

激光熔覆 CoCrFeNiSi_x 高熵合金涂层 组织及耐蚀性能研究

郝文俊¹, 孙荣禄^{1,2}, 牛伟^{1,2}, 李小龙¹, 谷米¹, 左润燕¹

(1.天津工业大学 机械工程学院, 天津 300387;

2.天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300387)

摘要:目的 研究 Si 含量对 CoCrFeNi 系高熵合金涂层组织、物相、显微硬度及耐蚀性能的影响。方法 通过激光熔覆技术在 45 钢基材上制备 CoCrFeNiSi_x (x 为物质的量之比, $x=0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$) 高熵合金涂层, 使用扫描电镜、X 射线衍射仪、显微硬度仪、电化学工作站对涂层的显微组织、物相组成、显微硬度、耐蚀性能、腐蚀形貌进行分析研究。结果 CoCrFeNi 高熵合金涂层为单一的 fcc 相, 之后随着 Si 含量的提升, 涂层向 bcc 相转变, 当 $x=2.0$ 时, 全部转化为 bcc 相。涂层的微观组织以等轴晶与枝晶为主, 当 Si 含量较少时, Si 元素主要在晶界中偏析, 随着 Si 含量的增加, 过多的 Si 会固溶到晶粒内部。涂层的平均显微硬度随着 Si 含量的升高而增加, CoCrFeNiSi_{2.0} 可达到 566.5HV_{0.5}。在 3.5% NaCl 溶液中, 涂层的腐蚀电位随 Si 含量的增加而变大, CoCrFeNiSi_{2.0} 较 CoCrFeNiSi_{0.0} 的腐蚀电位正移约 160 mV, 腐蚀电流密度从 1.17×10^{-6} A/cm² 减小到 6.06×10^{-7} A/cm², 耐蚀性提高。当 Si 含量较低时, 涂层表面出现连续大面积腐蚀痕迹, 随着 Si 含量的增加, 表面腐蚀以点蚀为主。结论 在 CoCrFeNi 系高熵合金涂层中添加 Si 元素, 可以促进 bcc 相的生成, 提高涂层的显微硬度, 同时可以有效抑制合金涂层的腐蚀倾向, 以及减缓合金涂层的腐蚀速率, 提高耐蚀性能。

关键词: 激光熔覆; 高熵合金; Si; CoCrFeNi; 物相分析; 显微组织; 耐蚀性能

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2021)08-0343-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.08.033

Study on Microstructure and Corrosion Resistance of CoCrFeNiSi_x High-entropy Alloy Coating by Laser Cladding

HAO Wen-jun¹, SUN Rong-lu^{1,2}, NIU Wei^{1,2}, LI Xiao-long¹, GU Mi¹, ZUO Run-yan¹

(1.School of Mechanical Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2.Tianjin Key Laboratory of Advanced Mechatronics Equipment Technology, Tianjin 300387, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of Si content on the structure, phase, microhardness and corrosion resistance of CoCrFeNi high-entropy alloy coating. In the study, CoCrFeNiSi_x ($x=0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$) high-entropy alloy coating on 45 steel

收稿日期: 2020-10-07; 修订日期: 2020-12-14

Received: 2020-10-07; Revised: 2020-12-14

作者简介: 郝文俊 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为金属材料表面强化和激光材料加工。

Biography: HAO Wen-jun (1995—), Male, Master, Research focus: surface strengthening of metal materials and processing of laser materials.

通讯作者: 孙荣禄 (1964—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为金属材料表面强化和激光材料加工。

Corresponding author: SUN Rong-lu (1964—), Male, Doctor, Professor, Research focus: metal material surface strengthening and laser material processing.

引文格式: 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.

HAO Wen-jun, SUN Rong-lu, NIU Wei, et al. Study on microstructure and corrosion resistance of CoCrFeNiSi_x high-entropy alloy coating by laser cladding[J]. Surface technology, 2021, 50(8): 343-348.

substrate is prepared by laser cladding technology, and the phase composition, microstructure, microhardness, corrosion resistance and corrosion morphology of the coating is analyzed by using scanning electron microscope, X-ray diffractometer, micro hardness tester, electrochemical workstation. Theoretical analysis combined with experimental verification shows that the CoCrFeNi high-entropy alloy coating is a single fcc phase. The microstructure of the coating is dominated by equiaxed crystals and dendrites. When the Si content is small, the Si element is mainly segregated in the grain boundaries. As the Si content increases, too much Si will be dissolved into the crystal grains. The average microhardness of the coating increases with the increase of Si content, and CoCrFeNiSi_{2.0} can reach 566.5HV_{0.5}. In 3.5% NaCl solution, the corrosion potential of the coating increases with the increase of Si content, the corrosion potential of CoCrFeNiSi_{2.0} is positively shifted by about 160 mV compared with CoCrFeNiSi_{0.0}, and the corrosion current density decreases from 1.17×10^{-6} A/cm² to 6.06×10^{-7} A/cm², the corrosion resistance is improved. When the Si content is low, continuous large-area corrosion marks appear on the coating surface. As the Si content increases, the surface corrosion is dominated by pitting corrosion. As a result, the addition of Si element to the CoCrFeNi series high-entropy alloy coating can promote the formation of bcc phase, increase the microhardness of the coating, and can effectively inhibit the corrosion tendency of the alloy coating and slow down the corrosion rate of the alloy coating, thereby improving the corrosion resistance.

KEY WORDS: laser cladding; high-entropy alloy; Si; CoCrFeNi; physical analysis; microstructure; corrosion resistance

高熵合金是近些年发展起来的一种多主元合金,自从 1995 年被叶均蔚教授提出以来,便受到科研人员的广泛关注,与橡胶金属、大块金属玻璃并称为合金化理论领域的三大突破^[1-2]。高熵合金一般认为由 5~13 种元素组成,各元素的原子含量占比为 5%~35%^[3-4]。由于其特有的高熵效应、迟滞扩散效应、晶格畸变效应和鸡尾酒效应,合金更倾向于形成体心立方(bcc)、面心立方(fcc)、密排六方(hcp)等简单固溶体结构^[5]。高熵合金的特性也赋予了其高强度、高硬度、良好的抗疲劳性能、优异的耐蚀性能、超强的抗辐射性能、较高的热稳定性和抗氧化性能等多种优异的性能^[6]。

目前,高熵合金的制备主要有三维的高熵合金块体与二维的高熵合金涂层。高熵合金块体的制备主要通过真空电弧熔炼法^[7],涂层有激光熔覆^[8]、电弧喷涂^[9]、氩弧熔覆^[10]、磁控溅射^[11]和电火花沉积^[12]。由于制备高熵合金的材料大多较为昂贵,制造成本较高,因此可以在一些成本较低的基材上制备高熵合金涂层,从而提高其在工业生产使用中的可行性。为了获得具有一定厚度,且表面平整、稀释率低的涂层,本文采用激光熔覆的方法制备高熵合金涂层。Co、Cr、Fe、Ni 原子半径及电负性相近,容易形成结构简单的单一固溶体结构。目前已有大量研究关于在 CoCrFeNi 基合金中添加 Al、Mo、Cu、Ti 等元素^[13-16]。张雪等^[17]在模拟海水条件下研究了 Al_xCoCrFeNi 高熵合金的耐蚀性能。研究发现,当 $x=0.5, 1.0$ 时,其物相结构为 fcc 相与 bcc 相共存;当 $x=1.5, 2.0$ 时,为 bcc 结构。随着 Al 含量的增加,合金在电解液中的腐蚀电位下降,腐蚀电流密度增加,耐蚀性下降,主要腐蚀形式为点蚀。王勇等^[18]在 CoCrFeNi 中添加 Cu 与 Mn,分别在 3.5% NaCl、5% NaOH 和 0.5 mol/L H₂SO₄ 溶液中进行电化学研究。他们发现,这 2 种合

金均为单一的 fcc 结构,CoCrFeNiMn 高熵合金在 3 种溶液中的耐蚀性能均高于 CoCrFeNiCu。主要原因是,Cu 会造成元素偏析,降低耐蚀性能,而 Mn 可以提高合金的耐蚀性。

以往研究关于金属元素对 CoCrFeNi 基高熵合金的影响较多,对 B、Si 等的研究较少。通常高熵合金较传统合金都有较好的耐蚀性能,而目前关于合金力学性能(如硬度、塑性、耐磨性、减摩性等)的研究较多,关于合金耐蚀性能的研究较少。在实际应用中,耐蚀性是影响材料服役的一个重要指标,因此制备耐蚀性良好的涂层具有重要的意义。本试验将采用激光熔覆技术在 45 号钢表面制备 CoCrFeNiSi_x (x 为物质的量之比, $x=0.0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$) 高熵合金涂层,研究 Si 含量对高熵合金涂层组织与性能的影响。

1 试验

1.1 试验准备与制备工艺

本试验使用 45 号钢作为基材,依次用 200、400、600、800、1000 目砂纸将基材表面打磨至光滑,并在无水乙醇中清洗干净。试验原材料选择等原子比 CoCrFeNi 高熵合金粉末(纯度大于 99.9%, 15~53 μm)和纯 Si 粉(纯度大于 99.99%, 200 目),利用 JA2003 电子精密天平(精度为 ± 0.1 mg)称量所需熔覆粉末质量,按照物质的量之比配制 CoCrFeNiSi_x 粉末。将不同配比的粉末分别在球磨罐中均匀混合,球磨机转速为 300 r/min,球料比为 3:1,混合 4 h。混合均匀的粉末在干燥箱内烘干后,采用预置粉末法涂敷在基材表面,涂层厚度为 1 mm。

使用 RFL-C1000 锐科光纤激光器在试样表面进行激光熔覆试验。通过多组工艺参数对照,选取最优

工艺参数：激光功率为 800 W，激光扫描速度为 8 mm/s，光斑直径为 2.0 mm，搭接率为 50%。

1.2 性能测试与表征

激光熔覆试验后，将试样沿垂直于激光扫描方向进行线切割，试样尺寸为 10 mm×10 mm×7 mm。分别使用 400、600、800、1000、1200、1500 目砂纸打磨至光滑无划痕，然后抛光至镜面。用腐蚀剂（饱和 FeCl₃ 盐酸溶液）对熔覆层进行化学腐蚀。利用带有 EDS 的扫描电子显微镜（SEM）对试样熔覆层的显微组织及成分进行观察分析。利用 D8 型 X 射线衍射仪（XRD）对熔覆层物相进行物相检测，加速电压为 40 kV，电流为 150 mA，衍射范围为 20°~100°。涂层的显微硬度使用 HV-1000 显微硬度计进行测量。

使用 LK2010 型电化学工作站（天津兰力化学电子技术有限公司）进行电化学测试，用三电极法连接电极。试样用树脂材料进行包裹，露出 1 cm² 的待测面积进行测试，利用铜导线将其与电化学工作站连接，试样作为工作电极，参比电极为饱和甘汞电极（saturated calomel electrode, SCE），铂电极作为对比电极，电解液为 3.5% NaCl 溶液，试验在室温下进行。动电位极化曲线的扫描速度为 5 mV/s，灵敏度为 1 mV/s。测试之后，利用 Leica DVM6 光学显微镜对试样的表面和三维腐蚀形貌进行观察。

2 结果及讨论

2.1 物相分析

大多数高熵合金都以晶体形式存在，微观的晶体结构是决定合金物理、化学和力学性能的重要因素。Guo 等^[19]通过对比混合焓、原子半径差、电负性差和价电子浓度（VEC），提出了以 VEC 预测合金相结构的产生。VEC 是合金中原子加权平均的价电子数，在高熵合金中加入 VEC 值较高的元素，有利于 fcc 相的形成，而添加 VEC 较低的元素，往往更容易形成 bcc 相^[20]。

Guo 等^[21]研究发现，当 VEC>8.00 时，会形成 fcc 结构；VEC<6.87 时，会形成 bcc 结构；而 6.87≤VEC≤8.00，则形成 fcc 与 bcc 的混合相。通过式(1)可以计算得到 CoCrFeNiSi_x 的 VEC，见表 2。通过分析可以预测，CoCrFeNi 为 fcc 相，之后随着 Si 含量的升高，向 bcc 相转变。

$$VEC = \sum_{i=1}^n c_i (VEC)_i$$

(1)

式中： c_i 是组元的原子数分数； $(VEC)_i$ 是组元的原子价电子数，见表 1。

CoCrFeNiSi_x 高熵合金表面熔覆层的 XRD 衍射图谱见图 1。CoCrFeNiSi_x 高熵合金涂层相结构仅为体心立方结构和面心立方结构，且相数 $P \leq 3$ 。根据

表 1 合金元素的价电子数（VEC）^[19]
Tab.1 Valence electron concentration (VEC) of alloy elements^[19]

Alloy elements	Si	Cr	Fe	Co	Ni
Atomic No.	14	24	26	27	28
VEC	4	6	8	9	10

表 2 CoCrFeNiSi_x 高熵合金涂层的 VEC
Tab.2 VEC of CoCrFeNiSi_x high-entropy alloy coating

x	0	0.5	1.0	1.5	2.0
VEC	8.25	7.78	7.40	7.09	6.83

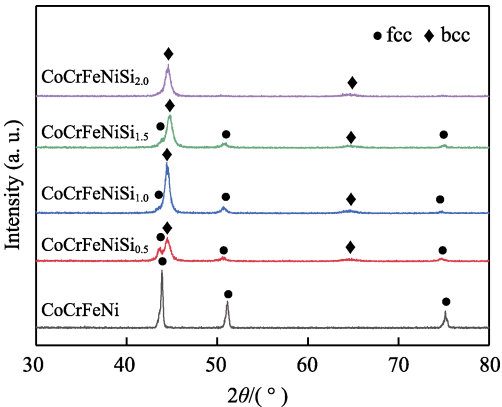


图 1 CoCrFeNiSi_x 高熵合金涂层的 X 射线衍射谱图
Fig.1 X-ray diffraction spectrum of CoCrFeNiSi_x high-entropy alloy coating

吉布斯相律 $P=C+1-F$ (C 为合金主元数， F 为热力学自由度)可知，合金所形成的物相数总是小于主元数，而本试验中测试结果也表明，相数小于主元数。这是因为多种主元的存在，使合金整体的混合熵增大，使主元之间的相容性也随着增大。由于金属间化合物是有序相，有连续的化学形式和特定的晶体结构，高的混合熵可以最大程度地避免由于相分离而生成多种复杂的金属间化合物^[22]。总的来说，高的混合熵使合金倾向于形成固溶体结构。从图 1 中可以看出，CoCrFeNiSi_{0.0} 合金为单一的 fcc 结构。随着 Si 含量的继续提高，fcc 相的衍射强度逐渐降低，CoCrFeNiSi_{2.0} 完全转化为 bcc 相。试验结果与理论预测结果相符，说明 Si 是 bcc 相的促成元素。

2.2 显微结构

CoCrFeNiSi_x 高熵合金熔覆层的显微组织形貌如图 2 所示。决定微观组织形貌的内因是化学成分，而外因是凝固条件。在试验中，由于激光熔覆^[23]的整个过程时间较短，具有快速熔化、凝固的特点，晶核沿传热方向快速结晶，对晶体生长的各向异性起到了一定的抑制作用，所以组织主要以等轴晶或枝晶为主。由表 3 可看出，CoCrFeNiSi_{0.0} 组织晶粒与晶界成分较为均匀，而 Si 的物质的量之比为 0.5、1.0 时，Si 元素主要在晶界上富集。这是因为 Si 在凝固冷却时，

被排斥到固液界面上。之后随着 Si 含量继续增加, 晶体内部 Si 含量上升。这是由于 Si 的添加会提高合

金涂层中的形核率^[24], 随着 Si 元素的添加, 组织以 Si 为核心形核长大, 因此晶粒内部的 Si 含量会升高。

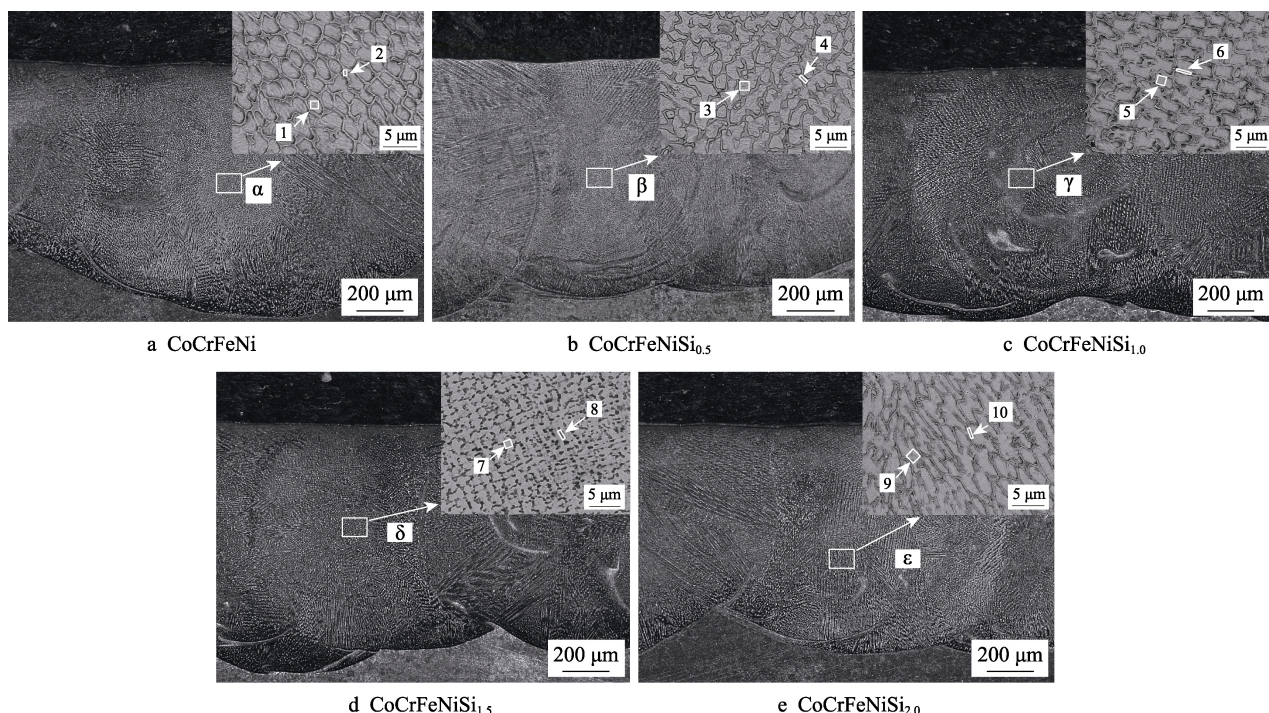


图 2 熔覆层组织形貌

Fig.2 Magnification structure of cladding layer

表 3 涂层测试点 EDS 分析
Tab.3 EDS analyses of test points in coating

		at%				
Region		Co	Cr	Fe	Ni	Si
CoCrFeNiSi _{0.0}	α	19.33	20.73	40.15	19.80	0.00
	1	19.61	19.61	40.67	20.11	0.00
	2	18.92	23.15	37.54	20.40	0.00
CoCrFeNiSi _{0.5}	β	15.71	16.86	41.08	16.29	10.06
	3	17.06	16.41	43.24	15.82	07.47
	4	12.86	16.38	27.86	21.81	21.09
CoCrFeNiSi _{1.0}	γ	14.48	15.71	36.43	15.83	17.55
	5	16.16	16.74	38.79	14.85	13.45
	6	14.73	16.07	31.79	17.50	19.91
CoCrFeNiSi _{1.5}	δ	12.77	13.92	33.78	14.27	25.25
	7	15.59	16.14	32.12	15.22	20.93
	8	13.96	14.99	29.89	14.76	26.40
CoCrFeNiSi _{2.0}	ε	10.63	14.10	25.65	12.11	37.51
	9	12.27	10.74	26.86	11.06	39.07
	10	12.67	15.42	24.52	14.91	32.48

2.3 显微硬度

CoCrFeNiSi_x 涂层的平均显微硬度曲线如图 3 所示。由图 3 可知, 当 Si 的物质的量之比为 0.0、0.5、1.0、1.5、2.0 时, 涂层的平均显微硬度分别是 401.2、421.5、507.8、523.7、566.5HV_{0.5}, 涂层的显微硬度

随着 Si 含量的升高而逐渐升高。当 $x=2.0$ 时, 平均硬度达到最高。由表 4 可知, Si 元素的原子半径较其他元素小。在合金中添加 Si 元素后, 一方面, 由于原子半径不同, 会使涂层内部晶格畸变程度增大, 使硬度提高; 另一方面, 原子半径较小的 Si 原子会占据晶格的空隙位置, 提高了致密度, 晶体之间的相对滑移变得困难, 因此表现为硬度提升。

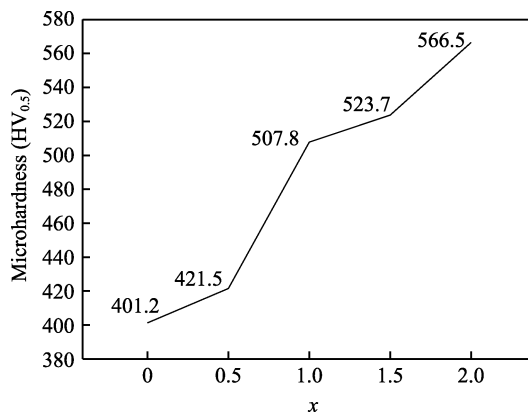


图 3 CoCrFeNiSi_x 高熵合金涂层的平均显微硬度

Fig.3 Average microhardness of CoCrFeNiSi_x high-entropy alloy coating

表 4 合金元素的原子半径
Tab.4 Atomic radius of alloy elements

Alloy elements	Si	Cr	Fe	Co	Ni
Atomic radius/pm	117	128	127	125	124

2.4 合金腐蚀性能

室温下 CoCrFeNiSi_x 涂层及基材 45 钢在 3.5% NaCl 溶液中的动电位极化曲线如图 4 所示。表 5 给出了相应的电化学参数。根据电化学腐蚀理论可知，合金的腐蚀电位 E_{cor} 表示的是合金的腐蚀倾向，腐蚀电位越高，说明腐蚀的可能性越小^[25]。腐蚀电流密度 J_{cor} 则是衡量腐蚀速率的标准，腐蚀电流密度越大，表明合金的腐蚀速率越高，其耐蚀性也就越差^[26]。从表 5 中可以看出，随着 Si 含量的增加，合金的腐蚀电位 E_{cor} 增大，CoCrFeNiSi_{2.0} 较 CoCrFeNi 的腐蚀电位正移约 160 mV，说明低 Si 含量的合金有更大的腐蚀倾向。合金腐蚀电流密度 J_{cor} 随 Si 含量的升高而减小，与 CoCrFeNi 相比，同等腐蚀条件下，

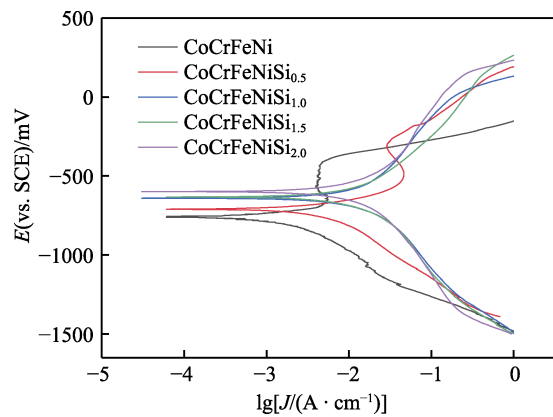


图 4 动电位极化曲线
Fig.4 Potential polarization curve

表 5 电化学参数
Tab.5 Electrochemical parameters

HEAs	E_{cor} (vs. SCE) /mV	J_{cor} / (A · cm ⁻²)
CoCrFeNi	-758.18	1.17×10^{-6}
CoCrFeNiSi _{0.5}	-710.44	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}
45 Steel	-1057.03	1.63×10^{-5}

CoCrFeNiSi_{2.0} 合金的腐蚀速率减慢，耐蚀性有了显著的提高。基体 45 钢的腐蚀电位明显低于涂层，腐蚀电流密度较 CoCrFeNi 涂层小 1 个数量级，说明涂层对基体可以起到有效的腐蚀防护作用。

由图 4 还可以看出，CoCrFeNi 和 CoCrFeNiSi_{0.5} 在阳极曲线部分有明显的钝化行为。在阳极曲线中，活化区相对平缓。随着电位的增加，曲线进入过渡区，随后在钝化区发生钝化现象，最后转向过钝化区。在 CoCrFeNiSi_{1.0}、CoCrFeNiSi_{1.5}、CoCrFeNiSi_{2.0} 的极化曲线中，没有发现明显的钝化现象。这是因为在耐蚀性较低的合金涂层表面，会生成大量的腐蚀产物，堆积在表面，对涂层产生保护作用，从而降低了腐蚀速率^[27]。

2.5 腐蚀形貌分析

CoCrFeNiSi_x 高熵合金涂层在 3.5% NaCl 溶液中的电化学腐蚀形貌如图 5 所示。可以看出，Si 含量较低时，已形成了连续大面积的腐蚀纹理。随着 Si 含

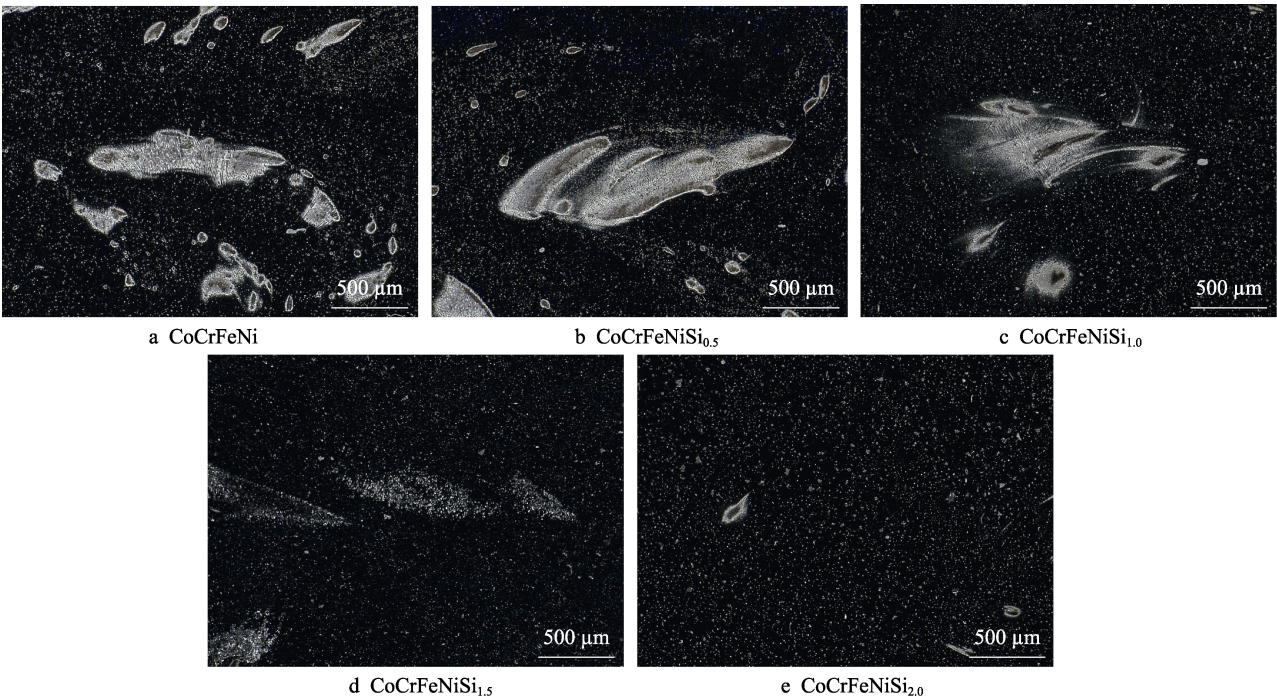


图 5 高熵合金涂层腐蚀形貌
Fig.5 Corrosion morphology of HEAs coating

量的升高,涂层上连续大面积的腐蚀痕迹减少,这是因为涂层的腐蚀电位增加,腐蚀倾向减小,而腐蚀电流密度减小,使涂层的腐蚀速率减慢,因此涂层上电偶腐蚀的程度减弱,点蚀坑未能扩展形成沟槽。

3 结论

1) CoCrFeNiSi_x 系高熵合金激光熔覆涂层主要由体心立方结构 (bcc) 和面心立方结构 (fcc) 组成。当不添加 Si 时,合金由单一的 fcc 结构组成。随着 Si 含量的增加,涂层由 fcc 相向 bcc 相转变。通过理论分析可知, Si 是 bcc 相的促成元素。

2) 显微组织以等轴晶与枝晶为主,添加少量 Si 时,在晶界处偏析。随着含量的提升, Si 会固溶到晶粒内部。涂层的显微硬度随 Si 含量的增加而升高,至 $x=2.0$ 时,可达 566.5 HV_{0.5}。

3) 随着 Si 含量的增加, CoCrFeNiSi_x 系高熵合金在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀电位上升,腐蚀电流密度减小,说明耐蚀性能提高。合金的耐腐蚀性能由大到小为 CoCrFeNiSi_{2.0}>CoCrFeNiSi_{1.5}>CoCrFeNiSi_{1.0}>CoCrFeNiSi_{0.5}>CoCrFeNi。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] RANGANATHAN S. Alloyed pleasures: Multimetallurgical cocktails[J]. *Current science*, 2003, 85(10): 1404-1406.
- [3] ZHANG Yong, ZUO Ting-ting, TANG Zhi, et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys[J]. *Progress in materials science*, 2014, 61: 1-93.
- [4] YE H J W. Recent progress in high-entropy alloys[J]. *Annales de chimie science des matériaux*, 2006, 31(6): 633-648.
- [5] MIRACLE D B, SENKOV O N. A critical review of high entropy alloys and related concepts[J]. *Acta materialia*, 2017, 122: 448-511.
- [6] 陈永星, 朱胜, 王小明, 等. 高熵合金制备及研究进展[J]. *材料工程*, 2017, 45(11): 129-138.
- [7] CHEN Yong-xing, ZHU Sheng, WANG Xiao-ming, et al. Progress in preparation and research of high entropy alloys[J]. *Journal of materials engineering*, 2017, 45(11): 129-138.
- [8] SENKOV O N, SCOTT J M, SENKOVA S V, et al. Microstructure and room temperature properties of a high-entropy TaNbHfZrTi alloy[J]. *Journal of alloys and compounds*, 2011, 509(20): 6043-6048.
- [9] ZHANG Hui, PAN Ye, HE Yi-zhu. Synthesis and characterization of FeCoNiCrCu high-entropy alloy coating by laser cladding[J]. *Materials & design*, 2011, 32(4): 1910-1915.
- [10] 郭伟, 梁秀兵, 陈永雄, 等. FeCrNiCoCu(B)高熵合金涂层的制备与表征[J]. *中国表面工程*, 2011, 24(2): 70-73.
- [11] GUO Wei, LIANG Xiu-bing, CHEN Yong-xiong, et al. Preparation and characterization of the FeCrNiCoCu(B) high-entropy alloy coatings[J]. *China surface engineering*, 2011, 24(2): 70-73.
- [12] 董世知, 孟旭, 马壮, 等. 氩弧熔覆 FeAlCoCrCuTi_{0.4} 高熵合金层的组织与耐磨性能[J]. *材料保护*, 2018, 51(9): 8-11.
- [13] DONG Shi-zhi, MENG Xu, MA Zhuang, et al. Microstructure and wear resistance of Fe AlCoCrCuTi_{0.4} high-entropy alloy coating prepared by argon arc cladding[J]. *Materials protection*, 2018, 51(9): 8-11.
- [14] DOLIQUE V, THOMANN A L, BRAULT P, et al. Complex structure/composition relationship in thin films of AlCoCrCuFeNi high entropy alloy[J]. *Materials chemistry and physics*, 2009, 117(1): 142-147.
- [15] 郭策安, 赵宗科, 赵爽, 等. 电火花沉积 AlCoCrFeNi 高熵合金涂层的高速摩擦磨损性能[J]. *材料导报*, 2019, 33(9): 1462-1465.
- [16] GUO Ce-an, ZHAO Zong-ke, ZHAO Shuang, et al. High-speed friction and wear performance of electrospray deposited AlCoCrFeNi high-entropy alloy coating[J]. *Materials reports*, 2019, 33(9): 1462-1465.
- [17] DU L M, LAN L W, ZHU S, et al. Effects of temperature on the tribological behavior of Al_{0.25}CoCrFeNi high-entropy alloy[J]. *Journal of materials science & technology*, 2019, 35(5): 917-925.
- [18] LI W P, WANG X G, LIU B, et al. Fracture mechanisms of a Mo alloyed CoCrFeNi high entropy alloy: *In-situ* SEM investigation[J]. *Materials science and engineering: A*, 2018, 723: 79-88.
- [19] VERMA A, TARATE P, ABHYANKAR A C, et al. High temperature wear in CoCrFeNiCu_x high entropy alloys: The role of Cu[J]. *Scripta materialia*, 2019, 161: 28-31.
- [20] 苗振旺, 祝夫文, 刘琪. CoCrFeNiCuTi_x 高熵合金的微观组织与耐腐蚀性能研究[J]. *粉末冶金技术*, 2020, 38(1): 10-17.
- [21] MIAO Zhen-wang, ZHU Fu-wen, LIU Qi. Study on microstructure and corrosion resistance of CoCrFeNiCuTi_x high-entropy alloy[J]. *Powder metallurgy technology*, 2020, 38(1): 10-17.
- [22] 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.
- [23] ZHANG Xue, CUI Hong-zhi, WANG Ming-liang, et al. Effect of Al content on microstructure and corrosion resistance of Al_xCoCrFeNi high entropy alloys[J]. *Transactions of materials and heat treatment*, 2018, 39(12): 29-36.