

铬铁原矿粉激光制备高熵合金复合涂层的组织与性能

李刚, 张井波, 刘圻, 宋艳东, 郭玉洁, 付晓帆

(辽宁工程技术大学 材料科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: **目的** 用铬铁原矿粉快速直接制备高熵合金复合涂层, 研究其组织结构及性能, 提高基体表面硬度和耐磨性。**方法** 采用激光熔覆技术在 40Cr 钢表面制备高熵合金复合涂层, 运用金相显微镜 (OM)、扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线衍射仪 (XRD) 及硬度计、磨粒磨损机, 分析高熵合金复合涂层不同深度的显微组织、物相结构及力学性能。**结果** 高熵合金复合涂层与基体结合良好, 物相结构为简单 BCC 结构的过饱和固溶体, 显微组织为典型胞状和树枝晶组织, 且原位自生形成的细小碳化物颗粒强化相弥散分布于基体。深度为 0.1 mm 时, 复合涂层的显微组织形貌最细小, 且存在一定程度的成分偏析。复合涂层显微硬度平均为 6.48 GPa, 为基材 40Cr 钢的 2 倍以上。高熵合金复合涂层不同深度的磨损率均低于基体的磨损率, 且随着深度的增加, 磨损率逐渐升高, 当深度为 0.1 mm 时, 磨损率最低, 为 0.17 mg/mm², 耐磨性最好。**结论** 以铬铁原矿粉为掺杂组元, 采用激光熔覆技术成功制备出掺杂原位自生颗粒强化相的高熵合金复合涂层, 显著提高了基体表面硬度和耐磨性。

关键词: 激光熔覆; 高熵合金; 铬铁原矿粉; 复合涂层; 显微组织; 耐磨性

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)03-0228-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.03.031

Microstructure and Properties of High Entropy Alloy Composite Coating Prepared by Laser with Raw Chromite Powder

LI Gang, ZHANG Jing-bo, LIU Jian, SONG Yan-dong, GUO Yu-jie, FU Xiao-fan

(School of Material Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare high entropy alloy composite coating with the raw chromite powder quickly so as to improve surface hardness and wear resistance by studying the microstructure and properties. The high entropy alloy composite coatings were prepared on the surface of 40Cr steel by laser cladding. The microstructure, phase structure and mechanical properties of high entropy alloy composite coatings at different depths were studied by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), X-ray diffraction (XRD), hardness tester and abrasive wear machine. The high entropy alloy composite coating had good bonding morphology with the substrate, the phase was simple supersaturated solid solution with BCC structure. The microstructure was a typical cellular and dendrite structure, and the fine carbide particles formed in situ were dispersed on the substrate. When the depth was 0.1 mm, the microstructure of the composite coating was the smallest, where a certain degree of segregation happened. The average microhardness of the composite coating was about 6.48 GPa, which was more than 2

收稿日期: 2018-10-12; 修订日期: 2018-12-20

Received: 2018-10-12; Revised: 2018-12-20

作者简介: 李刚 (1969—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为载能束材料表面改性及激光引燃制备复合材料。邮箱: stars2387@vip.sina.com

Biography: LI Gang (1969—), Male, Professor, Doctoral supervisor, Research focus: surface modification of energy beam material and preparation of composite materials by laser ignition. E-mail: stars2387@vip.sina.com

times of the 40Cr steel substrate. The wear rate of the high entropy alloy composite coating was lower than that of the substrate, and with the depth increasing, the wear rate increased gradually. When the depth was 0.1 mm, the wear rate of 0.17 mg/mm² was the smallest, which indicated wear resistance was the best. The high entropy alloy composite coating with in-situ particle reinforced phase is successfully prepared by laser cladding technology with the raw chromite powder as the doping component. The hardness and wear resistance of the substrate surface are greatly improved.

KEY WORDS: laser cladding; high entropy alloys; raw chromite powder; composite coating; microstructure; wear resistance

铬铁原矿粉需要经过复杂的工艺加工过程才能被应用，其产品存在精度差、有效利用率低、生产成本高等问题^[1,2]。学者们对加强铬铁矿可持续开发利用开展了诸多工作，如研究铬铁矿资源的预处理工艺，对矿产品进行深加工，提高其附加值等。中南大学王晨亮^[3]等人对云南某低品矿采用分级—脱泥—高梯度强磁选—摇床重选等，最终实现该铬铁矿资源的高效回收，并获得 Cr₂O₃ 品位为 45.3% 的铬精矿。俄罗斯学者 Nikiforova 等^[4]将铁矿石加工废料应用到制备陶瓷材料中。这些研究应用领域能实现铬铁矿资源的高效回收应用，但都存在制备工序复杂、能耗高、科技附加值低且污染严重等缺点^[5,6]，而将铬铁原矿粉直接用于制备复合材料的研究较少。因此，选用天然铬铁原矿粉直接快速制备复合材料的研究，不仅能拓宽矿物加工应用领域，减少原矿需要粗选、筛分、球磨、冶炼等繁杂环节，而且具有高效节能的重要意义。

铬铁原矿粉中元素组成与高熵合金^[7-9]成分有着较高的相似性，铬铁矿化学通式为 (Mg, Fe)O(Cr, Al, Fe)₂O₃，5 种基本组分三氧化二铬、氧化铝、三氧化二铁、氧化铁和氧化镁存在类质同象置换^[10,11]，即多组元和原子数分数大于 5%^[12-14]。目前制备高熵合金所用粉末材料主要为纯金属粉末^[15-17]，但有些单质在高温熔池中易氧化烧损^[18,19]，且主要添加元素 (Ni、Cr、Co 等) 价格昂贵^[20,21]，难以满足工业生产需要。此外，由于高熵合金具有单相固溶体结构，因此存在抗硬质磨粒磨损性能不足的问题^[22]。

Munitz. A^[23]等分析了热处理对 AlCoCrFeNi 高熵

合金的影响，结果表明热处理虽然没有改变合金树枝状形貌，但高熵合金发生了相变，在 650~975 ℃ 之间热处理会导致树枝状间的 BCC 结构向 σ 相转变，使得耐磨性有所提高。中国矿业大学研究组^[24]对 Al_xCoC_xCuFeNi 的粘着磨损行为进行了研究，发现随着 Al 含量的增加，BCC 相数量增加，提高硬度的同时降低了合金的磨损系数；在磨损过程中产生的氧化膜，有助于提高合金的耐磨性能。因此，可以采用铬铁原矿粉直接制备高熵合金，利用铝热还原反应将铬铁原矿粉中的金属元素还原出来，作为高熵合金的组分，其中的 C 元素可以合成原位自生硬质碳化物颗粒相，提高硬度和耐磨性；还具有避免单质元素氧化烧损，降低生产成本，减少环境污染等优势。目前国内还没有利用铬铁原矿粉末直接制备高熵激光熔覆涂层的先例。

本文利用具有极高温度梯度的高能激光束，以铬铁原矿粉作为掺杂组元，在 40Cr 钢表面制备高熵合金复合涂层，分析高熵合金复合涂层不同深度的显微组织形貌、物相结构及力学性能。

1 实验

1.1 实验材料

基体试样为 40Cr 钢，尺寸 30 mm×40 mm×10 mm，基材经磨平、磨光、抛光、清洗、干燥后备用。熔覆材料为铬铁原矿粉和 Fe30A 粉末，质量比为 30:70。实验所用材料成分含量见表 1。

表 1 实验材料及其成分含量
Tab.1 Experimental powder material and composition content

Materials		Powder composition	wt%
Raw chromite powder	Cr ₂ O ₃ 24.36%, MgO 18.87%, Fe ₂ O ₃ 18.74%, Al ₂ O ₃ 12.32%, SiO ₂ 1.05%, CaO 2.30%, TiO ₂ 1.05%		
Fe30A	Ni 32.0%~39.0%, Cr 12.0%~14.0%, B 2.0%~3.0%, Si 1.2%~2.0%, C 0.5%~0.7%, Fe Bal.		
40Cr	Fe Bal., Ni≤0.03%, Cr 0.8%~1.1%, Si 0.17%~0.37%, C 0.37%~0.40%, Mn 0.5%~0.8%, S≤0.0035%, P≤0.0035%, Cu≤0.003%		

根据 Boltzmann 假设，体系的混合熵 ΔS_{mix} 可表示为^[16]：

$$\Delta S_{\text{mix}} = -R[X_1 \ln X_1 + X_2 \ln X_2 + \cdots + X_n \ln X_n] = -R \sum_{i=1}^n X_i \ln X_i$$

(1)

式 (1) 中，R 为气体常数，X_i 为 i 组元的摩尔比，根据式 (1) 可以计算出熔覆层在不同稀释率下的混合熵。激光熔覆稀释率一般比较小^[20]，当稀释率为 5% 时，涂层的混合熵 ΔS_{mix} = 1.95R，在高熵合金的混合熵范围内，即以铬铁原矿粉作为掺杂组元，可以在

40Cr 钢表面制备出高熵合金复合涂层。

1.2 实验设备及方法

采用 RofinDC050 型激光加工机在 40Cr 钢基体上进行单道熔覆, 预置粉末厚度为 1.0 mm, 功率为 2700 W, 扫描速度为 5 mm/s, 光斑为 10 mm×2 mm 的宽带矩形光斑。

在 XRD-6100 型 X 射线衍射仪上进行物相结构分析及组织表征, Cu 靶为 X 射线源, 扫描角度为 20°~90°, 扫描速度 10 (°)/min。采用剥层法对高熵合金复合涂层进行不同深度相结构分析, 利用 800~2000# 砂纸逐级打磨试样熔覆层表面, 此剥层方式对试样的残余应力影响很小, 剥层深度分别为 0.1、0.3、0.5、0.7 mm, 采用千分尺测量样品的剥层深度。

采用 JSM-7500F 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察高熵合金复合涂层截面的组织形貌, 并使用能谱仪 (EDS) 分析高熵合金复合涂层的微区成分。

在 Axiovert 40 MAT 型倒置显微镜下, 观察高熵合金复合涂层不同深度的显微组织。

在 HV-1000Z 自动转塔显微硬度计上沿层深方向测试截面显微硬度分布, 距离涂层表面 0.1 mm 处开始测试, 测试间距为 0.1 mm, 其中, 载荷为 0.5 kg, 保载时间为 10 s。

在 ML-100 型磨粒磨损机上测试高熵合金复合涂层不同深度的耐磨性, 载荷为 70 N, 磨损时间 5 min, 实验所用砂纸为 360#, 用单位面积失重表征耐磨性, 并根据公式 (2) 计算涂层不同深度的磨损率。

$$\omega = \frac{m_0 - m}{S} \quad (2)$$

式 (2) 中: ω 为磨损率, mg/mm²; m 为磨损后质量, mg; m_0 为磨损前质量, mg; S 为磨损面积, mm²。

2 结果与分析

2.1 XRD 衍射分析

图 1a 为激光制备高熵合金复合涂层不同深度的 X 射线衍射图谱。由图 1a 可知, 高熵合金复合涂层在不同深度处均未出现明显的金属间化合物, 但具有相似的过饱和 BCC 简单固溶体结构, 衍射峰 2θ 位置与典型 BCC 结构 α -Fe 的衍射峰位置非常接近, 3 个衍射峰大约在 2θ 分别为 44.5°、64.5°和 82.0°的位置。当深度为 0.3 mm 和 0.5 mm 时, 衍射角 $2\theta=28.9^\circ$ 的位置出现了衍射峰, 表明固溶体为有序 BCC 固溶体, 这是由高熵合金中原子半径差异较大的固溶元素占据了固溶体点阵的固定位置所形成。

图 1b 为高熵合金复合涂层不同深度的 X 射线衍射图谱在 2θ 为 42°~47°的放大图。由图 1b 可以看出, 在 0.1 mm~0.5 mm 范围内, 随着深度的增加, (110)

衍射峰向左偏移, 根据布拉格公式 $2d_{hkl} \sin \theta = \lambda$, 2θ 角向较低方向偏移, 即 θ 变小, 晶面间距 d 变大。究其原因在于高熵合金中原子半径较大的固溶元素固溶到固溶体中, 使其发生晶格畸变, 且晶面间距 d 变大, 从而起到固溶强化作用。而深度为 0.7 mm 时的 (110) 衍射峰比 0.5 mm 时的衍射峰向右偏移, 此处接近结合区, 晶格畸变比深度为 0.3 mm 和 0.5 mm 时程度小。

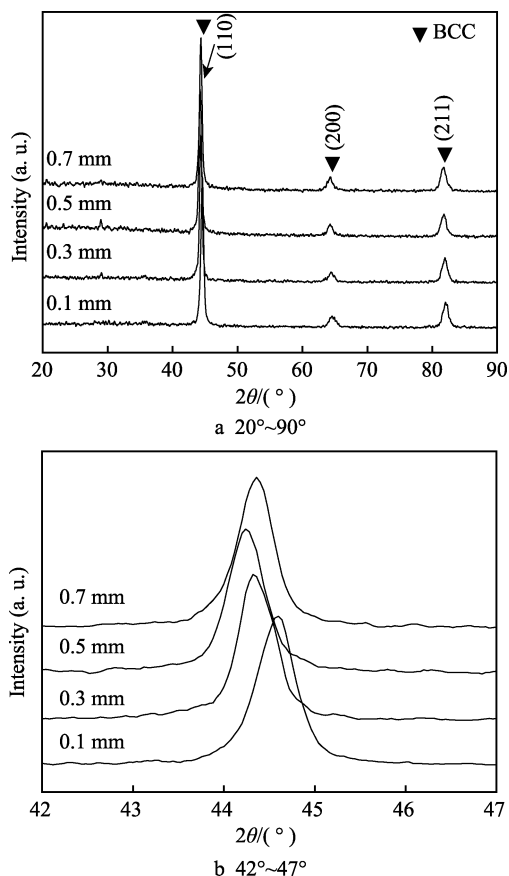


图 1 高熵合金复合涂层不同深度的 X 射线衍射图谱
Fig.1 XRD patterns of high entropy alloy composite coatings at different depths

2.2 显微组织形貌

图 2 是激光制备高熵合金复合涂层的截面形貌, a、b、c、d 区分别表示距离熔覆涂层表面 0.1、0.3、0.5、0.7 mm, 由表及里依次为熔覆层区、结合区和基体热影响区。由图 2 可知, 高熵合金复合涂层组织致密, 无气孔、裂纹等缺陷, 且涂层与基体结合良好, 为冶金结合。

图 3 为高熵合金复合涂层不同深度处的显微组织形貌。由图 3 可知, 高熵合金复合涂层显微组织为典型胞状晶和树枝晶, 且在胞状晶内部包裹细小颗粒相。深度为 0.1 mm 时 (图 3a), 复合涂层的显微组织细小, 根据凝固理论, 激光熔覆层表面温度梯度大, 树枝晶沿每个方向的生长速率相近, 从而晶粒很细

小。深度为 0.3 mm 时（图 3b），此区域无明显的散热方向，形核后的晶粒趋向自由生长，形成如图所示的胞状晶，胞状晶内部包裹着细小的颗粒相，它们与位错交互作用，阻碍位错运动，从而形成第二相强化。深度为 0.7 mm 时（图 3c），激光熔覆过程中，熔池结晶首先是在基体熔化后的液固界面非自发形核，即从此处开始凝固，凝固速率很小，熔池通过基体进行散热，温度梯度大，所以温度梯度和凝固速率比值很高，因此此处易形成平面晶，且有明显的晶界。原因是硼等元素在晶界偏聚造成局部合金化，显著地改变了晶界状态，减少了元素在晶界上的扩散过程，强化了晶界，有效改善了涂层的综合性能。

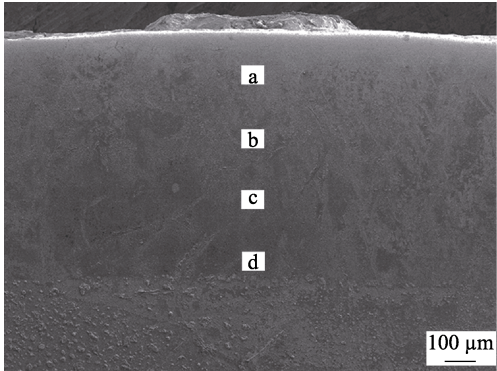


图 2 高熵合金复合涂层的截面形貌
Fig.2 Cross section morphology of high entropy alloy composite coating

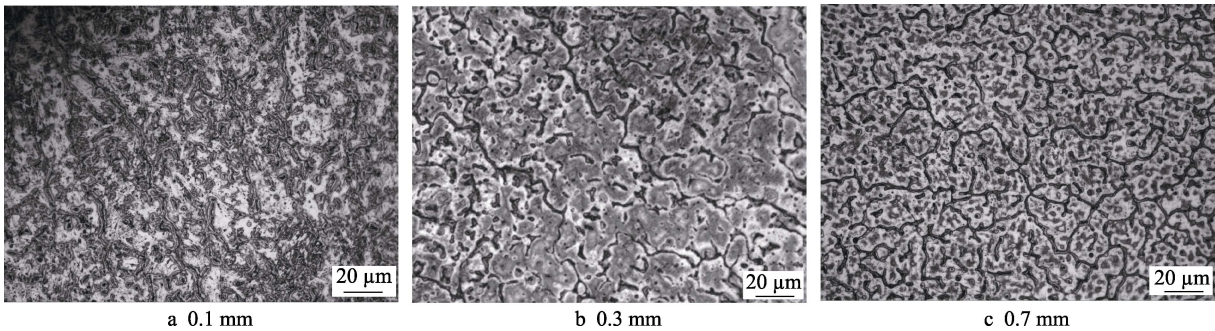


图 3 高熵合金复合涂层不同深度的显微组织形貌
Fig.3 Microstructure of high entropy alloy composite coatings at different depths

图 4 给出了高熵合金复合涂层深度为 0.1 mm 时横截面的 SEM 图，并对不同状态高熵合金复合涂层的显微组织进行 EDS 分析，结果如表 2 所示。由表 2 可以看出，复合涂层中存在一定程度的成分偏析，A 点碳元素富集，形成细小的硬质碳化物颗粒相，在激光熔覆过程中，铬铁原矿粉中的 Fe、Cr 元素被还原出来，与碳元素原位自生碳化物颗粒相，形成第二相强化作用，有效提高综合性能。B、C 点 Fe、Cr 元素富集，B、C 两点元素含量差别较小，存在较小程度的元素偏析。由此可以推断，元素偏析程度的变化，即原子扩散，引起了显微组织形貌的变化。根据 Gibbs 自由能定律（式 3）可以看出，激光熔覆过程中，混合熵越高，系统的自由能越低，高的混合熵可显著降低系统的自由能，从而有利于形成稳定的固溶体。

$$G_{\text{mix}}=H_{\text{mix}}-TS_{\text{mix}} \tag{3}$$

式（3）中， G_{mix} 为自由能， H_{mix} 为混合焓， S_{mix} 为混合熵， T 是热力学温度。

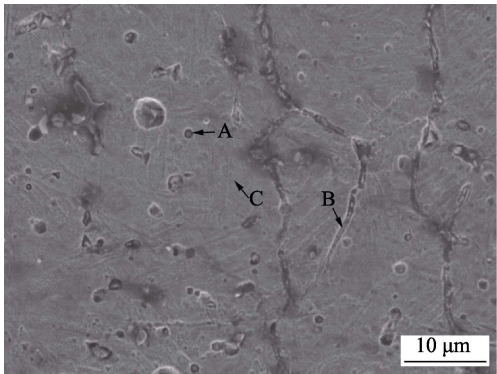


图 4 高熵合金复合涂层深度为 0.1 mm 时的 SEM 图
Fig.4 SEM diagram of high entropy alloy composite coating with a depth of 0.1 mm

表 2 能谱分析结果
Tab.2 Energy spectrum analysis results

Spot	at%									
	Al	Fe	Cr	Ni	Mg	Ca	Ti	Si	O	C
A	0.24	59.04	8.60	0.41	0.02	0.10	0.02	0.69	—	30.88
B	0.01	61.06	8.47	0.25	—	0.06	—	0.45	5.69	24.02
C	0.02	62.74	8.63	0.25	—	—	0.06	0.55	5.64	22.11

2.3 硬度测试

图5是高熵合金复合涂层截面显微硬度分布曲线。由图5可知,高熵合金复合涂层截面显微硬度呈三段分布,分别为涂层区、热影响区和基体区。涂层区显微硬度值明显高于基体区显微硬度值,熔覆层显微硬度平均约为6.48 GPa,为40Cr基体(3.22 GPa)的2倍以上。涂层硬度高的主要原因是,添加到涂层中的铬铁原矿粉中的大原子Al和小原子C、Si不仅使固溶体具有大的晶格畸变,阻碍了位错运动,导致固溶强化增强,并且小原子C、Si可部分作为间隙原子存在于固溶体内,从而进一步增加了晶体点阵的致密度。此外,激光熔覆的快速凝固可以进一步提高固溶体在涂层中的固溶度极限,提高固溶强化效果;再加上有细小硬质碳化物颗粒相弥散分布于基体,对位错起钉扎作用,导致位错运动被阻止,滑移难以进行,从而增加了涂层的强度和硬度。激光熔覆过程中的快速凝固可获得细小晶粒组织,产生细晶强化作用。在界面结合处,硬度值发生陡降;而在热影响区,其组织为细小马氏体组织,显微硬度值平均约为6.80 GPa,高于熔覆层区显微硬度值;随着层深增加,其组织由马氏体组织向回火索氏体组织转变,硬度值降低。

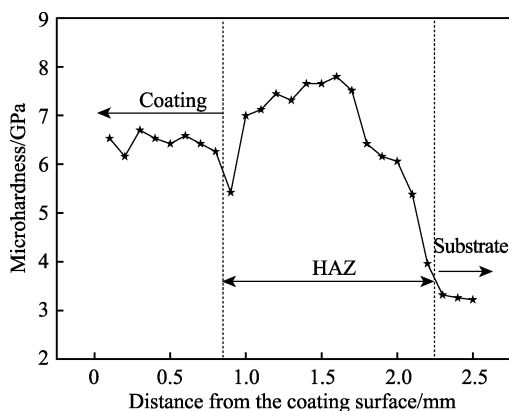


图5 高熵合金复合涂层截面显微硬度分布曲线
Fig.5 Microhardness distribution curve of high entropy alloy composite coating

2.4 耐磨性测试

图6为高熵合金复合涂层不同深度的磨损率。由图可知,基体的磨损率最高,为 0.51 mg/mm^2 ,高熵合金复合涂层的磨损率均低于基体的磨损率。这是因为涂层显微组织中存在的细小硬质碳化物颗粒相形成第二相强化,在磨损过程中起承载作用,不易被磨粒犁削,从而减少基体磨损,显著提高涂层耐磨性能。随着深度的增加,磨损率逐渐升高,涂层耐磨性越来越差,深度为0.1 mm时,磨损率最低,为 0.17 mg/mm^2 ,为基体40Cr钢的1/3,耐磨性最好。结合X射线衍射图及显微硬度分析可知,深度为0.1 mm

时,复合涂层的显微组织形貌最细小。晶粒越细,晶界面积越大,受到的外力可分散到更多的晶粒内,从而提高涂层的磨损性能。

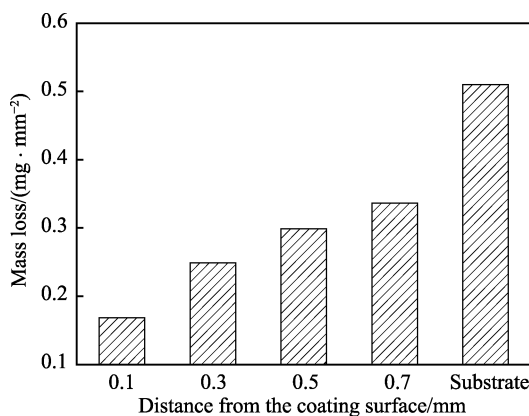


图6 高熵合金复合涂层的磨损率
Fig.6 Wear rate of high entropy alloy composite coating

3 结论

1)高熵合金复合涂层物相结构为简单BCC结构固溶体。复合涂层组织致密,无气孔、裂纹等缺陷,且涂层与基体为冶金结合,显微组织为胞状树枝晶组织,且涂层内部弥散分布着原位自生的细小硬质碳化物颗粒相。涂层中存在一定程度的元素偏析,从而引起显微组织形貌的变化。深度为0.1 mm时,复合涂层的显微组织形貌最细小。

2)激光熔覆高熵合金复合涂层的显微硬度均高于基体40Cr钢的显微硬度,平均显微硬度约为6.48 GPa,为基体40Cr钢的2倍以上。涂层磨损率均低于基体的磨损率,且随着深度增加,磨损率逐渐升高,距涂层表面0.1 mm处,磨损率最低,为 0.17 mg/mm^2 ,是基体40Cr钢的1/3,耐磨性最好。

参考文献:

- [1] KOLELI N, DEMIR A. Environmental materials and waste[M]. CA: Academic Press, 2016: 245-263.
- [2] SIBANDA V, KOPONG R, NDLOVU S, et al. Ball milling of high carbon ferrochrome slag to liberate the alloy for gravity concentration[J]. International journal of mineral processing, 2016, 157: 46-54.
- [3] 王晨亮, 邹坚坚, 胡真, 等. 云南某低品位铬铁矿石选矿工艺研究[J]. 金属矿山, 2016, V45(2): 72-76.
WANG Chen-liang, ZOU Jian-jian, HU Zhen, et al. Research of beneficiation process of a low-grade chromite ore of Yunnan province[J]. Metal mine, 2016, V45(2): 72-76.
- [4] NIKIFOROVA E M, EROMASOV R G, VASILYEVA M N, et al. Iron ores processing waste materials utilization in

- soft-mud molding ceramic bricks production[J]. *Obogashchenie rud*, 2016, 4: 61-66.
- [5] SCHEUNIS L, CAMPFORTS M, JONES P T, et al. Spinel saturation of a PbO based slag as a method to mitigate the chemical degradation of magnesia-chromite bricks[J]. *Journal of the european ceramic society*, 2016, 36(16): 4291-4299.
- [6] PARIRENYATWA S, ESCUDERO-CASTEJON L, SANCHEZ-SEGADO S, et al. Comparative study of alkali roasting and leaching of chromite ores and titaniferous minerals[J]. *Hydrometallurgy*, 2016, 165: 213-226.
- [7] 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.
- [8] 黄元盛, 蔡铭洪, 叶均蔚. AlCoCrCu_{0.5}NiFe 高熵合金氧化物薄膜光学特性的研究[J]. *表面技术*, 2016(2): 129-133.
- HUANG Yuan-sheng, CAI Ming-hong, YE Jun-wei. Optical properties of sputtered oxide films of AlCoCrCu_{0.5}NiFe high-entropy alloy[J]. *Surface technology*, 2016(2): 129-133.
- [9] OTTO F, DLOUHÝ A, PRADEEP K G, et al. Decomposition of the single-phase high-entropy alloy CrMnFeCoNi after prolonged anneals at intermediate temperatures[J]. *Acta materialia*, 2016, 112: 40-52.
- [10] 高峰, 吴尧鹏, 刘军, 等. 铬铁矿掺杂对压裂支撑剂结构与性能的影响[J]. *无机材料学报*, 2013, 28(9): 1019-1024.
- GAO Feng, WU Yao-peng, LIU Jun, et al. Effects of chromite additive on the microstructure and performance of bauxite-based fracturing proppant[J]. *Journal of inorganic materials*, 2013, 28(9): 1019-1024.
- [11] MERKLE R K W, SUNDER R P V, LOUBSER M. XRF analysis of chromite-rich samples-another look at powder briquettes[J]. *X-ray spectrometry*, 2010, 37(3): 273-279.
- [12] ZHANG Y, ZUO T T, CHENG Y Q, et al. High-entropy alloys with high saturation magnetization, electrical resistivity, and malleability[J]. *Scientific reports*, 2013, 3: 1455.
- [13] TSAO T K, YE H A C, KUO C M, et al. High temperature oxidation and corrosion properties of high entropy superalloys[J]. *Entropy*, 2016, 18(2): 62.
- [14] YE Y X, LIU C Z, WANG H, et al. Friction and wear behavior of a single-phase equiatomic TiZrHfNb high-entropy alloy studied using a nanoscratch technique[J]. *Acta materialia*, 2018, 147: 78-89.
- [15] 谢红波, 刘贵仲, 郭景杰, 等. Al 元素对 Al_xFeCrCoCuV 高熵合金组织及摩擦性能的影响[J]. *材料工程*, 2016, 44(4): 65-70.
- XIE Hong-bo, LIU Gui-zhong, GUO Jing-jie, et al. Effects of Al addition on microstructure and wear properties of Al_xFeCrCoCuV high-entropy alloys[J]. *Journal of materials engineering*, 2016, 44(4): 65-70.
- [16] ZHANG Y, ZUO T T, TANG Z, et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys[J]. *Progress in materials science*, 2014, 61(8): 1-93.
- [17] SANTODONATO L J, ZHANG Y, FEYGENSON M, et al. Deviation from high-entropy configurations in the atomic distributions of a multi-principal-element alloy[J]. *Nature communications*, 2015, 6: 5964.
- [18] 张素芳, 杨潇, 张勇. Al_{0.3}CrCuFeNi₂ 高熵合金单晶材料的制备及性能[J]. *金属学报*, 2013, 49(11): 1473-1480.
- ZHANG Su-fang, YANG Xiao, ZHANG Yong. Processing and properties of Al_{0.3}CrCuFeNi₂ single crystal high-entropy alloy[J]. *Acta metallurgica sinica*, 2013, 49(11): 1473-1480.
- [19] PICKERING E J, MUNOZ-MORENO R, STONE H J, et al. Precipitation in the equiatomic high-entropy alloy CrMnFeCoNi[J]. *Scripta materialia*, 2016, 113: 106-109.
- [20] 张晖, 潘冶, 何宜柱. 激光熔敷 FeCoNiCrAl₂Si 高熵合金涂层[J]. *金属学报*, 2011, 47(8): 1075-1079.
- ZHANG Hui, PAN Ye, HE Yi-zhu. Laser cladding FeCoNiCrAl₂Si high-entropy alloy coating[J]. *Acta metallurgica sinica*, 2011, 47(8): 1075-1079.
- [21] KASHAEV N, VENTZKE V, STEPANOV N, et al. Laser beam welding of a CoCrFeNiMn-type high entropy alloy produced by self-propagating high-temperature synthesis[J]. *Intermetallics*, 2018, 96C: 63-71.
- [22] 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): 2424-2428.
- AN Xu-long, LIU Qi-bin. Effect of WC particles on microstructure and properties of high entropy alloy SiFeCoCrTi coating synthesized by laser cladding[J]. *Rare metal materials and engineering*, 2016, 45(9): 2424-2428.
- [23] MUNITZ A, SALHOV S, HAYUN S, et al. Heat treatment impacts the micro-structure and mechanical properties of AlCoCrFeNi high entropy alloy[J]. *Journal of alloys & compounds*, 2016, 683: 221-230.
- [24] 隋艳伟, 陈霄, 戚继球, 等. 多主元高熵合金的研究现状与应用展望[J]. *功能材料*, 2016, 47(5): 50-54.
- SUI Yan-wei, CHEN Xiao, QI Ji-qiu, et al. Research progress of high-entropy alloys with multi-principal elements and its prospective application[J]. *Journal of functional materials*, 2016, 47(5): 50-54.