

激光熔覆 TC4/Inconel 625/316L 不锈钢梯度材料组织与性能

张敏¹, 王新宝¹, 王浩军², 马克¹, 朱子越¹, 张志强¹

(1. 西安理工大学, 西安, 710048; 2. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 西安, 710089)

摘要: 为了提高不锈钢工件的综合性能, 采用激光熔覆工艺在不锈钢上制备 TC4 熔覆层、Inconel 625 熔覆层作为过渡层, 通过光学显微镜、扫描电子显微镜、X 射线衍射仪、能谱仪、硬度计、摩擦磨损和电化学测试等研究了 TC4 熔覆层微观组织、显微硬度、电化学性能和摩擦磨损性能。结果表明, 熔覆层成形质量良好且具有均匀致密的微观组织。熔覆过程中, 由于元素扩散与高温作用发生的共晶反应, 熔覆层中生成 CrNi₂ 和 Ti₂Ni 增强相, 大大提升了熔覆层的硬度与耐磨性; TC4 熔覆层磨损机制主要为磨粒磨损与氧化磨损, 耐磨性优于基体; TC4 熔覆层的腐蚀电流密度小于基体, 耐蚀性显著高于基体。

创新点: (1) 通过激光熔覆实现了 TC4/Inconel 625/316L 不锈钢梯度材料的制备。

(2) 通过共晶反应生成 Ti₂Ni, CrNi₂ 增强相, 并研究其对熔覆层和基体的磨损机制与腐蚀机制的影响。

关键词: 激光熔覆; 增强相; 共晶反应; 摩擦磨损; 耐蚀性

中图分类号: TG 401 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20220628001

0 序言

不锈钢是工业领域一种常见的材料, 具有优异的力学性能、冷加工成形性, 良好的耐蚀性和焊接性, 且成本低廉, 常用于轨道、汽车制造业^[1-4]。然而, 不锈钢在石油化工、海洋管道和阀门等领域长期服役的耐蚀性表现却不尽如人意。例如, 在海洋、石油化工中服役的 304 和 316L 不锈钢在短时间内就发生点腐蚀和缝隙腐蚀乃至全面腐蚀^[5-10]。为了克服不锈钢以上的缺陷, 需要尝试通过相应措施来实现表面改性, 进而提高其综合性能。钛及钛合金具有优秀的耐蚀性、比强度以及较低的密度, 不仅可以用作耐腐蚀工件器皿, 同时可以很大程度上降低质量, 完成产品轻量化^[11]。

肖旋等人^[12] 通过真空扩散焊实现了 TC4 钛合金管与 15-5PH 不锈钢内衬管的连接, 并且实现了配合界面的冶金结合, 获得了无缺陷且性能良好的

焊接接头; Kahraman 等人^[13] 对不锈钢-钛板采用不同爆炸比的斜几何路线进行爆炸连接。结果表明, 随着爆炸比的增加, 观察到从光滑的键合界面过渡到波浪形界面, 在结合界面附近获得最高硬度值。

激光熔覆技术生产效率高、热影响区窄、熔覆层与基材结合强度高、组织致密, 被广泛用于金属合金零部件表面改性和熔覆修复^[14]。Zhang 等人^[15] 研究了当钛合金与不锈钢激光焊连接时, 铜用作中间层, 在钛-不锈钢界面, 由于铜的稀释和不锈钢的混合, 形成了一个焊接区; 在钛合金-铜界面, 共晶反应是连接的原因, 未观察到脆性 Ti-Fe 金属间化合物。Tanprayoon 等人^[16] 尝试通过选区激光熔化工艺向 316L 不锈钢添加 TiN 增强相, 显示出制备 316L/TiN 元件的良好可能性。Gao 等人^[17] 对 45 mm Ti6321 钛合金窄间隙激光焊接接头的显微组织进行了表征。结果表明, 显微组织演化规律与加热温度和冷却速率有关。田志刚等人^[18] 通过激光熔覆工艺制备 CoCrFeNiSi_x($x = 0.5, 1.0, 1.5$) 涂层, 研究发现, x 为 1.5 时, 涂层硬度最高。

通过激光熔覆工艺实现不锈钢表面熔覆

TC4 涂层, 简单高效易操作并且自动化程度高. 但钛与不锈钢属于异种金属, 物理与化学性能差异较大, 采用传统工艺实现连接存在极大的冶金不容性风险, 会导致界面产生大量脆硬相以及残余应力, 严重影响界面质量^[19]. 因此选择合适的金属或合金作为中间过渡层, 阻碍元素大量相互扩散, 实现界面良好的结合.

试验选择 Inconel 625 作为中间层过渡合金, 通过激光熔覆工艺实现 TC4 与不锈钢的优良结合, 研究 TC4 对不锈钢微观组织、力学性能和耐蚀性的影响, 为激光熔覆工艺在异种金属连接的应用提供数据与理论支撑.

表 1 基体和熔覆粉末的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical compositions of substrate and cladding materials

| 材料 | C | Al | Cr | Ni | Nb | Mo | V | Fe | Ti |
|-------------|-------|-----------|-------|-------|------|------|-----------|-------|----|
| 316L | 0.03 | — | 16~18 | 10~14 | — | 2~3 | — | 余量 | — |
| Inconel 625 | 0.03 | — | 20.21 | 余量 | 3.27 | 9.22 | — | 2.64 | — |
| TC4 | <0.10 | 5.50~6.70 | 0.04 | 0.01 | — | — | 3.45~4.50 | <0.25 | 余量 |

1.2 激光熔覆涂层制备

首先通过激光熔覆在不锈钢基体表面熔覆 Inconel 625 合金粉, 在已处理的 Inconel 625 表面熔覆 TC4 粉末. 试验选用 ISDL-3008 型光纤输入半导体激光器 (额定 3 kW), 功率为 65%, 同时通以 99% (体积分数) 的氩气作为激光熔覆保护气体. 原则上需确保基体与熔覆层平整、无缺陷和界面质量较好, 通过激光熔覆工艺过程以及焊后试样的组织力学性能确定最佳工艺参数, 激光熔覆参数见表 2.

表 2 激光熔覆参数

Table 2 Laser cladding parameters

| 熔覆金属 | 光斑直径 <i>D/mm</i> | 扫描速度 <i>v/(mm·s⁻¹)</i> | 送粉角度 <i>θ/(°)</i> | 送粉速度 <i>v_s/(g·min⁻¹)</i> |
|-------------|---------------------|--------------------------------------|----------------------|---|
| Inconel 625 | 5 | 5.5 | 75 | 70 |
| TC4 | 2 | 18 | 75 | 90 |

1.3 性能测试方法

激光熔覆试验完成后, 使用线切割制备尺寸为 10 mm × 10 mm × 10 mm 的试样, 打磨抛光后放入丙酮溶液中清洗, 擦拭酒精吹干. 熔覆层抛光剂选择 Al₂O₃ 溶液, 基体抛光剂选择金刚石研磨膏, 金相腐蚀剂选择 3 mL HF + 6 mL HNO₃ + 91 mL H₂O; 使用 OLYMPUS-GX71 型光学显微镜观察熔覆层

1 试验方法

1.1 试验材料

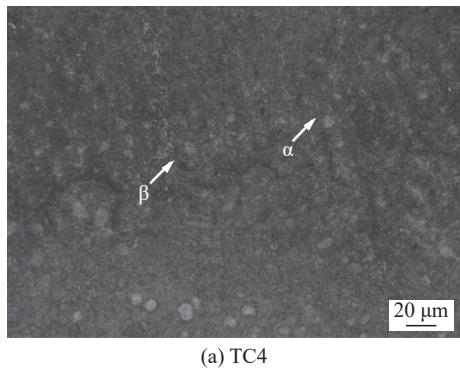
试验选用规格为 $\phi 55 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$ 的 316L 不锈钢作为基体材料, 使用角磨机打磨基体表面, 随后放入丙酮中超声冲洗, 采用 80, 240, 400, 600, 800 目砂纸依次打磨, 再用酒精清洗; 选择 TC4 和 Inconel 625 合金粉作为试验熔覆粉末, 粒径均为 50 μm , 试验前将合金粉放入真空烘干炉中烘干, 烘干温度为 150 °C, 保温时间为 1.5 h. 试验材料的化学成分见表 1.

的金相组织, 采用 VEGA3XMU 型扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 观察试样截面组织形貌, 并配合能谱仪 (energy disperse spectroscopy, EDS) 和 X 射线衍射仪 (X-ray diffraction, XRD) 进行物相鉴定; 采用 HVS-1000A/B 型数字维氏硬度仪对试样进行硬度测试, 测试点间隔为 0.2 mm, 试验力为 0.5 N, 保载时间为 10 s; 选用上海辰华 CHI600E 系列电化学测试工作站测得基体与熔覆层在 3.5% 的 NaCl 溶液中的电化学行为; 采用 HT-1000 摩擦磨损试验机表征熔覆层与基体的摩擦学行为, 摩擦过程参数设置为: 磨损时间为 30 min, 电机频率为 6.25 Hz, 绕动半径为 5 mm, 转速为 350 r/min, 摩擦方式为销盘式摩擦.

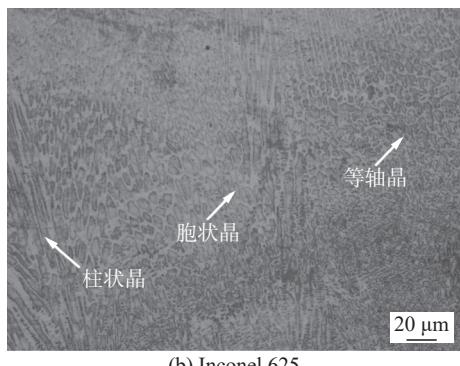
2 试验结果与讨论

2.1 显微组织分析

图 1 为 TC4 层与 Inconel 625 层的微观组织. TC4 的微观组织以细小以及团状的等轴晶为主, 其主要表现为部分 β -Ti 分布于初生 α -Ti 基体上, 这类组织往往能表现出较高的疲劳强度、塑性和较好的热稳定性, 但蠕变强度、断裂韧性较差; Inconel 625 微观组织主要以等轴晶、胞状晶和柱状晶为



(a) TC4



(b) Inconel 625

图 1 TC4 与 Inconel 625 熔覆层微观组织

Fig. 1 Microstructure of TC4 and Inconel 625 cladding layers. (a) TC4; (b) Inconel 625

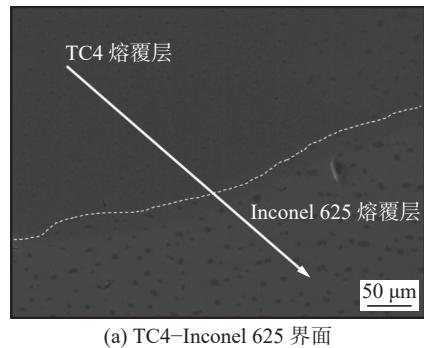
主, 均表现出典型的激光熔覆晶粒形貌. 由于激光熔覆有着快冷快热的特点, 冷却速率极快, 生长前沿出现明显过冷, 熔池中未出现明显异质形核, 故产生柱状晶.

图 2 为 TC4-Inconel 625, Inconel 625-316L 不锈钢基体的 SEM 图像和 EDS 线扫描结果. 图 2b 显示了 TC4 与 Inconel 625 之间的熔合边界, 发现 Ti 元素的成分分布在界面结合区波动很大, Ni, Cr, Mo 元素成分分布也有一定程度上的波动, 而其它元素基本保持不变. 图 2d 显示了 Inconel 625 与不锈钢之间的熔合边界. Ni, Cr, Fe 元素的成分分布变化显著, 其它元素的成分分布略有波动.

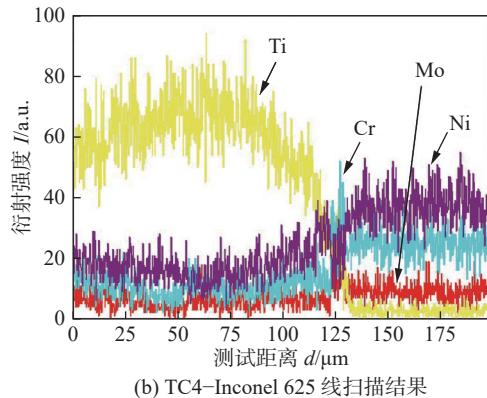
EDS 结果表示, 在激光熔覆过程中, Ni, Ti, Cr 和 Mo 等元素的含量波动很大. Mo 原子半径 (0.139 nm) 与 Ti 原子 (0.147 nm) 相差不大. 而 Ni 原子半径 (0.149 nm) 和 Cr 原子 (0.128 nm) 相差很大, 同时又因为元素的相互扩散能力强, 在熔化和冷却过程中元素产生金属间化合物, 这证实了 Ti_2Ni 和 $CrNi_2$ 金属间化合物的产生^[19].

2.2 物相分析

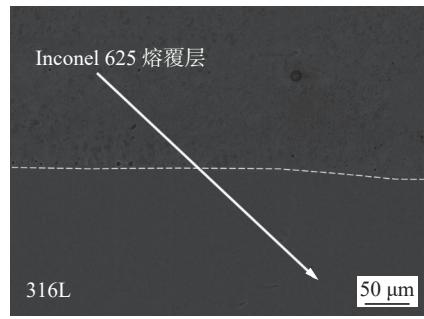
通过 XRD 分析熔覆层物相组成, 由图 3 可见, TC4 熔覆层主要为 α -Ti 和 β -Ti, Inconel 625 熔覆层



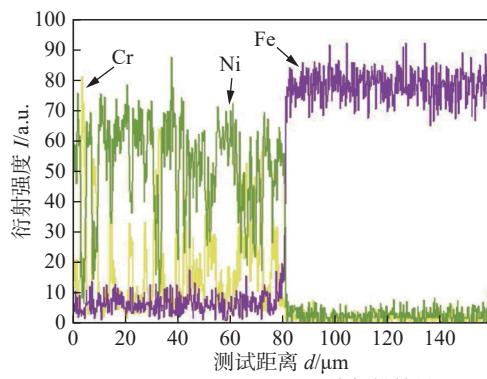
(a) TC4-Inconel 625 界面



(b) TC4-Inconel 625 线扫描结果



(c) Inconel 625-316L 界面



(d) Inconel 625-316L 线扫描结果

图 2 界面的 SEM 图像及其元素扩散情况

Fig. 2 SEM images of interfaces and its element diffusion. (a) interface of TC4-Inconel 625; (b) line scanning results of TC4-Inconel 625; (c) interface of Inconel 625-316L; (d) line scanning results of Inconel 625-316L

主要为 γ -Ni. 同时发现了 $CrNi_2$ 与 Ti_2Ni 的存在, 这是因为在激光熔化过程中由于高温作用 Cr 元素与 Ni 元素发生共晶反应产生 $CrNi_2$ 化合物, 并保留在

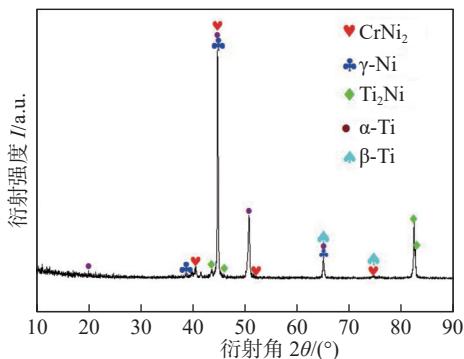


图 3 TC4/Inconel 625/316L 梯度材料 XRD 图谱
Fig. 3 XRD images of TC4/Inconel 625/316L gradient material

冷却凝固过程中^[20-21];高温熔化过程中元素发生扩散, Ti 元素与 Ni 元素在快速冷却凝固过程中生成 Ti_2Ni .

为了进一步明确物相类型, 对析出相进行能谱分析, 其 SEM 形貌如图 4 所示, 能谱分析结果见表 3 和表 4.

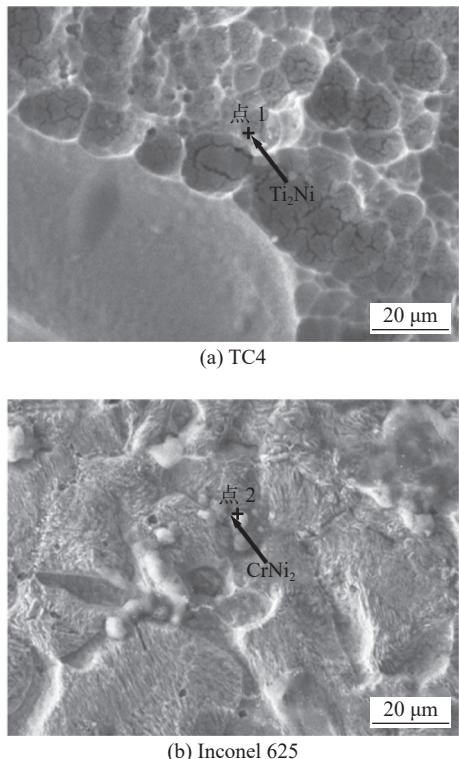


图 4 TC4-Inconel 625 界面局部 SEM 图像
Fig. 4 Partially SEM images of TC4-Inconel 625 fusion interfaces. (a) TC4; (b) Inconel 625

表 3 点 1 的 EDS 分析结果 (原子分数, %)
Table 3 EDS analysis results of point 1

| Al | Ti | V | Ni | Nb | Mo |
|------|-------|------|-------|------|------|
| 11.7 | 55.72 | 1.04 | 26.42 | 0.37 | 4.75 |

表 4 点 2 的 EDS 分析结果 (原子分数, %)

Table 4 EDS analysis results of point 2

| Cr | Mn | Si | Ni | Nb | Mo |
|------|-------|-------|-------|-------|------|
| 6.03 | 19.79 | 29.51 | 15.20 | 20.90 | 8.57 |

2.3 硬度结果分析

从图 5 可以看出, TC4 区平均硬度约为 433.64 HV0.5, Inconel 625 区平均硬度约为 293.5 HV0.5, 316L 不锈钢基体平均硬度为 183.26 HV0.5. 激光熔覆属于快速加热、快速冷却的加工工艺, 在激光熔覆的过程中, 由于元素扩散作用在熔池中析出大量 Ti_2Ni 和 $CrNi_2$ 化合物, Ti_2Ni 和 $CrNi_2$ 作为硬质第二相的加入可以起到钉扎晶界、阻碍位错运动的作用, 从而有效提升试样的硬度, 使得 TC4 层和 Inconel 625 层硬度达到峰值, 分别为 622.8, 459.7 HV0.5; 同时, 大量 Cr, Ni 等固溶元素在激光熔覆过程中起到固溶强化作用, 试样的硬度在两者的共同作用下得到提高.

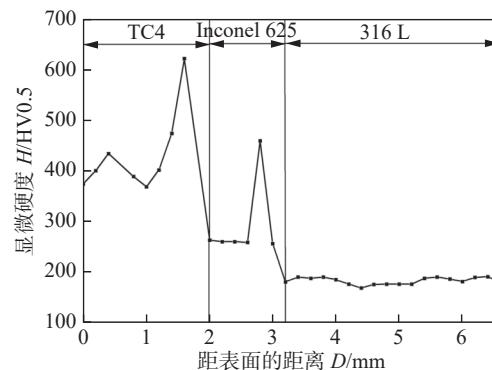


图 5 试样的显微硬度曲线
Fig. 5 Microhardness curve of sample

2.4 摩擦磨损结果分析

图 6 为 316L 不锈钢基体与 TC4 熔覆层在室温情况下, 磨损时间为 30 min、加载载荷为 5 N 的摩擦系数曲线. 在初始磨合阶段, 不锈钢基体摩擦系数快速波动, 在 10 min 后趋于稳定, 摩擦系数均值约为 0.35; TC4 熔覆层在磨损表现更加优异, 5 min 左右进入稳定磨损阶段, 波动幅度较小, 均值约为 0.20. 摩擦系数并不能表征材料耐磨损性, 仅仅能反映试样在摩擦过程中稳定程度, 磨损量更能直观代表材料的耐磨损性能. 对 316L 不锈钢基体与 TC4 熔覆层试样摩擦磨损试验前后质量进行对比, 316L 不锈钢基体磨损量 0.5 mg, TC4 熔覆层磨损量为 0.2 mg, TC4 熔覆层更加耐磨损.

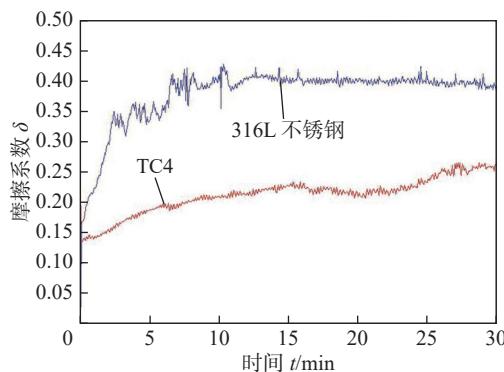


图 6 316L 不锈钢与 TC4 熔覆层的摩擦系数曲线

Fig. 6 Coefficient of friction curve of the 316L stainless steel and TC4 cladding layer

为了更加深入地研究基体与 TC4 熔覆层的磨损机制, 使用 SEM 观察了摩擦磨损表面形貌, 如图 7 所示。图 7a 中 316L 不锈钢基体磨损表面中存在大量深犁沟, 是因为试样在磨合过程中, 对磨副上的磨屑在压力作用下对试样表面造成犁削过程; 同时可以观察到, 基体表面还存在大量碎片与磨屑堆积, 这是因为摩擦过程不断产生高温, 使得磨屑软化团聚并不断压平压实, 形成鳞片状和片状结构, 基体主要发生粘着磨损。图 7b 中 TC4 熔覆层磨损表面存在少量浅而细的磨痕和碎片, 还存在大

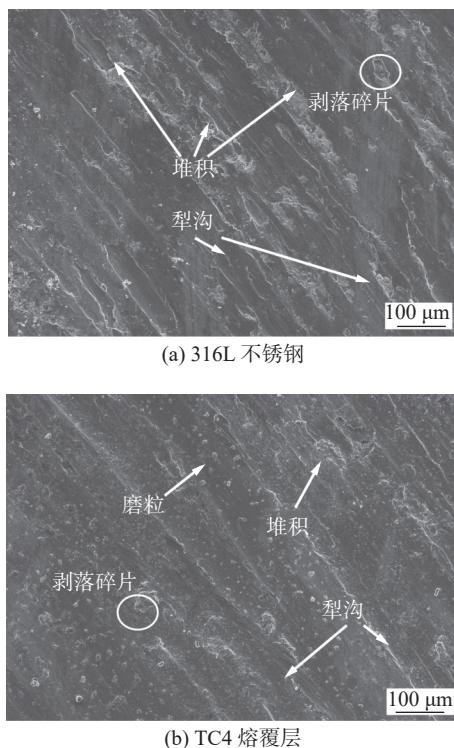


图 7 316L 不锈钢与 TC4 熔覆层磨损形貌

Fig. 7 Wear morphology of 316L stainless steel and TC4 cladding layer. (a) 316L stainless steel; (b) TC4 cladding layer

量颗粒状物质, 磨粒磨损机制明显。通过前面的相分析, 可以判断颗粒为 Ti_2Ni , $CrNi_2$, 提高了熔覆层硬度, 优化了耐磨性。

表 5 为 316L 不锈钢与 TC4 熔覆层磨损表面 EDS 元素分析。从表 5 可知, TC4 熔覆层表面含氧量明显高于 316L 不锈钢基体, 表明试样在摩擦过程中产生了氧化物。这是由于在压力载荷的作用下试样表面发生塑性变形, 热量加速了 O 元素向熔覆层内部扩散, 产生氧化物。因此, 熔覆层摩擦过程属于磨粒磨损与氧化磨损的混合磨损, 其磨损性能明显好于 316L 不锈钢基体。

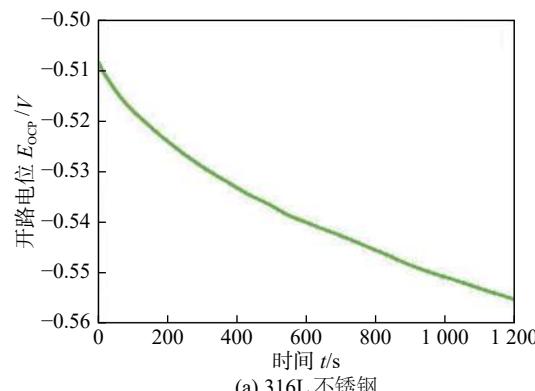
表 5 316L 不锈钢与 TC4 熔覆层磨损表面 EDS 元素分析 (质量分数, %)

Table 5 EDS elements analysis of wear surface of 316L stainless steel and TC4 cladding layer

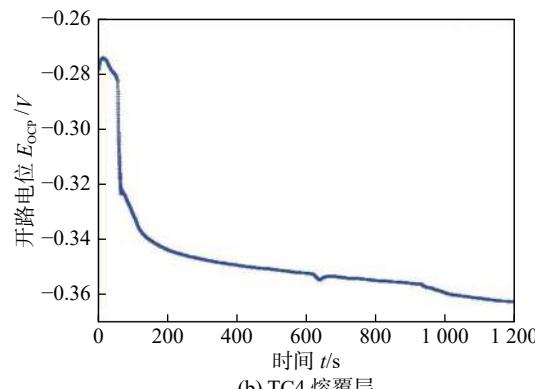
| 表面 | Ti | Al | Cr | Ni | Fe | O |
|----------|-------|------|------|------|-------|-------|
| TC4 熔覆层 | 36.00 | 3.61 | 1.46 | 3.87 | — | 55.06 |
| 316L 不锈钢 | — | — | 8.40 | 1.60 | 70.43 | 19.57 |

2.5 电化学结果分析

图 8 为 316L 不锈钢基体和 TC4 熔覆层在



(a) 316L 不锈钢



(b) TC4 熔覆层

图 8 316L 不锈钢与 TC4 熔覆层开路电位曲线

Fig. 8 Open circuit potential curves of 316L stainless steel and TC4 cladding layer. (a) 316L stainless steel; (b) TC4 cladding layer

3.5% NaCl 电解液中的开路电位 E_{OCP} . 从图 8 可以看出, 不锈钢基体的 E_{OCP} 的平均值为 -0.533 V, 且呈现持续下降的趋势; TC4 熔覆层的 E_{OCP} 值波动较小, 最终稳定在 -0.36 V. 由于 E_{OCP} 的数值越高, 则表明测试电极发生腐蚀的倾向就越低, 反之则 E_{OCP} 的数值越低, 其倾向就越高, 因此 TC4 熔覆层表现出较小的腐蚀倾向.

图 9 为 TC4 熔覆层、316L 不锈钢的等效电路

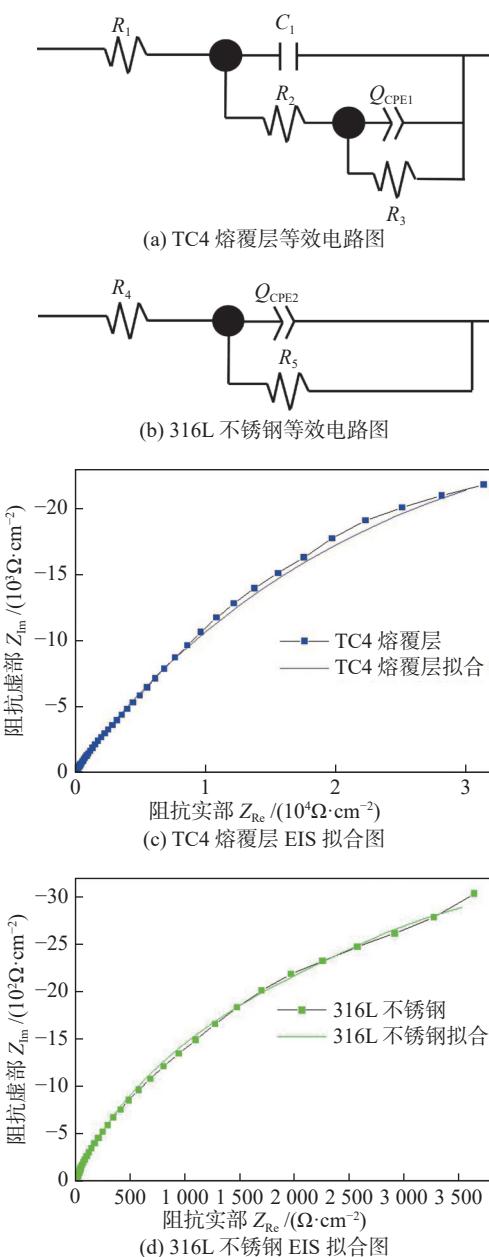


图 9 等效电路图和 EIS 拟合图

Fig. 9 Equivalent circuit diagram and EIS fitting diagram. (a) equivalent circuit diagram of TC4 cladding layer; (b) equivalent circuit diagram of 316L stainless steel; (c) EIS fitting diagram of TC4 cladding layer; (d) EIS fitting diagram of 316L stainless steel

图及阻抗谱 (EIS) 拟合曲线图. 表 6 和表 7 分别为基体与 TC4 熔覆层的 EIS 拟合参数. 其中 R_1 , R_4 为腐蚀液体系中的阻值, R_2 , R_5 为腐蚀层的电荷转移电阻, R_3 为双电层腐蚀体系电荷移动阻值, C_1 定义为腐蚀产物容性行为, 并添加常相位器件 CPE1, CPE2.

表 6 316L 不锈钢 EIS 拟合参数

Table 6 EIS fitting parameter table of 316L stainless steel

| 腐蚀液体系中的s阻值 $R_4/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$ | 腐蚀层的电荷转移电阻 $R_5/(\Omega\cdot\text{cm}^2)$ | 常相位器件的电容 $Q/(10^{-3}\text{F}\cdot\text{cm}^2)$ | |
|--|--|---|--------|
| | | CPE2-T | CPE2-P |
| 7.317 | 5 616 | 1.024 3 | 781.39 |

图 9c 和 9d 为熔覆层与 316L 不锈钢基体的 EIS 拟合曲线, TC4 熔覆层容抗弧大于 316L 不锈钢基体容抗弧, 容抗弧半径大小与材料耐蚀性呈正相关关系, 因此可以得出 TC4 熔覆层耐蚀性比 316L 不锈钢基体更好.

图 10 为 TC4 熔覆层与 316L 不锈钢基体的极化曲线. 从图 10 和表 8 可以看出, TC4 熔覆层和 316L 不锈钢基体的自腐蚀电位分别为 -1.035 5, -1.113 7 V; 单位面积上 TC4 熔覆层和 316L 不锈钢基体的自腐蚀电流密度分别为 2.5119×10^{-5} , 1.4454×10^{-4} A/cm². 但自腐蚀电位不能作为判断材料耐蚀性的唯一指标, 自腐蚀电位仅可以判断极化过程中电极发生腐蚀的倾向, 而自腐蚀电流密度可以更加客观地反应电极的耐蚀性, 自腐蚀电流密度越小, 电极被腐蚀速率越小.

腐蚀反应发生后, 电极试样与电解质溶液接触的表面形成腐蚀产物组成的钝化膜, 其致密度与稳定性是影响自腐蚀电流密度的主要因素. 图 10 中箭头框定的 TC4 钝化区间更大, 这是由于 TC4 富含 Ti 元素以及试样表面 O 元素形成的氧化膜, 同时由于扩散作用 Inconel 625 中的 Ni 元素向熔覆层中扩散, 熔覆层的钝化态趋于稳定, 提高了熔覆层的耐蚀性; 而不锈钢表面仅仅是因为 Cr 元素的存在生成一层富铬钝化膜, 产生了钝化现象. 因此, TC4 熔覆层表面可以形成了相较于基体更加稳定致密的钝化膜, 可有效减缓材料的腐蚀速率.

表 7 TC4 熔覆层 EIS 拟合参数
Table 7 EIS fitting parameter table of TC4 cladding layer

| 腐蚀液体系中的阻值 $R_1/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$ | 腐蚀产物电容 $C_1/(\text{F} \cdot \text{cm}^2)$ | 腐蚀层的电荷转移电阻 $R_2/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$ | 腐蚀体系电荷移动阻值 $R_3/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$ | 常相位器件的电容 $Q/(10^{-5} \text{F} \cdot \text{cm}^2)$ CPE2-T | CPE2-P |
|---|--|--|--|---|--------|
| 9.18 1 | 5.2363×10^{-6} | 36.6 7 | 965 42 | 9.85 02 | 58 690 |

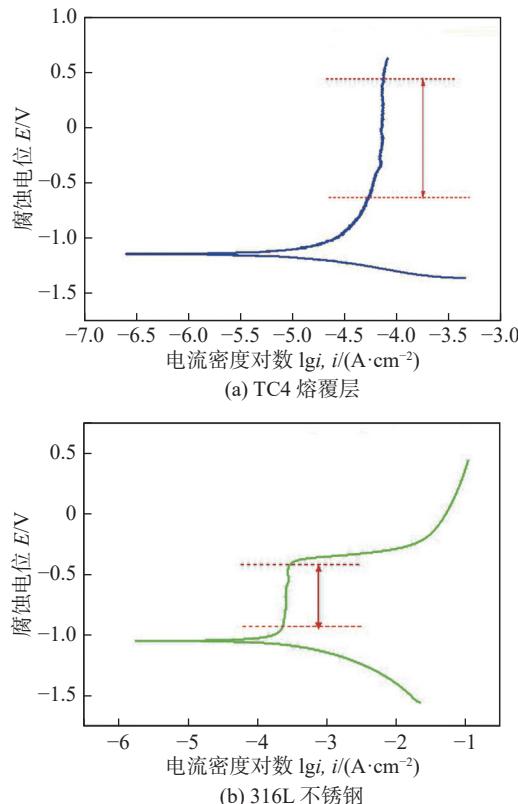


图 10 TC4 熔覆层与 316L 不锈钢的极化曲线

Fig. 10 Polarization curves of TC4 cladding layer and substrate. (a) TC4 cladding layer; (b) 316L stainless steel

表 8 TC4 熔覆层与 316L 不锈钢的极化参数

Table 8 Polarization parameters of TC4 cladding layer and 316L stainless steel

| 试样 | 自腐蚀电位 E_{corr}/V | 自腐蚀电流 $I_{\text{corr}}/(10^{-5} \text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$ |
|----------|---------------------------|---|
| TC4 熔覆层 | -1.035 5 | 2.511 9 |
| 316L 不锈钢 | -1.113 7 | 14.454 |

3 结论

(1) 激光熔覆后的 TC4 熔覆层和 316L 不锈钢基体成形质量良好,微观组织致密均匀。TC4 区平均硬度约为 433.64 HV0.5, Inconel 625 区平均硬度约为 293.5 HV0.5, 316L 不锈钢基体平均硬度为

183.26 HV0.5, 硬度实现了逐层降低的良好过渡。

(2) TC4 熔覆层摩擦系数稳定,且低于 316L 不锈钢基体,同时 TC4 熔覆层磨损量比 316L 不锈钢基体少;TC4 熔覆层氧含量明显高于 316L 不锈钢基体;316L 不锈钢基体磨损面出现大量犁沟、团聚和碎片,表现为粘着磨损机制,TC4 熔覆层表现出磨粒磨损和氧化磨损机制,其耐磨性优于 316L 不锈钢基体。

(3) TC4 熔覆层的容抗弧半径更大,且在相同电解液环境中的极化反应过程,TC4 熔覆层与 316L 不锈钢基体都出现了钝化现象,TC4 熔覆层钝化区间更大,钝化电流密度小于 316L 不锈钢基体,表明 TC4 熔覆层发生极化反应的速率更慢,其耐蚀性比 316L 不锈钢基体更强。

参考文献

- [1] 李妍, 张国庆, 吕建伟, 等. 316 不锈钢在海洋平台上的应用探讨 [J]. 涂层与防护, 2023, 44(2): 1–3, 7.
Li Yan, Zhang Guoqing, Lyu Jianwei, et al. Discussion on the application of 316 stainless steel on offshore platform[J]. Coatings and Protection, 2023, 44(2): 1–3, 7.
- [2] 戴红霞, 冯晓丽. 厚度对车用 304 不锈钢表面激光熔覆钛涂层组织性能的影响 [J]. 应用激光, 2020, 40(4): 626–630.
Dai Hongxia, Feng Xiaoli. The effect of thickness on the micro-structure and properties of laser clad titanium coating on 304 stainless steel for vehicles[J]. Applied Laser, 2020, 40(4): 626–630.
- [3] 卜哲涵. 车用 301L 不锈钢腐蚀和力学性能研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
Bu Zhehan. Research on corrosion and mechanical properties of 301L stainless steel for vehicles [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021.
- [4] Zhang Z, Yu T, Kovacevic R. Erosion and corrosion resistance of laser cladded AISI 420 stainless steel reinforced with VC[J]. Applied Surface Science, 2017, 410: 225–240.
- [5] 张东玖, 程从前, 杨华, 等. 钝化膜完整性对不锈钢海洋大气腐蚀的影响及其质检方法 [J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(5): 46–

- 50,56.
- Zhang Dongjiu, Cheng Qianqian, Yang Hua, *et al.* Effect of passivated film integrity on Marine atmospheric corrosion of stainless steel and its quality inspection methods[J]. *Corrosion and Protection*, 2023, 44(5): 46 – 50,56.
- [6] 尹程辉, 潘吉林, 陈俊航, 等. 热带海洋大气环境下不锈钢的腐蚀寿命评估 [J]. 表面技术, 2022, 44(5): 183 – 193, 246.
- Yin Chenghui, Pan Jilin, Chen Junhang, *et al.* Corrosion life assessment of stainless steel in tropical marine atmospheric environment[J]. *Surface Technology*, 2022, 44(5): 183 – 193, 246.
- [7] 杨青瑞. 固溶处理对 304 不锈钢腐蚀性能的影响及腐蚀演化模拟 [D]. 银川: 宁夏大学, 2021.
- Yang Qingrui. Effect of solution treatment on corrosion properties of 304 stainless steel and simulation of corrosion evolution [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021.
- [8] 李琳. 316L 不锈钢在高温环境的氧化行为及氧化膜的冲刷腐蚀研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
- Li Lin. Research on the oxidation behavior of 316L stainless steel in high temperature environment and the erosion corrosion of oxide film [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.
- [9] 胡玉婷, 董鹏飞, 蒋立, 等. 海洋大气环境下 TC4 钛合金与 316L 不锈钢铆接件腐蚀行为研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(2): 167 – 174.
- Hu Yuting, Dong Pengfei, Jiang Li, *et al.* Research on corrosion behavior of TC4 titanium alloy and 316L stainless steel riveted parts in marine atmospheric environment[J]. *Chinese Journal of Corrosion and Protection*, 2020, 40(2): 167 – 174.
- [10] Francis R. Galvanic corrosion of high alloy stainless steels in seawater[J]. *British Corrosion Journal*, 1994, 29(1): 53 – 57.
- [11] 孙荣禄, 杨文杰, 张九海, 等. 钛合金与不锈钢真空扩散焊接的研究 [J]. 佳木斯工学院学报, 1997(1): 46 – 50,79.
- Sun Ronglu, Yang Wenjie, Zhang Juhai, *et al.* Study on vacuum diffusion welding of titanium alloy and stainless steel[J]. *Journal of Jiamusi Institute of Technology*, 1997(1): 46 – 50,79.
- [12] 肖旋, 李海东, 刘海涛, 等. 钛合金真空与不锈钢管件真空扩散焊工艺研究 [J]. 热加工工艺, 2022, 52(1): 21 – 24.
- Xiao Xuan, Li Haidong, Liu Haitao, *et al.* Research on vacuum diffusion welding process of titanium alloy and stainless steel pipe fittings[J]. *Hot Working Process*, 2022, 52(1): 21 – 24.
- [13] Kahraman N, Gülenç B, Findik F. Joining of titanium/stainless steel by explosive welding and effect on interface[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 169(2): 127 – 133.
- [14] 张志强, 杨凡, 张天刚, 等. 激光熔覆碳化钛增强钛基复合涂层研究进展 [J]. 表面技术, 2020, 49(10): 138 – 151,168.
- Zhang Zhiqiang, Yang Fan, Zhang Tiangang, *et al.* Research progress of laser cladding titanium carbide reinforced titanium-based composite coatings[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(10): 138 – 151,168.
- [15] Zhang Y, Chen Y K, Zhou J P, *et al.* Forming mechanism and mechanical property of pulsed laser welded Ti alloy and stainless steel joint using copper as interlayer[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(2): 1425 – 1433.
- [16] Tanprayoon D, Srisawadi S, Sato Y, *et al.* Microstructure and hardness response of novel 316L stainless steel composite with TiN addition fabricated by SLM[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 129: 106238.
- [17] Gao Fuyang, Mu Zhuangzhuang, Ma Zhaowei, *et al.* Fine microstructure characterization of titanium alloy laser narrow gap welded joint[J]. *China Welding*, 2021, 30(3): 31 – 38.
- [18] 田志刚, 李新梅, 秦忠, 等. 激光熔覆 CoCrFeNiSi_x 高熵合金涂层的组织与性能 [J]. 焊接学报, 2022, 43(12): 53 – 63.
- Tian Zhigang, Li Xinmei, Qin Zhong, *et al.* Microstructure and properties of laser cladding CoCrFeNiSi_x high entropy alloy coating[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43(12): 53 – 63.
- [19] Sun Z, Ji X, Zhang W, *et al.* Microstructure evolution and high temperature resistance of Ti6Al4V/Inconel625 gradient coating fabricated by laser melting deposition[J]. *Materials & Design*, 2020, 191: 108644.
- [20] 张亚运, 魏金山, 齐彦昌, 等. TA2/Q235 复合板用 Ni 基过渡层熔焊接头组织和性能 [J]. 焊接学报, 2019, 40(1): 75 – 79.
- Zhang Yayun, Wei Jinshan, Qi Yanchang, *et al.* Microstructure and properties of welded joints with Ni base transition layer for TA2/Q235 composite plates[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(1): 75 – 79.
- [21] Wu W, Zhang M, Ding X, *et al.* Microstructure and mechanical property of fusion weld butt joints of TA1/X80 composite plate with TiNi and NiCrMo double-transition layers[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2016, 30(5): 372 – 378.

第一作者: 张敏, 教授, 博士; 主要从事焊接成形过程的力学行为及其结构质量控制、焊接凝固过程的组织演变行为及其先进焊接材料的研究; Email: zhmmn@xaut.edu.cn.

(编辑: 王娇)