

## WC对316 L钢表面的镍基激光熔覆涂层的性能影响研究

吴敬权, 李德荣, 安芬菊, 黄江, 王有明, 吴香林

### Effect of WC on the properties of Ni-based laser cladding coating on 316 L substrate

引用本文:

吴敬权, 李德荣, 安芬菊, 黄江, 王有明, 吴香林. WC对316 L钢表面的镍基激光熔覆涂层的性能影响研究[J]. [激光技术](#), 2024, 48(5): 677-683.

WU Jingquan, LI Derong, AN Fenju, et al. Effect of WC on the properties of Ni-based laser cladding coating on 316 L substrate[J]. [Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays](#), 2024, 48(5): 677-683.

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### 1. Cu质量分数对激光熔覆Ni-Cu-WC涂层组织和性能的影响

引用本文: 梁飞龙, 师文庆, 李凯玥, 等. Cu质量分数对激光熔覆Ni-Cu-WC涂层组织和性能的影响[J]. [激光技术](#), 2023, 47(5): 653-658.

### 2. WC质量分数对激光熔覆Ni基涂层组织和性能的影响

引用本文: 王杉杉, 师文庆, 吴腾, 等. WC质量分数对激光熔覆Ni基涂层组织和性能的影响[J]. [激光技术](#), 2023, 47(4): 463-468.

### 3. 激光熔覆复合涂层WC对裂纹产生机理影响研究

引用本文: 李镛昌, 魏昕. 激光熔覆复合涂层WC对裂纹产生机理影响研究[J]. [激光技术](#), 2023, 47(1): 52-58.

### 4. Ni60激光熔覆工艺参量对涂层裂纹及厚度的影响

引用本文: 黄海博, 孙文磊. Ni60激光熔覆工艺参量对涂层裂纹及厚度的影响[J]. [激光技术](#), 2021, 45(6): 788-793.

### 5. CeO<sub>2</sub>对激光熔覆Ni60合金涂层组织及性能的影响

引用本文: 陈顺高, 张晓明, 郑启池, 等. CeO<sub>2</sub>对激光熔覆Ni60合金涂层组织及性能的影响[J]. [激光技术](#), 2017, 41(6): 904-908.

文章编号: 1001-3806(2024)05-0677-07

## WC对316L钢表面的镍基激光熔覆涂层的性能影响研究

吴敬权<sup>1,2</sup>, 李德荣<sup>1</sup>, 安芬菊<sup>1</sup>, 黄江<sup>3</sup>, 王有明<sup>1</sup>, 吴香林<sup>1\*</sup>

(1. 广东海洋大学机械工程学院, 湛江 524088, 中国; 2. 广东省海洋设备及制造工程技术研究中心, 湛江 524088, 中国; 3. 广东海洋大学电子与信息工程学院, 湛江, 524088, 中国)

**摘要:** 为了提升316L不锈钢的耐腐蚀性能, 延长其在海洋环境中的使用寿命, 讨论了激光熔覆技术在316L基材表面熔覆了纯Ni60涂层和WC+Ni60复合涂层的方法和效果。WC+Ni60复合涂层结合了WC颗粒的硬度和Ni60基体的韧性, 具有更优异的综合性能, 适用于对基材表面进行更高强度的保护。分别利用硬度仪、X射线衍射仪和电化学工作站对涂层检索和测试。结果表明, WC+Ni60复合涂层的平均截面硬度为719 HV, 但各区域波动较大, 同时熔覆层表面相较纯Ni60涂层更耐腐蚀, 自腐蚀电位提高了0.12 V, 自腐蚀电流密度降低了 $2.49 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 。本研究为后期制备耐海水腐蚀复合涂层提供了参考。

**关键词:** 激光技术; 激光熔覆; 微观组织; 硬度; 耐腐蚀性

中图分类号: TG665

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.05.010

### Effect of WC on the properties of Ni-based laser cladding coating on 316L substrate

WU Jingquan<sup>1,2</sup>, LI Derong<sup>1</sup>, AN Fenju<sup>1</sup>, HUANG Jiang<sup>3</sup>, WANG Youming<sup>1</sup>, WU Xianglin<sup>1\*</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. Guangdong Marine Equipment and Manufacturing Engineering Research Center, Zhanjiang 524088, China; 3. School of Electronic and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China)

**Abstract:** In order to improve the corrosion resistance of 316L stainless steel and prolong its service life in the marine environment, this paper discusses the method and effect of laser cladding technology on the surface of 316L substrate by cladding pure Ni60 coating and WC+Ni60 composite coating. The WC+Ni60 composite coating combines the hardness of WC particles and the toughness of Ni60 matrix, which has better comprehensive performance and is suitable for higher strength protection of the substrate surface. The coatings were retrieved and tested by hardness tester, X-ray diffractometer and electrochemical workstation, respectively. The results show that the average cross-sectional hardness of the WC+Ni60 composite coating is 719 HV, but the fluctuation in each region is large. At the same time, the surface of the cladding layer is more resistant to corrosion than the pure Ni60 coating. The self-corrosion potential is increased by 0.12 V, and the self-corrosion current density is reduced by  $2.49 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ . This study provides a reference for the later preparation of seawater corrosion resistant composite coatings.

**Key words:** laser technique; laser cladding; microstructure; hardness; corrosion resistance

## 0 引言

马氏珠母贝是我国唯一产业化养殖的海水珍珠贝。为了保障马氏珠母贝的正常存活、生长和育珠产能, 需要使用清贝机清理马氏珠母贝及其养殖网笼滋生的大量污损生物和浮泥。由于工作环境恶劣、盐度

大、湿度高, 清贝机的关键零件支撑板因使用强度大, 易受到腐蚀而失效。为了提高支撑板在海水中的耐腐蚀性能, 延长其在海洋环境下的服役时间, 通过表面改性技术在其表面熔覆涂层, 来改善原有材料的综合机械性能。

目前较为常见的表面改性技术有热喷涂、电磁喷射、激光熔覆等<sup>[1]</sup>。其中, 激光熔覆因其使用范围广、效率高而被广泛采用。激光熔覆通过高温激光光束熔化预置粉末, 并喷射到基材表面, 与基材形成新的一层均匀、致密熔覆涂层<sup>[2]</sup>, 以增强材料表面的耐磨性、耐腐蚀性和硬度等性能, 从而实现表面强化。它可以用于修复损坏的零件表面, 延长其使用寿命, 同时提高其

基金项目: 国家自然科学基金项目(62073089); 广东海洋大学研究生创新教育项目(2023SFKC\_01); 湛江市科技计划资助项目(2021A05171)

\* 通信作者: wuxiangl@gdou.edu.cn

收稿日期: 2023-10-24; 修回日期: 2023-12-20

表面质量。激光熔覆的优点包括快速、高效、精确度高、可自动化操作等<sup>[3]</sup>。

随着中国激光表面改性技术在不断发展创新和完善,目前中国在激光表面改性技术领域已经取得了一定的成就,具备了较强的技术实力和市场竞争力。通过激光技术对材料表面进行加工或熔覆涂层,提高材料的耐磨、耐蚀、耐热等性能,不仅能够满足使用要求,还可以降低成本。目前激光熔覆技术在设备制造领域得到了日益广泛的应用,在提升设备关键零部件性能方面起到了非常重要的作用<sup>[4]</sup>。

LI 等人<sup>[5]</sup>的前期工作证明,在 316L 表面形成的熔覆涂层具有优良的物理和化学性质。研究结果显示:一方面,硬质 WC 的添加使得涂层微观显微硬度得到有效提升;另一方面,WC 的添加量并不跟涂层微观显微硬度成正比。在 WC 的质量分数小于 5% 时,涂层的显微硬度增加,当 WC 的质量分数等于或大于 5% 时,涂层的硬度有所下降。硬度下降的原因可能基于 WC 的加入造成涂层微观结构发生变化。

FU 等人<sup>[6]</sup>尝试了高速激光熔覆技术。研究结果显示:一方面,涂层表面形成了良好的冶金结合,没有明显的形貌缺陷;另一方面,WC 颗粒分布均匀,成为大颗粒的凝聚核,从而阻碍了枝晶的生长,起到了晶粒细化的效果。涂层的主要相组成为 NiFe,同时 W 和 C 元素也扩散到涂层中形成碳化钨、碳化铬等硬质相。

Ni 基与 WC 按一定质量分数比例混合的复合涂层也得到了研究<sup>[7]</sup>。通过马兰格尼对流,使得涂层与基材充分混合,显著改善了涂层的耐腐蚀性。进一步研究表明,涂层的耐腐蚀性与 WC 含量的比例成正比。这可以归因于 WC 颗粒的强化效应和体积扩散效应的共同作用。

此外,CHEN 等人<sup>[8]</sup>研究了 WC 颗粒对 Ni60 复合涂层影响,讨论了其微观形貌及磨损行为。通过使用 Ni60 复合粉末制备 WC/Ni 涂层,并引入纳米级别的微小 WC 颗粒。研究表明,WC 颗粒对激光熔覆 Ni60 复合涂层的组织和磨损行为起着重要作用,能够显著增强涂层的微观硬度和耐磨性。对于强化机制的分析表明,WC 颗粒的加入可以改善涂层的结晶结构,形成更细小的晶粒,并且能够填充涂层中的空隙和裂纹,增加涂层的致密性。

基体材料对熔覆涂层的性质亦有明显影响,尽管 LIU 等人<sup>[7]</sup>研究 Ni60 + WC 涂层的激光表面改性,但 XUE 等人<sup>[9]</sup>在研究类似涂层性质时发现,当基体材料为 H13 钢时,涂层的硬度可以达到甚至超过 H13 钢的 4 倍。

以上研究主要关注了 WC 含量对涂层的显微硬度和组成等表面性能的影响,而对 WC + Ni60 复合涂层

的耐腐蚀性研究相对较少。耐腐蚀性是涂层应用于实际工程中的关键性能指标,对其进行更多的研究可以更好地指导实际应用。

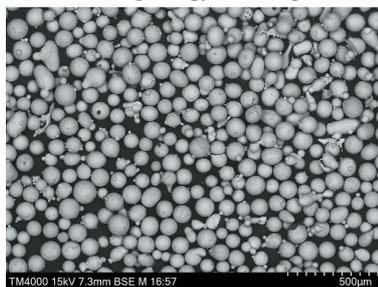
基于国内外相关研究,本文作者旨在研究 WC 镍基涂层对支撑板(06Cr17Ni12Mo2 不锈钢)组织形态、硬度和耐腐蚀性能的影响。在改善和提升支撑板表面性能的过程中,选择了 Ni60 和质量分数为 5% 的 WC 粉末的混合使用。因为 Ni60 具有良好的耐磨性和耐腐蚀性,而 WC 粉末则可以增加硬度和耐磨性。混合粉末熔覆在不锈钢表面,使用扫描电镜观察显微组织形貌,结合能谱分析和 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)分析综合判断各元素分布情况、硬质相组成,并分析熔覆表面硬度变化原因。在电化学测试耐腐蚀性中使用质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液模拟环境。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

实验中,316 基材的尺寸为 60 mm × 100 mm × 2.5 mm。涂层按预置法制备,主要成分为 Ni60,添加成分为 WC 粉末。Ni60 粉末和 WC 粉末颗粒直径分别为 50 μm ~ 130 μm 和 22 μm ~ 172 μm,其微观形貌如图 1a 和图 1b 所示。06Cr17Ni12Mo2 钢(316 不锈钢)与 Ni60 粉末成分如表 1、表 2 所示<sup>[10]</sup>。

a micromorphology of Ni60 powder



b micromorphology of WC powder



图 1 粉末微观形貌

Fig. 1 Micromorphology of powder

### 1.2 实验方法

实验中使用 XL-F2000T 型激光器作为激光熔覆实验装置。首先,将不锈钢基体表面经过粗砂纸打磨,以去除基体表面的氧化膜和其他影响实验的杂质。然

表1 06Cr17Ni12Mo2 基体材料化学成分

Table 1 Chemical composition of 06Cr17Ni12Mo2 substrate

element	P	S	Ni	Cr	Mo	C	Si	Fe
mass fraction/%	0.035	0.03	10.0~14.0	16.0~18.5	2.0~3.0	0.08	1.0	balance

表2 Ni60 粉末化学成分

Table 2 Chemical composition of Ni60

element	C	Cr	B	Si	Fe	P	S	Ni
mass fraction/%	0.8~1.2	14.0~16.0	3.0~3.5	3.5~4.0	14.0~15.0	0.02	0.02	balance

后使用体积分数为95%的酒精清洗外层油污和杂质<sup>[10]</sup>。接下来,将质量分数为5% WC和95% Ni60放入球磨机中以200 r/min混合搅拌2 h预先混合,然后将混合粉末均匀地覆盖在不锈钢板基材上,使其厚度达到1 mm。本次实验中,根据前期工作经验,激光功率设定为1100 W,光斑直径为3 mm,扫描速率(即单位时间内激光在工件上划过的距离)设定为10 mm/s,此时激光功率密度约为 $1.56 \times 10^8$  W/m<sup>2</sup>,搭接率设定为40%,进行多道搭接激光熔覆实验。激光熔覆间距设置为1.5 mm,熔覆路径如图2所示;熔覆层尺寸和形貌如图3所示。熔覆完成后涂层厚度0.6 mm~1.1 mm。为了后续方便分析,本文作者对未添加WC的熔覆层进行了定义,称之为“0WC熔覆层”。同时,还添加了质量分数为5%的WC,对应的熔覆层被定义为“5% WC熔覆层”。熔覆完成后,为方便后续研究,使用深杨QC350K中走丝线切割机床将试样切割成10 mm×10 mm的方块。

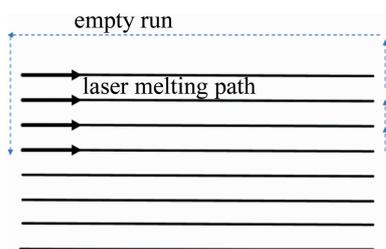


图2 熔覆路径图  
Fig. 2 Laser melting path

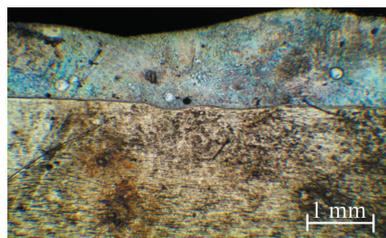


图3 熔覆层形貌图  
Fig. 3 Laser cladding layer morphology diagram

熔覆材料具有独特的特性,因此在制备试样时需要使用特定的腐蚀液,以便后续的扫描电镜观察和分析能够顺利进行。通常情况下,会选择由硝酸和盐酸

组成的腐蚀液来处理试样。这种腐蚀液能够有效地去除材料表面的氧化物和其它杂质,使得试样表面更加清晰,便于后续的观察和分析。

为了更清晰分析各组织成分对熔覆层的影响,本实验中利用日立TM4000Plus扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)获取涂层的形貌和组织特性。利用其自带的EDS来分析元素分布特性。而样品的相组成则用岛津XRD-6100型X射线衍射仪<sup>[10]</sup>。在检测过程中,衍射区间可设置为10°~90°,步长为0.04°,扫描速率为6°/min。

为了表征样品的耐腐蚀性能,使用CS Studio电化学工作站。在模拟海水的腐蚀环境中,采用含有3.5% NaCl溶液。扫描速率数值设置为0.5 mV/s,采样频率为1 Hz。

## 2 结果与分析

### 2.1 熔覆层组织分析

图4为激光熔覆层微观形貌,图4a为未添加WC颗粒的Ni60微观形貌。可以观察到界面处存在胞状组织,而在熔覆层向内部延伸的方向上,则出现了树枝状晶体(见图4a中a\*)结构<sup>[11]</sup>。熔覆层中部如图4a中b\*所示,为无方向的针状晶<sup>[12-13]</sup>。

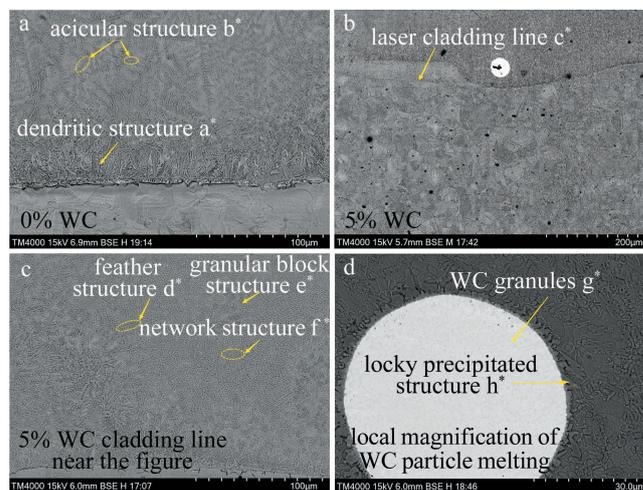


图4 激光熔覆层SEM显微组织  
Fig. 4 SEM microorganization of the laser cladding layer

图4b为添加5% WC的熔覆涂层形貌。可发现结合区附近有细小的胞状晶体,在熔覆线上有一窄的波浪型白亮带 $e^*$ ,此结构被界定为快速凝固组织<sup>[7]</sup>。

图4c中发现了羽毛状化合物 $d^*$ ,其形成机制为部分溶解的WC与基材中可溶性元素,如Ni、Cr与Fe等相互扩散而形成<sup>[14]</sup>。通过分析组织发现,相对于图4a中的组织,树枝状组织更小且分布更均匀。扫描电镜图片中看到树枝状组织和周围分布像网一样的组织 $f^*$ 。初步判断试样熔覆层中主要组织为 $\gamma$ -(Ni,Fe)和 $M_{23}C_6$ ;网状组织主要分布在树枝晶边缘由WC、 $Cr_{23}C_6$ 等相组成的共晶组织。在熔化区附近,呈现细密的基体组织 $e^*$ ,可以观察到尺寸及数量不均等的块体高熔点化合物<sup>[15]</sup>。

由图4d可以看到,WC颗粒加入熔覆材料后在高温熔融过程中存在熔化和溶解,图中白亮色所示 $g^*$ 是未溶解的WC。在 $g^*$ 周围分布着块状灰色组织 $h^*$ ,主要是W和Cr元素组成的化合物。WC溶解的C、W过渡到熔覆层中,凝固后在熔覆层枝晶间形成大量析出相。添加了WC颗粒的涂层因激光快速凝固,而形成沿固液界面的晶粒具有平面、柱状和等轴晶粒,WC颗粒的引入使周围组织垂直于其边界生长,呈柱状和细胞形状<sup>[16]</sup>。这是因为WC本身熔点较高,熔覆速度快,热量不能将较大的WC颗粒完全熔化;冷却速度较快,使凝固的组织向颗粒方向进而形成微区定向,进一步细化了结构,显示出局部晶粒细化的效果<sup>[17]</sup>。涂层的内部储能性能得到改善,有利于涂层的韧性和强度<sup>[18]</sup>。

图5中不规则形状白色是残存的WC颗粒,周围分布着块状组织。为了分析熔覆层中WC周围的元素

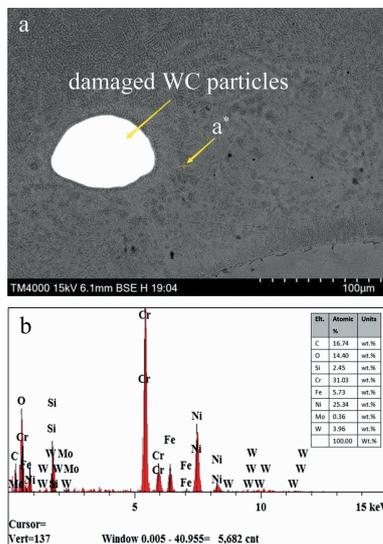


图5 能谱分析图

Fig. 5 Energy spectrum analysis diagram

组成,使用能谱仪对样品中WC附近的块状物 $a^*$ 进行测试,选择点含有W、Cr、Ni、C等元素,其中C的原子数分数为16.74%。进一步说明了块状为 $M_YC_X$ 的碳化物。

通过图6的XRD图分析可知,熔覆层物相主要含有 $\gamma$ -Ni(Fe)、Fe-Cr固溶体和碳化物 $Cr_7C_3$ 、 $Cr_{23}C_6$ 及硼化物 $W_2B$ 等<sup>[19-20]</sup>。由物相分析可知熔覆材料中添加的WC溶解后,C和W过渡到熔池中形成了铬碳化物及钨的硼化物等多种强化相,这些强化相主要在晶间分布<sup>[21]</sup>。XRD衍射图中没有检测到 $SiO_2$ 和 $B_2O_3$ 。在重熔过程中对于B(硼)和Si(硅)两种元素会形成一些氧化物。这是因为在高温下,硼和硅与氧气反应形成氧化物是比较稳定的化学反应,涂层在外侧形成氧化膜,试样准备时已提前去除,所以没有检测到。此外Si元素在晶体结构中的位置和排列方式也导致X射线无法进行准确的衍射测量<sup>[22]</sup>。

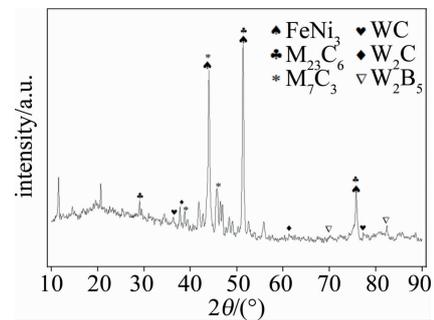


图6 熔覆层X射线衍射图谱

Fig. 6 X-ray diffraction pattern of cladding

## 2.2 截面显微硬度

激光熔覆是一个典型的非平衡过程,反应速度快,凝固时间短。涂层组织和性能会随着熔覆过程变化而变化。使用MHVD-1000AT硬度检测设备,在施加1.96 N的加载荷下,保压时间为10 s。从熔覆层到基体纵向进行测试,共测试10个点,测试间距为0.1 mm。同时,在横向左右两侧也进行同样的测试,每侧测试10个点,间距为0.1 mm。横向测试共进行3次,最终硬度数值取这些测试结果的平均值<sup>[10]</sup>。添加了WC会提高样品的硬度(如图7a所示,涂层硬度平均值从664 HV提高到719 HV),WC晶粒引入后,WC颗粒会在高温下熔融分解成W和C元素,阻碍晶粒长大,同时与粉末中的Fe、Cr等元素也会发生反应,从而形成硬质碳化物,如 $Cr_{23}C_6$ 等。WC晶粒引入能够细化晶粒同时形成硬质碳化物显著提高了硬度<sup>[10]</sup>。在激光熔覆过程中,熔融的WC会分解,释放出更多的W和C元素。由于C元素的原子半径小于W元素的原子半径,因此在吸收能量后,C元素更容易扩散。这

是因为原子的大小直接影响了其在晶格中的移动能力。因此,在熔融的 WC 周围会形成 W 元素富集区,而 C 元素则相对较少。这种 W 元素富集区的形成会影响涂层的成分均匀性和性能分布<sup>[10,23]</sup>。与此同时,在 WC 周围也会形成 C 元素和 W 元素富集区域。这些元素富集区会形成提高硬度碳化物的间隙相<sup>[10]</sup>,高于基体中的  $\gamma$ -(Fe、Ni)相<sup>[24-25]</sup>。所以熔覆层硬度波动较大。

从图 7b 中可以观察到,熔覆层与基材熔接线附近的结合部位的硬度是低于熔覆层中部。在激光熔覆过程中,激光束对预置粉末加热时传导到基体形成过渡区,使粉末熔化并迅速凝固形成涂层同时基体受热元素也会扩散<sup>[10,26]</sup>。涂层与基材形成熔池,并在熔接线附近相互渗透,充分混合。在这个过程中,涂层和基材之间会发生元素的交换。这种元素渗透会使结合区的成分被稀释,从而改变原有的机械性能导致其硬度降低<sup>[27]</sup>。

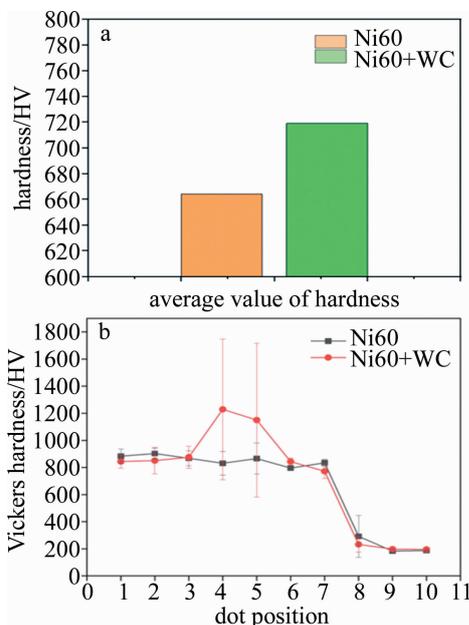


图7 涂层硬度分布及平均值

Fig. 7 Coating hardness distribution and average value

### 2.3 熔覆层耐腐蚀性分析

根据电化学腐蚀特性,腐蚀电流越小,耐腐蚀性效果越好;腐蚀电位越高,抗腐蚀性能越好<sup>[28-29]</sup>。如图 8a 所示,对比极化曲线图发现,添加了 WC 的熔覆涂层和纯 Ni60 涂层的自腐蚀电位分别为  $-0.259\text{ V}$  和  $-0.379\text{ V}$ ,自腐蚀电流密度是分别是  $3.70 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2$  和  $2.86 \times 10^{-6}\text{ A/cm}^2$ 。结果表明,添加了 WC 的熔覆层试样的耐腐蚀性能优于 Ni60 涂层试样。金属在电解质溶液中腐蚀是因为形成了原电池反应所导致的<sup>[30-31]</sup>。WC 是一种硬质相,吸收能量后破碎的细小

的颗粒可以在金属晶界和晶内。这些颗粒阻碍位错运动和晶界扩散,从而提高材料的力学性能。此外,WC 颗粒还可以作为阳极和阴极反应的障碍物,阻止金属的腐蚀。适量添加 WC 可以细化材料的组织结构,提高材料的耐腐蚀性能。涂层腐蚀机制如图 8b 所示,在 Ni60 中,Cr、Ni 和 Si 等元素不仅能够提高基体材料的电极电位减少了微观电池的数量,还能细化晶粒<sup>[32]</sup>,Cr 元素的加入可以促使钢材表面迅速形成致密稳定的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  钝化膜,并且这种钝化膜具有良好的防腐性能<sup>[10,33]</sup>。因此,Cr 元素的添加可以有效地减缓钢材的腐蚀。另外,Ni 元素的增加可以提高材料的自腐蚀电位,使材料更加抗腐蚀<sup>[10,34]</sup>。因此,通过向 Ni60 熔覆层中添加适量的 WC 颗粒可以细化材料的组织结构,并形成细小的碳化物,这些因素都有助于提高材料的抗腐蚀性能。

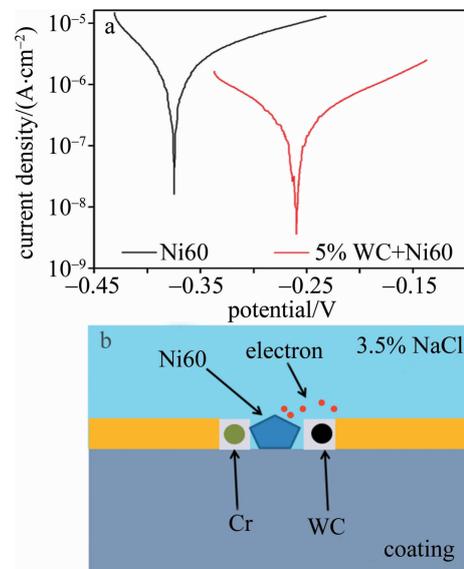


图8 a—极化曲线图 b—腐蚀机制

Fig. 8 a—polarization curve b—corrosion mechanism

### 3 结论

(a)通过对涂层横截面观察可知,Ni60 + WC 复合涂层的表面熔覆情况良好。涂层表面光洁无瑕,涂层与基体之间成功形成了良好的冶金结合。

(b)添加了 5% WC 的熔覆层截面硬度有显著增加,平均硬度可达 719 HV 但各区域波动较大。

(c)添加了 WC 的 Ni60 熔覆层相比于纯 Ni60 熔覆层,具有更高的自腐蚀电位和更低的自腐蚀电流密度( $3.70 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2$ )。Ni60 + WC 复合涂层的表面的耐腐蚀明显好于 Ni60 涂层:Ni60 + WC 复合熔覆层的表面的自腐蚀电位提高了 0.12 V,自腐蚀电流密度降低了  $2.49 \times 10^{-6}\text{ A/cm}^2$ 。

## 参考文献

- [1] ARULVEL S, RUFUSS D D W, JAIN A, *et al.* Laser processing techniques for surface property enhancement: Focus on material advancement[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2023,42(2): 103293.
- [2] LIU W L. Study on formation mechanism of Fe-Cr-C and Fe-Cr-Ni-C cast-infiltrated layers on cast steel surface [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2020 (in Chinese).  
柳文良. 铸钢表面 Fe-Cr-C 和 Fe-Cr-Ni-C 铸渗层形成机理研究 [D]. 洛阳:河南科技大学,2020.
- [3] LI J N. Investigation on microstructures and wear properties of Laser-cladded Ti-Al/ceramics composite coatings on titanium alloys [D]. Qingdao: Shandong University,2012 (in Chinese).  
李嘉宁. 钛合金激光熔覆 Ti-Al/陶瓷复合涂层组织结构与耐磨性的研究 [D]. 青岛:山东大学,2012.
- [4] FANG L Y. Research on Co-based selflubricating composite coatings by high frequency light vibrating assisted laser cladding [D]. Shanghai: Shanghai University of Engineering Science, 2017 (in Chinese).  
房刘杨. 高频微振辅助激光熔覆 Co 基自润滑复合涂层研究 [D]. 上海:上海工程技术大学,2017.
- [5] LI K Y, HUANG J, SHI W Q, *et al.* Effect of WC on the properties of Ni-based laser cladding coating on 316L substrate [J]. *Applied Laser*, 2023,43(6):36-41 (in Chinese).  
李凯玥,黄江,师文庆,等. WC 对 316L 钢表面的铁基激光熔覆涂层的性能影响研究 [J]. *应用激光*,2023,43(6):36-41.
- [6] FU Y L, GUO N, ZHOU C, *et al.* Investigation on In-situ laser cladding coating of the 304 stainless steel in water environment [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021, 289: 116949.
- [7] LIU Zh, WU Q, LIN J X, *et al.* Research on laser surface cladding of 2205 steel with Ni-based and WC powders [J]. *Materials Reports*, 2016,30(S2):535-538 (in Chinese).  
刘政,吴强,林继兴,等. 2205 钢表面激光熔覆 Ni 基 + WC 合金涂层的研究 [J]. *材料导报*,2016,30(S2):535-538.
- [8] CHEN Ch L, FENG A, WEI Y, *et al.* Effects of WC particles on microstructure and wear behavior of laser cladding Ni60 composite coatings [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 163: 109425.
- [9] XUE Sh L, LI J H, YAO H P, *et al.* Microstructure and properties of in-situ generated WC-reinforced Ni60 gradient coating by laser cladding on H13 steel [J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*,2022,50(6):41-45 (in Chinese).  
薛胜利,李金华,姚芳萍,等. H13 钢表面激光熔覆原位生成 WC 增强 Ni60 梯度涂层的组织及性能 [J]. *稀有金属与硬质合金*, 2022,50(6):41-45.
- [10] WU X L, AN F J, LI D R, *et al.* Study on the tissue and properties of laser cusing Ni60 + WC powder coating [J]. *Applied Laser*, 2023,43(11):1-8 (in Chinese).  
吴香林,安芬菊,李德荣,等. 激光熔覆 Ni60 + WC 粉末涂层的组织及性能研究 [J]. *应用激光*,2023,43(11):1-8.
- [11] WU Q. Experimental study on the performance of laser cladding Ni/WC coating on the surfaces of 2205 duplex stainless steel [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2017 (in Chinese).  
吴强. 基于蝶阀用 2205 双相不锈钢表面激光熔覆 Ni/WC 涂层性能的实验研究 [D]. 赣州:江西理工大学,2017.
- [12] LU P, JIA L, ZHANG C, *et al.* Optimization on laser cladding parameters for preparing Ni60 coating along with its friction and wear properties [J]. *Materials Today Communications*, 2023, 37: 107162.
- [13] GONG L. Effect of processing parameters on microstructure and properties of Ni60 coating by Induction remelting and cooling [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology,2018 (in Chinese).  
巩禄. 工艺参数对感应重熔及冷却处理 Ni60 涂层组织与性能的影响 [D]. 兰州:兰州理工大学,2018.
- [14] SHENG B Z, CHEN P J, YU X Y, *et al.* Effects of laser remelting on microstructural characteristics of Ni-WC composite coatings produced by laser hot wire cladding [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 908: 164612.
- [15] WU P, JIANG E Y, ZHOU Ch Ch, *et al.* Microstructure and properties of Ni/WC composite coating prepared by laser cladding [J]. *Chinese Journal of Lasers*,2003,30(4):357-360 (in Chinese).  
吴萍,姜恩永,周昌焱,等. 激光熔覆 Ni/WC 复合涂层的组织和性能 [J]. *中国激光*, 2003, 30(4):357-360.
- [16] XIAO Q. Research on process and anti-wear and corrosion behavior of laser cladded Cr-WC-Fe composite coatings [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2022 (in Chinese).  
肖奇. 激光熔覆 Cr-WC-Fe 复合涂层工艺及抗磨蚀行为研究 [D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2022.
- [17] QI X, LEI S W, XIN Y K, *et al.* Wear mechanisms and micro-evaluation on WC particles investigation of WC-Fe composite coatings fabricated by laser cladding [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 420: 127341.
- [18] PENG Y B, ZHANG W, LI T C, *et al.* Microstructures and mechanical properties of FeCoCrNi high entropy alloy/WC reinforcing particles composite coatings prepared by laser cladding and plasma cladding [J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2019, 84: 105044.
- [19] HUANG F X, JIANG Zh H, LIU X M. Microstructure and properties of Fe-base alloy + WC laser cladding layer [J]. *Heat Treatment of Metals*,2009,34(1):67-71 (in Chinese).  
黄凤晓,江中浩,刘喜明. 铁基合金 + WC 激光熔覆层的显微组织与性能 [J]. *金属热处理*, 2009,34(1):67-71.
- [20] XIAO Q, SUN W L, LIU J D, *et al.* Surface corrosion behavior of Ni60A/WC laser coating [J]. *Materials Reports*,2021,35(8):8146-8150 (in Chinese).  
肖奇,孙文磊,刘金朵,等. Ni60A/WC 激光熔覆涂层表面抗蚀行为 [J]. *材料导报*,2021,35(8):8146-8150.
- [21] WANG G M. Preparation and properties analysis of the WC reinforced Fe-base coating prepared by plasma spray welding [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology,2018 (in Chinese).  
王贵明. 等离子熔覆 WC 增强铁基涂层组织及性能研究 [D]. 青岛:山东科技大学,2018.
- [22] ZHAO X R, ZUO D W, CHENG H, *et al.* Microstructure and properties of laser clad Ni-based tungsten carbide alloy layer on a plastic mould steel [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2013,34(4):177-181 (in Chinese).  
赵先锐,左敦稳,程虎,等. 塑料模具钢表面激光熔覆 W<sub>2</sub>C/Ni 基合金涂层的组织及性能 [J]. *材料热处理学报*,2013,34(4):177-181.
- [23] WU P G. Research on application foundation of multi-layer laser cladding on steels [D]. Shanghai: Shanghai University Of Engineering Science, 2013 (in Chinese).  
吴培桂. 钢表面激光多层熔覆技术的应用基础研究 [D]. 上海:上海工程技术大学,2013.
- [24] YONG F X, DE J K. Effect of Ti<sub>2</sub>SnC mass fraction on microstructure and friction-wear performance of laser cladded Ni-WC coatings under WS<sub>2</sub> lubrication condition [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2023, 237(11): 1628-1638.

- [25] WANG Sh Sh, SHI W Q, WU T, *et al.* Effect of WC mass fraction on microstructure and properties of laser cladding Ni-based coating [J]. *Laser Technology*, 2023, 47(4):463-468 (in Chinese).  
王杉杉, 师文庆, 吴腾, 等. WC质量分数对激光熔覆Ni基涂层组织和性能的影响[J]. *激光技术*, 2023, 47(4):463-468.
- [26] CHENG H, FANG Zh G, ZHAO X R, *et al.* Microstructure and properties of laser cladding Ni-based tungsten carbide alloy coating on NAK80 mold steel [J]. *Surface Technology*, 2011, 40(1): 5-7 (in Chinese).  
程虎, 方志刚, 赵先锐, 等. NAK80模具钢表面激光熔覆Ni基碳化钨合金涂层的组织和性能[J]. *表面技术*, 2011, 40(1):5-7.
- [27] YU K, ZHAO W, LI Z, *et al.* High-temperature oxidation behavior and corrosion resistance of in-situ TiC and Mo reinforced AlCoCrFe-Ni-based high entropy alloy coatings by laser cladding[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(6): 10151-10164.
- [28] HU Z, LI Y, LU B, *et al.* Effect of WC content on microstructure and properties of high-speed laser cladding Ni-based coating [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 155: 108449.
- [29] WEN Ch, TIAN Y W, WANG G, *et al.* Electrochemical behavior of steel corrosion in microporous environment of marine concrete [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2022, 42(2): 126-134 (in Chinese).  
文成, 田玉琬, 王贵, 等. 海工混凝土微孔隙环境中钢筋的腐蚀电化学行为[J]. *广东海洋大学学报*, 2022, 42(2):126-134.
- [30] LUO F Y, YANG T Ch, ZHAO Y, *et al.* Effect of W content on microstructure and properties of laser cladding CoCrFeNi HEA coating [J]. *Coatings*, 2023, 13(8): 1301.
- [31] LU J Z, HAN B, CUI C Y, *et al.* Electrochemical and pitting corrosion resistance of AISI 4145 steel subjected to massive laser shock peening treatment with different coverage layers [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 88: 250-262.
- [32] YANG H, XU Z, PENG L, *et al.* High ductility and corrosion resistance chromium gradient stainless steel for fuel cell bipolar plates fabricated via laser powder bed fusion [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2023, 317: 118002.
- [33] LONG L, MENG Y, MIURA H, *et al.* The effect of surface enriched chromium and grain refinement by ball milling on corrosion resistance of 316L stainless steel [J]. *Materials Research Bulletin*, 2017, 91: 91-97.
- [34] WANG Z Q, WANG X L, NAN Y R, *et al.* Effect of Ni content on the microstructure and mechanical properties of weld metal with both-side submerged arc welding technique [J]. *Materials Characterization*, 2018, 138: 67-77.