

# 超高速激光熔覆 $\text{Al}_2\text{O}_3$ -316L 涂层工艺优化及耐腐蚀性能研究<sup>①</sup>

石锋<sup>1</sup>, 魏祥<sup>2</sup>, 陈志国<sup>3</sup>, 李沛扬<sup>1</sup>, 谢宝军<sup>1</sup>, 夏敬尧<sup>2</sup>

(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:** 使用超高速激光熔覆技术在 Ti6Al4V 棒材表面制备  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -316L 涂层。研究了扫描速度和送粉速度对单道熔覆涂层质量的影响, 以及 316 粉末含量对多道熔覆涂层质量和耐腐蚀性能的影响。结果表明, 制备涂层的适宜工艺参数为: 扫描速度 250 mm/s、送粉速度 8 g/min。当 316L 粉末含量(质量分数)为 20% 时, 涂层质量最佳。所有  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -316L 涂层的耐腐蚀性能都优于基体, 且随着 316L 粉末含量增加, 其耐腐蚀性能先上升后下降, 当 316L 粉末含量为 20% 时, 涂层的电化学阻抗为基体的 2.27 倍。

**关键词:** 表面处理; 氧化铝涂层; 316L; 激光熔覆; 熔覆涂层; 工艺参数; 耐腐蚀性能

中图分类号: TG174; TB302

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.02.032

文章编号: 0253-6099(2025)02-0178-05

## Corrosion Resistance of $\text{Al}_2\text{O}_3$ -316L Coatings Based on Optimized Extreme High-Speed Laser Cladding Technology

SHI Feng<sup>1</sup>, WEI Xiang<sup>2</sup>, CHEN Zhiguo<sup>3</sup>, LI Peiyang<sup>1</sup>, XIE Baojun<sup>1</sup>, XIA Jingyao<sup>2</sup>

(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:** Extreme high-speed laser cladding (EHLA) technology was used to prepare  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -316L coatings on Ti6Al4V rods. The effects of scanning speed, powder feeding rate on single-track coating quality, and 316L powder content on multi-track coating quality and corrosion resistance were explored. Results show that with the following optimum process parameters, including scanning speed of 250 mm/s and powder feeding rate of 8 g/min, the coating can present superior quality with the 316L powder in a mass fraction of 20%. It is shown that all  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -316L coatings exhibit superior corrosion resistance compared to the substrate. As 316L content increases, the corrosion resistance of coatings increases followed by decline. With 316L powder in a mass fraction of 20%, the electrochemical impedance of the coating is 2.27 times that of the substrate.

**Key words:** surface treatment; alumina coating; 316L; laser cladding; cladding coating; process parameter; corrosion resistance

在高盐雾、强腐蚀介质及动态载荷耦合作用下, Ti6Al4V 合金的抗腐蚀性能与长期服役稳定性面临劣化风险, 严重制约其在工程中的实际应用<sup>[1]</sup>。在 Ti6Al4V 合金表面制备涂层已成为增强其耐腐蚀性的主要方法<sup>[2-3]</sup>。激光熔覆技术可以实现涂层与基体之

间的冶金结合<sup>[4]</sup>, 在生产耐腐蚀和耐磨涂层方面具有巨大的潜力<sup>[5]</sup>。超高速激光熔覆技术通过重新设计同轴送粉喷嘴, 使得大部分能量作用于粉末颗粒上<sup>[6]</sup>。相较于传统的激光熔覆技术, 超高速激光熔覆技术制备的涂层表面粗糙度更低、加工效率更高、涂层

① 收稿日期: 2024-09-27

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: 石锋(1998—), 男, 浙江宁波人, 硕士研究生, 主要研究方向为超高速激光熔覆涂层。E-mail: sy220114@163.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

晶粒更加细小,在一定程度上提高了涂层性能<sup>[7]</sup>。然而,由于冷却速度过快,涂层中可能出现裂纹和孔隙等缺陷<sup>[8]</sup>。腐蚀介质可通过这些裂纹和孔隙渗入涂层,导致涂层合金耐腐蚀性能显著下降<sup>[9]</sup>。减少涂层中裂纹和孔隙数目是增强其耐腐蚀性能的有效方法。研究表明,合适的扫描速度和送粉速度可以降低涂层中的残余应力<sup>[10-11]</sup>,从而降低裂纹产生的概率,制备出低缺陷、高密度的熔覆涂层。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层具有优异的耐腐蚀性能,但容易出现开裂和剥落等问题,316L 粉末具有良好的熔焊性和成型性,有望改善 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 涂层开裂的问题。因此,本文采用超高速激光熔覆技术在 Ti6Al4V 棒材上制备 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-316L 涂层,研究送粉速度和扫描速度对涂层质量的影响,并研究 316L 粉末含量对涂层耐腐蚀性能的影响。

## 1 实验材料及方法

实验选用 Ti6Al4V 棒材作为基体,其尺寸为  $\Phi 50$  mm (外径)  $\times$  220 mm (长度),实验前先对基体材料进行精车,然后用无水乙醇清洗其表面。熔覆粉末为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-316L 混合粉末,各涂层熔覆粉末中 316L 粉末质量分数见表 1,各涂层熔覆粉末化学成分如表 2 所示,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末粒径 75~100  $\mu$ m,316L 粉末粒径 35~45  $\mu$ m。实验前,将 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末和 316L 粉末用球磨机均匀混合,球料比为 1:1 (其中  $\Phi 9$  mm 球、 $\Phi 5$  mm 球、 $\Phi 3$  mm 球质量比为 2:5:3)。然后将熔覆粉末置于 100  $^{\circ}$ C 干燥箱中干燥 1 h。

表 1 各涂层熔覆粉末中 316L 粉末含量

Table 1 316L powder content in cladding powder for each coating

涂层编号	316L 粉末含量(质量分数)/%
A1	10
A2	20
A3	30
A4	40

表 2 各涂层熔覆粉末化学成分(质量分数)

Table 2 Chemical composition of cladding powder for each coating %

名称	Si	O	Cr	Mo	Ni	Fe	Al
A1	0.03	42.30	1.60	0.15	1.30	7.01	余量
A2	0.08	37.60	3.31	0.33	2.25	14.11	余量
A3	0.10	32.94	4.93	0.49	3.40	21.05	余量
A4	0.21	28.23	6.63	0.65	4.54	28.04	余量

采用移动式激光熔覆设备,以 A2 涂层材料制备不同送粉速度和扫描速度的单道熔覆涂层,工艺参数如表 3 所示。筛选出合适的送粉速度和扫描速度后,

使用该参数制备不同 316L 粉末含量(质量分数,下同)的多道熔覆涂层。

表 3 实验工艺参数

Table 3 Process parameters in tests

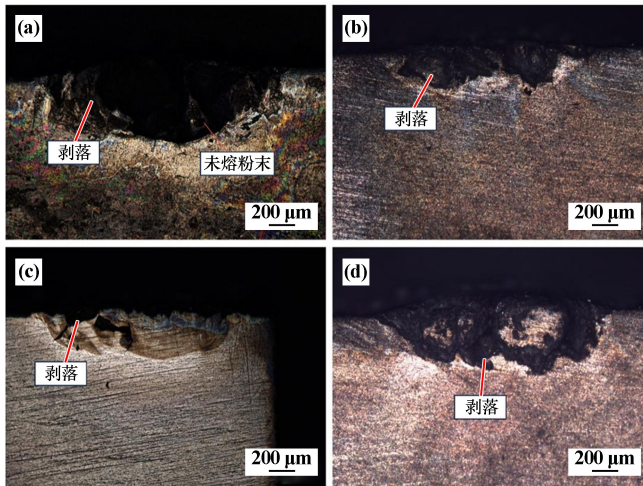
序号	扫描速度/(mm $\cdot$ s <sup>-1</sup> )	送粉速度/(g $\cdot$ min <sup>-1</sup> )
1	350	10
2	300	10
3	250	10
4	200	10
5	250	12
6	250	10
7	250	8
8	250	6

采用电火花切割技术从棒材表面切割出尺寸为 10 mm  $\times$  10 mm  $\times$  10 mm 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-316L 涂层样品,使用 Leica DM4M 金相显微镜观察单道涂层和多道涂层截面显微组织;采用 D/Max2550 X 射线衍射仪表征涂层物相;采用 Multi Autolab/M204 电化学工作站测定室温下涂层的耐腐蚀性能,并使用其自带的软件进行数据分析,工作站由标准三电极体系组成,以铂电极为辅助电极,以饱和甘汞电极(SCE)为参比电极,待测试样为工作电极。腐蚀液为质量分数 3.5% 的 NaCl 溶液。开路电位测试时间为 15 min,极化曲线测试范围为开路电位(OCP)处  $\pm 0.5$  V,扫描速度为 0.5 mV/s。电化学阻抗谱测试在 OCP 附近进行,频率范围为 10<sup>-2</sup>~10<sup>5</sup> Hz,电压振幅为  $\pm 5$  mV。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 扫描速度对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-316L 涂层形貌的影响

送粉速度 10 g/min,以 A2 为涂层材料,不同扫描速度下的单道熔覆涂层横截面形貌如图 1 所示。扫描速度 350 mm/s 时,部分熔融粉末包裹着未熔化的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末沉积在基体表面,被包裹的粉末颗粒无法继续受到激光能量作用以颗粒的形式存在于涂层内部,导致涂层结合力变差,涂层出现了大量剥落。扫描速度 300 mm/s 时,粉末与激光有更多时间接触,从而均匀地受热熔化沉积在基体表面,但在涂层中还是出现了较多的剥落,其原因是涂层凝固速度较快,基体和涂层内部产生较大的热应力,导致裂纹产生。扫描速度 250 mm/s 时,粉末熔融充分,熔池稳定形成,涂层中热应力释放充分,未产生较大的宏观剥落。扫描速度 200 mm/s 时,熔融粉末沉积较慢,基体可以接受更多激光能量,从而引起熔池扩大,降低涂层质量。适宜的扫描速度为 250 mm/s。



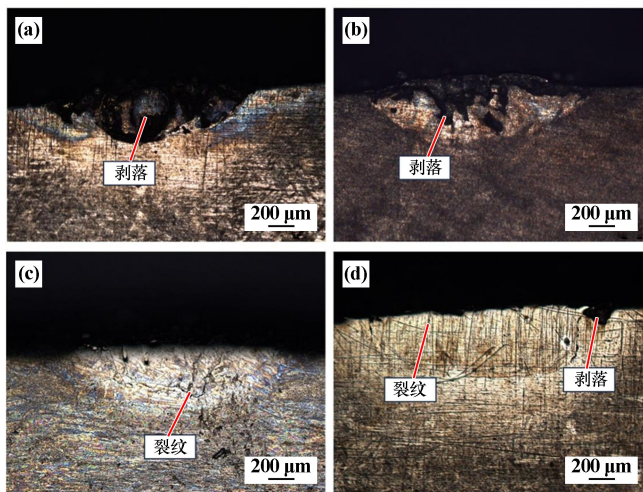
(a) 350 mm/s; (b) 300 mm/s; (c) 250 mm/s; (d) 200 mm/s

图1 不同扫描速度下的单道熔覆涂层横截面形貌

Fig. 1 Cross-sectional morphology of single-track clad coatings at different scanning speeds

## 2.2 送粉速度对 $Al_2O_3$ -316L 涂层形貌的影响

扫描速度 250 mm/s, 以 A2 为涂层材料, 不同送粉速度下的单道熔覆涂层横截面形貌如图 2 所示。送粉速度 12 g/min 时, 涂层中出现了较大剥落, 这是由于送粉速度较高, 粉末数量过多而激光能量不足, 未能完全将粉末熔化, 粉末与基体之间的结合力较差, 从而出现了较大剥落。送粉速度 10 g/min 时, 涂层剥落现象明显减少, 仅在涂层中出现少量的剥落和气孔。送粉速度为 8 g/min 时, 可以观察到涂层中仅存在一条垂直裂纹, 没有明显的气孔和剥落现象, 说明工艺参数适配, 制备的涂层质量好。送粉速度 6 g/min 时, 涂层表面出现了不完整剥落以及少量裂纹和孔洞, 涂层表面



(a) 12 g/min; (b) 10 g/min; (c) 8 g/min; (d) 6 g/min

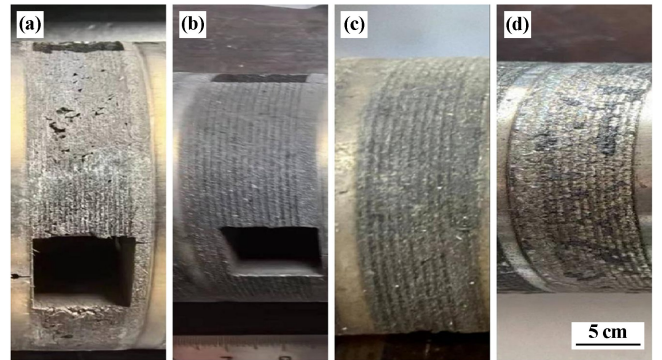
图2 不同送粉速度下的单道熔覆涂层横截面形貌

Fig. 2 Cross-sectional morphology of single-track clad coatings at different powder feeding speeds

的剥落是送粉量不够导致此处粉末分布不均匀产生的。适宜的送粉速度为 8 g/min。

## 2.3 316L 粉末含量对涂层多道熔覆形貌的影响

图 3 为不同 316L 粉末含量多道熔覆涂层的表面形貌。A1 涂层表面出现了宏观裂纹, A2、A3 涂层表面宏观质量较好, 没有观察到裂纹和宏观剥落的现象, A4 涂层表面未出现宏观剥落和裂纹, 但表面出现了黑色块状物质, 用毛刷刷掉后, 内部涂层形貌较差, 高低不平。

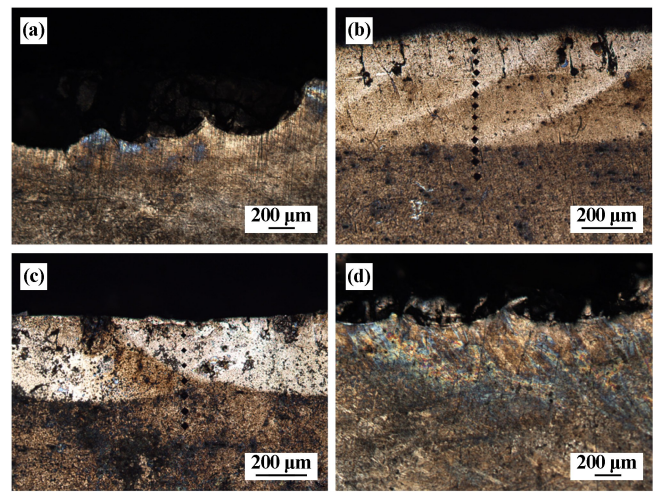


(a) A1 涂层; (b) A2 涂层; (c) A3 涂层; (d) A4 涂层

图3 不同 316L 粉末含量多道熔覆涂层的表面形貌

Fig. 3 Surface morphology of multi-track clad coatings with different 316L contents

图 4 为不同 316L 粉末含量多道熔覆涂层的截面形貌。宏观剥落与截面形貌相对应, A1 涂层截面形貌呈现出一片空洞, A2 涂层厚 500.3  $\mu\text{m}$ , A3 涂层厚 424.2  $\mu\text{m}$ 。相较于 A3 涂层, A2 涂层裂纹和孔洞较少。A4 涂层存在剥落现象, 但相较于 A1 涂层, 其剥落情况较轻, 仅有少量区域发生了剥落。综合涂层剥



(a) A1 涂层; (b) A2 涂层; (c) A3 涂层; (d) A4 涂层

图4 不同 316L 粉末含量多道熔覆涂层的截面形貌

Fig. 4 Cross-sectional morphology of multi-track clad coatings with different 316L contents

落情况以及裂纹和孔洞可以看出,316L 粉末含量为 20%时,涂层质量很好。

### 2.4 涂层显微组织分析

图 5 为不同 316L 粉末含量涂层的 XRD 图谱。由图 5 可知,涂层主要由 Al<sub>1.98</sub>Cr<sub>0.02</sub>O<sub>3</sub> 以及 TiO<sub>2</sub>、V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 组成。在熔覆过程中,当温度升高到 1 050 °C 时,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 316L 粉末中的 Cr 元素发生反应生成 Al<sub>1.98</sub>Cr<sub>0.02</sub>O<sub>3</sub> 相,Al<sub>1.98</sub>Cr<sub>0.02</sub>O<sub>3</sub> 相能提高陶瓷涂层的结合强度<sup>[12]</sup>,并且在激光熔覆过程中,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 会完全转变为稳定的 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相。部分基体上的 Ti 元素和 V 元素与粉末中的 O 元素发生反应,生成 TiO<sub>2</sub>、V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 等氧化物,这些氧化物分布在涂层中,可提升涂层硬度。其中 A4 涂层的衍射峰强最低,这是因为当 316L 粉末含量增大到 40%时,Fe 元素含量增大,涂层中 Fe 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 发生反应,在涂层表面形成了氧化膜,该氧化膜与涂层结合不紧密,会完全脱落,其衍射峰强度最低,且由于大部分 O 元素会与 Fe 发生反应,TiO<sub>2</sub> 和 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 衍射峰强度也有所下降。

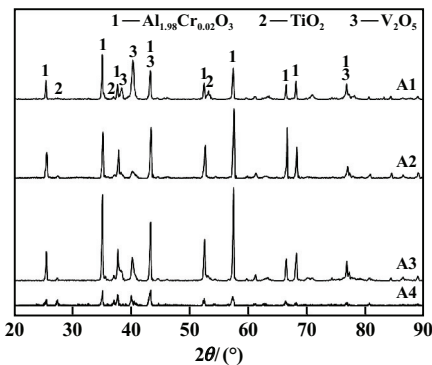


图 5 不同 316L 粉末含量涂层的 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of coatings with different 316L contents

### 2.5 耐腐蚀性能

图 6 为不同 316L 粉末含量涂层和 Ti6Al4V 基体的极化曲线。从图 6 可以看出,添加了 316L 粉末的涂层自腐蚀电位都大于基体,这说明涂层相较于基体更不容易被腐蚀。这主要是因为 316L 粉末受热熔化后均匀地分散在整个液相中,可以作为缓冲区降低 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉末和 Ti6Al4V 基体之间的热物理性质差异,减少裂纹和孔洞的产生,使得涂层具有更好的质量。但是在 A1、A2、A3、A4 涂层极化曲线中仍能观察到点蚀现象的发生,其原因可能是涂层中存在微裂纹,裂纹处发生了点蚀。本文选用 Tafel 外推法<sup>[13]</sup>来计算涂层的自腐蚀电位和自腐蚀电流,计算结果如表 4 所示。A1、A2、A3、A4 涂层的自腐蚀电位均高于 Ti6Al4V 基体,而自腐蚀电流均低于 Ti6Al4V 基体。自腐蚀电位越高,自腐蚀电流越低,说明涂层的耐腐蚀性能越好。

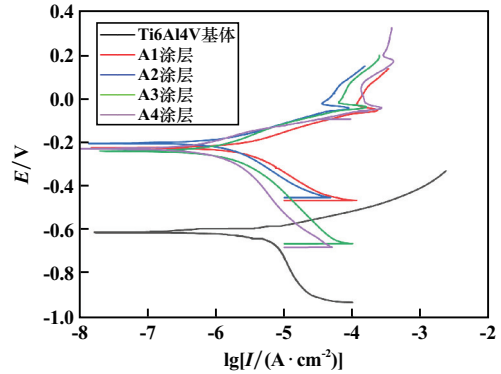


图 6 不同 316L 含量涂层和 Ti6Al4V 基体的极化曲线

Fig.6 Polarization curves of coatings with different 316L contents and Ti6Al4V substrate

表 4 不同 316L 粉末含量涂层和基体的极化曲线拟合值

Table 4 Fitting values of polarization curves for coatings with different 316L contents and Ti6Al4V substrate

样品名称	自腐蚀电位 $E_{cor}$ (V <sub>SCE</sub> )	自腐蚀电流 $I_{cor}$ / (A · cm <sup>-2</sup> )
A1 涂层	-0.227	$1.106 \times 10^{-6}$
A2 涂层	-0.194	$1.211 \times 10^{-6}$
A3 涂层	-0.233	$7.269 \times 10^{-7}$
A4 涂层	-0.214	$2.146 \times 10^{-6}$
Ti6Al4V 基体	-0.595	$6.651 \times 10^{-6}$

图 7 为不同 316L 粉末含量涂层和基体的电化学阻抗谱及其等效电路图。 $R_s$  为电解液电阻, $R_i$  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。涂层表面具有一定粗糙度,且涂层表面不均匀,容易出现多种电化学过程并存的情况(如电荷传递、扩散等),因此引入恒相位元素 CPE1 可以更准确模拟实际电化学的阻抗行为,使得 ECM 模型与实验数据更贴切。表 5 为对应等效电路中元器件的拟合数据,高阻抗代表涂层耐腐蚀性能好。结果表明,掺杂

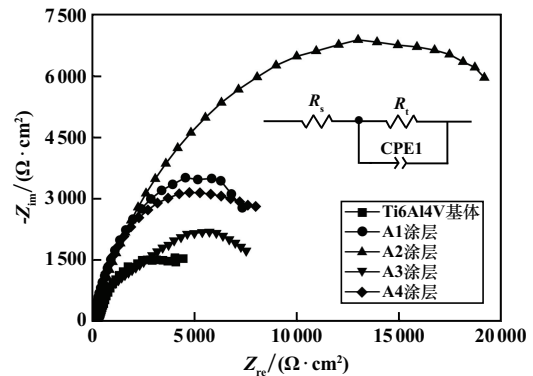


图 7 不同 316L 粉末含量涂层和基体的电化学阻抗谱及等效电路图

Fig.7 Electrochemical impedance spectra and equivalent circuit diagrams of coatings with different 316L contents

表5 电化学阻抗谱数据在等效电路中的拟合值

Table 5 Fitting values of electrochemical impedance spectroscopy data in equivalent circuit

样品名称	$R_s/$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	CPE1/ ( $\text{Ss}^n \cdot \text{cm}^{-2}$ )	$n_p$	$R_i/$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )
Ti6Al4V 基体	4.197	$8.02 \times 10^{-5}$	0.750	10 232
A1 涂层	9.617	$5.92 \times 10^{-5}$	0.653	7 081
A2 涂层	9.086	$9.38 \times 10^{-5}$	0.627	23 228
A3 涂层	11.91	$2.85 \times 10^{-4}$	0.664	12 242
A4 涂层	14.82	$4.14 \times 10^{-4}$	0.614	6 179

316L 粉末后,部分涂层阻抗低于 Ti6Al4V 基体,这与自腐蚀电位和自腐蚀电流观察到的结果不一致。阻抗表示电荷在涂层中转移的难度,A1、A4 涂层表面分布有裂纹,在这些裂纹处电荷转移难度小,因此 A1、A4 涂层的电化学阻抗小于基体;而 A2、A3 涂层致密,缺陷少,当涂层表面发生腐蚀时,316L 粉末中 Cr、Mo、Ni 等元素会在涂层表面形成氧化膜,阻止电荷转移,电荷转移难度大,因此,A2、A3 涂层的电化学阻抗大于基体。其中 A2 涂层的电化学阻抗最高,是基体的 2.27 倍。

### 3 结论

1) 扫描速度 250 mm/s、送粉速度 8 g/min 时,熔池稳定性显著改善,涂层内部热应力有效释放,缺陷(裂纹、孔洞)数量较少,表明该参数组合为制备涂层适宜的工艺参数。

2) 316L 粉末含量为 20%时,涂层中  $\text{Al}_{1.98}\text{Cr}_{0.02}\text{O}_3$  相的生成有效缓解了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基体的脆性开裂倾向,同时  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{V}_2\text{O}_5$  等氧化物均匀分布,显著提升涂层致密性,此时涂层厚度达 500.3  $\mu\text{m}$ ,裂纹与剥落现象少,涂层质量优。

3)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -316L 涂层的腐蚀倾向低于基体 Ti6Al4V 棒材,涂层的自腐蚀电位均高于 Ti6Al4V 基体,电化学阻抗在 6 179~23 228  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  之间。A2 涂层的电化学阻抗最高,是基体的 2.27 倍。

### 参考文献(References):

- [1] THATO S T, SAMUEL O A, EUGENE O, et al. Additive manufacturing of titanium-based alloys: A review of methods, properties, challenges, and prospects[J]. Heliyon, 2022,8(3):09401.
- [2] 杨军,谢小龙,汪蓬勃,等. 超音速微粒轰击对 Q355NH 耐候钢表面结构及电化学腐蚀性能的影响[J]. 矿冶工程, 2020,40(1):130-137.  
YANG Jun, XIE Xiaolong, WANG Pengbo, et al. Effect of supersonic fine particles bombarding on the surface structure and electrochemical corrosion behavior of Q355NH weathering steel[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(1):130-137.
- [3] 衷水平,朱煥林,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.
  - [4] NIE M H, ZHANG S, WANG Z Y, et al. Effect of laser power on microstructure and interfacial bonding strength of laser cladding 17-4PH stainless steel coatings[J]. Materials Chemistry and Physics, 2022, 275:125236.
  - [5] TAO X P, ZHANG S, ZHANG C H, et al. Effect of Fe and Ni contents on microstructure and wear resistance of aluminum bronze coatings on 316 stainless steel by laser cladding[J]. Surface & Coatings Technology, 2018,342:76-84.
  - [6] SCHOPPHOVEN T, GASSER A, WISSENBAACH K, et al. Investigations on ultra-high-speed laser material deposition as alternative for hard chrome plating and thermal spraying[J]. Journal of Laser Applications, 2016,28(2):022501.
  - [7] 郑红彬,王森辉,葛学元,等. 超高速激光熔覆工艺参数对熔覆层组织和性能的影响[J]. 新技术新工艺, 2021(5):63-69.  
ZHENG Hongbin, WANG Miaohui, GE Xueyuan, et al. Influence of ultra-high-speed laser cladding process parameters on the structure and properties of the cladding layer[J]. New Technology & New Process, 2021(5):63-69.
  - [8] ZHUANG D D, TAO W W, WANG A Z, et al. TiC distribution and properties of TiC-CrMnFeCoNi coating fabricated by laser cladding with ultrasound[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 468:129744.
  - [9] XU Z Z, HE Z J, WANG Z Y, et al. Effects of  $\text{CeO}_2$  on the microstructure and properties of laser cladding 316L coating[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019,28:4983-4990.
  - [10] GUO L L, CUI L, XIAO F, et al. Influence of process parameters on surface properties and corrosion resistance of Inconel 625 coating prepared by laser cladding[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2023,18:100213.
  - [11] 刘志威,魏祥,汪力,等. 超高速激光熔覆 Fe-Cr-B 基耐磨涂层工艺优化及性能研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(5):169-173.  
LIU Zhiwei, WEI Xiang, WANG Li, et al. Process optimization and property investigation for ultra-high-speed laser clad Fe-Cr-B based wear-resistant coating[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(5):169-173.
  - [12] ZHU J D, AN R, WEN G, et al. Characterization of the microstructure of an AlN-mullite- $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic layer on WCu composite alloy for microelectronic application[J]. Journal of Electronic Materials, 2015,44(11):4154-4160.
  - [13] JAVIDI M, HOSSEINI S, OROVCIK L, et al. Laser powder bed fusion of 316L stainless steel/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanocomposites; Taguchi analysis and material characterization[J]. Optics and Laser Technology, 2023,158:108883-108897.
- 引用本文:石锋,魏祥,陈志国,等. 超高速激光熔覆  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -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  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -316L coatings based on optimized extreme high-speed laser cladding technology[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):178-182.