晶高熵合金作为基体, 采用耐蚀性 Cu、Mo 元素进行合金化, 研究 Cu、Mo 元素对 AlCrFeNi_3 共晶高熵合金显微组织与耐蚀性能的影响, 分析 AlCrFeNi_3 - Cu/Mo 高熵合金的腐蚀与钝化行为, 并揭示其腐蚀机理, 建立材料宏观性能与微观组织间的内在联系。

D03-029

共晶高熵合金凝固组织及力学性能优化研究

卢一平*

大连理工大学

共晶高熵合金自 2014 年被提出以来, 由于其优异的综合力学性能和良好的铸造流动性, 是最具有工业化应用潜力的高熵合金之一, 目前已经成为高熵合金研究领域的一大热点。报告综述了本团队共晶高熵合金的最新研究进展, 详细介绍了共晶高熵合金的成分设计方法、相组成、组织形貌特点以及力学性能, 最后指出了共晶高熵合金面临的挑战并展望了其未来的发展方向。

D03-030

通过析出纳米 L_{12} 相提高高熵合金的耐点蚀能力

李天润*

中国科学院金属研究所

析出强化型高熵合金在室温下展现了出色的强韧性结合, 然而这些析出相通常会降低合金的耐局部腐蚀能力, 严重限制了此类材料在腐蚀环境中的应用。为了解决这一问题, 本工作提出了一种有效策略, 即在高熵合金 ($\text{Co}_{20}\text{Cr}_{15}\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{33}\text{Al}_6\text{Ti}_6$) 中引入纳米尺寸的 L_{12} 析出相来提高合金的耐腐蚀能力, 并探讨了析出相尺寸及含量对合金腐蚀行为的影响。

实验结果表明: 1.高熵合金的耐点蚀能力存在析出相的临界尺寸。当析出相尺寸降低至临界尺寸以下时, 高熵合金的点蚀电位明显升高。分析认为该合金耐局部腐蚀能力的改善与合金表面钝化膜稳定性的提升密切相关。当析出相尺寸低于临界尺寸时, 析出相在腐蚀初期被快速溶解, 最终合金表面形成富 Cr 的保护性钝化膜; 当析出相尺寸大于临界尺寸时, 析出相溶解不完全, 形成 FCC 基体上的富 Cr 钝化膜以及析出相表面的富 Al、Ni 的钝化膜。这种不均匀的钝化膜结构会显著降低合金的耐局部腐蚀能力, 促进点蚀的萌生和长大。2.析出相的尺寸在低于临界尺寸时, 合金的耐点蚀能力随析出相含量的增多而升高。通过提高纳米 L_{12} 相含量至 38 wt.%, 高熵合金的点蚀电位可以从 258 mV_{SCE} 提高到 603 mV_{SCE}。这种提升可以归因于钝化膜稳定性提升及点蚀长大的抑制两个方面。首先, 富 Ni、Al、Ti 的 L_{12} 沉淀在腐蚀过程中倾

向于被溶解, AlTi 氧化物/氢氧化物的快速沉积会促进保护性 Cr_2O_3 的异质形核, 并且 Cr 元素在 FCC 基体中的富集会提高合金钝化膜的稳定性。其次, 由于 FCC 基体中 Cr 元素的富集, 亚稳蚀点内的溶解动力学受到抑制, 因此抑制了点蚀的稳定长大。

上述工作系统地研究了析出强化型高熵合金在氯离子环境中的腐蚀行为, 澄清了纳米 L_{12} 相的腐蚀机制, 有望为耐腐蚀高熵合金的材料设计提供了新的思路。

D03-031

Pd 基非晶合金高温变形行为研究

崔静波、乔吉超*

西北工业大学

作为典型多体相互作用非平衡体系, 如何明晰非晶合金在多场耦合激励下高温变形机制, 建立非晶合金变形行为、动态弛豫机制与微观结构特征本征关联是该领域当前的重要研究内容。我们通过动态力学分析研究了 Pd 基非晶合金从室温到过冷液相区宽温度范围内的动态力学行为, 明晰了其 β 弛豫形式。在自由体积模型的框架下, 通过应变速率跳跃和单轴拉伸实验研究了玻璃转变温度附近的高温流变行为。结果表明, 塑性变形行为与温度和应变速率密切相关。塑性变形的高激活体积值可归因于 β 弛豫。为了进一步探究高温变形行为, 我们在 β 弛豫温度范围附近进行了蠕变实验。考虑到微观结构的非均匀性, 应变的演变可以用 Kohlrausch-Williams-Watts 方程和广义开尔文模型来描述。我们发现低于玻璃转变温度的退火会导致缺陷湮灭, 特征弛豫时间增加。我们的研究有助于深化对非晶合金在高温下力学行为的理解, 阐明潜在的变形机制及其对热力耦合激励下的响应, 并为非晶合金在高温环境下的应用提供了有力数据支撑。

D03-032

超高速激光熔覆快速制备高质量与高性能的纳米晶高熵合金涂层

黄留飞^{1,2}、孙耀宁²、李晋锋^{*1}

1. 中国工程物理研究院材料研究所
2. 新疆大学机械工程学院

超高速激光熔覆 (Ultra-high Speed Laser Cladding, UHSLC) 是近几年新兴的防护涂层快速制备技术, 为弥补传统激光熔覆 (Traditional Laser Cladding, TLC) 的低效率提供了有效手段, 满足了金属防护涂层“节材增效”的发展需求。本文分别采用 UHSLC 和 TLC 方法制备了 FeCoNiCrMo 高熵合金 (High Entropy alloys, HEAs) 涂层。并对二者的成形工艺、成形质量、元素分布、稀释率、晶粒形态、显微硬度和电化学腐蚀性能进行了对比研究。研究表明: 与 TLC 涂层相比, UHSLC 涂层的熔覆速度提升了约 150 倍, 表面粗糙度显著降低 (TLC 涂层约为 $38.35\ \mu\text{m}$, UHSLC 涂层约为 $2.62\ \mu\text{m}$); UHSLC 涂层厚度降低了一个数量级 (TLC 涂层约为 $2\ \text{mm} \sim 3\ \text{mm}$, UHSLC 涂层约为 $100\ \mu\text{m} \sim 200\ \mu\text{m}$), 并且基材稀释率极低 (不足 1%); UHSLC 涂层的极快速凝固特性使涂层的晶粒尺寸更小, 达到了纳米级 (平均晶粒尺寸约为 $190\ \text{nm}$), 从而表现出更高的显微硬度; 此外, UHSLC 涂层表现出更好的耐腐蚀性, 在 $1\ \text{mol/L}\ \text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液中表现出较低的维钝电流密度和较高的自腐蚀电位, 这归因于 UHSLC 涂层极低的稀释率降低了熔池化学扰动, 使得元素分布更均匀, 并且低稀释率也使得涂层成分更接近初始成分。本工作提供了一种利用高效、节材的 UHSLC 技术来降低基体稀释和改善 HEAs 涂层性能的新策略, 为高性能 HEAs 在防护涂层领域的快速制备提供了技术基础。

D03-033

通过调幅分解实现对高熵合金力学性能和磁电阻效应的协同调控

董培林²、钟智勇²、李晋锋^{*1}

1. 中国工程物理研究院材料研究所
2. 电子科技大学电子科学与工程学院

调整高熵合金的相组成是改变其机械性能和磁性能的有效途径。本研究使用氩弧熔炼制备了 FeCoNiCr ($\text{Al}_x\text{FeCoNiCr}$; $x=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.75$) 高熵合金, 通过 Al 含量变化控制合金的相组成。当 $x=0.25, 0.5, 0.75$ 时, 在面心立方 (FCC) 相基体中析出了体心立方 (BCC) 相。当 $x=1.0, 1.25, 1.75$ 时合金完全转变为 BCC 相。合金的压缩屈服强度从单一 FCC 相时的 230 MPa 增大到了单一 BCC 相时的 1200 MPa。此外, 当 $x=1.0, 1.25, 1.75$ 时合金中发生调幅分解得到了 B2 和 BCC 共格相, 其中 B2 相是富集 AlNiCo 的有序相, BCC 为富集 Fe-Cr 的无序相。合金中有序相与无序相之间化学元素分布的差异导致了两种相具有不同的磁性能, 在外加磁场下由于电子在两种磁性不同相之间的散射作用而诱导出了磁电阻 (MR) 效应, 当 $x=1.0$ 时合金在室温下的磁电阻变化率达到 -2.2%。该研究为设计先进磁性功能高熵合金提供了一种途径。

D03-034

激光熔化沉积制备具有高强韧的 Al-Ti-Zr-Nb-Ta 难熔高熵合金

杨秋菊、李晋锋*、帅茂兵

中国工程物理研究院材料研究所

难熔高熵合金 (RHEAs) 在结构应用方面具有巨大潜力, 但室温脆性和加工难度使其受到限制。本工作采用激光熔融沉积技术成功成形了一种具有优异强度和韧性的 Al-Ti-Zr-Nb-Ta 难熔高熵合金。首先通过等离子体旋转电极雾化制粉得到粒径与成分均匀的预合金粉末, 通过正交试验探索了激光熔化沉积技术 (LMD) 的最佳工艺窗口并获得成形质量优异的单壁 Al-Ti-Zr-Nb-Ta RHEA 试样。由于部分熔化粉末在熔池中起到异质成核作用, LMD 样品呈现出细小的等轴晶, 而铸造样品由于冷却速率差异得到的晶粒更大, 且暴露出严重的枝晶形态。归因于成形过程中复杂的热环境和超快的冷却速率特性, LMD 样品的微观结构由方形富集 Nb 和 Ta 的 BCC 相和以及条纹状富 Al、Ti 和 Zr 的 B2 相组成。与铸造样品相比, LMD 获得样品的抗压强度和塑性分别增加了 44% 和 83%, 达到 1450 MPa 和 42%。这是由于前述的细小等轴晶粒强化、共格析出强化共同导致的, 从而提高了 LMD 样品的原子应变和位错堆积能力。

D03-035

原位电镜研究非晶合金的热处理工艺参数

谢宇俊*

上海交通大学

《科学》杂志在创刊 125 中明确指出了“非晶态的结构本质是什么?”是 125 个重大科学之一。然而, 基于晶体材料发展的微观表征方法在面临结构无序, 化学无序的非晶合金时遇到巨大挑战, 极大阻碍基本理论框架的构建。更遑论进一步结合服役工况条件, 进行具有重大工程意义的原位观测分析。针对该问题, 报告人近年来通过发展原位多场耦合透射电子显微镜技术, 实现对非晶合金在高温下的复杂凝固结晶过程的观测。本报告将重点汇报非晶合金尺寸效应对其热处理工艺参数的影响, 提出尺寸效应当作为第四维度引入非晶合金的等温转变曲线 (T-T-T 相图)。同时进一步发现非晶合金的晶体生长速率取决于其热处理历史, 提出非经典超团簇耦合晶体生长机理。最后, 报告亦将展示 4D-STEM 技术及大数据分析技术在非晶态物质微观结构分析中取得的代表成果。

D03-036

激光增材制造析出强化型高熵合金高温和疲劳失效机制研究

徐龙*

江苏科技大学

激光增材制造高熵合金因其设计自由度高、成型速度快及综合性能好等特点为我国日益强大的工业体系提供新的材料选择。但增材制造因在微纳尺度上成型表面质量差、尺寸精度低和内部气孔等问题不仅降

低成型工件的疲劳性能,而且还加速材料腐蚀和高温氧化,这严重制约了增材制造高熵合金在精密器件和极端环境下的工程化应用。本研究通过借鉴仿生材料设计理念,调整选区激光熔化成型策略制备多级异质结构的高熵合金块体,该组织可以改变中温环境下裂纹扩展路径,形成多级裂纹偏转而延缓断裂,进而缓解中温脆断。此外,基于热处理促进双纳米析出强化相生成,实现拉伸强度和高周疲劳强度的显著提升。研究内容揭示析出相颗粒在疲劳裂纹扩展中的作用机理,为选区激光熔化析出强化型高熵合金疲劳断裂机制提供解释。本研究结果为激光增材制造析出强化型高熵合金在高温和疲劳环境下的工程化应用奠定基础。

D03-037

分子动力学研究非等原子比高熵合金 CoCrFeNi 的力学性能

施志林、张浩然、唐芑、蔡素磊、马明臻*

燕山大学材料科学与工程学院

高熵合金是由等原子比或近等原子比组成的四种或者四种以上元素组成,由于其优异的力学性能使其成为有潜力的结构材料。典型 FCC 结构的 CoCrFeNi 高熵合金具有优异的延展性、耐腐蚀性、抗辐照能力等,但是强度较低使其应用受到了限制。除析出强化,间隙强化,固溶强化,细晶强化等可以提高强度。我们发现调控 CoCrFeNi 中元素的组成比例可以影响其变形行为,从而改善力学性能。因此,本次研究选用 Co₂₀Cr₂₀Fe₂₀Ni₄₀, Co₂₅Cr₂₅Fe₂₅Ni₂₅, Co₃₅Cr₂₅Fe₂₀Ni₂₀, Co₄₀Cr₂₀Fe₂₀Ni₂₀ 这四种合金为研究对象,通过分子动力学手段研究其层错能、拉伸性能和化学有序结构来揭示不同原子比的 CoCrFeNi 变形机理。实验结果揭示 Co 含量可以影响其层错能,层错能直接影响其变形孪晶和相变的倾向,且随着层错能的降低,发生变形孪晶和相变的倾向就会越大。通过 Warren-Cowley parameter (WCP)参数发现 Cr 原子比例的增加会促使 Co 和 Ni 在其周围富集,改善化学短程有序结构,进而提高力学性能。

D03-038

激光增材制造轻质难熔高熵合金的强塑性匹配

蔡选鸿^{1,2}、王清²、李晋锋*¹

1. 中国工程物理研究院材料研究所
2. 大连理工大学材料科学与工程学院

难熔高熵合金(RHEAs)独特的功能和结构特性引起了广泛关注,但是其相对较高的密度($\rho > 10 \text{ g/cm}^3$)、难以加工和低塑性的特点很大程度上限制了其应用。传统的真空电弧熔炼(VAM)制备的轻质难熔高熵合金晶粒粗大($d > 300 \mu\text{m}$)并伴有枝晶,往往需要经过复杂的热处理才能获得相对良好的力学性能,但这过程中不可避免的引入 Laves 相和 M_5Si_3 型相等有害相。因此,本研究设计出一种低 Al 含量的轻质难熔高熵合金($\rho \sim 7.8 \text{ g/cm}^3$)并利用预合金粉末通过激光金属沉积增材制造(LMD)方法成功地制备出具有优异成形性能而无任何裂纹的合金样品。沿合金沉积方向,细小的等轴晶粒($d \sim 39 \mu\text{m}$)自下而上均匀分布。合金的微观组织为方形 BCC 纳米粒子($d \sim 6 \text{ nm}$)在 B2 基体上析出的 BCC/B2 共格组织,这主要得益于 BCC 粒子和 B2 基体之间适当的点阵错配度($\varepsilon \sim 0.64\%$),并且合金内部无任何脆性相析出。增材制造的合金具有良好的室温压缩屈服强度($\sigma_{\text{YS}} \sim 1600 \text{ MPa}$)和塑性应变($\delta \sim 50\%$)。其出色的力学性能主要归因于高密度的等轴晶粒边界带来的晶界强化、溶质元素带来的固溶强化以及方形 BCC 纳米粒子的析出强化。本工作通过 LMD 增材制造在 B2 基体中析出方形 BCC 纳米粒子获得连续的 BCC/B2 共格组织,显著提升了轻质难熔高熵合金的强塑性平衡,为高性能 RHEAs 的设计和制备提供了新的见解。

D03-039

难熔高熵合金的微观组织与力学行为研究

王亮*、薛云飞、靳柯、王本鹏、孙世海

北京理工大学

以 Ti、Zr、Hf、V、Nb、Ta 等难熔元素组成的难熔高熵合金表现出优异的力学和物化性能，受到人们的广泛关注。然而，当前难熔高熵合金的均匀变形能力普遍较低，直接限制了其工程应用。本报告汇总了近年来报告人所在团队在难熔高熵合金强韧性改善方面的相关研究，主要包括化学局域有序、马氏体相变、第二相强化、异质结构等策略对难熔高熵合金强韧性、特别是加工硬化能力和均匀变形能力方面的影响机制研究，为开发新型高强韧难熔高熵合金提供新的见解和思路。

D03-040

月壤玻璃地质学时间尺度的稳定性研究

陈自强¹、赵勇¹、池祥¹、闫玉强¹、沈杰²、邹敏杰¹、赵少凡³、刘明³、姚伟³、张博*¹、柯海波¹、马秀良¹、白海洋^{1,2,3}、杨孟飞³、邹志刚^{3,4}、汪卫华^{1,2,3}

1. 松山湖材料实验室
2. 中国科学院物理研究所
3. 中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室
4. 南京大学现代工程与应用科学学院

基于我国嫦娥 5 号任务获得的月壤样品，我们分析了其中玻璃态物质的结构、形貌、成分以及力学性能。这些月壤玻璃在月球环境下经历了至少数百万年的老化。针对微小的月壤玻璃颗粒（尺寸小于 60 微米），我们采用纳米压痕方法首次获得了月壤玻璃模量和硬度的实验数据。通过回春处理，我们获得了这些玻璃颗粒接近初始形成阶段的年轻态样品（回春态样品）。对比发现，这些样品中老化态玻璃样品的模量较之回春态样品显著增加（最大增量超过 70%）。这种巨大的模量增量在其它的玻璃物质老化过程中从未观察到，比如金属玻璃的老化后模量增量通常小于 10%。同时，我们还观察到和模量的巨大变化不同，月壤玻璃颗粒样品的硬度随老化的变化不大，这些样品中硬度变化大多小于 10%。研究结果为认识玻璃态物质老化和稳定性提供了新机制，揭示了独特的月壤玻璃成分和结构是导致其具有独特稳定性的根源，这为未来开发和设计特殊空间环境下使用的新材料提供了借鉴和新思路。

D03-041

共晶高熵合金相选择再结晶的温度依赖性及其力学效应

刘馨、何峰*、王锦程

西北工业大学

相选择再结晶是改善共晶高熵合金力学性能的有效策略。通过选相再结晶处理，回复后的硬相和再结晶的软相协同工作，充分释放共晶高熵合金的应变硬化能力。然而，很少有研究关注共晶高熵合金中选相再结晶组织结构的优化。在本研究中，我们以 Ni₄₄Co₁₀Cr₁₂Fe₁₅Al₁₇W₂ 为实验材料，研究了退火温度和轧制时间对共晶高熵合金选相再结晶的影响。我们制备了不同轧制次数和退火温度下的选相再结晶样品，并阐明了这些合金的强化机制和断裂行为。其中经过两次 30%冷轧和随后在 1000°C退火 20 分钟后，合金的铸态屈服强度、极限拉伸强度和延展性分别提高到 842±26 MPa、1387±11 MPa 和 27±1%，在不牺牲屈服和极限拉伸强度的情况下延展性提高了 50%以上。结合理论计算与实验验证阐明了合金的强化机制，表明其优异的强度来自于析出，位错，以及晶界强化，而良好塑性是由于裂纹在相界处开裂，并且不易扩展。这些发现创造了选相再结晶结合回复和再结晶两个过程的全新状态，可以显著提高共晶高熵合金，甚至其他双相合金的力学性能。

D03-042

微带和相变诱导塑性同时提高 L12 纳米相强化高熵合金的强塑性

李洪超、王军*、赵佳旺、赵萌萌、李金山

西北工业大学

基于析出强化机制和有良好的加工硬化能力, $L1_2$ 纳米相强化高熵合金具有优异的强度-塑性组合, 近年来受到广泛的关注。然而, 现有的研究多是对 $L1_2$ 相的调控, 对合金基体性质及其组成元素的研究并不多见, 合金基体元素含量对其变形机制尚不清楚。本研究制备了不同 Fe 含量的 $L1_2$ 相强化 $Al_5Ti_8Fe_x(CoNi)_{86.9-x}B_{0.1}$ 高熵合金, 研究了 Fe 含量对合金变形机理的影响。结果表明, Fe 含量的增加显著提高了 $Al_5Ti_8Fe_x(CoNi)_{86.9-x}B_{0.1}$ 高熵合金的室温强度和塑性。对于 $Al_5Ti_8Fe_{17}(CoNi)_{69.9}B_{0.1}$ 高熵合金, 由于存在大量有序的 $L1_2$ 相, 变形机制主要为动态细化的滑移带。对于 $Al_5Ti_8Fe_{28}(CoNi)_{58.9}B_{0.1}$ 高熵合金, 有序 $L1_2$ 析出相体积分数的降低和 FCC 基体层错能的增加导致变形过程中交叉滑移频率的增加, 从而促进位错在高应力晶体滑移面上的失稳和微带的产生。利用 TEM 和 XRD 观察到了变形中相变的发生, 通过热力学计算分析了 FCC→BCC 相变的原因。微带和微带内的相变促进了应变强化, 从而提高了材料的强度和塑性。提高 Fe 含量至 29 at. % 促进了 FCC→BCC 相变, 合金的应变强化进一步提升。这些研究阐明了 Fe 含量对析出强化高熵合金变形行为的影响, 获得了 $L1_2$ 相强化高熵合金中微带和相变的形成机制, 为未来设计开发超高强度和延展性合金开辟了新的途径。

D03-043

通过析出碳化物实现亚稳高熵合金强度和塑性协同提升

薛梦姣、张恒、秦维佳、李金山、赖敏杰*

西北工业大学

在过去受到广泛关注的 Cantor 合金的基础上, 人们开发了一系列贫 Ni 或不含 Ni 的非等摩尔比 CoCrFeMnNi 高熵合金, 成功实现了对层错能和变形机制的调节。其中, 具有较低层错能的 CoCrFeMnNi 高熵合金能够在变形过程中产生应力诱发马氏体和/或变形孪晶, 从而激发相变诱导塑性 (TRIP) 和/或孪晶诱导塑性 (TWIP) 效应, 进而获得优异的应变硬化能力和塑性。然而, 这类高熵合金的室温屈服强度普遍较低, 这极大地限制了它们的工程应用范围。添加 C 已被证明能够有效提升面心立方 (FCC) 高熵合金的强度, 然而, 相关研究表明, 过量 C 添加会导致碳化物析出, 并容易降低合金的塑性。因此, 在设计高强塑性的高熵合金时通常会限制 C 含量, 尽管碳化物的析出会进一步提高合金的强度。本工作提出了一种联合 TRIP/TWIP 效应和晶内析出相来改善高熵合金力学性能的合金设计策略: 首先, 基于 Cantor 合金设计了一种含 C 的具有低层错能的亚稳态 CrMnFeCoNiC 高熵合金, 保证其具有 TRIP 效应, 从而呈现出良好的塑性; 然后, 通过提高 C 含量促进 FCC 基体中产生晶内析出相, 并充分利用碳化物析出的强化效应对变形机制的调节作用, 进一步提升强度和塑性。结果显示, 随着 C 含量的提高, 合金的屈服强度、抗拉强度和延伸率都得到了提升。强度的显著提高主要归因于间隙 C 和碳化物所引起的晶粒尺寸减小和位错密度提高。塑性提高的原因在于一方面大量较窄的 HCP 马氏体、变形孪晶、9R 结构以及晶内的 M23C6 碳化物能够有效阻碍位错滑移, 改善了不同区域的应变分配, 有助于缓解应变局域化。另一方面碳化物主要分布在晶粒内部, 避免了晶间析出引起的应力集中和开裂倾向, 同时高延性的 FCC 基体和 TRIP 效应、TWIP 效应共同阻碍了裂纹的扩展。本工作为高强塑性亚稳高熵合金的设计开发提供了一条重要途径。

D03-044

梯度结构高熵合金塑性变形时的应变非局域化

付武靖^{1,2}、范国华¹、黄永江^{*2}

1. 南京工业大学
2. 哈尔滨工业大学

激光冲击强化 (LSP) 可于高熵合金 (HEAs) 表面诱导呈梯度分布的纳米孪晶、超细晶粒, 使其相较于同等平均晶粒尺寸的均质材料具备更为优异的应变硬化能力。微观结构研究发现, LSP 诱导的位错、小角度晶界及孪晶的共同作用增强了高熵合金的应变硬化能力, 导致了其在变形过程中的优异塑性。采用数字图像相关 (DIC) 原位拉伸技术结合微观结构表征, 从局域应变的角度揭示了一类典型的单相面心立方结构 (fcc)

的梯度结构高熵合金的塑性变形机理, 结果表明, 在变形过程中, 该类梯度结构高熵合金在塑性变形过程的表面形成的致密剪切带(SBs)容纳了梯度层的塑性应变, 延缓了纳米晶/细晶区域的应变局域化和过早失效, 使其具有相较均质合金更为优异的塑性。此外, 在塑性变形阶段, 合金硬化层中的细晶在失稳前产生了侧向局部应力分量。多向的局部应力状态激活了合金内部更多的滑移系统, 提高了梯度结构 HEAs 的力学性能。透射电镜及循环加载结果表明, 梯度结构在变形过程中高的背应力强化使得该结构的高熵合金材料具有优异的应变硬化能力和强塑性结合。

D03-045

AlCo_{1.2}Cr_{0.8}FeNi_{2.1} 共晶高熵合金的微观组织调控及腐蚀行为研究

段敬民、杨玉婧、董勇*

广东工业大学

选取 AlCo_{1.2}Cr_{0.8}FeNi_{2.1} 合金作为研究对象, 对其微观组织、力学性能和腐蚀性能进行了系统的研究, 并通过热处理对合金中的析出相进行调控, 深入研究了合金中析出相对其力学性能及腐蚀性能的影响, 揭示了 AlCo_{1.2}Cr_{0.8}FeNi_{2.1} 合金在 3.5 wt.% NaCl 溶液中的腐蚀机制。铸态 AlCo_{1.2}Cr_{0.8}FeNi_{2.1} 合金的微观组织为 FCC 相+B2 相的层片树枝状典型共晶组织结构, 且 FCC 相中含有许多大小为 2.5 ± 0.8 nm 的 L12 有序析出相。在 1200 °C 下对合金进行固溶处理, FCC 相中的纳米级 L12 相消失, 延伸率提高但强度下降, 且表现出较好的耐蚀性。对固溶处理后的合金在 700 °C 和 750 °C 下进行不同时间的时效处理, 发现 700 °C 时效后 FCC 相中出现 L12 纳米析出相, 并随着时效时间的增加, 纳米颗粒的尺寸增大。时效处理后合金强度得到了提升而塑性下降, 耐蚀性能相比于固溶态合金有所下降且随着 L12 纳米颗粒的粗大, 钝化膜的均匀性和致密性降低, 腐蚀性能下降的幅度增大。

D03-046

基于“大数据+机器学习模型预测+激光高通量制备筛选”的高玻璃形成能力合金开发新范式研究

李然*、毕甲紫、刘晓斌、张涛

北京航空航天大学

在过去 60 年的非晶合金材料规模化探索找寻过程中, 采用基于传统快速凝固的试错法(即: 母合金熔炼→反复快速凝固甩带铸棒制备不同尺寸的样品→相组成检测获得具有非晶态结构样品的临界尺寸)一直是最为通用可靠地揭示某一组分合金玻璃形成能力的有效手段。迄今为止, 通过该方法也仅找寻到了 1000 多种典型高玻璃形成能力的合金(包含相似组分的合金, 年均检出不到 20 个)。此外, 目前通过传统方法能够找寻的高玻璃形成能力非晶合金材料越来越少, 发展新型非晶合金快速检出方法尤为重要。近期, 我们发展了一种基于大数据+机器学习模型预测+激光高通量制备筛选的高玻璃形成合金快速检出方法, 通过与已知玻璃形成能力的经典合金体系结果相比较, 发现该方法具有适用合金体系广(宽范围)、材料用量少(低成本)、检出速度快(高效率)等优势。且不同于多靶共沉积的非晶薄膜高通量检出方法, 该类方法具有快速设计并检出更慢临界冷速样品的能力。该类非晶合金快速检出方法为探索具有极限性能的非晶合金体材料(特别是高温非晶合金)提供了全新的制备检出手段。

D03-047

Cu-Ta 非晶合金的结构演化、热稳定性及扩散行为研究

郝梓焱*、王鹏飞、吴艺凡、侯弘历

西北有色金属研究院

由于优越的强度和导电性能, 由不互溶合金元素组成的铜基复合材料受到了人们的广泛关注。通过大塑性变形, 在 Cu 和增强相之间形成的非晶层对材料性能的影响至关重要。本研究通过从头算分子动力学(AIMD)模拟研究了 Cu_{100-x}Ta_x (x = 10, 30, 50, 70 at.%)非晶合金的结构演化、热稳定性以及合金的扩散行为。

随着 Ta 含量的增加, Cu-Ta 和 Ta-Ta 键数量的增加导致了 Cu-Ta 非晶合金体积的升高。在富 Cu 非晶中, Ta 原子倾向于表现出类 Cu 原子团簇构型, 而富 Ta 非晶中的 Cu 原子则倾向于形成类 Ta 原子团簇构型。通过对能量演化的研究发现非晶合金的热稳定性随着 Ta 含量的增加先降低后升高。此外, 本文还研究了 Cu-Ta 合金中的原子扩散行为, 发现相比于 Cu 而言, Ta 的扩散能力明显较弱。非晶合金热稳定性和铜钽原子的扩散差异共同导致了 Cu-Ta 材料在大塑性变形下富 Ta 非晶层的形成。本研究结果可以有效助力 Cu-Ta 材料的发展和对非固溶合金界面结合机制的理解。

D03-048

超高速激光熔覆中铁基非晶合金涂层的裂纹抑制

王锴¹、张诚²、刘学*¹

1. 中国工程物理研究院材料研究所

2. 华中科技大学

铁基非晶涂层以其优异的耐磨性备受瞩目。最近开发的超高速激光熔覆 (EHLC) 技术为其制备提供了一种前景广阔的途径, 但受到了严重的开裂倾向的制约。此外, 对涂层结构演变和失效机理的深入理解仍然不足。因此, 了解裂纹起源并采取预防措施具有重要意义。本研究成功利用 EHLC 技术制备了可调节非晶相含量的 Fe-Mo-Cr-Y-C-B 非晶合金涂层。通过对涂层的微观结构进行表征, 揭示了在热影响区析出了硬脆的单斜 $\text{Mo}_{12}\text{Fe}_{22}\text{C}_{10}$ 和 M_{23}C_6 碳化物的纳米晶相。因此, 通过增加非晶相含量可有效减少涂层的开裂。随后, 研究了涂层的硬度分布、耐磨性能和磨损机理。结果表明, 增加非晶相含量可有效降低磨损率。制备的 Fe-Mo-Cr-Y-C-B 非晶涂层的磨损损失仅为 $3.54 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3 \cdot (\text{N} \cdot \text{m})^{-1}$, 比 45# 钢基体低一个数量级。涂层的磨损主要归因于疲劳磨损和轻微的氧化磨损。通过抑制涂层中的脆性析出相, 可以减少疲劳磨损, 并提高涂层的耐磨性。本研究为 EHLC 制备的铁基非晶涂层的裂纹预防和耐磨性改善提供了见解。

D03-049

非晶合金亚稳相的结构分析

孙永昊*

中科院物理所

非晶合金, 以其独特的无序结构和优异的物理化学性能已成为材料科学领域的研究热点。本报告聚焦于非晶合金亚稳相的结构形成机制及其对材料性能的影响, 通过大规模分子动力学模拟和先进的拓扑数据分析方法, 深入探讨了铜基非晶合金在结晶过程前的亚稳态结构演变。研究发现, 在非晶合金的结晶孵化期内, 原子的四面体堆叠行为对合金熔体稳定性、晶体生长和玻璃形成具有重要影响。特别是, 我们观察到了由不完美的四面体堆叠产生的链状结构, 这种结构可以通过三元素编码方案进行描述, 为理解非晶合金的中程序提供了新的视角。此外, 通过改变元素类型, 我们展示了化学中程序与原子间势阱的相对深度密切相关。本研究还揭示了温度和元素类型对非晶合金拓扑结构的影响, 表明了负混合热条件下, 通过调控原子间势能可以有效地调控非晶合金的化学中程序。我们的研究不仅为非晶合金的结晶机制提供了新的理论基础, 也为设计和开发具有特定性能的非晶合金材料提供了重要的指导。

D03-050

晶粒尺寸对 Fe23.7Co23.8Ni23.8Cr23.7Mo5 多主元合金的力学与空蚀-腐蚀性能的影响

牛佳成、陈维平、付志强*

华南理工大学

在船舶和水上设备中, 一些过流部件会经历严重的空蚀-腐蚀现象。目前使用的传统金属材料无法同时具备优异的机械性能和抗空蚀-腐蚀性能。因此, 亟需开发具有综合结构功能的新型合金。具有综合优异性能的多主元合金为这一问题提供了解决方案。本研究采用不同温度、不同时间的变形后退火工艺, 获得了

具有不同晶粒大小的单相面心立方结构 $\text{Fe}_{23.7}\text{Co}_{23.8}\text{Ni}_{23.8}\text{Cr}_{23.7}\text{Mo}_5$ 合金。对不同晶粒尺寸的样品进行了机械性能、耐电化学腐蚀性能、去离子水中的纯空蚀和 3.5 wt.% NaCl 溶液中的空蚀-腐蚀性能分析。随着变形后退火样品晶粒尺寸的增大，其拉伸强度降低，伸长率增加，同时在 3.5 wt.% NaCl 溶液中的耐腐蚀性也降低。其中，平均晶粒尺寸约为 $4.1\ \mu\text{m}$ 的样品具有优异的综合性能。最重要的是，该样品具有出色的抗空蚀-腐蚀性能，在两种介质中的累计质量损失分别为 $\sim 1.4\ \text{mg}$ 和 $\sim 2.6\ \text{mg}$ 。相比之下，316L 不锈钢在这两种介质中的质量损失要高得多，分别为 $\sim 16.7\ \text{mg}$ 和 $\sim 24.8\ \text{mg}$ 。

D03-051

非晶合金表面原子的准二维强液体动力学

王兵*

西北工业大学

非晶合金表面的快动力学特性在其潜在应用扮演着重要的角色。但，由于实验和模拟样品热历史的巨大差异，非晶合金表面的快动力学原子机制一直未被解决。本文采用了新开发的高效退火方法在模拟上实现了热历史具备巨大差异的非晶合金薄膜，并系统研究了他们的原子动力学行为。研究发现表面原子的动力学与热历史无关，而表面原子与内部原子的动力学异质性随热稳定性的提高而更加明显。这可由原子活化能谱理论解释，高稳定性下的非晶薄膜表面动力学行为快慢与距离表面深度关联更加明显。本研究揭示了限制在非晶合金表面的强液体动力学行为，这阐明了表面工程设计的潜在机制，例如，超声波冷焊及超晶格的生长等。

D03-052

不同模具制备的非晶合金腐蚀行为与腐蚀后力学行为的研究

张浩然、施志林、唐芑、蔡素磊、马明臻*

燕山大学

本文通过改变模具材料来调控 Vit 1 非晶合金凝固过程时的冷却速度，分别用铜模具、石墨模具和钢模具制备了 Vit 1 非晶合金。研究了冷却速度对 Vit 1 非晶合金在 $0.05\text{mol/L H}_2\text{SO}_4$ 、 0.1mol/L HCl 和 0.6mol/L NaCl 的溶液中的电化学腐蚀行为，浸泡腐蚀行为以及腐蚀后力学性能的影响。结果表明经过电化学腐蚀后的不同冷却速率制备的 Vit 1 非晶合金的拉伸性能与其腐蚀行为关系密切。在 H_2SO_4 腐蚀溶液当中，腐蚀前后的拉伸性能变化不大，这是缘于形成了稳定致密的钝化膜所致。在 HCl 和 NaCl 溶液中样品表面产生了明显的点蚀现象，力学性能与点蚀坑的深浅，大小有密切关系。其中石墨模具制备的 Vit 1 非晶合金由于具有较强的抗点蚀能力因此力学性能的劣化程度最小。在浸泡腐蚀过程中，样品表面并未发生点蚀现象，此时力学性能与非晶合金内部微观组织有关，经过浸泡腐蚀后，钢模具制备的非晶合金样品内部的有序结构消失，导致其力学性能下降最为明显。

D03-053

利用 DSC 简易认识弛豫与回春现象特征的思考

胡丽娜*

山东大学

差示扫描量热法 (DSC) 是测试材料热学性质的主要手段之一。通过不同策略开展的 DSC 扫描曲线，也可以给出非晶合金动力学演变信息。本报告介绍了如何利用 DSC 曲线的形状变化定性 (或定量) 认识非晶合金弛豫模式的特征、相关性等，并介绍了 DSC 曲线的变化对认识回春行为机理的重要性。在 DSC 曲线的指导下，可以对高熵合金超高的回春能力做出预测，并通过实验和模拟结果得到了很好的验证。这种方法也可以帮助我们定性探测纳米非晶、双相非晶合金的弛豫特点和回春特征。

D03-054

Cu 基非晶合金设计与电催化制氢性能研究

林怀俊*、简希颖、陈龙

暨南大学

金属铜并不是优异的电解水析氢反应 (HER) 催化剂材料, 然而, 当 Cu 基非晶合金处于长程无序的非晶状态时, 可以获得小的氢吸附吉布斯自由能 (ΔG_H)。基于此, 我们通过磁控溅射法制备了一系列非晶态 Cu-X (X=W, Ti, V, Cr, Zr, Nb, Mo, Ta) 合金用于电解水析氢催化剂。结果表明 Cu-W 和 Cu-Mo 体系非晶合金是高活性、高稳定性的 HER 催化材料。当成分为 Cu50W50 时可获得最佳的综合 HER 催化性能, 在 1 M KOH 中, 在 10 mA cm⁻² 的电流密度下过电位仅为 65 mV。密度泛函理论计算表明, 与纯铜和纯钨相比, 非晶态 Cu50W50 合金的 ΔG_H 接近于零。此外, 非晶态 Cu50W50 合金在 100 mA cm⁻² 电流密度下可持续催化 HER 反应 200 小时而没有明显的成分降解。对体心立方金属 Cu、面心立方金属 W 和非晶态 Cu1W1 合金进行了密度泛函计算, 发现非晶态 Cu1W1 在费米能级附近拥有最大的态密度, 且 ΔG_H 接近于零, 揭示了非晶态 Cu-W 合金拥有优异 HER 催化活性的原因。综上所述, 该材料可以作为高效的非贵金属电解水析氢催化剂使用, 并为制备完全不互溶体系非晶合金提供了新思路。

D03-055

基于机器学习的高熵合金设计

饶梓元*

上海交通大学

高熵合金是由多种主要元素组成的固溶体, 具巨大的成分空间和优异的性能。现有的热力学合金设计规则在高维成分空间中往往失效, 发现具有优异性能的高熵合金往往过于依赖于随机实验。我们提出了一种主动学习的机器学习策略, 能够基于非常稀疏的数据点在几乎无限的成分空间中加速高熵合金的设计。我们的方法将机器学习与密度泛函理论、热力学计算和实验相结合形成一个闭环工作。在对数百万种可能成分中的 17 种新合金进行加工和表征后, 我们确定了两种具有极低热稳定性的高熵合金, 它们在 300 K 时的膨胀系数约为 $2 \times 10^{-6}/K$ 。我们相信基于机器学习的方法是未来快速发现具有最佳热、磁和电性能的高熵合金的合适途径。

D03-056

BCC/B2 高熵合金的结构-功能性一体化设计

王清*

大连理工大学

本工作利用团簇成分式方法在 Al-LTM(后过渡金属)和 Al-ETM(前过渡金属)体系中设计了系列合金成分, 获得了 BCC/B2 共格组织, 并研究了不同粒子形貌对合金力学性能的影响、以及共格组织在高温长期时效后的稳定性。结合热动力学分析和相场组织模拟, 揭示影响共格组织形貌和稳定性的关键因素。最为重要的是, 在确保力学性能的同时, 合金还具有优异的功能性, 如软磁性能、高热焓、高稳定性、抗辐照性能等。由此, 通过成分设计, 可实现对合金共格组织的调控, 进而实现合金力学性能与功能性能等多个性能的协同调控。

D03-057

FCC/BCC 双相高熵合金的高温变形机制---高温孪晶与高温马氏体相变协同作用

柳林*、郭容

华中科技大学材料学院

高熵合金 (HEAs) 以其独特的原子结构特征和优异的力学性能成为近年来金属材料领域的新热点。但大多数单相 HEAs 仍不可避免存在倒置的强度-塑性关系, 具有 BCC (或 HCP) 结构的 HEAs 通常表现出高强度和低塑性, 而具有 FCC 结构的 HEAs 则表现出高塑性和低强度, 而拥有 FCC+BCC (HCP) 双相结构的高熵合金中是获得良好强-塑性配置的一个有效途径。我们基于价电子浓度 (VEC) 理论, 成功设计出体积分数相近的 FCC+BCC 的双相高熵合金 $\text{AlCoCrFeTi}_{0.5}\text{Ni}_{2.5}$, 该合金在室温下呈现出良好的强塑性配比, 屈服强度达 1.41 GPa, 塑性应变达 31.8%, 缺口断裂韧性达 $64.3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。在本工作中, 我们重点研究了这一双相高熵合金的高温性能和变形机制。高温 (500°C - 800°C) 压缩实验表明, 该双相高熵合金具有优异的高温性能, 如在 600°C 下, 屈服强度超过 1000 MPa, 并保持卓越的加工硬化能力。即使在 700°C 下, 屈服强度保持在 900 MPa 以上, 优于 Ni 基高温合金 (如 IN 718) 和部分难熔高熵合金的高温力学性能。微结构分析表明, 这一双相高熵合金的优异高温性能源于 FCC 相中形成高密度纳米孪晶和 BCC 相中发生马氏体相变的共同作用。而 FCC 中存在的强局域化学有序诱导全位错分解是激发高温变形孪晶形成的关键。这一工作为开发兼具良好室温和高温性能的双相高熵合金提供了结构设计的新策略。

参考文献:

R. Guo, L. Liu, et al, Achieving prominent high-temperature mechanical properties in a dual-phase high-entropy alloy: A synergy of deformation-induced twinning and martensite transformation. *Acta Mater* 264(2024)119591

D03-058

稀土元素 Nd 的添加对 $\text{Mg}_{100-x}\text{Nd}_x$ 合金非晶转变和晶化过程的影响

范浪涛¹、梁永超²、郑智展¹、周丽丽*¹、蒋元琪³、莫云飞⁴、田泽安⁵、王慧杰¹、韩蕾¹

1. 赣南医科大学
2. 贵州大学
3. 南昌师范学院
4. 长沙学院
5. 湖南大学

本文通过分子动力学模拟方法研究了组分比对 $\text{Mg}_{100-x}\text{Nd}_x$ 合金在快速凝固过程中相变的影响。采用基于新提出的最大标准团簇法 (LaSCA) 的几个结构参数以及均方位移, 揭示了 Nd 原子含量对体系相变的复杂影响。结果表明, 拓扑密堆团簇 (TCP) 结构在稳定过冷液体方面的作用远大于二十面体结构, 从而具有较强的抵抗结晶的能力。随着 Nd 原子含量的增加, 系统的玻璃化转变温度 (T_g) 增加到 700 K 左右后, 基本保持稳定。直到 $x \geq 70$ 时, 系统发生晶化。这是因为 Nd 原子含量的增加促进了 TCP 结构的形成, 直到 $x=25$ 时达到峰值。同时, Nd 原子含量的增加使体系的动力学不断减慢, 从而维持 T_g 在一个较高的温度值, 同时促进了系统的晶化。因此, 由于结构和动力学的共同作用, 体系的玻璃形成能力在 $x=25$ 处达到峰值。这些发现为揭示稀土元素添加对液态合金相变影响的微观机制提供了有价值的见解, 对新型非晶合金材料的开发具有重要意义。

D03-059

钨颗粒增强 Zr 基非晶合金复合材料的放电等离子烧结制备与力学性能研究

龚攀*¹、马云飞¹、丁华平¹、姚可夫²、王新云¹

1. 华中科技大学材料科学与工程学院
2. 清华大学材料学院

钨增强非晶合金复合材料具有高的剪切“自锐性”和无毒性, 是一种有望取代钨重合金和贫铀合金的新型穿甲弹弹芯材料。本文通过放电等离子烧结 (SPS) 工艺成功制备了致密化程度高、增强相分布均匀、基体为完全非晶态结构且力学性能优异的钨颗粒增强非晶合金复合材料 (Wp/BMGCs)。系统的研究了烧

结工艺、增强相体积分数和增强相粒径尺寸对复合材料准静态力学性能、动态力学性能和侵彻穿甲性能的影响。并结合有限元模拟共同分析了 Wp/BMGCs 烧结过程中微观组织演变过程、致密化机理、强韧化机理和断裂失效行为。研究发现在 Zr55Cu30Al10Ni5 基体中添加第二相钨颗粒后，断裂强度和塑性得到显著提高。随着 Wp 体积分数的增加，Wp/BMGCs 具有更高的塑性应变。而增强相体积分数相同的情况下，随着 Wp 粒径尺寸减小，增强相与非晶基体的界面增多。因此小尺寸的增强相具有更好的强化效果。上述研究对于提高我国军事竞争力，促进非晶复合材料在国防军事领域的应用具有重要的意义。

D03-060

金属玻璃原子团簇结构的自适应中心求和矢量参数

吕国建*、赵思瑾、乔吉超

西北工业大学力学与土木建筑学院

本文通过分子动力学模拟技术深入探讨了金属玻璃中原子团簇的结构特性，并引入了一种自适应的中心求和矢量参数。这一参数不仅能够一定程度反映原子团簇的对称性，还与原子的局部结构熵紧密相关，为快速揭示玻璃材料中原子局部特征提供了一种有效的量化工具。此外，该参数的运用还有助于区分不同晶体和非晶体结构中的原子。在剪切带附近，原子团簇的破坏和重组过程中，我们观察到这些团簇的中心求和矢量分布与周围其他原子并无显著差异。进一步通过激活能谱抽样分析方法，我们发现中心求和矢量的模值越小，其原子的激活能越高，意味着这些原子更难被激活。这些发现为深入理解金属玻璃复杂的局部结构提供了新的视角，并可能对材料设计和性能优化提供指导。

D03-061

Strong and ductile high-entropy materials with excellent multifunctionality

Zhiming Li*

Central South University

Multicomponent high- and medium-entropy alloys (HEAs & MEAs) composed of multiple principal elements have attracted great interest owing to their considerable potentials for achieving unprecedented properties in their practically infinite compositional space. Apart from exceptional mechanical properties such as high strength and good ductility, it has been shown that excellent magnetic, electrical and thermal properties can also be involved in HEAs & MEAs via compositional and microstructural design. In this talk, we will present the unique combinations of multiple functions and even mutually exclusive properties that we have successfully achieved in recently developed multicomponent HEAs/MEAs. The multiple functions include high strength, good ductility, electrical resistivity, soft magnetism, low thermal expansion (Invar), resistance to corrosion and hydrogen embrittlement. The associated design strategies will be clarified and some potential directions for further developing multifunctional HEAs/MEAs will also be briefly discussed.

D03-062

B2 相增强 NiCoCr 基异质结构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.

D03-063

添加 Nb 对 Zr-Cu-Al-Ni-Ag 非晶合金形成能力及腐蚀性能的影响

蔡素磊、施志林、张浩然、唐芑、马明臻*

燕山大学材料科学与工程学院

通过使用海绵锆为原料降低成本的同时保证非晶合金依旧具有与纯锆为原材料的非晶合金相似优良性能。本文以 Zr57Cu20Al10Ni8Ag5 非晶合金体系作为研究对象, 采用海绵锆和纯锆两种原料。由于海绵锆中存在其他杂质可能对其体系的玻璃形成能力以及耐腐蚀性有所影响。以海绵锆为原料的基础上添加微量元素 Nb 的来改善其玻璃形成能力和耐腐蚀性能。对以海绵锆为原料的 (Zr57Cu20Al10Ni8Ag5)_{100-x}Nbx (X=0、1、2、3) 和纯锆为原料的 Zr57Cu20Al10Ni8Ag5 通过 X 射线衍射测试和在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀行为进行研究。结果表明: 海绵锆中适量 Nb 的加入提高了该体系的玻璃形成能力。在 NaCl 溶液中, 在未添加 Nb 时, 纯锆和海绵锆相比, 采用海绵锆为原料时耐腐蚀性降低。当在海绵锆中添加 Nb 时, 随着 Nb 含量增加, 材料的耐腐蚀性提高。在 X=3 时, 耐腐蚀性能比纯锆的更好。

D03-064

应变速率和温度对增材制造高熵合金动态行为的影响

宋卫东*、刘姗姗

北京理工大学

随着高性能合金在极端环境中需求的增加, 新材料的研发变得日益活跃。高熵合金(HEAs)由于其卓越的性能而被认为是一种有潜力的候选材料。尽管 HEAs 展现出了卓越的力学性能, 但对极端条件下增材制造的 HEAs 的机力学能和微观结构的研究仍不够充分。因此, 本文研究了选择性激光熔融(SLM)制备的 CoCrFeMnNi HEAs 在高应变速率和不同温度下的准静态和动态力学性能。通过微结构表征发现, 增材制造样品具有单一面心立方(FCC)相和柱状晶结构, 在晶粒内部, 由于 SLM 过程中施加的高冷却速率, 出现了大量位错和亚结构。增材制造样品在从准静态到动态加载的变形过程中表现出明显的应变速率依赖性。与准静态力学性能相比, 增材制造 HEA 在动态加载下表现出更高的动态屈服强度, 更加显著的应变硬化行为, 并且在低温动态加载时表现出更大的塑性。随着应变速率的增加, 增材制造 HEAs 的屈服强度明显高于铸态合金, 且沿建造方向(BD)样品的强度变化比扫描方向(SD)样品更为显著。强度的增强归因于沿不同构建方向的晶粒取向和位错分布特征的差异, 以及应变速率的依赖性。加载过程中, 常温下材料以位错滑移和形变孪晶机制为主, 而低温下以多级孪晶机制为主, 有利于提高应变硬化速率和塑性。对 HEAs 在极端条件下的变形机制进行了深入研究, 有助于推动 HEAs 在未来的应用。

D03-065

微量钕添加对 Zr-Cu-Ni-Al-Nb 非晶合金形成能力及性能影响

唐芑、施志林、张浩然、蔡素磊、马明臻*

燕山大学材料科学与工程学院

本文通过选择 $(\text{Zr}_{56}\text{Ni}_{20}\text{Al}_{15}\text{Cu}_5\text{Nb}_4)_{100-x}\text{Y}_x$ ($X=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 \text{ at.}\%$) 添加稀土元素 Y 进行了成分的设计与调整, 得到具有高玻璃形成能力及热稳定性的合金成分, 拓宽了探寻大玻璃形成能力非晶合金。使用晶体锆和海绵锆制备的不同直径的非晶合金, 并进行热力学分析, 改变升温速率得出不同的特征温度以及同一升温速率不同 Y 含量所得出的不同特征温度。使用海绵锆制备的 BMG 与晶体锆制备的 BMG 进行性能对比, 实验表明 Y 含量添加 0.2% 时用晶体锆及海绵锆制备的 BMG 非晶形成能力较好, 制备出 12mm 非晶棒材; 在同一升温速率下两者的特征温度也呈现不同的变化规律; 力学性能随着 Y 的添加, 两者都呈现降低的趋势。本文意在寻找出一种低成本 Zr 基非晶合金体系, 其具有优异性能、无毒以及高 GFA, 进一步降低成本, 扩大此类先进材料的广泛实际应用。

D03-066

Zr 基块体金属玻璃在线性往复滑动下对抗 Si_3N_4 的摩擦学行为

谢朝聚、张猛*

暨南大学先进耐磨蚀及功能材料研究院

块体金属玻璃 (BMG) 由于独特的无序原子结构引起了研究人员的极大兴趣, 摩擦学领域也不例外。然而, BMG 的摩擦学行为取决于配合材料, 关于 Zr 基 BMG 对抗陶瓷的摩擦行为研究仍有待完善。本文通过往复滑动试验, 选用多个滑动参数, 包括 1-12N 的法向载荷和 1-12Hz 的往复频率, 滑动行程固定在 5mm, 研究了 $\text{Zr}_{60.14}\text{Cu}_{22.31}\text{Al}_{9.7}\text{Fe}_{4.8}\text{Ag}_3$ BMG 对抗 Si_3N_4 的摩擦行为。结果显示, 摩擦行为与法向载荷、往复频率密切相关。具体而言, 随着往复频率的增加, 摩擦系数 (COF) 呈上升趋势, 而法向载荷的增加 COF 呈下降趋势。同时, 磨损率随着法向载荷的增加而增加, 而往复频率的增加磨损率最初降低随后增加。进一步对磨损表面、磨损碎屑和配合材料的表征证实了主要的磨损机制是磨粒磨损或磨粒磨损和氧化磨损的组合。此外, 随着往复频率的增加, 氧化磨损逐渐向粘着磨损转变。

D03-067

Mn 对 FeCoNiBMn 高熵非晶合金结晶行为和磁性能的影响

王少华、朱胜利*

天津大学

FeCoNi 基高熵合金因其良好的热力学稳定性、综合力学性能和软磁性能而备受关注。设计了 FeCoNiBMn 高熵非晶合金 (HEAAs), 研究了 Mn 对其结晶行为、磁性能和力学性能的影响。FeCoNiBMn HEAAs 的结晶行为为: 1) Mn12-16 ($\Omega_A < 0.555$): $\text{am} \rightarrow \text{am}' + \text{M}_{23}\text{B}_6 \rightarrow \text{M}_{23}\text{B}_6 + \text{fcc}$; 2) Mn18-20 ($0.555 < \Omega_A < 0.606$): $\text{am} \rightarrow \text{am}' + \text{bcc} + \text{M}_{23}\text{B}_6 \rightarrow \text{bcc} + \text{M}_{23}\text{B}_6 \rightarrow \text{fcc} + \text{M}_{23}\text{B}_6$; and 3) Mn22 ($\Omega_A > 0.606$): $\text{am} \rightarrow \text{am}' + \text{bcc} \rightarrow \text{bcc} + \text{M}_{23}\text{B}_6 \rightarrow \text{fcc} + \text{M}_{23}\text{B}_6$ 。定义了一个新的参数 Ω_A 用以预估初始结晶相。FeCoNiBMn HEAAs 在铁磁性元素较低的情况下仍具有较高的饱和磁化强度。所有淬火态的 FeCoNiBMn HEAAs 矫顽力都很低, 小于 1.5 A/m。即使在完全结晶后, Mn14 合金仍然表现出低于 4 A/m 的极低矫顽力。

D03-068

SiC 纳米颗粒的添加对 AlTiVNbNi 高熵合金微观组织结构和宽温域摩擦学性能的影响

胡明川、杜银、李涛、裴旭辉、王瀚铭、王海丰*

西北工业大学

难熔高熵合金具有优异的高温力学性能和热稳定性, 作为高温结构材料具有广阔的应用前景。本研究旨在探索通过引入陶瓷相颗粒来进一步提高难熔高熵合金的综合性能。采用放电等离子烧结法制备了一种新型的 $\text{Al}_{0.8}\text{TiVNbNi}_{0.2}(\text{SiC})_{0.2}$ 难熔高熵合金基复合材料, 系统地分析和讨论了掺入 SiC 纳米颗粒的复合材料的微观结构演变、力学性能和高温摩擦学性能的差异。结果表明, 在烧结过程中, SiC 颗粒与基体合金

发生原位反应, 形成 TiC 和 Nb_5Si_3 相, 显著提高了力学性能。同时, 在较宽的温度范围 (室温至 800°C) 内, $\text{Al}_{0.8}\text{TiVNbNi}_{0.2}(\text{SiC})_{0.2}$ 复合材料的耐磨性相较于 $\text{Al}_{0.8}\text{TiVNbNi}_{0.2}$ 合金显著提高。一方面是由于原位增强相的形成提高了力学性能, 从而提高了耐磨性。另一方面, 所产生的硅氧化物提高了在高温下形成的摩擦层的连续性和致密度, 从而显著降低了磨损率。

D03-069

高性能非晶软磁合金的研究动态与应用前景

姚可夫*

清华大学/Tsinghua university

在软磁材料大家族中, 非晶软磁合金是一个新成员。自 1967 年, 非晶软磁合金材料在 Duwez 的实验室问世, 至今也仅 50 余年, 而进入工业化生产和开始走入应用也仅 40 余年。但与传统晶态软磁材料不同, 非晶软磁合金因原子堆垛呈长程无序的结构特征, 使其具有饱和磁感强度较高、磁导率高、矫顽力低、铁损低等优异软磁性能, 自问世便受到科技工作者和工程技术人员的高度关注和重视, 并很快就在配电变压器中作为铁芯得到应用。随后又在高频变压器、共模电感/滤波电感、无线充电等电力、电子、通讯等领域得到广泛应用。非晶软磁合金材料也经历了第一代、第二代的发展, 并已进入了第三代高性能材料研发与应用阶段。特别是近年第三代半导体走向应用, 给非晶软磁材料和磁性元器件带来了新的要求、挑战和需求。必须研发面向第三代应用的高性能软磁材料及磁性器件加工形成技术, 以满足不断提升的性能要求和应用需求。本文将总结非晶软磁合金材料的发展历程、研究动态, 分析非晶软磁合金材料的发展趋势, 介绍非晶软磁合金材料和器件的应用状态和应用前景。

D03-070

基于多任务生成式深度学习的铁基软磁金属玻璃性能逆向设计研究

李茂枝*

中国人民大学

铁基金属玻璃由于其优异的软磁性能, 在能源转换、电子设备和信息通讯等多个领域展现出显著的应用价值。然而, 传统的设计方法依赖于耗时的试错实验, 并面临磁饱和强度、矫顽力与玻璃形成能力间复杂权衡的挑战。针对这一问题, 我们提出了一个多任务生成式深度学习模型(MTWAE), 利用 Wasserstein 自动编码器(WAE)来逆向设计高性能铁基金属玻璃。MTWAE 不仅能够揭示合金成分与性能之间的联系, 还整合了多个性能预测任务。MTWAE 模型直接生成的具有高磁饱和强度($B_s > 1.5\text{T}$)的新型金属玻璃得到了实验的验证。更重要的是, MTWAE 具有可解释性, 可以直接揭示“元素-性质”的相关性, 有助于指导未来的材料设计。利用多任务学习框架, MTWAE 模型在多目标预测方面表现出优异的准确性。因此, MTWAE 模型能直接生成具有高饱和磁化强度、低矫顽力和高玻璃形成能力的新金属玻璃, 为铁基软磁金属玻璃的开发和性能优化提供了新的逆向设计策略。

D03-071

玻璃中由应变驱动的记忆效应

童钰、宋丽建、王军强*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

玻璃材料如金属、有机和硅酸盐玻璃, 在工程应用中广泛用作结构材料, 但它们在使用中易遭遇应力松弛, 影响性能与寿命。因此提升抗应力松弛能力对延长玻璃使用寿命至关重要。玻璃的机械性能与能量状态紧密关联, 应力松弛与退火老化过程相似, 均涉及从高能状态到接近热力学平衡态的过程。Kovacs 教授于 1963 年提出的双步退火方法, 通过引发“回春”效应 (Kovacs 记忆效应), 展现了抗老化的可能。本工作旨在探索双步加载是否能引发类似的应力记忆效应, 从而增强玻璃的抗松弛性能。

我们在多种玻璃中发现了 Kovacs 式的应力记忆效应，该效应在从高应变至低应变的双步加载中展现为非单调的应力松弛。在应力松弛过程中，如果应变从高状态跳跃到低状态，应力不会持续下降，而是先升高再降低。当原子运动变得更加协同且激活能较大时，例如预加载的应变较大、温度较高且加载时间较长，记忆效应会增强。通过弛豫动力学和原位同步辐射 X 射线实验，揭示了应力记忆效应的物理起源。第二阶段恒应变加载时出现的反常应力递增现象，可以显著抵抗因应力衰减导致的结构失效。

D03-072

非晶合金低弹性损耗特性的表征与结构关联性研究

金肖¹、童钰¹、高萌¹、王利民²、霍军涛¹、王军强^{*1}

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所
2. 燕山大学

弹性材料在工程运输、电力电子以及声学等领域被广泛使用。弹性装置服役时要求材料具有优异的静态和动态弹性性能，主要表现为较高的弹性应变极限和较低的阻尼损耗。前者影响材料的弹性强度、抗变形性和使用寿命，后者影响装置的灵敏度和稳定性。非晶合金由于其三维无序结构表现出高于多晶材料的弹性极限，可达 2% 以上，具有优异的静态弹性性能。而材料的动态弹性性能也就是损耗，主要由材料结构的内摩擦决定。与弹性极限的研究相比，非晶的损耗仍然缺乏定量的表征手段与物理机制的研究，这限制了非晶合金作为弹性材料的进一步开发与应用。针对这一关键科学问题，我们搭建了悬臂梁动态弹性测量装置，测量了非晶合金与几种常见晶态弹性合金的振动损耗，定量表征了非晶合金优异的抗损耗性能。结合弛豫动力学测试，证实非晶合金的阻尼损耗与损耗角正切值线性相关，即损耗源于非晶合金的室温下的弛豫行为。通过纳米压痕实验与碰撞测试，发现阻尼损耗与模量、硬度等关联性不高，而与弹性极限直接相关，进而建立了非晶合金静态与动态弹性性能之间的关联。这些发现为开发非晶合金弹性性能开辟了一条新途径。

D03-073

非晶合金塑形成形的中程序演变规律研究

刘思楠¹、兰司^{*2}、任洋¹、王循理¹

1. 香港城市大学
2. 南京理工大学

对大块金属玻璃（Bulk metallic glass, BMG）的变形过程中结构-性能关联的深入理解将有利于对塑性 BMG 的开发。但由于 BMG 的非均匀变形机制而具有有限的宏观室温塑性。为解决这一关键问题，一系列微观变形理论被提出，如自由体积、剪切转变区、类液区和流动单元。然而，上述微观变形理论的潜在原子级结构起源尚未被考虑。同时对变形过程剪切带、纳米异质相等介观结构与原子结构的交互机制也不明确。因此，利用原位同步辐射力学加载手段研究了 BMGs 的在不同条件下的变形行为。研究表明，包套压缩 BMG（Canning-compressed BMG, CC-BMG）与铸态样品相比具有更好的拉伸塑性和更高的屈服强度，在中程序尺度上具有不均匀和松散的局域有序结构。CC-BMG 存在两个塑性变形阶段，而非铸态铸态的单一阶段。实空间分析证明了 CC-BMG 塑性变形过程中边共享和面共享中程序团簇连接模式之间的竞争机制。通过原位散射手段研究了 Pd-Si BMG 在低温和室温下变形行为的差异。实验结果表明低温环境可以抑制锯齿流变行为。原位散射数据表明低温下样品具有更密集的局域堆积结构。实空间数据表明，与室温变形样品不同，低温变形样品的中程序结构有序度在塑性阶段快速提升，对应流变单元被快速消耗，加快了剪切带的形核使锯齿流变得到抑制。最后研究了 Pd-Si BMG 循环加载应变强化的结构起源，发现应变强化来自初次加载引入的更加无序且松散堆积的局域序构，应变强化过程短程序和中程序结构趋向于致密和有序化，越大尺度壳层的结构对应响应越显著，进一步说明中程序结构可能是主导塑性变形的结构单元。上述研究揭示了 BMGs 在不同条件下变形原子尺度非均匀结构的转变机制以及跨尺度结构的耦合关联，将为理解 BMGs 塑性结构起源提供理论支持。

D03-074

非晶合金太空制造技术研究进展

赵少凡*、刘明、周传昆、汪卫华

中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室

面向航天器中电磁功能部件应用需求,突破空间环境下低功耗、高效率金属材料太空制造技术是关键。选用非晶合金为太空制造原材料,研究其在高低温环境下的动力学行为,由此提出了原材料筛选依据。发现了块体非晶合金表面在超高真空、低温环境下具有自粘特性。结合非晶合金低温热塑性、高电阻等特性,提出开发了适用于空间环境的阻热制造工艺,可实现多种功能部件的高效制造,相关研究成果获国家认可,被列入在轨实验计划。

D03-075

增材制造兼具优异强度和延展性的缓梯度界面异质结构中熵合金

孙永刚¹、黄永江*¹、宁志良¹、孙剑飞¹、颜庆云(A.H.W.Ngan)²

1. 哈尔滨工业大学

2. 香港大学

增材制造(AM)现已被确立为一种通用的近净成形制造技术,允许通过逐层结构自由设计和一体化成形复杂结构的部件。目前,一些使用激光定向能量沉积(L-DED)AM制造层状异质结构高熵合金的研究表明,可以通过软组分和硬组分的组合来提高强度。然而,两层之间的界面在变形的早期阶段容易失效,导致强度提高有限,延展性较低。此外,在沉积过程中,界面处不可避免地发生重熔和稀释,这可能会形成一些脆性的金属间化合物,从而恶化材料的界面性能。另一方面,与铸态和热变形态金属材料相比,AM制造的金属构件由于初始粗大的柱状晶体微观结构,通常具有较差的强度和/或延展性、机械性能相对明显的各向异性,以及析出相体积分数不足等问题。用于性能调控的传统热机械方法(如冷轧或再结晶等)具有形状破坏性,不适合于对AM构件进行后处理。因此,找到合适的AM工艺以获得具有高强度-延展性协同作用的金属构件,是一个重要且具有挑战性的问题。

本研究中我们展示了一种有趣的双粉末源合金体系:(i) CoCrNi 中熵合金(MEA)和(ii)添加了单质 Ti 和 Al 以及相同 MEA(其名义成分为(CoCrNi)86Al7Ti7,下面简称 Al7Ti7),采用 L-DED 对两种粉末源交替进行沉积,随后对沉积构件进行非形状破坏性的热处理,所获得的构件表现出强度和延展性的显著协同作用(极限抗拉强度超过 1GPa,延展性接近 50%)。使用强度乘以延展性作为优值,这种 L-DED 合金体系比报道的其他中/高熵合金表现出更优异的强度-延展性协同作用。优异机械性能的关键是 L-DED 过程促进了异质结构(HS)的形成,该异质结构由韧性 CoCrNi MEA 和弥散分布有金属间化合物相(L1₂)的同一合金交替组成层状异质结构,这些交替形成的层间具有缓梯度界面的微观结构,具有这样结构的 MEA 既强且韧。值得注意的是,由于 Al7Ti7 层的成分被稀释,形成的缓梯度界面异质异质结构,其机械性能在各层上逐渐波动,但在变形过程中两层之间将发生小的塑性应变失配,因此裂纹不会优先发生在界面处。基于微观结构观察,热处理态 HS MEA 的高强度可归因于固溶强化、沉淀强化、位错相互作用以及位错与层错(SF)和孪晶的相互作用,这些皆对应于系统中显著的背景应力,其导致的高应变硬化率亦将引起颈缩阻力,这是抑制颈缩以提高延展性的重要因素,而 Al7Ti7 层的变形需要更大的外部应力,最终导致了 HS MEA 表现出更高的强度。

D03-076

CoCrFeMnNi 高熵合金电脉冲加速再结晶行为的研究

件志丞、徐晓峰、赵洋*、严旭东、周亚冲、魏来、于永强

吉林大学

本文研究了退火温度（700 °C、800 °C）和升温速率（0.17 °C/s 的低升温速率（LR）、500 °C/s 的中等升温速率（MR）和 4000 °C/s 的高升温速率（HR））对等原子 CoCrFeMnNi 高熵合金(HEA)再结晶行为的影响。通过微观结构和几何必要位错(GNDs)的演化分析阐明了电脉冲处理(EPT)诱导的加速再结晶行为机制。结果表明，随着退火升温速率的增加，再结晶区的平均 GNDs 密度和晶粒尺寸减小。在 700 °C 时，随着退火升温速率的增加，平均再结晶晶粒尺寸从 6.1 μm 减小到 2.2 μm 。在 800 °C 时，HR 材料表现出更高的再结晶百分比，平均晶粒尺寸相应地从 LR 的 12.5 μm 减小到 HR 的 4.7 μm 。EPT 通过降低再结晶形核势垒来提高再结晶形核率。700 °C 退火后，MR 样品的屈服强度（772 MPa）和断裂伸长率（0.30）与 LR 相比分别提高了~31% 和~25%。这项工作为通过 EPT 在较低的轧制量下加速再结晶行为和进一步提高 CoCrFeMnNi HEA 的晶粒细化程度提供了重要的见解。

D03-077

FCC 结构高熵合金的动态响应行为

薛云飞*、肖遥、曾庆磊、曹堂清
北京理工大学

FCC 结构高熵合金表现出了明显不同于传统 FCC 合金的动态响应特征，典型案例如下：

（1）不同于传统 FCC 固溶体合金的应变率不敏感，FCC 固溶体高熵合金不仅表现出更为显著的应变率强化效应，且应变率敏感系数突变所对应的临界应变率也更低。这主要与高熵合金连续晶格畸变效应密切相关。一方面，高熵合金位错运动的阻力由于连续晶格畸变产生了更为短程的应力场，只在几十个原子范围内，所以强烈受热激活影响，表现出明显的率相关性；另一方面，连续晶格畸变带来的高声子拖曳作用，导致高熵合金更早接近位错速度上限，迫使位错快速增殖导致应变率敏感系数突增现象向低应变率偏移。

（2）不同于传统高含量共格 L12 析出相 FCC 合金的强抗失稳能力，相同结构的 FCC 高熵合金，却表现出了极易失稳的能力，而同时还保留了 FCC 高熵基体强应变率强化和加工硬化能力。这是由之前完全没有报道过的全新机制主导的，即随着动态变形导致温升，高含量析出强化相低温、瞬间回溶，使局部强度急剧下降，加速剪切失稳。这种低温、瞬时的回溶是由析出相的纳米尺寸、低能量界面及调幅结构等特点共同促成的。

相关研究深化了对 FCC 结构高熵合金的动态塑性变形及失效机理的认识，为设计和制造具有优异动态力学性能的高熵合金提供了指导。

D03-078

多孔非晶与高熵材料的设计及储能应用

王志峰*、秦春玲
河北工业大学

非晶合金与高熵材料在很多领域已展现出非常独特的应用潜质，近年来相关材料在功能化应用方面逐渐大放异彩。报告介绍了团队在多孔非晶和高熵材料领域的研究进展，展示了相关材料的设计、合成及其在锂离子电池、锂硫电池中的应用情况。利用双相非晶合金脱合金制备了多孔非晶合金网络，研究发现材料表面团簇对多硫化物有很好的吸附作用，能够作为良好的载硫体，该网络在循环过程中同时展现出较好的结构完整性。进一步通过第一性原理计算和机器学习等手段，分析了材料表面活性位点的分布情况，为设计更合理载硫体提供参考。利用熵工程策略，分别合成了具有不同构型熵的尖晶石氧化物材料，发现随着构型熵的提高，材料作为锂离子电池负极展现出更好的长循环稳定性。熵工程策略进一步用于富锂锰氧正极材料的设计，展现出非常好的结构稳定性和循环稳定性。相关策略为更多材料的结构设计提供参考。

D03-079

稀土基非晶合金亚稳特征调控及其对磁热性能的影响

尹航博策、李凤梅、马云爽、宋丽建、高萌、张岩、许巍、王军强、霍军涛*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

磁热非晶合金是一种典型二级相变材料，稀土元素具有较大磁矩，使得稀土基非晶合金具有二级相变合金中较高的磁熵变值、较宽的制冷温区、较大的制冷能力和极小的热滞与磁滞。然而，目前研究的稀土基非晶合金所获得的较大磁热性能是在超导体所提供的极大磁场(5 T)下获得，而在低磁场下(如 2 T，商业永磁体可提供最大磁场)，合金磁热性能大幅降低。提升稀土基非晶合金磁热性能是该类合金应用于磁致冷领域亟需解决的关键问题。非晶合金为亚稳材料，亚稳特征调控对非晶合金磁热性能具有显著影响。本团队近期利用退火处理 TmCuAl 非晶合金，结果发现随着退火时间的延长，合金均匀性与磁熵变值均呈现先升高后降低的趋势，合金磁熵变峰值最大提升 23%，证明稀土基非晶合金均匀性变化可影响合金磁热性能。本团队利用金属间化合物成分制备出稀土-Al 非晶合金，合金在退火晶化过程中产生的中间相、主要晶体相与非晶相成分一致，合金磁熵变值随着晶化相产生次序呈现先升高后降低的趋势，各退火样品不同结构中稀土-稀土元素间耦合作用的不同对样品磁基态具有重要影响作用，进而影响合金磁熵变值。

D03-080**TiAl 基合金用新型 Ti-Zr-Cu-Ni(-Nb)系非晶/纳米晶钎焊材料**

李胡杨、逢淑杰*、白雪垠、彭绕、张涛

北京航空航天大学

TiAl 基合金是极具潜力的新型轻质高温结构材料，实现 TiAl 基合金的高强度钎焊连接对于推动实际应用具有重要意义。钎料是影响钎焊接头性能的重要因素，非晶合金作为一类新型钎焊材料应用时具有成带性好、成分均匀、材质纯净等诸多优势。本研究针对 TiAl 基合金的钎焊连接，设计制备了新型 Ti-Zr-Cu-Ni(-Nb)系非晶/纳米晶钎料，并对其非晶形成及钎焊 TiAl 基合金接头的组织结构和力学性能进行了研究。结果表明，随着 Nb 含量的升高，Ti-Zr-Cu-Ni(-Nb)系合金的非晶形成能力下降，但仍能够形成厚度达 40 μm 、具有非晶或非晶/纳米晶结构的连续柔韧的钎料薄带。采用上述新型 Ti-Zr-Cu-Ni(-Nb)系钎料在 1223K/30min 工艺参数下钎焊得到的 TiAl 基合金接头主要由 $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al} + (\text{Ti}, \text{Zr})_2(\text{Cu}, \text{Ni})$ 基体和钎缝中心位置的析出相构成。随着钎料中的 Nb 含量的提高，所获得接头中的析出相由岛状的 $\alpha_2\text{-Ti}_3\text{Al} + \alpha\text{-Ti}$ 变为几乎连续分布的 $\text{B}_2 + \text{O-Ti}_2\text{AlNb}$ ，同时脆性金属间化合物 $(\text{Ti}, \text{Zr})_2(\text{Cu}, \text{Ni})$ 的含量降低，接头的压缩剪切强度显著提高，可达~236MPa。上述结果表明，通过提高非晶/纳米晶钎料中的 Nb 含量，能够有效改善 TiAl 基合金接头的组织结构和力学性能。本工作的研究结果为非晶合金的应用及实现 TiAl 基合金的高强度钎焊连接提供了科学依据。

D03-081**Performance strengthening and integrated forming for refractory high entropy alloy based on laser additive manufacturing**

Jianglong Cai, Hang Zhang*

Xi'an Jiaotong university

The high melting point and brittleness of NbMoTa based refractory high entropy alloy result in very high forming difficulty. Innovative solutions are provided for high-throughput development materials and efficient forming of refractory high-entropy alloy by laser additive manufacturing technology. The design method and criterion of high performance refractory high entropy alloy are proposed by using first principles, CALPHAD and other alloy design theories combined with deep learning. By addition of elements and composition optimization, the crack defects of the alloy were successfully transformed into stacking faults, and the defects of the alloy were suppressed. The developed high performance refractory high entropy alloy has a hardness greater than 600Hv, a compressive strength of 3.1GPa at room temperature, a tensile strength of 1.2GPa at room temperature and a

compressive strength of 1.0GPa at 1000°C. The self-developed numerical simulation software was used to assist the process design. Intelligent partition forming technology is used to realize intelligent identification of high warpage sensitive area and real-time process control, which solved the warpage problem of large size complex parts. Based on laser additive manufacturing technology, this research promoted the application of NbMoTa-based refractory high entropy alloy in the critical parts of extreme heat resistance, such as aerospace, energy and military equipment, through material design-metallurgy-forming synchronous manufacturing.

D03-082

三维微纳晶格材料构筑及其力学性能研究

兰司*、张文韬、英会强、娄宇、姚忠正、闫澳
南京理工大学

超材料（如晶格结构材料）因其轻质、高比表面积和定制形状的能力，在机械支撑和电催化等方面的应用引起了广泛的兴趣。尽管此前人们已经做出了各种努力，但跨尺度制造微纳晶格结构仍然是一项极具挑战性的任务。在此，我们提出了一种策略，通过磁控溅射在三维（3D）打印聚合物骨架上沉积高熵合金（HEA）和非晶合金涂层，从而拓展微纳晶格结构的应用方向。三维打印的模板采用了从非晶合金的中程序结构中衍生出来的六元三帽三棱柱（6M-TTP）结构。6M-TTP 的拓扑复杂性可提供应力释放通道，从而大大避免应力集中，而含有非晶和纳米晶成分的 HEA 薄膜则可通过尺寸硬化效应进一步强化晶格结构。得益于上述优势，制备出的聚合物/HEA 混合晶格表现出较高的比压缩强度（在密度低于 500kg m⁻³ 时约为 0.055MPa kg⁻¹ m³）、优异的弹性恢复能力（在大于 30% 的压缩率下约为 70% 的恢复率）、增强的塑性（40% 的应变）和较高的比模量（0.135MPa kg⁻¹ m³）。当我们将镍钼铌金属玻璃薄膜沉积到 3D 打印聚合物骨架上时，我们获得了兼具镍钼铌非晶合金高电化学活性和微纳米晶格结构稳定性的复合材料，其灵敏度高（482 μA mM⁻¹cm⁻²），线性范围宽（0-1 mM 和 1-5 mM），检出限低（2.94 μM），在碱性溶液中具有长期的稳定性和选择性[3]。我们的策略为制造具有更好机械性能的多尺度微纳晶格结构开辟了一条前景广阔的途径，可将其推广到广泛的超材料研究中。

D03-083

CoCrNi(Fe)-BSi 系高熵合金复合涂层的组织及耐磨耐蚀性能研究

陈浩、崔洪芝*
中国海洋大学

21 世纪是人类全面认识、开发利用和保护海洋的新世纪。海洋工程材料作为拓展海洋空间、开发海洋资源的物质前提，是实现海洋科技创新、海洋可持续发展的基础和先导。海洋工程装备长期处于严酷海洋环境下工作，关键件服役中经受磨损和腐蚀的交互作用。近几年来，高熵合金因其具有高的硬度和强度、良好的耐磨性能、出色的耐蚀性能得到广泛重视。利用高能束流加工技术在金属基体上制备高熵合金复合涂层，有望获得良好的耐磨耐蚀性能，延长关键部件的服役寿命。本课题以 CoCrNi(Fe)-BSi 高熵合金为基础，适当添加 Nb 或 Mo 元素，通过激光熔覆、等离子熔覆、激光重熔等手段制备了一系列不同成分的高熵合金复合涂层，并研究了涂层的物相、组织结构、耐磨性及耐蚀性，建立了涂层成分-工艺-组织-性能之间的联系。

D03-084

Zr63.5Cu23Al9Fe4.5 合金的 Fe、He 离子束辐照损伤研究

梅显秀*
大连理工大学

聚变反应堆内环境恶劣且复杂,除了 14 MeV 的中子辐照、H/He 等离子体辐照和热负荷,服役材料在多种辐照的协同作用下极易产生更加严重的结构损伤和性能退化。本研究在室温条件下对 Zr_{63.5}Cu₂₃Al₉Fe_{4.5} 非晶合金和相同成分的晶体合金进行 Fe+He 离子的同时辐照,并通过单独的 Fe 离子和 He 离子辐照结果作为对比,研究协同效应和本征结构差异对辐照诱导微观结构演化和力学性能的影响。三种参数辐照后的非晶合金仍能保持良好的非晶结构,未发生纳米晶化或元素偏析现象;而晶体合金的辐照区域发生完全非晶化,形成具有明(富 Al 元素)、暗衬度(富 Cu、Fe 元素)差异的不均匀非晶结构。由于强烈的移位损伤效应,单 Fe 离子和同时辐照后的晶体合金表现出比单 He 离子辐照后更加均匀的结构。在单 He 辐照条件下,非晶合金中的 He 泡均匀分布,而晶体合金中的 He 泡不均匀分布,其中富 Cu 区域的 He 泡尺寸更大。相比于单 He 辐照,同时辐照后非晶和晶体合金的 He 泡分布规律不变,但同时辐照后形成的 He 泡尺寸更大。经所有参数辐照后的非晶合金和晶体合金均观察到明显的软化现象。非晶合金的锯齿流动行为减弱,变形更加均匀。由于非晶化,辐照后的晶体合金也产生锯齿流动,但相比于均匀的非晶结构,辐照后形成的不均匀非晶结构表现出更加微弱的锯齿流动行为和更高的硬度。

D03-085

单层及多层高熵薄膜的微观组织及辐照性能研究

蒋丽*、李艳辉、张伟

大连理工大学材料科学与工程学院

核电材料在反应堆强辐照环境下会出现肿胀、脆化等缺陷,从而威胁反应堆的安全运行。发展先进核工程材料是我国核电技术顺利发展、核电系统安全高效运行的基本保障。高熵合金由于出色的热稳定性、高温强度、耐蚀性,是第四代反应堆的新型候选材料[1-3]。而纳米金属薄膜材料拥有高密度的晶界结构,不仅可以有效地阻碍位错运动从而提高材料强度,还可以起到吸收辐照产生的缺陷的作用,并促进其湮灭/复合进而提高材料的辐照损伤性能。在其基础上发展起来的纳米金属多层膜材料不仅拥有高密度的晶界,其高密度的层界面同样可以起到提高材料力学性能及抗辐照性能的作用[4-8]。本文采用磁控溅射的方法分别制备了高熵合金单层薄膜材料及多层薄膜材料,深入研究了每种材料的微观变形机制及辐照效应。结果发现,CoCrCuFeNi 薄膜在 370dpa 高剂量辐照后无孔洞缺陷产生,材料内部发生纳米尺度的 FCC 向 BCC 结构转变,有效缓解了辐照产生的内应力,使其表现出优异的辐照抗力。Cu/TaNbMo 中熵合金多层膜的变形机制由 TaNbMo 层起主导作用,与传统双金属多层膜相比抗剪切变形能力更强。经辐照后,TaNbMo 层中仅出现纳米级孔洞,与双金属多层膜相比其抗肿胀能力大大提高。该工作不仅研究了成分复杂性对合金抗辐照性能的影响,还探索了结构复杂性主导下的材料微观变形机制及辐照效应,为设计新型反应堆用结构材料提供理论基础。

参考文献

- [1] W.Y. Huo, H. Zhou, F. Fang, et al. Microstructure and properties of novel CoCrFeNiTax eutectic high-entropy alloys, *J. Alloys Compd.* 735 (2018) 897-904.
- [2] Y. Zhang, T.T. Zuo, Z. Tang, et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys, *Prog. Mater. Sci.* 61 (2014) 1-93.
- [3] D.B. Miracle, O.N. Senkov. A critical review of high entropy alloys and related concepts, *Acta Mater.* 122 (2017) 448-511.
- [4] Y. Chen, Y. Liu, E.G. Fu, et al. Unusual size-dependent strengthening mechanisms in helium ion-irradiated immiscible coherent Cu/Co nanolayers. *Acta Mater.* 84 (2015) 393-404.
- [5] M. Wang, I.J. Beyerlein, J. Zhang et al. Defect-interface interactions in irradiated Cu/Ag nanocomposites. *Acta Mater.* 160 (2018) 211-223.
- [6] K.Y. Yu, Y. Liu, E.G. Fu, et al. Comparisons of radiation damage in He ion and proton irradiated immiscible Ag/Ni nanolayers. *J. Nucl. Mater.* 440 (2013) 310-318.

[7] X.Q. Liang, Y.Q. Wang, J.T. Zhao, et al. Size- and ion-dose-dependent microstructural evolution and hardening in He-irradiated miscible Cu/Zr crystalline/crystalline nanolaminates. *Surf. Coat. Tech.* 366 (2019) 255-265.

[8] L. Jiang, Y.J. Hu, K. Sun, et al. Irradiation-Induced Extremes Create Hierarchical Face-/Body-Centered-Cubic Phases in Nanostructured High Entropy Alloys. *Adv. Mater.* 32 (2020) 2002652.

D03-086

定向凝固 L12 增强型高熵合金的组织与高温力学性能研究

马赫¹、李彩月¹、宋凯凯²、曹崇德*¹

1. 西北工业大学

2. 山东大学

通过将 L12 析出相引入 FCC 基体高熵合金的方法，能够使 FCC 基体在变形过程中出现 L12 相对位错的钉扎效应，有效突破 FCC 高熵合金在变形过程中产生的强度与塑性权衡的问题。尽管如此，传统的高熵合金制备方法无法满足航空航天等极端条件下服役部件的力学性能需求，这使得 L12 增强型高熵合金在该领域下的应用存在极大的研究空间。

定向凝固技术是一种先进的材料制备技术，也是研究材料凝固理论的重要手段之一。通过精确控制凝固过程中的温度梯度和凝固速率，能够有效控制 L12 增强型高熵合金的显微组织。然而凝固速率对固液界面、凝固组织和力学性能的影响尚未系统的研究，其潜在的机理仍旧有待于进一步分析和探讨。

本文通过研究不同抽拉速率下定向凝固 NiCoCr 基高熵合金的显微组织以及力学性能，初步实现了对 L12 增强型高熵合金的显微组织进行微观调控。通过 SEM 以及 EBSD 分析发现，定向凝固后 L12 增强型高熵合金基体为单一 FCC 相固溶体，并发现大量的 L12 相析出。定向凝固 NiCoCr 基高熵合金室温拉伸的屈服强度为 732 MPa，塑性可以达到 37%。研究发现除沉淀强化机制起作用外，由于 L12 相与 FCC 基体的模量差异，在变形过程中作为硬相的 L12 相与基体产生异质结构，并在变形过程中促进了大量的几何必要位错的生成，诱发的 HDI 硬化，为定向凝固 L12 增强型高熵合金提供了额外的加工硬化能力，使得合金在高强度下仍旧保持良好的延伸率。

此外，对定向凝固后的样品进行 700°C 的高温拉伸实验发现，由于定向凝固过程中对显微组织的精确控制，其在 700°C 下的屈服强度可达到 516MPa，断裂强度为 670MPa。结果表明，定向凝固过程中精确的温度梯度控制以及缓慢的凝固速率使得晶粒生长方向以及取向表现出高度的均一性，并使 L12 增强型高熵合金在高温下保持了良好的热稳定性以及力学性能。

D03-087

非晶态和晶态合金本征结构对纳米摩擦学性能的影响

贾茜*

西北工业大学

非晶合金因其高硬度展现出相较于晶体更为优异的宏观耐磨性。然而，与之相关的微观力学变形和表面相互作用机制尚未揭示。我们制备了同成分的非晶与晶态 $Zr_{64.5}Cu_{35.5}$ 合金，通过原子力显微镜的压痕和纳米磨损实验探究了结构有序性对合金力学和摩擦学性能的影响。与晶体合金相比，非晶合金展现出卓越的抗摩擦磨损性能，粘附和犁沟系数均显著降低。通过计算模拟表明，缺乏结构有序性导致金刚石原子与非晶表面原子产生极大的不匹配，降低了界面粘附。此外，与非晶结构相关的高硬度和强弹性回复能力显著降低了犁沟系数，增强了非晶合金的耐磨性。因此，弱界面粘附和机械强化共同促进了非晶合金优异的纳米摩擦学性能。这些发现对加深结构效应对磨损机制的理解和开发新型耐磨合金具有指导意义。

D03-088

共晶高熵合金中 L12 和 bcc 纳米相的两步转变机制

焦增宝*
香港理工大学

在共晶高熵合金中引入纳米析出相，可发挥析出强化和层状结构强化的双重优势，为优化高熵合金的综合性能提供了新的设计思路，但共晶高熵合金成分的复杂性也带来了其纳米析出行为的复杂性。我们发现 fcc/L2₁ 共晶高熵合金在时效过程中可形成一种特殊的 fcc/L1₂ + L2₁/bcc 多级微纳组织。其中，fcc 基体中的 L1₂ 纳米相、L2₁ 基体中的 bcc 纳米相并不是通过一步转变形成，而是通过两步转变：第一步，纳米相以调幅分解形式发生元素富集，并维持与基体相一致的晶体结构；第二步，元素富集区发生结构转变（fcc→L1₂ 和 L2₁→bcc）。我们计算了 fcc/L2₁ 伪三元系统在不同温度下的调幅分解区，证实 fcc/L2₁ 共晶高熵合金体系在时效初期具有热力学不稳定性，满足发生调幅分解的热力学条件；力学性能结果显示，这种多级微纳组织的形成可显著提高共晶高熵合金的力学性能。本研究关于共晶高熵合金相稳定性和析出机理的结果对设计具有优异力学性能的多相纳米结构高熵合金有一定的指导意义。

D03-089

序调控策略制备高强韧性非晶合金材料

柯海波*
松山湖材料实验室

不同的原子序构对结构金属材料的强度和延展性起着关键作用。然而，如何有效地操纵原子序构来克服长期存在的强度-延性权衡仍然面临着挑战。原子制造是一种自下而上变革性的方法，可创制具有颠覆性能的全新材料，有望克服这一挑战。我们采用脉冲激光沉积技术作为原子制造技术，在典型的 Zr50Cu40Al10 非晶合金中制备出不同有序度的纳米结构，发现与已有的锆基合金相比，能够实现更广泛的序调控结构且呈现出更优越的力学性能。值得注意的是，我们获得一种全新的 spinodal 玻璃结构，其呈现出 3.89 GPa 的超高屈服强度和 75% 以上的延展性，实现了强度和延展性之间的权衡。本工作表明序调控在探索具有优异综合性能和极限性能材料方面的巨大潜力。

D03-090

超音速火焰喷涂铁基高熵非晶涂层腐蚀磨损性能研究

王倩倩*、叶阳子、沈宝龙
东南大学

热喷涂铁基非晶合金涂层具有优异耐腐蚀耐磨损性能以及相对低廉的成本，作为表面防护材料受到广泛关注，然而，热喷涂铁基非晶涂层容易产生孔隙、氧化物和晶体相等缺陷，影响涂层性能。提高涂层非晶含量、减少涂层缺陷是制备高性能铁基非晶涂层的关键。本文结合高熵合金设计策略，选择具有大非晶形成能力、优异热稳定性和耐腐蚀性的新型 FeNiCrMoBCPNb 高熵非晶合金，采用超音速火焰喷涂方法，制备了非晶含量高、孔隙率低、耐腐蚀性能优异的铁基高熵非晶涂层，并研究热输入对其结构与性能的影响。研究表明，在较高的热输入条件下，小尺寸粉末容易氧化难以铺展，聚集在一起形成表面胞状结构和内部多孔微氧化区，影响涂层结构均匀性和耐腐蚀性能。具有最低热输入的涂层具有较高非晶含量和较少孔隙、氧化物缺陷，能够减少表面点蚀萌生，其非晶含量为 82%，孔隙率为 0.17%，腐蚀电位为 -238 mV_{Ag/AgCl}，腐蚀电流密度为 0.8 μA/cm²，钝化电流密度为 1.2 μA/cm²，优于大多数已报道的超音速火焰喷涂铁基非晶涂层。此外，涂层还具有优异耐腐蚀磨损性能，在开路电位以下，涂层磨损率极低，主要是疲劳磨损；在开路电位以上，腐蚀和磨损产生剧烈交互作用，磨损率显著增加，主要是疲劳磨损、磨粒磨损和腐蚀磨损。本文制备的新型高性能铁基高熵非晶涂层展现出巨大的应用潜力。

D03-091

化学复杂型金属间化合物的创新设计与发展

杨涛*

香港城市大学

众所周知，“一代材料、一代技术、一代产业”。随着航空航天、能源电力、化学化工等关键核心领域的高速发展，加快研发综合性能优异的新型高温结构材料与部件势在必行。在众多的材料之中，金属间化合物因其独特的长程有序结构、高熔点、高强度、抗氧化、耐腐蚀等诸多优点被认为是一种最具潜力的高温结构材料之一，受到了世界各国材料科学工作者的广泛重视。本报告将聚焦学术前沿研究领域，重点介绍化学复杂型金属间化合物（又称之为多组元金属间化合物或高熵金属间化合物）这一新兴的金属结构材料，从“有序超点阵结构”、“多元素协同合金化”和“晶界纳米无序化”等多个方面讲述化学复杂型金属间化合物的创新设计、先进制造以及未来发展等。

D03-092**CoCrFeNi 高熵合金纤维的强韧化**

高小余、黄永江*

哈尔滨工业大学

随着器件小型化趋势的发展，各种微机电系统、微纳米器件等相继出现，开发兼具高强度和大塑性的金属微纤维的需求也愈加迫切。高熵合金因其独特的结构和性能优势，有望成为高性能金属纤维材料的绝佳候选。目前，多工艺拉拔技术是制备尺寸均匀、大长径比金属纤维的主要方法。本工作成功的制备了直径 70 μm 的 CoCrFeNi 高熵合金纤维，并采用电流处理对拉拔态的纤维进行后处理。结果表明，电流引起的焦耳热和非热效应的耦合作用促进了高熵合金纤维微观结构和力学性能的演变。其中，140 A/mm² 的电流密度下处理的纤维获得了高屈服强度（1.1GPa）和大的均匀延伸率（43%）。深度微观结构表征表明，高性能来源于电流处理导致的结构均匀性、晶粒尺寸和晶内位错密度的组合。该工艺赋予了纤维独特的微观结构特征，包括均匀的超细晶粒、低位错密度和晶内致密的 9R 相。其中，除了晶界强化以外，较低的位错密度导致的位错源强化导致了显著的强度提升，强化效果占屈服强度的 47%。在纤维屈服后，依赖于应力的多重硬化机制的顺序激活赋予微纤维持续的应变硬化能力，从而具有大的延展性。因此，这项工作为实现金属微纤维的强度-塑性协同作用提供了一条很有前途的途径。

D03-093**钛基非晶复合材料在室温和低温下的拉伸塑性变形行为研究**

朱润腾、柳林*

华中科技大学

在室温下，得益于晶相中的马氏体相变和机械孪晶，亚稳型大块非晶复合材料在保持高强度的同时，拉伸塑性得到了显著提升。低温变形时，该类合金的屈服强度得到了进一步增强。然而，马氏体相变触发应力的升高抑制了 TRIP 效应，导致合金的延展性严重恶化。因此，如何在维持室温力学性能的同时，进一步提升低温力学性能，成为了亟待解决的科学挑战。在本研究中，通过成分设计制备了名义成分为 Ti₄₈Zr₃₀Cu₆Ta₂Al₁Be₁₃ 的非晶复合材料，该材料由非晶基体和树枝晶组成。通过控制树枝晶的稳定性来调控合金的微观结构，进而获得了优异的综合力学性能。在 298 K 时，由于树枝晶中持续的马氏体相变，该合金表现出优良的塑性和加工硬化能力。其屈服强度高达 920 MPa，抗拉强度高达 1450 MPa，均匀伸长率为 8.2%。在 77 K 时，尽管马氏体相变受到抑制，但树枝晶中的堆垛层错被激活，这使得合金的低温塑性变形能力显著改善。其屈服强度和抗拉强度进一步提高至 1150 MPa 和 1630 MPa，并能保持 7.2% 的均匀伸长率。这一创新性的机制有效地解决了非晶合金固有的拉伸脆性和其他非晶复合材料中韧-脆转变的难题。这一成果的取得，不仅为亚稳型大块非晶复合材料的低温应用开辟了新道路，也为结构材料的研发提供了新的思路 and 方向。

D03-094

锆基非晶合金室温剪切扩展速率与剪切失效临界准则

王重*、殷思杰、程泓瑞、张浩、乔珺威、王志华

太原理工大学

锆基块体非晶合金在室温准静态加载时,材料屈服后,应力随应变呈现出起伏波动特征,该现象称之为锯齿流变。锯齿流变是微观剪切的宏观表现结果,可以通过对锯齿流变的研究进而探索非晶合金微观剪切变形机理。目前无法直接观测和表征变形过程中非晶合金内部结构的演化,导致内部结构与力学性能之间的关系尚不清晰,利用声发射技术间接表征内部结构变化并通过相应的声发射信号来获得非晶合金的动态信息。通过不同成分和不同应变速率下的准静态加载同步声发射监测实验,深入讨论了锯齿与剪切变形的内在关联。通过对非晶合金不同声发射子集(以临界应变为界)的统计分析,揭示了锯齿流变和平滑状态下声发射事件的响应机制,并深入研究宏观塑性不稳定期间剪切带形核和扩展的相对贡献。结合自由体积理论和剪切转变区模型讨论了非晶合金室温塑性变形机理,并提出了剪切带速度与剪切转变区激活体积的预测模型以及剪切失效的临界准则。

D03-095

快速设计和筛选高熵合金

张华磊*

西安交通大学

高熵合金(high-entropy alloys, HEAs)突破了以一种或两种元素为主的传统合金的设计理念,多主元的设计策略使高熵合金的种类更为丰富,高熵合金的多种优异性能引起了材料科学界的广泛关注。多主元特性使高熵合金在合金化和外力作用下的结构稳定性和形变更加复杂,单纯的实验试错法不能快速地研究无限可能的高熵合金成分组合,需要借助于快速高效的第一性原理计算优化合金组元及其配比,为开发和制造高性能高熵合金提供理论指导。然而,传统的第一性原理方法很难处理具有顺磁性的多主元无序固溶体,精确的 muffin-tin 轨道(exact muffin-tin orbitals, EMTO)和相干势近似(coherent potential approximation, CPA)相结合的方法能够高效准确地描述高熵合金中的化学无序和磁性无序。因此,我们利用第一性原理 EMTO-CPA 方法计算研究了合金化效应对 Cantor 高熵合金、Senkov 难熔高熵合金以及铪基高熵合金的相稳定性、弹性性能、层错能、力学性能、以及相变机制的影响规律,利用高通量计算实现了快速设计和筛选高性能高熵合金,为实验研究提供了精确的数据库和理论指导,期望实现材料的按需设计。

D03-096

非晶/纳米晶复相纳米多孔高熵合金的研制及其催化性能研究

李艳辉、金诗瑶、张伟*

大连理工大学

基于脱合金制备的纳米多孔合金由纳米尺度的孔隙和金属韧带组成,具有独特三维双连通多孔网状结构,比表面积高、导电性好、结构灵活可调且可作为自支撑电极,在水解制氢催化等领域具有良好应用前景。高熵非晶合金化学成分均匀、无晶体结构缺陷,是脱合金制备纳米多孔合金的理想前驱体,同时高熵化带来的多主元协同和迟滞扩散效应有助于提高催化活性和稳定性。本工作首先以 FeNiCoRuB 系高熵非晶合金为前驱体通过电化学脱合金制备纳米多孔合金,并通过调整前驱体中 Ni 含量实现了对纳米多孔合金结构和氨硼烷水解催化性能的调控。该系高熵非晶前驱体脱合金后可形成具有非晶/六方 Ru 纳米晶双相结构的 RuFeNiCo 纳米多孔合金,其对氨硼烷水解催化的初始转换频率(TOF)最高可达 $148.2 \text{ mol}_{\text{H}_2} \cdot \text{mol}_{\text{Ru}}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 、活化能低至 $25.3 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。在此基础上,通过对非贵金属系 FeCoNiPCB 高熵非晶合金脱合金制备得到非晶/纳米晶复相 FeCoNiPC 纳米多孔高熵合金,其在酸性和碱性条件下均展现出优异的电

解水析氢（HER）催化性能。最后，通过基于密度泛函理论（DFT）的第一性原理计算讨论了纳米多孔高熵合金高效催化性能的机理。

D03-097

低温热循环加速非晶合金剪切带在室温的结构弛豫

魏玉锋¹、潘杰^{*1,2}、孙永昊^{3,4}、李宁¹、张诚¹、汪卫华^{3,4}、柳林¹

1. 华中科技大学
2. 中国科学院金属研究所
3. 中国科学院物理研究所
4. 松山湖材料实验室

低温热循环是实现非晶合金结构回春的一种简单有效方法，但某些非晶合金在低温热循环处理后发生弛豫而不是回春。本研究通过在非晶合金中引入剪切带，在同一块样品上获得不同区域初始能量不同的非晶合金，系统地研究了不同初始状态对低温热循环处理效果的影响。研究结果发现，在经过低温热循环处理后，同一试样中的剪切带发生结构弛豫，而基体发生结构回春。类似的双向变化趋势还可以从显微硬度、纳米压痕曲线以及压痕形状的变化上得到验证。在经历了 100 次低温热循环处理后，剪切带和基体的焓和硬度均收敛到一个平衡值。低温热循环能够加速剪切带的结构弛豫，实现了在低温热循环的上限温度上做长时间退火所达不到的状态。本研究还采用自由体积模型对实验结果进行分析，阐明了非晶合金的初始状态影响其结构演化方向的机理。本研究为低温热循环处理非晶合金提供了新见解，阐明非晶合金初始状态在其焓变方向上的关键作用。

D03-098

一种制备单质非晶金属的普适策略

汪卫华*

中科院物理所

根据 1948 年 Kauzmann 熵危机理论，所有的液体都有可能形成非晶态，即非晶态是物质的本征特征。Turnbull 在 1969 年提出了“Can all materials be put into the glass form?”的问题，指出能将所有物质进行非晶化的最有力证据就是将单质金属非晶化。然而，近百年来单质金属非晶合成仍然是金属玻璃领域的难题和圣杯。我们借助原子制造及高通量的思想，并利用快冷和助熔剂处理，在实验中成功地将几乎所有单质金属，包括最难以实现非晶化的单质金，制备成为室温稳定的非晶态。通过采用超快皮秒脉冲激光在无水乙醇（助熔剂）中进行液相烧蚀，熔融的金纳米颗粒在无水乙醇和快速冷却的作用下，能够有效避免晶体的形核和长大，促使其形成了非晶单质金颗粒。通过这种原子制造的方法，能遍历单质金属能量地形图中的各种构型，从这些构型中，我们可以筛选获得具有室温稳定性的单质非晶纳米颗粒。从而实现了几乎所有单质金属，包括面心立方和其它结构类型（如密排六方、体心立方）的单质金属的非晶化，突破了制备单质非晶金属的百年难题和物质非晶形成能力极限。我们发现单质非晶的稳定性来源于其类二十面体团簇的强拓扑阻挫。我们的工作进一步证明非晶态是物质的本征态，同时也提供了一种基于原子构型制造和高通量形成非晶的新方法。

D03-099

Ti₂AlNb 合金用 Ti-Zr-Ni-Nb 高熵非晶合金钎料的形成及性能

彭绕、李胡杨、白雪垠、逢淑杰*、张涛

北京航空航天大学材料科学与工程学院

Ti₂AlNb 合金在航空航天领域极具应用潜力，目前其钎焊连接多采用传统商用钛基 Ti-Zr-Cu-Ni 钎料，存在接头强度较低等问题，这是由于钎料中 Cu 含量较高导致接头中生成较多脆性金属间化合物。我们注

意到, 采用高熵非晶合金作为钎料, 既具有非晶合金成带性好、成分及结构均匀的优点, 其多主元成分特点也有利于抑制接头中金属间化合物的形成, 提高接头力学性能。因此, 本工作针对 Ti₂AlNb 合金的钎焊连接, 提出综合考虑高熵合金的多主元成分理念、非晶合金成分基本准则和相似相异元素共存的高熵非晶钎料成分设计新思路, 开发了无 Cu 的新型 Ti-Zr-Ni-Nb 系高熵非晶合金钎料。研究表明, Ti-Zr-Ni-Nb 合金具有较高的非晶形成能力, 可采用熔体旋淬法制备为连续柔韧的钎料带材。采用其钎焊 Ti₂AlNb 合金, 接头主要由 β -(Ti,Nb)相、Laves 相和少量 Ti₂Ni 相构成。随钎焊温度升高, Zr、Ni 等元素扩散更充分, 抑制了 Laves 相的形成, 而过高的钎焊温度导致母材中过多的 Al 元素进入钎缝, 促进了 Laves 相的形成; 在 1273 K/20 min 工艺下接头剪切强度可达 261±18 MPa。进一步地, 我们研究了保温时间对接头组织结构和力学性能的影响, 在较短的保温时间下 (1273 K/1 min), 生成的 β -(Ti,Nb)相和 Laves 相细小且均匀离散地分布于钎缝中, 接头剪切强度可达 311±27 MPa, 明显高于采用传统商用牌号 Ti-Zr-Cu-Ni 钎料获得的钎焊接头强度 (约 150 MPa); 随保温时间延长 (10 min~30 min), Laves 相逐渐合并长大, 接头强度降低。研究结果将为新型高熵非晶合金钎料的开发和应用提供实验基础和理论依据。

D03-100

增减材复合制造 CoCrNi 中熵合金组织结构及性能研究

李泽浩、岳伟、范洪波、孙剑飞、黄永江*

哈尔滨工业大学

CoCrNi 中熵合金(Medium Entropy Alloy, MEA)综合性能优秀, 广泛应用于航空航天等高精尖领域。增减材复合制造技术结合增材成形与减材加工的工艺优势, 从而可以实现高精度、高质量的复杂结构的一次性成形, 为中熵合金构件制造提供了新的设计思路与方法, 在航空航天领域因此有广阔的应用与发展前景。研究增减材复合制造过程中试件的组织结构以及性能演变规律, 对于探索增减材复合制造技术在中熵合金研究领域的应用以及对复杂中熵合金构件的工程化应用具有重要意义。

通过对 CoCrNi 中熵合金纯增材, 增减材复合制造合金的组织结构进行表征。研究表明增减材后的试样的表面质量较纯增材的试样有所改善, 样品成形质量好, 元素分布均匀, 均为单相 FCC 结构。减材工艺的引入显著减少试样表面的气孔、微裂纹等缺陷, 同时产生了沿深度方向的组织变化, 包括纳米晶、变形孪晶和大量位错结构。探究了增减材复合制造工艺对构件的力学性能、摩擦性能以及耐腐蚀性能进行探究, 表明减材后的试样表现的力学性能较纯增材样品具有一定的改善, 减材后的试样的硬度较增材试样提升显著。同时在摩擦磨损实验中, 增材件试样的摩擦系数、相对质损率以及磨损表面的粗糙程度均比纯增材的样品低, 说明增材表面出现了加工硬化以及晶粒细化有关。本文所获得的结果有望为增减材复合制造 CoCrNi 中熵合金在航空航天领域的进一步应用提供科学理论指导。

D03-101

振动叠加弹性载荷促进非晶合金结构回春: 分子动力学模拟研究

蔡洪钧、施君儒、张茂*

华中科技大学

结构回春能有效提高金属玻璃的塑性。本研究提出了一种在弹性载荷上叠加振动来增强金属玻璃结构回春效果的方法。通过分子动力学模拟研究了 Zr₅₅Cu₃₀Al₁₀ 非晶合金在振动叠加弹性载荷处理过程中的原子重排行为和结构转变。结果表明, 振动降低了原子运动的能垒, 诱导更多的“类固体”区域原子参与塑性重排。此外, 弹性载荷的增加可以放大振动对塑性重排事件的促进效果。叠加振动后, 非晶合金平均过剩自由体积增大, 原子过剩自由体积的高斯分布的标准差更小, 过剩自由体积分布更为均匀。振动的叠加同时也促进了更多的类二十面体 Voronoi 多面体转化为具有较弱的局部五次对称性的混合和类晶体 Voronoi 多面体, 这使得处理后非晶合金塑性提升。我们的研究表明, 振动叠加弹性载荷可以显著增强金属玻璃的结构回春, 提升非晶合金室温塑性。

D03-102

超声振压诱导老化金属玻璃产生塑性和结构回春

陈哲*

深圳大学

金属玻璃 (MGs) 具有优异的性能, 但随着时间的推移, 其性能会不断退化, 从而增加了加工的复杂性。因此, 这对长期老化金属玻璃的成型提出了严峻的挑战。在此, 我们报告了超声波振动 (UV) 加载可在 1 秒钟内使明显老化的金属玻璃产生较大的塑性和较强的再生能力。在玻璃转化温度的 85% (0.85T_g) 下老化长达 1 个月的 LaNiAl MG 样品可实现高度降低 80% 的超声诱导塑性 (UVIP)。UVIP 所需的能量阈值随老化时间的延长而单调增加。超声加载过程结束后, 老化样品显示出强烈的年轻化, 其弛豫焓甚至超过了铸件样品的弛豫焓。这些研究结果表明, 超声加载是一种同时实现老化 MGs 成型和再生的有效技术, 为探索 MGs 性能与微结构之间的相互作用提供了另一种途径, 同时也拓展了 MGs 的应用前景。

D03-103

Long-term elasto-static compressive loading drives rejuvenation of a metallic glass

Abdalelah Homada, Xi Lei Bian, Gang Wang*

Shanghai University

Focus on rejuvenation and serration flow dynamic of metallic glass, this study explores the impact of different durations of elasto-static compressive loading (ECL) for 3, 6, 9, and 15 days on the deformation behaviors of a Zr_{52.5}Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al₁₀Ti₅ bulk metallic glass (BMG) under an elastic stress of 1600 MPa at room temperature. The results indicate that the increasing preloading time leads to enhanced rejuvenation, due to the excess free volume. Meanwhile, the increasing preloading time contributes to an increase in cut-off value of elastic energy density, which suggests collective movements of multiple shear bands, indicating the BMG is ductile. The significance of extending the preloading time, resulting in a more atomic dilatation and heterogeneous structure, which can aid in designing metallic glasses and offer valuable insights into the deformation mechanisms under various loading conditions to optimize their mechanical properties for applications.

D03-104

CoNiV 中熵合金中位错雪崩临界转变模型

乔珺威*

太原理工大学材料科学与工程学院

CoNiV 中熵合金在高温下有着良好的强度和塑性, 有望作为高温结构材料进行应用。但其在一定的温度和应变速率下变形时会出现应力应变曲线波动的现象, 即锯齿流变行为。锯齿流变行为一方面会对材料的表面平整性产生不利影响, 一方面可能作为合金强度和塑性权衡的一个突破口。因此, 研究不同锯齿流变行为的机理对于锯齿流变行为的应用具有较高的价值。以往的研究提出在传统合金中随着温度升高, 会出现由基线附近振荡的 B 型锯齿向在基线以下的 C 型锯齿转变的现象, 并且可能会伴随有临界应变的逆行为。本研究对中熵合金锯齿机理进行了研究。

通过分析不同温度下结合声发射的单轴拉伸实验的结果, 可以看出, 在 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的应变速率和 500-700°C 温度范围内出现了临界应变的逆行为以及锯齿由 B 型向 C 型转变的现象, 临界应变的逆行为同样反映在声发射信号的能量分布上。由上述结果可知: 1. B 型锯齿的应力降不会使动态应变时效 (Dynamic Strain Aging, DSA) 行为导致的额外位错密度减小到无 DSA 时的水平, 而 C 型锯齿的应力降会导致额外的位错密度减小至无 DSA 时的水平。2. 较大锯齿的双峰分布结果表明锯齿流变过程中会出现两种类型的大锯齿, 较小的一种锯齿无法将 DSA 行为导致的额外位错密度“清空”, 从实验结果出发修正的 widom 标度

函数可较好地拟合不同锯齿类型的应力降分布。3.基线拟合的结果表明 KM 模型能较好地拟合无 DSA 行为时的流变应力,在此基础上加上 DSA 行为的影响,可较好地拟合应力-应变曲线的上包络线,即传统理论认为的 C 型锯齿的基线。4.提出了中熵合金中类 DSA 行为的一种假设,认为与传统合金不同的点在于,中熵合金中的类 DSA 行为可能由短程有序对位错的阻碍作用引起,此假设与实验结果一致。

D03-105

钛合金高强韧连接用新型 Zr 基非晶钎料

逢淑杰*

北京航空航天大学

非晶合金作为钎焊材料具有成带性好、成分均匀、材质纯净等诸多优势。其中, Ti-Zr-Cu-Ni 等 Ti 基非晶钎料被广泛应用于钛合金的钎焊连接,接头强度较高,但钎料中 Cu 元素含量高使接头易生成脆性金属间化合物,特别是接头组织在钎缝中心普遍存在分界线,导致接头韧性低。我们突破钛合金钎焊普遍采用 Ti 基钎料的传统理念,提出开发并应用无 Cu 的新型 Zr 基非晶钎料以实现钛合金高强韧连接的新思路,设计并制备了具有良好非晶形成能力、较低液相线温度的新型 Zr 基非晶钎料。采用新型 Zr 基非晶钎料获得的 Ti-6Al-4V 合金钎焊接头形成了主要由 α -Ti+ β -Ti 集束构成的均匀组织结构,且接头组织在钎缝中心无分界线,接头兼具高强度和高冲击韧性。本工作的研究结果表明,发展和应用新型 Zr 基非晶钎料可以成为实现钛合金高强韧钎焊连接的有效途径,这对于拓展非晶合金的应用、提高钛合金钎焊构件的安全可靠性并扩大其应用范围具有重要意义,也将为钛铝金属间化合物等材料的钎焊连接提供候选钎料。

D03-106

化学短程有序对 316LN 中 Hall-Petch 关系的强化效应

刘长生、张瑞、张志伟*、张兴义

兰州大学

316LN 作为一种多主元合金,具有优异的低温力学性能,广泛应用于各类低温设备的制造。但随着其应用于极低温、大变形等极端服役环境,对其强度和塑性提出了更为严格的要求。同时,多主元合金中内禀的化学短程有序通常会使材料具有优异力学性能,然而目前化学短程有序对 316LN 强度的影响尚不明晰。本研究采用分子动力学模拟,探索了 316LN 中 Hall-Petch 关系的强化极限及其变形机制,并揭示了化学短程有序和温度对 Hall-Petch 关系的影响规律。其主要研究结果表明,316LN 的强度与晶粒尺寸的关系呈现三个阶段:即上升阶段,平台阶段以及下降阶段。且化学短程有序的存在将使得 Hall-Petch 效应出现明显的强化,同时使得平台阶段晶粒范围向小晶粒尺寸扩展。此外,随着温度的降低, Hall-Petch 关系发生了显著的低温强化,小尺寸晶粒下更为敏感。究其变形机理可知,上升阶段的塑性变形主要由晶粒内部位错的滑移所主导,随着晶粒尺寸的减小,晶界亦会阻碍位错运动使得材料强度有明显的提升,化学短程有序的存在将抑制位错从晶界处形核,并增大位错的滑移阻力,使得需要更大的外部载荷来使其发生变形。下降阶段塑性变形主要由晶界运动所主导,晶界迁移及晶粒旋转将导致强度随着晶粒尺寸的减小逐渐降低,而化学短程有序将会强化晶界,抑制晶界运动,从而使得强度提升。平台阶段则是由位错滑移和晶界运动共同主导,化学短程有序使得位错和晶界的运动都受到明显的抑制。

D03-107

单质非晶的本征结构非均匀性

童星*

松山湖材料实验室

结构非均匀性被认为是非晶合金的固有特征,对非晶合金的许多特殊性能中起着关键作用。以前的研究对非晶合金的结构和动态不均匀性的研究主要集中在多组分系统中。这些研究中的非晶合金由于化学成

分的变化而呈现纳米尺度的空间非均匀性，这一因素难以排除。本研究采用单质非晶作为研究对象，利用原子力显微镜（AFM）研究其结构非均匀性。我们的结果证实，单质非晶中存在显著的结构非均匀性，这种结构非均匀性无法通过退火等处理完全消除，从而证实了玻璃态固体中结构非均匀性的固有特性。此外，我们发现调节这种结构非均匀性可以操控单质非晶的性能。这项作为玻璃态固体中结构非均匀性的固有特性提供了确凿的证据，并有助于推进对玻璃本质的理解。

D03-108

TiZrNbVAl 高熵合金增材制造工艺优化及性能研究

肖邦^{1,2}、朱正旺*¹

1. 东北大学
2. 中国科学院金属研究所

通过直接能量沉积法制备了 TiZrNbVAl 高熵合金单道熔覆层，结合响应曲面法研究了激光功率、扫描速度、粉末供给率对单道熔覆层熔宽、熔高、宽高比、稀释率、粉末利用率的影响，总结出了相关参数的数学表达式。根据实验结果对加工参数进行了优化，并制备出了优化后的单道熔覆层。最优参数单道熔覆层的上边界近似为圆弧状，其微观组织为等轴晶和柱状晶，且柱状晶大致沿着沉积方向生长。熔覆层内部各区域的维氏硬度稳定，热影响区的维氏硬度随距熔池底部的距离增大而减小。纳米压痕结果表明熔池比热影响区具有更大的硬度，这与维氏硬度结果是结果一致的。本研究为直接能量沉积的工艺优化提供了新思路，为 TiZr 基高熵合金的性能研究提供了新方法。

D03-109

通过高熵合金颗粒中纳米晶的形成实现 Zr 基非晶合金强韧化

张嘉琪¹、丁华平²、龚攀*¹

1. 华中科技大学
2. 松山湖材料实验室

非晶合金由于其结构上长程无序、短程有序的特点，具有高强度、高硬度、良好的耐磨性以及耐腐蚀性等优异性能。但其塑性变形往往局限于几个纳米宽度的剪切带中，导致宏观脆性断裂，极大程度上限制了其工业应用，通过引入第二相制备非晶合金复合材料（BMGCs）是改善非晶合金室温变形能力的有效途径。本工作通过添加高熵合金颗粒作为第二相，采用等离子放电烧结法制备了高熵合金颗粒增韧非晶合金复合材料。同时提高了 Zr 基非晶合金的强度和塑性（从 0% 提高至 2.4% 以上）。BMGCs 在压缩过程中，大量的晶格畸变使高熵合金颗粒具有显著的加工硬化能力；断裂后，高熵合金颗粒由于局部剧烈的塑性变形，形成高密度位错和纳米晶，消耗了大量应变能，使其具有抵抗裂纹形成的能力。并且由于高熵合金颗粒的加工硬化行为使 BMGCs 变形更加均匀化，促进了多个剪切带的形成，稳定了剪切带扩展。将 BMGCs 中的强度-塑性协同增强作用归因于高熵合金颗粒中高密度位错和纳米晶的形成以及多个剪切带的稳定传播。

D03-110

超声振动调控 La55Al25Ni5Cu10Co5 中熵金属玻璃纳米压痕行为

李伟¹、李路遥¹、张宸¹、马将²、袁晨晨*¹

1. 东南大学材料科学与工程学院
2. 深圳大学机电与控制工程学院

流变缺陷被认为是决定金属玻璃力学性能、尤其是塑性变形能力的决定性因素。表征或者控制此类存在于长程无序结构的金属玻璃中的缺陷是一件极具挑战性的事情。在本项工作中，研究了经不同超声能量（5, 10, 15, 30 J）处理后的 La55Al25Ni5Cu10Co5 中熵金属玻璃的纳米压痕行为。结果发现，相较于铸

态原始样品，经超声处理的样品硬度和弹性模量变小，尤其在 15 和 30 J 较高能量下尤为明显，这主要归因于超声诱导样品的结构异质性增强。随着超声振动能量的升高，样品在 15 J 时其纳米压痕达到最大值。为了探索样品在不同能量状态下的变形机理，使用一个广义的 Maxwell-Voigt 模型检测 La55Al25Ni5Cu10Co5 中熵金属玻璃在不同超声振动能量下的缺陷激活。得到的特征弛豫时间谱显示样品在 15 J 时的弛豫时间谱第二峰值强度最高，表明最多数量的大尺寸缺陷在 15 J 时被成功激活，这导致了其大的纳米压痕位移。与此同时，剪切变形区（shear transformation zone, STZ）计算结果显示样品在 15 和 30 J 时的 STZ 尺寸大于其在 5 和 10 J，这导致样品在高能量状态下的纳米压痕变形明显强于低能量状态。基于微观结构的分析发现，La55Al25Ni5Cu10Co5 金属玻璃在 15 和 30 J，特别是在 15 J 时，展现出最有序有序的局部结构序，从能量势垒理论的角度看其 STZ 的激活会更加容易，并最终导致大的纳米压痕变形。我们的工作实现了 La55Al25Ni5Cu10Co5 金属玻璃在不同超声能量下的塑性变形可调性，并为揭示其在不同能量状态下的塑性变形机制提供了理论基础。

D03-111

Fe₂VAl_{1-x}Si_x 合金的有序-无序转变与热电性能研究

张富祥*

松山湖材料实验室

具有 Heusler 结构的 Fe₂VAl 合金具有类半导体特性，是具有很好热电性能的合金材料，不掺杂的三元合金具有典型的空穴电导特征，当在合金中掺杂 Si 等元素时其载流子转变为电子型。此外，在一定的温度下，合金会发生从有序的 Heusler 相(L2₁)到半无序的 B₂ 相,甚至发生到完全无序的固溶体 (A₂) 相的转变。伴随着合金的有序-无序转变，其热电性能会发生显著的改变。

利用同步辐射 X-射线衍射(XRD, PDF)及扩展 X-射线吸收谱 (EXAFS) 等技术，我们研究了合金的局域结构和掺杂的 Si 原子在合金的占位情况。结果表明，Si 原子并非占据 Al 原子的位置 (4a)，而是部分取代 V(4b)，同时，相应部分的 V 原子与 Al 原子共同占据同一晶体学位置 (4a)。通过对不同热处理工艺制备的样品的系统研究，定量分析了合金中 L2₁ 和 B₂ 相的比例，这种无序化转变会降低合金的输运性能，对提高合金的热电性能具有不利的影响，而合金中适当的反位缺陷则会明显地提高合金的电导率，可以极大地提高合金的热电转换性能。

D03-112

高熵合金中基于乘积网络预测构型的空间群

赵鼎祺、乔珺威*

太原理工大学

高熵合金属于一类复杂合金系统，粒子在晶格位置中的占据概率以及晶体的空间结构可以通过空间群来描述。基于机器学习方法的预测需要人为的构建特征，特征的有效性将直接影响到算法最终的预测效果。在这份报告中将介绍一种有效的算法结构，通过一种乘积结构来自动生成高阶特征，并通过深度神经网络来构建高阶特征与空间群的联系。这种宽而深的网络结构可以自动的建立高阶特征，代替人工构建特征所采用的唯象方法，通过一些初阶特征以及密度泛函计算得到的参数实现在广泛的合金元素中建立有效的预测模型。进一步的，本报告基于自由电子近似和紧束缚近似假设，从能带理论的角度解释了相关特征与范霍夫奇点和隙隙之间的关系，后两者将对相竞争产生影响。

D03-113

具有细晶粒尺寸和高相对密度的高熵氮化物复合材料的制备

王晓宇、战再吉*

燕山大学 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室

高熵陶瓷因其独特的性能在不同应用领域具有巨大潜力。然而,有关高熵陶瓷晶粒尺寸和致密化的优化研究仍处于起步阶段。本研究利用原材料设计和高能球磨技术制备了一种具有细晶粒尺寸和高致密性的 $(\text{Ti}_{19.28}\text{V}_{17.77}\text{Cr}_{17.11}\text{Zr}_{6.29}\text{N}_{39.56})_{91.81}(\text{ZrO}_2)_{8.19}$ 高熵氮化物复合材料。研究表明, CrN_x 可通过高能球磨技术从原料 Cr_2N 中制备并在较低温度下分解,从而促进高熵陶瓷固溶体的形成。该研究通过比较高熵体系 $(\text{Ti}_{19.28}\text{V}_{17.77}\text{Cr}_{17.11}\text{Zr}_{6.29}\text{N}_{39.56})_{91.81}(\text{ZrO}_2)_{8.19}$ 中的 CrN_x 与高熵体系 $(\text{Ti}_{18.6}\text{V}_{17.82}\text{Cr}_{12.12}\text{Zr}_{7.08}\text{N}_{44.36})_{93.51}(\text{ZrO}_2)_{6.49}$ 中的 CrN , 证明了 CrN_x 的重要性。通过 XRD、SEM、EDS、位移监测和相图计算等技术手段,探讨了两种体系之间的差异,尤其是在机械性能和晶粒尺寸方面。研究表明, $(\text{Ti}_{19.28}\text{V}_{17.77}\text{Cr}_{17.11}\text{Zr}_{6.29}\text{N}_{39.56})_{91.81}(\text{ZrO}_2)_{8.19}$ 的晶粒尺寸控制在 $3\text{ }\mu\text{m}$ 以内,致密性达到 98.78%。其室温下的维氏硬度、抗弯强度和断裂韧性分别达到平均值 $2248\text{HV}_{0.5}$ 、200 MPa 和 $9.428\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。该研究强调了选择特定材料并将其与相应制备工艺相结合以实现致密化和晶粒尺寸联合优化的重要性。

D03-114

电子束粉末床熔化制备无裂纹、高强度和韧性的化学复杂金属间合金

范才涛、贾岳飞*

上海大学

传统的金属间化合物难以加工,在增材制造过程中容易产生裂纹,而我们的工作则证明了通过电子束粉末床融化(EBPBF)可以成功制造出无裂纹且高性能的化学复杂型金属间合金(CCIMAs)。通过 EBPBF 制造的 CCIMAs 的微观结构非常复杂,呈现出多相组成,其中无序的 FCC 相构成基体,与 L12 有序的金属间相交错。有序晶格和高熵无序相的独特组合通过优化的 EBPBF 工艺进行了调整,赋予了该材料优异的机械性能,包括较高的拉伸强度和足够的延展性。研究发现, HCP 和 L21 析出相也能有效减缓和阻止裂纹扩展。这项工作展示了利用 EBPBF 制造具有定制微结构的 CCIMAs,这可能为发掘这些先进金属间合金的潜力提供新的见解和制造策略。

D03-115

轻质难熔中熵合金的超成型性及机理研究

贾岳飞、李庚辰、王刚*

上海大学

轻质难熔高/中熵合金(LRH/MEAs)凭借其低密度及在高温下的优异力学性能,是一类十分有前景的轻质高温材料。然而,LRHEAs 在室温下有限的延展性限制了它们的应用,特别是在制造和成形复杂几何形状方面。这里,我们报告了一种在室温下展示超成型性的 $\text{Ti}_{50}\text{V}_{29.5}\text{Zr}_{10}\text{Nb}_{10}\text{Mo}_{0.5}$ (原子百分比)LRMEA。该 LRMEA 经过冷轧,实现了近 1600%的伸长率和超过 96%的厚度减少,而无需中间退火。这种超级可塑性的背后机制来自于扭曲带、剪切带和位错通道的协同效应,这些共同抑制了变形过程中的裂纹扩展。经过 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的简单处理后,所得到的高强度 LRHEA 条带,最终厚度约为 0.2 毫米,展现出 1.5 GPa 的屈服强度,同时保持超过 10%的伸长率。这种超级可塑性机制及由此产生的高强度而又具延展性的 LRMEA 条带,为 LRHEAs 和难熔高熵合金的可成形性提供了新的见解,有望加速它们在工程应用中的使用,特别是在高强度薄带方面。

D03-116

高应变速率下 Zr 基金属玻璃的力学行为

姚志锋^{*1}、乔吉超²、姚尧^{1,2,3}

1. 西安建筑科技大学
2. 西北工业大学
3. 西安工业大学

本文研究了 Zr 基金属玻璃在高应变速率下的材料性能和本构模型。在室温下进行了准静态压缩试验和 SHPB 试验。研究发现, 当应变速率大于某一临界值时, 屈服强度的应变速率效应由不敏感变为负影响。这一现象可以用考虑绝热温升的修正剪切转变区协同剪切模型来定量描述。为了描述金属玻璃的非线性应变率关系, 采用修正的 Johnson-Cook 和 Cowper-Symonds 材料模型拟合实验应力-应变曲线。修正后的模型与实验结果吻合较好, 能较好地描述金属玻璃在高应变速率下的动态力学行为。

D03-117

基于团簇加连接原子模型的高熵材料成分设计

董闯^{*1,2}、张爽¹、王清²、邹存磊¹、赵亚军¹、刘世民¹

1. 大连交通大学
2. 大连理工大学

高熵合金是由五种或五种以上等量或大约等量金属形成的合金, 高熵氧化物是将五种或五种以上的金属或非金属氧化物以等摩尔或近摩尔比通过相互固溶的方法得到单一结构的氧化物, 我们将高熵合金和高熵氧化物统称为高熵材料, 其成分和组织特征为由多种元素组成但保持单一结构。在前期工作中, 本课题组首次提出“团簇加连接原子”模型的概念, 把近程序描述成第一近邻配位多面体团簇(这里简称团簇)以及位于团簇之间的连接原子, 看似复杂的合金成分可表述为简单的团簇式: $[\text{中心原子-壳层原子}]_n(\text{连接原子})_x$, 其中 n 和 x 分别表示对应原子的个数。本报告从团簇式角度揭示了高熵材料的成分特征, 即团簇壳层位置由多种原子混合占据。进而全面分析了现有不锈钢和多元氧化物的成分特征及化学近程序结构, 总结了高熵不锈钢和高熵氧化物的成分规律, 为新型高熵材料的研发提供了理论依据。

D03-118

CrMnFeCoNi 系高熵合金力学响应行为的应变率效应

尹仕攀¹、孟泽宇¹、贺竞瑶¹、李泽洲^{1,2,3}、张帆^{*1,2,3}、程兴旺^{1,2,3}

1. 北京理工大学
2. 冲击环境材料技术国家级重点实验室
3. 北京理工大学唐山研究院

高熵合金是一种由多个主元合金元素组成的具备高构型熵的合金, 在高温抗氧化、耐磨、低温和高应变率等极端条件下表现出极大性能优势。近来发现 CrMnFeCoNi 系高熵合金具有良好的强度、塑性和断裂韧性, 得到了大量关注。为了探明加载应变率、晶粒尺寸和堆垛层错能对 CrMnFeCoNi 系高熵合金力学响应行为的影响, 本工作以具有不同堆垛层错能的 CrMnFeCoNi (35 mJ/m^2) 和 $\text{Cr}_{26}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{14}$ (23 mJ/m^2) 为研究对象, 通过准静态和动态压缩性能测试, 对比研究了不同堆垛层错能和不同晶粒尺寸的 CrMnFeCoNi 系高熵合金的静动态力学性能特点; 利用背散射电子衍射和透射电子显微镜技术观察分析了变形组织, 研究了不同晶粒尺寸和不同堆垛层错能的 CrMnFeCoNi 系高熵合金静动态条件下的变形机制。研究结果表明, 压缩变形条件下 CrMnFeCoNi 系高熵合金表现出显著的细晶强化效应和应变率强化效应, 准静态、动态压缩条件下合金的流变应力、加工硬化指数和吸能能力均随着堆垛层错能的降低而增加。加载应变率和晶粒尺寸的变化影响孪生的临界应变, 但并不改变 CrMnFeCoNi 高熵合金的孪生形核方式和孪晶的平均宽度, 孪生的增殖主要以数量增加为主。然而, 堆垛层错能对 CrMnFeCoNi 系高熵合金的变形方式影响显著。准静态变形时, CrMnFeCoNi 变形以位错滑移为主; $\text{Cr}_{26}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{14}$ 以位错滑移和孪生为主。动态压缩变形时, 孪生行为对变形的贡献增加, CrMnFeCoNi 的变形模式主要为位错滑移和孪生; 堆垛层错能更低的 $\text{Cr}_{26}\text{Mn}_{20}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{20}\text{Ni}_{14}$ 在动态变形过程中除了位错滑移和孪生, 还发生了孪晶交互作用与 FCC-HCP 相变以协调变形, 该合金表现出更高的流变应力、加工硬化指数和吸能能力。可见, 堆垛层错能和晶粒尺寸的变化通过影响变形模式而实现高熵合金动态力学性能的提升。

D03-119

中子衍射揭示碳间隙原子对高熵合金轧制组织的影响方伟*¹、刘畅¹、徐平光²、殷福星³

1. 河北工业大学

2. 日本原子能研究开发机构

3. 广东省科学院

间隙原子强化高熵合金以其卓越的机械性能（包括高强度、高延展性），以及独特的功能特性，在近年来成为材料科学研究的前沿领域。在轧制加工这一关键的金属成形过程中，合金的晶体学取向分布和微观组织结构对于合金的最终综合性能起着决定性作用。探究在轧制过程中碳间隙原子如何影响合金材料的变形行为，不仅对学术研究中的材料设计具有指导价值，而且对实际工业应用中的性能优化也是一个亟待解决的关键问题。基于 Fe、Mn、Co、Ni 四种元素相对较低的碳亲和力，在本工作中我们设计了无碳化物形成的 $(\text{FeMnCoNi})_{96.5}\text{C}_{3.5}$ 合金，以 FeMnCoNi 合金为对比试样，以此来研究碳间隙原子对于高熵合金轧制变形组织的影响。中子衍射技术提供了高统计性晶体学取向分布信息，包括内部和表面晶粒，晶粒数量可以达到 10 亿个，这使得测量的块状样品平均组织结果比使用 X 射线衍射和电子背散射衍射的结果具有更高的统计性和可重复性。本工作通过 RESA 中子衍射实验清楚地捕捉到了碳间隙原子所引起的晶体学极图差异。尽管在形变早期阶段含碳和不含碳高熵合金的组织特征相似，但在 50% 冷轧变形量下，含碳合金中的 Brass 和 Goss 组织明显高于无碳合金，而 Copper 组织和 S 组织组分含量较低。碳间隙原子强化高熵合金中变形诱导的大量孪晶是变形组织形成明显差异的主要原因。这项工作有助于理解碳间隙原子对高熵合金组织演变的影响，为微观组织和性能优化提供了宝贵依据。

D03-120**Universal basis underlying temperature, pressure and size induced dynamical evolution in metallic glass-forming liquids**Huaping Zhang*¹, Beibei Fan², Jiaqi Wu², Maozhi Li²

1. Songshan Lake Materials Laboratory

2. Renmin University of China

The dramatic temperature-dependence of liquids dynamics has attracted considerable scientific interests and efforts in the past decades, but the physics of which remains elusive. In addition to temperature, some other parameters, such as pressure, loading and size, can also tune the liquid dynamics and induce glass transition, which makes the situation more complicated. Here, we performed molecular dynamics simulations for Ni₅₀Zr₅₀ bulk liquid and nanodroplet to study the dynamics evolution in the complex multivariate phase space, especially along the isotherm with the change of pressure or droplet size. It is found that the short-time Debye-Waller factor universally determines the long-time relaxation dynamics no matter how the temperature, pressure or size changes. The basic correlation even holds at the local atomic scale. This finding provides general understanding of the microscopic mechanism of dynamic arrest and dynamic heterogeneity.

D03-121**生物医用 TiZrNbTa 高熵合金的设计制备与组织性能研究**

谢国强*、向涛

哈尔滨工业大学（深圳）材料科学与工程学院

金属材料以其高强韧性、耐疲劳、易加工成形性等优良的综合性能，一直是临床上用量最大和应用广泛的一类生物医用材料。然而，目前使用的生物医用金属材料存在与人骨力学性能不匹配、包含生物毒性或生物有害性元素等问题，为了适应生物医疗领域应用的要求，研究与开发新型的生物医用金属材料具有十分重要的意义。本报告将介绍我们课题组近年来在生物医疗用 TiZrNbTa 高熵合金研究方面的进展。我

们设计并制备了不含生物毒性或生物安全性差元素的高熵合金及其复合材料，并通过成分优化、工艺调控、组织结构适配设计等对合金体系进行了优化，对其物理性能、热性能、化学性能、机械性能、生物安全性和生物相容性等进行了系统的评价。

D03-122

草酸改性铁基非晶合金对酸性橙 II 的高效去除性能和机理研究

韦靖^{*1,2}、郑志刚²、邱兆国²、曾德长²

1. 广州航海学院/广州交通大学（筹）

2. 华南理工大学

介绍了一种通过球磨铁基非晶合金 (Fe^{am}) 与草酸二水合物来制备草酸改性铁基非晶合金 (OA-Fe^{am}) 的方法。研究表明，由此产生的 FeC_2O_4 外壳能够显著提高 Fe^{am} 对酸性橙 II (AO II) 的去除性能，在 35 °C 环境温度下去除速率提高约 2.17 倍。这归因于与铁基非晶合金表面原始的 Fe_2O_3 外壳相比， FeC_2O_4 外壳具有更强的质子传导率。因此，质子可以更加有效地穿过 FeC_2O_4 外壳并渗透到铁芯中，并作为还原剂与铁芯反应生成 $\bullet\text{H}$ 。与此同时，在 Fe^{am} 表面生成大量吸附态 Fe^{2+} ，而表面吸附态 Fe^{2+} 是酸性橙 II 去除过程的主要参与者之一，因此在广泛的 pH 值范围内实现了高效的 AO II 去除。此外， OA-Fe^{am} 在去除直接染料和活性染料方面同样具有很好的去除效果。这项研究为 Fe^{am} 引入了一种对环境无害的表面改性技术，并重点探究了质子传导率对 Fe^{am} 去除染料废水性能的影响。

D03-123

高熵二维材料与非晶超导

应天平*

中国科学院物理研究所

2004 年石墨烯的发现打开了二维世界探索的大门。尽管二维材料具有丰富的物理性质，其研究的体系仍相对有限，新的二维材料设计策略亟待发现。同年，高熵合金 (HEA) 的概念被提出，其不仅具有优异的机械强度和抗腐蚀性能，高熵理念还大幅拓展了材料探索的空间。

第一部分内容，我们提出一种新的材料设计策略，将二维材料和高熵的概念结合起来，发现一个全新的材料家族，即高熵二维材料 (HEX, X 代表硫族元素、卤素或磷硫化物)。一方面，高熵合金多元素组成极大地拓宽了二维材料设计的自由度；另一方面，二维属性也有助于材料的表征和调控，扩展高熵系统的应用场景。这里，我们展示了 30 多新发现的 HEX 材料。这些材料的具有均匀的元素分布，易于剥离、插层和堆垛。除了继承 HEA 优异的耐腐蚀性和催化活性，由于 HEX 其丰富的元素组合，体系还展现出包括超导性、金属性、半导体性和绝缘性在内的多种物性。

第二部分内容，我们利用高压在 In-Te 二元体系中发现一种少见的“晶体-非晶-晶体”连续相变，源于体系中丰富的中程序和短程序。有趣的是超导转变温度在非晶相中达到最大值，这可能与电子波函数的分形行为有关。

参考文献:

T. P. Ying* et al. J. Am. Chem. Soc. 143, 7042-7049 (2021)

T. P. Ying et al. Adv. Sci. 2203219 (2022)

Y. Zhao, T. P. Ying*, C.Z. Chen*, Y.P.Qi* et al. Adv. Mater. 2401118 (2024)

D03-124

非晶合金的点蚀生长动力学研究

马浩然、牟春阳、杨明思、毛飞雄、贺爱娜、董亚强、满其奎、黎嘉威*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

点蚀损伤是金属腐蚀破坏的主要形式之一，研究非晶合金的点蚀行为，明确点蚀的萌生及生长机制，对提升非晶合金的服役稳定性具有重要意义。本工作利用微米级直径非晶丝制作的人工点蚀电极，研究了 Co 基非晶合金在 NaCl 溶液中的点蚀生长动力学行为。基于局部点蚀环境中蚀坑维持稳态生长的临界参数，揭示了非晶结构不均匀性影响点蚀生长的微观机制。研究发现，退火引起的结构弛豫降低了合金的活化溶解速率，导致再钝化电位和点蚀溶液临界浓度提高，显著抑制了无盐膜条件下活化控制的点蚀生长；另一方面，减缓的活化溶解导致点蚀溶液达到饱和浓度所需的转变电位升高，但是维持盐膜沉淀的溶液饱和浓度不变，盐膜覆盖下扩散控制的点蚀生长未受影响。

D03-125

超快超声振动诱导表面非晶化增强高熵合金机械性能

张宇、马将*

深圳大学

高熵合金 (HEAs) 因其独特的多组分和近等原子比设计理念，是一种有应用前景的新型金属材料，表现出与传统金属相更优越的性能。然而，它们在室温下的屈服强度 (σ_y) 相对较低，其中具有单相面心立方 (FCC) 结构的最为明显，这严重限制了它们在工程上的应用。在本研究，通过对 CoCrFeNiMn 高熵合金表面施加 20 KHz 的高频超声振动 (UV)，整个加工过程持续 1-3 秒，样品表面微柱压缩测试表明，微柱的压缩强度提高了 410%，达到目前报道初始相为 FCC 的最高值 5.1 GPa，TEM 以及 XRD 都显示表面晶体结构趋于无序化，佐证了其具有玻璃般的超强表面。此外，从加工后样品的横截面呈现梯度结构，从近表面到内层，分别有非晶结构、纳米晶体、细晶体和粗晶体。越靠近表面，颗粒越细小，位错密度越高，致使近表面的硬度提高了 103%。在拉伸试验中，坚硬的非晶相和纳米晶体使屈服强度和极限拉伸强度分别提高了 87% 和 60%，而中间粗晶延续韧性变形则保持了强度-韧性的平衡。我们的研究表明，超声振动是提高金属材料屈服强度和极限强度的一种简便而有效的方法。

D03-126

TiZrHfNbTa 系难熔高熵合金力学性能第一性原理计算

吴亚楠、李泽、刘景顺*

内蒙古工业大学

难熔高熵合金 (RHEAs) 因其优异的力学性能被认为是取代传统高温合金的重要候选材料。研究其组分与力学性能之间的关系对推进其应用进展具有重要意义。本工作基于第一性原理计算结合虚拟晶体近似法，研究了不同元素组分对具有优异延展性 TiZrHfNbTa 系 RHEAs 力学性能的影响。晶格常数、弹性模量、硬度、屈服强度和位错因子等物理参数的计算表明，加入原子半径和密度较大的元素分别提高了合金的晶格常数和密度。添加较多的 VB 副族元素可提高合金的弹性模量、硬度和强度，其中，TiHfNbTa 合金 (Zr0 合金) 的屈服强度最高，约为 1.28 GPa。强金属元素 Hf 的加入显著提高了合金的泊松比和位错形核能力，其原子键表现为金属键合，有助于改善合金的延展性。本工作为进一步研究 TiZrHfNbTa 系难熔高熵合金的力学性能提供了有效的理论预测。

D03-127

分级异质结构实现 TRIP 强化共晶高熵合金的强韧性协同作用

刘浩翔、武宇浩、刘栩东、贺一轩*

西北工业大学

将相变诱导塑性 (TRIP) 效应引入共晶高熵合金 (EHEA) 的变形过程是一种很有前途的规避强度-塑性权衡的方法。然而，相变引起的界面不稳定性最终会通过诱导裂纹萌生而导致低塑性。在这里，我们

报告了一种通过构建由片层区域和等轴区域组成的分级异质结构（HH）来克服这个问题的策略。该合金表现出优异的强度-延展性协同作用，极限抗拉强度为 1557.68MPa，均匀伸长率为 20.67%，这源于持续有效的加工硬化能力。原位拉伸实验表明，双阶段加工硬化行为是由不同区域的 B2 相在依次发生应力诱导马氏体相变引起。特有的分级异质结构诱导的顺序激活马氏体相变使得合金变形过程中具有持续切高效的加工硬化率。此外，FCC 相中堆垛层错网络的形成也有效地提高了加工硬化能力。更重要的是，不同区域之间的不相容变形产生了额外的异质变形诱导（HDI）强化。这项工作通过引入分级异质结构，为设计先进的 TRIP 辅助高性能共晶高熵合金铺平了道路。

D03-128

低氧超细晶难熔高熵合金的制备及其力学性能

侯超*、孙雅萍、宋晓艳

北京工业大学

晶界调控在提高合金的强度与塑性方面具有重要作用。难熔高熵合金的晶界易受氧浓度的影响，晶界处过高的氧含量导致晶界脆性增加，制约着难熔高熵合金力学性能的提升。本研究以 NbMoTaW 难熔高熵合金为例，采用高压辅助烧结以及从粉末合成到烧结全过程惰性气氛保护的粉末冶金技术，制备出具有单一 BCC 相结构的超细晶 NbMoTaW 合金，实现了在合金中构造出大量的“清洁”晶界。通过控制氧含量并增加晶界比例，缓解了晶界氧元素的偏析和氧化物形成，从而保持了界面固有的高结合强度。高结合强度的清洁晶界不仅有效降低了晶界的脆性断裂，还促进了合金晶粒内的变形。与电弧熔炼制备的粗晶合金以及传统粉末冶金方法烧结制备的合金相比，低氧超细晶 NbMoTaW 合金在室温下表现出同时提升的屈服强度和塑性，在 1200°C 时仍然表现出约 1100 MPa 的高屈服强度。本研究为制备物相纯净且具有优异力学性能的难熔高熵合金提供了可行途径。

D03-129

结构调控增强多主元合金电解水催化性能研究

杨绎原、贾喆、沈宝龙*

东南大学

多主元合金以其成分多样性，极大扩展了金属材料设计范围，在能源催化领域展现独特潜能。然而，传统合金化方法严重依赖成分设计和鸡尾酒效应，忽视了高熵固溶体结构调控的潜力。本文展示了两种结构调控策略，旨在设计新型无序合金催化材料以突破“成本-效率”制衡关系：

（1）采用创新磁性诱导合金设计策略在 $\text{Fe}_{10}\text{Co}_5\text{Ni}_{10}\text{Cu}_{15}\text{Al}_{60}$ 多主元合金中成功构筑化学短程有序结构^[1]，并研究其有序结构对电解水催化活性的影响。脱合金过程中表面大量 Al 元素浸出，形成均匀多孔结构。形成的 M-Cu (M = Fe, Co, Ni, Al) 有序原子配位构型，尤其是 Cu-Al 配位，极大降低水分解反应能垒，实现优异的碱性双功能电解水，在电池电压为 2.0 V 时，获得电流密度 130 mA cm^{-2} ，优于商业贵金属体系 4 倍；

（2）应变工程策略^[2]，通过空位诱导高熵合金薄膜表面产生晶格微观应变场，进而调控电荷分布与 d 带中心结构，实现优异全 pH 析氢反应催化活性。该高熵合金薄膜实现安培级电流密度过电势 104 mV（碱性）和 106 mV（酸性），在阴离子交换膜电解池稳定运行近 500 小时，寿命是商用 Pt/C || IrO_2 体系的 40 倍。以上结构调控设计策略为开发高性能、低成本合金催化材料提供重要实验和理论基础，为设计高性能多主元合金催化材料在能源催化领域广泛应用提供了新的思路。

[1] Chemical short-range order in multi-principal element alloy with ordering effects on water electrolysis performance. Y.Y. Yang, Z. Jia, X.Y. Zhang, Y.J. Liu, Q.Q. Wang, Y.J. Li, L.L. Shao, S.Y. Di, J. Kuang, L.G. Sun, L.C Zhang, Jamie J. Kruzic, Y. Lu, J. Lu, B.L. Shen, *Mater. Today* 72 (2024) 97-108.

[2] Vacancy induced microstrain in high-entropy alloy film for sustainable hydrogen production under universal pH conditions. Y.Y. Yang, Z. Jia, Q.Q. Wang, Y.J. Liu, L.G. Sun, B. Sun, J. Kuang, S.J. Dai, J.G. He,

S.D. Liu, L.B. Duan, H.J. Tang, L.C. Zhang, Jamie J. Kruzic, J. Lu, B.L. Shen, *Energ. Environ. Sci.* (2024) DOI: 10.1039/d4ee01139b.

D03-130

双相共格析出强化 $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金力学性能

刘景顺*

内蒙古工业大学

CoCrFeNi 高熵合金 (HEA) 具有典型单相 FCC 结构, 塑性优异, 但强度较低, 而 BCC 结构的 HEA 通常表现出高强度和低塑性。本工作以单一 FCC 结构的 CoCrFeNi HEA 为基础, 通过控制 Al 元素添加量引入 BCC 相, 结合轧制和热处理方法综合调控相含量及析出位置, 实现双相共格析出, 从而提高 HEA 力学性能。研究表明: 随 Al 含量增加, 合金的晶体结构发生 FCC-(FCC+BCC)-BCC 结构转变, 当 $x=0.5$ 时, 铸态合金呈 FCC+BCC 双相结构, 经轧制处理后, 结构不变, 表现出良好的加工硬化特征。轧制变形量为 90% (CR90) 时, 合金枝晶间 BCC 相发生剪切破碎, 形成纤维状变形组织, 其 R_m 和 $A\%$ 分别为 1498.77 MPa 和 2.82 %。经 1050 °C-2 h+650 °C-12 h 双重热处理后合金出现 60°/ <111> 孪晶界, 且在退火孪晶和 B2 相内析出大量共格的 L12 相和 BCC 相, 其 $R_{p0.2}$ 、 R_m 和 $A\%$ 分别为 859.04 MPa、1177.15 MPa 和 10.16%, 塑性变形能力得到有效改善。本实验结果可为高熵合金的开发和应用提供理论指导。

D03-131

锆基非晶合金螺纹孔铣削创成及加工硬化机理研究

李阳嘉、王成勇*、丁峰

广东工业大学

螺纹孔是锆基非晶合金制品中起连接和支撑作用的重要结构。本研究旨在分析锆基非晶合金螺纹孔铣削创成机制和表面加工硬化机理。结果表明, 螺纹孔的成型归因于刀齿圆周运动路径与螺纹孔螺旋线的干涉作用。刀齿切削时, 牙侧、牙底的去除量不一致而产生特定的镰刀状切屑。非晶态的加工硬化归因于刀具对加工表面的挤压应力使原子团簇协同重排被抑制, 表征为可激活的饱和剪切转变区域 (STZs) 体积的减少。提高切削速度, 可利用热软化效应促使 STZs 体积的增加以抑制加工硬化, 并实现锆基非晶合金螺纹孔高效高质量加工。

D03-132

纳米非晶合金的能量状态调控与性能关联

冯涛*

南京理工大学

成分-结构-性能之间的关系是影响材料制备和性能调控的基础。然而, 由于非晶合金的原子排列无序性, 晶体材料的经典理论和传统结构表征方法都无法揭示其微观结构与性能间的关系。非晶合金的能量亚稳态特征, 使得能量状态成为衔接于结构-性能之间的新桥梁, 为理解和认识非晶合金材料基本物理问题提供了重要途径。对快速凝固技术制备的非晶合金进行二次制备 (退火或者回春处理) 是改变其能量状态的常规途径, 但通常具有能量调控单向性、调控范围局限性、及体系选择性等特点。通过纳米结构化, 引入高度结构不均匀性的纳米非晶合金, 有望成为实现非晶合金能量状态双向调控的普适性方法。本文主要探讨纳米非晶合金的能量调控实现途径、能量状态与中短程原子结构特征的关联、以及能量状态对力学和催化性能的影响, 为实现非晶合金性能调控和应用拓展提供新的思路和方法。

D03-133

利用记忆效应同步提升 Fe-基非晶合金的塑性和软磁性能

周维华¹、张士元¹、宋丽建²、霍军涛²、王军强²、李毅*¹

1. 中国科学院金属研究所

2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

非晶态材料的记忆效应是指非晶态材料经过先低温再高温两步退火时，它的体积或者焓不是单调递减，而是先升高再降低。记忆效应在非晶材料中普遍，利用记忆效应实现非晶态材料的能量提升（即回春）也被广泛研究。然而，利用记忆效应来改善非晶态材料的力学性能以及功能性能还鲜有报道。

我们发现，利用记忆效应不仅可以实现弛豫态 $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{9.5}\text{B}_{13}$ 非晶合金条带的回春，还可以显著改善其力学性能。淬火态 $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{9.5}\text{B}_{13}$ 非晶合金条带在 600 K 退火 1 h 后，其能量状态降低了 1.08 kJ mol^{-1} ，平均弯曲失效应变从淬火态的 100%降低至弛豫态的 $15 \pm 6\%$ 。经过记忆效应回春处理后，条带的能量状态提升了 0.29 kJ mol^{-1} ，同时，平均弯曲失效应变回复至 $65 \pm 26\%$ 。同时，我们还发现，经过记忆效应回春后的非晶合金条带的软磁性能也得到了进一步的提升。淬火态 $\text{Fe}_{77.5}\text{Si}_{9.5}\text{B}_{13}$ 非晶合金的矫顽力为 3.4 A m^{-1} ，经过 600 K 退火 1 h 后的退火处理后，其矫顽力降低至 2.7 A m^{-1} ，然而经过记忆效应回春后非晶合金的矫顽力最小，达到 0.8 A m^{-1} 。

综上，我们发现利用记忆效应可以实现非晶合金的能量调控，实现弛豫态非晶合金的回春以及再韧化，并同时提升其软磁性能。这一发现为利用记忆效应改善非晶态材料的性能开辟了新的视角。

D03-134

过氧乙酸诱导铁基非晶合金构建表面纳米工程高效处理饮用水

李宇健、张振轩*、梁雄、马将

深圳大学机电与控制工程学院

非晶态合金属于能量状态丰富的非平衡态亚稳材料，在有机污染物的催化降解领域表现出显著的优异性能。本研究利用无氯氧化剂过氧乙酸诱导铁基非晶合金条带构建表面纳米工程高效处理饮用水，并有效控制去除过程中产生的有机卤代消毒副产物。通过构建非晶合金高级氧化技术研究了铁基非晶合金条带表面纳米工程的降解特性、非晶条带表征、可重复利用性、毒性分析、实际应用等内容；运用电子顺磁共振波谱技术及猝灭实验对催化反应中的活性物质进行了鉴定；结合材料表面物化性质的变化综合推断了其对有机卤代消毒副产物的生成控制机制。结果表明：在中性条件下，非晶合金可以有效通过降解前驱物（天然有机质）来控制消毒副产物的生成，天然有机质浓度可降低约 98.21%，对应消毒副产物的生成势降低约 80.64%，这种效果归因于纳米花结构产生的原电池效应，提高了降解效率。相比对应晶态铁基材料和均相材料表现出明显优势，催化反应中主要生成的活性物质为高价铁 Fe(IV) 。铁基非晶合金在综合水消毒和净化方面具有广阔的潜力。

D03-135

激光增材制造难熔高熵合金性能强化与复杂构件一体化成形

蔡江龙、张航*

西安交通大学

NbMoTa 基难熔高熵合金的高熔点及脆硬性导致极高的加工成形难度，采用激光粉末床熔融增材制造技术为难熔高熵合金材料大通量开发以及复杂构件的高效成形提供了创新性方案。研究采用第一性原理、CALPHAD 等合金设计理论并结合深度学习，提出高性能难熔高熵合金的设计方法和准则。通过元素添加与成分优化，成功将合金裂纹缺陷转化为堆垛层错，实现合金的缺陷抑制。开发的高性能难熔高熵合金硬度 $\geq 600 \text{ Hv}$ ，室温抗压强度 3.1 GPa ，室温抗拉强度 1.2 GPa ， 1000°C 抗压强度 1.0 GPa 。基于自主开发有限-差分数值模拟软件辅助工艺设计，采用智能分区成形技术实现高翘曲敏感性区域智能识别并进行实时工艺调控，从而解决大尺寸复杂构件成形的翘曲问题。本研究基于激光粉末床熔融技术，通过材料设计-冶金-

成形同步制造, 促进 NbMoTa 基难熔高熵合金在新一代航空航天、能源、军事装备等极端耐热关键零件的应用。

D03-136

优化 Cr 含量来增强 FeCoNiCr 系高熵合金的阻燃性能

喻嘉彬、王辉*、吴渊、吕昭平

北京科技大学

在航空航天领域, 对阻燃合金的需求越来越高。本研究合成了一系列 $(\text{FeCoNi})_{100-x}\text{Cr}_x$ ($x=0\sim 45\text{at.}\%$) 高熵合金, 研究了 Cr 含量对其阻燃性能的影响规律。结果表明, Cr 能有效提高高熵合金的阻燃性能, 但当 Cr 含量超过一定值 ($>30\text{at.}\%$) 时, 高熵合金的阻燃性能会降低。一方面, Cr 增加了高熵合金的燃烧热和燃烧速率, 从而降低了阻燃性能; 另一方面, Cr 促进了 Cr_2O_3 的形成, 从而提高了阻燃性能。因此, 两方面的作用使得 Cr 含量为 $30\text{at.}\%$ 时的阻燃性能最好。此外, 在燃烧过程中, 熔池外氧化层的形态对高熵合金的燃烧性能也有着重要影响, 液态氧化层能够协调熔池的变形应力, 从而使氧化层始终保持连续分布状态, 有效防止了氧向熔池内扩散, 促进了高熵合金的阻燃性能。目前的研究结果揭示了高熵合金中成分-燃烧性能之间的关联。

D03-137

Zr 基非晶合金的晶化行为、纳米晶相调控与力学性能研究

刘丛*

河北工业大学

Zr 基非晶合金具有大非晶形成能力、高稳定性、优异力学性能和良好生物兼容性等优点, 是应用前景较大的新型结构材料。然而, Zr 基非晶合金在室温压缩或拉伸过程中存在的室温脆性, 阻碍了它在工程领域的发展。因此, 提高材料的塑性是人们的研究重点。研究发现, 提高体系的 Zr 含量、部分析出纳米晶相能够有效提高材料的强度和塑性。我们通过添加合金成分和增加 Zr 含量, 成功制备出 Zr 含量高于 $70\text{at.}\%$ 的 Zr-Al-Ni-(Cu, Ag) 非晶条带和非晶棒。研究表明, Zr 基非晶合金的热稳定性和强度随着 Zr 含量增加而降低, 对非晶合金进行部分晶化处理, 获得均匀分布的准晶或 $\beta\text{-Zr} + \omega\text{-Zr}$ 纳米晶相, 提高了材料的强度。铸态、退火后含准晶或 $\beta\text{-Zr} + \omega\text{-Zr}$ 相的块体非晶合金不仅表现出较高的强度、硬度, 还能保持良好的塑性应变。准晶或 $\beta\text{-Zr} + \omega\text{-Zr}$ 相的共存及它们的协同作用, 导致富 Zr 非晶合金的屈服强度增加和保持较大的塑性应变。Zr 含量与纳米晶相对 Zr 基非晶合金强度和塑性的增强机制的研究, 对高强度的塑性富 Zr 块体非晶/纳米晶合金的开发和应用具有重要的研究意义和研究价值。

D03-138

Defeating hydrogen-induced grain-boundary embrittlement via triggering interfacial segregation in Fe-Cr-Co-Ni-type high-entropy alloys

Weihong Liu*

Harbin Institute of Technology (Shenzhen)

More than one century ago, hydrogen, the ubiquity element, was found to be detrimental to many metallic materials by causing a severe reduction in mechanical properties, such as ductility, toughness, and fatigue life, known as the hydrogen embrittlement (HE). Extensive studies demonstrate that grain boundaries (GBs), which inevitably exist in polycrystalline alloys, are preferential locations for hydrogen accumulation due to their high excess free volume. A high concentration of H atoms accelerates the decohesion of GBs by enhancing the strain localization, stabilizing vacancies, and accelerating void initiation and coalescence, finally leading to the brittle

intergranular crack with limited ductility [5–10]. Hence, the GBs are crucial in determining the HE resistance, especially in single-phase polycrystalline materials.

In this study, we found that such a long-standing HE problem can be effectively eliminated in the $\text{Fe}_{1-x}(\text{CrCoNi})_x$ face-centered-cubic (fcc) high-entropy alloys (HEAs) by triggering the localized segregation of Cr at GBs. It was revealed that increasing the Fe concentration from 2.5 to 25 at. % leads to substantially improved HE resistance, i.e., the ductility loss decreases from 70% to 6%, as shown in Fig. 1. Meanwhile, the fracture mode transformed from the intergranular to the transgranular mode. Multiscale microstructural analyses demonstrated that the $\text{Fe}_{2.5}\text{Cr}_{32.5}\text{Co}_{32.5}\text{Ni}_{32.5}$ (2.5Fe) and $\text{Fe}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}$ (25Fe) alloys show negligible differences in the phase structure, grain size, and GB character. However, interestingly, the near atomic-resolution elemental mapping revealed that an increased Fe concentration promotes the nanoscale Cr segregation at the GBs (Fig. 1), which is primarily motivated by the strong repulsive force between Cr and Fe and the low self-binding energy of Cr. Such unusual interfacial segregation of Cr, which has not been reported before in the $\text{Fe}_{25}\text{Cr}_{25}\text{Co}_{25}\text{Ni}_{25}$ alloy, helps enhance the GBs' cohesive strength and suppresses the local hydrogen segregation at GBs due to the decreased GB energy, leading to the outstanding HE resistance. These findings decipher the origins of the vastly-improved HE resistance in current FeCrCoNi-type HEAs, and meanwhile, provide new insight into the future development of novel high-performance structural alloys with extraordinary immunity to hydrogen-induced damages.

D03-139

具有优异力学性能和宽温度范围的近零热膨胀复合材料的设计

黄世科*

深圳大学

材料的尺寸随温度的变化非常小,即接近零热膨胀(NZTE)性能,在精密仪器仪表和航空航天等领域发现了诱人的前景。然而,如何手动设计和合成高性能的 NZTE 材料一直是一个长期的挑战。本文基于金属玻璃(MG)优异的键合成型能力,将不同体积比的 Zr 基 MG 与 $\beta\text{-LiAlSiO}_4$ ($\beta\text{-LAS}$)相结合,制备了热膨胀连续调节的复合材料。有趣的是,当 MG 体积比为 40%和 50%时,在 150 K ~ 700 K 温度范围内, NZTE 性能达到 0.693 ppm/K 和 1.587 ppm/K。抗压强度分别达到 320 MPa 和 436 MPa。该复合材料具有良好的抗热震性能和加工性能。本工作不仅提供了高性能的新型 NZTE 材料,而且为高性能 NZTE 复合材料的定制化提供了便利。

D03-140

高熵合金的变形行为

黄永江*

哈尔滨工业大学

本研究通过在室温和低温下进行的 Erichsen 杯突试验,研究了 $\text{CoCrFeNiMn}_{0.75}\text{Cu}_{0.25}$ 高熵合金板材的变形行为。结果表明高熵合金板材的成形性具有显著的温度依赖性。温度从 298 K 降至 93 K 时, Erichsen 指数 (IE) 从 9.8 mm 显著增加到 12.4 mm,表面积膨胀率 (δ) 从 51.6% 增加到 76.3%。低温下成形性的增强归因于变形机制的转变,从 298 K 时的单一位错滑移转变为 93 K 时的协同机制,包括位错滑移、分层堆垛层错、Lomer-Cottrell 锁以及多尺度纳米孪晶。这些发现为优化 HEA 的成形工艺提供了关键见解,突显了其在极端条件(如航空航天工程)中先进应用的潜力。本研究强调理解温度依赖变形机制的重要性,以利用高熵合金的独特性能在苛刻环境中实现更高的性能和可靠性。

D03-141

铈系非晶合金薄膜研究进展

黄火根*、张培、李正飞、张鹏国、王勤国
中国工程物理研究院材料研究所

为了探索铀系非晶合金在表面工程领域的应用可行性,开展了铀系非晶薄膜研究工作。首先,结合合金相图特征分析、共晶准则、基础团簇结构剖析、相似组元替换、反向设计思想等非晶合金设计方法,利用真空电弧熔炼、合金熔体甩带制备手段以及结构衍射、热分析表征技术,开发出多个拟用于镀膜的铀基非晶合金体系及成分,其中 U-Cr 体系表现出宽的非晶成分区间。

通过不同体系薄膜化优缺点的综合评估以及基于镀膜设备的现有条件,最终选择 U-Cr 作为非晶薄膜化体系。经过大量的工艺探索与高通量制备优化,采用高真空多靶磁控溅射方法实现了 U-Cr 非晶薄膜的可控制备,其薄膜厚度、成分范围与组织结构都可实现有机调控。高质量非晶薄膜可以达到光洁致密、厚度一致、成分均匀的效果,且表现出较优的抗腐蚀效果。

D03-142

Zr_{59.5}Cu_{14.4}Ni_{11.6}Al_{9.7}Nb_{4.8} 非晶合金在不同加热速率下的结晶路径及其非等温动力学研究

武毅^{1,2}、张龙*¹、李彪^{1,2}、朱玉辉⁴、袁旭东¹、颜廷毅¹、张宏伟¹、张海峰^{1,3}

1. 中国科学院金属研究所
2. 中国科学技术大学
3. 东北大学
4. 洛阳船舶材料研究所

非晶合金是一种亚稳金属材料,极易发生晶化,且其晶化过程中产生的缺陷对其性能具有极大的负面影响,此外,关于非晶合金晶化过程的理论仍存在较大局限。因此,研究非晶合金晶化行为及其动力学,对理解非晶合金的内部热动力学状态、拓展非晶合金的应用范围具有积极意义。本工作研究了 Zr_{59.5}Cu_{14.4}Ni_{11.6}Al_{9.7}Nb_{4.8} 非晶合金在加热时的结晶路径及其非等温动力学。该非晶合金晶化过程是按照二十面体准晶(IQ)相、富 Ni 相和富 Cu 相的顺序进行的。在不同的加热速率下计算了 Avrami 指数,对其非等温结晶动力学进行分析,发现 IQ 相和富 Ni 相是界面控制生长,而富 Cu 相是扩散控制生长。此外,构建了加热速率范围超过六个数量级的连续加热转变(CHT)图,揭示了不同加热速率下的结晶机理。这些发现加深了对非晶合金结晶行为及其动力学的理解。

D03-143

A data-driven symbolic regression approach to design strong single-phase multi-principal element alloys

Yang Tong*¹, Dawei Zhou¹, Weidong Li², Caijuan Shi³

1. Yantai University
2. University of Science and Technology Beijing
3. Institute of High Energy Physics

Multi-principal element alloys (MPEAs) emerge as a groundbreaking class of solid-solution alloys, showcasing an extraordinary combination of high strength and ductility, especially under extreme temperatures. However, the pursuit of a robust predictive formula for solid-solution strengthening remains unmet, hindering the design of MPEAs tailored to specific properties amidst the endless composition possibilities. Here, by integrating machine learning with local properties characterization and calculation, and mechanical testing, we quantitatively investigated the correlation between yield strength normalized by shear modulus (σ_y/G) and local environment features—Debye-Waller factor (U_{iso}) and local strain (ϵ_{1st}), characterizing local lattice distortion, and electronegativity mismatch ($\Delta\chi$), reflecting chemical complexity—for face-centered cubic MPEAs covering a wide range of atomic size and electronegativity variations. We found that U_{iso} exhibits a strong linear correlation with $\Delta\chi$, whereas for predicting σ_y/G , $\Delta\chi$ surpasses and other features in effectiveness. The efficacy

of the solid-solution strengthening predictive model is further substantiated through new alloy design. Our closed-loop approach provides a quantitative framework for designing MPEAs endowed with exceptional strength.

D03-144

新型难熔高熵合金中相变和位错行为与冷却速率的相关性

李哲、刘琛、王亮*、李志文、张庆达、王斌斌、苏宝献、骆良顺、陈瑞润、苏彦庆、郭景杰
哈尔滨工业大学

利用 Nb-Si 基超高温合金思想,提出了一种新命名的“含 Nb-Si 难熔高熵合金 (RHEAs)”。设计出 $6 \sim 6.67 \text{ g/cm}^3$ 的轻量 $\text{TiNbMo}_{0.5}\text{Al}_{0.225}\text{Si}_x$ RHEAs, 研究其相变与热处理冷却速率相关性, 以及在室温、高温下的变形机理。观察到两部分相变, $\beta\text{-(Nb, Ti)}_5\text{Si}_3$ 到 $\gamma\text{-(Nb, Ti)}_5\text{Si}_3$, 以及 BCC 固溶体(BCC_{ss})析出 $\gamma'\text{-(Nb, Ti)}_5\text{Si}_3$ 相。通过亚晶界形成和端迁移机制证明相变为元素扩散所控制。适当的 Si 含量有利于优良的强度-塑性协同作用, 室温条件下强度为 1763.58 MPa, 应变达到 23.65 %, 800 °C 高温条件下屈服强度为 1444.82 MPa, 应变为 17.48 %。淬火合金的高温位错行为由交滑移(铸态合金)演变为攀移-滑移耦合变形机制, 对均匀塑性变形均匀性起着至关重要的作用。因此, 提出的新型合金为纳米沉淀和多样化的位错模式定制化设计提供了新的思路。

D03-145

Fe 基非晶磁流体的制备及流变性能研究

杨春成*
河北地质大学

通过化学还原法制备了 Fe-Zr-B 非晶颗粒及磁流体。利用 X 射线衍射(XRD)、透射电子显微镜(TEM)和振动样品磁强计(VSM)对 Fe-Zr-B 非晶磁流体的结构、形貌和磁性进行了表征。此外系统研究了其磁粘特性。研究结果显示, Fe-Zr-B 颗粒呈现非晶结构, 平均粒径小于 30 nm。这些非晶颗粒的饱和磁化强度约为 55 emu/g, 表现出极低的剩磁和矫顽力。此外, 我们探讨了一个用于表征磁场对粘度磁滞效应影响的参数 $\Delta\eta^*$ ($\eta_{up}-\eta_{down}/\eta_{down}$)。研究结果显示, 在 124 mT 以下, $\Delta\eta^*$ 为负值, 而在磁场强度高于 124 mT 时, 该值转为正值。粘度与磁场之间的显著反向关联归因于流变性质和磁场的综合影响。这些发现可为 Fe 基非晶的功能化应用提供新的视角。

D03-146

非晶纳米晶软磁复合材料研发、制备及应用技术

董亚强*、贾行杰、李笑、邢立业、满其奎、沈保根
中国科学院宁波材料技术与工程研究所

我国正加快推进 5G 通讯、人工智能、物联网等新型基础设施建设, 亟需高效、高频低损、功能一体化的高端电子元器件, 为电感器、传感器、电磁兼容等器件产业的快速发展带来历史性机遇。但我国在高端软磁材料开发及应用关键技术上仍存在“卡脖子”问题, 部分核心材料及元器件严重依赖进口。针对以上问题, 本报告系统介绍团队在高频低损耗非晶纳米晶软磁复合材料的研发进展及应用推广情况。

D03-147

高磁感 FeCuSiB 系纳米晶合金设计与高频软磁特性调控研究

贺爱娜*、张干、张博峻、张瑞恒、董亚强、黎嘉威、满其奎
中国科学院宁波材料技术与工程研究所

软磁纳米晶合金具有纳米晶-非晶双相结构和低的有效随机磁晶各向异性,是 200 kHz 频率范围内综合性能最优的金属软磁材料,已作为高频变压器、各类电感、无线充电等元器件的关键材料,广泛应用于新能源汽车、智能电网、轨道交通和航空航天等领域。宽带隙第三代半导体的应用对软磁材料小型化、高效化和低能耗提出更高的要求,亟需开发与之匹配的高饱和磁感应强度(B_s , >1.3 T)与高频低损纳米晶材料。课题组基于机器学习辅助开发了高饱和磁感应强度和低矫顽力的纳米晶合金,并通过 SHAP 分析建立了饱和磁感应强度、矫顽力与重要特征的关联。采用常规晶化+低温横磁热处理有效提升了 FeCuSiBNbMn 合金的高频软磁特性。通过损耗分离、动态磁畴观察与磁各向异性调控解析了高频降损机制。另一方面,复合纳米晶化可以抑制服役温度引起的局部磁各向异性和磁畴结构的改变,从而使得在 140 °C 下,损耗和 100 kHz 的磁导率相对室温的变化率不超过 4 %。这表明经复合纳米晶化的 FeCuSiBNbMn 薄带具有优异的高频软磁特性与良好的热稳定性,适用于小型化、高效化和节能化的高频器件应用。

D03-148

溶解制造策略: 简易合成纳米多孔非晶合金多功能催化剂

曾圣浩、阮文清、梁雄、马将*

深圳大学

对提高能源效率的追求与能源存储和转换技术的发展是紧密相连的,其中,多功能催化剂扮演着至关重要的角色。然而,多功能催化剂的复杂合成和定制化设计过程,给催化剂的研发带来了巨大的挑战。针对这个问题,我们的研究采用了一种创新的溶解制造(DM)策略,成功设计出了一种自支撑、纳米级多孔的多功能电催化剂,有效解决了催化功能难以定制的问题。这种创新性的方法能够灵活地调整活性物质与非晶合金粘合剂的掺入比例,最终制造出在碱性环境中具有优异性能的电催化剂(NPMG@RuO₂)。这种催化剂展示出了优异的电催化活性,其在 10 mA/cm² 的电流密度下,析氢反应(HER)和析氧反应(OER)的过电位分别达到 41.50 mV 和 226 mV。此外,该催化剂对 HER 的 Tafel 斜率为 20.01 mV/dec,对 OER 的 Tafel 斜率为 66.53 mV/dec,同时能够保持 620 小时的稳定性。这些优异的性能得益于催化剂独特的纳米多孔结构,该结构保证了催化剂具有高密度的催化位点和良好的机械强度,同时, Ru 和 Pt-MG 之间的协同作用也提升了催化性能。这些研究结果为纳米多孔多功能催化剂的开发提供了一种提供了新的路径。

D03-149

多步升温对铁基非晶-纳米晶合金软磁性能的影响

梁韵武、郝梓炎、曹崇德、汪姚岑*

西北工业大学

软磁材料具有高饱和磁通密度(B_s)、低矫顽力(H_c)和高有效磁导率(μ_e),在变压器、电感器和汽车等许多领域发挥着重要作用。从非晶前驱体通过退火形成的铁基纳米晶材料,因其优异的软磁特性,尤其是高 B_s 和大 μ_e 而被视为传统对应材料的理想替代材料,但其软磁性能对快速升温热处理的依赖性是其制约其广泛应用的重要瓶颈。

我们对 Fe-Si-B-P-Cu 非晶合金的热力学性质进行研究,为确定热处理温度提供依据,并结合退火态合金的软磁性能研究快速热处理的作用机制。随着升温速率的增加,Fe-Si-B-P-Cu 非晶合金的晶化温度出现了明显的后移。通过基辛格拟合外延的方式,估算了 Fe-Si-B-P-Cu 非晶合金第一晶化阶段在 400K/min 升温下的 T_{x1} 和 T_{p1} 分别为 722K 和 730K,为研究快速升温热处理下的晶化行为提供了依据。

基于热力学研究,探究了 Fe-Si-B-P-Cu 退火合金的物相析出状态和软磁性能之间的关系,对快淬态带材分别以 10 K/min 和 400 K/min 的升温速率在不同温度下进行 10 min 保温热处理,得到在 400K/min 下的最佳的热处理温度为 750 K, H_c 也达到其最低值(~ 10 A/m)。

通过两步升温热处理,发现当慢速切入快速升温温度 T_{sf} (fast to slow switching temperature) 在 $S-T_{x1}$ 以下时, H_c 基本处于稳定状态,而在 $S-T_{x1}$ 之后出现急剧上升。而对于快速-慢速切换两步升温热处理而

言, 随着 T_{fs} 的升高, H_c 单调降低随后保持稳定, 且 H_c 的降幅随着 T_{fs} (slow to fast switching temperature) 也在不断下降。同时发现 Fe-Si-B-P-Cu 非晶合金以恒定升温速度进行热处理时, α -Fe 形核主要发生在 T_{x1} 与 T_{p1} 之间, 当温度高于 T_{p1} 时, α -Fe 的形核过程基本结束, 后续的晶化过程主要由于晶粒的长大所主导。

利用慢速-快速-慢速多步升温明确了快速升温热处理 (400K/min) 对于降低 Fe-Si-B-P-Cu 非晶-纳米晶合金 H_c 的关键温度窗口为 650-740 K 之间, 缩短了快速加热的必要温度区间, 为工业中局域温度范围内快速升温热处理的实现提供了基础。

结合快慢速切换升温与退火合金 H_c 的变化, 证实了多步升温热处理是研究非晶合金晶化过程中特征温度背后动力学机制的有效思路, 尤其是可以作为联系晶化热效应与动力学过程的关键手段。

D03-150

AlxHfTaTi 难熔中熵合金的室温力学和高温抗氧化性能研究

苏辰*

西南大学

难熔中熵合金(RMEA, Refractory Medium Entropy Alloy)其主要组成元素均为难熔金属元素, 有望在高温环境下服役的同时保持卓越的机械性能。然而, 该合金却面临着室温塑性低, 加工难度大和抗氧化性差等问题。本文通过添加 Al 元素, 制备出单相 BCC 结构的 AlxHfTaTi 合金, 并表现出超过 1200MPa 的压缩强度和超过 60% 的压缩塑性变形, 表现出良好的室温综合力学性能。通过对该合金进行下率为 87% 的冷轧变形后再进行 950°C-5min 退火处理, 获得晶粒细小的单相 BCC 结构, 其室温拉伸屈服强度高于 1000MPa, 断裂延伸率超过 20%。研究发现, 经过变形退火的样品的晶粒尺寸有所减小, 小尺寸晶粒中更易开动的多滑移, 从而促使晶粒旋转和位错滑移在合金中共同作用, 呈现优异的强塑性组合。最后通过对该合金在 1000°C 下的高温氧化行为进行研究, 发现在合金中添加 Al 后, 合金表层氧化层中的 AlTaO4 含量增多, 在合金表面形成了足够具有韧性且致密的氧化层, 氧化层没有出现开裂现象, 有效提高了合金的抗氧化性能。

D03-151

基于弛豫调控的非晶纳米晶合金制备及磁性能研究

宋丽建、霍军涛、王军强*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

铁基非晶纳米晶软磁合金具有高饱和磁感应强度、低矫顽力的特点, 在电力电子领域具有广泛应用前景。但由于非晶合金纳米晶化非常复杂, 晶化机制仍不清楚, 限制了高性能软磁材料的研制。围绕这一问题, 研究团队利用 Flash DSC 系统研究了非晶合金的等温弛豫规律, 建立了 β 弛豫与过冷液体晶化形核间的遗传性关系, 并据此制备出晶粒细密的铁基非晶纳米晶合金样品, 显著降低了矫顽力、提升了磁导率, 改善了软磁性能。相关结果为非晶-液体的遗传性提供了实验证据, 也为非晶纳米晶合金设计提供了新思路。

D03-152

高熵合金的点缺陷扩散行为的调控

丁俊*

西安交通大学

空位和间隙是晶体材料中的两种本征点缺陷。然而, 这两种缺陷的动力学行为却有极大差异。在常规的纯金属中, 间隙的扩散速率往往比空位高出若干个数量级。这样巨大的动力学行为的差异对材料的宏观性能带来显著影响, 例如材料的耐辐照损伤性能。在辐照环境下, 金属内部同时产生大量间隙和空位, 而间隙与空位的巨大的扩散速率差异往往导致点缺陷湮灭效率不高。因而, 降低间隙与空位的扩散速率差异能够帮助改善材料的耐辐照性能。

针对以上问题, 利用第一性原理分子动力学模拟对等原子比 NiCoCrFe (Pd) 合金中点缺陷扩散行为

进行研究,提出了一种可以大幅缩减两种点缺陷之间扩散速率差异的合金设计策略。研究表明,将更大的 Pd 原子加入到 NiCoCrFe 合金中,形成等原子比的 NiCoCrFePd 合金,两种点缺陷(空隙和空位)的扩散运动的数值上变得非常相似。通过调控高熵合金中组成元素的尺寸差异,本工作首次在单相金属结构材料中实现了近乎相等的空位和间隙两种点缺陷扩散速率[1]。这一长期以来难题的解决,是合金设计调控点缺陷扩散研究方面的重要突破。此结果为抑制空洞生成、材料肿胀提供了新的策略,为设计先进核用的耐辐照合金提供了新的思路

D03-153

Ti38V15Nb23Hf24 难熔高熵合金的高温氧化行为

欧阳迪^{1,2}、陈正杰²、于海滨²、陈镜昌¹、柳林^{*2}

1. 香港理工大学
2. 华中科技大学

难熔高熵合金因其具有本征高熔点,高稳定性和慢扩散等特性,有望在 800°C 甚至更高温度下服役,成为取代传统镍基高温合金的新一代耐高温金属材料。然而,难熔高熵合金较差的抗高温氧化性能限制了其广泛的应用,揭示高温氧化机制、提高抗高温氧化性能是该类材料的研究重点之一。本文以具有室温拉伸塑性的 Ti38V15Nb23Hf24 难熔高熵合金为对象,研究其在空气中不同温度下的高温氧化行为。结果表明:当温度低于 1000°C 时,难熔高熵合金表面会形成一层致密的氧化层,氧化层中的细小氧化物保持了近似的晶格常数和高度一致的晶体取向,使得氧在其中扩散较慢;而当温度高于 1000°C 时,V2O5 会从复合氧化物中的挥发,使氧化层中分层并产生大量的空位,这有利于金属离子的迁移和氧的内扩散,导致氧通量剧烈增加,从而诱发合金内部产生针状 HfO2 生长的内氧化。通过对针状 HfO2 生长尖端的观察,发现 HfO2 在合金内部沿着垂直于(-101)晶面的方向择优取向生长。该项研究表明,该难熔高熵合金在 1000°C 以上会因为外层氧化物的分解而导致其抗氧化性急剧变差,该研究为发展抗高温氧化难熔高熵合金提供了新的思路。

D03-154

高性能电感用非晶纳米晶软磁材料的制备

张岩*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

5G 通讯的发展对电子器件提出了高功率密度、高频化、小型化的需求。铁基非晶纳米晶合金具有高饱和磁感应强度、高磁导率、低矫顽力等优异的软磁特性,有助于满足以上电子器件性能提升的需求。提升非晶纳米晶软磁材料性能,需要从合金成分开发、结构调控、热处理工艺等多种方式及工艺入手;同时良好的绝缘包覆材料及方法、适合的压制成型工艺等亦对高性能非晶纳米晶磁粉芯材料的制备起到至关重要的作用。

本工作围绕提高非晶纳米晶软磁材料性能,开展了具有高饱和磁感应强度合金成分开发,通过气雾化法获得了具有 180 emu/g 的纳米级软磁粉末;针对具有高强高硬脆性纳米晶粉末,研究了低压力(~20 MPa)超声辅助压制方法对磁粉成型密度、颗粒分布均匀性、磁学性能的影响规律,成型密度可以等同于常规冷压法(1100 MPa)压制的磁粉芯;研究了多种绝缘包覆材料对磁粉磁学性能的影响,形成了具有百纳米级厚度的绝缘层,有效降低了磁粉芯的损耗;此外,为了实现电感器件的小型化,通过激光刻蚀研制了具有高电感密度~280-390 nH/mm²的微型柔性电感(为传统平面电感的 10 倍),DC-DC 转换器实测证明,电感器在平坦和弯曲状态下电压输出保持稳定。

具体研究内容及实验结果将在会场汇报。

D03-155

兼具高强韧性 with 优异磁热性能的稀土基非晶磁热合金

沈宝龙*

东南大学

稀土基非晶磁热合金因其较大磁熵变值、大制冷能力、低矫顽力和高电阻率等特性,作为潜在的磁制冷材料日益引起人们的广泛关注。然而,与具有巨磁热的晶态材料相比,非晶磁热合金的峰值磁熵变较低且室温塑性变形能力差,成为该类材料作为磁制冷剂应用的瓶颈。本团队在稀土基非晶磁热合金非晶形成能力、磁熵变及力学性能方面开展了系列研究工作[1,2]。最近,结合雾化法和等温吸氢方法成功开发出新型稀土金属玻璃-氢化物双相纳米结构的复合材料。与许多合金中传统的氢脆现象不同,这种纳米双相玻璃-氢化物结构显著提升了材料的强度和延展性,屈服强度提高了 44%,塑性变形从几乎为零大幅提高到 70%以上,打破了非晶合金和相关复合材料长期存在的强度-延展性权衡问题。基于微观原子结构分析,我们阐明了一种基于纳米级有序氢化物(NOH)及其与玻璃壳相互作用的新型强化和增韧机制。新型纳米双相玻璃-氢化物复合材料在低温下表现出反铁磁转变行为和低矫顽力特征,且在 5 T 外磁场变化下具有 18.7 J kg⁻¹K⁻¹ 的巨磁熵变 (- ΔSM),相较于吸氢前样品提高了 105.5%,并且是目前非晶合金和相关复合材料中的最大值[3]。本工作获得的优异磁熵变-强韧性组合突破了非晶合金作为磁制冷剂应用的性能瓶颈,为开发具有优异力学性能的新型磁热及其他功能材料提供了科学指导。

参考文献:

[1] L.L. Shao, L. Xue, Q. Luo, Q.Q. Wang, B.L. Shen, The role of Co/Al ratio in glass-forming GdCoAl magnetocaloric metallic glasses, *Materialia* 7 (2019) 100419.

[2] L.L. Shao, L. Xue, Q. Luo, K.B. Yin, Z.R. Yuan, M.Y. Zhu, T. Liang, Q.S. Zeng, L.T. Sun, B.L. Shen, Heterogeneous GdTbDyCoAl high-entropy alloy with distinctive magnetocaloric effect induced by hydrogenation, *J. Mater. Sci. Technol.* 109 (2022) 147.

[3] L.L. Shao, Q. Luo, M.J. Zhang, L. Xue, J.X. Cui, Q.Z. Yang, H.B. Ke, Y. Zhang, B.L. Shen, W.H. Wang, *Nat. Commun.* 15 (2024) 4159.

D03-156

CoFeSiB 非晶合金纤维增强环氧树脂复合材料的轴向破碎行为

梁维中*、魏然松、刘盈驿、邵琪

黑龙江科技大学

本文利用电弧熔炼技术和熔体抽拉法,制备了 Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.25}B_{15.25} 非晶合金纤维,使用手工铺陈和固化成型工艺,制备了 Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.25}B_{15.25} 非晶合金纤维增强环氧树脂复合材料。在准静态压缩条件下,研究了不同纤维体积分数(30%、40%、50%和 60%)、纤维取向(0°、15°和 30°)和纤维形状(直线形和正弦形)的非晶合金纤维增强环氧树脂复合材料的轴向破碎行为。通过压缩曲线及其对应的压缩过程破坏图像和破碎后样品断口形貌,确定了复合材料的破坏模式和能量吸收机理。

通过 DSC 差热分析与外推法确定了环氧树脂的固化工艺为: 25°C 条件下保温 24 小时,以 5°C/min 的加热速率加热至 125°C 保温 4 小时。探索了非晶合金纤维增强环氧树脂复合材料的制备工艺。在准静态压缩情况下,随着纤维体积分数由 30% 增加至 40% 再增加至 60%,复合材料的压碎效率 CFE 由 0.44 先增加至 0.46 后降至 0.28; 比能量 SEA 也由 34.79 J/g 先增至 41.20 J/g 后减小到 22.51 J/g。适当增加纤维取向可以提高复合材料 SEA 和 CFE,随着纤维取向由 0° 增加 15° 再增加到 30°,复合材料的 CFE 也相应的由 0.46 增加到 0.60 再增加到 0.79; SEA 则呈先增加后减小的趋势,先由 41.2 J/g 增加到 44.46 J/g 后降至 39.7 J/g。纤维形状的改变增加了样品的 SEA 和 CFE,正弦形纤维样品 S-V30 的 SEA 和 CFE 分别为 57.8 J/g 和 0.71,比直线形纤维样品 V30 分别高出 66% 和 42%。

在准静态下发现了三种不同的破坏模式。模式 I 是由基体控制,由样品一端向另一端逐渐产生破坏;模式 II 是纤维和基体变形共同控制的破坏模式;模式 III 是由轴向压缩载荷和横向剪切力及纤维变形共同

控制的破坏模式。此外，复合材料的能量吸收机理主要包括四个方面：轴向和周向裂纹扩展；基体变形、纤维层脱落；纤维束弯曲、纤维拔出和纤维扭结、纤维断裂。

D03-157

L21 相强化难熔高熵合金的成分设计优化

尹海清^{*1,2,3}、解树一¹、张聪¹、张瑞杰¹、姜雪¹、王永伟¹、曲选辉^{1,2}

1. 北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心，北京，100083
2. 材料基因工程北京高精尖创新中心，北京，100083
3. 辽宁省材料研究院智能技术研究所，沈阳，110004

难熔高熵合金 (RHEA) 具有高熔点和优异的抗软化性能，因此在极端高温应用中极具吸引力。Ni₂TiAl 相具有 L21 结构的 Heusler 结构，可与 BCC 相形成半共格界面，从而有效强化 BCC 基体，并可提高 RHEAs 的高温性能。本研究旨在针对工作温度为 850-880℃ 的耐高温高熵合金结构材料的应用需求，综合运用理论知识、第一性原理计算及热力学计算有效地设计并优化了一种新型 L21-Ni₂TiAl 相强化的难熔高熵合金体系，实现了高强、高韧及低密度的平衡。候选合金在室温铸造状态下的密度为 6.62 g/cm³，维氏硬度为 600.5±5.5 HV5，抗压屈服强度为 2012.9 MPa，断裂应变为 8.42%。在 850℃ 和 1000℃ 时的屈服强度分别为 1322.2 MPa 和 783.4 MPa，相应的断裂应变分别为 14.9% 和大于 50%，与已报道的铸态难熔中/高熵合金和两种传统的镍基超级合金相比，候选合金在室温至 850℃ 的温度范围内表现出良好的比强度。本研究为开发具有实际应用价值的难熔高熵合金提供了理论指导，并对推动下一代高推重比航空发动机的发展具有重要意义。

D03-158

304 不锈钢表面激光熔覆铁基中熵合金涂层组织性能研究

于志琦、赵燕春*

兰州理工大学

304 不锈钢因具有较好的耐腐蚀性能、耐热性能和抗氧化性能，已经成功应用于医疗器械、航空零部件和船舶零部件等领域，但在工况条件下其硬度较低和耐磨性较差，易使仪器设备由于磨损而缩短使用寿命，因此需要在其表面制备耐磨、减摩的涂层。本文利用激光熔覆表面改性技术在 304 不锈钢表面制备铁基中熵合金涂层，采用正交试验设计方法，探讨熔覆工艺参数（激光功率、熔覆速度和光斑直径）对涂层质量的影响，优化出制备涂层的最佳熔覆工艺参数，并通过优化出的工艺参数制备了 Fe_{63.3}Mn₁₄Si_{9.1}Cr_{9.8}C_{3.8} 中熵合金涂层。选择在盐溶液中抗点蚀性能强的 Mo 元素，并在优化出的 (Fe_{63.3}Mn₁₄Si_{9.1}Cr_{9.8}C_{3.8})₉₉Cu₁ 合金基础上，研究添加 Mo 元素含量分别为 1、3、5、7 和 10at.% 时对 (Fe_{63.3}Mn₁₄Si_{9.1}Cr_{9.8}C_{3.8})_{99-x}Cu₁Mo_x 中熵合金涂层组织、显微硬度、耐蚀和耐磨性能影响。

研究表明，由激光熔覆技术制备铁基中熵合金涂层时激光功率和熔覆速度对涂层质量有重要影响，而光斑直径对涂层质量的影响较小，优化获得的最佳工艺参数为激光功率 1500 W，熔覆速度 4 mm/s，光斑直径 4 mm。

由不同含量的 Mo 元素添加，研究了 (Fe_{63.3}Mn₁₄Si_{9.1}Cr_{9.8}C_{3.8})_{99-x}Cu₁Mo_x (x=0,1,3,5,7 和 10 at.%) 中熵合金涂层组织结构与耐蚀耐磨性能的关系。当 Mo 元素添加量低于 7at.% 时，涂层由单一的 FCC 结构固溶体相组成。而 Mo 含量为 10at.% 时，涂层中生成了 BCC 相和 σ 相。涂层的显微硬度随 Mo 元素含量增加呈递增趋势。其中 Mo 含量 10at.% 时，涂层显微硬度为 527(HV0.1)，约为基体 304 不锈钢的 2.6 倍。在 3.5%NaCl 溶液中，Mo 元素含量控制在合适范围内能提高涂层耐蚀性能。添加 1% at.% 和 3% at.% Mo 元素后，涂层的耐蚀性能显著提高，而当 Mo 元素含量大于 5% at.% 时，涂层耐腐蚀性能呈下降趋势。其中，Mo₅ 涂层具有高的腐蚀电位和低的腐蚀电流密度，表现出优异的耐蚀性能。XPS 分析测试表明，耐腐蚀性能归因于形成了含 Mo 和 Cr 的氧化物阻碍了 Cl⁻ 侵蚀。不同 Mo 含量 (Fe_{63.3}Mn₁₄Si_{9.1}Cr_{9.8}C_{3.8})_{99-x}Cu₁Mo_x

x 中熵合金涂层具有良好的耐磨性能，其磨擦系数和磨损率随 Mo 含量的增加呈递减趋势，其中 Mo 含量为 10at.% 时，涂层的耐磨性能最佳。

D03-159

FeCoMnAl 系高熵合金的软磁性能及应用研究

贾行杰¹、杨莉苹^{1,2}、董亚强^{*1}、李强²

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

2. 新疆大学

软磁性高熵合金因其高饱和磁化强度 (M_s)、低矫顽力 (H_c) 和高电阻率而备受关注。本工作研究了元素组成对 FeCoMnAl 系高熵合金的微观结构和软磁性能的影响规律，并表征了高熵合金粉芯的高频磁性能。研究表明，最佳的 Al/Mn 含量比有助于形成 BCC 和 B2 双相结构，显著提高合金 M_s 并降低 H_c 。Fe₃₅Co₃₅Mn₁₅Al₁₅ 高熵合金具有优异的磁电性能， M_s 为 162.77 emu/g， H_c 为 2.1 Oe，电阻率为 324 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$ 。经 660 °C 热处理的 Fe₃₅Co₃₅Mn₁₅Al₁₅ 高熵合金粉芯在 1 MHz@20 mT 的磁芯损耗为 1208 mW/cm³，磁导率为 48 并在 100 Oe 外场下保持初始值的 86 %，且磁性能具有优异的温度稳定性，在 25-150°C 范围内磁导率和损耗的变化均小于 2 %。

D03-160

NiFeCoAl 系中熵合金再结晶行为和性能表征

王艳*、王乃冉

济南大学

采用一种简化的策略，不进行预均化处理，仅通过一道次冷轧和退火处理，在 NiFeCoAl 系中熵合金中获得综合强度-延性的良好协同效应。热机械处理后的中熵合金由无序的 FCC 基体和不同有序度的 FCC 纳米级沉淀物组成。研究发现，纳米级 FCC 晶粒在部分再结晶和完全再结晶中选择性进行析出分布，表现出多重嵌套异质结构。在 1200°C 退火的粗晶合金中具有约 70% 的断后伸长率和比铸态样品高的抗拉强度。本工作设计了一个涉及抗拉强度和延伸率的新参数 k ，以揭示强度-延性协同效应的显著性。此外，设计不同成分配比的 Ni-Fe-Co-Al 中熵合金，其不仅在一道次轧制后（无退火）显示高的抗拉强度，且保持一定的塑性。根据磁滞回线测试，发现该系列合金体系在不同再结晶阶段，均保持优异的软磁性能。

D03-161

超声振动下的非晶合金液体环境焊接

李路遥、马将*

深圳大学

焊接，尤其是金属材料的焊接工艺，在人类历史的发展过程中发挥着至关重要的作用。现有的焊接方法的基本原理都需要使用电力或者火焰产生高温，使金属逐渐升温并熔化。随着科学技术的进一步发展，越来越多的场合需要用到金属的焊接，尤其是在水下环境（河流、湖泊、海洋等）作业。但是，当焊接传导热量的过程被限制时，我们会发现普通焊接过程几乎无法正常进行。为了应对这些挑战，研究人员提出了一系列的水下焊接方法。这些水下焊接技术按照操作方式可分为两大类，分别为干法焊接和湿法焊接。其中，水下干法焊接的基本原理是利用特殊的焊接设备和技术，在水下创造一个干燥的焊接环境。而湿法焊接是直接置于水中焊接，但是需要通过添加特殊的电源、电极或者焊剂，以确保电弧的稳定性和持续性。与需要大量设备支持和高昂成本的干式焊接相比，湿式焊接的操作简便性使得这种工艺可以进行更复杂的焊接。因此，一般水下湿焊被认为是修复海洋平台最有效、高效和经济的方法，也是近海工业中船舶建造、海中石油和天然气开采以必不可少的方法。

然而,在实际操作过程中,水下焊接面临的挑战是艰巨的。以水下湿焊为例,500~800℃的工作温度和由此产生的超高冷却速度会导致焊接区域力学性能的恶化。同时,在如此恶劣的工作环境下,氢分子、一氧化碳或水蒸气不可避免的会形成,大量孔隙产生导致力学性能进一步恶化。除此之外,随着水深的增加,工作电弧的稳定性也会受到影响。其中最严重的是,复杂的设施使操作人员行动不便以及熔化金属所需的大电流(达到数百安培)可能会对焊接人员的生命安全造成严重的威胁。

液体环境所包含的十分广泛,水下环境只是其中一种。当面临更加复杂的环境时,现有的焊接技术几乎“无计可施”。比如有机液体(酒精、石油等),日常维护存储这些液体的容器以及运输管道的维修十分有必要。但是,我们都知道,在这种易燃易爆的环境下,任何电弧和温升都是极端致命的。还有在更加极端的低温液氮环境下,其环境温度甚至将近-200℃。在如此极寒下,不出意外,任何常规焊接方式都将会失效。然而,液氮所代表的极端低温在我们所处的世界中无处不在。例如,我们地球的两极(最低-66℃)、空间站轨道(最低-100℃)、甚至在月球(最低-180℃)和火星表面(最低-143℃)。综上所述,极端温度一直是困扰太空等低温环境进行焊接工作的难题,如果我们研制出一种克服低温的焊接技术,将为人类迈向外太空的制造提供更多可行的技术储备。

非晶合金(又称金属玻璃)作为一种多种性能优势的金属材料,包括高强度、高硬度、良好抗腐蚀性、突出的韧性、抗疲劳特性、催化活性等,实现该材料在多种复杂环境的焊接将具有深远的意义。非晶合金在超声振动下具有不依赖于温度的“软化”效应,通过详细的机制分析发现,这种现象与非晶合金的微观原子结构密切相关。由于非晶合金中大量类液体区和类固体区的存在,高频振动将会诱发类液区大幅度扩张,当类液区足够多且连成一片时,整个块体就会瞬间坍塌成类液态。因此,超声振动作为一种成本低、效率高的工艺,有极大的潜力在液体环境焊接领域取得重大突破。

在本工作中,利用超声振动技术在水、海水、酒精和液氮环境下焊接了非晶合金材料。这种焊接方式不仅仅局限于非晶合金与非晶合金的焊接,研究人员还利用非晶合金“低温软化”的特性连接其他材料,比如将非晶合金嵌入到其他构件、将非晶合金作为铆钉进行铆接等。与常见的水下焊接技术相比,超声振动法具有无温升的优点,这将避免过高的温度和冷却速率对连接性能的影响。而且,由于整个焊接是一个不涉及电流的过程,供电系统的不稳定和用电的安全性不再是安全隐患。焊接试样不仅仍保持铸态试样94%的抗拉强度(1522 MPa)和抗弯强度(2930 MPa),而且腐蚀性能得到改善。这项工作不仅为水下连接技术打开了一扇窗,而且为石油、天然气、有机溶剂中的易燃环境和太空中的低温条件等极端环境提供了可行的策略。

D03-162

Ti-Zr-Nb-Ta-Al 系轻质难熔高熵合金的微观结构及强韧化机理研究

廖卫兵*、徐晨昊

深圳大学

轻质难熔高熵合金具有密度低及优异的力学性能,有着广泛的应用前景。然而,轻质难熔高熵合金的室温脆性至今尚未解决,改善轻质难熔高熵合金的室温塑性对其未来工程应用有着重要意义。本论文设计一种新型的 $\text{TiZrNbTa}_{0.1}\text{Al}_x$ ($x = 1, 0.2$) 轻质难熔高熵合金,通过改变 Al 元素的含量有效地控制了脆性相 Al_3Zr_5 的析出,并进一步研究了热机械加工对 $\text{TiZrNbTa}_{0.1}\text{Al}_{0.2}$ 轻质难熔高熵合金的微观结构和力学性能的影响,有效地改善了其综合力学性能。铸态轻质 $\text{TiZrNbTa}_{0.1}\text{Al}_1$ 难熔高熵合金具有~6.11 g/cm³ 的低密度,其结构呈现出体心立方(BCC)固溶体基体相及在基体上析出的微米尺度的脆性 Al_3Zr_5 金属间化合物相,合金的混合焓为-20.831 KJ/mol,其压缩屈服强度为 1037 ± 178 MPa,压缩塑性~6%。随着 Al 含量的降低, $\text{TiZrNbTa}_{0.1}\text{Al}_{0.2}$ 合金的混合焓提高到了-4.558 KJ/mol,并消除了脆性 Al_3Zr_5 金属间化合物相,形成单相 BCC 结构,其保持了~6.74 g/cm³ 的低密度和 1022 ± 51 MPa 的高屈服强度,并显著的提高压缩塑性到>70%。实验结果表明,优化 Ti-Zr-Nb-Ta-Al 合金体系中的 Al 含量可以有效消除合金中的脆性金属间化合物相从而提高合金的塑性。此外, $\text{TiZrNbTa}_{0.1}\text{Al}_{0.2}$ 合金铸态样品的拉伸屈服强度为 880 ± 58 MPa,拉伸极限强度为 918 ± 18 MPa,断裂伸长率为~13%。进一步,均匀化热处理后的 $\text{TiZrNbTa}_{0.1}\text{Al}_{0.2}$ 样品经过 70%变形量的室温轧制后得到热处理后轧制(HT + Rolling)样品,其仍然保持了单相 BCC 结构,且相比较于铸

态样品，其位错密度显著增加，平均晶粒尺寸明显减小，由此获得了显著的位错强化和细晶强化，拉伸屈服强度和拉伸极限强度分别提高了 47.1%和 53.5%，达到了 1294 ± 21 MPa 和 1373 ± 29 MPa。HT + Rolling 样品再经过热处理后得到了轧制后热处理（HT + Rolling + HT）样品，其在 BCC 基体相中析出了两种纳米级的第二相颗粒，与铸态样品相比，这些第二相颗粒为 HT + Rolling + HT 样品带来了明显的析出强化，其拉伸屈服强度和拉伸极限强度分别达到了 989 ± 6 MPa 和 1014 ± 27 MPa。不仅如此，这些细小的第二相颗粒配合样品中的低位错密度致使 HT + Rolling + HT 样品呈现出长效且稳定的加工硬化现象并具有良好的断裂伸长率~ 18%。实验结果表明，对 TiZrNbTa0.1Al0.2 合金的热机械加工可以有效的改善合金的综合力学性能。

D03-163

变废为宝：利用有害残余应力实现高熵合金的强塑性协同改善

吕云卓*

大连交通大学

强度与塑性之间“此消彼长”的矛盾关系是金属材料领域一个长期存在的难题。新型金属材料高熵合金也不例外。为了使高熵合金摆脱这个困境，在高熵合金中预制纳米孪晶被证明是有效的方法。然而，预制纳米孪晶通常是通过对已成形零件的后续变形来引入的，这对于生产具有复杂形状的实际部件是不可行的。在本工作中，我们报告了一种通过非破坏性工艺制造具有丰富预制纳米孪晶的复杂形状高熵合金构件的方法。以具有代表性的 CrMnFeCoNi 为模型材料，采用激光增材制造技术在高熵合金构件内部制造并存储了显著的有害残余应力。然后，我们采用深冷处理技术来调控这种有害的残余应力，通过孪生释放它。利用有害的残余应力，我们成功地将梯度纳米孪晶引入到高熵合金中。与此同时，还获得了非计划的梯度位错结构。这种梯度结构在不牺牲塑性的情况下有效地提高了屈服强度。

D03-164

超声诱导老化金属玻璃的塑性回复

陈建宇、任帅、马将*

深圳大学

玻璃材料的老化是不可避免的，将会导致性能退化。在金属玻璃中，老化效应会引起结构弛豫，导致机械性能下降和加工难度的提高。因此，开发一种有效的方法来逆转金属玻璃的衰老刻不容缓，并且极具挑战性。在这里，我们报告了一种简单的超声振动处理方法，可以在 0.4 秒内逆转超塑性 Zr 基金属玻璃的老化。铸态的 Zr 基金属玻璃在长时间退火后完全失去了其 10%左右的塑性，但老化样品经过超声振压处理后却能恢复 15.2%的塑性。这种独特的塑性恢复现象伴随着结构焓和玻色峰强度的强烈恢复，这与原子对分布函数分析揭示的局部结构变化相一致。这些发现表明，超声振动为回复老化玻璃和设计高性能金属玻璃提供了另一种有效途径，并进一步揭示了金属玻璃的结构演化机制。

D03-165

可定制多孔玻璃表面的溶解制造策略

刘俊升、马将*

深圳大学

玻璃表面微纳结构的设计和制造在实现所需功能方面具有重要意义。然而，玻璃固有的硬度和脆性给传统制造方法带来了不便。因此，开发一种简单且可控的制造策略对于制备具备功能应用的微纳结构玻璃至关重要。在本文中，我们提出了一种创新方法，利用可溶性氯化钠颗粒作为前驱体模板，在玻璃表面上创建可定制的多孔结构。通过我们的先导成型策略，成功利用可溶性氯化钠颗粒的潜力作为前驱体模板，从而便于制造量身定制的多孔玻璃表面。通过调节这些颗粒的大小和组合，我们实现了对所得多孔玻璃的

连续调控, 范围从超亲水(1°)到超疏水(142°). 值得注意的是, 制备的多孔玻璃表面表现出显著的亲油性, 展示了在油水分离和自清洁等多种应用方面的巨大潜力. 最重要的是, 即使经过了 10 次制造迭代, 玻璃表面的疏水-亲油功能依然完好, 凸显了我们策略的耐久性和可重复性. 这种方法为实现玻璃的特殊功能提供了方便且具有成本效益的途径, 为不同领域的进展铺平了道路.

D03-166

高熵非晶合金力学弛豫和平衡动力学关联

段亚娟、乔吉超*

西北工业大学

高熵非晶合金因温度变化后原子重排速度缓慢而偏离过冷液态的亚稳平衡, 导致诸如老化、回春和记忆效应等复杂现象, 为理解高熵非晶合金物理特性及其动力学和热力学行为的演变带来挑战. 本研究深入探索了高熵非晶合金在结构动力学和热动力学特性上的内在联系. 随着物理时效的增长, 其应力松弛特性与焓平衡动力学呈现明显的相关性, 这一发现突破了传统观点, 即物理老化仅与 β 弛豫相关. 研究表明, 激活能随物理老化时间变化, 并显示出广泛的激活能分布. 应力松弛的弛豫时间与焓弛豫时间及微纳力学特性 (如杨氏模量和硬度) 的平衡速率成正比. 值得关注的是, 高熵非晶合金的动态非均匀性与纳米压痕测得的微观结构非均匀性呈现相反的趋势. 通常, 玻璃的动态性能与其空间结构的非均匀性密切相关, 但该研究发现在空间结构趋于均匀化的同时, 动态非均匀性却有所增加. 研究发现, 动态非均匀性的变化与这些机制的时间尺度及其对总体松弛的相对贡献与老化演变过程紧密相关. 此外, 应力松弛动力学行为比焓弛豫表现出更显著的变化, 表明应力松弛动力学行为是一个更敏感的指标, 可用于表征高熵非晶合金的结构状态. 该工作为高熵非晶合金动力学和热力学领域的研究提供了新思路.

D03-167

高熵非晶合金中的连续多形性转变

刘雄军*、曹一欢、吕昭平

北京科技大学

非晶态多形性转变 (Polyamorphic Transition, 简称 PT) 是一种广泛存在于玻璃态材料中的物理现象, 为有效调节玻璃的结构和性能提供了一条重要途径. 深入理解 PT 对于揭示玻璃材料的形成机制及其结构特性具有重要的科学意义与实用价值. 在传统非晶合金体系中, PT 通常呈现出明显的一级相变特征. 在本报告中, 我们将报道高熵非晶合金在加热过程中出现的一种缺乏一级相变特征的连续非晶态多形性转变 (Continuous PT, 简称 CPT). 这种独特的 CPT 行为以原子结构的连续演变和随温度增加的化学浓度梯度为特征, 而未出现体积和能量的急剧变化. 通过 CPT 可产生一系列成分相同、结构和性能不同的玻璃态, 为研究玻璃态及玻璃转变的本质提供了新的模型材料. 我们将采用基于 Landau 理论的唯一模型对该现象进行描述, 同时还将从构型熵角度对 CPT 的热力学和动力学起源进行分析讨论.

D03-168

TiB₂ 颗粒增强的高强度、高延展性高熵金属间化合物基复合材料

胡珍*

上海大学

为寻求材料更卓越的性能, 高熵合金 (HEAs) 的概念扩展到了金属间化合物系统, 形成了高熵金属间化合物 (HEIMs) 并衍生出高熵金属间化合物基复合材料 (HEIMCs). 本研究通过火花等离子烧结 (SPS) 技术成功合成了一种新型并含有原位形成的 TiB₂ 纳米颗粒的 Ni-43.9Co-22.4Fe-8.8Al-10.7Ti-11.7B-2.5 HEIMCs. 所得到的 HEIMCs 块材具有有序的 L1₂ 结构的金属间化合物基体 (Ni, Co, Fe)₃(Al, Ti, Fe) 以及六方密堆结构 (HCP) 的 TiB₂ 纳米结构增强相, 增强相平均尺寸为 28.05 ± 0.13 nm. 由于 L1₂ 金属间化合物

基体的固有高强度和 TiB₂ 增强的异质分布, HEIMCs 表现出了约 1.4 GPa 的优异抗拉强度。材料中的 TiB₂ 纳米颗粒在阻碍裂纹传播和与颗粒界面上的独特无序界面协同作用方面起到了关键作用。在 HEIMCs 中还发现了独特的无序界面, 其平均宽度在 5-10nm 范围内, 具有延缓断裂和促进塑性变形时的应变硬化速率的能力。本研究制备的 HEIMCs 克服了传统金属间化合物通常存在的局限性, 并提供出色的强度和延展性平衡。这项研究结果有望为设计具有优异力学性能的原位增强的 HEIMCs 提供清晰的思路。

D03-169

非晶-纳米晶界面调控及其催化降解性能研究

梁顺兴*

广东工业大学

由于独特的原子排列和电子结构以及具有高吉布斯自由能的亚稳态, 非晶合金比有序晶体材料往往拥有更好的性能。然后作为催化剂, 利用成分调控进一步开发其催化性能仍受到限制, 如成分对玻璃形成能力的影响。据此, 我们采用铁基非晶-纳米晶合金作为研究对象, 通过调控非晶-纳米晶界面结构特性, 揭示纳米晶特征对界面结构的作用原理及其对反应活性位点构筑机制, 并建立非晶-纳米晶界面结构与类芬顿反应催化性能的构效关系。这些结果证明了通过简易合成非晶-纳米晶结构能有效克服非晶合金的不足, 为其进一步开发催化应用提供思路。

D03-170

The high performance of low melting entropy principle in designing metallic glasses of Cu-Zr-Ti

Benke Huo¹, Ji Wang¹, Zijing Li², Zhengqing Cai¹, Bingtao Wang¹, Shidong Feng¹, Yanhui Zhang¹, Limin Wang^{*1}

1. Yanshan University

2. 燕山大学理学院河北省微结构材料物理重点实验室, 河北秦皇岛 066004

Recently, we proposed a new strategy for designing glassy alloys based on the thermodynamic melting entropy, in which, binary alloys are selected as the initial components according to the principle of low melting entropy, and the melting entropy is employed to balance the proportion of these initial components and then a specific composition is reached. In this study, the influence of the low melting entropy in glass formation was re-evaluated through a comprehensive analysis of the Cu-Zr-Ti alloys. The binary alloys at eutectic points and stoichiometric compounds of Cu-Zr and Cu-Ti were selected, including: Cu_{58.8}Zr_{41.2}, Cu₅₆Zr₄₄, Cu_{44.6}Zr_{55.4}, Cu_{26.6}Zr_{73.4}, Cu₅₀Zr₅₀, Cu₁₀Zr₇, CuZr₂, Cu_{73.5}Ti_{26.5}, Cu_{43.6}Ti_{56.4}, Cu₃Ti₂, Cu₅₀Ti₅₀, and CuTi₂. The homogeneous alloys were prepared through arc-melting the mixtures of high purity elements (>4N) five times. The melting behaviors of the as-cast samples were tested using a high-temperature differential calorimeter (NETZSCH DSC 449C) at a fixed heating rate of 5 K/min. The melting points, T_m , and melting enthalpy, ΔH_m , of the samples were collected from the DSC traces, and the entropy of melting, $\Delta S_m = \Delta H_m/T_m$, was calculated. The glass formability of the binary alloys was analyzed by the variable speed ribbon casting and X-ray diffraction (XRD). The study results show that the critical spinning speed, R_{v-c} , of the eutectic alloys, Cu_{58.8}Zr_{41.2}, Cu₅₆Zr₄₄, Cu_{44.6}Zr_{55.4}, and Cu_{26.6}Zr_{73.4} are ~20, ~20, ~30, and ~50 m/s, the values of R_{v-c} of stoichiometric compounds Cu₅₀Zr₅₀, Cu₁₀Zr₇, and CuZr₂ are ~10, ~25, and ~45 m/s, respectively. In the Cu-Zr systems, the stoichiometric compound, Cu₅₀Zr₅₀, has the lowest entropy of melting ($\Delta S_m = 5.93$ J/mol-K) and the optimal glass formation ability (GFA). In the Cu-Ti systems, the R_{v-c} value of the eutectic alloy, Cu_{73.5}Ti_{26.5}, and the stoichiometric compound Cu₃Ti₂ are about 40 m/s and 60 m/s, respectively, while the alloys, Cu_{43.6}Ti_{56.4}, Cu₅₀Ti₅₀, and CuTi₂ could not be quenched into glassy phases in our lab condition, indicating their poorest glass formability. The eutectic alloy, Cu_{73.5}Ti_{26.5}, exhibits the optimal glass formability and the lowest entropy of melting (8.04 J/mol-K) among the systems with same elements. Based on the low melting entropy design strategy, Cu₅₀Zr₅₀ and Cu_{73.5}Ti_{26.5} were used as the initial components for designing ternary alloys. According to the leverage principle conducted on melting entropy, the

proportion of the two components were determined and the ternary alloy was reached as $\text{Cu}_{59.99}\text{Zr}_{28.75}\text{Ti}_{11.26}$. It is inspiring that this composition is quite close to reported optimal glass forming system, $\text{Cu}_{60}\text{Zr}_{30}\text{Ti}_{10}$, both the two alloys can be cast into full glassy rods with a diameter of 4 mm. Four points in this study are highlighted: the positive influence of low melting entropy on glass formation is reinforced; the design of glassy alloys with stoichiometric compounds challenges the traditional cognition on the correlation of compounds and glass formation; a design scheme for metallic glasses is proposed conducted on melting entropy, in which no "trial-and-error" work involved, this study throw new insight on the thermodynamics of glass formation.

D03-171

FeCoMoBCu 铁基非晶合金的结构、热学和磁学性能

孙阳、夏垚、兰春瑶、夏金花、王锋、兰颂*

重庆交通大学

铁基非晶合金是制备纳米晶软磁合金的重要前驱体,决定了非晶-纳米晶双相复合结构的软磁性,而元素合金化可实现非晶合金成分、结构与性能的可控调节。本项工作利用单辊铜轮甩带机制备了成分为 $(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_{79}\text{Mo}_{10}\text{B}_{10}\text{Cu}_1$ ($x=0, 0.1, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75, 1$) 快淬合金薄带,表征分析了不同 Co 含量铁基合金的结构、热学和磁学性能。设计的 FeCoMoBCu 合金体系具有较好的非晶形成能力,其快淬合金薄带均为非晶结构。随着 Co 元素含量的增加,初次晶化温度基本不变($\sim 450^\circ\text{C}$),而二次晶化温度从 750°C ($x=0$) 降低至 550°C ($x=1$),与非晶合金的晶化激活能随 Co 含量变化一致。Co 取代 Fe 元素导致非晶合金的饱和磁化强度先增大后减小,符合斯莱特-泡林曲线中 Fe-Co 合金平均原子磁矩随价电子数的变化趋势,且当 $x=0.3$ 时合金具有最高饱和磁化强度($\sim 120 \text{ A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$)。掺入 Co 元素可显著提高 $\text{Fe}_{79}\text{Mo}_{10}\text{B}_{10}\text{Cu}_1$ 非晶合金的居里温度和超精细磁场强度,并抑制少量顺磁性非晶相($\sim 1.4\text{vol.}\%$)的出现。本项研究表明,适量的 Co 元素合金化能够保障非晶合金具有较宽的纳米晶化温度区间($>200^\circ\text{C}$),是基于非晶相居里温度调控改善纳米晶合金高温软磁性的有效方式之一。

D03-172

Ti-Zr-Hf-Nb-Ta 系难熔高熵合金的力学性能与焊接性研究

王舒滨*、疏达、孙宝德

上海交通大学

以多主元、近等原子比组成的高熵合金具备较大的极端环境应用潜力。Ti-Zr-Hf-Nb-Ta 体系的难熔高熵合金因具备优异的室温塑性而受到广泛关注。本研究结果表明该体系单相 BCC 结构的合金具备优异的超低温拉伸塑性,然而均匀塑性变形能力低,在屈服后很快进入颈缩阶段。进一步地,通过降低 BCC 相的稳定性可激活孪生诱发塑性(Twinning-induced plasticity)机制,从而大幅提高 TiZrHfNb 合金在超低温下的应变硬化和均匀塑性变形能力。在 Ti-Zr-Hf-Nb-Ta 合金体系中,单相 BCC 调幅分解产生的共格双相 BCC 和脆性 ω 相的析出会导致合金的室温脆性问题。因此, BCC 相的稳定性控制是获得优异力学性能的关键。最后,研究表明 TiZrHfNbTa 高熵合金具备优异的激光焊接性,其焊缝和热影响区均能够保持稳定的单相 BCC 结构,表明了以 TiZrHfNbTa 为代表的难熔高熵合金具备工程应用潜力。

D03-173

双相共晶高熵合金中迥异的同/异相界面行为

代乾宁、谢碧君、孙明月*

中科院金属所

界面的结构和行为对材料的性能具有重要的影响. 本文旨在研究复杂成分多相体系材料中这些独特的界面结构和行为. 我们报道了通过连接 $\text{AlCoCrFeNi}_{2.1}$ 共晶高熵合金所获得的 L12-L1₂, B2-B2, L1₂-B2 三种

界面迥异的界面行为。具体是, 由于热-应变诱导的晶界演化, 在 $L1_2$ - $L1_2$ 界面附近出现了明显的界面动态再结晶。相反, 由于极少的界面应变, $B2$ - $B2$ 界面几乎没有发生动态再结晶, 其连接可能是由于扩散引起的。由于 $L1_2$ 相和 $B2$ 相本征的结构差异, 在 $L1_2$ - $B2$ 界面处只在 $L1_2$ 相侧发生了动态再结晶。这类异质界面的连接是由于界面元素的扩散。另外, 由于高熵合金高的缺陷-析出敏感性, 在连接界面附近出现了应变诱导析出的 $B2_{II}$ 相。 $B2_{II}$ 相的析出消耗了基体中的 Ni, Al 元素, 造成了 $L1_2$ 相的无序化。通过定量计算相应晶粒的极限尺寸评估了这些 $B2_{II}$ 相带来的 Zener 钉扎效应。这种 $B2_{II}$ 相的钉扎作用及元素的缓慢扩散效应可能导致了 $L1_2$ - $L1_2$ 界面温度依赖的动态再结晶行为。本研究有助于理解多相高熵合金独特的界面行为, 并为多相、复杂成分、界面析出等因素对界面演化的影响提供了新的认识。

D03-174

基于镁基金属玻璃纳米线的光驱动微型机器人

黄金标、马将*

广东省深圳大学

人类已开发出一系列在外部刺激下可执行复杂任务的仿生微型机器人, 如仿蛇类、昆虫和水鼩等。此类微型机器人在药物运输、远程送样、液体检测等领域被广泛应用。基于此, 研究者开发了各种自驱动策略, 其中基于马兰戈尼效应的光驱动被认为是一种有吸引力的选择。但大多数光驱动微型机器人使用石墨烯和碳纳米管等作为光热材料, 导致其生物相容性和可降解性较差, 极大限制了其在生物领域应用。本工作基于成分和结构双调控策略, 利用溶解制造获得了兼具优异光热性和生物相容性的光控微型机器人。将具有优异光热效应和生物相容可降解的 Mg 基金属玻璃纳米线与聚羟基烷酸酯 (PHA) 相结合, 制备出具有复杂形状可编程运动的微型机器人。在近红外激光照射下, 微型机器人通过 PHA 多孔结构和 Mg 基金属玻璃纳米线的局部表面等离子体共振的协同作用, 将光能转化为热能, 在水面形成表面张力差从而在水面上的快速和长时间远程控制。当激光功率密度为 2.0 W/cm^2 时, 机器人的速度可达 9.91 mm/s 。通过照射微型机器人不同位置, 可实现在水面上可编程的复杂运动, 包括直线、顺时针、逆时针和避障运动等。本工作提出的生物相容可降解的微型机器人制造方法在流体检测、药物运输和生物医学诊断等领域具有广阔的应用前景。

D03-175

Al 元素对 Ti-V-Zr-Nb-Al 轻质难熔高熵合金的微观结构、力学性能和耐磨性能的影响

梁朝杰、邓运来*

中南大学

体心立方 (BCC) 中/高熵合金 (MEA/HEA) 的特点是强度高、延展性低, 而且由于含有大量难熔元素, 通常密度较高。本研究制备了一系列不同 Al 元素含量的 Ti-V-Zr-Nb-Al 轻质难熔高熵合金 (LHEAs), 并对其微观结构、力学性能和摩擦学性能进行了系统的研究。结果表明, 添加铝元素后, 合金能够保持单一的 BCC 固溶体结构, 没有形成其他化学物相。虽然合金的硬度从约 352 HV 增加到约 430 HV, 但拉伸延展性却显著下降。一方面, 硬度增加的主要原因是铝原子与其他原子之间的结合力很强。另一方面, 拉伸性能的严重受损可能是由于几何必要位错密度 (GNDs) 的减少。虽然铝的加入有助于降低摩擦系数, 但合金的磨损率却增加了。在 Ti-V-Zr-Nb-Al 多主元合金系统中通过添加适量的 Al 元素不仅可以减少合金的密度, 还能使得合金的综合性能得以改善。

D03-176

数据驱动的多元铁基合金材料的智能优化设计

单光存*¹、李鑫¹、Chan-Hung SHEK²

1. 北京航空航天大学

2. 香港城市大学

多元铁基合金是巨磁阻抗磁传感器敏感元件的重要来源之一，其性能的优化设计对于开发高性能磁传感器有重要意义。利用传统的试错策略设计具有多种期望性能的磁性合金材料及磁传感器是具有挑战性的。本研究报告将针对多元铁基合金的磁传感器应用需求，提出数据驱动的优化设计策略从而实现对多元铁基合金的多种宏观性质的准确预测、单个目标性能的快速优化设计以及多个目标性能的协同优化设计。近期，我们提出了一种数据驱动的方法来加速磁性的设计，在饱和磁化 (M_s) 和硬度 (H) 之间进行最佳的权衡。通过训练机器学习模型来预测磁性高熵合金 (HEAs) 的 M_s 和 H ，并通过基于领域知识的特征设计和选择来优化其预测性能。进而，基于所设计的多目标进化方法以探索寻求最优合金成分，与传统多目标方法比较，突出了其在直接求解帕累托最优集方面的优势，最终成功开发了多种新型高性能多元铁基合金。

D03-177

应变诱导的高熵合金非晶化

吴渊*

北京科技大学

Elastic stability is the basis for understanding structural responses to external stimuli in crystalline solids, including melting, incipient plasticity and fracture. In this work, elastic stability is investigated in a series of high-entropy alloys (HEAs) using in situ mechanical tests and atomic-resolution characterization in transmission electron microscopy. Under tensile loading, the HEA lattices are observed to undergo a sudden loss of ordering as the elastic strain reached $\sim 10\%$. Such elastic strain-induced amorphization stands in intrinsic contrast to previously reported dislocation-mediated elastic instability and defect accumulation-mediated amorphization, introducing a form of elastic instability. Together with the first principle calculations and atomic-resolution chemical mapping, we identify that the elastic strain-induced amorphization is closely related to the depressed dislocation nucleation due to the local atomic environment inhomogeneity of HEAs. Our findings provide insights for the understanding of the fundamental nature of physical mechanical phenomena like elastic instability and incipient plasticity.

D03-178

弛豫子精准调控及相互作用

王军强*

宁波材料技术与工程研究所

Non-exponential relaxations are universal characteristics for glassy materials. There is a well-known hypothesis that non-exponential relaxation peaks are composed of a series of exponential events, which have not been verified. We discover the exponential relaxation events in metallic glasses and organic glasses using a high-precision nanocalorimetry. The relaxation peaks can be fitted by the exponential Debye function with a single activation energy. We obtain the complete spectrum of the exponential relaxation peaks over a wide temperature range from 0.63Tg to 1.03Tg, which provides solid evidence that non-exponential relaxation peaks can be decomposed into exponential relaxation units. Furthermore, the interaction between different relaxations are studied. These results open a door for developing the thermodynamics of non-equilibrium physics and for precisely modulating the properties of glasses by controlling the relaxation modes.

References:

L.J. Song, J.T. Huo*, J.Q. Wang*, et al. PNAS 120, e2302776120 (2023)

J.N. Wang, L.J. Song*, J.Q. Wang*, et al. Science China Mater. 66, 3706 (2023).

Y. Tong, E. Pineda, J.Q. Wang*, et al. J. Mater. Sci. Techn. 177, 96 (2024).

L.J. Song, J.Q. Wang*, et al. Phys. Rev. Lett. 125, 135501 (2020).

D03-179

基于相图计算的难熔高熵合金成分设计和性能优化

李天昕^{*1}、卢一平²

1. 贵州大学

2. 大连理工大学

难熔高熵合金因其优异的高温强度而备受瞩目，有望成为下一代高温结构材料。然而，目前难熔高熵合金仍然面临着一系列亟待解决的关键科学问题。首先，高温 NbMoTaW 系难熔高熵合金存在显著的室温脆性问题，不利于工业化应用；其次，中温 TiZrHfNbTa 系难熔高熵合金在 600–1000 °C 易分解，表现出较差的中温热稳定性。针对上述问题，本文旨在利用相图计算(CALPHAD)实现难熔高熵合金的成分设计和性能优化，通过先进表征手段探究难熔高熵合金的微观组织演化、力学行为以及强韧化机制，以期为难熔高熵合金在高温结构材料领域的工程化应用奠定理论和实践基础。

D03-180

3d 过渡族高熵合金的点蚀机理研究

鲁思渊*

宁波大学

优异的低温韧性和热成形性使 CoCrFeNi 系高熵合金 (HEA) 的增材制造在模具和深海工程领域具有极高的应用潜力，但该体系 HEA 的较低耐蚀性制约了其工程应用。本工作研究了不同退火温度下 C 间隙固溶 CoCrFeNiMn 合金的微观组织演化及点蚀机理，结果表明，经 500 和 700 °C 退火后 HEA 残留有变形孪晶，且基体中析出了“条状”纳米级 $M_{23}C_6$ 碳化物；900 °C 退火后 HEA 已完全再结晶，且基体中析出大量微米级 $M_{23}C_6$ 碳化物颗粒。腐蚀电化学测试结果表明，900 °C 退火提高了 HEA 的耐蚀性。对 HEA 试样进行加速浸泡实验，结合 SEM 和 EBSD 分析不同时间下 HEA 表面腐蚀微区的点蚀动态发展特征，发现冷轧 HEA 的点蚀起源于变形孪晶，500 和 700 °C 退火 HEA 的点蚀起源于“条状”纳米级 $M_{23}C_6$ 碳化物，900 °C 退火 HEA 基体中析出的微米级 $M_{23}C_6$ 碳化物不会引起 HEA 点蚀萌生。

D03-181

高熵非晶/晶体多层薄膜材料辐照性能及氢渗透行为研究

刘炳尧、孙康*、王刚

上海大学

核聚变反应堆作为未来能源问题解决方案，仍面临着高能离子辐照引发的材料变形和原料氚循环利用问题。本研究采用磁控溅射技术制备了一种高熵非晶/晶体多层薄膜材料，探索成分及界面对抗辐照性能及氢渗透行为的影响规律。利用 SRIM 模拟可知，特定的多层结构能有效降低辐照损伤效应及氢滞留现象。对多层膜结果开展质子辐照实验，通过掠入射 X 射线衍射仪和透射电子显微镜分析发现辐照后非晶层并未发生晶化，晶体层未发生相变，辐照后多层膜的层与层界面清晰，并未发生扭折变形。通过原子力显微镜对样品表面粗糙度进行分析，结果表明低剂量辐照会降低材料表面粗糙度，而高剂量辐照下，材料表面粗糙度会增加。借助纳米压痕研究辐照前后薄膜的力学性能变化，发现辐照可引起多层膜材料的硬化现象，硬度最大增长率为 21.8%。本研究结果表面非晶/晶体界面的引入可对辐照损伤及氢扩散路径实现有效的屏障作用，进而提高材料的抗辐照及氢渗透性能。这些发现为解决核聚变反应堆中材料辐照诱发变形和氚循环问题提供了新的思路和方法。

D03-182

超声诱导玻璃-玻璃转变

任帅*、陈哲、马将

深圳大学

非晶合金由于其优异的力学性能与功能特性而受到广泛的研究与关注。近年来,在特定非晶合金体系中观察到了液-液相变/玻璃-玻璃转变现象,这一独特的不同无序态间的多型性转变不仅为研究玻璃态的本质提供了新的视角,而且也为设计具有优异性能的新型玻璃态材料提供了新途径。然而,目前诱发该转变的方法比较单一,仅有超高压、热处理等方式;而且获得的低能态玻璃的性能提升有限。这里,我们报道了一种新的利用超声诱发玻璃-玻璃转变的方法,并发现获得的低能态玻璃的性能得到了显著提升。在 Y-Ni-Al 合金中,我们通过超声振压的方法,在室温且极低应力下,仅 1s 就可诱发玻璃-玻璃转变,获得新的第二相玻璃。进一步地,我们发现在液氮的极低温环境下,超声振压依然可以激发玻璃-玻璃转变。一般来说,在如此低的温度下,原子运动能力显著下降,此时玻璃处于一种深度冻结状态,结构转变壁垒较高,因此目前尚未有低温下玻璃-玻璃转变的研究报道。更重要的是,超声激振所产生的第二相玻璃在力学性能上实现了巨大提升,其弹性模量最大提升了~63%,屈服强度提高了~47%,硬度最大提升了~38%。作为对比,经历了数百万乃至数十亿年老化的月壤玻璃,其弹性模量也仅提高了 60%以上。因此,超声振压诱发的新玻璃的力学性能的巨大提升幅度,与历经数百万年自然老化的月壤玻璃相当。这项研究不仅为理解玻璃-玻璃转变的机制提供了新的视角,也为调控和优化非晶合金的性能开辟了新的道路。

D03-183

一种独特的复合人工韧带,具有优异的力学特性和卓越的耐磨性

Yanju Hui、Kang Sun*、惠彦举

Institute of Materials, Shanghai University, Shanghai 200444, China

本研究通过精密合金化设计(在 MgZnCa 金属玻璃体系中添加稀土元素钇(Y)和钆(Gd))和溅射工艺,创新性地制备了一种独特的复合人工韧带,具有优异的力学性能和优异的耐磨性。Y 和 Gd 元素的加入大大提高了薄膜的抗拉强度和耐磨性;MgZnCaY 膜在降低摩擦系数和提高耐磨性方面特别成功。研究表明,Y/Gd 元素的添加通过增加线之间的接触和减少线交叉处的脱离来改善 MgZnCa 非晶涂层的粘附性。这改善了表面粗糙度和抗拉强度。MgZnCaGd 系统中的两种主要磨损类型是氧化磨损和磨粒磨损。另一方面,MgZnCaY 非晶合金也表现出粘着磨损,磨损产物 Y_2O_3 有效地提高了硬度,同时也提高了耐磨性。此外,力学性能测试表明,稀土元素的加入提高了薄膜的抗拉强度,同时保持了其良好的刚度,这符合最佳 ACL 植入物的规格。提高拉伸性能的一个关键因素是粘着磨损。这项工作有效地创造了一种独特的人工韧带,该韧带由具有优异机械和耐磨性能的复合材料制成,为生物医学材料的表面改性提供了新的知识和技术。

D03-184

块体金属玻璃最大剪切应力的临界阈值准则

张浩、王重、乔珺威*

太原理工大学

块体金属玻璃(BMG)是一种具有独特力学性能的新型合金,具有潜在的结构应用价值。在过去的几十年中,BMG 的塑性变形机制得到了广泛的研究。剪切转变区(STZ)对于理解 BMG 的不可逆变形至关重要。STZ 的激活和演变在剪切带事件和瞬时力学响应中起着主要作用。依赖于最大剪切应力的累积分布,可以通过统计方法估算活化体积和 STZ 的大小。通过纳米压痕测试,已经在不同处理和各种实验环境中对不同体系的 BMG 的各项参数进行了广泛的研究。为了更好地理解 BMG 的微观塑性变形行为,迫切需要通过适当的方法建立这些参数的相关性。

众所周知, BMG 的低温冷热循环处理(CTC)很容易应用, 并且可以改变活化体积来改善其压缩塑性。因此, 可以通过不同的 CTC 次数获得 Zr 基 BMG 中具有不同活化体积的样品, 以进行纳米压痕研究。通过降噪程序和统计分析计算出这些样品的最大剪切应力值。通过引入低阶多项式, 从非线性斜率中获得活化体积值。然后, 可以清楚地发现最大剪切应力的范围和最大剪切应力的临界阈值都随着活化体积的增加而减小。通过引入平均场成功建立了新的准则。同时, 以图表的形式总结了一系列关于金属玻璃(MG)的最大剪切应力的临界阈值和活化体积的研究, 并提炼出该准则的三个适用条件。第一, MG 样品为块体而非薄膜或带状; 第二, 测试模式为载荷控制而非位移控制; 第三, 非线性斜率的问题引入一阶多项式来解决。

D03-185

符号回归辅助的高强难熔高熵合金逆向设计

赵上、李金山*、袁睿豪

西北工业大学

在过去的十年里, 机器学习在新材料设计方面得到了高速发展。然而, 面对高熵合金近乎无限的未知成分空间, 利用机器学习对所有可能的候选材料进行正向设计的策略仍然面临困境。这刺激了逆向设计策略的发展, 例如基于生成模型的对抗网络和包括遗传算法在内的启发式算法, 他们可以用来生成具有给定属性的候选材料。然而, 生成模型的局限性在于它们模拟现有数据的分布来进行学习, 因此不能很好地探索未知空间中的新材料。相比之下, 启发式算法可以通过演化过程中的随机性产生新材料, 但在广阔的未知空间中往往受制于大量的局部极值。因此, 高效地设计具有优异性能的新材料仍然是一项艰巨的挑战。

本工作提出了一个闭环逆向设计框架, 以符号回归为导向, 结合不确定性量化和启发式算法, 快速优化难熔高熵合金(RHEAs)的高温屈服强度。首先, 我们从文献中提取与自主实验构建了 RHEAs 在 1000 °C 下屈服强度数据集, 以及由材料基本物性参数组成的初始描述符空间。利用 Pearson 相关性分析和前向序列描述符筛选策略, 从 62 个基本描述符中确定了 14 个最有可能影响目标属性的关键描述符子集。之后利用符号回归技术确定了一个简单的公式, 将基本描述符(熔化焓)与高温屈服强度相关联, 并识别出一种尚未报道的候选合金体系(V-Ti-Mo-Nb-Zr)。通过两种启发式算法生成具有高屈服强度的候选合金, 并利用不确定性感知的效用函数从中识别最有希望的合金成分进行实验验证。将实验结果反馈到初始数据集, 进行迭代循环。经过 4 次迭代, 我们合成了 21 种合金。相比于初始数据集, 其中 12 种合金的比屈服强度得到了提升, 有两个合金的性能超过了 110 MPa/(g/cm³), 比已报道的最佳 BCC RHEAs 提高~32%。经过实验测试和理论计算, 新合金性能的增强可归因于密度的缓慢上升和晶格畸变的快速增加。

D03-186

基于原子择优占位行为定量化和图像化研究高熵合金四大效应

吴波*, 乔阳, 苏龙菊, Ali Hamid, 钱程, 张楚波, 孙佳文

福州大学

高熵合金新概念吸引了众多理论和实验科学家来挖掘高熵合金宝藏, 但高熵合金的理论和模型研究还很不完善, 甚至至存在很多争议。广为人知的高熵合金(高熵材料)的四大效应(热力学上的高熵效应, 动力学上的迟滞扩散效应, 结构上的晶格畸变效应, 性能上的鸡尾酒效应), 也不时受到质疑, 表明高熵合金(高熵材料)的结构与性能的关系研究还很不充分, 尤其是缺乏基于理性设计的定量化和图像化表征。以往对高熵合金(高熵材料)的计算模拟均以原子随机混合为准绳, 实际上, 这并不理性和公允, 因为它忽略了组成原子的种类和亚点阵结构上的差异, 以及热处理温度和时间等因素, 对不同种类的原子在不同种类的亚晶格上择优占位行为的影响。不合理的模型假设, 导致材料结构与性能预测出现显著偏差, 误导高熵合金研究开发。本报告将对高熵合金计算模拟文献进行述评, 提出择优占位行为研究的必要性必要性、方法和应用, 对若干典型中熵合金和高熵合金四大效应定量化和图像化预测表征。我们迫切需要采用包含精细中子散射技术在内的先进实验技术, 进行可靠性验证。

D03-187

Phase stability, magnetic ordering, and exceptional mechanical properties of FCC complex alloys under extreme environmentsLi Zhu¹, Yuemin MA¹, Muhammad Naeem^{1,2}, Haiyan HE^{1,3}, Xun-Li WANG^{*1}

1. 香港城市大学
2. 伯明翰大学
3. 大湾区大学

Neutron scattering is a powerful technique to determine the structure and dynamics of a material, which in turn determines the properties of the material. Here, we reported two examples. The first example is the 316L stainless steel showing an extraordinary work-hardening rate of ~ 7 GPa at 15 K. Detailed analyses of the in-situ neutron diffraction results revealed that the major contribution to the excellent strength and ductility comes from the transformation-induced plasticity effect, introduced by the austenite-to-martensite (γ -to- α') phase transition. During plastic deformation, the volume-fraction weighted phase stress and stress contribution from the α' -martensite increase significantly. The neutron diffraction data further suggest that the γ -to- α' phase transformation was mediated by the ϵ -martensite, as evidenced by the concurrent decline of the ϵ phase with the γ phase. This study sheds light on the extraordinary work-hardening effect due to phase transformation, which will provide guidance in the design of complex alloys.

The second example is associated with the CrMnFeCoNi high-entropy alloy, known as Cantor alloy. By using elastic and inelastic neutron scattering, we demonstrated conclusive evidence of antiferromagnetic order below a Néel temperature $T_N \sim 80$ K and strong spin fluctuations persisting to room temperature. Despite the chemical complexity, the magnetic structure in CrMnFeCoNi can be described as γ -Mn-like, with the magnetic moments confined in alternating (001) planes and pointing towards the $\langle 111 \rangle$ direction. Combined with first-principles calculation results, it is shown that the antiferromagnetic order and spin fluctuations help stabilize the fcc phase in CrMnFeCoNi high-entropy alloy.

D03-188

高 B_s 纳米晶软磁合金非晶前驱体结构及其晶化组织和磁性能研究张伟*、李艳辉
大连理工大学

Fe-B-Cu、Fe-B-Si-Cu、Fe-B-Si-P-Cu 等纳米晶合金具有 1.80 T 以上的饱和磁感应强度(B_s)，低矫顽力、低铁损等优异的软磁特性，是用于电动机、变压器、互感器等电能转换和传输器件的新一代软磁材料。这类合金可分为两大类型：高速升温热处理型和非晶前驱体分散纳米 α -Fe 晶型。前者需通过高升温速率热处理(180 ~ 400 K/s)使非晶带材晶化获得微细的纳米 α -Fe 晶组织，但这种热处理工艺在工况条件下难以实施；后者的急冷带材非晶基体分散着高数密度的数 nm 的 α -Fe 晶（核），在工况热处理条件即可形成微细的纳米 α -Fe 晶组织，这类合金的缺点是非晶前驱体的微结构不易控制。

针对非晶前驱体预存纳米 α -Fe 晶型的 Fe-(B, Si)-Cu 合金，我们系统调查了其急冷带材的结构、热性能、结晶化组织和磁性能，研究了合金成分及非晶前驱体结构对其晶化行为和磁性能的影响规律，阐明其影响机制，建立了合金成分-非晶前驱体结构-晶化组织-磁性能间的关联。进而，研究了合金化对纳米晶合金非晶前驱体结构及其晶化组织和磁性能的影响，发现添加少量前过渡族元素（ETM）均可抑制甚至消除非晶前驱体中的预存 α -Fe 晶的形成，并显著影响其晶化组织和软磁性能；其影响非晶前驱体结构的效果与合金的原子径错配度 (δ)和负混合焓(ΔH_{mix})的大小有关；而晶化组织微细化程度取决于晶化过程中 α -Fe 晶间的竞争生长和 ETM 抑制原子扩散的协同效应。此外，还研究、探讨了微量 Al 合金化对 Fe-(B, Si)-Cu 纳米晶合金非晶前驱体结构、晶化行为和磁性能的影响。

D03-189

超声振动强韧化 CoCrNiC0.1 双相中熵合金

李足*

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/中熵合金的出现, 为设计和制备高强韧合金提供了新的思路。其中, 单相 FCC CoCrNi 中熵合金是设计高强度和塑性的理想基础合金, 但其屈服强度较低, 难以满足工程应用的需求。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, 能够显著提升 CoCrNi 基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。此外, 大多数强化策略, 特别是通过晶粒细化和异质结构构建的强化策略, 不可避免地需要采用大变形轧制, 然后退火进行组织细化来最终提升中熵合金性能, 这不仅会增加能耗, 而且不利于碳中和。在本研究中, 避开“轧制+退火”的传统制备方法, 报道了一种基于超声振动辅助成型的新方法, 以同时提高 C 掺杂 CoCrNi 合金的强度和塑性。超声振动诱导的细小 Cr₇C₃ 网状碳化物的晶内析出, 是强度-塑性协同提升的主要原因。该工作为实现沉淀强化熵合金的强度-塑性协同提升提供了一条有效的新途径

D03-190

高压及高温循环对金属玻璃不均匀性结构及力学性能调控

罗强*

东南大学

结构不均匀性对金属玻璃的玻璃转变、弛豫行为、力学性能、物理和化学性能起着至关重要的作用。然而, 如何表征、观测和认识不同尺度局域结构随成分和外界条件的演化规律是长期困扰科学家的重要难题。本工作结合原位高压同步辐射 XRD、高压电阻和计算机模拟等技术系统研究了 CuZrAlY 金属玻璃高压结构变化, 发现该合金在高压下原子和电子结构呈现新型的阶梯式非晶态多形态转变, 并揭示出该合金在纳米尺度 Cu 和 Zr 元素分布的关联性波动以及在原子尺度 Zr-Zr 键的阶梯式压缩行为是该多形态转变的主要原因。此外, 研究了高温热循环处理对典型 Zr 基金属玻璃非均匀性结构和变形行为的影响。发现不同等温时长高温热循环样品的硬度、模量均增加, 样品整体表现弛豫状态; 然而短时高温热循环样品塑性变形能力提高。微观结构研究揭示短时高温热循环能够增强样品在微米尺度上的结构/力学不均匀性波动增强, 增加了高应力下剪切转变区的数量并减小其尺寸, 从而促进剪切带在其传播过程中的偏转, 形成多个剪切带。这项作为金属玻璃非均匀性结构特征及其高压和高温循环条件下的演化行为提供了新的认识, 对高性能金属玻璃新材料开发具有重要指导意义。

D03-191

铁基非晶条带的表面活化及其高效快速降解高浓度偶氮染料的机理分析

张响、余秀冬、刘海顺*、杨卫明

中国矿业大学

目前使用铁基非晶合金降解印染废水的效率较低, 完成 90%降解率的时间普遍在 10min 以上, 且能够降解的印染废水中偶氮染料种类较为单一, 难以满足快速降解复杂成分印染废水的需求。针对现有技术中存在的问题, 本文通过对铁基非晶条带进行表面预处理, 表面活化之后的条带对酸性橙 7, 亚甲基蓝, 罗丹明 B 等偶氮染料水溶液均具有降解效果, 仅需使用 0.5g/L 活化过的铁基非晶条带, 30s 便基本完成 20mg/L 的酸性橙 7、亚甲基蓝以及甲基橙的降解, 其降解 30s 时的降解率高于 95%, 罗丹明 B 水溶液 (20mg/L) 需要约 2min 才能达到 95%的降解率。

本文使用 XRD, SEM 以及 DSC 等方法分析了表面经过活化后的铁基非晶条带高效降解偶氮染料的机理, 研究认为: 一方面, 化学活化剂中阳离子在铁基非晶合金表面获得电子而沉积, 形成纳米或亚微米颗粒覆盖在合金表面, 增加了合金的比表面积, 从而促进了铁基非晶合金催化降解偶氮染料的效果; 另一方面, 铁基非晶合金中原子失去电子生成阳离子进入溶液, 从而在铁基非晶表面形成更多活性位点, 有利于铁基非晶表面在催化降解反应中更快提供零价铁, 进一步促进类芬顿反应时羟基自由基的生成和偶氮染料的降解速率。本文提出的铁基非晶条带活化方法具有易操作、成本低、工艺简单、降解效率高、可处理多种高浓度偶氮染料等优势, 有望在未来应用于印染废水的工业化处理中。

D03-192

金属玻璃超声波液下成形

李信¹、宋凯凯²、马将*¹

1. 深圳大学
2. 山东大学

金属在液态环境下的加工具有重要的战略应用潜力, 包括船舶地现场维修、极地建设、深海探索等。尽管目前已经发展了一些水下成形技术, 但这些技术仍然面临着工作温度高、压力大、易腐蚀以及人身安全风险等多重挑战。此外, 在易燃溶剂或液氮等极端环境中的金属加工技术仍未得到充分开发。在本研究中, 我们提出了一种在液态环境下金属玻璃的成形工艺, 其特点是加工时间短($\sim 1s$)、应力水平低($\sim 300MPa$)、加工后样品结构得到回春等。基于这一工艺, 我们已经在液态环境中制备了复杂的结构和部件, 如光栅、齿轮和六面体等。这项研究不仅为在液下高效地加工金属材料开辟了新途径, 还为航空航天、能源和海洋工程的创新应用提供了技术支持。

D03-193

含铝轻质高熵合金中的相反转现象

褚月鑫^{1,2}、高宽³、周维华¹、田勇²、张勇³、李毅*¹

1. 中国科学院金属研究所
2. 东北大学
3. 北京科技大学

添加铝是高熵合金获得超高比强度的重要策略之一。然而, 随着铝含量的增加, 合金通常从无序的 BCC 转变为有序的 B2, 导致延展性变差。在本研究中, 系统地研究了高铝含量高熵合金($Zr_{40}Ti_{28}Nb_{12}Al_{20}$) 在热加工处理后的结构与性能变化。经过轧制和热处理后, 合金从单一的 B2 向 BCC 加 B2 结构转变, 其中纳米级球状的 B2 相均匀分布于 BCC 晶粒中。微观组织演变始于 B2 基体分解为离散的富 Al 区和连续的贫 Al 区。随后, 在粗化过程中, 富 Al 相不断消耗基体的 Al 和 Zr。基体内部逐渐发生 Al 和 Zr 元素耗竭的现象, 并最终形成无序排列的 BCC 结构。这种相变增强了材料在拉伸条件下的延展性能, 并同时保持着超高比强度。本研究提供了一种新思路来抑制轻质高熵合金因添加铝而引起的脆化。

D03-194

激光增材制造仿生豪猪鱼刺非晶合金复合材料

崔祥成、吕云卓*

大连交通大学

为了改善非晶合金的室温塑性, 人们通常利用液态熔铸工艺, 向非晶合金内部引入较软的晶体相, 从而形成非晶合金复合材料。然而, 这种方式制备的非晶合金复合材料存在形状尺寸有限, 组织难以调控和强塑倒置关系等问题。那么, 能否另辟蹊径, 采用“新工艺”制备“新结构”来克服上述问题? 道法自然, 近年来人们发现仿照自然界中高强韧生物构型能够实现非晶合金材料的强塑性协同改善。然而, 目前制备上

述生物构型通常利用表面加工技术，仍然无法解决以往样品尺寸小和形状简单等问题。基于此，我们成功地制造了一种仿生非晶合金复合材料，其结构模仿豪猪鱼刺，通过熔融的 $\text{Zr}_{50}\text{Ti}_5\text{Cu}_{27}\text{Ni}_{10}\text{Al}_8$ 渗透到激光增材制造（LAM）制备的晶体 Nb 骨架中来实现的。该仿生非晶合金复合材料实现了强塑性协同提高，其屈服强度为~800MPa，断裂应变为~35%。利用仿生设计思路，通过 LAM 和渗透铸造技术的结合，为大规模开发高性能非晶合金复合材料打开了一个新的窗口。

D03-195

Thermoplastic forming amorphous alloy microfluidic chip micromold

Chunyan Li^{*1,2,3}, Shaojie Hou², Xiaoqiang Fu², Chunling Li⁴, Yishu Zhang², Xiaocheng Li^{1,2}, Shengzhong Kou^{1,2}

1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050;

2. Lanzhou University of Technology

3. Wenzhou Engineering Institute of Pump & Valve, Lanzhou University of Technology, Wenzhou Zhejiang 325105;

4. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract: Based on a designed ($\text{Zr}_{0.6336}\text{Cu}_{0.1452}\text{Ni}_{0.1012}\text{Al}_{0.12}$)_{99.4}\text{Y}_{0.6} amorphous alloy, an amorphous alloy microfluidic chip master mold for imprinting was fabricated by means of a high and low temperature mechanical property tester. Meanwhile, the molding process of the alloy was simulated using Deform software, the filling and rheological processes in the microchannels were investigated. The experimental results show that the filling height of the amorphous alloy is proportional to the temperature and load, but inversely proportional to the strain rate. At a temperature of 703 K, a strain rate of $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, a load of 1500 N, the quality of the imprinted amorphous alloy micromolds is higher. The simulation results show that the flow rate will be higher close to the center of the channel, and the flow rate is smoother near the flow front. The strain rate is lower, the forming is more favorable. In addition, molding quality is affected by temperature and press stroke. At higher temperature and longer stamping stroke, the forming quality is better. When the strain rate is lower, the equivalent strain distribution is more uniform, so that the alloy deformation has better mobility and simple flow behavior, which is more conducive to the formation of polymers. PMMA(Polymethyl Methacrylate) microfluidic chips and ordinary glass(D-FK61) microfluidic chips are prepared by imprinting molding with amorphous alloys. This study shows that amorphous alloys can be used as molding masters for polymers and ordinary glass, thus expanding the application of amorphous alloys in the field of micromolding.}

D03-196

Pushing the Boundaries of Solid-State Hydrogen Storage: A Refined Study on TiVNbCrMo High-Entropy Alloys

Bo Cheng^{1,2}, Lingjie Kong^{1,2}, Hongmei Cai¹, Yunkai Li¹, Yumeng Zhao², Di Wan^{*1,2}, Yunfei Xue^{1,2}

1. Beijing Institute of Technology

2. Yangtze Delta Region Academy of Beijing Institute of Technology

This study investigates the development of $\text{Ti}_{25}\text{V}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Cr}_{35-x}\text{Mo}_x$ ($x=2, 4, \text{ and } 6$) high-entropy alloys (HEAs) for enhanced hydrogen storage performance. Alloys with tailored atomic radii and uniform valence electron concentration (VEC) were designed to obtain homogeneous single-phase body-centered cubic (BCC) solid solutions in combination with the CALPHAD method. Pressure-Composition-Temperature (PCT) curves for the $\text{Ti}_{25}\text{V}_{30}\text{Nb}_{10}\text{Cr}_{31}\text{Mo}_4$ alloy at 323 K revealed a remarkable reversible hydrogen storage capacity of 2.24 wt.%, marking an unprecedented milestone within BCC high-entropy hydrogen storage alloys. The investigation reveals an unexpected reduction in maximum hydrogen storage with increased Mo content, challenging

conventional expectations. The findings in this study offer insights into the intricate balance between chemical interactions and atomic structure, proposing the bulk modulus as a novel parameter for evaluating hydrogen release performance in HEAs. This work lays a foundation for future research in optimizing HEAs for efficient and reversible solid-state hydrogen storage.

D03-197

调控 TCP 相原子不完美堆垛实现 CoCrNi 中熵合金强韧化

石芸竹*、雷智锋、程广生

湖南大学

具有面心立方结构的中熵/高熵合金尽管具有优异的塑性，但强度普遍较低。引入拓扑密堆结构(TCP)相能够有效提高合金强度，然而，这些有序相的析出通常受到其严格组成的限制，需克服高的能量势垒形核。因此，调控强化相的形核是优化微观组织及力学性能的关键。本文以 CrCoNi 中熵合金为基体合金，用 W 和 Mo 等难熔元素取代 Cr，调控 TCP 相(即 μ 相)的组成和原子构型。研究表明，W 的加入导致非化学计量成分的 μ 相颗粒形成，诱导了不完美的晶体堆积(即平面缺陷)。这种趋势降低了形核能垒，增加了 μ 相的体积分数，从而有效地抑制了 FCC 基体晶粒的长大。因此，提高了析出强化和晶界强化效应，屈服强度从 CrCoNi 的 427 MPa 显著提高到 W0.3Cr0.7CoNi 的 1356 MPa。然而，Mo 的加入不能改变 μ 相粒子的原子构型，导致强化效果较弱。我们的发现揭示了操纵原子尺度构型可以有效地增强 TCP 相的强化效果，这为先进金属材料的设计提供了参考。

D03-198

非晶合金纳米管——氧化带来的超弹性特征

李福成、柳延辉*

中国科学院物理研究所

低维金属，因其独特的功能和力学特性，引起了诸多的关注。然而，由于极高的比表面积($\sim 10^8 \text{ m}^{-1}$)，低维金属在空气中极易氧化，从而引起力学及功能特性的失效，这极大的阻碍了低维金属的实际应用。我们最新的研究发现，低维非晶合金(包括非晶纳米管、非晶纳米片材等)，以 ZrCuNiAl 为例，在发生显著的氧化之后，不仅没有恶化力学性能，反而展现出独特的超弹性(10%-20%)特征，这样的超弹性远远超过现有报道的包括形状记忆合金和橡胶金属(Gum metal)在内的超弹性金属。通过精细的结构表征和系统的模拟分析，我们发现该超弹性行为来源于其内部所形成的渗透化的氧化物网络状结构以及该结构附近 Zr-O 键的自修复能力(交替断裂和形成)。

D03-199

宽温域范围内具有优异机械性能的中熵不锈钢

温康康¹、蔡学成²、辛圣炜¹、孙宝茹¹、Rui Feng³、杜聪聪⁴、朱绘卉⁵、Ke An³、丁帅军¹、孟凡熙¹、袁震¹、吴渊⁵、白振华¹、Peter K. Liaw⁶、沈同德^{*1}

1. 燕山大学

2. 香港大学

3. Oak Ridge National Laboratory

4. 清远创新实验室

5. 北京科技大学

6. University of Tennessee, Knoxville

不锈钢作为工程材料已广泛应用于许多领域。然而，强度-塑性难以兼顾以及高温强度不足在很大程度上阻碍了它们的加工和应用。高温合金虽然高温强度及蠕变阻力高，但由于富镍且有些含钴，价格昂贵。

为应对此类挑战,我们研发了一种新型的低成本、无钴、铁基中熵不锈钢 ($\text{Fe}_{47}\text{Cr}_{16}\text{Ni}_{26}\text{Ti}_6\text{Al}_5$, at%), 通过高密度共格 L_{12} 纳米析出相强化。该中熵不锈钢在室温下具有 1.35 GPa 的极限抗拉强度和 36% 的总延伸率, 避免了传统不锈钢在强度和塑性之间的两难选择。韧性 L_{12} 纳米析出相与变形亚结构的动态细化共同作用, 产生了出色的加工硬化能力。原位中子衍射和透射电子显微镜揭示了其变形机制。此外, 在 700 °C 时的屈服强度高达约 0.8 GPa, 不仅优于许多铁基高温合金和不锈钢, 也可与某些镍基高温合金媲美。750 °C 时的稳态蠕变速率比传统的镍基高温合金和耐热钢至少低两个数量级。在高温下, 滑动位错与稳定的 L_{12} 纳米析出相之间的强烈相互作用有效地阻碍了位错的移动, 从而实现了优异的抗蠕变性。

D03-200

基于非晶合金的新型非晶氧化物半导体

孙世棚、柴甜甜、姚可夫、张政军、陈娜*

清华大学材料学院

N 型和 P 型非晶氧化物半导体对实现新兴光电器件的新功能至关重要。非晶氧化物半导体的传导类型主要由它们的局部原子构型决定。然而, 它们无序的非晶结构对局部原子排列的设计提出了重大挑战, 从而阻碍了具有预定导通类型的非晶氧化物半导体的发展。为了解决这一长期存在的问题, 我们通过在不同的非晶合金体系中添加氧元素来开发一类新的非晶氧化物半导体。这些非晶氧化物半导体表现出不同的导电类型, 主要取决于所选择的非晶合金体系。这些非晶氧化物半导体可以与主流半导体 Si 集成, 显示出开发有用的全色滤光片器件的潜力。这些发现可能为创造具有前景的光电子性能的新型非晶氧化物半导体铺平道路, 可用于薄膜二极管, 晶体管和太阳能电池。

D03-201

非晶复合涂层在发电行业的应用研究

王永田*

华北电力大学

非晶态合金具有良好的耐磨和耐蚀性能, 是当前国际材料研究领域的热点之一。随着"碳达峰-碳中和"目标的提出, 高参数发电锅炉受热面亟需材料兼具良好的耐高温腐蚀和磨损性能。本研究在锅炉管道表面制备了非晶复合涂层, 首先采用 X 射线衍射、扫描电镜和金相显微镜对其微观结构进行了表征, 证实了其非晶复合结构。然后重点开展了高温腐蚀对比实验和现场示范应用, 发现非晶复合涂层具有良好的耐高温腐蚀磨损特性, 并对其微观机理进行了研究。

D03-202

CoCrNi-Ta 中熵合金强韧化研究

许鼎锋、卢一平*

大连理工大学

CoCrNi 中熵合金表现出优异的低温韧性而受到广泛关注。然而较低的室温强度限制了其应用。因此对该合金的强韧化研究始终是热点话题。本工作在 CoCrNi 中熵合金中加入 Ta 元素进行合金化, 并结合热机械处理设计出多种异质结构($\text{CoCrNi}_{100-x}\text{Ta}_x$ 中熵合金。随着 Ta 含量提升, 合金异质结构逐渐复杂, 由简单的晶粒异质变为沉淀与晶粒双异质。同时合金实现了良好的强塑性结合。

D03-203

高熵合金的局域化学有序结构及其对性能的影响

王一涵、吴渊*、吕昭平

北京科技大学新金属材料国家重点实验室

高性能金属结构材料是国民经济可持续发展和国家战略安全的重要物质基础，也是建设制造强国和创新型国家的关键支撑，同时提高金属结构材料的强度和塑性是科研工作者们的永恒追求。中/高熵合金（medium/high entropy alloys, M/HEAs）基于熵的理念进行开发，将我们的视角从相图的角落转移到了相图的中心，极大拓展了材料的开发空间，为高性能金属结构材料的设计带来了新的活力。近年来，高熵合金是理想固溶体的假设被颠覆，并被不断证实存在不同程度的局域化学有序（local chemical ordering, LCO）结构，而后者如今被认为是高熵合金的本征特性之一，与材料的力学性能息息相关。本文综述了高熵合金中局域化学有序结构的表征进展，及其对于合金变形行为的影响，并总结高熵合金中局域化学有序结构的有效调控策略。

D03-204

激光粉末床熔融钨+金刚石金属基复合材料的界面扩散行为与非晶化机理研究

高学浩*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

钨（W）+金刚石（D）金属基复合材料具有钨合金和金刚石的优点，在精密切削研磨、隧道钻头、核设施防护、航空航天热端等领域有着广泛的应用。然而，由于钨和金刚石的高熔点、硬度、强度等特性，以及 W+D 复合材料的非均匀性，传统技术制备 W+D 复合材料常存在形状和尺寸限制，并且机械加工困难。激光粉末床熔融（L-PBF）在制备 W+D 材料复杂构件具有明显优势。因此，本文以钨（W）、金刚石（D）和镀 Ni 金刚石（D-Ni）粉末为原料，采用 L-PBF 技术制备了 W+D 和 W+（D-Ni）复合材料，重点研究了 W 和 D 界面的熔体流动和元素扩散行为、微观组织演变和非晶化机制。

D03-205

从粘弹性力学行为探索非晶合金微观结构非均匀性

乔吉超

西北工业大学力学与土木建筑学院，陕西省西安市 710072

非晶合金是在快速冷却过程中来不及结晶而形成的无序合金固体，结构上短程有序而缺少长程序，因而具有独特的物理和力学特性。从能量角度来看，非晶合金处于能量的亚稳态，体系中的原子总是有向能量更低、结构更稳定的构型方向跃迁的趋势。非晶合金是典型的粘弹性材料，在常温下由于原子结构被冻结因而以弹性性质为主导，在玻璃转变温度附近原子结构被激活则表现为明显的粘性流动特征。研究非晶合金的粘弹性力学行为是理解其玻璃态结构本质和玻璃转变行为起源的重要途径。本研究采用蠕变、应力松弛以及动态力学弛豫等方法，尝试揭示不同时间尺度动力学激励下非晶合金空间非均匀性结构与动力学之间的内禀性关联。

关键词：非晶合金；微观结构非均匀性；粘弹性行为；变形机制

参考文献：

- [1] Wang WH. Prog. Mater. Sci. 106 (2019) 100561.
- [2] Hao Q, Lyu GJ, Pineda E, et al. Int. J. Plast. 154 (2022) 103288.
- [3] Tao K, Li FC, Liu YH, et al. Int. J. Plast. 154 (2022) 103305.
- [4] Zhang LT, Wang YJ, Pineda E, et al. Int. J. Plast. 157 (2022) 103402.
- [5] Zhu F, Xing GH, Lyu GJ, et al. Int. J. Plast. 164 (2023) 103588.
- [6] Duan YJ, Nabahat M, Tong Y et al. Phys. Rev. Lett. 132 (2024) 056101

D03-206

Wiley 及其材料科学期刊介绍

崔少莹

Wiley 出版集团

将研究成果整理成文并经过同行评审发表在科学期刊上，是科研工作的重要组成部分。近年来，科学技术研究论文产出迅速增长，虽然不断有新的期刊推出，但稿件在投稿过程中所面临的竞争依然前所未有的激烈。选择合适的期刊是文章发表的关键一步，本报告将介绍 Wiley 出版集团和旗下材料期刊，并分享一些有用的资源信息，加强科研人员对 Wiley 期刊的了解，在后续投稿中拥有更多选择。

D03-207

大块非晶合金应用进展

李扬德¹，高宽²

1. 美国液态金属科技公司
2. 东莞市逸昊金属材料科技有限公司

大块非晶合金结构长程无序，相组成均匀，且无位错、晶界等缺陷，具备高强度、高硬度等优异物理性能，适合做精密结构件和高表面质量产品。逸昊金属从冶金方式和工艺上进行改进和提高，从工业化生产的层面大幅度提升了大块非晶铸锭的纯净度，并完成真空成型等全自动化，一个方面提升了精密零部件的生产良率、降低了成本；另外一个方面将高光外观产品的良率提升了近一倍，具备大批量产业化的能力和竞争力。大块非晶的应用产品分为几个领域：首先消费电子领域持续在折叠机转轴、折叠笔记本转轴上应用，转轴市场总出货量接近 1000 万件；其次在手机转轴盖、手机中框、智能手表表壳、智能戒指、高端耳机等外观件上持续应用；另外，医疗领域、汽车领域陆续有产品走向市场。

关键词：大块非晶、精密零部件、折叠机转轴

D03-208

非晶合金剪切带涌现：从连续介质到原子尺度

戴兰宏

中国科学院力学研究所 超常环境非线性力学国家重点实验室，北京 100190

非晶合金（也称金属玻璃）因具有一系列有优异的力学性能在空天、国防、能源等领域呈现出广阔的应用前景。然而，非晶合金极易形成纳米尺度剪切带，其快速扩展往往导致材料宏观脆性断裂，从而严重地限制了该类材料走向广泛的工程应用。因此，在外部载荷激励下原子长程拓扑无序堆垛的非晶合金，究竟如何涌现出纳米尺度的变形高度局域化的剪切带是力学、物理、材料等学科领域共同关注的重大科学问题。报告人团队历经二十余年的探索，系统建立了非晶合金剪切带新理论，从连续介质尺度模型到离散的原子尺度模拟都揭示出原子尺度的体胀（自由体积）软化是非晶剪切带涌现的主控机制，并得到多个国外实验室的实验证实，澄清了非晶合金剪切带物理起源长期广泛的学术争议。本报告从连续介质到原子尺度视角，重点介绍团队在非晶合金剪切带涌现与演化动力学方面取得的若干进展。

D03-209

高性能无序合金催化材料

吕昭平

北京科技大学

近年来，以非晶态合金和高熵合金为前驱体制备的纳米多孔催化剂在催化领域取得了许多重要进展，具有广阔的应用前景。然而，这些合金催化剂仍存在活性不足，活性-稳定性难以兼顾等关键挑战。本报告主要介绍采用物理冶金技术制备非晶态合金和高熵合金电催化材料的研究进展，聚焦于基于物理冶金原理，通过多主元合金化和多尺度（纳米-微米-毫米）结构调控实现对催化材料本征活性和表观活性的高效改善。同时，重点介绍无序合金作为前驱体提升催化剂活性和稳定性的新机制，为开发适于实际电催化应用的高性能结构功能一体化催化剂提供新思路。

D03-210

激光熔化沉积 CoCrFeMnNi 高熵合金的腐蚀行为

王梓行, 杨晓坤, 狄婧, 黄永江, 孙剑飞

哈尔滨工业大学, 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001

采用激光熔化沉积技术制备了 CoCrFeMnNi 高熵合金, 并研究了沉积态 CoCrFeMnNi 高熵合金在 3.5wt.%NaCl 溶液中的腐蚀机理。研究发现, 沿着沉积高度方向上, 随着热循环次数的增加, 样品的耐腐蚀性能降低, 经历了较少热循环次数的上部样品具有最小的自腐蚀电流密度和最大的阻抗值, 发生腐蚀的倾向较小。在增材制造过程中沉积层发生的重熔现象和较高的冷却速度, 使得晶粒尺寸减小、位错密度和显微硬度增加, 因而, 沉积样品的下部具有最高的硬度。本报告将建立 CoCrFeMnNi 高熵合金增材制造工艺-微观结构-腐蚀性能之间的内在关联, 为其工程化应用奠定工艺基础。

关键词: 高熵合金; 激光熔化沉积; 腐蚀行为

D03-211

基于新型纳米晶化机制的高频高磁导率软磁材料开发及应用拓展

周靖 1, 李雪松 1, 柯海波 1, 沈宝龙 2, 孙保安 1,3*, 白海洋 1,3*, 汪卫华 1,3

1 松山湖材料实验室, 广东省东莞市, 523808

2 东南大学, 江苏省南京市, 211189

3 中科院物理所, 北京市, 100190

宽禁带半导体的普及使现代电子设备能够在更高的频率下工作, 然而, 开发与宽禁带半导体器件相匹配的高频软磁材料仍然具有挑战性。不同于传统的基于 Cu 和 Nb 的纳米晶化机制, 我们在铁基非晶合金里发现了一种以磁不均匀性为形核核心的新型纳米晶化机制, 在此基础上开发出一种具有优异高频磁导率的新型软磁纳米晶合金, 该材料在 100 kHz 下的有效磁导率高达 36000 (比目前磁导率最高的 FeSiBCuNb 纳米晶合金高 44%), 并且随着频率的提高, 优势变得更加显著, 同时表现出较高饱和磁感应强度 (1.42 T) 和低损耗 (120 kW/cm³ @0.2 T, 100 kHz)。这种以 Co 磁性原子为纳米晶形核位点的新型晶化机制也进一步被三维原子探针实验、小角 X 射线散射实验以及 Fe-Co 磁性团簇形核过程的分子动力学模拟等证实。进一步研究发现, 新型纳米晶合金优异的高频磁性能起源于其特殊的微观结构和磁畴运动机制, 因此表现出极低的磁晶各向异性和磁弹性各向异性。此外, 该材料还具有较好的条带成型能力, 目前已在工业条件下实现百公斤级别的宽幅带材中试。

关键词: 纳米晶; 晶化机制; 高频软磁性能; 磁畴运动机制

D03-212

Pushing the Boundaries of Solid-State Hydrogen Storage: A Refined Study on TiVNbCrMo High-Entropy Alloys

程博 1,2, 孔令杰 1,2, 蔡红梅 1, 李云凯 1, 赵雨萌 2, 万迪 2,3,*, 薛云飞 1,2

1. 北京理工大学, 材料学院

2. 北京理工大学长三角研究院 (嘉兴)

3. 北京理工大学, 前沿交叉科学研究院

This study investigates the development of Ti₂₅V₃₀Nb₁₀Cr_{35-x}Mo_x (x=2, 4, and 6) high-entropy alloys (HEAs) for enhanced hydrogen storage performance. Alloys with tailored atomic radii and uniform valence electron concentration (VEC) were designed to obtain homogeneous single-phase body-centered cubic (BCC) solid solutions in combination with the CALPHAD method. Pressure-Composition-Temperature (PCT) curves for the Ti₂₅V₃₀Nb₁₀Cr₃₁Mo₄ alloy at 323 K revealed a remarkable reversible hydrogen storage capacity of 2.24

wt.%, marking an unprecedented milestone within BCC high-entropy hydrogen storage alloys. The investigation reveals an unexpected reduction in maximum hydrogen storage with increased Mo content, challenging conventional expectations. The findings in this study offer insights into the intricate balance between chemical interactions and atomic structure, proposing the bulk modulus as a novel parameter for evaluating hydrogen release performance in HEAs. This work lays a foundation for future research in optimizing HEAs for efficient and reversible solid-state hydrogen storage.

关键词: high-entropy alloys, hydrogen storage, body-centered cubic, PCT curve, CALPHAD

D03-213

亚稳态合金对含氮污水处理与再利用研究

陈双琴 1

1 南京理工大学材料科学与工程学院/格莱特研究所, 江苏 南京 210094

亚稳态合金(非晶合金、高熵合金、纳米非晶等)由于具有丰富的低配位活性位点和高吉布斯自由能,成为电化学催化剂家族中极具潜力和竞争力的新候选材料。我们主要针对含氮污水处理与再利用开展了一系列研究,包括亚稳态结构调控、催化体系设计及其环境因素影响。通过纳米晶化、纳米团簇、纳米界面等不同尺度调控非晶合金的微观结构,用于偶氮染料降解、尿素氧化、尿素燃料电池电极材料研究。

D03-214

Overcoming Strength-Toughness Trade-off in Eutectic High Entropy Alloy by Optimizing Chemical and Microstructural Heterogeneities

Zhaoqi Chen^{1,a#,†}, Wenqing Zhu^{1,b,†}, Hang Wang^{1,c}, Quanfeng He^{1,2,d}, Qihong Fang^{3,e}, Xiaodi Liu^{4,f}, Jia Li^{3,g*}, Yong Yang^{1,5,h*}

1. Department of Mechanical Engineering, City University of Hong Kong, Kowloon Tong, Kowloon, Hong Kong, 999077, China
2. Institute of Materials Modification and Modelling, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China
3. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha, 410082, PR China
4. College of Mechatronics and Control Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, 518060, China
5. Department of Materials Science and Engineering, City University of Hong Kong, Kowloon Tong, Kowloon, 999077, China

Abstract: The strength-toughness trade-off has long been a significant obstacle in the pursuit of advanced structural alloys. However, here we developed a eutectic high entropy alloy (EHEA) that effectively overcomes this fundamental limitation. Our EHEA, comprising face-centred cubic (FCC) and body-centred cubic (BCC) crystalline phases, demonstrates exceptional mechanical properties by harnessing microstructural hybridization and an unusual strain-induced phase transition from FCC to BCC. Unlike conventional eutectic alloys, the compositionally complexity of our EHEA allows precise control over its microstructural and chemical heterogeneities across multiple length scales, ranging from atomic- and nano-scales to meso-scales. Optimizing these microstructural and chemical heterogeneities within our EHEA resulted in high strength and remarkable ductility because of enhanced fracture resistance, outperforming alternative high/medium entropy alloys with similar compositions and microstructures.

Keywords: Eutectic high entropy alloy; Phase transformation; Crack delocalization; Multi-scale heterogeneity

墙报

D03-P01

Cr 元素在铁基非晶合金高密度钝化膜中的作用

宋梓祺、王伟民*

山东大学

研究了 Cr 元素对 $\text{Fe}_{72-x}\text{Cr}_x\text{B}_{19.2}\text{Si}_{4.8}\text{Nb}_4$ 条带 ($x = 0, 7.2, 21.6$ 和 36) 在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀行为的影响。结果表明, 当 Cr 含量达到 $21.6 \text{ at.}\%$ 时, 合金的玻璃成形能力得到改善。当 c_{Cr} 达到 $36 \text{ at.}\%$, 条带中出现一些纳米晶。随着 c_{Cr} 的增加, 铁基非晶条带的耐腐蚀性能和硬度不断提高; 在极化过程中, 它们的钝化膜呈现先增大后减小的趋势, 在 $c_{\text{Cr}} = 7.2 \text{ at.}\%$ 时点蚀电位最高。经 XPS 测试确认, 由 Cr_2O_3 和 $[\text{CrO}_x(\text{OH})_{3-2x}, n\text{H}_2\text{O}]$ 组成的致密钝化膜可以减少样品表面因氯化物腐蚀和过量的 CrFeB 相而产生的腐蚀坑数量。这项工作可以帮助我们设计和制备高耐腐蚀铁基非晶合金。

D03-P02

Highly efficient catalytic performance and self-renewing behavior of Fe-based glass induced by pulsed laser

Qi Chen, Weimin Wang*

Shandong University

FeSiB metallic glass using pulsed laser processing is proved to show excellent catalytic performance in wastewater treatment for the first time by decolorizing and mineralizing reactive red 195. Pulsed laser can effectively improve the thermodynamic properties, surface photothermal conversion and hydrophilicity of catalyst. Compared with homogeneous FeSiB catalyst, heterogeneity $\alpha\text{-Fe/FeSiB}$ exhibits a high k value, strong TOC removal rate and low activation energy. Theoretical calculations indicate that the excellent catalytic performance of heterogeneity catalyst is attributed to its unique nanoscale biphasic disorder structure, resulting the energy barrier of the rate-determining-steps of the conversion of $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$ to $\text{SO}_4^{\bullet-}$ is reduced from 2.20 to 1.52 eV . The reusability test of heterogeneity catalyst also shows that the abnormal recovery phenomenon of decolorization efficiency at the 19th cycle owing to its unique self-renewing. This study reveals that a nanoscale biphasic disorder structure is a new strategy for obtaining high catalytic rate and durability.

D03-P03

Co 元素对 Fe 基非晶合金退火处理后表面结构和性能的影响

王兆萱、王伟民*

山东大学

本文研究了 $\text{Fe}_{80-x}\text{P}_{13}\text{C}_7\text{Co}_x$ ($x=0, 4, 8$) 非晶合金条带 (Co_0 、 Co_4 、 Co_8) 在退火后的表面结构、腐蚀行为和软磁性能。退火后, Co_0 和 Co_4 样品表面形成了纳米晶结构, 而 Co_8 样品的纳米晶结构位于中间层, 表面层仍保持非晶态。此外, 所有样品在退火后钝化膜变薄, 这归因于碳的氧化还原作用。Co 元素能够使样品在 0.6M NaCl 溶液中的腐蚀电位保持稳定, 退火后的 Co_8 样品动电位极化曲线出现明显钝化平台。研究表明, Co 元素在维持 Fe 基非晶合金软磁性能方面发挥了重要作用。

D03-P04

非贵金属基金属玻璃的电催化析氢性能

郭紫薇、王伟民*

山东大学

贵金属 (Pt, Ru, Pd 等) 纳米粒子及其氧化物是性能优异的 HER 催化剂, 但是其储量的有限性在提高了成本的同时也限制了其广泛应用。由于成本低且具有丰富的活性位点、良好的自支撑性以及优异的耐腐蚀性, 非贵金属基非晶合金在 HER 催化剂领域引起了广泛关注, 如 Fe 基, Ni 基, Al 基等材料均被证实具备优异的催化能力。总结了目前典型的非晶合金催化剂的种类以及制备方法, 分析了非晶合金催化剂的作用原理以及未来发展面临的挑战。

D03-P05

综述了第IV主族元素掺杂对 FeBC 非晶合金的结构及性能影响

李燕旭、王伟民*

山东大学

综述文章中采用单辊甩带法制备了 $\text{Fe}_{83}\text{B}_9\text{C}_8\text{M}_2$ ($\text{M}=\text{C}, \text{Si}, \text{Ge}, \text{Sn}$) 非晶合金条带, 通过各种测试技术研究了非晶合金条带的力学性能、软磁性能、腐蚀性能等。研究发现, Si、Ge 元素加入使得条带近邻原子间距下降, 但并不改变铸锭的相结构, 而较大原子量 Sn 元素的加入使得体系相结构由条纹状 $\alpha\text{-Fe} + \text{Fe}_3\text{C}$ 转变为颗粒状 $\alpha\text{-Fe} + \text{Fe}_{23}(\text{C}, \text{B})_6$ 网状组织, 经快冷后晶态特征得以保存导致条带最近邻原子间距急剧上升。第IV主族元素微量掺杂可以明显提升 FeBC 非晶条带的杨氏模量。C、Si、Ge 元素的添加使条带的饱和磁化强度 (M_s) 逐渐增大, 而过大原子量的 Sn 元素掺杂后又使得 B_s 恶化, 但 Sn 的加入在一定程度上增强了条带的耐腐蚀性能。

D03-P06

对快冷铝镍合金耐腐蚀性能研究的综述

路新龙、王伟民*

山东大学

综述该研究, 是通过转速 (Sc) 分别为 21 和 42 m/s 的单辊甩带法制备了 $\text{Al}_{50}\text{Ni}_{50}$ 合金条带, 并在不同温度下进行了退火处理。随着冷却速率的提高, 转速为 $Sc = 42$ m/s 的铸态和退火条带具有更高的 (100) 晶面取向因子 $F(100)$ 。通过在 3.5% NaCl 溶液中的电化学测试和浸泡实验对不同条带的耐腐蚀性能进行了研究, 结果表明, 具有较高取向因子 $F(100)$ 的条带具有更高的耐腐蚀性。通过 X 射线光电子能谱 (XPS) 分析发现, $Sc = 42$ m/s 的铸态条带比 $Sc = 21$ m/s 的铸态和退火条带在内层具有更稳定、更致密的 $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{AlNi}$ 钝化膜, 并可以经过 700 °C 退火得到进一步提升。可见 $\text{Al}_{50}\text{Ni}_{50}$ 合金的耐蚀性可以通过提高冷却速度 (Sc) 再辅以适当温度的退火得到显著提升。

D03-P07

基于非稳定局域瞬态模的液态粘度

黄隆州¹、Vinay Vaibhav²、Bing-Yu Cui³、Baggioli Matteo⁴、Alessio Zaccone²、王云江*¹

1. 中科院力学研究所

2. Department of Physics "A. Pontremoli," University of Milan

3. School of Science and Engineering, The Chinese University of Hong Kong

4. Wilczek Quantum Center, School of Physics and Astronomy, Shanghai Jiao Tong University

液体的粘度由原子级摩擦决定。虽然可以使用 Green-Kubo 形式通过追踪应力的时间相关性来估计物质的粘度, 但这种方法并不能完全阐明动量运输的物理机制。在这里, 我们使用非仿射线性响应理论计算金属液体的粘度。这有助于解释瞬态简正模、仿射力场和原子尺度摩擦在粘度中的相对作用。令人惊讶的是, 我们发现只有非稳定局域模态对粘度有贡献, 而不是整个振动频域。这一观察结果为粘度作为动量运输提供了微观证据: 粘度由具有非稳定局域模作为前驱的局部结构激发促进的。我们根据这些发现提出了一个定量模型, 将粘度与非稳定局域模联系起来。该模型在广泛的温度范围内有效, 涵盖了 Arrhenius 和

非 Arrhenius 体系。从瞬态模预测粘度为计算和理解非晶材料中的输运现象提供了一个新的范式，是理解玻璃化转变机制的一种新方法。

D03-P08

Effect of element infiltration on radial composition/structure and magnetic/electrical properties of Fe-B amorphous powders prepared by spark erosion

Hao Liu¹,yu gao¹,lei zuo*²

1. beihang university

2. beijing instiute of technology

Before confirming spark erosion as an effective technique for producing Fe-based amorphous powders, it is crucial to thoroughly investigate their magnetic/electrical properties and the impact of different elements infiltration on composition, microstructure, and performances. Limited research has been conducted on the magnetic and electrical properties of spark-eroded Fe-based amorphous powders, and there is a dearth of studies on the influence of different elements' infiltration. In this work, a series of binary Fe₈₃B₁₇ amorphous powders were synthesized using water (as a source of O), ethanol (as a source of C and O), and silicone oil (as a source of O, Si, and C). The elements O, C, and Si exhibit different concentration distributions along the radial direction in the synthesized powders. The depth of O infiltration varies between 10 to 35 nm, C from 190 to 280 nm, and Si barely diffuses inward. For powders prepared in water (WF), the formation of nanoclusters throughout the particle leads to an improved saturation magnetization. Besides, the infiltrated mass ratio of O is merely 1.38 wt.% and is predominantly concentrated in the surface of WF powder, resulting in a significant increase in resistivity. The resistivity of WF powder is approximately four orders of magnitude higher compared to powders prepared in ethanol (EF) and silicone oil (SF). Nanoclusters are also observed in EF and SF powders, where the significant infiltration of non-magnetic C leading to a reduction in the saturation magnetization of both EF and SF powders. Inside EF powder, a remarkable peak of C content appears at ~30 nm away from the powder surface in the radial direction, accompanied by an increase in structural order. This suggests a synchronous relationship between the variations of structural order in the radial direction and the concentration of the infiltration element. These findings demonstrate the practical feasibility of tuning composition and microstructure via dielectrics to develop high-performance Fe-based amorphous powders.

D03-P09

Layered Ir-Ta metallic glass with surface Ir complementation enabling high-efficiency acidic oxygen evolution

Qi Guo,RUI LI*

Northwestern polytechnical university

Efficient and stable oxygen evolution reaction (OER) electrocatalysts are essential for proton exchange membrane water electrolysis. Here, we report a pre-activated IrTa-based metallic glass (MG) catalyst with a free-standing structure for high-efficiency acidic OER. Specifically, a unique surface catalytic structure that contains an IrOx mesoporous layer and a Ta-rich amorphous oxide layer with dispersed IrOx nanocrystals was in situ formed onto the MG substrate during oxygen-evolving. The layer-structured catalyst exhibits an overpotential of ~220 mV at the current density of 10 mA cm⁻² in 0.5 M H₂SO₄ and operates stably under 100 mA cm⁻² for more than 600 h. In-situ DEMS and XPS analyses reveal that the catalyst follows an adsorbate evolution mechanism pathway during OER. Moreover, the intercalated amorphous Ta oxides with IrOx nanocrystals can effectively modulate the valence state of the surface catalytically active Ir species and stabilize them, suppressing

the surface Ir from accumulating more O and dynamically complementing in case of their dissolving, thereby ensuring the efficiency and stability of the catalyst.

D03-P10

Intermetallic alloy electrocatalysts with hierarchical porosity serve ultra-stable isolated high-entropy sites for high-current-density oxygen-evolving

Yanan Zhang, Rui Li*

Northwestern Polytechnical University

Developing inexpensive and efficient catalysts for anodic oxygen evolution reaction is crucial for practical water electrolysis applications. However, breaking the trade-off between activity and stability under industrial current densities remains challenging. Here, we report atomic-ordered B2-type high-entropy intermetallic (HEI) alloy catalysts with self-supported hierarchical porosity that isolate the late 3d-transition metal-based high-entropy active sites for oxygen-evolving. This catalyst displays an ultralow overpotential of 359 mV at 1 A cm^{-2} and robust stability of over 2000 h with negligible activity decay (less than 2.3 %) at ampere-level current density ($\geq 2 \text{ A cm}^{-2}$). Our analyses reveal that the configurational entropy-increased alloy structure with synergistic electronic effect and the ordered intermetallic atom stacking framework with site-specific isolation effect can effectively reduce the energy barrier for water electrolysis and stabilize the catalytic high-entropy sites kinetically and thermodynamically. Moreover, the anion-exchange membrane water electrolyzer assembled by the B2-HEI catalyst electrode delivers a current density of 1 A cm^{-2} at a cell voltage of 1.72 V and can operate steadily for at least 300 h under 85 °C.

D03-P11

机器学习辅助设计具有超高显微硬度的高熵合金

赵顺利*

山东大学威海校区

高熵合金以其独特的显微组织和性能引起了人们的广泛关注。发现具有理想性能的新型 HEAs 至关重要，但传统的设计方法既费力又耗时。幸运的是，新兴的机器学习(ML)提供了一个有效的解决方案。在这项研究中，收集了来自不同合金系统的成分-显微硬度数据对，并使用生成对抗网络(GAN)进行了扩展。将这些数据对转换为经验参数-显微硬度对。然后利用主动学习(AL)对 Al-Co-Cr-Cu-Fe-Ni 体系进行筛选，并确定了 eXtreme Gradient Boosting (XGBoost)作为最优的 ML 主模型。使用 XGBoost 子模型的数百万次数据训练迭代和使用期望改进(EI)算法的精度评估建立了 HEA 成分与显微硬度之间的关系。所建立的子模型与实验数据吻合良好，其中四种富 Al 成分在铸态体态表现出超高显微硬度($>740 \text{ HV}$ ，最大值为 $\sim 780.3 \text{ HV}$)和低密度($<5.9 \text{ g/cm}^3$)。与稀 AlCo 金属间化合物相比，无序 BCC 纳米颗粒在有序富 AlCo 的 B2 基体中析出导致硬化增加。这种轻质、高性能的合金在薄膜或涂层等工程应用方面具有潜力。

D03-P12

快速退火对 Fe70Co14B16 非晶合金结构及磁性能的影响

崔佳丽、张涛*

北京航空航天大学

Fe 基非晶/纳米晶合金相比于硅钢、软磁铁氧体、坡莫合金，由于在高频率的工作状况下具有优异的软磁性能，并且热稳定性更优，能够作为新一代能源电力系统中小体积、低能耗、高能量密度的电磁耦合器件的核心材料，具有更加广阔的应用前景。近年来开发的 FeCo 基非晶合金有着较高的 Bs、热稳定性和

较低的 H_c ，但是针对经过不同热处理工艺的非晶合金的微观结构和软磁性能的研究比较少，另外 Co、Fe 元素的比例对非晶合金的形成能力也有着一定的影响。

综合考虑各元素之间的混合焓、混合熵以及原子尺寸的差异，设计了 Fe₇₀Co₁₄B₁₆ 非晶合金，并详细研究了快速退火对合金结构以及微观性能的影响。本文设计了一种 SiC 沙浴快速退火的热处理工艺，研究发现，Fe-Co-B 非晶合金的晶化相的形成是以均匀形核机制为主，且在结晶过程中，结构演化过程与升温速率和热处理温度有着密切的关系。在快速退火过程中，晶化析出相以 α -Fe (sc-CoFe) 相为主。快速退火更快的升温速率和更短的热处理时间有效抑制了晶粒的粗化，显著降低了合金的 H_c 。经过对快速退火的温度和热处理时间等参数的优化，表明“高温短时”可以达到最优的软磁性能，在 813 K，处理 3 s 能够得到 B_s 为 1.96 T， H_c 为 5.141 A/m 的优良软磁性能。

D03-P13

相调控对 AlCrFeNi 高熵合金力学性能的影响

张全*

烟台大学

高熵合金(HEAs)因其高强度、优异的压缩或拉伸性能、高硬度等卓越的特性而备受青睐，它们在航空航天和设备制造领域具有极大的潜力。本作品制备了 (AlNi)_x(FeCr)_{1-x} ($x=0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9$) 高熵合金，旨在探索它们的相组成、微观结构和力学性能。结果表明：当 $x=0.1、0.2$ 时，晶体结构为单一的 BCC 相(FeCr 相)。随着 x 增加，当 $x=0.3\sim 0.8$ 时，B2 相(AlNi 相)含量增加，组织内部出现枝晶与共晶结构。当 $x=0.9$ 时，晶体结构为单一的 B2 相。合金的压缩性能表现为先增大后减小的趋势，当 $x=0.5$ 时，断裂应力和塑性应变达到最大值，分别为 2398.87 MPa 和 33.23%。合金的耐磨性能同样表现为先增大后减小的趋势，当 $x=0.5$ 时，磨损深度最小，为 3.5 μ m。

D03-P14

Corrosion mechanisms of Zr-based bulk metallic glasses in NaBr solution

Chaojun Li, Li Liu, Xiang-jin Zhao*

Yantai University

The corrosion mechanisms of Zr₅₅Cu₃₅Al₁₀ and Zr₅₆Co₂₈Al₁₆ bulk metallic glasses (BMGs) in 3.5 wt.% NaBr solution was systematically investigated by kinetic potential polarization and electrochemical impedance spectroscopy. Both Zr₅₅Cu₃₅Al₁₀ and Zr₅₆Co₂₈Al₁₆ BMGs were subjected to pitting damage during the polarization process in NaBr solution due to the presence of Br⁻ ions. However, Zr₅₆Co₂₈Al₁₆ BMG exhibits better corrosion resistance compared to Zr₅₅Cu₃₅Al₁₀ BMG. Zr₅₅Cu₃₅Al₁₀ BMG experienced selective dissolution of alloying elements under the attack of Br⁻, and Cu element was enriched in the corrosion pit. The surface of Zr₅₆Co₂₈Al₁₆ BMG showed a more uniform distribution of elements after corrosion. Simultaneously, the substitution of Cu by Co led to changes in the composition of the passive films of the BMG and increased the relative content of ZrO₂, which is a principal factor contributing to the enhanced stability of Zr₅₆Co₂₈Al₁₆ BMG's passive film.

D03-P15

铁基合金熔体结构对前驱体与纳米晶结构及软磁性能的影响

孙梦镭、贺爱娜*、张宁、董亚强、黎嘉威、张博峻、满其奎

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

中国科学院磁性材料与器件重点实验室，浙江省磁性材料与应用技术重点实验室，中国科学院宁波材料技术与工程研究所，浙江宁波 315201

纳米晶软磁带材是 200 kHz 范围内综合性能最优的金属软磁材料。然而第三代半导体的应用驱使高频变压器、电感等电力电子器件向高频化、高效率与节能化发展,使得纳米晶软磁带材亟需超薄化。但是,目前超薄前驱体带材制备中因其合金粘度大容易出现堵带现象,这与熔体的粘度和结构特性密切相关。超薄带制备时需要一定的流动性,粘度需相应降低,进而会降低非晶形成能力。同时粘度也是反映合金熔体结构随温度变化的重要特性,可借此探究熔体结构对纳米晶结构与软磁性能的影响。因此,本工作在 FeSiBNbCu 基础上添加微量低熔点金属 Sn,观测了不同 Sn 添加量下合金粘度随温度的变化,分析熔体结构的不同及对前驱体结构、纳米晶结构及软磁特性的影响;为了对比,研究了母合金经高温粘度测试后的重熔合金制备的前驱体与纳米晶结构及软磁特性。研究发现,Sn 的添加可大幅降低粘度,高温保温 (> 1400 °C) 后的熔体快淬得到的前驱体带材的非晶结构更均匀,局部晶化明显减少;热处理后得到的纳米晶粒尺寸可减小 3-4 nm,可使 5 kHz 下的磁导率提高 20%。通过调控合金熔体结构可提高前驱体的无序度,细化纳米晶合金的晶粒尺寸,优化高频磁导率。

本文得到了国家重点研发计划课题(2022YFB2404101)、浙江省尖兵领雁(2023C01075)等项目的支持。

D03-P16

纳米晶 VNbMoTaW 难熔高熵合金中的蠕变

申珣、辛圣炜*、丁帅军、孙宝茹、沈同德

燕山大学

难熔高熵合金(RHEAs)被认为是高温应用的理想候选材料。纳米晶(NC)RHEAs 的高温力学性能应该与粗晶粒(CG)和超细晶粒(UFG)RHEAs 有很大不同。然而,NC RHEA 的蠕变行为在高温应用中必须得到很好的评估,但由于很难生产出大块的 NC RHEA 用于蠕变测试,因此这种蠕变行为在很大程度上还不为人所知。在本研究中,通过机械合金化和随后的高压/高温烧结,合成了平均晶粒尺寸为 67 ± 17 nm 的等原子块状 NC VNbMoTaW RHEA。在不同的应力(70 - 1100 MPa)条件下,在高温(973 和 1073 K)下对块状试样进行了压缩蠕变试验。块状 NC VNbMoTaW 的抗蠕变性略低于块状 CG VNbMoTaW,但远高于之前报道的 CG 和 UFG HEA。推导出的 NC VNbMoTaW 的活化体积、应力指数和活化能表明,蠕变变形主要是由晶界扩散引起的。蠕变变形受 Mo 和 Nb 元素扩散的控制,这两种元素在五合金元素中的晶界扩散速度最慢。本研究从根本上了解了数控 RHEA 的蠕变行为和变形机理,有助于设计先进的抗蠕变 RHEA。

D03-P17

Microstructural evolution and mechanical properties of CoCrNi medium-entropy alloys through vanadium addition

Yu Tang^{1,2}, Hengyong Yang², Jianyong Wang¹, Congkang Xu¹, Chuangshi Feng², Kai Zeng², Fuxiang Zhang^{*2}

1. Department of Physics, Shantou University

2. Songshan Lake Materials Laboratory

Abstract: The concurrent possession of high strength and ductility is a fundamental requirement for the extensive application of metallic materials in engineering. Conventional strengthening approaches have been unavoidably rendered obsolete by the inherent conflict between strength and ductility. Recently, medium-entropy alloys (MEAs) have emerged, featuring elevated levels of strength alongside excellent ductility. In this work, a series of (CoCrNi)_{1-x}V_x MEAs with the increased V contents (x=0, 5, 10, at. %) were synthesized successfully. The phase structure characterization reveals that the alloy changes from a single face-centered cubic (FCC) phase to FCC+sigma phase with the increase of V content. Tensile test results indicate that the yield strength of the alloys can be significantly enhanced without substantially sacrificing the ductility by introducing of appropriate amounts of V. Specifically, the (CoCrNi)_{0.95}V_{0.05} alloy exhibits outstanding comprehensive mechanical properties,

possessing a yield strength of 535 MPa with a ductility of 57%. Meanwhile, the $(\text{CoCrNi})_{0.90}\text{V}_{0.10}$ alloy achieves a yield strength of 750 MPa while maintaining a ductility of 24.5%, thereby possessing both high strength and high ductility. This achievement is attributed to the solid solution strengthening effect of V in the alloy and the possible formation of fine dispersed phases, which effectively impede dislocation movement and enhance deformation resistance. Additionally, the moderate addition of V also promotes grain refinement, further increases the strength of alloys. Our study provides an insight understanding of structure-property relationships and practical guidance for designing new medium-entropy alloys with both high strength and high ductility, which may promote the implication of these materials in industry such as aerospace and automotive manufacturing.

D03-P18

超声调控 La55Al25Ni5Cu10Co5 中熵金属玻璃纳米压痕行为

李伟¹、李路遥¹、张宸¹、马将²、袁晨晨*¹

1. 东南大学材料科学与工程学院
2. 深圳大学机电与控制工程学院

流变缺陷被认为是决定金属玻璃（MGs）力学性能、尤其是塑性变形能力的决定性因素。表征或者控制此类存在于长程无序结构的金属玻璃中的缺陷是一件极具挑战性的工作。研究发现超声振动技术能够显著影响 MGs 内部的缺陷激活行为，进而改善 MGs 的各项性能。然而关于超声诱导 MGs 缺陷激活机制仍未做过多深入研究。本项工作主要通过在不同施加能量下对 La55Al25Ni5Cu10Co5MG 进行超声振动处理。使用纳米压痕对不同能量状态下的样品进行微观力学测试，基于 Maxwell-Voigt 模型和协作剪切模型（CSM）对样品内部缺陷激活与演化行为进行分析，同时结合 TEM 微观结构分析给出超声作用下样品的结构变化。该工作通过超声振动实现了 La55Al25Ni5Cu10Co5MG 在塑性变形可调性，并揭示了其在不同能量状态下的缺陷激活机制。

D03-P19

增材制造 Ni-Co-V 多主元合金的微观组织和力学性能研究

解彤、仝阳*

烟台大学精准材料高等研究院

多主元合金因其高强度和优异的韧塑性，为高性能结构材料的开发提供了新途径。直接能量沉积（DED）增材制造作为一种迅速发展的技术，可以高效实现复杂几何形状零部件的净成形，同时 DED 制造过程中产生极高温度梯度和极端凝固条件会产生不同于传统铸造的微观组织，为合金的组织调控提供了新的自由度。为了充分利用 DED 制造和多主元合金的综合优势，本研究采用 DED 增材制造技术制备了 Ni-Co-V 多主元合金，并测试了其在超低温下的拉伸性能。研究结果表明 DED 制造的 Ni-Co-V 合金具有优异的强度和塑性。利用背散射电子显微镜（EBSD）和透射电子显微镜（TEM），进一步表征了合金的微观结构，分析了其微观变形机制。本研究为增材制造多主元合金的微观结构调控和性能优化提供了新的见解。

D03-P20

高熵合金光催化超疏水表面制备及性能研究

张昊、赵相金、刘丽*

烟台大学

高熵合金以其优异的催化活性在废水处理中获得了广泛的关注和研究。然而在实际应用中杂质离子会腐蚀合金表面，导致材料性能降低。在本研究中，通过简单快捷的电化学刻蚀法，使高熵合金表面同时具有优秀的拒水性和催化能力，超疏水表面的缓蚀率达到~97%，并表现出良好的长期耐腐蚀性能。催化循环四次后，催化效率仍能保持在 85%以上的高降解率。与其他高熵合金相比，Cu、Ti 的加入提高了光催化活

性。在可见光照射下具有良好的杀菌性能，杀菌率达到~99%。此外还评估了无机阴离子及 pH 值对该样品光催化性能的影响，以探究在实际应用中的影响。

D03-P21

热处理温度对非晶电机定子铁芯软磁性能的影响

施飞*

钢铁研究总院

非晶合金凭借优异的综合软磁性能，相比于传统的硅钢材料，适用于更高的频率，并且有着更低的损耗，因此在高速电机领域备受关注。但由于非晶合金薄、硬、脆的特点，导致非晶定子铁芯难以加工，并且加工过程对非晶铁芯的软磁性能影响严重，如何充分发挥其高频低损的优势成为定子铁芯加工的难点。叠压非晶定子铁芯的制备工艺主要包括非晶带材剪切、热处理、浸胶固化、切割成型。其中热处理可以减少带材内应力，提升带材的软磁性能，但同时会增加带材脆性。本文研究了不同热处理温度对非晶铁芯软磁性能的影响，结果表明：非晶带材的最佳热处理温度在 350℃左右，相比于未热处理的样品，磁导率有大幅提升，从 1300 增加到 1630（提升了 23%），损耗 P1kHz/1T 有着较大程度的降低，从 52.0W/kg 降低到 45.3W/kg（降低了 11%）。

D03-P22

服役时间对高 Bs 铁基纳米晶材料高频磁稳定性的影响

张博峻、贺爱娜*、董亚强、黎嘉威、孙梦镭、满其奎

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

铁基纳米晶材料具有低的矫顽力和损耗及良好的高频磁导率等优异的软磁性能，是共模电感、高频变压器、电流互感器和无线充电等高频器件的关键核心材料。这些纳米晶材料总是在交变外磁场和频率下工作，并受到工作环境的热影响。因此，提高铁基纳米晶材料在长时间高温服役下的高频磁稳定性对提高器件的可靠性至关重要。在此，我们基于高磁感 FeCuNbSiB 和 FeCuNbSiBMo 纳米晶磁芯（Bs 为 1.38-1.39T）纳米晶合金，研究了在 130℃的工作温度下，服役时间对软磁特性、微观结构与磁畴结构的影响规律。结果发现，两种合金磁芯随服役时间的相对变化率随着频率的增加而降低。与含钼环形磁芯相比，无钼磁芯的高频磁导率随服役时间的变化要小得多。此外，服役时间对两种纳米晶磁芯的损耗影响都较小，且无钼磁芯的损耗随服役时间的相对变化率小于含钼磁芯。从微观结构和磁畴结构分析表明，130℃的工作温度下服役 720 小时会略微改变两种纳米晶样品的磁畴结构，但不会改变两种纳米晶样品的相结构。

D03-P23

NiCoCrCuAl 高熵合金的微观结构和力学性能

赵发昌、陈兴华、赵兴明、伍复发*

辽宁工业大学

本文研究了 NiCoCrCuAl 系列高熵合金（HEAs）的力学性能和微观结构之间的对应关系，通过调整 FCC 和 BCC 相的比例。采用光学显微镜（OM）、X 射线衍射（XRD）、电子背散射衍射（EBSD）、扫描电子显微镜（SEM）和拉伸测试分析了合金的结构和力学性能。结果表明，NiCoCrCuAl 系列 HEAs 的晶体结构从 FCC 相过渡到 BCC 相，体心立方（BCC）相的体积分数从 14%增加到 93%。合金的微观结构从典型的树枝状结构演变为细小的等轴晶粒。合金的硬度从 366 HV 增加到 518 HV。当 BCC 相的体积分数小于 80%时，合金的抗拉强度从 815 MPa 增加到 1092 MPa。然而，当 BCC 相的体积分数大于 80%时，晶界处的塑性应变不协调，导致合金的过早断裂，从而降低了合金的拉伸强度。

D03-P24**Self-supporting high-entropy alloy electrocatalysts with tunable hierarchical nanoporosity for high-efficiency water splitting**

Qiqin Zhang, Rui Li*

Northwestern Polytechnical University

Nanoporous high-entropy alloys (HEAs) have recently emerged as promising candidates for water-splitting electrocatalysts due to their controllable porous construction and the synergistic effects of multicomponent chemicals. In this study, free-standing FeCoNiCrZr_x HEAs with various hierarchically nanoporous structures are fabricated by physical metallurgy and dealloying. Towards alkaline OER, the HEA-based catalysts show the lowest overpotentials of 221, 264, and 367 mV to achieve current densities of 10, 100, and 1000 mA cm⁻², respectively, smallest Tafel slope of 35.1 mV dec⁻¹, and excellent long-term stability for more than 1400 h at 1 A cm⁻², outperforming many recently reported state-of-the-art nanostructured alloy catalysts. The superior catalytic activity is mainly attributed to the secondary mesoporous structure which provides abundant reactive sites and the exceptional intrinsic reactivity originating from the synergistic electronic effects of the multiple components in alloying. Moreover, the stable monolithic nanoporous framework of the catalyst can effectively support the catalytically high-entropy oxides formed on the surface during OER, preventing them from rapidly dissolving under large current densities. This work provides a facile and scalable method for developing self-supporting, low-cost, and high-performance HEA-based porous catalysts for practical applications in energy conversion technologies and beyond.

D03-P25**Ni-Co-Cr 体系中熵合金的中温区变形机制研究**

马瑞旗、仝阳*

烟台大学精准材料高等研究院

高温合金普遍存在中温区塑性急剧降低的现象，这一有害行为制约了其加工成形条件和应用范围。为深入理解成分对中温区塑性的影响，利用电子背散射衍射、同步辐射 X 射线衍射和透射电子显微镜表征手段，本研究系统探究了高温合金基底 Ni-Co-Cr 体系合金在中温区（760℃）的变形行为、组织演变和变形微观机理。拉伸测试结果表明，提高 Co 和 Cr 含量可有效提高屈服强度和抗拉强度，并增强加工硬化能力，但降低塑性。组织分析显示 Co 和 Cr 含量的变化对再结晶行为有重要影响，这与中温区裂纹的形成紧密相连。本研究将进一步分析和讨论成分对变形机制的影响。

D03-P26**A Nanostructured TiZrNbTaMo High-entropy Alloy with Exceptional Corrosion Properties for Biomedical Application**

Man-Zhen Lin, Xuan Xiao, Chen-Hao Xu, Wei-Bing Liao*

Shenzhen University

A simple body-center cubic TiZrNbTaMo high-entropy alloy with amounts of nanocrystals was synthesized via magnetron sputtering, and its corrosion properties were studied in phosphate buffer solution at 37 °C. It was found that this nanostructured TiZrNbTaMo HEA showed a much lower corrosion current density ($\sim 0.017 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) as compared with the traditional Ti6Al4V alloy. The exceptional corrosion properties of this alloy were ascribed to the synergistic effects of multiple elements, nanocrystalline structure, and a stable surface passive film formation. Meanwhile, the elastic modulus and hardness of TiZrNbTaMo HEA is higher than Ti6Al4V alloy, which is expected to provide more excellent wear resistance.

D03-P27

高饱和磁感 FeCoSiBPCu 纳米晶合金设计制备与软磁机制研究

李磊*、范星都

东南大学材料科学与工程学院

开发高性能纳米晶软磁合金是我国电力电子工业节能减排迫切需求。然而，现有高性能纳米晶合金研究始终未能突破苛刻热处理工艺瓶颈，严重制约其实际应用。本文以前期探索发现的具有极宽晶化窗口 $\text{Fe}_{81.3}\text{Si}_4\text{B}_8\text{P}_5\text{Cu}_{1.7}$ 合金为基础，通过 Co 元素微合金化，制备出 $\text{Fe}_{81.3-x}\text{Co}_x\text{Si}_4\text{B}_8\text{P}_5\text{Cu}_{1.7}$ 系列纳米晶合金。系统研究了纵向磁场热处理作用下该纳米晶合金软磁性能变化规律，通过微观结构、磁畴结构观测，探索磁晶各向异性、感生各向异性对其软磁性能影响。研究发现，Co 元素添加能有效提高合金的热稳定性、居里温度与饱和磁感应强度。经纵向磁场热处理后，合金的软磁性能随微观结构变化呈现出异常行为，无 Co 及低 Co 元素含量的纳米晶合金具有更均匀细小纳米晶结构，却同时表现出高矫顽力与高有效磁导率。而高 Co 元素含量的纳米晶合金晶粒尺寸较大，却呈现出低矫顽力与极低有效磁导率。通过磁畴结构观测与磁化过程研究发现，经磁场热处理后合金的软磁机制由两种各向异性共同主导，即有效磁导率由平均磁晶各向异性决定，而矫顽力与相对磁导率则主要取决于感生各向异性。成功设计制备出综合软磁性能优异的 $\text{Fe}_{66.3}\text{Co}_{15}\text{Si}_4\text{B}_8\text{P}_5\text{Cu}_{1.7}$ 纳米晶合金，饱和磁感达 1.84 T，矫顽力低至 4-5 A/m，磁导率达 41300，1.0T/1kHz、0.5T/20kHz 条件下的损耗分别仅为 200、209 J/m³。研究结果对开发兼具高饱和磁感与可控软磁性能的纳米晶合金具有重要指导意义。

D03-P28

基于符号机器学习的多主元合金局域结构特征与屈服强度关联研究

王冉星、仝阳*

烟台大学

由于不同组元的原子尺寸和化学性质差异较大，多主元合金具有较大的局域晶格畸变和复杂的局域电荷转移，进而对固溶强化产生关键影响。但多主元合金的固溶强化与局域本征属性之间的定量关系尚存在争论。本研究选取多种面心立方单相多主元合金作为研究对象，通过局域结构测量、电负性差异计算、和符号机器学习算法，系统研究了其局域本征属性和屈服强度之间的量化关系。首先采用同步辐射 X 射线粉末衍射，表征了原子的振动因子 (U_{iso}) 和局域晶格应变 (ϵ)；随后，通过计算得到电负性错配参数；最后，在此数据基础上，利用符号回归机器学习算法，找出归一化屈服强度与上述本征属性之间的定量关系。数据分析发现和 U_{iso} 与归一化屈服强度之间具有强线性相关性，而 U_{iso} 与 ϵ 之间也具有强线性关联。利用发现的关系，设计了一种高归一化屈服强度的合金，实验结果验证了机器学习模型的预测准确性。这一结果对于快速筛选出符合强度设计要求的多主元合金具有重要指导意义，为合金的精准设计提供了新思路。

D03-P29

TiZr 系高熵合金氧间隙占位研究

周婷婷、王琦*、帅茂兵

中国工程物理研究院材料研究所

在材料科学领域，传统上认为材料的强度与塑性往往难以兼得。然而，近年来研究显示，通过在 TiZr 系高熵合金中掺杂不同浓度的氧原子，不仅可显著提高合金的强度，还能改善其塑性。获得此类优异力学性能的原因与氧原子的间隙占位及其固溶强化作用密不可分。然而，氧原子在 TiZr 系高熵合金中的占位倾向性尚不明确，难以揭示其与局域原子信息的依赖性并实现定量预测。为此，本文以 TiZr 系体心立方(BCC)高熵合金体系为研究对象，通过高通量第一性原理计算，深入分析了 TiZr 系高熵合金中间隙位氧原子的溶解能分布，构造了涵盖二元至五元合金系统的溶解能数据集。进一步，基于该数据集并对间隙位的局域原子信息构造描述符，建立了一个高精度的机器学习模型，能够准确预测 TiZr 系高熵合金体系在广泛成分空

间中的间隙位氧溶解能。这一成果不仅可定量评估含氧高熵合金中氧原子的占位倾向性，还可用于指导 TiZr 系高熵合金体系的氧掺杂设计，从而为探索优异力学性能的含氧高熵合金提供理论依据。

D03-P30

大塑性软磁高熵合金纤维

马严¹、黎嘉威¹、杨卫明^{*2}

1. 中科院宁波材料所
2. 中国矿业大学

软磁纤维在电子设备内的能量转换、传输和存储过程中发挥着至关重要的作用。然而，传统的软磁材料具有较差的延展性，因此难以承受长期的拉伸、扭转和剪切载荷的作用。高体积分数的晶界可以提高传统软磁材料的塑性变形能力，但会降低矫顽力。这严重限制了其在柔性电子器件中的应用。在这里，我们提出了一种克服这一困境的策略，该策略是通过简单的内圆水纺丝法，获得具有低晶格失配度的有序共格纳米晶的粗晶 $\text{Fe}_{34}\text{Co}_{29}\text{Ni}_{29}\text{Al}_3\text{Ta}_3\text{Si}_2$ 高熵合金纤维。具有微米级别直径的软磁高熵合金纤维在 23 % 伸长率下具有 674 MPa 的拉伸强度、8.1 Oe 的低矫顽力、116 emu/g 的中等饱和磁化强度和 770 K 的高居里温度。

D03-P31

Al-Ti-V-Cr(-Nb)系高熵合金的组织结构和耐腐蚀性能研究

米芮、廖振龙、李柔珊、逢淑杰*、张涛
北京航空航天大学材料科学与工程学院

Al-Ti-V-Cr(-Nb)系高熵合金具有低密度、良好的高温力学性能和抗高温氧化性能等特点，具有应用潜力。腐蚀行为是影响金属材料长期服役可靠性的因素之一，本工作研究了 Nb 和 Cr 元素的相对含量对 Al-Ti-V-Cr-Nb 高熵合金的组织结构和腐蚀行为的影响。研究表明，Al-Ti-V-Cr(-Nb)高熵合金具有 B2 单相结构，合金晶格畸变程度随 Nb 含量增加而减小。在 3.5mass%NaCl 溶液中，Al-Ti-V-Cr(-Nb)系高熵合金发生自钝化，其中 AlTiVCr 高熵合金在较高的阳极极化电位下发生过钝化溶解，而具有较高 Nb 含量的合金的钝化区高达 2V (vs. SCE) 以上，其具有更低的腐蚀速率。随着合金中 Nb 元素含量增加，合金表面氧化膜的阻抗值和厚度提高，使合金表现出优异的耐腐蚀性能。

D03-P32

Co 替代 Fe 制备具有优异综合性能的新型 Fe-B-P-C-Cu-Co 非晶/纳米晶合金

张文峰、张涛*
北京航空航天大学

Fe 基非晶合金由于其优异的软磁性能，如高有效磁导率、低矫顽磁性和低磁芯损耗，已广泛应用于电子和电气设备领域。然而，与传统硅钢相比，它们的饱和磁化强度(Ms)相对较低。提高非晶合金 Ms 值对于当前电子器件轻质小型化和高功率密度的发展至关重要。对于许多 Fe 基非晶合金体系，铁磁性的提升可以通过部分 Co 取代 Fe 来获得，但过量添加 Co 不利于工业材料成本的降低，并导致矫顽力(Hc)的恶化。因此，有必要通过控制 Co 的添加量在材料成本和性能之间取得平衡。此外，Co 对 Fe 的部分取代对不同合金体系的非晶形成能力(AFA)有不同影响，需要更深入的研究来探索潜在的影响机制。

本文系统研究了 $\text{Fe}_{84.5-x}\text{B}_{12}\text{P}_2\text{C}_1\text{Cu}_{0.5}\text{Co}_x$ ($x=0,4,8$) 合金的非晶形成、热性能、晶化行为、磁性能、电阻率和弯曲韧性。发现 Co 对 Fe 的取代促进了铸态合金从完全非晶结构向非晶/纳米晶双相结构的转变，这与所涉及原子间相互作用的差异有关。合金的 Ms 值随 Co 含量的增加而增加，经热处理可在 $x=8$ 时提高至 1.93 T，但 Co 对 Fe 的过度替代由于预先存在的 $\alpha\text{-Fe}(\text{Co})$ 晶粒而使矫顽力和弯曲韧性恶化。电阻率与组织的无序程度呈正相关， $x=4$ 的铸态合金表现出 $136.2 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ 的高电阻率。因此，退火后的

Fe_{80.5}B₁₂P₂C₁Cu_{0.5}Co₄ 合金具有优异的软磁性能($M_s=1.81$ T, $H_c=7.8$ A/m)和良好的弯曲韧性,并具有较高电阻率,在电子器件领域具有潜在的应用前景。

D03-P33

聚丙烯酰胺对 FeSiBNbCu 纳米晶软磁复合材料软磁性能及温升特性的影响

李笑^{1,2}、董亚强^{*1}、邢立业¹、贾行杰¹、张玲¹、满其奎¹、沈保根¹

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

2. 浙江工业大学

终端应用领域正在推动电感器元件向小型化、高频和低功耗集成化方向发展,降低电感磁芯损耗可以降低电感温升,一定程度上提高器件运行的稳定性。本研究通过化学方法在 FeSiBNbCu 粉末表面制备了一种新型高效的聚丙烯酰胺绝缘层,并研究了丙烯酰胺含量对纳米晶软磁粉芯(NPC)软磁特性的影响。当丙烯酰胺含量为 1.5 wt.%时,在高频(20 mT, 2 MHz)下的最低 $P_{cv}=725.16$ mW/cm³,磁芯的直流偏压性能显著提高。此外,还使用 Comsol Multiphysics 模拟了 NPC 产生的电磁热,并提出了电磁-热耦合模型来模拟感应温升。包覆 PAM 后,磁损耗引起的温升降低到 345.45 K,比包覆前低约 31 K。此外,由于包覆材料引起的温升降低到 368.14 K,降低了 8 K。这些研究表明,通过在磁粉表面制备性能优异的 PAM 包覆层,可以减少高频下的磁损耗,从而降低磁芯的温升。

D03-P34

ZnO 绝缘层对 FeBSiPCNbCu 纳米晶粉芯软磁性能的影响

邢立业^{1,2}、董亚强^{*1}、李笑¹、贾行杰¹、张玲¹、满其奎¹

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

2. 宁波大学

软磁复合材料(SMCs)在现代电子电路中发挥着重要作用。然而,随着应用场景趋于高频化与高功率密度化,如何降低 SMC 的功率损耗仍具有挑战性。在本工作中,采用 FeBSiPCNbCu 纳米晶软磁粉末,以 PVP 作为表面修饰剂,二水醋酸锌作为水解剂,在粉末表面制备出均匀的 ZnO 包覆层,系统研究了二水醋酸锌含量对 FeBSiPCNbCu@ZnO 纳米晶磁粉芯(NMPCs)性能的影响规律。研究发现,在二水醋酸锌含量为 1.75 wt.%时,经 783 K 热处理 1 h 后, NMPCs 性能最优, 20 mT/2 MHz 条件下功率损耗 P_c 低至 698 mW/cm³、有效磁导率达到 45,且直流偏置优异,在 100 Oe 时磁导率保持在初始值的 68.3%。此外, ZnO 绝缘层还有效的改善了 NMPC 的散热性能,这极大的提高了磁粉芯在电子电路的适用性。

D03-P35

纳米析出强化高熵合金中纳米相和晶界偏析的三维原子探针研究

栾军华*、开执中、CT Liu

香港城市大学三维原子探针联合研究实验室

纳米析出强化是提高高熵合金室温和高温力学性能的重要手段,其强化效果与纳米相的尺寸、数量、分布密切相关,从原子尺度深入研究纳米相的形成、长大和粗化机理对科学调控纳米析出组织具有重要的指导意义。三维原子探针(3D APT)是一种具有原子级空间分辨率的测量和分析方法,对分析高熵合金中的元素偏聚、析出相成分以及界面成分非常重要。在本研究中,我们利用 LEAP5000XR 三维原子探针系统表征了 Fe-Co-Ni-Cr-Al-Ti-Nb 等体系的纳米析出组织,发现在晶界和晶内形成两种不同形貌的 L12 纳米析出相,一种是在晶内均匀分布的球状纳米相,其析出机制为连续析出,纳米相富含 Ni、Co、Al、Ti、Nb 等元素;另一种在晶界处呈板条状或柱状纳米相,其析出机制为不连续析出,板条状 L12 纳米相同样富含 Ni、Co、Al、Ti、Nb 等元素,但与晶内的球状纳米相相比,其成分更接近平衡态成分。此外,我们利用

三维原子探针还观测到高熵合金晶界处存在明显的 Nb 元素偏析，该晶界偏析可以抑制晶界 L12 相的不连续析出，促进晶内 L12 相的均匀析出，显著提升了高熵合金的强韧性。

D03-P36

月球环境下金属材料的性能演变和寿命预测

朱瑞松¹、孟森宽¹、郑洪亮¹、高通¹、姜诗豪¹、王文浩¹、张述豪¹、赵梓渊¹、葛璇²、王伟民¹、胡丽娜¹、王峥*¹

1. 山东大学
2. 奥尔堡大学

虽然月球基地已成为近年来的发展重点，但月球表面复杂且极端的环境仍然是月球探测面临的巨大挑战。与地球不同，月球的昼夜温差变化会导致很多材料，尤其是金属材料的性质发生完全不同的演变。在这项研究中，我们利用实验室模拟极长周期的月球温度环境，研究了九种典型高性能金属材料的性能演变。虽然月球化处理能改善所有金属材料的性能，但不同结构的非晶合金和结晶合金的微观机理各不相同。此外，在分析塑性行为的基础上，对月球基地金属材料的使用寿命进行了保守预测，并提出了在各种月球应用场景下的实际材料选择建议。

D03-P37

超声振动对 Fe-Si-B 非晶粉末实现优异染料降解性能的影响

阮嘉艺、袁晨晨*
东南大学

合成染料在我们的日常生活中造成了严重的生态和环境威胁。几十年来，人们努力研究有效且廉价的染料降解方法。超声波振动作为一种新型加工方法，在非晶合金领域得到了广泛的应用。在本文中，采用亚甲基蓝溶液研究超声波振动对 $\text{Fe}_{81}\text{Si}_9\text{B}_{10}$ 非晶合金粉末在类芬顿反应中催化降解能力的影响。经不同超声振动能量处理后的 $\text{Fe}_{81}\text{Si}_9\text{B}_{10}$ 非晶粉末表现出染料降解性能不同程度的提升。其中，最佳样品 $\text{Fe}_{81}\text{Si}_9\text{B}_{10}$ -500J 在 11 分钟内完全降解染料，降解活化能为 40.87011 kJ/mol，降解速率为 0.70291 min^{-1} 。 $\text{Fe}_{81}\text{Si}_9\text{B}_{10}$ -500J 催化剂的优异降解性能归因于其低能垒、强电荷转移和大反应面积。微观分析表明，原电池效应与超声振动诱导结晶导致的体积自由能降低之间存在竞争关系。基于超声波振动，调控非晶/纳米晶的比例以达到非晶合金最佳催化降解性能，这将促进超声振动在非晶合金降解领域的更好应用。

D03-P38

一种通过软件辅助计算探究高熵非晶合金新体系的高通量方法

张玲珑、魏先顺*
同济大学

高通量技术可以实现高效的材料筛选，极大地加速了新型先进材料的开发。由于高熵金属玻璃 (HEMG) 具有非晶合金长程无序的原子结构和高熵合金多主元特性所引起的迟滞扩散效应，因此成为了当前研究的热点材料之一。在本研究中，我们运用软件辅助计算的方法对已有的高熵非晶合金数据进行了总结，并与一些传统高合金参数进行了对比，结果发现高熵合金与高熵非晶的原子尺寸差 ($9 < \delta r < 18.5$) 和晶格畸变度 ($\gamma > 1$) 取值有着显著的差异。根据该参数范围，我们使用三靶磁控共溅射技术成功制备了 W-Ti-FeTaB 高熵非晶梯度成分薄膜。该梯度合金薄膜在复合靶成分区附近呈现出非晶态结构，且在液态铅铋合金的腐蚀试验中表现出了优异的耐腐蚀性能。本研究指出了软件辅助计算在指导用于新型高熵金属玻璃材料开发中的潜在应用，同时也为核反应堆防护涂层材料提供了参考和备选材料。

D03-P39

生物医用 TiZrHfNbCu_x 高熵合金制备与性能研究曾楷^{1,2}、肖猛¹、杨亨勇^{1,2}、唐宇¹、张富祥^{*1}

1. 松山湖材料实验室, 东莞, 523808, 中国
2. 华南理工大学 材料科学与工程学院, 广州, 510640, 中国

摘要: Ti-Zr-Hf-Nb 高熵合金因具有良好的耐腐蚀性能、与骨骼接近的硬度、优异的生物相容性和较低的杨氏模量而备受关注, 但其作为植入材料所面临的感染风险关注度低。本文旨在通过向 Ti-Zr-Hf-Nb-Cu_x (TZHNC, $x=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$) 高熵合金中添加铜元素来得到优异的医用抗菌高熵合金材料。利用真空电弧熔炼分别得到不同含铜量的块体样品, 利用 CCK-8 试剂以及细菌涂板法研究含铜 TZHN 合金对细菌和细胞行为的影响。结果显示, TZHN 合金为 BCC 结构, 添加铜后有富铜相 Cu(Hf, Zr)₂ 析出, 其含量随铜含量增加而增加; 少量添加铜 ($x<0.8$) 的样品促进人体血管内皮细胞的增殖, 但对金黄色葡萄球菌没有抑制能力; 含铜量较高的样品的抗菌性能明显提高, $x=0.8$ 时抗菌率为 84%, $x=1$ 时抗菌率为 98%, 同时也并未产生明显的细胞毒性。因此, 适量添加铜元素 ($0.8<x<1$) 可以获得兼具良好生物相容性和抗菌性的 TZHN 合金。

D03-P40**金属玻璃液体中笼动力学、 β 弛豫与 α 弛豫的等时叠加**任楠楠^{*1}、管鹏飞²、K. L. Ngai³

1. 安徽工业大学
2. 北京计算科学研究中心
3. CNR-IPCF

在玻璃形成体中, 通过保持其弛豫时间 $\tau_a(T, P)$ 不变, 已很好地建立了在不同的温度 T 和压强 P 组合下 α 弛豫的频率色散的叠加 (即等时叠加)。然而, 更快动力学 (包括笼动力学和 β 弛豫) 是否具有同样的特性仍然是一个值得探究的问题。在不同的温度和压强组合下, 我们对两种合金液体在很宽时间范围内的动力学性质进行了分子动力学模拟。通过均方根位移、非高斯参数以及中间散射函数这三种动力学参量与时间的关系, 我们不仅可以观察到 α 弛豫, 还可以通过观察到更快的动力学过程, 包括笼动力学和 β 弛豫。在不同温度和压强状态下, 我们得到了整个时间范围内 $\langle \Delta r^2(t) \rangle$ 、 $\alpha_2(t)$ 和 $F_s(q, t)$ 的等时叠加, 证明该特性不仅适用于 α 弛豫, 而且适用于笼动力学和 β 弛豫。此外, 我们还发现 $\alpha_2(t)$ 的峰值时间 $\tau_{\alpha_2, \max}(T, P)$ 和扩散系数 $D(T, P)$ 都可以通过 ρ^{γ}/T 实现密度标度律。

D03-P41**Ti-V-Zr-Nb-Al 轻质难熔高熵合金的微观组织结构与力学性能研究**杨亨勇^{1,2}、唐宇¹、冯创世¹、肖猛¹、曾楷^{1,2}、张富祥^{*1}

1. 松山湖材料实验室, 东莞, 523808, 中国
2. 华南理工大学 国家金属材料近净成形工程技术研究中心, 广州 510640, 中国

难熔高熵合金因其具有优异的高温力学性能和耐腐蚀性能而受到广泛关注。然而, 室温延展性较低和密度较高等缺点导致其加工成型受限, 影响其在高温领域的应用。本文基于高熵合金相形成规律, 通过电弧熔炼, 轧制和热处理工艺设计出一系列具有单相 BCC 结构的 Ti60(V2Zr3Nb2)40-xAl_x ($x=0, 3, 6, 9$) 轻质难熔合金 (理论密度为 5.1 g/cm³ 至 5.5 g/cm³)。相结构分析表明, Ti60(V2Zr3Nb2)40-xAl_x ($x=0, 3, 6, 9$) 合金体系均为体心立方结构, 随着 Al 含量的增加, 其晶格常数从 3.31 Å 减小到 3.28 Å。室温拉伸实验结果表明, 随着 Al 含量的增加, 其屈服强度呈不断增长的趋势, 但延伸率先增加后降低。值得注意的是, 与 $x=0$ 样品相比, $x=6$ 样品的屈服强度提高 12.3%, 塑性提高 5.9%, 分别为 717 MPa 和 33.5%, 实现了强度和塑性的协同增长。同时, 对其变形机制进行了深入探讨。本研究通过成分设计制备出具有优异加工成型能力的

轻质难熔高熵合金，打破了传统合金中存在的强度-塑性限制，为开发新型轻质高强高加工成型能力的难熔高熵合金提供了一种新思路。

D03-P42

Ni_{2.5}CrFeAl_{0.25}Ti_{0.25} 中熵合金力学行为及其变形机理研究

张佳鑫¹，马胜国^{1,*}，王志华^{1,*}，乔珺威^{1,2}

1 太原理工大学 机械与运载工程学院，山西 太原 030024

2 太原理工大学 材料学院，山西 太原 030024

本研究制备了一种无 Co 非等原子比 Ni_{2.5}CrFeAl_{0.25}Ti_{0.25} 中熵合金，经热机械加工后呈现出由 FCC、L12 和富 Cr 的 BCC 相组成的三级相结构。室温条件下合金表现出了优异的拉伸性能，其屈服强度约为 1.2GPa，抗拉强度约为 1.6GPa，加工硬化率约为 4.5GPa，同时还具有 16.6% 的拉伸塑性。理论计算表明，析出强化对于合金优异的拉伸强度有着显著的贡献。进一步的微观分析表明，三级相结构和层错网的双重作用保证了材料在提升强度的同时还具有良好的应变硬化能力。此外，该合金在低温准静态拉伸中同样表现出了优异的强塑性协同效应，其低温拉伸屈服强度约为 1.4GPa，极限抗拉强度约为 2GPa，同时还具有 21% 左右的拉伸塑性。

D03-P43

通过模具材料调控冷却速率制备的 Zr₅₀Cu₃₄Al₈Ag₈ 非晶合金的形成能力，热稳定性及力学性能

张山¹、韦超²、施志林²、张浩然²、马明臻^{*2}

1. 华北理工大学

2. 燕山大学

本文利用耐热模具钢，紫铜和高纯石墨模具调控非晶合金吸铸过程的冷却能力，制备了直径为 3 mm 的 Zr₅₀Cu₃₄Al₈Ag₈ 非晶合金铸棒。通过 X 射线衍射仪，差示扫描量热仪测试了该合金的非晶态结构，玻璃形成能力及热稳定性。用万能试验机测试了不同模具吸铸的非晶合金的力学性能。用扫描电子显微镜分析了该非晶合金的断裂特征，用透射电子显微镜和高分辨分析了非晶合金的微观结构。由于不同材料模具的吸铸过程的冷却速度不同，对非晶合金的形成能力，热稳定性和力学性能有重要影响。实验结果表明，紫铜模具吸铸试样的玻璃形成能力较高。高纯石墨模具吸铸所获非晶合金的玻璃转变和晶化过程的激活能均最大，分别为 525.8 和 334.0 kJ/mol，显示了较好的热稳定性；同时，此非晶合金的断裂强度 1888.2 MPa，应变达 3.55%，综合力学性能较好。随冷却速率的降低，高纯石墨模具吸铸的非晶合金内部自由体积的含量减少，并且有有序结构产生，是其热稳定性和塑性变形能力较高的主要原因。

D03-P44

FeSiBCr_x 非晶合金的微波响应和耐蚀性能研究

谢亚杰^{1,2}、庄学恒¹、潘丽宁¹、宁明强¹、满其奎^{*1,2}、沈保根¹

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

2. 浙江工业大学

随着通讯技术的高速发展，工业设备和海洋军事等复杂极端环境对 5G 设备的防腐性能和吸波性能提出了迫切需求。本文采用感应熔融技术结合气体雾化方法，在氩气环境下制备了不同 Cr 含量的非晶态磁损耗 FeSiBCr_x (x=0、1、1.3 和 2.2 at%) 微波吸收体。在 3.4 mm 厚度下，FeSiBCr_x (x=1.3) 吸收体的反射损耗 (RL) 达到 -58 dB。并在 1.7 mm 厚度时，有效吸收带宽 (EAB: RL < -10 dB) 约为 8.25 GHz，覆盖了 X 和 Ku 波段。同时，FeSiBCr_x 吸收体具有优异的防腐性能，腐蚀电流密度 I_{corr} 低 (10^{-6} A cm⁻²)，极化电阻 R_p 高 (10^4 - 10^5 Ω)。随着 Cr 含量的增加，防腐性能逐渐增强。在中性盐溶液中连续腐蚀 720

小时后, $\text{FeSiBCCr}_{1.3}$ 仍能保持稳定的微波吸收性能。此外, $\text{FeSiBCCr}_{1.3}$ 微波吸收涂层还表现出优异的双功能性能, 并且在连续盐雾试验后, 其表面形态和微波吸收性能的变化极小。这项研究为设计和制造适用于恶劣环境的高效多功能微波吸收材料提供了一条合理的途径。

D03-P45

基于非晶软磁材料的频率选择表面设计与吸波应用研究

何笑^{1,2}、庄学恒¹、潘丽宁¹、满其奎^{*1,2}、沈保根¹

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

2. 中国科学技术大学

随着科技的进步, 电磁辐射的强度和频率不断升高, 对人类和设备的影响日益凸显。传统吸波材料需较厚的吸收层实现高效吸波, 且通常难以对特定频率电磁波吸收。频率选择表面吸波材料相对较轻且有优良频率选择性和热稳定性。基于非晶软磁材料作为频率选择表面的吸波材料, 具有高强度、轻质、柔韧性和可塑性等特性。本文通过单辊法制备 CoFeNiBSiCr 非晶软磁条带, 通过调控 Cr 元素含量优化其非晶形成能力及磁性能, 从而制备低频吸波性能优异的传统吸波材料与非晶条带频率选择表面复合材料。通过电磁仿真结果调整频率选择表面的图案尺寸(数据), 非晶软磁条带频率选择表面复合材料的有效吸收带宽($\text{RL} < -10 \text{ dB}$)由 3.0 GHz 提升至 9.0 GHz, 在 5.0 GHz 处可实现 -41.5 dB 的电磁吸收性能。这意味着可在仅调整频率选择表面材料二维图案的情况下实现电磁波的吸收强度与频宽的有效调控, 有利于减小传统吸波材料的厚度, 这为研究薄层宽频的吸波复合材料提供了新的研究思路。

D03-P46

液液相变对 $\text{Cu}_{46}\text{Zr}_{46}\text{Al}_8$ 金属玻璃力学性能的影响

石飞龙、丁奕钧、李阳阳、王峥、胡丽娜*

山东大学

金属玻璃(MG)的应用日益广泛, 对其液体的精确调节提出了更高的要求。在玻璃形成液体中经常观察到液-液相变(LLPT)现象, 其对玻璃力学性能的影响有待进一步研究。在这项工作中, 我们发现低于 LLPT 温度淬火的金属玻璃的弹性模量比高于 LLPT 温度淬火的金属玻璃的弹性模量增加了 12%, 变形过程中激活的剪切带数量增加了 40%。通过透射电镜和分子动力学模拟, 我们发现低于 LLPT 温度淬火的金属玻璃中形成具有良好塑性的 CuZr_2 纳米晶体, 有利于变形过程中产生大量剪切带, 从而增强了试样的塑性。相反, 在高于 LLPT 温度淬火的金属玻璃中形成脆性 AlCu 纳米晶, 阻碍了剪切带的形成, 导致局部应力集中的形成。该研究不仅加深了对金属玻璃制备过程中凝固过程的理解, 而且为从液态调节金属玻璃的力学性能提供了新的思路。

D03-P47

Mechanism of Zr-based metallic glasses at cryogenic temperature

Chunyan Li^{*1,2,3}, Tianyu Chen², Shunping Wang²

1. Lanzhou University of Technology

2. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu 730050;

3. Wenzhou Engineering Institute of Pump & Valve, Lanzhou University of Technology, Wenzhou Zhejiang 325105)

Traditional crystalline materials tend to become brittle at cryogenic temperatures, making it a great challenge for developing cryogenic engineering. To address this issue, this study investigates the mechanism of $\text{Zr}_{0.6336}\text{Cu}_{0.1452}\text{Ni}_{0.1012}\text{Al}_{0.12}\text{TM}_3$ (at. %) bulk amorphous alloy at 77K、177K and 298K which were fabricated by cooper mold suction casting method. Meanwhile, the deformation behavior of $\text{Zr}_{0.6336}\text{Cu}_{0.1452}\text{Ni}_{0.1012}\text{Al}_{0.12}$

amorphous alloy model was simulated at ambient temperature(300K) and low temperatures(250K,200K,150K,100K,50K,20K) through Molecular dynamics simulation. The experimental results show that when strain rate is $1 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$, with the decreasing of temperature, the plastic strain and compressive strength of bulk amorphous alloy increases gradually, the plastic strain reach 13.7% at 77K. The simulation results were in accord with the experiment, the amorphous alloy keep plastic at low temperature, and the tensile strength and plastic strain increased with decreasing temperature. With Open Visualization Tool (ovito), it showed that the activation of strain of first shear transformation zones (Stz's) is limited at low temperatures. The unique amorphous model result in unique structural evolution model. This paper attempts to explain the unique low-temperature properties of Zr-based amorphous alloys in the hope that it will provide a reference for following work.

D03-P48

Ir-Ni-Ta 合金抗腐蚀性的组合研究

胡立威^{1,2}、李明星²、王刚¹、柳延辉*²

1. 上海大学

2. 中国科学院物理研究所

金属玻璃通常被认为具有出色的抗腐蚀性能。然而，化学成分和非晶结构各自的作用尚不明确。在本研究中，我们选取 Ir-Ni-Ta 合金体系作为研究对象，采用组合制备和高通量表征技术来探索合金成分与腐蚀电流密度以及腐蚀电位之间的相关性。结果显示，腐蚀电流密度与金属-金属键强度及金属-氧键强度之间存在显著的相关性，这表明 Ir-Ni-Ta 金属玻璃的腐蚀过程主要由化学成分控制。尽管如此，非晶结构能够促进更致密的钝化膜的形成，对于本身就具有抗腐蚀性的合金而言，这一特性可额外增强其抗腐蚀能力。这些发现将有助于设计出抗腐蚀性能更加卓越的金属玻璃。

D03-P49

基于亚稳工程对 TiZrHfTax 高熵合金准静态与动态力学性能研究

汪晓弟*

大连理工大学

基于亚稳工程调控思路，研究了 TiZrHfTax 高熵合金在准静态与动态加载后的力学行为与微观组织演变。研究结果显示，在铸态条件下，合金发生了明显的相分离。随着钽(Ta)含量的增加，密排六方(HCP)相的比例明显减少。此外，动态压缩实验表明，该合金展现出显著的正应变速率敏感性以及应变率增塑效应。这些发现为高熵合金在复杂载荷加载下微观结构的调控提供了新的理论与实验依据。

D03-P50

Pd-Ni-P 非晶合金过冷液相区中的异常强化行为

曹一欢、刘雄军、吕昭平*

北京科技大学

非晶合金在过冷液相区内粘度急剧降低，从而在形变时表现出典型的粘流行为：应变软化和超塑性。在本报告中，我们报道了 Pd-Ni-P 非晶合金在过冷液相区的异常流变行为，其特点是显著的强化行为和良好的塑性。通过高分辨透射电子显微镜结合同步辐射 X 射线衍射等技术证实了这种反常的流变行为是变形过程中中程尺度的结构有序化导致的，并且强化效果还与温度和应变速率强烈相关。这种异常的高温流变行为丰富了非晶合金的变形特征，也为金属玻璃加工图增添了新的加工硬化区域。

D03-P51

通过高温固溶氮化强化 TaNbHfZr 高熵合金的耐磨和耐蚀性能田震¹、梁弼宁¹、彭祥阳²、张晓宾¹、吴渊*¹、吕昭平¹

1. 北京科技大学
2. 中广核研究院

长期以来,表面硬度和耐磨性的不足一直是阻碍高熵合金(HEAs)实际应用的巨大挑战。近年来,高熵合金氮化物 (HEAN) 层的出现成为解决这一问题的新方法。本文通过高温固溶氮化工艺制备了 (Ta₂NbHfZr)₂N HEAN 层,并研究了不同氮化持续时间对其组织、力学性能、磨损行为和耐腐蚀性的影响。采用 X 射线衍射(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)、电子探针显微分析仪(EPMA)和透射电子显微镜(TEM)对它们的微观结构和成分进行分析。研究发现,氮化层主要由 BCC 相、FCC 相(HfN、ZrN)、HCP 相(TaN、ZrN、Nb₂N)和 TaN 相组成。通过纳米压痕进行的力学评估表明,氮化层的硬度和弹性模量均显著提高。其中,氮化层最大硬度为 21.2 GPa,弹性模量为 297.6 GPa, H³/E² 比值最高,为 0.244 GPa。在耐腐蚀性方面,固溶氮化高熵合金对点蚀电位有相当大的改善。与未经处理的高熵合金相比,我们的研究表明固溶氮化是实现高熵合金表面改性有效且简单的方法,对其硬度、耐磨性和耐腐蚀性等性能均具有明显的提升。

D03-P52**Zr 基非晶中的一种异常相变**

张英杰、吴渊*、吕昭平

北京科技大学

Zr 基非晶合金由于具有高的非晶形成能力、优异的力学性能和抗腐蚀性,引起了广泛的关注。本课题组在 Zr 基非晶合金的研究工作中发现,少量 Fe 的加入不仅可以改善合金的塑性,还可以促发一种异常的相变行为。表现为 DSC 曲线过冷液相区异常放热鼓包,以及相应温度处合金热膨胀率的反常增大和同步辐射半高宽的反常增加。不同温度退火实验表明,相变后的合金仍处于非晶态,并保留了铸态时的压缩塑性。本工作不仅揭示了 Zr 基非晶中的一种异常相变行为,并且开发了一种具有退火稳定性的非晶合金,对 Zr 基非晶的应用具有重要的意义。

D03-P53**高熵 MAX 相的设计与变形行为研究**吴子娇¹、朱翔宇²、吴渊¹、Moon J. Kim²、吕昭平*¹

1. 北京科技大学
2. University of Texas at Dallas

MAX 相是一种新兴材料,具有独特的金属和陶瓷性能组合,具有作为高温元件的巨大潜力。然而,由于它们缺乏塑性变形能力和低的强度(特别是在高温下)导致其力学性能不理想,这限制了它们的潜在应用。在这项研究中,我们应用从金属领域学到的高熵概念,将局部化学成分波动(LCF)引入 MAX 相的原子堆积层中。在模型 Ti₂AlC 中,用 Zr、Nb 和 Ta 取代了 Ti,在保留其晶格结构的同时,成功开发了高熵 MAX 相。在这个新的 MAX 相中,增强的 LCF 产生了强大的晶格应变,增加了对位错滑移的抵抗力,所以即使在 1473 K 下也导致了超过 500 MPa 的高抗压屈服强度。此外,LCFs 在变形过程中刺激了位错发生交叉滑移和层错的生成,有效缓解了应变局域化,促进了均匀变形,最终增强了室温和高温下的塑性。我们的工作不仅阐明了 MAX 相的变形机理的理解,而且还为改善其力学性能提供了一条有价值的途径,使它们有希望作为下一代轻质耐高温材料。

D03-P54**超音速火焰喷涂工艺对非晶涂层结构与力学性能的影响**

黄帅帅、杜清、李紫怡、王辉、吴渊、吕昭平、刘雄军*
北京科技大学

铁基非晶合金因其具有高强度、高硬度以及良好的耐磨性和耐腐蚀性，在能源和化工领域显示出巨大的防护潜力。在各种涂层制备方法中，超音速火焰喷涂(HVOF)因其高冷却速率和灵活的工艺可调节性被用于非晶涂层的制备。高压喷涂过程中的喷涂条件，特别是喷涂枪管的长度，对涂层的物相和结构有重要影响。本研究通过调节喷涂枪管的长度，制备了三种 Fe_{50.5}Cr₁₉Mo₉Si₁C_{12.5}B₈ 非晶态涂层。通过 XRD、DSC、SEM 等表征手段，考察涂层微观结构、相分布及热稳定性的差异。涂层的结合强度和硬度与涂层的孔隙率和碳化物含量有关，而涂层的孔隙率和碳化物含量与涂层的过热过程有关。该研究为铁基非晶涂层的制备控制提供了指导。

D03-P55

氧微合金化提升 Zr-Cu 金属玻璃的玻璃形成能力和塑性

王瑾玥¹、刘雄军*¹、吴渊¹、王辉¹、马东²、吕昭平¹

1. 北京科技大学新金属材料国家重点实验室
2. 东莞松山湖材料实验室中子科学中心

金属玻璃(MG)中更好的玻璃形成能力(GFA)通常对应更脆的力学行为，存在着玻璃形成能力和塑性之间的权衡。但最近有实验表明，通过向 Zr-Cu 基 MG (以前被认为是有害元素)中添加少量氧，可以同时增强 GFA 和塑性。在本工作中，我们利用分子动力学(MD)模拟，揭示了均匀分布的氧中心团簇(OCC)在液态和玻璃态下结构致密且能量稳定，是 GFA 和塑性同时增强的原因。OCC 促进过冷液体中的结构和动力学异质性，从而增加 Zr-Cu 非晶合金的 GFA。与此同时，致密的 OCC 团簇与周围的疏松环境相互作用，增大结构不均匀性，促进剪切转变区的形成，从而增强塑性变形能力。这项工作不仅加深了对 MG 玻璃形成和变形行为的机理解，而且对于利用低成本含氧原材料开发 MG 具有重要意义。

D03-P56

CrCoNi 中熵合金的原子尺度摩擦行为：短程有序和非公度界面效应

李雯玥、张杰、Shigenobu Ogata、高磊、刘雄军*、吕昭平

北京科技大学

摩擦对机械的效率和寿命有重要影响，为解决这一问题，结构超滑利用晶体界面中的非公度接触来最大限度地减少摩擦，已经成为一种有效的润滑方法。然而，这一概念能否推广到多主元合金仍不确定。在本研究中，我们通过分子动力学(MD)模拟全面研究 CrCoNi 摩擦对的摩擦行为，考虑三个不同的扭转角(0°、2.5°、30°)和化学短程有序的影响。研究表明，当滑动界面从 0°扭转到 2.5°时，摩擦力显著降低至少一个数量级，这种降低归因于系统内位错的连续滑移。值得注意的是，我们发现较大的 30°扭转角可以消除位错，从而使摩擦力进一步降低到超低摩擦状态。具体而言，由于所形成的非公度界面之间的连续滑动，随机固溶体(RSS)和短程有序(SRO)样品的摩擦系数分别为 0.0041 和 0.003，证明了这种方法的有效性。此外，RSS、SRO 和纯 Ni 的比较分析阐明了在 2.5°扭转角时，位错弯曲对 CrCoNi 中熵合金摩擦力的降低起到关键作用。这些发现为非公度界面和 SRO 对中熵合金摩擦行为的影响提供了有价值的信息，证明了结构超滑对降低机械系统摩擦的重要意义。

D03-P57

退火处理改善 FePC 非晶合金的磁性和降解性能

齐志港、王伟民*

山东大学

采用单辊甩带法制备了 $\text{Fe}_{80}\text{P}_x\text{C}_{20-x}$ ($4.5 \leq x \leq 6.5$) 非晶合金条带。用各种方法研究了非晶合金带和退火带的磁性和对罗丹明 B 染料的降解性能。在现有合金中, 提高 P 含量可以抑制初晶 $\alpha\text{-Fe}$ 和石墨相的析出, 并促进铸锭和退火带中共晶 $\alpha\text{-Fe} + \text{Fe}_3\text{C} + \text{Fe}_3\text{P}$ 相的形成。对于 $\text{Fe}_{80}\text{P}_{4.5}\text{C}_{15.5}$ 合金带, 随着退火温度的升高, 条带的 $\alpha\text{-Fe}$ 晶粒尺寸增大。对于 $\text{Fe}_{80}\text{P}_{6.5}\text{C}_{14.5}$ 合金带, 随着退火温度的提高, $\alpha\text{-Fe}$ 晶粒的尺寸先变大后变小。条带的降解性能和可重复使用性表现出类似的“退火”依赖性行为, 这可以通过原电池的尺寸效应来解释。同时, 条带的饱和磁化率 B_s 和矫顽力 H_c 随着退火温度的增加而增加, 反应速率常数 k 对 $\ln(B_s \cdot H_c)$ 呈近似线性变化。

D03-P58

TiZrNbHf 难熔高熵合金组织与力学性能的研究

梁世龙、王永欣*

西北工业大学

难熔高熵合金 (RHEAs) 由于其优异的力学性能和高温结构稳定性而受到材料界的广泛关注, 在工业上有着广阔的应用前景。然而, RHEAs 虽然具有许多优点, 但其主要缺点之一是大多数 RHEAs 的塑性和加工性能较差。因此, 迫切需要研制出强度高、冷加工性能好的新型 RHEAs。本文制备了 TiZrNbHf 合金, 通过实验和密度泛函理论 (DFT) 计算研究了该合金的微观结构、力学性能、相稳定性、晶格畸变和基本物理性能。结果表明, TiZrNbHf 合金具有良好的冷轧成形性能, 室温下的压下率大于 80%, 无裂纹产生, 退火后的拉伸伸长率大于 27%, 在宏观断裂表面周围观察到作为延性断裂的典型特征的颈缩。此外, 合金的拉伸屈服强度从退火状态的 667MPa 增加到 80% 冷轧状态的 1116MPa, 显示出加工硬化行为。X 射线衍射 (XRD) 结果表明铸态 TiZrNbHf 合金具有单一的 BCC 固溶体结构, 且在轧制和退火过程中没有发生相结构的转变, 具有良好的相稳定性。并通过固溶强化理论和 DFT 计算了其原子尺寸错配、力学模量错配和晶格畸变对 TiZrNbHf 合金力学性能的影响。在计算 TiZrNbHf 合金晶格畸变时, 研究了未畸变与畸变模型不同原子对第一近邻距离的大小变化, 结果表明 Zr 和 Hf 元素对合金的固溶强化和晶格畸变起着关键作用。为了直观地显示 TiZrNbHf 合金的各向异性, 绘制了杨氏模量 (E)、最大剪切模量 ($G_{\max}$) 和最小剪切模量 ($G_{\min}$) 的三维分布图。结果表明 TiZrNbHf 合金的杨氏模量的最大值和最小值分别位于 $\langle 111 \rangle$ 和 $\langle 100 \rangle$ 方向, 最大剪切模量和在最小剪切模量 $\langle 110 \rangle$ 方向表现出较大差异, 表明 $\{110\}$ 晶面在剪切变形中具有显著的各向异性。本工作有助于理解 TiZrNbHf 合金的材料性能, 对 TiZrNbHf 合金的工业开发和应用提供了重要的数据和参考, 也为新型韧性 RHEAs 的设计提供了指导。

仅发表论文

D03-PO01

Microstructure evolution and mechanical properties of FeNiV medium entropy alloy by adding Al

Chuangshi Feng, Shuai Nan, Hongquan Song, Zhou Guan, Hengyong Yang, Yu Tang, Meng Xiao, Fuxiang Zhang*

Songshan Lake Materials Laboratory

Revealing the influence of microalloying on the evolution of the microstructures and mechanical characteristics, and thereby obtaining alloys with superior strength and ductility, holds significant importance in engineering applications. In this work, a series of as-cast FeNiVAl_x (values of x is 0, 0.1, 0.2, 0.3) MEAs were fabricated by arc vacuum melting, and the evolution of microstructure and mechanical properties were investigated systematically. The phase analysis showed that the microstructure of the FeNiVAl_x medium-entropy alloy transformation from FCC (γ ; 46.4%; phase content) + sigma phase (53.6%) in FeNiV to a single BCC phase in FeNiVAl_{0.3} with the increase of Al molar ratio. With the increase of the Al contents, the mechanical properties of alloys exhibit a decrease in strength, but an remarkable increase in elongation. Specifically, the FeNiV alloy shows a highest yield strength of 1851 MPa with the ductility of 7.8%, and FeNiVAl_{0.2} alloy shows the best comprehensive compressive properties: high yield strength of 1255 MPa and ductility over 50% without fracturing. In addition, the formation of the phase structures, compositions and the deformation mechanisms of the alloys were also investigated. The elimination of the harmful sigma phase, coupled with the formation of BCC phase, contribute to the observed decrement in strength and increment in ductility. This study elucidates the intrinsic relationship between microstructures and mechanical properties with Al contents in FeNiVAl_x alloys, offering insights for the design of MEAs with high strength and excellent ductility through microalloying.

D03-PO02

FePCB 系非晶合金的制备与研究

王浩、张涛*

北京航空航天大学

具备高饱和磁感应强度、低矫顽力和高磁导率的 Fe 基非晶合金，满足了软磁材料的理想磁特性，在高度电气化、高电力转换效率的现代社会中具有巨大的应用潜力。与传统硅钢材料相比，Fe 基非晶软磁合金具有显著优势，包括矫顽力远低于硅钢，且在高频下损耗低，因此是未来高频高效电机发展中最具潜力的材料之一。然而，较低的饱和磁感应强度限制了 Fe 基非晶软磁合金在设备小型化和高能量密度器件中的应用。因此，研究 Fe-P-C-B 系合金的非晶结构形成规律以及类金属元素对性能的影响，对于开发兼具良好形成能力和优异软磁性能的非晶合金成分，具有重要意义。

本研究以 Fe-C-P-B 系非晶合金为基础，通过 CALPHAD 热力学计算结合数据归纳，总结出 Fe-P-C-B 系合金可形成非晶结构的成分规律，总结了类金属元素 P、C 和 B 元素三者的原子配比对 Fe-P-C-B 系非晶合金的非晶形成能力的影响：在高 P 含量成分范围内，非晶形成能力较高；随着 P 含量降低，B/C 原子比的降低会导致非晶形成能力下降。基于总结的规律，设计了六种不同原子配比的 $\text{Fe}_{86}\text{P}_x\text{C}_y\text{B}_z$ 非晶合金成分，用于探究 P、C 和 B 三种元素不同配比对其形成能力、热学性能及软磁性能的影响。其中， $\text{Fe}_{86}\text{P}_5\text{C}_3\text{B}_6$ 非晶合金表现出最佳软磁性能，其淬态下的饱和磁感应强度 B_s 为 1.78 T，矫顽力 H_c 为 11.1 A/m；在 T_{X1} -80 K 的条件下退火 10 min 后的饱和磁感应强度 B_s 上升至 1.79 T，矫顽力 H_c 下降至 4.5 A/m，且具有良好的弯曲韧性。本研究对于开发兼具良好形成能力和优异软磁性能的非晶合金成分，及推广 Fe 基非晶合金在软磁材料领域的实际生产应用具有重要意义。

D03-PO03

Unravel the spinodal decomposition kinetics in (FeCoCrNi)₈₅(AlCu)₁₅ alloy through small-angle neutron

scatteringShunfu Xie^{1,2}, Yubin Ke^{*2,3}, Weiwen Zhang¹

1. South China University of Technology

2. Spallation Neutron Source Science Center

3. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences

High entropy alloys (HEAs) constituted of single solid solution phase, but remains chemical inhomogeneity in nature due to its multi-principal composition. Currently, existence of nanoscale spinodal decomposition (SD) phase in matrix was found to have significant impact on the properties of HEAs. Nevertheless, the morphology evolution and the kinetics of SD is not clear, which hinders in-depth understanding of the structure-property relationship. In this study, we examine the spinodal structures in (FeCoCrNi)₈₅(AlCu)₁₅ HEAs at different states using in-situ small-angle neutron scattering (SANS), in conjunction with transmission electron microscopy (TEM) technique. The result demonstrates that SD occurred when aging the HEA samples at temperatures ranging from 500 to 800°C, which leads to the phase constitution of NiAlCu-rich and FeCoCr-rich spinodal phases, L12 ordered phases, and FCC matrix. The characteristic wavelength of SD (λ_{SD}) grows from 5.31 nm to 51.26 nm when aging temperature rises from 500°C to 800°C, which explains the enhancement of the alloy's microhardness. The SD kinetics was unraveled by fitting the time-dependent through in-situ SANS measurement at 700°C. During isothermal treatment at 700°C, the λ_{SD} increases from 10.42 nm to 17.43 nm with prolonged time, and SD is in the late stage from the exponential trend of the λ_{SD} over time. Moreover, comparing with aging temperature, the aging time has a relatively minor impact on the coarsening of SD.

D03-PO04**新型高温合金“高温高熵合金”**

陈强*

北京科技大学 新金属材料国家重点实验室

传统高温合金是指以铁、镍、钴为基，能在 600°C 以上的高温及一定应力作用下长期工作的一类金属材料，并具有较高的的高温强度，良好的抗氧化和抗腐蚀性能，良好的疲劳性能、断裂韧性等综合性能。镍基合金是高温合金中应用最广、高温强度最高的一类合金之一，在 650~1000°C 范围内具有较高的强度和良好的抗氧化性、抗燃气腐蚀能力。通过添加难熔合金元素来改善镍基合金的高温性能似乎达到了其极限水平，因此开发新型高温合金具有重要的意义。高熵合金具有显著的四大效应，其热稳定性好，可以通过成分设计在一定范围内满足高温使用要求，可成为非常有潜力的新型高温合金。对于高熵合金高温性能的研究越来越多，其中，Cr、Zr、Ti 合金体系具有最优的性能，其密度低、强度高、熔点高，是潜在的高温合金。因此，可以通过成分设计以及调控合金的组织形貌来降低合金密度，提高合金室温性能以及高温强度，从而使得该合金兼具良好的室温与高温性能。