

D03.非晶与高熵合金

分会主席：吕昭平、姚可夫、张勇、沈宝龙、王成勇、李扬德、乔珺威

D03-01

低维非晶合金材料及特性

汪卫华

中国科学院物理研究所

D03-02

块体非晶合金产业化与应用开发案例

李扬德

东莞宜安科技股份有限公司

块体非晶合金材料产业化涉及专利、合金成分优化、合金批量制备与回收、真空熔炼成型工艺与装备、产品后加工以及相匹配的材料加工技术等。从原材料到产品，需要诸多环节的关键技术开发。目前商业化开发的主要是锆基非晶合金，原料价格较高，但作为可以压铸成型的高比强材料，锆基非晶合金在部分取代不锈钢和钛合金的应用领域具有明显的成型工艺和成本优势。非晶合金特有的铸态大弹性应变极限、高强度、高硬度和高耐腐蚀性特点，结合其成型过程中极好流动性无结晶相变的低凝固收缩特点，使其在高强精密薄壁复杂结构和弹性部件领域有着极好的应用前景。本文重点介绍液态金属在通讯、机器人和工业标准件等领域的应用开发进展，包括在大尺寸部件如笔记本框和大幅面薄板等领域的开发情况。

D03-03

典型面心立方和体心立方高熵合金的固溶强化

吕昭平，雷智锋，尚园园，吴渊

北京科技大学新金属材料国家重点实验室

由于其高的组织稳定性、大的晶格畸变和复杂的化学短程有序，高熵合金带来了一系列独特的性能，呈现出很大的工程应用潜力。传统的溶质和溶剂的概念在高熵合金中已不适用，因此其变形行为与强化机理方面的研究受到愈来愈多的关注和重视。近来，我们课题组采取了多种手段来强化典型的高熵合金。本报告将主要介绍典型面心立方 FeCoNiCrMn 和体心立方 TaNbHfZrTi 固溶强化行为，着重讨论间隙原子对变形行为和力学性能的影响规律。在此基础上尝试探索这两种高饱和复杂固体中的间隙固溶强化机理。我们的结果不仅为提升高熵合金的综合力学性能提供了新途径，而且也为正确理解固溶强化理论奠定了基础。

D03-04

金属玻璃强度的随机尺寸效应：从块体金属玻璃到金属纳米玻璃 (nanoglass)

杨勇，李福成

机械工程系，工学院，香港城市大学，九龙塘，九龙，香港特别行政区，中国

金属玻璃的强度在小尺寸下是否具有尺寸效应一直是个有争议的问题。在本次报告中，根据分子动力学模拟结果，我们首先提出一个金属玻璃剪切带的生长失稳模型。通过这个生长失稳模型，我们把金属玻璃强度和剪切带的宽度，弹性模量，剪切带内的能量耗散以及剪切带的长度联系在了一起。由此，我们可以定量解释为什么在微米压缩实验里面，有时候可以看到尺寸效应，有时候又看不到尺寸效应。并且我们也可以解释问什么在微米拉伸试验里面，尺寸效应相较于微米压缩试验更为明显。更进一步，我们研究了金属纳米玻璃(nanoglass) 的强度行为，发现了尽管金属纳米玻璃的模量虽然较块体金属玻璃高，然而它的强度却变弱。这个看似反常的现象也可以用金属玻璃内剪切带的生长失稳模型很好解释。最后，我们讨论了不同金属玻璃里可达到的强度极限。

D03-05

铁基非晶合金的化学活性和污水降解净化性能研究

姚可夫, 陈双琴, 邵洋
清华大学材料学院

非晶合金因其特殊的原子无序堆垛结构, 使其具有多种优异的力学、物理和化学性能。特别是最近的研究结果表明, 非晶合金具有比传统零价晶态合金及其同成分的晶态合金更好的偶氮染料降解性能, 使其在染料污水降解净化处理中具有很好的应用前景。本研究对铁基非晶合金条带的降解性能, 发现除非晶合金的亚稳结构有利于高反应活性外, 制造过程中的高残余应力也有利于提高反应活性。本研究还发现, 晶化退火处理并不一定导致合金在降解净化处理中的反应活性降低, 通过对 (Fe73.5Si13.5B9Nb3Cu1)91.5Ni8.5 非晶合金进行合适的晶化热处理获得的多相纳米晶合金, 具有远高于同成分非晶合金的反应活性。并且, 在偶氮染料降解净化处理过程中, (Fe73.5Si13.5B9Nb3Cu1)91.5Ni8.5 多相纳米晶条带在多次循环降解净化处理中可保持较好的降解效率稳定性。上述研究结果表明, 铁基非晶合金及合适热处理获得的晶态合金具有很好的应用前景。

D03-06

Cr 元素添加对 FeSiB 非晶合金热稳定性、软磁性能以及耐腐蚀性能的影响

沈宝龙

东南大学 材料科学与工程学院

本文研究了 Cr 元素添加对 FeSiB 非晶合金热稳定性、软磁性能以及耐腐蚀性能的影响机理。通过单辊甩带法制备了 Fe79.5-xSi9.5B11Cr_x (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9 和 11 at%) 非晶薄带, 对其进行退火处理, 分析不同退火条件下的晶化相组成, 发现微量掺杂 Cr 元素可显著提高合金热稳定性。利用振动样品磁强计 (VSM) 和直流 B-H 仪对非晶合金的磁学性能测量发现, 随着 Cr 元素含量从 0 增加到 11 at%, 非晶合金的饱和磁感应强度从 1.63 T 下降至 0.63 T, 矫顽力从 2.46 A/m 下降至 1.47 A/m。在室温下 0.1 M 氯化钠溶液中开展浸泡实验发现, Cr 元素含量从 0 增加到 5 % 时, 腐蚀速率从 1.83×10^{-1} 大幅下降至 3.91×10^{-4} mm·year⁻¹; 利用扫描电镜 (SEM) 对浸泡后的薄带表面进行分析, 结果显示, 薄带表面形成的致密氧化膜导致了非晶合金耐腐蚀性能的提高。对非晶合金进行电化学极化曲线分析, 结果表明, Cr 元素含量为 5 % 的合金具有较低的钝化电流密度 (2.67×10^{-6} A/cm²) 以及较大的钝化区间 (0.44 V); Cr 元素含量大于 5 % 时, 电化学极化曲线钝化区间超过 1.13 V。利用 X 射线光电子能谱 (XPS) 对电化学测试后条带表面元素结合能分析表明, Cr 元素在表面层的富集是 FeSiBCr 非晶合金耐蚀性提高的主要原因。

D03-07

磁性非晶合金及其衍生物的电控磁行为

陈娜, 张盈祺

清华大学材料学院

电控磁行为已在磁性金属、磁性半导体和磁性氧化物中相继报道, 表明这种磁电耦合交互作用普遍存在于磁性材料中, 而载流子调制磁性是电控磁行为的典型机理之一。相比磁性晶体金属, 磁性非晶合金的载流子浓度低约一到两个数量级, 在同样外加栅极电压下, 同样厚度的磁性非晶合金薄膜可能会表现出更为显著的电控磁效应。另一方面, 磁性晶体金属在不改变母相晶体结构的前提下, 对于外加异类元素通常有固溶度的限制。而磁性非晶合金由于结构的长程无序特性可以引入更多的外加元素实现成分和性能连续可调。采用物理气相沉积方法, 在磁性非晶合金 CoFeTaB 中引入氧, 可使其发生金属-半导体转变, 从而降低磁性非晶合金的载流子浓度。随氧含量的增加, CoFeTaBO_x 的光学带隙不断增大, 载流子浓度不断降低, 而电控磁效应不断增强。针对具有自旋极化导电电子的磁性非晶合金及其衍生的非晶氧化物开展系统深入的磁电输运及电控磁行为研究可以拓宽磁性非晶合金在自旋电子学领域的应用, 具有重要的科学研究意义和实际应用价值。

D03-08

稀土基非晶磁制冷材料的开发及性能研究

霍军涛, 盛威, 王军强

中国科学院宁波材料所

稀土基非晶合金相比于晶态磁制冷材料具有制冷温区宽、力学性能和耐腐蚀性能优异等优点, 作为磁制冷工质具有广阔的应用前景。但是现有稀土基非晶合金还面临磁转变温度较低、加工性能差等问题, 限制了其作为室温磁制冷材料的应用。

用。针对以上问题，我们通过研究铁磁性元素对 Gd 基非晶合金磁性能的影响机制，优化合金成分，开发了一些列兼具大非晶形成能力、优异力学性能和近室温优异磁热效应的 Gd 基非晶态制冷材料；并利用熔体抽拉法将 Gd 及其非晶合金制备成实际所需的微米级丝材。近室温具有大磁热效应的 Gd 基非晶态制冷材料及其微丝的开发，将促进稀土基非晶合金作为磁制冷材料的实际应用。

D03-09

Fe 基块体非晶合金的因瓦效应

胡强，王金苗，严意宏

江西省科学院应用物理研究所

因瓦效应是指某些磁性合金在居里温度附近或居里温度以下出现异常低膨胀的效应，最早在 Fe-Ni 合金中发现，是迄今为止唯一获诺贝尔物理学奖的冶金学成就。传统 Fe-Ni 因瓦合金已有广泛应用，但其面心立方结构使得合金材质偏软，而 Fe 基块体非晶合金最大特点就是高强度，如能结合两者特性则可实现很有潜力的应用。早期仅有薄带 Fe 基非晶因瓦效应的报道，我们首次发现(Fe71.2B24Y4.8)96Nb4 块体非晶也具有明显的因瓦效应，且其因瓦效应在结构弛豫后增强，在出现纳米晶后减弱，在晶粒粗大时则基本消失，另外在某个特定的熔体温度下制备的非晶具有更为明显的因瓦效应，这些现象与 Fe 原子局域结构的改变有关，可通过穆斯堡尔谱测得的超精细内磁场的变化获得较好的解释。最近我们进一步研究了 Fe76-xSi3.3P8.7C7.0B5.0Mx(M=Cu, Mo; x=0-5)、[(Fe1-xCox)75B20Si5]96Nb4(x=0, 0.3, 0.5)、Fe100-xNixP13C7(x=10, 20, 30)和 FeMoPCB 四个体系 14 个磁性块体非晶合金的热膨胀行为，发现它们均有因瓦效应，且分为两类，一类合金的低膨胀特性出现在居里温度附近狭窄的温度区间里，另一类合金则在居里温度以下宽广的温度范围内都具有低膨胀特性，因此更具实用性，且后一类合金的饱和磁化强度和居里温度均偏低，也即磁性能偏低。另外，Co 和 Ni 两种铁磁性元素常用来替代 Fe 基非晶合金中的部分 Fe 元素，从而调节合金的各种性能，但我们发现不管是用 Co 还是来 Ni 来替代 Fe 元素均会导致因瓦效应的减弱，且替代量相同时因瓦效应减弱的程度也基本相同，这与 Fe-Fe 原子对数目的减少有关。上述研究工作对开发新型高强度、低膨胀 Fe 基块体非晶合金具有很好的指导意义。

D03-10

(FeCoNi)75Mo5P10B10 高熵块体非晶态合金磁热性能的研究

吴克楠

新疆大学

利用 Fluxing 提纯技术和 J-quenching 技术相结合的方法，我们成功制备了最大直径达 1.8 mm 的(FeCoNi)75Mo5P10B10 高熵块体非晶态合金，并对其磁热性能进行了表征和研究。结果显示，(FeCoNi)75Mo5P10B10 高熵块体非晶态合金的饱和磁化强度和居里温度分别为 53.63 emu/g 和 547 K；在 5 T 外场下的最大磁熵变值为 1.85Jkg⁻¹K⁻¹。同其它过渡族金属基非晶态合金相比，目前的过渡族金属基高熵块体非晶态合金的磁热性能并不突出，表明高熵效应似乎对非晶态合金的磁热性能并没有显著影响。

D03-11

Fe、Ni 元素相互替换对 FeNi 基非晶态合金机械性能影响的第一性原理模拟计算研究

岳转辉，李强

新疆大学

为了研究 Fe、Ni 元素相互替换对(Fe, Ni)80P14B6 非晶态合金机械性能影响的结构起源，我们采用第一性原理分子动力学方法对 Fe80P14B6, Fe40Ni40P14B6, Ni80P14B6 非晶态合金进行了模拟计算。研究结果显示，Fe80P14B6 和 Ni80P14B6 中存在 P-B 键，而 Fe40Ni40P14B6 中则没有。P-B 键属于强的共价键，不利于塑性变形。键对分析表明，相对于 Fe80P14B6 和 Ni80P14B6，Fe40Ni40P14B6 合金中代表类二十面体的 15XX 键对比例减小，而代表 fcc/hcp 的 142X 键对和 bcc 的 1441 和 1661 键对比例增大，这就说明 Fe、Ni 互换后合金的五次对称性降低，这有利于塑性变形。另外，通过中程序分析发现，Fe80P14B6 和 Ni80P14B6 合金中团簇间共面连接所占比例较大，而 Fe40Ni40P14B6 合金共点连接所占比例较大，说明 Fe、Ni 互换后合金中团簇的连接方式方式变化，导致团簇间空穴增多，从而使合金塑性增加。团簇相关联指数计算结果表明，Fe80P14B6 和 Ni80P14B6 合金中团簇的关联性强于 Fe40Ni40P14B6 合金，表明 Fe、Ni 互换后合金中团簇间关联性减小，这使的合金变得相对疏松，对合金的塑性变形是有利的。

D03-12

Fe 基非晶软磁复合材料的放电等离子烧结制备与绝缘设计

赵占奎, 鲁书含, 王明罡

长春工业大学材料科学与工程学院

软磁复合材料 (SMCs) 是有高电阻率高磁性能低损耗可应用于中低频范围的高性能软磁材料。为获得性能优异的磁粉芯, 通常采用粉末冶金的方法压制绝缘处理后的磁性粉末。但 SMCs 磁芯的电阻率由于其烧结过程及热处理过程中存在金属元素扩散破坏界面绝缘性使电阻率降低的问题。同时 SMCs 磁芯还存在绝缘介质的非磁性添加导致的饱和磁感应强度 (B_s) 和磁导率 (μ) 降低, 矫顽力 (H_c) 增大, 软磁性能劣化的问题。而近年来, 长春工业大学赵占奎课题组报导了使用 Fe 基非晶磁粉作为基础磁粉, 采用软磁铁氧体作为绝缘介质, 通过放电等离子烧结 (SPS) 进行固结改善上述问题的先进 SMCs 制备原理与方法。可在 Fe 基非晶合金的玻璃转变温度以下, 实现完全不晶化前提下的高致密高强度固结。并且获得了较高的软磁综合性能。为充分发挥材料高频下的软磁性能, 本文报道了添加界面扩散阻挡层, 提高铁氧体绝缘层电阻率的机制与影响因素。通过在非晶粉末颗粒表面形成 Fe 元素扩散阻挡层, 把非晶粉末与铁氧体分隔开, 从而抑制其 Fe 元素向铁氧体绝缘层的扩散, 避免 Fe^{2+} 的离子浓度的增加, 提高绝缘层的绝缘效果。 MgF_2 化学稳定性强, 耐热性优良, 在 $600^\circ C$ 以上烧结及热处理, 与铁反应也小, Fe 元素难以置换其 Mg 元素而阻止 Fe 元素通过 MgF_2 层的扩散, 使其比电阻降低较小。因此, 我们采用化学法, 在 Fe 基非晶粉末颗粒表面生成均匀的 MgF_2 层, 再用溶胶凝胶法包覆镍铁氧体前驱体。将经复合绝缘的 Fe 基非晶粉末进行放电等离子烧结, 使其致密化, 获得 Fe 基非晶/ MgF_2 /(ZnNi) Fe_2O_4 软磁复合材料。通过 XRD、SEM、VSM、AT521 精密电阻仪等研究方法分析包覆层厚度及放电等离子烧结温度对所得材料的组成、微观结构、电阻率及软磁静态及动态性能的影响。研究发现, 铁氧体绝缘层厚度相对一定的情况下, 随着 MgF_2 阻挡层厚度的增加, 电阻率增大。SPS 烧结后的 Fe 基非晶/ MgF_2 /(ZnNi) Fe_2O_4 软磁复合材料具有优良的软磁性能, 高的电阻率, 以及优异的综合机械性能。

D03-13

磁性铁基非晶合金的结构与物性关联性研究

单光存, 张吉亮, 石灿鸿

北京航空航天大学

铁基非晶合金具有传统晶态合金所无以比拟的磁性能和力学性能等, 因此, 深入研究 Fe 基块体金属玻璃磁性与原子团簇结构的关联无论是理论上还是在实际应用中都具有十分重要的意义。近期, 我们研究了一系列的 FeBSi 非晶合金和新开发的 FeBM ($M = Zr, Nb$ 或 Y 以及三者的混合物) 非晶合金在结构, 热学, 机械和磁性方面存在显著差异。该差异的原因归因于硼和金属合金化之间更混合的负热量元素, 从而这导致了短程序 (团簇结构) 和 FeB 的结合性质的变化。基于从头算多次散射计算方法 (FEFF8.4) 和铁的电子结构, 我们对扩展 X 射线吸收精细结构谱 (EXAFS) 的结果进行了深入分析。这种巨大差别揭示了铁基金属玻璃的结构与物理性质之间相互关系的理解。基于电子结构我们对研究结果进行了深入讨论, 并且我们的研究结论为设计优异软磁性能的铁基非晶合金提供了一个新途径。

D03-14

铁基纳米晶复合磁粉芯的制备及其性能研究

董亚强, 李童, 刘珉

中国科学院磁性材料与器件重点实验室, 浙江省磁性材料及其应用重点实验室, 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

铁基纳米晶软磁合金因其独特的组织结构, 其饱和磁致伸缩系数趋近于零, 因此, 纳米晶磁粉芯可有效解决非晶磁粉芯在实际应用中出现的噪声问题。然而, 目前国内外用于生产的 Finemet 系纳米晶合金, 其非晶形成能力 (GFA) 较低, 导致非晶粉末只能通过带材破碎法来制备, 具有尖锐的棱角, 难以绝缘, 使磁粉芯涡流损耗增加, 性能恶化。针对这一问题, 本文采用工业原材料, 通过感应熔炼法制备了名义成分为 $(Fe_{0.76}Si_{0.09}B_{0.1}P_{0.05})_{98.5}Nb_{1}Cu_{0.5}$ 的母合金, 采用真空雾化法成功制备出了球形非晶粉末。以 2% 的环氧树脂为绝缘粘结剂, 在室温下用 1800 MPa 的压强压制成外径为 20.3 mm, 内径为 12.7 mm, 厚为 5.4 mm 的环形磁粉芯。随后, 系统研究了退火温度对磁粉芯高频性能的影响规律。结果表明, 在 $480^\circ C$ 退火 1 小时后, 磁粉芯的性能最优, 其磁导率达到 86, 并且在 10 MHz 范围内保持稳定, 在 $B_m = 0.1$ T, $f = 100$ kHz

时，其损耗仅为 1290 mW/cm³，在外加直流偏置场为 100 Oe 时，其磁导率仍能保持在初始值的 50%以上。这种性能优异的新型铁基纳米晶磁粉芯有望广泛应用于各类开关电源、变压器和扼流圈等器件中，促进电子元器件及相关行业的发展。

D03-15

(Fe,Co)-B-Si-Zr/Hf 高硬块体非晶合金

耿遥祥，鞠洪博，喻利花

江苏科技大学

铁基块体非晶合金软磁和力学性能优异，在录/放磁头、扼流圈、耐磨材料及结构材料等领域具有良好的应用前景。相似原子替代可有效增加块体非晶合金的形成能力（GFA）、软磁和力学性能。其中，以 Fe-B-Si-Nb 块体非晶合金为基础，通过 Co 适当替代 Fe 可有效增加非晶合金的 GFA 和力学性能，降低非晶合金的矫顽力（H_c），其中 [(Fe_{0.5}Co_{0.5})_{0.75}B_{0.2}Si_{0.05}]₉₆Nb₄ 合金形成棒状块体非晶样品的临界尺寸（d_c）可达 5 mm，断裂强度（σ_f）超过 4200 MPa。基于此，本研究以 Fe_{71.7-x}Co_xB_{16.7}Si_{8.3}Zr_{3.3} 和 Fe_{72.5-y}Co_yB_{16.7}Si_{8.3}Hf_{2.5}（x, y = 0, 5, 10, 15, 20, 25，原子百分比）块体非晶合金为基础，通过铜模吸铸、单辊甩带、X 射线衍射、热分析、纳米压痕、维氏硬度、磁性测量等手段，系统研究 Co 替代 Fe 对非晶合金 GFA、热稳定性、力学性能和软磁性能的影响。结果表明：随着 Co 含量的增加，样品的 GFA 逐渐降低，d_c 由替代前的 2.5 mm 降低到 1.0 mm，当 Co 的含量增加到 25 时，在 Fe_{46.7}Co₂₅B_{16.7}Si_{8.3}Zr_{3.3} 合金成分中已经不能形成块体非晶样品；非晶合金的玻璃态转变温度（T_g）、晶化开始温度（T_x）、过冷液相区宽度（ΔT_x）及液相线温度（T_l）随着 Co 含量的增加而逐渐降低，表明非晶合金的热稳定性逐渐降低；块体非晶样品的硬度（H_v）和杨氏模量（E）随 Co 含量的增加而逐渐升高，其中 Fe_{51.7}Co₂₀B_{16.7}Si_{8.3}Zr_{3.3} 块体非晶样品的 H_v 和 E 分别高达 13.5 GPa 和 230 GPa，超过现有报道的 Fe 基块体非晶合金，这主要归因于 Co 替代 Fe 后使得非晶合金中原子键强增大，增加了破坏难度；非晶条带样品的饱和磁感应强度（B_s）随 Co 含量的增加而逐渐降低，H_v 先降低后增加，所有样品表现出良好的软磁性能（B_s 为 1.12-1.33 T，H_v 为 0.6-5.2 A/m）。

D03-16

高 Cu 含量 Fe 基 FeSiBCu 非晶/纳米晶粉体的制备及其电磁屏蔽性能研究

张春旋，李艳辉，张伟

大连理工大学材料科学与工程学院

随着电子信息产业技术的进步，现代电子设备向着微型化、集成化和高频化方向发展，加之新一代无线通讯、无线充电技术的崛起，电磁干扰、电磁污染现象日益严重。传统的铁氧体屏蔽材料由于受到 Snoke 极限的制约而无法满足高频应用的需求，探索和发展高频适用的高效电磁波屏蔽/吸波材料已经成为迫切需要解决的问题。Fe 基非晶/纳米晶软磁合金具有高的饱和磁化强度和磁导率，在 GHz 频率范围内具有作为吸波材料的潜在应用，但纳米晶结构与电磁屏蔽/吸波性能的相关性尚缺乏系统研究。最近，我们选取高铜含量（Cu > 2.0 at.%）的 FeSiBCu 合金为研究对象，采用球磨法制备合金粉体，调查了球磨时间和热处理工艺对粉体的结构、形貌和电磁性能（2-18 GHz）的影响规律。结果表明，该合金经适当时间球磨后可形成平均颗粒尺寸为~7 μm 的球状粉体，具有 α-Fe 晶粒尺寸为~5 nm 的纳米晶/非晶双相结构，并在 X 波段（8-12 GHz）内显示出优异的吸波性能。粉体经适当热处理后，吸波性能可进一步改善。

D03-17

Fe 基非晶合金高温应变强化行为研究

高雪峰，杨红旺

沈阳工业大学

铁基非晶合金具有初晶型晶化的特点，析出纳米铁晶体，具有良好的软磁性能，是变压器铁芯材料硅钢的替代产品，可大大降低变压器运行过程中的铁损耗，提高工作效率。前期，我们在铝基非晶合金中观测到明显的高温应变强化行为。铁基非晶态合金过冷液相区非常有限或不存在稳定的过冷液相区，同样也是典型性的初晶型晶化的非晶合金体系。铁基非晶合金作为变压器铁芯硅钢的替代材料，在使用过程中不可避免的要受到温度升高和应力的双重作用，研究铁基非晶合金高温变形行为和力学性能对非晶合金的基础和应用研究均具有重要意义。我们对 Fe₇₈Si₉B₁₃ 非晶合金进行高温拉伸测试，

研究了不同温度和应变速率下的变形行为、断口形貌及微观组织转变，探索了温度和应变速率因素对非晶合金高温变形和力学性能的影响。结果表明，Fe78Si9B13 非晶合金在拉伸过程中随着温度的增加，应变速率的降低其断裂强度降低，塑性变形能力增加；应力-应变曲线中出现了应变强化现象。多晶金属材料，室温应变强化是由于塑性变形引起的位错增殖，位错之间或位错和晶界等其它晶体缺陷的相互作用引起的，而 Fe78Si9B13 非晶材料仅含有晶粒尺寸<10nm 的不连续、弥散分布的纳米铁晶粒，应变强化不可能是位错强化机制引起。因此，非晶合金高温应变强化机理研究具有重要的科学意义。结合拉伸过程中的晶化动力学、断口形貌和微观组织变化，我们对其高温应变强化行为的机理进行了讨论。

D03-18

低成本 FeCo 基非晶合金电催化性能研究

张发宝，蒋伟，胡青卓

合肥工业大学材料科学与工程学院

非晶合金（简称 MGs）由于其结构上的特殊性和亚稳定性，因而具有很多优异特性，如高强度、耐腐蚀性、超导电性等，已广泛用于国民经济各个方面。MGs 用作催化剂具有很多独特的性质，一方面可以在很大的范围内调节合金的组分、连续地控制其电子性质；另一方面非晶合金具有亚稳态特性的内部结构，在腐蚀介质中具有很好的稳定性。因此，MGs 被认为是一种潜在的电催化剂。另外，MGs 能够大规模生产并且生产成本低，操作简便。此外，FeCo 基纳米材料已被大量实验证实符合低的成本效益，并且具有良好的耐腐蚀特性与高的电催化活性[3]。鉴于此，我们设计出一种析氢电催化活性高的过渡金属 Fe、Co 基的非晶合金电催化剂。首先，采用单辊激冷技术获得高品质的 FeCo 基非晶合金带材。然后通过 X 射线衍射（X-ray diffraction, XRD）和透射电子显微镜（Transmission electron microscopy, TEM）对带材的结构进行表征，XRD 谱线上仅存在唯一的宽而弥散的馒头峰，TEM 图谱上没有出现明显的晶格条纹、衍射斑点以及晶体衍射环，这些结果表明制备的合金带材为完全的非晶态组织。最后采用三电极系统对样品的电催化特性进行测量，其中成分为 Fe40Co40P13C7 带材在 0.5M H2SO4 溶液中，10 mA cm⁻² 电流密度对应的过电位为 118 mV[4]。一系列实验结果表明，这类 FeCo 基非晶合金在酸性溶液中具有高电催化活性和长期稳定性，是一种很好的电催化剂，具有极大的商业应用前景。

D03-19

非晶合金的塑性与其液体结构和性能的关系

惠希东

北京科技大学

缺少塑性是当前制约块体非晶合金在工程方面应用的重要因素。块体金属玻璃塑性的起源以及评估块体金属玻璃的塑性依然是开放性的课题。本工作制备和调查了一系列具有不同塑性的块体金属玻璃，并研究了其塑性与熔融液体与过冷液体脆度的关系。研究表明，（1）合金的塑性与熔融液态的结构有着密切联系即：熔融合金在高温熔体的脆性值 M 与塑性成反相关的关系；（2）低温的脆性值 m 与塑性成正相关的关系；（3）合金的塑性与强脆转变温度成反相关关系，并从结构弛豫的角度解释了这种关系；（4）从能量角度来看，韧性的金属玻璃在转变温度处的势垒大于脆性金属玻璃，因此将保留更多的类液区。

D03-20

Short-range order in Metallic glasses: Enough or not?

管鹏飞

北京计算科学研究中心

非晶合金，又称金属玻璃，是典型的由金属键主导的原子玻璃体系，其相对简单的微观结构为探索非晶态相关的基本物理问题提供了优良模型；非晶合金无序结构所带来的优异力学，物理和化学性能，也为其在各类新材料领域的应用提供了物性基础。因而，对非晶合金的研究不仅具备重要的科学意义，也具有重要的应用价值。与其他玻璃的形成一样，非晶合金是通过对高温合金熔体的快速冷却来抑制结晶过程，并在一定的温度时发生玻璃转变(glass transition)而形成。玻璃转变是与非晶合金的形成、微观结构与宏观物性等密切相关的物理过程，但其本质并不能通过传统的热力学相变理论来描述，是当前凝聚态物理和材料科学所面临的巨大挑战之一。近年来，人们在对非晶合金过冷液体的研究中发现，随温度的降低，

其动力学行为变慢的同时也伴随着特殊局域结构特征（短程序）的演化，进而尝试构建过冷合金熔体中结构短程序与慢动力学之间的耦合关系，并将其理解为慢动力学的结构起源。基于计算模拟，我们发现了受限非晶合金过冷液体中慢动力学与其结构短程序（特征原子团簇）特征之间的退耦合；构建了慢动力学与原子构型相似度之间的耦合关系，并给出了由该相似度出发定义的静态关联长度在无论是受限、还是非受限体系中对慢动力学的普适描述，揭示了该静态关联长度在玻璃转变中的主导作用。研究表明控制非晶合金过冷液体慢动力学，乃至玻璃转变的结构因素并不是非晶几何结构的短程序，而是反映构型间空间关联的静态关联长度；为更全面地认识非晶合金的几何结构序、更深入地理解玻璃转变的本质提供了全新的视角。

D03-21

非晶合金玻璃转变的结构起源

刘雄军，王书道，王辉

北京科技大学

玻璃转变的本质是当前非晶合金领域最受关注的科学问题之一。本报告将介绍近来我们采用分子动力学模拟方法对非晶合金中玻璃转变的结构起源进行探索的部分工作。在前期工作中（PRL, 2010, 105, 155501），我们发现非晶合金原子排列的总体特征可描述为球周期有序叠加局域平移对称性（LTS），表明 LTS 是非晶原子结构的普遍特征之一。近期，通过对非晶合金中的 LTS 结构进行定量表征，得到了玻璃形成过程中 LTS 团簇（含量、尺寸、分布）随温度的演化规律，发现随着温度降低 LTS 团簇尺寸逐渐增加，并在玻璃转变温度附近发生渗逾（percolation）转变，形成 LTS 渗逾网络结构从而导致玻璃转变的发生。我们进一步揭示了 LTS 团簇发生渗逾转变的原子机制：少量 LTS 原子充当“钉子”将过冷液态中已有的 LTS 团簇钉扎起来形成 LTS 渗逾骨架。该结果不仅为理解玻璃转变的结构起源提供了有益线索，而且也有助于理解非晶合金的变形行为。

D03-22

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，Keith K.C. Chan，潘少鹏

燕山大学材料科学与工程学院

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原因之一，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，首先通过不同技术手段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。

D03-23

非晶合金纳米颗粒的压缩形变行为

张琪，李默

中国空间技术研究院钱学森空间技术实验室

作为一种小尺寸材料，纳米颗粒有很大的比表面积，其力学性能与块体材料可能存在显著差异。而相比于同样作为小尺寸材料的纳米线，纳米颗粒由于截面积分布不均，接触表面可能会承受非常大的应力，从而表现出独特的力学行为。由于实验条件的限制，目前几乎找不到关于非晶合金纳米颗粒力学性能的研究。本研究采用分子动力学模拟的方法对 Cu64Zr36 非晶合金纳米颗粒的压缩形变行为进行研究，重点关注纳米颗粒尺寸和应变速率对力学性能的影响。在尺寸影响的研究中，通过对比直径为 20nm 和 50nm 的纳米颗粒的压缩形变行为发现，在纳米尺度下，尺寸变化不改变非晶合金纳米颗粒的压缩形变行为，不均匀的原子应变分布是纳米颗粒独特的几何形状导致的。在应变速率对非晶合金纳米颗粒压缩变

形行为影响的的研究中发现三种不同的形变行为（几何形状随应变的变化、应力-应变曲线、表面熔化等），在应变速率小于某个阈值的情况下，纳米颗粒的压缩变形行为不随应变速率的改变发生显著变化。当应变速率达到阈值，形变行为会出现显著变化。通过分析发现，应变速率的阈值与该材料中的声波传递速度有着密切联系。

D03-24

基于 AIMD 的铁基非晶合金中扩散行为的模拟与分析

汪姚岑, 郝梓焱, 张岩

西北工业大学

铁基纳米晶合金是继铁基非晶态合金之后又一种具有优异软磁性能与应用前景的新材料。其典型制备工艺是通过对铁基非晶态合金进行适当的退火以使得其中出现大量 α -Fe 形核但不发生过度的晶粒长大而成，实际上是纳米尺度的 α -Fe 晶体镶嵌在残余非晶母体中的复合材料。早期开发的铁基纳米晶合金往往需要加入一定量的 Nb, Zr 等大原子序数的金属元素，如 FINEMET 与 NAMOPERM 系列等。通常认为这些元素的添加一方面将有利于初步合成中非晶合金的形成，另一方面其较大的原子尺寸将导致非晶合金在退火晶化过程中的原子扩散受阻，从而抑制晶体的长大以促成纳米晶合金的形成并使得材料具有良好的软磁性能。然而早期的尝试中也发现，对抑制晶粒生长的作用并不是随着原子尺寸越大而逐渐上升。目前普遍认为 Nb 的添加对晶粒生长的抑制效果明显优于 W, Hf, Ta 等第六周期元素，说明原子尺寸并不是抑制扩散的关键因素，也不是促成纳米晶合金的主要原因。通过基于第一性原理的分子动力学对铁基非晶合金的结构与热动态特征进行模拟分析发现，原子尺寸对非晶合金中的原子扩散能力的影响极其有限，而决定原子扩散能力的关键因素是非晶合金中原子与近邻原子间的结合能。并且，在分子动力学模拟过程中发现，高温下 Nb 原子的扩散能力在 FeNbSi 或 FeNbCu 体系三元非晶结构中与 Fe 的扩散能力基本相同，但在 FeNbB 体系中则显著低于 Fe 的扩散能力，说明铁基非晶合金中加入 Nb 以抑制原子扩散是通过 Nb 与 B 的共同作用而造成的，而这一机理实际上与 Nb 和 B 之间强烈的结合倾向有关。因此，在 FINEMET 等类型的铁基非晶合金晶化过程中，Nb 与 B 将优先结合以形成扩散壁垒以阻碍晶粒的长大，这也解释了为何具有极强扩散能力的 B 在 FINEMET 类型的非晶合金晶化后会与原子尺寸远大于 B 的 Nb 共同富集在 α -Fe 晶体表面。此外，本研究还以同样的方式对 Zr、W 等元素在铁基非晶合金结构中的扩散能力进行了分析，通过横向比较说明了造成高周期重金属元素对铁基非晶合金纳米晶化促进作用的原因。

D03-25

Metallic glass nanostructures of tunable shape and composition

柳延辉

中国科学院物理研究所

Metals of hybrid nano-/microstructures are of broad technological and fundamental interests. Manipulation of shape and composition on the nanoscale, however, is challenging, especially for multicomponent alloys such as metallic glasses. Although top-down approaches have demonstrated nanomoulding, they are limited to very few alloy systems. In this talk, we present a facile method to synthesize metallic glass nanoarchitectures that can be applied to a broad range of glass-forming alloys. This strategy, using multitarget carousel oblique angle deposition, offers the opportunity to achieve control over size, shape and composition of complex alloys at the nanoscale. As a consequence, nanostructures of programmable threedimensional shapes and tunable compositions are realized on wafer scale for metallic glasses including the marginal glass formers. Realizing nanostructures in a wide compositional range allows chemistry optimization for technological usage of metallic glass nanostructures, and also enables the fundamental study on size, composition and fabrication dependences of metallic glass properties.

D03-26

Zr 基大块金属玻璃隐藏液态相变微观机制的原位研究

兰司, 董蔚霞, 葛嘉城

南京理工大学

近来研究报道，具有优异玻璃形成能力大块金属玻璃，如典型的 Pd-Ni-P 合金等，在被加热到超过冷液相区的过程中会发生异常放热现象，原位散射结果表明该异常放热峰对应着晶化温度以下的隐藏液-液相变(1, 2)。无独有偶，具有优异玻

璃形成能力的 $Zr_{52.5}Cu_{17.9}Ni_{14.6}Al_{10}Ti_5$ (BAM11) 大块金属玻璃在加热到晶化温度之前也会发生异常放热现象。人们针对该现象展开了大量研究,但其对应的微观结构变化机制仍然悬而未决,甚至存在争议。本文利用差式扫描量热分析、同步高能 X-射线广角衍射/小角散射、原位径向分布函数、以及原位透射电子显微镜研究了 BAM11 在超过冷液态区间的热物理行为及液态相变机制。原位同步 X-射线广角衍射/小角散射结果揭示了样品随保温时间变化的一系列多尺度结构演变过程,表明样品在结晶之前发生了隐藏液态相变。径向分布函数 (PDF) 则从实空间角度揭示了短程、中程尺度不同壳层的结构变化,表明团簇连接在液态相变过程发挥了关键作用。原位透射电子显微镜进一步揭示了 Zr 基超冷液体的完整相变路径。上述研究结果表明,多组元 Zr 基金属玻璃在超过冷液相区晶化温度前会发生液态相变,其独特的相变行为暗示该合金体系具有复杂的短程和中程有序结构。研究表明多尺度结构的协同耦合演变可能是 BAM11 合金具有超高热稳定性的原因,同时可与其优异的玻璃形成能力关联起来。我们的研究有利于进一步清除该研究方向的争议,同时可为研发新型超稳非晶合金提供参考。

D03-27

Fe 元素替代对 $Gd_{60}Co_{40-x}Fe_x$ 非晶合金热稳定性及磁热性能的影响

张慧燕, 欧阳建涛, 李海玲

安徽工业大学

非晶合金作为磁制冷材料,其磁转变温区更宽从而磁制冷效率和相对制冷能力更高,而且工作温度区间可调。目前在近室温区,Fe 基与 Gd 基非晶是主要研究对象。在 RE-TM (RE: 稀土元素, TM: 过渡族金属) 家族中,Gd-Co 二元非晶体系在近室温区间具有较大的磁熵变值,并且随着 Co 元素含量的增加,其居里温度 TC 会逐渐接近室温,但是磁熵变峰值 $|\Delta SM_{pk}|$ 减小。经报道,5 at% Fe 元素替代 $Gd_{50}Co_{50}$ 中的 Co 元素,可以使非晶合金的居里温度接近室温的同时仍然保持较大的磁熵变以及较好的制冷能力,但关于一系列不同含量 Fe 元素替代对 Gd-Co 体系非晶形成能力和磁热性能的影响,尚未见到相关研究与报道。本论文以 Gd-Co 二元非晶合金体系中具有较高磁熵变的 $Gd_{60}Co_{40}$ 为基础,通过不同含量 Fe 替代 Co,通过单辊熔体旋淬法获得了 $Gd_{60}Co_{40-x}Fe_x$ ($x = 0, 5, 10, 15, 20$) 系列非晶合金条带,但 Fe 元素的加入使非晶合金的热稳定性和玻璃形成能力降低。另外,随着 Fe 含量增加,合金磁性能和磁热性能的变化如下: (1) TC 先升高后降低,以 $Gd_{60}Co_{30}Fe_{10}$ 的最高为 239 K; (2) $|\Delta SM_{pk}|$ 逐渐减小,这些现象可能归因于 Fe 对 Co 的替代使合金中的主导磁交换作用由铁磁性变化为亚铁磁性。在该系列非晶合金中, $Gd_{60}Co_{30}Fe_{10}$, $Gd_{60}Co_{25}Fe_{15}$ 和 $Gd_{60}Co_{20}Fe_{20}$ 的 $|\Delta SM|$ -T 曲线在较宽温度区间内呈现平台型,可以通过非晶合金主相中的局域结构不均匀性对此进行解释。指数 n ($|\Delta SM| \propto H^n$) 的偏离和 ΔSM -T 曲线普适行为的构建,进一步印证了上述观点。期望本文能够帮助研究者们加强对元素替代影响磁热性能的规律的理解,以及研发在近室温区适于 Ericsson 循环的磁制冷非晶合金。

D03-28

非晶合金粘弹性变形中的“涡旋状”原子运动

刘晓笛, 王天玉, 叶一帆

香港城市大学

非晶合金的粘弹性常常归因于原子的滑移或者局域的剪切变形事件的激活。然而,我们利用分子动力学模拟的方法对非晶合金蠕变行为进行研究,结果显示非晶合金的粘弹性有很大一部分是由于原子的非简谐振动造成的。而且,研究发现这类往复的非简谐振动是多个原子的集体协同转动的行为。这种运动可以产生了很大的局部旋度,大约十倍于剪切变形直接产生的旋度值。这很类似于粘性流体在受限剪切时所表现出的特征。随着非晶合金粘弹性变形的进行,这种“涡旋状”的原子运动展现出与原子剪切变形不断增加的关联性。研究结果还显示非晶合金的粘弹性变形是一个包含两种过程的复杂过程,这与近期报道的在多种非晶合金中发现的两种 beta 弛豫现象吻合。

D03-29

金属玻璃形成液体中高温动力学转折的微观研究

任楠楠, 胡丽娜, 管鹏飞

山东大学

金属玻璃形成液体从高温降至 TA 时，弛豫行为会经历从 Arrhenius 到 Super-Arrhenius 的转折，TA 被认为是协同运动开始的温度，且一般在熔点以上，但其微观机理目前还不清楚。本工作通过对 Fe80P20 体系液体的分子动力学模拟，得到了弛豫时间与动力学不均匀性之间的幂律关系，发现 TA 处的动力学转折与动力学不均匀性增长趋势偏离 Arrhenius 相对应，并进一步揭示发生这种转折的结构起源是五重对称性高于 0.6 的原子显著增多，并且这类原子运动较慢，相互关联形成较大团簇。TA 作为高温玻璃形成液体中的动力学转折，其演变机制影响着后续的玻璃转变，研究其微观机理，对于进一步认识玻璃转变现象具有非常重要的意义。

D03-30

金属玻璃温退火中的两步弛豫动力学

宋丽建，王军强

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

退火是一种有效调节金属玻璃性质的方法，但通常认为退火是单一的弛豫过程。我们利用高精度闪速差示扫描量热仪系统研究金基金属玻璃等温退火过程中的焓变行为。发现金基金属玻璃 β 弛豫向 α 弛豫的等温转变行为。并通过能量地形图模型定量解释了不同弛豫模式间转变行为。发现微小的焓变(0.8 kJ/mol)会导致激活能垒极大的提升(100 kJ/mol)，并认为是由于原子协同运动造成的。这对我们理解不同弛豫模式对金属玻璃性质的影响提供了基础。

D03-31

La30Ce30Al15Co25 大块金属玻璃中的动态弛豫行为

陈迎红，乔吉超

西北工业大学

动态弛豫是理解金属玻璃力学和物理性质的基础。我们通过动态力学分析的方法研究了 La30Ce30Al15Co25 金属玻璃的力学弛豫行为。与其它典型金属玻璃不同，基于损耗模量，La30Ce30Al15Co25 金属玻璃表现出了明显的慢 beta 弛豫峰。在玻璃转变温度 Tg 点以下的物理时效使得慢 beta 弛豫的激活能明显增强和 alpha 弛豫强度的降低。我们进一步讨论了慢 beta 弛豫和 alpha 弛豫之间的联系。La30Ce30Al15Co25 金属玻璃提供了一种典型玻璃体系来研究动态弛豫行为。

D03-32

非晶塑性：从自由体积到剪切转变

蒋敏强

中国科学院力学研究所

理解“塑性”即固体在外力激励下如何流动是固体力学的一个经典问题。自 1934 年晶体塑性的位错机制被提出至今，固体塑性总是与晶格缺陷及其运动密切相关。但是，这种经典机制对于自然界中普遍存在的非晶固体而言不再适用，位错、孪晶等传统晶格缺陷在长程无序非晶固体中无法定义。过去几十年，非晶塑性理论或模型的发展主要沿着两条途径：一条致力于寻找承担非晶塑性的结构缺陷，以美国工程院院士哈佛大学 F. Spaepen 教授提出的“自由体积”理论为代表；另一条则认为非晶塑性不存在确定的结构起源，而应该直接关注微观的基本流动事件，以美国科学院院士麻省理工学院 A.S. Argon 教授提出的“剪切转变”理论为代表。报告人近期的工作试图统一这两条途径，打通“非晶结构-流动事件-塑性变形”这一全过程。首先，通过胶体玻璃可视化技术研究了剪切转变流动事件的时空演化动力学，澄清了剪切转变与自由体积动力学的相互作用图像。随后，基于此图像，发展了一个非晶固体的粘弹塑性本构模型，复现了非晶固体中的多种塑性行为，揭示了剪切转变事件和自由体积动力学这两个高度耦合过程如何协同控制非晶固体的塑性屈服和后期演化。最后，理论预测和实验验证了非晶塑性流动局部化（剪切带）过程中的体胀程度即自由体积含量。

D03-33

块体非晶合金的变形行为：形变软化还是加工硬化？

潘杰，李毅

中国科学院金属研究所

一般来说, 块体非晶合金的变形主要依靠剪切带进行。但是剪切带内剧烈软化使塑性变形局限于极小区域, 从而使非晶合金表现为脆性断裂, 这也严重制约其工业应用。结合自由体积模型, 实验观察和分子动力学模拟, 本工作发现, 块体非晶合金的变形行为和力学性能取决于其应力状态。在单轴拉伸或压缩变形时, 自由体积产生的速率总是大于自由体积湮灭的速率, 使自由体积迅速聚集并形成剪切带, 从而使非晶合金表现为形变软化和非均匀变形。在三维压缩状态下, 形变软化仍然主导非晶合金的变形过程。但由于在此条件下剪切变形能被有效抑制, 从而使非晶合金表现为均匀变形行为, 伴随着剧烈的回春和软化现象。在三维拉伸状态下, 自由体积湮灭速率在某一临界应力时超过产生速率, 加工硬化开始主导非晶合金的变形行为, 伴随着硬度的上升和结构的有序化。在此变形条件下, 块体非晶合金表现出独特的力学行为, 如超高的强度 (>2.9 GPa), 拉伸塑性 (>10%), 反缺口效应以及韧性断裂行为。本工作系统呈现了块体非晶合金在不同应力状态下的变形机理以及对应的结构演化和力学性能, 这将有助于对非晶合金变形行为的深入认识。

D03-34

金属玻璃的动态力学弛豫行为研究

乔吉超

西北工业大学

随着对非晶态材料(高分子、氧化物玻璃和金属玻璃等)物理及力学性能的研究, 其弛豫行为已经成为理解过冷液体玻璃转变、扩散行为和力学性能等的重要表征手段。从热力学上出发, 过冷液体是从高温冷却下来, 各态遍历并且能量处于亚稳态的材料, 因而弛豫是过冷液体的内在本质。研究表明, 非晶态材料的弛豫温度在某一个临界温度 T_c 以下, 其弛豫模式会从单一的弛豫行为劈裂为主弛豫 (β relaxation) 和次弛豫 (α relaxation)。 α 弛豫对应着玻璃转变过程, 而玻璃转变行为是凝聚态物理中至今尚未清晰理解的重要基础问题之一。事实上, 从动力学的角度出发, 玻璃转变对应着过冷液体的弛豫现象, 为了进一步探究非晶态物质的玻璃转变现象, 一个重要课题就是深入理解玻璃转变过程中过冷液体的弛豫行为的相关问题大量的研究发现其与金属玻璃的物理、化学和力学等诸多性能直接相关, 目前对金属玻璃动态弛豫行为的研究还存在着很多问题亟待解决。本报告将结合现阶段金属玻璃动态弛豫的最新研究进展, 重点介绍金属玻璃动态弛豫的特征、联系及物理分析。

D03-35

非晶合金薄膜的纳米划痕研究

马昕迪, 马将, 王刚

上海大学材料研究所; 上海大学微结构重点实验室

非晶合金薄膜, 作为一种二维形态的非晶合金, 具有高硬度, 低模量, 耐腐, 耐磨, 抗菌等优势, 由于其良好的弯曲延展形成能力, 且表面较光滑, 在微机电系统有着良好的应用前景。本文采用磁控溅射制备出不同模量硬度梯度的 Ni62Nb38, Cu50Zr50, Co66Ta35B9, Fe70Nb10B20 四种非晶合金薄膜, 并对基片加热, 采用纳米压痕与纳米划痕仪分析其微观光学行为, 探究不同模量与硬度的非晶合金薄膜在不同载荷与加载速率下随温度变化后的弹塑性变形能力以及耐磨性的关系。实验结果表明同一成分的合金薄膜的模量和硬度与溅射基片温度呈负相关关系, 在同一加载力状态下弹性回复量随加载速率增加而降低; 加载速率越大压入深度越深, 且硬度值越大的样品在纳米滑移过程所受侧向力越大, 分析了材料硬度与耐磨性的关系, 并用自由体积理论解释了非晶合金薄膜在纳米划移过程中材料的模量与薄膜回复程度的关系。

D03-36

N、O 元素掺杂 Ti 基非晶复合材料的拉伸变形行为

李力源, 王军, 寇宏超

西北工业大学

钛基非晶合金及非晶复合材料的制备过程通常是用高纯度原料在高真空的环境下进行的, 苛刻的制备条件所带来的高昂成本限制了其工业化应用。本文在成分为 Ti48Zr20Nb12Cu5Be15 的非晶复合材料中添加 2 at. % 的氧元素和氮元素。拉伸结果显示出不同的断裂方式。2 at. % 氧元素的引入会引起非晶基体热稳定性的降低, 非晶基体中出现许多的弥散的纳米晶, 同时沿枝晶边缘形成了多晶结构的微观颗粒, 裂纹绕过枝晶扩展。与氧元素相比, 氮元素掺杂的非晶复合材料在提高强度的同时可以保持一定的拉伸塑性以及加工硬化过程, 避免了材料在变形过程中发生灾难性断裂。

D03-37

Zr-Cu-Fe-Al 金属玻璃的微观结构及力学性能研究

刘思楠, 董蔚霞, 葛嘉城

南京理工大学材料科学与工程学院/格莱特研究院

采用差示扫描量热法、小角/广角同步 X 射线散射、同步辐射高能 X 射线衍射、中子衍射以及力学性能等测试手段, 研究了两种金属玻璃 Zr₅₉Cu₃₃Al₈ 和 Zr₅₉(Cu_{0.55}Fe_{0.45})₃₃Al₈ 的热物理行为、原子和纳米尺度结构、机械性能以及它们的内在联系。结果表明, 在不同的铸造温度(对应吸铸初始电流)下, Zr₅₉Cu₃₃Al₈ 熔融液体在凝固过程中没有异常的结构变化。与之不同的是, 使用较低的吸铸温度制备的 Zr₅₉(Cu_{0.55}Fe_{0.45})₃₃Al₈ 熔融液体在冷却过程中发生了液态相分离。小角 X 射线散射结果表明, Zr₅₉(Cu_{0.55}Fe_{0.45})₃₃Al₈ 金属玻璃的非均质性随着吸铸温度的降低而增加。研究进一步表明, 发生了液态相分离的 Zr-Cu-Fe-Al 金属玻璃具有更好的综合机械性能, 包括更高屈服强度和更显著的压缩延展性, 其压缩曲线对应着更复杂的锯齿流变行为。同步辐射高能 X 射线衍射以及中子散射径向分布函数分析结果表明, 液态相分离引起的溶质原子间键结合的变化可能是其塑性得到改善的内在原因。基于上述结果, 我们发现通过改变吸铸电流, 在固定的吸铸时间内可以调整吸铸初始温度, 可实现 Zr-Cu-Fe-Al 金属玻璃熔体液态相分离过程中微观结构的调控, 从而改善其力学性能。本文研究结果可为结构和性能可调控的纳米结构大块金属玻璃的研发提供新的思路。

D03-38

Zr 基非晶合金的动态力学性能研究

胡亚杰, 王朝欢, 翟薇

西北工业大学

非晶合金具有显著的动态力学弛豫行为, 研究弛豫行为对理解其结构有着重要科学意义。本文通过铜模吸铸的方法制备了 Zr_{64.13}Cu_{15.75}Ni_{10.12}Al₁₀ 大块金属玻璃, 利用 X 射线衍射仪对其进行了结构分析并证实了其非晶结构, 通过差示扫描量热仪 DSC 图谱得到了其玻璃化转变温度 $T_g=639K$, 结晶起始温度为 $T_x=723K$, 结晶温度为 $T_p=741K$, 其过冷液相区宽度 $\Delta T=84K$ 。通过动态力学热机械分析仪 DMA 在温度域和频率域上系统研究了其动态力学性能。发现 Zr_{64.13}Cu_{15.75}Ni_{10.12}Al₁₀ 非晶合金在 683K 附近出现明显的主弛豫 (α 弛豫), 计算弛豫激活能为 4.24eV。温度域的研究中损耗模量的值在温度低于 633K 时保持稳定(接近 0), 在 633-718K 时急剧上升并在 $T_g=639K$ 处出现峰值; 频率域的研究中发现随着驱动频率的升高, 损耗模量的峰值向高温区移动, 对应的玻璃转变温度 1Hz 时为 681K, 16Hz 时为 710K, 说明弛豫的发生出现在高温低频方向, 即金属玻璃的动态玻璃转变, 可归结于高温或者低频作用下原子运动能力的增加。通过 Debye 模型, KWW 模型, QPD 模型对主曲线进行了分析。由于金属玻璃主弛豫的非对称性, Debye 模型不能很好的描述弛豫过程。KWW 模型中, 当 Kohlrausch 指数 $\beta_{KWW}=0.571$ 时, 实验数据与模型可以很好的吻合。在具有明确物理意义的 QPD 模型中, 实验数据与 QPD 方程较好符合, 此模型也将金属玻璃的微观结构状态与宏观弛豫行为进行了定量的联系。

D03-39

非晶合金剪切带运动稳定性研究

孙保安

中国科学院物理研究所

由于结构长程无序, 非晶合金表现出和晶体合金完全不同的变形行为和机制。微观上, 非晶合金没有类似于位错等晶体结构缺陷; 而宏观上, 非晶合金的变形具有不均匀化特点, 即形成剪切带和锯齿流变现象。研究非晶合金的剪切带的行为和性质不仅对理解和设计非晶合金材料的塑性非常重要, 而且对研究其它复杂无序体系的受力和失稳(如胶体运动、地震、山体滑坡等)也有重要价值。然而由于高度的时空局域化, 非晶合金的剪切带过程及其与宏观力学行为的本征关联仍然不是很清楚。前期通过对锯齿流变的统计和动力学分析, 我们初步阐明了剪切带复杂动力学特征与非晶塑性的关联, 发现了塑性非晶合金的自组织临界性。并且通过理论分析, 发现非晶合金锯齿流变行为起源于剪切带运动过程中的本征动力学不稳定性, 并且找到了控制锯齿流变的关键参数。本报告中, 我们将主要介绍最近在非晶合金锯齿流变过程中剪切带运动稳定性方面的研究成果。首先, 利用非晶合金锯齿流变中应力的变化与剪切带之间的对应关系, 我们得到了一种简单的精确测量锯齿过程中剪切带瞬时速度变化的方法。采用这种方法, 我们追踪了 90 余不同非晶合金样品在不同条件压缩变形

时的瞬时速度演化，发现几乎所有样品在失稳前的剪切带所能到达的最大瞬时速度几乎为一个常数， $1.5\pm 0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这说明非晶合金的剪切带运动稳定性受一个临界速度控制。该临界速度对应的粘度值大约为 $10^4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，在过冷液体的粘度范围。从物理机制上来说，剪切带的失稳的临界速度准则说明非晶的失稳断裂是一个液体不稳定性过程，和 Tanaka 等人提出的非晶断裂的液体不稳定性理论相吻合。最后，我们还将讨论这里发现的剪切带失稳的临界速度准则对理解和设计非晶合金在不同条件下的塑性的启示和意义。

D03-40

玻璃材料制成的梁的一阶弯曲振动中的异常双峰现象——非整数阶粘弹性的证据？

阮海辉，王建彪，王旭

香港理工大学机械工程学系

本文报告了一种当温度高于玻璃转变点(T_g)以后发生的奇特的双峰现象，即由玻璃制成的梁状样品在基模态下的弯曲振动，其振动的能谱在基频附近存在两个峰。这种现象在对由硼硅酸盐玻璃，硫系玻璃和金属玻璃制成的量的激励振动的实验中都有发现，可被认为是玻璃态材料流变行为的共同特征，但是与经典的弹性振动理论解明显不同。玻璃材料在温度高于 T_g 时，其振动行为会由于粘弹性行为而变得非常复杂。通常这种复杂性只用广义 Maxwell 模型来描述，即损失谱拉伸对应于松弛时间分布发生宽化。但是广义 Maxwell 模型不能预测到实验中观察到的双峰。为此，本文引入非整数阶粘弹性模型对一个两端自由的玻璃梁的基模态进行分析，并成功预测到两个互相接近的振动峰。这表明，处于过冷态的玻璃材料的特殊流变行为，可能比广义 Maxwell 模型更加复杂，此复杂性是导致双峰的原因。

D03-41

内生型 Ti 基非晶合金复合材料的反常内耗行为研究

吕国建，乔吉超，姚尧

西北工业大学

本研究采用动态力学分析仪对原位内生枝晶型 Ti 基非晶复合材料的内耗行为特征进行了探究。不同于传统的非晶合金，其储能模量出现反常升高，且损耗模量的峰温不随频率的变化而改变的现象，表明了该内耗峰并不是传统意义上的非晶态物质的弛豫峰。为了探究该反常内耗行为的起源，在玻璃转变温度以下对试样进行了长时间的退火处理，再次升温测量后发现其反常内耗现象消失，表明该内耗行为具有不可逆的特点。借助于高分辨透射电镜，研究发现枝晶相在温度处理后析出了纳米晶，表明反常内耗行为是由枝晶相在升温过程中析出了新的纳米晶而引起的。同时，通过扩展指数方程很好地描述了其结构弛豫随着物理时效的演变特征，表明其弛豫行为并不是单一的德拜弛豫行为。

D03-42

La 基非晶复合材料高应变速率下拉伸变形行为

董金磊，乔珺威

太原理工大学

本文以 La-Al-Cu-Ni 系非晶复合材料为研究对象，系统的研究了 La74 非晶复合材料宽应变速率下的拉伸变形行为及变形机制。在准静态拉伸试验中，宏观的拉伸塑性和显著的加工硬化能力被观察，断裂强度为 570 MPa ，伴随着 4% 的均匀变形。显著的加工硬化行为被归因于树枝晶中变形孪晶的形成。用霍普金森拉杆对 La 基非晶复合材料进行了动态拉伸的研究，材料具有 2% 的动态拉伸塑性。高速率变形下，临界剪切带内绝热温升引起的软化导致 La74 非晶复合材料表现出负的应变速率敏感性。利用修饰的协同剪切模型建立了 La74 非晶复合材料屈服强度随应变速率变化的本构方程。

D03-43

氢浓度对高熵合金 FeCoNiCrAl0.1 力学性能的作用

陈业新，强小妮

上海大学材料研究所

利用预充氢后拉伸和动态拉伸实验方法研究了氢原子浓度对再结晶态高熵合金 FeCoNiCrAl0.1 力学性能的作用，研究结果表明：随着预充氢或动态拉伸时充氢电流密度的增大，高熵合金 FeCoNiCrAl0.1 试样的抗拉强度基本恒定，且在相同

充氢电流密度下，动态拉伸时合金试样的抗拉强度明显低于预充氢后拉伸时合金试样的抗拉强度。但是，随着充氢电流密度增大，合金试样的延伸率随之降低。当预充氢的电流密度由 0 增加至 80 mA/cm² 时，充氢后合金试样拉伸时的延伸率降低了 13.8 %。而当充氢电流密度由 0 增加至 180 mA/cm² 时，动态拉伸合金试样的延伸率降低了 22.0 %。拉伸试样的断口形貌显示，随着充氢电流密度的增加，试样断口形貌上的微孔洞的直径和数量均有所增加。较高的氢浓度使高熵合金 FeCoNiCrAl_{0.1} 拉伸时的延伸率明显降低，同时，合金中的氢原子还促进了高熵合金 FeCoNiCrAl_{0.1} 中空位浓度的增加和空位的扩散。

D03-44

Correlation between the viscoelastic heterogeneity and the domain wall motion of Fe-based metallic glass

王军强

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

The soft magnetic properties of Fe-based metallic glasses are reduced significantly by external and residual stresses, e.g. the susceptibility decreases and coercivity increases, which limits their application severely. Unraveling the micromechanism of how the stress influences the soft magnetic properties is of great help for enhancing their performance. In this talk, we investigate the effect of viscoelastic heterogeneity on the motion of magnetic domain wall surrounding nanoindentations. Compared to the matrix, dissipation of the viscoelastic heterogeneity increases towards the nanoindentation. Meanwhile, the motion of domain wall under external magnetic field becomes more difficult towards the nanoindentations. A correlation between the viscoelastic dissipation and the moving ability of magnetic domain walls is observed, which can be well fitted using magnetoelastic coupling theory. This suggests that manipulating the microscale viscoelastic heterogeneity is probably a helpful strategy for enhancing the soft magnetic properties of metallic glasses

D03-45

Co-Cr-Fe-Ni-X(X=Al, Cu, Mn)高熵合金互扩散系数矩阵高通量测定及其缓慢扩散效应研究

荔琴, 王瑞, 钟静

中南大学 粉末冶金国家重点实验室 长沙 湖南

高熵合金很多优异的性能都与其缓慢扩散效应有关。原子的缓慢扩散可抑制晶粒生长，使高熵合金易获得热稳定性高的固溶体相和纳米结构，甚至非晶结构。近年来，高熵合金缓慢扩散效应及其扩散机制已经成为高熵合金领域的研究热点之一，而目前的研究结果对高熵合金是否存在缓慢扩散存在明显的争议。为此，本论文选取 Co-Cr-Fe-Ni-X(X=Al, Cu, Mn)三个经典的面心立方基高熵合金体系作为研究对象，通过实验高通量测定合金体系中随成分和温度变化的互扩散系数矩阵，对其缓慢扩散效应进行了研究。首先，采用单相扩散节技术制备了 1273、1323 以及 1373 K 三个温度的 Co-Cr-Fe-Ni-X(X=Al, Cu, Mn) 简易多元扩散节，并结合电子探针显微分析技术测定各扩散节中组元浓度随扩散距离分布的实验数据。随后利用本研究小组最近基于高效数值回归法开发的 HitDIC 软件 (<https://hitdic.com>)，计算得到了各多元扩散节中随组元成分和温度变化的互扩散系数矩阵，并在此基础上计算了 Co-Cr-Fe-Ni-X(X=Al, Cu, Mn) 三个体系高熵合金中各组元的示踪扩散系数。最后，基于所获得 Co-Cr-Fe-Ni-X(X=Al, Cu, Mn)高熵合金中各组元的互扩散系数及示踪扩散系数与对应各子体系中的扩散系数文献值的全面对比来研究了高熵合金中是否存在缓慢扩散效应。互扩散系数对比结果表明：在所研究的高熵合金中，仅部分元素存在缓慢扩散。而示踪扩散系数的对比也得到了相同的结论。

D03-46

超细晶 Al_{0.45}CoCrFeNi 高熵合金的晶界析出强化

侯晋雄, 乔珺威

太原理工大学

通过冷轧与热处理获得完全再结晶的双相高熵合金，冷轧后的样品经过退火处理，BCC 相在 FCC 基体的晶界快速析出抑制了基体晶粒的长大，通过不同温度热处理控制母相与析出相的晶粒大小、体积分数调节双相高熵合金的力学性能。铸态 Al_{0.45}CoCrFeNi 合金屈服强度为 209MPa，拉伸强度为 581MPa，并且拥有 62%的优异的塑性。900°C再结晶后的材料屈

服强度为 727MPa，抗拉强度为 911MPa，同时还有 22%的拉伸塑性。在 900°C热处理 1h 可以获得晶粒尺寸为 0.72 μm ，第二相大小为 0.16 μm 的超细晶双相高熵合金。并且在双相超细晶高熵合金中经过 500~800°C10h 的热处理后，晶粒没有明显长大，依然保持了 BCC 和 FCC 稳定的两相组织。

D03-47

Al_{10.3}CoCrFeNi 高熵合金温度依赖的变形机制——以锯齿流变行为为切入点

张宇，李金山，王军

西北工业大学

合金的塑性变形机制由流变单元（位错、孪晶、晶界等）决定，不同流变单元开动所需的临界应力会随着温度的变化而变化。锯齿流变行为是指在一定的温度和应变速率范围内，在塑性变形过程中出现的应力不稳定的现象，表现为应力-应变曲线上的锯齿波，锯齿流变特征与流变单元联系紧密。我们通过调查不同温度压缩时的锯齿流变行为，研究了 Al_{10.3}CoCrFeNi 高熵合金的变形机制。随着变形温度升高，锯齿行为表现出两种异常现象，表明变形机制发生了转变。通过观察显微组织发现 Al_{10.3}CoCrFeNi 高熵合金在 600 °C 压缩后形成了大量平行排列的纳米孪晶，而在 800 °C 被相互缠绕的位错所取代，说明主要的变形机制由孪生转变为滑移。这种温度依赖的变形机制与不同温度下的位错活性和层错能的大小有关。本文中所发现的孪生机制为中温下强韧化高熵合金提供了一种新思路。

D03-48

一种共晶高熵合金的拉伸行为研究

张耀莉，王新广，李金国

中国科学院金属研究所

高熵合金是由五种或五种以上的合金元素以近原子比熔炼而成的具有金属特性的合金，具有高熵效应、晶格畸变效应、迟滞扩散效应和鸡尾酒效应。近些年高熵合金多以单相固溶体结构居多，包括单相 FCC 结构和单相 BCC 结构。然而单相固溶体结构很难满足合金的综合力学性能，为了同时获得高强度和良好的塑性，具有两相结构的共晶高熵合金被提出并研制出来。本实验主要进行了一种共晶高熵合金的拉伸性能研究。借助光学显微镜（OM）、扫描电子显微镜（SEM）、透射电子显微镜（TEM）、X 射线衍射仪（XRD）、电子探针技术（EPMA）和 Miedema 计算模型等表征手段和计算方法对合金变形前后的微观组织、成分变化及微观变形机制做了研究，得到了如下的实验结果和结论。试验结果：1.室温拉伸试验数据显示，合金的抗拉强度 $\sigma_b \sim 1.3\text{GPa}$ ，屈服强度 $\sigma_s \sim 800\text{MPa}$ ，表明合金具有很高的强度。2.高温拉伸结果显示，合金具有超高的塑性，尤其是在拉伸速率为 $1 \times 10^{-3}/\text{s}$ 和拉伸温度为 1000°C 时，合金的断后延伸率达到了 250%。试验结论：1.室温拉伸后的组织中出现 B2 型析出相，在变形过程中起到了析出强化的作用，是合金在室温具有高强度的主要原因。2.高温变形过程同时出现了析出相和再结晶现象：通过成分分析及结构标定，两种析出相为 NiAl 和 Ni₃Al，结合 Miedema 计算模型可知，NiAl 比 Ni₃Al 的生成焓更低，因此 B2 型析出相在析出过程中起主导作用，计算与试验结果一致。B2 型析出相和 L1₂ 型析出相，分别对应位错切过和位错绕过机制；通过比较再结晶的驱动力和析出钉扎阻力可知，再结晶软化在变形的稳定流变阶段起主要作用。因此共晶高熵合金的高温变形行为主要与析出强化和再结晶软化机制有关。3.合金元素不含贵金属，并且熔炼工艺简单，密度较轻，成本较低。在室温具有高强度，高温具有优异的延展性，这就是说合金可以在高温锻造成型，并应用在室温，有望成为某些高成本合金的替代材料。

D03-49

形变热处理对 Al_{10.6}CoCrFeNi 双相高熵合金微观结构和力学性能的影响

谭雅琴，乔珺威

太原理工大学

本次工作主要利用了 XRD，SEM，EBSD 等手段研究了形变热处理对 Al_{10.6}CoCrFeNi（fcc+bcc）双相高熵合金微观结构和力学性能的影响，并定量分析了不同强化方式对屈服强度的贡献作用。实验结果表明，退火过程中伴随着无序 bcc 相逐渐消失的是有序 b2 相以针状沉淀出现，并且随退火温度的升高，针状沉淀演变为大块的液滴状沉淀。尽管微观结构有上述的变化，但实际的相组成与平衡相图预测结果相当一致，这表明了 fcc 和 b2 相的高温稳定性。纳米压痕结果表明，

bcc/b2 相的硬度远高于 fcc 相，在受力变形的过程中 bcc 相也承受着更大的应力。退火处理使合金的屈服强度降低，均匀延伸率提高，尽管有第二相析出依然没能改变这一趋势，这使得我们把研究重点放到了不同强化方式对屈服强度的作用上，结果表明对于双相 Al0.6CoCrFeNi 高熵合金我们可以通过简单加和不同强化方式的贡献来定量估计该合金的屈服强度。

D03-50

难熔高熵合金的相变韧塑化

黄海龙, 张飞, 吴渊, 王辉, 刘雄军, 吕昭平

北京科技大学

高熵合金高的构型熵使其在高温时仍能保持极高的稳定性，基于高熔点元素的 BCC（体心立方）结构难熔高熵合金具有优异的抗高温软化能力，优异的高温性能使其具有广阔的应用前景。但是难熔高熵合金的室温脆性极大的限制了其加工成型和进一步应用。本报告在研究难熔高熵合金相稳定性的基础上，采用“亚稳工程”的设计思路，将 TRIP 效应引入到脆性难熔高熵合金中，大幅提高了其拉伸塑性和加工硬化能力，并研究了相结构演化规律及双相结构的形变相变耦合作用与协同变形过程，为设计高强高韧的难熔高熵合金提供新的思路。

D03-51

共晶高熵合金成分设计方法

姜慧, 卢一平, 王同敏

大连理工大学

高熵合金作为一种新型合金，展现了许多特殊的物理化学和力学特性，但以固溶体为主要结构的高熵合金，铸造流动性较差，难以补缩，晶格畸变严重，铸造的宏观和微观偏析严重，制约了高熵合金的规模化工业应用。共晶高熵合金可同时具有高熵合金和共晶合金的特性，且只需通过简单凝固过程就能获得具有良好铸造性能的合金，因而受到广泛的关注。然而怎样设计共晶高熵合金成分仍面临一个非常大的挑战。本文根据混合焓和二元共晶相图，提出了一个用于设计具有面心立方（FCC）和金属间化合物双相共晶高熵合金成分的简单方法。并基于此方法设计了三元到五元一系列共晶合金成分。此外采用真空电弧炉熔炼方法制备了纽扣合金铸锭，并使用配有 X 射线能谱仪（EDS）的扫描电镜（SEM）、X-射线衍射仪（XRD）、透射电镜（TEM）、差示扫描量热分析仪（DSC）、维氏硬度计、万能实验机测试设备分析了合金的微观组织、热力学行为、硬度和室温压缩性能。实验结果表明：在 Co-Cr-Fe-Ni-Nb 合金系中，我们设计的三元到五元共晶合金都是由 Nb-贫乏的 FCC 和 Nb-富集的金属间化合物两相层片共晶形貌构成，这与我们设计方法一致，表明我们提出的设计方法是非常有效、简便且该方法也为共晶高熵合金的成分设计提供了新途径。此外，力学性能测试表明：在三元至五元合金中，CoCrFeNiNb0.45 五元共晶高熵合金具有最优的综合力学性能：维氏硬度 482 HV、屈服强度 1316 MPa、断裂强度 2293 MPa、压缩塑性 21.3%，展现了高熵合金优异特性。

D03-52

C 对 NiCoCr 系列中熵合金力学性能及其变形机制影响的研究

尚园园, 何骏阳, 吴渊

北京科技大学 新金属材料国家重点实验室

本文系统地研究了 C 合金化对中熵合金 NiCoCr 的力学性能及其变形机理的影响。实验表明，在中熵合金 NiCoCr 中加入 C，不仅可以提高屈服强度，同时还能得到大的拉伸塑性和强的加工硬化能力，这与传统合金的固溶强化效果有着很大的不同。分析表明，碳的加入提高了层错能，细化了孪晶片层结构，推迟了孪生的整个过程，从而提高了加工硬化能力，进而使得合金具有良好的塑性。本研究工作不仅有助于深入理解固溶强化机理，而且为开发高强度高塑性相结合的新型合金提供了一个有效的途径。

D03-53

碳化物增强 ZrTiHfV0.5Nb0.5 高压压缩性难熔高熵合金

陈文凯, 李云凯, 陈义文

北京理工大学

难熔高熵合金 (RHEAs) 具有高熔点, 耐高温氧化和耐腐蚀性等突出特点, 因而在高温领域具有非常好的应用前景, 但由于其组成元素为难熔元素且结构为单相 BCC 固溶相或以 BCC 固溶相为主, 因此密度较高且塑性不好。本文采用真空电弧熔炼法, 以 ZrTiHfV0.5Nb0.5 合金为基体, 分别添加不同比例 C 元素制得碳化物增强高熵合金。相比于基体密度 8.135g/cm³, ZrTiHfV0.5Nb0.5C0.2 合金的密度下降到 8.014g/cm³。研究了材料在室温和高温下的微观结构和力学性能, XRD 及 EDS 分析结果显示, 加 C 后 ZrTiHfV0.5Nb0.5C_x (X=0.06,0.12,0.2) 合金均为体心立方 (BCC) 相和 HfC 相两相混合物。ZrTiHfV0.5Nb0.5C_x (X=0,0.06,0.12,0.2) 合金具有良好的室温压缩塑性, 压缩过程没有发生断裂破坏, 塑性应变 >40%, 屈服应力接近 1GPa。Gleeble 热压缩实验结果显示, 700°C 高温压缩, ZrTiHfV0.5Nb0.5C_x (X=0.06,0.12,0.2) 相比基体强度均有所下降, 800°C 高温压缩, ZrTiHfV0.5Nb0.5C_x (X=0.06,0.12,0.2) 强度与基体基本持平。

D03-54

Formation and properties of P-free Pd-based bulk metallic glasses with high glass-forming ability

张伟

dalian university of technology

Thermoplastic processing have been developed for making the micro- and nano-devices on bulk metallic glasses (BMGs) by virtue of the viscous flow formability, which have been expected to enter commercial production. Noble metal-metalloid type of BMGs have been widely used for the thermoplastic processing. For noble metal-based BMGs so far known, the BMG samples with critical diameters (dc) exceeding 10 mm are available only in the Pd-Ni-P and Pt-Ni-P alloy systems. However, these BMGs contain a large amount of phosphorus element, which limit the manufacturability. In this work, we investigated the effect of alloying additions on the thermal stability and GFA of Pd-Si metallic glasses. The stabilization of supercooled liquid and GFA of the Pd-Si alloys were enhanced by addition of Cu, Ag, Co and Ni. The multi-component Pd-based BMGs have large supercooled liquid region of ~ 77 K. Glassy samples with dc up to 10 mm can be fabricated by Cu mold casting without fluxing treatment. These BMGs exhibit low viscosity of ~ 2×10⁷ Pa·s in the supercooled liquid state, excellent thermoplastic formability, high strength with large plastic strain, and good corrosion resistance.

D03-55

利用高通量计算评估多元大块金属玻璃的形成能力

张帆, 张传, 曹伟生

CompuTherm

大块金属玻璃 (BMGs) 具有独特的性能, 如高强度, 高断裂韧性, 良好的可铸性和优异的耐磨性和抗腐蚀性。自首次成功合成 Au-Si 非晶以来, 大块金属玻璃受到了广泛的关注, 已提出许多指标来评估玻璃形成能力 (GFA)。众所周知, 结晶是阻碍非晶相形成的原因, 因此, 玻璃形成能力是由过冷熔体和结晶相的竞争决定的。也就是说, 在过冷熔体的稳定性强于结晶相的区域, 玻璃形成能力较强。因为相图计算 (CALPHAD) 方法可以用来评估多组元体系的相稳定性, 这种方法已被用于预测玻璃形成能力和玻璃形成范围。人们早已认识到二元体系中的深共晶区有利于玻璃的形成。利用 CALPHAD 方法, 这一概念可拓展至多元体系中, 即具有低液相面的成分处有利于形成大块金属玻璃。低液相面处的组成代表了在该成分附近凝固范围最小。基于这个考虑, 我们提出了一种新的评估方法来寻找那些具有良好玻璃形成能力的成分范围。利用这种方法, 对给定的多元体系在全成分或部分成分范围实施高通量计算 (HTC), 然后筛选计算结果, 找到凝固范围小的成分区域, 即具有良好玻璃形成能力的成分区域。在本工作中, 我们将用 Al-Cu-Ni-Ti-Zr 体系及其子体系为例来说明这种方法。我们发现实验观察到的大块金属玻璃的成分的确落在我们预测的成分范围。CALPHAD 方法已用于加速材料设计和开发。然而, 这种方法的可靠性取决于用于计算的热力学数据库的可靠性。因为大块金属玻璃和高熵合金 (HEAs) 都是基于多个关键组元, 因此开发用于此类应用的热力学数据库更具挑战性。本工作还将讨论该方法的优点和不足。

D03-56

Ultrafast consolidation of bulk nanocrystalline titanium alloy through ultrasonic vibration

刘志远

深圳大学

Nanocrystalline (NC) materials have fascinating physical and chemical properties, thereby they exhibit great prospects in academic and industrial fields. Highly efficient approaches for fabricating bulk NC materials have been pursued extensively over past decades. However, the instability of nanograin, which is sensitive to processing parameters (such as temperature and time), is always a challenging issue to be solved and remains to date. Herein, we report an ultrafast nanostructuring strategy, namely ultrasonic vibration consolidation (UVC). The strategy utilizes internal friction heat, generated from mutually rubbing between Ti-based metallic glass powders, to heat the glassy alloy rapidly through its supercooled liquid regime, and accelerated viscous flow bonds the powders together. Consequently, bulk NC-Ti alloy with grain size ranging from 10 to 70 nm and nearly full density is consolidated in 2 seconds. The novel consolidation approach proposed here offers a general and highly efficient pathway for manufacturing bulk nanomaterials.

D03-57

相似元素共存(La-Ce)-Co-Al 体系结构与非晶形成能力的关联

李轩, 张涛

北京航空航天大学

非晶合金具有长程无序短程有序的原子排列结构, 而显示出优异的物理、化学和力学性能。提高非晶合金的形成能力对基础和应用十分重要。相似元素替代是提高块体非晶合金形成能力的一种有效方法。然而, 还未有文献明确的从原子结构的角度阐释相似元素引入增强非晶形成能力的机理。因此, 我们利用第一性原理分子动力学研究三元 $\text{La}_{65}\text{Co}_{25}\text{Al}_{10}$ 和伪三元 $(\text{La}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_{65}\text{Co}_{25}\text{Al}_{10}$ 的原子结构和非晶形成能力之间的关联。我们使用对关联函数、键角分布、配位数、溶质-溶质隔离、Voronoi 多面体和自由体积等方法研究体系原子结构。研究发现, 相似元素 Ce 部分替代 La 后, 具有更高非晶形成能力的伪三元 $(\text{La}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_{65}\text{Co}_{25}\text{Al}_{10}$ 具有更高的溶质-溶质隔离、更多的类二十面体和更少的自由体积。

D03-58

微量元素氢对锆基非晶合金玻璃形成能力的影响

董福宇, 张悦, 何梦圆

沈阳工业大学

采用 Ar-H₂ 等离子体电弧熔炼法制备出 $\text{Zr}_{64}\text{Cu}_{24}\text{Al}_{12}$ 和 $\text{Zr}_{66}\text{Cu}_{22}\text{Al}_{12}$ 非晶合金棒, 利用 X 射线衍射和差示扫描量热法对合金试样进行分析, 研究了合金试样的玻璃形成能力及其热稳定性。结果表明: 相比于高纯氩气条件下, 在锆基非晶合金试样中加入适量的氢后使得非晶合金的结构发生了改变。随着升温速率的增加, 两个放热峰向高温方向移动, 表现出很强的动力学特征, 相同升温速率下加氢后的合金的过冷液相区宽度明显增加, 约化玻璃转变温度 T_{rg} 也得到显著提高, 表明氢的加入提高了非晶合金的热稳定性和玻璃形成能力。最后, 采用脆性参数表征了液态结构在过冷液相区随温度变化的难易程度, 发现加氢后合金的脆性参数值降低, 更接近于刚性熔体, 起到了提高非晶合金玻璃形成能力的作用。

D03-59

Cu-Zr-Al 系合金的非晶形成能力

江浩然, 魏先顺, 沈军

同济大学

我们以二元共晶团簇作为基本组成单元设计 Cu-Zr-Al、Cu-Zr-Al-Sn 非晶合金成分, 通过相图计算的方法计算了 Cu-Zr、Zr-Al 和 Zr-Sn 二元共晶团簇的热力学形核驱动力, 并利用经典形核理论和相竞争的思想确定了各二元共晶团簇的比例系数, 成功地在 Cu-Zr-Al、Cu-Zr-Al-Sn 合金体系中制备出了新的块体非晶合金。计算成分 $\text{Cu}_{45.6}\text{Zr}_{45.3}\text{Al}_{9.1}$ 、 $\text{Cu}_{43.3}\text{Zr}_{47.1}\text{Al}_{8.6}\text{Sn}_{1.0}$ 的 4mm 样品 XRD 结果均显示为一个宽化的漫散射峰。SEM 观察结果表明样品中存在少量的晶化相, EDS 结果显示为富铝相和富锡相。通过适当调整二元共晶团簇的比例系数, 抑制析出相的形成, 获得了 4mm 完全非晶结构的 $\text{Cu}_{47.5}\text{Zr}_{45.1}\text{Al}_{17.4}$ 和 $\text{Cu}_{47.3}\text{Zr}_{45.8}\text{Al}_{6.4}\text{Sn}_{0.5}$ 块体非晶合金。

D03-60

Zr 基非晶合金的生物相容性

黄永江

哈尔滨工业大学

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。首先选择 $Zr_{46}(Cu_{4.5/5.5}Ag_{1/5.5})_{46}Al_{18}$ 、 $Zr_{51.9}Cu_{23.3}Ni_{10.5}Al_{14.3}$, $Zr_{51}Ti_{5}Ni_{10}Cu_{25}Al_{19}$, and $Ti_{40}Zr_{25}Ni_{12}Cu_{3}Be_{20}$ 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, $Zr_{46}(Cu_{4.5/5.5}Ag_{1/5.5})_{46}Al_{18}$ 具有最佳的耐腐蚀性能,动物实验结果表明, $Zr_{46}(Cu_{4.5/5.5}Ag_{1/5.5})_{46}Al_{18}$ 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 $Zr_{46}(Cu_{4.5/5.5}Ag_{1/5.5})_{46}Al_{18}$ (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 $Zr_{50.7}Cu_{28}Ni_{9}Al_{12.3}$ 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。

D03-61

医用压铸 Zr 基非晶合金温晶化动力学研究

张涛, 孟显娜, 王成勇

广东工业大学

本文采用差热扫描量热法对压铸成型的医用 $Zr_{68.84}Nb_{4.59}Cu_{12.99}Ni_{9.76}Al_{3.66}Y_{0.5}$ 和 $Zr_{65.31}Ti_{3.27}Cu_{15.51}Ni_{11.69}Al_{3.68}Y_{0.4}$ 非晶合金的恒温升温动力学进行了对比研究; 研究表明两种牌号非晶合金过冷液相区宽度分别为 72.3K 和 59.2K。在等温情况下, 借助 JMA 方程计算得到两种牌号合金的等温晶化激活能分别为 294.22KJ/mol 和 272.78KJ/mol; 由此可知 $Zr_{68.84}Nb_{4.59}Cu_{12.99}Ni_{9.76}Al_{3.66}Y_{0.5}$ 合金的热稳定性相对较高。此外, 两种牌号合金的 Avrami 指数 n 分别为 3.3-4.1 和 1.8-2.8; 表明二者晶化过程有所不同, 前者为受界面控制的多晶型晶化过程, 后者为受扩散控制的晶体长大过程。

D03-62

氧对钼氧合金非晶形成能力的影响

段峰辉, 潘杰, 李毅

中国科学院金属研究所

不同于其他类金属元素(如 B, C, Si, P 等), 在非晶合金形成过程中, 氧通常以稳定的氧化物形式存在或诱导产生亚稳相, 从而被认为是一种恶化非晶形成能力的元素。目前, 氧元素仅以杂质(含量<0.1 at.%)的形式引入到一些非晶合金中。至今还没有文章报道过以氧元素作为主组元的非晶合金。本工作通过直流电沉积方法制备了一系列的 MoO_x (14-24 at.%)非晶合金镀层, 其中氧作为合金元素稳定了该非晶结构。通过调控电流密度从 0.4 A/cm² 升到 2.5 A/cm², 镀层中的氧含量从 24 at.%降到 14 at.%, 此时镀层的微观结构从完全非晶结构转变成了非晶/纳米晶的复合结构。具有完全非晶结构的镀层成分— $Mo_{76}O_{24}$ 非常接近 Mo-O 二元合金共晶点的成分。另外, 我们还探究 $Mo_{76}O_{24}$ 非晶合金的晶化行为和力学性能, 发现钼氧非晶的晶化温度约为 773 K, 强度约为 1.7 GPa; 钼氧非晶合金表现为脆性断裂, 断裂韧性仅为 2.04 MPa m^{1/2}, 这可能与合金中大量的钼氧共价键有关。

D03-63

氦离子辐照 Fe 基金属玻璃的损伤研究

张小楠, 梅显秀, 王友年

大连理工大学

聚变堆中的材料辐照损伤问题制约着核聚变能的发展。选择具有良好耐辐照性能的材料成为成功运用核能的关键因素之一。金属玻璃由于具有长程无序短程有序结构, 其体系中的大量无序结构被认为能够吸收辐照诱导的损伤, 可能应用于聚变

装置的辐照环境中。其中 Fe 基金属玻璃由于具有较宽的过冷液相区、相对较高的晶化开始温度且不含中子活化元素，是耐辐照的热门候选材料。本文采用 300keV He 离子辐照金属玻璃 Fe₈₀Si_{7.43}B_{12.57} 和 Fe₆₈Zr₇B₂₅ 带，研究两种 Fe 基金属玻璃的辐照晶化行为，观察其在本实验条件下的表面损伤状况并与金属 W 的相比较，为金属玻璃应用于未来聚变堆的可能性研究提供一些可供参考的数据。300keV 的 He 离子辐照后，金属玻璃 Fe₈₀Si_{7.43}B_{12.57} 发生了一系列晶化过程：当辐照剂量为 4×10^{17} ions/cm² 时，金属玻璃 Fe₈₀Si_{7.43}B_{12.57} 中出现了少量亚稳的 β -Mn 型相纳米晶，辐照剂量达到 1×10^{18} ions/cm² 时，金属玻璃 Fe₈₀Si_{7.43}B_{12.57} 中 β -Mn 型相纳米晶转变为 α -Fe 相和 Fe₂B 相，当辐照剂量增大到 1.6×10^{18} ions/cm² 时，金属玻璃 Fe₈₀Si_{7.43}B_{12.57} 中的纳米晶除了 α -Fe 相和 Fe₂B 相，还增加了 β -Mn 型相和 Fe₃B 相且晶化体积也有所增多；金属玻璃 Fe₆₈Zr₇B₂₅ 保持了良好的非晶结构，这主要是两者原子组分的差异以及晶化开始温度不同所致。两种金属玻璃在辐照剂量为 1.6×10^{18} ions/cm² 时，表面均发生了剥落，金属玻璃 Fe₈₀Si_{7.43}B_{12.57} 剥落处呈现出韧性剪切台阶而金属玻璃 Fe₆₈Zr₇B₂₅ 剥落处呈现出了脆性的断口形貌。金属 W 在辐照剂量为 1×10^{18} ions/cm² 时表面就发生了起皮剥落。而金属玻璃由于原子均匀无序排列，对入射的 He 原子有一定的溶解度，从而当辐照剂量进一步增大至 1.6×10^{18} ions/cm² 时，Fe 基金属玻璃的表面才出现了剥落。可以看出两种 Fe 基金属玻璃的耐 He 离子辐照性能均好于金属 W。

D03-64

Sn 元素添加对 Ti 基枝晶增韧块体非晶复合材料在往复状态下的干摩擦性能研究

任越

西北工业大学

本文对原位枝晶增韧块体非晶复合材料 (BMG) Ti_{47-x}Zr₂₅Nb₆Cu₅Be₁₇Sn_x (x=0,1,2)，在不同加载作用下的摩擦学性能进行研究。材料的磨损量随着 Sn 元素的添加而减少，采用纳米压痕和纳米划痕对其力学性能以及晶体相和非晶体相的磨损性能进行了表征。Sn 元素显著影响了 β -Ti 枝晶相的加工硬化能力，这也是造成 BMG 耐磨性差异的原因所在。Sn 含量的增加对摩擦性能的影响归因于磨损过后枝晶相和非晶相间硬度的变化。当前工作通过微量元素添加来调整枝晶相的自身特性，为提高 BMGs 的耐磨性提供了进一步的思路。

D03-65

Al₈₆Ni₉La₅ 非晶条带在球磨过程中的结构演变

闫芝成，王伟民

山东大学

我们对不同转速下得到的 Al₈₆Ni₉La₅ 非晶条带分别进行了室温球磨 (300K) 和冷冻球磨 (77K)，并对产物进行了研究分析。结果表明，14.4m/s 转速下得到的条带在室温球磨过程中产生了晶化现象，在冷冻球磨的条件下晶化现象更加明显；而 36.6m/s 转速下得到的条带无论在室温还是低温条件下球磨，XRD 上都没有晶化峰的出现。对不同冷速下得到的 Al₈₆Ni₉La₅ 进行了分子动力学模拟，我们发现相对低冷速下得到的非晶中含有更多的 Ni 原子为中心的 <0 3 6 0>团簇，这种 <0 3 6 0>团簇更易于彼此连接成中程序，从而通过促进剪切带的形成来促进晶化。此外，不同转速下得到的 Al₈₆Ni₉La₅ 非晶，随着球磨过程的进行，都发生了一定程度的结构回复，晶化焓和晶化起始温度先降低再升高。我们把这种现象归因于球磨过程中条带粉碎程度的变化。

D03-66

Atomic structural evolution of monatomic metallic liquids in crystallization process

李茂枝

中国人民大学

Crystallization is a nonequilibrium phenomenon in condensed matter physics and materials science. Although numerical simulations and experiments in colloidal systems suggest the existence of relatively ordered liquid structures serving as precursors of nuclei, the entire process is far less understood, mainly due to the difficulty of understanding atomic structures of liquid state before crystallization. Here, we developed a tetrahedral structure model for metallic liquids to investigate the atomic structural evolution in crystallization process. In this model, not only tetrahedron, but also some other building blocks of crystal structures are taken into

account. These fundamental building blocks are found to exist even in high temperature liquid, and the populations are increasing with temperature decreasing, indicating that structural ordering is developing in the scale smaller than atomic cluster in high temperature liquid. The connectivity of these building blocks reveals the atomic structural evolution of metallic liquids, and provides a clear physical picture for the formation of precursor and subsequent nucleation.

D03-67

金属玻璃中的二次弛豫与微结构演化研究

王庆, 陆丹玲, 张倪倩

上海大学 材料研究所 微结构中心

与其它非晶凝聚态物质类似, 金属玻璃形成过冷液体或玻璃态固体弛豫谱常常显示出多模态行为: 包括对应于玻璃转变的主弛豫, 以及快、慢二次弛豫等; 然而关于它们内在关联关系的建立及其背后的物理本质仍远未澄清, 这使得人们在深入认识金属玻璃的结构动态不均性和性能时还面临巨大的挑战。前期研究表明, 在低于玻璃转变温度的连续循环加热过程, 金属玻璃原子尺度结构演化可基本只涉及化学短程有序的变化。在本项工作中, 我们利用动态力学分析技术研究了镧基金属玻璃在连续循环加热过程中, 其慢 b 二次弛豫的行为及其动力学。研究表明, 动态力学谱上的慢 b 二次弛豫峰随着循环加热进程向高温移动, 这意味着其特征弛豫时间增大。但另一方面也发现, 在其低温侧峰型保持不变的同时, 根据 Arrhenius 关系所获得的驱动能也保持不变, 这表明慢 b 二次弛豫特征弛豫时间的增大, 应当归因于 Arrhenius 关系中前置因子的提高。进一步从驱动熵角度分析, 我们发现随着循环加热的进程, 金属玻璃慢 b 二次弛豫所涉及的原子协同运动程度在发生明显的变化, 并与原子尺度化学短程有序化有关。

D03-68

The effect of Mo addition on structure and glass forming ability of Ni-Zr alloys

田泽安

湖南大学

Understanding the structure and glass forming ability (GFA) of metals is crucial to establishing metallic glass theory and producing advance materials with excellent properties. The classical molecular dynamics simulation was conducted to investigate the effect of Mo atom addition upon atomic structure and glass-forming ability (GFA) of Ni₆₄Zr_{36-x}Mo_x (x=0, 6, 12, 18, 21, 24, 27) metallic glasses (MGs), in terms of the system energy, radial distribution functions, and the largest standard cluster analysis. It is found that the Mo atoms do not simply replace Zr atoms, but heavily change the chemical order, resulting in more stable and compact structures that are much complex indicated by the split of the first major peak on pair distribution function curves. The evolution of several parameters highlights a critical point of x=21. For example, at x<21 the phase transitions from liquid to the final glass may include complex structural changes, because the energy curve cannot be fitted with two lines; while at x>=21 the vitrification process should be much simpler, for which two lines can perfectly fit the energy plot; With the addition of Mo atoms (at the same time Zr atom decreases by the same amount), the volume of the system is always much less than the sum of all atom's volume; this volume difference is a function of x and gets the maximum at x=21. Further analysis reveals that the addition of Mo atoms does not favour the formation of icosahedrons but enhances that of topologically close-packed (TCP) structures that are not only fully responsible for the shape evolution of the first major peak on the PDF curves, but also positively correlation with the glass forming ability (GFA) predicted by formation enthalpy. Thus TCP structures are the essential characteristic of MGs and the higher the forming ability of TCP structures, the better the GFA of Ni₆₄Zr_{36-x}Mo_x alloys. These findings shed a new light on the understanding of microstructure and the structure-GFA relationship of MGs.

D03-69

剪切转变的剪涨本质

吕云卓, 蒋敏强, 陆兴

大连交通大学

剪切转变 (Shear transformations, STs), 作为基本的局部重排事件, 决定了非晶固体的塑性流动。尽管十分重要, 剪切转变的结构起源以及动力学特性仍然很不清楚。最近, 我们以三维胶体玻璃为模型体系, 通过施加简单剪切的加卸载变形, 原位观察了剪切转变事件的时空演化过程。通过跟踪变形过程中胶体粒子的运动轨迹, 定量地确定了剪切转变的两个基本属性: 局部剪切应变和体胀(或自由体积)。研究发现, 在剪切转变事件发生前, 当地局部区域的自由体积在短时间内急剧增大, 随后导致该局部区域剪切应变的显著跳跃(预示剪切转变的激活)。基于相关分析进一步发现, 剪切转变是否能够激活与当地初始的局部自由体积关联较弱。相反, 剪切转变的涌现在很大程度上取决于当地局部区域的体胀能力, 即自由体积的动态产生能力。具体来说, 具有高体胀能力的粒子直接参与了随后的剪切转变事件, 而参与粒子的初始自由体积并不一定很高。这些结果证实和丰富了 Argon 关于剪切转变体胀本质的推断, 也为理解非晶塑性的结构起源提供了新的视角。

D03-70

La 基块体金属玻璃的 β 弛豫与电子结构关联性

蒋伟, 吴继礼, 张博

合肥工业大学 材料学院&非晶态物质科学研究所

本文主要研究 La₇₀Ni₁₅Al₁₅, La₇₀Co₁₅Al₁₅ 和 La₇₀Cu₁₅Al₁₅ 三种块体非晶的 β 弛豫与电子结构的关联性。通过 x 射线光电子能谱技术测试发现具有明显 β 弛豫峰的 La₇₀Ni₁₅Al₁₅ 和 La₇₀Co₁₅Al₁₅ 金属玻璃在费米能级处的电子运动比只有肩膀峰的 La₇₀Cu₁₅Al₁₅ 金属玻璃的电子运动更加的强烈。同时 Ni 和 Co 元素的电子状态的核心级别出现严重分裂现象, 而 Cu 元素电子状态并没有出现这种现象。研究表明费米能级处有较剧烈的电子运动, 并且组成元素的电子状态有复杂的分裂模式有助于促进 La 基金属玻璃的 β 弛豫行为。本文抛开原有的原子结构模型从电子结构角度来探究, 为研究和理解 β 弛豫的起源问题提供了新的思路。

D03-71

Defect-induced structure disordering process at crystal-amorphous interface

朱逸颖, 汪浩, 李默

深圳大学

Crystal undergoes a phase transition to a disordered state when subject to various severe external stimuli including chemical mixing, irradiation, plastic deformation, or hydrogen permeation. The transition observed in experiment often exhibit features of first-order thermodynamic transition with nucleation and growth, but theoretical work predicts the possibility of a continuous nature of transition via elastic instability. Here we demonstrate by using a molecular dynamics simulation in a crystal-amorphous metal diffusion couple that the amorphization occurs asymmetrically in a relatively concentration-steady interface, where the concentration grade exists intrinsically perpendicular to the diffusion direction. The manifestation of elastic instability mechanism at the crystal-amorphous interface is covered by the kinetic constraint and intrinsically in-plane concentration grade imposed by inter-diffusion and fluctuation of interface that leads to the feature of first-order phase transition observed in experiment.

D03-72

关于金属玻璃的超稳定性

薛荣洁, 赵林志, 施成龙

中国科学院物理研究所

Ediger 等人报道了超稳定分子玻璃具有动力学和热力学的稳定性, 表现为具有更高的玻璃转变温度 T_g 和更低的虚构温度 T_f 。随后, 其他学者分别报道了超稳定的聚合物玻璃和金属玻璃, 这些玻璃都具有更高的玻璃转变温度 T_g , 表现出较高的动力学稳定性, 但它们通常意义上热力学能态却处于低的位置即并没有展现出高的热力学稳定性。此外, 报导的这些超稳定玻璃都是通过沉积的方法制备得到的二维薄膜材料, 而制备块体的超稳定玻璃既具有重要研究价值, 也可拓展金属玻璃的应用价值, 但如何获得块体的超稳定玻璃也存在技术上的挑战。我们采用基于一种非平衡手段—高压技术对铜模冷却制备的 Pd_{40.16}Ni_{9.64}Cu_{30.12}P_{20.08} 块体金属玻璃进行处理, 本工作介绍结合热分析和结构分析手段研究不同条件下处理获得的块体金属玻璃的热力学与动力学稳定特性结果。

D03-73

The glass transition temperature during liquid metal solidification exemplified by Vitreloy 1 alloy

Zhang wei, Xiang qingchun, Ren Yinglei, Qiu Keqiang

School of Materials Science and Engineering Shenyang University of Technology

The cooling temperature curves of Vitreloy 1 bulk metallic glass (BMG) during solidification in copper mold were measured. Differential scanning calorimetry (DSC) was used to determine the fusion enthalpy (ΔH_f) and the glass transition temperatures. The specific heat capacities (C_p) of the alloy in the undercooled liquid, the amorphous state and the crystal were determined as well. According to the relationships of the heating rates and the glass transition temperatures, the amorphous solidification process of the alloy was speculated. In addition, two numerical simulations of the amorphous solidification process with different glass transition temperatures were carried out. The results show that the cooling temperature curves which were simulated with the extrapolated glass transition temperatures are in good agreement with the measured results.

D03-74

Inhomogeneity of free volumes in metallic glasses under tension

杨亮, 李明飞, 达伟

南京航空航天大学

The disordered and nonequilibrium nature of metallic glasses (MGs) makes their underlying deformation mechanisms to be poorly understood. In this work, the deformation under uniaxial tensile stress in a Zr₂Cu structural model is investigated from the atomic-level aspect. A new approach for detecting free volumes quantitatively is designed, based on which it is found that free volumes apparently increase within the elastic stage, and expand slowly after the yield point, and finally reach to an upper limit in the plastic stage. In addition, it is revealed that, in different zones of the structural model, free volumes exhibit inhomogeneity under stress, in terms of the size, the density, and the distribution. In particular, the expansion of free volumes in the center zone is much more rapid than those in the transition and the marginal zones. A more interesting phenomenon is that the density of free volumes in the center zone decreases with strain, while the counterparts in the transition and the marginal zones increase with strain. It is found that the atomic-level stress between different zones may contribute to the inhomogeneity of free volumes under stress.

D03-75

Size effect on dynamics in metallic liquids

张华平, 李茂枝

中国人民大学物理系

The relaxation dynamics in finite-sized metallic liquid droplets were investigated via molecular dynamic simulations in model binary Ni₅₀Zr₅₀ metallic liquids. We find that the droplet size has a significant impact on liquid dynamics. The structural relaxation time exhibit strong size dependence and decrease drastically as the droplet is smaller than a certain size. It is revealed that this results from a liquid-like surface layer (~1 nm thick) of droplets, in which the dynamics is much faster than the interior of droplets. The size dependent behavior of dynamics in metallic liquid droplets could be well understood with the universal scaling relationships between structure relaxation time and Debye-Waller factor (DWF). These findings provide insight into the dynamics of metallic liquid droplets and plausible understanding of recent novel experimental observations. Apart from temperature and pressure, size may be another important parameter for potentially tuning the properties of metallic liquids and glasses in nanometer scale.

D03-76

TiZr 基非晶复合材料过冷液相区变形行为研究

吴龙军, 朱正旺, 王爱民

中国科学技术大学

非晶复合材料在具有块体非晶高强度、高弹性模量和高耐腐蚀性等优异性能的同时，具有更加优异的塑性。目前块体非晶合金及其复合材料主要的成形方式是在过冷液相区进行热塑成型，因此对非晶复合材料在过冷液相区的变形行为进行研究具有重要意义。本文研究了内生枝晶相 TiZr 基非晶复合材料(TN10 合金)的过冷液相区拉伸变形行为及组织演化规律。结构表征表明室温下 TN10 合金的枝晶相形貌具有 Bi-mode 结构，其中粗大枝晶一次枝晶臂长 40-60 μm ，细小枝晶的一次枝晶臂长 1-2 μm ，总的枝晶相体积分数为 25%-35%，粗细枝晶的体积比为 1:5 左右，粗大枝晶均匀分布在细小枝晶中，枝晶相为 BCC 结构。TN10 非晶基体的玻璃转变温度 $T_g=618\text{ K}$ ，初始晶化温度 $T_x=698\text{ K}$ ，过冷液相区宽度 $\Delta T=T_x-T_g=80\text{ K}$ 。本文在 613K-693K 温度区间以 10 K 为温度梯度以 $1 \times 10^{-3}\text{ s}^{-1}$ 的应变速率对 TN10 进行准静态单轴拉伸实验。实验结果表明在准静态单轴拉伸条件下，材料呈均匀粘性流动，在 613K-633K 区间，材料变形行为是弹性阶段后出现明显的应力过冲，应力过冲后下降至一个稳定的值，而后均匀流变并表现为一定的加工软化，过冲应力（峰值应力与稳定应力的差）的大小随温度升高而降低。在 643K-693K 温度区间，材料的拉伸变形行为表现为无应力过冲，且在弹性变形之后的均匀流变阶段出现加工硬化，加工硬化率随温度的升高而增大。TN10 的初始流变应力随温度的升高逐渐降低，其塑性变形能力（塑性）随温度的升高先增大后减小，在 673K 时达到最大。在实验温度下，枝晶相在拉应力和温度共同作用下会发生 $\beta\text{-Ti} \rightarrow \alpha''\text{-Ti}$ 的相变；温度高于 643K 时，拉伸后的非晶基体发生部分晶化，枝晶相的相变和非晶基体的晶化导致材料在较高的温度下具有加工硬化效应。实验结果表明非晶复合材料的结构和热稳定性对其过冷液相区变形行为具有重要影响。

D03-77

纳米高熵氧化物(Mg_{0.2}Co_{0.2}Ni_{0.2}Cu_{0.2}Zn_{0.2})O 的制备及其在锂离子电池中的应用

陈鸿，孙森，杨朝明

四川大学原子核科学技术研究所

高熵氧化物材料是最近几年出现的一种新型陶瓷材料，具有多种金属元素在原子水平均匀分散的特点。因其具有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和性能上的“鸡尾酒”效应，而在众多应用领域表现出优异的性能。为了解决传统金属氧化物负极材料充放电比容量较低、循环稳定性差、嵌锂脱锂过程中体积膨胀大进而电极材料易粉碎等缺点，本文采用高温固相一步合成法，设计合成了结构稳定的五元高熵氧化物(Mg_{0.2}Co_{0.2}Ni_{0.2}Cu_{0.2}Zn_{0.2})O，并采用高能球磨法制备得到了粒径为 10-100 nm 之间的高熵氧化物纳米粉末。以金属锂片为对电极、1M LiPF₆ + EC + DMC (V/V = 1/1) 为电解液，组装成锂离子半电池，并探究了其电化学性能。结果表明，该纳米高熵氧化物粉末在 100 mA/g 的电流密度下经过 350 次充放电循环后其比容量可保持在 900 mAh/g 左右；在 100 mA/g~3000 mA/g 倍率充放电测试条件下，经过 45 个测试循环，其比容量保持在 500 mAh/g~1050 mAh/g 之间。

D03-78

高熵 CoCrFeNiAl_x 合金的快速凝固组织特征及性能研究

郑风勤，王伟丽

西北工业大学

本文采用落管无容器处理技术研究了 CoCrFeNiAl_x($x=0.5,1,2$)高熵合金的快速凝固组织特征及性能。结果发现，在近平衡凝固条件下，CoCrFeNiAl_x($x=0.5,1,2$) 合金液相线温度分别 1642K，1659K 和 1498K，其相组成随 Al 含量的增加从 BCC 与 FCC 混合相转变为单一的 BCC 相，微观组织出现了“柱状枝晶-等轴枝晶粒-非等轴枝晶粒”的转变。在快速凝固条件下，CoCrFeNiAl_x($x=0.5,1,2$) 高熵合金的微观组织随液滴尺寸的减小均出现“粗大枝晶-枝晶细化-等轴晶”的形貌变化规律。通过模拟计算发现，CoCrFeNiAl_x($x=0.5,1,2$) 高熵合金的冷却速率与过冷度均随液滴直径减小而增大。CoCrFeNiAl_x($x=0.5,1,2$) 高熵合金的显微硬度和磁性测试结果显示，合金的显微硬度随液滴直径的减小而增加。CoCrFeNiAl_{0.5} 高熵合金的饱和磁化强度，剩余磁化强度和矫顽力均随粒径减小先增加。CoCrFeNiAl_x($x=1,2$)高熵合金的饱和磁化强度，剩余磁化强度和矫顽力随液滴直径减小出现复杂的变化趋势。

D03-79

Ce₇₀Al₁₀Cu₂₀ 非晶熔体的互扩散行为研究

张博

合肥工业大学材料学院非晶态物质科学研究所

作为描述多元体系微观动力学的重要参数，互扩散行为无论是对工业应用还是对理论研究都具有重要的意义。但对于多元互扩散过程，由于交叉项的出现，无论是实验测量还是理论分析都更加困难。这里我们采用课题组新近开发的多层平动剪切技术对 Ce-Al-Cu 三元体系的 Ce₇₀Al₁₀Cu₂₀ 非晶熔体互扩散行为进行了测量，并利用全局优化算法进行了分析和计算。结果显示，对于这一体系，互扩散行为主要由主扩散系数项决定，交叉扩散系数项非常小，相较于主扩散系数项可以忽略。这与固态合金中的结果相差较大，反映了合金熔体与固态扩散的巨大差异。同时，Darken 公式在这个体系中不成立，说明对于这一体系动力学贡献对互扩散过程具有非常重要的作用。

D03-80

非晶复合材料中的类霍尔-佩奇关系

乔珺威

太原理工大学材料科学与工程学院

对于传统的结构材料来说，高强度和高延展性的结合仍然是一个很大的挑战。最近的研究表明高熵合金具有的特殊结构和热力学特性会极大地影响位错运动，并有助于机械性能的提高。fcc 结构的高熵合金具有优异的延展性。然而，仅仅依靠高熵合金基体还不足以在工程中应用，所以我们迫切需要建立其他强化机制。析出强化就可以使合金的强度和塑性达到一个很好的结合。我们所做的工作展示了在 fcc CoCrFeNiTi_{0.2} 高熵合金基体中析出第二相的可能性。合金由真空电弧熔炼法制备，铸态下的样品在 1200°C 下均一化 5h，使合金基体全部变为等轴晶，然后冷轧至厚度减少 75%，接下来在 800°C 下分别退火 3 h、5 h、8 h、10 h、24 h、48 h，最后水淬。我们对热处理后的样品进行了拉伸试验测试，与单相 CoCrFeNiTi_{0.2} 合金相比，析出强化后合金的屈服强度和抗拉强度都分别提高了大约 600MPa 和 500MPa，而且仍然保持良好的延展性，可以达到 20% 左右。这就是由于各种强化机制特别是析出强化而得到的性能提升。

D03-81

Ce₇₀Al₁₀Cu₂₀ 熔体在加压条件下结构与扩散行为的第一性原理分子动力学研究

李冬冬，陈恒，孙晓锐

合肥工业大学材料学院非晶态物质科学研究所

Ce 的 4f 电子在局域态和退局域态之间转化时伴随着巨大的体积塌缩，实验中观察到在压力作用下，Ce₅₅Al₁₄S₅，Ce₇₅Al₁₂S₅，Ce₇₀Al₁₀Ni₁₀Cu₁₀ 等非晶体系中存在有趣的多形性转变[1-3]。如何从原子尺度上理解 Ce 基多元合金体系在加压条件下的多形性转变。Ce₇₀Al₁₀Cu₂₀ 非晶是一种典型的 Ce 基非晶，并且具有较好的非晶形成能力，我们采用分子动力学方法对该体系进行理论研究[4]。通过对短程有序性分析发现，在 Ce₇₀Al₁₀Cu₂₀ 熔体中，存在两种不同的 Ce 原子：大半径的 Ce 和小半径的 Ce。随着压力的增加，大半径的 Ce 逐渐转化为小半径的 Ce，并且当压力高于 4.6 GPa 的时候，熔体中小半径的 Ce 占主导。另一方面，在加压的条件下，由于 Ce 原子半径的变化，Cu 周围原子的五次对称性逐渐的增强，而在 4.6 GPa 附近，Al 周围原子的五次对称性突然降低。结果还表明，这种结构的变化同样伴随着 Cu 扩散系数的迅速降低。本研究有助于深入理解压力作用下熔体结构和动力学的关系。

D03-82

多相脉冲电沉积法制备纳米结构非晶合金 及其力学性能研究

郭春雨，兰司，孙宝安

南京理工大学

纳米结构非晶材料由于可以通过引入大量的非晶/非晶界面来改变非晶材料的微观缺陷结构和/或微观化学结构来实现对其性能的调控，因而获得了广泛的关注。纳米结构非晶合金 (Nanostructured metallic glasses, NMGs) 通常采用惰性气体冷凝法来制备，对设备的要求很高，研究投入成本巨大，因此对该领域的研究发展起到了一定的阻碍作用。我们成功开发了一种多相脉冲电沉积技术，通过适当地控制团簇的形核及生长速率实现了 NMGs 的制备。采用 SAXS/WAXS、HRTEM、XPS 等方法对电沉积 NMGs 的微观结构和成份进行了表征，发现采用这种多相脉冲电沉积法制备的 NMGs 具有纯度高、结构致密、无界面氧化等优点。同时该技术无需真空系统，具有成本低、效率高的优势，还具有可量产的能力，因此成为了一种非常有前景的 NMGs 制备技术。通过纳米微柱压缩实验，透射电镜原位拉伸实验，以及纳米压痕蠕变实验等结果，发现电沉积法制备的 NMGs 与同成份的快速冷却法制备的非晶合金相比塑性有显著增强，这与 NMGs 独特的微观结构密切相关。

D03-83

一种综合力学性能优异的 Zr52Cu11.5Ni17.5Al15Nb4 块体非晶合金

邓希达, 陈双双, 曾燮榕

深圳大学

本研究通过成分设计, 以 $Zr_{56-x}Cu_{7.5+x}Ni_{17.5}Al_{15}Nb_4$ ($x=0, 2, 4, 6, 8$) 合金体系为研究对象, 通过铜模浇铸方法制备出临界直径为 10 mm 的新型 Zr52Cu11.5Ni17.5Al15Nb4 块体非晶合金。该非晶合金拥有优异的综合力学性能, 平均压缩强度、平均压缩塑性和平均缺口韧性可分别达到 2214 MPa, 8.03 %和 112 MPa m^{1/2}, 最大压缩塑性可达 15.5 %。研究表明: 大的压缩塑性是由于 Cu 原子合金化引入大量随机分布的自由体积, 这有利于变形过程中广泛剪切带的形成、分支和相互作用, 阻碍主剪切带的扩展, 从而提高塑性。本工作可能为开发高强度、高塑性的块体非晶合金提供一定的指导。

D03-84

金属玻璃及其复合材料的塑性变形

伍复发, 魏景松, 赵荣达

辽宁工业大学

对几种金属玻璃及其复合材料的拉伸塑性变形进行了实验研究, 通过分析金属玻璃复合材料的塑性变形的稳定性, 给出了金属玻璃复合材料发生均匀塑性变形的判据, 并提出了颈缩单元和临界约化加工硬化率概念。基于理论分析和预测, 制备了枝晶增强金属玻璃复合材料复合板, 使其与纯钛形成内外增强相同时对金属玻璃进行韧化的双金属板结构, 而且表现出了优越的力学性能。枝晶增强金属玻璃复合材料/纯钛双金属板的成功制备为金属玻璃及其复合材料的强韧化和工程应用提供了新的思路。

D03-85

激光冲击作用下非晶合金剪切带特征及规律

李炎森, 张坤, 王洋, 卫宇航, 唐伟奇, 张亚婷, 魏炳忱

中国科学院力学研究所

本文利用激光冲击短脉冲、高压力幅值等优点, 对超高应变率下非晶合金的响应进行了研究。发现在激光冲击作用下非晶合金表面会形成几微米到几十微米不等的弧形及圆形剪切带, 远小于其他加工方式所产生的剪切带尺寸。进一步利用界面粘结技术对激光冲击影响深度进行了研究, 发现其影响深度可达毫米量级; 并且, 剪切带的密度与影响区深度呈负相关, 剪切带长度与影响区深度呈正相关。然后对激光冲击塑性影响区进行了维氏硬度的测量, 发现在近表面处, 硬度值最大, 且高于基体硬度, 随着深度增加, 材料硬度值先降低, 在升高, 最后趋于平稳, 表明在冲击影响区存在着两种不同的残余应力场。

D03-86

温度诱导的金属玻璃液体动力学行为的几个转折点

胡丽娜

山东大学材料液固结构演变与加工教育部重点实验室

固体来源于液体。与传统晶体材料相比, 非晶固体与其液体性质的联系更加紧密。在这篇报道中, 我们着重介绍随着温度的变化, 金属玻璃液体的三个典型动力学转折及其对应的机理研究: 首先是在 T_A 约等于 $2T_g$ 处的转折。它指的是, 在降温过程中, 在 T_A 附近, 高温熔体的扩散系数或弛豫时间开始偏离 *arrehnius* 公式。这种偏离对应的是原子由自由扩散到开始有了相互关联。由于 T_A 和 T_g 的比值和熔体的脆性相关, 即液体的脆性越大, 该比值就越小。这说明玻璃转变在 T_A 处就有所体现。通过分子动力学模拟, 我们的研究发现, 该转折本质上对应了五重对称性大于 0.6 的原子的动力学转折。而这些原子正是金属熔体中运动较为慢的原子的运动。这一发现可以定性解释玻璃转折与 T_A 的关系。因为研究发现五重对称性大于 0.6 的原子的运动, 同样可以解释玻璃转变的很多现象。因此, 可以认为 T_A 与 T_g 具有相同的推动力。其次是高温熔体中的液液相变现象。基于高温熔体粘度测量仪、热扫描量热仪及分子动力学模拟方法, 我们对金属玻璃熔体的动力学性质、热力学性质以及其微观结

构的演变进行了研究。结果发现，CuZr 基、La 基、Fe 基等金属玻璃在液相线温度 100~200 度以上均存在动力学性质的明显转折，只是转折程度有所不同，放热效果也有很大差别。其中，CuZr 的异常动力学转折最为明显，并且伴随着较大的放热反应。将研究的十种 CuZr 二元合金的动力学转折强度用 F 值进行量化，发现 F 值越大，对应其固体的玻璃形成能力越大。分子动力学模拟试验进一步证实了该动力学转折及对应放热大小的结构根源，证明 CuZr 二元合金熔体中的液液相变有利于玻璃形成能力的提高。相对 CuZr 二元合金而言，铁基金属玻璃熔体的动力学转折相对较弱，且有较微弱的吸热现象存在。我们认为，这是造成铁基金属玻璃具有较弱玻璃形成能力的原因之一。而 La 基金属玻璃熔体对应的动力学转折过程中，未观察到明显的吸放热现象。最后是过冷液相区的强脆转变现象。我们前期的研究结果表明强脆转变现象是金属玻璃液体中存在的普遍现象。我们将过冷液体的强脆转变程度和高温熔体的液液相变程度进行了对比，发现无论是对于边缘合金还是大块金属玻璃体系，其强脆转变程度都与其熔体中的液液相变程度相关。这说明，两个转折都具有同样的驱动力。上述工作均表明高温熔体的动力学性质在过冷液体乃至金属玻璃固体中的遗传性。

D03-87

Au 基非晶合金熔体的结构转变

许巍，宋丽建，曹亚茹

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

通过调控非晶合金中的复合相能够调控非晶合金的性能，如果能调控两种非晶相的复合，将为非晶合金的应用提供重要的技术手段。大块非晶合金往往由具有较大负混合焓的多组元元素组成，而这类体系中是否存在微观结构的相分离仍存在争议。已有的有关非晶相分离的研究多集中在室温附近，而非晶的晶化往往为确定相分离带来干扰因素。非晶的微观结构很大程度上遗传自其高温熔体，如果能通过调控非晶合金高温熔体的微观结构进而调控其室温下的结构，将为调控非晶合金的性能提供重要的科学指导。我们通过高温 NMR 方法研究了 Au 基非晶合金高温熔体的结构，发现其平衡熔体中存在微观尺度的相分离结构，熔体的热历史对微观结构具有很大的影响，通过调控熔体的热历史可以对熔体的微观结构进行一定程度的调控，这对于调控非晶合金室温下的结构和性能具有重要的科学意义。

D03-88

高熵非晶合金的热稳定性与玻璃形成能力的异常关系

杨铭，刘雄军，吴渊

北京科技大学

人们普遍认为，具有大的玻璃形成能力的非晶合金在加热过程中较不容易发生晶化，并且这种大的玻璃形成能力非晶合金在加热过程中会保持较高的热稳定性。在本文中，我们报道了高熵大块非晶合金的热稳定性和玻璃形成能力之间存在的的关系。我们研究了两种典型的高熵大块非晶合金，即 ZrTiHfCuNiBe 和 ZrTiCuNiBe，并与相对应的传统非晶合金成分 Vit1(Zr41.2Ti13.8Cu12.5Ni10Be22.5)进行比较。结果显示，ZrTiHfCuNiBe 和 ZrTiCuNiBe 相比于 Vit1 在玻璃转变温度区具有较大的粘度及液体脆性参数 D^* ，这些结果均表明高熵大块非晶合金在加热过程中的缓慢原子扩散行为，因此具有较高的热稳定性。然而，具有高热稳定性的高熵非晶合金的玻璃形成能力却远远小于相对应的传统非晶合金 Vit1。我们通过测量合金的高温熔体的粘度及其熔化-凝固行为，发现高熵大块非晶合金熔体具有低的液体粘度、低的原子扩散能量势垒以及较窄的过冷度 $DTL(=T_l-T_s)$ ， T_l 为完全熔化时的液相线温度， T_s 为冷却凝固时的开始凝固相温度)，在冷却的过程中，这都将促进结晶相的形成从而降低其玻璃形成能力。我们的研究结果清楚地表明大块非晶合金的玻璃形成能力是由过冷液体的动力学行为决定的，然而其在加热过程中的热稳定性是由原子的缓慢扩散控制的。

D03-89

少量 ZrO 晶体颗粒对 Vit1 非晶合金过冷液相区力学性能的影响

谭军

昆明理工大学材料科学与工程学院

非晶合金作为一种新型材料，具有短程有序和长程无序的原子结构，而且没有传统晶体材料位错、晶界等缺陷，使其具有不同于传统晶体金属材料的优异特点，如高硬度、高强度、耐磨、耐腐蚀等。非晶合金一般具有较宽的过冷液相区，

而且在此温度范围内具有一定的超塑性变形能力因而具有较好的塑性和热加工性能。本文主要探索了第二相颗粒对晶体形成和剪切带扩展的影响。在 Gleeble3500 热模拟试验机上进行不同温度和应变速率下 Vit1 非晶合金复合材料的压缩和拉伸变形研究。发现温度和应变速率对材料的屈服强度、屈服降落和稳态应力都有不同程度的影响。屈服强度、屈服降落和稳态应力都随温度的增加而降低而随应变速率增加而增加。运用 SEM 观察晶体颗粒对剪切带运动的影响后发现剪切带在扩展过程中遇到颗粒后会被颗粒阻断或者绕过，但少量的杂质对变形过程的影响基本可以忽略不计。XRD 对变形后的样品进行分析后发现样品有部分结晶。结晶会导致合金的黏度增大，对力学性能产生一定的影响。Johnson-cook 模型可以很好地描述含有少量 ZrO 晶体颗粒的 Vit1 非晶合金在高温变形过程的流应力变化趋势。相关研究为 Vit1 合金，特别是含有少量晶体颗粒的非晶合金复合材料的广泛应用具有一定的指导意义。

D03-90

铝基非晶的污水降解

王伟民

山东大学

Al88Co10Y5 非晶合金在 35min 后将甲基蓝染料降解完全，通过改变过渡元素 Co 的含量并分别对非晶条带在不同温度下进行退火热处理，分析对比其降解效果，发现非晶合金具有优异的降解性能。这主要是由于其表面具有较高的能量状态，容易结合并吸附溶液中的染料分子，进一步发生化学反应，破坏官能团使其褪色。

D03-91

铁基非晶复合涂层耐海水腐蚀磨损特性研究

王永田，唐德振，戴亚洲

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。随着深海研究和水下作业的加速进行，亟需材料兼具良好的耐海水腐蚀和磨损性能。本文采用激光熔覆法在钢板表面制备了铁基非晶复合涂层，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。然后重点在海水和淡水中开展了湿沙橡胶轮磨损对比实验，发现铁基非晶复合涂层具有良好的耐海水腐蚀磨损特性，并对其耐海水腐蚀磨损的微观机理进行了研究。

D03-92

铁基非晶粉末-多孔材料复合结构高速催化降解偶氮染料

斯佳佳，姚可夫

清华大学

偶氮染料目前使用最为广泛的一种有机染料，约占合成染料的 80%，主要应用于纺织印染工业。印染工业中产生大量含有偶氮染料的废水，对人类健康和生态环境构成了严重威胁。因此，如何高效且廉价地处理含有偶氮染料的废水是一个重要课题。铁基非晶合金是一种亚稳态合金，其高原子活性使得铁基非晶粉末具有显著高于传统纯铁粉的降解效果。但是，由于铁基非晶合金与染料废水之间的巨大密度差异，非晶粉末往往沉积在容器底部，难以与废水充分接触，在很大程度上局限了其降解效果。因此，本文创新性地将铁基非晶粉末与多孔合金复合，研究了该复合结构对降解金橙 II 溶液（25 mg/L）的作用，并与单一非晶粉末的降解效果进行了对比。实验通过光谱仪测定偶氮特征峰强度继而确定溶液中的甲基橙的剩余含量。研究发现，搅拌 5 min 后，采用非晶粉末-多孔材料复合结构的实验组降解效率超过 65%，而采用单一非晶粉末的对照组降解效率仅为 15%；30 min 后，实验组的降解效率超过 90%，而对照组仅为 52%；对照组 60 min 的降解效率与实验组 5 min 的降解效率相当。研究结果表明，当搅拌力度不足时，将铁基非晶粉末与多孔材料复合能够极大地提高材料对金橙 II 溶液的降解效率。该效果主要与以下两个作用有关：多孔复合结构极大地提高了非晶粉体与溶液的表面积，促进了粉体与溶液的化学作用；另外，由于粉末载体具有更高的化学电位，形成的局域原电池可以进一步加速非晶粉末与溶液的作用。实验组的载体材料在降解过程不参与反应，因而可以进行重复利用。

D03-93

锆基非晶合金飞秒激光加工表面细菌粘附性研究

杜策之, 王成勇, 张涛

广东工业大学

非晶合金因具有优异的力学特性、耐腐蚀性和生物相容性等, 在医疗器械上有着广泛的应用前景。而非晶合金在机加工过程中存在工具磨损大、易晶化等问题。使用飞秒激光加工非晶合金不仅能维持加工区域非晶态, 同时拥有较高的加工效率和较低工具损耗, 可获得较好的表面质量。飞秒激光诱导的表面微纳结构使得材料表面具有一定的功能性, 进而提升医用非晶合金的表面性能。本研究使用飞秒激光在不同脉冲能量和扫描速度下对锆基非晶表面进行加工, 使用 SEM 和 AFM 对加工后的材料表面微纳结构进行观测, 并进行了大肠杆菌培养实验。统计了不同表面粘附的大肠杆菌菌落数量, 分析了材料表面微纳结构类型与大肠杆菌粘附性的关系。

D03-94

质子交换膜燃料电池块体非晶合金双极板的腐蚀行为研究

谌祺, 丰胜, 魏代坤

华中科技大学

燃料电池是一种将化学能直接转换成电能的发电装置。因其能量转换不受卡诺循环的限制, 理想转换效率高达 80%, 而且环境友好, 几乎不排放有害物质, 被认为是 21 世纪首选的洁净、高效的先进能源。质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 具有可在室温快速启动, 无电解质流失, 比能量高, 易小型化等特点, 备受人们关注。阻碍其商品化的主要障碍是价格因素, 特别是双极板的制造成本太高。常规石墨双极板占有整个单电池质量价格的 50%, 体积的 60%, 重量的 80%。为了降低价格, 缩小体积, 减轻重量, 提高比能量, 研发满足 PEMFC 工作需求的新型双极板材料至关重要。块体非晶合金具优异的力学性能、耐腐蚀性和加工成形性非常适合成为 PEMFC 的双极板材料。我们通过动电位极化、恒电位极化、开路电位 (OCP) 和电化学阻抗谱等电化学测试评估了 Zr 基块体非晶合金在模拟 PEMFC 环境中的耐腐蚀性能。电化学测试结果表明 Zr 基块体非晶合金及适合做 PEMFC 双极板的阳极材料也适合作为阴极材料。

D03-95

FePC 非晶合金对亚甲基蓝染料的高效降解及“自更新”行为研究

王倩倩, 陈明秀, 林萍华

东南大学 材料科学与工程学院

本文首次研究了 FePC 非晶薄带基于类芬顿反应的高效染料降解性能。利用紫外光谱仪对降解反应过程中染料浓度变化分析发现, 相比于已被广泛研究的 FeSiB 非晶薄带, FePC 非晶薄带具有更高的降解效率, 以及更低的反应活化能。通过扫描电镜 (SEM) 对反应后薄带表面形貌分析发现, FePC 表面形成的大量纳米多孔结构促进了物质传递; 利用 X 射线光电子能谱仪 (XPS) 对反应前后薄带表面元素结合能分析发现, FePC 非晶合金中强的 Fe-C 键及弱的 Fe-P 键形成原电池结构, 加快零价 Fe 失去电子参与类芬顿反应的过程。对 FePC 非晶薄带多次循环使用后的表面形貌分析发现, 反应后表面层自动脱落的“自更新”行为是其可重复利用达 20 余次的主要原因。FePC 非晶薄带基于类芬顿反应降解亚甲基蓝染料主要适用于酸性环境, 降解效率在 pH=3, 双氧水浓度为 5 mM 时为最高, 并且随条带用量的增加而增大, 随染料浓度的增加而减小。本文不仅提供了一种高效、低成本的染料废水处理方法, 同时扩大了 FePC 非晶合金的应用领域。

D03-96

钛基非晶合金复合材料的腐蚀行为研究

杨玉婧, 马明臻, 刘日平

燕山大学材料科学与工程学院

本文以 $(\text{Ti}_{0.45}\text{Zr}_{0.31}\text{Be}_{0.17}\text{Cu}_{0.07})_{100-x}\text{Nb}_x$ ($x = 4, 6, 8, 10, 12$) 钛基非晶合金复合材料为对象, 分别在 0.6 mol/L NaCl、1 mol/L NaOH 和 0.5 mol/L H₂SO₄ 三种腐蚀介质中测试了钛基非晶合金复合材料的电化学极化曲线。通过对极化曲线的分析, 研究了钛基非晶合金复合材料在不同介质中的腐蚀特性。用 SEM 和 EDS 分析了腐蚀后非晶合金复合材料表面形貌的变化

以及化学组成和元素分布状态，发现钛基非晶合金复合材料在含氯离子和不含氯离子的腐蚀介质中具有不同的腐蚀行为。经过 NaCl 溶液电化学极化之后，钛基非晶合金复合材料中的非晶相在氯离子的作用下发生了选择性溶解，树枝晶相逐渐析出。分析认为这种现象可能是由于亚稳态的非晶相与稳定的晶体相相比具有较高的氯化物反应活性所致，氯离子沿着基体和树枝晶的交界处进行侵蚀，在复合材料中形成深的通道，最终导致非晶基体与树枝晶分离。实验结果表明，钕含量为 8 (x=8) 的钛基非晶合金复合材料在以上三种溶液中的耐蚀性能要明显优于其他四种非晶合金复合材料。

D03-97

可降解块体非晶基复合材料的生物医用研究

郭胜锋

西南大学

从本世纪初，以镁基和铁基合金为代表的具有生物可降解特性的新一代医用金属材料发展迅猛。这类新型材料摒弃了人们通常将金属植入物作为生物惰性材料使用的传统思想，巧妙地利用镁和铁在人体环境中可发生腐蚀（降解）的特性，以可控方式实现金属植入物在体内的修复功能，并逐渐降解直至最终消失的临床目的。由于镁、铁可降解金属其化学组元是生物体的生命元素，具有良好的生物相容性、独特的降解功能，在骨科、心血管支架等领域中具有极为重要的应用前景，被欧美等国家称为具有革命性的生物医用金属材料。鉴于块体非晶合金独特的腐蚀行为、高的固溶度及高强度等特点，我们发展了系列镁基块体非晶基复合材料，并对可降解铁基非晶基复合材料的生物相容性进行了探索性研究。结果表明，兼具良好塑韧性和生物相容性的新型镁基、铁基块体非晶基复合材料，有望为非晶合金功能性应用开辟新的发展空间。

D03-98

熔体快淬速度对 Ni-Ti-Zr-Cr-V 非晶合金力学性能及吸氢性能影响

侯雪玲

上海大学材料学院

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-V 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 224 MPa、0.28 % 提高到 543 MPa、1.1%，其室温吸氢量由 25.8 ml/g 增加到 26.9 ml/g。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滑移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间断裂，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。

D03-99

微纳尺度下高熵高温合金的变形机理研究

甘斌, Sammy Tin, Jon Molina

西北工业大学

镍基高温合金具有优异的高温强度和韧性，因而成为制造涡轮叶片和涡轮盘等航空发动机热端部件的首选材料。高熵合金设计思想颠覆了传统合金设计理念，极大地拓展了高温材料开发空间。本研究通过采用微纳力学测试、扫描电镜和透射电镜显微分析手段，揭示了 CMSX-4 镍基单晶高温合金边长为 450nm 的单个 Ni3Al 立方强化相在微纳尺度下的变形行为，测得的 10GPa 屈服强度，显著高于 Ni3Al 单晶块体的屈服强度(150MPa)，接近该金属间化合物的理论强度，此外，该纳米颗粒还具有优越的韧性。本研究利用聚焦离子束在涡轮盘用多晶 IN 718 镍基高温合金的单个晶粒内，制备出了 1 微米至 5 微米直径的微柱，揭示了微柱尺寸、应变速率和测试温度对微柱变形行为的影响规律，采用晶体塑性有限元模拟方法，模

拟了具有单滑移、双滑移和多滑移变形模式的单晶微柱的变形行为，与实验结果吻合的很好，此方法所获取的塑性参数可以模拟多晶变形行为，得到的压缩屈服强度和实验测得的数值相差 5 % 左右，这些结果表明通过合理的实验设计，可以很好的关联宏观和微观的变形行为。最后，以 CrCoNi 多主元合金为研究对象，揭示了纳米晶的应变率敏感性和显微结构的热稳定性。总而言之，微纳力学性能测试手段是当前研究结构材料在高温环境下变形机理的利器。

D03-100

CoCrFeNiAlx 系高熵合金在动载荷下的强韧化行为

马胜国，王志华，乔珺威

太原理工大学材料强度与结构冲击重点实验室

通过采用分离式霍普金森动态加载技术，系统研究了 CoCrFeNiAlx 系高熵固溶体合金在高速冲击载荷下的力学行为和变形机理，着重分析了本合金系在不同应变速率加载下的力学性能参数及其应变率敏感性，在此基础上采用宏观与微观、材料与力学、定性与定量相结合的分析方法，获得高熵合金在冲击载荷下的强韧化行为。如通过室温动态加载（应变率为 103s⁻¹ 以上），获得了具有孪生诱导塑性效应（即 TWIP 效应）的 CoCrFeNiAl0.6 (FCC+BCC) 双相高熵合金，其孪晶尺寸、断裂强度和断裂应变分别为 5-10 nm、1.5 GPa 和 40 %。通过动态扭转技术获得了具有梯度分级结构、显著晶粒细化和 TWIP 效应的 CoCrFeNiAl0.1 高熵合金。

D03-101

FeCoNi(CuAl)0.8 Gax (x = 0 - 0.08)高熵合金的相组成和磁性能的相关性

徐晖，李忠，谭晓华

上海大学

在目前已报道的典型高熵合金组元中，大都含有 Fe、Co、Ni 这三种最典型的铁磁性元素，这使得其可能具有良好的磁学性能；同时，高熵合金本身又兼具良好的力学性能、耐蚀性、热稳定性等，且容易制备加工成型，有望成为一种新型磁性材料。本文采用电弧熔炼和铜模吸铸法制备了 FeCoNi(CuAl)0.8 Gax (x = 0 - 0.08)高熵合金。利用软磁测试仪、振动样品磁强计、X 射线衍射仪、扫描电镜和透射电镜对合金的磁性能、相组成和微观结构进行了系统地研究。结果表明：不含 Ga 的高熵合金是由大量面心立方相 (FCC) 和少量体心立方相 (BCC) 组成，随着少量 Ga 元素的添加，合金中 FCC 相的相对含量逐渐减少，而 BCC 相逐渐增加。磁性分析表明，合金中各种磁性参数与其相组成密切相关。随着合金中 BCC 相的相对含量增加，其饱和磁化强度 (Ms)、最大磁感应强度 (Bm)、剩余磁感应强度 (Br)、矫顽力 (Hc) 和磁滞损耗 (Pu) 的数值增加，而初始磁导率 (ui) 和最大磁导率 (um) 的数值则减少。这为进一步提升高熵合金的磁性能提供了思路。

D03-102

深过冷条件下高熵 CoCrFeNiMn 合金的组织特征及性能分析

王伟丽，邢逸凡，魏炳波

西北工业大学理学院应用物理系

通过熔体浸浮方法实现了高熵 CoCrFeNiMn 合金的深过冷快速凝固，对不同过冷度条件下合金的组织结构和性能特征进行了分析。结果发现，不同过冷度下的高熵合金均由 FCC 结构的两种高熵相组成，且随着过冷度的增大微观组织显著细化，发生了由粗大枝晶向等轴晶转变的演化规律。深过冷快速凝固条件对合金的力学、电学及腐蚀等性能有着较大的影响。随着过冷度的增大，合金的屈服强度、维氏硬度和电阻率均有较大幅度的增加，而弹性模量增速缓慢。分析合金的腐蚀特征可知，在 NaCl 和 H2SO4 溶液的腐蚀条件下，过冷度的增加显著地提高了高熵 CoCrFeNiMn 合金的耐腐蚀性，且大过冷度高熵 CoCrFeNiMn 合金在小的腐蚀速率和长的腐蚀时间中具有更强的耐腐蚀性能。而对于 NaOH 溶液而言，虽然过冷度提高了合金的耐腐蚀性，但不同过冷条件对高熵 CoCrFeNiMn 合金的腐蚀效果影响较小。

D03-103

高熵 MoTiNiCuAl 合金微观组织与腐蚀性能研究

赵晓蕾，王伟丽，魏炳波

西北工业大学长安校区

高熵合金是近年来兴起的一种新型金属材料，组元多和结构简单等特点使其具有很多传统合金无法比拟的优异性能，因而被广泛研究。本文选取高熵 MoTiNiCuAl 合金作为研究对象，采用电磁悬浮技术获得不同过冷度，利用 CHI 电化学分析仪工作站研究其电化学腐蚀行为。结果表明，高熵 MoTiNiCuAl 合金微观组织为 Mo 固溶体相和 NiTiAl 相两相构成。综合对比分析 304 不锈钢与该合金在腐蚀介质(3.5% NaCl 溶液，1mol/L NaOH 溶液，1mol/L H₂SO₄ 溶液)中的腐蚀后的组织形貌及不同扫描速率(0.1mV/s, 0.005mV/s, 0.001mV/s, 0.0005mV/s)下动电位极化曲线表明，室温时(25°C) 该合金具有较强的耐腐蚀性能，且电磁悬浮条件下的高熵 MoTiNiCuAl 合金的耐均匀腐蚀性能低于平衡凝固下的合金，二者耐腐蚀性均随扫描速率减小而增强。

D03-104

CoCrFeNiSx 系列高温自润滑高熵合金的设计、制备和性能

张爱军，孟军虎，韩杰胜

中国科学院兰州化学物理研究所

在航空航天、武器装备和冶金工业等领域中，高温、重载和强冲击等苛刻工况对高性能自润滑合金具有迫切的需求，但常规自润滑合金在其力学性能和润滑性能之间难以达到综合平衡，目前亟需开发新型自润滑高熵合金。基于此，本文以具有良好塑性和韧性的 CoCrFeNi 高熵合金为基体，通过引入 S 元素，在国内外首次设计和制备了 CoCrFeNiS_x 系列高温自润滑高熵合金，系统地考察了其物相组成、显微组织、力学性能和高温摩擦学性能，研究了其强韧化机理和高温摩擦磨损机制。结果表明：S 元素加入 CoCrFeNi 高熵合金中主要形成了金属硫化物 Cr_xS_y 相，提高了合金的室温强度和硬度，并显著改善了其在室温至 800°C 范围内的摩擦学性能。其中，CoCrFeNiS_{0.5} 高熵合金综合力学性能最好，并且在室温至 800°C 的范围内摩擦系数低，耐磨性好，具有良好的工业化应用前景。

D03-105

高熵合金的冲击韧性和韧脆转变温度

张璐，张勇

北京科技大学

冲击韧性是金属材料应用的一个重要动态性能指标，韧脆转变温度对于结构材料的实际应用更具有重要的意义，而关于高熵合金冲击韧性和韧脆转变温度的研究却较少。采用夏比冲击实验测量材料的冲击韧性，一般会在塑性试样中间开 V 形或 U 形缺口，其目的为在切口附近造成应力集中，保证材料在指定位置发生断裂。对于 U 形试样，其冲击功大部分消耗于裂纹的形成，而对 V 形缺口试样，其冲击功大部分消耗于裂纹的扩展，更能反映材料的缺口和内部缺陷对动态载荷的敏感性。课题组前期的关于 Al_xCoCrFeNi 系高熵合金的低温冲击韧性的研究，发现对于高熵的合金体系，其冲击韧性与相组成、温度以及流动单元密切相关。其中，具有 FCC 结构的 Al_{0.1}CoCrFeNi 合金显示出超高的室温和低温冲击韧性，在 77K 冲击韧性可达 397.87J，这可能是由于该高熵合金的层错能低而在低温下降至更低，所以在低温状态和冲击载荷下，当位错运动受阻，变形机制由位错滑移主导变为孪晶主导（也会伴有少量的相变和绝热剪切），但该合金在 77K 以上温度内并未显示出韧脆转变，其转变温度可能更低于液氮温度。共晶高熵合金具有铸造性能好，偏析小，组织结构类似于珠光体，这里选取一个典型的 AlCoCrFeNi_{2.1} 共晶高熵合金进行分析。AlCoCrFeNi_{2.1} 合金的组织为 FCC 与 BCC 双相共晶组织，且综合力学性能良好，室温抗拉强度约为 1050MPa，延伸率可达 17%。对 AlCoCrFeNi_{2.1} 合金进行夏比 V 型缺口冲击实验，发现其冲击韧性优于珠光体钢，在 77K 以上未发现明显的韧脆转变现象。

D03-106

CoCrCu_xFeNiTi_{0.3} 多元高熵合金的组织与性能研究

项宏福

江苏科技大学

本文根据多主元高熵合金的成分设计准则，设计了 CoCrCu_{0.5}FeNiTi_{0.3}，CoCrCuFeNiTi_{0.3}，CoCrCu_{1.5}FeNiTi_{0.3} 三种多主元合金，采用真空电弧熔炼合金铸锭，之后对合金进行同温度下长时间的时效处理。并借助扫描电子显微镜对合金的微结构进行观察，采用能谱进行了微区成分分析，借助 X 射线衍射仪对合金的相结构进行了测定，并对合金的硬度和

压缩性能进行了测试。研究发现 CoCrFeNiCu_{0.5}Ti_{0.3}, CoCrFeNiCuTi_{0.3}, CoCrFeNiCu_{1.5}Ti_{0.3} 多主元合金均由 FCC 相组成, 随着 Cu 含量的增加, FCC 反应峰向左略有偏移, 表明晶格常数略有增加。所有合金铸态显微组织主要为枝晶组织, 当 Cu 元素含量增加时, Cu 产生偏聚效应, 集中在晶间区域。对合金进行硬度测试结果可知, 合金的硬度均呈现下降的趋势, 由 286HV 下降至 249HV。CoCr Cu_{0.5}FeNiTi_{0.3}, CoCrCuFeNiTi_{0.3}, CoCr Cu_{1.5}FeNiTi_{0.3} 抗压强度分别为 1698MPa、1680MPa 和 1416MPa, 塑性应变值分别为 50%、46%和 45%。对 CoCrCuFeNiTi_{0.3} 进行长时间时效处理, 对其在 750°C 分别时效 100h、200h、300h、400h、500h、600h、700h、800h、900h、1000h。CoCrCuFeNiTi_{0.3} 由单一的 FCC 相变为 FCC 相和简单立方相, 简单立方相含量随着处理时间的增加而增加, 显微组织由枝晶组织变为枝晶组织和片层状组织, 枝晶组织与铸态枝晶组织相似, 片层状组织由 Ti、Ni、Co 元素构成, 片层间主要由 Co、Cr、Fe、Ni、Ti 元素构成。对处理后的合金进行硬度测试结果可知, 随着热处理时间的增加, 硬度值由 347.02HV 下降到 269.69HV。抗压强度由 2149.86MPa 下降到 1210.19MPa, 塑性应变值由 39%降至 20%。对该系列合金的相形成进行预测和计算, 分析结果可知, CoCCuxrFeNiTi_{0.3} 多主元合金系的混合焓, 原子半径差和混合焓的值均在形成稳定固溶体相的合理范围内。CoCrCuxFeNiTi_{0.3} 合金系的价电子浓度和电负性差值为 0.58、0.63 和 0.69, 合金内为 FCC 相结构和简单立方相。

D03-107

激光熔化沉积技术制备 CrMnFeCoNi 高熵合金组织与力学性能的研究

向硕, 李晋锋, 李强

新疆大学

采用激光熔化沉积和铸造方法分别制备出 CrMnFeCoNi 高熵合金。通过 XRD 衍射、金相腐蚀、SEM 和力学拉伸等测试手段对不同方法制备的 CrMnFeCoNi 高熵合金进行金相结构、微观组织及力学性能的研究。研究结果表明: 通过激光熔化沉积与铸造方法制备的 CrMnFeCoNi 高熵合金均由单一的 FCC 固溶体相构成; 通过改变激光沉积功率工艺的方法可调控 CrMnFeCoNi 高熵合金中柱状晶与等轴晶的比例; 相对于铸造的 CrMnFeCoNi 高熵合金来说, 激光熔化沉积制备的 CrMnFeCoNi 高熵合金中元素分布更加均匀, 具有更为优异的塑性变形能力。

D03-108

FCC 结构高熵合金微观组织与变形机制调控的碳合金化效应

江峰, 陈良斌, 魏然

西安交通大学

由过渡族金属元素 Fe、Mn、Ni、Co、Cr 等组成的 FCC 结构高熵合金是已开发出来的高熵合金中的一大类。它们一般具有良好的塑性变形能力(室温塑性应变大于 50%)、高温时良好的相稳定性和抗氧化性能(含有的 Cr 等元素可以形成氧化物保护膜)、低温时(如液氮温度)具有超过绝大多数纯金属和合金的优异断裂韧性和冲击韧性, 并且屈服强度和塑性可以同步提高而不发生低温致脆。然而这类高熵合金的室温强度相对较低, 在铸态只有约 200MPa, 远低于目前金属结构材料所需的强度要求, 低的强度将严重阻碍其作为实际结构材料的应用。本文系统地研究了碳含量对 Fe₄₀Mn₄₀Co₁₀Cr₁₀ 高熵合金(HEA)的显微组织和室温力学性能的影响。结果表明, 添加大量碳的合金 HEA 具有高拉伸强度(935MPa)和高延展性(~74%)的最佳组合, 优异的力学性能归因于: 高含量间隙碳原子通过抑制位错运动并促进室温下形变诱导的孪生而增强了强度和延展性。同时适当的碳合金化保持了单一 FCC 结构使延展性得到进一步保证。该研究结果为开发具有优异机械性能的 HEA 提供了一种新策略。

D03-109

增材制造中的相分离: 有序多孔金属材料无模板制备

刘学, 乐国敏, 李秀燕

中国工程物理研究院材料研究所

金属有序多孔材料在催化、传感等领域具有重要应用。然而其制备往往需要借助于模板, 导致制备过程复杂且成本高昂。本工作利用增材制造中特有的快速冷却与定向导热条件, 使 Fe-Cu-Ni 合金在增材制造过程中发生相分离, 自发形成有序排列的富 Cu 相与富 Fe 相。其中富 Fe 相呈现不发达的树枝状结构, 有序排列于富 Cu 相基体中。然后采用简单化学腐蚀使富 Fe 相溶

解, 成果制备得到了(Cu, Ni)蜂窝状结构, 该结构孔径约为 11 μm , 壁厚约为 200 nm。此外, 还对(Cu, Ni)蜂窝状结构的形貌演化进行了研究, 揭示了该结构的形成机制。本工作提出了一种无模板制备金属有序多孔材料的新思路, 有望用于多种金属有序多孔材料的便捷制备。

D03-110

3D Printing Bulk Metallic Glasses by Thermal Spraying: Fabrication and Properties

张诚, 汪唯, 汪喆

华中科技大学

Large sized bulk metallic glasses (BMGs) and BMG/stainless steel (SS) composites with excellent mechanical properties were successfully fabricated by using a thermal spray three-dimensional (3D) printing (TS3DP) technique. The 3D-printed BMG and BMGC (reinforced with 50% SS powder) parts exhibited high fracture strength (>1.8 GPa) and fairly good fracture toughness (13-21 MPa m^{1/2}, which is 200–400% greater than that of the as-cast BMG of the same composition). The enhanced fracture toughness originates from the intrinsically layered structure in the 3D-printed BMG components, which caused crack deflection and thus increase of the energy dissipation during crack propagation. In parallel to structural applications, we also fabricated BMG parts for functional applications. As a demonstration, the catalytic property of as-printed BMGs towards degradation of azo dye will be investigated in detail.

D03-111

激光功率对 Fe 基激光熔覆涂层微观组织与性能的影响

胡立威, 马斌斌, 乐国敏

燕山大学材料科学与工程学院

Fe 基涂层兼具低廉的价格与优异的耐磨性而受到广泛关注。本工作选取 Fe-Si-B 工业废料, 破碎后采用激光熔化沉积技术分别在 800 W, 1000 W 和 1200 W 的激光功率下制备致密的 Fe-Si-B 熔覆试样。采用 X 射线衍射分析仪、差示扫描量热仪、光学显微镜、扫描电镜、显微硬度仪研究激光功率对熔覆层微观组织与性能的影响。结果表明: 制备的 Fe-Si-B 熔覆层均由(Fe, Si)树枝晶以及 Fe₂B 与(Fe, Si)的片状共晶组织构成, 其中(Fe, Si)树枝晶数量与尺寸均随熔覆功率的增加而增加; 熔覆层硬度随熔覆功率的下降而提高, 最高可达 726 ± 10 HV, 为基体的 3.7 倍, 取得了良好的表面强化效果。涂层耐磨性为基体十倍以上。

D03-112

一种 fcc 高熵合金中析出强化对拉伸性能的影响

张瀚文, 乔珺威

太原理工大学

对于传统的结构材料来说, 高强度和高延展性的结合仍然是一个很大的挑战。最近的研究表明高熵合金具有的特殊结构和热力学特性会极大地影响位错运动, 并有助于机械性能的提高。fcc 结构的高熵合金具有优异的延展性。然而, 仅仅依靠高熵合金基体还不足以在工程中的应用, 所以我们迫切需要建立其他强化机制。析出强化就可以使合金的强度和塑性达到一个很好的结合。我们所做的工作展示了在 fcc CoCrFeNiTi_{0.2} 高熵合金基体中析出第二相的可能性。合金由真空电弧熔炼法制备, 铸态下的样品在 1200°C 下均一化 5h, 使合金基体全部变为等轴晶, 然后冷轧至厚度减少 75%, 接下来在 800°C 下分别退火 3 h、5 h、8 h、10 h、24 h、48 h, 最后水淬。我们对热处理后的样品进行了拉伸试验测试, 与单相 CoCrFeNiTi_{0.2} 合金相比, 析出强化后合金的屈服强度和抗拉强度都分别提高了大约 600MPa 和 500MPa, 而且仍然保持良好的延展性, 可以达到 20%左右。这就是由于各种强化机制特别是析出强化而得到的性能提升。

D03-113

温度对高熵合金摩擦学性能的影响

杜黎明, 杨慧君, 陈明

太原理工大学

本文分别研究了 Al_{0.25}CoCrFeNi 和 Al_{0.6}CoCrFeNi 高熵合金的显微组织，硬度，以及温度对摩擦学性能的影响。结果表明，经热处理后，Al_{0.25}CoCrFeNi 高熵合金仍是单一的面心立方相；而 Al_{0.6}CoCrFeNi 高熵合金由于 σ -CrFe 相的析出，其硬度从 278 HV 增加到 480 HV，故摩擦学性能优于 Al_{0.25}CoCrFeNi 高熵合金。由于高熵合金优异的稳定性和红硬性，其高温下均展示出了良好的耐磨性。在 600°C 时，Al_{0.6}CoCrFeNi 高熵合金的耐磨性几乎是 GCr15 的 3 倍。此外，两种合金的摩擦系数均与温度呈负相关性；同时，随着实验温度的升高，磨损机理也都是由最初的磨粒磨损变为分层磨损，最后转变为氧化磨损。

D03-114

FeSiBCNi 非晶合金及其软磁性能的研究

李福山，杨要轩，张航

郑州大学

在 FeSiBC 合金中添加 Ni 元素，利用单铜辊甩带法制备 Fe₈₁Si_{8.1-x}B_{9.9}C₁Ni_x(0、0.25、0.50、1.0)非晶合金带材。采用 X 射线衍射仪、差示扫描量热仪、振动样品磁强计、阻抗分析仪以及直流 B-H 回线测量仪研究 Ni 元素对 FeSiBC 非晶合金带材的非晶形成能力和软磁性能影响。结果表明适量 Ni 元素的添加一定程度提高了 FeSiBC 非晶软磁合金的磁饱和强度。其中 Fe₈₁Si_{7.85}B_{9.9}C₁Ni_{0.25} 在 Tx 前 100°C 保温 10min 热处理后可以获得较高的饱和磁感应强度为 1.72T，有效磁导率可达 10053，矫顽力为 10.1A/m。该研究为开发高磁饱和新型铁基非晶软磁合金提供了新思路。

D03-115

铁基纳米晶合金软磁性能的微观结构依赖性

董帮少，周少雄，张广强

安泰科技股份有限公司

铁基纳米晶合金的软磁性能具有非常明显的微观结构依赖性。在典型的 Finemet 型纳米晶合金中，优异的软磁性能来源于均匀分布的纳米晶相嵌入非晶基体的双相结构，其磁晶各向异性常数将被铁磁交换耦合作用大幅削弱，从而使得合金表现出高磁导率、低矫顽力、低损耗、低磁致伸缩系数等优异软磁性能；最近十年不同课题组开发的 FeSiBCu(P)系纳米晶合金的饱和磁感应强度 Bs 在 1.72-1.97T 区间内变化、矫顽力在 5.7-379.3A/m 区间内变化，也源于微观结构的差异。由于其非晶前驱体在晶化过程中 α -Fe(Si)晶粒形核密度和生长速度的不可控性，使得晶粒尺度过大、密度过小，导致了铁基纳米晶合金软磁性能的随机性变化。针对调控纳米晶晶核形核及生长速度的瓶颈问题，本团队从提高形核密度、调控晶粒生长速度的角度，试验开发了 FeSiBCuAl、FeSiBPCuNb、FePCCu 系等高 Bs 铁基纳米晶合金，同时理论预测了 Cu 含量的上限值，获得最优软磁性能为 Bs \geq 1.70T，Hc \leq 3.3A/m，具有应用潜力，明确了铁基纳米晶合金软磁性能的微观结构依赖性。

D03-116

Dynamic mechanical response of bulk metallic glasses

范吉堂

北京科技大学

Accompanying with high-rate uniaxial compressive deformation, compressive-zero-tensile transition of the local stress applied on the shear plane is revealed, which clarifies the mechanisms of strain softening and catactrophic fracture of BMGs under an impact loading. By geometrical design of material, crack opening is successfully prevented, which effectively depresses the catactrophic fracture of BMGs. A state-of-the-art research, named as high-rate squeezing (HRS) is proposed. The HRS can process a cylindrical BMGs into an intact thin sheet (90% strain) in a high-speed event. Temperature rise makes a main effect in the process, which induces the thermoplastic flowing. The HRS technique is also supposed to process metallic glasses and other metallic alloys for developing advanced materials and structures. For clarifying the mechanisms of BMGs in HRS process, negative strain rate dependency of the peak stress is revealed. Also, the melting layer thickness increases with the increase of strain rate, which is caused by the temperature rise localizing in a shear band. The characteristic transition from non-Newtonian to Newtonian flow in the shear

bands correlated to the strain rate is addressed. Furthermore, temperature in a shear band is studied. Coupling with the applied high-rate loading, multiple shear bandings for producing thermal energy, thermal diffusion for overall heating and viscous flowing at a constant stress for homogeneous condensation are one-by-one illustrated. Meanwhile, the true stress, true strain rate and material shape at a real time are revealed. For the whole material, the deformation velocity and the applied force are calculated for evaluating the integral dynamic damage efficiency on a target. Also, for the heated part of the material, the motion velocity, mass and temperature are theoretically evaluated for addressing the jet-like formation and propagation.

D03-117

NiCuP 改性铁基非晶合金：薄且高稳定性的电磁屏蔽材料

黎嘉威, 张继君, 谭果果

中科院磁性材料与器件重点实验室, 浙江省磁性材料及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

随着信息技术的高速发展, 电磁干扰或电磁辐射日益严重, 人们对于电磁污染的关注度越来越高。目前, 迫切需要开发能够有效处理电磁污染的材料, 尤其是这类材料还能兼具薄、热稳定性好、容易加工、可大面积制备、能承受恶劣环境等特点。我们通过简单的化学镀方法, 在非晶合金带材表面制备了均匀、高结合力的 NiCuP 层, 并通过粘合获得多层导电-导磁-导电的复合材料。结果显示, 0.1 mm 厚的复合材料在 X 波段的频率范围内具有 40 dB 的电磁屏蔽效能, 高于较厚的传统金属、金属氧化物和聚合物复合材料都要高。同时, 该复合材料还具有良好的耐蚀性、高的热稳定性和优异的抗拉强度, 使其可用于恶劣环境下的电磁污染防护。为突破非晶合金带材的尺寸限制, 我们提出了一种通用的策略, 即通过非晶态粉末的表面改性和超音速火焰喷涂技术合成含有 NiCuP 层的大尺寸非晶涂层。具有分层结构的非晶涂层显示出较高的导电性和良好的软磁性能, 从而实现了 30 dB 的电磁屏蔽效能, 优于未化学镀的非晶涂层 (20 dB) 和基体 (10-15 dB)。我们利用洛伦兹电镜研究了涂层内部界面的磁场和电场分布。磁感应图和电荷分布结果表明, NiCuP 层可以与软磁性的非晶涂层产生强电磁耦合作用, 从而导致多个内部反射, 形成电磁吸收网络, 有利于提高涂层的电磁屏蔽效能。上述思路有利于扩大非晶合金在电磁屏蔽领域的应用范围, 市场潜力巨大。

D03-118

非晶合金纤维制备及其力学和磁学性能

沈红先, 邢大伟, 黄永江

哈尔滨工业大学材料科学与工程学院

采用快速凝固熔体旋淬技术可获得具有微米级直径的非晶合金纤维由于其特殊的几何结构, 通常具有非常优异的特殊性能, 本文主要总结了近年来课题组在非晶合金纤维制备及性能方面的研究和进展。CoFe 基非晶合金纤维具有优异的力学性能, 采用冷拔的方式, 可以有效消除非晶合金纤维制备过程中产生的表面缺陷; 在冷拔过程中发现应力诱发纳米晶相的产生, 可以有效提高纤维拉伸断裂强度。值得注意的是, CoFe 基非晶合金纤维还具有十分优异的巨磁阻抗性能, 调制处理后纤维在 10mA 驱动电流下随外场变化其最高阻抗变化率可达 600%, 作为原材料制备磁敏传感器理论精度可达 nT 级, 具有极高的响应速度。而制备的稀土级非晶合金纤维, 则具有优异的磁热性能, 5T 外场下磁熵变峰值可达 10J/kgK; 微米级纤维极大的比表面积使其在磁制冷系统中具有非常大的热交换效率。此外, 制备的 Fe 基非晶合金纤维具有优异的力学和微波吸收性能, 制备的 NiMnGa 的晶体材料具有优异的形状记忆效应及超弹性。总之, 非晶合金纤维的特殊几何结构和优异的性能, 使其在复合材料和功能性材料方面具有极高的应用价值。

D03-119

Ni-Mn-Ga-Fe 铁磁形状记忆合金的磁热性能

刘艳芬, 孙剑飞, 张学习

齐齐哈尔大学

为了提高 Ni-Mn-Ga 合金的相变温度及磁性能, 采用真空电弧熔炼法制备 Ni₅₀Mn₂₅Ga₁₉Fe₆ 多晶合金, 并经过一个步进式有序化热处理, 利用磁学性质测量系统地研究了磁场对马氏体相变的影响及合金的磁热效应。M-T 曲线表明, 掺 Fe 合金具有热弹性马氏体相变和磁相变特征, Fe 含量为 6%, 马氏体相变温度和居里温度比化学计量比 Ni₂MnGa 三元合金升高

~160K 和 26K, 有效增加了马氏体相的稳定性和奥氏体相的铁磁交换作用。通过麦克斯韦方程计算了合金的磁焓变, 在磁场变化为 50kOe 时, 获得了合金在 363K 附近的最大负磁焓变 ($-\Delta S_{mmax}$) ~11J/KgK, 同时在磁场变化为 2kOe 时, 合金出现最大正磁焓变 (ΔS_{mmax}) ~1.2J/KgK, 并揭示其形成的物理机制为磁场对马氏体孪晶变体和磁矩耦合作用, 利用一个合适的制冷循环, 通过这两种效应可获得可观的制冷效果, 这对磁制冷的发展是有益的。

D03-120

Fe 基非晶态合金的弛豫过程及其与机械性能的关联

张通, 李强

新疆大学

实验结果显示, Ni 部分置换 Fe 将导致 Fe80P13C7 块体非晶态合金塑性得到很大的提高。研究表明非晶态合金的机械性能与其弛豫行为密切相关。为了调查 Ni 替换 Fe 导致 Fe80P13C7 块体非晶态合金塑性提高的微观机理, 我们对 (Fe,Ni)80P13C7 块体非晶态合金体系的弛豫行为进行了研究。本研究工作使我们有机会了解 Fe 基块体非晶态合金的弛豫行为与其塑性之间的关联关系, 并为研究 Fe 基非晶态合金的塑性变形机制提供重要的信息。

D03-121

铁基非晶合金的结构不均匀性及其对晶化行为的影响

王寅岗, 朱力

南京航空航天大学

铁基非晶合金因其优异的软磁性能和较为简单的制备工艺在工业上具有广泛的应用前景, 实际生产中往往需要对合金带材进行适当的退火处理以实现软磁性能的进一步优化, 然而目前人们对于伴随这一过程所发生的具体结构演变尚不清楚。本文采用同步辐射 X 射线衍射、穆斯堡尔谱以及小角 X 射线散射等一系列分析手段研究了铁基非晶合金受到外界温度场作用时的结构演变。在对一种各元素之间混合焓均为负值的 Fe-P-C 非晶合金的研究中发现, 合金在结构弛豫过程中发生原子重排, 拓扑短程有序度增大, 同时溶质-溶剂原子之间的关联作用显著增强。这一结果表明, 单从拓扑结构演变的角度不足以充分地描述铁基非晶合金的结构弛豫过程。同时淬态合金样品具有最大程度的纳米尺度不均匀性, 这种不均匀性会随着结构弛豫的进行不断降低。事实上, Fe-P-C 非晶合金中的结构演变可以通过不均匀程度的降低进行阐释。因此从非晶合金不均匀性的角度来理解其结构弛豫是完全可行的, 而铁基非晶合金结构不均匀性在弛豫过程中的演变显然会对其后续晶化行为产生一定的影响。我们对含 Cu 的 Fe-B-C-Cu 铁基非晶合金进行了两步退火处理, 预退火低于初始晶化温度从而引发结构弛豫, 相应的软磁性能测试显示两步退火所得的纳米晶合金具有更为优异的软磁性能。经过预退火后, 非晶合金的超精细场分布的低场峰和高场峰之间的间距增大, 一方面这可以从 Cu 原子的聚集形成 Cu 团簇得到解释, 另一方面, 从非晶合金的不均匀性来看, 这表明预退火导致了合金体系化学不均匀性的增大。透射电镜的结果表明, 和常规退火处理相比, 两步退火的样品中的晶粒更为细小且分布更为均匀。

D03-122

高速开关磁阻电机用非晶及纳米晶铁芯磁性能

李立军, 卢志超, 李德仁

中国钢研科技集团有限公司 安泰科技股份有限公司

本文通过实验方法对高速开关磁阻电机用非晶及纳米晶定子铁芯磁特性及其对电机静、动态性能的影响做了对比研究。首先, 采用叠块切割法制备非晶及纳米晶定子铁芯并测试其在低频和高频下的磁特性。然后, 搭建电机测试系统, 对分别装配有非晶及纳米晶合金定子铁芯的电机在静态下的相电感、磁链及的转矩特性, 以及电机在负载运行时的功率和温升性能进行测试, 并与同型号的硅钢电机性能做对比分析。结果表明: 非晶及纳米晶合金铁芯具有高磁导率、低矫顽力及低损耗特性, 在 1 kHz, 1 T 条件下, 其损耗分别为 35W300 硅钢铁芯的 1/10 和 1/20; 当铁芯工作在不饱和状态时, 非晶及纳米晶合金材料的高磁导率特性均可提高开关磁阻电机的相电感峰值, 有利于电机在高速下仍保持稳定扭矩输出; 当电机在 25000 rpm、相同负载扭矩条件下, 具有非晶和纳米晶定子铁芯的电机的损耗分别较硅钢电机下降了约 55 W 和 63 W, 有效降低了电机温升速率;但受非晶及纳米晶饱和磁感值较低的特性影响, 具有非晶及纳米晶定子铁芯的电机的静态饱和磁链值

低于硅钢电机，从而限制了电机的磁负荷能力及最大输出功率。研究结果可为高效、高速非晶及纳米晶开关磁阻电机设计和优化提供参考。

D03-123

电流退火工艺对 Gd-Al-Co-Fe 金属纤维磁性能的影响

吴梦君, 刘景顺, 王旭峰

内蒙古工业大学材料科学与工程学院

本文研究了直流电流退火中电流强度对 Gd-Al-Co-Fe 金属纤维磁学性能的影响。研究表明, Gd 基金属纤维的一般磁学性能指标值随退火电流强度 (50~110mA) 升高呈先增后减的变化趋势, 90mA 退火态金属纤维的软磁性能最佳, 最大磁导率 μ_m 为 0.3816 和饱和磁化强度 M_s 为 255.26 emu/g。Gd 基金属纤维的磁热性能指标值随退火电流强度升高也呈先增后减趋势。在 5T 外磁场下, 90mA 退火态金属纤维的最大磁熵变- ΔSM 达 12.77J/kg·K, 较制备态纤维- ΔSM (10.33J/kg·K) 提高了 0.24 倍, 制冷效率 RCP 为 1123.15J/kg, 较制备态纤维提高了 0.11 倍。从微结构演变角度分析, 高强度直流电流作用时发生了原子团簇和电子耦合作用, 形成了原子有序取向区和环向畴, 其内部残余应力释放和磁各向异性场减小, 致使制冷容量提高, 达到制冷目的。因此, 直流退火态 Gd 基金属纤维可为中低温磁制冷技术提供一种选择依据。

D03-124

Gd₃₆Tb₂₀Co₂₀Al₂₄ 高熵非晶纤维磁热性能以及低温原子结构演变研究

尹航博策, 黄永江, 沈红先

哈尔滨工业大学

通过熔体旋淬方法制备 Gd₃₆Tb₂₀Co₂₀Al₂₄ 高熵合金纤维, 所制备纤维为完全非晶态结构。该纤维具有优异的磁热性能, 其居里温度为 87 K, 在 5T 变化外场下最大磁熵变值 (- ΔSM_{max}) 可达 12.2 J·kg⁻¹K⁻¹; 此外, 纤维还具有宽的制冷温区 (77 K), 以及高的制冷效率 (RC ~ 724 J·kg⁻¹、RCP ~ 939 J·kg⁻¹), 这是由于高熵非晶纤维高的结构熵导致了较大的结构混乱度使得内部磁有序困难, 造成纤维磁相转变困难, 进而提高了纤维的磁热性能, 非晶态结构还使纤维磁制冷温区变宽, 促进了该纤维的可应用性。这种稀土基非晶高熵纤维在中低温区具有非常好的磁热应用前景。值得注意的是纤维的工作温区较低, 为了探究纤维原子结构变化对于磁热性能的影响, 采用原位高能同步 X 射线衍射观察室温和低温下纤维原子尺度的结构变化, 在降温过程中, 纤维始终保持非晶态, 原子体积持续减小, 纤维中小尺寸原子持续的向大尺寸原子方向移动, 占据了大尺寸原子之间的空间, 导致大尺寸原子之间的键长增长, 当温度降低到 180K 的时候, 小尺寸原子之间的键长开始变短。

D03-125

脉冲激光处理对铁基非晶结构及性能的影响

郭玲玉, 王伟民

山东大学

本文研究了脉冲激光处理对铁基非晶结构及性能的影响, 采用了平均功率为 10、20 和 30 W 的脉冲激光束对 Fe₇₈Si₉B₁₃ 非晶条带表面进行处理, 并对其表面形貌变化、组织结构演变以及性能改变等方面进行了研究。通过对处理后条带表面形貌的 SEM 观察, 发现经 10 W 处理的条带表面规则排列着圆形激光斑点 (中间凹下, 四周凸起的类似冠状样貌)。随着功率的增加 (20 和 30 W), 激光斑点直径增加, 圆环周围发生明显的飞溅现象。XRD 结果显示激光处理之后的条带仍保持了非晶的典型漫散射馒头峰, 也就是说明激光处理之后没有发生明显的晶化行为。通过对 XRD 漫散射峰的高斯拟合, 可以发现其峰位有增加的趋势, 通过公式推导可以说明激光处理之后其特征距离有变小的趋势。SAXS 数据推导出的 $p(r)$ 曲线的峰位向左偏移, 说明其非晶内部团簇尺寸有减小的趋势。TEM 结果显示激光处理之后, 在样品表面形成了一种新的非晶无序结构, 其无序度更高, 与 SAXS 结果相一致。此外, 由于激光处理过程中具有一定的热影响区, 导致了部分纳米晶的存在, 通过对衍射斑点的标定可以发现 α -Fe(Si) 相存在于激光处理的所有样品中, 此外在 30 W 处理的样品中发现了 Fe-B 相的存在。对样品性能表征可以发现激光处理之后的样品的耐蚀性、磁性和热稳定性都有增加的趋势, 其中 20 W 样品的性能是最优异的。

D03-126

超薄柔性 Fe-Si-B@Ni-Cu-P 多层非晶复合材料的制备及其电磁屏蔽性能研究

张继君, 黎嘉威, 谭果果

中科院磁性材料与器件重点实验室, 浙江省磁性材料及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

随着电子信息技术的高速发展, 各种电子产品及器件日益增多, 电磁污染日益加剧。电磁辐射会干扰周围电子设备及器件的正常运行, 引起信息的泄露, 同时对人类健康也有很大的危害, 因此, 急需发展“薄、轻、宽、强”的电磁屏蔽材料, 来净化电磁环境。面对日渐复杂的电磁环境, 切需要发展超薄柔性的高效电磁屏蔽材料, 若是材料制备方法简单且能服役于高温腐蚀等恶劣环境则更佳。本文以 Fe-Si-B 非晶软磁带材(牌号: 1K101)为基底, 通过化学镀的方法在其表面沉积了厚度均匀、结合力高、导电性好的 Ni-Cu-P 非晶镀层, 制备了具有“导电层/导磁层/导电层”结构的功能复合带材。将上述带材进行粘结, 制备出了超薄、柔性的多层 Fe 基非晶电磁屏蔽复合材料(FNMG), 该材料兼具优异的软磁性能、高的导电性和出众的电磁屏蔽性能。化学镀时间为 5 min, 厚度仅为 0.1 mm 的 FNMG 在 X 波段(8-12 GHz)的电磁屏蔽效能高达 42 dB, 远超工业标准的 20 dB。且经过 10~100 次弯折后, FNMG 的电磁屏蔽性能保持良好的稳定性, 仅出现微小的波动。该 FNMG 优异的屏蔽效能主要归功于样品兼具高的磁导率、高的电导率以及导电-导磁-导电的多层结构, 在磁损耗、电损耗、多重反射损耗、以及良好的阻抗匹配的协同效应下, 显示出最好的电磁屏蔽效能。此外, FNMG 表现出良好的耐蚀性能, 在 3.5 wt.% 的 NaCl 溶液中, 相对于与 Fe-Si-B 非晶带, FNMG 的腐蚀电位增加了~ 0.35 V。FNMG 还具有较好的热稳定性和力学性能, 其晶化温度约为 800 K, 拉升强度大于 1.5 GPa, 远高于导电高分子屏蔽材料的服役极限。同传统金属基电磁屏蔽材料相比, 本文获得的 FNMG 多层非晶复合电磁屏蔽材料兼具高的屏蔽效能、超薄的厚度、高的柔韧性、良好耐腐蚀性、高的热稳定性、优良的机械性能和弯曲稳定性, 在严苛环境下的电磁防护领域具有很强的竞争优势。

D03-127

非晶合金的成形技术

柳林

华中科技大学材料学院

非晶合金因其具有原子排列长程无序的特殊结构特征而表现出一系列优异的物理、化学和力学性能, 如高强度、高弹性、以及优异的耐磨耐蚀性能。但非晶合金固有的本征脆性以及难加工性阻碍了这类材料的工程应用。能否方便地实施非晶合金的成形与加工是突破其工程应用瓶颈的关键。本报告将介绍作者所在的团队近年来在非晶合金成形与加工方面的研究进展, 包括: 非晶合金在过冷液态区的热塑性未微成形、激光 3D 打印成形以及超音速热喷涂成形。重点介绍各成形技术的原理, 成形工艺对非晶合金微结构及性能的影响, 并分析各成形技术存在的问题和拟解决的途径。

D03-128

锆基块体非晶合金的流动性及铸造成形

马明臻, 张新宇, 刘日平

燕山大学

本文用石墨坩埚和氧化铝坩埚通过中频感应真空熔炼炉熔炼锆基块体非晶合金, 分别用顶注式金属铜模螺旋试样、环状试样和水冷不锈钢管真空吸铸的方法, 开展了 Zr₄₁Ti₁₄Cu_{12.5}Ni₁₀Be_{22.5} 和 ZrNiAlCu 块体非晶合金铸造流动性和充型能力的研究, 建立了流动长度与浇注温度之间的本构方程。试验结果显示, 螺旋试样流动长度及不锈钢管真空吸铸的流动长度与流动能力不仅与温度有关, 而且与充型时的浇注速度以及吸铸的压力有关。即流动长度随合金熔体的温度、浇注速度以及吸铸时压强的提高而增加。通过在 1073K、1123K 和 1173K 的不同浇注温度下进行的铸件充型能力试验, 分析了不同浇注温度对 Zr₄₁Ti₁₄Cu_{12.5}Ni₁₀Be_{22.5} 块体非晶合金形成能力的影响。对铸件顶端的凝固温度测量显示, 当温度从合金液体充满铸型顶端时的 1005K 冷却到 633K 时所需时间为 9.23s, 平均冷却速率为 40K/s, 瞬时冷却速率为 37K/s, 远远超过 Zr₄₁Ti₁₄Cu_{12.5}Ni₁₀Be_{22.5} 块体非晶合金的临界冷却速率。X-ray 衍射与差示扫描量热分析显示, 在不同浇注温度下所获得的铸件均为非晶态结构。

D03-129

Zr 基非晶合金高速铣削加工特性研究

赖子健, 丁峰, 王成勇
广东工业大学

切削加工是获得复杂形状、高精度和高光洁度非晶合金零件的主要方法。现有非晶合金切削加工主要集中于低速车削、钻削以及微细加工。为了了解非晶合金高速铣削特征, 本文基于单因素实验研究了切削速度对切屑形成、切削发光、切削力、切削温度及刀具磨损等多个切削特征的影响。实验结果表明, 在切削速度为 94~132m/min 时, 产生条带状切屑, 且自由表面呈现出典型的连续层叠状结构; 当切削速度超过 150m/min 时, 条带状切屑转变为扇叶状切屑, 切屑自由表面发生了明显的熔化; 进一步提升切削速度至 170m/min 和 188m/min, 分别形成了连续层叠熔覆的 C 型切屑和锯齿状 C 型切屑。干式切削条件下, 切削高温和切屑熔化导致刀具的磨损形式主要表现为粘接磨损、扩散磨损和氧化磨损, 并伴随着严重的刀具涂层撕裂和脱落现象; 切削发光现象随着切削速度的提升和刀具磨损的增加而愈发剧烈。为了防止刀具过早失效, 本文进一步尝试采用纯冷风和冷风复合油膜防水滴冷却润滑技术来提升非晶合金的可加工性, 结果表明, 这两种技术都能有效抑制切削发光现象, 且极大降低了粘接磨损, 刀具主要磨损形式转变为微崩刃; 相比较于纯冷风, 应用冷风复合油膜防水滴技术的切削力和温度分别降低了约 20%和 60%。

D03-130

熔体抽拉 Ho_{33.3}Er_{33.3}Co_{33.3} 中熵非晶纤维结构分析及磁热性能

鲍颖, 沈红先, 黄永江

哈尔滨工业大学材料科学与工程学院

本文主要采用熔体抽拉的方法制备 Ho_{33.3}Er_{33.3}Co_{33.3} 中熵合金纤维, 其具有优异的磁热性能。Ho_{33.3}Er_{33.3}Co_{33.3} 合金纤维居里温度(TC)为 25K, 在 5T 的外场下, 该中熵合金纤维最大磁熵变(- ΔS_{Mmax})为 14.96 J·kg⁻¹·K⁻¹, 高于纯金属 Gd 纤维 - ΔS_{Mmax} (10.2 J·kg⁻¹·K⁻¹)。通过透射电镜 (TEM) 和原位高能同步 X 射线衍射结构分析显示, Ho_{33.3}Er_{33.3}Co_{33.3} 合金纤维非晶基体上存在少量纳米晶相结构, 由于纳米晶相与非晶基体的耦合交互作用, 提高了纤维的磁热性能。Ho_{33.3}Er_{33.3}Co_{33.3} 中熵合金纤维制冷剂容量 (RC) 和相对制冷量 (RCP) 分别达到了 395.68J·kg⁻¹ 和 526.74J·kg⁻¹, 这说明该合金纤维在低温下具有高的制冷效率和良好的可逆磁热效应(MCE), 可作为低温磁热材料和制冷材料, 而体现良好应用前景。

D03-131

基于气雾化和放电离子烧结技术制备 Zr 基非晶颗粒增强 Al 基复合材料及其力学行为研究

李松, 谭文亮, 戴志强

中南大学粉末冶金研究院

本文利用氩气雾化和放电等离子烧结法制备了 Zr 基非晶颗粒增强铝基复合材料, 研究了 Zr 基非晶颗粒体积分数的变化 (0, 10%, 20%和 30%) 对 7056 高强铝合金基复合材料的微观结构和力学行为的影响。利用 X 射线衍射 (XRD)、差示量热分析 (DSC)、扫描电镜 (SEM) 和高分辨透射电镜 (HRTEM) 对复合材料的成分、组织结构、界面结合状态进行了分析。烧结成形过程中 Zr 基非晶颗粒未发生晶化, 复合材料的致密度达到 99%以上, 并且随非晶颗粒含量增加有逐渐下降趋势。力学性能测试结果表明, 非晶颗粒含量增加, 导致复合材料的硬度和压缩屈服强度明显提高, 但压缩塑性逐渐下降, 当非晶颗粒体积分数为 30%时, 压缩塑性仍有 15%。此外, 烧结态 7056 高强铝合金呈现明显地加工硬化现象, 而随着非晶颗粒含量增加, 加工硬化现象明显削弱。

D03-132

锆基非晶合金电解质离子体抛光工艺研究

何小琳, 王成勇, 张涛

广东工业大学

锆基非晶合金优异的力学性能及良好的生物相容性使其在军工、3C 电子、医疗等行业有广泛应用前景, 但其高弹性、高硬度、高电阻等特性导致传统抛光方法存在质量差、效率低等问题。电解质等离子体抛光是一项新兴的表面光整技术, 其利用气液电离发生等离子体技术, 原理是加载着高电压的工件浸没到电解质中, 形成回路的瞬间造成短路释放大量热量

使工件周围的电解液汽化形成高阻气层，气层在高温高压作用下电离形成等离子体放电通道，对工件表面进行微观轰击实现材料去除，达到表面平整光亮的效果。该技术对材料导电性能要求低，适用于复杂形面的工件且对多相合金无不利影响。本实验基于自行研发的电解质等离子体抛光装置及抛光液，通过单因素实验，分析了电压、电解质温度、抛光时间、下潜深度、工件大小、阴极表面积、工件与阴极板距离等工艺参数的影响，利用粗糙度、光泽度和去除厚度对加工质量进行表征，以获得较优的工艺组合。试验结果表明最佳工艺组合对锆基非晶合金去除效率为 $2\mu\text{m}/\text{min}$ ，粗糙度从 $0.548\mu\text{m}$ 下降至 $0.104\mu\text{m}$ ，光泽度从 89.2G 上升至 468.4G。

D03-133

电磁焊接锆基非晶合金与纯铝的界面研究

王笃振，李宁，柳林

华中科技大学材料学院

非晶合金具有优异的机械性能，在现代工业中表现出极大的应用潜力，但其实际应用一直受到玻璃形成能力的约束。因此作为一种未来可能的解决思路，非晶合金与异种金属材料的焊接越来越受到人们的关注。基于此，本研究选择 Zr65Al10Ni10Cu15 与工业纯铝为研究对象，对其进行电磁焊接实验研究。结果表明：二者可以实现牢固的焊接连接。为了探究其焊接机理，我们采用扫描电子显微镜（SEM）对焊接界面进行更加细致的观察，结果表明焊接界面呈现出典型的波浪状界面，部分区域还具有旋涡状的特征。采用高性能聚焦离子束（fib）系统在此区域制备透射电子显微镜（TEM）试样，进行 TEM 显微分析，结果表明此区域存在着宽度约为 $2.5\mu\text{m}$ 的中间层，靠近中间层铝母材发生了晶粒细化，而非晶母材则保持非晶态结构。中间层主要由锆基非晶相和纳米级纯铝颗粒组成，并显示出金属液态流动的形貌特点。理论分析表明这种结构与形貌是由高速碰撞引起的局部金属熔化与应力波搅拌，以及后续快速冷却引起的。这对理解非晶合金与异种金属材料电磁焊接的机理、促进非晶的工程应用具有重要意义。

D03-134

高熵合金中合金元素在亚晶格上的占位有序化行为和力学性能预测

吴波，谢哲学，黄江林

福州大学

本文采用第一性原理计算结合合金热力学计算，在准简谐近似（QHA）下，定量化研究了具有应用前景的高熵合金体系 CoCrFeNiMn 和 NbTaVWM（M=Mo、Ti）的相结构、热力学函数、合金元素占位有序化行为，进而基于占位分数，预测了合金的弹性性质。在 298K 到 1498K 的温度范围内，CoCrFeNiMn 系高熵合金为稳定的 FCC 单相结构；在 298K 到 2698K 的温度范围内，NbTaVWM（M=Mo、Ti）系高熵合金为稳定的 BCC 单相结构，合金相均未发生调幅分解。随着温度的升高，合金的混合焓和混合熵上升，Gibbs 自由能减小，混合熵逐渐接近玻尔兹曼假设的理想混合的理论值。温度对合金中元素的占位倾向有着明显的影响，随着温度的升高，大部分元素在亚点阵上的占位有序化倾向减弱，倾向于无序化。以 CoCrFeNi 合金为例，298K 时，合金的占位构型为 $(\text{Co}_{0.519}\text{Cr}_{0.240}\text{Fe}_{0.014}\text{Ni}_{0.227})_{1a}(\text{Co}_{0.160}\text{Cr}_{0.253}\text{Fe}_{0.329}\text{Ni}_{0.258})_{3c}$ ，Co 倾向于 1a 点阵位置，Fe 倾向于 3c 点阵位置，Cr 和 Ni 无明显的占位倾向；而 1498K 时，合金的占位构型为 $(\text{Co}_{0.422}\text{Cr}_{0.124}\text{Fe}_{0.194}\text{Ni}_{0.260})_{1a}(\text{Co}_{0.193}\text{Cr}_{0.294}\text{Fe}_{0.269}\text{Ni}_{0.247})_{3c}$ ，除 Cr 略微偏向 3c 点阵位置以外，其他的元素均趋向于无序占位。本文进一步建立合金相的原子排列模型，分别采用了基于占位分数建模模式（SOF）和传统的特殊准随机结构（SQS 建模，计算出合金相的弹性性质。SOF 考虑了在实际情况下，合金原子在亚晶格上的占位存在倾向性，而 SQS 模型不考虑原子在亚晶格上的占位倾向性问题，仅考虑原子在所有亚点阵上随机占位。两种模型所计算出的弹性力学性质差距不太明显，均能反映上述高熵合金体系的本征塑性，但显然基于占位分数建模，建模更加真实，研究内涵更加深刻。对于 CoCrFeNiM 系高熵合金，三种材料的弹性力学性能排行依次为 $\text{CoCrFeMnNi} > \text{CoCrFeNi} > \text{CoCrCuFeNi}$ ，对于 NbTaVWM 系高熵合金，三种材料弹性力学性能排行依次为 $\text{MoNbTaVW} > \text{NbTaVW} > \text{NbTaTiVW}$ 。元素的占位行为对合金弹性力学性能有着一定的影响。当温度上升，占位有序度减小时，晶体的体积增大，原子间的键强度减弱，材料的弹性力学性能下降。

D03-135

高熵非晶合金中的高应变速率敏感性

赵少凡, 王海滨, 姚可夫
钱学森空间技术实验室

非晶合金材料和高熵合金材料都因其特殊的结构而具有高强度、高硬度、强耐腐蚀性等良好的综合性能。从热力学和动力学角度来说,“熵”值的考虑对非晶形成原理起着重要作用。基于两种材料均有“高混乱度”的结构需求,可将高熵合金材料的设计概念引入非晶合金材料中,形成“高熵非晶合金材料”。现有的研究表明,研究者们已经成功开发了一些高熵非晶合金体系,且具有优秀的非晶形成能力和综合性能。但是,揭示“高熵”效应对非晶合金的影响一直是个值得思考的课题。我们分别对 TiZrHfCuNi 体系高熵非晶合金薄膜材料以及 TiZrHfBe(CuNi)高熵块体非晶合金材料进行了不同应变速度下(0.01, 0.05, 0.1, 0.5 s⁻¹)的纳米压痕实验。实验结果表明这两种材料的平均硬度都随着应变速率的提高而具有显著的提升,也就是说高熵非晶合金材料具有较高的应变速率敏感系数(m)。尤其是 TiZrHfBeNi 高熵非晶合金材料的 m 值达到 0.056,这是目前非晶合金材料报道中的最高 m 值。同时, m 值的分布与非晶合金的玻璃转变温度(T_g)并没有直接关联。现有的研究报道表明,非晶合金的 m 值与其剪切变形区域大小(STZ volume)呈反比。所以我们认为高熵非晶合金因“高熵效应”,对应了更加均匀的非晶结构以及更小的剪切变形区域,使其剪切带难以形成及扩展,从而具有高应变速率敏感系数。

D03-136

应变速率对 TiZrHfCuNiBe 高熵非晶合金在纳米压入过程中变形行为的影响

童钰, 乔吉超, 姚尧
西北工业大学

本研究以 TiZrHfCuNiBe 高熵非晶合金为研究对象,借助纳米压痕试验探索高熵非晶合金的塑性变形行为,试验应变速率范围是 250 到 10000 μ N/s-1。试验中 TiZrHfCuNiBe 高熵非晶展现出明显的锯齿流变现象。同时在荷载-位移曲线中发现,位移突发的数量和位移突发尺寸随着应变率的增加而减小,这意味着该高熵非晶合金的锯齿流变行为是率相关的。此外,通过统计分析荷载-位移曲线中第一个位移突变处的强度,得到该高熵非晶合金的激活体积和剪切变形区(STZ)大小,同样呈现率相关性。

D03-137

过渡族金属基高熵块体非晶态合金的制备与性能研究

李春泽, 李强
新疆大学

采用 fluxing 提纯和 J-quenching 技术相结合的方法,我们成功制备出临界尺寸达 2mm 的(FeCoNi)₈₀(PB)₂₀ 高熵块体非晶态合金。VSM 测试结果显示目前的高熵块体非晶态合金的饱和磁化强度为 0.9 T。压缩测试结果显示,目前的高熵块体非晶态合金具有 3000 MPa 的高压缩断裂强度,以及 4%的大压缩塑性。

D03-138

具有高硬度和优异耐磨性的高熵非晶

杜银, 周青, 任越
西北工业大学

Ti 基高熵非晶被成功制备并且研究了其玻璃形成能力和热稳定性。其硬度和粘着磨损行为被研究并与传统的具有相同元素的钛基非晶进行了比较。研究表明 Ti 基高熵非晶的硬度高于传统相似元素组成的非晶硬度。在往复滑动干摩擦试验中,非晶的磨损量及摩擦系数随着非晶体系熵升高而单调下降。通过 DSC、SEM 和 TEM 研究发现钛基高熵非晶中的高熵效应使得其具有高的硬度和优异耐磨性。

D03-139

(Fe, Co, Ni, Cr, Mo) -B 非晶态高熵合金的形成能力、热稳定性及力学性能的研究

王芳, 朱胜利, 井上明久
天津大学

本工作中，我们成功制备了 $(\text{Fe}_{0.25}\text{Co}_{0.25}\text{Ni}_{0.25}\text{Cr}_{0.125}\text{Mo}_{0.125})_{100-x}\text{B}_x$ ($x=11-31$ at%)系列非晶态高熵合金材料，研究了其非晶形成能力、热稳定性和力学性能，以及高熵效应对材料性能的影响。研究发现，对比 $(\text{Fe}_{0.25}\text{Co}_{0.25}\text{Ni}_{0.25}\text{Cr}_{0.25})_{100-x}\text{B}_x$ 高熵合金，Mo 部分替代 Cr 能极大提高材料的玻璃形成能力、热稳定性和硬度。由于 Mo 元素的添加，我们能够在较大 B 含量区间内制备出非晶态的合金条带，DSC 结果表明 B 含量从 22%到 31 at% 都能观察到明显的过冷液相区，而在没有 Mo 元素的 $(\text{Fe}_{0.25}\text{Co}_{0.25}\text{Ni}_{0.25}\text{Cr}_{0.25})_{100-x}\text{B}_x$ 高熵合金中没有观察到过冷液相区。对 $(\text{Fe}_{0.25}\text{Co}_{0.25}\text{Ni}_{0.25}\text{Cr}_{0.125}\text{Mo}_{0.125})_{100-x}\text{B}_x$ ($x=11-31$ at%)非晶态合金条带的 X 射线衍射结果分析中，我们利用样品的非晶衍射峰位置的移动来表示非晶合金的平均原子间距离的变化，该结果表明随着 B 的含量提高，非晶合金材料的平均原子间距越小，表示材料具有更加紧密的原子堆积程度，这与其维氏硬度的提高也是相对应的。此外，对其初始晶化过程研究发现：当 B 含量为 15 at%~20 at%，样品的晶化过程是 Am(非晶态)→FCC+ Am；当 B 含量为 25 at%~27 at%，样品的晶化过程是 Am→GT(玻璃态)→M23B6。

D03-140

Nanocrystalline CoCrFeNiAl_{0.3} high-entropy alloy thin film coating by magnetron sputtering

廖卫兵

深圳大学

High-entropy CoCrFeNiAl_{0.3} alloy thin films were prepared by magnetron sputtering technique. The thin film surface was very smooth and homogeneous. The synchrotron X-ray experiment confirmed that (111) type of texture existed in the thin film, and the structure was face-centered cubic nanocrystals with a minor content of ordered NiAl-type body-centered cubic structures. Interestingly, the elastic modulus of the thin film was nearly the same to the bulk single-crystal counterpart, however, the nanohardness is about four times of the bulk single-crystal counterpart. It was found that the high hardness was due to the formation of nanocrystal structure inside the thin films and the preferred growth orientation, which could be promising for applications in micro fabrication and advanced coating technologies.

D03-141

非晶合金粉末烧结过程中原子扩散系数的量化

杨超, 李鑫鑫

National Engineering Research Center of Near-net-shape Forming for Metallic Materials, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

粉末烧结是把粉末颗粒粘结成块状固体结构的材料制备技术。通常情况下，粉末收缩和致密化的影响因素包括表面能、平均颗粒尺寸、粘度等各种物性参数，这些影响因素对以粉体之间形成烧结颈为特征的粉末收缩早期阶段尤为重要。本质上讲，致密化机制可用前述物性参数决定的特定物理量来分析和表述，例如致密化速率、激活能、应力指数、综合影响因素。然而，作为可代表传质能力和控制粉体致密化机理的直接物理量，粉末烧结过程中的原子扩散系数迄今尚未被定量分析和推导。作为一种有应用前景的金属材料，非晶合金已经引起了科研界与产业界的高度关注。但是，现有文献表明非晶合金过冷液相区内的扩散行为尚未被深入理解。同时，非晶合金粉末常被用于粉末烧结法制备新结构块体合金，如纯非晶、等轴超细晶、双尺度结构等。从定性角度来说，这些新结构的形成机制归因于其特殊的原子扩散机制。有鉴于此，本论文基于 Stokes-Einstein 方程、Arrhenius 方程和 Frenkel 模型，建立了可量化推导非晶合金粉末烧结过程中原子扩散系数的理论框架，并建立了量化原子扩散系数与粉体致密化机理的内在关联性。相应地，与雾化法制备的 Ti_{40.6}Zr_{9.4}Cu_{37.5}Ni_{9.4}Sn_{3.1} 非晶粉末相比，球磨法制备的 Ti_{40.6}Zr_{9.4}Cu_{37.5}Ni_{9.4}Sn_{3.1} 非晶粉末具有更高的原子扩散系数，决定了其更高的粉体瞬时致密化速率。研究结果表明，原子扩散系数可用作表征传质能力和控制粉体致密化机理。

D03-142

粉末冶金 NbTaV-(Ti,Al)难熔高熵合金及其复合材料的制备及性能研究

刘彬, 郭文敏, 李天琛

中南大学粉末冶金国家重点实验室

难熔高熵合金，尤其是韧性难熔高熵合金，具有良好的高温力学性能和室温塑性，作为高温结构材料具有良好的应用潜力。常规难熔高熵合金大都采用电弧熔炼方法制备，但电弧熔炼制备的难熔高熵合金因为组元多、扩散慢、易产生粗大枝晶和严重成分偏析，同时易生成脆性金属间析出物，严重限制了合金的力学性能和应用。粉末冶金是制备难熔材料的一类理想方法，可制备成分均匀、组织细小的难熔合金，同时可制备大尺寸试样，具有较好的工程应用价值。本研究采用粉末冶金方法制备了具有良好塑性的 NbTaV-(Ti,Al)高熵合金及 NbTaV-(Ti,Al)+TiC 复合材料，NbTaVTi 高熵合金具有均匀细小的单一 β 相组织，压缩强度和压缩塑性分别高达 2.1Gpa 和 25%；加入 TiC 碳化物后，压缩强度提高至 2.4GPa，而压缩塑性仍保持 15%左右；添加 Al 可使密度和抗氧化性能得到优化，同时保持较好的抗压强度 (1.67GPa) 和延性 (6%)，因此，粉末冶金 NbTaV-(Ti,Al)高熵合金及其复合材料可望成为一类有良好应用潜力的高温结构材料。

D03-143

新型无偏析的含 Cu 高熵合金

于源，乔竹辉，杨军

中国科学院兰州化学物理研究所

Cu 元素的添加能够促使高熵合金得到足够的混合熵和较低的混合焓，然而由于 Cu 元素与过渡族元素较高反应焓引起的偏析，恶化了合金的耐腐蚀性能和机械性能。偏析是含 Cu 高熵合金长期以来亟待解决的难题。为此，我们通过调控相形成路线和原料结构，研制了一种低成本、简单易行的烧结方法，有效地消除了高熵合金中的 Cu 偏析。通过耦合原料的不稳定性、高的扩散温度和相流动性，Cu 元素与过渡族元素的扩散得到加速。制备新型的高熵合金不仅具有均匀的 Cu 元素分布，而且呈现了纳米相耦合的结构。即该方法维持了 Cu 元素添加对系统低自由能的作用，避免了偏析对耐腐蚀性能的恶化，还通过加剧晶格畸变强化了高熵合金。

D03-144

多主元单相固溶体型高熵合金调幅分解成分预测

尹可心，田权伟，张国璘

大连理工大学

在 Co-Cr-Fe-Ni-Al 系高熵合金中，晶格结构为体心立方(BCC)的 α 相经常发生调幅分解，其组织为以 Fe、Cr 为主要成分的无序 BCC 相和以 Ni、Al 为主要成分的有序 B2 相。人们普遍认为这一现象的发生是由于调幅分解可大幅降低合金自由能所致，但却缺少足够的理论依据。本文基于热力学，从合金成分浓度起伏所导致的自由能变化的角度，讨论并给出了 n 主元单相无序固溶体能够形成调幅分解的条件：若以各组元自由能二阶偏微分 G_{ij} 为元的 n 阶二次型不符合半正定矩阵，合金就会发生调幅分解。本文根据以上方法验证了典型的 Co-Cr-Fe-Ni-Al 系高熵合金能够发生调幅分解的原因。同时，设计了一种具有调幅分解组织的新型 $Co_2FeCrAl$ 固溶体型高熵合金，该合金由晶格结构为 BCC 的 α 相固溶体构成，其调幅分解组织为富含 Fe、Cr 的无序 BCC 相和富含 Co、Al 的 B2 相。

D03-145

高熵合金的空位与团簇热力学

王志军

西北工业大学

高熵合金的耐辐照性能已经开始得到关注，并表现出优异的抗辐照性能。在分析耐辐照机理方面，通常从间隙原子移动的缓慢动力学效应入手。空位是与金属抗辐照性能有关的另外因素。高熵合金的空位则鲜有人关注。我们从空位的热力学入手，分析发现，高熵合金的平衡空位密度随着构型熵的增加显著增加。平衡空位浓度的分析同样适用于空位团簇的分析。结果表明，构型熵的增加对辐照过程中临界空位团簇的增加也有显著影响，从而可以解释辐照过程中空穴的平均尺寸较小的现象。分析结果也进一步表明高熵合金空位浓度增加使得分析其高温的缓慢扩散变得相对复杂。高熵合金的空位热力学分析从热力学角度揭示了构型熵对高熵合金性能的影响

D03-146

马氏体增强金属玻璃复合材料中的协同增韧机制

付小玲

广东工业大学

通过对 ZrCu 二元合金单轴向压缩行为研究, 系统地分析了马氏体颗粒大小, 直径, 分布对轴向压缩塑性的影响。更重要的是, 研究发现马氏体相变过程中的微裂纹增韧与微裂纹偏转机制作为马氏体相变的辅助机制协同增韧。

D03-147

FeCoCrNiMox 高熵合金腐蚀行为与机理研究

代春朵, 刘智勇, 李军

北京科技大学腐蚀与防护中心

高熵合金包含至少五种主元素, 且每种元素含量为 5%-35 at.%。因为高混合熵效应, 高熵合金趋于形成无序固溶体而不是金属间化合物, 多种元素在固溶体中的无规则排列产生了特殊的局部无序化学环境, 从而有可能产生独特的耐腐蚀性能。因此本研究以典型的 FeCoCrNi 合金为基体, 添加不同含量的 Mo 元素, 研究在盐溶液及酸溶液中 Mo 元素对 FeCoCrNiMox 合金腐蚀行为的影响。FeCoCrNiMox(x=0, 0.1, 0.3, 0.6)合金通过电弧熔炼制备并吸铸而成。采用 X 射线衍射(XRD), 透射电镜(TEM)及扫描电镜(SEM)分析确定其相组成, 物相结构及组织组成。通过极化曲线及恒电流测试分析其腐蚀行为。通过分析, FeCoCrNiMox 合金组织均为铸态树枝晶, Mo 含量为 0.3, 0.6 时, 有富 Mo 元素的析出相形成, 并随着 Mo 含量增多, 析出相大大增加。在不同介质中的电化学测试中 FeCoCrNiMox 合金均展现出较好的耐腐蚀性能。由于富 Mo 元素的析出相与其周围贫 Mo 区的电偶作用, FeCoCrNiMo0.3 及 FeCoCrNiMo0.6 合金在 1MNaCl 中产生局部腐蚀, 而 FeCoCrNi, FeCoCrNiMo0.1 合金则产生点蚀。由于 Mo 元素参与合金钝化膜的形成, 含 Mo 元素合金的耐腐蚀性能明显优于 FeCoCrNi 合金, 且 FeCoCrNiMo0.1 合金耐蚀性最佳, 明显优于 316L 不锈钢。实验结果表明 Mo 元素增多, 促进析出相形成, 并提高合金耐腐蚀性能, 但 Mo 元素全部固溶到 FeCoCrNi 基体中, 对耐蚀性能最为有益。

D03-148

高强高韧 Fe 基非晶基复合材料的激光 3D 打印

李宁, 张健佳, 邢伟

华中科技大学

非晶合金在室温下难以成形加工是制约这类材料工程应用的瓶颈。发展新的成形技术是非晶合金未来发展与应用的关键。近年来发展起来的激光选区熔化(SLM) 3D 打印技术有望解决非晶合金的成形难题。由于非晶合金具有与晶态材料完全不同的原子结构, 激光 3D 打印中的缺陷产生与抑制、组织结构演变及力学性能等诸多科学问题尚不清晰。基于上述背景, 本研究选择高强度、但具有本征脆性的 Fe_{43.7}Co_{7.3}Cr_{14.7}Mo_{12.6}C_{15.5}B_{4.3}Y_{1.9} (at.%, 断裂韧性 2.2 MPa m^{1/2}) 非晶合金作为研究对象, 进行了不同工艺参数下的激光 3D 打印。。研究发现: 样品中存在大量微裂纹且难以采用工艺调控的方式消除。为了探索这种微裂纹产生的微观机制并提出有效的抑制办法。本研究采用了有限元模拟的方法, 发现在 SLM 成形过程中, 缺陷(如孔洞)周围的应力集中高达 4.1GPa, 高于 Fe 基非晶合金的断裂强度, 从而诱发了微裂纹。为了抑制微裂纹的产生, 我们选择了 Cu 及 CuNi 合金作为第二相。扫描电子显微镜(SEM)分析表明, 混合 20%质量分数的 Cu 的打印样品出现微裂纹, 但在混合 50%质量分数的 Cu 和 CuNi 粉末后裂纹完全消除。DTA 结果表明 SLM 成形的合金仍然具有高的非晶含量。为了进一步探索第二相抑制微裂纹的机理, 本研究采用透射电子显微镜(TEM)对非晶基体与 Cu 的界面结合处进行了分析, 结果发现在第二相 Cu 的晶粒中存在高密度位错, 这表明在激光 3D 打印中, Cu 通过塑性变形释放了大量热应力, 避免了微裂纹的产生。随后对所制备的样品进行了力学测试, 发现其断裂韧性高达 47 MPa m^{1/2}, 相比纯 Fe 基非晶合金提高了近 20 倍。这对促进非晶合金的工程应用具有重要意义。

D03-149

CuZr/Cu 非晶/晶体纳米复合材料构型转变诱导锯齿流变行为的高通量 计算与实验研究

王毅, 甘斌, 林德焯

西北工业大学

最新研究表明金属非晶/晶体纳米复合材料在保持较高强度同时具有优异的塑性。然而，其塑形变形的物理机制和结构转变仍是亟待解决的一个关键科学问题。本项工作通过集成高通量的计算与实验研究，旨在阐明 CuZr/Cu 非晶/晶体纳米复合材料形变过程的结构-性能关系。一方面，通过从头计算分子动力学计算，构建 CuZr 非晶的稳态构型，其径向分布函数与文献报道的扩展 X 光吸收精细谱的结果相吻合，并为经典分子动力学计算提供初始构型依据。另一方面，分子动力学模拟的压缩变形结果表明该材料的锯齿流变行为主要由构型转变诱导，其中包括纳米 Cu 在形变过程中生成的 HCP 类型的层错结构和孪晶结构，Cu 晶界处的 BCC 型有序化转变，以及 CuZr 非晶中的无序-有序结构转变。利用键合电子密度和高分辨透射电镜技术进一步详细表征了 CuZr/Cu 非晶/晶体纳米复合材料中的微观组态，软区与团簇区，剪切变形区等局部区域的典型特征。因此，本工作从电子和原子角度揭示了 CuZr/Cu 非晶/晶体纳米复合材料形变过程的塑形变形的物理机制和结构转变特征，为探索新型自初化非晶/晶体纳米复合材料提供依据。

D03-150

Design of novel L12 precipitate strengthened high-entropy alloys based on the Al-Co-Cr-Fe-Nb-Ni

antonov stoichko, Detrois Martin, Tin Sammy

State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing

A series of non-equiatomic high-entropy alloys based on the Al-Co-Cr-Fe-Nb-Ni, with varying levels of Ni, Co, Nb, and Fe were investigated in an effort to study the phase stability of the system and design alloys with microstructures similar to conventional Ni-base superalloys. Initially, complex microstructures were obtained following exposure at 900°C, where precipitation of Laves, NiAl, γ' and δ phases was observed. Lowering the content of the Fe, Nb or Co prevented the formation of undesirable phases and resulted in finer γ' precipitates while lowering the Co content alone resulted in a higher number and density of the γ' precipitates. These results were compared to thermodynamic predictions using Thermo-Calc. The TCNi8 database was accurate with respect to phase composition while TTNi8 provided good phase stability results. Varying the aging treatment allowed for control of the size and distribution of the strengthening phase that formed during cooling. Results from the microstructural characterization and mechanical property assessments of the γ/γ' two-phase high-entropy alloys will be presented and discussed.

D03-151

铸态及退火态 Co_{0.2}Cr_xFe_{0.7-x}Ni_{0.1} 和 Co_{0.2}Cr_yFe_{0.1}Ni_{0.7-y} 合金的显微组织和硬度

吴长军, 孙娅, 苏旭平

江苏省材料表面科学与技术重点实验室, 常州大学材料科学与工程学院, 江苏常州

本文研究了铸态、800 和 1000°C 退火 30 天 Co_{0.2}Cr_xFe_{0.7-x}Ni_{0.1} (x=0.1–0.6) 和 Co_{0.2}Cr_yFe_{0.1}Ni_{0.7-y} (y=0.1–0.5) 合金的显微组织和硬度。铸态下 Co_{0.2}Cr_xFe_{0.7-x}Ni_{0.1} 合金随着 Cr 含量增多, 合金由 BCC→FCC→FCC+BCC→FCC+ σ →BCC+ σ 相转变。Co_{0.2}Cr_{0.2}Fe_{0.5}Ni_{0.1} 合金经过 800°C 退火 30 天后, 从 FCC 相中析出了 σ 相, 而 1000°C 退火后, 合金仍为 FCC 单相。而合金经过 800 和 1000°C 退火后, Co_{0.2}Cr_{0.3}Fe_{0.4}Ni_{0.1} 合金的 (Fe, Cr)-BCC 相转变成 FeCr- σ 相, 且随着 Cr 含量的增加, σ 相变多; 当 Cr 含量为 40 at.% 时, 合金由 FCC+ σ 转变成 FCC+BCC+ σ 三相共存。Co_{0.2}Cr_{0.6}Fe_{0.1}Ni_{0.1} 合金退火后 BCC 相消失, 此时合金为 σ 单相。而铸态下 Co_{0.2}Cr_yFe_{0.1}Ni_{0.7-y} 系合金除 Cr 含量为 50 at.% 外, 其他合金均为 FCC 单相, 经过 1000°C 退火 30 天后合金的相组成没有发生变化。800°C 退火后, 除了 Co_{0.2}Cr_{0.4}Fe_{0.1}Ni_{0.3} 合金的 FCC 相中析出了 σ 相之外, 其他合金的相组成没有发生变化。当铸态 Co_{0.2}Cr_xFe_{0.7-x}Ni_{0.1} 系合金由 BCC 相转变成 FCC 相时, 合金的硬度值由 324.4 HV 下降到 198.7 HV, 而当 σ 相出现, 即 Cr 含量为 40 at.% 时, 合金的硬度值由 185 HV 增加到 429.6 HV, 并且随着 σ 相变多, 合金的硬度值逐渐变大, 最大值为 908.6 HV。800 和 1000°C 退火后 Co_{0.2}Cr_xFe_{0.7-x}Ni_{0.1} 合金的最大值分别为 1098.1 HV 和 922.9 HV。当 Co_{0.2}Cr_yFe_{0.1}Ni_{0.7-y} 系合金 Cr 含量小于 50 at.% 时, 合金为 FCC 单相, 因此合金的硬度值从 127.6 HV 缓慢增加到 229.4 HV。当 Cr 含量为 50 at.% 时, 合金中出现 σ 相, 此时合金硬度值迅速增加到 458.7 HV。且退火后 σ 相变多, 800°C 退火后, 该点合金的硬度值为 563.7 HV, 而 1000°C 退火后由于晶粒变粗, 合金的硬度值出现两极分化, 分别为 279.4 HV 和 595.1 HV。这些结果将对 Co-Cr-Fe-Ni 系多组元合金的设计有重要的作用。

D03-152

超强高塑性富 Laves 相中熵共晶纳米复合材料

丁肇夷, 赫全峰, 王庆

香港城市大学 机械与生物医疗系

传统 Laves 相以及富 Laves 相合金往往在室温表现出脆性, 人们把这样的脆性归因于其低的断裂韧性。然而, 在本工作中, 我们设计了一种 FeCoNiNb0.5 中熵纳米复合材料, 它拥有超过 50%体积分数的立方 Laves 相却有着超高强度以及优异塑性的完美结合。这样突出的机械性能来源于高强度的 Laves 相和软的 FCC 通过半共格界面结合而成的纳米尺度层片状结构。在室温压缩当中, 当层片状尺寸小于一个临界值, 这种复合材料展现了强且持续的加工硬化行为, 导致了超过了 20% 的断裂应变和 3.5GPa 的断裂强度。随后, 我们通过微柱压缩实验和理论模型的建立探索了这种在富 Laves 相的合金中异常的加工硬化机制, 揭示了一种从位错滑移到孪晶转变的尺寸效应。当前的工作揭示: 通过精心的合金成分选择, 我们可以获得高性能的双相共晶纳米结构。这样的合金设计思路对未来的结构材料设计提供了前景。

D03-153

原位 TiB 晶须增强双尺度钛合金的组织性能研究

陈涛, 杨超

华南理工大学

改进钛合金制备工艺与精准控制微观组织(相种类、尺寸、分布与形态), 一直被视为是两大最行之有效的改善钛合金强韧性的途径。研究表明, 通过改进生产工艺从而获得不同尺度晶粒共存的双尺度或多尺度结构可有效改进钛合金的强韧性。有鉴于此, 以 TiNbCuNiAl/Sn 合金体系为研究对象, 采用机械合金化+半固态烧结方法设计开发新型双尺度结构钛合金, 旨在进一步改善钛合金高强度与韧性的结合。采用机械合金化工艺球磨 85h 制备 Ti68.8Nb13.6Cu5.1Ni6(AI/Sn)6.5 非晶粉末, 利用 DSC 与高温原位 XRD 分析 Ti68.8Nb13.6Cu5.1Ni6Al6.5 与 Ti68.8Nb13.6Cu5.1Ni6Sn6.5 非晶粉末的半固态烧结区间起始温度。将两种非晶终态粉末在不同温度进行半固态烧结, 研究力学性能及显微组织发现, 在两种粉末的半固态起始温度下进行烧结制备的块体合金, 均呈现出双相(β -Ti+MTi2)等轴晶包围双尺度(微米等轴晶 β -Ti+超细晶长条状 MTi2)结构, 且均具有优异的强韧性。此时, Ti68.8Nb13.6Cu5.1Ni6Al6.5 块体合金屈服强度、断裂强度和断裂应变分别为 1173MPa、2409MPa 和 40.8%, Ti68.8Nb13.6Cu5.1Ni6Sn6.5 块体合金分别为 1346MPa、2567MPa 和 38.1%。最后, 选择强韧性优异的 Ti68.8Nb13.6Cu5.1Ni6Al6.5 合金为研究对象, 添加微量的 B 元素得到 Ti68.3Nb13.6Cu5.1Ni6Al6.5B0.5 和 Ti67.8Nb13.6Cu5.1Ni6Al6.5B1 两种合金成分, 旨在探索原位 TiB 晶须对双尺度结构钛合金组织与性能的影响。研究表明, B 的加入促进了合金体系的非晶形成能力。对比烧结块体组织及力学性能发现, 在半固态起始温度进行烧结, 微观组织的双相等轴区和双尺度区均原位析出 TiB 晶须或 TiB 晶须团簇, 由于 TiB 晶须的增强作用, Ti68.3Nb13.6Cu5.1Ni6Al6.5B0.5 块体的屈服强度、断裂强度和塑性分别为 1297MPa、2529MPa 和 36.5%, 与不含 B 元素合金相比, 虽然塑性有所减小, 但强度有明显提升, 说明此合金获得较优的综合力学性能。总之, 利用机械合金化+半固态烧结工艺, 改变烧结温度从而精确控制微观组织进一步改善钛合金的综合性能, 对实现结构钛合金高强韧化目标有重要意义。

D03-154

具有连续可控枝晶相成分的 Ti 基内生枝晶相非晶复合材料的设计与性能研究

刘丁铭, 朱正旺, 李正坤

东北大学材料科学与工程学院

本文提出了一种新的 Ti 基内生枝晶相非晶复合材料的成分设计方法。通过这个方法制备了一系列具有优异特性的内生枝晶相非晶复合材料, 其名义成分为 Ti50.32Zr33.92-0.6xCu4.56Ni2.12Be9.08Mo0.6x(x=0, 0.5, 1, 2, 4, 6, 10, 记作 M0-M10)。在这一系列复合材料中, Mo 元素几乎全部固溶在枝晶相中, 枝晶相的成分被连续精确的调控, 同时枝晶相的体积分数和尺寸以及非晶基体的成分几乎保持不变, 从而在内生枝晶相非晶复合材料领域首次实现了单一因素调控。实现这一特性的关键因素有两个, 第一是运用了“分离设计”的思想, 即直接调控枝晶相的成分, 而不是复合材料的整体成分; 第二是选取了具有两相平衡特性的非晶合金复合材料体系以及特殊的调控元素 Mo。研究结果表明, 枝晶相的成分对复合材料的结构, 力学性能以及变形机制起到了决定性影响。随着枝晶相中 Mo 元素的单调增加, 枝晶相中 β 稳定元素的含量逐

渐增加，复合材料的结构与性能呈现了规律性的变化。根据复合材料枝晶相稳定性与变形机制的不同，这一系列复合材料可以被分为两大类：相变型和非相变型。对于 M0-M2 相变型复合材料，枝晶相中 β 稳定元素的含量较低，枝晶相 ($\beta+\omega$ 两相) 处于亚稳态，加载过程中亚稳态的 β 相发生应力诱发马氏体相变，并且相变生成的 α' 相在随后的变形过程中出现形变孪晶，这些都导致这一类复合材料具有强烈的加工硬化作用。并且，随着枝晶相中 β 稳定元素含量的连续变化，相变行为也被连续调控，从而导致复合材料具有不同的屈服强度和加工硬化率；对于 M4-M10 非相变型复合材料，枝晶相中的 β 稳定元素较高，枝晶相 (单一 β 相) 处于稳定态，加载过程中枝晶相主要通过位错滑移变形，这一类复合材料的屈服强度更高，变形能力更好，但是加工硬化能力弱，甚至在拉伸过程中出现明显的加工软化。这些结果对于理解内生枝晶相非晶复合材料的变形，设计具有优化的综合力学性能的非晶复合材料具有普适性的指导意义。

墙展

D03-P01

基于激光熔化沉积与铸造技术制备 CrMnFeCoNi 高熵合金的组织与力学性能对比研究

李晋锋，向硕

中国工程物理研究院材料研究所

采用激光熔化沉积和铸造方法分别制备出 CrMnFeCoNi 高熵合金。通过 XRD 衍射、金相腐蚀、SEM 和力学拉伸等测试手段对不同方法制备的 CrMnFeCoNi 高熵合金进行金相结构、微观组织及力学性能的研究。研究表明：通过激光熔化沉积与铸造方法制备的 CrMnFeCoNi 高熵合金均由单一的 FCC 固溶体相构成；通过改变激光沉积功率工艺的方法可调控 CrMnFeCoNi 高熵合金中柱状晶与等轴晶的比例；相对于铸造的 CrMnFeCoNi 高熵合金来说，激光熔化沉积制备的 CrMnFeCoNi 高熵合金中元素分布更加均匀，具有更为优异的塑性变形能力。

D03-P02

低成本高玻璃形成能力的超强块体非晶合金的研制及性能评估

吴扬，李然，张涛

北京航空航天大学 材料科学与工程学院

块体非晶合金是一类具有高强度、高硬度和大弹性极限的无序金属材料，其优异的力学性能是目前先进金属材料领域研究热点之一，如何提高材料的强度是材料研究领域永恒的主题。非晶合金具有特殊的短程有序、长程无序的结构特点，赋予该类材料很好的力学性能。在众多的非晶合金组分之中，Co 基块体非晶合金凭借其超高的强度、比强度、弹性模量和硬度，达到了目前块体金属材料强度的极限值 (6 GPa)。但已报道的 Co 基块体非晶合金形成能力通常都不高 (一般小于 2 mm)，通常也不具有压缩塑性，且含有大量价格较贵的 B 元素，从而严重限制了其作为高性能结构材料的广泛应用。本研究基于相似相异元素共存的非晶合金组元设计方法，通过合金组元和成分设计调节，从 Co-Ta-B 三元块体非晶合金出发，利用低成本相似元素替换的手段，采用铜模铸造的快速凝固技术，获得一系列预期合金组分。测定不同组分样品的结构、热学性能、压缩力学性能、并对其失效样品的断口形貌进行观察，测定了该系列材料的硬度及弹性模量，优化了合金的玻璃形成能力及力学性能，并探讨了合金组分、力学性能、弹性性能之间的关系。研究表明，采用成本较低的相似元素如 Si、Al 等替换 B，可以适当提高 Co 基块体非晶合金的玻璃形成能力，并有效调节合金的强度、硬度、模量、压缩塑性等力学性能，从而为该类超强块体非晶合金的工业化应用奠定了科学研究基础。

D03-P03

高熵非晶合金 Zr40Hf10Ti4Y1Al10Cu25N7Co2Fe1 玻璃化转变和晶化动力学

王思博，龚攀

华中科技大学材料科学与工程学院

我们利用差热扫描法和 X 射线衍射研究了具有高混合熵的 Zr40Hf10Ti4Y1Al10Cu25N7Co2Fe1 块体非晶合金 (BMG) 的玻璃化转变和晶化动力学。连续 DSC 曲线显示出了在较低的加热速率下结晶的五个阶段 (20 k/min)。用 Moynihan 和

Kissinger 公式计算了玻璃化转变的激活能，同时利用 Kissinger、Ozawa 和 Boswell 模型计算了晶化的激活能。发现了与每个结晶阶段相对应的结晶相。还对 Zr₄₀Hf₁₀Ti₄Y₁Al₁₀Cu₂₅Ni₇Co₂Fe₁ 的动力学脆性进行了评估。基于等温 DSC 曲线，还对 Johnson-Mehl-Avrami 方程得到的 Avrami 指数进行了详细的分析。研究表明，Zr₄₀Hf₁₀Ti₄Y₁Al₁₀Cu₂₅Ni₇Co₂Fe₁ 非晶合金的结晶行为既表现出高熵 BMG 的特征，又具有单一主元素的传统非晶合金，具有较高的玻璃形成能力。本文研究了 Zr₄₀Hf₁₀Ti₄Y₁Al₁₀Cu₂₅Ni₇Co₂Fe₁ 非晶合金的玻璃化转变和晶化动力学，主要结论如下：（1）连续 DSC 结果表明，特征温度随加热速率的增加而升高，利用 Lasocka 方程研究了 T_g 与升温速率关系，根据 Moynihan 和 Kissinger 公式，玻璃化转变的激活能分别为 494±59 KJ/mol 和 483±59 KJ/mol。（2）Zr₄₀Hf₁₀Ti₄Y₁Al₁₀Cu₂₅Ni₇Co₂Fe₁ 非晶合金在较低加热速率下的晶化分为 5 个阶段，对于所有的加热速度第一和第二结晶峰均有所重叠，用 Kissinger 方程估计第一和第二峰的表现活化能分别为 275±15 KJ/mol 和 274±9 KJ/mol，Ozawa 和 Boswell 公式得到了相似的结果。（3）在非等温结晶过程中，τ₅ 相首先析出，然后形成 τ₃ 相和 BCC 相，当退火温度提高到 T_{p4} 以上时，最终形成稳定的结晶相 Zr₂Cu。（4）用 Angell 方程计算出的脆性参数 m 为 36.6，表明所研究的非晶合金可归为中等形成能力的非晶合金。（5）在等温条件下，此非晶合金的结晶过程由两个步骤组成，第一步由形核率降低的扩散控制的三维生长控制，而第二步由形核率增加的三维生长控制，并且发现在第一个晶化阶段中由高熵效应作为主导，而等温晶化的第二阶段结晶机理与传统的锆基非晶合金类似。

D03-P04

类金属元素对 FeCBSiPCu 非晶合金纳米晶化行为及软磁性能作用机理的研究

吕志超，李宏祥，雷智锋

北京科技大学

铁基非晶合金的软磁性能与其 α-Fe 纳米晶化行为密切相关。该工作利用 DSC、TEM 及 VSM 等手段系统地研究了类金属 C、B、Si 和 P 元素对典型的 Fe-Cu-(CBSiP)非晶合金热稳定性、纳米晶化行为和软磁性能的作用机理。研究表明，对于 α-Fe 型初生相的铁基非晶合金，类金属元素的添加能够有效提高合金的晶化温度 TX₁，从而提高非晶合金的热稳定性。然而，随着不同类金属元素含量的增加，第二个晶化峰位置变化规律则表现出不同的趋势。C 和 B 元素对 TX₂ 无显著影响，Si 含量的增加使第二个晶化峰逐渐向高温区移动，P 元素的添加使第二个晶化峰向低温区移动，从而使热处理窗口 (TX₂-TX₁) 急剧减小。此外，由于类金属的 p 层电子与 Fe 原子的 3d 电子产生强烈的交互作用，因此类金属元素的添加会在不同程度上降低 Fe-Cu-(CBSiP)系非晶合金的饱和磁感应强度 BS。同时，类金属元素含量的增加能够显著提高合金的居里温度。该研究能够为具有大热处理窗口及优异综合性能的新型铁基非晶软磁材料的开发提供有效的指导，从而进一步推动铁基非晶软磁材料的工业应用。

D03-P05

微量元素添加对 FeSiNbCuB 系非晶纳米晶合金磁性能的影响研究

吕雷鹏，张涛

北京航空航天大学

Fe 基非晶纳米晶软磁合金因其具有优异的综合软磁性能，高饱和磁感应强度、高磁导率、低损耗、低成本等特性，大力促进了电子元器件向高频化、轻量化方向发展。为了扩大 Fe 基非晶纳米晶合金软磁材料的应用范围，开发高 Bs、低 Hc 同时兼具较强非晶形成能力的铁基非晶纳米晶合金材料具有重要意义。本实验在 FeSiNbCuB 合金成分基础上，微量添加 Zr、P 元素设计系列合金成分。采用真空非自耗电弧炉在氩气保护下熔炼制备合金铸锭，并利用单辊甩带法分别制取非晶合金条带，经过适当的热处理工艺得到非晶纳米晶的合金条带。实验采用 X 射线衍射仪(XRD)、差示扫描量热仪(DSC)和振动样品磁强计(VSM)等仪器对非晶态和晶化后的薄带的微观结构和磁性能进行了表征和测试。研究发现合金的磁性能随着 Zr 和 P 含量以及退火温度的变化而变化。我们发现当分别有 1 个 Zr 和 1 个 P 原子比的添加时，经过热处理后得到的非晶纳米晶合金的软磁性能得到一定的改善，磁饱和强度提高，分别达到了 1.32T、1.30T，矫顽力分别为 0.63A/m、0.48A/m，并且经过电镜的观察，我们得到经过热处理后的非晶纳米晶合金的平均晶粒在 15nm。

D03-P06

钛基非晶复合材料的锯齿流变行为研究

赵燕春, 孙浩, 蒋建龙
兰州理工大学

以钛基非晶复合材料为研究对象, 通过室温压缩以及纳米压痕实验, 结合其应力-应变曲线与微观组织结构, 分析研究该材料各阶段塑性变形锯齿流变行为, 结合其断后试样 SEM 与纳米压痕形貌, 建立出非晶/晶体与材料发生锯齿流变的关系, 分析其锯齿流变机制。该合金在室温压缩应力下表现出良好的综合力学性能, 其屈服强度为 1000MPa, 断裂强度为 2750MPa, 塑性变形 25%, 且在塑性阶段发生锯齿流变应及加工硬化现象。过渡区域为 B19' 单斜马氏体组织, 在压入深度为 0-100nm 范围内, 锯齿流变类型主要表现为 A; 压入深度为 100-200nm 时, 其锯齿流变类型主要表现为 A+B 型, 即压入前期锯齿类型表现为 A 型, 压入后期锯齿类型为 B 型; 当压入深度超过 200nm 时, 锯齿类型为主要表现为 B 型, 且随着压入深度的不断增加, 其 B 型锯齿相邻两锯齿间间隔变小。中心区域为立方结构的 B2 奥氏体组织, 0-20nm 范围内为 C 型锯齿, 30-60nm 范围内 C 型锯齿过渡为 A 型, 又有 A 型锯齿过渡为 B 型锯齿, 在压入深度大于 60nm 后, 锯齿类型主要表现为 B 型锯齿, 并且 B 型锯齿的锯齿也随压入深度的增加有所变化。在变形初期该复合材料的锯齿流变主要有非晶基体承担, 随着变形量的增加 Cu 原子与位错的钉扎作用, 位错的脱钉作用显著, 同时 TRIP 效应使得材料内部产生应力场与非晶剪切带产生应力场相互作用, 使得非晶基体剪切带增殖。在材料变形后期, TRIP 效应减弱且位错发生增殖, 溶质原子的扩散速度与可动位错的移动速度不一致, 锯齿较中期稀疏并最终发生断裂。

D03-P07

机械合金化-真空热压烧结制备高性能 CoCrFeNi (WC) 高熵合金涂层

徐娟, 王艳
济南大学

利用机械合金化法制备添加不同含量 WC (10 wt.%、30 wt.%) 的 CoCrFeNi 高熵合金粉末。采用真空热压烧结工艺在 Q235 钢基材表面制备添加不同含量 WC 的 CoCrFeNi 高熵合金涂层。通过 X 射线衍射仪、差示扫描量热仪、场发射扫描电子显微镜、维氏硬度计、摩擦磨损试验机和电化学工作站, 系统研究添加不同含量 WC 的 CoCrFeNi 高熵合金涂层微观组织、力学性能和耐蚀性。选取添加不同含量 WC (10 wt.%、30 wt.%) 并均匀混料的 CoCrFeNi 高熵合金粉末, 得到单一 FCC 固溶体相与 WC 相共存的混合组织。真空热压烧结制备的两种 WC 添加高熵合金涂层结构较为致密, 没有明显孔隙等缺陷存在, 且与基材间形成良好的冶金结合。通过测试可知, 涂层的烧结产物仍为单一 FCC 固溶体相与 WC 相共存组织。与高熵合金粉末相比, 涂层相结构没有明显变化, 混合粉末机械稳定性较好。显微硬度测试结果表明, 含 10 wt.%、30 wt.% WC 添加的涂层具有较高硬度, 分别为 475 HV、531 HV, 是基材显微硬度 (约 160 HV) 的 3 倍和 3.3 倍。在相同的干摩擦条件下, Q235 钢基材、含 10 wt.% 和 30 wt.% WC 的 CoCrFeNi 涂层分别维持在 0.87、0.37 和 0.36, 涂层摩擦系数显著低于基材, 耐磨性提高。在 3.5 wt.% NaCl 溶液中, 涂层比基材具有更优异的整体耐蚀性, 表现在较小的腐蚀电流 (i_{pass})、较大的腐蚀电位 (E_{corr}) 及较宽的钝化区间 (ΔE) 和较小的腐蚀速率 (r_{corr}), 其中, 含 10 wt.% WC 添加的涂层耐蚀性表现最优。

D03-P08

Fe₄₂Ni_{41.3}Si₈B₄P₄Cu_{0.7} 非晶条带退火过程中的 L10-FeNi 相晶化机理

郝梓焱, 汪姚岑, 曹崇德
西北工业大学

硬磁材料在机械、电子、航空航天等领域具有非常广泛的应用。稀土硬磁材料如 Sm-Co、Nd-Fe-B 等合金由于其优越的性能在当今市场中占有极大比例, 但是其对稀土元素的依赖严重不利于相关产业的长期可持续发展。有序相 L10 FeNi 作为一种不含稀土元素并且具有较高磁晶各向异性 ($\sim 1.3 \times 10^7 \text{ erg/cm}^3$) 和磁能积 ($\sim 42 \text{ MGOe}$) 的硬磁合金受到了广泛关注, 但由于其合成条件中对低温的要求与铁、镍原子极低的扩散能力使得 L10 FeNi 合金的有效合成一直没有较大进展。近年来有研究者报道通过对 Fe₄₂Ni_{41.3}Si₈B₄P₄Cu_{0.7} 非晶条带进行退火得到了含有一定量 L10 FeNi 并具有 700 Oe 以上矫顽力的带材, 为 L10 FeNi 硬磁材料的有效合成提供了一条重要的途径。尽管如此, 对铁镍基非晶带材退火合成 L10 FeNi 的研究仍显不足, 对晶化过程中的机理研究及各种合金元素所起到的作用乃至合金成分的设计改良方针仍然缺乏系统的认识。本研究通过对 Fe₄₂Ni_{41.3}Si₈B₄P₄Cu_{0.7} 非晶条带进行退火工艺设计, 研究了该非晶体系中 L10 FeNi 的成相机理并通过改进

退火工艺（400 °C，6 天）成功将退火后带材的矫顽力提升至 861 Oe。晶化机理研究表明，Fe₄₂Ni_{41.3}Si₈B₄P₄Cu_{0.7} 非晶合金在升温过程中会发生两个阶段的晶化，其中第一阶段晶化主要析出的是 α -Fe，对 L10 FeNi 的合成并无贡献，L10 FeNi 的形成主要发生在第二阶段残余非晶完全晶化的过程中。而由 Cu 添加引起的富铁相在第一晶化阶段析出会导致非晶母体中铁镍的含量比例失衡，反而不利于 L10 FeNi 的形成。此外，虽然从自由能来看 L10 FeNi 在 320 °C 以上将产生向不具备硬磁性能的 A1 FeNi 相转化的趋势，对此非晶条带样品在 400 °C 保温至 12 天发现其矫顽力达到 861 Oe 后并无明显下降，说明在这一温度下铁、镍原子的扩散迁移能力仍然有限，已经晶化的结构难以在有限的时间内发生相变反应。

D03-P09

铁基非晶合金的磁学，力学，热学大数据分析

张豪杰，王军强

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

最近的 20 多年时间里，铁基非晶合金快速发展，一大批优异性能的铁基软磁非晶合金被开发出来。非晶态物质中存在多体相互作用，使其物理、化学性质演化规律非常复杂。因此设计研发具有优异性能的铁基非晶合金具有极大挑战。近几年来，大数据的思想越来越深入人心，对生活的各个方面都具有重要影响。本报告将通过大数据分析的方法建立铁基非晶中磁性能参量，及其与力学、热学参量间的内禀关联性。指导铁基非晶合金的开发。

D03-P10

Al 基非晶合金去合金化制备锰氧化物超级电容器的研究

王新朝，张涛

北京航空航天大学

超级电容器是一种新型的能量存储与转化装置，根据存储机理可分为双电层超级电容器和赝电容超级电容器两大类。由于赝电容电极材料具有理论电容大、环境污染小、制备成本低等优势，是一种极具发展前景的超级电容材料。目前研究主要集中在更具商用前景的 MnO₂、NiO、Co₃O₄ 等金属氧化物。本实验选择了电势窗口较宽的锰氧化物材料作为研究对象。针对锰氧化物电导率较低和比表面积较小的两个问题，我们以 Al-Ni-Mn-Y 非晶合金为前驱体，采用去合金化法制备了超细纳米多孔 NiMn 合金，通过进一步 KMnO₄ 氧化处理，得到了以 Ni 为导电骨架，具有纳米多孔结构的高性能锰氧化物超级电容器材料。循环伏安、恒电流充放电测试表明，Ni、Mn 原子比例对材料的电化学性能有较大的影响，当 Ni: Mn 的摩尔比为 4:1 时，电极材料比电容可达 293F/g（2M Li₂SO₄ 电解液）。

D03-P11

金属玻璃 α 弛豫对成分的依赖性

曹亚茹，王军强

中国科学院宁波材料所

为了描述不同玻璃过冷液体的不同，Angell 提出了脆度的概念。原子间的混合焓显著影响金属玻璃 β 弛豫行为，而 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。且人们发现通过调控(La_{0.5}Ce_{0.5})₆₅Al₁₀Co_{25-x}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，并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。实验发现该体系的玻璃转变温度 (T_g) 随着 Cu 含量的增加而降低，而脆度 (m)先增后减，当 x=10 时，m=63.6 达到最大值，且脆度与平均混合焓之间存在单调关系，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。

D03-P12

高强度纳米结构双相高熵合金薄膜

操振华，蔡云鹏，孟祥康

南京大学

相比单相高熵合金材料，双相高熵合金具有更加优异的力学性能。我们采用直流磁控溅射技术交替沉积制备出不同单层厚度的 CoCrCuFeNi/Al 面心立方单相高熵合金薄膜，然后通过 550 °C 退火处理，Al 层扩散至 CoCrCuFeNi 层，使得部分面心立方相转变为体心立方相，从而获得同时具有面心与体心立方相的纳米多晶双相高熵合金。TEM 与 XRD 结果显示，退火后高熵合金的层状结构消失，平均晶粒尺寸大约为 40 nm；利用纳米压痕表征单相与双相高熵合金薄膜的力学性能，结果表明，随着单层厚度的增加，单相高熵合金硬度从 7.5 GPa 增加到 8.5 GPa，对于双相高熵合金，最高硬度可达 10.6 GPa，硬度提高大约 25%。分析表明，体心立方相强化、异质相界面强化以及固溶强化是导致硬度提高的内在强化机制。

D03-P13

高饱和磁化强度的新型 Fe-Si-B-P-Zr 非晶纳米晶合金的性能研究

吕旷，惠希东

北京科技大学

在现今的生活与生产中，软磁材料是一种极为重要、应用十分广泛的能源电子材料。铁基非晶合金作为一种新型节能环保型软磁材料，具有低矫顽力、高磁导率、高电阻率、低损耗、频率特性好等优良特性。如果利用铁基非晶及其纳米晶合金应用于电力变压器、电机和电子信息领域用，可促进器件向节能化、小型化、高效化和高稳定性方向发展，因而具有十分重要的经济价值和社会效益。然而，由于非晶形成能力的要求，通常需要添加较高比例的非磁性非晶形成元素，导致合金的饱和磁化强度降低。因此，开发高饱和磁化强度的非晶纳米晶合金，成为近年来的研究热点，迫切需要开发兼具高饱和磁化强度、优异软磁性能和大非晶形成能力的新型铁基非晶和纳米晶软磁合金。最近，本课题组围绕这些问题，开发出了一种既具有高饱和磁化强度又具有较好的非晶形成能力的 Fe-Si-B-P-Zr 非晶纳米晶合金，我们将铁含量提高至 80%（原子分数）以上，同时在传统 Fe-Si-B 体系的基础上加入 P、Zr 这两类促进非晶形成能力的元素，得到了 Fe₈₀B₁₃Si₃P₃Zr₁ 和 Fe₈₁B₁₃Si₂P₃Zr₁ 这两组非晶合金，他们的临界尺寸分别为 40 μ m 和 35 μ m，饱和磁化强度分别达到 1.68T 和 1.66T。

D03-P14

高强高韧高熵合金的成分设计与制备

郭容，柳林

华中科技大学材料科学与工程学院、材料成形与模具技术国家重点实验室

本文采用电弧熔炼和铜模吸铸法制备了 AlCoCrFeTi_{0.5}Ni_x (x=0.5, 1, 1.5, 2) 系高熵合金，利用 X-射线衍射仪、光学显微镜、扫描电镜、EDS 等分析测试手段对铸态高熵合金的相结构、形貌和成分进行表征。利用万能力学试验机对铸态高熵合金的压缩性能进行测试。结果表明：该高熵合金的组织结构与 Ni 含量密切相关。当 x \leq 1 时，高熵合金由 bcc 相固溶体 (bcc₁+bcc₂ 结构) 组成，当 x \geq 1.5 时，合金的显微组织逐渐变为由 bcc+fcc 相 (bcc₁+bcc₂+fcc 结构) 固溶体组成，转变过程中伴有共晶组织和调幅组织产生，并且在合金中发现了明显的元素偏析，枝晶区富含 Al 和 Ni，枝晶间区域富集 Cr 和 Fe。力学性质测试表明：Ni 含量同样对力学性能带来影响，随 Ni 含量的增加，合金的屈服强度逐渐减小，而合金的塑性逐渐增加，其中 AlCoCrFeTi_{0.5}Ni₂ 的屈服强度、断裂强度和塑性应变分别达到 1.66GPa、2.29GPa 和 9%。表现出良好的工程应用潜力。

D03-P15

选区激光熔化 3D 打印 Zr 基非晶合金过程中缺陷演变及其形成机理

邢伟，陈祯，欧阳迪

华中科技大学

激光 3D 打印非晶合金过程中，熔池的凝固行为对最终成形的非晶构件的结构和性能具有至关重要的影响。但激光 3D 打印包含粉末高温熔化及随后熔池快速冷却两个过程，难以进行实验观察。本工作建立了选区激光熔化 (SLM) 过程三维瞬态有限元模型，采用流体体积法 (Volume of Fluid, VOF)，实现了对激光束与非晶合金粉末交互作用过程中三维自由表面进行动态追踪，准确获得了激光 3D 打印过程中熔池的凝固行为，结果表明：在低能量密度下，由于粉末部分熔化、球形形成了不连续的扫描轨迹；随能量密度增加，粉末熔化更加完全，球形现象消失，出现了熔化道表面冶金开孔缺陷及

熔化层间产生空隙；而在高能量密度下，表面质量提高，仅存在少量气孔缺陷。不同工艺条件下对 Zr 基非晶合金粉末进行 SLM 成形，对成形件的凝固形貌及缺陷进行表征，结果与模拟结果相吻合。

D03-P16

Si 含量对 CrMnFeCoNiSix 高熵合金的微观组织和性能的影响

张超，张超

合肥工业大学

本论文通过 XRD、SEM、EDS、TEM、压缩性能测试和显微硬度测试，系统研究了 Si 含量对 CrMnFeCoNiSix 高熵合金的相结构变化、微观组织的形貌特征和力学性能。结果表明：随着 Si 含量的增加，fcc 相减少，bcc 相增多，合金由单一的 fcc 固溶体结构逐步转化为 fcc+bcc 结构共存。微观组织中 Cr、Fe 和 Co 主要存在于 fcc 相中，Ni、Si 偏析于 bcc 相中。Si 含量具有合金性能的作用。随着 Si 含量的增加，合金的屈服强度和显微硬度呈上升趋势，当 $x=0.7$ ，屈服强度和显微硬度都达到最大值，分别为 1004MPa 和 384HV。

D03-P17

Fe-Co-Ni-Cr-Mn 系高熵合金层错能的研究

刘少飞，吴渊，刘雄军

北京科技大学

层错能是材料塑性变形的一个重要参数，对于 FCC 系高熵合金，通过调控其层错能可以改变材料的变形机制，进而改变其塑性变形能力，提高强度和加工性能。本文利用透射电子显微镜通过测量扩展位错宽度计算了 NiCoCr, FeCoNiCr, FeCoNiCrMn, (FeCoNiCr)94Mn6, (FeCoNiCr)86Mn14 和 Fe20Co15Ni25Cr20Mn20 六种 Fe-Co-Ni-Cr-Mn 系高熵合金的层错能，发现该体系高熵合金的层错能与其组成元素尤其是 Ni 元素的层错能密切相关，增加低层错能组元的浓度可以有效降低合金的层错能。另外，相比层错能较高的合金，层错能较低的合金在变形尤其是低温变形过程中形成的变形孪晶更多而且厚度更细，因此呈现出更为优异的力学性能。本研究工作不仅有助于深入理解高熵合金的变形机制，而且为开发具有优异综合性能的新型高熵合金提供了一个有效的途径。

D03-P18

高熵合金反常应变率效应

曹堂清，薛云飞

北京理工大学

本文选取了典型的单相 FCC 结构 CoCrFeNi 高熵合金为主要研究对象，评价其在 $5 \times 10^{-5} \sim 6.5 \times 10^3 s^{-1}$ 宽应变率范围内的应变率相关力学性能，以揭示其变形机制。同时，以 GS2.5 高熵合金研究对象，探究了纳米沉淀相对高熵合金动态响应行为的影响。此外，以典型的单相 BCC 结构 HfNbZrTi 高熵合金和“BCC+B2”型纳米沉淀相强化 A2-3 高熵合金为研究对象，对 BCC 结构高熵合金的应变率响应行为进行分析研究。研究发现，CoCrFeNi 高熵合金动态加载时应变率敏感性的突变起源于其在高应变率区的变形主控机制为位错增殖，另外，该合金动态加载时更易于孪生，因而具有良好的抗剪切失稳变形能力。

D03-P19

Gd 基非晶合金复合丝材的磁热性能研究

冯静清，盛威，王军强

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

Gd 基非晶合金由于磁滞小、磁热效应大和磁制冷效率高而成为广泛研究的磁制冷工质。但是由于 Gd 基非晶合金的居里温度过低而不利于广泛应用。针对此问题，我们开发了一系列 GdAlM(M=Co, Ni)金属微丝，并研究了其磁热性能。随着 Gd 含量的增加，合金非晶基体中出现了晶化相，在 5T 外加磁场下，金属微丝的磁熵变出现了 2 个峰值，分别出现在 98K 处和 258K 处，磁熵变值分别为 $4.2 Jkg^{-1}K^{-1}$ 和 $5.2 Jkg^{-1}K^{-1}$ ，半峰宽为 250K，通过计算得到金属微丝的制冷能力可以达到 $890 Jkg^{-1}$ 。这种 Gd 基非晶合金复合丝材兼具晶体材料较高的磁熵变和非晶材料较宽的转变温区，是具有优良应用前景的磁制冷材料。

D03-P20

Ni 元素添加对 FeBSiNbP 块体非晶合金形成能力、软磁性能和力学性能的影响

周靖, 杨卫明, 孙宝安

东南大学材料科学与工程学院

本文系统研究了 Ni 元素添加对 Fe_{78-x}Ni_xB_{14.2}Si_{2.75}P_{2.75}Nb_{2.3} (x = 0, 7.8, 15.6, 23.4, 31.2 和 39 at%) 块体非晶合金的玻璃形成能力、软磁性能和力学性能的影响。利用差示扫描量热仪(DSC)对合金热学参数进行测量, 结果表明, 通过添加 Ni 元素, 合金体系的热稳定性得到提高, 玻璃转变温度 T_g 从 780 K 逐渐降低至 710 K, 过冷液相区宽度 ΔT_x (T_x-T_g) 从 30 K 上升至 45 K。Ni 元素原子分数为 39 % 时, 对应于 ΔT_x 为最大值时, 通过铜模浇铸法可获得临界直径为 2 mm 的非晶棒材。利用振动样品磁强计 (VSM) 和直流 B-H 仪对合金的磁学性能测量发现, 饱和磁感应强度随着 Ni 含量的增加从 1.39 T 降低至 0.88 T, 矫顽力从 1.7 A/m 降低至 0.7 A/m, 初始磁导率则从 17300 增大到 20800; 通过研究该体系的力学性能发现, 当 x = 39, 即合金成分为 Fe₃₉Ni₃₉B_{14.2}Si_{2.75}P_{2.75}Nb_{2.3} 时, 该合金的室温压缩塑性应变达到 7.8 %, 屈服强度、极限强度和断裂强度分别为 2860 MPa、3360 MPa 和 2535 MPa。扫描电镜 (SEM) 观察压缩变形后样品的表面形貌, 发现变形过程中形成了多重剪切带和剪切台阶; X 射线光电子能谱仪 (XPS) 对非晶合金表面附近的状态密度分析表明, Ni 元素的加入促进形成较多无方向的金属-金属键, 增加了非晶合金原子键合之间的柔顺性, 从而提升了合金的塑性。研究发现通过添加 Ni 元素可以制备出兼具大非晶形成能力、优异软磁性能和优良室温压缩塑性的 Fe 基块体非晶合金。

D03-P21

Ho 添加对 FeNbB 块体金属玻璃的过冷液相区间热稳定性的影响

胡风, 白旭东, 张根垒

东南大学材料科学与工程学院

Fe₇₁Nb₆B₂₃ 非晶合金力学性能优异, 具有 Fe 基非晶合金体系中最高的强度 (4850 MPa), 且室温塑性变形可达 1.6 %。然而, FeNbB 合金系过冷液相区间较窄, 最大临界直径只有 1.5 mm, 极大地限制了其广泛应用。本文通过在 FeNbB 非晶合金中微量添加重稀土元素 Ho, 开发出兼具大非晶形成能力和大过冷液相区间的 FeHoNbB 非晶合金。本文研究了微量添加稀土元素 Ho 对 FeNbB 金属玻璃的过冷液相区间热稳定性、非晶形成能力、磁学和力学性能的影响。采用差示扫描量热仪 (DSC) 分析其热学性能, 结果表明适量 Ho 元素掺入可提高合金的过冷液相区间的稳定性和玻璃形成能力, Fe₆₆Ho₅Nb₆B₂₃ 非晶合金的过冷液相区间达到 90 K, 临界直径达 3 mm。利用振动样品磁强计 (VSM) 和直流 B-H 仪以及微机控制电子万能力学试验机对合金的磁学性能及力学性能分析表明, 该合金系具有较为优异的软磁性能和室温力学性能, 其饱和磁感应强度为 0.45-1.09 T, 断裂强度和维氏硬度分别为 3.15-4.65 GPa 和 1090-1040 kg/mm²。此外, 变温压缩实验表明, Fe₆₆Ho₅Nb₆B₂₃ 金属玻璃在过冷液相区间展现了较好的热塑性变形能力。通过对样品进行退火和预加热处理发现, Ho-Nb 键之间的正混合焓和原子错配引起的合金结构微观尺度不均匀性, 可能是该合金系大非晶形成能力及大过冷液相区的一个重要起因。

D03-P22

时效处理对 CrMnFeNi₂Al_{0.25}Ti_x 高熵合金微观组织及性能的影响

林俐菁, 钟志宏, 鲜欣

合肥工业大学

高熵合金的微观结构稳定性以及力学性能, 影响着其在严峻条件下的应用。本文采用真空电弧熔炼法制备了铸态 CrMnFeNi₂Al_{0.25}Ti_x (X=0.1,0.2,0.3) 高熵合金, 研究了不同 Ti 元素含量及短期时效 (700°C, 12h 和 24h) 对合金组织和性能的影响。时效试样有 4 mm × 4 mm × 6 mm 的方块和 Φ3 mm × 6 mm 的圆柱两种规格, 分别用于时效后微观组织的观察和压缩性能的测试。铸态和时效态合金的晶体结构通过 XRD 进行分析, 微观组织、组成成分等则借助 SEM 和 TEM 观测和分析。机械性能主要测试了其压缩性能和硬度, 压缩后的样品借助 TEM 观测并分析其变形行为。实验结果表明, 铸态 CrMnFeNi₂Al_{0.25}Ti_{0.1} 合金为单一 FCC 结构, 足量 Ti 元素的添加, 促使了 FCC2 相 (Ni₃(Al,Ti)) 的生成, 并且随着 Ti 含量的增加, 其体积分数不断增加。Ni₃(Al,Ti) 相的析出强化作用, 使 CrMnFeNi₂Al_{0.25}Ti_x 高熵合金的室温压缩屈服强度明显增加, 由 Ti_{0.1} 时的 232.77 MPa 增加到了 Ti_{0.3} 时的 609.12 MPa, 显微硬度也由 186 Hv (Ti_{0.1}) 增加到了 340 Hv

(Ti_{0.3})。而当 Ti_x 合金在 700 °C 时效 12h 后, 由于合金微观组织的细化以及少量 NiAl (B2) 相的生成, 其压缩屈服强度有了显著提高, 分别高达 1.212 GPa, 1.456 GPa 和 1.993 GPa。合金时效 24h 后的组织及性能较 12h 变化不大。以上结果表明, 铸态高熵合金并非完全平衡态组织, 在一定温度和时间下时效处理后, 高熵合金的微观组织将更稳定, 并能极大地提高其力学性能。

D03-P23

Cu 元素添加对 FeCoBSiNb 块体金属玻璃形成能力、塑性变形和软磁性能的影响

侯龙, 王倩倩, 杨卫明

东南大学材料科学与工程学院

FeCoBSiNb 块体金属玻璃具有超高的断裂强度以及优异的软磁性能, 然而其室温压缩塑性几乎为零, 限制了进一步应用。本文通过微量添加 Cu 元素诱发非晶基体的结构不均匀性来调控 FeCoBSiNb 块体金属玻璃的塑性变形能力以及软磁性能。通过铜模铸造法制备了 (Fe_{0.5}Co_{0.5})_{72-x}B₂₀Si₄Nb₄Cu_x (x = 0, 0.3, 0.4, 0.7 和 1 at%) 块体金属玻璃, 采用 X 射线衍射 (XRD)、差示扫描量热仪 (DSC)、直流 B-H 仪、场发射扫描电镜 (SEM)、微机控制电子万能力学试验机 etc 系统地研究了微量掺杂 Cu 元素对金属玻璃形成能力、塑性变形以及软磁性能的影响。结果表明, Cu 元素的添加能明显地诱发初始晶化相从 (Fe,Co)₂₃B₆ 到 α -(Fe,Co) 相的转变, 0.3 % 的 Cu 元素添加时, 合金的热稳定性以及玻璃形成能力明显提高, 其临界直径可达 4 mm。尽管 Cu 元素的添加导致软磁性能略有降低, 但合金的室温塑性变形从 0.4 % 提高至 3.7 %, 其断裂强度保持在 4 GPa 以上。Cu 元素添加诱发了金属玻璃基体的结构不均匀性, 析出大量纳米级 α -(Fe,Co) 团簇, 为多重剪切带的形成提供了异质形核点, 并且有效阻碍剪切带的扩展, 诱发高密度、多样性的复杂多重剪切带的形成, 进而提高了合金的塑性变形能力。

D03-P24

一种新型可自持的具有高析氧催化活性的镍基催化剂

席果果, 张涛

北京航空航天大学

电解水产氢作为一种具有前景的制备及储存可再生能源的方法受到了各界的广泛关注。其中, 电解水催化剂是提高能源转换效率的关键。研究表明, 碱性电解水制氢所消耗的电能约 25% 浪费在克服电极过电位, 尤其是阳极析氧反应的过电位上, 因此研究具有高析氧催化活性的阳极材料, 解决析氧过电位过高的问题, 具有重要的科学意义。目前对析氧电极材料的研究主要集中于贵金属及其氧化物、过渡金属及其氧化物。RuO₂ 和 IrO₂ 是先进的析氧催化剂, 具有很低的析氧过电位。但由于这些催化剂价格昂贵, 很难在工业上进行大规模应用。其中, 过渡金属及其氧化物在碱性介质中表现出较高的析氧催化活性, 具有析氧过电位低、耐蚀性强、稳定性好、成本低廉等优点, 受到了广泛关注。鉴于此, 我们开发了一种具有自持性的镍基催化剂。该催化剂完美地实现催化剂载体电极一体化, 有效地提高了析氧催化活性。在 1M KOH 溶液中, 对应于 10 mA·cm⁻² 电流密度, 析氧过电位可达 310 mV, 且其 Tafel 斜率可低至 45 mV·dec⁻¹。此外, 在电流密度 10 mA cm⁻² 和 100 mA cm⁻² 的条件下, 高 OER 活性至少可以维持 24 h, 且没有明显的衰减。考虑到其优异的催化性能, 本文报道的镍基催化剂可以作为一种新型的高催化活性电极材料。

D03-P25

控制晶化法或选择性氧化法调控金属玻璃的电阻温度系数

刘斌斌, 韩潮雨, 王征远

北京科技大学

金属玻璃长程无序的结构特征导致其很多物理和化学性能与晶体之间存在明显的区别, 研究人员对金属玻璃潜在的工程应用进行了研究, 其中包括燃料电池、太阳能电池的电极、电化学中的纳米线等。金属玻璃电阻的一个典型特征就是其电阻温度系数可正可负, 因此本研究选取 Zr₅₇Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al₁₀Nb₅、Cu₆₆Zr₃₄ 两个金属玻璃体系, 分别通过过冷液相区控制晶化、选择性氧化的方式调控金属玻璃的电阻温度系数。Zr₅₇Cu_{15.4}Ni_{12.6}Al₁₀Nb₅ 金属玻璃具有负的电阻温度系数, 在过冷液相区 700K 等温退火过程中, 随着晶体相含量增加, 合金的电阻逐渐减小, 电阻温度系数也由负变正。在残余非晶基体相负电阻温度系数和晶体相正电阻温度系数的共同作用下, 当晶化体积分数达到 0.64454 时, 得到了电阻几乎不变

的金属玻璃复合材料，这说明通过控制晶体相含量调控金属玻璃的电阻温度系数是可行的。由于 Zr 和 Cu 与 O 亲和力的差别，Cu₆₆Zr₃₄ 金属玻璃薄带在氧化过程中 Zr 优先发生氧化，均匀的非晶相转变为 ZrO₂、Cu 及残余的非晶基体相。晶体相的含量从表面到芯部呈现梯度分布，导致不同厚度的氧化薄带具有不一样的电阻温度系数。在具有正电阻温度系数的 Cu 和负电阻温度系数的残余非晶基体及 ZrO₂ 的共同作用下，厚度为 20 μ m 的氧化薄带在 1.9K-300K 的温度范围内具有几乎恒定的电阻值(TCR \approx 0)，这说明通过选择性氧化导致相分离的方式也可以调控金属玻璃的电阻温度系数。控制晶化或选择性氧化获得的具有几乎恒定电阻值(TCR \approx 0)的金属玻璃复合材料为拓宽金属玻璃的应用领域提供一种新的思路。特别是选择性氧化导致的 Cu₆₆Zr₃₄ 金属玻璃的相分离在制备精密电阻器、薄膜电阻器及催化领域都具有一定的应用前景。

D03-P26

激光 3D 打印内生第二相增韧的锆基非晶基复合材料及其力学性能研究

张鹏程，欧阳迪，邢伟

华中科技大学

选区激光熔化(SLM)3D 打印技术为制备复杂形状的块体非晶合金提供了一种全新的方法，但在 3D 打印过程中，复杂的热历史会导致 3D 打印非晶合金的脆化。为解决这一问题，在本工作中，我们选择有韧性第二相颗粒原位析出的 Zr 基体系制备非晶粉末进行 3D 打印实验。借助 XRD、DSC、XRT、SEM、TEM 和力学性能试验机系统研究了 3D 打印样品的结构和性能。结果表明：3D 打印样品中的非晶含量高于 90%，致密度达到 99.75%，断裂强度可达 1.9GPa，塑性应变为 2%。缺口三点弯曲实验表明，3D 打印非晶合金的断裂韧性 K_q 值达到 60MPa·m^{1/2}，略低于铸态样品（K_q= 73 MPa·m^{1/2}），这是目前报道的 3D 打印非晶合金的最大值。研究发现，韧性第二相颗粒的存在是提高 3D 打印非晶基复合材料性能的重要原因。韧性颗粒一方面阻碍了剪切带快速扩展，另一方面促进了次级剪切带的增殖，最终导致了断裂韧性的提高。此工作为激光 3D 打印高强高韧非晶合金及其构件提供了一个新思路。

D03-P27

构建 CeNi 二元合金 EAM 势

雷亚威，张博，孙晓锐

合肥工业大学材料学院&非晶态物质科学研究所

基于实验和第一原理数据，构造了一种新型的 CeNi 二元合金原子嵌入势（EAM）。该原子嵌入势能够准确地描述合金、液体以及非晶结构的平衡晶格常数、结合能、优化空位形成能量以及间隙原子能、Ce1Ni1 声子能谱、弹性常数和径向分布函数。在此基础上，研究了深共晶液体成分 Ce₈₀Ni₂₀ 的玻璃形成能力和动态特性。Ce₈₀Ni₂₀ 金属玻璃模拟结果与相关实验数据吻合良好，比如 Ni 的玻璃化转变温度和自扩散常数。

D03-P28

难熔高熵合金 ZrTiHfNb_{0.5}X_{0.5}(Mo, Ta)显微结构与动态力学性能研究

徐子祁，程兴旺，陈义文

北京市海淀区北京理工大学

难熔高熵合金在动态加载条件下少有研究，但其高强度、低蠕变性能且具有一定的塑性，使得在动态加载条件下具有一定的应有价值。本文通过热力学理论及固体分子经验电子理论设计了 ZrTiHfNb_{0.5}X_{0.5} (Mo, Ta) 难熔高熵合金，并且对其制备和表征。实验结果表明，两种合金均为单相 BCC 结构，室温压缩变形量超过 40%。加载速率 6816 S⁻¹ 条件下，ZrTiHfNb_{0.5}Mo_{0.5} 的屈服强度为 2971MPa，变形量超过 75%，在动态加载条件下具有良好的应用。研究表明，难熔高熵合金优异的抗高温性能能够有效减弱绝热剪切带对动态力学性能的影响，且强塑性较为匹配的高熵合金由于具有协调变形能力，动态力学性能得到较大的提升。

D03-P29

基于原位实时观测研究偏置电流对巨磁阻抗效应非晶微丝表面环向磁畴结构及性能影响

姜思达，沈红先，尹航博策

哈尔滨工业大学材料科学与工程学院

提高 Co 基巨磁阻抗效应(Giant Magnetio-impedance, GMI)非晶微丝高频阻抗性能, 在实际高灵敏度传感器设计应用中具有重要现实意义。在低频区(< 10 MHz)施加适当偏置电流, 可有效提高非晶微丝巨磁阻抗性能, 但其高频(10-1000 MHz)磁畴转动机制尚缺乏深入系统研究。本课题组最新研究表明, 巨磁阻抗效应的提高与其表面磁畴结构有密切联系。理解在偏置电流作用下非晶微丝表面磁畴结构的实时变化, 是调控获得高性能 GMI 式磁电传感器的关键因素之一。本文详细阐述, 基于熔体抽拉 $\text{Co}_{69.25}\text{Fe}_{4.25}\text{Si}_{13}\text{B}_{11.5}\text{Zr}_2$ ($\sim 52 \pm 2$ mm)巨磁阻抗效应非晶微丝通以 140mA 偏置电流时, 磁力显微原位观测实施方案。激励电流频率为 200 MHz, 周期性往复运动单点激励外场为 2.5 Oe, 小于非晶微丝等效各项异性场 4 Oe, 在偏置电流作用 9min 后, 巨磁阻抗效应比值可达 $\sim 1000\%$, 此数值约为同等电流退火处理后阻抗比值的 3 倍。阻抗性能的明显改善, 来源于实施监测发现的表面环向磁畴结构在偏置电流作用下的演变。这是首次, 监测表面磁畴结构演变的同时结合阻抗性能的研究, 其提供了一种新型的调控微丝性能应用于高灵敏度传感器的新型研究方法。

D03-P30

Al 基非晶合金点蚀行为的研究

李丽颖, 李然, 张涛

北京航空航天大学 材料科学与工程学院

Al 基非晶合金具有高强度、低密度、高热稳定性、良好的力学性能、优异的耐腐蚀性等特点, 在海洋舰艇结构材料方面具有广泛的应用前景。但大量研究结果显示, Al 基非晶合金在含有氯离子的溶液中表现出易产生局部腐蚀的倾向。这种局部腐蚀通常以点蚀形式出现, 形成微米尺寸的点蚀坑, 它们往往会成为疲劳裂纹的源头, 导致非晶合金发生断裂失效。本研究制备了 Al-Ni-Y 系高玻璃形成能力的非晶合金, 以 3.5%wt.NaCl 溶液为电解液, 采用动电位阳极极化扫描技术对 Al 基非晶合金的点蚀行为进行研究。通过恒电流腐蚀技术对其进行表面处理, 对腐蚀之后的试样, 采用 Rigaku D/max 2500 型 X 射线衍射仪 (XRD) 对样品进行结构分析; 采用 JSM-7500F 场发射扫描电子显微镜 (SEM) 对其腐蚀形貌进行观察和分析; 采用其附带的 X-射线能谱仪 (EDX) 进行成分分析; 采用 JEOL JEM2100F 透射电子显微镜 (TEM) 对其微观结构进行观察分析。根据研究表明, Al 基非晶合金在经历塔菲尔 (Tafel) 区后表现出自发钝化现象, 具有较宽的钝化区间, 钝化区的钝化电流密度较低, 随后腐蚀电流密度发生突变, 表明其发生了点蚀。

D03-P31

Sm-Co-B 系非晶合金的形成、结晶化组织及磁性能

赖磊强, 暴丰, 李艳辉

大连理工大学材料科学与工程学院

SmCo 系化合物因其大磁晶各向异性和高居里温度等本征特性, 作为高性能永磁材料已应用于高温领域。但和 Nd-Fe-B 系合金相比, 有关 Sm-Co 系新型永磁材料的研究较少。溶体快淬法是探索制备新型永磁材料的有效方法之一, 通过溶体快淬使合金形成非晶态, 经热处理结晶化可获得含有永磁相的均匀、微细的组织结构, 而得到良好永磁性能。Sm-Co 合金非晶形成能力较低, 快淬条带的晶粒粗大, 难以获得高永磁性能。本工作拟通过添加合金元素 B 以提高 Sm-Co 合金的非晶形成能力, 利用溶体快淬法制备出 Sm-Co-B 系非晶合金, 并系统调查了该系合金的热稳定性、结晶化组织及磁性能。结果表明, 快淬 Sm-Co-B 合金可在 2.5-15 at. % Sm, 50-82.5 at. % Co, 15-35 at. % B 的宽成分范围形成了非晶态。该系合金具有较高的热稳定性, 其结晶化温度在 836 K 以上。Sm-Co-B 非晶合金呈软磁性, 经适当热处理后可形成了微细的含永磁相的复相组织结构, 而显示出强永磁性。其中 $\text{Co}_{65}\text{Sm}_{10}\text{B}_{25}$ 合金在 1000 K 经 600 s 热处理后形成了由 SmCo_3 、 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 和 $\text{SmCo}_{12}\text{B}_6$ 组成的复相组织, 其矫顽力达 810 kA/m。此外, 我们还对非晶合金成分、热处理结晶化组织结构及其磁性能的关系进行了研讨。

D03-P32

高 Zn 元素轻质高强铝合金的制备与性能

鲍晓通, 张涛

北京航空航天大学

高强度铝合金是广泛应用于航空航天、交通运输和其他工业部门的重要结构材料之一, 具有强度高、密度小以及优良的综合性能。Zn 元素是高强度铝合金中的重要元素, 可显著提高铝合金的强度, 同时具有优良的断裂韧性和抗应力腐蚀性

能。传统铸造技术得到的铝合金，Zn含量的最大值在8 wt%左右，本实验采用喷射成形技术，合金Zn含量最高可达30.77 wt%。本实验设计成分为Al_{185-x}Si₁₃Zn_xCu₂ (x=6-16)合金，并使用快速凝固设备制备了圆柱棒试样和板状试样。观察合金微观结构主要由面心立方结构的AlSi相、AlZn相等组成；合金试样屈服强度由425MPa，提高到770MPa；断裂强度由1110MPa提高到1620MPa，并且具有高达4%的弹性形变和30%的塑性形变；维氏硬度由160Hv提高到250Hv；弯曲断裂强度由780MPa提高到940MPa。Zn元素的添加，对合金的微观结构和综合性能具有明显影响。

D03-P33

非调制比“非晶/晶体”纳米多层膜的本征尺寸效应

黄平，王飞

西安交通大学金属材料强度国家重点实验室

金属玻璃具有高强度、高硬度、良好的耐蚀性等优点，但其几乎为零的断裂延伸率极大的限制了非晶材料的工程应用。在变形过程中，通过主剪切带的形成和扩展，非晶材料表现出瞬间脆断的断裂方式。若可以抑制剪切带的形成和扩展，将有助于非晶材料塑性的提高。在相关的研究中，通过制备非等调制比的晶体-非晶多层膜可以有效的抑制非晶中剪切带的形成和扩展。这种剪切带的抑制作用与添加的晶体层的厚度密切相关，表现出了明显的尺寸效应。在以往的研究中，通常选择两种方法来研究这种尺寸效应，即固定调制波长，改变调制比，或固定晶体或非晶层的厚度，改变另一层的厚度。在这两种研究方法中，晶体或非晶层的体积分数都会随着层厚的改变而改变，此时难以辨别体积分数和层厚对系统性能的变化具体影响，因为在多层膜中，韧性层体积分数的增大，本身就可能使系统的韧性增加，此时不能判断尺寸效应对韧性增强的贡献。本课题通过制备体积分数相同，但层数不同的CuTa/Cu多层膜，系统的研究了CuTa/Cu多层膜的本征尺寸效应，此外通过改变Cu层的体积分数，研究了Cu层厚度相同但体积分数不同时的多层膜的力学性能。之后，通过改变CuTa合金层的微观结构，研究了界面结构不同时，体系的本征尺寸效应。结果表明，非等调制比多层膜的力学性能需要由调制比和层厚两个因素来共同决定，当调制比不同时，即使加入的Cu层厚度相同，也会体现出完全不同的形变机制。此外，当界面结构发生改变时，Cu层厚度相同时，也将体现出不同的形变机制。因此，在非等调制比的晶体/非晶多层膜中，其力学性能将由调制比，添加层厚度和界面结构三者共同决定。

D03-P34

放电离子烧结制备CuZrAl颗粒增强铝基复合材料的微观结构和性能研究

牛作哲，张岚翔，王艳

济南大学材料学院

在目前的工作中，我们通过机械合金化的方法制备了CuZrAl非晶合金颗粒，利用放电等离子烧结制备了不同体积分数的CuZrAl非晶合金增强的铝基复合材料，复合材料具有较高的致密度。研究了复合材料的微观结构、机械性能和海水耐蚀性。烧结后的复合材料由FCC-Al、Al₃Zr和CuAl₂相组成。CuZrAl颗粒以亮白色和网络状析出在纯Al基体中。由于Al和Cu原子在基体和增强体之间的相互扩散，烧结后的复合材料具有良好的界面结合。与放电等离子烧结制备的纯Al块体相比，复合材料具有优异的力学性能。力学性能的提升主要是因为第二相强化、析出物连续分布、高致密度、良好的界面结合和细晶强化。其中，20 vol.%的CuZrAl增强铝基复合材料在具有一定塑性变形的同时还表现出最佳的显微硬度(290 HV)、高的屈服强度(408 Mpa)和断裂强度(459 MPa)。此外，复合材料在海水溶液中具有较好的耐点蚀性和较宽的钝化区。

D03-P35

Fe基非晶合金复合吸波材料的制备和性能研究

石娜丽，张涛

北京航空航天大学

随着通信技术和雷达系统向微波频率的快速发展，更需要高频下具有质量轻、厚度薄、吸收频带宽、吸收能力强的吸波材料。Fe基非晶较高的电阻率、合金长程无序短程有序的原子排列使其具有优异的软磁性能和电性能，高的磁导率，高的饱和磁化强度，低的矫顽力，Fe基非晶不存在晶界，缺陷，成分均匀，因此具有非常优异的耐蚀性能。此外，非晶粉

末具有长程无序的原子结构，这不仅有利于减少涡流损耗，而且可以扩大 GHz 频率应用的趋肤深度。这也是非晶态合金复介电常数低很容易达到良好的阻抗匹配的原因。因此，Fe 基非晶复合材料有望成为一种很有前景的吸波材料应用。本文采用球磨法制备了片状石墨/FePCBCu 非晶合金复合材料，通过 XRD, SEM, TEM 等表征了样品的形貌和结构；采用 VSM、矢量网络分析仪测试了样品的磁性能及合金电磁参数；通过反射损耗计算公式得到样品在不同厚度时的吸波性能。通过对石墨添加比例、材料形貌、结构、异质界面、磁电耦合效应对吸波性能的影响的研究发现，当石墨添加比例为 8%，球磨时间为 8h 时，所制备的 FePCBCu/石墨复合材料展现出优异的吸波性能：匹配厚度为 2.57mm 时，材料的最大反射损耗为-72.98 dB，匹配厚度为 2.25mm 时，材料的最大反射损耗为-68.87dB，有效吸收波段（ $RL < -10$ dB）达到 6.64 GHz。

D03-P36

激光表面熔化制备非晶合金表层

毕甲紫，李然，张涛

北京航空航天大学

非晶合金具有原子排列长程无序短程有序的结构特征，具有特殊的力学性能、物理化学性能以及与晶态合金不同的应用领域和范围。快速凝固技术是制备非晶合金应用最广泛的技术。利用激光的高能束对材料表面进行快速加热，并利用基体材料的热传导进行急冷，可以获得很高的加热、冷却速率。采用激光表面熔化作为处理手段，对合金表面进行快速熔化、快速凝固处理，在不同基体和成分中制备了非晶合金表层。研究了合金的非晶形成能力、表面状态、激光处理参数对表面非晶层形成的影响。合金的非晶形成能力、熔点、晶态成分的均匀性均是表面非晶层形成的影响因素。合金的非晶形成能力越高，表面非晶层形成的可调参数范围越大。激光处理的加载电压、脉冲宽度与频率、扫描速度和保护气氛对表面非晶层的形成同样具有重要影响。加载电压越高、脉冲宽度越大，合金的表面区域熔化越充分；扫描速度越快，合金表面熔融区的冷却速度越快，多种条件匹配可以获得形成表面非晶层的参数范围。采用有限元法模拟了激光处理过程中合金表层及一定深度处温度的分布，并对处理后的合金表层重熔区域—热影响区进行了观察。进一步，采用激光表面熔化技术，可以对大量的不同体系、不同成分的合金进行处理，并检测其表面结构，从而快速的筛选可能的非晶合金成分。激光表面熔化技术在开发非晶合金成分、寻找大玻璃形成能力区域上，具有可期的良好应用。

D03-P37

超声辅助去合金化制备纳米多孔镍粉末

左磊，张涛

北京航空航天大学

由于在催化、传感、热交换、表面等离子体共振等多领域存在广阔的应用前景，纳米多孔金属受到了广泛关注。而去合金化方法是一种简单、有效地制备纳米多孔金属的方法。它通过选择性腐蚀去掉合金中的活性组元，未被腐蚀的惰性组元会自发形成纳米多孔结构。目前，已通过去合金化方法制备了多种纳米多孔金属，如金，银，铂，钯等。但由于这些贵金属价格昂贵，其工业化应用受到了很大限制。因此，制备价格低廉的纳米多孔过渡族金属，如铜和镍，受到了越来越多的关注。相比于铜，通过去合金化方法制备纳米多孔镍更加困难。这是因为镍在化学性质上更加活泼，而这会导致在腐蚀去除其他活性组元时镍本身也会被腐蚀掉，从而难以形成纳米多孔结构。目前采用的前驱体和腐蚀液体系并不能制备出兼具高比表面积、结构均匀和高纯度的纳米多孔镍，寻找新型前驱体和对应的腐蚀液具有重要意义。非晶合金，又称金属玻璃，具有原子尺度的均匀性，并且不存在晶界、位错等缺陷，是理想的去合金化前驱体。为了防止镍的溶解，还需选择合适的腐蚀液。基于上述分析，我们选择 Mg-Ni-La 非晶合金为前驱体， $(NH_4)_2SO_4$ 溶液为腐蚀液，利用去合金化过程中的体积收缩现象，并在超声的作用下成功制备出纳米多孔镍粉末。纳米多孔镍粉末兼具高比表面积、结构均匀和高纯度三特性，且具有优异的析氢催化性能。

D03-P38

高强韧钛合金钎焊接头用 Ti-Zr-Cu-Co-Al 系非晶/纳米晶钎料的形成与性能

白雪垠，逢淑杰，刘敏茜

北京航空航天大学

钛合金广泛应用于航空航天等领域，其钎焊连接多采用钛基钎料，但现有钛基钎料中含有较多的降熔元素 Cu 和 Ni，钎焊过程中易与 Ti 反应形成脆性金属间化合物，导致接头存在较大脆性。因此，设计并研究钛合金高强韧连接用新型钛基钎料从而改善接头力学性能对于提高钛合金钎焊构件的安全可靠性具有重要意义。本工作设计制备了低 Cu 含量的 Ti-Zr-Cu-Co-Al 非晶/纳米晶合金，研究了其形成机理和热性能。由于该系合金具有较高的非晶形成能力，采用熔体旋淬技术可将其制备为厚度达 45 μ m 的柔韧薄带，作为钎料可以方便地预置于各种形状的焊缝中；虽然该系合金的 Cu 含量低，但其液相线温度较低，为 1150K~1175K，应用于钎焊 Ti-6Al-4V 合金时可以满足钎焊温度低于其 β 转变温度的要求。采用 Ti-Zr-Cu-Co-Al 非晶/纳米晶钎料在 1223K/900s 真空钎焊条件下所获得的 Ti-6Al-4V 合金接头形成了魏氏组织，由 α -Ti、 β -Ti 和少量的 CoTi₂ 构成。采用该系钛基非晶/纳米晶钎料显著减少了 Ti-6Al-4V 合金接头中脆性金属间化合物的含量，从而使接头拉伸剪切强度和冲击韧性值分别达 546 \pm 30MPa 和 3.60 \pm 0.45J/cm²，明显高于采用常规钛基钎料所获得的钎焊接头的力学性能。本工作还对钎焊过程中的元素扩散行为及连接机理进行了研究。

D03-P39

高频高磁感 FeSiBNbCu 纳米晶合金的工艺性和磁性能研究

肖恢芸, 王安定, 贺爱娜

中科院磁性材料与器件重点实验室, 浙江省磁性材料及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

Finemet (Fe_{73.5}Si_{13.5}B₉Nb₃Cu₁) 系列铁基纳米晶合金具有矫顽力低, 磁导率高和损耗低等优异的软磁性能, 是当前综合性能最优的软磁材料, 当前广泛应用于高频变压器、滤波器、电抗器和共模电感等领域。随着电子产品向高频化和小型化发展, 铁芯对于饱和磁感和工作频率的要求日趋提高, 由于此合金的 Fe 含量低, 其饱和磁感应强度 (B_s) 仅为 1.24T, 亟需开发一种同时兼具高 B_s 、高磁导率、高频低损耗和工艺性良好的新型铁基纳米晶合金。之前, 课题组报道了一种用高纯原料开发的性能优异的 Fe₇₆Si₁₃B₈Nb₂Cu₁ 纳米晶合金【1】, 该合金的饱和磁感应强度大幅度提升, 而且热处理温度窗口宽, 软磁性能非常优异。为了进一步探讨其应用前景, 研发规模化生产技术, 本文采用工业等级原料研究了该合金系的工艺性和磁性能。通过单辊快淬法成功制备了宽度分别为 20 和 55 mm 的纳米晶合金带材, 利用 XRD, DSC, VSM, DC B-H 仪、阻抗分析仪和 TEM 等测试分析手段, 研究了工业原材料对合金热稳定性、晶化行为和磁性能的影响。结果表明, 工业原料制备的宽带表面质量和韧性均非常优异, 表明该合金具有良好的非晶形成能力和工艺性。工业和高纯原料制备样品的 DSC 曲线基本相同, 表明杂质对该合金的热物性影响可以忽略不计。在最佳条件(温度, 时间)热处理后, 样品的 B_s 达到 1.39 T, 矫顽力低至 3.5 A/m, 1 kHz 下磁导率可达 28000, 与高纯原料制备样品的磁性能相当, 说明该合金对杂质具有较高的容忍性。同时, 样品具有良好的频率特性, 在 100kHz 时其磁导率仍达到 17000, 这可归因于其具有均匀细小的微观结构(14 nm)。总之, 该合金软磁性能优异, 且具有优异的工艺性, 满足制备宽带要求, 在高频电力电子领域具有良好的应用前景。

D03-P40

磁场热处理改善高 Fe 含量非晶合金的软磁性能的机理研究

李虎, 王安定, 贺爱娜

新疆大学物理科学与技术学院, 乌鲁木齐 830046

铁基非晶合金是一种新型的绿色节能软磁材料, 具有高饱和磁感应强度 (B_s) 和高磁导率、低矫顽力和低损耗等优异的软磁性能, 广泛应用于电力电子器件等领域。为了满足器件的小型化和轻量化发展需求, 课题开发了高饱和磁感应强度的 FeSiBPC 系高 Fe 含量非晶合金, (B_s) 可达 1.65T。然而, 该合金系存在磁导率 (μ_e) 低和矫顽力高 ($H_c > 4$ A/m) 等缺点。最近, 相关研究表明纵向磁场热处理可改善 FeSiBPC 系非晶合金的软磁性能。但是, 其微观磁畴结构与软磁性能之间的关联性还需要进一步深入的研究。因此, 研究磁场热处理改善高 Fe 含量非晶合金的软磁性能的机理具有重要的意义。本工作中, 我们系统研究了纵向磁场热处理对高铁含量 Fe(82.6-85.7)Si(2-4.9)B(9.2-11.2)P(1.5-2.7)C0.8 非晶合金软磁性能和微观结构的影响。XRD 结果表明, 磁场热处理样品仍具有完全非晶结构。通过克尔显微镜观察发现, 淬态合金的磁畴均呈现出紊乱无序的状态, 经最佳磁场热处理后, 其磁畴结构演变为清晰的条纹畴, 且垂直于磁场方向。磁性能测试结果表明磁场热处理能够有效地改善非晶合金的软磁性能。 H_c 低至 0.8A/m, μ_e 可达 1.1×10^4 , 0.7 T 和 $f = 50$ Hz 条件下的损耗低至

0.052 W/kg。与常规热处理相比，磁场热处理条件下的 H_c 降低了 20 % 以上，这主要归因于在外加磁场以及温度场的共同作用下，原子磁矩方向的改变对畴壁的移动和偏转具有很大的促进作用，合金的微观结构变得更加均匀，从而提高了合金的软磁性能。

D03-P41

非晶合金振动加载热塑性成形机理

李足, 彭思旭, 李宁

华中科技大学材料科学与工程学院、材料成形与模具技术国家重点实验室

非晶合金在过冷液态区的超塑性成形特点，以及在微纳尺度具有较宏尺度更优异的力学性能，使其在微纳制造领域具有重要应用前景。但在微纳尺度，高粘度和材料—模具表面间的界面作用严重影响其成形能力。我们前期研究 (Acta Materialia, 65, 2014, 400-411) 表明，振动加载可有效提高其成形能力。然而，这一现象的物理本质及普适性至今尚不清晰。本研究分别选择具有不同脆度的 Pd40Cu30Ni10P20、Zr35Ti30Be26.75Cu8.25 及 La55Al25Cu10Ni5Co5 三种非晶合金，采用动态力学分析仪(DMA)进行不同频率下的单向拉伸测试，并采用液氮冷却保留其瞬态结构。随后通过单悬臂实验测量不同加载频率下材料的结构弛豫。结果表明：三种非晶合金的塑性应变均随加载频率增加而增大。但随着加载频率的增加，三种非晶合金的 $\tan\delta$ 峰值下降，峰位向低温偏移。据此进行理论计算，发现随着振动频率增加，材料粘度降低。进一步分析发现，归一化 $\tan\delta$ 的半峰宽随频率增加逐渐宽化，表明振动加载诱发了材料内部结构的均匀性。本研究不仅深入揭示了非晶合金振动加载成形机理，也为促进非晶合金的超声振动塑性成形机理提供了理论指导。

D03-P42

微量 Nb 元素对 Ti 基非晶合金在 W 基片上润湿行为和界面特征的影响

陈森, 李正坤, 付华萌

东北大学

W 纤维/非晶合金复合材料在军事国防领域具有重要意义，然而在制备复合材料的过程中，非晶合金与 W 纤维的润湿性和界面反应对其力学性能有极其重要的影响。本文选取 Ti32.8Zr30.2Ni5.3Cu9Be22.7 (记为 ZT3) 非晶合金作为基体，研究了(ZT3)100-xNbx (x=0,1,3,5)合金与 W 基片之间的润湿行为和界面特征。XRD 和 DSC 结果表明，Nb 元素的加入使 ZT3 合金的玻璃形成能力略微降低。通过座滴法研究了 1000°C 保温 30min 时合金在 W 基片上的润湿行为，润湿包含快速减小阶段和润湿平衡阶段，平衡阶段约在 800°C 时开始，并且 x=0,1,3,5 时平衡润湿角基本一致，均在 17~21° 范围内。润湿结果表明，添加 Nb 元素后，合金熔体与 W 基片仍然保持良好的润湿性和较快的铺展速率。对不同温度下 (T=700°C,800°C,900°C,1000°C) 保温 30min 后的界面特征进行观察，结果表明在溶解和反应温度下，随 Nb 元素含量增加，W 颗粒溶解和界面反应逐渐减弱；x=3 时，合金熔体中的 W-Zr 相颗粒已基本消失，界面反应得到很好的抑制。本研究为 W 纤维/Ti 基非晶合金复合材料的制备提供了重要参考和理论指导。

D03-P43

多元 NiCrWFeTi 合金激光选区熔化成形工艺，组织和性能研究

王博文, 杨喜岗, 陈祯

西安交通大学机械工程学院

本文设计并制备了一种新型多元 Ni5Cr4WFe9Ti 预合金球形粉末，采用激光选区熔化的方法，通过 Rosenthal 模型确定基本的工艺参数，利用正交试验方法获得优化工艺参数范围，成功制备了 Ni5Cr4WFe9Ti 合金试样。研究了不同工艺参数 (激光功率 P, 扫描速度 v, 扫描间距 H) 对成形件组织和性能的影响。通过 XRD, SEM, DSC 和静力学拉伸试验方法对试样性能进行表征，结果表明，试样具有单相 FCC 结构，具有良好的热稳定性，熔点为 1433.2°C，一直到 1226.8°C 未发生相变，相比于铸件，其抗拉强度和塑性分别提高 34% 和 61%，为 1002MPa 和 15.3%，为增材制造多元合金构件提供了新思路。

D03-P44

电脉冲对 ZrCuAlHf 非晶合金结构和性能的影响

张宝庆, 刘高鹏, 曹国华
河南理工大学

大块非晶合金 (BMG) 由于优越的物理和化学性能得到人们的广泛关注, 然而室温脆性对非晶合金的应用有着极大的限制。传统金属处理工艺繁琐且高消耗, 因此节能环保、高效低成本、精准可控的电脉冲处理工艺一开发出来便受到广泛的应用。本文通过铜模吸铸法制备了直径为 5mm 的(Zr47Cu44Al9)Hf2 非晶合金棒, 采用 X 射线衍射仪 (XRD)、差示扫描量热分析仪 (DSC) 和万能力学试验机研究了电脉冲 (电压和时间) 对其相组成、热稳定性和力学性能的影响。结果表明: 相比于铸态合金, 电脉冲处理后(Zr47Cu44Al9)Hf2 非晶合金塑性随着处理时间和电压的增加先增大后减小; 恒定处理时间和电流的情况下, T_g 玻璃转变温度和 T_x 都向低温度方向移动, 并且过冷液相区变小。然后固定电压, 改变电脉冲处理时间后, T_g 向高温度方向移动, T_x 没有明显变化, 过冷液相区减小; 电处理促使非晶合金发生晶化, 并且随着处理时间和电压的增加其晶化程度逐渐增大。

D03-P45

Cr 元素对 AlCrFeCoNi 系高熵合金的微观结构及腐蚀行为的影响

郭慧, 逢淑杰
北航

AlxCrFeCoNi 系高熵合金具有高强度、高韧性等优异的综合力学性能, 具有良好的应用前景。该系高熵合金中易钝化元素 Cr 的存在有助于合金表面保护性氧化膜的形成, 但是其成分偏析通常会导致贫 Cr 区的出现, 使合金易发生局部腐蚀。为了进一步提高 AlxCrFeCoNi 系高熵合金的耐腐蚀性能, 揭示其腐蚀行为与成分、微观结构的相关性, 本工作系统研究了 Cr 元素对该系合金的微观结构和腐蚀行为的影响。对一系列具有不同 Cr 含量的该系高熵合金的微观结构进行的研究结果表明, 当 Cr 含量较低时, 合金为单一的 FCC 固溶体结构; 随着 Cr 含量的逐渐增加, 合金由 FCC 结构逐渐转变为 FCC 与 BCC 的混合结构, 说明 Cr 元素可以促进 BCC 结构的形成。动电位极化实验结果表明, 该系高熵合金在 3.5wt.% 的 NaCl 溶液中均发生自发钝化; Cr 含量较低的合金发生点蚀现象, 点蚀电位随 Cr 含量的增加而提高, Cr 含量为 31 at.% 以上的合金未发生点蚀。随着 Cr 含量的增加, 合金的自腐蚀电位提高, 自腐蚀电流密度明显降低。上述研究表明, Cr 含量的提高可以有效改善该系高熵合金的耐腐蚀性能, 且合金中 BCC 结构的出现未对该系高熵合金的耐腐蚀性能产生显著影响, 说明成分是影响该系高熵合金耐腐蚀性能的主导因素。在此基础上, 采用交流阻抗谱 (EIS) 和 X 射线光电子能谱 (XPS) 研究了 Cr 元素对 AlCrFeCoNi 高熵合金腐蚀行为的影响机理。

D03-P46

氩弧熔覆制备 FeCrNiCoAl 高熵合金涂层

鲍爱莲, 陈其光, 金鹏飞
常熟理工学院

高熵合金涂层以其优异的性能备受国内外学者的关注和研究。本文采用氩弧熔覆法制备了 FeCrNiCoAl 高熵合金及其涂层, 并与真空熔炼法制备的块体材料进行对比; 利用 X 射线衍射、扫描电镜分析了 FeCrNiCoAl 高熵合金及其涂层的相结构和显微组织; 采用显微硬度计、电化学工作站对比分析了该合金及其涂层的硬度和耐蚀性能。结果表明: 氩弧熔覆的 FeCrNiCoAl 涂层表面主要由 FCC 相和非晶结构组成, 涂层与基体呈冶金结合, 且结合良好; 熔炼制备的高熵合金主要由 BCC 相组成, 其组织为由中心向外生长的树枝晶; 合金涂层熔合区组织呈近似垂直于熔合线的树枝晶结构, 有明显方向性, 涂层中部主要是等轴晶。熔炼制备的 FeCrNiCoAl 高熵合金硬度为 433HV0.2, 其涂层硬度为 475 HV0.2, 涂层硬度略高于熔炼合金硬度; 在 3.5%NaCl 电化学溶液腐蚀中, 该合金及其涂层均表现出良好的耐蚀性能, 自腐蚀电位分别为 -0.127V、-0.119V, 涂层耐蚀性能略优于熔炼合金, 且均出现钝化现象。

D03-P47

高压对金属锆熔体在快速晶化过程的影响

莫云飞
长沙学院 电子信息与电气工程学院

类似于高温，高压同样能对金属熔体在凝固过程中的微观结构分布和演变、热力效应和动力学行为起到非常重要作用，甚至能改变凝固路径。只有充分了解在不同压力条件下的原子演变机制才能通过控制凝固条件来制备理想的金属材料。在本工作中，通过分子动力学模拟来探索高压条件对金属锆(Zr)熔体在快速晶化过程中的影响。在 0 压条件下凝固过程中只出现一个中间过渡阶段现象，而在高压条件下凝固会出现多个中间过渡阶段现象。本工作的开展能为研究高压下纯金属的凝固提供新的理解角度。

D03-P48

高熵硬质合金 CoCrTiMoxWy 的组织结构与力学性能研究

王炯

上海大学材料基因组工程研究院

本研究结合高熵合金设计理念与传统钨、钼硬质合金成分设计思路，以研究高熵硬质合金为目的，使用氩弧熔炼法制备具有不同 W/Mo 比例的 CoCrTiMoxWy 系列合金样品。通过维氏硬度仪测量硬度值，使用光镜和扫描电镜及 XRD 等表征测量手段分析合金中钨和钼成分变化对铸态下合金力学性能与组织结构的影响。研究发现在钼含量一定时合金硬度随着钨含量的增加而下降，但当钨含量一定时随着钼含量的增加合金硬度提高。我们采用机器学习的手段对合金成分与硬度关系进行了初步的建模预测，为高熵硬质合金的设计提供依据。

D03-P49

Chiral Metallic glass nanolattice structure with Negative Poisson's Ratio and Improved Mechanical Properties

Z. Chen

School of Physical Science and Technology, China University of Mining and Technology

Metallic glasses (MGs) possess many great physical and mechanical properties such as high strength and hardness, but catastrophic brittleness exhibited in most metallic glasses is one of the obstacles restricting their application.[1] Motivated by improving elastic deformation capability of MGs, a porous nanolattice structure has been designed with negative Poisson's ratio. This research suggested that MGs with specific chiral nanolattice structure can exhibit superior mechanical properties such as large ductility and elasticity. Moreover, mechanical properties are drastically affected by the structure and size of this porous nanolattice, such as length and thickness of ligaments. MD simulation of Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulation (LAMMPS) was used in this study. Cu50Zr50 MGs simulated was generated by conventional quenching method.[2] Several chiral nanolattice structure with different nanolattice parameters are constructed to study the changing of mechanical properties. The three-dimensional dimensions of the structures are $1071(L_x) \times 1200(L_y) \times 23(L_z) \text{ \AA}^3$, containing about 0.9 ~ 1.5 million atoms. Tensile loading was loaded along the y-axis at a strain rate of 10^{-8} at 50K. Improved ductility and higher strength are observed for the structures with thinner and longer ligaments or thinner ring nodes. It is shown that the deformation progress consists of two obviously different stages: elastic deformation stage and failure stage. Moreover, it is also revealed that the deformation mechanism is dominated by the rotation of nodes and extension of ligaments during elastic deformation while the main factor causing failure is due to large-scale deformation in joint between nodes and ligaments. Meanwhile, the rotation of nodes leads to the emergence of negative Poisson's ratio, accompanied with improved mechanical properties. This study introduces a potential solution to break the limitation of brittleness for MGs, and provides useful guidance to the design of MG structure with large elastic deformation capability.

D03-P50

异步轧制对 CoCrFeNiMn 高熵合金微观结构及力学性能的影响

梁山

长安大学

本文研究了异步轧制对 CoCrFeNiMn 高熵合金 (HEA) 的微观结构及力学性能的影响。我们发现利用一种使材料大变形的轧制工艺 (异步轧制) 可以使 CoCrFeNiMn 高熵合金的力学性能得到显著的提高。异步轧制后在热处理温度为 1073K

的屈服强度能够达到 700MPa，延伸率能够达到 50%。发现异步轧制对于 CoCrFeNiMn 高熵合金的强化机制主要归因于细晶强化和梯度结构。结果也证明了异步轧制所产生的细晶和梯度结构有利于提高 CoCrFeNiMn 高熵合金的力学性能。在异步轧制过程中轧件表面存在搓轧区并且具有很大的剪切应力，使得表面变形区引起剪切变形，起到细化晶粒的作用，形成很高的局部塑性变形，可以激发更多的滑移系滑移。然而轧件中间区域具有较小的剪切应力，塑性变形不严重，从而形成梯度结构。

D03-P51

强磁场下 AlCoCrFeNi 高熵合金凝固组织演变和性能研究

赵晨东

西北工业大学凝固技术国家重点实验室

强磁场，作为一种新型的材料加工方式，施加到材料处理过程中时可以调控合金的组织形态，改善材料的性能。本文通过在 AlCoCrFeNi 高熵合金凝固过程中施加强磁场，研究了磁场强度对合金凝固组织演化和性能的影响。通过观察显微组织发现 AlCoCrFeNi 高熵合金在无磁场下凝固时，平行于磁场方向的组织无规律性，而在 6T 磁场下合金的 BCC 相沿着磁场方向排列，磁场促进了取向性组织的形成。室温压缩的结果表明在平行于磁场方向，凝固时施加 6T 磁场相对于无磁场提高了 300MPa，塑性略微降低。本文中强磁场凝固的方法为调控高熵合金组织，改善其性能提供了一种新的思路。

D03-P52

Fe-Si-B-P-C 非晶合金熔体粘度及表面张力研究

李颖

安泰科技股份有限公司

分别采用振荡杯法和座滴法研究了 Fe-Si-B-P-C 合金体系熔体粘度及表面张力随温度的变化规律，确定了粘度的温度敏感性差异最大的两个合金成分。用平面流工艺制备了该两种合金的非晶薄带，分析了薄带的厚度和贴辊面表面质量随熔体温度的变化。结果表明，非晶薄带的厚度随熔体温度的升高而近似线性减小；对于熔体粘度对温度不敏感的合金来说，熔体温度变化对薄带厚度的影响也相对较小；薄带贴辊面的气坑尺寸和数量均随熔体温度的升高先减小（减少）后增大（增多）。最后，分别从粘度及表面张力对熔潭的影响角度对实验结果进行了分析。

D03-P53

Coupling of phase transformation and deformation in a TRIP-reinforced BMG composite

袁小园

北京科技大学

The coupling of metastable austenite crystal phase and amorphous matrix phase in a TRIP-reinforced amorphous composite is investigated via Digital Image Correlation (DIC). The major study are evolution and distribution of local strain between crystal phase and amorphous phase, the metastable austenite crystal phase carries more local shear strain than that of amorphous phase during the deformation of martensitic transformation, which relaxed the concentration in phase boundary and delayed the rapid extension of shear band. In the subsequent deformation progression, the mismatch in mechanical properties between martensitic phase after transformation and amorphous matrix brings out generation and evolution of shear band gradually.

D03-P54

Formation, structure and properties of biocompatible TiZrHfNbTa high-entropy alloys

杨译

北京科技大学

In this poster, we carefully investigated mechanical, surface and magnetic biocompatibility of TiZrHfNbTa high-entropy alloys (HEAs) in which all five constituents are non-toxic and allergy-free. Several novel HEAs with a low Young's modulus (57 GPa, almost half that of conventional biomedical titanium alloys), a good balance of high strength and ductility, and ultra-low magnetic

susceptibility ($1.71 \times 10^{-6} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$, similar to that of pure Zr) were successfully developed. Our analysis reveals that phase formation and Young's modulus are closely related to the valence electron concentration in the current HEA system. The low Young's modulus can be obtained by controlling the valence electron concentration around 4.18 and simultaneously maintaining the body-centered cubic (BCC) structure. The yield strength of the currently developed HEAs with single BCC or hexagonal-close-packed (HCP) structure can be well evaluated by treating these HEAs as pseudo-binary solid solutions, and the large modulus misfit was found to be mainly responsible for the high yield strength.

D03-P55

Rare-earth high-entropy alloys with giant magnetocaloric effect

王正奇

北京科技大学

In this poster, we report the development of rare-earth high-entropy alloys (RE-HEA) with multiple principle elements randomly distributed on a single hexagonal close-packed (HCP) lattice. Our work demonstrated that it is the entropy, rather than other atomic factors such as enthalpy, atomic size and electronegativity, that dictates phase formation in the current rare-earth alloy system. The high configuration entropy stabilized the crystalline structure from phase transformation during cooling, whereas a second-order magnetic phase transition occurred at its Neel temperature. The quinary RE-HEA exhibited a small magnetic hysteresis and the largest refrigerant capacity (about 627 J kg^{-1} at the 5T magnetic field) reported to date, along with respectable mechanical properties. Our analysis indicates that the strong chemical disorder resulted from the high configuration entropy makes magnetic ordering in the HEA difficult, thus giving rise to a sluggish magnetic phase transition and enhanced magnetocaloric effect. Our findings evidenced that RE-HEAs have great potential to be used as magnetic refrigerants and the alloy-design concept of HEAs can be employed to develop novel high-performance magnetocaloric materials.

D03-P56

无 Be 钛基块体非晶合金设计与制备研究

杨兴龙, 谷佳伦, 邵洋, 姚可夫

清华大学

目前, 非晶形成能力较大的钛基非晶均含有贵金属 Pd 或毒性元素 Be, 这会在一定程度上限制钛基块体非晶的应用。但已报道的无 Pd、无 Be 钛基合金的非晶形成能力都较小, 所以不断研发新的钛基非晶合金和提高其非晶形成能力具有重要意义。本研究设计并制备出了不同 Fe 含量的无铍 Ti 基块体非晶合金, 发现 $\text{Ti}_{42.7}\text{Zr}_{9.4}\text{Cu}_{34.4}\text{Ni}_{9.4}\text{Sn}_{3.1}\text{Fe}_1$ 、 $\text{Ti}_{42}\text{Zr}_{9.4}\text{Cu}_{35.6}\text{Ni}_{9.4}\text{Sn}_{3.1}\text{Fe}_{0.5}$ 非晶合金的临界尺寸达到 2.5mm, 屈服强度达 2GPa 以上, 且有一定宏观压缩塑性。并且, Fe 含量增加可显著提高该 Ti 基非晶合金点蚀电位。研究表明, 添加微量 Fe 元素, 可提高 TiZrCuNiSn 合金的非晶形成能力和改善其力学性能和耐腐蚀性能。

D03-P57

工业基铁基非晶涂层显微组织及腐蚀行为研究

王善林

南昌航空大学航空制造工程学院

以工业铁合金为原材料, 用超音速火焰喷涂技术 (HVOF) 制备了名义成分为 $\text{Fe}_{33.5}\text{Co}_8\text{Cr}_{20}\text{Mo}_{14.5}\text{Y}_{1.5}\text{C}_{14}\text{B}_{7.5}\text{Si}_{1.0}$ (at %) 的铁基非晶涂层。研究表明, 当煤油流量为 26L/h 时, 涂层中非晶含量高达 95%、孔隙率低于 1.5%。TEM 分析表明, 涂层中的片层结构之间形成了冶金结合界面, 界面结构呈非晶态, 但含氧量较高。在含 Cl⁻ 溶液中, 由于贫 Cr, 片层界面最先发生点蚀, 但非晶涂层的耐腐蚀性能远优于 SUS316 不锈钢。

D03-P58

微量 Mn 掺杂对 Fe-B-P-Si 合金非晶形成能力以及软磁性能的影响

邵鹏程, 李雪莲

山东大学(威海)

本文通过设计合金成分 $\text{Fe}_{83}\text{B}_{10}\text{P}_5\text{Si}_2\text{-xMnx}$, 研究了微量 Mn 替换 Si 对 Fe-B-P-Si 合金非晶形成能力以及软磁性能的影响。实验结果表明, 随着 Mn 含量的增加, $\text{Fe}_{83}\text{B}_{10}\text{P}_5\text{Si}_2\text{-xMnx}$ 合金的非晶形成能力表现出先增强后减弱的趋势。而且微量元素 Mn 的添加(小于 0.3at.%) 对合金 Bs 有提升作用, 在本实验中 0.1 at.% 的 Mn 掺杂对 Bs 有最佳的作用效果, 使合金 Bs 从 1.54T ($\text{Fe}_{83}\text{B}_{10}\text{P}_5\text{Si}_2$) 提升至 1.6T。该实验结果为使用低纯原料制备非晶合金时的杂质元素控制提供了参考。

D03-P59

Fe_{26.7}Co_{26.7}Ni_{26.7}Si_{8.9}B₁₁ 高熵合金韧脆转变的微观结构起源

张泽群, 宋凯凯, 王丽

山东大学(威海)机电与信息工程学院

通过快速凝固制备出了具有亚共晶结构的 $\text{Fe}_{26.7}\text{Co}_{26.7}\text{Ni}_{26.7}\text{Si}_{8.9}\text{B}_{11}$ 高熵合金先驱体, 后续对高熵合金在不同温度热处理, 研究了其微观结构的演变规律及所力学性能的变化规律。发现铸态样品结构是由初生 fcc 固溶枝晶分布在共晶基体中, 而共晶基体是由 fcc 固溶体, 四方 $(\text{Fe,Co})_2\text{B}$ 化合物和少量六方 $\text{Ni}_{31}\text{Si}_{12}$ 金属间化合物组成。对不同温度热处理后的样品分别进行淬火及炉冷处理后, 发现随着热处理温度的升高, 共晶组织逐渐分解为 fcc 晶体、 $(\text{Fe,Co})_2\text{B}$ 及少量六方 $\text{Ni}_{31}\text{Si}_{12}$ 金属间化合物, 这导致 fcc 相含量升高。与此同时, 主导的结构框架从共晶结构逐渐转变为 fcc 枝晶结构, 合金逐渐形成了具有强化颗粒效果的 $(\text{Fe,Co})_2\text{B}$ 晶体散乱地分布在 fcc 枝晶间区域的结构。这种从亚共晶结构逐渐转变为双相共存组织的微观结构变化导致高熵合金力学性能由脆至韧的转变。因此, 通过控制高熵合金微观结构的转变进而实现了对高熵合金强度和塑性的调控。

D03-P60

微米尺度相分离金属非晶合金的脆性起源: 基于动态弛豫和理论分析

薛其森, 宋凯凯, 王丽

山东大学(威海)机电与信息工程学院

研究证实金属非晶合金在 0.6~0.8T_g 温度范围内发生的明显的 β 弛豫行为与宏观拉伸塑性息息相关。我们研究结构发现尽管在具有微米尺度相分离特征的非晶合金 $(\text{ZrxLa}_{1-x})_{57}\text{Co}_{27}\text{Al}_{16}$ ($x = 0.2, 0.3, 0.4$) 在 α 弛豫之前呈现出明显的 β 弛豫现象, 但其在 0.7T_g 附近仍然表现出明显脆性特征。为了阐明其内在脆性产生的潜在机制, 我们首先研究了 $(\text{ZrxLa}_{1-x})_{57}\text{Co}_{27}\text{Al}_{16}$ ($x=0, 0.2, 0.3, 0.4$ 和 1) 的 β 弛豫行为与它们的力学性能, 发现金属玻璃 $\text{La}_{57}\text{Co}_{27}\text{Al}_{16}$ 和 $\text{Zr}_{57}\text{Co}_{27}\text{Al}_{16}$ 在出现明显的 β 弛豫峰和 β 弛豫尾的温度范围附近, 确实表现出明显的塑性特征。但是当这两种金属合金在不同的比例条件下制备出的相分离的非晶态 $(\text{ZrxLa}_{1-x})_{57}\text{Co}_{27}\text{Al}_{16}$ ($x=0, 0.2, 0.3$ 和 0.4) 存在富 La 区和富 Zr 区, 而此两中非晶相具有不同的玻璃化转变温度, 因此在动态弛豫测量过程中, 当温度在 0.7T_g 附近时, β 弛豫过程仅仅发生在富 La 区内(此时的 β 弛豫随着频率的变化行为可以用 cole-cole 模型描述, 并随着相分离程度的增加而变得更加明显), 而富 Zr 区的是不发生任何 β 弛豫特征, 即此时非晶基体中仅仅富 La 区域中的潜在结构单元或者流变单元被激活, 而不整个非晶基体, 导致具有微米尺度相分离特征的非晶合金发生脆性断裂。因此, 目前研究结果表明相分离相之间的成分差异性对于设计韧性相分离金属玻璃是非常重要的。

仅发表论文

D03-PO-01

元素 V 对多主元 AlCrFe₂Ni₂ 合金微观组织与力学性能的影响

董勇, 胡焱, 陈安伏

广东工业大学

本文通过真空电弧熔炼方法制备了 $\text{AlCrFe}_2\text{Ni}_2\text{V}_x$ ($x = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$) 多主元高熵合金, 利用高分辨 X 射线衍射仪、场发射扫描电镜、维氏硬度、和压缩试验对该合金系进行了显微组织和力学性能分析。研究表明, 该合金具有复杂的微观组织形态, 当添加少量的 V 元素时, 合金由 FCC 相与 BCC 相组成; 随着 V 元素的进一步增加, FCC 相消失, 合金由 BCC 相与 B2 相组成, 其中在 $\text{AlCrFe}_2\text{Ni}_2\text{V}$ 合金中, 基体由 B2 相组成, 组织形态也由复杂形态转变为类似等轴晶的多晶组织。压缩试验结果显示, 随着 V 元素的增加, 屈服强度增加, 断裂强度没有明显变化, 且压缩率降低。且随着 V 元素增加, 合金系的维氏硬度逐渐变大, 且在 FCC 相向 BCC 相转变时发生急剧的增大。经分析发现, V 元素不仅促进了 BCC 相的生成, 还会使 BCC 相发生有序化转变。

D03-PO-02

铁基非晶粉末与薄带的晶化行为研究

李翠芹, 黄正华, 徐春杰

西安理工大学, 材料科学与工程学院

Fe 基非晶合金具有优异的软磁性能, 其软磁性能优于硅钢片, 电阻率是硅钢的三倍, 铁损仅为硅钢的四分之一, 广泛应用于配电变压器和大功率电抗器等。本文制备了 $\text{Fe}_{50.6}\text{Cr}_{23.3}\text{Mo}_{8.4}\text{C}_{8.4}\text{B}_{9.33}$ (at.%) 合金粉末和薄带。用 X 射线衍射仪 (XRD) 分析了原始态和退火态的相组成, 用差示扫描量热仪 (DSC) 分析了粉末和薄带的晶化行为。结果表明, 该合金粉末和薄带为完全非晶态, 等时 DSC 曲线 (温度 ≤ 993 K) 均呈现两个放热峰, 分别对应于纳米晶 $\alpha\text{-Fe}$ 相和 $(\text{Fe}, \text{Mo})_{23}(\text{C}, \text{B})_6$ 相的析出。粉末的第一放热峰开始温度 T_{x1} 、第一放热峰峰值温度 T_{p1} 、第二放热峰峰值温度 T_{p2} 和过冷液相区宽度 ΔT_x 均要高于薄带的相应值, 提高幅度 7~10 K。粉末和薄带的 ΔT_x 分别为 71 K 和 64 K。由 Kissinger 方程得到的粉末第一和第二放热峰对应的表观激活能 E_{a1} 和 E_{a2} 分别为 455.4 kJ/mol 和 494.5 kJ/mol, 而薄带的 E_{a1} 和 E_{a2} 分别为 485.6 kJ/mol 和 487.4 kJ/mol。

D03-PO-03

高熵合金基复合材料及其耐磨性能研究进展

杜文博, 朱胜, 陈永星

再制造技术国家重点实验室

经过近 20 年的研究发展, 目前已设计形成轻质高熵合金、准晶高熵合金、高温高熵合金、难熔高熵合金、非晶高熵合金、单相高熵合金、高熵记忆合金等特殊结构和性能的合金种类, 极大丰富了高熵合金设计理论和应用领域, 成为新的学科增长点。多种强化机制使高熵合金强度和硬度显著提高, 同时具有较高混合熵而呈现良好的高温热稳定性, 是耐磨材料的理想选择, 在表面工程领域具有广泛应用, 成为近年来国内外研究热点。由于固溶大量异质元素原子, 使高熵合金固溶体晶格中柏氏矢量增大, 阻碍位错滑移, 强度显著增大, 但同时合金脆性转变温度升高, 使合金脆性增加, 韧性下降。复合效应是材料性能的“倍增器”和“催化器”。迄今, 关于高熵合金基复合材料的研究成果不多, 且仅限于纤维单向排列或颗粒弥散的单向增强复合材料。因此, 通过选择不同结构和性能特征的增强相, 利用适当工艺制备高熵合金基复合材料, 将成为新的研究方向和热点。本文综述了高熵合金基复合材料研究现状, 着重阐述高熵合金基复合材料在表面工程领域的应用, 提出将石墨烯作为增强相制备高熵合金的技术思路, 改善力学性能的同时, 还可降低其摩擦系数, 可望成为具有较高强度的新型耐磨材料。

D03-PO-04

激光熔化沉积的制备策略对 CrMnFeCoNi 高熵合金结构与性能的影响

向硕, 李晋锋, 李强

新疆大学

为了研究激光熔化沉积工艺对 CrMnFeCoNi 高熵合金微观结构与力学性能的影响, 采用单向扫描和双向扫描两种制备策略, 分别在 1000W、1200W 和 1400W 功率下制备出 CrMnFeCoNi 高熵合金样件。通过 XRD 衍射、金相腐蚀和力学拉伸等分析手段对 CrMnFeCoNi 高熵合金相结构、微观组织结构及力学性能进行了研究。研究结果表明: 1. 不同工艺参数条件下制备得到的 CrMnFeCoNi 高熵合金均为 FCC 单相固溶体结构; 2. 通过控制激光沉积功率, 可调制 CrMnFeCoNi 高熵合金

组织结构中柱状晶与等轴晶的比例；3.双向扫描工艺条件下制备得到 CrMnFeCoNi 高熵合金具有更加均匀的组织结构与更为优异的拉伸力学性能。

D03-PO-05

非晶合金析氧电极的制备与性能

贺盼, 张涛

北京航空航天大学

广泛认为贵金属及其氧化物是最具有析氧活性的电催化剂, 但其高昂的价格限制了工业应用。由于过渡族金属、合金及其氧化物在强碱中具有优异的电催化活性和耐腐蚀能力, 成为最受关注的非贵金属析氧催化剂。处于亚稳态的非晶态合金原子排列为长程无序、短程有序, 可提供更多的催化活性位点, 并可含有超过平衡固溶度的析氧催化活性元素, 同时具有优良的导电性, 因而制备过渡族金属系非晶合金电极有望提升电解水的析氧性能。本文设计并制备了一系列 FeNiBM 非晶合金析氧电极 ($M=Ru, Mo, Zr, La, Y$), 并研究微量元素替换对合金的非晶形成能力的影响以及化学腐蚀对电极析氧性能的影响。结果表明, 使用 Mo、Ru 和 Zr 元素进行微量替换后的电极析氧性能有所提高, 而 La、Y 使性能降低。通过硝酸腐蚀发现各试样电极的析氧性能均有非常显著的提升。FeNiBRu 非晶合金, 化学腐蚀后的过电位降低, 最大达 65mV。同时, 化学腐蚀处理前后的电极电位都基本保持不变, 具有良好的稳定性。采用铁镍基非晶合金有望制备电解水制氢的高性能阳极析氧电极。

D03-PO-06

机械合金化对 $Ti_xCrFeCoNiCu$ ($x=0.25,0.5,0.75,1.0$) 高熵合金性能的影响

苗振旺, 祝夫文, 刘琪

安徽工程大学

人们对于合金的使用一直秉承着以单一元素或者化合物作为基体, 并向其中加入其它少量元素进行强化的设计理念。由于高熵合金拥有诸如高熵效应、迟滞扩散效应、晶格扭曲效应以及鸡尾酒效应等不同于传统合金的特点, 所以其具备高强度、耐腐蚀、耐高温、耐磨等诸多优异的使用性能, 这就使其在理论研究和工业应用方面均具有极大的价值。本实验采用真空电弧炉熔炼制备了 $Ti_{0.25}CrFeCoNiCu$ 、 $Ti_{0.5}CrFeCoNiCu$ 、 $Ti_{0.75}CrFeCoNiCu$ 、 $Ti_{1.0}CrFeCoNiCu$ 四种体系的高熵合金, 每一种分成两组, 一组采用球磨处理, 一组不做球磨处理。采用洛氏硬度计研究了四种材料的力学性能。通过电化学实验研究了四种体系的合金在 0.5mol/L H_2SO_4 溶液中的耐腐蚀性能, 经研究发现: 球磨处理过的四种体系高熵合金硬度明显低于未球磨的, 当 $x=0.25,0.5$ 时, 两组合金的硬度都是先增大后减小, 且合金硬度差别较大, 当 $x=0.75,1.0$ 时两组合金的硬度继续增加, 但趋于缓慢。其中 $x=0.5$ 时, 未球磨的一组为 93HRB, 处理过的为 58HRB。随着 Ti 含量的增加, 四种体系的高熵合金硬度都明显提高。 $Ti_{0.25}CrFeCoNiCu$ 、 $Ti_{0.5}CrFeCoNiCu$ 、 $Ti_{0.75}CrFeCoNiCu$ 、 $Ti_{1.0}CrFeCoNiCu$ 四种体系高熵合金在 0.5mol/L H_2SO_4 溶液中的耐腐蚀研究表明: 合金中 Ti 元素可以提高合金的耐腐蚀性能, 而且随着 Ti 元素的含量提高, 合金的腐蚀电位逐渐降低, 合金的耐腐蚀性能逐渐提高。将 Ti 含量相同的相互对比可发现, 未球磨的一组腐蚀电流明显小于球磨处理过的。当 $x=0.25$ 两者耐腐蚀性基本相同, $x=0.5$ 时差别较为明显, 此时未球磨的腐蚀电位为 -0.241V, 球磨过的腐蚀电位为 -0.383V。通过分析原因是由于机械合金化过程中粉末被反复破碎和焊合, 产生大量新鲜的结合界面, 形成细化的多层复合颗粒, 继续研磨, 由于塑形变形内部缺陷增加导致晶粒进一步细化, 此时在其内组元间发生了固态反应扩散, 使体系能量升高而导致耐腐蚀性降低。

D03-PO-07

He⁺离子辐照对 $Cu_{48}Zr_{48}Al_4$ 块体非晶复合材料的微观结构和力学性能的影响

王洋, 张坤, 卫宇航

中国科学院力学研究所

本文主要研究了 He⁺离子辐照对 $Cu_{48}Zr_{48}Al_4$ 块体非晶复合材料的微观结构和力学性能的影响。实验结果表明, 当辐照离子剂量从 2.5×10^{17} ions/cm² 到 1.0×10^{18} ions/cm² (DPA 最大值分别为 21.5 dpa 和 86 dpa), 材料发生从 B2-CuZr 相到 B19'-CuZr 和 B33-CuZr 相的转变。同时, 平均表面粗糙度也随着辐照剂量的增加而增加, 且在最高辐照剂量下材料表面发

生局部脱落。纳米压痕实验结果表明,随着辐照剂量的增加,材料非晶区域的硬度和杨氏模量减小;而晶态区域由于马氏体相的出现表现出明显的硬化效应,且离子辐照后材料的宏观硬度无明显变化。以上结果表明经 He⁺离子辐照后, Cu₄₈Zr₄₈Al₄ 块体非晶复合材料由于非晶基体的辐照软化效应和晶态区域的马氏体硬化效应,维持了稳定的力学性能。这些结果对于超常环境下新型服役材料的设计和应用具有重要意义。

D03-PO-08

ZrCuAlNbHf 非晶合金的温晶化动力学研究

曹国华, 刘坤, 张宝庆

河南理工大学

块体非晶合金相对于晶体材料因其特殊结构而具有独特的物理和化学性能,如高强度、良好的软磁性、高的耐腐蚀性等,在军事、医用器材、体育器材等领域具有广阔的应用前景。其中 Zr 基块体非晶合金由于其较好的玻璃形成能力和相对低廉的价格受到了广泛关注。块体非晶合金在玻璃转变温度 T_g 附近获得足够的能量后开始进行原子短程扩散重排,非晶态结构会自发转变成部分晶态或完全晶态,相应的材料性能也会随之发生变化。因此非晶合金晶化动力学研究,对于深入了解非晶合金的热稳定性和形核长大机制,利用晶化过程控制组织获得高性能材料有着重要的意义。本文采用铜模吸铸法制备了(Zr_{46.3}Cu_{43.4}Al_{8.3}Nb₂)₉₅Hf₅ 非晶合金,采用示差扫描量热分析(DSC)研究了非晶合金的等温晶化行为,利用 Johnson-Mehl-Avrami (JMA)方程分析了其等温晶化动力学。结果表明,(Zr_{46.3}Cu_{43.4}Al_{8.3}Nb₂)₉₅Hf₅ 非晶合金在 733 K~753 K 温度范围等温晶化过程中,Avrami 指数 n 随着等温温度的升高而逐渐增大,其数值由 733K 时的 2.39,增大到 753K 时的 2.73,表明晶化过程主要受扩散控制的形核率随时间延续而增大的形核与长大机制支配。随着 n 的变化,形核速率和长大方式发生了改变。基于 Arrhenius 公式计算得到平均晶化激活能为 545.8 kJ/mol。晶化激活能与等温晶化体积分数密切相关。

D03-PO-09

Minor addition Nb induced microstructure evolution and multiplication of shear bands in Cu-Zr-Ti based bulk metallic glasses

韩振华, 杨军, 张长军

西安理工大学

Starting from the brittle Cu_{55.5}Zr₃₇Ti_{7.5} bulk metallic glass (BMG), the effect of Nb addition on the mechanical properties is systematically investigated. Monolithic BMG was successfully fabricated in the present of (Cu_{55.5}Zr₃₇Ti_{7.5})_{100-x}Nb_x (x = 0, 4 and 10 at. %) alloy with a diameter of 3 mm. The Nb additions significantly increase the plasticity of the respective alloys. The (Cu_{55.5}Zr₃₇Ti_{7.5})₉₀Nb₁₀ alloy is found to have the largest plastic strain in compression of around 6 % while the Nb-free Cu_{55.5}Zr₃₇Ti_{7.5} BMG exhibits values of 0%. The plasticity enhancement is attributed to the minor addition Nb induced microstructure evolution, resulting in the multiplication of shear bands during deformation.

D03-PO-10

CoCrFeNi 高熵合金在熔融 Al 中的界面扩散研究

胡垚, 何俊涛, 吴雨财

广东工业大学

本文主要研究了多主元 CoCrFeNi 高熵合金在 700°C 熔融 Al 液体中的元素扩散行为,利用 X 射线衍射仪、扫描电镜、能谱仪、显微硬度计系统地研究了 CoCrFeNi 和 Al 扩散界面的微观组织、结构和显微硬度变化。研究表明,在高熵合金与 Al 熔体的界面处发生了复杂的化学反应,首先形成的是 FCC+BCC 的混合固溶体层,接着在该固溶体层近 Al 端有块状的 Al₁₃Cr₂ 化合物生成,随着保温时间的增加,固溶体层厚度增加到 43μm 后保持不变,块状化合物也逐渐转变成球状分布在 Al 基体中。BCC 结构的生成使得固溶体层硬度可达 450HV,同时化合物的存在也让基体硬度增加明显。

D03-PO-11

HfNbTaTiZrW(Mo)难熔高熵合金的组织 and 力学性能研究

王梦, 程兴旺
北京理工大学

本文选取 Hf、Nb、Ta、Ti、Zr、W 和 Mo 七种元素为原料, 按照等摩尔比的配比, 利用非自耗真空电弧熔炼的方法分别制备 HfNbTaTiZrW 和 HfNbTaTiZrWMo 两种难熔高熵合金。采用 XRD、SEM 和 EDS 等方法对高熵合金的微观组织特征进行表征, 同时对合金的硬度以及室温和高温准静态压缩性能进行研究。研究表明: HfNbTaTiZrW 和 HfNbTaTiZrWMo 合金均包含两种无序 BCC 相, 其微观形貌为典型的树枝晶。HfNbTaTiZrW 合金的显微维氏硬度值为 525HV, HfNbTaTiZrWMo 为 564HV。HfNbTaTiZrW 合金的室温压缩屈服强度为 1550MPa, 断裂应变为 26%。HfNbTaTiZrWMo 合金的屈服强度为 1636MPa, 但其断裂应变仅为 15%。两种合金均表现出应变硬化现象。高温压缩试验结果表明, HfNbTaTiZrWMo 合金的高温性能更优异。该合金在 1100°C 下压缩屈服强度可达到 670MPa, 而 HfNbTaTiZrW 合金仅有 356MPa。但由高温压缩应力-应变曲线可看出, 两种合金屈服后应变软化现象较严重。

D03-PO-12

Fe 含量对 Ni-Mn-Ga 形状记忆纤维的微观结构和相变行为的影响

刘晓华, 刘艳芬, 李建军
齐齐哈尔大学

基于 Ni₂MnGa 合金对成分敏感性, 通过掺杂第四元素和细化晶粒改善合金的脆性同时提高相变温度。采取熔体抽拉技术制备 Fe 掺杂的 Ni-Mn-Ga 纤维, 纤维直径在 30~50μm, 长度 5~10cm, 表面光滑, 没有明显的宏观缺陷。研究表明, Fe 含量对纤维的组织 and 相结构有显著的影响, 随着 Fe 的加入晶粒尺寸在减小, Fe 起到了细化晶粒的作用, 将有效改善合金的脆性。Fe 的掺杂实现了从母相到马氏体相的转变, 扫描电子显微镜和透射电子显微镜显示奥氏体相和马氏体相的显微组织分别以“花呢纹”和 7M 调制结构为主。纤维的马氏体相变表现出成分依赖性, 随着 Fe 含量的增加显著提高, 基于 Hume-rothery 理论分析了马氏体相变温度升高是源于电子浓度升高和晶胞体积收缩两者共同作用的结果。

D03-PO-13

大厚度铁基非晶复合涂层的制备及特性研究

戴亚洲, 莫嘉伟, 王永田
马鞍山日德瑞陶瓷新材料有限公司

本文采用激光熔覆和同步送粉法, 原位制备了大厚度 Fe 基非晶复合涂层, 利用 X 射线衍射、扫描电镜和透射电镜对涂层的成分和组织进行了分析, 并测试了涂层的显微硬度和摩擦磨损特性。结果表明, 采用激光熔覆的方法可以制备出高非晶含量的复合涂层, 涂层内纳米晶颗粒表面被非晶基体包覆。涂层与基体为冶金连接, 有良好的结合强度及耐磨性。最后重点讨论了微观结构和性能之间的内在联系, 涂层内非晶相与纳米晶的协同增效作用是其具备良好耐磨性能的主要机制。

D03-PO-14

第一性原理方法研究 Al_xCoCrFeNiMn 高熵合金

丁欣恺, 孙琨, 方亮
西安交通大学

采用第一性原理密度泛函理论研究 Al_xCoCrFeNiMn(x=0-2)高熵合金的生成焓、结构特性和力学性能。具体利用精确 Muffin-Tin 轨道理论结合相干势近似和全电荷密度第一性原理技术(EMTO-CPA) 计算等效晶格参数, 二阶弹性常数, 生成热和多晶体弹性模量。通过与实验数据和其他第一性原理软件例如 VASP 软件的模拟结果相比较, 来说明模拟工作的有效性和准确性。结果表明, Al 元素含量的增加一定程度上会降低材料结构的热稳定性。生成热的计算结果均为负值, 表明 Al_xCoCrFeNiMn(x=0-2)高熵合金在热力学条件下是稳定存在的。工作可以为制备 Al_xCoCrFeNiMn(x=0-2)高熵合金提供一定的可行性依据。

D03-PO-15

CoCrCu_{0.5}FeNiSix 高熵合金的相选择、组织和性能研究

陈晨, 刘宁, 周鹏杰
江苏科技大学

当 Si 元素加入 FCC 结构 CoCrCu0.5FeNi 高熵合金后, 金属间化合物相易于形成。当 CoCrCu0.5FeNiSix 高熵合金中的 Si 含量大于等于 4.25at%时, 合金中开始出现化合物相。参数计算结果表明, 当 $\Omega \geq 3.09$, $\delta \geq 1.57$, $\Delta S \geq 14\text{J/K}\cdot\text{mol}$, $\Delta H_{\text{mix}} \leq -8.003\text{kJ/mol}$, $\text{VEC} \leq 8.36$, 和 $\Lambda \leq 5.7$ 时, CoCrCu0.5FeNiSix 高熵合金中会出现化合物相。CoCrCu0.5FeNiSix 高熵合金的强度随着 Si 含量的增加呈现上升趋势, 这说明 Si 具有明显的强化效果。CoCrCu0.5FeNiSi0.2 合金具有最佳的力学性能: 极限强度 1200MPa 屈服强度 900MPa, 极限应变 ϵ_s 34%。分析表明, 当 Si 的加入量小于 4.25at%时, 合金由 FCC 固溶体组成, 其强化机制主要为固溶强化, 而当 Si 的加入量大于等于 4.25at%时, 合金中出现化合物相, 由 FCC+化合物相组成的合金强化机制为固溶强化和析出强化。但由于化合物相在枝晶间局部分布, 所以强化效果有限。

D03-PO-16

冷变形和热处理对高熵合金 Cu₂CrFeNiAl 的影响

皮锦红, 杜海龙, 范音龙
南京工程学院

利用高纯金属原料, 采用真空电弧熔炼方法制备了直径为 6mm 的高熵合金 Cu₂CrFeNiAl。铸态高熵合金由典型的树枝晶和晶间弯曲的带状组织构成。铜、镍严重偏析于晶间带状组织中。对合金进行了 6% 的冷塑性变形后再处以 200°C-950°C 的退火处理, 可将原始铸态组织中的发达树枝晶转变为块状晶粒, 并将带状组织转变为交织在一起的针状组织, 并最终溶入块状晶而使带状组织完全消失。随着退火温度的升高, 块状晶粒会粗化。退火使合金硬度得到不同程度的提升。冷变形后的 Cu₂CrFeNiAl 合金经 700°C 退火后的硬度最高, 其显微硬度和纳米硬度 (H) 分别为 428.3HV 和 5.05GPa。原始铸态合金的显微硬度和纳米硬度分别为 307.6HV 和 2.08GPa。而且, 此时合金的弹性模量 (E) 最低, 只有 126.1GPa。所以, 以 H/E 衡量的金属耐磨性最好。当退火温度高达 950°C 时, 合金硬度急剧下降。冷塑性变形后配以适当的再结晶退火处理可以有效改变高熵合金的组织结构并消除不均匀偏析组织。

D03-PO-17

激光熔覆制备 Al_xCoCrFeNi (0.3≤x≤2.0) 高熵合金涂层微观组织与性能

张国璁, 尹可心, 田权伟
大连理工大学材料科学与工程学院

本文研究了快速冷却条件下, Al 元素对 CoCrFeNi 合金涂层的微观组织与性能的影响。使用激光熔覆的方法制备了 Al_xCoCrFeNi 高熵合金涂层, 其中 x 分别为 0.3, 0.5, 0.6, 1.0, 2.0。通过 XRD, SEM, 显微硬度等测试手段, 本文系统研究了该高熵合金体系的微观组织与性能特点。实验结果表明, x=0.3 和 0.5 时, 组织为单一的面心立方结构, 显微硬度较低。x=0.6 时, 组织为面心立方与体心立方的双相结构, 显微硬度提高。x=1.0 和 2.0 时, 面心立方消失, 组织成为无序体心立方与有序体心立方的混合结构, 显微硬度得到明显提高。研究证实, 在快速冷却条件下, Al 元素能够改变 Al_xCoCrFeNi 高熵合金涂层的微观结构, 从而影响了合金性能。

D03-PO-18

CoCrFeNiAl 高熵合金的热压缩变形行为的研究

田权伟, 尹可心, 张国璁
大连理工大学材料科学与工程学院

本文通过真空磁悬浮熔炼方法制备出了等摩尔的 CoCrFeNiAl 高熵合金, 并利用 Gleeble-3500 热模拟压缩机进行了热压缩实验, 主要探索了其高温流变变形规律。同时, 基于动态材料模型绘制了合金在真应变为 0.7 时的热加工图, 并结合合金在不同变形条件下显微组织的演变规律得出了合金的最佳热加工工艺参数。研究结果表明: 当真应变固定时, 铸态 CoCrFeNiAl 高熵合金的峰值流变应力和稳态流变应力均随着加工温度的升高或应变速率的降低而减小。利用双曲正弦函数模型得到了铸态 CoCrFeNiAl 高熵合金的变形平均激活能 Q 和应力因子敏感系数 n 的值。其次, 当加工温度较高时 (T >

1000°C)，在加工图中对应的功率耗散效率 (η) 值较大，其最大值为 48%，对应的显微组织为均匀的再结晶组织。合金的不稳定加工区域主要表现为低温加工区域 ($T < 1000^\circ\text{C}$)，在其显微组织中可观察到显微裂纹的产生。

D03-PO-19

拼接成型对非晶定子铁芯的磁性能影响

李山红, 李德仁, 卢志超

安泰科技股份有限公司

非晶态合金具有高磁导率、低损耗的优异性能。本文采用浸漆固化后线切割的方式制作定子铁芯，并将不同块数拼接成型的非晶定子铁芯与整块的非晶定子铁芯的磁性能进行了对比分析。结果显示，非晶定子铁芯的损耗值随着拼接块数的增加依次增加，当拼接块数增加到 4 块时，与整块相比，铁芯损耗增加了 78.57%；在同样的激磁条件下，非晶定子铁芯的 B_m 值随着拼接块数的增加依次减小，当拼接块数增加到 4 块时，与整块相比，降低了 30%。这说明，当非晶定子铁芯在用拼接的方式成型时，拼接的块数越少越好。

D03-PO-20

Mn 元素对 Fe-Co-Cr-Ni-Al-Ti-Mn 系多组元合金组织及力学性能的影响

魏成宾

大连理工大学

本论文研究了 Mn 元素及热处理工艺对 Fe-Co-Cr-Ni-Al-Ti-Mn 系多组元合金组织及力学性能的影响。实验结果表明，由电弧熔炼制得的钮扣合金晶粒组织粗大；随着 Mn 元素含量的降低，合金的压缩屈服强度逐渐升高，当 Mn 含量为 18.4%(at%)，压缩变形量达到 70%时的压缩真应力约为 1GPa，并且合金不产生裂纹。经过固溶处理之后，合金的压缩强度降低，硬度也有所降低。对合金进行时效处理发现，不同 Mn 含量的合金到达时效峰值时的时间不同，经过 650°C×2h 时效处理之后，Mn 含量为 18.4%的合金的硬度达到最大值，约为 173HV。时效处理对合金的压缩性能影响不大，经过 2h 时效处理之后，Mn 含量为 18.4%的合金的加工硬化率呈现出先减小后增大再减小的趋势。

D03-PO-21

电弧喷涂制备铁基非晶纳米晶涂层的形成及性能研究

武丹, 樊自控

北京航空材料研究院

本文利用电弧喷涂技术在钢基体上制备 FeCrBSiMnMoW 多元铁基非晶纳米晶复合涂层。采用 X 射线衍射仪、扫描电镜、透射电镜对涂层的微观结构进行了表征，并讨论了非晶纳米晶的形成机制，并分析了涂层的各项性能。结果表明：涂层组织致密、孔隙率低。从显微结构看，涂层由非晶和 $\alpha(\text{Fe}, \text{Cr})$ 纳米晶组成： $\alpha(\text{Fe}, \text{Cr})$ 相纳米晶均匀弥散分布于部分非晶基体内。涂层热稳定性较好，晶化温度在 587.5°C 以上；涂层的显微硬度为 HV0.3=1150；涂层以磨粒磨损为主，摩擦系数约为 0.434，磨损率较低为 $3.3 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ ，耐磨损性能良好。因此，FeBSiCrNbMnY 系非晶纳米晶具有高的显微硬度和良好的耐磨性能。

D03-PO-22

Zr-Cu-Ni-Al-Er 非晶合金的高温流变行为研究

李春燕, 尹金锋, 朱福平

兰州理工大学

以 (Zr-Cu-Ni-Al)97.4Er2.6 块体非晶合金为研究对象，在过冷液相区进行高温压缩实验，研究其在过冷液相区的变形行为和可加工性，并建立了热加工图。结果表明：温度为 410°C、420°C 的低应变速率下 ($5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)，加工效率范围为 70%~85%，应力范围为 60~120MPa，此时试样的流动性较好，在较小的应力下可热塑成形，是可选的热加工工艺参数。温度为 430°C、应变速率范围为 $5 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时，加工效率范围为 75%~85%，应力范围为 16~106MPa，表现出了极好的流动性，在很小的应力下就可成形，是可选的热加工工艺参数。这不仅为 Zr 基非晶合金在热加工图和加工工艺方面的研究提供一定的实验数据与理论依据，也为特殊用途微型零件的制备提供了新的方法和思路。

D03-PO-23

Zr85Cu15 二元非晶-纳米晶合金结构的分子动力学模拟

威力, 高伟, 马明臻

燕山大学

对 Zr85Cu15 非晶合金进行不同程度等温退火过程分子动力学模拟, 结果表明随着弛豫时间的增加, Cu-Cu 的双体分布函数第二峰变化明显, 即 Cu-Cu 次近邻关系在不同退火时间发生明显变化; 由配位数研究发现以 Cu 为中心的团簇结构配位数降低, 即 Cu 为中心的团簇结构变得松散, 导致 TTT 曲线形状由双 C 曲线变为 C 曲线。对 Zr85Cu15 非晶合金进行等温退火、冷却处理及室温弛豫过程中各个构型进行结构分析发现: 等温退火与冷却过程中都生成了体心立方结构的晶化相; 随着晶化过程的持续进行, Cu 原子和 Zr 原子周围的配位数变化趋势不同, 前者平均配位数降低, 后者平均配位数增大。由键对分析可知随着晶化过程的进行, 非晶中主要存在的五重对称结构分别转化为体心结构的 1661 和 1441 键对。1441 键对的增加导致 Cu 原子的配位数降低, 1661 的增加是 Zr 原子周围的配位数增加的主要原因。

D03-PO-24

TixAlCrNbV 高熵合金的显微组织及力学性能研究

肖树龙, 徐丽娟, 周渊飞

哈尔滨工业大学

本文以 TixAlCrNbV 高熵合金为研究对象, 在难熔合金元素的基础上加入 Al 元素, 同时调整 Ti 元素的含量, 达到减重和提高比强度的目的。采用水冷铜坩埚真空感应熔炼炉制备了 TixAlCrNbV 高熵合金, 并在 1200°C 条件下对其进行 12 小时的退火, 研究了 TixAlCrNbV 合金的相组成、显微组织以及常温和高温力学性能。XRD 结果表明, 铸态 TixAlCrNbV 合金为单一的 BCC 结构, 与 VEC 的预测结果相吻合, 其理论 VEC 值为 5.56; 退火处理后, 合金中出现了 C14 结构的 Laves 相。铸态 TixAlCrNbV 合金的显微组织为粗大的等轴晶, 退火后晶粒尺寸变化不大, 在晶界附近和晶粒内部析出大量第二相沉淀; 随着 Ti 元素的增多, 合金中第二相的体积分数逐渐降低。显微硬度实验结果表明, 高熵合金在铸态和退火态下的显微硬度均随着 Ti 元素含量的增加而减小, 当 Ti 元素过多时, 退火处理对提高硬度是不利的。TixAlCrNbV 合金室温下具有较高的压缩屈服强度, 退火后压缩屈服强度有所提升 (最大达到 1654MPa); 当 Ti 元素含量高时, 元素含量对合金的室温屈服强度影响很小; 与类似的合金相比, TixAlCrNbV 高熵合金具有较高的高温比屈服强度。