

不同元素对 CoCrFeNi 系高熵合金涂层影响的研究现状

吴苏瑞¹ 张树玲^{1,2} 张瑞峰¹ 夏俊佳¹ 马兴华¹ 郭 峰¹
(1.青岛理工大学机械与汽车工程学院; 2.宁夏大学机械工程学院)

摘 要 CoCrFeNi 系高熵合金涂层具有优良的耐腐蚀性、塑韧性和耐高温氧化性,但由于强度低、硬度和耐磨性差等问题,其工程应用受到限制。目前已有研究表明,添加元素可以改善其性能。分析并总结了不同元素对 CoCrFeNi 系高熵合金涂层组织结构的影响,指出了 CoCrFeNi 系高熵合金涂层研究中存在的技术问题,并对其发展进行了展望。

关键词 金属元素;非金属元素;高熵合金涂层;激光熔覆;性能

中图分类号 TG174.44 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.01.003 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Status on Effects of Different Elements on Properties of CoCrFeNi Series High-entropy Alloy Coatings

Wu Surui¹, Zhang Shuling^{1,2}, Zhang Ruifeng¹, Xia Junjia¹, Ma Xinghua¹, Guo Feng¹
(1.School of Mechanical & Automotive Engineering, Qingdao University of Technology;
2.School of Mechanical Engineering, Ningxia University)

Abstract: CoCrFeNi series high-entropy alloy coatings exhibit excellent corrosion resistance, plastic toughness, and high-temperature oxidation resistance, while the engineering applications are limited due to low strength, poor hardness and wear resistance. At present, a large number of experimental results reveal that addition of elements can improve the performance of the HEAs. Effects of various elements on microstructure and properties of CoCrFeNi series high-entropy alloy coatings were reviewed. The technical problems existing in the investigation were proposed, and future research directions were prospected.

Key Words: Metal Element, Non-metal Element, High-entropy Alloy Coating, Laser Cladding, Performance

高熵合金(HEAs)一般定义由 5 种及以上的等摩尔分数或接近等摩尔分数元素组成的合金^[1]。随着研究深入,HEAs 的概念逐渐发展到四元领域^[2]、三元领域^[3]、非等摩尔合金领域^[4],甚至在非晶领域^[5]也有了研究进展,拓宽了 HEAs 的成分设计自由度^[4]。同时,HEAs 多元素组成的特性使其具有四大核心效应:高熵效应、晶格畸变效应、迟滞扩散效应和“鸡尾酒”效应^[6~11],这为 HEAs 带来了许多优异的性能,如高屈服强度、高延展性、高热稳定性、超强的抗辐射性能、优异的断裂韧度和耐氧化性等^[12~15]。同时,采用共晶合金思想设计的共晶高熵合金展现出高强度、良好的塑性、优异的铸造性能和可控的近平衡微观结构^[16,17]。同时,可以通过组成元素的选择和含量的变化而引起协同效应,使 HEAs 能适应不同服役环境^[18]。

高电极电位的 Co、Fe、Ni 元素和耐腐蚀元素 Cr 具

有相近的原子半径和熔点,能够在基体中进行良好的互溶,组成的 HEAs 表现出较高的耐腐蚀性能^[19],同时,Cr 具有不同于其他 3 种元素的负空位形成能,因此 Cr 可从合金系中析出,形成 Cr₂O₃ 氧化物薄膜,提高 HEAs 的耐高温氧化性能^[20]。WANG W R 等^[21]指出,CoCrFeNi 系 HEAs 具有高延展性、低温断裂韧度、耐腐蚀性和热稳定性的出色性能组合,且可以通过沉淀强化机制,在保持其足够延展性的同时提高其强度。但是,铸态 CoCrFeNi 系 HEAs 的屈服强度仅有 136 MPa,硬度(HV)仅为 140^[22],同时,Co 与 Ni 的添加提高了使用成本,因此 CoCrFeNi 系 HEAs 的工程应用受到限制^[23]。为了改善 CoCrFeNi 系 HEAs 的性能,并拓展其应用领域,目前已有大量试验研究,将传统合金作为基体,开发具有出色性能的高熵合金涂层(HEACs, High entropy alloy coatings),并且,基于

收稿日期:2022-02-09;修改稿收到日期:2022-03-10
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51861031)
第一作者简介:吴苏瑞,男,1999 年出生,硕士研究生,山东青岛(266525),E-mail:1018589152@qq.com
通信作者:张树玲,女,1980 年出生,副教授,山东青岛(266525),E-mail:Slzhang1229@163.com
引用格式:吴苏瑞,张树玲,张瑞峰,等. 不同元素对 CoCrFeNi 系高熵合金涂层影响的研究现状[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(1):12-16.
WU S R, ZHANG S L, ZHANG R F, et al. Status on effects of different elements on properties of CoCrFeNi series high-entropy alloy coatings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(1):12-16.

HEAs 的四大效应,探索金属、非金属元素的添加以及元素含量对 CoCrFeNi 系 HEACs 性能的影响^[23~25]。

HEACs 的制备方法主要有激光熔覆法^[26,27]、磁控溅射法^[28,29]、热喷涂法^[30]、真空电弧熔炼法^[31]和等离子熔覆法^[32]等。其中,等离子熔覆法和激光熔覆法能够使得涂层与基体实现较好的冶金结合。WANG M L 等^[14]研究发现,通过等离子熔覆法制备的 HEAs 复合涂层,呈现出与基体良好冶金结合的同时,涂层内部没有明显的裂纹和缝隙。陈明宣等^[20]指出,等离子熔覆技术具有较高的粉末利用率,易于调节工艺参数,具备其他表面熔覆法所不具备的粉末混合均匀、使合金发生细晶强化等特点,但是,其精度难以控制,且能量过高,使得涂层处于急热急冷的状态,导致基体变脆,韧性下降。激光熔覆技术能够在实现涂层与基体冶金结合,充分保留熔覆材料性能的同时使得涂层微观结构精细均匀^[33~36],并且其具备能量集中、对基材热影响较小、稀释率较低、较高的加热温度和冷却速度等特点,被广泛应用于机械零件修复、功能涂层以及高价值部件的涂覆^[8,36]。将激光熔覆技术与 HEACs 相结合,能够更好地开发出优异性能的 HEACs,因此常被用于制备 HEACs。

1 金属元素对 CoCrFeNi 系 HEACs 微观组织与性能的影响

1.1 Mo 元素

Mo 是一种具备耐高温、耐腐蚀、高强度的难熔金属元素,在工业中常被作为添加剂来提高 HEACs 的综合性能^[8,37]。在 HEAs 中适量添加 Mo 元素,不仅可以提高 HEAs 强度、淬透性、耐热性、晶格摩擦力和剪切模量,还可以在其表面形成钝化膜,提高合金的耐腐蚀性^[22,34,38]。在 CoCrFeNiMo_x ($x=0.1, 0.2, 0.3$) 激光熔覆 HEACs 中添加少量 Mo,涂层的相结构仍然保持 FCC 相,但出现 Mo、Cr 等元素偏聚现象,并且结合区附近容易出现裂纹;当 $x=0.3$ 时,合金的相结构转变为 FCC 相和 σ 相,涂层的偏析现象得到缓解,结合区的裂缝明显减少。同时,涂层表现出优良的耐腐蚀性能。由于 σ 相的析出和高熵合金晶格畸变效应的综合作用,涂层硬度不断提升,摩擦因数大幅降低,耐磨性明显提高^[26,38,39]。适量的 Mo 能够提高 CoCrFeNi 系 HEACs 性能,但孙娅等^[22]指出,过量的 Mo 元素容易引起合金的夹杂和偏析现象,进而造成塑性和抗氧化性的下降。因此,合理控制 Mo 含量才能够使得涂层呈现最好的性能。

1.2 Al 元素

Al 具有较大的原子半径,在涂层中添加 Al 会使涂

层发生晶格畸变,有助于晶粒细化,通过固溶强化作用,能够有效提高涂层的硬度和强韧性,同时生成氧化物 Al₂O₃,有效提高涂层的抗氧化性和耐磨损性能^[40~42]。CHAO Q 等^[43]通过在 Al_xCoCrFeNi 激光熔覆 HEACs 中添加 Al,发现随着 Al 的摩尔比从 0.3 增加到 0.6、0.85,涂层的相结构从单一的 FCC 相逐渐转变为 BCC 相,并且随着 BCC 含量增加,HEACs 的硬度逐渐提高,耐磨性也有所改善。但是,伴随 Al 含量提高,Al_xCoCrFeNi HEAs 中具备抗腐蚀性能的 Cr 的相对含量降低,HEAs 容易析出有序的 BCC 相,其与无序 BCC 相交替分布,导致晶界增多,容易诱发点蚀;在点蚀现象发生后,HEAs 中的有序 BCC 相与其余相形成了大量的微观腐蚀电池,导致富 Ni、Al 的有序 BCC 相侵蚀严重,加速腐蚀进程,最终导致 Al_xCoCrFeNi HEAs 的耐腐蚀性能严重下降^[44]。

1.3 Cu 元素

Cu 具有良好的导热、导电性能。然而,Cu 会降低 CoCrFeNi 系 HEACs 的耐磨性和耐腐蚀性能,并且软磁性变差^[45]。CAI Y 等^[46]利用激光熔覆技术在 Cr12MoV 模具钢上制备了 CoCrFeNiCu_x 中熵合金涂层,发现 Cu 容易在晶界偏析,形成富 Cu 固溶体,而富 Cu 固溶体和基体间存在的较大电位差,导致涂层的耐腐蚀性能下降;随着 Cu 含量添加,这种偏析现象会越来越严重。

王夺^[47]通过对 CoCrFeNiCu_x ($x=0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5$) HEAs 的研究后发现,Cu 促进了 FCC 相的形成,在添加少量 Cu ($x \leq 1$) 时,其相结构为两种 FCC 相 (FCC1+FCC2),并且,其屈服强度和显微硬度逐渐升高,在 $x=0.5$ 时达到最高[屈服强度为 328 MPa,硬度 (HV) 为 162],而后呈现下降趋势;当 Cu 含量逐渐升高 ($x > 1$),HEAs 呈枝晶状组织形貌,并且富 Cu 相在枝晶间析出。

1.4 Ti 元素

Ti 是一种强度高、易加工且兼具耐低温与耐高温性能的银白色金属元素^[37]。由于具有较大的原子半径,在 HEAs 中添加 Ti 容易加剧晶格畸变,起到促进固溶强化的作用,并有利于 BCC 相的形成,使得合金的硬度和强度提高。同时,适量 Ti 能提高合金的电极电位,使合金表面形成氧化薄膜,极大地提高合金的耐蚀性能,而过量的 Ti 元素反而会形成金属间化合物,造成腐蚀电流密度增大,影响合金的耐腐蚀性能^[4,37,48]。激光熔覆 CoCrFeNiTi_x ($x=0, 0.3, 0.5$) HEAs,在未添加 Ti 时,表现出 FCC 相结构,添加 Ti 后在 CoCrFeNiTi_{0.3} HEAs 中除了 FCC 相,还观察到由富含 (Ni, Ti) 的 R

相和富含(Cr,Fe)的 σ 相的混合物组成的板状结构,在CoCrFeNiTi_{0.5} HEAs 中,发现了 FCC 相、富含(Ti,Co)的 Laves 相和 $R+\sigma$ 的混合相。在此过程中,随着 Ti 含量增加,由于 FCC 相固溶体的固溶强化和硬质次生相(R 、 σ 和 Laves 相)的综合作用,合金硬度(HV)由 135 提高到 515,抗拉强度提高了 75%,同时其屈服强度逐渐升高,而塑性逐渐下降^[49]。

2 非金属元素对 CoCrFeNi 系 HEACs 微观组织与性能的影响

2.1 B 元素

添加 B 后 HEAs 涂层耐腐蚀性能较好,且硬度增加^[36]。郝文俊等^[4]指出,由于 B 相对于 Cr、Co、Fe、Ni 元素原子半径较小,添加少量 B 时,容易与其他元素结合而引起晶体结构的“坍塌”,造成 CoCrFeNi 系 HEAs 硬度与晶格常数下降,但当元素含量逐渐增加,由于间隙固溶体的形成,增加合金的晶格常数,产生固溶强化,使得合金的硬度和耐磨性逐渐提高,FeCoCrNiB_x ($x=0.5, 0.75, 1.0, 1.25$) 激光熔覆 HEACs 的相结构转变为 FCC 固溶体和 M₃B 硬质相,并且 M₃B 硬质相逐渐增加,HEACs 的硬度和耐磨性能明显提高,见图 1^[25]。同时,ZHANG C 等^[50]发现,在 CoCrFeNi 系 HEACs 中添加 B 后,会生成(Cr,Fe)₂B 相,且随着 B 含量提高,CoCrFeNi 系 HEACs 的硬度和耐腐蚀性能逐渐提升,但当添加过量 B($x=1.25$)时,硼化物由(Cr,Fe)₂B 相转变为(Fe,Cr)₂B 相,涂层硬度呈指数增长,但耐腐蚀性能却逐渐下降。

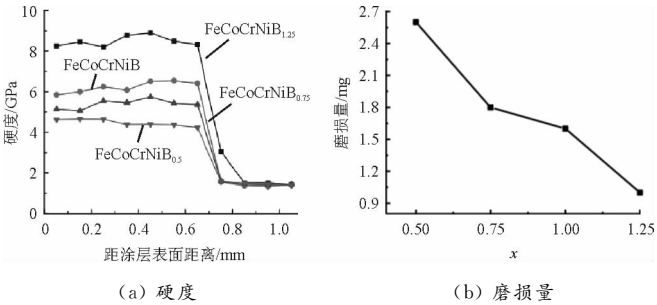


图 1 FeCoCrNiB_x ($x=0.5, 0.75, 1.0, 1.25$) HEACs 的显微硬度和磨损量^[27]
Fig.1 Microhardness and wear loss of FeCoCrNiB_x ($x=0.5, 0.75, 1.0, 1.25$) HEACs^[27]

2.2 Si 元素

Si 的添加能够提高涂层硬度和耐腐蚀性能,并且高 Si 含量的涂层会生成具有润滑作用的 SiO₂ 和 SiO 氧化膜,极大提高涂层的摩擦磨损性能^[49~53]。HUANG L 等^[53]研究发现,在 FeCoCrNi 系 HEAs 中添加 Si 后,合金硬度均明显提高,从 89.52 增加到

653.71,磨损机制转化为磨蚀性磨损,磨痕深度从 22.139 μm 减少到 5.292 μm ,并且宽度也逐渐减小,合金耐磨性能显著提高。但是,同 B 元素一样,由于 Si 元素具有较小的原子半径,添加少量 Si 时,会引起 HEAs 的“坍塌”现象,造成合金硬度和晶格常数下降^[4]。

当 Si 含量增加时,CoCrFeNi 系激光熔覆 HEACs 的相结构逐渐转变为 BCC 相,同时,由于 Si 与其他元素原子半径差加剧了涂层内部晶格畸变,同时,原子半径较小的 Si 占据晶格的空隙位,阻碍晶体间的相对滑移,引起涂层硬度提高;随着 Si 含量增加,涂层的磨损机制从氧化磨损与磨料磨损转变为单一的磨料磨损,磨损量与摩擦因数持续降低,并且腐蚀电流密度 J_{corr} 逐渐降低,腐蚀速率减慢,涂层的耐磨性能与耐腐蚀性能明显提升,见表 1 和表 2^[25,54]。

表 1 CoCrFeNiSi_x HEACs 的硬度、磨损量以及摩擦因数^[24]

CoCrFeNiSi _x HEACs ^[24]			
合金	硬度(HV _{0.5})	磨损量/mg	摩擦因数
CoCrFeNi	452.1	9.45	0.69
CoCrFeNiSi _{0.5}	483.4	8.85	0.68
CoCrFeNiSi _{1.0}	549.8	7.31	0.60
CoCrFeNiSi _{1.5}	563.1	6.23	0.55
CoCrFeNiSi _{2.0}	586.5	5.62	0.49

表 2 CoCrFeNiSi_x HEACs 的电化学参数^[54]

CoCrFeNiSi _x HEACs ^[54]		
合金	E_{corr} (vs. SCE)/mV	$J_{\text{corr}}/(A \cdot \text{cm}^{-2})$
CoCrFeNi	758.18	1.17×10^{-6}
CoCrFeNiSi _{0.5}	-710.4	9.20×10^{-7}
CoCrFeNiSi _{1.0}	-634.06	7.08×10^{-7}
CoCrFeNiSi _{1.5}	-633.37	6.85×10^{-7}
CoCrFeNiSi _{2.0}	-598.60	6.06×10^{-7}

2.3 C 元素

添加 C 元素后的 HEAs,表现出屈服强度与抗拉强度提高,甚至随着环境温度降低呈现屈服强度、抗拉强度以及延展性的提高^[55]。HUANG T D 等^[56]研究 CoCrFeNiC_x ($x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$) HEAs 的性能后,发现未添加 C 元素时,合金表现出高延展性,但强度较低,当逐渐添加 C 元素,由于固溶强化和硬质碳化物相的综合作用,CoCrFeNiC_x HEAs 的硬度、强度得到明显提高,硬度(HV)从 133 增加到 335,压缩屈服强度从 155 MPa 增加到 923 MPa。

在 CoCrFeNiC_x ($x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 0.9$) HEAs 中,少量添加 C($x<0.3$)并没有改变原有的 FCC 单相结构,但随着 C 含量逐渐增加($x>0.3$),合金的微观结构从单一 FCC 相转变为枝晶间结构,并且在内部区域形成共晶碳化物(FCC+M₇C₃),由于高硬度(约 17.7 GPa 的纳米硬度)和高体积分数的 M₇C₃ 碳化

物强化的形成,使得合金的强度明显提高,屈服强度从 295 MPa 持续增加到 512 MPa,抗拉强度从 423 MPa 增加到 693 MPa,但形成的碳化物沉淀导致 HEAs 塑性变形能力下降,总伸长率从 80.6% 下降到 22.1%^[31]。

3 总结与展望

适量的金属元素添加能够改善 CoCrFeNi 系 HEACs 的性能,但过量的金属元素添加容易造成涂层部分性能下降,而且其中金属元素 Cu,需要同另外的添加元素相配合才能显著提高涂层的性能;对于非金属元素,少量添加容易引起 CoCrFeNi 系 HEACs 性能的下降,较大含量的非金属元素添加反而能够使涂层呈现出较好的性能。因此,当选择金属元素来提高 CoCrFeNi 系 HEACs 的性能时,需要合理降低金属元素的添加量,以及同其他元素一起添加来改善涂层性能,而当选择非金属元素时,则需要适当提高非金属元素的添加量,并依据涂层工作环境控制其含量,才能使得涂层具有最理想的性能。

目前,虽然已有大量关于不同元素的添加对 CoCrFeNi 系 HEACs 性能影响的研究,但仍然存在一些有待解决的问题。首先,对于添加其他元素如 Pd、V、Ta 等对 CoCrFeNi 系 HEACs 产生的影响方面的研究相对较少。通过研究一些未被研究的元素对 CoCrFeNi 系 HEACs 性能的影响,不仅能够丰富这个领域的研究成果,还能够发现一些意料之外的性能改善,进而可以使 CoCrFeNi 系 HEACs 被应用在更多不同的工作环境之中。其次,目前较多的研究集中在改变添加元素的选择或元素含量的变化对 CoCrFeNi 系 HEACs 在常温下性能的影响,而对真空环境、酸碱环境、高温与低温环境等恶劣条件下性能影响的研究则相对较少;对不同环境下性能的测试,能够进一步开发其性能并丰富其应用领域。最后,目前更多的试验研究是基于不断的尝试来测试 HEACs 性能的变化,如何根据应用场合的需要,快速、高效地为 CoCrFeNi 系 HEACs 选择合适的添加元素以及元素的添加量方面还缺乏理论指导。更好地开发这方面的理论,并借助理论引入仿真模拟技术,提前通过理论依据和仿真软件来验证试验结果,有助于提高研究效率,推进相关的研究进展。

参 考 文 献

- [1] CHANG X J, ZENG M Q, LIU K L, et al. Phase engineering of high-entropy alloys[J]. *Adv. Mater.*, 2020, 32(14): 1 907 226.
- [2] ZOU Y, MAITI S, STEURER W, et al. Size-dependent plasticity in an Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅ refractory high-entropy alloy[J]. *Acta Materialia*, 2014, 65: 85-97.
- [3] LI Q Y, ZHANG H, LI D C, et al. Comparative study of the microstructures and mechanical properties of laser metal deposited and vacuum arc melted refractory NbMoTa medium-entropy alloy[J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2020, 88: 105 195.
- [4] 郝文俊,孙荣禄,牛伟,等. 合金元素影响高熵合金涂层组织及力学性能综述[J]. *材料导报*, 2020, 34(2): 330-333.
- [5] 杨铭,刘雄军,吴渊,等. 高熵非晶合金研究进展[J]. *中国科学*, 2020, 50(6): 17-29.
- [6] TSAI M H, YEH J W. High-entropy alloys: A critical review[J]. *Materials Research Letters*, 2014, 2(3): 107-123.
- [7] 商昭,白文芳,董潇婉,等. 高熵合金特性和力学性能的研究进展[J]. *热加工工艺*, 2022, 51(2): 11-16.
- [8] 许途,刘谦,黄燕滨,等. 高熵合金涂层的研究现状[J]. *电镀与涂饰*, 2019, 38(7): 326-333.
- [9] 赵海朝,梁秀兵,乔玉林,等. 激光熔覆高熵合金涂层的研究进展[J]. *材料工程*, 2019, 47(10): 33-43.
- [10] PICKERING E J, JONES N G. High-entropy alloys: A critical assessment of their founding principles and future prospects[J]. *International Materials Reviews*, 2016, 61(3): 183-202.
- [11] CHEN J, ZHOU X Y, WANG W L, et al. A review on fundamental of high entropy alloys with promising high-temperature properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 760: 15-30.
- [12] ZHANG F, ZHANG C, CHEN S L, et al. An understanding of high entropy alloys from phase diagram calculations[J]. *CALPHAD-Computer Coupling of Phase Diagrams & Thermochemistry*, 2014, 45: 1-10.
- [13] 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, 45(11): 129-138.
- [14] WANG M L, LU Y P, ZHANG G J, et al. A novel high-entropy alloy composite coating with core-shell structures prepared by plasma cladding[J]. *Vacuum*, 2020, 184(6 201): 109 905.
- [15] ZHANG Y, ZUO T T, TANG Z, et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys[J]. *Progress in Materials Science*, 2014, 61(4): 1-93.
- [16] LU Y P, DONG Y, JIANG H, et al. Promising properties and future trend of eutectic high entropy alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2020, 187: 202-209.
- [17] WANG M L, LU Y P, WANG T M, et al. A novel bulk eutectic high-entropy alloy with outstanding as-cast specific yield strengths at elevated temperatures [J]. *Scripta Materialia*, 2021, 204: 114 132.
- [18] MIRACLE D B, SENKOV O N. A critical review of high entropy alloys and related concepts[J]. *Acta Materialia*, 2017, 122: 448-511.
- [19] 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.
- [20] 陈明宣,马强,孟君晟,等. 高熵合金涂层的研究进展[J]. *金属热处理*, 2021, 46(9): 7-14.
- [21] WANG W R, QI W, XIE L, et al. Microstructure and corrosion behavior of (CoCrFeNi)₉₅Nb₅ high-entropy alloy coating fabricated by plasma spraying[J]. *Materials (Basel)*, 2019, 12(5): 694.
- [22] 孙姬,吴长军,刘亚,等. 合金元素对 CoCrFeNi 基高熵合金相组成

- 和力学性能影响的研究现状[J]. 材料导报, 2019, 33(7): 1 169-1 173.
- [23] CAI Y C, CHEN Y, LUO Z, et al. Manufacturing of Fe-CoCrNiCu_x medium-entropy alloy coating using laser cladding technology[J]. Materials & Design, 2017, 133: 91-108.
- [24] 郝文俊. 激光熔覆 CoCrFeNiSi_x 高熵合金涂层组织及其性能的研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2021.
- [25] 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.
- [26] ZHENG B, LIU Q B, ZHANG L Y. Microstructure and properties of mofectiw high-entropy alloy coating prepared by laser cladding[J]. Advanced Materials Research, 2013, 820: 63-66.
- [27] ZHANG S Y, HAN B, LI M Y, et al. Microstructure and high temperature erosion behavior of laser clad CoCrFeNiSi high entropy alloy coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 417: 127 218.
- [28] ALVI S, JARZABEK D M, KOHAN M G, et al. Synthesis and mechanical characterization of a CuMoTaWV high-entropy film by magnetron sputtering[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(18): 02 156.
- [29] ZHAO S, LIU C, YANG J, et al. Mechanical and high-temperature corrosion properties of AlTiCrNiTa high entropy alloy coating prepared by magnetron sputtering for accident-tolerant fuel cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 417: 127 228.
- [30] MEGHWAL A, ANUPAM A, MURTY B S, et al. Thermal spray high-entropy alloy coatings: A review[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2020, 29(11): 01 047.
- [31] ZHANG L J, YU P F, FAN J T, et al. Investigating the micro and nanomechanical properties of CoCrFeNi-C- x high-entropy alloys containing eutectic carbides[J]. Materials Science and Engineering, 2020, A796 (5): 140 065.
- [32] WANG J, ZHANG B, YU Y, et al. Study of high temperature friction and wear performance of (CoCrFeMnNi)₈₅Ti₁₅ high-entropy alloy coating prepared by plasma cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 384: 125 337.
- [33] LI J C, HUANG Y, MENG X C, et al. A review on high entropy alloys coatings: fabrication processes and property assessment[J]. Advanced Engineering Materials, 2019, 21(8): 1 900 343.
- [34] 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.
- [35] 李相阳, 朱红梅. 激光熔覆制备高熵合金涂层的研究进展[J]. 热加工工艺, 2016, 45(22): 107-117.
- [36] GOODARZI D M, PEKKARINEN J, SALMINEN A. Analysis of laser cladding process parameter influence on the clad bead geometry[J]. Welding in the World, 2017, 61(5): 883-891.
- [37] 张志彬, 张舒研, 陈永雄, 等. 合金组元与含量对激光熔覆高熵合金涂层的影响研究综述[J]. 中国表面工程, 2021, 34(5): 76-91.
- [38] 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): 868-874.
- [39] 王昕阳, 黄燕滨, 刘谦, 等. 钼含量对碳钢表面 CoCrFeNiMo 高熵合金激光熔覆涂层组织结构与耐磨性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(17): 1 201-1 208.
- [40] 隽永飞, 李军, 蒋云强, 等. 激光熔覆制备高熵合金涂层的研究进展[J]. 应用激光, 2018, 38(1): 130-135.
- [41] 郑必举, 蒋业华, 胡文. 铝含量对 Al_xCrFeCoCuNi 高熵合金涂层抗氧化性能的影响[J]. 应用激光, 2016, 36(1): 18-22.
- [42] YE X, MA M, CAO Y, et al. The property research on high-entropy alloy Al_xFeCoNiCuCr coating by laser cladding[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 303-312.
- [43] CHAO Q, GUO T, JARVIS T, et al. Direct laser deposition cladding of Al_xCoCrFeNi high entropy alloys on a high-temperature stainless steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2017, 332: 440-451.
- [44] 张雪, 崔洪芝, 王明亮, 等. Al 含量对 Al_xCoCrFeNi 系高熵合金组织和耐蚀性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(12): 29-36.
- [45] SHANG C Y, AXINTE E, GE W J, et al. High-entropy alloy coatings with excellent mechanical, corrosion resistance and magnetic properties prepared by mechanical alloying and hot pressing sintering[J]. Surfaces and Interfaces, 2017, 9: 36-43.
- [46] CAI Y, CHEN Y, LUO Z, et al. Manufacturing of FeCoCrNiCu_x medium-entropy alloy coating using laser cladding technology[J]. Materials & Design, 2017, 133(11): 91-108.
- [47] 王夺. CoCrFeNiCu 系高熵合金的组织与力学性能[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2014.
- [48] 孙楠, 温宸, 刘子利, 等. Al, Ti 含量对锻态 Incoloy825 合金组织和耐腐蚀性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(3): 860-866.
- [49] 刘恕寿, 黄维刚. AlCoCrNiSi_x 高熵合金微观组织结构与力学性能[J]. 材料工程, 2012(1): 5-8.
- [50] ZHANG C, CHEN G J, DAI P Q. Evolution of the microstructure and properties of laser-clad FeCrNiCoB_x high-entropy alloy coatings[J]. Materials Science and Technology, 2016, 32(16): 1 666-1 672.
- [51] CHENG P, ZHAO Y H, XU X T, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of Al_{0.3}CoCrFeNiSi_x high-entropy alloys containing coherent nanometer-scaled precipitates[J]. Materials Science and Engineering, 2020, 772: 138 681.
- [52] 张国忠. 激光熔覆 AlCoCrFeNiSi_x 高熵合金及其织构涂层的组织性能研究[D]. 江苏徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [53] HUANG L, WANG X J, JIA F C, et al. Effect of Si element on phase transformation and mechanical properties for FeCoCrNiSi_x high entropy alloys[J]. Materials Letters, 2021, 282: 128 809.
- [54] 郝文俊, 孙荣禄, 牛伟, 等. 激光熔覆 CoCrFeNiSi_x 高熵合金涂层组织及耐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 343-348, 381.
- [55] WU Z, PARISH C M, BEI H. Nano-twin mediated plasticity in carbon-containing FeNiCoCrMn high entropy alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 647: 815-822.
- [56] HUANG T D, JIANG L, ZHANG C L, et al. Effect of carbon addition on the microstructure and mechanical properties of CoCrFeNi high entropy alloy[J]. Science China Technological Sciences, 2017, 61(1): 117-123.

(编辑: 刘晨辉)