

## 激光与光电子学进展

## 超高速激光熔覆 TiC/Inconel 625 复合涂层的组织和性能提升研究

葛通, 陈兰, 谷朋飞, 任旭东\*

江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013

**摘要** 超高速激光熔覆技术(EHLA)可以突破涂层生产的效率瓶颈,为制备高质量涂层提供有效途径。采用EHLA和常规激光熔覆(CLA)技术在45钢基体上制备TiC/Inconel 625复合涂层,并对涂层的微观组织、物相组成、耐腐蚀性能以及摩擦磨损性能进行了表征。结果表明,两种涂层的显微组织均表现出相同的生长模式,由胞状或柱状枝晶向等轴枝晶转变。对于EHLA涂层,98.2 m/min的熔覆速度加快了凝固组织的冷却速率,从而细化了枝晶,平均枝晶间距不超过1  $\mu\text{m}$ ,并且所形成的细化组织有助于涂层耐蚀性的提升。TiC的加入促进了枝晶间碳化物的形成,并起到了沉淀强化的作用,同时在涂层表面形成了致密的钝化膜。并且EHLA涂层的摩擦系数低于CLA涂层,展现出良好的摩擦磨损性能。

**关键词** 激光技术; 超高速激光熔覆; TiC/Inconel 625复合涂层; 微观结构; 耐腐蚀性能; 摩擦磨损性能

中图分类号 TG174.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220475

## Microstructure and Properties Improvement of TiC/Inconel 625 Composite Coatings Using Extreme High-Speed Laser Cladding

Ge Tong, Chen Lan, Gu Pengfei, Ren Xundong\*

School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China

**Abstract** Extreme high-speed laser cladding (EHLA) technology can break through the efficiency bottleneck of coating production and provide an effective way to prepare high-quality coatings. TiC/Inconel 625 composite coatings were prepared on 45 steel substrates using EHLA and conventional laser cladding (CLA) technologies, and the microstructure, phase composition, corrosion resistance, and friction and wear properties of the coatings were characterized. Results show that the microstructure of the two coatings exhibits the same growth pattern, from cellular or primary columnar crystal to equiaxed crystal. For the EHLA coating technology, a cladding speed of 98.2 m/min accelerates the cooling rate of the solidified microstructure, thereby refining the dendrite. The average particle size is less than 1  $\mu\text{m}$ , contributing to the improvement of the corrosion resistance of the coating. The addition of TiC promotes the formation of interdendritic carbide, thereby playing the role of precipitation strengthening, and forming dense passivation on the coating surface. The friction coefficient of the EHLA coating technology is lower than that of the CLA coating technology, showing good friction and wear performance.

**Key words** laser technique; extreme high-speed laser cladding; TiC/Inconel 625 composite coating; microstructure; corrosion resistance; friction and wear properties

## 1 引言

表面涂层技术是防止机械设备及其零部件表面腐蚀、磨损等故障的基本手段<sup>[1-3]</sup>。目前常用的表面涂层制备方法有电镀、热喷涂、激光熔覆和各种表面堆焊技术,但这些方法都有其局限性。电镀技术污染环境,生产过程中会产生电镀废液且回收困难<sup>[4]</sup>。热喷涂技术

制备的涂层内部孔隙率为1%~2%,涂层结合不稳定<sup>[5]</sup>。堆焊技术存在效率低、成本高、表面精度低等问题,制约了其推广应用。与这些技术不同的是,超高速激光熔覆(EHLA)技术不涉及化学过程,相比之下更环保。EHLA涂层具有缺陷少、与基体结合强度高的优点,其耐久性远高于电镀涂层<sup>[6]</sup>。在EHLA过程中,其特殊的能量分布形式,其中约90%的激光能量输入

收稿日期: 2021-12-06; 修回日期: 2022-01-10; 录用日期: 2022-01-13; 网络首发日期: 2022-01-24

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB1102602)、国家自然科学基金(51975261)、江苏省青年科学基金(BK20210754)

通信作者: \*renxd@ujs.edu.cn

到粉末,剩余的能量用于熔化基体,可以形成冶金结合界面,对基体造成较少的热损伤<sup>[7]</sup>。与热喷涂和堆焊技术相比,EHLA特殊的熔凝形式,粉末和激光在基材上方聚合,使涂层和基材在性能上互补。此外,在EHLA过程中,粉末以熔融或半熔融状态进入熔池,消除了熔池为熔化粉末提供热量的需求,缩短了熔池的持续时间。因此,EHLA技术的熔覆速度可达300 m/min,这意味着熔覆效率可由常规激光熔覆速度下的30 cm<sup>2</sup>/min提高到500 cm<sup>2</sup>/min<sup>[8-9]</sup>。

Shen等<sup>[10]</sup>发现采用EHLA生产的431不锈钢涂层,高熔覆速度使晶粒更细,能够抑制涂层的腐蚀过程。Yuan等<sup>[11]</sup>分别采用低速激光熔覆以及超高速激光熔覆技术在钢基体上制备了Ni45合金涂层,通过对比发现,常规激光熔覆层的冷却速率远小于高速激光熔覆层的冷却速率,并且高速激光熔覆层的耐磨损、耐腐蚀性能均优于常规激光熔覆层。此外,Yang等<sup>[12]</sup>分别以0.4 m/min、40 m/min和70 m/min的扫描速度,在45钢基体上制备了FeCrMoMn涂层,与常规激光熔覆相比,高速激光熔覆后的熔覆层晶粒尺寸减小,热影响区减小,由于熔覆层的溶质俘获导致熔覆层稀释率降低,基体与涂层之间形成了冶金结合。

目前,采用EHLA技术制备复合涂层的研究较

少。Inconel 625合金广泛应用于航空、航天发动机叶片等结构件,其具有耐腐蚀,抗氧化等优良特性。而TiC具有硬度高、耐磨性好和良好的稳定性等优点<sup>[13-14]</sup>。纳米TiC能够改善陶瓷相TiC与Ni基体相之间的界面结合特性,当TiC与镍基合金熔合时,具有较好的湿润性,可得到金属基复合材料(MMCs)<sup>[15]</sup>,在保持耐腐蚀性的基础上,提升涂层的硬度与耐磨损性能。因此,本文以纳米TiC为增强颗粒,采用常规激光熔覆(CLA)和EHLA制备了TiC/Inconel 625复合涂层。通过对比研究涂层微观组织和枝晶间碳化物对熔覆层耐蚀性以及摩擦磨损性能的影响。

## 2 试 验

### 2.1 材料和 EHLA 过程

基材采用45钢的钢管,外径为50 mm,厚度为10 mm。选择TiC/Inconel 625粉末混合物作为涂层材料,其中TiC质量分数为4%和Inconel 625为96%。Inconel 625粉末的粒径范围为15~45 μm,呈正态分布,如图1(c)所示,纳米TiC的平均粒径为40 nm。采用行星磨机(QM-3SP2)将两种粉末均匀混合,扫描电镜(SEM)图如图1(a)和(b)所示。在进行激光熔覆之前,对基材表面进行机械打磨,然后用无水乙醇清洗表面。

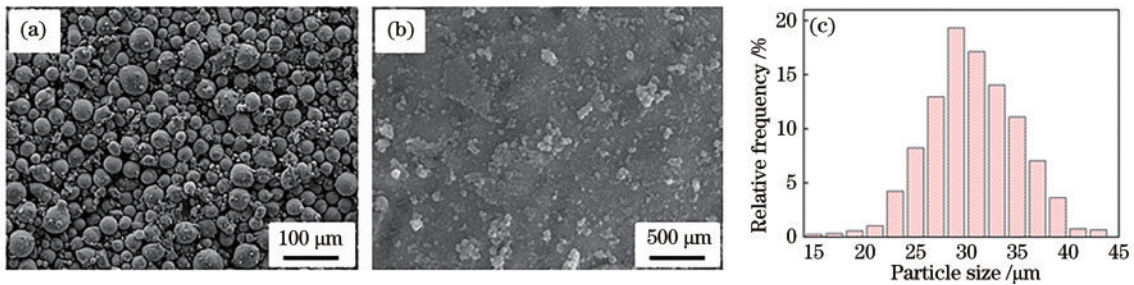


图1 TiC/Inconel 625混合粉末。(a) SEM图;(b)表面高倍SEM图;(c)粒径分布

Fig. 1 TiC/Inconel 625 mixed powder. (a) SEM image; (b) high magnification SEM image of surface; (c) particle size distribution

熔覆试验在IPG-YLS-5000光纤激光系统上进行,光斑直径保持在2 mm。完整的EHLA系统包括三个主要部分:旋转车床、激光与送粉装置以及机械手驱动机构。在高速车床夹紧45钢棒材旋转设定速度后,机械手驱动熔覆头沿基材轴线进行熔覆。常规的激光熔覆技术是在激光的作用下将粉末和部分基材同时熔化。而在EHLA过程中,激光束与粉末在基材

表面上方聚集,粉末通过保护气体在熔融或半熔融状态下喷射到基材表面,最终形成固化涂层。为了进一步比较两种熔覆涂层的组织和性能,选择了2组激光熔覆参数,其中常规熔覆速度为1.8 m/min,超高速激光熔覆速度为98.2 m/min。熔覆过程中采用的具体激光加工参数如表1所示。

表1 常规和超高速激光熔覆工艺参数

Table 1 Conventional and extreme high-speed laser cladding process parameters

Sample	Laser power /W	Cladding speed / (m·min <sup>-1</sup> )	Powder feeding rate / (g·min <sup>-1</sup> )	Overlap rate /%
CLA	1200	1.8	0.8	50
EHLA	3600	98.2	3.2	80

### 2.2 微观组织和性能测试

激光熔覆后,将试样切割成10 mm×10 mm×5 mm的块体。利用VK-X250光学显微镜对熔道进行

初步观察;利用JSM-7800F扫描电子显微镜对熔道进行横截面显微表征;利用能谱仪(EDS)分析了样品中元素的分布;利用X射线衍射仪(XRD)分析样品中的

相。采用电化学工作站(CHI760E)在室温下对试样进行电化学测试,腐蚀介质为加入质量分数 3.5% NaCl 的水溶液,并利用扫描电镜对腐蚀形貌进行观察。采用圆盘摩擦磨损试验机对两种涂层的磨损行为进行了研究,具体参数如下:载荷为 8 N,转速为 600 r/min,摩擦半径为 3 mm,持续时间为 30 min,摩擦副为半径 4 mm 的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  陶瓷球。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 组织结构

图 2 为两种涂层的截面形貌。在优化工艺参数

下,本文得到了组织致密、成形良好的涂层。由于 EHLA 熔池薄而宽,在送粉率一致的条件下,随着熔覆速度的增加,涂层变薄。如图 2 所示,CLA 涂层的厚度约为  $342.67 \mu\text{m}$ ,而 EHLA 涂层的厚度仅为  $98.68 \mu\text{m}$ 。对于 EHLA 技术,高重叠率使熔池的小部分位于基材上,从而降低了对基材的热量输入,同时保证了对少量基材的熔化,实现较低的稀释率,保证涂层与基材的有效冶金结合。总的来说,两种熔覆方法制备的涂层均未发现明显的裂纹或缺陷。当熔覆速度为  $98.2 \text{ m/min}$  时,涂层的生产效率可达  $200 \text{ cm}^2/\text{min}$ ,显著高于 CLA 的  $30 \text{ cm}^2/\text{min}$ 。

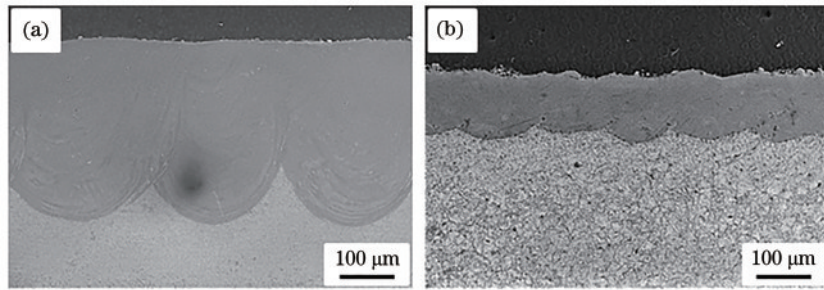


图 2 涂层的形貌。(a) CLA 涂层;(b) EHLA 涂层

Fig. 2 Morphologies of coating. (a) CLA coating; (b) EHLA coating

图 3 为两种试样的截面微观组织。从图 3(a1)和(a2)可以看出,CLA 涂层和 EHLA 涂层底部区域显微结构主要为胞状或柱状枝晶,但熔覆/基体界面附近的枝晶间距从  $(3 \pm 0.15) \mu\text{m}$  减小到  $(1 \pm 0.07) \mu\text{m}$ ,表明熔覆速度的增加抑制了枝晶的生长。总体而言,两种熔覆涂层的微观组织变化基本一致,沿散热方向由胞状或柱状枝晶转变为等轴枝晶结构。在涂层中间区域[图 3(b1)],凝固组织呈现柱状枝晶,随着扫描速度的提高,枝晶间距由  $(2.8 \pm 0.12) \mu\text{m}$  减少到  $(0.8 \pm$

$0.05) \mu\text{m}$ [图 3(b2)]。与涂层中间区域不同,顶部区域的凝固组织以典型的非定向生长为主[图 3(c1)、(c2)]。EHLA 涂层顶部组织过冷以及非均质形核使得枝晶在熔池的搅动下分裂成新的成核矩阵,熔化的金属原子在其上结晶形成等轴晶[图 3(c2)]。相比于 CLA 涂层,EHLA 涂层表面等轴晶尺寸更小,由  $(2.7 \pm 0.13) \mu\text{m}$  减小到  $(0.9 \pm 0.05) \mu\text{m}$ ,作为工作区域有利于提升涂层的耐腐蚀性能以及摩擦磨损性能。

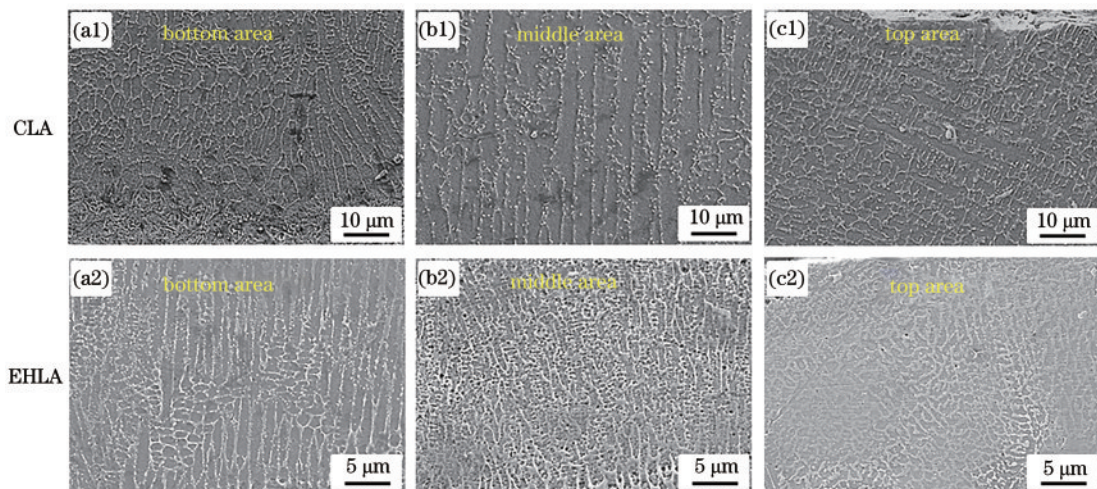


图 3 CLA 和 EHLA 截面微观组织结构 SEM 图。(a)底部区域;(b)中部区域;(c)顶部区域

Fig. 3 SEM images of CLA and EHLA section microstructure. (a) Bottom area; (b) middle area; (c) top area

熔覆速度以及熔凝方式的不同导致了凝固组织的形状和尺寸不同。对于超高速激光熔覆而言,由于熔

覆速度远超过常规熔覆,单位时间内注入涂层材料的热量减少,从而降低了温度梯度( $G$ )。另一方面,

EHLA 试样的高冷却速率促进了晶粒的生长,晶粒生长速度( $R$ )随着熔覆速度的增加而变快。结果表明, $G/R$ 比值降低,组织过冷度增加,促进了等轴枝晶的形成。为了定量分析 CLA 和 EHLA 涂层的枝晶尺寸,利用 ImageJ 软件分别计算了等轴晶区二次枝晶臂之间的距离。二次枝晶臂间距( $\lambda_2$ )、 $G$ 和 $R$ 可以表示为

$$\lambda_2 = A(G \times R)^{-n}, \quad (1)$$

式中: $A$ 和 $n$ 为材料常数; $G \times R$ 为冷却速率。对于相同的材料, $A$ 和 $n$ 是固定值,所以二次枝晶臂之间的距离与温度梯度和生长速率成反比,与冷却速率成反比。由于 EHLA 的冷却速率远大于 CLA,因此 EHLA 涂层的最终枝晶结构更细、更小。在具体的试验中,我们至少测量了 30 次二次枝晶臂之间的距离,并计算了平均值。结果表明,随着熔覆速度的增加,等轴晶区二次枝

晶臂间距由  $(3 \pm 0.15) \mu\text{m}$  减小到  $(0.6 \pm 0.05) \mu\text{m}$ 。对于 EHLA 样品,较细的等轴枝晶区作为工作区域有助于提升涂层的耐蚀性<sup>[16]</sup>。对 EHLA 涂层顶部区域 SEM 放大图中的 P 区域白色颗粒进行 EDS 扫描,结果如图 4 所示,可以看出,在枝晶和枝晶间的白色颗粒为 Cr 或 Nb 等碳化物。在凝固过程中,大量 Cr、Nb 等原子优先与 C 原子结合发生共晶反应,形成新的碳化物,如  $\text{Cr}_3\text{C}_2$ 、 $\text{NbC}$  分布在涂层中,能够堵塞腐蚀通道,提升涂层的耐蚀性<sup>[17-18]</sup>。此外,本文对两种涂层分别做了 XRD 物相分析,如图 5 所示。两种涂层主要含有  $\gamma(\text{Cr-Ni})$  相和少量的 TiC 相。对于 EHLA 样品,较高的激光功率带来较高的温度,促进了 TiC 粒子的溶解, TiC 相衍射峰强度减弱。同时,大量的 Ti 和 C 原子扩散到  $\gamma(\text{Cr-Ni})$  晶格中,促进  $\gamma(\text{Cr-Ni})$  相的生长。

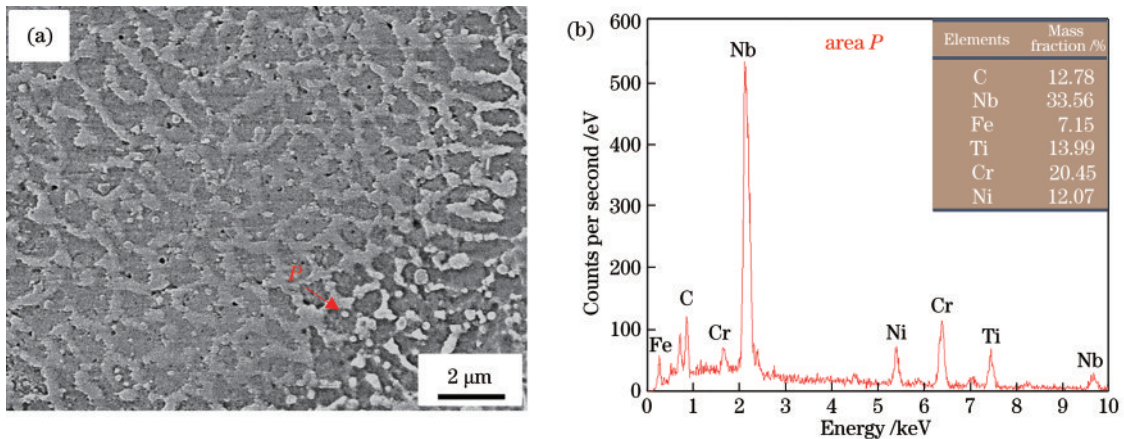


图 4 白色颗粒的表征。(a) SEM 图;(b) EDS 分析

Fig. 4 Characterization of the white particles. (a) SEM image; (b) EDS analysis

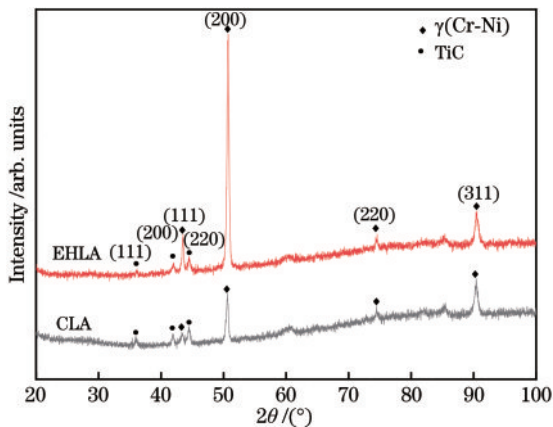


图 5 CLA 和 EHLA 涂层的 XRD 图谱

Fig. 5 XRD pattern of CLA and EHLA coatings

### 3.2 耐腐蚀性能

为了研究两种涂层的耐腐蚀性能,分别测量了涂层的自腐蚀电位( $E_{\text{corr}}$ )以及腐蚀电流密度( $I_{\text{corr}}$ ),电化学极化曲线以及阻抗谱图如图 6 所示。根据极化曲线,采用 Tafel 外推法得到了两种涂层的自腐蚀电位和腐蚀电流密度,见表 2。CLA 涂层的  $E_{\text{corr}}$  值为  $-0.512 \text{ V}$ ,  $I_{\text{corr}}$

值为  $2.472 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。EHLA 涂层的  $E_{\text{corr}}$  值为  $-0.404 \text{ V}$ ,  $I_{\text{corr}}$  值为  $1.372 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。EHLA 涂层的自腐蚀电位明显高于 CLA 涂层,而腐蚀电流密度呈相反趋势。一般来说,越高的  $E_{\text{corr}}$  ( $E_{\text{corr}}$  是一个涉及热力学的因素)和越低的  $I_{\text{corr}}$  ( $I_{\text{corr}}$  是一个涉及腐蚀动力学的因素)意味着腐蚀倾向越低,腐蚀速率越慢<sup>[19]</sup>。因此,从  $E_{\text{corr}}$  和  $I_{\text{corr}}$  的值来看,涂层在高速熔覆下的耐蚀性将得到提高。对于 EHLA 试样,更均匀、更细的微观组织有利于降低涂层腐蚀速率。同时,由位错和层错组成的细化枝晶有助于钝化膜的快速成核生长,可以抑制腐蚀溶液的侵蚀<sup>[20]</sup>。此外,从图 6(b)可以看出,CLA 和 EHLA 涂层的奈奎斯特图均为不完全电容弧。电容弧半径是评价合金涂层耐腐蚀性能的一个重要参数<sup>[21]</sup>。电弧电容越大,涂层的腐蚀速率越低,耐腐蚀性能越好<sup>[22]</sup>。结果表明,在熔覆速度  $98.2 \text{ m}/\text{min}$  下,EHLA 涂层电容弧半径比 CLA 涂层大,腐蚀量趋于更小。在评价试样的防腐性能时,还应考虑阻抗值( $|Z|$ )和相位角。由图 6(c)和(d)可知,EHLA 涂层的  $|Z|$  的最大值和相位角均高于 CLA 涂层。 $|Z|$  值和相位角越大,钝化膜越稳定。总的来说,EHLA 涂层耐腐蚀性能相比 CLA 涂层更好。

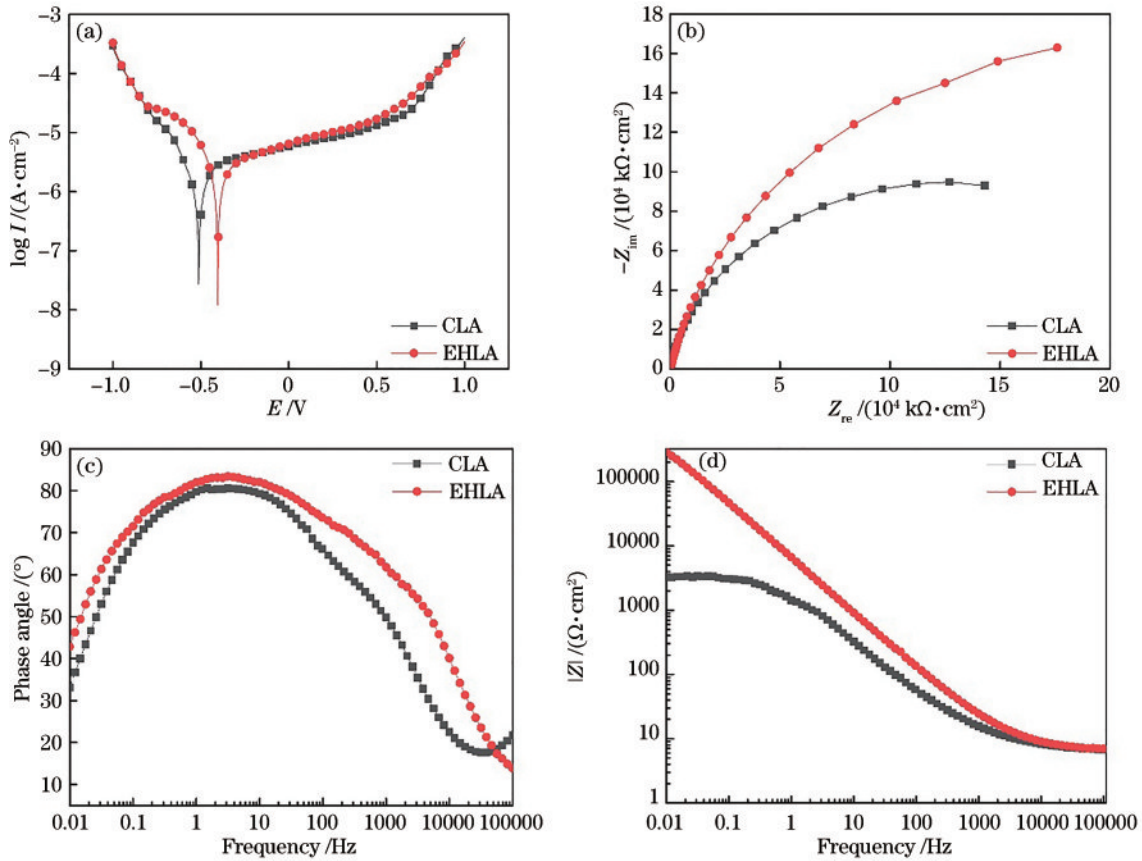


图 6 CLA 和 EHLA 涂层在质量分数 3.5% NaCl 溶液中的耐腐蚀性。(a)极化曲线;(b)奈奎斯特图;(c) (d)伯德图  
Fig. 6 Corrosion resistance of CLA and EHLA coatings in mass fraction 3.5% NaCl solution. (a) Polarization curve; (b) Nyquist diagram; (c) (d) Bode diagrams

表 2 CLA 和 EHLA 涂层的电化学参数

Table 2 Electrochemical parameters of CLA and EHLA coating

Sample	$E_{corr}/V$	$I_{corr}/(\mu A \cdot cm^{-2})$
CLA	-0.512(±0.011)	2.472(±0.079)
EHLA	-0.404(±0.008)	1.372(±0.071)

为了定量分析涂层的耐腐蚀性,选择了相应的等效电路(图 7)对电化学阻抗谱(EIS)进行拟合。等效电路由电解液电阻( $R_s$ )、钝化膜电阻( $R_L$ )、电荷转移电阻( $R_{ct}$ )和腐蚀反应产生的双电层电容组成。为了防止涂层表面的不均匀和吸附的影响,采用恒相位元件(CPE)代替理想的电容器(CPE<sub>L</sub>是钝化膜的电容,CPE<sub>dl</sub>是界面处电双层的电容)。Z<sub>CPE</sub>为CPE阻抗,其公式<sup>[23]</sup>表示为

$$Z_{CPE} = Y_0^{-1}(j\omega)^{-n}, \quad (2)$$

式中: $Y_0$ 为电容参数; $j$ 为虚单位; $\omega$ 为角频率; $n$ 为色散系数。拟合数据的定量结果如表 3 所示。可以看出,EHLA 涂层的  $R_L$  值远高于 CLA 涂层, $R_L$  值从  $3.819 \Omega \cdot cm^2$  增加到  $128 \Omega \cdot cm^2$ 。对于 EHLA 涂层, $R_L$  值越高,表明形成的钝化膜越厚、越致密。在  $98.2 \text{ m/min}$  的高熔覆速度下,涂层的  $R_{ct}$  值比熔覆速度  $1.8 \text{ m/min}$  的涂层提高了  $125.8\%$ 。众所周知, $R_{ct}$  值可以反映涂层的腐蚀速率<sup>[24]</sup>。 $R_{ct}$  值越高,电荷转移速度越慢,涂层的腐蚀速率越慢。对比表 3 的拟合结果可知,EHLA 涂层的  $R_{ct}$  值高于 CLA 涂层,说明 EHLA 涂层耐蚀性更好。阻抗拟合结果显示出与动态极化分析相同的规律。

表 3 CLA 涂层和 EHLA 涂层的阻抗拟合数据  
Table 3 Impedance fitting data of CLA and EHLA coatings

Sample	$R_s/(\Omega \cdot cm^2)$	$R_L/(\Omega \cdot cm^2)$	CPE <sub>L</sub>		$R_{ct}/(\Omega \cdot cm^2)$	CPE <sub>dl</sub>	
			$Y/(\mu F \cdot cm^{-2})$	$n$		$Y/(\mu F \cdot cm^{-2})$	$n$
CLA	5.157	3.819	3.96	0.889	$2.096 \times 10^5$	31.290	0.881
EHLA	4.845	128.000	24.23	0.803	$4.732 \times 10^5$	7.741	0.936

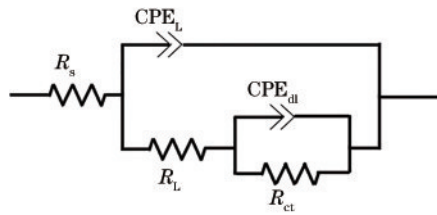


图 7 CLA 和 EHLA 涂层阻抗拟合的等效电路

Fig. 7 Equivalent circuit for impedance fitting of CLA and EHLA coatings

### 3.3 摩擦磨损性能

两种涂层的摩擦系数随时间变化如图 8 所示。可以发现,摩擦系数曲线均在初始阶段迅速增加,然后在一定范围内波动,最后保持稳定。其中,EHLA 涂层的摩擦系数相比 CLA 涂层较低,表明 EHLA 涂层的耐磨擦磨损性能有所提高。为了观察磨损形貌,本文采用扫描电镜对摩擦痕进行了拍摄,如图 9 所示。通过观察图 9(a2)和(b2)可知,EHLA 涂层的磨痕更浅,其磨损形式主要为磨料磨损形貌,没有产生大片的碎屑和剥落。而 CLA 涂层可以明显看出磨痕表面散布有少量熔融凸颗粒和明显的沟槽现象,其磨损的主要磨损形式为磨粒磨损和黏着磨损,并且出现黑色摩擦氧化层,如图 9(a1)和(b1)所示。对于 CLA 涂层,硬质颗粒较为粗大,在磨损过程中容易脱落。同时,在干摩擦情况下容易发生黏着磨损,形成的氧化层,会造成持续摩

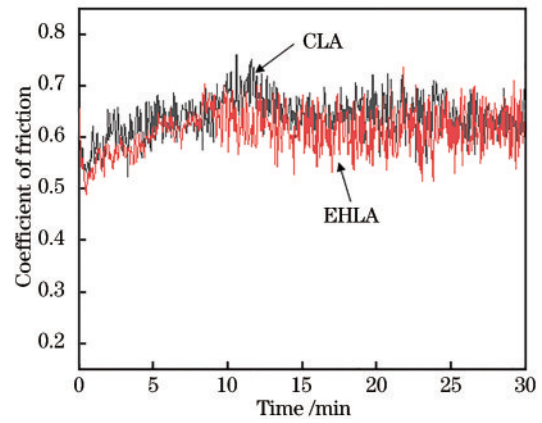


图 8 CLA 和 EHLA 涂层的摩擦系数

Fig. 8 Friction coefficient of CLA and EHLA coatings

擦并发生疲劳脆裂,从而导致涂层出现大片的碎屑和剥落<sup>[25]</sup>。而对于 EHLA 涂层,细小的枝晶间碳化物作为硬质相,整体硬度较高,不易脱落,因此磨损以磨粒磨损为主,磨损现象较轻。同时,涂层微观组织细小,组织致密,有利于提高耐磨性。此外,本文对磨痕深度进行了表征,如图 10 所示。从图 10(a)可以看出,CLA 涂层的磨痕宽度约为 678.136  $\mu\text{m}$ ,深度在  $-7 \mu\text{m}$  至  $12 \mu\text{m}$  之间波动。而 EHLA 涂层不仅磨痕宽度减小为 653.173  $\mu\text{m}$ ,深度也变得更深,在  $-5 \mu\text{m}$  至  $10 \mu\text{m}$  之间波动,如图 10(b)所示。磨痕深度结果进一步表明,相比于 CLA 涂层,EHLA 涂层的耐磨性更好。

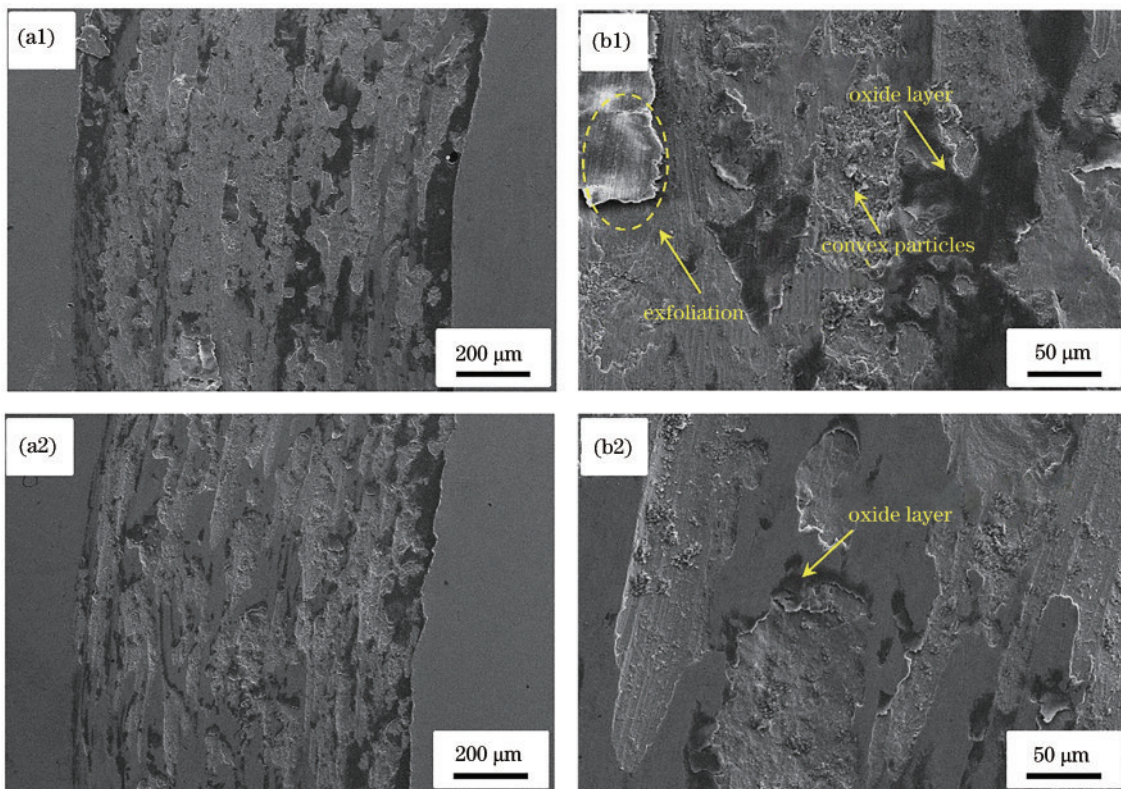


图 9 CLA 和 EHLA 涂层的磨损形貌。(a)全貌;(b)局部放大图

Fig. 9 Wear morphologies of CLA and EHLA coatings. (a) Full picture; (b) partial enlarged drawing

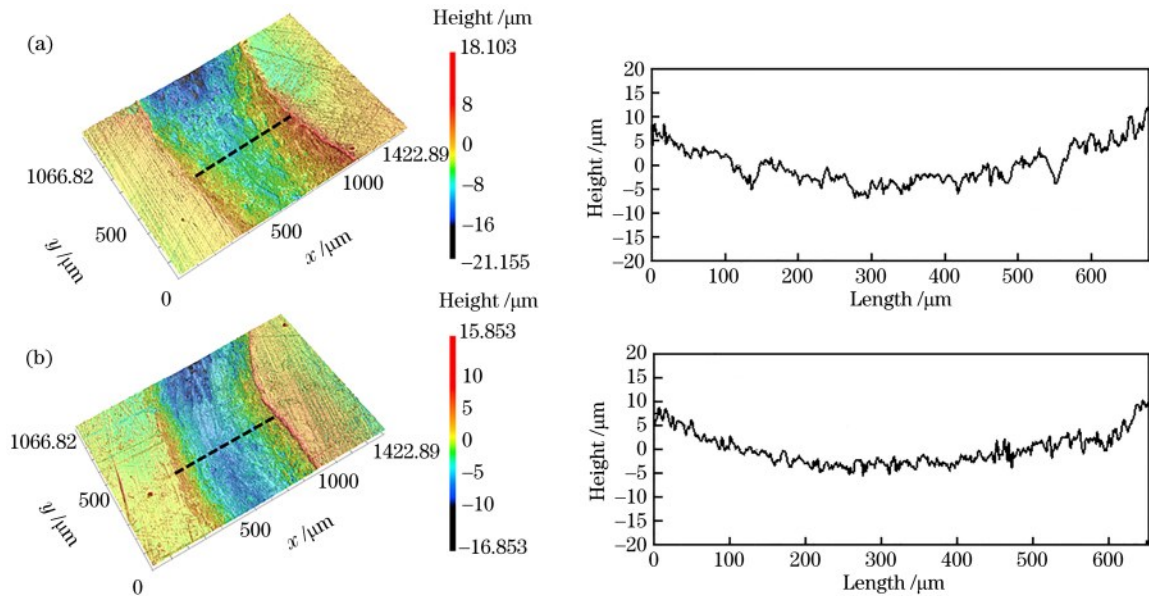


图 10 涂层的磨痕深度表征。(a) CLA;(b) EHLA

Fig. 10 Wear depth characterization of coatings. (a) CLA; (b) EHLA

## 4 结 论

本文采用 EHLA 和 CLA 技术分别制备了 TiC/Inconel 625 复合涂层。通过对比分析,详细研究了涂层的组织、成分、耐蚀性以及摩擦磨损性能。得出以下结论:

1) 两种熔覆技术制备的 TiC/Inconel 625 涂层组织转变基本一致,均从胞状枝晶或柱状枝晶转变为等轴枝晶,并且 EHLA 涂层的枝晶尺寸减小,且在涂层顶部存在等轴枝晶区。更小的枝晶尺寸和等轴枝晶区有助于提升涂层的耐腐蚀性能。

2) 高熔覆速度下,元素扩散速率加快,而添加一定比例的 TiC 促进了涂层成分的均匀性。在高冷却速率下,涂层晶粒间形成的 Cr、Nb 等碳化物起到了沉淀强化和阻塞腐蚀通道的作用,进一步提升了 EHLA 涂层的防腐性能。

3) 对于 EHLA 涂层,摩擦系数相较 CLA 涂层更低,其均匀分散的碳化物和晶粒尺寸的细化有助于耐磨性的提升。超高速激光熔覆在提高效率的同时在性能上有所提升,表明超高速激光熔覆能够在一定程度上满足涂层制备的要求。

## 参 考 文 献

- [1] 王豫跃,牛强,杨冠军,等.超高速激光熔覆技术绿色制造耐蚀抗磨涂层[J].材料研究与应用,2019,13(3):165-172.  
Wang Y Y, Niu Q, Yang G J, et al. Investigations on corrosion-resistant and wear-resistant coatings environmental-friendly manufactured by a novel super-high efficient laser cladding[J]. Materials Research and Application, 2019, 13(3): 165-172.

- [2] Li Y L, Song P, Wang W Q, et al. Microstructure and wear resistance of a Ni-WC composite coating on titanium grade 2 obtained by electroplating and electron beam remelting[J]. Materials Characterization, 2020, 170: 110674.
- [3] Lan G Y, Deng Y, Chen W L, et al. Development and application of physical vapor deposited coatings for medical devices: a review[J]. Procedia CIRP, 2020, 89: 250-262.
- [4] 李俐群,申发明,周远东,等.超高速激光熔覆与常规激光熔覆 431 不锈钢涂层微观组织和耐蚀性的对比[J].中国激光,2019,46(10):1002010.  
Li L Q, Shen F M, Zhou Y D, et al. Comparison of microstructure and corrosion resistance of 431 stainless steel coatings prepared by extreme high-speed laser cladding and conventional laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1002010.
- [5] 崔佳鹏.激光熔覆技术研究现状与发展趋势[J].农机使用与维修,2019(12):25.  
Cui J P. Research status and development trend of laser cladding technology[J]. Agricultural Mechanization Using & Maintenance, 2019(12): 25.
- [6] 澹台凡亮,田洪芳,陈峰,等.超高速激光熔覆在 27SiMn 液压支架立柱上的应用探讨[J].新技术新工艺,2019(3):52-54.  
Tantai F L, Tian H F, Chen F, et al. Discussion on application of high-speed laser cladding on 27SiMn hydraulic support column[J]. New Technology & New Process, 2019(3): 52-54.
- [7] 吴影,刘艳,陈文静,等.超高速激光熔覆技术研究现状及其发展方向[J].电焊机,2020,50(3):1-10,140.  
Wu Y, Liu Y, Chen W J, et al. Research status and development direction of extreme high-speed laser material deposition[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(3): 1-10, 140.

- [8] Shen B W, Du B R, Wang M H, et al. Comparison on microstructure and properties of stainless steel layer formed by extreme high-speed and conventional laser melting deposition[J]. *Frontiers in Materials*, 2019, 6: 248.
- [9] Schopphoven T, Gasser A, Wissenbach 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.
- [10] Shen F M, Tao W, Li L Q, et al. Effect of microstructure on the corrosion resistance of coatings by extreme high speed laser cladding[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 517: 146085.
- [11] Yuan W Y, Li R F, Chen Z H, et al. A comparative study on microstructure and properties of traditional laser cladding and high-speed laser cladding of Ni45 alloy coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 405: 126582.
- [12] Yang J X, Bai B, Ke H, et al. Effect of metallurgical behavior on microstructure and properties of FeCrMoMn coatings prepared by high-speed laser cladding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 144: 107431.
- [13] 刘洪喜, 董涛, 张晓伟, 等. 激光熔覆制备 WC/Co50/Al 硬质合金涂层刀具的微观结构及切削性能[J]. *中国激光*, 2017, 44(8): 0802002.  
Liu H X, Dong T, Zhang X W, et al. Microstructure and cutting performance of WC/Co50/Al cemented carbide coated tools fabricated by laser cladding process[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0802002.
- [14] 吴军, 金杰, 朱冬冬, 等. TiC 添加量对高能激光熔覆 Inconel718 基陶瓷涂层显微组织和摩擦磨损性能的影响[J]. *表面技术*, 2021, 50(9): 225-235.  
Wu J, Jin J, Zhu D D, et al. Effect of TiC content on microstructure, friction and wear properties of Inconel718 based ceramic coatings prepared by high energy laser cladding[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(9): 225-235.
- [15] 褚清坤, 余春风, 邓朝阳, 等. TiC 含量对激光选区熔化 Inconel 625 合金微观组织及表面摩擦磨损性能的影响[J]. *中国表面工程*, 2021, 34(1): 76-84.  
Chu Q K, Yu C F, Deng Z Y, et al. Effect of TiC on microstructure and wear properties of Inconel 625 alloy fabricated via selective laser melting technology[J]. *China Surface Engineering*, 2021, 34(1): 76-84.
- [16] Wu Q L, Zhang J Q. Corrosion behavior of laser-clad Cu-9Ni-6Sn coating[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 349: 1117-1129.
- [17] Chen L, Sun Y Z, Li L, et al. Improvement of high temperature oxidation resistance of additively manufactured TiC/Inconel 625 nanocomposites by laser shock peening treatment[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 34: 101276.
- [18] Li Z Y, Yan H, Zhang P L, et al. Improving surface resistance to wear and corrosion of nickel-aluminum bronze by laser-clad TaC/Co-based alloy composite coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 405: 126592.
- [19] 白杨, 王振华, 左娟娟, 等. 激光熔覆制备铁基复合涂层及其耐热耐蚀性能[J]. *中国激光*, 2020, 47(10): 1002001.  
Bai Y, Wang Z H, Zuo J J, et al. Fe-based composite coating prepared by laser cladding and its heat and corrosion resistance[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1002001.
- [20] Chen L, Zhang X Z, Wu Y, et al. Effect of surface morphology and microstructure on the hot corrosion behavior of TiC/IN625 coatings prepared by extreme high-speed laser cladding[J]. *Corrosion Science*, 2022, 201: 110271.
- [21] 龚玉玲, 武美萍, 崔宸, 等. 激光功率对 TC4 合金表面 Ni60A/CeO<sub>2</sub> 熔覆层组织及耐腐蚀性能的影响[J]. *金属热处理*, 2021, 46(8): 236-240.  
Gong Y L, Wu M P, Cui C, et al. Effect of laser power on microstructure and corrosion resistance of Ni60A/CeO<sub>2</sub> clad layer on TC4 alloy[J]. *Heat Treatment of Metals*, 2021, 46(8): 236-240.
- [22] 徐一飞, 孙耀宁, 王国建, 等. 高速激光熔覆铁基合金涂层的组织及性能研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(10): 1002122.  
Xu Y F, Sun Y N, Wang G J, et al. Microstructure and properties of iron-based alloys coatings prepared by high-speed laser cladding[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(10): 1002122.
- [23] Liao C J, Yang J S, He Y H, et al. Electrochemical corrosion behavior of the carburized porous TiAl alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 619: 221-227.
- [24] Cao M, Liu L, Yu Z F, et al. Electrochemical corrosion behavior of 2A02 Al alloy under an accelerated simulation marine atmospheric environment[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(4): 651-659.
- [25] 郝云波, 王江, 杨萍, 等. 激光熔覆锡基巴氏合金的微观组织及性能[J]. *中国激光*, 2020, 47(8): 0802009.  
Hao Y B, Wang J, Yang P, et al. Microstructures and properties of tin-based Babbitt metal prepared by laser cladding deposition[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(8): 0802009.