

铬铁原矿粉掺杂制备 $\text{CrFeNiSiAl}_{0.5}$ 高熵合金涂层及其组织性能

李刚, 刘圉, 常雷明, 李立轩, 熊梓连

(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 以 40Cr 钢为基体, 制备掺杂铬铁原矿粉的 $\text{CrFeNiSiAl}_{0.5}$ 高熵合金涂层, 提高其硬度与耐磨性。方法 在 Cr、Fe、Ni、Al、Si 纯金属粉末中掺杂铬铁原矿粉, 矿粉有效原子数分数为 0%、5%、10%、15% 时, 采用激光熔覆技术, 在 40Cr 钢基体上制备 $\text{CrFeNiSiAl}_{0.5}$ 高熵合金涂层。利用 X 射线衍射仪、金相显微镜、扫描电子显微镜, 表征高熵合金涂层的物相结构及微观组织。利用硬度计、磨粒磨损机, 对涂层的硬度及耐磨性能进行表征。结果 不含铬铁原矿粉时, 高熵合金涂层为单一的 BCC 相, 铬铁原矿粉为 10% 时, 出现 FCC 相。高熵合金涂层微观组织以胞状树枝晶为主, 涂层与结合区存在明显分界, 与基体呈良好的冶金结合。不含铬铁原矿粉时, 高熵合金涂层平均硬度值为 643.5HV; 铬铁原矿粉为 15% 时, 涂层平均硬度值为 838.1HV, 是基体的 3.4 倍。磨损率随铬铁原矿粉占比的增加而降低, 铬铁原矿粉有效原子数分数为 15% 时, 磨损率约为 0.14 mg/mm^2 , 耐磨性能最好。结论 在 40Cr 钢基体上成功制备出了以铬铁原矿粉为掺杂组元的高熵合金涂层, 铬铁原矿粉的掺入, 提升了 $\text{CrFeNiSiAl}_{0.5}$ 高熵合金涂层的硬度与耐磨性。

关键词: 铬铁原矿粉; 高熵合金; 激光熔覆; 显微组织; 硬度; 耐磨性

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2021)02-0271-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.02.028

Preparation of $\text{CrFeNiSiAl}_{0.5}$ High Entropy Alloy Coating by Doping Chromite Powder and Its Microstructure and Properties

LI Gang, LIU Jian, CHANG Lei-ming, LI Li-xuan, XIONG Zi-lian

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

ABSTRACT: $\text{CrFeNiSiAl}_{0.5}$ high entropy alloy coating doped with chromite powder was prepared on 40Cr steel to improve its hardness and wear resistance. $\text{CrFeNiSiAl}_{0.5}$ high entropy alloy coating was prepared on 40Cr steel substrate by laser cladding technology when Cr, Fe, Ni, Al and Si pure metal powders were doped with chromite powder and the effective atomic number fraction of ore powder was 0%, 5%, 10% and 15%. The phase structure and microstructure of high entropy alloy coating were

收稿日期: 2019-09-22; 修订日期: 2020-05-07

Received: 2019-09-22; Revised: 2020-05-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51805235); 营口理工学院创新团队支持计划资助 (TD202001); 营口理工学院高层次人才科研启动项目资助 (YJRC202014)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51805235), Program for Innovative Research Team in Yingkou Institute of Technology (TD202001); High-level Talents Research Project of Yingkou Institute of Technology (YJRC202014)

作者简介: 李刚 (1969—), 男, 博士, 教授, 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, Doctor, Professor, Research focus: surface modification of energy beam material and preparation of composite materials by laser ignition. E-mail: stars2387@vip.sina.com

引文格式: 李刚, 刘圉, 常雷明, 等. 铬铁原矿粉掺杂制备 $\text{CrFeNiSiAl}_{0.5}$ 高熵合金涂层及其组织性能[J]. 表面技术, 2021, 50(2): 271-276.

LI Gang, LIU Jian, CHANG Lei-ming, et al. Preparation of $\text{CrFeNiSiAl}_{0.5}$ high entropy alloy coating by doping chromite powder and its microstructure and properties[J]. Surface technology, 2021, 50(2): 271-276.

characterized by X-ray diffractometer, metallographic microscope and scanning electron microscope. The hardness and wear resistance of the coating were characterized by hardness tester and abrasive wear machine. The results show that the high-entropy alloy coating is a single BCC phase without the chromite powder, and the FCC phase occurs when the content of the chromite powder is 10%. The micro-structure of the high-entropy alloy coating is mainly in the form of a cell-like dendritic crystal, and the coating and the bonding area have obvious boundary, and the high-entropy alloy coating micro-structure is in good metallurgical bonding with the matrix. The average hardness value of the high-entropy alloy coating is 643.5HV when no chromite powder is contained. And the content of the chromite powder is 15%, the average hardness of the coating is 838.1HV, which is 3.4 times of the matrix, and the wear rate is reduced with the increase of the content of the chromite powder, and the wear rate is about 0.14 mg/mm² when the content of the chromite powder is 15%, the wear resistance is the best. High entropy alloy coating with chromite powder as doping component was successfully prepared on 40Cr steel substrate. The hardness and wear resistance of CrFeNiSiAl_{0.5} high entropy alloy coating were improved by adding chromite powder.

KEY WORDS: chromite powder; high entropy alloy; laser cladding; microstructure; hardness; wear resistance

铬铁矿是我国的战略性稀缺矿种^[1], 铬铁矿石开采后, 经粗选、球磨、冶炼等工序, 可作为制备高性能不锈钢、耐热钢及合金的原材料^[2], 但也存在成本高、工序复杂、利用率低等缺点^[3-4]。高熵合金^[5]因其结构的特殊性, 不仅具有较高的强度与良好的耐磨性^[6-7], 且拥有高加工硬化、高电阻率^[8-9]、耐腐蚀性及抗高温性能^[10-11]。目前, 纯多组元高熵合金的制备多采用熔覆^[12]、真空熔炼^[13]、磁控溅射^[14]或机械合金化^[15]等方法。翁子清^[16]等采用激光熔覆技术在 45# 钢基体上制备了表面形貌良好的 FeCrNiCoMn 高熵合金涂层, 研究了高熵合金涂层的抗高温软化性能。洪丽华^[17]等利用真空电弧熔炼炉制备了 Al_{0.5}CoCrFeNi 高熵合金, 研究了其抗高温腐蚀性能。Liu^[18]等采用直流磁控溅射法, 制备了 FeCoNiCuVZrAl 高熵合金多组分非晶氮化物薄膜。Rogal 等^[19]利用机械合金化法制备了 AlCoCrFe 和 AlCoCrFeNi 系的四种不同组成的高熵合金复合材料, 但该方法制备出的粉末需再加工才可应用, 存在高耗能、低产值^[20-21]、污染严重^[22]等缺点。利用激光熔覆技术, 采用铬铁原矿粉直接、快速、短流程加工制备高熵合金复合材料涂层, 对矿物资源的快速、高附加值利用具有重大意义。

本文在纯金属粉末 Cr、Fe、Ni、Al、Si 中, 加入一定量的铬铁原矿粉, 采用激光熔覆法制备了 CrFeNiSiAl_{0.5} 高熵合金涂层, 并对涂层进行组织性能表征, 拟为后续全组元铬铁原矿粉激光熔覆制备高熵合金涂层做先期理论准备和技术初探。

1 试验

1.1 试验材料

以 40Cr 钢为基体, 尺寸为 30 mm×20 mm×10 mm, 经金相制备、抛光、清洗、干燥后, 备用。粉末材料为球磨后的铬铁原矿粉及 Cr、Fe、Ni、Al、Si 纯金属粉, 粉末粒度均为 200 目, 合金元素在室温下的晶体学参数见表 1。铬铁原矿粉中的金属元素以氧化物

形式存在, 通过铝热反应将其置换出, 作为纯金属粉末的有效成分参与反应, 故配制粉末时, 将铬铁原矿粉中氧化物换算成纯金属, 并按有效原子比 0:100、5:95、10:90、15:85 配制粉末材料, 铬铁原矿粉成分含量见表 2。

表 1 合金元素在室温下的晶体学参数
Tab.1 Crystallographic parameters of alloying elements at room temperature

Element	Atomic weight/(at.%)	Atomic radius/(×10 ⁻¹ nm)	V_{EC}	Electronegativity
Al	26.98	1.43	13	1.61
Cr	52.00	1.28	6	1.66
Fe	55.85	1.27	8	1.83
Ni	58.69	1.24	10	1.91
Si	28.08	1.34	14	1.90

表 2 铬铁原矿粉成分含量
Tab.2 The elementary content of chromite powder wt. %

TiO ₂	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Cr ₂ O ₃
1.1	1.1	2.3	12.3	18.8	18.9	24.4

1.2 试验设备及方法

在 40Cr 钢基体表面使用 RofinDC050 型激光加工机进行激光熔覆, 将粉末置于基体上, 粉末层宽度 1cm、厚度 1 mm, 激光扫描速度 300 mm/min, 功率 3100 W, 光斑为大小 10 mm×2 mm 的矩形光斑。采用 XRD-6100 型 X 射线衍射仪对高熵合金涂层进行物相分析, 扫描角度为 20°~100°, 扫描速度为 10 (°)/min。利用 Axiovert40MAT 型金相显微镜观察高熵合金涂层截面组织形貌。使用 JSM-7500F 型扫描电子显微镜 (SEM) 及能谱仪 (EDS) 观察与分析高熵合金涂层截面组织形貌和高熵合金涂层微区成分。在涂层截面边缘处, 利用 HV-1000Z 自动转塔显微硬度计测试硬度, 每两个测试点间距为 0.1 mm, 硬度计载荷 0.5 kg, 保载时间 10 s。采用 ML-100 型磨粒磨损机对高熵合

金涂层进行磨损测试, 选用 360 目砂纸, 加载载荷 70 N, 磨损有效时间 5 min, 测试单位面积失重, 以此表征耐磨性, 根据公式(1)计算涂层表面磨损率。同时, 利用 OLS4000 型激光共聚焦显微镜观察涂层磨损后的形貌。

$$\omega = \frac{m_1 - m_2}{S}$$

(1)

式中: m_1 为磨损前质量; m_2 为磨损后质量; S 为磨损面积; ω 为磨损率。

2 结果与分析

2.1 XRD 衍射分析

图 1 为 CrFeNiSiAl_{0.5} 高熵合金涂层 XRD 分析图谱。由图 1 可知, 铬铁原矿粉含量低时, 高熵合金涂层以 BCC 相为主, 当铬铁原矿粉含量增加时, 出现 FCC 相。随着铬铁原矿粉含量的增加, BCC 相和 FCC 相的含量呈现出规律性的变化, FCC 相随铬铁原矿粉含量的增加而增加, 在铬铁原矿粉有效原子数分数为 15% 时, 高熵合金涂层中同时存在 BCC 相与 FCC 相, FCC 相的峰强出现最大值, BCC 相的峰强出现最小值。这是因为, Fe、Cr、Ni 等元素均呈体心或面心立方结构, 原子半径差距小, 且 Fe、Cr、Ni 等元素在高熵合金涂层中含量的总和要高于 Al 元素, 抑制了由于 Al 元素大量存在而产生的 BCC 结构^[23], 所以随机分布在晶体点阵上的原子形成了 FCC 相。同时, 在涂层中检测出了 Al₂O₃ 氧化物相, 这是因为铬铁原矿粉中的氧化物未完全发生置换反应, 残留于涂层中。

根据表 1 中元素电负性及 Hume-rothery^[24]可知, 元素间电负性差距小有利于固溶体的生成。结合 ZHANG^[25]、GUO^[26]等人提出并完善的固溶体形成规则, 认为 22 kJ/mol< ΔH_{mix} <7 kJ/mol, 11 kJ/mol< ΔS_{mix} <19.5 kJ/mol, δ <8.5% 时, 合金中更易形成固溶体。同时当 V_{EC} <6.87 时, 易形成稳定 BCC 固溶体相; 当 $V_{\text{EC}} \geq 8$ 时, 易形成稳定 FCC 固溶体相; 当 $6.87 \leq V_{\text{EC}} < 8$ 时, 易形成双相共存的固溶体相。根据 YANG^[27]等总结的公式计算出的混合焓、混合熵、原子半径差与价电子浓度见表 3, 其中混合熵、原子半径差与价

电子浓度均在合理范围。在图 1 中发现, 不含矿粉 (0%) 时, 仅存在 BCC 相, 这与价电子判据的预期结果一致。结合 XRD 测试结果, 矿粉为 5%、10%、15% 时, 涂层的物相趋于简单化, 在检测范围内未出现大量金属间化合物的物相, 说明加入铬铁原矿粉后, 涂层因高熵效应, 抑制了金属间化合物的产生。

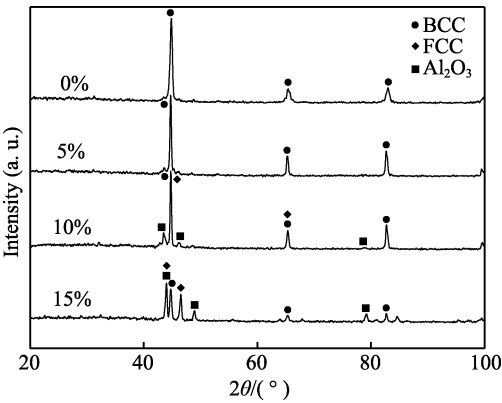


图 1 不同铬铁原矿粉含量 CrFeNiSiAl_{0.5} 高熵合金涂层 XRD 分析图谱

Fig.1 XRD curves of CrFeNiSiAl_{0.5} high entropy alloy coating with different content of chromite powder

表 3 CrFeNiSiAl_{0.5} 高熵合金涂层的 ΔH_{mix} 、 ΔS_{mix} 、 δ 和 V_{EC} 值
Tab.3 The values of ΔH_{mix} , ΔS_{mix} , δ , V_{EC} of CrFeNiSiAl_{0.5} high entropy alloy coating

$\Delta H_{\text{mix}}/(\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\Delta S_{\text{mix}}/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$\delta/\%$	V_{EC}
-30.21	13.15	4.43	6.56

2.2 显微组织分析

图 2 为不同铬铁原矿粉含量的 CrFeNiSiAl_{0.5} 高熵合金涂层形貌。由图 2a、b 可看出, 高熵合金涂层均与基体形成了良好的冶金结合, 涂层与结合区分界明显。由图 2a 可看出, 铬铁原矿粉为 0% 时, 涂层无孔洞及裂纹等缺陷, 表面存在少量团聚点。由图 2b 可看出, 铬铁原矿粉为 15% 时, 涂层表面存在团聚现象, 同时表面存在颗粒质点, 结合 XRD 分析结果与实验反应原理, 推断为铝热反应不完全所产生的未熔融氧化物颗粒。

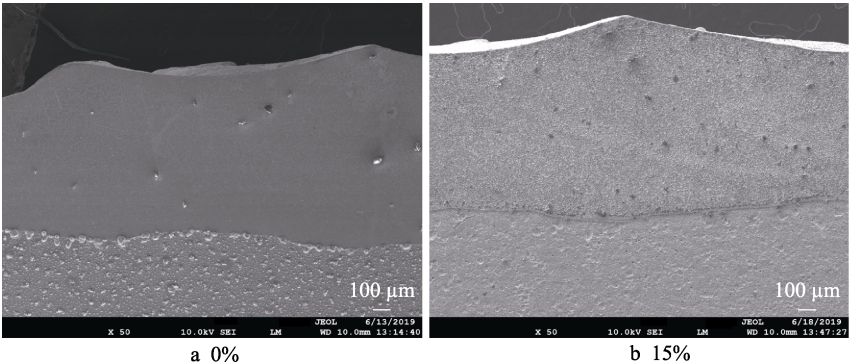


图 2 不同铬铁原矿粉含量的高熵合金涂层全貌

Fig.2 Macro-morphology of high-entropy alloy coating with different content of chromite powder

图 3 是不同铬铁原矿粉含量的 CrFeNiSiAl_{0.5} 高熵合金涂层的显微组织形貌。由图 3b 可知, 高熵合金涂层以形状不规整的胞状树枝晶为主, 亮灰色区域为枝晶组织, 暗灰色区域为枝晶晶界。对比图 3a、d 可知, 随着铬铁原矿粉有效原子比的增加, 晶粒逐渐变得细小均匀, 晶间区域变得明显。这是由于 Al 元素与其他元素存在较大的原子半径差, 合金内的混乱程

度随 Al 元素的加入而提升, 导致合金内部的原子扩散受到抑制^[27], 从而影响了晶粒的形核与生长, 致使晶粒细化。涂层在烧结过程中产生的孔洞减少, 同时有细小质点出现, 弥散分布于晶粒中, 结合 XRD 结果分析, 发现其为未完全发生置换反应所残留的氧化物。细小质点的存在, 有效抑制了位错的发生, 减少了组织中的滑移现象, 提升了高熵合金涂层的力学性能。

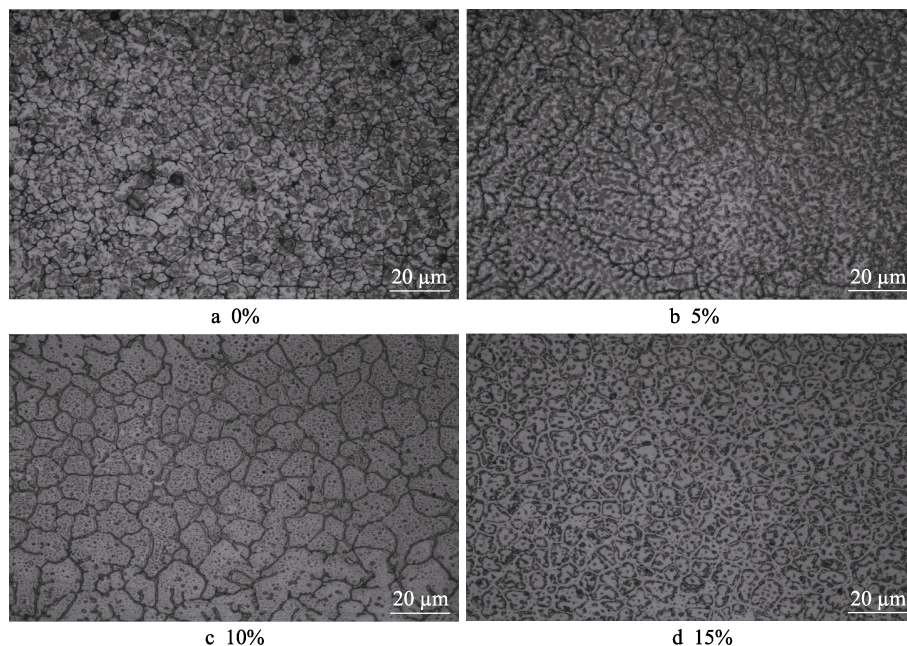


图 3 不同铬铁原矿粉含量的高熵合金涂层显微组织形貌

Fig.3 Microstructure of high-entropy alloy coating with different content of chromite powder

图 4 是铬铁原矿粉为 15% 时的高熵合金涂层截面 SEM 图。对组织晶粒内部和晶界处分别进行 EDS 分析, 结果见表 4。Fe、Cr 等元素在晶界处富集, Cr 元素在晶界处及颗粒相中的含量均比晶粒内部高, 且 Cr 元素是硬质相生成元素, 所以在晶界处会有较多的硬质相生成。B、C 两点元素含量差距小, 元素偏析程度小。由文献[29]可知, 当 ΔH_{mix} 为负值时, ΔH_{mix} 越小, 元素之间的键结合能力越强; 而 ΔH_{mix} 为正值时, ΔH_{mix} 越大, 元素的互溶性越差, 元素偏析也就越严重。由表 5 可知, Cr-Fe 之间的混合焓为 -1 kJ/mol, 这远高于其他元素之间的混合焓, 枝晶中的 Cr 元素会遭到排斥, 因此 Cr 元素在晶界处聚集, 使晶界得到强化。同时, 涂层颗粒点中 O 元素含量较高, 结合 XRD 分析, 发现组织中未反应完全的氧化物将作为强化相, 显著提高涂层性能。

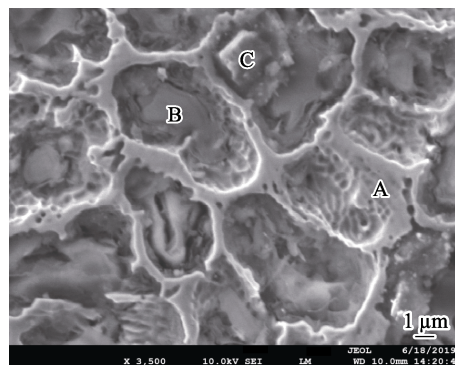


图 4 铬铁原矿粉为 15% 的高熵合金涂层截面 SEM 图
Fig.4 Microstructure of a 15% high-entropy alloy coating with a high content of chromite powder

表 5 不同元素间化学混合焓^[28]

Tab.5 Enthalpy of chemical mixing between different elements
kJ/mol

Element	Al	Fe	Cr	Ni	Si
Al		-11	-10	-22	-19
Fe	-11		-1	-2	-35
Cr	-10	-1		-7	-37
Ni	-22	-2	-7		-40
Si	-19	-35	-37	-40	

表 4 EDS 分析结果

Tab.4 Energy spectrum analysis results

Spot	Al	Fe	Cr	Ni	Si	O
A	0.71	22.71	12.02	9.74	21.90	32.92
B	0.46	14.09	7.76	6.08	11.45	23.38
C	0.55	15.31	8.44	6.37	12.42	23.31

2.3 硬度测试

图 5 是不同铬铁原矿粉含量的 $\text{CrFeNiSiAl}_{0.5}$ 高熵合金涂层截面显微硬度分布曲线。从硬度曲线可以看出, 高熵合金涂层由表面至基体的硬度呈阶梯状分布, 涂层的硬度较基体显著提高, 铬铁原矿粉有效原子比增加, 硬度值也随之提高。不含铬铁原矿粉的高熵合金涂层平均硬度为 643.5HV, 铬铁原矿粉为 15% 时, 高熵合金涂层平均硬度为 838.1HV, 基体硬度为 247.5HV。铬铁原矿粉的加入使得高熵涂层硬度提高, 是基体的 3.4 倍。由 XRD 与 EDS 分析可知, 高熵合金涂层内存在 Al_2O_3 相, 又因组织内含有大量的氧元素, Cr、Ni 等元素在晶界处富集。结合显微组织形貌分析, 形成的氧化物作为颗粒相弥散分布在涂层中, 阻碍了位错运动的发生, 极大地提升了高熵合金涂层的硬度。同时, 随着铬铁原矿粉含量的升高, 涂层中 Al 原子的数目增多, 由表 2 可知, Al 原子半径大于其余元素原子半径, 故产生的固溶强化效果显

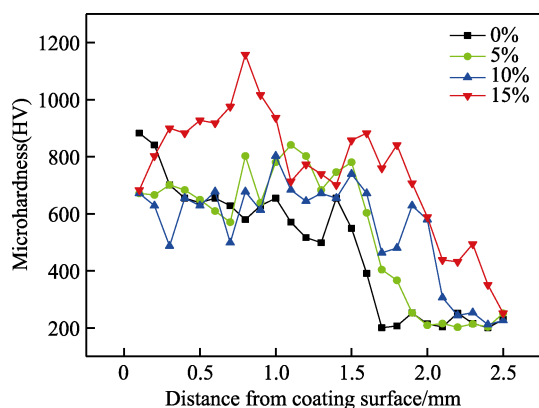


图 5 高熵合金涂层截面显微硬度分布曲线

Fig.5 Microhardness distribution curve of high entropy alloying coating

著, 使得晶粒细化, 晶间区域面积增大^[30], 这与显微组织形貌分析的结果一致。故涂层硬度提高是固溶强化效应、细晶强化效应与氧化物作为颗粒相共同作用的结果。

2.4 耐磨性测试

图 6 为不同铬铁原矿粉含量的 $\text{CrFeNiSiAl}_{0.5}$ 高熵合金涂层磨损率。由图 6 可知, 基体磨损率约为 0.5 mg/mm^2 , 随着铬铁原矿粉有效原子比的增大, 磨损率逐渐降低。可见, 高熵合金涂层的耐磨性能较基体有了明显的提高。当铬铁原矿粉为 15% 时, 磨损率约为 0.14 mg/mm^2 。

图 7 为不同铬铁原矿粉占比的 $\text{CrFeNiSiAl}_{0.5}$ 高熵合金涂层磨损后的表面形貌。可看出, 涂层表面存在明显犁沟, 铬铁原矿粉为 15% 时, 磨痕较浅。铬铁原矿粉占比低时, 组织中存在气孔等明显缺陷; 铬铁原矿粉占比高时, 高熵合金涂层组织逐渐细化, 对磨损起到了阻碍作用, 提高了合金涂层的耐磨性能。

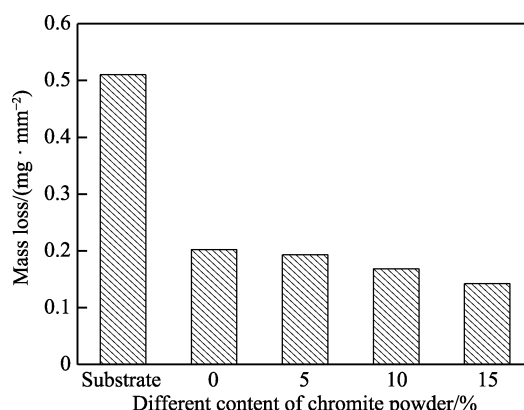


图 6 高熵合金涂层磨损率

Fig.6 The wear loss of high entropy alloying coating

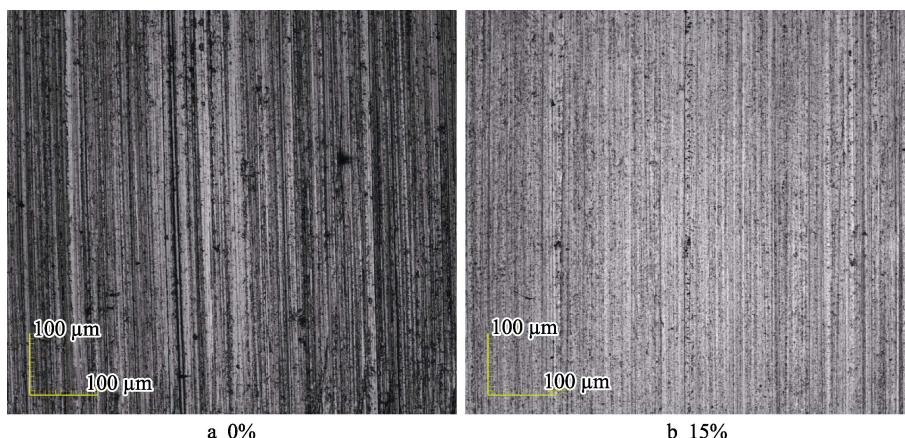


图 7 不同铬铁原矿粉含量的高熵合金涂层磨损后形貌

Fig.7 Morphology of high entropy alloy coatings with different content of chromite powder

3 结论

在 Cr、Fe、Ni、Al、Si 的纯金属粉末中, 加入

铬铁原矿粉, 采用激光熔覆技术在 40Cr 钢表面成功制备了 $\text{CrFeNiSiAl}_{0.5}$ 高熵合金涂层。利用金相显微镜、X 射线衍射仪、SEM、EDS、硬度计、磨粒磨损

机等仪器,研究铬铁原矿粉有效含量对 $\text{CrFeNiSiAl}_{0.5}$ 高熵合金涂层组织及性能的影响,得出如下结论:

1) 不含铬铁原矿粉时, $\text{CrFeNiSiAl}_{0.5}$ 高熵合金涂层的物相为单一 BCC 相。铬铁原矿粉含量提高, FCC 相随之增多, 铬铁原矿粉为 15% 时, BCC 相与 FCC 相共存。高熵合金涂层与基体呈良好的冶金结合, 随铬铁原矿粉含量的增加, 涂层孔隙等缺陷减少, 显微组织逐渐细化, 同时有硬质相均匀分布在涂层中。

2) $\text{CrFeNiSiAl}_{0.5}$ 高熵合金涂层中不含铬铁原矿粉时, 涂层平均硬度值为 643.5HV, 铬铁原矿粉为 15% 时, 高熵合金涂层平均硬度值约为 838.1HV, 是基体的 3.4 倍。磨损率随铬铁原矿粉含量的增加而降低, 铬铁原矿粉为 15% 时, 磨损率约为 0.14 mg/mm^2 , 涂层耐磨性能最好。

参考文献:

- [1] 袁小晶, 李鹏远. 中国铬资源全球布局分析[J]. 中国矿业, 2019, 28(7): 60-64.
YUAN Xiao-jing, LI Peng-yuan. Analysis of global investment of chromium resources in China[J]. China mining magazine, 2019, 28(7): 60-64.
- [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] SONG Yao, LI Jing, PENG Miao, et al. Identification of Cr (VI) speciation in ferrous sulfate-reduced chromite ore processing residue (rCOPR) and impacts of environmental factors erosion on Cr (VI) leaching[J]. Journal of hazardous materials, 2019, 373: 389-396.
- [4] 吴俊, 全学军, 李纲, 等. 铬铁矿无钙焙烧渣的 SO_2 还原解毒[J]. 化工学报, 2018, 69(4): 1678-1686.
WU Jun, QUAN Xue-jun, LI Gang, et al. Detoxification of chromium ore processing residue from roasting chromite without calcium by SO_2 reduction[J]. Journal of chemical industry and engineering, 2018, 69(4): 1678-1686.
- [5] LI Wei, FAN Hai-dong, TANG Jing, et al. Effects of alloying on deformation twinning in high entropy alloys[J]. Materials science and engineering, 2019, 763: 138143.
- [6] LI Wei, LIU Ping, LIAW P K. Microstructures and properties of high entropy alloy films and coatings: A review[J]. Materials research letters, 2018, 6(4): 199-229.
- [7] 李安敏, 史君佐, 谢明款. 高熵合金力学性能的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(3): 461-466.
LI An-min, SHI Jun-zuo, XIE Ming-kuan. Research progress on mechanical properties of high entropy alloys[J]. Materials reports, 2018, 32(3): 461-466.
- [8] 张世一, 王勇, 韩彬, 等. 激光熔覆多主元高熵合金涂层的研究进展[J]. 材料导报, 2017, 31(S1): 485-488.
ZHANG Shi-yi, WANG Yong, HAN Bin, et al. Progress in laser clad multi-principal-element high entropy alloy coatings[J]. Materials reports, 2017, 31(S1): 485-488.
- [9] 常鸿, 赵莎, 刘春海. $(\text{AlCrMoNbZr})_{1-x-y}\text{N}_y\text{O}_x$ 高熵合金涂层的制备及性能研究[J]. 功能材料, 2019, 50(4): 4174-4179.
CHANG Hong, ZHAO Sha, LIU Chun-hai. Preparation and properties of $(\text{AlCrMoNbZr})_{1-x-y}\text{N}_y\text{O}_x$ high entropy alloy coating[J]. Journal of functional materials, 2019, 50(4): 4174-4179.
- [10] PRAFULL P, SANJAY K, DHANALAKSHMI P, et al. On the high temperature coarsening kinetics of γ' precipitates in a high strength $\text{Co}_{37.6}\text{Ni}_{35.4}\text{Al}_{9.9}\text{Mo}_{4.9}\text{Cr}_{5.9}\text{Ta}_{2.8}\text{Ti}_{3.5}$ fcc-based high entropy alloy[J]. Acta materialia, 2019, 170: 62-74.
- [11] ZHAO Sha, HE Lin-xin, FAN Xiao-xia, et al. Microstructure and chloride corrosion property of nanocrystalline AlTiCrNiTa high entropy alloy coating on X80 pipeline steel[J]. Surface and coatings technology, 2019, 375: 215-220.
- [12] 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.
GAO Xu-jie, GUO Na-na, ZHU Guang-ming, et al. Research status of high entropy alloys coating prepared by laser cladding[J]. Surface technology, 2019, 48(6): 107-117.
- [13] WANG Cai-mei, YU Jian-xing, ZHANG Yu, et al. Phase evolution and solidification cracking sensibility in laser remelting treatment of the plasma-sprayed CrMnFeCoNi high entropy alloy coating[J]. Materials and design, 2019, 182: 108040.
- [14] 黄纯可, 李伟, 刘平, 等. 磁控溅射法制备 $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ 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): 6144-6148.
HUANG Chun-ke, LI Wei, LIU Ping, et al. Study on microstructure and mechanical properties of $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$ high entropy alloy thin films prepared by magnetron sputtering[J]. Journal of functional materials, 2017, 48(6): 6144-6148.
- [15] 颜建辉, 李凯玲, 汪昇, 等. 机械合金化和放电等离子烧结制备 NbMoCrTiAl 高熵合金[J]. 材料导报, 2019, 33(10): 1671-1675.
YAN Jian-hui, LI Kai-ling, WANG Yi, et al. NbMoCrTiAl high entropy alloy prepared by mechanical alloying and spark plasma sintering[J]. Materials reports, 2019, 33(10): 1671-1675.
- [16] 翁子清, 董刚, 张群莉, 等. 退火对激光熔覆 FeCrNiCoMn 高熵合金涂层组织与性能的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 65-70.
WENG Zi-qing, DONG Gang, ZHANG Qun-li, et al. Effects of annealing on microstructure and properties of FeCrNiCoMn high-entropy alloy coating prepared by laser cladding[J]. Chinese journal of lasers, 2014, 41(3): 65-70.
- [17] 洪丽华, 张华, 王乾廷, 等. $\text{Al}_{0.5}\text{CoCrFeNi}$ 高熵合金高温腐蚀行为研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(8): 56-62.
HONG Li-hua, ZHANG Hua, WANG Qian-ting, et al. High temperature corrosion behavior of $\text{Al}_{0.5}\text{FeCoCrNi}$ high entropy alloy[J]. Hot working technology, 2013, 42(8): 56-62.