

## 高熵合金制备及应用研究进展\*

宫书林,李艳春,张 煜,宋美慧,李 岩

(黑龙江省科学院 高技术研究院,黑龙江 哈尔滨 150000)

**摘 要:**本文对高熵合金及其粉体的制备方法、高熵合金的力学性能、耐腐蚀性和热稳定及抗氧化性进行了综述,并对高熵合金的应用前景进行了总结和展望。为进一步丰富高熵合金的制备技术及优化合金性能提供了理论依据。

**关键词:**高熵合金;增材制造;热等离子球化;力学性能

**中图分类号:**TB331

**文献标识码:**A

## Research progress on the preparation and application of high entropy alloys\*

GONG Shu-lin, LI Yan-chun, ZHANG Yu, SONG Mei-hui, LI Yan

(Institute of Advanced Technology, Heilongjiang Academy of Sciences, Harbin 150000, China)

**Abstract:** This article reviews the preparation methods of high-entropy alloys and their powders, and the mechanical properties, corrosion resistance, thermal stability, and oxidation resistance of high-entropy alloys, and summarizes and prospects their application potential. It also provides a theoretical basis for further enriching the preparation technologies of high-entropy alloys and optimizing the alloy properties.

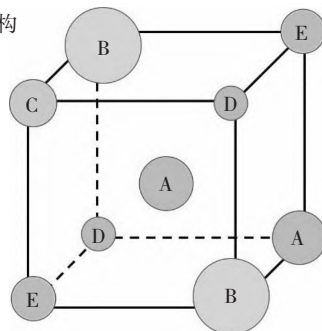
**Key words:** high entropy alloys; additive manufacturing; thermal plasma spheroidization; mechanical properties

现今社会,科技发展迅速,而对材料性能的探索也从未停止,尽管碳素结构钢仍是人们使用最为广泛的金属材料,但在机械零部件的关键部位,钢结构的性能已在很大程度上无法满足实际使用要求。传统的碳素结构钢在很长一段时间内很难取得重大突破。2004年,随着叶均蔚等人<sup>[1]</sup>提出了高熵合金的概念,高熵合金材料进入学者们的视野。该体系是由5种或5种以上等原子比或近等原子比的主要元素组成的BCC和FCC结构(图1),每种元素的原子百分比在5%~35%之间,混合熵大于 $1.61R J \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ ( $R$ 为气体常数)。

高熵合金的组织与性能受到四大效应的共同影响<sup>[2]</sup>,其中高熵效应使其倾向于形成简单的固溶体相,迟滞扩散使得相变进程减缓,晶格畸变在一定程度上使其结构的性能发生改变,鸡尾酒效应可通过多种元素的复合,使合金获得优异的综合性能;正是由于这些特性,高熵合金具有比传统合金更高的强度、硬度以及优异的耐蚀、耐磨等性能,这对于高熵

合金的研究及发展具有重要意义。本文通过介绍常用的高熵合金的制备方法,如电弧熔炼法、表面熔覆技术和增材制造技术,以及增材制造用粉的制备方法,如机械合金化、等离子体旋转电极雾化、等离子球化技术,并对高熵合金的应用前景进行展望。

(a) BCC 结构



(b) FCC 结构

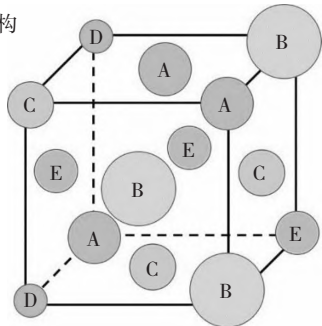


图1 5种主元的固溶体模型:BCC结构(a);FCC结构(b)

Fig.1 Solid solution model of five principal components:  
(a) BCC structure; (b) FCC structure

收稿日期:2025-10-22

基金项目:黑龙江省省属科研院所科研业务费项目(CZBZ202608001);  
黑龙江科学院能力提升专项(YSTS2025GJS01)

作者简介:宫书林(1997-),男,研究实习生,2023年毕业于黑龙江科技大学材料科学与工程专业,硕士研究生,现从事金属增材制造方向。

通信作者:李艳春(1981-),女,硕士,副研究员,研究方向:高熵合金复合材料。

## 1 高熵合金及其粉体的制备

### 1.1 高熵合金的制备

1.1.1 电弧熔炼法 目前,高熵合金的制备主要采用电弧熔炼法,在电能的作用下,电极与物料间通过产生的电弧来熔炼金属<sup>[3]</sup>,该方法的优势在于可使各元素充分混合,在熔炼过程中不易氧化,被污染的几率更低。然而合金成分复杂多样,且各元素的熔点存在差异,因此,在组织中会存在明显的元素偏析,需要进一步处理。此方法会存在缩孔、缩松等铸造缺陷,组织较为粗大;同时,受熔炼环境的限制,熔炼的合金锭形状简单,尺寸较小,难以满足复杂结构及大尺寸产品的制备需求,这些也限制了高熵合金在实际生产生活中的应用<sup>[4]</sup>。

1.1.2 表面熔覆技术 表面熔覆技术是通过热源对涂层粉末的辐照,使其快速熔化与基体形成冶金结合,最终获得性能显著优于基体表面的涂层。高熵合金涂层的制备主要有激光熔覆、等离子熔覆等方法。在表面改性技术中激光熔覆的应用最为广泛,因此,学者们开始将高熵合金材料的高强度、高硬度等优异性能与熔覆技术结合,发挥各自的优势<sup>[5]</sup>。与电弧熔炼制备块体高熵合金材料相比,该方法制备的涂层具有组织更均匀、更细小、结构更致密等特点,且熔覆层对基体的热影响小,二者的冶金结合性更优<sup>[6]</sup>。此外,激光熔覆的自动化水平高、工艺参数可调数量多、熔覆层缺陷少,激光能量密度越低,涂层晶粒尺寸越小,颗粒越细,性能越好<sup>[7]</sup>。有学者利用氩弧熔覆技术制备了 AlCuFeNiCoSi 高熵合金涂层,硬度最高可达 62.5HRC。

1.1.3 增材制造技术 随着增材制造技术的发展,其应用更为广泛,金属增材制造可分为两大类:粉末床融合技术(PBF)和直接能量沉积技术(DED),见图 2<sup>[8]</sup>。这也为高熵合金成形构件的制备提供了新的思路,该技术将三维模型进行二维切片处理,以逐层堆积的方式制备目标材料<sup>[8]</sup>。增材制造理论上可实现任意复杂形状材料的成形,实现多构件组成零件的一体化制造,进而减少材料的浪费,缩短制备周期,具有更灵活的设计,能够进行定制化加工<sup>[9]</sup>。同时增材制造还具有加热速度和冷却速度快、熔池尺寸小的特点<sup>[10]</sup>,可使高熵合金粉末在极短的时间内完成熔化和凝固过程,因此制造的高熵合金晶粒尺寸细小、元素分布均匀,强度远高于铸件<sup>[11]</sup>。

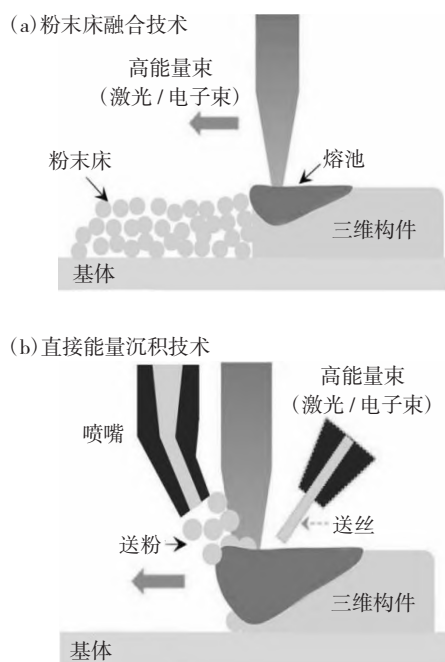


图2 金属增材制造示意图

Fig.2 Schematics of metal additive manufacturing

### 1.2 高熵合金粉体的制备

增材制造所打印出来的零件,其品质和性能取决于粉末的性质。如果粉末质量较差,打印过程中就会产生气孔、裂纹等缺陷。粉末质量受到球形度、粒径大小、粉末流动性、松装密度和振实密度等因素影响。机械合金化和雾化法是制备高熵粉末的常用方法,其中雾化法包括水雾化法(WA)、气雾化法(GA)、等离子雾化法(PA)及等离子旋转电极雾化法(PREP)。

1.2.1 机械合金化法 机械合金化是通过金属粉末在球磨机中高速转动,其与粉末、罐壁之间相互碰撞,使得混合粉末发生原子间扩散,进而获得合金化粉末的方法<sup>[12]</sup>,同时也是制备纳米高熵合金的主要手段。球磨过程中通过破碎粗大晶粒,优化内部组织成分均匀性,从而使其机械性能得到改善。但该方法存在机械合金化过程时间长、球形度差、加工过程中易引入杂质等问题,不适合大批量制备。

1.2.2 等离子体旋转电极雾化法 等离子体旋转电极雾化法的技术原理见图 3,该方法以等离子炬为热源,以金属或合金棒料为自耗电极,棒料在高速旋转过程中,其端面熔融金属液流在离心力作用下被甩出,并在惰性气体中快速冷却凝固为金属粉末。此过程无需坩埚,且有高纯惰性气体保护,制粉环境洁净,可获得高纯度金属粉末,适用于高性能粉末的制备<sup>[13]</sup>。同气雾化工艺相比,其具有工艺参数简单、粉末表面光滑、制粉效率高等优势。

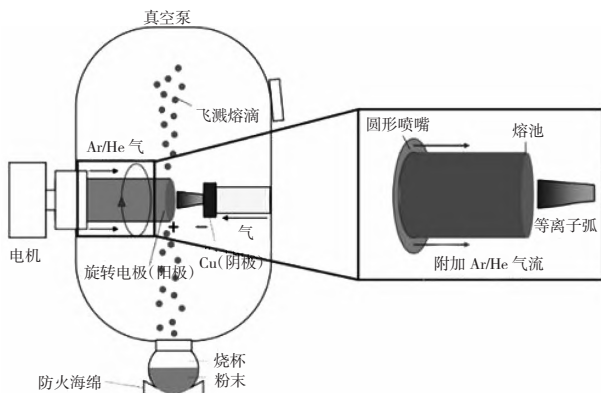


图3 PREP技术原理

Fig.3 Schematic diagram of PREP technology

**1.2.3 热等离子体球化法** 热等离子体球化(TPS)是利用温度高、能量密度大、传热及冷却速度快的等离子体,将粉末颗粒瞬间加热至熔化或半熔化状态,借助表面张力收缩成球形,随后快速冷却成球形颗粒。其优势在于球化过程中颗粒飞行时间长、产品无污染、操作模式连续、粉末球形度高、气体流速低及工作功率低等。由于无电极烧损产生的污染,该方法适用于难熔和高纯粉末球化工艺。通过射频电磁场相互作用产生等离子体,使粉末熔化并缩聚成球的技术称为射频等离子体球化。王繁强等人<sup>[14]</sup>将机械合金化与射频等离子体球化相结合制备 WMoTaNbV 高熵合金粉末,球磨过程中得到单一 BCC 相的高熵粉末,而粉末呈扁平状,同时粉末中氧、碳杂质含量相应增加,经过球化处理后,其粉末球形化形貌及元素分析见图 4。粉末中的氧、碳含量显著降低,这是由于碳化物经高温分解且与吸附于粉末中的氧反应后挥发,从而降低了杂质含量。经等离子体球化后粉末具有流动性良好、振实密度高、氧含量低等特点。

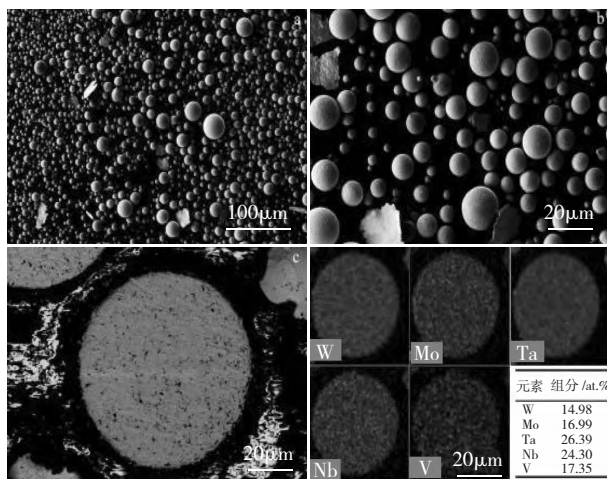


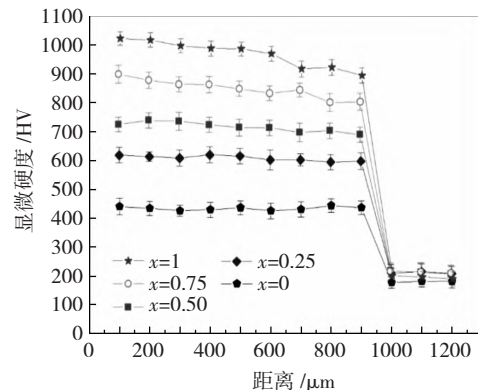
图4 粉末球形化形貌和元素分析

Fig.4 Morphologies of powder after spheroidization and element analysis

## 2 高熵合金的性能

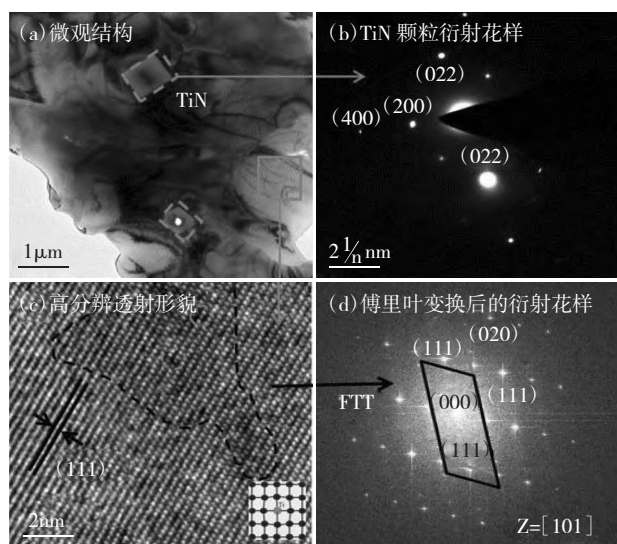
### 2.1 力学性能

由于高熵合金中的元素与传统固溶体结构不同,无溶剂和溶质之分,同时合金中主元原子半径相差很大,使晶格存在显著畸变,因而固溶强化的作用明显,进而使涂层具有较高的强度和硬度。这也是采用激光作为热源制备的高熵合金具有较高硬度和耐磨性的原因之一。激光熔覆技术兼具快速加热与高冷却速率的特点,可有效提高形核率,使涂层组织的晶粒更为细小。而优化元素的配比并进行适当热处理对提高涂层的硬度、耐磨性有一定改善。He 等人<sup>[15]</sup>在 Q235 钢上制备  $\text{FeCoCrNiAlTi}_x$  复合涂层,涂层的硬度曲线见图 5,  $x=1$  时平均硬度可达到 966.29 HV,随 Ti 含量的增加,其摩擦系数和磨损量有所降低,耐磨性能得到了改善,主要磨损机理为磨粒磨损。Joseph 等人<sup>[16]</sup>采用 DLF 制备  $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$  高熵合金,晶体结构发生  $\text{FCC} \rightarrow \text{FCC} + \text{BCC} \rightarrow \text{BCC}$  的转变;随着 Al 浓度的增加,体系的强度明显提升,其中  $\text{Al}_{0.85}$  强度最高,这是由于自旋分解形成的密集沉淀导致沉淀硬化效应所致。

图5  $\text{FeCoCrNiAlTi}_x$ 涂层的显微硬度Fig.5 Microhardness of  $\text{FeCoCrNiAlTi}_x$  coatings

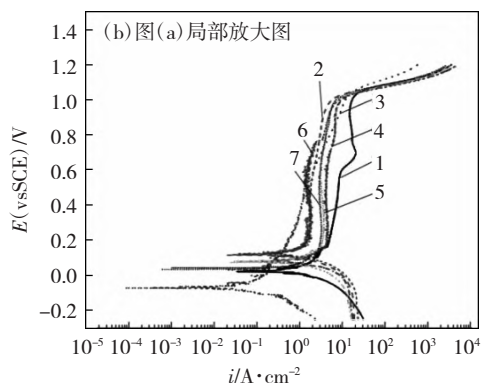
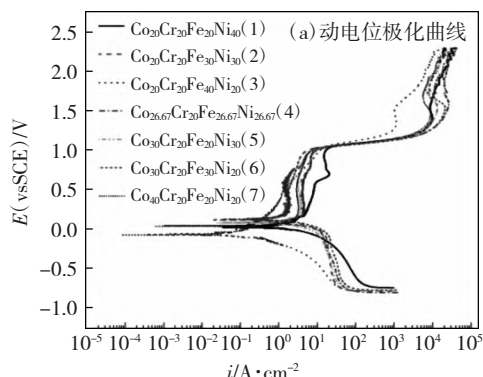
熔覆过程中,涂层会析出纳米晶和金属间化合物,产生弥散强化效应。与激光热源具有加热快、冷却快的工艺特点结合,可达到协同增效的效果,进一步提升涂层的综合性能。Guo 等人<sup>[17]</sup>在 904L 钢表面通过原位析出 TiN 颗粒,优化了  $\text{CoCr}_2\text{FeNiTi}$  复合涂层,结果表明,随着 Ti 元素的增加,涂层由不规则的树枝状、粒状的 TiN 以及少量 Laves 相组成,图 6 为  $\text{CoCr}_2\text{FeNiTi}_{0.5}$  涂层的 TEM 分析结果,可以看出 TiN 颗粒相与基体形成冶金结合,结合区域无微裂缝或孔洞;较大原子半径的 Ti 原子溶解到固溶体中,引发晶格畸变,进而提高了涂层的硬度。



图 6 CoCr<sub>2</sub>FeNiTi<sub>0.5</sub> 涂层的透射图像Fig.6 TEM micrograph of CoCr<sub>2</sub>FeNiTi<sub>0.5</sub> coating

## 2.2 耐蚀性

**2.2.1 合金元素对高熵合金耐蚀性的影响** 我国每年因腐蚀而造成的经济损失占比很大,制备具有更优异的耐蚀材料、延长结构的使用寿命具有重要意义。与传统的合金不同,高熵合金基本由单相或两相组成,一般不存在多相组成。传统合金相组成较为复杂,不同相之间存在电位差,在导电环境中易形成微电池,从而使材料的耐蚀性能降低。采用激光熔覆制备高熵合金涂层时,通常微量元素的加入或调节某种元素加入的量,是提高耐蚀性的主要手段。设计高熵合金粉末成分时,通常会加入如 Ni、Cr、Mo、Co、Ti 等耐蚀元素,使高熵合金在 HNO<sub>3</sub>、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、NaOH 和 NaCl 等多种腐蚀介质中能表现出良好的耐腐蚀性能<sup>[18]</sup>。杨海欧等人<sup>[19]</sup>在 3.5%NaCl 溶液中,研究了单相 CoCrFeNi 高熵合金中各组成元素对合金耐蚀性能的影响。图 7 为合金体系在 3.5%NaCl 溶液中的动电位极化曲线,当 Co、Cr 含量固定,增加 Fe 含量并减少 Ni 含量,可降低电流密度,提升耐蚀性;当 Cr 含量不变,减少 Co、增加 Fe 及 Ni 含量时,自腐蚀电位提高,腐蚀倾向降低。

图 7 Co<sub>0</sub>Cr<sub>20</sub>FeNi<sub>80-a-b</sub> 体系在 3.5%NaCl 溶液中的动电位极化曲线Fig.7 Potentiodynamic polarization curves of Co<sub>0</sub>Cr<sub>20</sub>FeNi<sub>80-a-b</sub> system in 3.5%NaCl solution

**2.2.2 激光热源对高熵合金耐蚀性的影响** 高熵合金具有高混合熵效应,同时激光熔覆具有快热快冷的特点,在二者协同作用下,制备的涂层易于形成致密均匀的简单组织,晶界处的杂质较少,且会改善成分偏析,从而抑制微电池的形成,减弱腐蚀倾向,耐蚀性能优于传统合金。库岩涛等人<sup>[20]</sup>采用选区激光熔化技术,制备了不同工艺参数的 AlCoCrFeNi<sub>2.1</sub> 共晶高熵合金,图 8 为试样微观组织的 TEM 形貌,涂层以层片状为主,少部分存在胞状,胞内为 B2 相,胞壁为 L12 相。当激光能量密度为 180J·mm<sup>-3</sup> 时,试样耐蚀性较好。这是因为纳米级层片更细小,可形成致密的钝化膜,阻碍 Cl<sup>-</sup> 等腐蚀性离子侵蚀涂层表面。该钝化膜与基体紧密结合,能有效抑制微电池腐蚀,增强抗腐蚀能力。

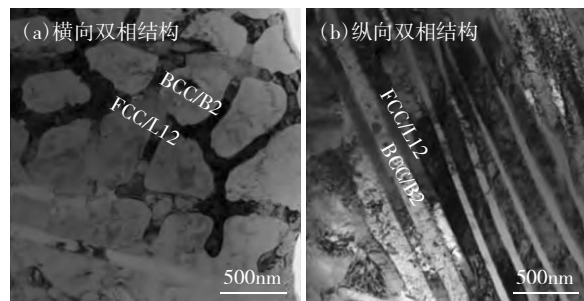


图 8 微观组织的 TEM 图像

Fig.8 TEM micrographs of the dual-phase structure

**2.2.3 热处理对高熵合金耐蚀性的影响** 高熵合金在制备过程中,会出现残余应力、元素偏析、气孔等缺陷,这些缺陷会影响高熵合金的耐蚀性,通过适当的热处理工艺,可调整节熵合金的化学成分分布、均匀组织、细化晶粒、消除内应力等<sup>[21]</sup>,进而改善缺陷带来的不利影响,提升高熵合金的耐蚀性能。蒋淑英等人<sup>[22]</sup>制备 AlCoCrFeNi 高熵合金并进行退火处理,对比铸态与退火态高熵合金的耐腐蚀性能发现,

在3.5%NaCl溶液中,1000℃退火态的合金耐蚀性最好;在 $0.5\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{H}_2\text{SO}_4$ 溶液中,各状态合金均出现钝化现象,在1000℃退火时电流密度最小,耐蚀性最优。Li等人<sup>[23]</sup>制备了FeCoCrNiMn高熵合金涂层,经过800℃退火后发现,Mn扩散至晶内,缓解了其在晶界处偏析,使元素分布更均匀,通过减少局部腐蚀微电池,使得钝化膜成分更稳定。同时钝化膜中Cr、Ni、Co的富集也增强了膜的保护性能。

### 2.3 热稳定及抗氧化性能

高熵合金在高温下依然能维持相结构与性能稳定,表现出优异的抗高温氧化性能,这主要归因于迟滞扩散效应降低了其扩散系数,即便在高温下,扩散系数仍较低。为提升高熵合金的高温抗氧化性能,通常添加W、Ta、Zr、Si、Al等合金元素,其加入会形成致密氧化膜,有效防止氧的扩散,从而改善涂层的抗氧化性能。Wang等人<sup>[24]</sup>对 $\text{Ni}_x\text{Co}_{0.6}\text{Fe}_{0.2}\text{Cr}_y\text{Si}_z\text{AlTi}_{0.2}$ 涂层在1100℃保温10h处理后,涂层硬度仍然很高,最高可达964 HV。

## 3 高熵合金应用

由于高熵合金具有优异的力学性能、耐蚀性能及耐高温性能,因此,在车辆装备领域、耐磨刀具材料领域、焊接领域、生物医用材料领域、核工业领域等均具有潜在应用价值。

### 3.1 车辆装备领域

在车辆装备领域,高熵合金具有一定应用潜力。可采用轻质高熵合金材料替代传统的汽车所需的结构材料(如轿车结构板、轴承用钢等),同时也可替换零部件材料(如曲轴、变速箱等),发挥其轻量且高强度的优势,显著提升车辆的可靠性,同时满足轻量化使用要求<sup>[25]</sup>。

### 3.2 耐磨刀具领域

制备各类耐磨涂层或刀具材料时,传统合金不能满足高速切削的使用需求。为提升传统刀具材料在高速切削下的性能,可通过设计高熔点的高熵合金涂层成分,利用激光熔覆技术对传统刀具材料进行改性,使刀具在高速切削下仍具有优异的耐磨性、很高的硬度、良好热稳定性、抗高温软化性以及优良的断屑效果,进而提高被加工材料的表面光洁度<sup>[26]</sup>。

### 3.3 焊接领域

高熵合金在焊接领域发挥着独特的作用,可作为焊接填充材料,用作两种合金之间的中间层,获得

以固溶体相为主的焊缝,防止金属间形成化合物,通过固溶强化来提高焊接接头的使用强度<sup>[27]</sup>;同时,因其具有耐高温性能、较高的抗压强度以及耐腐蚀性能,常作为高温材料应用于耐火钢结构骨架及高温设备中。

### 3.4 生物医用领域

作为医用材料,具有生物相容性的无毒或低毒元素是最重要的条件。根据不同元素在医用材料中的作用,适时调整医用高熵合金材料元素成分并进行合金化设计,从生物安全性、生物相容性角度出发,改善传统材料引发的不良反应,在临床实践方面具有广阔的应用前景<sup>[28]</sup>。

### 3.5 核工业领域

含有高熔点难熔金属元素的高熵合金,在核工业领域具有巨大的潜在价值,其不仅具有良好的抗辐照损伤能力,还展现出优异的高温强度及可调控的耐蚀性。这些突出性能是核反应堆结构材料安全保障<sup>[29]</sup>。

## 4 总结与展望

高熵合金与传统合金相比具有更优异的性能,成为近些年材料领域的研究热点。然而,采用传统的电弧熔炼法制备高熵合金,易产生成分偏析、缩孔、缩松等铸造缺陷,且铸造的合金形状简单、尺寸较小,难以制备结构复杂、尺寸较大的产品;而以激光为热源的表面改性技术,可使涂层组织更均匀细小、结构致密,且激光熔覆的自动化水平高、工艺参数可调控范围广、熔覆层缺陷少。

增材制造技术的发展为高熵合金的制备提供了新思路。增材制造理论上可实现对任意复杂形状材料的成形,实现多构件组成零件的一体化成形,进而减少材料的浪费,缩短制备周期,具有更灵活的设计,能够进行定制加工,制备出的构件性能优于铸件。

目前,学者们通过调控工艺参数、优化成分设计,对打印件的质量及性能优化开展了大量基础性研究,然而就合金粉末质量对打印件的影响研究较少,对此,通过机械合金化或等离子体旋转电极雾化等制得的粉末,经等离子球化实现细化球化,进而优化合金粉末的质量、提高打印件性能,是未来较为广泛的研究方向;另一方面,对高熵合金在严苛的服役环境下的应用研究较少,因此,可结合计算机模拟技术,对其在严苛环境中的服役情况进行预测,进一步拓宽材料的应用范围。

## 参考文献

- [1] Ye J W, Chen S K, Lin S J, *et al.* Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: Novel alloy design concepts and outcomes[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2004, 6(5): 299–303.
- [2] Owen L R, Jones N G. Lattice distortions in high-entropy alloys[J]. *Journal of Materials Research*, 2018, 33(19): 2954–2969.
- [3] 赵林飞, 李慧, 梁精龙. 高熵合金制备工艺的研究进展[J]. *腐蚀与防护*, 2021, 42(7): 42–47.
- [4] 高绪杰, 郭娜娜, 朱光明, 等. 激光熔覆制备高熵合金涂层的研究进展[J]. *表面技术*, 2019, 48(6): 107–117.
- [5] 王永东, 宫书林, 汤明日, 等. 激光熔覆 Fe 基 C-Ti-W 复合涂层的实验研究[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2021, 31(6): 719–724.
- [6] Muvvala G, Karmakar P D, Nath K A. In-process detection of microstructural changes in laser cladding of in-situ Inconel 718/TiC metal matrix composite coating[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 740: 545–558.
- [7] Sun S, Fu H, Ping X, *et al.* Effect of CeO<sub>2</sub> addition on microstructure and mechanical properties of in-situ (Ti, Nb)C /Ni coating[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2018, 359: 300–313.
- [8] Liu Z Y, Zhao D D, Wang P, *et al.* Additive manufacturing of metals: Microstructure evolution and multistage control[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2022, 100(5): 224–236.
- [9] Blakey-Milner B, Gradl P, Snedden G, *et al.* Metal additive manufacturing in aerospace: A review[J]. *Materials and Design*, 2021, 209: 110008.
- [10] Yang X G, Zhou Y, Xi S Q, *et al.* Additively manufactured fine grained Ni<sub>6</sub>Cr<sub>4</sub>WFe<sub>9</sub>Ti high entropy alloys with high strength and ductility [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 767: 138394.
- [11] Park J M, Choe J, Kim J G, *et al.* Superior tensile properties of 1% C-CoCrFeMnNi high-entropy alloy additively manufactured by selective laser melting[J]. *Materials Research Letters*, 2020, 8(1): 1–7.
- [12] 王咏奇, 李安敏, 韦善军. 高熵合金的制备方法研究现状[J]. *信息记录材料*, 2021, 22(5): 14–17.
- [13] 李岩, 宋美慧, 张煜, 等. 等离子旋转电极法制备 3D 打印用 GH3536 高温合金球形粉末[J]. *化学工程师*, 2021, 35(10): 1–4.
- [14] 王繁强, 施麒, 刘辛, 等. 机械合金化-射频等离子球化制备 WMoTaNbV 难熔高熵合金球形粉末[J]. *稀有金属材料与工程*, 2024, 53(12): 3428–3436.
- [15] He B, Zhang N, Lin D, *et al.* The phase evolution and property of FeCoCrNiAlTi<sub>x</sub> high-entropy alloying coatings on Q235 via laser cladding[J]. *Coatings*, 2017, 7(10): 157–165.
- [16] Jithin J, Tom J, Xinhua W, *et al.* Comparative study of the microstructures and mechanical properties of direct laser fabricated and arc-melted Al<sub>x</sub>CoCrFeNi high entropy alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 633: 184–193.
- [17] Guo Y X, Shang X J, Liu Q B. Microstructure and properties of in-situ TiN reinforced laser cladding CoCr<sub>2</sub>FeNiTi<sub>x</sub> high-entropy alloy composite coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 344: 353–358.
- [18] Shang C, Axinte E, Sun J, *et al.* CoCrFeNi (W<sub>1–4</sub>Mo<sub>x</sub>) high-entropy alloy coatings with excellent mechanical properties and corrosion resistance prepared by mechanical alloying and hot-pressing sintering[J]. *Materials and Design*, 2017, 117: 193–202.
- [19] 杨海欧, 尚旭亮, 王理林, 等. 单相 CoCrFeNi 高熵合金的组成元素对其在 NaCl 溶液中的耐蚀性能的影响[J]. *金属学报*, 2018, 54(6): 905–910.
- [20] 库岩涛, 邱贺方, 袁晓静, 等. 选区激光熔化技术处理 AlCoCr-FeNi<sub>21</sub> 共晶高熵合金的力学性能及耐腐蚀性能[J]. *火箭军工程大学学报*, 2024, 38(6): 105–115.
- [21] 盛颖航, 王凯, 高鹏, 等. 高熵合金耐腐蚀性能研究现状与展望[J]. *材料保护*, 2024, 57(12): 53–66.
- [22] 蒋淑英, 林志峰, 孙永兴. AlCoCrFeNi 高熵合金铸态与退火态的耐蚀性[J]. *稀有金属材料与工程*, 2018, 47(10): 3191–3196.
- [23] Li R X, Kong D C, He K T, *et al.* Improved passivation ability via tuning dislocation cell substructures for FeCoCrNiMn high-entropy alloy fabricated by laser powder bed fusion[J]. *Applied Surface Science*, 2023, 621: 156856.
- [24] Wang L M, Chen C C, Yeh J W, *et al.* The microstructure and strengthening mechanism of thermal spray coating Ni<sub>4</sub>Co<sub>6</sub>Fe<sub>2</sub>Cr<sub>5</sub>-SiAlTiO<sub>2</sub> high-entropy alloys[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2011, 126(3): 880–885.
- [25] 柳建, 郭煜, 蔡志海, 等. 轻质高熵合金在车辆装备中的应用前景[J]. *特种铸造及有色合金*, 2021, 41(7): 849–852.
- [26] 薄盛宏, 刘其斌. 刀具表面激光熔覆高熵合金涂层的研究进展[J]. *应用激光*, 2022, 42(5): 20–30.
- [27] 张秉刚, 于涛, 王厚勤, 等. 高熵合金在焊接领域的应用研究现状[J]. *航空材料学报*, 2022, 42(5): 1–14.
- [28] 刘吉奎, 张香云, 袁子洲. 医用钛系高熵合金的设计与进展[J]. *材料科学与工程学报*, 2021, 39(6): 1061–1064.
- [29] 张平, 蒋丽, 杨金学, 等. 核用难熔高熵合金的研究进展[J]. *材料导报*, 2022, 36(14): 5–26.