

高熵合金涂层研究进展

黄绍服^{1,2,3} 曾祥领¹ 彭 振¹ 柳 建⁴ 蔡志海⁴ 李 静⁴ 杜 娴⁴ 刘 军⁴

[1.安徽理工大学机械工程学院;2.南京航空航天大学江苏省精密与微细制造技术重点实验室;

3.安徽理工大学环境友好材料与职业健康研究院(芜湖);4.陆军装甲兵学院机械产品再制造国家工程研究中心]

摘 要 金属材料的失效往往是从材料表面开始,强化材料表面品质会延长金属构件的使用寿命,提高使用效率。高熵合金由于其具有优异的耐腐蚀性、耐磨性、抗高温氧化性等特点受到广泛关注。高熵合金性能的多样性使其可以作为金属表面涂层材料。基于现有研究,综合分析高熵合金涂层对金属材料表面性能的影响,总结了高熵合金作为涂层时的性能特点及高熵合金涂层的制备方法,并提出了该领域技术面临的问题及发展趋势。

关键词 高熵合金;涂层;组织性能;制备方法

中图分类号 TG139 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.07.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in High Entropy Alloy Coatings

Huang Shaofu^{1,2,3}, Zeng Xiangling¹, Peng Zhen¹, Liu Jian⁴, Cai Zhihai⁴, Li Jing⁴, Du Xian⁴, Liu Jun⁴

[1.College of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology;2.Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics;

3.Institute of Environment-friendly Materials and Occupational Health, Anhui University of Science and Technology(Wuhu);4.National Engineering Research Center for Remanufacturing of Mechanical Products, Academy of Armored Force]

Abstract: The failure of metal materials usually originates from the material surface. Through strengthening the material surface, the service life of metal components can be prolonged and efficiency can be improved. High-entropy alloys (HEAs) attracts extensive attention due to the excellent corrosion resistance, wear resistance, high temperature oxidation resistance and other characteristics. The property diversity allows HEAs to be used as metal surface coating materials. Based on the existing research, the influence of HEAs coating on the surface properties of metal materials was comprehensively reviewed, and the performance characteristics of HEAs as coating as well as the preparation methods of HEAs coating were summarized. The problems and development trend of technology in HEAs coating field were put forward.

Key Words: High Entropy Alloy, Coating, Microstructure and Properties, Preparation Methods

高熵合金(High-entropy alloys, HEAs)作为一种新型合金,也被命名为多组元高浓度合金^[1]、多主元合金^[2]、成分复杂合金^[3]等。研究表明,高熵合金由于热力学上的高熵效应、性能上的“鸡尾酒”效应、动力学上的缓慢扩散效应和结构上的晶格畸变效应抑制了复杂金属间化合物的出现,与传统 Fe、Al、Ti、Ni 基合金相比,高熵合金具有更高的混合熵,形成不同的固溶体,如体心立方结构(BCC)、面心立方结构(FCC)以及密排六方结构(HCP),甚至是非晶结构^[4-5]。由于多种元素倾

向于混乱排列而形成简单固溶体相,高熵合金展现出集各元素特性于一体的“集中特性”,表现出比传统合金更加优异的性能。所含元素都充当主元发挥作用,“四大效应”是中熵合金和高熵合金区别于传统合金最大的特征,这些显著的“集中特性”使高熵合金具有硬度和强度高、屈服强度高、断裂韧度高、抗高温氧化能力强、耐腐蚀以及独特的电磁性能^[6-9]等,在工程应用领域具有巨大的应用潜力。然而,高熵合金块体多采用熔炼法^[10]制备,材料规格小,易出现冶金缺陷。此外,高熵合金组

收稿日期:2022-09-13;修改稿收到日期:2022-11-04
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52275228);国家自然科学基金青年基金资助项目(52105234, 52205242);教育部联合基金资助项目(8091B032110);安徽理工大学环境友好材料与职业健康研究院研发专项基金资助项目(ALW2021YF06)
第一作者简介:黄绍服,男,1974 年出生,教授,安徽淮南(232001),E-mail:8556126@qq.com
通信作者:柳建,男,1982 年出生,副研究员,北京(100072),E-mail:xbdlu5899@163.com
引用格式:黄绍服,曾祥领,彭振,等. 高熵合金涂层研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(7):876-883.
HUANG S F, ZENG X L, PENG Z, et al. Research progress in high entropy alloy coatings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(7):876-883.

元多为 Co、Ni 等高价元素,导致合金生产成本高。这限制了其在复杂、大型工件上的应用。

表面工程主要通过物理、化学或机械过程使得材料表面的化学成分、微观结构和表面状态发生转变,以此赋予材料表面腐蚀、磨损和功能特性等,提高材料的综合性能。目前,表面工程已发展成为集材料、化学、力学和焊接学等于一体的综合学科,广泛应用于防腐、耐磨、修复和材料强化等领域^[11]。涂层制备技术可在确保高效利用高熵合金性能特点的同时,显著降低高熵合金的制备成本和缩短制备周期,因此高熵合金涂层的研究受到广泛关注^[12]。

1 高熵合金涂层研究现状

高熵合金涂层的制备过程具有较快的冷却速度,称为“快速淬火效应”。在较低温度下,由于热力学驱动力的降低,高熵合金可能会在缓慢冷却的同时经历各种相变,快速的冷却能有效抑制高熵合金涂层内部组织的相转变。此外,快速淬火限制元素的扩散,也限制脆性金属间化合物的成形和生长,有助于形成高熵合金相^[13-14]。近年来高熵合金涂层的摩擦磨损性能、耐腐蚀性和抗高温氧化性能是研究的重点。

1.1 耐磨涂层

高熵合金涂层通常具有较高的硬度和弹性模量,因此表现出优良的耐磨性。FANG Q H 等^[15]通过对 Fe-CoCrNiNb_x ($x=0.25, 0.6, 0.8$) 系列 HEA 涂层的试验,发现 FeCoCrNiNb_x HEA 涂层的耐磨性随着 Nb 含量增加先增大后减小,其硬度随着 Nb 含量增加而增加。由于 BCC 和 FCC 相之间的合理体积分数,FeCoCrNiNb_{0.6} HEA 涂层显示出高硬度和良好的耐磨性。相对其他 HEAs 涂层,FeCoCrNiNb_x 涂层的摩擦因数较小,可以将其开发为耐磨损齿轮涂层。HSU W L 等^[16]通过等离子熔覆设备制备 NiCo_{0.6}Fe_{0.2}Cr_{1.5}SiAlTi_{0.2} HEA 涂层,发现涂层中形成了大量的 Cr₃Si 相,并在 800 °C 和 1 100 °C 时效时导致硬度和耐磨性大幅增加。氧化试验表明,合金表面形成了包含 Al₂O₃ 和 Cr₂O₃ 的致密热生长氧化物层。

LI Y Z 等^[17]制备了 Al_xCrFeCoNiCu ($x=0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.0$) 高熵合金涂层,发现 Al_xCrFeCoNiCu HEA 涂层磨损率最高和最低的分别是 FeCoNiCuCu [$2.26 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$] 和 Al_{1.5}CrFeCoNiCu [$6.6 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$] 涂层,相对基体的磨损率分别提高了 67.4% 和 0.19%。Al_{0.8}CrFeCoNiCu 涂层具有良好的耐磨性,磨损率为 $1.9 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,Al_{0.8}CrFeCoNiCu HEA 涂层适用

于铝合金表面性能的改善。综上,高熵合金涂层的耐磨性与合金组元及含量密切相关,如 Nb、Al 等金属元素。除了添加金属元素,添加非金属元素也可提高高熵合金涂层的耐磨性。

LIN D Y 等^[18]采用激光熔覆法制备 FeCoCrNiAlB_x ($x=0, 0.25, 0.50, 0.75$) 涂层,发现添加 B 后相结构发生转变,BCC 相对应的峰增加。随着 B 含量增加,涂层的耐磨性显著提高,FeCoCrNiAlB_{0.75} 涂层具有最佳耐磨性。

1.2 耐腐蚀涂层

相较于高熵合金块体材料,高熵合金涂层的组织结构均匀,有利于提高材料表面的耐腐蚀能力。研究表明,在高熵合金涂层或薄膜中加入一些耐蚀性的金属元素,如 Cr、Ni、Mo 等元素,有助于提高涂层的耐腐蚀能力。刘谦等^[19]采用同步送粉激光熔覆技术在 Q235 钢表面制备了 CoCrFeNiMo_x HEA 涂层,研究了涂层的耐蚀性能。发现在 3.5% (质量分数) NaCl 溶液中,CoCrFeNiMo_x HEA 涂层具有优良的综合耐蚀性能,且随着 Mo 含量增加,涂层的腐蚀电位正移,腐蚀电流密度减少,钝化区间变长,阻抗弧半径增大,电极反应阻力增强。JIANG Y Q 等^[20]采用激光熔覆法在 45 号钢表面制备了不同 Cr 含量 ($x=0.50, 0.75, 1.00, 1.50, 2.00$) 的 AlCoCr_xFeNi HEAs 涂层,综合研究了涂层组织和腐蚀行为随 Cr 含量的变化规律。结果表明,在 0.1 mol/L 的 HCl 和 3.5% 的 NaCl 溶液中涂层的耐蚀性随 Cr 含量增加先提高后降低。在浸水试验中也观察到类似的现象。在 $x=1.50$ 时涂层的耐蚀性最佳。另外,在 45 号钢表面激光熔覆 AlCoCr_xFeNi HEA 涂层可显著提高其耐蚀性。

此外,非金属单质和陶瓷相的加入对涂层耐磨性也有所提升。ZHANG C 等^[21]采用激光熔覆制备了 FeCrNiCoB_x 涂层,发现涂层组织主要为 FCC 相及少量硼化物。B 含量在 0.5% 和 1% 之间时,涂层的硬度和耐腐蚀性随之提高;B 含量为 1.25% 时,硼化物从 (Cr,Fe)₂B 转变为 (Fe,Cr)₂B,涂层的耐腐蚀能力降低,但均高于 304L 不锈钢。董世知等^[22]通过电弧熔覆制备了 FeAlCoCrCuTi_{0.4} HEA 涂层,研究了添加 WC 和 Al₂O₃ 对该涂层的显微组织和性能的影响,发现涂层结合良好,在细晶强化等作用下硬度 (HV) 增至 685,添加 WC 和 Al₂O₃ 能够显著降低涂层的稀释率以及提高涂层的耐蚀性能。

1.3 抗高温氧化涂层

相比于传统的镍基合金涂层材料,高熵合金涂层具有较高的抗氧化性,主要因为高熵合金高的混合熵、扩

散系数低。研究发现,添加 Al, Cr, Ta 和 Zr 等金属元素,在涂层表面可形成致密氧化膜,有效提升涂层的抗高温氧化能力。CAI Z B 等^[23]在 Ti-6Al-4V 基体上通过激光熔覆制备 NiCrCoTiVAl 合金。在 900 °C 下保温 8 h 后相结构不变。结果表明,涂层在 1 005 °C 以下是稳定的,该涂层的抗氧化性是由于存在 NiO 与合金元素 Al、Cr、Co。邸英南等^[24]采用激光熔覆技术在 Ti-6Al-4V 钛合金表面制备了近等摩尔比的 AlCrFeMoV-Ti HEA 涂层,发现在 800 °C 下恒温氧化 50 h 后,HEA 涂层的氧化增重为 1.49 mg,仅为基体的 16.37%。激光熔覆 AlCrFeMoVTi HEA 涂层能显著改善 Ti-6Al-4V 钛合金的高温抗氧化性能。

研究发现,N 和 Si 常用于提升高熵合金涂层的抗高温氧化性。SHENG W J 等^[25]利用磁控溅射技术制备 $W_x\text{NbTiAlSiNHEA}$ 薄膜,发现高熵合金薄膜均具有非晶结构,在 700 °C 以下保温 24 h,稳定性较好。1 000 °C 热处理后,薄膜开始晶化,NbTiAlSiN 发生相变形成 FCC 结构,而 NbTiAlSiWN 为 BCC 结构,但随着 N_2 流速的增大,转变为 FCC 结构。SHEN W J 等^[26]采用磁控溅射技术制备 $(\text{Al}_{0.34}\text{Cr}_{0.22}\text{Nb}_{0.11}\text{Si}_{0.11}\text{Ti}_{0.22})_{50}\text{N}_{50}$ 涂层,并研究了其高温抗氧化性。发现 900 °C 退火 50 h 后,其高温抗氧化性优于其他涂层,表面致密的 Al_2O_3 层保护使其具有优异的高温抗氧化性能。TSAI D C 等^[27]采用反应磁控溅射技术制备 $(\text{AlCrMoTaTi})\text{Si}_x\text{N}$ 涂层,系统研究了 Si 含量对涂层氧化抗力的影响。发现与无硅涂层相比,沉积态含硅涂层具有相对致密的结构。当涂层暴露在高温环境下时,涂层表面会形成一层氧化层并继续增厚。在 1 073 K 时,生成 Al_2O_3 和 TiO_2 氧化层。随着 Si 含量不断增加,涂层的抗氧化性逐渐增强,在 1 173 K 时, Si 含量低至 7.51%,涂层表现出比无 Si 涂层低一个数量级的氧化速率。

1.4 功能涂层

高熵合金涂层不仅有较好的耐磨性、耐腐蚀性与抗高温氧化性,同时也具备优异的物理性能。YEN J W 等^[28]利用磁控溅射技术制备的 BNbTaTiZr HEA 薄膜,获得了 $246 \mu\Omega/\text{cm}$ 的电阻率。LIN P C 等^[29]制备了 FeCoNiCrAlSi HEA 薄膜,发现在 400 °C 及以下的沉积和退火条件下,薄膜具有简单的 BCC 结构。在 500 °C 退火后形成有序的 BCC 结构,具有优良的软磁性能。QIU X W 等^[30]采用激光熔覆制备 $\text{Al}_2\text{CrFeNiCoCuTi}_x\text{ HEA}$ 涂层,涂层的相结构为简单的 FCC、BCC 结构和 Laves 相, Ti 含量增加一定程度上促进了 BCC 的形成。随着 Ti 含量增加, $\text{Al}_2\text{CrFeCoCuNiTi}_x\text{ HEA}$ 涂层在 0.5 mol/L 的 HNO_3 溶液中的耐腐蚀性能增强。

与 Q235 钢相比,涂层相对耐磨性有明显的提高。

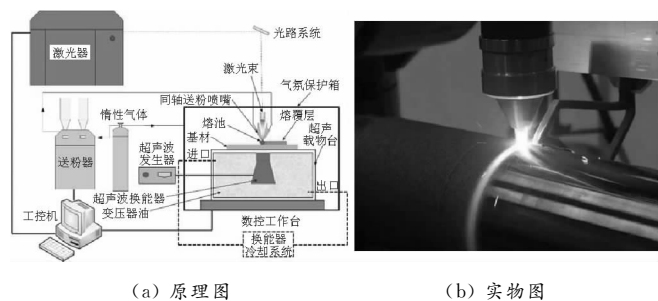
综上所述,高熵合金涂层中组元可决定高熵合金涂层的性能。在设计高熵合金涂层成分时,应充分考虑使用环境及性能要求,选取合适的金属及非金属元素,使得高熵合金涂层综合性能最佳。

2 高熵合金涂层制备技术现状

涂层制备技术具有成本低、高效增强基体表面力学性能等特点,不仅可以充分利用高熵合金的特殊性能,而且制备成本低、周期短,高熵合金涂层具有明显优势^[31],常用的高熵合金涂层制备技术主要有激光熔覆、电弧熔覆、等离子熔覆、热喷涂、磁控溅射和电化学沉积等。

2.1 激光熔覆

激光熔覆是在基材表面预置一层或几层涂层材料(高熵合金粉末),粉末和基材两者在激光束的作用下迅速熔合,冷却后在基体表面形成一种冶金结合且综合性能良好的熔覆层。该熔覆方法具有快速冷却和熔化的优点,制备效率高,得到的涂层组织性能较好,其中最显著的效果是使材料“内外兼优”。高熵合金涂层材料硬度高、耐磨性好、耐腐蚀性能优异等,基体材料强度高、韧性好、成本低廉等,两者结合以达到改性的要求^[32]。但是基体和涂层材料性质差别大,涂层残余内应力大,两者连接强度弱,涂层易剥落,可供选择的涂层材料少,这是目前涂层材料亟需攻破的重大难题,而高熵合金的发现推动了涂层材料的进一步发展。图 1 为激光制备高熵合金涂层原理。



(a) 原理图

(b) 实物图

图 1 激光熔覆制备涂层

Fig.1 Coating prepared by laser cladding

陈磊等^[33]通过激光熔覆制备了 MnCrTiCoNiSi_x ($x=0, 0.5, 1$) HEAs 涂层,发现当 $x=1$ 时,合金涂层硬度显著提高。刘昊等^[34]通过激光熔覆制备了 $\text{AlCoCrFeNiSi}_x\text{ HEA}$ 涂层,探究了 Si 添加量对涂层的成形品质、组织形貌和硬度的关系,发现 304 钢上制备出表面品质优异的高熵合金涂层,平均硬度 ($\text{HV}_{0.3}$) 达到 8 481 MPa,显著提高了基体的硬度。LIU J 等^[35]采用激光熔覆制备 $\text{AlCoCrFeNiTi}_x\text{ HEA}$ 涂层,发现涂层主

要由无序体心立方固溶相(FeCr)和有序体心立方相(AlNi)组成,Ti的引入导致涂层在腐蚀过程中产生钝化行为。钝化膜的成分是 Al_2O_3 、 TiO_2 、 Ti_2O_3 、 Cr_2O_3 和 $\text{Cr}(\text{OH})_3$,涂层表现出较好的耐腐蚀性。WU C L等^[36]采用激光熔覆制备FeCoCrAlNiTiHEA涂层。发现 $x=0.5$ 和1时FeCoCrAlNiTi_x合金为FCC+BCC结构。随着Ti含量增加,相结构从FCC+BCC+TiNi结构转变为FCC+BCC+Ti₂Ni+有序BCC结构。添加Ti元素后涂层硬度(HV)由615增加至730,是304不锈钢基体的3.6倍。随着硬度增加, $x=2\%$ 时,合金在蒸馏水中具有最佳的耐蚀性。研究者采用激光熔覆技术,研究高熵合金中组元含量对涂层性能的影响。在不同材料基板上制备高熵合金涂层,有效改善基板材料的耐腐蚀性和耐磨性等。

在钢材表面制备高熵合金涂层,可显著提高基材的性能。ZHANG S等^[37]采用激光熔覆在304不锈钢上用预混的高纯度Co、Cr、Al、Ni粉末合成了FeCoCrAlNi HEA涂层以提高耐腐蚀性和抗气蚀性,发现涂层的抗气蚀性约为304不锈钢的7.6倍。ZHANG M等^[38]采用激光熔覆在45钢表面制备了TiZrNbWMo难熔高熵合金涂层,主要由体心立方结构固溶体和少量的 $\beta\text{-Ti}_x\text{W}_{1-x}$ 析出相组成,归因于高熵效应和激光快速凝固。在800、1 000和1 200℃热处理20 h后,除 $\beta\text{-Ti}_x\text{W}_{1-x}$ 相析出外,涂层的结构和BCC固溶体相基本保持不变,表明涂层具有较高的热稳定性。SHU F Y等^[39]采用激光熔覆技术在低碳钢表面制备了一种新型非晶态高熵合金涂层,对制备的涂层中两种特征层的组织和高温磨损行为进行研究。发现上层为非晶态/结晶层,主要由非晶态相和面心立方相组成,下层主要为体心立方固溶相,析出碳化物和硼化物。上层非晶相的体积分数约为49%,形成了新的磨损机制,显著提高了高温环境下的耐磨性。

其他金属表面制备高熵合金涂层同样能发挥高熵合金的性能。YUE T M等^[40]在纯Mg基板表面采用激光熔覆技术制备AlCoCrCuFeNi HEA。发现涂层的顶部是致密的AlCoCrCuFeNi HEA层,在其下方存在复合层,能在Mg基体中熔化部分HEA粉末。在HEA凝固过程中,由于Cu与其他HEA元素的亲和力较低,部分Cu扩散到Mg熔体中。SHON Y D等^[41]采用激光增材法在Al基板上制备了HEA涂层。在激光加工过程中,采用双层涂层和更高的能量输入相结合的方法,实现了对稀释效应的控制,使整个涂层获得优异的耐腐蚀性能。刘昊等^[34]采用激光熔覆技术在Al-Si304不锈钢表面制备了AlCoCrFeNiSi_x($x=0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$)高熵合金涂层。研究了Si元素对Al-

CoCrFeNiSi_x高熵合金涂层微观组织和性能的影响。发现AlCoCrFeNiSi_x高熵合金涂层由体心立方构成。随着Si含量增加,Si元素置换固溶使晶格收缩,晶粒逐步细化,纳米尺度球状AlNi相在晶粒内脱溶,涂层的显微硬度达到8 481 MPa。AlCoCrFeNiSi_x高熵合金涂层的热力学腐蚀倾向和均匀腐蚀速率均低于基材AISI304不锈钢。Si元素的掺杂提高了钝化膜的修复能力和稳定性,使腐蚀机制从自催化发展的点蚀转变为晶间腐蚀。YE Q F等^[42]采用激光熔覆制备了CrMnFeCoNiHEA涂层,结果表明在3.5%的NaCl溶液和0.5 mol/L硫酸溶液中,涂层的耐蚀性均优于A36钢基体,但低于304不锈钢。

目前,对于激光熔覆工艺参数对高熵合金涂层组织和性能的研究相对较少,这是激光熔覆制备高熵合金的研究方向之一。激光熔覆技术可制备优异性能的高熵合金涂层,但也存在一些局限性,激光设备复杂、占用空间大、成本昂贵、涂层稀释严重。由于涂层快冷效应,应力分布不匀,不利于排气浮渣,出现涂层间隙和硬度不均等缺陷。

2.2 电弧熔覆

电弧熔覆技术主要有合金焊丝电弧直接熔入法、预涂合金粉末电弧直接熔入法和合金元素间接熔入法。霍文焱等^[43]采用电弧熔覆在Q235钢表面熔覆TiCrCuFeNi HEA涂层,研究了其组织结构、耐磨性及硬度等,发现涂层主要由BCC相、FCC相和Laves相组成,耐磨性优异,以磨粒磨损和粘着磨损为主,抗腐蚀性能优于不锈钢,涂层表面硬度(HV)高达754。

WANG C M等^[44]采用钨弧熔覆工艺在X65钢基板上制备了CrMnFeCoNi涂层。发现涂层中宏观偏析区Fe含量较高,宏观偏析区表现为含有高密度位错的体心立方结构,证明在宏观偏析区发生了马氏体相变。动电位极化曲线表明,CrMnFeCoNi涂层经历了主动、被动和过钝化3个阶段。在主动阶段,宏观分离区优先发生溶解,主要由相组分因素和合金组分因素决定。在被动阶段,CrMnFeCoNi涂层形成被动膜,而宏观分离区则表现为主动溶解,形成较深的裂缝。一旦宏观偏析区形成深裂缝,则裂缝腐蚀机制起主导作用。GROMOV V E等^[45]采用线弧增材制造(WAAM)技术在5083铝合金基体上制备了非等摩尔比的高熵合金FeCoCrNiMn涂层。发现涂层显微硬度为2.5~3.5 GPa,在与基体的边界处增至9.9 GPa。涂层中部的磨损系数为 $2.3 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,摩擦因数为0.7。在涂层与基体的界面处形成了厚度达450 μm 的过渡层。LIU J等^[46]通过绞合方法,设计开发了一种MoNbTaWTi难熔高熵合金缆式丝材,并开展

MoNbTaWTi 难熔高熵合金线弧熔覆成形研究, 制备的 MoNbTaWTi 难熔高熵合金成形层结构为单一的 BCC 相, 室温平均硬度 ($HV_{0.2}$) 为 533。这为高熵合金的丝材制备及其快速制造提供了一种新方法。

目前, 研究电弧熔覆制备高熵合金涂层处于探索阶段, 提高电弧熔覆效率及优化其工艺参数是电弧熔覆制备涂层研究的重点。

2.3 等离子熔覆

等离子熔覆技术是指利用等离子弧为热源产生高温快速熔化高熵合金粉末或丝材, 并在高速氩气作用下喷射至基材表面, 与熔化的基体表面材料一起扩散和反应等, 冷却凝固后形成以冶金结合的 HEAs 熔覆层, 是一种高效的表面再制造技术。图 2 为等离子高熵合金涂层原理。该技术需要考虑材料之间的流动性、相容性、润湿性等因素, 成形后的制件结合强度高、力学性能优异^[47]。

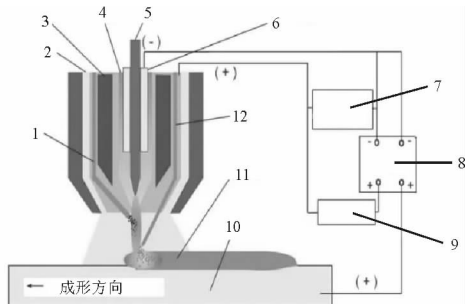


图 2 等离子喷涂设备原理

Fig.2 Principle of plasma spraying equipment

1. 基质粉末和进料气体 2. 保护气体 3. 冷却 4. 等离子气体
5. 钨极 6. 电极焊接电流 7. 高频点火 8. 电源 9. 引弧逆变器
10. 母材 11. 堆焊层 12. 硬质表面和进料气体

王智慧等^[48]通过该技术制备 CoCrCuFeNiMn HEA 熔覆层, 分析了该熔覆层的组织结构等, 发现该 HEA 熔覆层为 FCC 结构, 拥有树枝晶形貌且有纳米相组织析出。卢金斌等^[49]在 Q235 钢基体上制备 CoCr-CuFeMnNi HEA 涂层, 发现涂层主要为 FCC 和 BCC 相组成, 显微硬度 ($HV_{0.2}$) 最高为 390, 高于基体的硬度。CHENG J B 等^[50]研究了 CoCrCuFeNiNb_x HEA 涂层的组织和性能。发现添加 Nb 元素会改变原来的相构成。CoNiCuFeCrNb 涂层中可以检测到有序的 Laves 相和 FCC 固溶相的形成。在相同的磨损测试条件下, 含 Nb 涂层的相对耐磨性约为无 Nb 涂层的 1.5 倍。在盐酸溶液中, Nb 涂层表现出最低的腐蚀电流密度。ANG A S M 等^[51]采用机械合金化制备的 Al-CoCrFeNi 和 MnCoCrFeNi 高熵合金粉末利用等离子喷涂技术制备了两种高熵合金涂层。发现 AlCoCrFe-Ni 粉末机械合金化后形成的主要相是 BCC。相反,

FCC 相在 MnCoCrFeNi 粉末中占主导地位, 且两种 HEA 涂层的层状等离子喷涂微观结构都具有 FCC 相。然而, 由于高温涂层工艺, 也形成了少量的氧化物相。TIAN L H 等^[52]在 316 不锈钢表面以机械合金粉末为原料利用等离子喷涂制备了 AlCoCrFeNiTi 高熵合金涂层。研究发现, 涂层含有少量 FCC 和 BCC 固溶体相。AlCoCrFeNiTi 涂层的磨损行为随着磨损温度的升高而发生显著变化, 在 700 ℃ 时, 涂层表现出优异的耐磨性。YUE T M 等^[53]在 Mg 基底表面利用等离子喷涂和激光熔覆双步法制备了 AlCaCrCuFeNi 高熵合金涂层。发现喷涂的 HEA 涂层含有尺寸为 50 μm 的微孔; 激光重熔后, 在重凝固层中没有观察到明显的孔隙, 喷涂层中存在的微孔被消除, 获得了致密的表面层。喷涂和激光重熔涂层均主要由 BCC 固溶体相和少量 FCC 相组成, 未发现金属间化合物。

等离子熔覆可制备厚度大于 1 mm 的合金熔覆层, 并且熔覆工艺简单、材料利用率高、热效率高、设备的使用成本低, 冶金结合强度高; 熔覆层的稀释率小, 排气浮渣性好, 熔覆层的组织均匀细小等, 综合性能相对较好, 在航空航天、工程机械增材和修复再制造领域有着非常广泛的应用。此外, 等离子熔覆工艺适应性强、对环境要求低、便于规模化生产^[54]。因此, 等离子熔覆在大面积、大厚度损伤部件表面修复再制造有明显优势。但在采用粉末制备高熵合金时, 精度难以控制, 热源温度高, 在送粉过程中, 不能精确控制气流, 导致涂层的成形差, 限制了等离子熔覆的应用。

2.4 热喷涂

热喷涂技术是利用高速气流将材料送入热源(电弧、火焰等)快速熔化后将材料喷射至基材表面, 待冷却凝固, 形成冶金结合的涂层技术。该制备技术喷涂后冷却速度快, 有利于形成非晶或纳米晶高熵合金, 喷涂综合性能优异的高熵合金熔覆层至装备或零件的表面, 能显著提升装备即零件的服役寿命。CHEN L J 等^[55]利用超音速火焰喷涂制备 Al_{0.6}TiCrFeCoNi 高熵合金涂层, 并研究涂层在不同温度下的摩擦行为。发现涂层表面硬度 ($HV_{0.1}$) 为 789 ± 54, 断裂韧性为 8.4 MPa · m^{1/2}, 随着试验温度升高, 涂层的磨损行为发生了显著变化。其主要磨损机理是磨料磨损。随着温度升高, 疲劳对涂层力学性能的影响越来越大, 特别是相变对涂层力学性能的影响。在 500 ℃ 时, 摩擦反应起了重要作用。在磨损轨迹上形成了致密的氧化层, 由于其作为固体润滑剂的作用, 摩擦因数最低, 与 300 ℃ 相比, 磨损率没有进一步增加。

WANG W R 等^[56]采用等离子喷涂技术在 Q235

钢基体上制备了厚度为 500 μm 的 $(\text{CoCrFeNi})_{95}\text{Nb}_5$ HEA 涂层。微观分析结果表明,与高熵合金粉末相比, $(\text{CoCrFeNi})_{95}\text{Nb}_5$ HEA 涂层形成了新的 Laves 相,枝晶和枝间晶之间发生了元素偏析,枝间晶富集了 Cr 和 Nb。HEA 涂层的显微硬度 ($\text{HV}_{0.5}$) 为 321,显著高于基体的显微硬度。在耐蚀性方面,涂层在 NaCl 溶液中具有较好的耐蚀性。虽然腐蚀形式为点蚀,但 HEA 涂层的点蚀电位明显高于其他涂层,这主要是由于涂层表面存在 Cr 和 Nb 形成的致密钝化膜。研究发现,等离子喷涂技术制备的 $(\text{CoCrFeNi})_{95}\text{Nb}_5$ HEA 涂层可以显著提高 Q235 钢基体的耐蚀性和力学性能。热喷涂技术对基材热损伤较弱、材料残余应力弱,涂层厚度较薄,涂层与基材结合能力弱等,制备的涂层难以满足高速重载等复杂工况。在使用热喷涂技术制备高熵合金涂层,对涂层进行热处理,可提高涂层性能。

2.5 磁控溅射

磁控溅射是指在电场作用下,电荷的离子获得电场能从而被加速轰击到金属靶材上,猛烈碰撞使得靶材中的粒子发生溅射后最终被吸附沉积在靶材表面形成薄膜。该制备技术可用于任何材料,适用性广,薄膜与基材结合良好,厚度可控性好,镀膜面积大,但是磁控溅射设备复杂,溅射过程中,易受气体杂质等影响。

随着对高熵合金研究不断深入,通过磁控溅射技术制备高熵合金涂层也取得了很大进展。马铭等^[57]利用该技术制备 AlCrWTaTiNb HEA 薄膜,探究了氮化处理对薄膜的组织结构、微观形貌和性能等的影响,发现该薄膜为 FCC 结构,增加氮化温度能够提升薄膜的硬度和弹性模量等力学性能。黄纯可等^[58]利用该技术沉积 AlCoCrFeNi HEA 薄膜,探究了 Al 含量对该薄膜组织结构和力学性能的关系,发现添加 Al 后发生固溶强化作用从而显著提高了 AlCoCrFeNi HEA 薄膜的硬度。FENG X 等^[59]在 Si 基片上采用多靶磁控溅射工艺沉积 ZrNbTaTiWHEA 薄膜。发现当 Zr 摩尔分数超过 35% 时,薄膜中形成非晶态结构。硬度和模量分别为 5.9~11.5 GPa、134.4~190.4 GPa。BRAECK-MAN B R 等^[60]采用多靶磁控溅射工艺制备 AlCoCr-CuFeNi HEA 薄膜。通过增加 Al 含量,观察到薄膜由 FCC 向 BCC 结构的转变。

2.6 电化学沉积

电化学沉积法是指含有电解液、电源、阴阳电极等构成的回路,在电场作用下,基材发生物理和化学反应后析出 HEAs 薄膜的表面镀层工艺。使用电化学沉积法在基材表面制备高熵合金镀层,能够强化材料的耐腐蚀性能、抗氧化性能、抗辐照性能、耐磨损性能等,有效

提高了装备和零件的服役寿命。LI H 等^[61]采用电化学沉积制备 MgMnFeCoNiGd 合金涂层。发现沉积的合金是非晶态的,当 Mg 含量低于 20% 时,可以观察到铁磁性到抗磁性的转变。YAO C Z 等^[62]采用恒电位电沉积制备了 BiFeCoNiMn 高熵合金薄膜,经 N_2 气氛退火后,薄膜主要为面心立方 (FCC) 结构的固溶体,在 762 K 热处理时薄膜可以结晶。沉积时的薄膜表现为软磁行为,而退火后的薄膜表现为硬磁各向异性。薄膜表面由致密均匀的颗粒组成,呈三角锥形,粒径为 100~200 nm,当将薄膜在氩气气氛下退火后,形成了简单的结构,沉积态薄膜表现出软磁性,而退火态薄膜表现出硬磁性。

电化学沉积技术制备高熵合金涂层有一定的优势,但由于高熵合金中组元较多,各元素之间的电负性差异较大,不能精确控制高熵合金元素的成分。电化学沉积高熵合金涂层时,受到电镀液传质的影响,涂层易产生裂纹缺陷,达不到提高涂层综合性能的目的。因此,电化学沉积工艺制备高熵合金涂层时需解决裂纹缺陷。研究采用磁场+电化学沉积复合工艺,利用磁场与电场之间的交互作用,产生磁流体动力学效应,提高电镀液的传质,从而达到提高合金涂层综合性能的作用,为高熵合金涂层的制备提供了新方法。

3 存在问题与研究展望

高熵合金涂层的选择存在一定的局限性,目前主要使用的是现有高熵合金体系,主要针对耐磨损涂层、耐腐蚀涂层、抗高温氧化涂层以及部分物理性能。对于非晶高熵合金涂层、高熵合金复合材料的研究较少。高熵合金涂层的选择存在盲目性,并没有根据基体金属的实际工作环境设计高熵合金涂层。目前的研究还是在已有的高熵合金体系中添加元素改变高熵合金性能,不能确保涂层性能与实际需求相匹配。高熵合金涂层的使用范围还需要扩大,不仅限于材料强化领域,在生物医学等领域也有着广泛的应用前景。

针对目前高熵合金的研究趋势,高熵合金将在以下方向有着较大的发展。

(1) 现有的制备工艺与高熵合金涂层品质之间的关系还需要进一步研究。

(2) 由于高熵合金具有优异的耐磨性、耐腐蚀性、抗高温氧化性和较好的物理性能,因此需要设计具有特殊物理特性的高熵合金薄膜和涂层,并且说明高熵合金薄膜/涂层的成分、相结构和物理性能之间的机制。

(3) 目前现有的报道主要是针对高熵合金作为涂层,但是对高熵合金复合材料的研究报道较少。为进一步提高高熵合金涂层的整体性能,满足在极端条件下高

熵合金涂层的使用要求,高熵合金基复合材料的成分设计与制备技术将是高熵合金发展的趋势。

(4)高熵合金薄膜、涂层建模和理论计算的研究较弱,对涂层和薄膜进行仿真模拟有助于说明制备工艺、微观结构和性能之间的关系,因此需要进行更多高熵合金薄膜和涂层预测、理论计算模型的研究。

参 考 文 献

- [1] MIRACLE D B, SENKOV O N. A critical review of high entropy alloys and related concepts[J]. *Acta Materialia*, 2017, 122: 448-511.
- [2] SENKOV O, MILLER J, MIRACLE D, et al. Accelerated exploration of multi-principal element alloys with solid solution phases[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 1-10.
- [3] ZHANG Y, GAO M C, YEH J W, et al. High-Entropy Alloys: Fundamentals and Applications [M]. AG Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
- [4] 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.
- [5] LI D, LI C, FENG T, et al. High-entropy $\text{Al}_{0.3}\text{CoCrFeNi}$ alloy fibers with high tensile strength and ductility at ambient and cryogenic temperatures[J]. *Acta Materialia*, 2017, 123: 285-294.
- [6] 叶喜葱, 徐张洋, 王童, 等. Si 含量对 AlCrNiTiSi_x 高熵合金微观组织和硬度的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2020, 40(12): 1 323-1 327.
- [7] 姚昆达, 刘亮, 商剑, 等. $\text{Al}_{0.8}\text{CrFe}_2\text{Ni}_x$ 高熵合金的组织与力学性能[J]. *特种铸造及有色合金*, 2020, 40(8): 880-883.
- [8] 丁一, 胡振峰, 梁秀兵, 等. 高熵合金高温抗氧化性的研究进展[J]. *表面技术*, 2021, 50(1): 162-172.
- [9] 孙驰驰, 张艳, 张静, 等. CoCrFeNi 系高熵合金耐腐蚀性能研究进展[J]. *特种铸造及有色合金*, 2020, 40(5): 557-562.
- [10] 刘超, 相珺, 伍复发, 等. 铸态 $\text{Fe}_x(\text{CoCrNiV})_{(100-x)}$ 合金的组织与性能[J]. *特种铸造及有色合金*, 2021, 41(10): 1 224-1 228.
- [11] 王海斗, 莫继良, 岳文. “表面工程材料与技术”专题(2022年)序言[J]. *材料导报*, 2022, 36(7): 3-4.
- [12] 王宾. 不锈钢表面 $(\text{CoCrFeNiTiSi}_x)_{(100-y)}\text{WC}_y$ 高熵合金激光熔覆层组织及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- [13] AN Z, JIA H, WU Y, et al. Solid-solution CrCoCuFeNi high-entropy alloy thin films synthesized by sputter deposition[J]. *Materials Research Letters*, 2015(3): 203-209.
- [14] KATAKAM S, JOSHI S S, MRIDHA S, et al. Laser assisted high entropy alloy coating on aluminum: Microstructural evolution[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(10): 104 906.
- [15] FANG Q H, CHEN Y, LI J, et al. Microstructure and mechanical properties of FeCoCrNiNb_x high-entropy alloy coatings[J]. *Physica*, 2018, B550: 112-116.
- [16] HSU W L, YANG Y C, CHEN C Y, et al. Thermal sprayed high-entropy $\text{NiCo}_{0.6}\text{Fe}_{0.2}\text{Cr}_{1.5}\text{SiAlTi}_{0.2}$ coating with improved mechanical properties and oxidation resistance[J]. *Intermetallics*, 2017, 89: 105-110.
- [17] LI Y Z, SHI Y. Microhardness, wear resistance, and corrosion resistance of $\text{Al}_x\text{CrFeCoNiCu}$ high-entropy alloy coatings on aluminum by laser cladding [J]. *Optics and Laser Technology*, 2021, 134: 106 632.
- [18] LIN D Y, ZHANG N N, HE B, et al. Tribological properties of Fe-CoCrNiAlB_x high-entropy alloys coating prepared by laser cladding [J]. *Journal of Iron and Steel Research (International)*, 2017, 24(2): 184-189.
- [19] 刘谦, 王昕阳, 黄燕滨, 等. Mo 含量对 CoCrFeNiMo 高熵合金组织及耐腐蚀性能的影响[J]. *材料研究学报*, 2020, 34(11): 868-874.
- [20] JIANG Y Q, LI J, JUAN Y F, et al. Evolution in microstructure and corrosion behavior of $\text{AlCoCr}_x\text{FeNi}$ high-entropy alloy coatings fabricated by laser cladding [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 775: 1-14.
- [21] ZHANG C, CHEN G J, DAI P Q. Evolution of the microstructure and properties of laser-clad FeCrNiCoB_x high-entropy alloy coatings [J]. *Metal Science Journal*, 2016, 32(16): 1 666-1 672.
- [22] 董世知, 孟旭, 马壮, 等. WC 和 Al_2O_3 对氩弧熔覆 $\text{FeAlCoCrCuTi}_{0.4}$ 高熵合金涂层组织和耐冲蚀性能影响[J]. *焊接学报*, 2019, 40(7): 127-132, 166-167.
- [23] CAI Z B, CUI X F, JIN G, et al. Microstructure and thermal stability of a Ni-Cr-Co-Ti-V-Al high-entropy alloy coating by laser surface alloying [J]. *Metals and Materials International*, 2017, 23(5): 1 012-1 018.
- [24] 邸英南, 刘洪喜, 张晓伟, 等. 钛合金表面激光熔覆 AlCoCrFeMoVTi 高熵合金涂层的摩擦磨损和高温抗氧化性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2021, 50(8): 2 883-2 891.
- [25] SHENG W J, YANG X, WANG C, et al. Nano-crystallization of high-entropy amorphous $\text{NbTiAlSiW}_x\text{N}_y$ films prepared by magnetron sputtering [J]. *Entropy*, 2016, 18(6): 226-232.
- [26] SHEN W J, TSAI M H, TSAI K Y, et al. Superior oxidation resistance of $(\text{Al}_{0.34}\text{Cr}_{0.22}\text{Nb}_{0.11}\text{Si}_{0.11}\text{Ti}_{0.22})_{50}\text{N}_{50}$ high-entropy nitride [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2013, C160(11): 531-535.
- [27] TSAI D C, DENG M J, CHANG Z C, et al. Oxidation resistance and characterization of $(\text{AlCrMoTaTi})\text{-Si}_x\text{-N}$ coating deposited via magnetron sputtering [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 647: 179-188.
- [28] YEN J W, CHUN Y C. High-entropy BNbTaTiZr thin film with excellent thermal stability of amorphous structure and its electrical properties [J]. *Materials Letters*, 2016, 185: 456-459.
- [29] LIN P C, CHENG C Y, YEN J W, et al. Soft magnetic properties of high-entropy Fe-Co-Ni-Cr-Al-Si thin films [J]. *Entropy*, 2016, 18(8): 308-320.
- [30] QIU X W, ZHANG Y P, LIU C G. Effect of Ti content on structure and properties of $\text{Al}_2\text{CrFeNiCoCuTi}_x$ high-entropy alloy coatings [J]. *Journal of Alloys & Compounds*, 2014, 585: 282-286.
- [31] DUCHANIYA R K, PANDEL U, RAO P. Coatings based on high entropy alloys: An overview [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 44: 4 467-4 473.
- [32] 张航, 陈子豪, 何垚垚, 等. 增材制造高熵合金的研究进展[J]. *特种铸造及有色合金*, 2020, 40(12): 1 314-1 322.
- [33] 陈磊, 刘其斌. 激光熔覆制备高熵合金 MnCrTiCoNiSi_x 涂层组织与性能的分析[J]. *应用激光*, 2014, 34(6): 494-498.
- [34] 刘昊, 高强, 郝敬宾, 等. 激光熔覆 AlCoCrFeNiSi_x 高熵合金涂层的微观组织及耐腐蚀性能[J]. *稀有金属材料与工程*, 2022, 51(6): 2 199-2 208.

- [35] LIU J, JING B, CHEN P, et al. Microstructural characterization and corrosion behaviour of AlCoCrFeNiTi_x high-entropy alloy coatings fabricated by laser cladding[J]. Surface & Coatings Technology, 2019, 361: 63-74.
- [36] WU C L, ZHANG S, ZHANG C H, et al. Phase evolution and cavitation erosion-corrosion behavior of FeCoCrAlNiTi_x high entropy alloy coatings on 304 stainless steel by laser surface alloying[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 698: 761-770.
- [37] 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.
- [38] ZHANG M, ZHOU X, YU X, et al. Synthesis and characterization of refractory TiZrNbWMo high-entropy alloy coating by laser cladding[J]. Surface & Coatings Technology, 2017, 311: 321-329.
- [39] SHU F Y, LIU S, ZHAO H Y, et al. Structure and high-temperature property of amorphous composite coating synthesized by laser cladding FeCrCoNiSiB high-entropy alloy powder[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 731: 662-666.
- [40] YUE T M, XIE H, LIN X, et al. Solidification behaviour in laser cladding of AlCoCrCuFeNi high-entropy alloy on magnesium substrates[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 587-593.
- [41] SHON Y D, JOSHI S S, KATAKAM S, et al. Laser additive synthesis of high entropy alloy coating on aluminum: Corrosion behavior[J]. Materials Letters, 2015, 142: 122-125.
- [42] YE Q F, FENG K, LI Z G, et al. Microstructure and corrosion properties of CrMnFeCoNi high entropy alloy coating[J]. Applied Surface Science, 2017, 396: 1 420-1 426.
- [43] 霍文斌, 时海芳, 张竞元. 电弧熔覆 TiCrCuFeNi 高熵合金涂层的组织与性能[J]. 机械工程材料, 2014, 38(8): 61-64.
- [44] WANG C M, YU Y, YU J X, et al. Effect of the macro-segregation on corrosion behavior of CrMnFeCoNi coating prepared by arc cladding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 846: 156 263.
- [45] GROMOV V E, KONOVALOV S V, IVANOV Y F, et al. Investigation of the structure and properties of a coating from a high-entropy FeCoCrNiMn alloy obtained by a wire arc additive manufacturing[J]. Physics of the Solid State, 2022, 64(6): 1-5.
- [46] LIU J, LI J, DU X, et al. Microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured MoNbTaWTi high entropy alloys[J]. Materials, 2021, 14(16): 4 512.
- [47] 魏仕勇, 彭文屹, 陈斌, 等. 等离子弧粉末堆焊熔覆材料的研究现状与进展[J]. 材料导报, 2020, 34(9): 9 143-9 151.
- [48] 王智慧, 王虎, 贺定勇, 等. 等离子熔覆 CoCrCuFeNiMn 高熵合金组织研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(3): 644-648.
- [49] 卢金斌, 彭竹琴, 马明星, 等. Q235 钢等离子熔覆 CoCrCuFeMnNi 高熵合金涂层[J]. 金属热处理, 2016, 41(4): 51-54.
- [50] CHENG J B, LIANG X B, XU B S. Effect of Nb addition on the structure and mechanical behaviors of CoCrCuFeNi high-entropy alloy coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2014, 240: 184-190.
- [51] ANG A S M, BERNDT C C, SESSO M L, et al. Plasma-sprayed high entropy alloys: Microstructure and properties of AlCoCrFeNi and MnCoCrFeNi[J]. Metallurgical & Materials Transactions, 2015, A46(2): 791-800.
- [52] TIAN L H, XIONG W, LIU C, et al. Microstructure and wear behavior of atmospheric plasma-sprayed AlCoCrFeNiTi high-entropy alloy coating[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25: 5 513-5 521.
- [53] YUE T M, XIE H, LIN X, et al. Microstructure of laser Re-melted AlCoCrCuFeNi high entropy alloy coatings produced by plasma spraying[J]. Entropy, 2013, 15: 2 833-2 845.
- [54] 焦志鹏. 微束等离子增材再制造高熵合金熔覆层组织及性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2019.
- [55] CHEN L J, BOBZIN K, ZHOU Z, et al. Wear behavior of HVOF-sprayed Al_{0.6} TiCrFeCoNi high entropy alloy coatings at different temperatures[J]. Surface & Coatings Technology, 2019, 358: 215-220.
- [56] WANG W R, WU Q, LU X, et al. Microstructure and corrosion behavior of (CoCrFeNi)₉₅Nb₅ high-entropy alloy coating fabricated by plasma spraying[J]. Materials, 2019, 12(5): 694-701.
- [57] 马铭, 任瑛, 侯晓多, 等. 磁控溅射制备 AlCrWTaTiNb 高熵合金薄膜低温等离子体氮化[J]. 大连理工大学学报, 2019, 59(1): 28-34.
- [58] 黄纯可, 李伟, 刘平, 等. 磁控溅射法制备 Al_xCoCrFeNi 高熵合金薄膜的微观组织和力学性能研究[J]. 功能材料, 2017, 48(6): 6 144-6 148.
- [59] FENG X, TANG G, SUN M, et al. Structure and properties of multi-targets magnetron sputtered ZrNbTaTiW multielements alloy thin films[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 228: 424-427.
- [60] BRAECKMAN B R, BOYDENS F, HIDALGO H, et al. High entropy alloy thin films deposited by magnetron sputtering of powder targets[J]. Thin Solid Films, 2015, 580: 71-76.
- [61] LI H, SUN H, WANG C, et al. Controllable electrochemical synthesis and magnetic behaviors of Mg-Mn-Fe-Co-Ni-Gd alloy films[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 598: 161-165.
- [62] YAO C Z, ZHANG P, LIU M, et al. Electrochemical preparation and magnetic study of Bi-Fe-Co-Ni-Mn high entropy alloy[J]. Electrochimica Acta, 2008, 53: 8 359-8 365.

(编辑: 刘晨辉)

欢迎关注
“特种铸造”
微信公众号



- | | | |
|--------|---------|--------|
| ● 微官网 | ● 行业动态 | ● 联系我们 |
| ● 微商城 | ● 铸造前沿 | ● 免费推广 |
| ● 本刊会议 | ● 经典案例 | ● 铸造职场 |
| ● 收录动态 | ● 铸造学堂 | ● 产品库 |
| ● 稿件系统 | ● 专利与发明 | ● 企业库 |