

高熵合金研究进展

宋鑫芳, 张 勇

Progress of high entropy alloys

SONG Xin-fang and ZHANG Yong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2022040003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

粉末冶金法制备颗粒增强钛基复合材料的研究进展

Research progress on particle-reinforced titanium matrix composites prepared by powder metallurgy method

粉末冶金技术. 2020, 38(2): 150-158

少钴/无钴WC材料制备研究进展

Research progress on preparation of cobalt-less/cobalt-free WC-based materials

粉末冶金技术. 2021, 39(3): 280-286

CoCrFeNiCuTi_x高熵合金的微观组织与耐腐蚀性能研究

Study on microstructure and corrosion resistance of CoCrFeNiCuTi_x high-entropy alloy

粉末冶金技术. 2020, 38(1): 10-17

钛及钛合金人体植入材料研究进展

Research progress on titanium and titanium alloys used as implant materials for human body

粉末冶金技术. 2019, 37(3): 225-232

高强高导铝石墨烯复合材料研究进展

Research progress on high-strength and high-conductivity Al-graphene composites

粉末冶金技术. 2021, 39(4): 358-365

机械合金化结合放电等离子烧结技术制备热电材料的研究进展

Research progress on processing of thermoelectric materials by mechanical alloying combined with spark plasma sintering

粉末冶金技术. 2021, 39(1): 4-14



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

高熵合金研究进展

宋鑫芳, 张 勇[✉]

北京科技大学新金属材料国家重点实验室, 北京 100083

[✉]通信作者, E-mail: drzhangy@ustb.edu.cn

摘 要 高熵合金突破了传统合金成分的限制, 通过调配多种组元的排列组合和含量, 赋予了高熵合金高强度、高韧性、高硬度、低温韧性、耐腐蚀和抗辐照等优异的力学性能和功能性能, 在众多领域表现出了巨大的应用潜力。高熵合金目前主要有三个代表性的种类: 以 3d 过渡族金属为主的 Cantor 合金 (CoCrFeMnNi); 以难熔金属为主的 Senkov 合金 (NbMoTaW); 以铝镁钛等轻质元素为主的低密度高熵合金 (AlMgLiZnCu, AlMgZnCuSi, AlZrTiNbMo)。本文从高熵合金的概念出发, 详细介绍了高熵合金的制备工艺, 讨论了如何制备具有高强度-高塑性、优秀磁性能-力学性能以及高强度-高导电性、轻质-高强度等优异综合性能的高熵合金, 并对高熵合金未来的发展趋势进行了展望。

关键词 高熵合金; 研究进展; 制备工艺; 力学性能; 功能性能

分类号 TG135

Progress of high entropy alloys

SONG Xin-fang, ZHANG Yong[✉]

State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

[✉]Corresponding author, E-mail: drzhangy@ustb.edu.cn

ABSTRACT High entropy alloy breaks through the limitation of traditional alloy composition, rendering a great possibility to constitute alloys by using the entropic conceptions. It provides a novel way for the development of new materials, which usually exhibits excellent mechanical and functional properties, such as high strength, high toughness, high hardness, exceptionally excellent low temperature toughness, excellent corrosion resistance, and radiation resistance, showing the great application potential in many fields. Up to now, three typical high entropy alloys have been developed: Cantor alloy (CoCrFeNiMn) which mainly composed of 3d transitional elements; Senkov alloy (NbMoTaW), mainly contains refractory elements; Lightweight and low density high entropy alloys (AlMgLiZnCu, AlMgZnCuSi, AlZrTiNbMo). Based on the concept of high-entropy-alloy, the processing of high entropy alloys was introduced in detail, and how to prepare the high entropy alloys with the excellent combination performance (high strength-high toughness, excellent magnetism-mechanical properties, and high strength-high electrical conductivity) was discussed. Finally, the development trend of high entropy alloys in the future was prospected.

KEY WORDS high entropy alloys; research progress; preparation process; mechanical properties; functional properties

收稿日期: 2022-05-12

DOI: 10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2022040003; <http://pmt.ustb.edu.cn>

金属材料是人们日常生活中所需的基础材料之一，小到生活用品，大到轮船、航空航天发动机都离不开金属材料，它的研发对国民经济的发展至关重要。随着科技的发展，对传统材料力学性能以及功能性能提出了更高的要求，由于传统材料的性能有限，难以满足日益发展的工艺需求。经研究人员的积极探索，高熵合金逐渐出现在人们的视野中，它突破了传统的合金设计理念，为合金成分设计提供了一种新思路。高熵合金（high entropy alloys, HEAs）一般含有四种及以上的合金元素，根据所需合金性能的要求，通过选择性的添加某些合金元素并控制合金元素的比例，可以改变合金的晶体结构和相组成，从而实现合金性能的突破^[1-2]。独特的设计理念赋予了高熵合金优异的力学性能和功能性能，例如高强度、高韧性、低温断裂韧性、优异的磁性能及导电性能等^[3-4]，在工业制造领域有着广阔的发展前景。

1 高熵合金制备工艺

高熵合金的制备方法包括熔炼铸造法、粉末冶金法、增材制造法以及磁控溅射法等。熔炼铸造法包括真空电弧熔炼法和真空感应熔炼法，由于该工艺较简单，所以它是制备高熵合金最常用的方法。但熔炼铸造法制备的高熵合金流动性和浇注性较差，存在严重的成分偏析、组织粗大、内部缩孔等铸造缺陷。Lu等^[5-6]采用熔炼铸造法制备了 AlCoCrFeNi_x （ x 为2.0、2.1和2.2）共晶或近共晶高熵合金，其组织由面心立方+体心立方两相组成，拉伸试验表明，直接铸造的共晶高熵合金在较大的成分范围和较宽的温度范围内均能表现出较高的强度和塑性。这种共晶和近共晶高熵合金解决了高熵合金在工程应用中存在的浇注性能差、成分偏析、高断裂强度与高塑性之间的矛盾等问题，是熔炼法制备高熵合

金的典型代表，易于适应大规模工业化生产。

粉末冶金法也是制备高熵合金常用的一种方法，它以金属粉末或预合金粉末作为原料，经过球磨/混合、压制、烧结以及后续处理等步骤制备块体高熵合金，具有近净成形、热加工性能好、成本低、高效率等优势。另外，由于粉末颗粒细小，冷却速度快，采用粉末冶金工艺制备高熵合金的组织更加均匀，易形成晶粒细小的等轴晶，抑制了铸造法引起的成分偏析和枝晶组织，因而表现出了比传统铸造合金更优异的力学性能。Anand等^[7]采用机械合金化和放电等离子烧结（spark plasma sintering, SPS）相结合的方法合成了具有等原子成分 TiAlNiCo 、 TiAlNiFe 和 TiAlNiCoFe 的单相体心立方纳米晶高熵合金，发现合金的硬度大于HV 700，抗压强度大于2.5 GPa。Pan等^[8]通过放电等离子烧结的方法制备了 $\text{Nb}_{25}\text{Mo}_{25}\text{Ta}_{25}\text{W}_{25}$ 高熵合金，该合金的压缩屈服强度、断裂韧性和硬度分别为2460 MPa、16.8%和7.78 GPa，远高于同成分的铸态合金。Tang等^[9]采用铸造法和热等静压两种方法制备了 AlCoCrFeNi 合金，发现与铸造法相比，热等静压法制备的合金强度较低，但其塑性好，断裂延伸率为11.7%，显著大于铸态合金（1%）。

近期，张勇老师课题组将 $\text{AlCo}_{0.4}\text{CrFeNi}_{2.7}$ 、 $\text{AlCoCrFeNiTi}_{0.2}$ 和 $\text{Fe}_{28.5}\text{Co}_{47.5}\text{Ni}_{19}\text{Al}_{1.6}\text{Si}_{3.4}$ 高熵合金粉末同WC粉末混合，经过球磨混粉、干燥以及1300℃短时放电等离子烧结，成功制备了一系列不同高熵合金含量的WC-HEA高熵硬质合金，样品如图1所示。研究发现，经1300℃烧结后，5% $\text{AlCoCrFeNiTi}_{0.2}$ -WC（质量分数）高熵硬质合金，最大硬度为 $\text{HV}_{30} 1567.8$ ；而10% $\text{AlCo}_{0.4}\text{CrFeNi}_{2.7}$ -WC（质量分数）高熵硬质合金具有最佳的硬度和断裂韧性，分别为 $\text{HV}_{30} 1575$ 、 $9.2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ，表明高熵合金代替Co作为制备硬质合金的粘结相具有

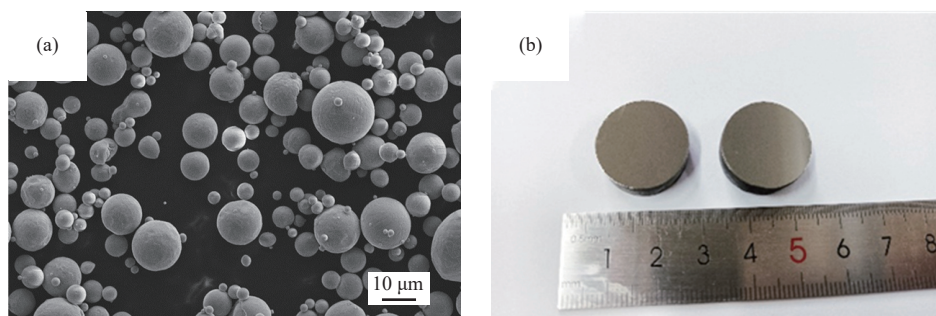


图1 高熵合金粉末 (a) 和放电等离子烧结 WC-HEA 硬质合金 (b)

Fig.1 High entropy alloy powders (a) and the WC-HEA cemented carbide by spark plasma sintering (b)

广阔的发展前景。

增材制造^[10] (Additive Manufacturing, AM) 俗称 3D 打印, 是近年来新兴的一种金属快速成形技术。它基于分层-叠加制造的原理, 以数字化模型为基础, 利用高能的激光束, 将金属粉末、金属丝或者膏状材料等熔化-凝固再逐层堆积, 最后形成致密的金属构件, 可以实现较高的精度及复杂构件的直接成形。另外, 由于温度梯度大、快速凝固和冷却, 晶粒来不及长大使得成形的样品晶粒组织细小均匀, 有效抑制元素的偏析, 但同时也会产生残余应力以及裂纹等缺陷, 影响合金的力学性能。Luo 等^[11] 采用选区激光熔化技术制备了具有面心立方和体心立方双相结构的 AlCrCuFeNi_x ($2.0 \leq x \leq 3.0$) 高熵合金, 其中, 制备的 $\text{AlCrCuFeNi}_{3.0}$ 高熵合金具有调制纳米级层状或胞状双相结构, 并具有最佳的抗拉强度 (957 MPa) 和塑性 (14.3%)。Wang

等^[12] 研究了选区激光熔化工艺制备的 AlCoCrCuFeNi 高熵合金, 由于选区激光熔化工艺的快速冷却使 AlCoCrCuFeNi 高熵合金内部存在大量细小晶粒和高密度位错网络, 同传统制备方法相比, 3D 打印制备的该合金硬度提高了 HV 210。目前, 在增材制造工艺方向, 张勇教授也开展了相关工作, 采用选区激光熔化技术制备了 $\text{Fe}_{28.5}\text{Co}_{47.5}\text{Ni}_{19}\text{Al}_{1.6}\text{Si}_{3.4}$ 高熵合金, 研究了不同工艺参数对合金磁性能及力学性能的影响, 合金的相对密度达到了 98.9%, 并发现采用选区激光熔化工艺制备的合金屈服强度约为同成分铸造合金的 2.8 倍, 合金的力学性能得到了很大的提升。另外, 张勇教授还将 $\text{Fe}_{28.5}\text{Co}_{47.5}\text{Ni}_{19}\text{Al}_{1.6}\text{Si}_{3.4}$ 合金打印成多孔骨架结构, 并通过对多孔骨架压渗纯 Al, 形成 $\text{Fe}_{28.5}\text{Co}_{47.5}\text{Ni}_{19}\text{Al}_{1.6}\text{Si}_{3.4}$ 高熵合金和纯 Al 的多孔骨架复合材料, 如图 2 所示, 达到提高合金的力学性能的目的。

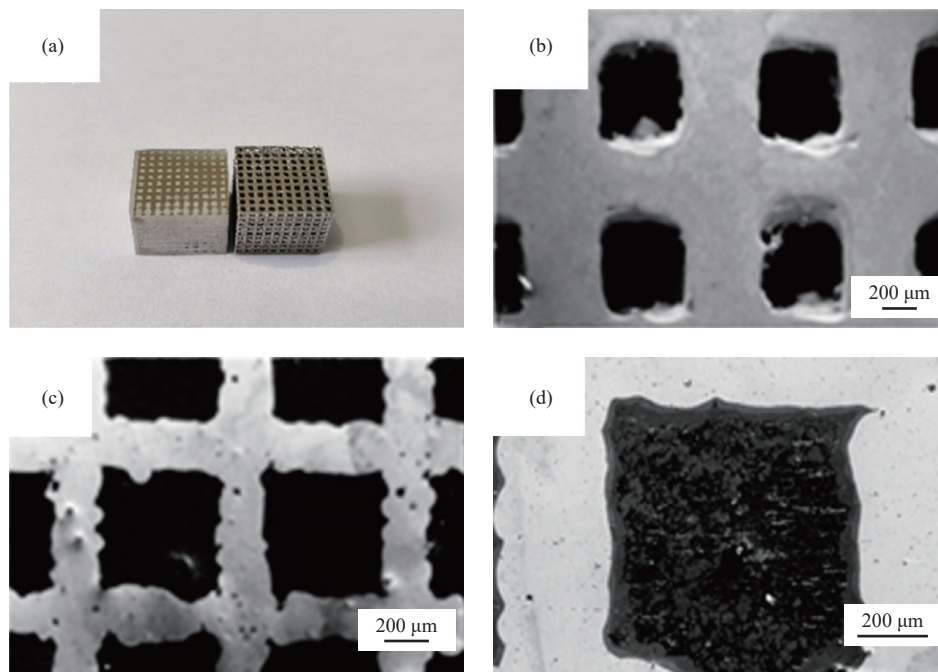


图 2 $\text{Fe}_{28.5}\text{Co}_{47.5}\text{Ni}_{19}\text{Al}_{1.6}\text{Si}_{3.4}$ 高熵合金和纯 Al 多孔骨架复合结构

Fig.2 Porous skeleton composite structure of the $\text{Fe}_{28.5}\text{Co}_{47.5}\text{Ni}_{19}\text{Al}_{1.6}\text{Si}_{3.4}$ high entropy alloys and the pure Al

2 高熵合金的性能突破

2.1 高强度和高韧性

金属材料是组成各种金属构件的原材料, 它包含了强度和塑性两个极重要的性能, 在大多数工程应用过程中都要求金属材料既具有高强度, 同时又兼具高韧性优异性能。以汽车的结构件为例, 一方面, 我们希望它能够承受更多的力, 另外一方面, 我们又希望汽车发生碰撞的时候, 结构件能够有很

大程度的变形, 从而保护乘客安全。但是强度和塑性是一个矛盾体, 一般来说, 材料的强度越大, 塑性越小; 塑性越大, 强度越小。例如传统的铝合金材料拥有良好的延展性, 但是屈服强度一般仅为 300~400 MPa 左右^[13]; 而镁合金具有相对较低的屈服强度以及较差的延展性^[14]。由于材料的这种强塑性倒置性关系的存在, 使开发高强高韧合金充满了挑战。

随着高熵合金的研发,各种高强高韧的合金材料陆续出现在人们视野中。高熵合金是由多种组元组成的一种固溶体结构,一般认为,在这种固溶体中各元素的原子随机占据晶体的点阵位置,每个原子周围都围绕着其他种类的原子。由于各类原子的尺寸不同,性质各异,这就会使固溶体产生严重的晶格畸变,阻碍位错的运动,从而使合金具有很高的强度。另外,高熵合金中常存在大量的孪晶,也增加了高熵合金的塑性。Li等^[15]提出了一种亚稳态工程策略,设计了一种新型的相变诱发塑性的多组元纳米结构块状高熵合金,通过降低相稳定性实现了双相组织导致的界面硬化以及相变引起的硬化。这种由相稳定性降低而导致的广泛硬化和高熵合金的大规模固溶强化,提高了合金的强度。此外,稳定相的位错硬化和亚稳相的相变诱导硬化使应变硬化能力增加,从而提高了合金的延性,实现了合金高强高韧性的突破。Lei等^[16]在TiZrHfNb难熔高熵合金中引入原子数分数2.0%氧原子后,合金表现出异常间隙强韧化效应,氧原子优先占据间隙位置,形成富O、Zr、Ti的有序氧复合体,从而造成固溶强化,提高了材料的强度。同时,有序氧复合体将位错的剪切模式由平面滑移转变为波状滑移,并在变形过程中促进了双交叉滑移,位错不断增殖,从而增加了材料的塑形变形能力,其拉伸屈服强度达到 (1.11 ± 0.03) GPa,拉伸塑性达到 $(27.66\pm 1.13)\%$,展现出很高的屈服强度和很强的拉伸塑性,突破了金属材料强度和塑形不可兼得的瓶颈。另外,Pan等^[17]研究了具有单相面心立方结构的 $Al_{0.1}CoCrFeNi$ 高熵合金,通过运用一种简单、高效的小角度往复

扭转梯度塑性变形技术,在晶粒内部引入梯度纳米级位错胞结构。从样品表面至样品中部,位错密度逐渐降低,位错胞尺寸逐渐增加,实现了位错胞结构的梯度有序分布和可控制备。拉伸结果表明,梯度位错胞结构可显著提高材料屈服强度,并使其保持良好的塑性和稳定的加工硬化。

研究表明,部分共晶高熵合金也具有高强高韧的优异性能。Shi等^[18]采用定向凝固技术制备了一种共晶高熵合金,成功地协调了裂纹容限和高延伸率。该合金组织呈现出一种新型的多级共晶鱼骨结构,能够实现仿生多级裂纹缓冲,可在大量低变形组织中诱导稳定、持久的晶体形核和多个微裂纹的生长,形成相邻动态应变硬化特征的分层缓冲,避免了裂纹灾难性生长和破坏,实现了在不牺牲强度的同时具有超高的均匀拉伸延伸率,最高可达50%,是传统的非缓冲共晶高熵合金的3倍。另外,Yan等^[19]研制出了一种体心立方结构的低密度Al-Nb-Ti-Zr系高熵合金(密度小于 $7\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}$),其中 $(Zr-Ti-Nb)_{90}Al_{10}$ 和 $(Zr-Ti-Nb)_{90}Al_{20}$ (分别称为Al10和Al20)两种合金均具有超高的抗拉强度和优异的塑性,从图3可以看出其压缩屈服强度分别为978 MPa和1368 MPa,并且在压缩变形量达到50%时,仍然没有发生断裂。铸态Al10合金的拉伸屈服强度基本和压缩态相等,断裂延伸率为14.2%,由于铸造缺陷,铸态Al20合金未能得到拉伸。经过冷轧后,Al10合金的拉伸强度增加到1287 MPa,延伸率为9.1%,值得注意的是,冷轧态Al20合金的拉伸屈服强度高达1803 MPa,同时保留了8.1%的拉伸塑性,实现了强度和塑形的良好结合。

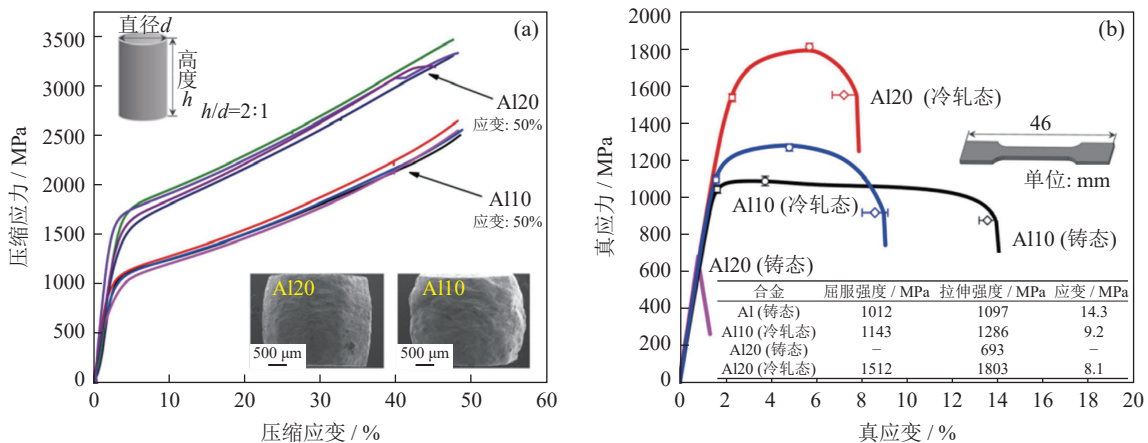


图3 $(Zr_{0.5}Ti_{0.35}Nb_{0.15})_{100-x}Al_x$ 高熵合金室温拉伸和压缩性能^[19]

Fig.3 Tensile and compressive properties of the $(Zr_{0.5}Ti_{0.35}Nb_{0.15})_{100-x}Al_x$ alloys at room temperature^[19]

2.2 磁性能和优良力学性能

传统的磁性材料都具有优异的磁性能,如硅钢、

Fe-Co合金、Fe-Ni合金等软磁材料以及钕铁硼等硬磁材料,但可加工性较差,表现出室温脆性,限

制了其应用, 特别是在机械负载功能器件上^[20]。因此, 获得一种磁性能和优良的力学性能相结合的磁性材料至关重要。

近来, 高熵软磁材料发展迅速, 它是以 Fe、Co 和 Ni 三种铁磁性元素为主, 并且微量添加一种或多种非铁磁性元素, 例如反铁磁性 Cr, 抗磁性 Cu、Si、Ga, 顺磁性 Al、Ti、Mn、Sn 等元素, 改善合金的磁性能以及力学性能, 从而得到具有优异综合性能的高熵软磁材料。Zhang 等^[21] 在 FeCoNi 合金中添加少量的 Al 和 Si 设计出了 FeCoNi(AlSi)_x 系高熵合金, 结果表明, 随着 Al、Si 含量的增多, 合金的晶格畸变增大, 显著提高了合金的电阻率。另外, 由于 Al、Si 的加入, 产生了固溶强化以及晶格畸变, 阻碍了位错的运动, 所以合金的强度和塑性都得到了提高。Zuo 等^[22] 还在 CoFeMnNi 合金

中加入了 Al、Cr、Ga、Sn 元素, 使原有的面心立方结构转变为 B2 结构, 使合金的饱和磁化强度大幅度提高, 如 CoFeMnNiAl 合金的饱和磁化强度 (M_s) 值为 $147.86 \text{ Am}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$, 并且具有优异的力学性能, CoFeMnNiGa 合金的屈服强度为 872 MPa, 延伸率为 14.81%。另外, Zhang 等^[23] 还采用磁悬浮熔炼法制备了具有面心立方结构的 $(\text{Fe}_{0.3}\text{Co}_{0.5}\text{Ni}_{0.2})_{95}(\text{Al}_{1/3}\text{Si}_{2/3})_5$ 高熵软磁合金, 如图 4 所示, 其矫顽力仅为 $96 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, 饱和磁感应强度为 1.55 T, 并且室温拉伸塑性高达 25% 以上; 之后对其进行冷轧处理及退火处理, 发现其水冷状态下合金的拉伸塑性达到 38%, 同时也具有良好的软磁性能, 矫顽力为 $130 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$, 饱和磁感应强度为 1.59 T, 实现了力学性能和磁性能双重突破。

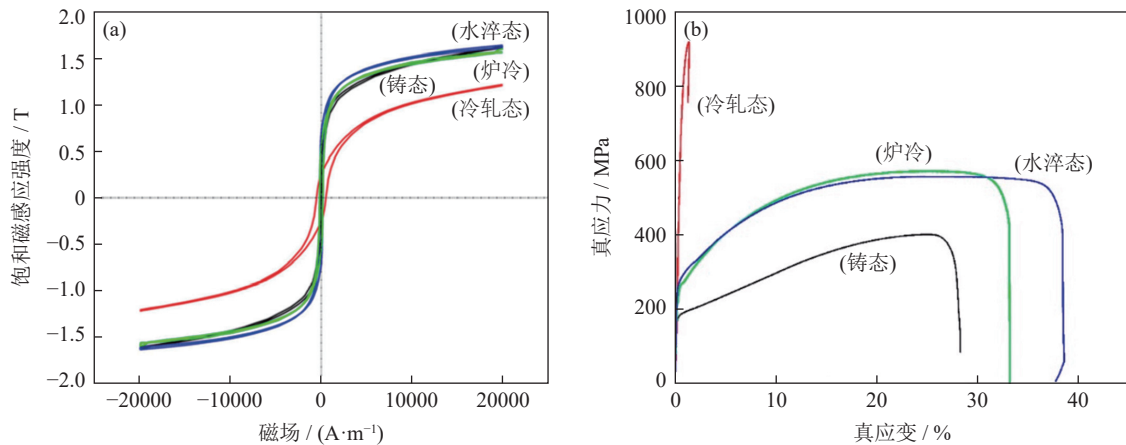


图 4 $(\text{Fe}_{0.3}\text{Co}_{0.5}\text{Ni}_{0.2})_{95}(\text{Al}_{1/3}\text{Si}_{2/3})_5$ 高熵软磁合金性能^[23]: (a) 磁性能; (b) 室温拉伸性能

Fig.4 Properties of the $(\text{Fe}_{0.3}\text{Co}_{0.5}\text{Ni}_{0.2})_{95}(\text{Al}_{1/3}\text{Si}_{2/3})_5$ high entropy soft magnetic alloys^[23]: (a) magnetic properties; (b) tensile properties at room temperature

由于布洛赫壁与可诱发硬化的缺陷之间的相互作用, 传统的强化概念通常会显著地恶化软磁性能。Han 等^[24] 研发了一种非等原子的 CoFeNiTaAl 软磁高熵合金, 其有序纳米沉淀相均匀的分布在具有面心立方结构的基体中。该种软磁高熵合金强度高, 塑性约 15%, 并且矫顽力略微增加 (小于 10.7 Oe)。合金元素对软磁材料磁性能和力学性能的调控使高熵软磁材料具有优异的软磁性能, 同时, 可以解决目前常规软磁材料的力学性能差、铸造性能不稳定的缺陷, 在电机、变压器等工业领域展现出了非常大的发展潜力。

2.3 高强度和高导电性

纯铜具有良好的导电和导热性能, 并且工艺性

能优良, 易于加工制造, 已经形成几个主要的系列合金 (Cu-Fe、Cu-Cr、Cu-Ni、Cu-Ag、Cu-Mg 系), 被广泛应用于电子电气、机械制造等工业领域。随着现代航空航天、电子技术快速发展, 对铜及铜合金的使用提出了更高要求, 需在保证良好导电、导热等物理性能基础上具有更高的强度, 尤其是良好高温力学性能, 但是, 现有牌号的铜及铜合金的强度和导电性之间存在着一种取舍关系, 难以同时具备高强度和高导电性的优异性能, 限制了其在高端工业领域的应用^[25], 因此, 解决 Cu 合金的强度和导电性之间的矛盾是一个重要任务。近期, 部分高熵合金在高强高导方向开始崭露头角, Sun 等^[26] 在主相 Cu 中引入质量分数 10% 的 WTaMoNb

高熵合金，经热压烧结后形成了具有体心立方/面心立方混合结构的复合材料，该合金材料展示了优异的热稳定性，如图 5 (d) 所示，拉伸强度高达 (758.3±20.8) MPa，并且保持了 (42.5±1.5) % IACS

的优异导电性。由此可见，高熵合金在突破强度和导电性的平衡方面具有很大的潜力，但目前高熵合金在该方向上的研究还较少，需要进一步研究。

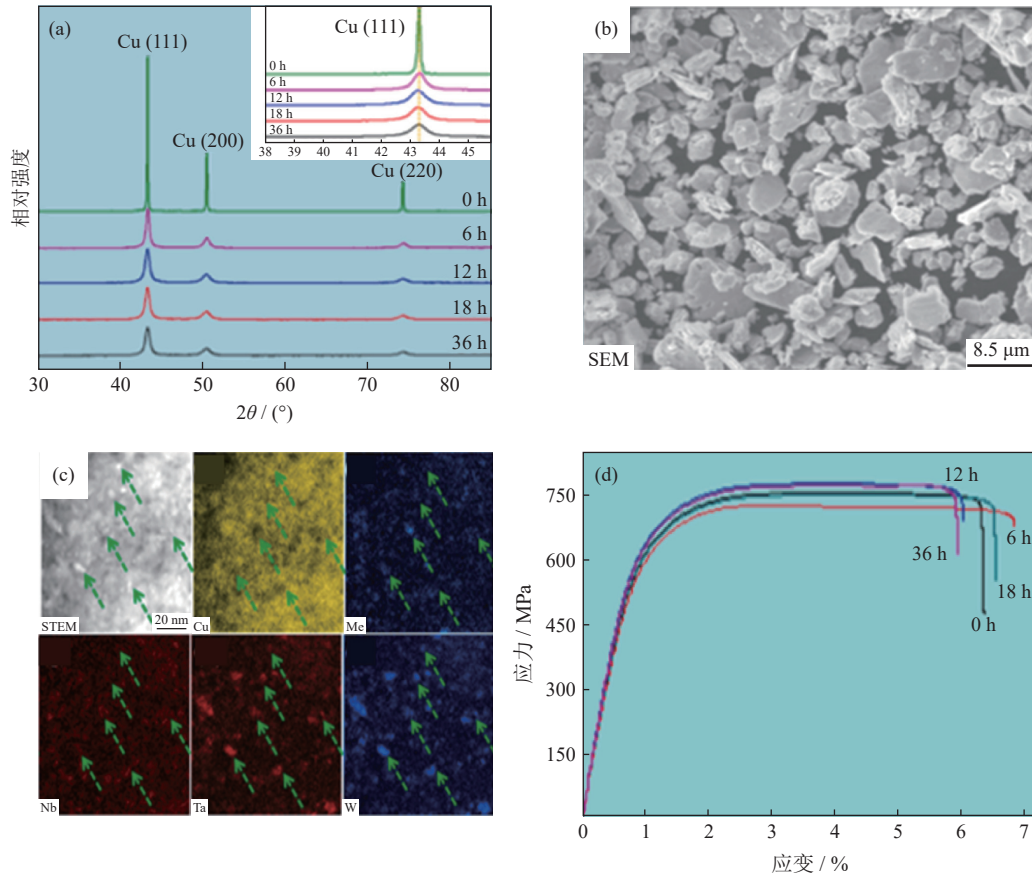


图 5 混合粉末物相 (a)、微观形貌 (b) 和成分分析 (c) 及烧结 Cu-10%W-Ta-Nb-Mo 合金拉伸性能 (d)

Fig.5 Phase (a), morphology (b), and composition (c) analyses of the milled powders and the tensile properties of the sintered Cu-10%W-Ta-Nb-Mo alloy (d)

2.4 轻质高强性能

低密度、高强度是工程应用的理想合金的追求，特别是结构应用，如航空和民用运输，控制工程组件的重量是降低能源需求的关键。轻质低密度高熵合金的密度一般小于 $6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，通常选择 Al、Li、Mg、Ti 等低密度元素进行组合^[27]。目前，已有部分相关低密度、高强度高熵合金的研究成果被报道。Li 等^[28]采用电弧熔炼法制备了密度为 $6.00 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的 $\text{Al}_{15}\text{Zr}_{40}\text{Ti}_{28}\text{Nb}_{12}\text{Mo}_5$ 高熵合金，展示出了优异的压缩力学性能，压缩屈服强度为 1.28 GPa，并且压缩塑性达到 50% 时，样品仍未发生断裂。另外，Li 和 Shao 等^[29,30]还制备了两种新型沉淀硬化的 $\text{Al}_{80}\text{Zn}_{14}\text{Li}_2\text{Mg}_2\text{Cu}_2$ 和 $\text{Al}_{85}\text{Mg}_{10.5}\text{Zn}_{2.03}\text{Cu}_{2.02}\text{Si}_{0.45}$ 五元高熵合金。其中，铸态的 $\text{Al}_{80}\text{Zn}_{14}\text{Li}_2\text{Mg}_2\text{Cu}_2$ 合

金抗压强度大于 1 GPa，塑性大于 20%，并且该合金的密度仅为 $3.08 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，具有协同强度和延展性，打破了目前高熵合金轻量化和高锌含量 Al 合金的限制，拓展了其在结构材料中的应用前景。

3 结论

高熵合金相对于传统合金来说是一个全新的概念，它的出现给材料领域带来了极大的发展空间，突破了传统合金在强度-塑形、磁性-力学性能以及强度-导电性、轻质-高强等方面的平衡关系，具有优异的力学性能和功能性能。目前对高熵合金的研究主要集中在力学性能上，在热电材料、超导材料、磁性材料等功能性材料方面上的研究较少，所以今后还需进一步加强研究。

合金的性能依赖于其化学组成, 寻找最优的化学成分, 提高其性能, 仍然是一个关键问题。然而, 高熵合金成分设计空间十分庞大, 仅通过传统的“试错法”预测合金的性能, 不可避免地会造成研究结果的偶然性和不准确性。采用第一性原理、分子动力学等材料计算模拟手段, 并结合多靶共溅射、多点分布式纳米压痕测试等高通量制备和表征技术, 有望快速且有针对性筛选出具有理想结构和性能的成分, 可大大的提高高熵合金的研究效率。

参考文献

- [1] Tsai M H, Yeh J W. High-entropy alloys: a critical review. *Mater Res Lett*, 2014, 2(3): 107
- [2] Ye Y F, Wang Q, Lu J, et al. High-entropy alloy: challenges and prospects. *Mater Today*, 2016, 19(6): 349
- [3] Zhang Y, Zuo T T, Tang Z, et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Prog Mater Sci*, 2014, 61: 1
- [4] Zhang W R, Liaw P K, Zhang Y. Science and technology in high-entropy alloys. *Sci China Mater*, 2018, 61(1): 2
- [5] Lu Y P, Dong Y, Guo S, et al. A promising new class of high-temperature alloys: eutectic high-entropy alloys. *Sci Rep*, 2014, 4: 6200
- [6] Lu Y P, Gao X Z, Jiang L, et al. Directly cast bulk eutectic and near-eutectic high entropy alloys with balanced strength and ductility in a wide temperature range. *Acta Mater*, 2017, 124: 143
- [7] Anand Sekhar R, Samal S, Nayan N, et al. Microstructure and mechanical properties of Ti-Al-Ni-Co-Fe based high entropy alloys prepared by powder metallurgy route. *J Alloys Compd*, 2019, 787: 123
- [8] Pan J Y, Dai T, Lu T, et al. Microstructure and mechanical properties of Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅ and Ti₈Nb₂₃Mo₂₃Ta₂₃W₂₃ high entropy alloys prepared by mechanical alloying and spark plasma sintering. *Mater Sci Eng A*, 2018, 738: 362
- [9] Tang Z, Senkov O N, Parish C M, et al. Tensile ductility of an AlCoCrFeNi multi-phase high-entropy alloy through hot isostatic pressing (HIP) and homogenization. *Mater Sci Eng A*, 2015, 647: 229
- [10] Chen S Y, Tong Y, Liaw P K. Additive manufacturing of high-entropy alloys: a review. *Entropy (Basel)*, 2018, 20(12): 937
- [11] Luo S C, Zhao C Y, Su Y, et al. Selective laser melting of dual phase AlCrCuFeNi_x high entropy alloys: formability, heterogeneous microstructures and deformation mechanisms. *Addit Manuf*, 2020, 31: 100925
- [12] Wang Y, Li R D, Niu P D, et al. Microstructures and properties of equimolar AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy additively manufactured by selective laser melting. *Intermetallics*, 2020, 120: 106746
- [13] Dhanaraj P S, Rathinasuriyan C. Optimization of fiber laser welding parameters for high strength aluminium alloy AA7075-T6. *Mater Today Proc*, 2021, 52: 283
- [14] Zhang Q H, Li J G, Jiang K, et al. Gradient structure induced simultaneous enhancement of strength and ductility in AZ31 Mg alloy with twin-twin interactions. *J Magnesium Alloys*, 2021, 10: 014
- [15] Li Z M, Pradeep K G, Deng Y, et al. Metastable high-entropy dual-phase alloys overcome the strength-ductility trade-off. *Nature*, 2016, 534(7606): 227
- [16] Lei Z F, Liu X J, Wu Y, et al. Enhanced strength and ductility in a high-entropy alloy via ordered oxygen complexes. *Nature*, 2018, 563(7732): 546
- [17] Pan Q S, Zhang L X, Feng R, et al. Gradient-cell-structured high-entropy alloy with exceptional strength and ductility. *Science*, 2021, 374(6570): 984
- [18] Shi P J, Li R G, Li Y, et al. Hierarchical crack buffering triples ductility in eutectic herringbone high-entropy alloys. *Science*, 2021, 373(6557): 912
- [19] Yan X H, Liaw P K, Zhang Y. Ultrastrong and ductile BCC high-entropy alloys with low-density via dislocation regulation and nanoprecipitates. *J Mater Sci Technol*, 2022, 110: 109
- [20] Chaudhary V, Mantri S A, Ramanujan R V, et al. Additive manufacturing of magnetic materials. *Prog Mater Sci*, 2020, 114: 100688
- [21] Zhang Y, Zuo T T, Cheng Y Q, et al. High-entropy alloys with high saturation magnetization, electrical resistivity and malleability. *Sci Rep*, 2013, 3(1): 1
- [22] Zuo T T, Gao M C, Ouyang L Z, et al. Tailoring magnetic behavior of CoFeMnNi_x (x=Al, Cr, Ga, and Sn) high entropy alloys by metal doping. *Acta Mater*, 2017, 130: 10
- [23] Zhang Y, Zhang M, Li D Y, et al. Compositional design of soft magnetic high entropy alloys by minimizing magnetostriction coefficient in (Fe_{0.3}Co_{0.5}Ni_{0.2})_{100-x}(Al_{1/3}Si_{2/3})_x system. *Metals*, 2019, 9(3): 382
- [24] Han L L, Rao Z Y, Souza Filho I R, et al. Ultrastrong and ductile soft magnetic high-entropy alloys via coherent ordered nanoprecipitates. *Adv Mater*, 2021, 33(37): 2102139
- [25] Kim H, Ahn J H, Han S Z, et al. Microstructural characterization of cold-drawn Cu-Ni-Si alloy having high strength and high conductivity. *J Alloys Compd*, 2020, 832: 155059
- [26] Sun C F, Guo Y C, Yang Z, et al. Microstructurally stable nanocomposite WTaMoNb/Cu prepared by mechanical alloying and hot pressing sintering. *Mater Lett*, 2022, 306: 130894
- [27] Li Y S, Zhang Y. Light-weight and flexible high entropy alloys // *High Entropy Alloys*. London: IntechOpen Limited, 2019: 1
- [28] Li Y S, Liaw P K, Zhang Y. Microstructures and properties of the low-density Al₁₅Zr₄₀Ti₂₈Nb₁₂M(Cr, Mo, Si)₅ high-entropy alloys. *Metals*, 2022, 12(3): 496
- [29] Li R X, Zheng R, Wu Y, et al. Mechanical behaviors and precipitation transformation of the lightweight high-Zn-content Al-Zn-Li-Mg-Cu alloy. *Mater Sci Eng:A*, 2021, 802: 140637
- [30] Shao L, Zhang T, Li L, et al. A low-cost lightweight entropic alloy with high strength. *J Mater Eng Perform*, 2018, 27(12): 6648