

激光熔覆镍基合金磨损及电化学腐蚀性能研究

韩晨阳¹, 孙耀宁¹, 徐一飞¹, 张瑞华², 路超³, 赵芳⁴

(1.新疆大学 机械工程学院, 乌鲁木齐 830047; 2.阳江市五金刀剪产业技术研究院, 广东 阳江 529533; 3.钢铁研究总院, 北京 100053; 4.兰州理工大学, 兰州 730000)

摘要: **目的** 为解决不锈钢零件在工程应用中表层由于磨损、腐蚀导致其使用寿命缩短的问题, 修复和提升不锈钢表层的硬度、耐磨性及耐蚀性。**方法** 在总结前期大量实验数据及规律的基础上, 采用激光熔覆法在 304 不锈钢表层制备无裂纹、熔覆质量良好的 Ni60 涂层。利用光学显微镜、扫描电镜、能谱仪、X 射线衍射仪等设备, 系统地研究了熔覆层组织的形貌、元素分布及物相结构。采用显微硬度计、摩擦磨损仪、电化学工作站等设备, 测试熔覆层的硬度分布、磨损特性及电化学特性。**结果** 涂层具有均匀致密的微观结构, 主要以固溶态 γ -(Ni,Fe)、碳化物 $M_{23}C_6$ ($M=Fe, Ni, Cr$)、硼化物 CrB 组成, 熔覆涂层的显微硬度约为基材的 2.5 倍, 熔覆过程中, 硬质增强相的形成是其硬度提升的主要原因。熔覆涂层的磨损率、磨损深度、磨损后表面单位面积的粗糙度 (S_a) 分别为基材的 8.5%、69%、22.2%, 与基材相比, 涂层的耐磨性能明显更优。涂层的腐蚀速率比基材低 2 个数量级, 涂层表面形成的致密钝化膜是耐蚀性好的主要原因。**结论** 熔覆质量良好的 Ni60 涂层, 较 304 奥氏体不锈钢基材有更加优异的硬度、耐磨及耐腐蚀性能。

关键词: 激光技术; 硬度; 耐磨; 腐蚀; 微观结构; 镍基合金

中图分类号: TH117.1; TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2021)11-0103-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.11.008

Research on Wear and Electrochemical Corrosion Properties of Laser Cladding Nickel Base Alloy

HAN Chen-yang¹, SUN Yao-ning¹, XU Yi-fei¹, ZHANG Rui-hua², LU Chao³, ZHAO Fang⁴

(1.School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2.Yangjiang Hardware Knife and Scissors Industrial Technology Research Institute, Yangjiang 529533, China; 3.General Iron and Steel Research Institute, Beijing 100053, China; 4. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730000, China)

ABSTRACT: In order to solve the problem that the service life of surface layer of stainless steel parts is shortened due to wear and corrosion in engineering practice, efforts are made to repair and improve the hardness, wear resistance and corrosion resistance of surface layer of stainless steel. On the basis of summarizing a lot of experimental data and rules in the early stage,

收稿日期: 2021-01-05; 修订日期: 2021-04-23

Received: 2021-01-05; Revised: 2021-04-23

基金项目: 自治区自然科学基金 (2020D01C030); 自治区科技支疆项目计划 (2020E0264); 阳江市科技计划项目 (SDZX2020009)

Fund: Supported by Autonomous Region Natural Science Foundation (2020D01C030), Xinjiang Science and Technology Project Plan of Autonomous Region (2020E0264), Science and Technology Project of Yangjiang City (SDZX2020009)

作者简介: 韩晨阳 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为激光表面改性。

Biography: HAN Chen-yang (1997—), Male, Master, Research focus: laser surface modification.

通讯作者: 孙耀宁 (1977—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为表面改性及复合材料。

Corresponding author: SUN Yao-ning (1977—), Female, Doctor, Professor, Research focus: surface modification and composite materials.

引文格式: 韩晨阳, 孙耀宁, 徐一飞, 等. 激光熔覆镍基合金磨损及电化学腐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(11): 103-110.

HAN Chen-yang, SUN Yao-ning, XU Yi-fei, et al. Research on wear and electrochemical corrosion properties of laser cladding nickel base alloy [J]. Surface technology, 2021, 50(11): 103-110.

Ni60 coating with good cladding quality and no cracks was prepared on 304 stainless steel surface by laser cladding. The microstructure, element distribution and phase structure of the cladding surface were systematically studied by optical microscope, scanning electron microscope, energy dispersive spectrometer and X-ray diffractometer. The hardness distribution, wear characteristics and electrochemical characteristics of the cladding surface were measured by microhardness tester, friction and wear tester and electrochemical workstation. The uniform and compact microstructure of the coating is mainly composed of solid solution state γ -(Ni,Fe), carbides $M_{23}C_6$ ($M=Fe, Ni, Cr$) and boride CrB. The microhardness of the cladding coating is about 2.5 times that of the substrate. The hardness enhancement of the coating is mainly caused by the hard reinforcing phase formed in the cladding process. The wear rate, wear depth and wear surface roughness per unit area (S_a) of the cladding coating are 8.5%, 69% and 22.2% of the substrate, respectively. Compared with the substrate, the wear resistance of the cladding coating is obviously better. The corrosion rate of the coating is 2 orders of magnitude lower than that of the substrate, and the formation of dense passivation film on the coating surface is the main reason for the good corrosion resistance. Compared with 304 austenitic stainless steel base material, Ni60 coating with good cladding quality has better hardness, wear resistance and corrosion resistance.

KEY WORDS: laser technique; hardness; wear resisting; corrosion; microstructure; nickel base alloy

在服役过程中,机械、电气设备的零部件表面经常会受到腐蚀、磨损、疲劳应力的交叉作用,持续的破坏作用会使工件报废。而报废金属的修复再利用价值巨大,2019年,国家废弃金属消费量为2.16亿吨,同比2018年增长15%。废弃产品熔化成原材料会造成二次浪费,因此研究经济性、耐腐蚀、耐磨损涂层来保护材料显得尤为重要^[1-5]。

Conde 等人^[6]报道, Ni-Cr 合金镀层具有良好的润湿性、耐蚀性、耐磨性。Cockeram^[7]发现, Ni-Cr 合金相对于铁基、钴基具有更低的断裂韧性。此前,人们大多采用传统方式如热喷涂(机械结合)、激光沉积(涂层薄)等技术来涂覆材料表面,而激光熔覆具有加工效率高、污染小等优势,是目前应用广泛的一种再制造技术。文献[8-9]采用激光熔覆 Ni-Cr 合金,发现镀层与基体冶金结合良好,骤热快冷生成的硬铬沉淀相及共晶结构在提升硬度的同时,也加大了裂纹扩展的途径。格罗宁根大学的 Hemmati^[10]在碳钢上激光熔覆了 Ni-Cr 合金,通过研究不同稀释率的 Fe 含量对硬铬生成相及涂层硬度的影响,得出稀释率在 25%以下时,会促进含铁量高的铬硼化物生成,且涂层硬度随着稀释率减小呈线性升高。大连理工大学吴祖鹏^[11]通过对预热 300 °C 的 304 不锈钢基板表面进行激光熔覆,成功制备出无裂纹的 Ni60 熔覆涂层,在此条件下得到的涂层具有良好的韧性,但预热温度过高,凝固涂层散热慢,组织粗化,导致其硬度不高。如何通过控制预热温度获得无裂纹、性能良好的镍基合金涂层备受关注^[12-16]。

304 奥氏体不锈钢作为常见的低碳合金钢,广泛用作工程零件,此类零件服役于交变载荷及恶劣环境中,但其表面耐磨性及耐腐蚀性能较差,零件极易失效。为满足实际工程应用,在 304 不锈钢基体上制备无裂纹、高硬度、耐磨性好、耐腐蚀性能良好的 Ni60 涂层,且研究涂层性能提升的原因及显微组织特性是

必要的。因此,在总结前期大量实验结果的基础上,通过控制预热温度,在 304 奥氏体不锈钢表层激光熔覆 Ni60 合金粉末,以期获得熔覆质量良好、无裂纹的涂层表面,从组织及相的角度分析熔覆层硬度、耐磨性及耐腐蚀性能变化的原因。

1 实验

1.1 材料及实验参数

基材选用 304 奥氏体不锈钢,尺寸为 100 mm×50 mm×4 mm。其化学成分(以质量分数计)为:0.07% C, 1.8% Mn, 10% Ni, 19% Cr, 0.8% Si。

Ni60 熔覆粉末的粒度为 35~105 μm ,熔点为 960~1040 °C。其化学成分(以质量分数计)为:0.5% C, 4.5% P, 17% Cr, 4.55% Si, 余量为 Ni。熔覆前,采用金相干砂纸对基材表面打磨去污,酒精清洗后,在真空干燥箱中,120 °C 预热备用。

实验设备采用德国 IPG 公司 YLS-2000 光纤激光器,光斑直径为 2 mm,离焦量为 16 mm,总结大量工艺实验,优化参数为:激光功率 $P=1200\text{ W}$,扫描速度 $V_p=5\text{ mm/s}$,送粉速度 $V_f=10\text{ r/min}$,搭接率 $L=33\%$,送粉气(氩气)流量为 6 L/min,保护气(氩气)流量为 3 L/min。熔覆结束后,静置冷却,沿涂层横截面切割样品,砂纸打磨抛光,制备金相试样,以王水($V(\text{HCl}):V(\text{HNO}_3)=3:1$)腐蚀截面 30 s 左右,超声酒精清洗后,备用。

1.2 熔覆涂层的表征

采用上海荼明公司生产的 CDM-16CX 金相显微镜观察熔覆层微观形貌。利用 ZEISS EVO 18 型扫描电子显微镜(SEM)观察组织结构。利用 Oxford X-Max 50 型能量色散谱(EDS,微探针 20 kV,能量分辨率优于 129 eV 的 Mn $K\alpha$)分析化学成分。通过日本理

学公司生产的 D/max-2400 粉末 X 射线衍射仪(XRD, 扫描速度 5 (°)/min, 扫描角度 $2\theta=20^{\circ}\sim 110^{\circ}$) 分析物相组成。利用 HV-1000 型数字显微硬度计, 测量涂层截面沿深度方向的显微硬度, 为避免误差, 测量 3 组硬度, 取平均值(施加压力为 200 N, 停留时间为 15 s)。采用 HT-300 型干摩擦滑动磨损实验机, 对 304 不锈钢基材及激光熔覆涂层(尺寸为 10 mm×5 mm×5 mm) 进行摩擦磨损实验(测量 3 次), 采用 Si₃N₄ 摩擦环(直径为 4 mm), 载荷为 3 N, 磨损次数为 1.2×10^4 次。采用 VHX-6000 超景深显微镜观察磨损表面形貌, 测量磨损数据。采用 CS 350 电化学工作站对熔覆层试样进行电化学测试, 表征其耐腐蚀性能, 腐蚀介质为 3.5% NaCl 溶液, 测试温度为(25±5) °C, 以铂电极为辅助电极, 甘汞电极为参比电极, 试样为工作电极, 实时测试 Tafel 极化曲线及阻抗。测试前, 采用金相砂纸将试样表面逐级打磨至 2000#, 并用 SiO₂ 抛光液抛光, 再将涂层表面浸入电解液中 1 h, 以便在稳定的开路电位下完成测试。电化学阻抗测试的频率为 $10^{-2}\sim 10^5$ Hz, 获得了电化学阻抗谱。测量动电位极化曲线时, 腐蚀电位以 100 mV/s 的扫描速度从 -1.5 V 扫描到 1.5 V, 为避免误差, 对样品进行 3 次电化学测试, 数值结果取平均值。

2 结果及分析

2.1 Ni60 涂层的显微组织及硬度

图 1 为涂层截面不同部位的金相组织形貌, 依次为 Ni60 涂层横截面底部、中部、顶部的组织形貌。涂层底部由平面晶(平面晶是涂层与基材冶金结合的良好标志)及胞状晶组成(图 1a)。涂层中部主要由鱼骨状柱状晶组成(图 1b)。从图 1c 中可以看到, 在涂层顶部, 沿深度方向 200 μm 左右形成细小的等轴晶, 涂层顶部热量以很快的速度向下和向外传播, 因此在快冷作用下, 涂层顶部的等轴晶得到细化。熔池结晶过程中, 合金元素及凝固条件会对凝固模式产生影响, 结晶形态及大小与成分过冷(温度梯度 G 和生长速率 R) 有关, G/R 对于微观结构有很大的影响, 比值小会抑制熔池中成分过冷发生, 使晶体成核

和生长发生在熔池的更多区域, 微观结构得到细化且分布均匀^[17-20]。

图 2 是利用扫描电镜进一步拍摄涂层的组织细节及组织结构。图 2a 为涂层/基体整体形貌, 发现无裂纹等宏观缺陷。从基体向熔覆层顶部方向对主要元素进行能谱线扫描(红色箭头), 可以观察到, 在结合区处(10~15 μm), 铁、镍元素含量急剧变化, 这是因为熔池热量高使合金熔化, 元素分布及含量再分配, 在此区间内, 镍元素含量沿涂层至基材方向急剧下降, 而铁元素与之相反(图 2b)。从图 2c 中的结合处可以观察到宽度约 7~8 μm 的白色冶金结合带, 值得注意的是, 熔覆层底部靠近结合区处, 有一段宽度约为 7 μm 的无沉淀区, 这是由于基体中大量铁元素经激光熔化渗透到熔池中, 在凝固初期, 抑制了铬化物的形成, 在凝固结束时, 也抑制镍-硅共晶的形成, 在以前的研究中也发现了类似微观结构^[10,16]。此外, 稀释率增加, 无沉淀区的范围变大, 合金硬度及裂纹敏感性有所降低, 涂层韧性会提升。从图 2d 中可以观察到, Ni60 涂层拥有典型的亚共晶结构, 推测这是由于熔池快速冷却, 以树枝状固溶体为基体, 大量网状枝晶间共晶包裹着碳化物及富铬沉淀物, 使涂层结构细腻、均匀、紧密。

图 3a 为 Ni60 涂层沿深度方向的硬度分布, 涂层顶部的最高硬度为 708.4HV_{0.2}, 这是由于激光重熔, 形成了细小晶体, 使硬度提高。Ni60 熔覆层的平均硬度为 591.2HV_{0.2}, 约是 304 奥氏体不锈钢基材硬度的 2.5 倍。这是由于涂层中形成了硬质相 M₂₃C₆ (M=Fe、Ni、Cr)、硼化物(CrB、Ni₃B、FeNi₃等)、金属间化合物, 在这些产物的弥散强化作用下, 硬度得到提升。值得注意的是, 涂层与基材分界处的硬度为 252.4HV_{0.2}, 要远低于涂层的平均硬度, 这主要是由于涂层与基材稀释的作用下, 结合处高的铁含量抑制了硬质相的形成, 证明硬质合金相是提升 Ni60 熔覆层硬度的主要因素, 也证实了图 2c 中无沉淀区的存在。由 XRD 物相检测结果(图 3b)可以观察到, Ni60 合金粉末与熔覆后涂层的物相组成基本相同, 主要由固溶态 Ni₃B、γ(Ni)、FeNi₃, 碳化物 M₂₃C₆、M₇C₃, 硼化物 CrB 组成。值得注意的是, 在 $2\theta=35^{\circ}\sim 60^{\circ}$

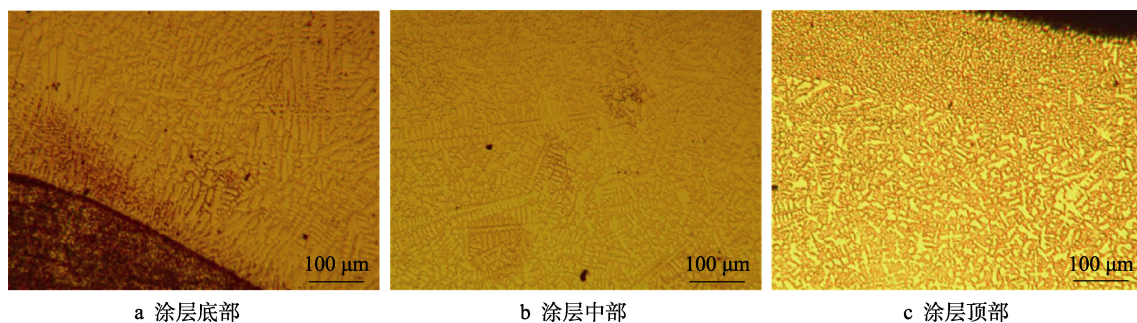


图 1 不同部位 Ni60 涂层形貌

Fig.1 Morphology of Ni60 coating on different parts: a) top of coating; b) middle of coating; c) bottom of coating

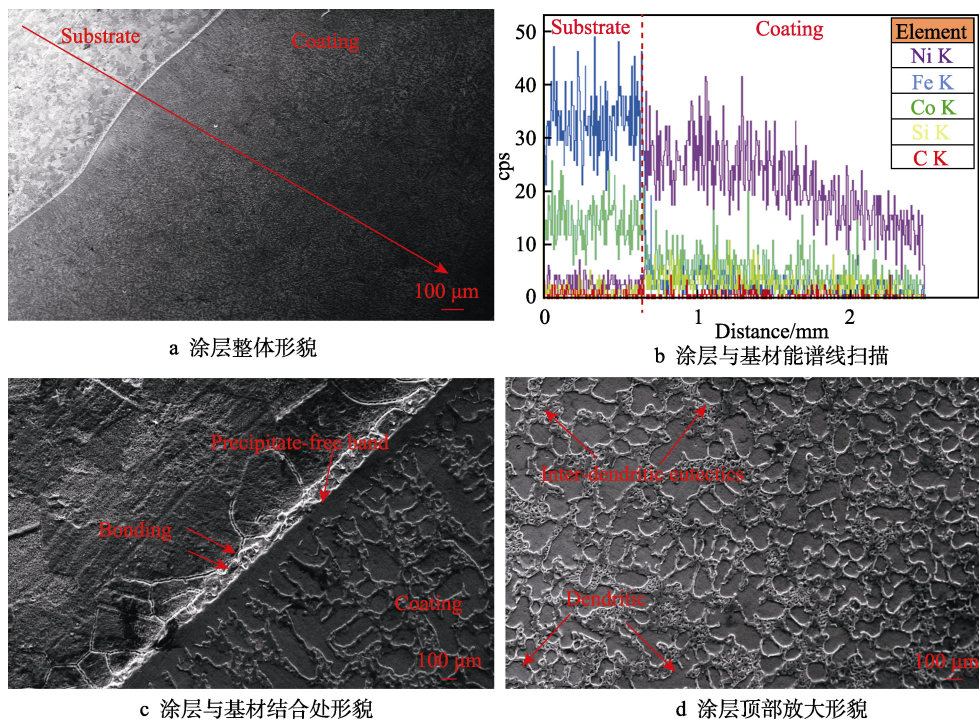


图2 涂层截面部位扫描电镜图及元素分布

Fig.2 Scanning electron microscope and element distribution of coating section: a) overall morphology of coating; b) EDS of coating and base material; c) morphology of the bond between coating and substrate; d) enlarged topographic view of the top of the coating

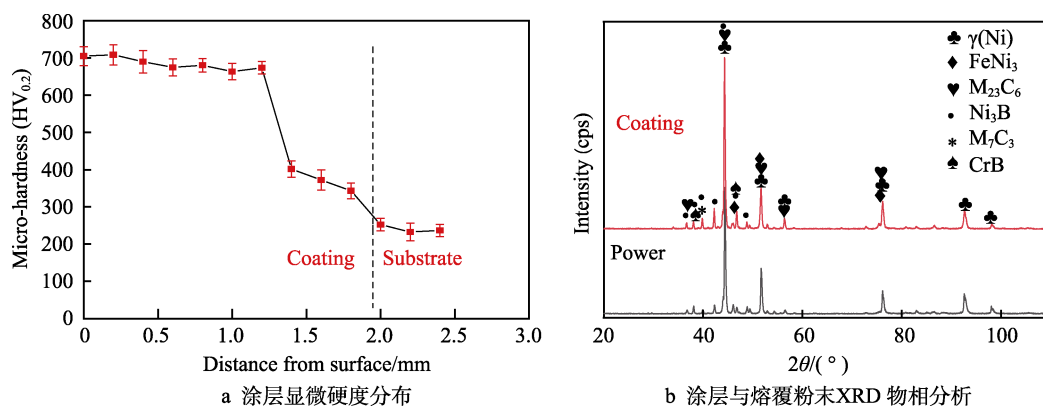


图3 涂层硬度及XRD测试结果

Fig.3 Coating hardness and XRD test results: a) microhardness distribution of coatings; b) phase analysis of coating and cladding powder by XRD

时,涂层的衍射峰强度要比粉末的衍射峰强度更高,这主要是由于,熔覆过程的快冷处理,细化了涂层中的晶粒^[21-22]。

2.2 Ni60 涂层的磨损性能

图4为涂层与基材磨损结果。图4a为Ni60涂层与304奥氏体不锈钢的摩擦系数随着磨损时间变化的曲线。可以观察到,在初始磨合阶段,涂层的摩擦系数随着时间快速波动,在10 min左右,摩擦系数变得平稳,呈现小范围周期性波动。这表明进入到稳定磨损阶段,直至磨损结束,Ni60熔覆涂层的平均摩擦系数为0.08,这可归因于涂层具有致密均匀的微

观结构(图1、图2)以及涂层表面具有很高的硬度。在磨合阶段,基材的摩擦系数随时间呈梯度上升,在5 min左右,摩擦系数进入稳定磨损阶段,摩擦系数类似于正弦函数上下跳动,直至磨损结束,304奥氏体不锈钢基材的平均摩擦系数为0.15。这表明涂层表面的润滑性优于基材。此外,从表1中可以看出,磨损结束后,涂层与基材表面在单位面积上的粗糙度 Sa 分别为6.096、27.440 μm ,涂层表面单位面积上的粗糙度仅为基材的22.2%,证明涂层的减摩性能优于基材,这与摩擦系数的结果呈正相关。

为了进一步分析磨损后Ni60涂层与304奥氏体不锈钢的磨损特性,采用扫描电镜及超景深显微镜分

别对其磨损表面进行表征（图 4b、4c）。可以观察到，304 不锈钢磨损表面有大范围的疲劳剥落和塑性变形，由于基材硬度较低，在与 Si₃N₄ 陶瓷球持续相互摩擦时，304 奥氏体不锈钢基材表层更容易剥落，导致基材表层磨损严重，此外磨损过程中产生的碎屑，经摩擦力往复运动，促使 304 奥氏体不锈钢基材表面发生严重的塑性变形，形成犁沟特征，从而导致磨料磨损的产生。从图 4c 可以看出，经磨损后，Ni60 涂层的磨痕细而窄，伴随少量的粘合坑和短的犁沟，没有明显的剥落和塑性变形。涂层优异的耐磨性主要与微观结构、相组成及磨损过程有关，大量的碳化物（M₂₃C₆、M₇C₃）及铬化物分布在枝晶间共晶处，同时硬质相 CrB 抑制晶粒生长，促进异质形核，使晶体更加细小致密，使涂层的磨损过程比较稳定，磨损

率较低。涂层中 γ-(Ni) 固溶体的均匀韧相也有助于降低硬质相在磨损过程受到残余应变及剪切应力的影响^[23-25]。从表 1 中可以看出，304 奥氏体不锈钢基材的磨损率为 4.1×10⁻⁴ mm³/(N·m)，Ni60 熔覆涂层的磨损率为 3.5×10⁻⁵ mm³/(N·m)，仅为 304 不锈钢基材磨损率的 8.5%。

从 304 不锈钢基材三维磨损表面（图 4d）可以观察到，沿横截面方向，基材磨损呈现 U 字形，这是由于基材表层较软，在磨损过程中，基材横截面中心处受到的摩擦力最集中，导致基材表面最先剥落，形成很深的疤痕和犁沟，经测量，磨损痕迹的深度为 52.156 μm。从图 4e 观察到，沿横截面方向，Ni60 涂层的磨损痕迹呈梯度变化，这是由于涂层表面硬度很高。在磨损过程中，摩擦环无法使涂层表面形成凹坑，

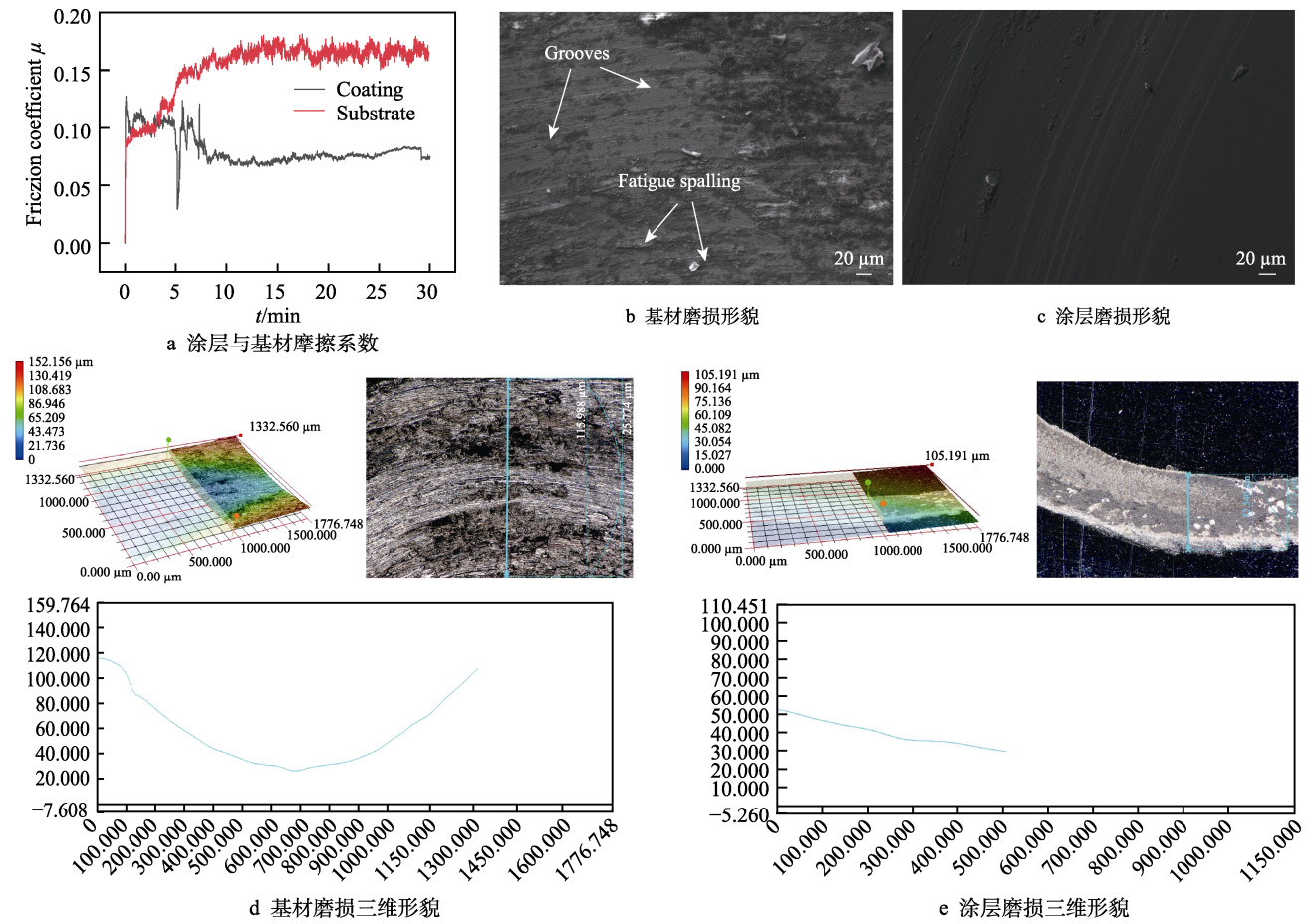


图 4 Ni60 涂层与基材的磨损数据及磨损形貌特征

Fig.4 Wear and tear data and wear morphology characteristics of Ni60 coating and substrate: a) friction coefficient between coating and substrate; b) wear topography of substrate; c) wear pattern of coating; d) 3D morphology characterization of substrate; e) 3D morphology characterization of coating

表 1 涂层与基材磨损率及粗糙度
Tab.1 Wear rate and roughness of coating and substrate

Material	Original quality/g	Mass after friction/g	Wear rate/(mm ³ ·N ⁻¹ ·m ⁻¹)	Roughness per unit area/μm
Ni60 coating	2.849	2.849	3.5×10 ⁻⁵	6.096
304 base metal	1.878	1.868	4.1×10 ⁻⁴	27.449

受离心力作用,导致涂层磨损痕迹呈梯度变化,经测量,Ni60涂层的磨损痕迹的深度为 $105.191\ \mu\text{m}$ 。综上,Ni60涂层较304奥氏体不锈钢基材具有更优的耐磨性。

2.3 Ni60涂层的耐腐蚀性能

图5为涂层与基材的腐蚀结果。图5a为Ni60涂层与304不锈钢基材在3.5%NaCl溶液中的极化曲线。可以观察到,样品表面都发生了钝化,涂层与304不锈钢基材中的Cr元素使熔覆层及304不锈钢基材表面进入钝化态,进而形成钝化膜,但涂层的钝化区宽度(黑色箭头区间)比基材的钝化区宽度大(红色箭头区间),这是由于在腐蚀过程中,涂层中的Ni元素在合金表面会形成一层氧化膜,可以使熔覆层钝态逐渐稳定。

为了进一步了解Ni60熔覆涂层及基材的动态腐蚀特性,腐蚀过程中,使用Tafel外推法拟合极化曲线。图5b中,黑色箭头指示点是熔覆表层在腐蚀过程中阴极拟合线与阳极拟合线的交点,红色箭头指示点是基材表层在腐蚀过程中阴极拟合线与阳极拟合线交点,通过分析拟合结果,获得腐蚀电位及自腐蚀电流密度数值(表2)。涂层与304不锈钢基材的腐蚀电位数值分别为 -6.570 、 $-7.206\ \text{V}$ 。李例群等^[17]提出,腐蚀电位是材料热力学腐蚀倾向的特征,其数值越大,代表合金腐蚀倾向越小。自腐蚀电流密度及腐蚀速率代表了熔覆表层与304不锈钢基材表层抗腐蚀性能的优劣(动力学角度),其数值越小,合金腐

蚀越慢,与材料本身的晶粒尺寸、形成的钝化膜、碳化物含量等有关。Ni60熔覆涂层的自腐蚀电流密度数值($6.607\times 10^{-6}\ \text{A}/\text{cm}^2$)比304不锈钢基材的自腐蚀电流密度数值($8.128\times 10^{-6}\ \text{A}/\text{cm}^2$)小,此外,涂层的自腐蚀速率($0.205\ \text{mm}/\text{a}$)较304不锈钢基材($13.867\ \text{mm}/\text{a}$)小2个数量级,证明涂层的耐腐蚀性能更优。

为进一步了解涂层及基材的腐蚀性能,通过等效电路图(图5c),对涂层与304不锈钢基材电化学腐蚀过程的阻抗进行拟合,其中 CPE_1 、 CPE_2 是恒相位差角元件(可弱化涂层表面不均匀性的影响),分别替代腐蚀产物层电容、双电层电容, R_u 代表盐溶液电阻, R_f 代表涂层表面钝化膜电阻, R_{ct} 代表正极转移电阻,测试结果见表2。从表2中看出,涂层与304不锈钢基材的钝化膜电阻分别为 2386 、 $1094\ \Omega\cdot\text{cm}^2$,表明涂层表面金属离子形成的电解质溶液的阻力大于304不锈钢基体^[12]。在图5d所示的频率区间内,可以观察到,熔覆涂层的曲线偏离半圆轨迹更大,证明容抗弧半径大于基材的容抗弧半径,容抗弧半径反映材料表面的阻抗,容抗弧半径越大,表明材料表面阻抗越大,形成钝化膜的耐蚀性越好,因此熔覆涂层的耐电化学腐蚀性比304不锈钢基材更好。此外,材料的耐腐蚀性能也表现在阻抗模量 $|Z|$ 的大小,从图5e中看出,熔覆涂层阻抗模量远大于304不锈钢基材,进一步说明熔覆涂层的耐蚀性好,这与极化曲线、奈奎斯特图的结果相互验证。

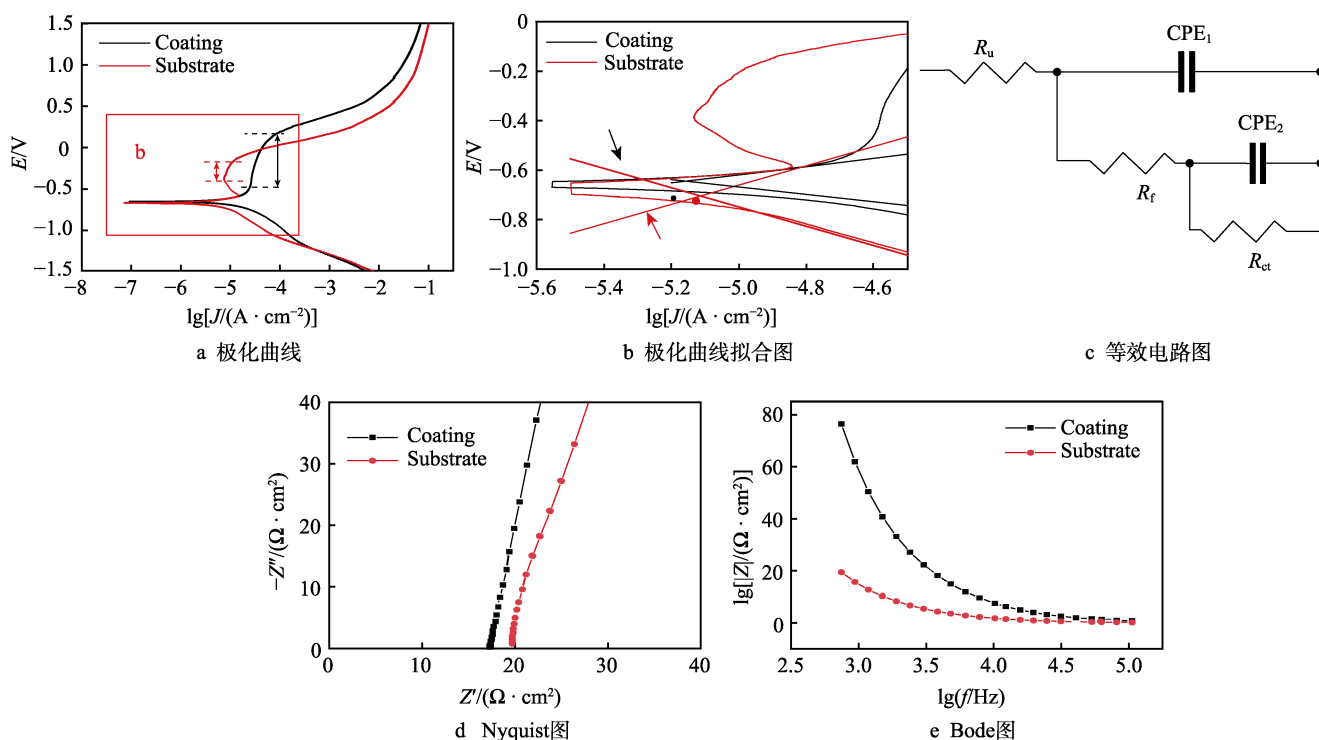


图5 涂层与基材在3.5%NaCl溶液中腐蚀结果图

Fig.5 Corrosion results of coatings and substrates in 3.5% NaCl solution: a) polarization curve; b) polarization curve fitting diagram; c) equivalent circuit diagram; d) Nyquist diagram; e) Bode chart

表 2 熔覆层与基体的极化参数
Tab.2 Polarization parameters of cladding layer and substrate

Material	Self-corrosion potential/V	Corrosion current density/(A·cm ⁻²)	Corrosion rate/(mm·a ⁻¹)	Polarization resistance/(Ω·cm ²)
Ni60 coating	-6.570±0.013	6.607×10 ⁻⁶ ±1.52×10 ⁻⁸	0.205±0.012	2386±37
304 base metal	-7.206±0.021	8.128×10 ⁻⁶ ±1.74×10 ⁻⁸	13.867±0.1732	1094±21

3 结论

1) 涂层与基材形成冶金结合且涂层组织均匀细密, 涂层主要由固溶态 $\gamma(\text{Ni})$, 碳化物 M_{23}C_6 、 M_7C_3 , 硼化物 CrB 组成, 且其分布在枝晶及枝晶间, 由于基材中 Fe 元素的稀释, 导致在结合处偏向涂层一侧形成约 $7\text{ }\mu\text{m}$ 的无沉淀区。

2) Ni60 涂层的平均显微硬度约为 304 奥氏体不锈钢的 2.5 倍, 磨损后, 涂层比基材的摩擦系数更稳定, 数值也更小。此外, 面粗糙度数值显示涂层比基材的润滑性更好, 涂层的磨损率仅为基材的 8.5%。在 3.5% NaCl 溶液中, 涂层的腐蚀速率比基材低 2 个数量级, 表明涂层具有更好的耐腐蚀特性。

参考文献:

[1] 梅丽芳, 秦建红, 严东兵. 活性激光焊接 304 不锈钢温度场的数值与试验研究[J]. 激光技术, 2020, 44(4): 492-496.
MEI Li-fang, QIN Jian-hong, YAN Dong-bing. Numerical and experimental study on temperature field of activated laser welding 304 stainless steel[J]. Laser technology, 2020, 44(4): 492-496.

[2] 平学龙, 符寒光, 孙淑婷. 激光熔覆制备硬质颗粒增强镍基合金复合涂层的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(9): 1535-1540.
PING Xue-long, FU Han-guang, SUN Shu-ting. Progress in preparation of hard phase reinforced Ni-based alloy composite coating by laser cladding[J]. Materials reports, 2019, 33(9): 1535-1540.

[3] 韩晨阳, 孙耀宁, 王国建, 等. 不锈钢冷轧辊激光表面修复工艺研究[J]. 应用激光, 2020, 40(4): 598-604.
HAN Chen-yang, SUN Yao-ning, WANG Guo-jian, et al. Study on laser surface repair technology of stainless steel cold roll[J]. Applied laser, 2020, 40(4): 598-604.

[4] 黄留飞, 孙耀宁, 王国建. 激光熔覆技术制备高熵合金涂层研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(24): 240003.
HUANG Liu-fei, SUN Yao-ning, WANG Guo-jian. Research progress of laser cladding high-entropy alloy coating[J]. Laser & optoelectronics progress, 2019, 56(24): 240003.

[5] 杨丹, 宁玉恒, 赵宇光, 等. 工艺参数对 304 不锈钢表面激光熔覆 Ni 基合金涂层的组织、耐磨性及耐腐蚀性的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(24): 133-140.

YANG Dan, NING Yu-heng, ZHAO Yu-guang, et al. Influence of processing parameter on microstructure, wear-resistance and corrosion-resistance of laser cladding Ni-based alloy on the surface of 304 stainless steel[J]. Materials review, 2017, 31(24): 133-140.

[6] CONDE A, ZUBIRI F, DE DAMBORENEA Y J. Cladding of Ni-Cr-B-Si coatings with a high power diode laser[J]. Materials science and engineering: A, 2002, 334(1-2): 233-238.

[7] COCKERAM B V. The fracture toughness and toughening mechanisms of nickel-base wear materials[J]. Metallurgical and materials transactions A, 2002, 33(1): 33-56.

[8] MIGUEL J M, GUILLEMANY J M, VIZCAINO S. Tribological study of NiCrBSi coating obtained by different processes[J]. Tribology international, 2003, 36(3): 181-187.

[9] FERNÁNDEZ E, CADENAS M, GONZÁLEZ R, et al. Wear behaviour of laser clad NiCrBSi coating[J]. Wear, 2005, 259(7-12): 870-875.

[10] HEMMATI I, OCELÍK V, DE HOSSON J T M. Dilution effects in laser cladding of Ni-Cr-B-Si-C hardfacing alloys[J]. Materials letters, 2012, 84: 69-72.

[11] WU Zu-peng, LI Tao, LI Qi, et al. Process optimization of laser cladding Ni60A alloy coating in remanufacturing[J]. Optics & laser technology, 2019, 120: 105718.

[12] SONG Xin-ling, LEI Jian-bo, XIE Ji-chang, et al. Microstructure and electrochemical corrosion properties of nickel-plated carbon nanotubes composite Inconel 718 alloy coatings by laser melting deposition[J]. Optics & laser technology, 2019, 119: 105593.

[13] ARIAS-GONZÁLEZ F, DEL VAL J, COMESAÑA R, et al. Fiber laser cladding of nickel-based alloy on cast iron[J]. Applied surface science, 2016, 374: 197-205.

[14] YAN Hua, ZHANG Pei-lei, GAO Qiu-shi, et al. Laser cladding Ni-based alloy/nano-Ni encapsulated h-BN self-lubricating composite coatings[J]. Surface and coatings technology, 2017, 332: 422-427.

[15] YUAN Wu-yan, LI Rui-feng, CHEN Zhao-hui, 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.

[16] ZHANG Jian, HU Yu, TAN Xiao-jun, et al. Microstructure and high temperature tribological behavior of laser cladding Ni60A alloys coatings on 45 steel substrate[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(5): 1525-1532.

- [17] 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): 174-183.
LI Li-qun, SHEN Fa-ming, ZHOU Yuan-dong, 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): 174-183.
- [18] 张杰, 张群莉, 陈智君, 等. 固溶温度对激光增材制造 Inconel 718 合金组织和性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(2): 47-53.
ZHANG Jie, ZHANG Qun-li, CHEN Zhi-jun, et al. Effect of solution temperature on microstructure and properties of Inconel 718 alloy fabricated via laser additive manufacturing[J]. Surface technology, 2019, 48(2): 47-53.
- [19] 欧阳春生, 刘秀波, 罗迎社, 等. 304 不锈钢表面激光制备 Ti_3SiC_2 -Ni 基自润滑复合涂层的高温摩擦学性能[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 161-171.
OUYANG Chun-sheng, LIU Xiu-bo, LUO Ying-she, et al. High-temperature tribological properties of Ti_3SiC_2 -Ni based self-lubricating composite coatings prepared on 304 stainless steel by laser cladding[J]. Surface technology, 2020, 49(8): 161-171.
- [20] 杨二娟, 李勇, 李巍, 等. WC 含量对激光熔覆 NiCrBSi-WC 复合涂层显微结构及力学性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(9): 238-244.
YANG Er-juan, LI Yong, LI Wei, et al. Effect of WC particle content on microstructure and mechanical properties of laser cladding NiCrBSi-WC composite coating[J]. Surface technology, 2019, 48(9): 238-244.
- [21] SUI Yi-yong, YANG Fan, QIN Guo-liang, et al. Microstructure and wear resistance of laser-cladded Ni-based composite coatings on downhole tools[J]. Journal of materials processing technology, 2018, 252: 217-224.
- [22] 孙元, 赵旭, 苏瑾, 等. 镍基单晶高温合金钎焊接头的微观组织与性能[J]. 焊接学报, 2020, 41(7): 32-38.
SUN Yuan, ZHAO Xu, SU Jin, et al. Microstructure and properties of nickel-based single crystal superalloy brazed joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(7): 32-38.
- [23] 李宁, 王刚, 王廷, 等. Inconel 718 镍基合金与 304 不锈钢电子束焊接[J]. 焊接学报, 2019, 40(2): 82-85.
LI Ning, WANG Gang, WANG Ting, et al. Weldability of Inconel 718 and 304 stainless steel by electron beam welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(2): 82-85.
- [24] 黄杰, 贺定勇, 杜开平, 等. FeCrNiMo 激光熔覆层组织与电化学腐蚀行为研究[J]. 表面技术, 2020, 49(12): 228-234.
HUANG Jie, HE Ding-yong, DU Kai-ping, et al. Microstructure and electrochemical corrosion behavior of FeCrNiMo layer fabricated by laser cladding[J]. Surface technology, 2020, 49(12): 228-234.
- [25] 谭金花, 孙荣禄, 牛伟, 等. Ni60/h-BN 含量对激光熔覆钛基复合涂层组织及性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(10): 107-115.
TAN Jin-hua, SUN Rong-lu, NIU Wei, et al. Effect of Ni60/h-BN content on microstructures and properties of laser cladding titanium-based composite coatings[J]. Surface technology, 2019, 48(10): 107-115.

(上接第 92 页)

- [17] 张小军, 黄惠, 董劲, 等. 锌电积过程中锰元素对铝阴极的电化学行为影响[J]. 工程科学学报, 2018, 40(7): 800-807.
ZHANG Xiao-jun, HUANG Hui, DONG Jin, et al. Influence of manganese on the electrochemical behavior of an aluminum cathode used in zinc electrowinning[J]. Chinese journal of engineering, 2018, 40(7): 800-807.
- [18] ISAKHANI-ZAKARIA M, ALLAHKARAM S R, RA-MEZANI-VARZANEH H A. Evaluation of corrosion behaviour of Pb- Co_3O_4 electrodeposited coating using EIS method[J]. Corrosion science, 2019, 157: 472-480.
- [19] VERDIAN M M, RAEISSI K, SALEHI M. Corrosion performance of HVOF and APS thermally sprayed NiTi intermetallic coatings in 3.5% NaCl solution[J]. Corrosion science, 2010, 52(3): 1052-1059.
- [20] AHN S H, CHOI Y S, KIM J G, et al. A study on corrosion resistance characteristics of PVD Cr-N coated steels by electrochemical method[J]. Surface and coatings technology, 2002, 150(2-3): 319-326.
- [21] ZHU Lin-xin, PETROVA R S, GASHINSKI J P, et al. The effect of surface roughness on PEO-treated Ti-6Al-4V alloy and corrosion resistance[J]. Surface and coatings technology, 2017, 325: 22-29.
- [22] WANG Ye, LU Dan-hua, WU Guo-long, et al. Effect of laser surface remelting pretreatment with different energy density on MAO bioceramic coating[J]. Surface and coatings technology, 2020, 393: 125815.
- [23] 姜晓霞, 王景韞. 合金相电化学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984: 320.
JIANG Xiao-xia, WANG Jing-yun. Alloy phase electrochemistry[M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1984: 320.
- [24] 周重光, 杨明江, 彭林华, 等. 先进高重频激光处理对镀铬层结合特性的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2003, 26(5): 15-18.
ZHOU Chong-guang, YANG Ming-jiang, PENG Lin-hua, et al. Effect of advanced high-frequency laser treating on joining condition of chrome cladding material[J]. Ordnance material science and engineering, 2003, 26(5): 15-18.
- [25] 徐向阳, 张坤, 陈光南, 等. 激光硬化基体对镀铬层组织和结合的影响[J]. 中国激光, 2006, 33(3): 413-416.
XU Xiang-yang, ZHANG Kun, CHEN Guang-nan, et al. Influence of laser hardening substrate on microstructure and bonding of electroplating chromium coating[J]. Chinese journal of lasers, 2006, 33(3): 413-416.