

合金成分对激光熔覆高熵合金涂层影响的研究进展

刘卫东^{1,2} 米国发¹ 李 雷²

(1.河南理工大学材料科学与工程学院; 2.上海电机学院材料学院)

摘 要 高熵合金(High-Entropy Alloys, HEAs)因其兼备优越的力学和电化学性能,得到研究者关注。激光熔覆可在基材表面熔覆具有特种功能的涂层,使单一材质材料成为功能梯度复合材料,通过激光熔覆在材料表面制备 HEAs 涂层,可显著提升材料表面硬度、高温力学性能和耐腐蚀性,延长服役寿命。概述了合金成分及含量对激光熔覆 HEAs 涂层硬度、耐磨性、耐腐蚀性等性能的影响及其机理,总结了激光熔覆制备 HEAs 涂层面临的挑战,展望了激光熔覆 HEAs 涂层的应用前景和发展方向。

关键词 激光熔覆;高熵合金;力学性能;耐腐蚀性能;微观组织

中图分类号 TG139;TG174.44 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.07.012 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Research Progress in Influence of Composition and Content on Laser Cladding High-entropy Alloy Coating

Liu Weidong^{1,2}, Mi Guofa¹, Li Lei²

(1.School of Materials Science and Engineering, Henan Polytechnic University;
2.School of Materials, Shanghai Dianji University)

Abstract: High-entropy alloys(HEAs) have been the focus of research in academia and industry due to the excellent mechanical and electrochemical properties. Coatings with special functions can be cladded on the substrate surface by laser cladding, making single material become functional gradient composite. HEAs coating on the surface can significantly improve the surface hardness, high-temperature mechanical properties and corrosion resistance of the material, prolonging the service life. The effects of alloy composition and content on the hardness, wear resistance and corrosion resistance of laser cladding HEAs coatings as well as the mechanism were reviewed. The challenges of laser cladding HEAs coatings were summarized, and the application as well as development direction of laser cladding HEAs coatings was prospected.

Key Words: Laser Cladding, High-entropy Alloys(HEAs), Mechanical Properties, Corrosion Resistance, Micro-structure

作为一种新型多组分合金材料,高熵合金(HEAs)因其独特的成分、微观结构备受关注^[1,2]。HEAs 又称多主元合金,由 YE H J W 等^[3]率先提出,其打破了长久以来以一种或两种元素为主元的传统合金设计理念,为新型合金体系的设计和开发拓展了新的方式。HEAs 通常由具有体心立方(BCC)结构、面心立方(FCC)结构、密排六方(HCP)结构的简单固溶体组成^[4,5]。HEAs 中的相数远低于 Gibbs 相律预判的相数,所以其具有优异的高温稳定性^[6]。由于激光能量密度大,熔覆速度快,熔池具有快热、快冷特征,快速凝固过程导致溶质截留效应而严重偏离平衡凝固,极大减小了成分偏析的程度,显著提高了合金的固溶极限^[7]。熔池快速凝固时过冷度大,可细化晶粒,甚至形成纳米晶或非晶^[1]。微观结构上表现为晶格畸变程度大,性能上表现为高硬度^[3]。HEAs 的高熵效应、迟滞扩散效应、晶格畸变效应以及“鸡尾酒效应”,赋予 HEAs 优异的力学性能和物理、化学性能^[8~11]。

通过激光熔覆技术制备的涂层与基体的结合方式为冶金结合,而超高速火焰喷涂和等离子喷涂与基体为机械结合,电镀硬铬与基体为物理结合,其粘结力均不如冶金结合。由于冶金结合中基体的稀释,结合区的成分互扩散导致成分浓度呈梯度变化,抗热敏感性更好,

收稿日期:2021-10-08;**修改稿收到日期:**2021-11-03
基金项目:上海市科委“科技创新行动计划”重大专项基金资助项目(19511105402)
第一作者简介:刘卫东,男,1997 年出生,硕士研究生,河南焦作(454003),E-mail:2391825696@qq.com
通信作者:李雷,男,1975 年出生,教授,上海(201306),E-mail:lilei1975@163.com
引用格式:刘卫东,米国发,李雷. 合金成分对激光熔覆高熵合金涂层影响的研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(7):847-855.
LIU W D, MI G F, LI L L. Research progress in influence of composition and content on laser cladding high-entropy alloy coating[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(7):847-855.

不易脱落。激光熔覆可根据性能需求进行灵活的成分设计,如可制备热障涂层、传热涂层,与基体材料热敏感性相匹配的涂层,但目前的激光熔覆高熵合金的应用成本相对较高。有电化学沉积和磁控溅射法制备 HEAs 薄膜、真空熔铸法制备块体 HEAs 和激光熔覆法制备涂层 HEAs^[12~14]。薄膜难以满足较大厚度 HEAs 的应用,相对于块状 HEAs,激光熔覆 HEAs 涂层厚度可在数微米到数毫米范围内调节,与基体形成良好的冶金结合,稀释率低、热影响区小、热变形小^[15~18],并具有不受制备试样尺寸限制的优点,易实现工业化生产^[19]。图 1 为激光熔覆加工示意图。

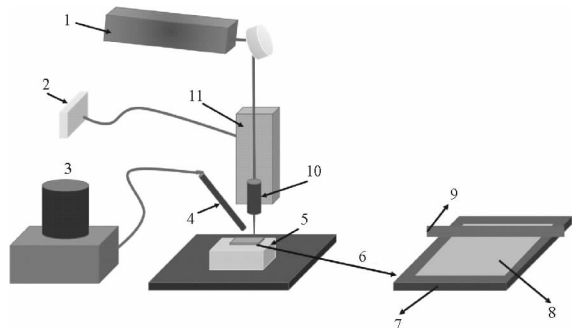
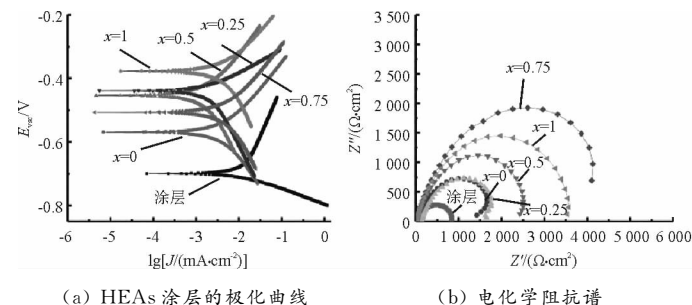


图 1 激光熔覆工艺过程示意图^[19]

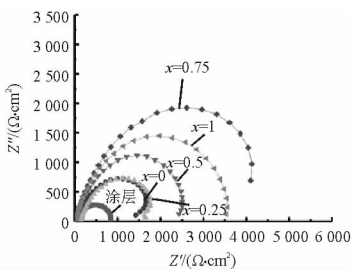
Fig.1 Schematic diagram of laser cladding^[19]

- 1.激光系统 2.运动控制系统 3.送粉器 4.喷嘴 5.基材
- 6.隆起区 7.固定磨料工具 8.金属粉 9.光滑的金属条
- 10.聚焦系统 11.三坐标系统

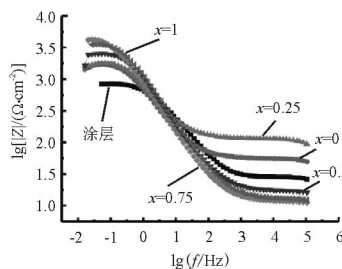
金属材料的腐蚀和磨损问题非常突出,尤其是在高应力、高温腐蚀或摩擦磨损等复杂环境中工作的零部件需要更高的强韧性、耐磨性、耐腐蚀性和高温稳定性等^[20]。在普通金属基材表面激光熔覆 HEAs 材料,形成功能梯度复合材料,使其具备基体材料不具备的高强、耐蚀、耐磨、抗氧化等性能,成为研究热点。本课题主要综述了目前 HEAs 激光熔覆材料成分及其含量对 HEAs 涂层组织性能的影响,为激光熔覆 HEAs 材料体系的设计和开发提供参考。



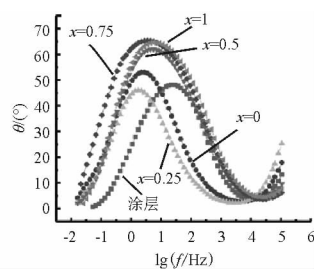
(a) HEAs 涂层的极化曲线



(b) 电化学阻抗谱



(c) 模值



(d) 相位角

图 2 $\text{Ni}_{1.5}\text{CrFeTi}_2\text{B}_{0.5}\text{Mo}_x$ 合金涂层的电化学参数^[21]

Fig.2 Electro-chemical parameters for $\text{Ni}_{1.5}\text{CrFeTi}_2\text{B}_{0.5}\text{Mo}_x$ HEAs coatings^[21]

备了 CoCrFeNiMo_x ($x=0.1, 0.2, 0.3$) HEAs 涂层,发现随着 Mo 含量增加,枝晶间距减小,二次枝晶更加发达,Cr 和 Mo 元素主要分布在枝晶间。Mo 的原子半径较

1 金属元素对 HEAs 涂层组织性能影响

HEAs 涂层材料体系中组元多为金属元素,不同的金属元素对涂层的微观组织和性能有着不同的影响。主要介绍 Mo、Nb、Ti、Al 元素对 HEAs 涂层组织性能的影响。

1.1 Mo

Mo 是难熔金属,原子间结合力强,常温和高温下强度高。Mo 的原子半径与 Fe、Cr、Ni 和 Ti 相近,在熔覆过程中易形成置换固溶体,减小晶格畸变程度,且热膨胀系数小,可减少甚至避免产生表面微裂纹。

GU Z 等^[21]采用激光熔覆技术制备了 $\text{Ni}_{1.5}\text{CrFe-Ti}_2\text{B}_{0.5}\text{Mo}_x$ ($x=0, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00$, 摩尔比,下同) HEAs 涂层,发现 Mo 的加入使涂层由单相 BCC 转变为双相 BCC+FCC。随着 Mo 含量增加,涂层弹性模量和纳米硬度提升,但 x 超过 0.75 后,其纳米硬度继续增大而弹性模量下降。图 2 为 $\text{Ni}_{1.5}\text{CrFeTi}_2\text{B}_{0.5}\text{Mo}_x$ 合金基体和涂层的耐腐蚀性能图谱。可以看出, $x=0.75$ 时涂层的耐腐蚀性最好,且所有涂层的耐腐蚀性都优于 904L 不锈钢基体。与基体和其他涂层相比, $x=0.75$ 和 $x=1$ 时合金耐腐蚀性和耐磨性更好,最高平均显微硬度约为基体的 3.6 倍,合理的 Mo 含量对提升发动机叶片的耐磨性和耐腐蚀性,延长服役寿命效果显著。

JUAN F Y 等^[22]以 45 钢为基体,采用激光熔覆技术制备了 FeCrCoNiAlMo_x ($x=0.25, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50$) HEAs 涂层,发现涂层组织为树枝晶,随着 Mo 含量增加,稀释率渐增,涂层的显微组织相对均匀,整个涂层的显微硬度只有轻微波动。Mo 含量增加导致枝晶间析出 CrFeNiMo 新相,硬度和耐磨性削弱。 $x=1$ 时具有最高的显微硬度,最小且稳定的摩擦因数,以及最小的磨损量、磨损率。

刘谦等^[23]以 Q235 钢为基体,采用激光熔覆技术制

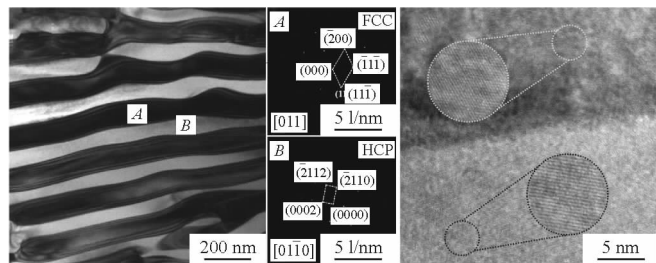
大,不利于扩散,形成了枝晶间金属间化合物 CrMo ,涂层由单相 FCC 转变为双相 $\text{FCC}+\text{MoCr}(\sigma$ 相)。涂层在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中耐腐蚀性能表现优

良,结合第一性原理计算分析表明,这是由于表面形成了致密的钝化膜,且随着 Mo 含量增加耐腐蚀性增强,拓宽了常用钢材 Q235 的应用范围。

1.2 Nb

Nb 可促进精细第二相的形成,有助于提高合金的硬度和耐磨性。单相 FCC 结构的 HEAs 塑性好但强度不高,而单相 BCC 结构的 HEAs 强度高但相对较脆。为了克服这些缺点,开发了第二代 HEAs,其通常由 4 种以上非等摩尔分数元素组成,并具有多相结构^[24]。LI T X 等^[25]、LU Y P 等^[26] 结合共晶合金和 HEAs 提出了共晶高熵合金(EHEAs)的概念,EHEAs 由高强度相(BCC 相或金属间化合物)和高塑性相(FCC 相)组成的层片状或棒状共晶组织结构,使 HEAs 达到了强韧性的平衡^[27,28]。Laves 相具有高配位数和空间填充度,大的晶胞和位错矢量的 TCP 结构,这使位错形核和滑移变得相当困难,在室温下的硬度高达 8~9 GPa^[29]。

WEN X 等^[30]通过二元共晶成分计算、热力学计算和简单的试错,采用激光熔覆技术在 316L 不锈钢基体上成功制备了 $\text{Ni}_{1.5}\text{CrCoFe}_{0.5}\text{Mo}_{0.1}\text{Nb}_x$ ($x=0.55, 0.68, 0.8$) EHEAs 涂层,成功地设计了一种具有纳米层片结构的新型 $\text{Ni}_{1.5}\text{CrCoFe}_{0.5}\text{Mo}_{0.1}\text{Nb}_{0.68}$ EHEAs,其 TEM 图像见图 3。该涂层由 FCC 相和 HCP 相(C-14Laves 相)组成,硬质的 C-14Laves 相使涂层得到强化。由于 $\text{Ni}_{1.5}\text{CrCoFe}_{0.5}\text{Mo}_{0.1}\text{Nb}_{0.68}$ 涂层为共晶组织,该成分的涂层兼具优异的强度和塑性,强韧性得到平衡,综合力学性能优良。 $\text{Ni}_{1.5}\text{CrCoFe}_{0.5}\text{Mo}_{0.1}\text{Nb}_x$ ($x=0.55, 0.68, 0.8$)涂层中心区域为层片状的亚共晶($x=0.55$)/共晶($x=0.68$)/过共晶($x=0.8$)组织,涂层和基体界面区域为柱状晶组织^[31,32]。随着 Nb 含量增加,涂层的平均显微硬度提高,主要磨损机制由粘着磨损转变为磨粒磨损,耐磨性提高。



(a) TEM 图像和相应的选区电子衍射图像 (b) FCC 相和 Laves 相界面的高分辨率 TEM 显微图像^[30]

图 3 $\text{Ni}_{1.5}\text{CrCoFe}_{0.5}\text{Mo}_{0.1}\text{Nb}_{0.68}$ EHEAs 涂层 TEM 图像

Fig.3 TEM images of $\text{Ni}_{1.5}\text{CrCoFe}_{0.5}\text{Mo}_{0.1}\text{Nb}_{0.68}$ EHEAs coating

WANG H L 等^[33]在 M2 工具钢表面采用激光熔

覆技术制备了 $\text{MoFe}_{1.5}\text{CrTiWAlNb}_x$ ($x=1.5, 2, 2.5, 3$) EHEAs 涂层,发现涂层由 BCC 相、(Nb, Ti)C 相和 C14-Laves 相组成。随着 Nb 含量增加,组织结构由胞状晶向柱状晶转变,晶界出现大量的碳化物颗粒,显微硬度逐渐提升,涂层的磨损量和摩擦因数下降, $x=3$ 时涂层显微硬度($\text{HV}_{0.2}$)达到了 910,远高于基体硬度,耐磨性最好,涂层磨损机理主要是磨料磨损。

ZHANG Y 等^[34]和 XIANG K 等^[35]分别在 45 钢基体和纯 Ti 基体上激光熔覆了 $\text{FeNiCoCrTi}_{0.5}\text{Nb}_x$ ($x=0.25, 0.50, 0.75, 1.00$)和 CoCrFeNiNb_x ($x=0, 0.01$)EHEAs 涂层,都出现了细小的层片状共晶组织 Laves 相。随着 Nb 含量增大,Laves 相增多,硬度远高于成分相近的块体非晶合金,层片状的共晶结构比等轴块状晶粒合金的强度、硬度、耐磨性更加优良。

以上研究表明,HEAs 体系中引入 Nb 元素,形成细小层片状的 EHEAs 是改善材料表面强韧性,获得优良综合力学性能的有效方式。

1.3 Al

Al 的原子半径大于 Mn、Fe、Cr,作为间隙原子或置换原子形成固溶体时,晶格畸变程度大,具有显著的强化作用。其次,Al 氧化后易形成致密的氧化物薄膜,可提高耐腐蚀性。

SUN Z L 等^[36]在 Q235 钢基体上激光熔覆了 FeCoNiTiAl_x ($x=0, 0.5, 1$) HEAs 涂层,发现 Al 促进了 FCC 相向 BCC 相转变,显微组织呈典型的树枝晶。随着 Al 含量增加,涂层硬度、耐磨性较基体大幅度提升。

LI Y Z 等^[37]在 5083 铝合金表面激光熔覆了 $\text{Al}_x\text{CrFeCoNiCu}$ ($x=0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.8, 1.0, 1.2, 1.5, 1.8, 2.0$) HEAs 涂层。随着 Al 含量增加,涂层相结构由 FCC1 相变转为 FCC1+BCC1 相,再转变为 BCC1+BCC2+FCC2 相,涂层的硬度逐渐提升。值得注意的是,耐磨性与硬度变化不一致,而是以 $x=2.0$ 涂层为界限,耐磨性先增加后降低, $x=1.5$ 时涂层耐磨性最好,原因是 $x=2.0$ 时涂层中观察到晶间裂纹。 $x=1.5$ 时涂层发生严重点蚀和晶间腐蚀, $x=0.8$ 时涂层耐腐蚀性最好。综合来看, $x=0.8$ 涂层可作为铝合金表面性能改善效果的较优选择,显著提升了 5083 铝在船舶舰艇、钻探工具等设备上应用的性能。

GU Z 等^[38]在 Q235 钢基体上激光熔覆了 $\text{Al}_x\text{Mo}_{0.5}\text{NbFeTiMn}_2$ ($x=1, 1.5, 2$) HEAs 涂层,发现随着 Al 含量增加,涂层硬度和耐磨性大幅提升。纳米压痕表明,该合金体系涂层加工硬化能力大。由于 Nb、Ti 的晶间偏析,导致激光熔覆过程中单相 BCC 结构转变为双相 BCC 结构,涂层主要由含 Al 的 BCC 相和(Nb、

Ti)C 相组成,而晶界处的(Nb、Ti)C 又能抑制晶粒长大,涂层进一步得到细晶强化,使 $x=2$ 涂层的显微硬度较基体提高了 5 倍,耐磨性大幅改善。

以上研究表明,Al 可促进 BCC 相的形成,在大气下熔覆也可产生增强相 Al_2O_3 ,提升熔覆涂层的综合性能。

1.4 Ti

Ti 原子半径与 Al 相近,比 Co、Ni、Fe、Cr 大,故 Ti 作为间隙原子或置换原子而形成固溶体时,晶格畸变程度较大,且 Ti 是碳化物形成元素,生成的陶瓷强化相,可有效改善激光熔覆 HEAs 涂层性能。

LIU J 等^[39]在 45 钢表面激光熔覆了 AlCoCrFeNi-Ti_x ($x=0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0$) HEAs 涂层。XRD 和 TEM 分析表明,晶粒中存在 Fe-Cr 富集和 Al-Ni-Ti 富集的旋节分解结构,涂层相结构为无序 BCC1 固溶体相(Fe-Cr)和有序 BCC2 固溶体相(Al-Ni),主要由等轴多边形晶粒、TiC 和 Al_2O_3 纳米颗粒组成。随着 Ti 含量增加,涂层耐腐蚀性加强,Ti₁ 涂层耐腐蚀性最佳。经 XPS 鉴定,Ti₁ 涂层的腐蚀表面成分为 Al_2O_3 、 TiO_2 、 Ti_2O_3 、 Cr_3O_3 和 $\text{Cr}(\text{OH})_2$,这些物质形成一层钝化膜结合在涂层表面,既提高了合金塑性和弹性模量,也提升了耐腐蚀性,且涂层中元素的均匀分布和简单的相组成抑制了微电池腐蚀。

GU Z 等^[40]在 Q235 钢基体上激光熔覆制备 $\text{CoCr}_{2.5}\text{FeNi}_2\text{Ti}_x$ ($x=0、0.5、1、1.5$) HEAs 涂层,发现涂层组织由等轴晶和柱状晶组成,与基体形成良好的冶金结合。Ti 元素使涂层由 BCC 单相固溶体向 BCC+ FCC 双相固溶体转变,FCC 结构减缓了 Cl^- 在涂层中扩散渗透。随着 Ti 含量增加,涂层的耐腐蚀性增强,硬度提升,塑性和韧性降低,其显微硬度比基体高 2.4 倍,最高平均显微硬度值($\text{HV}_{0.2}$)($x=1.5$)为 480,4 种涂层中 $x=1$ 涂层体积磨损率最低,磨损表面最为光滑,表现出显著的耐腐蚀性和优异的耐磨性。

2 非金属元素对 HEAs 涂层组织的影响

非金属元素除具有降低合金熔点、提高润湿性、增加流动性、脱氧、除渣、除气等功能,还影响合金微观组织转变,生成陶瓷相,改变层错和位错密度,强化合金性能,概述了 B、Si 对 HEAs 涂层组织性能影响。

2.1 B

大量研究表明,B 与合金元素的混合焓小,见表 1。在 Fe-Cr-Ni 合金体系中引入 B 元素可以生成 Fe_2B 、 Cr_2B 或 CrB 等硬质第二相,显著提升涂层的力学性

能^[41~45]。

表 1 合金中可能形成的二元硼化物的混合焓^[42]

Tab.1 Mixing enthalpies of binary borides formed in

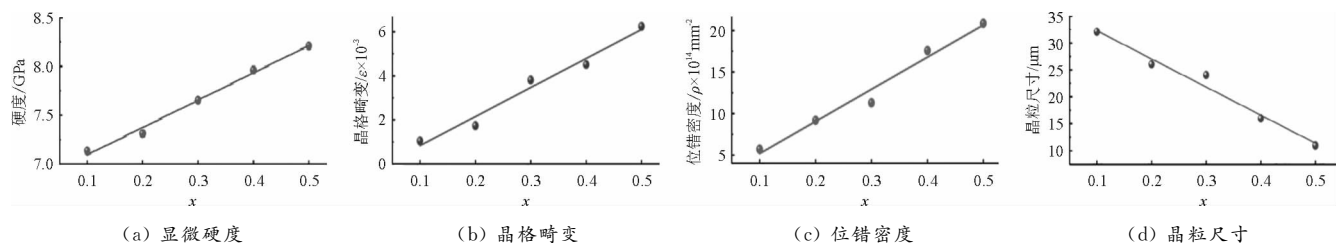
the alloy ^[42]							(kJ/mol)
Cr ₂ B	Fe ₂ B	Co ₂ B	Ni ₂ B	CrB	FeB	CoB	NiB
−34	−30	−28	−27	−45	−38	−38	−34

张冲等^[41]在 45 钢基体上激光熔覆了 FeCrNi-CoMnB_x ($x=0.5、0.75、1.00、1.25$) HEAs 涂层。涂层由 FCC 固溶体和硼化物两相组成。当 $x\leq 0.75$ 时,硼化物以 $(\text{Cr},\text{Fe})_2\text{B}$ 相为主,当 $x=1$ 时,生成大量的 $(\text{Fe},\text{Cr})_2\text{B}$ 相。硼化物随着 B 含量增加而增多,导致涂层的硬度、耐磨性得到提升。硼化物 $(\text{Fe},\text{Cr})_2\text{B}$ 相在 $(\bar{1}10)$ 面存在许多堆垛层错,硼化物中的层错是 $(\text{Fe},\text{Cr})_2\text{B}$ 相通过 $(\bar{1}10)$ 面的层错方式由 $(\text{Cr},\text{Fe})_2\text{B}$ 相转变而形成,该转变使涂层的硬度和耐磨性有显著提升。

陈国进等^[46]在 Q235 钢基体上激光熔覆了 Fe-CoCrNiB_x ($x=0.5、0.75、1.0、1.25$) HEAs 涂层,B 的加入使涂层由 FCC 固溶体相转变为 FCC 固溶体相和 M_2B (Cr,Fe 等硼化物)硬质相。随着 B 含量增加,涂层中枝晶间组织转变为麦穗状,然后转变为网状,并且有条状组织出现,基体组织逐渐减少,FCC 固溶体相向 M_2B 转变的程度增大,合金涂层平均硬度增加,耐磨性提升。当 $x=1.25$ 时,由于 FCC 相向硬质相 M_3B 发生转变,起到弥散强化的作用,且效果远大于固溶强化的削弱,使涂层的硬度和耐磨性发生了跳跃式提升,该研究结果与张冲等^[41]的研究一致。

2.2 Si

Si 作为一种常用的合金化元素,能加强组织致密性,提升硬度和耐磨性,对于激光熔池具有良好的冶金脱氧效果。LIU H 等^[47]在 304L 基体上激光熔覆了 AlCoCrFeNiSi_x ($x=0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5$) HEAs 涂层,发现涂层主要由无序 BCC (Fe-Cr)基体相和少量有序 BCC(Al-Ni)纳米微粒相组成。XRD 分析表明,Si 原子的固溶导致晶格收缩,随着 Si 含量增加,涂层中位错密度增加,晶粒细化,晶界处有少量 Cr_{23}C_6 相析出。Si 含量增加使晶格畸变、位错密度、晶粒尺寸发生线性变化,最终使显微硬度与 Si 含量呈线性正相关,见图 4。定量分析表明,位错强化占主导地位。随着 Si 含量增加,涂层的平均摩擦因数和磨损率均显著降低,这与磨损表面上氧化膜的形成有关。经 XPS 分析, $x=0.5$ 时涂层磨损表面的氧化膜成分为 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 、 Cr_2O_3 、 SiO_2 和 SiO。涂层的主要磨损机制由粘着磨损、磨料磨损和分层磨损演变为氧化磨损,氧化膜中的 SiO_2 和 SiO 具有良好的自润滑减摩性。

图4 AlCoCrFeNiSi_x HEAs 涂层的性能参数^[47]Fig.4 Performance parameters of AlCoCrFeNiSi_x HEAs coatings^[47]

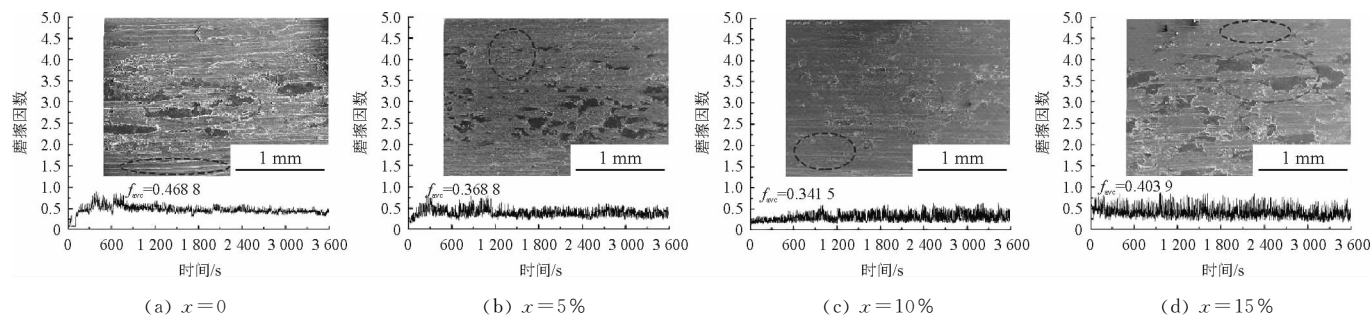
郝文俊等^[48]在45钢基体上激光熔覆了CoCrFe-NiSi_x ($x=0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$) HEAs涂层,发现随着Si含量增加,涂层由FCC结构向BCC结构转变,组织更加致密,晶粒更加细化,硬度和耐磨性与Si含量呈正相关,这与LIU H等^[47]研究结果一致。综上,适量的Si可以提高涂层的成形性,改善涂层与基体之间的润湿能力和冶金结合效果。

3 陶瓷颗粒对 HEAs 涂层组织性能影响

陶瓷相颗粒具有高熔点、高硬度、高耐磨性、抗氧化等特点,HEAs的“鸡尾酒效应”使陶瓷相的优异性能得以显现。

3.1 TiC

CAI Y C等^[49]在4Cr5MoSiV1模具钢上激光熔覆了FeMnCrNiCo+ x TiC ($x=0, 5, 10, 15$, 质量分数,%)

图5 FeMnCrNiCo+ x (TiC) HEAs 涂层的摩擦因数曲线和磨损表面形貌^[49]Fig.5 Friction coefficient curves and worn surface morphologies of FeMnCrNiCo+ x TiC HEAs coatings

疲劳磨损,所以要确定最佳的TiC含量还需要深入研究。

GUO Y J等^[42]在304L基体上激光熔覆了CoCr-CuFeNiSi_{0.2}(Ti, C)_x ($x=0, 0.5, 1.0, 1.5$),涂层中原位生成了TiC颗粒,(Ti, C)₀涂层为典型树枝晶FCC相,添加Ti和C的(Ti, C)_x涂层主要由FCC相和沿晶间分布的粒状TiC陶瓷相组成。Ti和C的加入提高了涂层的显微硬度和耐磨性,降低了涂层的摩擦因数和磨损量,但并不呈正相关,(Ti, C)_{1.0} HEAs涂层表现出最高的硬度和最好的耐磨性。这与CAI Y C^[49]等的研究结果一致。

3.2 WC

李大艳等^[50]在304L基体上激光熔覆了Al-

HEAs涂层,发现部分TiC陶瓷颗粒在激光作用下分解成Ti和C元素。一部分Ti和C元素聚集在晶界上,凝固形成新的沿晶界分布的TiC颗粒,一部分TiC在晶内析出,无新相生成,组织呈典型的树枝晶。TiC可促进小角度晶界生成,抑制大角晶界。随着TiC颗粒含量增加,晶粒更加细化,位错密度增加,加之其钉扎效应提高了合金强度。涂层的开裂敏感区包括晶界和TiC陶瓷颗粒本身,当TiC颗粒含量低时,晶界处TiC颗粒的连续分布是沿晶开裂的主要原因。过量的TiC颗粒易结合成大尺寸TiC,其本身存在的缺陷成为裂纹源并随后在外力作用下迅速延展失效。因此,含量合理的TiC颗粒可兼顾涂层的强韧性。图5为不同TiC含量涂层的磨损表面形貌。可以看出,TiC颗粒含量极低时易发生粘着磨损,含量较高时易发生磨料磨损,都不利于耐磨性提高。FeMnCrNiCo+10%(TiC)涂层中的低熔点金属能有效改善表面磨损性能,但也存在潜在的

CoCrFeNiNb_{0.75}+ x (WC) ($x=0, 10, 15, 20, 25$, 质量分数,%) HEAs涂层。不含WC的HEAs涂层为BCC相与Laves共晶组织。随着WC加入,出现NbC相,且随着WC含量增加而增多,共晶组织逐渐解离消失,Laves相聚集并长大,所有涂层的硬度和耐磨性相对于基体均明显提高。安旭龙等^[51]在Q235钢基体上制备了SiFeCoCrTi HEAs涂层,并研究了WC颗粒对该涂层组织性能的影响。发现SiFeCoCrTi涂层为BCC相和金属间化合物组成的胞状晶,添加WC后,涂层组织为细小且致密的树枝晶,形成大量TiCo₃、Co_{1.07}Fe_{18.93}金属间化合物,显著提高了合金硬度和耐磨性。

BAO Y F等^[52]在Q235钢基体上激光熔覆了Fe-

CoCrNiB_{0.2}+x(WC)(x=0、20%,质量分数) HEAs 涂层,发现添加 20% WC 的涂层硬度和耐气蚀性都得到提升。在 Cl⁻ 侵蚀和气泡破裂引起的循环应力作用下,涂层外表面不断从基材上剥离,高硬度涂层对循环冲击应力的抵抗性更强,所以涂层优良的抗气蚀性归因于其较高的表面硬度,故通过提高表面硬度来提高涂层的耐气蚀性是有效的处理方式。

3.3 NbC 和 TiN

LI X F 等^[53] 在 Q235 钢基体上激光熔覆了 Al-CoCrFeNi+x(NbC)(x=10、20、30,质量分数,%) HEAs 涂层。加入 NbC 颗粒使 FCC 相向 BCC 相转变,晶界处的 NbC 颗粒导致了强烈的钉扎效应,抑制了凝固过程中晶粒生长,可显著细化晶粒^[54],并阻碍位错滑移,抑制塑性变形。NbC 颗粒的加入使形核速率提高和小角度晶界增加,这都使涂层的硬度和耐磨性显著改善。另外,由于高残余应力和晶格畸变,涂层中含有大量小角度晶界^[55],这在以往的 HEAs 研究中很少观察到。从涂层表面到熔合线的显微硬度几乎不变,表明涂层组织分布均匀。当 NbC 的加入量为 20% 时,涂层显示出最高的硬度和耐磨性,获得良好的综合性能。

GUO Y X 等^[56] 为了延长磷酸反应器搅拌叶片的使用寿命,在大气环境中采用激光熔覆技术在 904L 不锈钢表面制备了 CoCr₂FeNiTi_x(x=0、0.5、1) HEAs 涂层。涂层由 FCC 相、TiN 相和少量 Laves 相组成。x=0 时涂层为柱状晶结构,加入 Ti 元素后,涂层由无定形晶和 TiN 陶瓷颗粒以及少量脆性 Laves 相组成。随着 Ti 增加,生成 TiN 增多,涂层的硬度和耐磨性提高,摩擦因数减小,但过量 TiN 会增加涂层脆性开裂倾向。

其中 x=1 的涂层的硬度比基体高 3 倍以上,磨损量约为基体的 1/3。适量 Ti 可溶解在 FCC 相中,降低腐蚀速率,Ti 含量过高会形成微电池腐蚀,降低涂层的耐腐蚀性。涂层的耐腐蚀性均强于基体,结合耐磨性来看,x=0.5 时涂层的耐磨性和耐腐蚀性等综合性能最好,显著提升磷酸反应器搅拌叶片的使用寿命,达到节约工业生产成本,提高生产效率的目的。

以上研究表明,引入陶瓷相可提高 HEAs 涂层的力学和耐腐蚀性。不足的是激光熔覆原位生成陶瓷增强相的可控性有待进一步研究和提升。

4 稀土元素对 HEAs 涂层组织性能影响

稀土元素电负性较低,引入稀土元素可以起到变质、脱氧、净化组织、细化晶粒、减少缺陷的作用。在激光熔覆材料中加入稀土元素有望改善涂层的力学、物理、化学性能,目前稀土元素对激光熔覆 HEAs 涂层影响的研究鲜有报道。因此,通过稀土元素含量对涂层组织性能的研究进而对材料表面进行改性具有很大的探索空间,对于改善和提升工业产品性能有较好的应用前景。

GU Z 等^[57] 在 Q235 基体上激光熔覆了 Mg-Mo-Nb-Fe-Ti-xY(x=0、0.4、0.8、1.2,质量分数,%) HEAs 涂层。由于 Nb 和 Ti 具有很强的碳化物形成能力,涂层中总存在 FCC 结构的(Nb,Ti)C 碳化物,且其存在与 Y 的含量无关。Y 掺杂引起固溶体晶格畸变,且使双 BCC 相+FCC 相转变为单 BCC 相+FCC 相。随着 Y 含量增加,涂层的晶粒细化,硬度、耐磨性显著提升。图 6 为 MgMoNbFeTi₂Y_x 合金涂层的显微硬度压

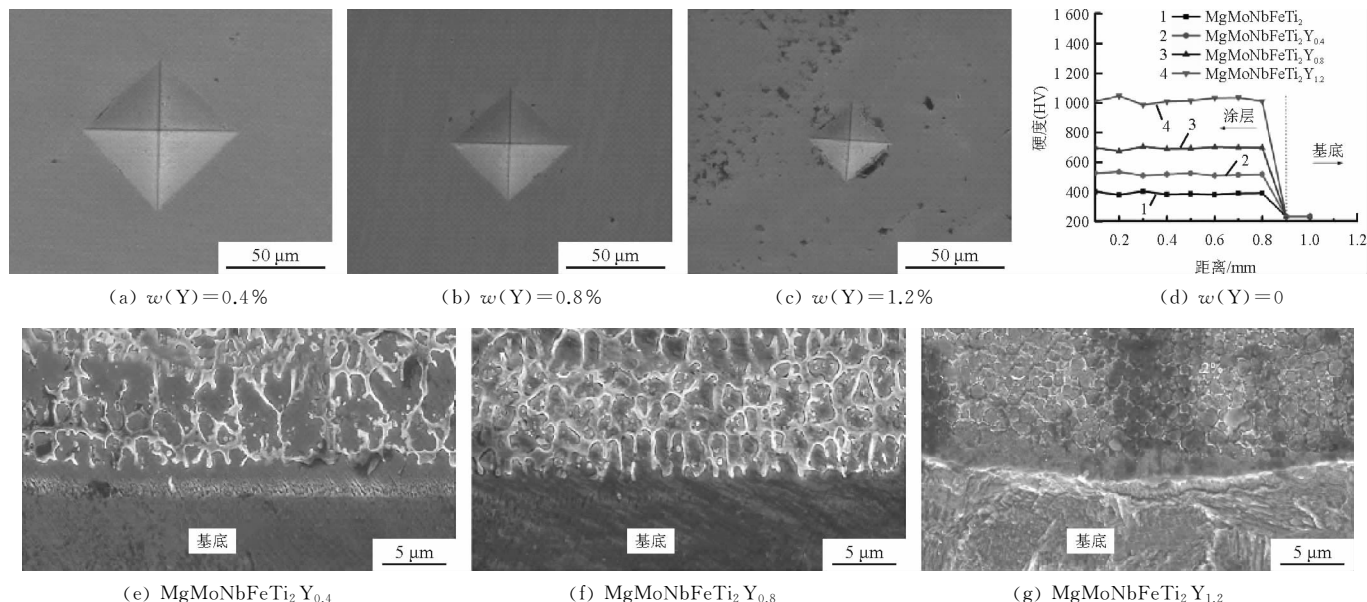


图 6 MgMoNbFeTi₂Y_x HEAs 涂层在 2.94 N 载荷下的显微硬度压痕和形貌^[57]

Fig.6 Microhardness indentation and morphologies of MgMoNbFeTi₂Y_x HEAs coatings under loading of 2.94 N^[57]

痕和涂层与基材结合的横截面。可见, $w(Y)=1.2\%$ 的涂层平均显微硬度最高, 是基体的 5 倍以上。饱和海水泥浆溶液中模拟涂层腐蚀表明, Y 的加入提高了涂层耐腐蚀性, 含 $w(Y)=0.8\%$ 的涂层具有优异的耐腐蚀性, 但该涂层耐腐蚀性对温度的敏感性较高, 温度升高使涂层耐蚀性显著降低。因此, 应在此基础上进一步研究如何降低温度对耐腐蚀性能的消极影响。

安亚君等^[58]在 45 钢基体上激光熔覆了 $\text{FeCrWN-iC}+w(\text{CeO}_2)$ ($w=0.1, 0.2, 0.3, 0.4$, 质量分数, %) HEAs 涂层。研究表明, 适量的稀土可以起到细晶强化作用。由于 Ce 在 Fe 中固溶度较小, 过量的 Ce 不能完全反应, 净化作用会下降, 削弱其强化作用, 甚至会产生组织粗大的不良影响。随着 Ce 含量增加, 涂层表面硬度和耐磨性先增后减。含 0.1% 的 CeO_2 的涂层摩擦磨损表面最光滑、耐磨性最好。

以上研究表明, 适量稀土元素的引入对于激光熔覆 HEAs 涂层的性能改进是一种具有重要研究空间和价值的新思路。

5 结 语

目前激光熔覆 HEAs 材料体系还不够丰富, 成分设计仍以经验和试错法为主, 而 HEAs 合金元素众多, 试验法工作量巨大。鉴于此, 通过高通量集成计算法来预测材料性能、预先筛选出潜在高性能材料体系, 从而大幅度减小试验量, 是今后成分体系设计的重要方向。

高熵合金元素多元化, 加之激光熔覆过程是极端非平衡凝固过程, 导致 HEAs 涂层中的相生成和转化机理研究困难, 难以预测其析出相及演化规律, 也造成了性能预测的困难。极端非平衡凝固状态下高熵合金中相的形成与演化是需要重点研究的方向。

激光熔覆过程中的急冷急热, 过饱和地固溶了比体系原子半径大的元素, 涂层与基体的弹性模量和膨胀系数存在一定差异等特征, 导致激光熔覆层易出现裂纹, 尤其是对含 Al、Ti 等原子半径较大的材料体系, 这严重限制了其产业化应用。应着力于开发一种同时兼备高硬度、塑韧性较好的 HEAs 合金体系, 从而推动其走向产业化, 在激光熔覆过程中生成纳米级共晶相是一种可能的解决方案。

参 考 文 献

[1] ZHOU Y J, ZHANG Y, WANG Y L, et al. Microstructure and compressive properties of multicomponent Al_x (TiVCrMnFeCoNiCu)_{100-x} high-entropy alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2007, A454: 260-265.

[2] ZHANG Y, ZHOU Y J, LIN J P, et al. Solid-solution phase formation rules for multi-component alloys[J]. Advanced Engineering

Materials, 2008, 10(6): 534-538.

[3] YEH 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.

[4] MA Y, WANG Q, JIANG B B, et al. Controlled formation of coherent cuboidal nanoprecipitates in body-centered cubic high-entropy alloys based on $\text{Al}_2(\text{Ni,Co,Fe,Cr})_{14}$ compositions[J]. Acta Materialia, 2018, 147: 213-225.

[5] ZHANG H, PAN Y, HE Y Z. Synthesis and characterization of FeCoNiCrCu high-entropy alloy coating by laser cladding[J]. Materials and Design, 2011, 32: 1 910-1 915.

[6] 张晖, 潘治, 何宜柱. 激光熔覆 $\text{FeCoNiCrAl}_2\text{Si}$ 高熵合金涂层[J]. 金属学报, 2011, 47(8): 1 075-1 079.

[7] SUN Z P, LI X Z, WANG Z M. Microstructure and mechanical properties of low activation Fe-Ti-Cr-V-W multi-principal element alloys[J]. Journal of Nuclear Materials, 2020, 533: 152 078.

[8] DONG Y, LU Y P, KONG J R, et al. Microstructure and mechanical properties of multi-component AlCrFeNiMo_x high-entropy alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2013, 573: 96-101.

[9] SHU F Y, LIU S, ZHAO H Y, et al. Structure and high-temperature property of amorphous composite coating synthesized by laser X element alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 731: 662-666.

[10] QIU X W, WU M J, LIU C G, et al. Corrosion performance of $\text{Al}_2\text{CrFeCo}_x\text{CuNiTi}$ high-entropy alloy coatings in acid liquids[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 708: 353-357.

[11] ZHU J M, ZHANG H F, FU H M, et al. Microstructures and compressive properties of multicomponent AlCoCrCuFeNiMo_x alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2010, 497: 52-56.

[12] YONG Z A, TITZ A, ZHI T B, et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys[J]. Progress in Materials Science, 2014, 61: 1-93.

[13] CHOUDHRY K I, MAHBOUBI S, BOTTON G A, et al. Alloy design and properties optimization of high-entropy alloys[J]. Corrosion Science, 2015, 100: 222-230.

[14] ZHANG Y, YANG X, LI A W. Alloy design and properties optimization of high-entropy alloys[J]. JOM, 2012, 64(7): 830-838.

[15] FARAHMAND P, KOVACEVIC R. Corrosion and wear behavior of laser clad Ni-WC coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 276: 121-135.

[16] ADESINA O S, POPOOLA A P I, PITYANA S L, et al. Microstructural and tribological behavior of in situ synthesized Ti/Co coatings on Ti-6Al-4V alloy using laser surface cladding technique[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95(1): 1 265-1 280.

[17] AL-SAYED S R, HUSSEIN A A, NOFAL A A, et al. Characterization of a laser surface-treated martensitic stainless steel[J]. Materials, 2017, 10(6): 595-613.

[18] YAO C Z, PENG Z, MENG L, et al. Electrochemical preparation and magnetic study of Bi-Fe-Co-Ni-Mn high entropy alloy[J]. Electrochimica Acta, 2008, 53(28): 8 359-8 365.

[19] 马壮, 王倪, 王恩杰, 等. 高熵合金基复合材料研究进展[J]. 材料

- 导报, 2015, 29(17): 140-143.
- [20] 宋芊汀. (TiZrNbTa)₉₀Mo₁₀ 高熵合金的腐蚀与磨损行为[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
 - [21] GU Z, PENG W S, GUO W M, et al. Design and characterization on microstructure evolution and properties of laser-cladding Ni_{1.5}CrFeTi₂B_{0.5}Mo_x high-entropy alloy coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 408: 126 793.
 - [22] JUAN F Y, LI J, JIANG Y Q, et al. Microstructural characterization and corrosion behaviour of AlCoCrFeNiTi_x high-entropy alloy coatings fabricated by laser cladding[J]. Applied Surface Science, 2019, 465: 700-714.
 - [23] 刘谦, 王昕阳, 黄燕滨, 等. Mo 含量对 CoCrFeNiMo 高熵合金组织及耐蚀性能的影响[J]. 材料研究学报, 2020, 34(11): 70-76.
 - [24] LI Z M, PRADEEP K G, DENG Y, et al. Metastable high-entropy dual-phase alloys overcome the strength-ductility trade-off[J]. Nature, 2016, 534: 227-230.
 - [25] LI T X, LU Y P, WANG T M, et al. Grouping strategy viadorbit energy level to design eutectic high-entropy alloys[J]. Applied Physics Letter, 2021, 119: 071 905.
 - [26] LU Y P, DONG Y, GUO S, et al. A promising new class of high-temperature alloys: Eutectic high-entropy alloys[J]. Rep., 2014 (4): 6 200.
 - [27] YIN Y, ZHANG J Q, TAN Q Y, et al. Novel cost-effective Fe-based high entropy alloys with balanced strength and ductility[J]. Materials and Design, 2018, 162: 24-33.
 - [28] 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[J]. Acta Materialia, 2017, 124: 143-150.
 - [29] TAKEYAMA M, LIU C T. Microstructure and mechanical properties of Laves-phase alloys based on Cr₂Nb-Science direct[J]. Materials Science and Engineering, 1991, A132(91): 61-66.
 - [30] WEN X, CUI X F, JIN G, et al. In-situ synthesis of nano-lamellar Ni_{1.5}CrCoFe_{0.5}Mo_{0.1}Nb_x eutectic high-entropy alloy coatings by laser cladding: Alloy design and microstructure evolution[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 405: 26 728.
 - [31] JIN G, CAI Z B, GUAN Y J, et al. High temperature wear performance of laser-cladded FeNiCoAlCu high-entropy alloy coating [J]. Applied Surface Science, 2018, 445: 113-122.
 - [32] WU C L, ZHANG S, ZHANG C H, et al. Phase evolution and properties in laser surface alloying of FeCoCrAlCuNi_x high-entropy alloy on copper substrate[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 315: 368-376.
 - [33] WANG H L, LIU Q B, GUO Y X, et al. MoFe_{1.5}CrTiWAlNb_x refractory high-entropy alloy coating fabricated by laser cladding [J]. Intermetallics, 2019, 115: 106 613.
 - [34] ZHANG Y, HAN T F, XIAO M, et al. Effect of Nb content on microstructure and properties of laser cladding FeNiCoCrTi_{0.5}Nb_x high-entropy alloy coating[J]. Optik, 2020, 198: 163 316.
 - [35] XIANG K, CHEN L Y, CHAI L, et al. Microstructural characteristics and properties of CoCrFeNiNb_x high-entropy alloy coatings on pure titanium substrate by pulsed laser cladding[J]. Applied Surface Science, 2020, 517: 146 214.
 - [36] SUN Z L, ZHANG M Y, WANG G Q, et al. Wear and corrosion resistance analysis of FeCoNiTiAl_x high-entropy alloy coatings prepared by laser cladding[J]. Coatings, 2021, 11(2): 115-122.
 - [37] LI Y Z, SHI Y. Microhardness, wear resistance, and corrosion resistance of Al_xCrFeCoNiCu high-entropy alloy coatings on aluminum by laser cladding[J]. Optics and Laser Technology, 2021, 134: 106 632.
 - [38] GU Z, MAO P, XI S Q. Microstructure and wear behavior of mechanically alloyed powder Al_xMo_{0.5}NbFeTiMn₂ high entropy alloy coating formed by laser cladding[J]. Social Science Electronic Publishing, 2020, 401: 126 244.
 - [39] LIU J, LIU H, CHEN P J, et al. Microstructural characterization and corrosion behaviour of AlCoCrFeNiTi_x high-entropy alloy coatings fabricated by laser cladding [J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 361: 63-74.
 - [40] GU Z, XI S Q, SUN C F. Microstructure and properties of laser cladding and CoCr_{2.5}FeNi₂Ti_x high-entropy alloy composite coatings[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 819: 152 986.
 - [41] 张冲, 吴炳乾, 王乾廷, 等. 激光熔覆 FeCrNiCoMnB_x 高熵合金涂层的组织结构与性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(9): 2 639-2 644.
 - [42] GUO Y J, LI C G, ZENG M, et al. In-situ TiC reinforced CoCr-CuFeNiSi_{0.2} high-entropy alloy coatings designed for enhanced wear performance by laser cladding[J]. Materials Chemistry and Physics, 2019, 242: 122 522.
 - [43] KULKA M, MAKUCH N, DZIARSKI P, et al. A study of nanoindentation for mechanical characterization of chromium and nickel borides' mixtures formed by laser boriding[J]. Ceramics International, 2014, 40(4): 6 083-6 094.
 - [44] DO J, LEE K, JEON C, et al. Effects of Cr and B contents on volume fraction of (Cr, Fe)₂B and hardness in Fe-based alloys used for powder injection molding[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2012, A43(7): 2 237-2 250.
 - [45] HEMMATI I, HUIZENGA R M, OCELIK V, et al. Microstructural design of hardfacing Ni-Cr-B-Si-C alloys[J]. Acta Materialia, 2013, 61(16): 6 061-6 070.
 - [46] 陈国进, 张冲, 唐群华, 等. 含 B 量对激光熔覆 FeCoCrNiB_x ($x=0.5, 0.75, 1.0, 1.25$) 高熵合金涂层组织结构与耐磨性的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44 (6): 1 418-1 422.
 - [47] LIU H, SUN S F, ZAHNG T, et al. Effect of Si addition on microstructure and wear behavior of AlCoCrFeNi high-entropy alloy coatings prepared by laser cladding [J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 405: 126 522.
 - [48] 郝文俊, 孙荣禄, 牛伟, 等. 激光熔覆 CoCrFeNiSi_x 高熵合金涂层的组织及性能[J]. 表面技术, 2020, 34(S2): 1-15.
 - [49] CAI Y C, ZHU L S, CUI Y, et al. Fracture and wear mechanisms of FeMnCrNiCo + x (TiC) composite high-entropy alloy cladding layers[J]. Applied Surface Science, 2020, 543: 148 794.
 - [50] 李大艳, 姜慧, 邹龙江, 等. WC 含量对激光熔覆 AlCoCrFeNiNb_{0.75} 高熵合金涂层的组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(10): 117-121, 126.
 - [51] 安旭龙, 刘其斌. WC 颗粒对激光熔覆高熵合金 SiFeCoCrTi 涂层的组织及性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(9): 2 424-2 428.
 - [52] BAO Y F, GUO L P, ZHONG C H. Effects of WC on the cavitation erosion resistance of FeCoCrNiB_{0.2} high entropy alloy coating prepared by laser cladding[J]. Materials Today Communications, 2021, 26: 102 154.

Sr 变质对 Al-Mg₂Si 合金组织和力学性能的影响

杜 阳¹ 索忠源² 姜 峰² 路大勇¹

(1.吉林化工学院材料科学与工程学院; 2.吉林化工学院机电工程学院)

摘 要 研究了 Sr 对过共晶 Al-Mg₂Si 合金组织和力学性能的影响。结果表明,在 Mg₂Si 增强铝合金中,Sr 对初生 Mg₂Si 相和共晶 Mg₂Si 相均有影响。添加 Sr 后,初生 Mg₂Si 相的形貌由未变质的粗大树枝状转变为四边形。同时,共晶 Mg₂Si 相的形态从长杆状向细杆状、颗粒状转变。当 Sr 含量为 0.1% 时,变质效果最好,初生 Mg₂Si 相尺寸最小,分布均匀,合金抗拉强度为 121 MPa,和未变质合金相比,抗拉强度提升了 55.1%,且伸长率并未降低。当 Sr 的含量达到 0.15% 时,初生 Mg₂Si 再次粗化,出现过变质,导致力学性能降低。

关键词 Al-20Mg₂Si 合金;初生 Mg₂Si;Sr 变质;力学性能

中图分类号 TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.07.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Sr Modification on Microstructures and Mechanical Properties of Al-Mg₂Si

Du Yang¹, Suo Zhongyuan², Jiang Feng², Lu Dayong¹

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology;
2.School of Materials Science and Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology)

Abstract: The effects of Sr on the microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-Mg₂Si alloy were investigated. The results indicate that Sr has effects on both primary Mg₂Si phase and eutectic Mg₂Si phase in Mg₂Si reinforced aluminum alloy. After Sr addition, the morphology of the primary Mg₂Si phase is transformed from coarse dendritic to quadrilateral shape. Meanwhile, the morphology of eutectic Mg₂Si phase is transformed from long rod-like to fine rod-like and granular. When Sr content is 0.1%, the modification effect is desirable, and the primary Mg₂Si phase is tiny and evenly distributed. The tensile strength of the alloy is 121 MPa, which is increased by 55.1% compared with the unmodified alloy with slight elongation change. When the addition amount of Sr reaches 0.15%, the primary Mg₂Si is coarsened again, and over-metamorphism occurs, resulting in the degradation of mechanical properties.

Key Words: Al-20Mg₂Si Aluminum Alloy, Primary Mg₂Si, Sr Modification, Mechanical Properties

收稿日期:2021-10-10;修改稿收到日期:2021-11-11

基金项目:吉林省科技厅国际科技合作资助项目(20200801034GH)

第一作者简介:杜阳,男,1995 年出生,硕士研究生,吉林省吉林市(132022),E-mail:1498919339@qq.com

通信作者:索忠源,男,1979 年出生,副教授,吉林省吉林市(132022),E-mail:zhy-suo@126.com

引用格式:杜阳,索忠源,姜峰,等. Sr 变质对 Al-Mg₂Si 合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(7):855-858.

DU Y, SUO Z Y, JIANG F, et al. Effects of Sr modification on microstructures and mechanical properties of Al-Mg₂Si[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(7):855-858.

[53] LI X F, FENG Y H, LIU B, et al. Influence of NbC particles on microstructure and mechanical properties of AlCoCrFeNi high-entropy alloy coatings prepared by laser cladding[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 788: 485-494.

[54] WANG J Y, YANG H L, LIU Z L, et al. A novel Fe₄₀Mn₄₀Cr₁₀Co₁₀/SiC medium-entropy nanocomposite reinforced by the nanoparticles-woven architectural structures[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 772: 272-279.

[55] YANG X H, WANG Z G, WU Z, et al. A coupled EBSD/TEM study of the microstructural evolution of multi-axial compressed pure Al and Al-Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2016, A658: 16-27.

[56] GUO Y X, SHANG X J, LIU Q B. Microstructure and properties of in-situ TiN reinforced laser cladding CoCr₂FeNiTi_x high-entropy alloy composite coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 344: 353-358.

[57] GU Z, MAO P, XI S Q, et al. Microstructure and wear properties of mechanically alloyed powder Al_xMo_{0.5}NbFeTiMn₂ high-entropy alloy coating by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 401: 126 244.

[58] 安亚君, 芦晶晶, 曹皓巍. 稀土含量对活性激光熔覆 Fe-Cr-W-Ni-C 涂层的组织和磨损性能的影响[J]. 材料保护, 2020, 53(3): 101-106.