

Symposium D08

Deformation Behavior and Flow Units in Metastable Materials

亚稳材料的形变及流变单元

2017年7月8-12日

分会主席:

张勇	北京科技大学
沈同德	燕山大学
王刚	上海大学
乔珺威	太原理工大学
耿桂宏	北方民族大学
吴海峰	航天特种材料及工艺技术研究所

联系人:

张蔚冉 北京科技大学
电话: 18811389682
邮箱: zhangweiranruth@163.com

D-08. 亚稳材料的形变及流变单元

分会主席：张勇、沈同德、王刚、乔琚威、耿桂宏、吴海峰

D08-01

非晶中的流变单元

汪卫华

中科院物理研究所

D08-02

具有室温塑性的难熔高熵合金的设计

乔琚威

太原理工大学材料科学与工程学院 030024

通过相图计算分析 MoNbTaVTi、MoNbTaV 等几种高熔点高熵合金的热力学稳定性和相形成规律，利用现有的高熵合金相形成规律参数，如混合焓、混合熵、价电子浓度、电负性理论、指标等，初步判断合金的相结构特征。通过真空电弧熔炼炉制备选取成分的合金样品，并通过一系列的微观结构表征和力学性能测试，将实验结果和数值模拟及理论预测相比较，在此基础上构建了预测铸态难熔高熵合金屈服强度的半经验公式，从而可以指导设计性能优异的新型难熔高熵合金材料。

关键词：高熵合金；难熔金属；力学性能

D08-03

金属玻璃中 β 弛豫结构起源的思考

张博

合肥工业大学材料科学与工程学院 非晶态物质科学研究所 230009

金属玻璃处于一种能量亚稳态，故弛豫是金属玻璃的固有属性。 β 弛豫是玻璃态中最主要的弛豫模式，这一弛豫过程对玻璃化转变、塑性变形、原子扩散、晶化和热稳定性等都具有重要影响。但目前对其结构起源知之甚少。

目前对于金属玻璃中 β 弛豫的结构起源众说纷纭，Johari^[1]首先提出了玻璃中的 β 弛豫与玻璃中疏松的局域结构有关，这些疏松的局域结构被看作是玻璃中的结构缺陷。Ichitsubo 等人^[2]推断 β 弛豫可能源于一种微观结构，他们发现金属玻璃微观结构上是非均匀的，包括强键合的区域和弱键合的区域。汪卫华等人^[3-4]认为金属玻璃中遗留了熔体中的类液区域，类液区的原子运动形式被局域在纳米尺度范围内， β 弛豫就对应于非晶固体中没有被完全冻结住的纳米区域的原子平移运动。

金属玻璃中 β 弛豫结构起源与其局域结构的非均匀性密切相关。综合现有的研究工作^[5]，本文提出一些对 β 弛豫结构起源的思考和见解。

1. G. P. Johari, Ann. N.Y. Acad. Sci. 279 (1976) 117-140.
2. T. Ichitsubo, et al., Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 245501.
3. 汪卫华, 物理学进展, 33 (2013) 177-351.
4. H. B. Yu, K. Samwer, W. H. Wang, H. Y. Bai, Nat. Commun. 4 (2013) 2204.
5. Y. Y. Bai, Y. L. Geng, C. M. Jiang, B. Zhang, J. Non-Cryst. Solids 390 (2014) 1-4.

D08-04

非晶合金弛豫行为的激活弛豫方法研究

李茂枝

弛豫是非晶合金中普遍存在的现象，尤其是低温下非晶合金的弛豫非常重要，与非晶合金的形变、稳定性、热学和动力学性质密切相关。然而，其微观结构起源仍不清楚。本文采用激活弛豫法（Activation-Relaxation Technique, ART）系统研究了两个典型非晶合金系统的势能景（potential energy landscape），La₅₅Ni₂₀Al₂₅ 和 Cu₄₆Zr₄₆Al₈。我们系统分析了两个体系的激活能，激活过程的原子参与度、以及参与激活过程的原子空间分布等，两个体系的弛豫行为具有很大差异。通过分析势能景特征，发现二者分布比较类似，但形状有很大不同，这是导致两个非晶合金体系不同弛豫行为的主要原因。

关键词：非晶合金；弛豫；势能景

D08-05

Taming microstructure of nanostructured alloy through two conventionally undesirable reactions

F. Liu*, L.K. Huang, W.T. Lin and B. Lin

State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, P.R. China

*E-mail of Corresponding Author: liufeng@nwpu.edu.cn

In nanostructured metals, heterogeneous and hierarchical microstructures have yielded great success in improving the low ductility, which has been the Achilles heel of their application as structural materials. To achieve the unique microstructures, generally, various strategies focus on the design of fabrication processes rather than the application of inherently microstructural changes such as phase transition and grain growth, since they are conventionally believed as two typically undesirable reflections when nanostructured materials suffer instability. Here, we report a solid-reaction based technique arising from the concurrence of phase transition and grain growth, achieving a new kind of heterogeneous microstructure, i.e. dual-phase bimodal nanostructure. The physics behind the concurrence aiming to understand the dual-phase bimodal nanostructure is investigated both experimentally and computationally. The present finding, offers an unexplored and feasible strategy taming, instead of inflexibly retaining, the nanostructure, which may further serve as a new guideline for alloying in designing nanostructured alloys with optimized mechanical properties and good thermal stability.

Keywords: Phase transition; grain growth; dual-phase bimodal nanostructure; nanostructured metals

D08-06

Fragile to strong transition in nano-scale glass forming liquids

张珊

北京计算科学研究中心 100193

纳米金属玻璃在催化、纳米压印、生物医学等方面有着广阔的应用前景[1-3]。对其物性的尺寸效应探究是当前研究的热点问题之一。人们普遍认为过冷液体的动力学行为与其玻璃态的物性密切相关，因而探究过冷液体的尺寸效应具有非常重要的科学意义。液体脆性作为过冷液态动力学行为的本征属性，当接近玻璃化转变温度时，它可以反映粘度随温度变化而偏离 Arrhenius 行为的程度，因此引起大家的广泛关注。

本文运用分子动力学的模拟方法，基于嵌入式原子理论（EAM）的势函数，采用经典的 CuZr 体系，研究玻璃形成液体动力学行为的尺寸效应。我们发现：1) 存在临界尺寸 R_c ，当体系直径小于 R_c 时，过冷液体脆性发生 fragile-to-strong 转变；2) 表面液体的动力学行为与体系的尺寸也密切相关，这与其表面的势能图景（PEL）[4]的形状存在直接关联，即小尺寸拥有更简单的 PEL，也因此表现 strong liquid 的行为。

最终，我们的结论将有助于人们更加深刻的理解和探究过冷液体及金属玻璃在纳米尺度下物性的微观机理。

1. Gleiter H. Beilstein journal of nanotechnology, 2013, 4(1): 517-533.
2. Zhu Z, Bai B, Duan H, et al. Small, 2014, 10(8): 1603-1611.
3. Chen N, Shi X, Witte R, et al. Journal of Materials Chemistry B, 2013, 1(20): 2568-2574.
4. Fan Y, Iwashita T, Egami T. Nature communications, 2014, 5.

关键词：纳米金属玻璃；液体脆性；尺寸效应；势能图景

D08-07

内生钛基非晶复合材料的腐蚀行为

徐宽宽

太原理工大学 030024

内生钛基非晶复合材料由于在非晶的基体上沉淀析出树枝晶相，改善了非晶合金塑性差的缺点。然而由于树枝晶相的存在，出现了明显的成分偏析现象，非晶相富集了更多的铜和铍元素，树枝晶相富集了更多钛元素，导致非晶相和树枝晶相表现出不同的耐腐蚀行为。在有氯离子存在的溶液中出现非晶相的选择性腐蚀现象；而钛基非晶复合材料在不含氯离子的溶液中表现出明显的钝化行为。而且钛基非晶复合材料的腐蚀行为与元素含量的变化存在着密切的关系，当钛元素含量低时，会有点蚀发生，随着钛元素的不断提高点蚀得到抑制，只发生非晶相的选择性腐蚀，当钛含量进一步增加时，非晶相的选择性腐蚀同时也得到了有效地抑制。

关键词：金属玻璃；钛基合金；腐蚀行为；动电位极化

D08-08

高熵合金中 BCC/B2 共格组织的稳定性及析出强化研究

王清，董闯

大连理工大学三束材料改性教育部重点实验室 材料科学与工程学院，大连市凌工路 2 号 116024 116024

高熵合金中 BCC/B2 共格组织对化学成分及其敏感。尤其是在 Al-TM (TM: transition metal, 过渡金属) 高熵合金中，BCC/B2 的共格组织对 Al 元素的含量非常敏感。在 BCC/B2 共格组织中，由于纳米级析出粒子对基体的强化作用，使得高熵合金的力学性能得到提升。本工作旨在研究 Al-Ni-Co-Fe-Cr 高熵合金中，在 BCC 基体中共格析出的纳米级 B2 粒子的组织稳定性和强化作用。

根据化学短程序的概念，利用团簇加连接原子结构模型设计出高熵合金团簇式 $[Al-TM_{14}]Al$ 。在固定 Al 含量的前提下，非等摩尔混合 TM 原子。实验结果表明，在 $[Al-TM_{14}]Al$ 高熵合金中的 BCC/B2 存在三种微观共格形貌：编织网状的调幅分解形貌，球形粒子析出形貌和立方形粒子析出形貌。三种形貌的形成与 BCC 和 B2 相之间的错配度密切相关。

在 BCC 基体中析出纳米级立方形 B2 粒子的组织对高熵合金的强化作用最佳，使高熵合金具有高强度的同时，兼具了良好的塑性。这种立方形析出的相貌与 Ni 基高温合金中 L_{12} 粒子在 FCC 基体中析出的形貌非常相近。因此，本工作对高温下高熵合金中 BCC/B2 共格组织的稳定性进行了相应的研究。

关键词：高熵合金；Al-Ni-Co-Fe-Cr；团簇结构模型；力学性能；共格析出强化

D08-09

钨基微丝的熔体抽拉法制备及其在高频脉冲管制冷机中的应用

霍军涛，王军强，常春涛，王新敏

中国科学院宁波材料技术与工程研究所 315201

蓄冷材料是制约高频脉冲管制冷机低温制冷性能的关键因素。目前高频脉冲管制冷机中一般选用微米级的不锈钢丝网填料，但由于其比热在低温会迅速下降，严重影响了蓄冷器在低温的蓄冷性能。而具有低温大比热的稀土磁性蓄冷材料，由于比较脆且强度低，很难通过传统拉拔方式加工成实际所需的微米丝。采用熔体抽拉设备成功制备了形状连续均匀、直径 50 μm 左右的 Er3Ni 的蓄冷丝材。并进一步对其磁性能和蓄冷性能进行了研究。研究发现，所开发的 Er3Ni 蓄冷丝材，既保留了 Er3Ni 材料的大低温比热，克服了不锈钢丝网低温比热较低的弱点；又保持了丝状的最优使用外形，减小了流动阻力和轴向导热损失。因此其在高频脉冲管制冷机中的蓄冷性能明显优于 Er3Ni 球和不锈钢丝网。这种新材料的开发，将有望提高高频脉冲管制冷机的制冷效率。

关键词：微丝；熔体抽拉法；蓄冷材料

D08-10

非晶合金不均匀性的表征、应用及其调控

管鹏飞

北京计算科学研究中心 100094

不均匀性，即结构、元素及动力学不均匀性等，是非晶合金的本征属性。大量的实验和理论研究表明，玻璃形成（过冷）液体及非晶合金的各类不均匀性与其宏观物性之间存在着密切的关联。因而，如何精确地描述各类不均匀性，明确它们之间的联系，探索不均匀性与非晶合金宏观物性之间的关联，是建立完备的非晶合金理论框架，进而实现对高性能非晶合金材料物性的综合调控的重要科学基础。近年来，运用计算模拟技术及相关理论分析，并结合先进的实验手段，系统地研究了非晶合金中的结构^[1]、元素、力学响应^[2]及动力学不均匀性；阐明了结构^[3]及元素^[4]不均匀性与非晶形成能力、动力学不均匀性与低温弛豫行为^[5-6]、表面不均匀性与电化学稳定性^[7]等之间的关联；探索了有效地调控非晶合金中不均匀性的方法^[8-9]。基于对非晶合金中不均匀性的表征、应用及调控的研究，将帮助我们逐步揭示非晶合金宏观物性的微观机理，并建立有效、准确的结构物性关联，为拓展非晶合金的应用范围，开发高性能合金材料提供理论依据。

1. A. Hirata, P. Guan, T. Fujita, Y. Hirotsu, A. Inoue, A. R. Yavari, T. Sakurai and M. Chen*, Direct observation of local atomic order in a metallic glass, *Nature Materials* 10 (1), 28-33 (2011).
2. Y. C. Hu, P. F. Guan*, M. Z. Li, C. T. Liu, Y. Yang*, H. Y. Bai, and W. H. Wang*. Unveiling atomic-scale features of inherent heterogeneity in metallic glass by molecular dynamics simulations. *Phys. Rev. B* 93, 214202 (2016)
3. P. F. Guan, T. Fujita, A. Hirata, Y. H. Liu and M. W. Chen*, Structural Origins of the Excellent Glass Forming Ability of Pd40Ni40P20, *Physical Review Letters* 108 (17) (2012).
4. T. Fujita, P. F. Guan, H. W. Sheng, A. Inoue, T. Sakurai and M. W. Chen*, Coupling between chemical and dynamic heterogeneities in a multicomponent bulk metallic glass, *Physical Review B* 81 (14) (2010).
5. Wang, B; Shang, BS; Gao, XQ ; Wang, WH; Bai, HY; Pan, MX*; Guan, PF*. Understanding Atomic-Scale Features of Low Temperature-Relaxation Dynamics in Metallic Glasses. *J. Phys. Chem. Lett.* 7 (23), 4945 (2016)
6. Wang, B; Wang LJ; Wang, WH; Bai, HY; Gao, XQ ; Pan, MX*; Guan, PF*. Understanding the maximum dynamical heterogeneity during the unfreezing process in metallic Glasses. *J. Appl. Phys.* (121), 175106 (2017)
7. Yuan Chao Hu, Yi Zhi Wang, Rui Su, Cheng Rong Cao, Fan Li, Chun Wen Sun*, Yong Yang, Peng Fei Guan*, Da Wei Ding, Zhong Lin Wang, Wei Hua Wang*. A Highly Efficient and Self-Stabilizing Metallic-Glass Catalyst for Electrochemical Hydrogen Generation. *Adv. Mater.* 28 (46), 10293 (2016)
8. Yuan-Chao Hu, Peng-Fei Guan*, Qing Wang, Yong Yang*, Hai-Yang Bai, and Wei-Hua Wang*, Pressure effects on structure and dynamics of metallic glass-forming liquid, *The Journal of Chemical Physics* 146, 024507 (2017)
9. Lijin Wang, Pengfei Guan*, and W. H. Wang. The correlation between fragility, density, and atomic interaction in glass-forming liquids. *J. Chem. Phys.* 145, 034505 (2016)

关键词：非晶合金；不均匀性；计算模拟；性能调控

D08-11

Cu₆₄Zr₃₆ 金属玻璃原子构型无序度与变形行为的分子动力学研究

冯士东^{1,2}, Keith K.C. Chan¹, 刘日平²

1. 先进制造技术研究中心, 工业及系统工程系, 香港理工大学, 香港
2. 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 燕山大学, 秦皇岛市

块体金属玻璃的低塑性特征是制约其作为结构材料在工业中应用的主要环节之一。而金属玻璃的塑性和断裂行为与其微结构中的原子构型密切相关。本研究旨在查明原子构型无序度与其塑性变形能力的内在规律。

采用分子动力学与准近邻原子参数相结合的方法, 以 Zr-Cu 金属玻璃为研究对象, 首先通过不同冷速法处理使其具有不同形态和数量的原子无序构型, 量化金属玻璃中构型无序的变化程度, 然后研究金属玻璃变形与原子构型无序度的关联性, 建立变形与原子构型无序度的关系。

研究结果发现变形的不均匀性主要是因为构型无序区域的不均匀分布, 原子构型无序度与变形单元、动力学弛豫存在紧密联系。不同区域中准近邻原子的不同数量标志着存在不同类型的构型无序区域。应力加载时, 变形单元优先出现在准近邻原子数大的区域, 即构型无序度大的区域。

构型无序度大的区域是塑性变形单元和结构弛豫的结构起源区。剪切带的宽度和动力学弛豫可以通过结构无序程度来进行调节。这为改善金属玻璃的塑性、实现金属玻璃在工程中的应用奠定基础。

关键词：金属玻璃；原子构型；形变；分子动力学

D08-12

Al_{0.6}CoCrFeNi 高熵合金在冲击载荷下的动态压缩性能

王璐¹, 马胜国¹, 王志华¹, 乔珺威^{1,2}

1. 太原理工大学应用力学与生物医学工程研究所
2. 太原理工大学材料科学与工程学院

利用 INSTRON 万能试验机和分离式霍普金森压杆装置(SHPB)对双相(FCC+BCC) Al_{0.6}CoCrFeNi 高熵合金在常温下应变速率为 $1 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ - $4 \times 10^3 \text{s}^{-1}$ 范围内对其进行了单轴压缩实验, 研究加载应变率对 Al_{0.6}CoCrFeNi 高熵合金力学性能的影响。利用透射显微镜对变形试样进行显微观察, 重点分析不同加载应变率下该合金的变形机理。结果表明, 该合金在准静态和高应变速率下都具有比较明显的加工硬化现象, 准静态时该合金具有比较低的应变率敏感性, 其主要的强化机制为位错强化, 而高应变速率时该合金的动态屈服强度和流变应力均随应变率的提高而增加, 与准静态相比, 其流变应力表现出较强的应变率敏感性, 其主要的强化机制是位错强化和 FCC 相中的孪晶强化, 具有明显的 TWIP 效应。最后, 利用实验数据对 Al_{0.6}CoCrFeNi 高熵合金在高应变速率下的动态塑性本构关系进行拟合, 得到室温下该材料的动态塑性本构方程。

关键词：高熵合金；动态加载；应变速率；TWIP 效应

D08-13

亚微米尺度下金属单晶体的间歇式塑性流变行为：外部尺寸效应及其微观调控

刘刚, 孙军, 张鹏

西安交通大学 材料科学与工程学院 金属材料强度国家重点实验室 710049

随着纳米制造技术的蓬勃发展, 晶体材料在微纳米尺度下的力学性能正逐渐受到广泛的关注。大量的实验和模拟研究表明, 亚微米尺寸面心立方金属单晶的塑性变形以应变突跳的方式进行, 其随机性和间歇

性的本质将使材料在无法预知的瞬间突然失去承载能力。本研究工作旨在深入理解间歇式塑性变形的规律，以及其定量调控的实现手段。

我们采用 FIB 加工了直径为 500-3500nm 的铝合金单晶体，并进行单轴压缩的测试手段定量的提取了间歇式塑性形变所占总塑性形变的占比，以及应变突跳尺寸分布的统计规律。

实验结果表明，间歇式塑性形变的占比和尺寸分布的幂律指数均具有外部尺寸依赖性；发现引入异质“颗粒”可以调控外部尺寸效应；揭示了间歇式塑性形变的占比和其尺寸分布之间服从“统一”的法则。在理论方面，本研究工作构建了基于可动位错密度的平均场模型，其半定量的解释了上述的实验规律，并在理论上统一了外部尺寸和异质“颗粒”对间歇式塑性变形的耦合影响。

本研究结果将促进有关微纳尺度下材料间歇式塑性变形的深入认识，并有助于保证微纳器件用材料安全服役，避免无征兆失稳的发生。

关键词：间歇式塑性形变；应变突跳；尺寸效应；异质颗粒

D08-14

Nb-Si 基超高温合金的高温变形行为

郭喜平，唐晔，乔彦强

西北工业大学 710072

Nb-Si 基超高温合金具有高熔点、低密度和较好的高温力学性能，有望成为飞机发动机热端部件用超高温结构材料。Nb-Si 基超高温合金的制备技术主要有真空电弧熔炼、定向凝固、粉末冶金等，但目前对 Nb-Si 基合金塑性成形方面研究还较少。

Nb-Si 基合金中脆性硅化物相体积分数为 30-70%，属于难变形材料，塑性成形难度较大。系统研究了变形热力参数对 Nb-Si 基合金高温变形过程中的流变应力、微观组织演变和软化机制的影响规律，对优化 Nb-Si 基合金的塑性成形工艺具有重要意义。

对电弧熔炼态 Nb-Si 基超高温合金在 1200-1500 oC 进行了热压缩，结果表明，改进的 Arrhenius 型双曲正弦方程可准确描述 Nb-Si 基合金高温塑性变形本构关系，且 Nb-Si 基合金的动态软化过程符合 Avrami 方程。基于 Prasad 准则绘制了 Nb-Si 基超高温合金的热加工图，并结合热加工窗口得到电弧熔炼态 Nb-Si 基合金的最佳锻造条件为 1350-1440 oC/0.001-0.01 s⁻¹，而在低温高速率（1200-1300 oC/0.05-0.1 s⁻¹）或过高温度（1500 oC）下变形时 Nb-Si 基合金发生流变失稳。通过扫描电子显微镜(SEM)分析了变形组织，阐明了不同温度和应变速率下 Nb-Si 基合金的微观组织演化规律。随着应变量的增大，Nbss/Nb5Si3 共晶形貌逐渐演变成硅化物颗粒增强的 Nbss 基体，且在较高温度和较低应变速率下共晶形貌组织含量明显减少。

结合电子背散射衍射（EBSD）和透射电子显微镜（TEM）进一步分析了 Nb-Si 基合金变形组织中各组成相的取向变化和亚结构，揭示了 Nb-Si 基超高温合金的软化行为。Nb-Si 基合金的动态软化以 Nbss 的动态再结晶为主，并形成细小的 Nbss 晶粒（平均尺寸为~10 μm），而 Nb5Si3 相仅在较高温度和较大应变量下发生动态再结晶。

关键词：Nb-Si 基超高温合金；高温变形；塑性本构方程；热加工图；动态再结晶

D08-15

从结构块到十次准晶及大单胞复杂晶体相

何战兵

北京科技大学新金属材料国家重点实验室 100083

由于不存在平移对称性，准晶的结构不像传统晶体材料一样，可以用一个平移单胞来描述。然而要想完全理解准晶这种新奇结构的性质和进一步开发其潜在应用，对准晶结构的理解和解析又非常必要。因而对准晶的晶体结构研究一直准晶研究领域的热点和难点。虽然准晶体不能用一个平移单胞来描述，但是准晶中有一些基本的结构块（原子团簇结构），可以在准晶中重复出现。因而对准晶的晶体结构的理解，就

简化为对这些结构块的原子结构和其堆积或连接方式的理解。我们将以我们最新发现的 Al-Fe-Cr-Si 系中一种全新的十次准晶为例，基于达原子分辨率的球差校正透射电镜 HAADF-STEM 像的结果，详细阐述该类十次准晶中的基本结构块，特别是 2 纳米的十边形结构块的结构，连接及形成准晶和相关的准晶近似相的一些结构规律。进而为理解该类准晶的性质和开发其潜在应用提供晶体结构上的支持。

关键词：准晶；近似相；结构单元；晶体结构；球差电镜

D08-16

金属玻璃最高能量状态及性质

尚宝双¹，王利近¹，管鹏飞¹，汪卫华²

1. 北京计算科学研究中心
2. 中国科学院物理研究所

金属玻璃是一种典型的非平衡态材料，在同一个温度下，由于制备历史的不同，金属玻璃具有不同的能量状态[1]。金属玻璃的最低能量状态，能够联系到理想玻璃态[2]，而最高能量状态是否存在，以及玻璃的最高能量状态的物理意义还不是很清楚，本文利用分子动力学模拟的方法，通过低温循环处理的手段[3]，来提高金属玻璃能量状态，研究金属玻璃在某一温度下，是否存在最高能量状态，并应用势能图景理论来解释这一能量极限的物理意义[4]，发现金属玻璃的最高能量状态的玻色峰对应于高温液态结构的玻色峰，这预示着最高能量状态的玻璃态是声子控制的结构稳定性到鞍点控制的结构稳定性的转变界限[5]。

1. Y.Sun, A.Concussell and A.L.Greer, *Nature Review Material*, 16039(2016)
2. P.G.Debenedetti and F.H.Stillinger, *Nature*, 410, 8(2001)
3. S.Ketov, Y.Sun, S.Nachum et al, *Nature*, 524, 200(2015)
4. S.Sastry, P.G.Debenedetti and F.H.Stillinger, *Nature*, 393, 554(1998)
5. T.S.Griggera, V.Martin-Mayor, G.Parisi and P.Verrocchio, *Nature*, 422, 289(2003)

关键词：金属玻璃；低温循环；年轻化；势能图景；玻色峰

D08-17

玻璃波色峰的方向序

蒋敏强^{1,2}，杨杰^{1,2}，王云江^{1,2}，戴兰宏^{1,2}

1. 中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室，北京 100190
2. 中国科学院大学 工程科学学院，北京 100049

在太赫兹频率，玻璃的振动态密度通常偏离德拜预测而出现过剩，呈现一种反常的波色峰(Boson peak)现象。作为玻璃的一个本征特征，波色峰为理解玻璃的本质提供了一扇窗口，其结构起源成为玻璃物理领域中热点问题之一。尽管仍然存在争议，目前普遍认为玻璃波色峰源于结构无序导致的准局域横向振动软模。本工作通过对金属玻璃静态结构与原子振动谱的分子动力学模拟分析，首次实现了玻璃波色峰的定量结构表征。基于原子振动横向软模图像，在 Voronoi 多面体空间定义了一个一维结构矢量。这个矢量的方向表征了横向软模在波色峰频率的最大可能振动方向，而长度则与波色峰强弱呈线性关联。一维结构矢量的空间分布验证了波色峰的准局域横向软模本质；结构矢量的局域特征尺度接近声子在波色峰频率时的波长。这个工作定量解析了玻璃中波色峰的结构方向序，为理解玻璃的振动与结构关联打开了一个突破口。

D08-18

铜基块体非晶合金的设计与力学性能

潘冶¹，吴继礼^{2,1}，皮锦红^{3,1}

1. 东南大学
2. 合肥工业大学

3. 南京工程学院

铜基块体非晶合金具有强度高、成本低的突出优点，通过合金成分的合理设计可获得较高的非晶形成能力（GFA）。但是塑性差仍是非晶合金的共性问题，其原因非晶合金不具备阻碍剪切带扩展并且能够诱发多重剪切带的结构特征，在狭小的空间内的少量几条剪切带容纳了合金在加载过程的大部分变形，表现为极为有限的宏观塑性变形，极大地限制了非晶合金的实际应用。因此，在提高 GFA 的同时改善其室温塑性一直是非晶合金领域的研究热点。本文从铜基块体非晶合金的成分设计入手，基于热力学相图计算，用非平衡凝固的 Scheil 模型，预测多元 Cu 基非晶合金成分的凝固过程，设计并制备出具有较高 GFA 的非共晶成分的 Cu-Zr-Ti 块体非晶合金，获得了兼具压缩断裂强度达 2500MPa 及宏观塑性达 25% 的优异综合力学性能，分析了不同成分合金剪切带和断口形貌。探索了力学性能与锯齿流变动力学之间的关系，在压缩加载条件下，制得的铜基块体非晶合金应力-应变曲线上呈现出锯齿流变现象，反映了剪切带的间隙性运动特征。用时间序列分析及统计方法，得出随着非晶合金塑性的提高，剪切带动力学行为由混沌特征演化为自组织状态，当宏观塑性超过 10% 时，均呈现出自组织状态，这种状态的出现是非晶合金具有优异宏观塑性的重要原因之一。本文还研究了添加少量 Ni、Mo、Nb 对 Cu-Zr-Ti 三元块体非晶合金锯齿流变动力学行为和力学性能的影响。

关键词：铜基块体非晶合金；力学性能；剪切带；锯齿流变

D08-19

铝基非晶合金化学功能特性研究

王军强

中国科学院宁波材料技术与工程研究所 315201

铝基非晶合金作为高强轻质合金吸引了广泛的研究兴趣，然而目前铝基块体金属玻璃形成能力只有 1-2mm，作为结构材料难以获得广泛应用。与其他金属元素不同，铝元素既可以与酸反应也可以与碱反应。这种特殊的化学性质使得铝基非晶合金在化学反应中可能具有特殊的应用前景。本报告将主要介绍我们组最近在铝基非晶合金化学功能特性方面的研究进展。首先，我们研究了 Al-Ni-Co-Y 非晶合金在氢氧化钾溶液中去合金化过程，成功制备出具有多级纳米多孔结构的 NiCo 金属/氧化物复合材料，具有优异的赝电容特性，比电容达到 1.05 F/cm²。进一步通过在非晶合金中添加少量 Cu，去合金化后，显著提高了纳米多孔材料的导电性能，比电容达到 1.22 F/cm²。其次，非晶合金在降解印染污水反应中表现出较高的反应活性，但是随着溶液 pH 值的升高，反应活性显著降低。考虑 Al 基非晶合金的酸碱双重特性，以及在碱性溶液中反应形成的纳米多孔结构，有望在碱性染料溶液中表现高活性。我们研究发现 Al-Ni-Co-Y 非晶合金在较宽 pH 范围内都可以快速降解偶氮染料。而且在碱性(pH=12)和酸性(pH=2)溶液中比在中性溶液中降解速率快 1.5 和 189 倍。酸性和碱性溶液褪色过程基本符合一级反应机制。中性溶液中褪色经历了两个过程：首先是偶氮键在非晶合金还原作用下的降解过程，然后是第一阶段析出的氢氧化铝絮状沉淀吸附偶氮染料的褪色过程。氢氧化铝吸附偶氮染料属于物理过程，速率更快，褪色较彻底。在酸性和碱性溶液中，表面形成的富镍和富钨纳米多孔层起到增强染料吸附的作用，从而加快了染料褪色降解过程。这些结果表明铝基非晶合金在染料污水褪色中有良好的应用前景。

关键词：铝基非晶合金；降解污水；纳米多孔材料

D08-20

半固态搅拌制备碳化硅增强 Zn-40Al 基复合材料的微观组织、力学性能和摩擦磨损性能

董福元，薛鹏皓，刘宁，秦春，李吉林，耿桂宏

北方民族大学 750021

使用半固态搅拌方法制备了含有不同重量百分比 SiC 的 Zn-40Al 复合材料。研究了 SiC 对微观结构、力学性能和摩擦磨损性能的影响。微观结构分析发现添加 SiC 后，铸造的 Zn-Al 合金有不同程度的结构细

化。然而随着 SiC 含量的提高, 出现了一定数量的缩孔缺陷。复合材料的硬度随着 SiC 增强颗粒含量的提高而提高。拉伸强度随着 SiC 比重的提高而明显的下降。Zn-40Al-0.5wt.% SiC 具有最好的强化效果, 相比于不添加 SiC 的合金强度提高了 20%。总体结果表明复合材料具有相似的摩擦磨损系数但是添加 SiC 后磨损量下降到不足原始合金的十分之一。

关键词: Zn-40Al 合金; SiC 颗粒; 微观组织; 力学性能; 摩擦磨损

D08-21

高熵合金粉末制备及其在激光 3D 打印中的应用

张晖, 何宜柱, 冒爱琴, 徐震霖

安徽工业大学材料科学与工程学院 243000

采用真空气雾化制备了 CoCrFeMnNi 高熵合金粉末以及铁含量介于 50~65at.% 的低成本 Fe_xCrCoNiAl 和 Fe_xCrMnAlTiSi_{0.3} 等多元合金粉末, 研究了铁含量、高熵效应和合金元素组成对激光 3D 打印工艺选择、烧结性、成形性和搭接组织与结构的影响。研究表明, 多主元成分的选择添加有利于提高合金粉末自熔性, 改善激光 3D 打印高熵合金器件成形性。激光 3D 打印多主元合金凝固后组织细小、相结构简单, 随着铁含量增加成分偏析减小、晶界明显净化。与 304 不锈钢相比, 部分成分富铁多元合金具有接近的成本和更优的耐稀硫酸腐蚀性能。

关键词: 高熵效应; 激光 3D 打印; 自熔性; 耐腐蚀

D08-22

纳米压痕法评价金属玻璃的断裂韧性

王建强, 郭慧

中国科学院金属研究所 110016

目前已有许多评价断裂韧性的试验方法, 如三点弯曲等。然而, 这些试验方法敏感于试样的几何形状和尺寸。压痕法是一种需要测量裂纹长度的、能够有效评价断裂韧性的新型试验方法, 由于金属玻璃在压痕下能产生塑性变形, 因此压痕法评价金属玻璃有一定的局限性。在本研究中, 通过纳米压痕试验获得载荷-位移曲线, 从能量的角度将试验过程中所做的功与产生裂纹面所消耗的功关联起来, 并且利用连续损伤机制预测断裂点, 由此提出了一个能评价金属玻璃压痕断裂韧性的方法, 并将该方法获得的一系列金属玻璃的压痕断裂韧性值 KC 与由裂纹张开位移得到的断裂韧性值 KQ 进行对比。结果表明, KC 与 KQ 误差在 10% 以内, 并且 $KQ=1.1KC-3.7$, 利用此关系式预测出了 Al₈₆Ni₆Y_{4.5}Co₂La_{1.5} 的 KQ 为~35 MPa \sqrt{m} 。

关键词: 断裂韧性; 压痕法; 块体非晶; 损伤

D08-23

Cu-Ni-Si 合金带材的制备及其时效行为

耿桂宏

北方民族大学

本课题采用电弧熔炼+单辊旋转快速凝固的新方法, 制备出作为高强中导型大规模集成电路引线框架用的 Cu-Ni-Si 系合金薄带。研究了凝固速度、时效温度和时间等对合金组织、导电性能、强度及显微硬度的影响规律。研究结果显示, 对快速凝固的铜合金薄带进行时效处理后, 能显著提高铜合金的显微硬度和拉伸强度, 电导率也得到很好的回复; 合金的电导率随着时效时间的延长而持续提高, 尤其是前 120 min 的时效时间内, 合金的电导率随时效时间的延长上升趋势较大, 之后趋势较为平缓; 显微硬度和拉伸强度随着时效的进行, 达到时效峰值后下降, 时效峰值过后, 显微硬度和拉伸强度下降的速度随时效温度的增大而增大。

D08-24

Zr 基非晶合金的生物相容性

黄永江

哈尔滨工业大学材料科学与工程学院 150001

块体非晶合金因其微观原子排列呈现长程无序(即无平移周期性)、短程有序的独特结构特征,而彰显出高强度、高断裂韧性、低弹性模量、优异的耐腐蚀性、良好的抗疲劳性能以及良好的生物相容性等一系列优于晶态合金的性能,在作为新一代高性能的生物医用材料领域上吸引着越来越多研究者的深入研究。本文首先选择 Zr₄₆(Cu_{4.5}/5.5Ag₁/5.5)₄₆Al₈, Zr_{51.9}Cu_{23.3}Ni_{10.5}Al_{14.3}, Zr₅₁Ti₅Ni₁₀Cu₂₅Al₉ 及 Ti₄₀Zr₂₅Ni₁₂Cu₃Be₂₀ 这四种非晶合金为对象,系统研究它们的细胞毒性及生物腐蚀性能,同时,开展了它们的体内植入试验,并与 Ti-6Al-4V 以及纯 Ti 进行对比研究,所有非晶合金的细胞毒性等级为 0-1, Zr₄₆(Cu_{4.5}/5.5Ag₁/5.5)₄₆Al₈ 具有最佳的耐腐蚀性能,动物实验结果表明, Zr₄₆(Cu_{4.5}/5.5Ag₁/5.5)₄₆Al₈ 不亚于商用的 Ti-6Al-4V,其优异的生物相容性可以归因于其非晶结构以及无毒性元素的化学组成,且含有生物相容性良好的 Ag 元素。同时,选用 Zr₄₆(Cu_{4.5}/5.5Ag₁/5.5)₄₆Al₈ (at.%) (ZrCuAlAg)非晶合金为研究对象,利用微弧氧化表面改性技术对其处理,在其表面制备了出具有生物活性的涂层,通过改变微弧氧化电压参数和时间参数探讨了非晶合金表面涂层的形成机理,通过电化学腐蚀实验、血液相容性试验、口腔黏膜刺激试验和动物皮下植入试验等系列试验,综合评价了微弧氧化 ZrCuAlAg 非晶合金的生物相容性。最后,详细研究了晶化分数对 Zr_{50.7}Cu₂₈Ni₉Al_{12.3} 非晶合金在模拟体液中的腐蚀以及磨损交互作用,该合金的耐腐蚀性随晶化分数的增加先升高后降低,晶化分数为 14 %合金的耐腐蚀电位最大,基于 X 射线光电子能谱,阐明了晶化行为-腐蚀及磨损性能之间的内在关系。

关键词: 非晶合金; 生物腐蚀; 生物相容性; 力学性能

D08-25

凝固亚稳高强轻质钢的力学行为

宋长江, 张鉴磊, 翟启杰

上海大学 材料科学与工程学院 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室 200072

随着能源危机和环境恶化的日益加剧,轻量化是汽车节能、减排和汽车工业可持续发展的必然之路。基于汽车结构刚度(取决于材料模量、零件形状和尺寸因素)的考虑,即使钢铁具有更高的强度其厚度也不能无限制降低,提高强度的同时降低其比重(即高强轻质钢)成为轻量化先进高强钢的研究新方向。Fe-Mn-C 钢中添加 Al 元素可使其密度降低 10-20%,同时具有高强度(大于 900MPa)和良好的塑性(50%以上),该合金系轻质钢密度的降低量取决于 Al 元素的含量。但是 Al 是强铁素体稳定元素,高含量 Al 元素将促使大量的铁素体相的形成且容易导致粗大的碳化物降低其塑性,影响了其综合性能和密度的进一步降低。本文提出利用亚快速凝固可扩大固溶极限和形成亚稳相的特点,克服传统制备方法遇到的问题,并希望探索低密度、高强塑性超性能轻质高强钢的绿色制备新工艺。研究结果显示亚快速凝固样品可直接获得亚稳奥氏体并含纳米尺度的碳化物颗粒的样品,其力学性能优于传统复杂工艺(轧制+热处理)制备类似成分样品的力学性能,其后对凝固亚稳高强轻质钢的力学行为及组织演变进行系统分析。

关键词: 轻质钢; 凝固亚稳材料; 亚快速凝固; 力学行为; 组织演变

D08-26

原位 TiB 晶须增强双尺度结构钛合金: 半固态烧结制备、微观结构与力学行为

杨超^{1,2}, 康利梅^{1,2}

1. 华南理工大学国家金属材料近净成形工程技术研究中心

2. 金属材料高效近净成形技术与装备教育部重点实验室(B类)

鉴于单一尺度纳米晶或超细晶金属材料通常在室温展现出较低的塑性，制备兼具较高强度和塑性的双尺度结构金属材料成为了国内外研究者的关注热点。目前，制备高强韧双尺度结构金属材料包括热机械处理法、粉末固结法、再结晶法与铸造法等四种工艺。尤其是，铸造过程中结合半固态加工技术，可制备出高强韧的双尺度结构（纳米晶基体+微米树枝晶）钛合金材料。

有鉴于此，基于非晶合金粉末独特的粘性流动特性从而增强粉末烧结性，采用粉末冶金技术，通过合理的成分设计，在 $\text{Ti68.8Nb13.6Cu5.1Ni6Al6.5}$ 中添加微量 B 得到 $\text{Ti68.3Nb13.6Cu5.1Ni6Al6.5B0.5}$ 和 $\text{Ti67.8Nb13.6Cu5.1Ni6Al6.5B1}$ 两种合金，先机械合金化制备出非晶态合金粉末，随后结合非晶晶化和半固态烧结技术，制备出原位 TiB 晶须增强的双尺度结构钛合金。

制备的双尺度结构为双相 ($\beta\text{-Ti+MTi}_2$) 等轴晶包围双尺度 (微米等轴晶 $\beta\text{-Ti+超细晶长条状 MTi}_2$) 结构，或微米等轴晶 $\beta\text{-Ti+超细晶长条状 MTi}_2$ 的全双尺度结构；原位针状 TiB 晶须分布于双相等轴区和双尺度区表面。半固态烧结过程中双尺度结构（或原位 TiB 晶须）的形成机制可分为粉末颗粒重排、致密化与晶化、晶粒长大、形成液相或半固态、形成双尺度结构等五个阶段。力学性能分析表明，其压缩屈服强度、断裂强度和断裂塑性分别为 1297MPa、2529MPa 和 36.5%，综合力学性能优于铸造法制备的同成分复合材料。

研究表明半固态烧结技术可为制备高性能、新结构、高熔点金属材料提供一种新方法。

关键词：非晶合金复合材料；半固态烧结；钛合金；液相烧结；结构性能

D08-27

具有大磁热效应的高熵非晶微丝

盛威¹，王刚¹，霍军涛²，王军强²

1. 上海大学

2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

非晶合金独特的长程无序结构使其具有较宽的磁性转变温区和较大的磁热效应，而受到磁制冷领域的广泛关注。实际应用需要将磁制冷材料加工成微米丝或球，对于非晶合金这是个加工难题。

本文采用熔体抽拉法制备了 $\text{Gd}_{20}\text{Ho}_{20}\text{Er}_{20}\text{Al}_{20}\text{T}_{20}$ ($X=\text{Fe, Co}$ 和 Ni) 高熵非晶微丝，研究了其磁热效应，制冷能力等性能。

结果表明，5 T 磁场下， $X=\text{Co}$ 时，最大磁熵变为 $10.2 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，制冷能力达到 625 J kg^{-1} 。通过添加不同的过渡族元素，可使其磁性转变温度在 25 K 到 55 K 之间调节。当 $X=\text{Co}$ 时，非晶丝磁性转变温区比块状宽 5 K。

实验结果表明高熵非晶丝具有优异的磁热性能，作为磁制冷材料具有良好的应用前景。

关键词：磁热；高熵；非晶丝

D08-28

图说高熵合金——大数据视角下的高熵合金

苗定豪，何战兵，张勇

北京科技大学新金属材料国家重点实验室 100083

高熵合金形式上的数学表达式是元素向量与元素权重向量的内积。当元素向量包含元素周期表中所有元素时，任一高熵合金形式上仅由其权重向量确定。高熵合金的大数据，使得数据驱动方法在探索合金成分与性能之间关系应用得越来越多。随着互联网、数据库和机器学习等技术的发展，从科研文献中获取不同种类高熵合金成分、结构、性能、工艺等参数正变得越来越简单，这使得高熵合金结构化数据库的建立成为可能，也预示着材料科学即将或正在进入大数据时代。然而，随着高熵合金数据量不断增加，蕴藏在大数据里大价值如何挖掘就成了一个关键问题。

我们用文本挖掘技术对高熵合金进行定量分析，得到当前高熵合金中使用的 36 种元素及其使用频率。根据合金中包含的元素和合金的结构，用层次聚类的方法将现有高熵合金分为六类。用可视化技术展示不同高熵合金之间的谱系关系和性能分布特征，进而为工程应用、理论计算、科学研究提供参考。

用大数据处理方法，基于少量实验数据，利用神经网络模型，做合金成分优化，预测合金性能，将大大降低合金制备的成本。

关键词：高熵合金；大数据；层次聚类；神经网络；成分优化；数据驱动

D08-29

非晶合金流变单元的软化特性和宏观整体模量的关联

孙保安

南京理工大学 210094

最近一系列先进的实验手段和计算机模拟结果均表明，非晶合金的结构中存在纳米尺度不均匀区域，即在无序的非晶弹性基底上存在着纳米尺度的原子排列比较松散的区域或者类液区。这些类液区将对非晶合金的宏观力学变形行为和弛豫等流变性质起着决定性的作用，可以看作非晶合金结构的“本征缺陷”，被定义为流变单元。虽然流变单元的概念为理解非晶合金的微结构-性能关系提供了一个简单的物理图像。但如何建立流变单元与非晶宏观性质的定量关联目前仍然是一个巨大的挑战。非晶合金弹性模量是结构的敏感反应，对理解非晶合金的许多行为起着非常重要的作用。本文中，我们从理论和实验角度研究了非晶合金局域流变单元的特性和宏观整体模量的定量关联。首先从 Eshelby 弹性夹杂理论出发，推导得到了非晶合金的宏观整体模量和流变单元体积分数 V_f 、软化特性的关系。发现非晶合金的剪切模量 G 和体弹模量 K 和流变单元体积分数符合反比关系，且流变单元的模量软化程度越大， G 和 K 随 V_f 下降越快；而非晶合金的泊松比随流变单元的体积分数的变化呈现出两种趋势：当流变单元的剪切模量软化程度较大（定义为剪切软化）时，整体泊松比随 V_f 的增加逐渐增大；而当流变单元的体弹模量软化程度较大时（定义为压力软化）时，整体泊松比随 V_f 的增加而减小。这些理论预测结果被不同非晶合金体系下的高温退火实验所证实，并通过模量随退火时间的变化可以反推出流变单元的模量软化特性。此外，我们还发现流变单元的软化特性和非晶合金的塑性存在密切关联：流变单元的剪切软化越严重，非晶合金的压缩塑性越大。这些结果不但可以用来解释非晶合金中常用的塑性的泊松比准则，而且还可以解释某些塑性非晶合金的反常低泊松比现象。最后，利用流变单元和非晶宏观整体模量的关联，我们还讨论了非晶合金的液体脆性和泊松比的关联以及非晶合金弛豫退火的动力学机制。

关键词：非晶合金；流变单元；弹性模量；泊松比；塑性

D08-30

一类新的橡皮泥：金属橡皮泥

卢一平¹，王刚²，温斌³，王同敏¹，李廷举¹

1. 大连理工大学材料科学与工程学院 116024
2. 上海大学
3. 燕山大学

传统橡皮泥是由有机物（甘油）和无机物（ CaCO_3 ）组成的，目前被广泛应用在各个工业领域，通常不具有导电性或弱导电性。这我们提出了一个新的策略来设计一类新的橡皮泥，其同时拥有橡皮泥和金属合金的性质。我们命名这一新的橡皮泥为金属橡皮泥。这一新颖的橡皮泥由 Ga, In, Sn, Cd 和 Zn 等低熔点合金构成。金属橡皮泥能在近室温温度时(30~40 °C)能够像橡皮泥一样变形，同时它还是很好的导体，电率为 12.76%IACS。这是首次获得金属橡皮泥。由于金属橡皮泥具有金属合金的性质，因此可能在一些特殊的工业领域得到广泛的应用，从而潜藏着巨大的经济价值。

关键词：金属橡皮泥；低熔点合金；良好的导电性

D08-31

High performance in base metal and CGHAZ for ferrite-pearlite steels

Xiaohua Chen, Zidong Wang

University of Science and Technology Beijing 100083

A method for improving mechanical properties of base metal and coarse-grained heat-affected zone (CGHAZ) in ferrite-pearlite steel was proposed. Two steels, with and without special addition of Ti, were fabricated. Gleeble-3500 simulator was used to simulate CGHAZ. Microstructures were characterized. Tensile tests and Charpy impact tests were performed. Results show that nano-sized in-situ titanium oxides form in the melt. Compared with those of as-rolled steel without Ti addition, yield strength, elongation and toughness of as-rolled base metal with Ti addition are all promoted. Evolution of microstructures and mechanical properties was investigated and formation mechanism of titanium oxides was discussed.

Keywords: Strength; Toughness; Ferrite-pearlite steel; Welding; CGHAZ; Nano-sized titanium oxides

D08-32

流变单元对锆基非晶合金锯齿流变动力学行为的影响研究

刘乐华¹, 刘志远², 何良菊¹, 李培杰¹

1. 清华大学
2. 深圳大学

锯齿流变行为是材料形变过程中的常见形变现象。在晶体材料中, 锯齿流变行为主要受到位错等缺陷调控, 而非晶合金中, 由于不存在晶界、位错等缺陷, 在应力作用下的锯齿流变行为的结构起源及其与锯齿流变行为的关系乃不明晰。本文通过精心设计的阶梯状模具, 制备出了具有不同直径(即不同冷却速率制备)的锆基非晶合金。通过差示扫描热分析、密度等表征, 发现非晶合金中冻结的流变单元的体积分数随冷却速率增大逐渐增多。进而, 研究了具有不同流变单元体积分数的非晶合金的在压应力下的锯齿流变行为, 通过统计应力-应变曲线中的锯齿事件中的应力跳跃, 发现随着试样中冻结流变单元的增多, 锯齿流变动力学行为由满足统计学高斯分布的嘈杂态向满足衰减幂指分布的自组织临界状态转变。通过定义锯齿模量并统计该模量随着应变的演变规律, 并基于模量与流变单元的关系, 发现合金中流变单元的演变是一个应力诱导的流变单元增加与迟豫导致的流变单元减少的竞争过程。压缩试样屈服后, 流变单元先逐渐增多再逐渐消耗减少, 直至断裂, 最大约有试样 1/4 的体积的流变单元被激活。通过统计剪切带的粘度变化发现, 锯齿流变为应力诱导的玻璃化转变。通过统计锯齿流变的弹性储能密度的变化, 发现随着非晶合金中冻结的流变单元增多, 平均弹性储能密度逐渐减少。在形变过程中, 锯齿弹性储能密度随着应力增大, 先逐渐降低, 然后增加, 直至断裂, 与流变单元演变一致。通过计算分析流变单元激活能、剪切带激活能与锯齿弹性储能之间的关系, 发现锯齿事件是剪切带激活、渗逾、滑移的过程, 弹性储能主要用于诱导流变单元的渗逾, 发生局域玻璃化转变, 流变单元越多, 所需激活的类固相区越少, 所需能量越少。冻结的流变单元及形变过程中激活的流变单元调控非晶合金锯齿流变行为, 是锯齿流变动力学转变的物理起源。相关研究为理解非晶合金的形变机制及调控非晶合金性能提供了思路。

关键词: 非晶合金; 锯齿流变; 流变单元; 形变机制

D08-33

不同类型孪生对 TA2 纯钛板材的低温轧制变形机理的影响

罗晋如^{1,2}, 宋晓², 张济山², 庄林忠², 王茂银¹

1. 表面物理与化学重点实验室, 绵阳 621907 中国
2. 北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083 中国

深低温轧制可通过降低热激活抑制易滑移位错来影响金属的变形机理和微观组织演变，获得常温变形条件下不易获得的细晶/纳米晶结构，实现板材的强化与增塑，是现今研究的热点之一。目前关于 FCC 金属的深低温轧制研究报道较多，而对 HCP 金属的关注较少。不同于 FCC 金属，HCP 金属在低温条件下变形孪生丰富，因而其低温变形机理及微观组织演变具有不同于 FCC 金属的独特特征。

在本研究中，将选取孪生类型丰富的 HCP 金属 TA2 商用纯钛板材，分别在室温和液氮温度(77K)下轧制变形至不同变形量，应用 EBSD 技术对轧制板材中的各类孪生进行观察表征和统计分析。

重点讨论变形温度和变形量对 TA2 纯钛中位错滑移、孪生变形、以及不同类型的孪生变形机制之间的平衡关系的影响，研究 TA2 钛板的低温变形机理，并应用 Schmid 因子讨论研究不同温度、轧制至不同变形量的 TA2 板材中的各类孪生的择优规律与应变协调关系，讨论变形温度、变形量对不同类型孪生变体择优机理的影响，阐明低温轧制变形过程中 HCP 金属钛的变形机理与微观组织演变规律。

研究结果既是 HCP 金属低温变形基础理论的重要组成部分，又是优化设计低温轧制工艺、实现变形金属微观组织调控的核心规律。

关键词：TA2 纯钛；深低温轧制；孪生类型；变体择优

D08-34

镁锂合金的塑性失稳研究

韩恩厚，许道奎，徐永波

中国科学院金属研究所 110016

设计了不同 Li 含量的单相和双相镁锂合金和准晶强化 Mg-Li-Zn-Y 合金，研究了 Li 含量变化对合金塑性失稳的影响，并确定了临界 Li 含量。开展了不同速率的拉伸和压缩实验，研究了不同应力状态和应变速率对合金塑性失稳的影响规律。另外，在高温条件下对合金的拉伸曲线进行了测定，确定了温度变化对合金塑性失稳的影响规律。对发生塑性失稳的合金样品进行了不同应变累积的停载实验。结合光学显微镜、扫描电镜和透射电镜等观察手段，对样品表面和内部组织结构进行了观察，确定出引起合金塑性失稳时所对应的微观变形机制。

研究和对比了加载速率条件下不同合金发生塑性失稳的强弱程度，确定出塑性失稳曲线中锯齿波类型的变化情况。对发生塑性失稳的不同合金进行了声发射监测实验，通过对监测到声发射信号强度的变化确定出合金元素和加载速率对合金塑性失稳的影响规律。通过选用合适的热处理制度，在合金中析出了弥散的纳米级准晶强化强颗粒，有效地对位错运动进行了钉扎， β_1' 相的存在可以显著对位错起到钉扎作用，增加了塑性失稳过程中位错脱钉的难度，从而显著的消除了合金的塑性不稳定性现象。

关键词：镁锂合金；塑性失稳；锯齿流变

D08-35

非晶合金在复杂应力状态下的变形行为

陈顺华

合肥工业大学 230009

应力状态的改变对非晶合金塑性变形行为具有重要的影响。先后介绍了从简单的梯度应力到复杂应力场下非晶合金的变形行为。首先研究了拉伸载荷下非晶合金在梯度应力状态下的变形行为，并发现非晶合金在梯度应力下可以在应力集中区域呈现出更多的塑性变形。其次，进一步改变拉伸样品的几何形状设计更复杂的应力状态研究其变形行为，并发现非晶合金在拉伸方向上的延伸率可以通过非晶合金样品中应力状态的强度及分布来设计并调控。在此基础上在缺口拉伸样品中设计了局部区域的复杂应力场，获得了可调控的塑性变形。结果表明通过设计复杂应力场可以在非晶合金中调制其锯齿流变至临界状态，从而推迟非晶合金的灾难性断裂。作为力学性能优良的新型结构材料，非晶合金在复杂应力状态下的变形行为研究对它的工业应用具有重要意义。

关键词：非晶合金；复杂应力状态；塑性变形；锯齿流变

D08-36

非晶合金的原子尺寸与弹性模量/玻璃转变温度关联的研究

赵昆

河北科技大学 050018

该文研究了非晶合金的原子尺寸与弹性模量/玻璃转变温度的关系。

通过理论推导与实验数据拟合分析相结合，作者发现在非晶合金中，较小的平均原子尺寸对应于较高的弹性模量和较高的玻璃转变温度，而较小的原子尺寸差异对应于较大的泊松比和较好的力学性能。

原子尺寸对非晶合金性能的影响已有很多研究。在以前的研究中，通常用摩尔体积来表示非晶合金原子尺寸大小。摩尔体积的计算需要用到非晶合金的密度，这在非晶合金制备出来以前是无法获得的，从而不能用来预测非晶合金的性质和指导非晶合金的设计。该论文通过原子半径的数据计算得到非晶合金的平均原子尺寸和原子尺寸差异，并研究了原子尺寸与非晶合金性能的关联。这样就可以从原子半径的数据出发，直接指导非晶合金的成分设计。

本论文的发现对设计具有良好力学性能的非晶合金具有重要的指导意义。

关键词：非晶合金；金属玻璃；原子尺寸；弹性模量；玻璃转变温度

D08-37

基于最大熵结构模型的高熵合金的弹性性质研究

郑淑敏，王绍青

中国科学院金属研究所 110016

高熵合金具有一种新型合金设计理念，一经提出便受到了广泛的关注。实验结果表明高熵合金具有优异的力学性能、摩擦磨损性能、耐腐蚀性、耐高温等性能，成为未来最有发展潜力的新型结构材料之一。

本工作采用了一种研究随机合金的新方法最大熵模型(MaxEnt)，该方法建立了超胞，考虑了合金的晶格畸变，且能够用于研究复杂元素配比的高熵合金。采用了CP2K第一原理密度泛函软件包，该软件包能够有效地模拟超胞。本文研究的高熵合金是体心立方(BCC)和面心立方(FCC)的结构，立方晶体含有三个弹性常数C11, C12和C44。计算结果表明：TiZrNbMoV和AlMoNbTiV的弹性性质与EMTO-CPA的结果接近，且Ta Nb Hf Zr Ti的弹性性质与实验值符合得较好。EMTO-CPA没有考虑局域环境，所以其适用于研究宏观性质。MaxEnt模拟了实际合金块体，所以既适合于研究宏观性质也适合于研究微观局部改变对合金性质的影响，但是MaxEnt建立的是超胞，占用的计算资源较多，两种方法都可以用于研究高熵合金，在实际研究过程中，要根据建模原理选择合适的方法。此外，本文采用MaxEnt方法计算了六元高熵合金Al_{0.5}CoCrCuFeNi的弹性性质。综上，MaxEnt方法可很好地模拟高熵合金，为高熵合金的研究提供了理论依据。

关键词：高熵合金；最大熵模型；弹性常数；第一原理

D08-38

双相高熵合金 Fe₅₀Mn₃₀Co₁₀Cr₁₀ 低温变形机制

李冬月，张勇

北京科技大学 100083

高熵合金是具有独特的无序固溶体结构及优异的力学性能的一代金属材料。本文选用具有面心立方结构和密排六方结构的Fe₅₀Mn₃₀Co₁₀Cr₁₀双相高熵合金，通过真空感应熔炼、锻造、轧制和再结晶等工艺制备高熵合金块体，探究低温条件下其组织结构演变与变形机制。

采用 X 射线衍射仪、扫描电镜、电子背散射、透射电镜和三维原子探针等手段对其变形后的微观结构及组织进行表征；采用不同温度和速率下拉伸对其力学性能进行表征。

结果表明，Fe50Mn30Co10Cr10 高熵合金具有较高的强度和韧性，并且随着温度的降低，其抗拉强度不断提高，而延伸率有所降低，且断口分布大量韧窝。这可能是由于低温条件下 Fe50Mn30Co10Cr10 高熵合金中位错和晶界的相互作用增强，派纳力升高，阻碍位错运动，从而使其强度增加，韧性降低。

关键词：双相高熵合金；低温性能；变形机制

D08-39

金属玻璃复合材料双金属板的力学行为

伍复发

辽宁工业大学 121001

采用真空电弧熔敷方法制备了 TC4/Ti43Zr27Mo5Cu10Be15 和 TA/Ti43Zr27Mo5Cu10Be15 非晶复合材料与钛合金双金属板。结果表明钛基非晶复合材料可以和钛合金基体形成良好的冶金结合，并且非晶复合材料层熔敷后依然保持非晶复合材料的结构。单一的 Ti43Zr27Mo5Cu10Be15 非晶合金复合材料在拉伸变形时，一旦屈服即发生颈缩，表现出强烈的塑性失稳；而与 TA2 纯钛复合后，双金属板的拉伸塑性变形能力表现出强烈的尺寸效应，随着双金属板两层之间的厚度比变化，从灾难性脆性断裂到均匀变形均可以发生；而与 TC4 复合则尺寸效应不如与 TA2 复合明显，整体表现出良好的均匀变形行为。通过对双金属板塑性变形行为及其尺寸效应的深入分析，揭示了钛基非晶复合材料本质上兼具强度和韧性，可以用作普通钛合金的涂层，以提高普通钛合金的表面力学性能。

关键词：非晶合金复合材料；双金属板；力学性能；断裂；尺寸效应

D08-40

基于自由体积模型的剪切带滑移行为研究

邵洋，杨冠南，姚可夫

清华大学材料学院 100084

非晶合金中的塑性变形机制以剪切带的粘性流动或滑移为主。在塑性变形过程中，由于存在剪切膨胀效应，相对于基体部分，剪切带内部的结构会变得更为松散，温度也会随之升高；而在之后的结构弛豫和热耗散过程中，剪切带内部结构和温度又会恢复正常。考虑温度、应变速率以及材料常数的影响，自由体积模型可以定量描述材料中自由体积的产生和湮灭规律，从而很好的解释了非晶合金中玻璃转变温度之上的均匀流变行为和室温下剪切带局域化行为。然而，仍有一些问题无法解释，比如很多模拟计算表明非晶合金的弹性应变可以高达 10%，而试验中大部分的非晶合金的弹性变形应变只有约 2%；自由体积模型认为剪切带的滑移是不稳定事件，一旦开动材料将灾难性的失效，但实验中却可以观察到剪切带停止扩展的现象；即使在所谓的弹性区，研究人员也观察到了一些塑性变形的特征，即剪切带可以在材料较低的全局应力条件下启动。解释这些问题对于认识非晶合金中剪切带扩展行为至关重要。

考虑材料中自由体积的分布及其引起的局部应力集中的影响，结合基本的自由体积模型，我们提出了一个改进的自由体积模型去认识结构不均匀性对非晶合金中剪切带滑移行为的影响。我们的模型可以很好的解释较低的全局屈服强度、剪切带稳态滑移过程、以及弹性区中的流变事件等现象。考虑设备等因素对加载应力的微扰后，该模型亦可揭示非晶合金中锯齿流变现象的物理起源。

关键词：自由体积；结构不均；应力集中；锯齿流变

D08-41

氮气流量对 AlCrTaTiZr 高熵合金氮化物薄膜的膜基结合力和扩散阻挡性能影响

蒋春霞，李荣斌，乔帮威

本文为研究不同氮气流量对 AlCrTaTiZr 高熵合金氮化物薄膜的膜基结合力和扩散阻挡性能的影响。采用磁控溅射方法在 Si 基体上制备了不同氮气流量的 AlCrTaTiZrNX(HEANX)高熵合金氮化物薄膜和不同氮气流量的 Si/HEANX/Cu 薄膜体系。使用 TEM、APT、SEM、AFM、4PP、XRD 和多功能力学试验机研究了不同氮气流量对 HEANX 薄膜的膜基结合力和扩散阻挡性能的影响。

实验结果表明：HEANX 薄膜晶体为单一的面心立方结构(FCC)，其内部元素分布均匀且无晶界偏析存在；随着氮气流量的增加薄膜与基体的结合力先增加后降低，当氮气流量为 20%(N₂:5sccm,Ar₂:20sccm) 时，HEAN20 薄膜呈现出最高的膜基结合力 440mN。800℃退火后，Si/HEAN20/Cu 薄膜层间界面清晰，各层薄膜未发生扩散。相应 Si/HEAN20/Cu 体系的方阻由 0.674Ω/sq 降低至 0.081Ω/sq，无深能级的 Cu-Si 相产生，故 HEAN20 薄膜有效地阻挡了 Cu 原子的扩散。在 HEAN20 薄膜中，由于氮含量适中，氮原子仅与各金属原子形成金属氮化物，从而提高了阻挡层的致密度；同时，HEAN20 薄膜为纳米晶结构且晶格畸变较大，从而无法为 Cu 原子扩散提供通道，造成了 Cu 原子在 HEAN20 中的扩散激活能升高，因此 HEAN20 薄膜具有最佳的扩散阻挡性能。

关键词：氮气流量；高熵合金；膜基结合力；扩散阻挡层；热稳定性

D08-42

具有显著加工硬化性能的钛基非晶复合材料的变形机制

范婧，乔珺威

太原理工大学 030024

非晶复合材料在室温静态拉伸下的均匀塑性变形是其工程应用的重要条件。因此，认识非晶复合材料在拉伸条件下的变形机制就显得尤为重要。本研究通过对 Ti-Zr-Ni-Ta-Be 体系的钛基非晶复合材料进行室温静态拉伸实验，对其不同阶段的变形行为进行了分析。本研究中的非晶复合材料在室温拉伸中显示了显著的加工硬化行为，位错强化是其主要变形机理。本研究通过对枝晶部分的强化作用与非晶基体中变形机制的结合，揭示了位错强化在非晶基体以及枝晶第二相之间的作用，进而，解释了该研究中的非晶复合材料的宏观加工硬化行为的变形机制。

关键词：非晶复合材料；加工硬化；位错强化

D08-43

非晶合金中锯齿流变动力学对应变速率的响应行为

李娇娇，乔珺威

太原理工大学 030024

非晶合金塑性变形过程中由于剪切局域化会引发间歇性的滑移雪崩锯齿行为，反映到应力-应变曲线上表现为应力降或应变突进。锯齿流变动力学的研究可以间接探索非晶塑性变形过程中剪切局域区的结构变化及变形机理。借助经典的统计学对 Zr 基非晶不同应变速率下的应力降分布规律分析发现，随应变速率的增加出现了从峰值分布向幂律分布转变的特点，对应幂律分布下的试样塑性较好。此外，锯齿流最大值这一参数可以判断试样断裂的可能性，通过简单而明智的“平均场理论”对一种新颖的大塑性 Fe 基非晶研究得到该参数受应变速率可调，进而可以给出不同应变速率下雪崩事件的大统一标度行为，这一规律可以预测该体系其它应变速率下的锯齿流分布情况。这些动力学标度结果为我们进一步分析非晶变形的物理机制提供了思路。

关键词：非晶合金；锯齿流变；应变速率；动力学

D08-44

高熵合金的发现和发展

张勇

北京科技大学新金属材料国家重点实验室 100083

探索新材料是人类永恒的目标之一。传统探索新材料的方法主要是通过改变和调制化学成分，调制结构及物相、调制结构缺陷来获得新材料。近几十年来，人们发现通过调制材料的“序”或者“熵”，也能获得新型材料。如非晶合金就是典型的通过快速凝固，引入“结构无序”而获得的高性能合金材料。实际上，通过改变和调制“结构序”、“化学序”都可以获得性能独特的新材料。高熵合金就是近年来采用多组元混合引入“化学无序”获得的新型材料。所以，高熵合金实际上还有不同的名字，如多组元合金、多主元合金、成分复杂合金、高浓度复杂合金、高浓度固溶体合金、多基元合金等。从波尔兹曼的“构型熵”公式不难发现，高熵合金或材料表现为更多的组元（组分）和更高的组元（组分）浓度。从热力学上看高熵合金可以具有更低的吉布斯自由能，在某些情况下可能表现出更高的相和组织稳定性。动力学上，高熵合金或材料表现出缓慢和迟滞的特性，当然材料的特性绝不是仅仅由“熵”决定的，热力学焓的作用也非常重要。按照公开发表的文献，高熵合金至今已经 13 年，经历了两代：第一代是等原子比-单相高熵合金；第二代是非等原子比-双相高熵合金。近年来的研究发现高熵合金具有宽温域高韧性、耐辐照等特点。

关键词：高熵合金；宽温域高韧性；耐辐照；相形成；相稳定性

D08-45

表面机械研磨处理调控金属玻璃流变单元及塑性形变行为研究

王庆^{1,2}, 孙康¹, 王刚¹, 刘锦川², 杨勇², 吕坚²

1. 上海大学 材料科学与工程学院 材料研究所
2. 香港城市大学 机械与生物医学工程系 先进结构材料研究中心

前期有大量研究结果表明，大塑性形变能在金属玻璃中引入过剩自由体积，有效改变金属玻璃原子尺度局域拓扑结构；但对可能同时诱导产生的原子有序化甚至纳米晶化对金属玻璃的流变单元和塑性形变行为的影响，相对而言则不够系统深入。

在本工作中，为深入理解金属玻璃流变单元演化和塑性形变行为的内在关系，我们首先利用 X-ray 衍射仪、示差扫描量热仪、（高分辨）透射电子显微镜表征了在表面机械研磨循环加载条件下，金属玻璃微结构随大塑性形变的演化，以及处理参数对其的影响；进一步，我们结合不同压头（包括 Berkovich 球形）纳米压入实验和准静态压缩、拉伸实验分析表征了金属玻璃材料的屈服、塑性流变单元及行为和其随形变诱导原子结构改变的演化。

研究表明，依赖于处理条件，随表层塑性变形速率或大小变化，金属玻璃表层在形成更多过剩自由体积，同时也能引发热或应变驱动的结构弛豫和纳米晶化；上述这两个竞争过程会诱导金属玻璃流变单元行为的改变，进而影响其宏观屈服和塑性剪切流变行为。

关键词：金属玻璃；表面机械研磨处理；微结构；流变单元；塑性变形

D08-46

熔体快淬速度对 Ni-Ti-Zr-Cr 非晶条带力学性能及断口形貌的影响

侯雪玲, 王晓晨, 王建新, 姜冰, 徐晖

上海大学材料研究所 200072

非晶合金由于其原子结构长程无序、短程有序等特点，表现出优异的力学性能[1]。是未来有广阔应用前景的重要结构材料。本文研究了在熔体快淬过程中，快淬速度对 Ni-Ti-Zr-Cr 非晶合金力学性能的影响。在实验中，当快淬速度由 30 m/s 变化到 45 m/s 时，合金快淬条带均呈非晶态，且非晶合金的力学性能随着快淬速度的增加而增加，当快淬速度由 30 m/s 增加到 45 m/s 时，抗拉强度和延伸率分别由 224MPa, 0.28% 提高到 543MPa 和 1.1%。当快淬速度为 45 m/s 时，非晶条带的应力-应变曲线上出现锯齿状。通过对不同快淬速度非晶条带断口形貌的分析，发现快淬速度为 45 m/s 的非晶条带断裂面出现了脉状纹络，表明此合

金有较好的韧性。脉状纹络的形成是由于样品在断裂前沿剪切带局部的粘度变化引起。因为剪切带可以在短时间内迅速穿过非晶样品内部，使合金发生不均匀塑性变形而瞬时断裂，这种瞬间断裂，使应力应变曲线出现锯齿状流变现象，它是快淬速度为 45 m/s 的非晶条带应力-应变曲线上出现锯齿状和延伸率提高的原因。通过对不同快淬速度的非晶快淬条带断口进行能谱分析发现，快淬速度为 30 m/s 时，非晶基体中的合金元素 Zr、Ni 和 Cr 出现了偏聚。当快淬速度提高到 45m/s 时，其非晶基体中的元素原子百分比与原始成分一致。显然，随着快淬速度的提高，在凝固过程获得的非晶合金基体成分更加均匀，合金的力学性能也随之提高。

关键词：Ni-Ti-Zr-Cr 非晶条带；快淬速度；力学性能；断口形貌

D08-47

磁控溅射 CoCrFeNiAl_{0.3} 高熵合金薄膜的力学性能研究

廖卫兵，于春燕，黄建军

深圳大学物理与能源学院 518060

将高熵合金制备成薄膜形状，不仅减少了工业使用原材料成本，也充分利用了高熵合金各种优异的力学性能，从而最大限度地发挥高熵合金在工业上的应用优势。然而，目前对于高熵合金薄膜小尺度下的力学性能研究很少，对其在小尺度加载环境下的微观变形机理尚不清楚，使其在工业上的广泛应用受到一定限制。本文意在通过研究高熵合金薄膜在微纳米尺度下的力学性能，并建立相应的微观变形机理，为高熵合金薄膜在微纳米尺度的应用提供理论模型。

本文采用磁控溅射技术制备 CoCrFeNiAl_{0.3} 高熵合金薄膜，用扫描电镜和原子力显微镜对高熵合金薄膜表面进行了显微分析，之后利用高能 X 射线分析了薄膜的相结构，采用纳米压痕技术测试了薄膜的硬度和弹性模量，之后采用聚焦离子束在薄膜表面切出圆柱状样品，再通过原位压缩实验测试了薄膜的强度和塑性变形。对薄膜的显微结构采用了透射电镜进行了详细观察。

实验发现高熵合金薄膜的表面光滑，但通过放大后发现，其表面存在许多的纳米结构，而且这些纳米结构随着溅射时间逐渐变化，其硬度为 11.2 GPa，杨氏模量为 191 GPa，其屈服强度达到了 1000 MPa，断裂强度达到了 2000 MPa，这是同成分块体高熵合金的约 3 倍。

本文研究发现，通过磁控溅射是一种有效的方法制备高熵合金薄膜，获得的高熵合金薄膜的强度和硬度很高，是同成分块体材料的 3 倍左右，这主要和高熵合金薄膜内部的纳米晶和非晶结构有关系。

关键词：高熵合金；薄膜；原位压缩；变形行为

D08-48

Al_{0.3}CoCrFeNi 高熵合金高温变形行为以及热加工图研究

童钰，乔吉超，姚尧

西北工业大学 710129

本研究以 FCC 结构的 Al_{0.3}CoCrFeNi 高熵合金为研究对象，借助 Gleeble-1500 进行高温压缩试验探索高熵合金的高温变形行为。试验在温度为 700~950℃ 及应变速率为 $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-1} \text{s}^{-1}$ 的条件下对样品压缩变形 50%。通过分析变形过程中的应变率敏感指数 (m)、应变硬化指数 (n)、激活能 (Q) 和热加工图来研究和揭示高熵合金的高温变形机理。由应变、应变率及变形温度确定的本构方程将用于模拟和预演试验现象。试验结果中的 m 值和 Q 值随应变率的变化趋势可分为两部分，同时也预示着 Al_{0.3}CoCrFeNi 高熵合金在变加载速率的高温变形过程中的变形方式会发生改变。

关键词：高熵合金；高温变形；热加工图

D08-49

Zr-Cu-Ti-Ni-Al 大块金属玻璃的液态-液态相变机制研究

董蔚霞¹, 陈涵悦^{#1}, 方旖旎¹, 郭春雨¹, 王循理², 兰司^{*1,2}

1. 南京理工大学材料科学与工程学院格莱特纳米科技研究所
2. 香港城市大学物理与材料科学系

Zr52.5Cu17.9Ni14.6Al10Ti5 合金 (BAM11) 因其优异的玻璃形成能力和廉价的成本而具有巨大的应用前景。利用热处理引发液态相分离, 从而调控锆基金属玻璃的内部结构, 可以改进合金的性能。但该体系主组元之间都具有负混合焓, 因此该合金在超过冷液态区间是否会发生液态相分离仍然具有很大的争议。据最新报道, 锆基金属玻璃在超过冷液相区间会发生液-液相变。尤其是对于典型的在结晶前具有异常放热现象的 BAM11, 有待进一步探明其液态相变机制。

本文利用差式扫描量热分析、X-射线衍射、小角散射以及透射电子显微镜研究了 BAM11 在超过冷液态区间的液态-液态相变机制。同时, 利用纳米压痕仪研究了具有纳米尺度不均匀结构的金属玻璃的力学性能响应行为。

热分析发现, 在超过冷液态区间保温, BAM11 具有两个清晰的放热峰, 暗示在结晶之前发生了结构转变。通过 X-射线衍射对不同保温时间样品进行表征, 发现保温至第一个放热峰中间的玻璃 (中间态) 具有与初始态和结晶态截然不同的衍射谱。小角散射测试表明中间态合金是不均匀的, 同时其特征尺度为 20-30nm。电子显微镜明场相确认了小角散射的观测结果, 同时电子衍射结果表明中间态合金仍然为非晶态。成分分析显示中间态合金具有相对均匀的成分分布。BAM11 力学测试结果的统计分析表明初始态和中间态的弹性模量相当, 而在硬度方面, 中间态的表面硬度要比结晶态和初始态的大, 其中中间态、结晶态及初始态的平均表面硬度分别为 8.87Gpa, 8.11Gpa, 7.71Gpa, 中间态的平均表面硬度要比结晶态和初始态的分别高出 9.36%、15.05%。

上述结构分析结果表明 BAM11 发生了液-液相变, 通过恰当的热处理可以制备获得具有纳米尺度非均匀结构的高硬度的纳米非晶合金。

#董蔚霞和陈涵悦贡献相当;

*通讯邮箱: lansi@njust.edu.cn

关键词: 大块金属玻璃; 液态-液态相变; 纳米非晶; 力学响应

D08-50

粉末冶金高熵合金的析出强化行为

刘彬, 刘咏, 王家文, 张翠

中南大学粉末冶金国家重点实验室 410083

高熵合金由于合金组元多、含量高, 铸造过程易形成粗大的枝晶、严重的成分偏析和其他复杂的脆性金属间化合物相, 限制了力学性能。粉末冶金技术通过高冷速抑制枝晶和偏析的形成, 可从根本上解决组织粗大、成分偏析、相组成杂乱等问题, 同时粉末快速凝固能够显著提高合金元素的过饱和固溶度, 在后续热处理过程中通过控制第二相析出可进一步提高性能。本研究针对粉末冶金高熵合金的热 (机械) 处理析出强化行为进行研究, 主要探讨热 (机械) 处理对粉末冶金高熵合金析出行为及力学性能的影响, 阐明粉末冶金高熵合金的析出强化机理。结果表明, 适当的热处理工艺可于晶内弥散析出纳米至微米尺度的第二相, 第二相析出的同时合金的强度得到显著提高, 同时还保持良好的韧性。此外, 热机械处理能改善合金的微观组织, 加速第二相析出进程, 显著提高合金的力学性能。

关键词: 粉末冶金; 高熵合金; 析出强化; 力学性能

D08-51

高熵合金的高温高压稳定性及其激光 3D 打印浅析

严明^{1,*}, 刘彬², 宋廷廷³, 陈鹏¹, 刘咏², Ma Qian³

1. 南方科技大学 材料科学与工程, 深圳 518055

2. 中南大学 粉末冶金研究院, 长沙 410083

3. 皇家墨尔本理工大学 工学院 澳大利亚墨尔本 3000

过去 60 年中, 高温合金的使用温度上限大致仅以每年 5 度的速度提升, 研究进展相对缓慢。寻找更优的高温合金材料成为具有战略意义的一件材料科学所面临的重大挑战。

高熵合金的出现, 使得获得更优的高温合金材料成为可能。研究表明^[1, 2], BCC 晶体结构的 V20Nb20Mo20Ta20W20, 其高温拉伸性能明显高于现有的镍基高温合金如 Inconel 718。高熵合金呈现的独特力学性能和组织性能(如高的混合熵)迅速引起了材料科学与工程领域的极大兴趣(Ref. 1: Senkov et al. *Intermetallics* 19 (2011) 698-706; Ref. 2: Zhang et al. *Progress in Materials Science* 61, 2014: 1-93)。

然而目前而言, 对于高熵合金在接近于服役条件下(高温+高压)的相稳定性以及相变行为的研究结果极少。确定高熵合金在高温高压下的相变行为有着重要的材料科学以及工程应用价值, 至少有助于理解:

- (1) BCC 晶体结构在怎样的条件下会发生相变?
- (2) BCC 晶体结构在高温高压下的相应稳定相是什么
- (3) 对相变起决定意义的因素是什么?
- (4) 高熵合金的高温高压相变是扩散型的还是切变型的?

本研究将利用高温砷对 V20Nb20Mo20Ta20W20 高熵合金进行原位加热加压(压力范围在 10 GPa 以内, 温度范围为 1000 摄氏度以内), 同时利用高能 X 射线衍射对其相变进行系统研究。高熵合金的选区激光熔化 3D 打印&增材制造也将被简短的讨论到。

关键词: 高熵合金; V20Nb20Mo20Ta20W20; 高温合金; 高温高压相变; 3D 打印&增材制造; 选区激光熔化 (SLM); 激光能量密度

D08-52

机械退火对 Zr 基非晶合金力学性能的影响

谭军

昆明理工大学 650093

退火是一种常见的金属热处理工艺, 指的是将金属缓慢加热到一定温度, 保持足够时间, 然后以适宜速度冷却。目的是降低硬度, 改善切削加工性; 消除残余应力, 稳定尺寸, 减少变形与裂纹倾向; 细化晶粒, 调整组织, 消除组织缺陷。而我们在此采用预加载的方式, 向非晶合金中输入能量(命名为“机械退火”), 观察非晶合金结构及性能的变化。我们选用了非晶形成能力和力学性能兼具的 Zr56Co24Al20 大块金属玻璃, 分别在 1900MPa、1700MPa 和 1500MPa (均在屈服强度以下) 恒定压强下持续 40h, 55h 和 70h, 研究发现, 在预加载后, 密度都出现上升的趋势。卸载后放置 30 天以上, 重新压缩测试, 发现屈服强度都有所下降, 而且在塑性阶段锯齿流变幅度增大。

关键词: 机械退火; 非晶合金; 力学性能

D08-53

CuZrAl 非晶合金的蠕变行为及物理机制

乔吉超^{1,1,3}, 王云江², Jean-Marc Pelletier³, 姚尧¹

1. 西北工业大学

2. 中国科学院力学研究所

3. INSA de Lyon, France

The dynamic heterogeneity is an inherent nature of metallic glasses (MGs) due to their inhomogeneous structure down to atomic-scale. But a quantitative relationship between the dynamic feature and deformation modes of MGs is far from fully established compared with their crystalline counterparts. Here extensive creep experiments—constant loading with constant temperature—are conducted to quantitatively explore the dynamic

heterogeneity of MG from a thermodynamic perspective. We found an anomalous creep phenomenon characterized by the increased activation Helmholtz free energy and activation volume with increasing temperature while the creep is always governed by diffusive mechanism in the explored temperature-stress regime.

关键词：金属玻璃；蠕变；扩散；结构非均匀性

D08-54

Cu50Zr50 二元非晶合金拉伸蠕变行为及其激活能-温度谱研究

洪凯¹, 吴林¹, 蒋伟¹, 张博^{1,2}

1. 合肥工业大学材料科学与工程学院非晶态物质科学研究所, 安徽 合肥 230009

2. 安徽省功能材料与器件重点实验室, 安徽 合肥 230009

本文选用 Cu50Zr50 非晶薄带此经典二元等原子比非晶态模型材料作为研究对象, 通过动态力学拉伸蠕变技术, 对该材料从高于室温到过冷液相区宽温度区间的蠕变行为进行系统定量的研究, 并结合流变单元理论进行讨论。得到主要的实验结果如下: 1. 该材料蠕变变形各个阶段体现出不同的弹性、粘弹性和粘性。随着温度升高, 材料由弹性逐渐向粘性发生转变, 流变单元增加。同时对应变-时间曲线微分后得到应变速率-时间曲线, 发现应变速率随着时间推移下降后逐渐稳定, 从而得到各个温度下的稳态应变速率。稳态应变速率随着温度的升高增加。2. 假设蠕变表观激活能随着温度变化非固定值, 根据 Arrhenius 方程得到各个温度下的激活能即温度-激活能谱。在较低温度范围内, 激活能基本不变, 在 β 弛豫温度范围区间开始出现波动, 当温度进一步升高进入 α 弛豫温度范围与过冷液相区间, 激活能急剧增大, 并在玻璃转变温度附近出现峰值。3. 通过改变蠕变应力重复实验, 发现随着应力增大, 整体上各个温度下的激活能有所增大, 此结论进一步验证形变单元随着应力增大数量增加的结论。

关键词：非晶合金；蠕变；激活能；流变单元

D08-55

一种 B2 相强化的 FeCrMo0.2Al0.5Ni0.5 高熵合金

董勇, 程永奇, 章争荣, 肖小亭

广东工业大学 材料与能源学院, 广州 510006 中国

采用真空电弧熔炼方法制备了 FeCrMo0.2Al0.5Ni0.5 多主元高熵合金, 通过高分辨 X 射线衍射仪、扫描电镜、及硬度、压缩试验对 FeCrMo0.2Al0.5Ni0.5 合金进行了显微组织和力学性能分析。研究表明, 该合金具有典型的树枝晶/枝晶间隙结构, 且随着凝固温度的降低, 大量的、弥散的第二相在树枝晶中析出。结合能谱和 XRD 结果可知, 树枝晶基体为富含 Fe、Cr 和 Mo 元素的 BCC 相, 枝晶间隙和第二相为富含 Al、Ni 元素的 B2 相。压缩试验结果显示, 不含有 B2 相的 FeCrMo0.2 合金压缩 50% 不发生断裂, 屈服强度为 550MPa, 而析出 B2 相的 FeCrMo0.2Al0.5Ni0.5 合金屈服强度高达 1600MPa, 硬度也从 Hv380 升高至 Hv522。经分析发现, 主要的强化机制为析出相强化和固溶强化。该合金良好的压缩力学性能使其在模具、刀具行业具有潜在的应用价值。

关键词：多主元高熵合金；微观组织结构；第二相强化；固溶强化；力学性能

D08-56

Hardening by annealing and abnormal Hall-Petch relationship in nanocrystalline elements and alloys

T. D. Shen

Yanshan University

We have found a hardening effect in annealed iron- and nickel-based nanocrystalline (NC) alloys and a softening effect in annealed pure NC iron. As a result, abnormal Hall-Petch relations were observed in annealed NC alloys. These abnormal phenomena could be explained by the segregation of solutes and/or impurities in the grain

boundary because of three evidence: i) hardening by annealing has been observed in many annealed NC alloys and low-purity (< 99%) NC metals, but not in annealed high-purity (> 99.9%) NC metals; ii) annealing embrittlement; and iii) cooling rate dependent microhardness. In addition, our experiment results suggest that i) the dislocations stored in the grain interiors of NC alloys do not change the microhardness, and ii) it is the grain size and the grain boundary structure, rather than the dislocations stored in the grain interiors, that determines the strength of deformed and annealed NC elements and alloys.

D08-57

Stick-slip dynamics in a Ni₆₂Nb₃₈ metallic glass film during nanoscratch

Gang Wang, Dongxue Han, Kang Sun

Shanghai University

The stick-slip dynamics during nanoscratch is investigated for the Ni₆₂Nb₃₈ metallic glass. The detrended fluctuation analysis is introduced to explore the influence of loading force on the temporal scaling and stick-slip behavior. The self-similar characteristics and complexity in the temporal scale of the lateral force signal are investigated. A modified Cauchy class model is used for the stochastic stick-slip process, which connects the fractal dimension and the Hurst exponent and features the positive correlation process. The confidence intervals of the differential friction coefficient at different loading forces elucidate the inhomogeneous (and homogeneous) shear-branching processes during the nanoscratch process. The paper will enhance the understanding of the deformation of the metallic glasses.

Keywords: stick-slip; dynamics; metallic; glass; nanoscratch

D08-58

Transformation-induced plasticity in Ti-based bulk metallic glass composites

Kaikai Song

Shandong University (weihai)

Recently, in situ fabricated bulk metallic glass composites (BMGCs) reinforced shape memory phase have attracted much attentions due to their relatively high strength and obvious tensile plasticity. Until now, depending on the nature of the shape memory phase in the glassy matrix, the currently widely-studied BMGCs reinforced shape memory phase can be classified into two main groups: (1) CuZr-based BMGCs with the presence of B2 CuZr shape memory crystals in the glassy matrix, and (2) Zr/Ti-based BMGCs with the precipitation of beta-Zr/Ti dendrites which can transform into alpha" martensites. However, during deformation of latter alloy systems, one toxic Be element must be usually used as micro alloying elements in order to maintain the relatively high glass-forming ability and the formation of beta-Zr/Ti dendrites in the glassy matrix, which seriously restrict their widespread applications as engineering materials. So far, less studies are being focusing on the transformation-induced plasticity in Ti-based BMGCs without containing any Be element. In the present work, a series of TiCuNi-based BMGCs with the shape memory crystals embedding in the glassy matrix have been successfully explored. The shape memory crystals in the glassy matrix has been identified to be B2 Ti(Ni,Cu) phase, which can transform into Ti(Ni,Cu) martensites during deformation and then provide relatively high work-hardening effect. Besides, the multiple shear bands can be easily induced at the crystalline-amorphous interfaces and then their subsequent rapid propagation would be effectively inhibited due to the presence of B2 crystals in the glassy matrix, leading to the enhancement of ductility together with a relatively high strength. The present studies could extend the studies on the BMGCs and could provide a good candidate for the future application of BMGCs.

Keywords: Bulk metallic glasses; Composites; Shear bands; Martensitic transformation; Mechanical properties

D08-59

Effect of X (Sc, Ti, V, Cr, Co, Ni, Cu and Zn) element substitution on the electronic structure, mechanical properties of Fe₃AlC: A first principle study

Rong-da Zhao¹, Tao Zhang¹, Fu-fa Wu¹, Jing-chuan Zhu², Xin Liu³, Zuo-Fu Zhao¹, Hong-bo Ba¹, Sheng-nan Ma¹

1. Liaoning University of Technology
2. Harbin Institute of Technology
3. Special Equipment Supervision Inspection Institute of Jin Zhou

The first-principle calculations based on density functional theory (DFT) have been used to investigate the effect of X (Sc, Ti, V, Cr, Co, Ni, Cu and Zn) element substitution on structural and mechanical properties of Fe₃AlC compound. The calculated formation enthalpy shows that the compounds with different alloy element are stable except the element Cu and Zn substitution in the Fe place or Al place of the Fe₃AlC. The effect of the different alloy elements on the independent elastic constants and the polycrystalline mechanical properties were calculated and discussed, such as bulk modulus B, shear modulus G, Young's modulus *E*, Poisson's ratio *v* and Vickers hardness *H_v*. The higher B/G and Vickers hardness *H_v* are obtained by the addition Cr atom in Al and Fe place, respectively, which means that the existence of Cr atoms can improve the ductility and strength of the Fe₃AlC. Furthermore, the density of states, the electron density difference, the population analysis and magnetic moment of Fe₂₄Al₇C₈Cr has been also calculated to explain the mechanism of the structural stability, the chemical bonding and magnetization mechanism for the addition of Cr into the Fe₃AlC at the electron level. In addition, the electronic structure of Fe₂₄Al₇C₈Cr indicates that the effect of the Cr on ductility of the Fe₃AlC is attributed to the strongly hybridization between the p states of C and Al, the d states of Cr and Fe, and the s states of Al, appearing around Fermi level. The occurrence of the hybridization between different atoms indicates that the covalent bonding is formed in the compounds or phases, resulting in stronger structural stability. The findings explain the strengthening and toughening mechanisms in the Fe-Al-C alloys with Cr addition and provide paths to achieve ductile and light Fe-Al-C alloys.

Keywords: First-principle; Fe₃AlC; Ductility; Elastic properties; Electronic structure

D08-60

高应变速率下, CoCrFeNiMn 高熵合金的力学响应和组织演变

刘俊鹏¹, 卞祥德², 武晓雷², 张勇¹

1. 北京科技大学 新金属材料国家重点实验室
2. 中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室

CoCrFeNiMn 做为典型的面心立方高熵合金, 具备诸多优异的性能。之前的关于高熵合金的霍普金森实验表明, 面心立方高熵合金具有很优异的抗剪切能力, 在极高应变速率的环境下尤其表现突出。然而, 针对此极限环境下的研究并不深入, 其详细的组织演变规律并不明晰。

本文通过霍普金森高速加载实验, 来详细研究面心立方高熵合金在高应变速率下的力学响应和组织演变过程。

研究发现, 相较于传统材料, CoCrFeNiMn 高熵合金在高应变速率下, 具备优异的性能和高的强塑积, 在防撞吸能材料领域具有很强的应用潜力。

关键词: 高熵合金; 高速加载; 组织演变

D08-61

选区激光熔化成型硅黄铜合金的工艺和组织性能研究

赵延杰, 杨超

华南理工大学 510000

黄铜有优良的机械性能、耐腐蚀性能、导电导热性能及良好的工艺性能,同时还具有色泽美丽的外观,广泛应用到航空航天、电子电讯、五金装饰、仪表等领域,是有色金属中应用最广泛的合金材料之一.但传统的黄铜精密复杂零件采用的铸造加工工艺普遍存在有冷却速度慢,铸造件的晶粒粗大,容易出现成分偏析和一些常见的缺陷等问题,不仅会严重影响黄铜合金的力学性能,还会降低黄铜的耐腐蚀性能,同时其铸造工艺不能成形某些复杂和优异性能的结构,严重影响黄铜合金的推广和使用.而选区激光熔化(Selective Laser Melting)作为一种最新发展的快速成型技术,它利用金属粉末在激光束的热作用下完全融化后凝固而成型零件,特别适合壁薄、内腔复杂、内流道等传统加工技术难以实现的复杂薄壁精密构件的制造,且选区熔化工艺特有的高冷却速率以及高过冷度,使得制备的零件组织细小致密、成分均匀、性能优异.因此,如果能够运用选区激光熔化工艺成功制备出黄铜合金,预期可成型复杂结构的黄铜零件并改善其力学性能,具有极其重要的科学和工程意义,然而,由于锌元素的活性高,沸点低,易挥发,而铜元素的低激光吸收率和高导热系数,从而探索在激光成型黄铜合金时,激光输出热量既能抑制锌元素挥发,又能使黄铜粉末完全熔化的工艺参数存在一定的难度.目前,通过选区激光成型工艺成型黄铜合金鲜有成功报道.

本文以气雾化制备的硅黄铜合金粉末为原料,基于选区激光成型工艺,通过调控激光成型参数,成功制备出致密度可达98.8%的HSi80-3硅黄铜合金.合金晶粒细小,其显微组织由FCC的 α -Cu相和 κ -Cu₇Si相组成,合金的屈服强度达到275MPa,显微硬度达到203.5HV,均高于同成分铸件;抗拉强度为371.5MPa,延伸率为7.5%,与铸造件相当.

研究结果为制备复杂结构的高性能黄铜合金零件提供了一种新方法.

关键词: 硅黄铜; 选区激光熔化; 气雾化粉末; 力学性能

D08-62

高通量筛选 AlMgZnCuSi 轻质高熵合金

李蕊轩, 张勇

北京科技大学

轻质合金因其较高的比强度和比模量而在航空航天、汽车电子等领域得到了广泛的应用,但目前其设计思路大多局限于选取一到两个主元素再添加微量元素的方法获得所期望的性能.近些年发展起来的高熵合金拥有较高的混合熵能使固溶体相得到稳定,因而表现出许多优异的性能,它的发展为轻质合金的设计打开了新的思路.因为高熵合金最少包含5种主元,且每种主元百分比在5%到35%之间,所以使用传统的试错法设计合金成分时过程将更加复杂,耗时更长.我们试图通过高通量计算并筛选出可能表现出高性能的、具有合适成分的轻质高熵合金,已有研究通过利用相图计算等方法成功预测出单相高熵合金,明显缩短了成分设计时间.本文以轻质 AlMgZnCuSi 高熵合金为例,对其进行高通量筛选,得到同时满足单相固溶体结构、低密度和低成本的合金成分,再结合实验进行验证,从而迅速获得最合成分配比的合金,这一过程有助于指导快速设计新型轻质高熵合金.

关键词: 高熵合金; 轻质合金; 高通量计算

墙展

D08-P01

金属玻璃(La_{0.5}Ce_{0.5})₆₅Al₁₀Co_{25-x}Cu_x 的脆度系数随成分的变化

宋丽建¹, 李然², 许巍¹, 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. 北京航空航天大学

Angell 提出用“脆度”的概念来表征过冷液体粘度的不同, 人们发现脆度与玻璃形成能力、泊松比等有密切联系。研究表明原子间的混合焓显著影响金属玻璃 β 弛豫行为, 且 β 弛豫与脆度有关, 但平均混合焓与脆度间的关系尚未建立。

前人通过调控 $(\text{La}_{0.5}\text{Ce}_{0.5})_{65}\text{Al}_{10}\text{Co}_{25-x}\text{Cu}_x$ ($x=0, 5, 10, 15, 20, 25$) 相似元素的配比显著提高了体系的玻璃形成能力, 且随成分变化玻璃形成能力出现极大值。我们通过高精度闪速差示扫描量热仪 (Flash DSC) 进一步研究了该体系过冷液相区的玻璃转变行为。

发现脆度随成分变化也存在极大值, 且脆度与平均混合焓间存在单调关系。

表明该体系的脆度由平均混合焓决定, 该工作为进一步研究 β 弛豫、脆度和混合焓间的关系以及调控金属玻璃弛豫行为提供了基础。

关键词: 金属玻璃; 脆度; 混合焓

D08-P02

二元 Cu-Ti 非晶合金薄膜的脱合金化与纳米多孔材料制备

胡青卓, 吴继礼, 张博

合肥工业大学材料科学与工程学院 230009

纳米多孔材料的概念是相对于传统材料而提出的, 它具有很多优异的特性, 具有相对密度低、重量轻、比表面积高、比强度高、高导电率和高导热率等优点, 使其在催化与活化剂、传感器、燃料电池及量子尺寸效应等众多领域有着潜在的应用价值[1-2]。目前, 制备纳米多孔材料主要有模板法和脱合金化方法[3]。相比于模板法, 脱合金化法制备的多孔材料工艺过程简单, 且对于材料的孔洞排列方式与孔径尺寸可进行动态控制。因此, 脱合金化法是现在制备多孔材料较常用的方法。

本文同样采用脱合金化方法, 以二元 Cu-Ti 非晶合金薄膜材料为前驱体, 以碱性溶液作为脱合金腐蚀溶液, 制备出了以纳米纤维堆积的“鸟窝”状多孔材料。通过 X 射线衍射 (XRD) 和 X 射线光电子能谱 (XPS) 的表征可以确定该材料主要由 TiO_2 构成, 并掺杂少量的 Cu 元素。场发射扫描电子显微镜 (FE-SEM) 观察表面形貌, 发现多孔材料形貌与孔径随着腐蚀时间不同有着显著的变化, 当腐蚀时间为 1 天时, 发现表面未完全腐蚀; 腐蚀时间为 2 天和 3 天时, 在微孔周围出现了纤维组织; 之后随着腐蚀时间延长到 4、5、6 天, 微孔径变小, 纤维组织长大粗化。该结论也得到了透射电子显微 (TEM) 分析结果的佐证, 同时电子选区衍射 (SAED) 与 X 射线能谱 (EDS) 分析证明了该材料主要由 TiO_2 构成。

1. D. Kramer, R.N. Viswanath, J. Weissmuller, Nano Lett. 4 (2004) 793.

2. Y. Ding, M.W. Chen, J. Erlebacher, J. Am. Chem. Soc. 126 (2004) 6876.

3. J. Erlebacher, M.J. Aziz, A. Karma, N. Dimitrov, Nature 410 (2001) 450-453.

关键词: 纳米多孔材料; 脱合金化方法; 非晶合金薄膜

D08-P03

LaCe 基块体高熵金属玻璃及其明显 β 弛豫行为

蒋伟, 吴继礼, 张博

合肥工业大学材料科学与工程学院非晶态物质科学研究所 230009

具有非晶态本质的块体高熵金属玻璃突破了传统金属材料的成分中有一种或两种占绝大多数的元素, 也突破了传统金属玻璃的成分设计原则。因其成分特征和结构特征使其具有很多独特的性能从而引起广泛关注。金属玻璃是一种亚稳态物质, 会自发的向平衡态转变发生弛豫, 目前弛豫行为研究主要集中在 β 弛

豫机制上，其表现形式有峰，肩膀峰和过剩翘等不同的明显程度，且只在少数金属玻璃体系具有明显的 β 弛豫。

本文开发了一种含有稀土元素镧(La)和铈(Ce)块体高熵金属玻璃体系，使用动态力学分析仪(DMA)的单悬臂梁测试方法系统的测量了该系列高熵金属玻璃的温度-模量谱和频率-模量谱。温度弛豫谱上发现其在 372K 左右具有明显的 β 弛豫峰，并随着频率的增加 β 弛豫峰向高温移动。在室温到 T_g 的温度区间内，间隔 5K 取一个点，测得等温条件下频率依赖的动态力学弛豫谱，发现其在低频处也具有明显 β 弛豫峰，并且随着温度增加 β 弛豫峰向高频移动。通过 Arrhenius 方程拟合得到其变温和等温条件下的 β 弛豫激活能，这两种条件下拟合得到的激活能数值相近，并且符合 $E\beta/RT_g$ 都在 20-30 之间。通过结合原子间的混合焓和熵值对 β 弛豫行为进行分析。高熵金属玻璃由于接近等原子比的特性，所以少了溶质和溶剂原子概念的影响，对我们探究 β 弛豫起源问题起着重大作用。

关键词：高熵金属玻璃；激活能； β 弛豫

D08-P04

含钴马氏体时效硬化不锈钢热变形行为研究

韩彤¹，邹德宁¹，张威²，刘星¹，韩英³

1. 西安建筑科技大学
2. 西安交通大学
3. 长春工业大学

马氏体时效硬化不锈钢具有超高强度，良好的塑韧性以及一定的耐蚀性能，应用于航空航天、机械制造、原子能等重要领域，其优异的性能取决于合金元素及其含量，以及热加工过程中组织的演变。马氏体时效硬化不锈钢中加入 Co 元素，可以提高钢的强韧性，并且 Co 元素会对钢的热加工性能产生影响，因此研究 Co 元素对马氏体时效硬化不锈钢的热变形行为的影响是十分必要的。

本文利用热模拟试验机，在变形温度为 950-1150℃，应变速率为 0.01-10s⁻¹ 的条件下对 15-5PH 马氏体时效硬化不锈钢与在其成分基础上添加 10%Co 含量的马氏体时效硬化不锈钢进行了等温压缩实验。

通过流变应力曲线，计算热激活能，并构建热加工图。结果表明：热变形激活能 Q_{0Co} 为(449.27KJ/mol) 大于 Q_{10Co} (377.24KJ/mol)，在不同变形参数下，功率耗散因子 η_{0Co} 均小于 η_{10Co} 。

15-5PH (0Co) 与 10Co 马氏体时效硬化不锈钢具有相似的流变应力特征，两种钢在高温低应变条件下呈现动态再结晶特征，在高应变条件下呈现明显的动态回复特征。Co 元素会马氏体时效硬化不锈钢的流变应力增大，10Co 马氏体时效硬化不锈钢发生动态再结晶的倾向大于 0Co 马氏体时效硬化不锈钢。

关键词：马氏体时效硬化不锈钢；钴含量；热压缩实验；热变形激活能；热加工图

D08-P05

NbTiAlSiZr 高熵合金氮化物薄膜的热稳定性与力学性能

邢秋玮

北京科技大学 100083

作为一种新型薄膜材料，高熵合金薄膜一般具有高硬度、良好的耐磨、耐蚀性与高温热稳定性，受到研究者的广泛关注。本文通过磁控溅射的方法在室温下沉积 NbTiAlSiZr 高熵合金及其氮化物薄膜，通过改变氮气流率得到具有不同氮含量的高熵合金薄膜。通过 X 射线衍射分析了薄膜在高温下的晶体结构转变，并对其力学性能进行了分析。结果表明，与传统薄膜相比，NbTiAlSiZrN_x 薄膜具有高硬度和良好的热稳定性。在 700℃ 退火 24 小时后，薄膜可以保持非晶相，没有明显的晶化现象，薄膜的硬度有所下降。随着反应溅射中氮气流率的增加，薄膜高温下抗晶化能力提高的同时，硬度跌幅也更为明显。这一结果表明，在沉积过程中将氮含量控制在一定范围内，才能够获得兼具热稳定性与力学性能的高熵合金薄膜。

关键词：高熵合金；非晶薄膜；热稳定性；力学性能

D08-P06

Effect of Ni and Cr element on the micromechanical performance of the B2(FeAl) alloys: A first-principles investigation

Rong-Da Zhao¹, Tao Zhang¹, Fu-Fa Wu¹, Jing-Chuan Zhu², Xin Liu³, Zuo-Fu Zhao¹, Sheng-Nan Ma¹, Hong-Bo Ba¹

1. School of Materials Science and Engineering, Liaoning University of Technology
2. School of Materials Science and Engineering, HarBin Institute of Technology
3. Special Equipment Supervision Inspection Institute of Jin Zhou

Abstract: Using first-principles density functional calculations, we reveal the effect of the Ni and Cr element on the elastic properties, the ideal tensile strength (ITS) along the [001] direction and electronic structure of B2(FeAl) alloys. The results show that the replacement of Fe atoms by the Ni or Cr atoms are energetic stable structure. The high B/G and large Cauchy press are obtained by the addition of the alloy element Ni and Cr in B2(FeAl), meaning good extrinsic ductility. Starting from the B2(FeAl), the ITS is 16.92GPa and the ITS of the B2(FeAl) with the addition of the Ni and Cr is 16.16GPa and 17.94GPa, respectively. The alloying effect on the ductility and ITS is attributed to the electronic structure with the addition of the different alloy element. The intrinsically ductile B2(FeAl) with high ideal strength can be obtained by the control the proportion of Cr element.

Keywords: First-principle; FeAl(B2); Ductility; Elastic properties; Electronic structure

D08-P07

Ti 基非晶复合材料的摩擦磨损性能

郑盼, 商剑, 魏景松, 伍复发

辽宁工业大学 121001

采用电弧熔炼和铜模吸铸的方法制备了 Ti₄₃Zr₂₇Mo₅Cu₁₀Be₁₅ 非晶复合材料, 采用销-盘式摩擦试验机研究了其与 GCr15 钢配副的干滑动摩擦磨损性能, 主要考查了载荷、速度和温度对其摩擦系数和磨损量的影响。结果表明, 载荷和转速因素对 Ti₄₃Zr₂₇Mo₅Cu₁₀Be₁₅ 非晶复合材料的摩擦性能影响显著, 而温度因素影响较小; Ti₄₃Zr₂₇Mo₅Cu₁₀Be₁₅/GCr15 钢的平均摩擦系数为 0.21~0.35, 摩擦系数明显低于 TC4/GCr15 钢平均摩擦系数 0.31~0.68, 而其磨损量为 1~30mg, 显著高于 TC4/GCr15 钢的磨损量 0~7mg。磨损表面分析表明, 相比 TC4, Ti 基非晶复合材料表面的犁沟较浅且平滑, 磨屑较少, 磨损机制随着实验条件变化而改变, 即在低载荷低转速条件下为磨粒磨损, 而在高载荷高转速为粘着磨损。磨损断面分析发现在磨损过程中非晶复合合金磨损表面出现了软化结晶现象, 这可能是导致其摩擦系数较小和磨损量大的主要原因。

关键词: Ti 基非晶复合材料; TC4; 摩擦磨损; 软化结晶

D08-P08

Mo 添加对热压烧结 CoCrFeNi 高熵合金涂层结构和性能的影响

王雯, 翟思成, 徐娟, 牛作哲, 徐帅, 王艳

济南大学 250022

本课题通过机械合金化和真空热压烧结技术在 Q235 钢基体上成功制备了性能优异的新型等原子比 CoCrFeNiMo 高熵合金涂层。首先研究了 Mo 元素的添加和球磨时间对涂层用粉末的微观组织演化和形貌的影响。研究结果表明球磨 100 h 时 CoCrFeNiMo 高熵合金粉末形成了体心立方 (BCC) 和面心立方 (FCC) 两种固溶体相, 而 CoCrFeNi 球磨产物为单一的 FCC 固溶体相。延长球磨时间至 200 h 相结构仍然保持稳定, 粉末颗粒尺寸约 50 μm。

热压烧结后的涂层厚度约为 850 μm ，涂层均匀致密，没有明显的孔隙等缺陷存在，涂层与 Q235 钢基体结合良好。与 CoCrFeNi 涂层对比，Mo 添加使涂层相结构包含两种 FCC 固溶体相，还有少量 NiW-type 和 σ -CoCr 金属间化合物产生。CoCrFeNi (Mo) 两种高熵合金涂层的平均显微硬度和耐磨性远优于 Q235 钢基体，其中 Mo 添加明显提高涂层的显微硬度，达到 565 HV，耐磨性也优于 CoCrFeNi。这与 Mo 添加导致细小金属间化合物均匀的从固溶体基体中析出，起到第二相强化效果。利用电化学工作站在 3.5 % NaCl 溶液中进行耐蚀性测试，结果表明，涂层的整体耐蚀性均远远优于基体，表现为较小的腐蚀电流、更正的腐蚀电位以及较宽的钝化区间。其中，CoCrFeNi 涂层具有相对优异的整体耐蚀性，归因于较高含量耐蚀性 Cr 元素的存在以及相结构简单的烧结产物。

关键词：高熵合金涂层；机械合金化；真空热压烧结；微观结构；性能

D08-P09

TiZrHfNbCuBe 高熵非晶基体复合材料的设计及室温力学性能

令狐嵘凯

太原理工大学 030024

高熵非晶基复合材料是在五种或以上元素按照等原子比或近等原子比的原则的前提下，在非晶基体上通过控制成分和冷却速率原位生成韧性晶体相，制备出内生晶体增韧的非晶基复合材料。这种复合材料材料结合了高熵合金优点与非晶复合材料的优点，室温下不仅具有非晶合金高强度、高硬度等特征，同时具有晶体高熵合金的许多优良性能，如高韧性、低比重等，具有重要的研究价值与工程应用前景。

通过成分设计得到一种成分为(Ti-Zr-Hf-Nb-Cu)_{100-x}Be_x的高熵非晶合金，其中，x 为 Be 元素所占的原子数百分比， $x \leq 40\%$ 将配比好的合金元素分成两组，其中元素 Hf 和 Nb 为一组，元素 Ti, Zr, Cu, Be 为一组。先熔炼 Hf 和 Nb 中间合金，然后在将中间合金与 Ti, Zr, Cu, Be 元素置于一起反复熔炼。最后得到高熵非晶基体复合材料。通过压缩测试得到当 X 为 30 时，屈服强度可以达到 1700MPa 左右，且具有良好的塑性。

关键词：高熵非晶基复合材料；成分设计；力学性能

D08-P10

Gd50Al30Co20 非晶合金纤维拉伸数据统计分析

罗斌^{1,1}，沈红先^{1,2}，邢大伟^{1,2}，李海超^{1,2}，林琳^{1,1}，孙剑飞^{1,2}

1. 哈尔滨工业大学机电工程学院

2. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院

Gd50Al30Co20 非晶合金纤维具有优异的磁热性能，在磁制冷系统中纤维密排制冷工质因其特殊的类一维几何结构和微米级直径而具有极大的换热效率，但相应的对制冷工质的力学性能要求也随着大幅提高。之前我们仅对两种成分 GdAlCo 非晶纤维的断裂强度进行了威布尔和对数正态统计分析，为更全面分析此类型合金的拉伸数据，本文采用数学统计方式对纤维的断裂强度进行了分析，通过对两种分布的拟合优度进行检验，得到了断裂强度更符合威布尔分布的结果；Gd50Al30Co20 非晶合金纤维的断裂均值为 969.5MPa，标准偏差为 158.7；纤维断口截面呈明显非晶脆性断裂特征，由无特征剪贴带扩展区和河流花样瞬断区组成；此外，本文统计分析了纤维在不同拉伸应变下拉伸应力的分布，通过对多组试验数据进行分析验证，得到了拉伸应力更符合对数正态分布的结果；通过对不同拉伸应变下拉伸应力的均值和偏差进行分析，本文发现拉伸应力的变异系数随着拉伸应变的增大而逐渐减小，得到了材料的非均匀性会造成拉伸应力呈现不同程度的分散性的结果，且拉伸应力的分散度随着拉伸应变的增大而逐渐减小。Gd50Al30Co20 非晶合金纤维优异的力学性能完全满足其在磁制冷系统中的应用。

关键词：非晶纤维；拉伸性能；数学统计；变异系

a 前两位作者对本论文的贡献相同，为共同一作

* 通讯作者：林琳 (waiwaiyl@163.com)，沈红先 (hitshenhongxian@163.com)

D08-P11

钛基非晶复合材料/钛合金双金属板的组织与力学性能

魏景松^{1,2}, 伍复发¹, 蒋松山², 黄永江², 薛鹏², 郑盼¹

1. 辽宁工业大学
2. 哈尔滨工业大学

枝晶增强型非晶复合材料作为一种可以提高非晶材料韧性的方法被广泛应用。然而, 过多的枝晶相体积分数将会使非晶复合材料的强度和硬度急剧下降。为了解决这一问题, 需要一种创新的方法使非晶复合材料兼具强度和韧性。

分别以多种类型钛合金为基体, 采用真空电弧熔敷方法制备了 Ti₄₃Zr₂₇Mo₅Cu₁₀Be₁₅ 非晶复合材料与钛合金双金属板。

组织和结构分析表明, 钛基非晶复合材料可以和钛合金基体形成良好的冶金结合, 并且非晶复合材料层熔敷后依然保持非晶复合材料的结构。拉伸力学性能测试结果表明, 单一的 Ti₄₃Zr₂₇Mo₅Cu₁₀Be₁₅ 非晶合金复合材料屈服之后很快发生颈缩, 表现出强烈的塑性失稳; 与 TA2 复合后, 双金属板的拉伸塑性变形能力急剧下降, 即屈服之后迅速发生断裂, 无显著的均匀变形能力; 而以 β 型钛合金 TB2 为基体的双金属板非晶复合材料的均匀塑性变形能力大幅度提高, 尤其以 $\alpha+\beta$ 型钛合金 TC4 为基体的双金属板非晶复合材料表现出良好的均匀塑性变形能力。

实验结果证明, 钛基非晶复合材料本质上兼具强度和韧性, 可以用作普通钛合金的涂层, 以提高钛合金的表面力学性能, 并拓展其应用空间。

关键词: 非晶复合材料; 枝晶增强; 钛合金; 双金属板; 力学性能

D08-P12

Si 微合金化和快速凝固对 Al_{0.4}CoNiCu_{0.6}Si_x(x=0~0.2)高熵合金组织与力学性能的影响研究

陈永星

装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室

本工作从合金本征组成成分优化和制备技术手段上着手, 利用“Si 元素微合金化”与“铜模吸铸快冷”的技术思想, 通过真空电弧熔炼和铜模吸铸快冷技术分别制备了 Al_{0.4}CoNiCu_{0.6}Si_x(x=0~0.2)高熵合金并对其组织和力学性能进行了对比研究, 真空电弧熔炼和铜模吸铸的高熵合金分别定义为 M_x 和 I_x(x=0, 0.05, 0.1, 0.2)。研究表明: 当 x≤0.1 时, M_x(x=0, 0.05)和 I_x(x=0, 0.05, 0.1)合金的物相结构均为 fcc 结构, 当 x≥0.1 时, M_x(x=0.1, 0.2)和 I_{0.2} 相结构转变为“fcc+微量 bcc”双相结构, 且由于快冷速率的影响, I_{0.2} 的 bcc 相百分含量相对少于 M_{0.2}。随着微量 Si 含量的增加, 由于晶格畸变引起的固溶强化及细晶强化带来的 Hall-Petch 效应的影响, M_x 的平均维氏硬度由 193HV 增加至 334HV, I_x 的平均维氏硬度由 216HV 提高至 395HV; M_x 的屈服强度从 295MPa 增加至 588MPa, 当 x=0.2 时, M_x 合金的抗压强度和断裂应变率分别为 3074MPa 和 40.5%; I_x 合金的屈服强度从 310MPa 提高至 700MPa, 当 x=0.2 时, I_x 合金的抗压强度和断裂应变率分别为 3407MPa 和 33.1%。本工作制备的 Al_{0.4}CoNiCu_{0.6}Si_x(x=0~0.2)高熵合金的强度与塑性好于目前已报道的大部分其他采用真空电弧熔炼制备的 AlCoCrFeNiCu 系列高熵合金, 通过“微量 Si 元素固溶强化”与“铜模吸铸快冷细晶强化”实现了高熵合金高强度与优塑性的良好结合。

D08-P13

AlCoCrFeNi 高熵合金离子渗氮前后的微观结构和摩擦磨损性能

王永祥

太原理工大学 030024

通过真空电弧熔炼制备了 AlCoCrFeNi 高熵合金, 采用等离子渗氮技术制备了高熵合金渗氮层。渗氮层和铸态高熵合金的微观结构和摩擦磨损性能分别在干燥环境、去离子水和酸雨环境下进行研究。将不同

介质中的摩擦结果进行对比, 研究结构与介质的综合作用对合金耐磨性的影响。结构表明, 由于硬质相的出现以及固溶强化的作用, 渗氮高熵合金的硬度由铸态时的 522 HV 提高到 720 HV。另外, 渗氮层的耐磨性能明显优于相同条件下铸态的耐磨性能。由于氧化膜, 渗氮层的存在以及溶液的润滑作用, 氮化后的高熵合金在酸雨条件下获得最小的磨损率 $2.8 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{Nm})$ 。高熵合金渗氮前后在酸雨条件下主要的磨损机制为磨粒磨损和腐蚀磨损。然而, 在干摩擦以及去离子水条件下, 高熵合金渗氮前后的主要磨损机制为磨粒磨损、粘着磨损和氧化磨损。

仅发表论文

D08-PO01

偏执电压作用下并联金属纤维巨磁阻抗效应研究

张树玲¹, 陈炜晔², 耿桂宏², 张勇³, 于永川¹

1. 宁夏大学 机械工程学院
2. 北方民族大学 材料科学与工程学院
3. 北京科技大学 新金属材料国家重点实验室

研究了不同数量 Co 基非晶态金属纤维并联后的 GMI 效应。实验结果表明, 10MHz 时, 四根纤维并联后可以获得较高的 GMI 效应, 灵敏度也最高, 3mA 激励时, 其灵敏度达到 1134V/T, 施加 1V 偏执电压后最大灵敏度升高到 2160V/T; 十条纤维并联后, 3mA 激励时的最大灵敏度为 561.9V/T, 施加 1V 偏执电压后为 576.8V/T。纤维横截面环向磁场分析表明, 相同激励条件下, 随并联纤维数量增加, 纤维间磁交互作用增强, 纤维表层环向磁场强度增大, 环向磁化过程加强, 有利于提高 GMI 效应; 但是, 磁交互作用导致并联纤维中存在近零磁场区域, 这使得参与环向磁化的环向畴数量减少, 不利于获得大的环向磁导率及 GMI 效应。当环向磁场强度的增大不足以弥补环向磁化的减弱时, 增强环向磁场强度对 GMI 效应的影响明显。因此, 并联纤维数量大于四条后, 随并联纤维数量增加, 环向磁化畴数量继续减少, 偏执电压对 GMI 效应的影响不明显。这一研究结果表明, 加强 Co 基非晶态纤维的环向磁化是增强其 GMI 效应及灵敏度的关键。

关键词: 磁交互作用; GMI 效应; 偏执电压

D08-PO02

AlCrTaTiZrMo 氮化物薄膜的制备与扩散阻挡性能的研究

乔帮威

上海电机学院 201306

目的: 研究 AlCrTaTiZrMo 高熵合金氮化物扩散薄膜的扩散阻挡性能和热稳定性。

方法: 通过直流磁控溅射的方法, 在 Si 基体上制备厚度为 15nm 的 6 主元 AlCrTaTiZrMo 高熵合金氮化物扩散阻挡层, 在不打破真空的状态下, 在扩散阻挡层上制备 100nm 厚的 Cu 膜, 并利用 XRD、SEM、EDS、AFM、TEM、FPP 研究了其相成分、微观组织结构、表面形貌和界面的结合情况等, 来研究其扩散阻挡性能与热稳定性。

结果: 在 800℃ 真空退火 1 小时后, 其依然保持非晶质基体上分布纳米晶的稳定结构, XRD 未检测到铜硅化合物, 表面依然平整; 900℃ 后, 方块电阻突然增大, Cu 膜表面出现凝聚现象, 岛状形貌出现, XRD 检测到铜硅相, TEM 元素线扫结果也证明 Cu 原子扩散进入 Si 基体, 表明此时 AlCrTaTiZrMo 氮化物扩散阻挡层失效。

结论：高熵合金氮化物薄膜高的扩散阻挡性能源于其高熵效应、晶格畸变效应、迟滞扩散效应所形成的稳定非晶质基体上分布纳米晶的稳定结构，无快速扩散通道，简单的固溶体结构和高的原子堆积密度。

D08-PO03

He²⁺离子辐照 Fe 基非晶合金薄带剥离损伤研究

卫宇航

中国科学院力学研究所 100190

非晶合金又称为金属玻璃，是采用快速凝固技术制备的一种新型金属合金，具有极高的强度、耐磨性和耐腐蚀性。相同成分的非晶态和晶态合金材料，非晶态合金具有更优异的抗辐照性能，这是因为非晶合金材料没有传统晶体材料中的晶格缺陷，原子呈现短程有序，长程无序的排列方式。作为传统晶态材料的潜在的替代材料，非晶合金在飞行器、核工业、深空等领域具有广阔的应用前景。

本文通过单辊甩带法制备了不同转速下的 Fe₇₈Si₈B₁₄ 和 Fe₇₈P₈B₁₄ 非晶合金及其复合材料薄带，随后利用能量为 100keV 的 He⁺ 离子进行辐照。

发现在低剂量 (2×10^{17} ions/cm²) 下，非晶和复合材料表面均无明显变化。随着辐照剂量的升高，在高剂量 (5×10^{17} ions/cm²) 下表面均出现了严重的开裂剥落现象，甚至发生多层剥落。这是因为辐照会引起非晶及复合材料内部自由体积发生变化。在低剂量下，被辐照基体可以容纳一定量的自由体积。在高剂量下随着自由体积进一步增多，多余自由体积无法容纳，基体内部形成大量不稳定性缺陷，同时，入射 He⁺ 离子极易聚集成团形成氦气团，随着辐照剂量达到某一临界值，导致剥落损伤现象发生。

对比高能量下 (500keV) He²⁺ 离子辐照 Fe 基非晶薄带实验，同时结合蒙特卡洛模拟表明：辐照能量越低，造成的损伤区越接近于被辐照基体表层，更易产生表面剥落损伤。

关键词：非晶合金；离子辐照；自由体积；剥落

D08-PO04

爆炸喷涂铁基非晶复合涂层对 7075 铝板拉伸性能的影响研究

王永田，莫嘉伟，陶璐璐

华北电力大学

7075 铝被广泛应用于航空航天、汽车等领域，但是其存在对应力集中敏感、韧性较差等问题。金属表面是容易萌生裂纹的位置，因此需要对其表面进行强化，而非晶涂层具有强度高、硬度大、耐磨耐腐蚀性强等诸多优点。本论文结合铁基非晶涂层的优异性能和电热爆炸喷涂的技术特点，针对当前广泛应用于工业领域的 7075 铝合金板材的韧性等力学性能进行改善，在厚度为 1 毫米左右的 7075 铝板表面爆炸喷涂 Fe 基非晶合金复合涂层。实验结果表明：Fe 基非晶复合涂层能均匀平铺在基体表面，复合涂层的硬度是基体铝板的 6 倍，非晶复合涂层把 7075 铝板的拉伸塑性从 4-7% 提高到了 10-14%；涂层能有效抑制了裂纹的萌生和扩展，分散施加在主裂纹上的应力，从而提高试样的拉伸性能。

关键词：非晶复合涂层；7075 铝；拉伸塑性

D08-PO05

不同冷却速率 CuZrAlNb 金属玻璃复合材料显微组织和拉伸性能

梁维中¹，康志杰¹，宁志良²，孙海超²，陈永生¹

1. 黑龙江科技大学

2. 哈尔滨工业大学

本文采用铜模滴注法制备了直径分别为 2、3 和 4 mm 的 Cu_{48-x}Zr₄₈Al₄Nb_x (x=1,5 at%) 金属玻璃复合材料阶梯型棒材，研究了不同冷却速率 CuZrAlNb 金属玻璃复合材料的显微组织及拉伸性能。结果表明：样品显微组织和拉伸性能受晶体相含量影响。随着 Nb 含量增加或冷却速率降低，样品显微组织晶化程度

增加, 拉伸断裂强度降低, 断裂方式由剪切断裂转化为脆性断裂, 样品侧表面剪切带减少, 断口表面由树枝脉状条纹转化为塑坑结构。通过测试断裂韧度及分析平面应变条件下塑性区尺寸探讨了金属玻璃复合材料变形机制。

关键词: 金属玻璃复合材料; 冷却速率; 显微组织; 拉伸性能

D08-PO06

相变对高熵合金 FeNiMnCr0.75Al_x (x = 0 – 0.75) 机械性能的影响

李荣斌², 张威威¹, 张晴³, 乔帮威¹

1. 上海理工大学
2. 上海电机学院
3. 上海大学

目的: 研究了 Al 元素含量及热处理对高熵合金 FeNiMnCr0.75Al_x (x = 0 – 0.75) 其力学性能和微观结构的影响

方法: 本文利用电弧熔炼和铜模吸铸法制备了 FeNiMnCr0.75Al_x (x = 0 – 0.75) 高熵合金, 并对合金进行了 700-900 °C 的退火处理 1 h

主要结果如下: (1) 在 FeNiMnCr0.75Al_x (x = 0 – 0.75) 中, 当 x = 0 时, 为单相 FCC1 固溶体; x = 0.25 时, 合金具有 FCC1 + BCC 混合相结构; x = 0.5 时, 合金的结构为 BCC + 极少量 FCC2 相; (x = 0.75 时, 为单相 BCC 固溶体; (2) FeNiMnCr0.75Al0.75 具有十分优异的综合力学性能, $\sigma_{0.2} = 1571.8$ MPa, Hardness = 1479 HV, $\sigma_{max} = 3047.2$ MPa, $\epsilon_p = 34.6\%$ 。合金在 900 °C 退火之后没有新相产生, 且保持较高的强度硬度, 这说明该合金在高温下结构及性能均非常稳定; (3) 对 FeNiMnCr0.75Al_x (x = 0 – 0.75) 合金进行 700-900 °C 的退火处理, 可以显著提高具有 FCC + BCC 混合相合金的强度硬度, 但对单相合金则几乎没有影响, 这是因为具有 FCC + BCC 混合相合金热处理后, 部分 BCC 相转变为了 Cr5Fe6Mn8 相。其中 FeNiMnCr0.75Al0.5 合金在 900 °C 退火之后屈服强度由铸态时的 1411.1 MPa 增加至 2331.9 MPa。

结论: FeNiMnCr0.75Al0.75 具有十分优异的综合力学性能, 且该合金在高温下结构及性能均非常稳定。

D08-PO07

熔体抽拉 Co 基金属纤维的制备和性能研究

陈炜晔¹, 耿桂宏¹, 张树玲², 孙剑飞³

1. 北方民族大学
2. 宁夏大学
3. 哈尔滨工业大学

微尺寸 CoFe 基金属纤维不但表现出较高的断裂强度和非线性变形特征, 同时具有优异的电磁性能, 并已作为新型生物材料应用于医学、生物学等领域。目前关于熔体抽拉法制备金属纤维基本工艺规律的研究比较成熟, 但即使完全相同的工艺条件下, 所制备的纤维亦存在差异。本文采用熔体抽拉法制备 CoFe 金属丝, 分析相同工艺下不同直径金属丝的结构和软磁性能。

由于熔池液面不稳定以及辊轮波动, 相同工艺条件下金属纤维直径不均匀, 平均直径 50 μ m, 存在 20% 左右的直径分别大于 80 μ m 和小于 40 μ m 的纤维。经差热分析和高分辨投射电镜分析表明, 直径 30 μ m-60 μ m 的金属纤维为非晶态。随纤维直径增加到 80 μ m, 凝固冷却速率减小至 1.4x10⁵k/s, 无序原子逐渐聚集成成长程序乃至纳米晶, 直径 85 μ m 纤维中的出现了少量纳米晶, 并导致矫顽力增加。

实验表明采用熔体抽拉技术制备金属纤维, 控制液面和辊轮稳定性是获得直径均匀金属纤维的关键技术, 凝固冷却速率决定了纤维微观结构和基本磁性能。

D08-PO08

高温高速粒子冲击对铁基非晶复合涂层的影响研究

王永田, 陶璐璐, 莫嘉伟

华北电力大学

高温冲蚀是指在高温环境下固体粒子以一定的速度和角度对材料表面进行冲击时, 发生的材料耗损或破坏的一种现象, 普遍地存在于航空、能源、机械和冶金等工业领域, 例如循环流化床锅炉水冷壁管和燃气轮机的叶片等。本文采用氩弧熔敷法制备了一系列铁基非晶复合涂层, 并对其微观结构、显微硬度和高温冲蚀特性进行了研究。与 20G 碳钢对比发现, 非晶复合涂层的维氏硬度是碳钢的 6 倍以上, 在 30°及 90°冲击角下均呈现良好的抗高温石英砂粒子冲蚀性能。通过对高温冲蚀形貌的微观分析, 对非晶复合涂层耐高温高速粒子冲击特性的微观机理进行了解释。

关键词: 非晶复合涂层; 高温冲蚀

D08-PO09

分子动力学模拟研究高温高压下位错对 Mo 单晶结构相变的影响

李亚林¹, 蔡军¹, 莫丹¹, 王沿东²

1. 华北电力大学核科学与工程学院
2. 北京科技大学国家金属新材料重点实验室

目的: 钼金属在高温高压下结构稳定性及相变一直是研究的热点问题, 据我们所知, 直到目前为止, 在此方面的研究中都未考虑到内部缺陷对晶体结构相转变的影响, 本文通过分子动力学模拟研究了动高压和静高压下位错对钼单晶结构稳定性及相转变的影响, 进一步揭示钼单晶在动静高压下的相变机理。

方法: 通过分子动力学模拟对钼单晶及其缺陷进行研究, 计算其在动高压下 Hugoniot 曲线和 Hugoniot 声速变化, 考虑在动高压与静高压下晶体缺陷对其自由能变化、不同压强下弹性常数变化及结构变化的影响等。

结果: 在动压下 Mo 的 Hugoniot 声速及自由能变化在 200GPa 左右发生不连续变化, 在静压下, 钼单晶弹性常数, 声速及自由能变化在 650GPa 处发生转折。计算发现钼单晶中的位错的存在可以使上述不连续点发生的发生压强大为降低。

结论: 在冲击压下, 金属钼在 200GPa 左右发生固固相变; 在静压下, 这一相变点发生在 650GPa 左右处; 动压及静压下位错可以大大降低金属钼晶体发生结构相转变的压力。

D08-PO10

分子动力学模拟研究铁铬合金晶界对级联碰撞影响

莫丹¹, 蔡军¹, 李亚林¹, 王沿东²

1. 华北电力大学核科学与工程学院
2. 北京科技大学国家金属新材料重点实验室

目的: 为了提高材料的抗辐照性能研究材料的辐照损伤机制具有重要物理意义。由于铁铬合金可能作为聚变堆第一壁结构材料的潜在应用, 其辐照损伤机制一直是一个国际研究热点。然而, 据我们所知用分子动力学模拟研究铁铬合金晶界对辐照产生缺陷的影响及其机制仍然鲜有报道。

方法: 本文通过分子动力学模拟, 采用原子参杂方法构造铁铬合金, 利用 EAM 势研究了铁铬合金晶界在不同初级离位原子 PKA 的能量和温度对级联碰撞的影响, 并分析了离位级联各阶段点缺陷的数目及分布; 研究晶界对含铬原子缺陷形成的影响, 及铬原子对高能级联碰下晶界结构二次演化所产生的效应。

结果: 模拟发现了晶界的存在不仅影响达到热峰的时间, 会导致含铬原子缺陷的增加, 我们也发现在级联碰撞能量沉淀的过程中, 铬原子对晶界结构的二次演化具有较大影响。

结论: 晶界的存在增强了辐照效应的影响, 铬原子也增强了在级联碰撞过程中晶界结构的二次演化。

关键词: 分子动力学; 级联碰撞; 铁铬合金; 晶界