

WC 对 Al_{0.2}CoCrFeNi 放电等离子烧结组织和性能的影响

于金虎¹ 庄文晨¹ 陶美悦¹ 曹志强^{1,2}

(1.大连理工大学材料科学与工程学院;2.大连理工大学宁波研究院)

摘 要 以 Al_{0.2}CoCrFeNi(HEA)为基体,体积分数为 5% WC 陶瓷颗粒为增强相,采用放电等离子烧结的方式制备高熵合金基复合材料。通过相组成分析、微观结构观察、力学性能和摩擦学性能测试等,研究 WC 陶瓷颗粒对复合材料组织和性能的影响。结果发现,随着 WC 陶瓷颗粒的加入,复合材料中除了 WC 和基体 FCC 相之外,还出现了新的碳化物相 M₆C 和 M₂₃C₆。复合材料的强度和硬度相对于基体高熵合金都有所提升,同时断裂应变保持在 43.6%,磨损率降低了 50% 以上。

关键词 高熵合金;复合材料;放电等离子烧结;力学性能;摩擦学性能

中图分类号 TG113.25;TG146.21 **文献标志码** A

DOI10.15980/j.tzzz.2023.012.021 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Effects of WC on Structure and Properties of Spark Plasma Sintered Al_{0.2}CoCrFeNi Alloy

Yu Jinhu¹, Zhuang Wenchen¹, Tao Meiyue¹, Cao Zhiqiang^{1,2}

(1.School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology;
2.Ningbo Institute of Dalian University of Technology)

Abstract: High entropy alloy matrix composites were fabricated by spark plasma sintering with Al_{0.2}CoCrFeNi as matrix and 5% WC as reinforcement. Effects of WC ceramic particles on structure and properties of the composites were investigated by phase composition analysis, microstructure observation, mechanical properties, and tribological properties tests. The results indicate that with the addition of WC ceramic particles, new carbide phases of M₆C and M₂₃C₆ appears in the composites in addition to the WC and matrix FCC phases. The strength and hardness of the composites are increased relative to the matrix, while the fracture strain retains at 43.6%, and the wear rate is reduced by over 50%.

Key Words: High Entropy Alloy, Composites, Spark Plasma Sintering, Mechanical Properties, Tribological Properties

多组元高熵合金的出现,突破了传统合金的设计限制,被称为合金化理论领域近年来的突破之一^[1-2]。由于存在高熵效应、严重的晶格畸变、迟滞扩散效应和“鸡尾酒效应”等,高熵合金通常具有高强度、高塑性、良好的抗氧化性和耐磨性等特点^[3-5]。FCC 相高熵合金,通常具有良好的塑性,但强度不足^[5-8]。通过添加陶瓷颗粒制备高熵合金基复合材料是一种较有前景的强化方式^[9-10]。目前有关高熵合金基复合材料的相关研究,在增强相的选择、制备工艺、强化机制等方面已经取得一定成果,但是离实际应用仍有较大差距,需要进一步研究。制备工艺包括等离子弧熔覆^[11-12]、热压烧结^[13-14]、热反应^[15]、电弧熔炼^[16-17]等,其中热压烧结有致密、强度高的特点。而增强相大部分为陶瓷颗粒^[18-21],少部分为金属化合物^[15,22],添加方式包括外加增强相^[22-24]和

原位自生增强相^[25]。

本研究通过放电等离子烧结(SPS)的方式,在 Al_{0.2}CoCrFeNi 高熵合金基体中添加体积分数为 5% 的 WC 陶瓷颗粒对其进行强化,研究 WC 陶瓷颗粒的添加对复合材料微观结构、力学性能、摩擦学性能的影响,探究 HEA-5% WC 复合材料的相应强化机制和磨损行为,旨在为高熵合金复合材料的应用提供参考。

1 试验材料与方法

采用气雾化法制备 Al_{0.2}CoCrFeNi 高熵合金,其质量分数大于 99.9%,尺寸为 45~105 μm;球形 WC 颗粒直径为 200 nm,质量分数为 99.99%。称取 HEA 粉末和 5% (体积分数) 的 WC 陶瓷颗粒加入不锈钢球磨罐中,按照球料比 10 : 1 加入不锈钢球进行球磨,球磨机

收稿日期:2023-01-06;修改稿收到日期:2023-03-01
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52271024);国家重点研发计划资助项目(2017YFA0403803)
第一作者简介:于金虎,男,1998 年出生,硕士研究生,辽宁大连(116024),Email:yujinhu2022@163.com
通信作者:曹志强,男,1965 年出生,教授,辽宁大连(116024),E-mail:caozq@dlut.edu.cn
引用格式:于金虎,庄文晨,陶美悦,等. WC 对 Al_{0.2}CoCrFeNi 放电等离子烧结组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(12):1 700-1 704.
YU J H, ZHUANG W C, TAO M Y, et al. Effects of WC on structure and properties of spark plasma sintered Al_{0.2}CoCrFeNi alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 700-1 704.

转速为 200 r/min,球磨 2 h。球磨后的粉末在 SPS-3T-3-MIN(L)型放电等离子烧结设备上烧结成形,烧结温度为 1 000 ℃,保温时间为 10 min,烧结压力为 50 MPa。烧结后的试样通过线切割进行取样分析。

采用 Empyrean 型 X 射线衍射仪对试样进行物相分析,使用 Cu 靶 K α 辐射(波长 $\lambda=0.154\ 06\ \text{nm}$),工作电压为 45 kV,工作电流为 40 mA,扫描角度(2θ)范围为 $20^\circ\sim 100^\circ$,扫描速度为 $4^\circ/\text{min}$;使用 JXT-8530F PLUS 场发射电子探针和 IT800-SHL 扫描电镜观察微观组织,使用电子探针配备的波谱仪(WDS)进行微区成分分析。采用阿基米德排水法测定试样密度,并根据理论密度计算试样的致密度。硬度测试采用 MT-50 型维氏硬度计,试验载荷为 9.8 N,保压 15 s,测量 5 次取平均值。压缩试验在 Instron5982 型电子万能材料试验机进行,压缩试样尺寸为 $\phi 4\ \text{mm}\times 8\ \text{mm}$,压缩速率为 $1\times 10^{-3}\ \text{s}^{-1}$ 。摩擦磨损测试在 MFT-1000T 摩擦磨损试验机上进行,对磨材料为钨钢对磨盘,载荷为 50 N,摩擦半径为 15 mm,试验前后测量试样制成的摩擦销的质量并计算体积磨损。

2 试验结果与讨论

2.1 相组成

图 1 为 SPS 法制备的 Al_{0.2}CoCrFeNi(HEA)高熵合金和 HEA-5% WC 复合材料的 XRD 图谱。可以看出,未添加 WC 陶瓷颗粒时,Al_{0.2}CoCrFeNi 高熵合金主要相结构为单相 FCC 结构,这与之前研究结果一致^[7-8]。加入 5% 的 WC 颗粒后,X 射线分析显示出更复杂的衍射图案。HEA-5% WC 复合材料主要由 FCC 基体相和 WC 相组成,此外,在复合材料 XRD 图谱中还出现两种微弱的新相衍射峰,通过与标准 PDF 卡片对比,确定新相为 Fe₂W₂C^[26]和 M₂₃C₆^[23]结构,表明在放电等离子烧结过程中,WC 颗粒与基体 Al_{0.2}CoCrFeNi 产生了界面反应。该反应可以由图 2 的 WC 与基体

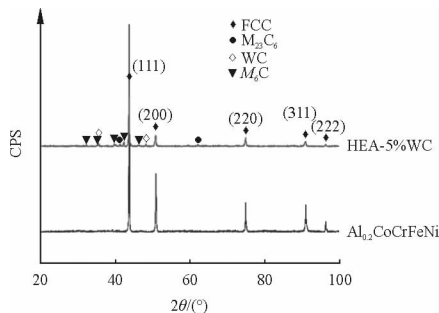


图 1 Al_{0.2}CoCrFeNi 高熵合金和 HEA-5% WC 复合材料的 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of Al_{0.2}CoCrFeNi HEA and HEA-5% WC composites

中各元素在不同温度下反应的自由能变曲线来解释,该反应曲线由 HSC Chemistry 热力学计算软件计算获得。可以看出,1 000 ℃时 WC 与基体中的 Al 元素和 Cr 元素反应的吉布斯自由能变均为负值,其中 Cr 元素反应的吉布斯自由能变更小,因此 WC 倾向于与 Cr 元素反应生成新的碳化物相 M₂₃C₆,同时 WC 中 C 元素减少并与基体中的 Fe 元素结合形成 M₆C 结构。

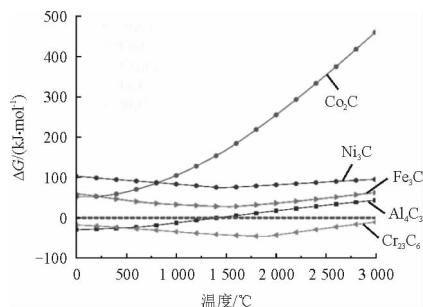


图 2 WC 与基体不同元素反应的吉布斯自由能随温度的变化曲线

Fig.2 Variation curves of Gibbs free energy with temperature for the reaction of WC with different elements

2.2 微观结构

图 3 为 Al_{0.2}CoCrFeNi 高熵合金以及 HEA-5% WC 复合材料的显微组织。表 1 为不同区域的化学成分。由图 3a 和图 3b 可见,Al_{0.2}CoCrFeNi 高熵合金基体呈单相结构,结合图 1 及相关研究^[7]可知,Al_{0.2}CoCrFeNi 合金中的主相为 FCC 相。结合表 1 可以看出,Al_{0.2}CoCrFeNi 放电等离子烧结制备的试样与标称成分大致相同。同时,在晶界处,合金组织呈黑色,且黑色部分 Al 含量较高,这归因于晶界处的成分偏析。

从图 3c 和图 3d 可以看出,HEA-5% WC 复合材料主要由浅灰色 FCC 基体相以及高熵合金颗粒之间的白色富 W 相组成。白色富 W 相包含 M₆C 相(见图 3d 中点 4)和原有的 WC 相(见图 3d 中点 6),点 4 处其他元素与 C 元素的比值接近 6 : 1,同时 W 含量较高,因此判断该区域为 M₆C,与 XRD 结果相符。由于合金中其他元素会与 Fe 元素相互固溶,因此点 4 处 Fe 含量并未达到 C 含量的两倍。从图 3d 可以看出,复合材料中除基体和白色相外,还存在少量深灰色相,见图 3d 中点 5。结合表 1 可知,深灰色相中 C 摩尔分数接近 20%,其他合金元素与 C 元素的摩尔比接近 23 : 6,因此推测深灰色相为碳化物 M₂₃C₆。新的碳化物的生成与各合金元素与 C 元素的二元混合焓有关。表 2 为 Al、Co、Cr、Fe、Ni、W、C 元素间的混合焓(ΔH)。可以看出,Cr 与 C 之间的混合焓最负($-61\ \text{kJ/mol}$),因此 C 易与 Cr 产生反应生成碳化物,由于 Fe 元素等可以置换部分 Cr 原子,因此生成富含 Cr 的 M₂₃C₆。由于 W 和 C 的混合

焓(−60 kJ/mol)与 Cr 和 C 的混合焓相差不大,同时 SPS 放电时间较短,因此复合材料中仍保留一定的 WC 成分,见图 3d 中点 6。

图 4 为 HEA-5% WC 复合材料的 EPMA 元素面扫描。可以看出,WC 颗粒分布在高熵合金颗粒交界位

置,在晶界和相界处有 Cr 元素的富集,Co、Fe、Ni 元素在 FCC 相中基本呈现均匀分布。Al 元素在黑色相中分布较多,这与表 1 中点 2 的基体点分析结果一致。Cr 元素在交界处的富集证明了发生界面反应,基体中的 Cr 与外加 WC 颗粒中的 C 在放电等离子烧结过程中发

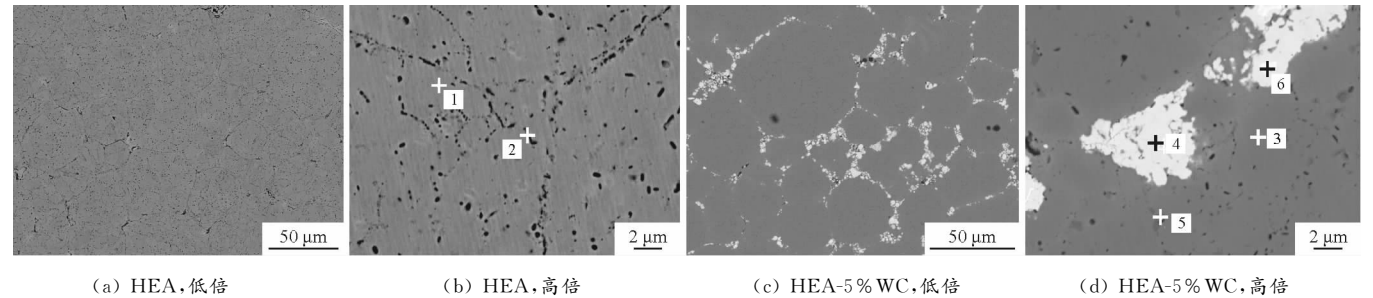


图 3 Al_{0.2}CoCrFeNi 高熵合金和 HEA-5% WC 复合材料的 EPMA 背散射图像

Fig.3 EPMA backscattering images of Al_{0.2}CoCrFeNi high entropy alloy and HEA-5% WC composites

表 1 Al_{0.2}CoCrFeNi HEA 和 HEA-5% WC 复合材料的化学成分

Tab.1 Chemical composition of Al _{0.2} CoCrFeNi HEA and HEA-5%WC composites %							
区域	x_B						
	Al	Co	Cr	Fe	Ni	W	C
1	3.99	23.51	24.47	24.37	23.66	-	-
2	15.00	20.77	21.44	22.01	20.79	-	-
3	3.97	25.17	19.94	25.25	24.91	0.14	0.62
4	0.35	13.65	19.71	10.17	7.27	32.84	16.01
5	1.26	4.89	61.83	8.04	3.87	0.07	20.04
6	0	3.26	2.99	2.63	2.54	50.78	37.80

表 2 Al、Co、Cr、Fe、Ni、W、C 元素间的不同原子对间的混合焓

Tab.2 Mixing enthalpy between different atom pairs of Al, Co, Cr, Fe, Ni, W, and C elements (kJ/mol)							
元素	ΔH						
	Al	Co	Cr	Fe	Ni	W	C
Al	-	-	-	-	-	-	-
Co	-19	-	-	-	-	-	-
Cr	-10	-4	-	-	-	-	-
Fe	-11	-1	-1	-	-	-	-
Ni	-22	0	-7	-2	-	-	-
W	-2	-1	-1	0	-3	-	-
C	-36	-42	-61	-50	-39	-60	-

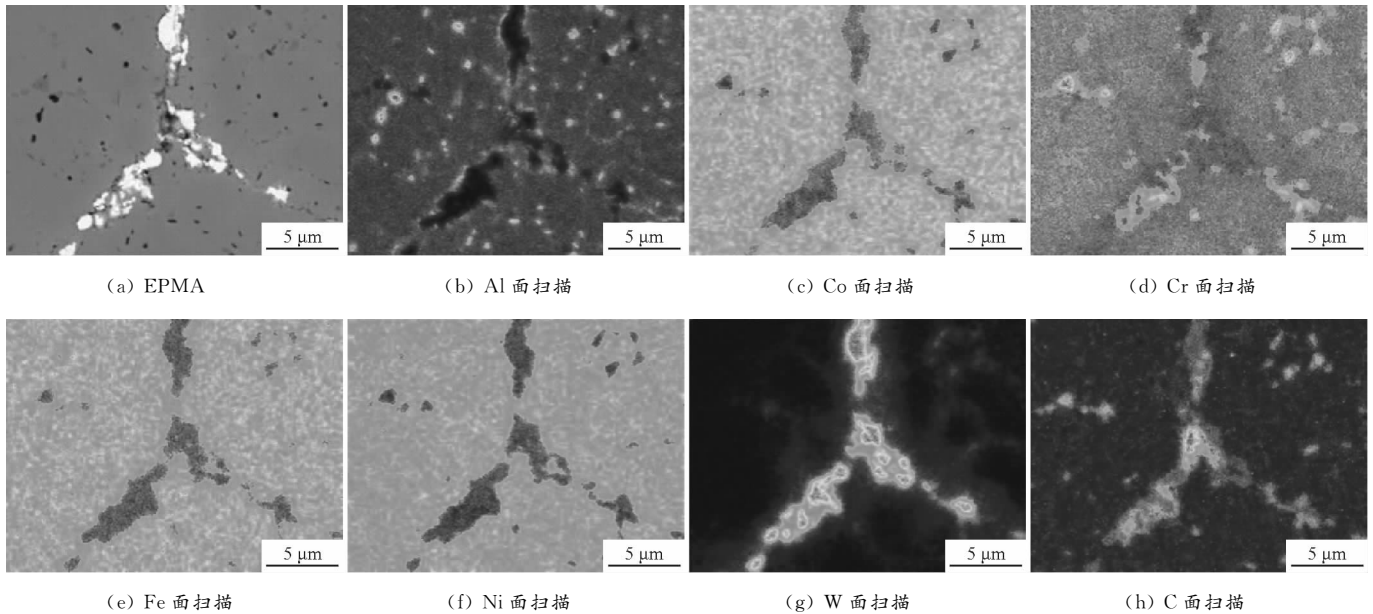


图 4 HEA-5% WC 复合材料的 EPMA 面分析图

Fig.4 EPMA mapping of HEA-5% WC composite

生反应,在界面处生成 $M_{23}C_6$ 相。

2.3 力学性能

表 3 为 Al_{0.2}CoCrFeNi 基体和 HEA-5% WC 复合材料的室温力学性能,图 5 为二者的室温压缩工程应

力-应变曲线。从表 3 可以看出,HEA 基体和 HEA-5% WC 复合材料的致密度都在 95% 以上,试样基本实现致密化。与 Al_{0.2}CoCrFeNi 基体相比,HEA-5% WC 复合材料的压缩屈服强度和维氏硬度都有小幅提升,说

明加入 WC 纳米颗粒后,实现了对高熵合金基体的强化。HEA-5% WC 复合材料断裂应变为 43.6%,而 HEA 基体在屈服应变为 50%时仍未断裂,说明 WC 颗粒加入后,虽然复合材料的塑性有所下降,但是仍能保持相对良好的塑性变形能力。

表 3 Al_{0.2}CoCrFeNi 和 HEA-5%WC 复合材料的力学性能
Tab.3 Mechanical properties of Al_{0.2}CoCrFeNi HEA and HEA-5%WC composites

材料	致密度/ %	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	伸长率/ %	硬度 (HV)
Al _{0.2} CoCrFeNi	95.22±2	424±14	-	-	196±4
HEA-5% WC	96.76±2	468±8	1 871±22	43.6±0.6	226±10

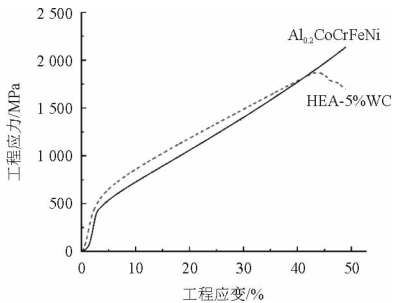


图 5 Al_{0.2}CoCrFeNi 和 HEA-5% WC 复合材料的工程压缩应力-应变曲线

Fig.5 Engineering compressive stress-strain curves of Al_{0.2}CoCrFeNi HEA and HEA-5% WC composites

与 Al_{0.2}CoCrFeNi 基体相比,HEA-5% WC 复合材料中 WC 硬质相均匀分布在高熵合金颗粒交界处,阻碍位错的运动,因此复合材料中有明显的弥散强化效果。HEA-5% WC 复合材料中的 FCC 基体相中有新的 M₂₃C₆析出,新析出的碳化物相也会对复合材料的强度提升起到一定作用,复合材料表现出析出强化。从图 4 可知,W 元素不仅分布在 WC 颗粒中,同时会沿 WC 与基体交界处向基体内扩散,表现为复合材料的固溶强化效果。复合材料的塑性下降,是由于 WC 与基体界面存在的微小缺陷,导致裂纹的产生与扩展。

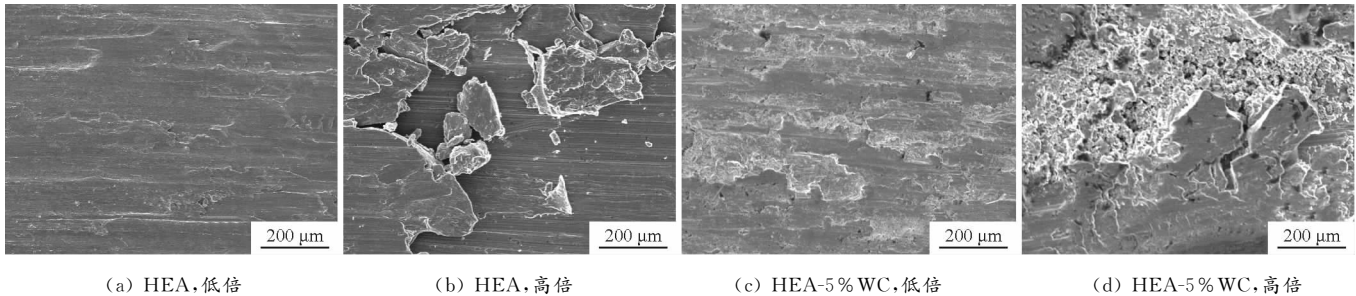


图 7 Al_{0.2}CoCrFeNi 和 HEA-5% WC 复合材料磨损表面的 SEM 图

Fig.7 SEM images of worn surfaces of Al_{0.2}CoCrFeNi high entropy alloy and HEA-5% WC composites

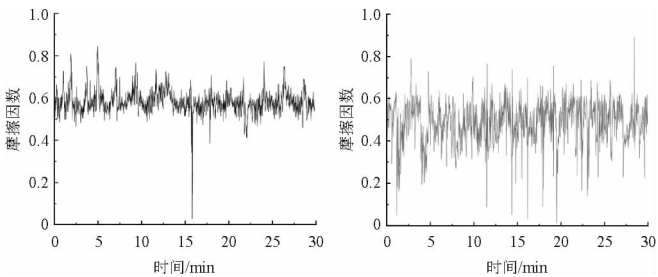
加入导致复合材料中磨粒磨损更加严重,但是 WC 硬质颗粒的存在提高了复合材料的抗塑性变形能力,因此复合材料的磨损相对 HEA 基体更加轻微。

2.4 摩擦学性能

表 4 为 Al_{0.2}CoCrFeNi 和 HEA-5% WC 复合材料的干摩擦磨损测试结果,图 6 为相应的摩擦因数曲线。对比表 4 和图 6 可知,加入 5%的 WC 后,复合材料的摩擦因数相比于基体有所降低,同时磨损率仅为基体的 49%。根据 Khrushchov 理论^[27],合金材料的耐磨性与其硬度密切相关,硬度越高,磨损率越小,这与硬度测试的结果相符合。

表 4 Al_{0.2}CoCrFeNi 和 HEA-5%WC 复合材料的磨损结果
Tab.4 Wear results data of Al_{0.2}CoCrFeNi HEA and HEA-5%WC composites

材料	摩擦因数	磨损速率/($\times 10^{-4} \cdot \text{mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
Al _{0.2} CoCrFeNi	0.582	2.47
HEA-5% WC	0.484	1.22



(a) Al_{0.2}CoCrFeNi (b) HEA-5% WC

图 6 Al_{0.2}CoCrFeNi 和 HEA-5% WC 复合材料的摩擦因数
Fig.6 Friction coefficient of Al_{0.2}CoCrFeNi and HEA-5% WC composites

图 7 为 Al_{0.2}CoCrFeNi 基体和 HEA-5% WC 复合材料的磨损表面形貌。可以看出,高熵合金基体的磨损表面更为平滑,而 HEA-5% WC 复合材料的磨损表面有较多的磨损缺陷,这可能是摩擦过程中 WC 颗粒的剥落造成的。HEA 基体和复合材料磨损表面都存在沟槽和磨损碎屑,证明均发生了磨粒磨损。HEA 磨损表面还存在一些较深的凹坑和斑块,说明 HEA 还存在粘着磨损^[28]。复合材料表面的碎屑相对更多,主要是来自于分布在颗粒交界处 WC 颗粒。虽然 WC 颗粒的

3 结 论

(1)利用放电等离子烧结技术向 Al_{0.2}CoCrFeNi 高

熵合金添加体积分数为 5% 的 WC 颗粒。 $\text{Al}_{0.2}\text{CoCrFe-Ni}$ 基体烧结完成后为 FCC 相, HEA-5% WC 复合材料包含 FCC 相、WC 相和新的碳化物相 M_6C 和 M_{23}C_6 , 表明烧结过程中 WC 颗粒与基体产生了界面反应。

(2) 相对于 HEA 基体, HEA-5% WC 复合材料的维氏硬度、屈服强度都有一定提升, 同时复合材料的压缩断裂应变保持在 43.6%, 复合材料中存在弥散强化、析出强化、固溶强化等强化效果。

(3) HEA-5% WC 复合材料的摩擦因数较 HEA 基体有所降低, 磨损率仅为 HEA 基体的 49%, 表明 WC 颗粒的加入提高了复合材料的耐磨性。

参 考 文 献

- [1] FAN Q C, LI B S, ZHANG Y. The microstructure and properties of $(\text{FeCrNiCo})\text{Al}_x\text{Cu}_y$ high-entropy alloys and their TiC-reinforced composites[J]. *Materials Science and Engineering*, 2014, A598: 244-250.
- [2] YE H 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.
- [3] CHENG H X, PAN Z M, FU Y, et al. Review-corrosion-resistant high-entropy alloy coatings: A review[J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 2021, 168(11): 111 502.
- [4] 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.
- [5] LI S, LEI S, WU Y B, et al. Effect of Ti content on magnetic and electrochemical corrosion properties of FeCoCrNi high entropy alloys[J]. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*, 2021, 10(3): 33 003.
- [6] WANG W R, WANG W L, WANG S C, et al. Effects of Al addition on the microstructure and mechanical property of $\text{Al}_x\text{CoCrFe-Ni}$ high-entropy alloys[J]. *Intermetallics*, 2012, 26: 44-51.
- [7] CHANG S H, HUANG S P, WU S K. Effect of Al content on the selective leaching property of $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ high-entropy alloys[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 32: 104 079.
- [8] CHOU H P, CHANG Y S, CHEN S K, et al. Microstructure, thermophysical and electrical properties in $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ ($0 \leq x \leq 2$) high-entropy alloys[J]. *Materials Science and Engineering*, 2009, B163(3): 184-189.
- [9] 刘是文, 朱德智, 金小强. 等离子烧结 $\text{Al}_{35}\text{Ti}_{15}\text{Cr}_{20}\text{Mn}_{20}\text{Cu}_{10}/6061\text{Al}$ 复合材料的组织与性能[J]. *特种铸造及有色合金*, 2021, 41(1): 43-46.
- [10] 赵延周, 李小聪, 高利, 等. 烧结温度对 $(\text{AlCoCrFeNi}_{2.1})_p/\text{Cu}$ 复合材料组织和性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2022, 42(12): 1 511-1 517.
- [11] PENG Y B, ZHANG W, LI T C, et al. Microstructures and wear-resistance of WC-reinforced high entropy alloy composite coatings by plasma cladding: effect of WC morphology[J]. *Surface Engineering*, 2021, 37(5): 678-687.
- [12] 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*, 2021, 184: 109 905.
- [13] GUO Z M, ZHANG A J, HAN J S, et al. Microstructure, mechanical and tribological properties of CoCrFeNiMn high entropy al-

loy matrix composites with addition of Cr_3C_2 [J]. *Tribology International*, 2020, 151: 106 436.

- [14] WANG J Y, YANG H L, HUANG H, et al. Microstructure and mechanical properties of SiC whisker reinforced CoCrNi medium entropy alloys[J]. *Materials Letters*, 2019, 254: 77-80.
- [15] CHEN G, LUO T, SHEN S C, et al. Tungsten particles reinforced high-entropy alloy matrix composite prepared by in-situ reaction[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 862: 158 037.
- [16] POLETTI M G, FIORE G, GILI F, et al. Development of a new high entropy alloy for wear resistance: $\text{FeCoCrNiW}_{0.3}$ and $\text{Fe-CoCrNiW}_{0.3} + 5\%$ of C[J]. *Materials & Design*, 2017, 115: 247-254.
- [17] WEI Q Q, LUO G Q, ZHANG J, et al. Designing high entropy alloy-ceramic eutectic composites of $\text{MoNbRe}_{0.5}\text{TaW}(\text{TiC})_x$ with high compressive strength[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 818: 152 846.
- [18] CHEN H Y, KOSIBA K, LU T W, et al. Hierarchical microstructures and strengthening mechanisms of nano-TiC reinforced CoCrFeMnNi high-entropy alloy composites prepared by laser powder bed fusion[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, 136: 245-259.
- [19] JIANG P F, ZHANG C H, ZHANG S, et al. Fabrication and wear behavior of TiC reinforced FeCoCrAlCu -based high entropy alloy coatings by laser surface alloying[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 255: 123 571.
- [20] ROGAL A, KALITA D, LITYNSKA-DOBRYNSKA L. CoCrFeMnNi high entropy alloy matrix nanocomposite with addition of Al_2O_3 [J]. *Intermetallics*, 2017, 86: 104-109.
- [21] ROGAL A, KALITA D, TARASEK A, et al. Effect of SiC nanoparticles on microstructure and mechanical properties of the CoCrFeMnNi high entropy alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 708: 344-352.
- [22] YADAV S, SARKAR S, AGGARWAL A, et al. Wear and mechanical properties of novel $(\text{CuCrFeTiZn})_{100-x}\text{Pb}_x$ high entropy alloy composite via mechanical alloying and spark plasma sintering[J]. *Wear*, 2018, 410-411: 93-109.
- [23] ZHOU R, CHEN G, LIU B, et al. Microstructures and wear behaviour of $(\text{FeCoCrNi})_{1-x}(\text{WC})_x$ high entropy alloy composites[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2018, 75: 56-62.
- [24] YANG S F, ZHANG Y, YAN X, et al. Deformation twins and interface characteristics of nano- Al_2O_3 reinforced $\text{Al}_{0.4}\text{FeCrCo}_{1.5}\text{Ni-Ti}_{0.3}$ high entropy alloy composites[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2018, 210: 240-244.
- [25] CHENG H, CHEN W, LIU X Q, et al. Effect of Ti and C additions on the microstructure and mechanical properties of the Fe-CoCrNiMn high-entropy alloy[J]. *Materials Science and Engineering*, 2018, A719: 192-198.
- [26] TANG D W, LIU X S, XIAO W W. Influences of W contents on microstructures, mechanical properties and the shielding performance for neutrons and γ -rays of Fe-W-C alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 827: 153 932.
- [27] KHRUSCHOV M M. Principles of abrasive wear[J]. *Wear*, 1974, 28(1): 69-88.
- [28] MIAO J W, GUO T M, REN J F, et al. Optimization of mechanical and tribological properties of FCC CrCoNi multi-principal element alloy with Mo addition[J]. *Vacuum*, 2018, 149: 324-330.

(编辑: 刘晨辉)