

Si 含量对激光熔覆 FeCrNiCSi_x 涂层组织 结构及高温摩擦性能的影响

龙海洋¹, 史海江^{1,2}, 卢冰文^{2*}, 马汝成², 闫星辰²,
刘志存¹, 贵永亮¹, 董真^{1,2}

(1.华北理工大学, 河北 唐山 063210; 2.广东省科学院新材料研究所
广东省现代表面工程技术重点实验室, 广州 510651)

摘要: **目的** 研究不同 Si 含量对 Fe 基涂层组织结构及高温摩擦磨损性能的影响规律, 为延长高温环境下冶金部件的服役寿命提供技术支持。**方法** 选用铬粉、硅粉、镍粉、碳粉、铁粉 (纯度均大于等于 99%), 配制不同 Si 含量 (质量分数分别为 5%、10%、15%) 的 FeCrNiCSi_x 粉末, 在配制完成后使用行星磨混合粉末, 采用激光熔覆技术制备不同 Si 含量 (质量分数分别为 5%、10%、15%) 的 FeCrNiCSi_x 涂层。通过 X 射线衍射仪 (XRD)、扫描电子显微镜 (SEM) 和其自带能谱仪 (EDS) 分析涂层的物相组成、显微组织和元素分布; 利用维氏显微硬度计分析涂层的截面显微硬度分布规律; 采用摩擦磨损试验机测试涂层在温度 500 °C、载荷 200 N 下的摩擦因数, 称量磨损实验前后的质量差, 计算磨损率; 通过 SEM 观察磨痕形貌, 分析涂层磨损机理。**结果** 质量分数为 5% 的 Si 涂层物相主要是 γ -Fe 和 Fe-Cr 固溶体, 显微组织由树枝晶和等轴晶组成。质量分数为 10%、15% 的 Si 涂层的物相主要为 Fe₃Si、Fe-Cr 固溶体, 显微组织主要由等轴晶组成。质量分数为 5%、10%、15% 的 Si 涂层的显微硬度分别为 301.3HV0.5、576.6HV0.5、598.5HV0.5, 摩擦因数分别为 0.61、0.50、0.47, 磨损率分别为 3.10×10^{-5} 、 5.90×10^{-5} 、 7.39×10^{-5} g/m。**结论** 随着涂层中 Si 含量的升高, 涂层的摩擦因数降低, 显微硬度和磨损率升高。其中, Fe₃Si 相的产生使得涂层的平均显微硬度提高, 由于 Fe₃Si 相的脆性较大, 剥落程度较严重, 导致涂层的磨损率上升。综合评判可知, 质量分数为 10% 的 Si 涂层的高温耐磨最优, 其磨损形式为磨粒磨损。

关键词: 激光熔覆; Fe-Cr-Si 合金; 显微组织; 显微硬度; 高温磨损; 磨损机理

中图分类号: TG174.4; TG665 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)17-0062-09

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.17.005

收稿日期: 2023-08-23; 修订日期: 2023-12-08

Received: 2023-08-23; **Revised:** 2023-12-08

基金项目: 国家自然科学基金 (52005113, 52101082, 52201067); 广东省科学院打造综合产业技术创新中心行动资金 (2022GDASZH-2022010107); 广州市青年科技人才托举项目 (QT-2023-038); 广东省基础与应用基础研究基金 (2022B1515250004); 河北省属高校基本科研业务费研究项目 (JQN2023029); 河北省在读研究生创新能力培养资助项目 (CXZZBS2024136); 河北省省级科技计划 (246Z1019G)

Fund: National Natural Science Foundation of China (52005113, 52101082, 52201067); Guangdong Academy of Science Projects (2022GDASZH-2022010107); Young Talent Support Project of Guangzhou Association for Science and Technology (QT-2023-038); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2022B1515250004); Research Project of Basic Scientific Research Business Expenses of Universities in Hebei Province (JQN2023029); Funding Project for Fostering Innovation Ability of Graduate Students in Hebei Province (CXZZBS2024136); Science and Technology Program of Hebei (246Z1019G)

引文格式: 龙海洋, 史海江, 卢冰文, 等. Si 含量对激光熔覆 FeCrNiCSi_x 涂层组织结构及高温摩擦性能的影响[J]. 表面技术, 2024, 53(17): 62-70.

LONG Haiyang, SHI Haijiang, LU Bingwen, et al. Effect of Si Content on Microstructure and High Temperature Friction Properties of FeCrNiCSi_x Coating by Laser Cladding[J]. Surface Technology, 2024, 53(17): 62-70.

*通信作者 (Corresponding author)

Effect of Si Content on Microstructure and High Temperature Friction Properties of FeCrNiCSi_x Coating by Laser Cladding

LONG Haiyang¹, SHI Haijiang^{1,2}, LU Bingwen^{2*}, MA Rucheng², YAN Xingchen²,
LIU Zhicun¹, GUI Yongliang¹, DONG Zhen^{1,2}

(1. North China University of Science and Technology, Hebei Tangshan 063210, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Modern Surface Engineering Technology, Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510651, China)

ABSTRACT: After the key parts of metallurgical equipment are used in high temperature environment for a long time, the surface is easy to be damaged. In high temperature environment, the Fe-Cr-Si alloy coating can protect the substrate from high temperature gases, oxides and corrosive media, while providing high hardness and wear resistance. Therefore, it is widely used for surface protection of service parts in high temperature, high corrosion and high wear environments. At present, the main research pays more attention to Fe-Cr-Si coatings with low Si content, and less to Fe-Cr-Si coatings with high Si content. The coating prepared by laser cladding technology has the advantages of metallurgical bonding, low dilution rate, small heat-affected zone and dense microstructure. The preparation of protective coating by laser cladding technology is a suitable way to improve the service life of parts. The work aims to solve the problem of surface failure of metallurgical parts in high temperature environment and investigate the effect of Si content on the high temperature wear performance of Fe-based coatings. Therefore, chromium powder, silicon powder, nickel powder, carbon powder and iron powder (purity $\geq 99\%$) were used to prepare alloy powder. The Si content of the alloy powder was 5%, 10% and 15%. The finished powder was mixed with a star ball mill. After mixing, the powder was dried in a vacuum drying oven at 100 °C for 2 h. The process parameters of laser cladding were as follows: laser power of 1 600 W, lap rate of 50%, spot diameter of 5 mm, scanning speed of 600 mm/min and powder feeding speed of 5 r/min. The base material was 1Cr11Ni2W2MoV heat-resistant steel plate. The phase composition of the coating was analyzed by X-ray diffractometer. The microstructure of the coating and its element distribution were analyzed by scanning electron microscope (SEM) and its own energy dispersive spectrometer (EDS). The friction and wear properties of coatings with different Si contents were tested by friction and wear testing machine at 500 °C, and the friction coefficient curve and wear mechanism of coatings were analyzed. Si could improve the oxidation resistance of the coating and refine the grain. With the increase of Si content, the coating produced Fe₃Si phase, the microhardness increased, the friction coefficient decreased, and the wear rate increased. The reason for the increase of coating wear rate was that Fe₃Si had phase brittleness, so the degree of spalling was larger. The phase of 5% Si coating was γ -Fe and Fe-Cr solid solution, and the microstructure was mainly isometric crystal and dendrite, the average microhardness was 304.3HV0.5, the average friction coefficient was 0.61, the wear rate was 3.10×10^{-5} g/m, and the wear form was mainly adhesive wear. The phase of 10% Si and 15% Si coatings was Fe₃Si and Fe-Cr solid solution, the microstructure was mainly equiaxial and the wear form was mainly spalling wear. The average microhardness of 10% Si coating was 576.6HV0.5, the average friction coefficient was 0.50, and the wear rate was 5.90×10^{-5} g/m. The average microhardness of 15% coating was 598.5HV0.5, the average friction coefficient was 0.47, and the wear rate was 7.39×10^{-5} g/m.

KEY WORDS: laser cladding; Fe-Cr-Si alloy; microstructure; microhardness; high temperature friction wear; wear mechanism

设备对冶金产业至关重要,其工况条件复杂,常在高温(500 °C)、重载等环境下服役,高温磨损、高温氧化容易导致设备表面损伤,进而影响其服役安全和使用寿命^[1-3]。表面涂层技术是保护冶金部件的重要手段,目前冶金部件的表面涂层防护技术有喷涂技术^[4]、电弧熔化技术^[5]、堆焊^[6]、激光熔覆技术^[7]等。激光熔覆技术是利用高能激光束熔化粉末,同时在基体表面形成熔池,经过快速冷却后,形成具有与基体冶金结合的涂层^[8-9]。采用激光熔覆技术制备的涂层具有冶金结合、稀释率低、热影响区小、组织致

密等优点^[10-12],所以通过激光熔覆技术制备防护涂层成为冶金部件的有效防护手段。

涂层材料是影响冶金部件表面激光熔覆涂层防护效果的关键。其中,Fe-Cr-Si系合金涂层在高温环境下能够保护基材不受高温气体、氧化物和腐蚀介质的侵蚀,具有良好的抗氧化性和耐腐蚀性,同时具有较高的硬度和耐磨性,被广泛应用于高温、高腐蚀、高磨损环境下服役部件的表面防护^[13-19]。秦铁玉等^[20]通过电弧熔炼工艺制备了Fe20Cr10Si合金,合金的显微组织主要由树枝晶组成,并且合金在900 °C空气环

境中的抗氧化能力是 45 钢的 50 倍,表明 Fe20Cr10Si 合金的高温抗氧化性优异。龙俊等^[17]研究了 Si 含量 (0.6%~2.5%) 对 Fe-Cr 合金耐磨钢组织和性能的影响,结果表明, Si 的加入有助于改善碳化物第二相的分布情况,随着 Si 含量的提高,合金钢的硬度上升,其耐磨耐蚀性能提高,当 Si 元素的质量分数达到 2.3% 时,其韧性下降。董刚等^[21]指出,在 316L 涂层中, Si 能够在高温下氧化,生成 SiO₂ 薄膜,它阻碍了涂层的氧化进程,同时它作为钝化层,有效地提高了涂层的耐腐蚀性。

综上所述, Si 元素能够有效提高涂层的耐磨性、耐腐蚀性及抗氧化性^[22-28]。目前的主要研究内容集中于低 Si 含量 (质量分数 < 5%) 的合金涂层,针对高 Si 含量 (质量分数 > 5%) 合金涂层的研究较少。由此,本文采用激光熔覆技术制备 FeCrNiCSi_x 涂层,研究高 Si 含量 (质量分数为 5%、10%、15%) 下, Si 含量的变化对 FeCrNiCSi_x 涂层显微组织、硬度和高温耐磨性的影响规律,为高 Si 含量合金涂层的相关研究提供理论依据,为冶金部件的表面防护提供一定技术支持。

1 实验

1.1 材料

熔覆粉末选用纯度均大于等于 99% 的铬粉、硅粉、镍粉、碳粉、铁粉,经过筛分,粉末粒度为 53~150 μm。使用 NX-100 型高精度电子天平配制 Si 元素的质量分数分别为 5%、10%、15% 的混合粉末,混合粉末的成分如表 1 所示。在配制完成后,使用行星球磨机混合,转速为 200 r/min,时间为 4 h。在混粉结束后,使用真空干燥箱在 100 ℃ 下干燥 2 h,分别将不同 Si 含量粉末制备出的涂层命名为 5Si、10Si、15Si 涂层。基体选用 1Cr11Ni2W2MoV (1Cr11Ni) 耐热钢板,具体成分见表 2。

表 1 FeCrNiCSi_x 涂层粉末成分
Tab.1 Composition of FeCrNiCSi_x powder

Coatings	Mass fraction/%				
	Cr	Si	Ni	C	Fe
5Si	20	5	4	1	70
10Si	20	10	4	1	65
15Si	20	15	4	1	60

表 2 耐热钢板基材成分
Tab.2 Composition of heat-resistant steel substrate

Element	C	W	Mo	Cr	Ni	V	Fe
Mass fraction/%	0.10-0.16	1.50-2.00	0.35-0.50	10.50-12.00	1.40-1.80	0.18-0.30	Bal.

1.2 方法

激光熔覆设备采用 TruDisk6006 型光纤激光器,工艺参数:激光功率为 1 600 W,搭接率为 50%,光斑直径为 5 mm,扫描速度为 600 mm/min,送粉速度为 5 r/min。在涂层熔覆完成后,用 DK7750 型线切割设备将试样切割成边长为 10 mm 的正方块,用砂纸打磨并且抛光涂层,在质量分数为 0.7% 的 HF, 43% 的 HNO₃, 50% 的 H₂O 的腐蚀液中腐蚀 10 s 左右。通过 LeicaDM6000M 型金相显微镜、FEI-Sirion 200 型场发射扫描电镜观察涂层的微观组织结构,采用扫描电镜自带的能谱仪 (EDS) 分析各相的化学成分,使用 Miniflex600 型 X 射线衍射仪进行 XRD 物相分析。采用 MC010-HVS-1000 维氏显微硬度计测量涂层截面的硬度,测量 10 个点,每个点间隔 1.5 mm,取其平均值。高温磨损性能实验设备为 MRH-1 型磨损试验机,摩擦磨损工作示意图如图 1 所示,采用 DJ1002A 高精度电子天平测量磨损质量损失。将磨损实验的试样切割为长、宽、高分别为 20、10、10 mm 的长方体块,用砂纸 (600~2000 目) 打磨并抛光。经过三维形貌轮廓仪检测,3 种不同 Si 含量涂层的磨损实验样品的平均表面粗糙度均为 0.91 μm,具体高温磨损实验参数见表 3。

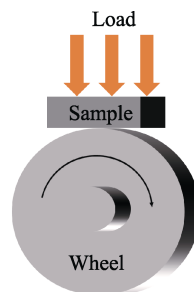


图 1 磨损试验机工作示意图
Fig.1 Working diagram of wear test machine

表 3 高温磨损实验参数
Tab.3 Parameters of high temperature wear test

Temperature/℃	Time/min	Load/N	Sliding speed/(m·s ⁻¹)	Sliding distance/m
500	60	200	0.209	753.6

通过式 (1) 计算试样的磨损率。

$$\omega = \frac{m}{L} \quad (1)$$

式中: ω 为磨损率, g/m; m 为摩擦磨损试验前后质量损失, g; L 为滑动距离, m。

2 结果与分析

2.1 物相分布

5Si、10Si、15Si 涂层的 XRD 衍射图谱结果如图

2 所示。5Si 涂层的物相主要由 γ -Fe、Fe-Cr 固溶体组成, 10Si、15Si 涂层的物相主要由 Fe_3Si 、Fe-Cr 固溶体组成。由此说明, 随着 Si 含量的增加, 涂层的初生相由 γ -Fe 转化为金属硅化物 Fe_3Si , 同时 Fe_3Si 的含量呈上升趋势, 说明 Si 元素促进了金属硅化物的产生。如图 2 所示, 衍射峰较尖锐, 说明结晶度较好。由于 Si 元素的增加使得晶面间距减小, 造成主衍射峰向右偏移, 其中 15Si 涂层的主衍射峰比 10Si 涂层的主衍射峰向右偏移了约 0.16° 。随着 Si 元素的增加, 10Si、15Si 涂层的 Fe_3Si 相衍射峰逐渐增强, 表明涂层中 Fe_3Si 相逐渐增多。

2.2 显微组织

不同 Si 含量 FeCrNiCSi_x 涂层的截面 OM 形貌如图 3 所示。可以看出, 涂层内部致密, 无裂纹, 成型质量良好。涂层结合区明显, 结合线呈波浪状, 具有明显的激光熔覆工艺特征, 结合线的凸起部分为涂层搭接处, 凹陷部分为熔池, 涂层与基体冶金结合良好, 孔隙较少。其中, 5Si、10Si、15Si 涂层的厚度分别约为 1.98、2.15、2.32 mm。

5Si、10Si、15Si 涂层的显微组织和元素分布如图 4 所示。5Si 涂层的显微组织如图 4a 所示, 可以看出, 其显微组织主要由树枝晶和等轴晶组成。10Si、15Si 涂层的显微组织分别如图 4b~c 所示, 其显微组织主要由等轴晶组成。10Si、15Si 涂层的晶粒无明显

差别, 但二者比 5Si 涂层的晶粒更加细小。Si 元素促进了等轴晶的产生, 在一定程度上起到了细化晶粒的作用^[22]。

各涂层 EDS 面扫能谱如图 4 所示, 可以看出, Fe 元素主要分布在晶粒中, Si 元素在 5Si 涂层中的含量较少, 无法看出明显差别。随着涂层中 Si 元素含量的升高, Si 元素向晶粒内部集中; Cr 元素主要集中在晶界部分, 部分 Fe、Si 元素固溶于 Fe-Cr 中, 且晶粒的晶界明显; C 元素在 5Si 涂层中主要集中在晶界部分, 在 10Si、15Si 涂层中分布较为均匀; Ni 元素在 3 种不同 Si 含量的涂层中均分布较均匀。结合 XRD 图谱和点扫元素分布结果 (表 4) 可知, 5Si 涂层中因不存在 Fe_3Si 相, 故 Si 元素以固溶形式存在, 且 γ -Fe 相主要分布在晶粒中; 10Si 涂层位置 3 元素点扫结果显示, Si 元素与 Fe 元素的原子数分数之比接近 1:3, 由此可验证该位置主要为 Si 元素与 Fe 元素结合形成的 Fe_3Si 相, 且主要分布在晶粒中, 而 3 种涂层的 Fe-Cr 固溶体相主要分布在晶界部分。

2.3 显微硬度

5Si、10Si、15Si 涂层的平均显微硬度分布如图 5 所示。其中, 5Si 涂层的平均显微硬度为 304.3HV0.5, 10Si 涂层为 576.6HV0.5, 15Si 涂层为 598.5HV0.5。随着 Si 元素含量的升高, 涂层的显微硬度逐渐升高。结合 XRD 可知, 涂层硬度的提高是因 5Si 涂层中 Si

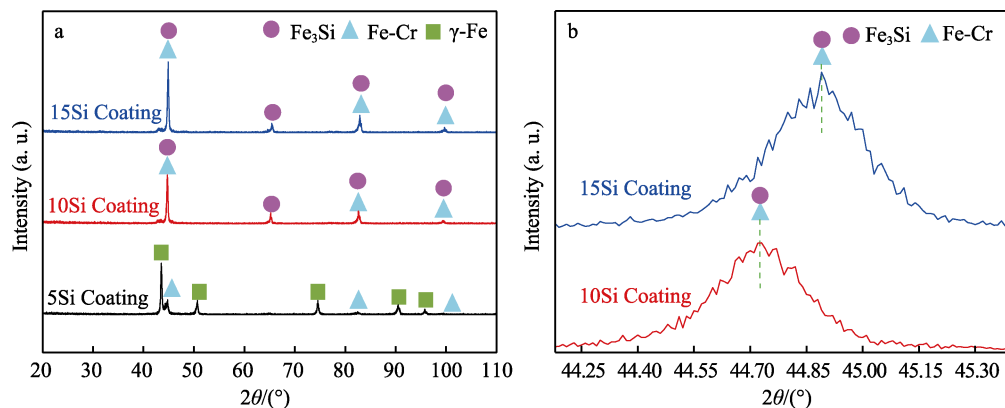
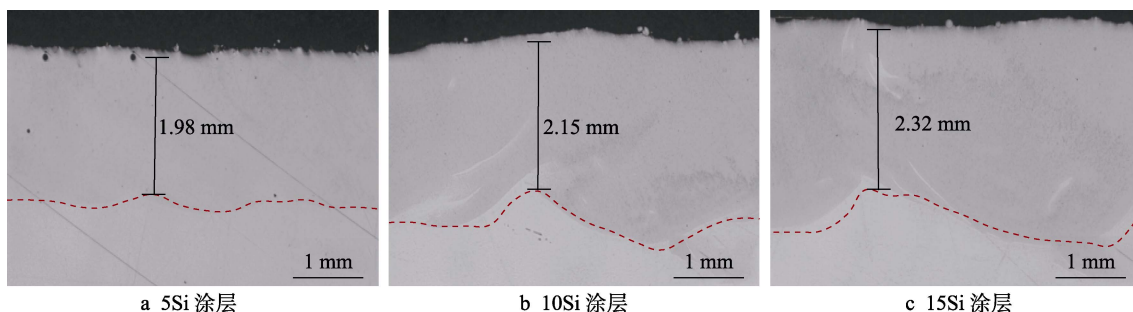


图 2 不同 Si 含量涂层 XRD 衍射图谱 (a) 和 XRD 局部图 (b)

Fig.2 XRD diffraction patterns (a) and partial diagram of XRD (b) of coatings with different Si contents



a 5Si 涂层

b 10Si 涂层

c 15Si 涂层

图 3 不同 Si 含量涂层截面 OM 形貌

Fig.3 OM cross section morphology of coatings with different Si contents: a) 5Si coating; b) 10Si coating; c) 15Si coating

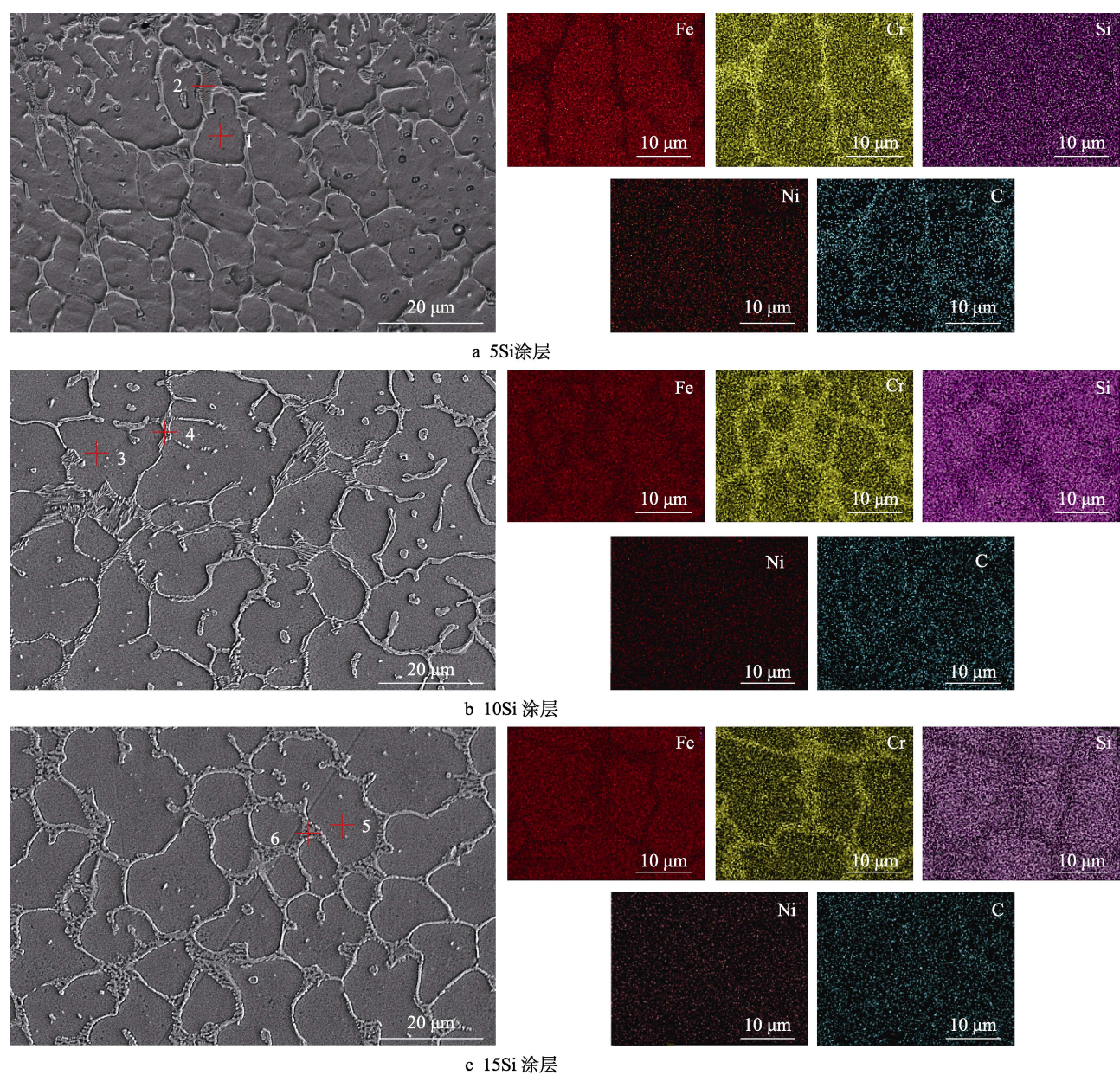


图 4 不同 Si 含量涂层的微观组织和元素分布

Fig.4 Microstructure and elemental distribution of coatings with different Si contents:
a) 5Si coating; b) 10Si coating; c) 15Si coating

元素的含量较低，涂层以硬度较低的 γ -Fe 相为主，随着 Si 元素含量的升高，10Si、15Si 涂层中产生具

表 4 不同 Si 含量涂层晶粒和晶间的元素成分
Tab.4 Composition of the grains and intergranular elements of the coatings with different Si contents

Samples	Position	Atomic percentage/%				
		Fe	Cr	Si	Ni	C
5Si	1	67.77	19.73	3.67	3.56	4.34
	2	26.63	51.69	0.83	5.2	7.15
10Si	3	65.71	14.18	21.56	4.61	4.14
	4	54.84	30.51	12.32	5.24	5.45
15Si	5	55.03	12.30	24.42	2.98	4.63
	6	53.67	29.49	16.21	4.55	6.18

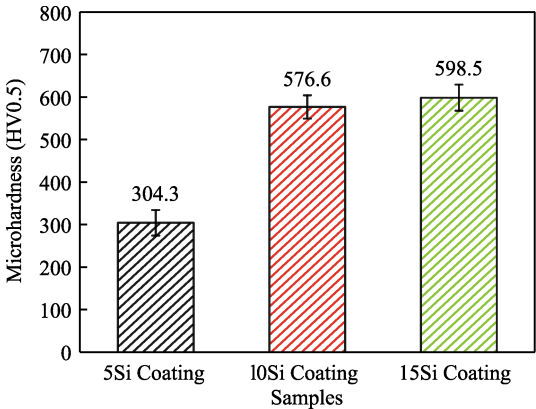


图 5 不同 Si 含量涂层的平均显微硬度
Fig.5 Average microhardness of coatings with different Si contents

有高硬度的金属硅化物 Fe₃Si 相, 使得其硬度明显高于 5Si 涂层。由涂层的显微组织 (图 4) 可知, 10Si、15Si 涂层的显微组织主要由等轴晶组成, 且晶粒尺寸和数量差别不大。二者的主要物相均为 Fe₃Si 相, 且 Fe₃Si 均位于晶粒内部, 因此二者的硬度差别不大, 其硬度高低主要区别于晶间。由于晶间的物相为 Fe-Cr 固溶体, 因此 Si 在晶间起到了固溶强化的作用, 15Si 涂层的晶间 (表 4 中位置 6) EDS 显示, 其 Si 含量高于 10Si 涂层, 因此 15Si 涂层的整体硬度略高于 10Si 涂层。

2.4 高温摩擦磨损性能

2.4.1 摩擦因数

5Si、10Si、15Si 涂层磨损试样的摩擦因数-距离曲线如图 6 所示。在开始阶段, 对磨环与试样之间的表面不平整, 存在氧化层, 导致开始运动前需要克服较大的摩擦力, 所以对磨环开始运动时摩擦因数出现了一个峰值。在高温环境下涂层发生软化现象^[29], 在外界载荷的作用下可能发生塑性变形, 导致其更容易适应接触面的形状, 从而摩擦因数降低。随着对磨环和试样开始进行相对滑动, 其摩擦因数呈逐渐下降趋势, 且趋于一个较低的稳定值。在整体磨合阶段, 3 种涂层摩擦因数曲线无明显差别。磨损距离为 300 m 左右时, 摩擦因数曲线出现明显的分离现象, 摩擦因数出现差别, 其中 5Si 涂层的摩擦因数曲线整体平稳, 10Si、15Si 涂层的摩擦因数曲线呈整体稳定下降趋势, 二者的摩擦因数分别在 480 m 和 520 m 左右才逐渐稳定, 这种现象可能是磨损机制不同所致。5Si、10Si、15Si 涂层在稳态磨损阶段的平均摩擦因数分别为 0.61、0.50、0.47, 可以看出涂层的摩擦因数随着 Si 元素含量的升高逐渐降低。

2.4.2 磨损性能

从图 7 可以看出, 5Si 涂层的磨损界面存在大量

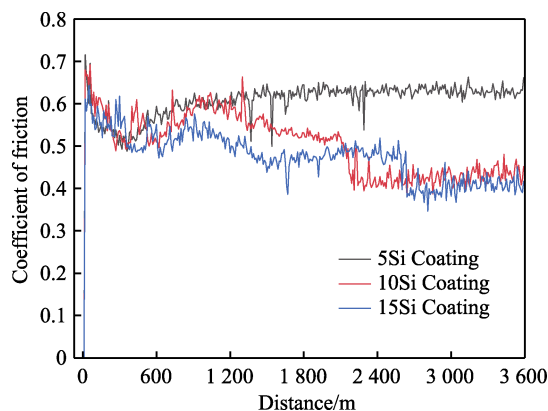


图 6 不同 Si 含量涂层的 COF-距离曲线
Fig.6 COF-distance curves for coatings with different Si contents

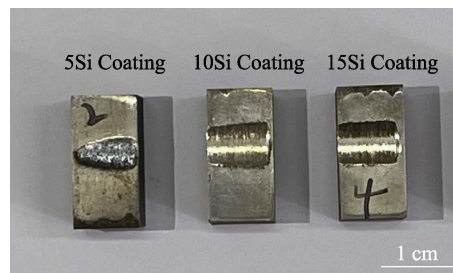


图 7 磨损实验后的 5Si、10Si、15Si 涂层试样
Fig.7 5Si, 10Si and 15Si coated samples after wear test

的黑色氧化物, 失去了金属光泽, 磨屑黏结在磨损表面, 出现了轻微烧损现象。15Si、10Si 涂层的磨损界面呈金属颜色, 其磨损量较大, 大量磨屑被排出。这是因为 10Si、15Si 涂层的物相主要由 Fe₃Si 相组成, Fe₃Si 相具有优秀的高温抗氧化性能。由此说明 Si 元素含量的提高能够增强涂层的抗氧化性^[28], 使涂层更适宜在高温环境下工作。

如图 8 所示, 5Si、10Si、15Si 涂层试样的磨损率分别为 3.10×10^{-5} 、 5.90×10^{-5} 、 7.39×10^{-5} g/m。由此可以看出, 5Si 涂层的耐磨性最佳, 随着 Si 元素含量的提高, 涂层的磨损率随之提高。由图 5 可知, 10Si、15Si 涂层的硬度高于 5Si 涂层的硬度, 但其磨损率大于 5Si 涂层的磨损率。主要原因: 虽然 Fe₃Si 的硬度较高, 但是其脆性较大, 导致涂层在磨损试验中大量剥落。同样, 在高温条件的氧化和腐蚀作用下, 涂层中的 Si 元素可能与氧气或其他化合物发生反应, 导致涂层降解和磨损加剧^[30]。

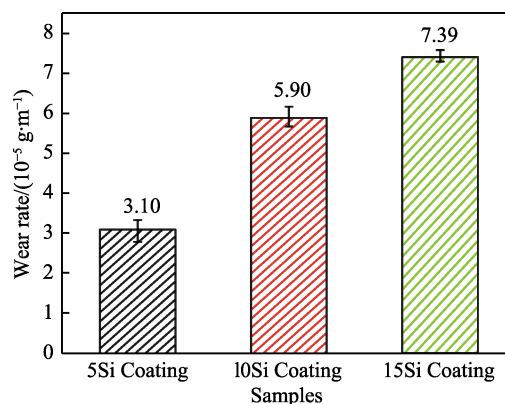


图 8 5Si、10Si、15Si 涂层磨损率
Fig.8 Wear rate of the 5Si, 10Si and 15Si coatings

2.4.3 磨损机理

5Si、10Si、15Si 涂层界面的磨损形貌、磨屑 SEM 检测和磨损机理如图 9 所示。如图 9a 所示, 5Si 涂层出现明显的断裂和分层, 以及明显的剥落坑和裂纹。随着磨损实验的进行, 磨屑在反复磨损作用下黏结在涂层表面, 并在高温下发生氧化, 其磨损形式主要为黏着磨损和氧化磨损^[31]。这是由于 5Si 涂层的硬度较

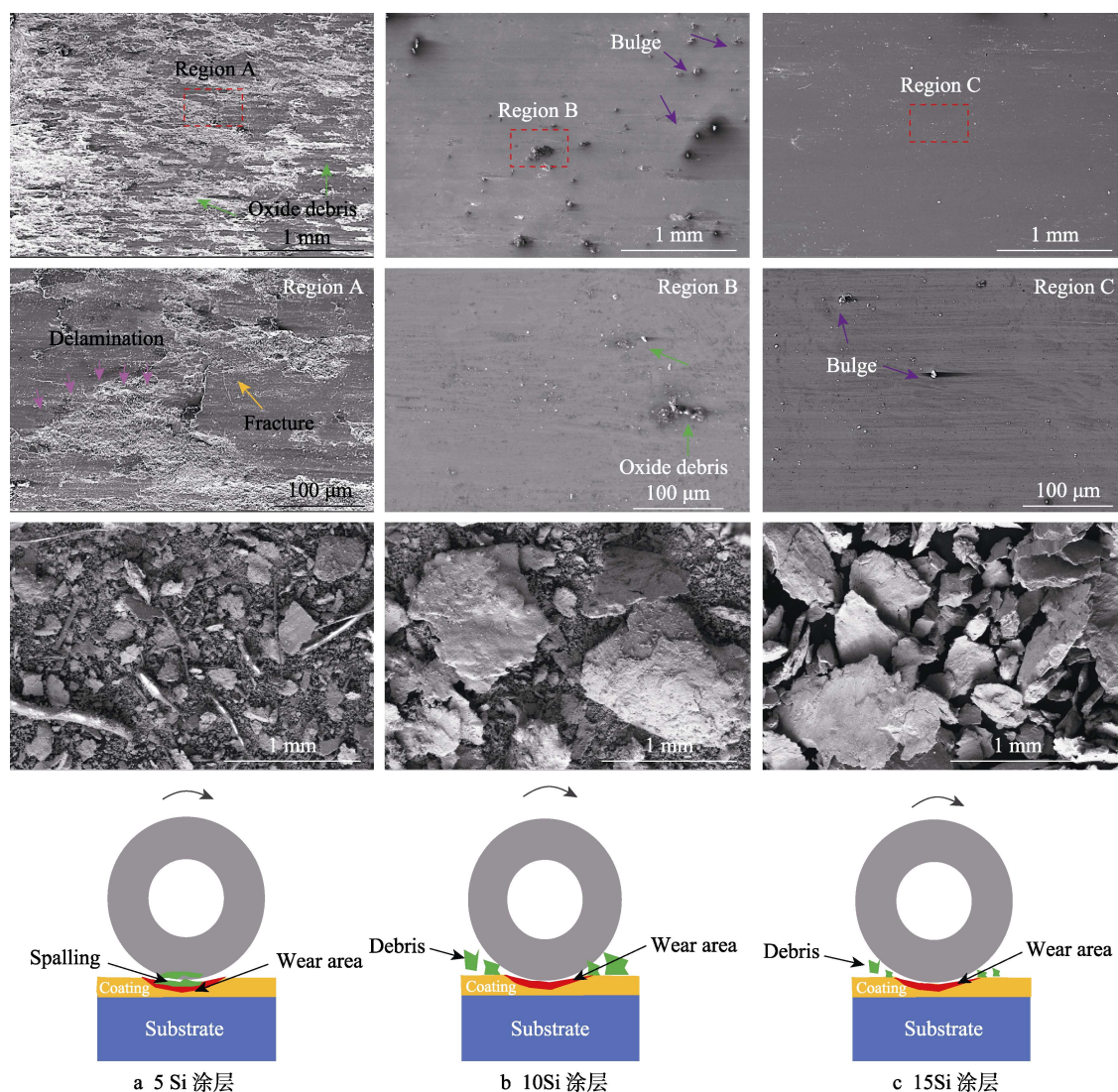


图9 不同 Si 含量涂层的磨损、磨屑 SEM 形貌和磨损机理
Fig.9 Morphology and wear mechanism of wear and chip SEM of coatings with different Si contents: a) 5Si coating; b) 10Si coating; c) 15Si coating

低, 容易发生塑性变形, 在法向载荷超过涂层的剪切强度时, 涂层表面发生变形和压缩, 导致涂层表面剥落, 并形成裂纹。同时, 在不断的相对滑动过程中, 逐渐形成了剥落坑, 塑性变形区和剥落坑的存在导致其摩擦因数更高^[32]。其中, 5Si 涂层的磨屑主要由粉尘和细小颗粒组成, 说明 5Si 涂层的剥落程度较低。如图 9b 所示, 在磨损试验过程中, 10Si 涂层表面并未出现大量剥落坑和黏结的氧化物磨屑, 涂层磨屑在磨粒磨损作用下不断排出, 发生了金属断裂现象, 出现少量凸起部分, 同时伴随着犁沟, 涂层表面较平整, 故摩擦因数低于 5Si 涂层, 磨屑形状主要为大块不规则形状和细小的颗粒。如图 9c 所示, 15Si 涂层表面相较于 10Si 涂层表面更加平整, 犁沟增多, 凸起部分更少, 这也导致其摩擦因数更低, 磨屑主要以大小不一的块状形式存在。在高温下, 10Si、15Si 涂层的磨损形貌并未出现大量氧化物, 这主要是因 Si 元素提高了涂层的高温抗氧化性^[33], 可见 10Si、15Si 涂

层的磨损形式均以磨粒磨损为主^[34]。综上所述, 以 γ -Fe 相为主的 5Si 涂层主要以黏着磨损和氧化磨损为主, 以 Fe_3Si 相为主的 10Si 和 15Si 涂层以磨粒磨损为主, 且随着 Si 元素的增加, 磨损程度增大。

3 结论

1) 通过激光熔覆制备的 5Si、10Si、15Si 涂层中, 5Si 涂层显微组织主要为树枝晶和等轴晶结构, 物相组成主要由 γ -Fe 和 Fe-Cr 固溶体组成。10Si、15Si 涂层显微组织主要为等轴晶结构, 物相组成主要由 Fe_3Si 和 Fe-Cr 固溶体组成。

2) 随着 Si 元素含量的提高, 涂层的硬度和磨损率都逐渐升高。这是由于 Fe_3Si 相在具有较高硬度的同时具有一定脆性, 在磨损过程中会发生严重剥落现象, 涂层的磨损率随之升高。

3) 5Si 涂层主要以黏着磨损和氧化磨损为主, 在

高温下其耐磨性能最佳,但其抗氧化性较差,硬度较低。10Si、15Si 涂层以磨粒磨损为主,且磨损率逐渐升高。三者相比,综合判定 10Si 涂层为最佳 Si 含量涂层。

参考文献:

- [1] 杨康,陈诚,徐国正,等. 冶金严苛服役环境中热喷涂技术的应用现状及展望[J]. 表面技术, 2022, 51(1): 16-32.
YANG K, CHEN C, XU G Z, et al. Application Status and Prospects of Thermal Spraying Technology in Metallurgical Field under Harsh Service Environment[J]. Surface Technology, 2022, 51(1): 16-32.
- [2] 白林,陈登福,刘鹏,等. 结晶器铜板表面耐磨纳米复合镀层的制备及性能[J]. 表面技术, 2017, 46(7): 7-12.
BAI L, CHEN D F, LIU P, et al. Preparation of Wear Resistant Nano Composite Coating on Surface of Copper Crystallizer[J]. Surface Technology, 2017, 46(7): 7-12.
- [3] 侯峰岩,任乔华,高锦岩. 连铸关键设备再制造技术及应用[J]. 中国表面工程, 2012, 25(4): 31-35.
HOU F Y, REN Q H, GAO J Y. Remanufacturing Technology in Continuous Casting Core Equipment and Its Application[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(4): 31-35.
- [4] 毕刚. 连铸结晶器铜板表面涂层热喷涂技术研究[J]. 表面技术, 2009, 38(4): 75-77.
BI G. Thermal Spraying Technology of Surface Coatings of the Continuous Casting Mould[J]. Surface Technology, 2009, 38(4): 75-77.
- [5] 秦铁玉,宋春燕,马汝成,等. Si 含量对 Fe-Cr-Si 系合金组织与耐蚀性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(8): 77-82.
QIN T Y, SONG C Y, MA R C, et al. Effect of Si Content on Microstructure and Corrosion Resistance of Fe-Cr-Si Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(8): 77-82.
- [6] 牛犇,郭春富,孙伟强,等. Cr5 冷轧辊堆焊修复技术研究[J]. 焊接技术, 2018, 47(4): 127-130.
NIU B, GUO C F, SUN W Q, et al. Study of Surfacing Repairing Technology of Cr5 Cold Roller[J]. Welding Technology, 2018, 47(4): 127-130.
- [7] RAY A, ARORA K S, LESTER S, et al. Laser Cladding of Continuous Caster Lateral Rolls: Microstructure, Wear and Corrosion Characterisation and On-Field Performance Evaluation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(8): 1566-1575.
- [8] 龙海洋,董真,卢冰文,等. WC 含量对激光熔覆 FeCoNiCr 高熵合金涂层组织结构及性能的影响规律研究[J]. 中国激光, 2023, 50(24): 107-116.
LONG H Y, DONG Z, LU B W, et al. Influence of WC Content on Microstructure and Properties of Laser-Cladded FeCoNiCr High-Entropy Alloy Coatings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(24): 107-116.
- [9] 马清,张艳梅,卢冰文,等. 激光熔覆硬质颗粒增强高熵合金复合涂层研究进展[J]. 材料研究与应用, 2021, 15(5): 583-592.
MA Q, ZHANG Y M, LU B W, et al. Research Progress of Hard Particle Reinforced High Entropy Alloy Composite Coatings Fabricated by Laser Cladding[J]. Materials Research and Application, 2021, 15(5): 583-592.
- [10] WENG F, CHEN C Z, YU H J. Research Status of Laser Cladding on Titanium and Its Alloys: A Review[J]. Materials & Design, 2014, 58: 412-425.
- [11] 常成,闫星辰, GARDAN J, 等. 激光选区熔化成形 Nano-WC/CX 钢微观组织及机械性能初探[J]. 材料研究与应用, 2021, 15(4): 309-317.
CHANG C, YAN X C, JULIEN G, et al. Exploration on the Microstructure and Mechanical Properties of the Selective Laser Melted Nano-WC/CX Steel[J]. Materials Research and Application, 2021, 15(4): 309-317.
- [12] 褚清坤,闫星辰,岳术俊,等. 激光选区熔化成形 Ti-12Mo-6Zr-2Fe (TMZF)合金微观组织及力学性能的研究[J]. 材料研究与应用, 2021, 15(4): 350-357.
CHU Q K, YAN X C, YUE S J, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Ti-12Mo-6Zr-2Fe (TMZF) Alloy Formed by Laser Selective Melting[J]. Materials Research and Application, 2021, 15(4): 350-357.
- [13] 由臣,陈民芳,孙家枢,等. Fe-Cr-Si 合金喷焊层组织及抗高温氧化机理研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2003, 26(6): 23-25.
YOU C, CHEN M F, SUN J S, et al. Study on Morphology and High Temperature Oxidation Mechanism of Fe-Cr-Si Alloy Spray-Welding Coating[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2003, 26(6): 23-25.
- [14] 孙彬,郝明欣,尤宏广,等. Fe-1Cr-0.2Si 钢的高温氧化行为[J]. 材料导报, 2020, 34(16): 16131-16135.
SUN B, HAO M X, YOU H G, et al. High Temperature Oxidation Behavior of Fe-1 Cr-0.2 Si Steel[J]. Materials Reports, 2020, 34(16): 16131-16135.
- [15] LONG J Y, DING W, YANG Y T. Research on the Corrosion Resistance and Mechanism of Fe-Cr-Si Alloy in Molten Aluminum[J]. Corrosion Science, 2022, 201: 110303.
- [16] LI Y J, DONG S Y, YAN S X, et al. Microstructure Evolution during Laser Cladding Fe-Cr Alloy Coatings on Ductile Cast Iron[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 108: 255-264.
- [17] 龙骏,郑志斌,郑开,等. Si 含量对 Fe-Cr 耐磨合金钢组织与性能的影响[J]. 铸造技术, 2018, 39 (3): 517-520.
LONG J, ZHENG Z B, ZHENG K, et al. Effects of Si Content on Microstructure and Properties of Fe-Cr Wear-Resisting Alloy Steels[J]. Foundry Technology, 2018, 39(3): 517-520.
- [18] ZHANG P L, LI M C, YAN H, et al. Microstructure Evolution of Ni-Mo-Fe-Si Quaternary Metal Silicide Alloy Composite Coatings by Laser Cladding on Pure Ni[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 785: 984-1000.
- [19] 贵永亮,张良,王振磊,等. Fe-Cr-Si 系合金的研究现状与展望[J]. 材料导报, 2013, 27(增刊 2): 343-345.

- GUI Y L, ZHANG L, WANG Z L, et al. Research Progress and Development of Fe-Cr-Si Alloy[J]. Materials Reports, 2013, 27(Sup.2): 343-345.
- [20] 秦铁玉, 宋春燕, 马汝成, 等. Fe-Cr-Si 系合金的组织 and 高温氧化行为研究[J]. 热加工工艺, 2023, 52(6): 62-66.
- QIN T Y, SONG C Y, MA R C, et al. Research on Microstructure and High-Temperature Oxidation Behavior of Fe-Cr-Si Alloy[J]. Hot Working Technology, 2023, 52(6): 62-66.
- [21] 董刚, 尤涵潇, 毛凯军, 等. Si 含量对激光熔覆 316L 工艺及腐蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2024, 53(3): 179-190.
- DONG G, YOU H X, MAO K J, et al. Effect of Si Element Content on the Manufacturing Process and Corrosion Performance of Laser Clad 316L[J]. Surface Technology, 2024, 53(3): 179-190.
- [22] WANG Q Q, BAI X D, SUN B, et al. Influence of Si on Tribological Behavior of Laser Cladded Fe-Based Amorphous/Crystalline Composite Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 405: 126570.
- [23] 李珂尧, 周健松, 王凌倩. B、Si 元素对激光熔覆 Fe-Cr-Mo-B-Si 非晶涂层的非晶形成能力及其摩擦学机理的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 192-202.
- LI K Y, ZHOU J S, WANG L Q. Effect of B and Si Elements on the Amorphous Formation Ability and Tribological Mechanism of Fe-Cr-Mo-B-Si Amorphous Coatings by Laser Cladding[J]. Surface Technology, 2020, 49(8): 192-202.
- [24] AUBRY P, BLANC C, DEMIRCI I, et al. Analysis of a Ni-Fe-Cr-Mo-Si Hardfacing Alloy Manufactured by Laser Cladding: Influence of the Iron Content on the Wear Resistance Properties[J]. Procedia CIRP, 2018, 74: 210-213.
- [25] JAGDHEESH R, KAMACHI MUDALI U, SASTIKUMAR D, et al. Laser Cladding of Si on Austenitic Stainless Steel [J]. Surface Engineering, 2005, 21(2): 113-118.
- [26] LIU H, SUN S F, ZHANG T, et al. Effect of Si Addition on Microstructure and Wear Behavior of AlCoCrFeNi High-Entropy Alloy Coatings Prepared by Laser Cladding [J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 405: 126522.
- [27] LIU X J, HE Y Q, CAO G M, et al. Effect of Si Content and Temperature on Oxidation Resistance of Fe-Si Alloys [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2015, 22(3): 238-244.
- [28] MAO H H, QI X, CAO J, et al. Effect of Si on High Temperature Oxidation of 30Cr13 Stainless Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2017, 24(5): 561-568.
- [29] LV Y H, LI J, TAO Y F, et al. High-Temperature Wear and Oxidation Behaviors of TiNi/Ti₂Ni Matrix Composite Coatings with TaC Addition Prepared on Ti₆Al₄V by Laser Cladding[J]. Applied Surface Science, 2017, 402: 478-494.
- [30] 周琦, 贾建刚, 赵红顺, 等. Fe₃Si 金属间化合物高温抗氧化性能研究[J]. 航空材料学报, 2011, 31(2): 72-78.
- ZHOU Q, JIA J G, ZHAO H S, et al. Oxidation Resistance at High Temperature of Fe₃Si Intermetallic[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(2): 72-78.
- [31] REN Z Y, HU Y L, TONG Y G, et al. Wear-Resistant NbMoTaWTi High Entropy Alloy Coating Prepared by Laser Cladding on TC4 Titanium Alloy[J]. Tribology International, 2023, 182: 108366.
- [32] PENG Z L, ZHANG J, ZHANG M J, et al. Laser In-Situ Preparation and Mechanical Properties of VC Reinforced Fe-Based Wear-Resistant Composite Cladding[J]. Ceramics International, 2022, 48(19): 28240-28249.
- [33] FENG Y Q, YE J L, FENG Y L, et al. Microstructure Evolution and High Temperature Oxidation Behavior of Laser Cladded Titanium-Based Composite Modified by Nb/Si Addition[J]. Surface and Coatings Technology, 2022, 444: 128677.
- [34] 马汝成, 贵永亮, 龙海洋, 等. 激光熔覆 FeCrSi_xNiCoC 涂层高温耐磨性能[J]. 中国表面工程, 2023, 36(1): 179-188.
- MA R C, GUI Y L, LONG H Y, et al. Wear Resistance of Laser Cladding FeCrSi_xNiCoC Coating at High Temperature[J]. China Surface Engineering, 2023, 36(1): 179-188.