高性能 316L-Al_2O_3 涂层的超高速激光熔覆及组织性能研究①

李沛扬[1]，魏祥[2]，陈志国[3]，谢宝军[1]

（1.中南大学 材料科学与工程学院，湖南 长沙 410083；2.湖南人文科技学院 能源与机电工程学院，湖南 娄底 417000；3.湖南开放大学 智能制造学院，湖南 长沙 410004）

摘　要：在 40Cr 钢棒表面通过超高速激光熔覆制备 Si 合金化的 316L-Al_2O_3涂层。采用光学显微镜、扫描电子显微镜、显微硬度计、摩擦磨损试验机和电化学工作站等研究了 Si 对涂层微观组织、显微硬度、耐磨和耐蚀性能的影响。结果表明，316L-Al_2O_3涂层主要由奥氏体和 Al_2O_3组成，Si 的加入细化了晶粒，同时涂层中生成了 FeSi 金属间化合物，涂层硬度提升了 18.97%；含 Si 的 316L-Al_2O_3涂层耐磨、耐蚀性均得到提高，其体积磨损量和自腐蚀电流密度分别为 19.1×10^{-3} mm^3和 6.93×10^{-8} A/cm^2。

关键词：超高速激光熔覆；316L-Al_2O_3；Si 合金化；耐磨性能；耐蚀性能；涂层；表面处理

中图分类号：TG174　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.27

文章编号：0253-6099(2026)01-0163-05

Research on Microstructure and Properties of High Performance 316L-Al_2O_3 Coating by Ultra-High-Speed Laser Cladding

LI Peiyang[1], WEI Xiang[2], CHEN Zhiguo[3], XIE Baojun[1]

(1.*School of Materials Science and Engineering*, *Central South University*, *Changsha* 410083, *Hunan*, *China*; 2.*School of Energy and Electromechanical Engineering*, *Hunan University of Humanities*, *Science and Technology*, *Loudi* 417000, *Hunan*, *China*; 3.*School of Intelligent Manufacturing*, *Hunan Open University*, *Changsha* 410004, *Hunan*, *China*)

Abstract: A 316L-Al_2O_3 coating with an introduction of Si was prepared on the surface of 40Cr steel bar by ultra-high-speed laser cladding. Effects of Si on the microstructure, microhardness, wear resistance and corrosion resistance of the coating were investigated by means of optical microscope, scanning electron microscope, microhardness tester, friction and wear testers, electrochemical workstation among others. The results show that the 316L-Al_2O_3 coating is mainly composed of austenite and Al_2O_3. And an addition of Si refines the grain size and also leads to the generation of FeSi intermetallic compounds in the coating, which increases the coating hardness by 18.97%. It is found that the Si-containing 316L-Al_2O_3 coating exhibits improved wear resistance and corrosion resistance, and its wear volume and self-corrosion current density are 19.1×10^{-3} mm^3 and 6.93×10^{-8} A/cm^2, respectively.

Key words: ultra-high-speed laser cladding; 316L-Al_2O_3; Si introduction; wear resistance; corrosion resistance; coating; surface treatment

在复杂工况下，40Cr 钢零部件表面极易发生腐蚀，并且由于其表面硬度偏低，也很容易发生严重磨损。采用表面工程技术在其表面制备耐磨、耐腐蚀涂层是解决上述难题的有效途径[1]。金属陶瓷由韧性金属和高硬陶瓷相组成，同时具备优异耐磨、耐蚀性能，是一种高性能涂层材料[2]。目前，制备金属陶瓷涂层的方法有热喷涂、气相沉积、激光熔覆和超高速激光熔覆[3-4]。其中，超高速激光熔覆在激光熔覆技术的基础上通过调整激光、粉材和熔池的相对位置，优化了粉体的熔凝形式和能量吸收比例，提高了材料的沉积速度，减少了对基体的热输入，可制备出无缺陷、高结合强度、低稀释率的涂层[5]。316L-Al_2O_3金属陶瓷材

① **收稿日期**：2025-08-24
基金项目：湖南省自然科学基金(2025JJ80339)；湖南省“双一流”学科建设项目(湘教通 2018-469 号)
作者简介：李沛扬(1999—)，男，湖北襄阳人，硕士研究生，主要研究方向为超高速激光熔覆涂层。E-mail:1195197796@qq.com
通信作者：魏祥(1988—)，男，湖南安化人，副教授，主要研究方向为高性能耐磨材料。E-mail:hnwxiang@126.com
陈志国(1969—)，男，湖南临澧人，教授，主要研究方向为新材料的微观组织设计与制备。E-mail:hngary@163.com

料在装备制造中已有广泛应用,但在涂层制备领域,该涂层与基体之间的热物理性能存在差异,在反复的熔化和凝固循环中会导致涂层产生残余应力和开裂。同时,Al_2O_3占比较高时,在制备过程中涂层表面还会出现氧化皮,降低涂层质量[6]。

研究发现,Si 可以在合金和陶瓷之间的界面富集,降低界面能和液相表面张力从而改善润湿性,进而抑制裂纹的形成;并且,Si 还能与金属元素(如 Fe、Cr、Ni 等)反应生成硬质金属硅化物,增强涂层的力学性能和耐磨性[7]。Si 元素形成的氧化膜也能降低腐蚀过程中离子的迁移速率,提升材料耐腐蚀性[8]。因此,为进一步改善 316L-Al_2O_3金属陶瓷涂层的熔覆质量,提高其性能,本文通过添加 Si,采用超高速激光熔覆在 40Cr 钢表面制备 Si 合金化的 316L-Al_2O_3金属陶瓷涂层,并研究 Si 元素对 316L-Al_2O_3涂层物相组成、微观组织结构、耐磨和耐蚀性能的影响。

1 实验材料及方法

采用调质态 40Cr 钢棒作为基体材料进行超高速激光熔覆。精车后钢棒的尺寸为 Φ50 mm×250 mm,熔覆前用无水乙醇清洁其表面。熔覆材料由 316L 粉末(粒径 70~100 μm)、Al_2O_3(粒径 50~70 μm)以及 Si 粉(粒径 5~20 μm)组成,纯度均不低于 99.9%,316L 粉末化学成分如表 1 所示。熔覆粉末成分组成如表 2 所示。用天平称取 3 种粉末,使用卧式混料机混合均匀,混粉时间为 8 h,球料比为 1∶1。实验前将熔覆粉末置于 90 ℃干燥箱中干燥 1 h。采用南京辉锐光电科技有限公司生产的移动式激光熔覆设备 Fumu 4kw 进行涂层制备,实验采取的工艺参数为:扫描速度 200 mm/s,送粉量 26 g/min,激光功率 2 100 W,搭接率 70%。

表 1 316L 粉末化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of 316L powder %

Cr	Ni	Mo	B	Si	Fe
18.0	10.5	2.0	0.8	0.5	余量

表 2 熔覆粉末成分组成(质量分数)

Table 2 Composition of cladding powder

熔覆粉末名称	成分组成
316L-Al_2O_3	316L+8%Al_2O_3
316L-Al_2O_3-2Si	316L+8%Al_2O_3+2%Si

采用电火花线切割从棒材表面切割出尺寸为 10 mm×10 mm×10 mm 的样品,经砂纸打磨抛光后用王水(浓盐酸与浓硝酸体积比 3∶1)腐蚀 25 s,使用 OLYMPUS BX53M 光学显微镜(OM)观察涂层截面金相组织,使用 TESCAN MIRA3 LMH 扫描电镜(SEM)观察分析涂层微观形貌,并用 EDS 检测元素含量。采用 D/Max2550 X 射线衍射仪(XRD)表征涂层物相组成,扫描速度为 4 (°)/min。使用岛津 HMV-2T 硬度计测量涂层截面硬度,沿垂直于熔覆层的方向每隔 50 μm 测试一个点,载荷为 1.96 N,保荷时间为 15 s。在 UMT-3 往复式摩擦磨损试验机上进行摩擦磨损实验,磨球为 Φ9.5 mm 的 Si_3N_4陶瓷球,载荷为 30 N,往复摩擦距离为 8 mm,摩擦时间为 40 min,频率为 0.5 Hz,根据 WYKO NT9100 光学轮廓仪测量摩擦磨损后涂层表面二维轮廓数据,计算涂层体积磨损量,并使用 Quanta-200 环境扫描电子显微镜(SEM)观察涂层摩擦磨损后的表面形貌。通过 Multi Autolab M204 电化学工作站对样品进行电化学测试,腐蚀液为3.5%的 NaCl 溶液,通过极化曲线和阻抗谱来表征涂层的耐蚀性,开路电位测试时间 15 min,极化曲线扫描范围为开路电位处±0.3 V,扫描速度 1 mV/s。阻抗谱测试频率范围为 10^{-2}~10^5 Hz,电压振幅±5 mV。

2 实验结果与讨论

2.1 涂层物相分析

图 1 为 316L-Al_2O_3涂层和 316L-Al_2O_3-2Si 涂层的 XRD 衍射图谱。由图 1 可知,316L-Al_2O_3涂层主要由奥氏体和 Al_2O_3组成。添加了 Si 粉后,316L-Al_2O_3-2Si 涂层中生成了 FeSi 金属间化合物。该化合物同时含有金属键和共价键,使得其兼具高硬度、耐磨、耐蚀等优异性能。

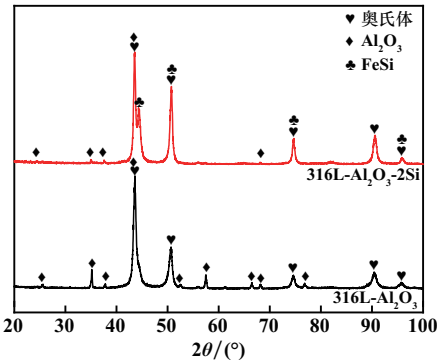


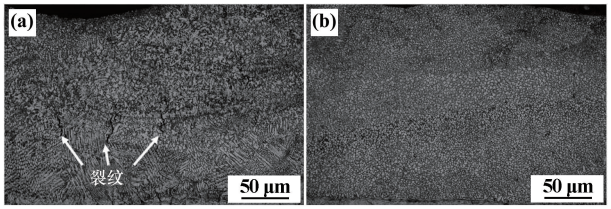
图 1 涂层 XRD 衍射图谱

Fig. 1 XRD patterns of coatings

2.2 涂层微观组织

涂层的显微组织照片如图 2 所示。由图 2 可知,316L-Al_2O_3涂层中形成了大量柱状晶和枝晶,并且涂

层中还出现了较多的裂纹；316L-Al_2O_3-2Si 涂层中裂纹消失，原先涂层中的柱状晶和枝晶转变为细小的等轴晶。由文献[9]可知，超高速激光熔覆 316L-Al_2O_3 涂层中产生的裂纹为凝固裂纹，枝晶的形成导致凝固过程中液态金属的流动受到阻碍，无法进行收缩补偿，最终在应力作用下引发开裂。添加 Si 后，合金粉末熔点降低，在激光作用下更容易达到熔化状态，改善了其润湿性和流动性[8]。

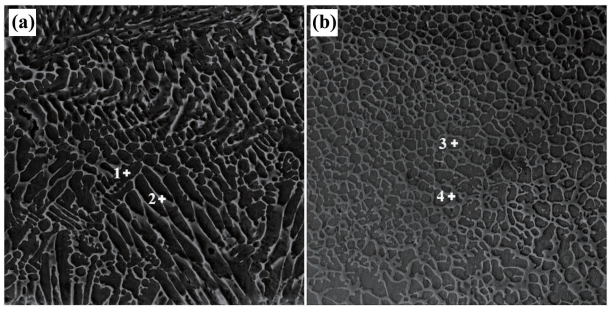


（a）316L-Al_2O_3；（b）316L-Al_2O_3-2Si

图 2　涂层显微组织照片

Fig. 2　Microstructures of coatings

涂层 SEM 照片见图 3，不同位点的 EDS 分析结果见表 3。由图 3 和表 3 可知，在涂层凝固过程中，Si 元素会在晶界处富集，阻碍了柱状晶和枝晶的生长[10]。同时部分晶粒也会以添加的 Si 粉作为结晶核心形核并长大，使得晶粒更加细小。



（a）316L-Al_2O_3；（b）316L-Al_2O_3-2Si

图 3　涂层 SEM 照片

Fig. 3　SEM images of coatings

表 3　涂层中不同位点 EDS 结果（质量分数）

Table 3　EDS analysis of different points of coatings　%

位点	Fe	Cr	Ni	Mo	Al	Si	O
1	85.63	8.07	4.17	0.67	0.41	0.48	0.57
2	78.56	11.78	5.77	2.07	0.32	0.66	0.84
3	68.56	18.48	10.34	1.12	0.49	0.80	0.20
4	66.43	18.08	11.30	2.15	0.27	1.55	0.22

2.3　涂层显微硬度分析

图 4 为涂层截面显微硬度分布图。由图 4 可知，基体 40Cr 钢的硬度为 345$HV_{0.2}$，316L-Al_2O_3 涂层的硬度为 580$HV_{0.2}$，是基体硬度的 1.7 倍。316L-Al_2O_3 涂层硬度的提高主要归因于涂层中弥散分布的 Al_2O_3 颗粒。在加入 2% 的 Si 粉后，涂层硬度达到了 690$HV_{0.2}$，较 316L-Al_2O_3 涂层硬度提升了 18.97%。涂层晶粒尺寸的减小是涂层硬度提高的主要原因，同时 Si 对 Fe 基体的固溶强化以及生成的 FeSi 金属间化合物均匀分布在涂层中也是涂层硬度提高的重要因素。

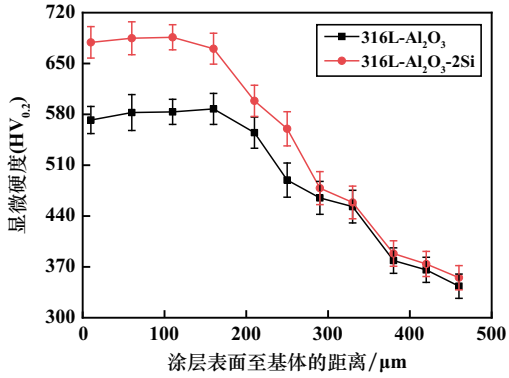


图 4　涂层截面显微硬度分布图

Fig. 4　Microhardness distribution of cross-section of coatings

2.4　涂层耐磨性能

图 5 为涂层磨痕二维轮廓图，表 4 为 2 种涂层的磨痕深度和体积磨损量。与 316L-Al_2O_3 涂层相比，316L-Al_2O_3-2Si 涂层体积磨损量降低了 21%，其耐磨性能优于 316L-Al_2O_3 涂层。316L-Al_2O_3-2Si 涂层耐磨性的增强归因于其本身更高的硬度以及涂层中裂纹的消失。

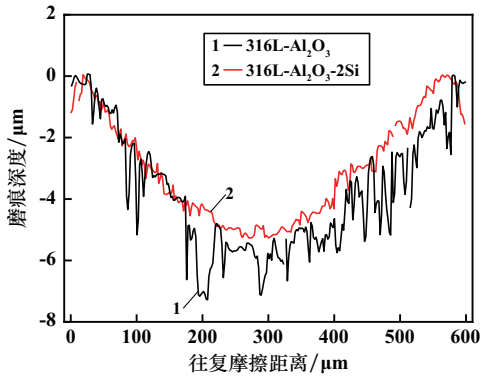


图 5　涂层磨痕二维轮廓图

Fig. 5　2D contour of coating abrasion

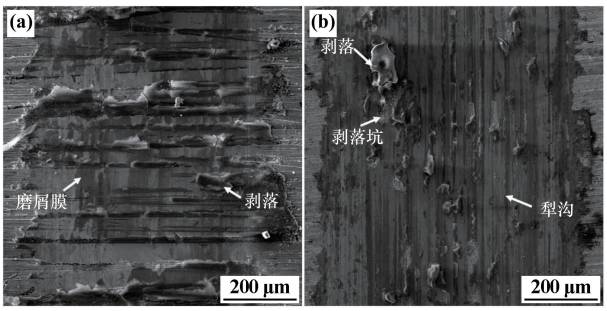
表 4　涂层磨痕深度和体积磨损量

Table 4　Wear depth and volume of coatings

涂层名称	磨痕深度/μm	体积磨损量/(10^{-3} mm^3)
316L-Al_2O_3	7.18	24.2
316L-Al_2O_3-2Si	5.24	19.1

涂层磨损表面整体形貌如图 6 所示。316L-Al_2O_3

涂层表面出现了大量的横向片状凸起，同时涂层表面产生了磨屑膜，磨屑膜产生的原因是涂层在摩擦的过程中磨球对 316L-Al_2O_3 涂层表面产生切削作用，大量磨屑在涂层处堆积生成一层磨屑层，当磨损切削进一步进行时，磨屑膜也会发生破碎，形成大量的凸起状碎片。因此 316L-Al_2O_3 涂层的磨损机制为氧化磨损和磨粒磨损。添加 2% 的 Si 后，由于涂层晶粒的细化作用，晶界面积增加，磨球切削作用时变形产生的位错都堆积在晶界处，形成应变强化，有效阻止了磨球的入侵，316L-Al_2O_3-2Si 涂层表面出现了一定程度剥落，形成了剥落坑，同时在磨粒的带动下，涂层表面也有犁沟产生，因此 316L-Al_2O_3-2Si 涂层的磨损机制主要为磨粒磨损和黏着磨损。



（a）316L-Al_2O_3；（b）316L-Al_2O_3-2Si

图 6 涂层磨损表面整体形貌

Fig. 6 Wear morphology of coatings

2.5 涂层耐蚀性能

图 7 为涂层在室温下置于 3.5%NaCl 溶液中测得的极化曲线。从图 7 可以看出，316L-Al_2O_3 涂层阳极部分的极化曲线出现了腐蚀电流迅速增大的点，表明发生了点蚀，这与涂层中存在裂纹有关。加入 Si 粉后，涂层自腐蚀电位正移，自腐蚀电流密度明显降低。

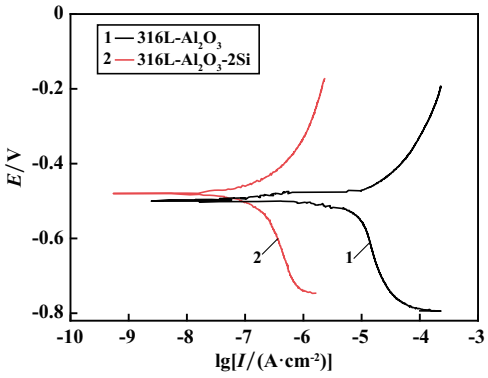


图 7 涂层极化曲线

Fig. 7 Polarization curve of coatings

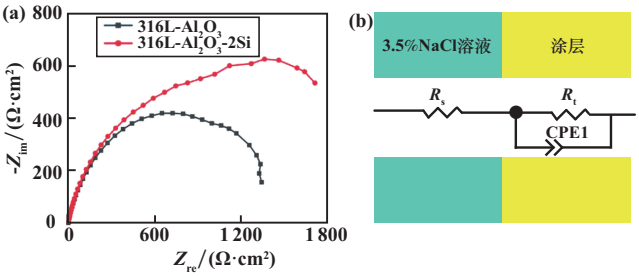
对图 7 的极化曲线进行 Tafel 拟合[11]，结果见表 5。由表 5 可知，316L-Al_2O_3-2Si 涂层的自腐蚀电流密度比 316L-Al_2O_3 涂层降低了 2 个数量级，表明 Si 的引入有效提升了熔覆层的耐腐蚀性能。316L-Al_2O_3-2Si 涂层腐蚀性能更好的原因是添加 Si 后，涂层裂纹消失，并且 Si 可以降低形成连续 Cr_2O_3 膜的临界 Cr 含量，有利于形成连续的 Cr_2O_3 保护膜，同时 Si 能形成 SiO_2 层，覆盖在原有的高 Cr 含量的不锈钢 Fe-Cr-O 钝化层上，只有破坏了这层 SiO_2 层，腐蚀破坏才能进一步进行[8]。

表 5 极化曲线拟合结果

Table 5 Fitting results of polarization curve

涂层名称	自腐蚀电位 E_{corr}/V	自腐蚀电流 I_{corr}/(A·cm^{-2})
316L-Al_2O_3	−0.51	7.15×10^{-6}
316L-Al_2O_3-2Si	−0.48	6.93×10^{-8}

图 8 为涂层的电化学阻抗谱及其等效电路图。从图 8(a)可以看出，316L-Al_2O_3-2Si 涂层的容抗弧半径比 316L-Al_2O_3 涂层的容抗弧半径大。容抗弧半径与耐蚀性呈正相关，容抗弧半径越大，发生腐蚀的阻力越大，说明 Si 合金化有效提升了 316L-Al_2O_3 涂层的耐蚀性。按照图 8(b)所示的等效电路对测得的阻抗数据进行拟合，电化学阻抗谱在等效电路中的拟合值如表 6 所示。等效电路图中，R_s 为电解液电阻，CPE1 为恒相位元件，通过等效电路图可以准确模拟涂层实际电化学的阻抗行为，R_t 为恒相位元件 CPE1 的电荷转移电阻，反映涂层中电子转移的难易程度[12]。从表 6 可知，相较于316L-Al_2O_3涂层，含Si涂层的电荷转移



（a）Nyquist 图；（b）等效电路图

图 8 涂层电化学阻抗谱及等效电路图

Fig. 8 Electrochemical impedance spectra and equivalent circuit of coatings

表 6 电化学阻抗谱在等效电路中的拟合值

Table 6 Fitting result of electrochemical impedance spectroscopy in equivalent circuits

涂层名称	R_s/(Ω·cm^2)	CPE1/(s^n·Ω^{-1}·cm^{-2})	n	R_t/(Ω·cm^2)
316L-Al_2O_3	7.510	4.7×10^{-4}	0.674	1 183
316L-Al_2O_3-2Si	9.313	4.3×10^{-4}	0.735	1 743

电阻提高了 47.3%。电荷转移电阻越大,电荷转移的难度越大,在动电位极化曲线中对应腐蚀发生时的自腐蚀电流越小,这说明电化学阻抗谱数据与动电位极化曲线数据吻合。

3　结论

1) 316L-Al_2O_3涂层由奥氏体和 Al_2O_3组成,添加 Si 粉后,涂层中生成了 FeSi 金属间化合物,同时涂层中柱状晶和枝晶向等轴晶转变,晶粒尺寸也变得细小。

2) 316L-Al_2O_3涂层的硬度为 580$HV_{0.2}$,加入 Si 粉后,涂层硬度提升了 18.97%,体积磨损量减少了 21%。316L-Al_2O_3涂层的磨损机制为氧化磨损和磨粒磨损,加入 Si 粉后,涂层的磨损机制为磨粒磨损和黏着磨损。

3) Si 的添加有效提高了 316L-Al_2O_3涂层的耐腐蚀性能,316L-Al_2O_3-2Si 涂层的电荷转移电阻和自腐蚀电流密度分别为 1 743 Ω·cm^2和 6.93×10^{-8} A/cm^2,与 316L-Al_2O_3涂层相应值(1 183 Ω·cm^2和 7.15×10^{-6} A/cm^2)相比,分别提升了 47.3%和降低了 2 个数量级。

参考文献(References):

[1] 衷水平,朱焕林,杨蕾,等. 锂电铜箔防氧化抗腐蚀处理技术研究现状[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):145-150.
ZHONG Shuiping, ZHU Huanlin, YANG Lei, et al. Research status of anti-oxidation and anti-corrosion treatment technology for LIBs copper foil[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(3):145-150.

[2] LIU G Z, ZHOU S X, WANG C S, et al. Fabrication and characterization of SiC/Al composites prepared by laser powder bed fusion (LPBF) combined with vacuum pressure infiltration[J]. Materials & Design, 2023,236:112495.

[3] WANG Y M, ZHANG W, CHEN D Q, et al. High temperature friction and wear performance of TiB_2-50Ni composite coating sprayed by HVOF technique[J]. Surface and Coatings Technology, 2021,407:126766.

[4] ZHANG Z H, WANG X, ZHANG Q Q, et al. Fabrication of Fe-based composite coatings reinforced by TiC particles and its microstructure and wear resistance of 40Cr gear steel by low energy pulsed laser cladding[J]. Optics & Laser Technology, 2019,119:105622.

[5] 石锋,魏祥,陈志国,等. 超高速激光熔覆 Al_2O_3-316L 涂层工艺优化及耐腐蚀性能研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):178-182.
SHI Feng, WEI Xiang, CHEN Zhiguo, et al. Corrosion resistance of Al_2O_3-316L coatings based on optimized extreme high-speed laser cladding technology[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):178-182.

[6] BETTS J C, MORDIKE B L, GRECH M. Characterisation, wear and corrosion testing of laser-deposited AISI 316 reinforced with ceramic particles[J]. Surface Engineering, 2010,26(1/2):21-29.

[7] 王海威,肖文波. 高速激光熔覆 FeCoCrNiMn 高熵合金熔覆层组织及耐磨性研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):148-152.
WANG Haiwei, XIAO Wenbo. Microstructure and wear resistance of FeCoCrNiMn high-entropy alloy coating by high-speed laser cladding technology[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(5):148-152.

[8] 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 Gang, YOU Hanxiao, MAO Kaijun, 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.

[9] LI Q S, CUI J, YANG Y F, et al. Enhanced surface wettability modification of Al_2O_3 for laser cladding ceramic-metal composite coatings[J]. Materials Today Communications, 2024,40:109746.

[10] 尹燕,茹恩光,刘鹏宇,等. 激光熔覆 $FeAlCrNiSi_x$高熵合金涂层的显微组织与耐蚀性能[J]. 中国有色金属学报, 2024,34(4):1300-1307.
YIN Yan, RU Enguang, LIU Pengyu, et al. Microstructure and corrosion resistance of laser cladding $FeAlCrNiSi_x$ high entropy alloy coating[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024,34(4):1300-1307.

[11] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 3 版. 北京:化学工业出版社, 2008.
CAO Chunan. Principles of electrochemistry of corrosion[M]. 3rd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.

[12] SOTNICZUK A, KUCZYNSKA-ZEMLA D, KROLIKOWSKI A, et al. Enhancement of the corrosion resistance and mechanical properties of nanocrystalline titanium by low-temperature annealing[J]. Corrosion Science, 2019,147:342-349.

引用本文:李沛扬,魏祥,陈志国,等. 高性能 316L-Al_2O_3涂层的超高速激光熔覆及组织性能研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):163-167.
LI Peiyang, WEI Xiang, CHEN Zhiguo, et al. Research on microstructure and properties of high performance 316L-Al_2O_3 coating by ultra-high-speed laser cladding[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):163-167.