

高熵合金的制备方法及其应用进展*

李梦娇,董应虎,张瑞卿,钟永录,胡满银,杨世松

(南昌航空大学材料科学与工程学院,南昌 330063)

[摘要] 相比传统合金,高熵合金具有突出的物理、磁化、化学和机械性能,在过去的几十年中,高熵合金已经成为材料科学领域发展较快的研究方向,具有广泛的应用前景。重点综述了高熵合金制备方法的研究进展及优缺点,分析了其组织结构和优良性能的应用,并对未来的研究方向进行了总结。

关键词: 高熵合金(HEAs);制备技术;机械合金化(MA);电弧熔炼(VAM);激光熔覆

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.22.058



李梦娇

硕士研究生,主要研究方向为粉末冶金材料及高熵合金材料。

早在几千年前,人们就开始使用金属来制备工具,随着社会的进步发展,单一金属的性能已经不能满足需求,因此,人类尝试在单一金属中添加一种或少量的其他元素,制备出了传统的合金,如钢、青铜、铝合金、铜合金、锌合金、钛合金等^[1]。合金的生成常会改变元素单质的性质,如密度、导电性、导热性及抗拉强度等。但在某些条件下,这种合金的热力学性能并不稳定,当施加高温时,可能发生相变,导致操作性能的劣化。为了改善材料的结构与性能,一种全新的合金化概念被提出,称为高熵合金(HEAs),这些新材料通常是由等摩尔或者近似等摩尔浓度的 n (通常 $n \geq 5$)种元素组合而成,每一种元素的浓度在5%~35%之间,后来又提出了HEAs的另一种定义,即当合金的熵大于 $1.5R$ (R 为气体常数)时,合金被划分为HEAs^[2-6]。从这两个定义可以看出,HEAs设计的基本原则是具有较高的混合熵,以稳定固溶相,而不形成复杂的金属间相^[7-8]。

因此,尽管这些合金的成分可能很复杂,但其微观结构却很简单。显然,这一理论为探索、发现和开发新型结构和功能应用的合金提供了巨大的机会^[9]。本文就高熵合金的制备技术及性能等方面的最新研究进行了综述,展望了HEAs的发展趋势,为高熵合金的开发提供一定的参考。

高熵合金的制备方法及其特点

虽然有许多研究学者已经制备出了不同体系的HEAs,但对于HEAs的制备方法,还未形成比较科学的理论系统。而目前HEAs的制备方法大多数是以传统合金的制备理论为基础,主要包括机械合金化、电弧熔炼法、激光熔覆法等,每种方法都有优缺点^[10-11]。

1 机械合金化法

MA是一种固态粉末加工技术,是指将混合元素或预合金粉末与研磨介质(通常为不锈钢球)一起装入

* 基金项目:国家自然科学基金(51264033);江西省自然科学基金(20151BAB206012);江西省教育厅科技项目(GJJ170585)。

球磨罐中,在预定时间内进行高速球磨。在此过程中,粉末颗粒反复被压扁、冷焊、断裂和重新焊接,促使元素粉末之间发生合金化,并在加工结束时获得均匀的合金^[12-13]。其试验装置的示意图如图1^[14]所示。MA也是制备纳米HEAs最广泛采用的方法之一。与其他方法相比,MA能够形成具有均匀化学成分的微观结构^[15]。MA是用纯粉末在合金化过程中合成平衡、非平衡或非晶态材料,与铸态材料相比,该材料表现出更好的力学性能,因为在MA过程中的冷焊接、元素扩散、变形强化和新合成阶段的连续压裂抑制了不良晶粒的生长,使晶粒尺寸减小,缓解了材料内部化学成分不均一性的问题,从而可以使合金的机械性能得到改善。室温下均匀相固溶体的形成是MA优于铸造的主要优点,特别是在初始成分熔点差异较大的多组分合金中。然而,使用MA生产HEAs也存在一些缺点,如球磨过程中的污染和高氧化倾向等。

Liu等^[16]通过MA和真空热压烧结成功制备了 $\text{FeCoCrNiMnTi}_{0.1}\text{C}_{0.1}$ HEAs,研究了烧结温度对组织和力学性能的影响。结果表明:

$\text{FeCoCrNiMnTi}_{0.1}\text{C}_{0.1}$ 合金的显微组织主要由基体相FCC相和少量的 M_{23}C_6 、 M_7C_3 和 TiMnO_3 相组成。在烧结温度为 900°C 时,合金显示出优异的机械性能,其屈服强度和硬度分别达到 1652MPa 和 461HV 。Yurkova等^[15]采用MA法制备了纳米晶等原子 AlCuNiFeCr HEAs粉体,得到具有BCC晶体结构的过饱和固溶体。球磨处理1~5h内可形成BCC固溶体结构。球磨1h后,平均微晶尺寸接近 60nm ;球磨5h后,微晶尺寸降至约 17nm 。X射线衍射分析、扫描和透射显示,在 AlCuNiFeCr 内合金形成过程中组分的溶解系统可能按以下顺序发生: $\text{Al}\rightarrow\text{Cu}\rightarrow\text{Ni}\rightarrow\text{Fe}\rightarrow\text{Cr}$ 。在 800°C 退火和放电等离子体烧结后,合金变为三相,分别为 B_2 有序固溶体、FCC固溶体和 $(\text{Cr, Fe})_{23}\text{C}_6$ 相。 AlCuNiFeCr 合金经烧结后的维氏硬度为 8.35GPa ,室温下的抗压强度达到 1960MPa 。Oleszak等^[17]采用MA法成功合成了高熔点多组分 WMoNbZrV HEAs。在球磨20h后,得到了具有纳米晶单相BCC固溶体结构,其特征最小晶粒尺寸约为 10nm ,最大晶格应变为 0.58% ,晶格参数为 3.1687 。Pan

等^[18]通过MA和放电等离子烧结技术成功地制备了 $\text{Nb}_{25}\text{Mo}_{25}\text{Ta}_{25}\text{W}_{25}$ 和 $\text{Ti}_8\text{Nb}_{23}\text{Mo}_{23}\text{Ta}_{23}\text{W}_{23}$ 耐火HEAs。球磨60h后,两种HEAs的研磨粉末表现出稳定的单相BCC纳米晶体结构,其平均微晶尺寸约为 10nm 。在放电等离子烧结工艺之后,两种合金的晶粒尺寸小于 $1\mu\text{m}$ 。 $\text{Nb}_{25}\text{Mo}_{25}\text{Ta}_{25}\text{W}_{25}$ HEAs的抗压屈服强度、断裂应变和维氏硬度分别为 2460MPa 、 16.8% 和 7.78GPa ,优于采用真空电弧熔炼法制备的相同合金。添加Ti可以进一步提高 $\text{Ti}_8\text{Nb}_{23}\text{Mo}_{23}\text{Ta}_{23}\text{W}_{23}$ HEAs的压缩性能,其中断裂应变和最大压缩应力分别增加了 56.5% 和 10.7% 。

2 电弧熔炼法

电弧熔炼(VAM)是目前块体高熵合金最普遍使用的制备方法,其主要过程是把一定比例的金属材料放入钎锅内,然后对真空炉重复抽取真空后,充入保护气体氩气^[19],通过电极的等离子弧加热使元素均熔化后,受水冷铜急速冷却的影响而凝固成合金,其工艺示意图如图2^[20]所示。在该方法下大部分高熔点的金属元素,都能很好地熔化并相互混合^[21]。由于在熔炼过程中较低熔点的金属元

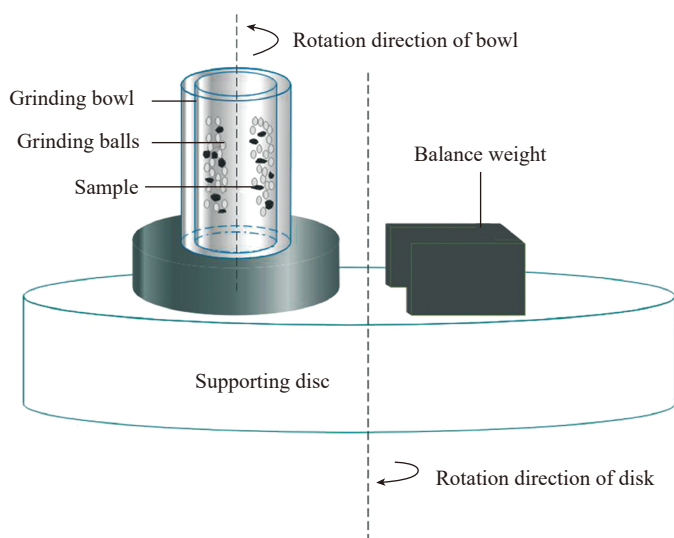


图1 试验装置示意图

Fig.1 Schematic of experimental apparatus

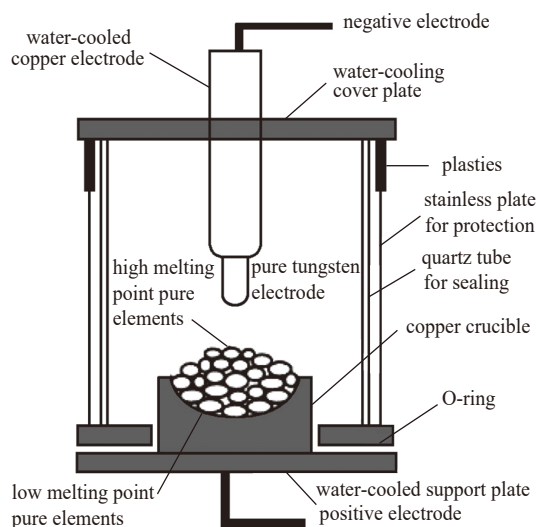


图2 电弧熔炼法示意图

Fig.2 Schematic diagram of vacuum arc melting method

素比较容易挥发,难以与高熔点金属元素实现较好的混合,因此,该方法不太适合较低熔点的金属元素,并且在熔融液体向固体过渡过程中会产生偏析或共晶的现象,造成成分的不均匀性。

Hou 等^[22]通过 VAM 制备了 AlFeCoNiB_x ($x=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$) HEAs, 研究了 B 对合金微观结构和力学行为的影响。XRD 和 EPMA 结果表明:少量 B 原子溶解在 B_2 基体中,其他 B 原子导致 FCC 相的形成。随着 B 含量的增加,其微结构从纯 B_2 相转变为“ B_2 相 + 颗粒 FCC 结构”,然后转变为“ B_2 相 + 共晶结构”,并且 B_2 相的晶粒尺寸先减小后增大。通过将 B 含量从 0 增加到 0.2,其屈服强度、断裂强度和塑性应变分别从 805MPa、850MPa 和 0.07 增加到 1253MPa、2293MPa 和 0.27。屈服强度的增加是由于 B 原子的固溶强化和细晶强化。而可塑性的增加是由于 FCC 共晶结构的形成。Chen 等^[23]通过 VAM 和铜注射快速凝固制备了 $\text{Al}_{0.4}\text{CoCu}_{0.6}\text{NiSi}_x$ ($x=0, 0.05, 0.1, 0.2$) HEAs, 分析了其微观结构及强化机理。结果表明: $\text{Al}_{0.4}\text{CoCu}_{0.6}\text{NiSi}_x$ HEAs 的微观结构是典型的柱状枝晶,铜注射快速凝固后的分枝取向是无序的。随着微量

Si 的增加,新的 BCC 相逐渐沉淀,枝晶茎的长度减小,枝晶臂的宽度和枝晶粒度同时下降。合金的强化机理是固溶强化、新 BCC 相的形成和细晶强化。对于 3 种强化效应的作用, Si 微合金化的新型 BCC 相的强化效果大于快速冷却的细晶强化效应,大于 Si 微合金化的固溶强化效应。Zhang 等^[24]通过 VAM 制备了等摩尔耐火 HEAs NbZrTiCrAl ,研究了合金在 800°C、1000°C 和 1200°C 下的显微组织和氧化反应。该合金主要由 BCC 单相固溶体组成,具有典型的枝晶和枝晶间结构。在 800°C 和 1000°C 下遵循抛物线氧化动力学,其合金中具有致密和均匀的结构,在 1200°C 下为线性氧化动力学,其合金中具有多孔性和层状结构。

3 激光熔覆法

激光熔覆法是制备涂层材料最常用的方法之一,它是将激光技术、控制系统和计算机辅助制造(CAM)结合在一起的一种跨学科技术。在激光熔覆中使用激光束热源,在其作用下,预先放置或同步进给的粉末以及基底的薄层将快速熔化和固化,与基底形成冶金结合^[19]。其工艺示意图如图 3^[25]所示。激光熔覆具有许多优点,例如加热和冷却速度快、与基底的粘附力强、形状变化很小、显

微组织细小均匀,基体的固溶性提高等^[26-27],并且由于熔覆过程中激光辐射的能量影响区较小,基体材料的熔化量很小,从而使得熔覆层的稀释率较小,这样,既能使原包层材料获得优良的性能,又能使基板的热效应降到最低。因此,既能满足材料表面使用的要求,又不改变材料的整体特性。

Zhang 等^[28]通过激光熔覆制备了 6FeNiCoSiCrAlTi HEAs 涂层,该涂层具有简单 BCC 固溶体相结构。激光熔覆快速凝固过程大大减轻了 6FeNiCoSiCrAlTi 涂层的成分偏析,并通过晶粒细化、固溶和纳米级结构提高了显微硬度,其显微硬度达到 780HV,比通过其他方法制备的大多数 HEAs 要高得多。此外,涂层还表现出优异的软磁性能。Qiu 等^[29]通过激光熔覆法制备了 AlCrFeCuCo HEAs,采用扫描电子显微镜、X 射线衍射仪和电化学工作站研究了其微观结构和耐腐蚀性。结果表明: HEAs 相主要由 FCC 和 BCC 固溶体相组成,该合金具有优异的耐腐蚀性,随着扫描速度的提高,合金耐蚀性能先增强后减弱。 AlCrFeCuCo HEAs 在 1mol/L NaCl 溶液中的耐腐蚀性能优于 0.5mol/L H_2SO_4 溶液。Lin 等^[30]通过激光熔覆制备 FeCoCrNiAlB_x ($x=0, 0.25, 0.50, 0.75$) HEAs 涂层,研究 B 对高熵合金涂层结构和性能的影响,结果表明:高熵合金由 BCC 相和共晶组织($\text{FCC}+\text{M}_2\text{B}$)组成,随着 B 含量的增加,BCC 相含量增加,共晶结构含量降低,并且高熵涂层的耐磨性显著提高, $\text{FeCoCrNiAlB}_{0.75}$ 涂层显示出最佳的耐磨性。

高熵合金的组织

由于高配置熵的作用, HEAs 倾向于形成简单固溶体结构,例如 FCC、BCC 或 $\text{FCC}+\text{BCC}$ 结构。根据已报道的 HEAs,尽管其具有诸多优良的性能,然而,在单相 HEAs

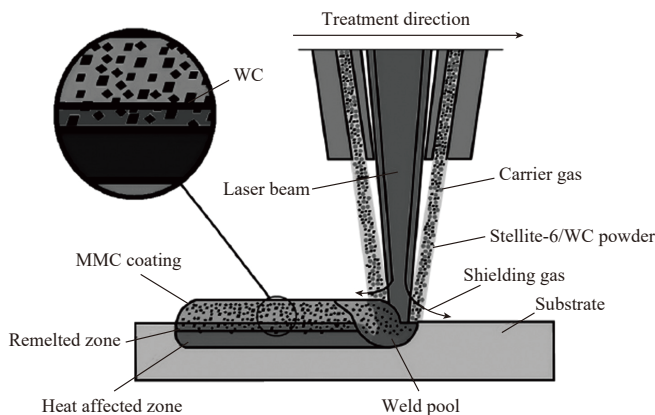


图3 激光熔覆工艺示意图
Fig.3 Schematic diagram of laser cladding process

中似乎难以实现同时具有高强度和高延展性能。如 $\text{FeMnNiCoCr}^{[31]}$ 和 $\text{Ti}_{30}\text{Al}_{20}\text{V}_{20}\text{Nb}_{20}\text{Mo}_{10}^{[32]}$, 前者为单相 FCC 固溶体结构, 其总断裂伸长率为 58%, 但在室温下的屈服强度却只达到 95MPa, 后者为单相 BCC 固溶体结构, 其屈服强度达到 1200MPa, 但其断裂应变却在 10% 以下。为了获得具有高强度和优异延展性的 HEAs, 科学家们已经提出并设计了具有双相结构的 HEAs。如 Wu 等^[33] 通过真空电弧炉制备了共晶 $\text{Ni}_{30}\text{Co}_{30}\text{Cr}_{10}\text{Fe}_{10}\text{Al}_{18}\text{W}_2$ HEAs, 该 HEAs 具有 FCC+ 有序的 BCC (B_2) 相结构。在铸态下, 其拉伸强度为 1266.5MPa, 伸长率为 20.3%。与其他传统合金和单相 HEAs 相比, 该合金较好地实现了强度和延展性之间的良好平衡。除此之外, 还有一些其他结构的 HEAs, 如 $\text{HoDyYGdTb}^{[34]}$ 具有六方晶体结构, $\text{GdHoLaTbY}^{[35]}$ 为单相 HCP 结构, 而 GdHoLaTbYDy 主要为 HCP 结构, 其中夹杂着少量的 FCC 结构。据目前的研究发现, HCP 结构的 HEAs 组元主要由稀土元素和贵金属元素组成, 某些 FCC 结构的 HEAs 通过特殊处理后也会转变为 HCP 结构。

高熵合金的应用

由于独特的设计理念, 相比于传统的合金, 人们发现 HEAs 具有许多突出的应用性能, 例如高温下优异的机械性能、低温下的断裂韧性以及优异的耐腐蚀性能等。这些性能有望用于未来的新发现和新发明, 最终可能会带来新的应用。

1 高温性能的应用

无论何种类型, 热机的效率随着温度的升高而增加。在诸如核能、燃煤和燃油等发电行业中, 工作温度的升高可以降低燃料消耗、污染和运行成本。在喷气发动机工业中, 工作温度的增加可使性能改进, 例如更重

的有效载荷、更大的速度和更大的范围的组合^[36]等。目前发动机主要部件材料的开发还是集中在 Ni 基高温合金材料上, 但由于其初始熔点大约在 1300°C, 镍基高温合金适用于温度仅在 1160~1277°C 之间^[37]。因此, 开发具有更优异高温性能的发动机部件材料变得至关重要。Senkov 等^[38] 通过真空电弧熔炼制备了两种具有与 Ni 基高温合金相似的微观结构耐火高熵合金 NbMoTaW 和 VNbMoTaW。试验表明这两种耐火 HEAs 在 1600°C 时的屈服强度超过 400MPa, 这远高于 Inconel 718 Ni 基高温合金在 1000°C 的屈服强度(低于 200MPa)。热机的开发需要进一步改善发动机部件材料的高温性能。与 Ni 基高温合金相比, HEAs 在高温下具有更高的稳定性、更低的成本和密度、正的晶格失配, 这表明这些合金由于具有吸引人的高温机械性能, 有可能取代 Ni 基高温合金作为下一代高温材料。

2 断裂韧性的应用

材料的断裂往往关乎着安全的问题, 一般来说, 根据失效应变可以分为脆性和韧性断裂。脆性断裂没有塑性变形的迹象, 通常以灾难性方式发生, 开发具有卓越性能的新型金属材料具有重要意义。据报道, 当温度从 298K 下降到 77K 时, $\text{CrMnFeCoNi}^{[39]}$ HEAs 的断裂韧性几乎保持恒定, 而 $\text{CrCoNi}^{[40]}$ MEAs 的断裂韧性略微增加。 $\text{Al}_{0.1}\text{CoCrFeNi}$ 和 $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}^{[41]}$ HEAs 的冲击能量随着温度下降而降低, 并且以近似线性的方式, 较为缓和。在这些 HEAs 中, 没有出现像钢、非晶合金、镁合金、多孔金属和纳米金属等许多传统合金那样尖锐的脆脆转变, 这表明这些合金可能是极端寒冷条件下应用的优良候选材料, 例如, 用于船体、飞机和低温储存罐的材料等。

3 耐腐蚀性的应用

我国每年因腐蚀而引起的材料浪费极其严重, 研究和开发具有耐腐蚀性较好的材料对资源的节省具有重要意义。Zhang 等^[42] 通过激光表面合金化方法, 在 304 不锈钢上制备了具有良好冶金结合性能的 FeCoCrAlNi HEAs 涂层, 试验结果表明 FeCoCrAlNi 涂层的显微硬度是 304 不锈钢的 3 倍, 在 3.5% 的 NaCl 溶液中, 其抗空蚀性能是 304 不锈钢的 7.6 倍左右, 电流密度比 304 不锈钢降低了一个数量级。Ye 等^[43] 采用激光表面合金化的方法制备了 CrMnFeCoNi HEAs 涂层, 并在 3.5% 的 NaCl 和 0.5mol/L H_2SO_4 溶液中进行电位动态极化试验, 结果表明 HEAs 涂层的耐蚀性能均优于 A36 钢基体, 腐蚀电流甚至低于 304 不锈钢。高熵合金作为一种新开发的多主元合金, 超越了基于单一多数主体元素的传统合金的设计限制^[44], 具有提高耐腐蚀性的潜力。这表明这些具有优异的内在耐腐蚀性的新型合金, 在恶劣环境的应用中具有巨大的经济和安全益处。

结论

高熵合金的出现给材料领域带来了极大的发展空间, 打破了一些传统合金性能的极限, 自从其被提出以来一直受到科学家的关注, 近年来, 虽然高熵合金的研究取得了一定的成果, 但对整个 HEAs 领域的认识还不够成熟, 本文重点分析了高熵合金制备方法的研究进展, 讨论了高熵合金的组织形成及性能方面的应用, 其未来的发展趋势可以总结为以下几点:

(1) 由于现有的理论与设备主要是基于对含有一两个主要元素的传统材料的研究, 缺乏更加基础的科学研究以及指导体系。

(2) 目前对于高熵合金体系的组成主要是集中在过渡族金属元素, 为了探索一些新的组织形成, 需要对

有潜在价值的合金系统进行更多的研究,以获得更好的性能,节省成本、能源和资源。

(3) 高熵合金材料的性能在特殊情况下,仍然受到一定的限制。对传统合金或材料所不能达到的性能的研究具有重要价值,如室温超导体、超高温合金性能以及具有极高热硬度和较长使用寿命的工具。

(4) 高熵合金中混合熵的贡献、晶格畸变、磨损、腐蚀和氧化等的机制和理论是否只是传统合金的简单延伸,值得进一步研究与探讨。

参考文献

- [1] 安继儒,田龙刚.金属材料手册[M].北京:化学工业出版社,2008:46-936.
- AN Jiru, TIAN Longgang. Metal materials manual[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 46-936.
- [2] MIRACLE D B, SENKOV O N. A critical review of high entropy alloys (HEAs) and related concepts[J]. Acta Materialia, 2017, 122: 448-511.
- [3] LI Z, ZHAO S, RITCHI E, et al. Mechanical properties of high-entropy alloys with emphasis on face-centered cubic alloys[J]. Progress in Materials Science, 2019, 102: 296-345.
- [4] GORSSE S, COUZINIÉ J P, MIRACLE D B. From high-entropy alloys to complex concentrated alloys[J]. Comptes Rendus Physique, 2018, 19(8): 721-736.
- [5] 赵雪柔,吕煜坤,石拓.高熵合金相形成理论研究进展[J].材料导报,2019,33(7):1174-1181.
- ZHAO Xuerou, LÜ Yukun, SHI Tuo. Advances in the study of phase formation theory of high entropy alloys[J]. Materials Reports, 2019, 33(7): 1174-1181.
- [6] 叶均蔚,陈瑞凯,林树均.高熵合金的发展概况[J].工业材料杂志,2005,24:71-74.
- YE Junwei, CHEN Ruikai, LIN Shujun. Overview of the development of high entropy alloys[J]. Journal of Industrial Materials, 2005, 24: 71-74.
- [7] ZHOU Y, ZHOU D, JIN X, et al. Design of non-equiatomic medium-entropy alloys[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 12-36.
- [8] ZHANG L S, MA G L, FU L C, et al. Recent progress in high-entropy alloys[J]. Advanced Materials Research, 2013, 631-632: 227-232.
- [9] SENKOV O N, WILKS G B, MIRACLE D B, et al. Refractory high-entropy alloys[J]. Intermetallics, 2010, 18(9): 1758-1765.
- [10] ZHANG Y, ZUO T T, TANG Z, et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys[J]. Program Materials Scientist, 2014, 61: 24-30.
- [11] 陈永星,朱胜,王晓明,等.高熵合金制备及研究进展[J].材料工程,2017(11):133-142.
- CHEN Yongxing, ZHU Sheng, WANG Xiaoming, et al. Progress in preparation and research of high entropy alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2017(11): 133-142.
- [12] SURYANARAYANA C, AL-AQEELI N. Mechanically alloyed nanocomposites[J]. Progress in Materials Science, 2013, 58(4): 383-502.
- [13] CHEN Y L, TSAI C W, JUAN C C, et al. Amorphization of equimolar alloys with HCP elements during mechanical alloying[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 506(1): 210-215.
- [14] TIAN Y, LU C, SHEN Y, et al. Microstructure and corrosion property of CrMnFeCoNi high entropy alloy coating on Q235 substrate via mechanical alloying method[J]. Surfaces and Interfaces, 2019, 15: 135-140.
- [15] YURKOVA A, CHERNIAVSKY V, BOLBUT V, et al. Structure formation and mechanical properties of the high-entropy AlCuNiFeCr alloy prepared by mechanical alloying and spark plasma sintering[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 786: 139-148.
- [16] LIU X Q, CHENG H, LI Z J, et al. Microstructure and mechanical properties of FeCoCrNiMnTi_{0.1}Co_{0.1} high-entropy alloy produced by mechanical alloying and vacuum hot pressing sintering[J]. Vacuum, 2019, 165: 297-304.
- [17] OLESZAK D, ANTOLAK-DUDKA A, KULIK T. High entropy multicomponent WMoNbZrV alloy processed by mechanical alloying[J]. Materials Letters, 2018, 232: 160-162.
- [18] PAN J, 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[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 738: 362-366.
- [19] 曹海洋. Al₁Co_xCrFeNiV_{0.3}Ti₂多主元合金的组织与性能研究[D].西安:西安理工大学,2018.
- CAO Haiyang. Study on microstructure and properties of Al₁Co_xCrFeNiV_{0.3}Ti₂ multi-component alloys[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [20] 李工,崔鹏,张丽军,等.高熵合金研究现状[J].燕山大学学报,2018,42(2):4-13.
- LI Gong, CUI Peng, ZHANG Lijun, et al. Current studies of high entropy alloys[J]. Journal of Yanshan University, 2018, 42(2): 4-13.
- [21] 张敏,张勇,乔琨威.高熵合金腐蚀性能研究进展[J].太原理工大学学报,2017,48(3):364-370.
- ZHANG Min, ZHANG Yong, QIAO Junwei. Recent progress in corrosion properties of high entropy alloys[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2017, 48(3): 364-370.
- [22] HOU L, HUI J, YAO Y, et al. Effects of boron content on microstructure and mechanical properties of AlFeCoNiB_x high entropy alloy prepared by vacuum arc melting[J]. Vacuum, 2019, 164: 212-218.
- [23] CHEN Y, ZHU S, WANG X, et al. Microstructure evolution and strengthening mechanism of Al_{0.4}CoCu_{0.6}NiSi_x (x=0-0.2) high entropy alloys prepared by vacuum arc melting and copper injection fast solidification[J]. Vacuum, 2018, 150: 84-95.
- [24] ZHANG P, LI Y, CHEN Z, et al. Oxidation response of a vacuum arc melted NbZrTiCrAl refractory high entropy alloy at 800-1200°C[J]. Vacuum, 2019, 162: 20-27.
- [25] BARTKOWSKI D, MLYNARCZAK A, PIASECKI A, et al. Microstructure, microhardness and corrosion resistance of Stellite-6 coatings reinforced with WC particles using laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 68: 191-201.
- [26] ZHANG S, WU C L. Synthesis and characterization of FeCoCrAlCu high entropy alloy coating by laser surface alloying [J]. Surface Coatings Technology, 2015, 262: 64-69.
- [27] 刘承鑫,叶宏,唐朝.激光熔覆 AlCrCoMnNiFe 合金涂层及性能研究[J].热加工工艺,2017(8):162-165.
- LIU Chengxin, YE Hong, TANG

- Chao. Research on laser cladding AlCrCoMnNiFe coating and its properties[J]. Hot Working Technology, 2017(8): 162–165.
- [28] ZHANG H, PAN Y, HE Y, et al. Microstructure and properties of 6FeNiCoSiCrAlTi high-entropy alloy coating prepared by laser cladding[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(6): 2259–2263.
- [29] QIU X W, ZHANG Y P, HE L, et al. Microstructure and corrosion resistance of AlCrFeCuCo high entropy alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 549: 195–199.
- [30] LIN D Y, ZHANG N N, HE B, et al. Tribological properties of FeCoCrNiAlB_x high-entropy alloys coating prepared by laser cladding[J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2017, 24(2): 184–189.
- [31] YAO M J, PRADEEP K G, TASAN C C, et al. A novel, single phase, non-equiatom FeMnNiCoCr high-entropy alloy with exceptional phase stability and tensile ductility[J]. Scripta Materialia, 2014, 72–73: 5–8.
- [32] XU Z Q, CHENG X W, WANG M, et al. Design of novel low-density refractory high entropy alloys for high temperature applications[J]. Materials Science and Engineering, 2019, 755: 318–322.
- [33] WU Q, WANG Z, ZHENG T, et al. A casting eutectic high entropy alloy with superior strength-ductility combination[J]. Materials Letters, 2019, 253: 268–271.
- [34] FEUERBACHER M, HEIDELMANN M, THOMAS C. Hexagonal high-entropy alloys[J]. Materials Research Letters, 2015, 3(1): 1–6.
- [35] 赵亚杰. 密排六方结构稀土高熵合金及其力学性能[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- ZHAO Yajie. Rare earth high entropy alloys in hexagonal close-packed structure and the mechanical properties[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.
- [36] PINEAU A, ANTOLOVICH S D. High temperature fatigue of nickel-base superalloys—A review with special emphasis on deformation modes and oxidation[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(8): 2668–2697.
- [37] CHEN J, ZHOU XY, WANG WL, et al. A review on fundamental of high entropy alloys with promising high-temperature properties[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2018, 760: 15–30.
- [38] SENKOV O N, WILKS G B, SCOTT J M, et al. Mechanical properties of Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅ and V₂₀Nb₂₀Mo₂₀Ta₂₀W₂₀ refractory high entropy alloys[J]. Intermetallics, 2011, 19(5): 698–706.
- [39] GLUDOVATZ B, HOHENWARTER A, CATOOR D, et al. A fracture-resistant high-entropy alloy for cryogenic applications[J]. Science, 2014, 345: 1153–1158.
- [40] GLUDOVATZ B, HOHENWARTER A, THURSTON K V S, et al. Exceptional damage-tolerance of a medium-entropy alloy CrCoNi at cryogenic temperatures[J]. Nature Communications, 2016, 7: 10602.
- [41] LI D Y, ZHANG Y. The ultrahigh charpy impact toughness of forged Al₃CoCrFeNi high entropy alloys at room and cryogenic temperatures[J]. Intermetallics, 2016, 70: 24–28.
- [42] ZHANG S, WU C L, ZHANG C H, et al. Laser surface alloying of FeCoCrAlNi high-entropy alloy on 304 stainless steel to enhance corrosion and cavitation erosion resistance[J]. Optics & Laser Technology, 2016, 84: 23–31.
- [43] YE Q, FENG K, LI Z, et al. Microstructure and corrosion properties of CrMnFeCoNi high entropy alloy coating[J]. Applied Surface Science, 2017, 396: 1420–1426.
- [44] LI T, SWANSON O J, FRANKEL G S, et al. Localized corrosion behavior of a single-phase non-equimolar high entropy alloy[J]. Electrochimica Acta, 2019, 306: 71–84.

通讯作者: 董应虎, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为先进粉末冶金材料及技术研究, E-mail: niatdyh1@163.com。

Preparation and Application Progress of High Entropy Alloys

LI Mengjiao, DONG Yinghu, ZHANG Ruiqing, ZHONG Yonglu, HU Manyin, YANG Shisong
(School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

[ABSTRACT] Compared with traditional alloys, high entropy alloys have outstanding physical, magnetization, chemical and mechanical properties. In the past decades, high-entropy alloys have become a fast developing research direction in the field of materials science, and have a wide application prospect. The research progress, advantages and disadvantages of preparation methods of high-entropy alloys are reviewed, its organizational structure and excellent performance application are analyzed, and the future research directions are summarized.

Keywords: High entropy alloys (HEAs); Preparation technique; Mechanical alloying (MA); Vacuum arc melting (VAM); Laser cladding

(责编 大漠)