

# 热丝激光熔覆 17-4PH 涂层组织与腐蚀磨损性能

张安琪<sup>1</sup>, 王彦芳<sup>1</sup>, 牛德文<sup>1</sup>, 石志强<sup>1</sup>, 何艳玲<sup>1</sup>, 王海新<sup>2</sup>, 苏成明<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学(华东) 材料科学与工程学院, 山东 青岛 266580;  
2. 潍柴雷沃重工股份有限公司五星车辆厂, 山东 诸城 262233;  
3. 陕西天元智能再制造股份有限公司, 西安 710055)

**摘要:** 目的 在低碳钢表面高效制备沉淀硬化马氏体不锈钢涂层, 研究涂层在腐蚀磨损苛刻条件下耦合损伤行为。方法 采用热丝激光熔覆技术在 20 钢基材表面制备 17-4PH 马氏体不锈钢涂层, 通过 X 射线衍射仪(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)等分析涂层的相组成和显微组织, 采用电化学腐蚀摩擦磨损试验机对涂层的摩擦磨损、极化曲线、电化学阻抗谱(EIS)及腐蚀磨损耦合行为进行研究。结果 制备的涂层组织均匀、致密, 无裂纹、气孔等缺陷, 主要由马氏体相组成。熔覆区的平均硬度约为 310HV0.1, 约是基材硬度的 1.5 倍, 自腐蚀电流密度为  $6.583 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ , 具有优异的耐蚀性。在 3.5%NaCl 溶液中, 随摩擦载荷的增加, 涂层的开路电位下降, 摩擦因数增大, 自腐蚀电位下降, 腐蚀电流密度增大, 摩擦对腐蚀促进作用明显。结论 热丝激光熔覆技术节能、高效, 制备的 17-4PH 涂层结构致密、性能优异, 可用于在腐蚀磨损苛刻环境下零部件的表面改性。

**关键词:** 热丝激光熔覆; 17-4 马氏体不锈钢涂层; 显微组织; 腐蚀磨损

**中图分类号:** TG172 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)09-0379-08

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.09.040

## Microstructure and Tribocorrosion Properties of Hot-wire Laser Cladding 17-4PH Coating

ZHANG An-qi<sup>1</sup>, WANG Yan-fang<sup>1</sup>, NIU De-wen<sup>1</sup>, SHI Zhi-qiang<sup>1</sup>,  
HE Yan-ling<sup>1</sup>, WANG Hai-xin<sup>2</sup>, SU Cheng-ming<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and engineering, China University of Petroleum (East China), Shandong Qingdao 266580, china;

2. Five-Star Vehicles Plant, WeiChai Lovol Heavy Industry Co., Ltd., Shandong Zhucheng 262233, china;

3. Shaanxi Tyon Intelligent Remanufacturing Co., Ltd., Xi'an 710055, china)

**ABSTRACT:** Precipitation-hardened martensitic stainless steels have excellent comprehensive mechanical properties and corrosion resistance, and are widely used in aviation, aerospace, Marine and petrochemical industries. In this paper, a 17-4PH

收稿日期: 2021-08-06; 修订日期: 2021-11-05

Received: 2021-08-06; Revised: 2021-11-05

基金项目: 山东省自然科学基金(ZR2019MEM032)

Fund: Shandong Provincial Natural Science Foundation (ZR2019MEM032)

作者简介: 张安琪(1997—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: ZHANG An-qi (1997-), Female, Postgraduate, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 王彦芳(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为激光材料表面改性与先进材料。

Corresponding author: WANG Yan-fang (1976-), Male, Doctor, Assistant professor, Research focus: surface modification and advanced materials.

引文格式: 张安琪, 王彦芳, 牛德文, 等. 热丝激光熔覆 17-4PH 涂层组织与腐蚀磨损性能[J]. 表面技术, 2022, 51(9): 379-386.

ZHANG An-qi, WANG Yan-fang, NIU De-wen, et al. Microstructure and Tribocorrosion Properties of Hot-wire Laser Cladding 17-4PH Coating [J]. Surface Technology, 2022, 51(9): 379-386.

martensitic stainless steel coating was prepared on the surface of low carbon steel by hot-wire laser cladding technology. The microstructure and tribocorrosion properties of the coatings were analyzed. The results show that the microstructure of the coating is uniform, compact, and no defects such as cracks and pores. The coating is mainly composed of martensite phase. The average hardness of the cladding zone is about 310HV0.1, which is about 1.5 times of the hardness of the substrate. The corrosion current density is  $6.583 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ , showing excellent corrosion resistance. In 3.5% NaCl solution, with the increase of friction load, the open circuit potential of the coating decreases, the friction coefficient increases, the corrosion potential decreases, and the corrosion current density increases. The friction has a significant promoting effect on the corrosion. This paper can not only provide new ideas and methods for surface modification of materials, but also provide data for the use of 17-4PH coating in harsh corrosive wear environment.

**KEY WORDS:** hot-wire laser cladding; 17-4 martensitic stainless steel coating; microstructure; tribocorrosion

激光熔覆是通过在基材表面添加熔覆材料,利用高能密度激光束辐照加热,使熔覆材料和基材表面薄层发生熔化,并快速凝固,从而在基材表面形成与其为冶金结合的添料熔覆层的一种表面改性技术<sup>[1-2]</sup>。该技术所制备的涂层具有与基体呈冶金结合、稀释率低、热影响区小、组织细小致密等优势,并得到广泛应用<sup>[3]</sup>。根据外形特征熔覆材料主要有粉末和丝材 2 种。丝材熔覆与金属粉末熔覆相比具有材料利用率高、熔覆效率高、环境污染小及熔覆组织缺陷少等优势,并得到广泛关注<sup>[4-6]</sup>。李凯斌等<sup>[7]</sup>采用侧向送丝激光熔覆 308L 不锈钢,研究了激光功率、扫描速度、送丝速度对熔覆层横截面几何尺寸、宽高比及稀释率的影响。吉绍山等<sup>[8]</sup>采用三光束光内同轴送丝技术,开展了单向和多向单道熔覆成形试验。张小新等<sup>[9]</sup>将 ER90S-G 焊丝作为熔覆材料,强化 Ti600 钛合金表面性能。然而,丝材熔化稳定性低,受母材与丝材对激光吸收率低的影响,经常发生未熔合现象,影响涂层成形质量。

热丝激光熔覆是将丝材进入熔池前进行连续稳定加热,再利用高能激光能量,将金属丝材与基材表面同时熔化、凝固与沉积的一种增材制造技术。该技术可以克服粉末熔覆和普通丝材熔覆的缺点,以熔覆效率高、热输入量低、材料利用率高、熔覆质量稳定等优势,在机械装备自动化生产再制造过程中具有较大优势和发展空间<sup>[10-17]</sup>。近年来,热丝激光熔覆技术得到了大量研究者的关注。黄梓麟等<sup>[18]</sup>建立了单道次熔覆工艺参数和成形质量关系的回归模型和多道次熔覆的搭接率模型,提高了激光热丝熔覆的成形质量。Capello 等<sup>[19]</sup>研究了热丝激光熔覆过程脉冲功率和持续时间对熔覆成形的影响。Tyralla 等<sup>[20]</sup>通过温度场控制,获得了高效、低稀释率的激光热丝熔覆层。Zhao 等<sup>[21]</sup>采用热丝激光熔覆技术制备了高耐磨性的 Ni/WC 复合涂层。

17-4PH 钢是沉淀硬化马氏体不锈钢,具有高强度、硬度、抗腐蚀等性能,主要用于海上平台、直升机甲板、涡轮机叶片、机械部件、制造轴类、汽轮机部件等,是理想的涂层候选材料<sup>[22-24]</sup>。Lin 等<sup>[25]</sup>研究

了激光成形修复 17-4PH 不锈钢的微观组织和力学性能,发现激光沉积区的显微组织由马氏体板条和少量的析出强化相颗粒组成,基体和热影响区的显微组织由马氏体板条和铁素体条带组成。王强等<sup>[26]</sup>研究激光功率对 17-4PH 不锈钢丝材激光熔覆组织及硬度的影响,确定了最佳激光熔覆功率。目前激光熔覆 17-4PH 不锈钢的报道主要集中在直接成形态的组织表征、热处理对组织和力学性能的影响等方面,对其腐蚀环境下的摩擦学性能报道较少。本文采用热丝激光熔覆技术在 20 钢表面制备马氏体不锈钢涂层,研究涂层的组织结构及在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀磨损性能。该工作不仅可以为材料表面改性提供新的思路和方法,还可以为 17-4PH 涂层在腐蚀磨损苛刻环境下使用提供数据。

## 1 试验

基材选用 80 mm×160 mm×20 mm 的 20 钢板材。熔覆材料选用 17-4PH 不锈钢丝材,直径为 1.2 mm,化学成分如表 1 所示。采用陕西天元智造研发的 ProLC-3000MT 高速丝材激光熔覆设备,波长为 1 064 nm,光斑直径为 3 mm。采用侧向送丝,送丝速度为 14 mm/s,丝材预热温度为 800 ℃,激光功率为 2 000 W,采用氩气保护,气体流量为 20 L/min。

表 1 熔覆焊丝的化学成分  
Tab.1 Chemical composition of cladding wire  
wt. %

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	P	S	Cu	Nb	Fe
0.032	0.50	0.32	16.55	4.63	0.45	0.012	0.012	3.40	0.25	Bal.

采用 TD-3500 型 X 射线衍射仪 (Cu K $\alpha$  衍射,  $\lambda=0.154\ 060\ \text{nm}$ ) 分析熔覆涂层的物相,操作电压为 30 kV,工作电流为 20 mA,扫描范围为 20°~110°,扫描步长 0.02°。采用 ZEISS 光学显微镜和 JSM-7200F 扫描电镜观察涂层的组织形貌。采用 HV-100A 型显微硬度计,沿熔覆层横截面熔深方向由表面至基体每隔 0.1 mm 测试显微硬度,分析涂层显微硬度的

分布特征, 加载载荷 100 g, 保载时间 15 s。

干摩擦测试采用直径 3 mm 的 GCr15 为对磨副, 载荷为 5 N, 频率为 2 Hz, 摩擦时间为 30 min。采用三电极体系测试涂层和基体在 3.5%NaCl 溶液中的动电位极化曲线、EIS 电化学交流阻抗谱, 工作电极为试样, 参比电极为 Ag/AgCl (饱和 KCl), 辅助电极为石墨电极。试样在腐蚀液中的暴露面积为 10 mm×10 mm。极化扫描速度为 0.3 mV/s, 扫描范围为 -500~500 mV (vs. OCP), 频率范围为 0.01 Hz~100 kHz。电化学腐蚀磨损采用 MFT-EC4000 往复电化学腐蚀摩擦磨损试验机, 其实验原理如图 1 所示。选用 3.5%NaCl 腐蚀溶液, 试样规格为 10 mm×20 mm, 对偶件为直径 4 mm 的 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 球, 摩擦加载载荷为 5、10、15、20 N, 往复频率为 0.5 Hz, 往复行程为 6 mm, 摩擦时间为 40 min。静载和摩擦条件下的腐蚀试验, 前 10 min 静置, 中间 40 min 加载摩擦, 后 10 min 静置, 总试验时间为 60 min。

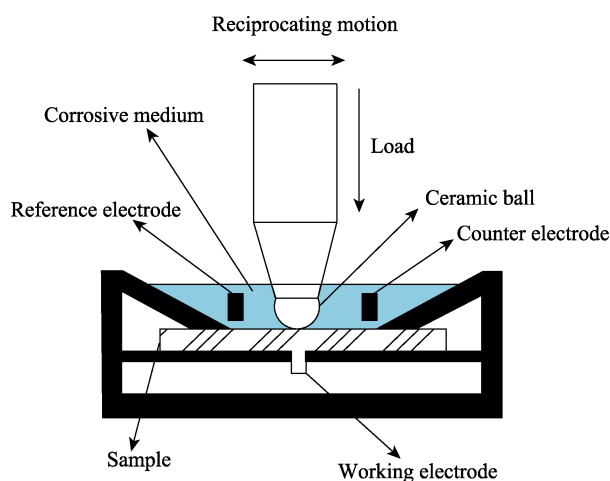


图 1 腐蚀磨损测试示意图

Fig.1 Schematic diagram of tribocorrosion test

## 2 涂层的显微组织

图 2 为热丝激光熔覆 17-4PH 试样的表面宏观形貌, 熔覆层成形良好, 表面平整、光滑且无宏观裂纹。图 3a 为熔覆层的宏观组织, 分为熔覆层、热影响区和基体三部分。熔覆层致密、均匀, 无裂纹, 但有少量气孔。涂层具有明显的多道搭接痕迹, 厚度约为 1 200 μm, 热影响区宽度约为 220 μm。图 3b 为熔覆层结合区的能谱分析, 可以看出涂层和基材结合处元素发生了相互扩散, 说明涂层与基材实现了冶金结合。图 4 为 17-4PH 涂层的 X 射线衍射图谱, 在 2θ=44.5°、64.8°、82.0°、98.5°出现了明显的衍射峰, 经标定, 其分别是马氏体相 (110)、(200)、(211) 和 (220) 晶面的衍射峰。

图 5 为 17-4PH 马氏体不锈钢涂层的组织形貌。由于熔覆层不同区域的温度梯度和凝固速度不同, 呈

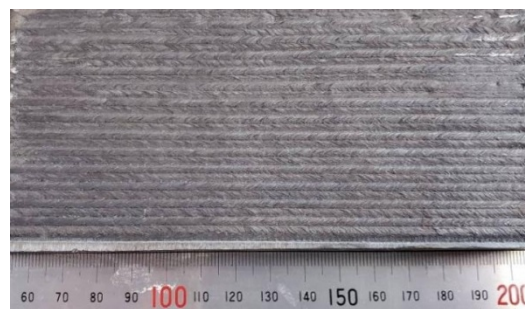
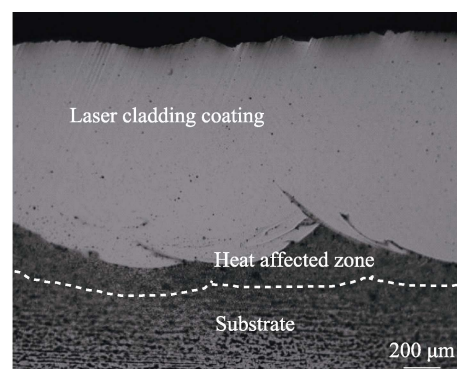
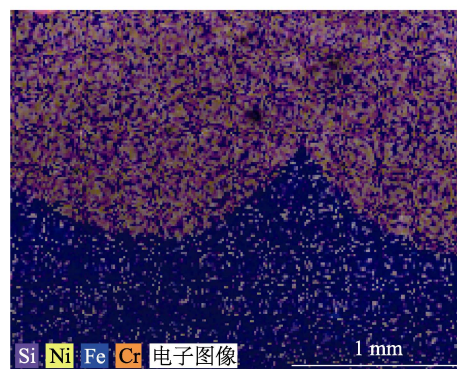


图 2 涂层表面宏观形貌

Fig.2 Surface morphology of hot-wire laser cladding 17-4PH coating



a 宏观形貌



b 能谱分析

图 3 17-4PH 不锈钢涂层的宏观形貌及能谱分析  
Fig.3 Macro morphology and energy spectrum analysis of hot-wire laser cladding 17-4PH coating: a) macro morphology; b) energy spectrum analysis

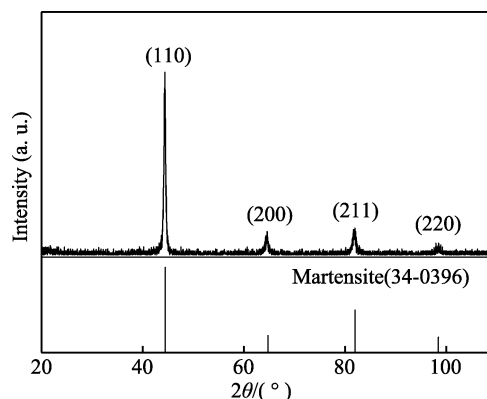


图 4 17-4PH 马氏体不锈钢涂层的 X 射线衍射图  
Fig.4 X-ray diffraction pattern of 17-4PH martensitic stainless steel coating

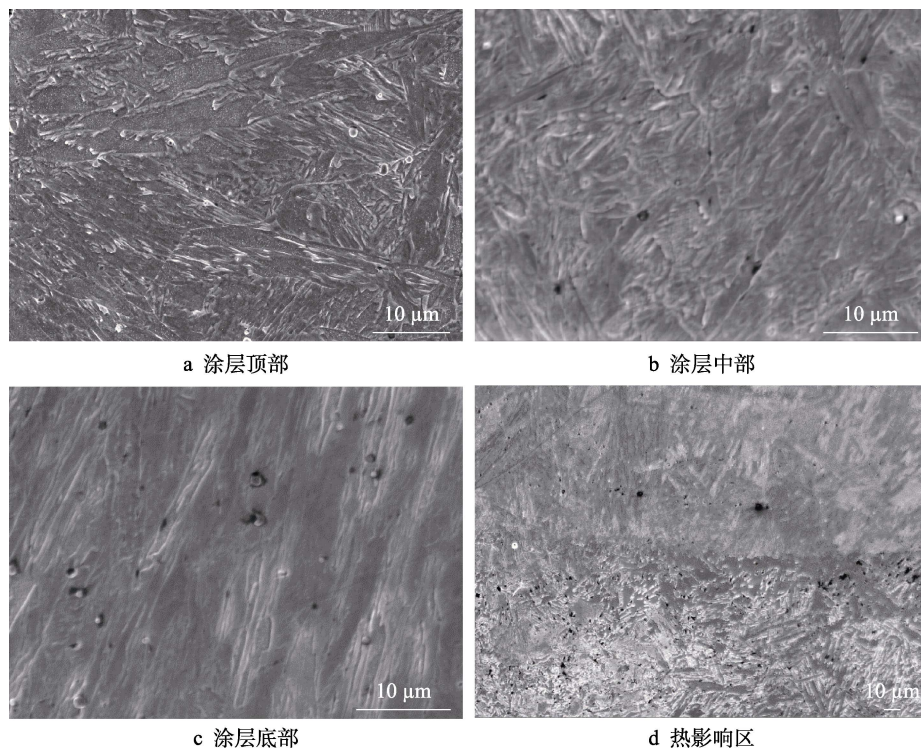


图5 激光熔覆涂层的组织形貌

Fig.5 Morphology of laser cladding 17-4PH coating: a) top of coating; b) middle region of coating; c) bottom of coating; d) heat affected zone

现出不同的组织形态。表层是细薄的马氏体板条(图5a),中部是厚长的马氏体板条(图5b),涂层底部为粗马氏体板条(图5c),在基材与熔覆层的结合区有一条由平面晶结合带,说明涂层和基材呈冶金结合(图5d)。

根据凝固理论,凝固组织生长形态主要受温度梯度/凝固速度控制。在结合区,熔池的温度梯度非常高,基材有直接冷却作用,冷却速度大,使该区域形成了薄的马氏体板条。随着熔覆层数的增加,沿熔覆方向的温度梯度和冷却速率均因热的积累而降低,形成粗大的马氏体板条。此外,后续激光熔覆过程中的多次快速加热和冷却也会使已熔覆层重复回火,导致已熔覆层中形成的马氏体板条变粗。熔覆后加热效应的减弱使激光熔覆区顶部再次形成薄马氏体板条。

### 3 涂层的性能

#### 3.1 熔覆层的显微硬度

图6为热丝激光熔覆17-4PH涂层的显微硬度分布图。从图6中可以看出,硬度从激光熔覆区、热影响区到基材逐渐降低,熔覆层硬度变化不大,熔覆区的硬度约为基材的1.5倍。这主要是由于熔覆层主要是马氏体组织,具有较高的硬度。

#### 3.2 摩擦磨损

图7和图8分别为涂层与基材干摩擦条件下的摩

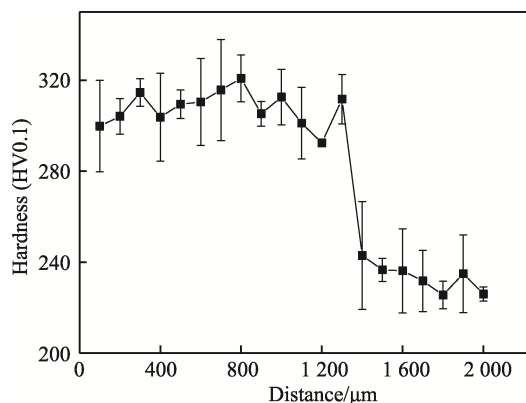


图6 17-4PH 马氏体不锈钢涂层的显微硬度

Fig.6 Microhardness of 17-4PH martensitic stainless steel coating

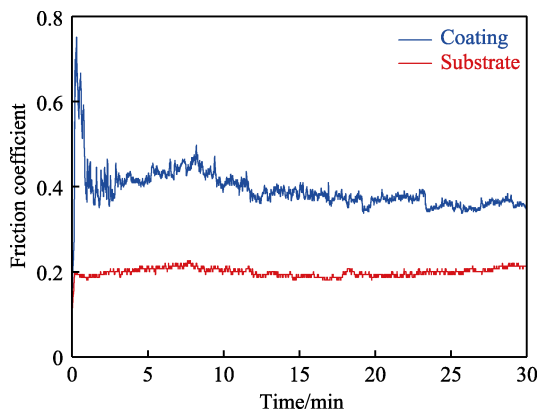


图7 涂层与基材的摩擦因数随时间变化曲线

Fig.7 Friction coefficient of laser cladding coating and substrate



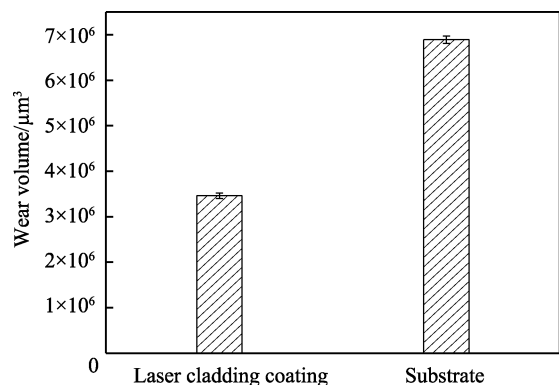


图 8 涂层与基材的磨损体积  
Fig.8 Wear volume of laser cladding coating and substrate

擦因数随摩擦时间变化曲线和磨损量。可以看出,涂层的摩擦因素波动较大,平均摩擦因数约为 0.4,基材摩擦因数较平滑,平均摩擦因数约为 0.2。涂层的摩擦因数较基材高,但磨损量却远小于基材。这主要是由于涂层主要是马氏体组织,较基材的亚共析钢组织具有更高的硬度,耐磨性更高。但在滑动过程中也

需要克服更高的极限剪切强度,容易使表层剥落,产生磨屑,导致表面粗糙度增大和摩擦因数升高。

图 9a、图 9b 分别为涂层和基材在 3.5%NaCl 溶液中的摩擦因数随载荷变化曲线。可以看到,随摩擦载荷的增加,涂层和基材的摩擦因数均增大。这是由于随载荷增大,局部应力迅速增加,使涂层表面出现微凸峰和碎屑,导致表面粗糙度增大,同时也增大了对磨副与磨痕的接触面积,使摩擦因数增大。但在相同载荷下,涂层的摩擦因数小于基材。图 10a、图 10b 分别给出了涂层和基材磨痕轮廓,可以明显看出,涂层的磨损体积远小于基材,涂层在溶液中的耐磨性优于基材。同时相比于相同载荷下的干摩擦因数,溶液中涂层的摩擦因数降低,这主要是由于摩擦力驱使液体流动,并从磨损表面携带碎屑流出,降低了表面粗糙度和摩擦因数,说明溶液环境在摩擦过程中有润滑作用。

### 3.3 电化学腐蚀

图 11 为涂层与基材在 3.5%NaCl 溶液中的极化曲

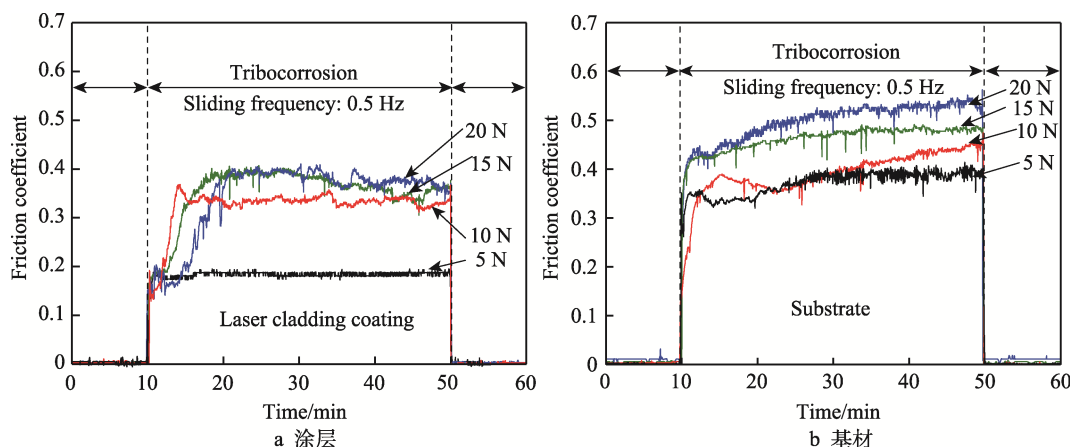


图 9 不同载荷下涂层和基材腐蚀磨损耦合摩擦因数  
Fig.9 Friction coefficient of tribocorrosion between coating and substrate at various friction loads: a) laser cladding coating; b) substrate

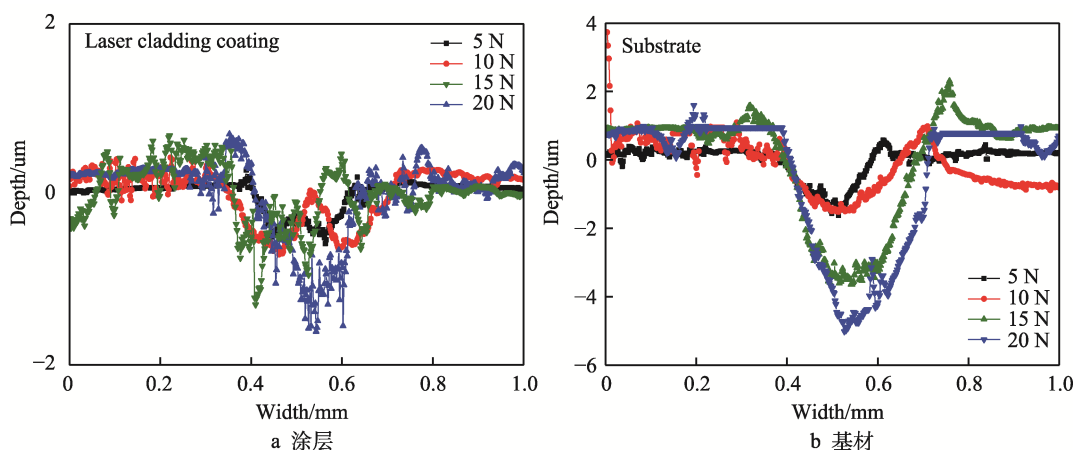


图 10 不同载荷下涂层和基材磨痕的截面轮廓  
Fig.10 Section profile of abrasion of coating and substrate at various friction loads: a) laser cladding coating; b) substrate

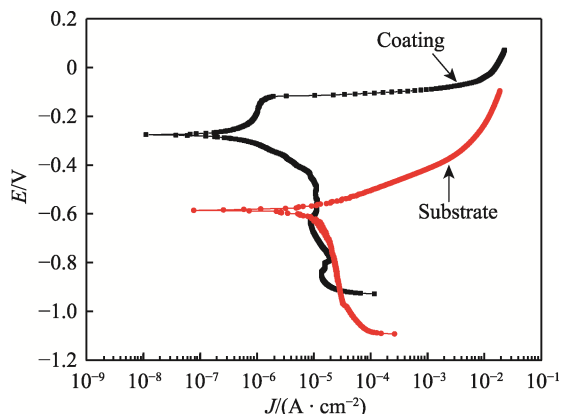


图 11 涂层与基材的极化曲线  
Fig.11 Polarization curves of coating and substrate

线。根据 Tafel 外推法计算出涂层和基材的自腐蚀电位  $E_{\text{corr}}$  和腐蚀电流密度  $J_{\text{corr}}$ ，如表 2 所示。从图 11 中可以看出，涂层表现出一定的钝化特征。与基材相比，涂层腐蚀电位较正，自腐蚀电流密度约小 3 个数量级，表现出更好的耐腐蚀性能。这主要是由于 17-4PH 熔覆丝材含有较多的 Cr、Ni 等易钝化元素，具有较强的耐蚀性。热丝激光熔覆之后，涂层保持了熔覆丝的组织结构特征，同时与基材之间形成了良好的冶金效果，组织更加致密，呈现了比基材更优异的耐蚀性。

表 2 涂层和基材的电化学参数  
Tab.2 Electrochemical parameters of coatings and substrates

Materials	$E_{\text{corr}}/\text{V}$	$J_{\text{corr}}/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
Coating	-0.290	$6.583 \times 10^{-8}$
Substrate	-0.585	$1.047 \times 10^{-5}$

图 12 为热丝激光熔覆涂层及基材在 3.5%NaCl 溶液中开路电压稳定后测得的交流阻抗谱。从图 12a 可以看出，熔覆涂层及基材的 Nyquist 曲线均表现为单一直径的容抗弧，熔覆涂层的容抗弧半径大于基

材，说明涂层的电荷转移电阻大，耐腐蚀性优于基材。图 12b 所示的 Bode 图反映了频率、阻抗模值、相位角之间的关系。图 12b 中，低频区的阻抗模值  $|Z|$  用来评价金属表面被腐蚀介质破坏的程度，熔覆涂层的  $|Z|$  大于基材，说明涂层的耐蚀性优于基材。从 Bode 相位角图可以看出，熔覆涂层的最大相位角、最大相位角频率范围均大于基材。综上可以看出热丝激光熔覆 17-4PH 马氏体不锈钢涂层的组织相对致密均匀，耐蚀性优于基材。

图 13 为涂层在 3.5%NaCl 溶液中的开路电位随不同载荷摩擦下的变化曲线。由图 13 可见，随着试样浸泡时间的延长，涂层表面状态逐渐稳定，电位稳定在 -0.33 V 左右。在加载瞬间，开路电位急速下降，逐渐到达最低点，这是因为 17-4PH 涂层表面钝化膜破坏的瞬间表面状态失稳；随摩擦的进行，开路电位又逐渐回升并趋于稳定。随着载荷的增大，钝化膜被破坏得越严重，腐蚀磨损耦合开路电位的稳定值越小，卸载之后涂层表面再次生成稳定致密的钝化膜，开路电位的值逐渐回升至初始水平。

图 14 为 17-4PH 马氏体不锈钢涂层在不同载荷下摩擦测得的极化曲线。可以看出，摩擦作用使涂层的自腐蚀电位负移；同时，利用 Tafel 外推法对静态及滑动磨损过程中的动电位极化曲线进行拟合，得到的电化学参数如表 3 所示。静态腐蚀中 17-4PH 马氏体不锈钢涂层的电流密度仅为  $6.583 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ ，表明静态条件下涂层具有较好的耐蚀性；在摩擦过程中自腐蚀电位降低，且随着载荷的增加，腐蚀电流密度增大。表明滑动磨损使不锈钢涂层表面状态发生变化，钝化膜遭到破坏，减薄甚至破裂，且载荷越大变形越严重，致使暴露在腐蚀介质中的面积增大，表面电位差加大导致腐蚀电位负移和腐蚀电流增大。另外，从表 3 中可以看出，载荷影响下的腐蚀电流密度比静态条件下的腐蚀电流密度高约 1~2 个数量级，且随载荷增加，腐蚀电流密度增大。这表明磨损促进了不锈钢涂层的腐蚀速率，故腐蚀磨损之间存在交互作用。

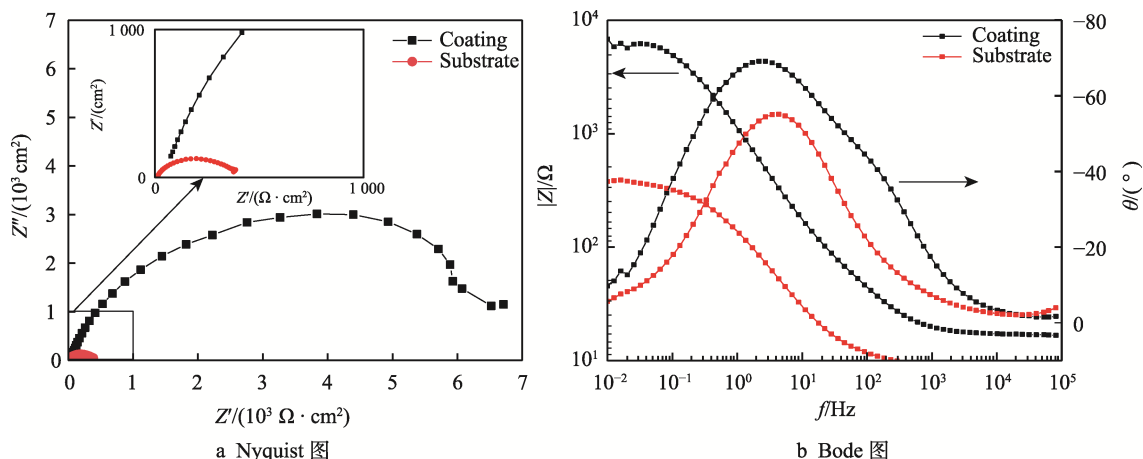


图 12 热丝激光熔覆涂层和基材阻抗图谱  
Fig.12 ESI of laser cladding 17-4PH coating and substrate: a) Nyquist plot; b) Bode plot

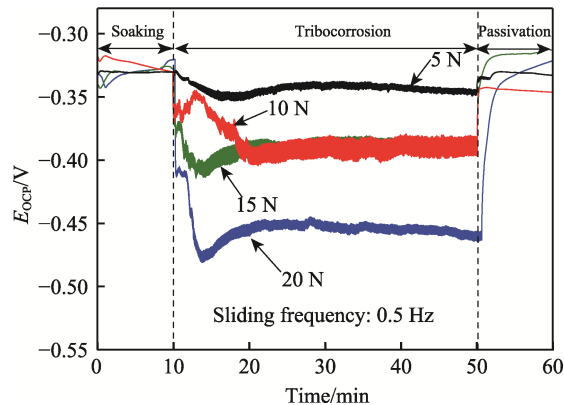


图 13 不同载荷下的腐蚀磨损耦合开路电位  
Fig.13 Coupled open circuit potentials of corrosion wear at various friction loads

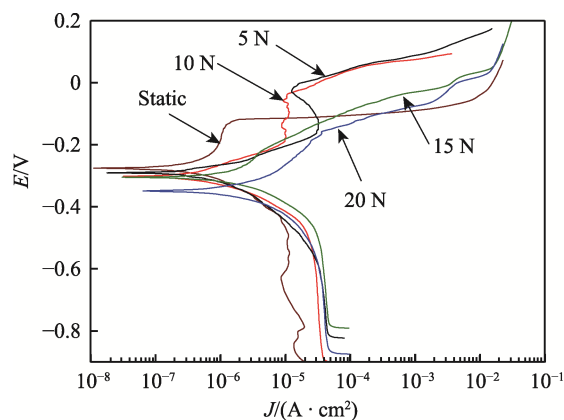


图 14 不同载荷下的动态极化曲线  
Fig.14 Dynamic polarization curves at various friction loads

表 3 不同载荷下涂层的电化学参数  
Tab.3 Electrochemical parameters of coatings at various friction loads

Load/N	$E_{\text{corr}}/\text{V}$	$J_{\text{corr}}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
0	-0.290	$6.583\times10^{-8}$
5	-0.303	$6.715\times10^{-7}$
10	-0.321	$8.342\times10^{-7}$
15	-0.325	$2.547\times10^{-6}$
20	-0.378	$3.652\times10^{-6}$

## 4 结论

- 1) 热丝激光熔覆涂层的显微组织主要为板条状马氏体。熔覆区的平均硬度约为 310HV0.1, 约是基材硬度的 1.5 倍。
- 2) 热丝激光熔覆涂层的自腐蚀电流密度为  $6.583\times10^{-8} \text{ A/cm}^2$ , 具有优异的静态耐蚀性, 涂层可以改善基材的耐蚀性。
- 3) 在 3.5%NaCl 溶液中, 随摩擦载荷的增加, 热丝激光熔覆涂层的开路电位下降, 摩擦因数上升, 自腐蚀电位下降, 腐蚀电流密度增大, 磨损促进涂层

的腐蚀速率, 腐蚀与磨损存在交互作用。

## 参考文献:

- [1] 张津超, 石世宏, 龚燕琪, 等. 激光熔覆技术研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(10): 1-11.  
ZHANG Jin-chao, SHI Shi-hong, GONG Yan-qi, et al. Research Progress of Laser Cladding Technology[J]. Surface Technology, 2020, 49(10): 1-11.
- [2] 王彦芳, 李豪, 石志强, 等. 激光熔覆高耐蚀 Fe 基固溶体合金涂层[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(8): 61-65.  
WANG Yan-fang, LI Hao, SHI Zhi-qiang, et al. Laser Cladding Fe-Based Solid Solution Alloy Coating with High Corrosion Resistance[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(8): 61-65.
- [3] ZHU Li-da, XUE Peng-sheng, LAN Qing, et al. Recent Research and Development Status of Laser Cladding: A Review[J]. Optics & Laser Technology, 2021, 138: 106915.
- [4] KRIPALANI K, JAIN P. Comprehensive Study of Laser Cladding by Nitinol Wire[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 37: 656-664.
- [5] HEIGEL J C, GOUGE M F, MICHALERIS P, et al. Selection of Powder or Wire Feedstock Material for the Laser Cladding of Inconel® 625[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 231: 357-365.
- [6] XU Xiang, MI Gao-yang, XIONG Ling-da, et al. Morphologies, Microstructures and Properties of TiC Particle Reinforced Inconel 625 Coatings Obtained by Laser Cladding with Wire[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 740: 16-27.
- [7] 李凯斌, 李东, 刘东宇, 等. 侧向送丝光纤激光单道熔覆层组织[J]. 焊接学报, 2014, 35(10): 85-88, 117.  
LI Kai-bin, LI Dong, LIU Dong-yu, et al. Microstructure of Single Track Fiber Laser Cladding with Wire Feeding by Side[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(10): 85-88, 117.
- [8] 吉绍山, 刘凡, 傅戈雁, 等. 三光束光内同轴送丝激光熔覆成形新方法研究[J]. 表面技术, 2019, 48(4): 285-293.  
JI Shao-shan, LIU Fan, FU Ge-yan, et al. New Forming Method of Coaxial Wire Feeding Inside Three Beams Laser Cladding[J]. Surface Technology, 2019, 48(4): 285-293.
- [9] 张小新, 陈建荣, 唐刚. 发动机用 Ti600 钛合金激光送丝熔覆参数优化及性能表征[J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(8): 714-718.  
ZHANG Xiao-xin, CHEN Jian-rong, TANG Gang. Characterization of Ti600 Ti-Alloy Surfaces Modified by Laser-Cladding of SKD11 Wire[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2020, 40(8): 714-718.
- [10] NURMINEN J, RIIHIMÄKI J, NÄKKI J, et al. Comparison of laser cladding with powder and hot and cold wire techniques[C]//International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. Scottsdale: Laser Instit-

- ute of America, 2006: 568.
- [11] NURMINEN J, RIIHIMÄKI J, NÄKKI J, et al. Hot-Wire Cladding Process Studies[J]. International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics, 2007, 1702: 948-952.
- [12] WEN Peng, FENG Zhen-hua, ZHENG Shi-qing. Formation Quality Optimization of Laser Hot Wire Cladding for Repairing Martensite Precipitation Hardening Stainless Steel[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 65: 180-188.
- [13] WEN Peng, CAI Zhi-peng, FENG Zhen-hua, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Hot Wire Laser Clad Layers for Repairing Precipitation Hardening Martensitic Stainless Steel[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 75: 207-213.
- [14] KÄSTNER C, NEUGEBAUER M, SCHRICKER K, et al. Strategies for Increasing the Productivity of Pulsed Laser Cladding of Hot-Crack Susceptible Nickel-Base Superalloy Inconel 738 LC[J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2020, 4(3): 84.
- [15] MUNRO C, CHEN J. Direct Comparison of Cold Metal Transfer to Laser Hot-Wire Cladding for AISI 4340 Structural Steel Repair[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2021, 26(1): 11-19.
- [16] LIU Shuang, LIU Wei, HAROONI M, et al. Real-Time Monitoring of Laser Hot-Wire Cladding of Inconel 625[J]. Optics & Laser Technology, 2014, 62: 124-134.
- [17] ZHANG Zhe, KONG Fan-rong, KOVACEVIC R. Laser Hot-Wire Cladding of Co-Cr-W Metal Cored Wire[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 128: 105998.
- [18] 黄梓麟, 王罡, 魏绍鹏, 等. 激光热丝熔覆修复工艺设计与成形质量分析[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(S1): 141-145.
- HUANG Zi-lin, WANG Gang, WEI Shao-peng, et al. Quality Characterization and Technological Design in Laser Hot Wire Cladding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(S1): 141-145.
- [19] CAPELLO E, PREVITALI B. The Influence of Operator Skills, Process Parameters and Materials on Clad Shape in Repair Using Laser Cladding by Wire[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 174(1-3): 223-232.
- [20] TYRALLA D, SEEFELD T. Temperature Field Based Closed-Loop Control of Laser Hot Wire Cladding for Low Dilution[J]. Procedia CIRP, 2020, 94: 451-455.
- [21] ZHAO Sheng-bin, XU Sai, HUANG Yi-ming, et al. Laser Hot-Wire Cladding of Ni/WC Composite Coatings with a Tubular Cored Wire[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 298: 117273.
- [22] 路媛媛, 肖鱼, 赖境, 等. 激光固溶对 17-4PH 不锈钢力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(2): 156-162.
- LU Yuan-yuan, XIAO Yu, LAI Jing, et al. Effect of Laser Solid Solution Treatment on Mechanical Properties of 17-4PH Stainless Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(2): 156-162.
- [23] HSU T H, HUANG Pei-chen, LEE Meng-yun, et al. Effect of Processing Parameters on the Fractions of Martensite in 17-4 PH Stainless Steel Fabricated by Selective Laser Melting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 859: 157758.
- [24] 邓操, 王越, 袁铁锤, 等.  $\text{TiB}_2$  含量对 17-4PH 钢熔覆层组织及性能的影响[J]. 精密成形工程, 2021, 13(2): 42-47.
- DENG Cao, WANG Yue, YUAN Tie-chui, et al. Effect of  $\text{TiB}_2$  Content on Structure and Properties of 17-4PH Steel Cladding Layer[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(2): 42-47.
- [25] 林鑫, 薛蕾, 陈静, 等.  $\text{TiB}_2$  含量对 17-4PH 钢熔覆层组织及性能的影响[J]. 中国表面工程, 2009, 22(1): 19-24.
- LIN Xin, XUE Lei, CHEN Jing, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Laser Forming Repaired Ti-6Al-4V Alloy Component[J]. China Surface Engineering, 2009, 22(1): 19-24.
- [26] 王强, 李洋洋, 杨洪波, 等. 激光功率对 17-4PH 丝材激光熔覆组织及硬度的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(3): 191-197.
- WANG Qiang, LI Yang-yang, YANG Hong-bo, et al. Effect of Laser Power on Laser Cladding Structure and Hardness of 17-4PH Wire[J]. Surface Technology, 2021, 50(3): 191-197.

责任编辑: 万长清