

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.07.011

## 激光熔覆再制造镍基合金层的组织和性能研究

钱绍祥<sup>1\*</sup>, 仇莺璇<sup>2</sup>

(1. 镇江市高等专科学校 现代装备制造学院, 江苏 镇江 212028; 2. 江苏科技大学 粮食学院, 江苏 镇江 212028)

**摘要:** 采用激光熔覆再制造技术在 316L 基材上开展多层镍基合金梯形槽试验研究, 分析了修复区的物相组成和显微组织结构, 研究了修复区的组织变化对熔覆层的显微硬度和耐腐蚀性能的影响。结果表明, 修复区与基材呈现良好的冶金结合, 其结合区的组织主要为胞状晶和柱状晶, 熔覆层内的组织主要为柱状晶和等轴晶; 晶粒内部具有较高的位错密度且以小角度晶界为主; 修复区的平均显微硬度约为基材平均显微硬度的 2.23 倍; 相较于基材, 修复区具有更好的耐腐蚀性能。

**关键词:** 激光熔覆; 再制造; 多层; 镍基合金; 微观组织

中图分类号: TG174.44

文献标识码: A

## Research on microstructure and properties of Ni-based alloy layer for laser cladding remanufacturing

Qian Shaoxiang<sup>1\*</sup>, Qiu Yingxuan<sup>2</sup>(1. School of Modern Equipment Manufacturing, Zhenjiang College, Zhenjiang 212028, China;  
2. School of Grain Science and Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212028, China)

**Abstract:** Experimental research was done about multi-layer Ni-based alloy trapezoidal groove using laser cladding remanufacturing technology, the phase composition and microstructure of repaired zone were analyzed, and the effects of microhardness and corrosion resistance of the cladding layer were studied about structural changes in the repaired zone. The results showed that good metallurgical bonding was obtained between the repaired zone and the substrate, the structure of its bonding zone was mainly composed of columnar and cellular crystals, the microstructure inside the cladding layer was mainly composed of columnar and equiaxed crystals, the high dislocation density was found, and it was mainly composed of small angle grain boundaries in the grains, the average microhardness of the repaired zone was approximately 2.23 times that of the substrate, compared to the substrate, the repaired zone had better corrosion resistance.

**Keywords:** laser cladding; remanufacturing; multi-layer; Ni-based alloy; microstructure

收稿日期: 2023-08-10

修回日期: 2023-09-08

作者简介: 钱绍祥, 男, (1977—), 男, 博士, 副教授, email: qiansx@zjc.edu.cn

基金项目: 2022 年江苏省高校哲学社会科学研究一般项目(2022SJYB2297); 2022 年江苏省“青蓝工程”人才项目; 2021 年镇江市高等专科学校校级党建与思想政治教育专项课题(GZDJSZ202113); 2023 年镇江市高等专科学校校级教学改革重点项目(2023ZD05)

再制造是利用增材制造技术对废旧机械零部件的失效部位进行材料的逐层沉积,使得故障部件的几何形貌得以恢复的一种技术<sup>[1-2]</sup>。由于修复部位的材料选择具有较大的自由度,可以根据实际工况选择具有某种特殊功能的材料,使得修复后的产品性能达到或超过新品。目前,再制造技术凭借其良好的经济效益,广泛应用于航空、航天、海工、军工等装备制造领域,成为当今绿色经济发展的重要一环,备受国内外产业界和学术界的广泛关注<sup>[3-5]</sup>。

激光熔覆再制造作为一种先进的再制造工艺是基于激光熔覆技术,利用高能激光束作为热源,快速熔化熔覆材料和基材,通过逐层逐道的熔覆方式实现受损零部件的修复和再制造;它具有修复精度高、热影响区小、环境污染少等特点,是一种极具发展潜力的修复再制造技术,有着广阔的应用前景,因此开展激光熔覆再制造技术的研究具有重要的现实意义<sup>[6-9]</sup>。

由于激光熔覆在逐层再制造的过程中熔池和基材之间存在自上而下的温度梯度,水平方向上存在由内而外的温度梯度,多层熔覆再制造给修复区域带来复杂的热历史,导致在修复部位形成了相对比较复杂的微观组织结构。相较于其它成熟的再制造技术,激光熔覆技术容易产生气孔、裂纹等冶金缺陷,修复质量难以得到保证<sup>[10-11]</sup>。因此,研究分析修复部位的微观组织和性能是提高激光熔覆技术在装备再制造领域广泛应用的重要课题。当前,国内外学者开展了激光熔覆再制造技术的研究,Kattire等<sup>[12]</sup>采用激光熔覆技术在模具钢 H13 表面熔覆 CPM9V 粉末进行再制造,分析了修复部位的微观组织结构变化;陈世鑫等<sup>[13]</sup>采用 FeGrNiCu 粉末在 QT700 球墨铸铁齿轮表面进行激光熔覆再制造,探究熔覆层的微观组织演化;Huang 等<sup>[14]</sup>采用激光熔覆再制造技术在 34GrNiMo6 钢上制备了不同层数的熔覆层,分析了每一层的组织演化,但是在 316L 基材上进行激光熔覆再制造多层镍基合金的研究报道较少。因此,本文在前期一系列研究的基础上通过在 316L 不锈钢缺损部位开展多层镍基合金激光熔覆再制造试验,研究分析修复区的微观组织演变和性能,以期激光熔覆技术在再制造领域的广泛应用提供支持。

## 1 试验

### 1.1 试验材料和设备

试验采用基材为 316L 不锈钢,其化学成分(质量分数)如下: C 0.023%、Mo 2.16%、Cr 16.4%、Si 0.69%、S 0.57%、P 0.034%、Mn 1.37%、Ni 10.03%、余量为 Fe;熔覆粉末为镍基合金粉末,其化学成分(质量分数)如下: C 0.03%、Cr 6.0%、Si 1.5%、B 3.0%、Fe 0.38%、余量为 Ni,颗粒尺寸 80~270 目。

实验设备主要包括:(1)RFL-C3300 光纤激光器及其配套设备;(2)处理和检测设备:电火花数控线切割机床、UNIPOL-802 型自动抛光机、X 射线衍射仪(XRD, D8 多功能粉末衍射仪)、AxioImager A2m 型光学显微镜、扫描电子显微镜(SEM, SU-6600)、背散射电子衍射(EBSD, NordlysNano 型)、KB-30S-FA 型自动维氏硬度计、CHI660D 型电化学工作站。

### 1.2 试验方法

基于前期的工艺实验及相关研究,采用多层多道激光熔覆工艺,工艺参数为:第一层激光功率  $P=1.8$  kW,第二、三层激光功率  $P=2.2$  kW,扫描速度为  $v=5$  mm/s,送粉量为  $F=30$  g/min,光斑直径  $r=4$  mm,搭接率  $\eta=50\%$ ,Z 轴抬升量  $\Delta Z=1$  mm,制备过程中全程氩气保护。为模拟真实的再制造过程,选取典型的梯形槽为研究对象,试验前先在基板上加工出梯形槽,其尺寸如图 1 所示,梯形槽表面用砂纸打磨,用丙酮清洗干净表面油污,烘干备用。由于缺口的深度在 3 mm 左右,单层激光熔覆修复的厚度约为 1 mm 左右,因此,采用三层激光熔覆再制造工艺,从而获得 3 mm 厚的修复区。

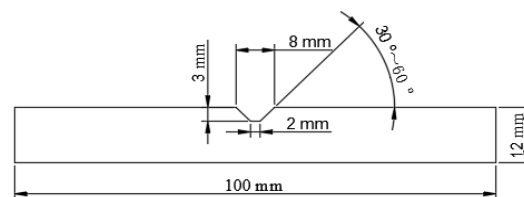


图1 梯形槽示意图

Fig.1 Schematic diagram of trapezoidal groove

## 2 结果与分析

### 2.1 XRD 分析

图2为激光熔覆再制造修复区的XRD图谱,经分析其相组成为  $\gamma$ -(Fe, Ni)、 $\text{Ni}_3\text{B}$ 、 $\text{Cr}_5\text{B}_3$  和  $\text{Ni}_{17}\text{Si}_3$  四

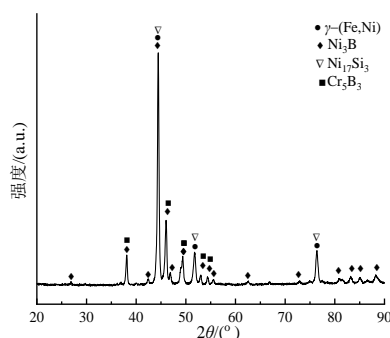
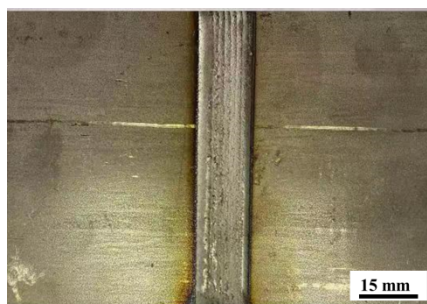


图2 修复区的XRD图谱

Fig.2 XRD pattern of the repaired zone



(a) 表面



(b) 横截面

图3 修复区的宏观形貌

Fig.3 Macroscopic morphology of the repaired zone

### 2.3 SEM分析

激光熔覆再制造区域的截面微观组织如图4所示。其中图4(a)为修复区域的整体微观结构图,可以观察到修复区与基材形成了良好的冶金结合,在整个修复区域发现了一些大小不一的气孔随机分布,这主要是熔池中的C原子与空气中的O原子的化学反应生成CO,由于激光熔覆加工冷却速度快的特点,使得在熔池的凝固过程中已溶解的CO等气体来不及逃逸,从而产生一定数量的微小气孔<sup>[13]</sup>。图4(a)中A~F区域的局部放大图分别对应图4(b)~图4(g),从图4(b)可以明显观察到熔覆层与基材之间的熔合线,且在交界面形成了耐腐蚀性较强的胞状晶,表明两者之间形成了充分的冶金结合,在修复区的底部,由于靠近底部区域温度梯度很高,熔池底部的液态金属与大面积的基材接触产生激冷效应,晶粒形核在垂直于熔合线方向上以胞状晶方式生长,由于激光熔池的传热特点,当激光束离开熔池后,液态金属迅速从熔池底部向顶部外延式生长,其组织呈现典型的柱状晶特征。在图4(c)和

种相,由于316L基材的稀释作用,基材与修复区之间产生了相互扩散,基材中的Fe元素进入了熔池,导致在熔覆层中发现 $\gamma$ -(Fe, Ni)固溶相,相关研究表明, $\text{Ni}_3\text{B}$ 、 $\text{Cr}_5\text{B}_3$ 和 $\text{Ni}_{17}\text{Si}_3$ 等物相的存在有助于改善或增强修复层的性能。

### 2.2 宏观形貌分析

激光熔覆再制造多层镍基合金的宏观形貌如图3所示,其中图3(a)为表面形貌图,图3(b)为截面形貌图。可以观察到,在梯形槽区域实现了连续完整的激光熔覆再制造,修复区整体形貌良好,表面较为平整,不存在个别小区域未完全填满的现象;修复区和基材结合牢固,未发现裂纹和未熔合现象。

(d)中,第一层和第二层的中上部区域发现大量不规则的等轴枝晶,这主要是因为多层激光熔覆的过程中,已凝固的熔覆层充当了后面熔覆层的基体,使得该层经历着激光重熔处理,顶部区域的组织结构重新熔化再凝固,根据“成分过冷”理论分析,由于熔覆层中本身存在大量热量,温度梯度很小,固相散热能力较弱,随着液相中的溶质原子越来越富集,导致成分过冷逐渐增大,当成分过冷大到形成非均匀形核时,得到的凝固组织便呈现为等轴枝晶;此外,根据过渡区域的特征分析,可以明显地区分层与层之间的分界线(图4(e)),该区域发现形状、大小不一致且无序的柱状晶,表明后续的激光扫描对该区域的组织结构产生了明显的影响,但是柱状晶的生长特性没有发生变化。从图4(f)中可以观察到在交界线以上的区域分布着大量致密且粗细不一的等轴晶和长短不一的柱状晶,在顶部区域内,除等轴晶和柱状晶外,还存在一定数量的胞状晶,如图4(g)所示。从观察结果分析,激光熔覆再制造区域的微观组织并不是自下而上有序分布着平面晶、胞状晶、柱

状晶和等轴晶,与单纯的多层多道激光熔覆增材制造所形成的微观结构存在一定的差异<sup>[15]</sup>;主要是因为梯形槽两侧为大面积的316L基材,再制造过程中温度场分布与在空气中存在差异,温度梯度的改变

导致微观组织结构发生了变化,在熔化、冷却、凝固、再熔化、再冷却、再凝固这一复杂的热历程中梯形槽形状的基材与修复层之间相互形成了扩散,产生了更为复杂的稀释效应,使微观组织结构产生变化。

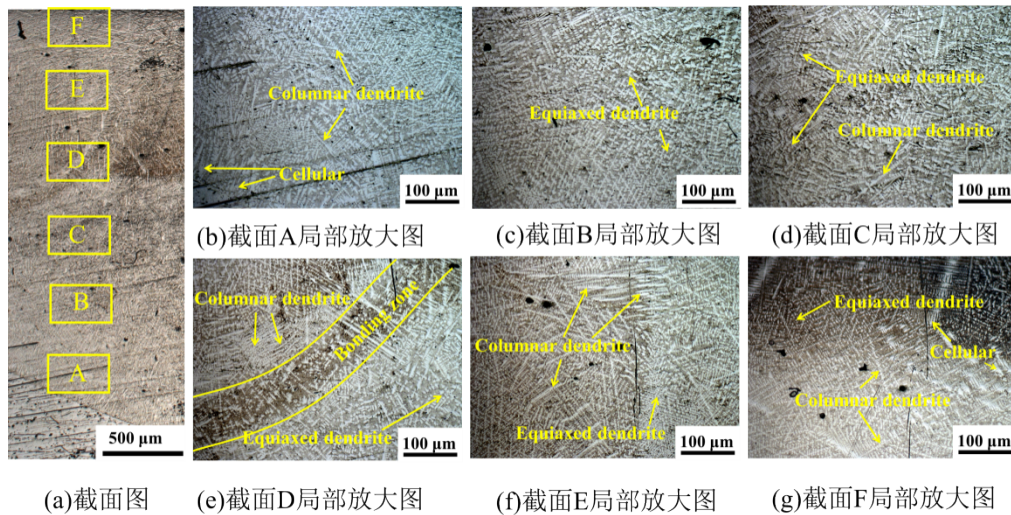
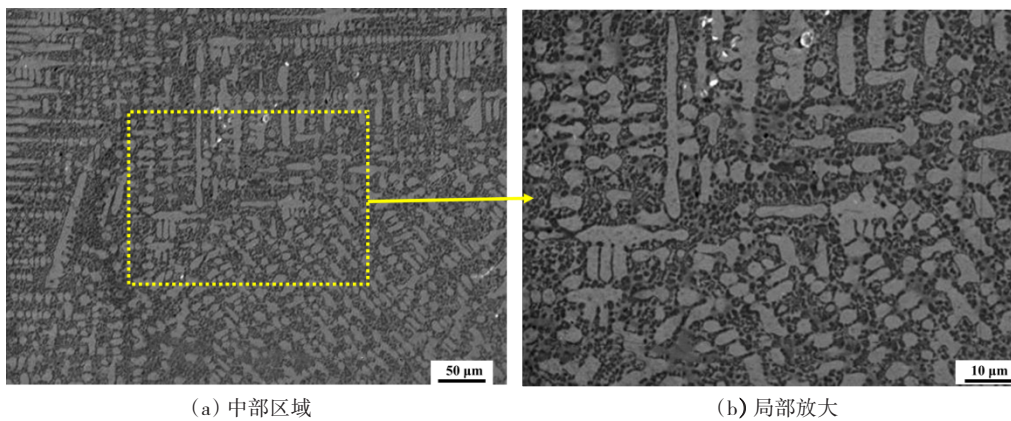


图4 修复区的微观组织

Fig.4 Microstructure of repaired zones

为了更加清晰的了解修复区的微观组织结构,对其中间区域进行分析,如图5所示。从图5(a)中可以观察到枝晶的生长大致可分为 $0^\circ$ 、 $30^\circ$ 和 $90^\circ$ 3个方向,柱状晶的大小、形貌均不完全一致,等轴晶的大小也不一样,表明在多层激光熔覆再制造过程

中存在着复杂多变的温度梯度、冷凝速率和晶粒生长速率。从放大视图5(b)中观察到更为细化的枝晶和枝晶间组织,表现为块状、棒状和一些不规则的椭圆状,形成网状的共晶组织结构,部分柱状枝晶尚未生长完全,表现为长条胞状。



(a) 中部区域

(b) 局部放大

图5 中部区域及局部放大SEM形貌图

Fig.5 SEM images of the middle region and its local magnified image

## 2.4 EBSD 分析

反极图(inverse pole figure, IPF)如图6(a)、(c)所示,图中不同颜色代表着晶粒的不同取向,局域平均取向差(kernel average misorientation, KAM)如图6(b)、(d)所示,反映了应变集中程度的变化,不

同颜色代表着试样中的取向差区域不同,从蓝色到绿色表示位错密度由小到大<sup>[16]</sup>。

从IPF图中可知,由于激光熔覆过程中存在着复杂的温度场变化,枝晶并不以 $\langle 100 \rangle$ 方向择优生长,而是在 $\langle 101 \rangle$ 和 $\langle 111 \rangle$ 方向上生长;在局部的微

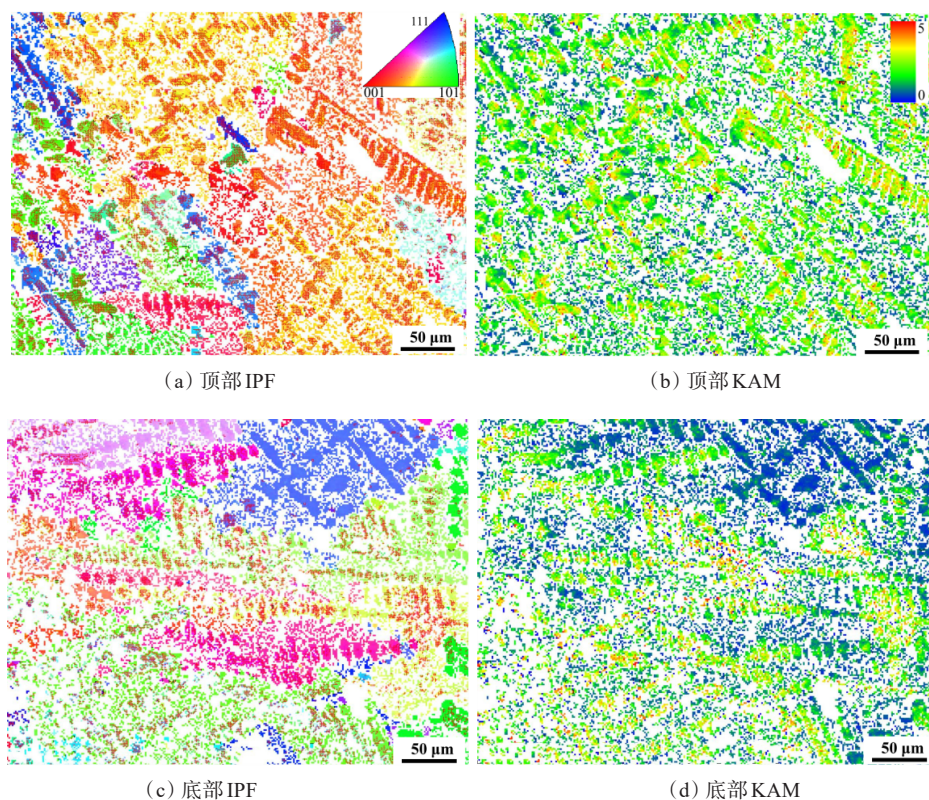


图6 修复区的IPF图和KAM图

Fig.6 IPF and KAM charts of the repaired zone

小区域内,由于温度场的变化不大,先形成的枝晶对后续枝晶的生长取向产生了影响,使得该区域的晶粒取向相同。从图6(b, d)中观察到底部和顶部具有较高的KAM值,表明该区域的组织结构具有较高的位错密度,其原因在于梯形槽的结构有更好的导热效果,在凝固过程中,温度下降得更快,过冷

度更大,形成了更高密度的位错;同时,过冷度的增大有利于提高形核率,细化枝晶,缩小晶粒尺寸,增加晶界数量,增大位错运动的阻力,从而提高其强度<sup>[17]</sup>。晶界类型统计如图7所示,可以看出,小角度晶界占比在顶部和底部区域分别为97.9%和97.1%,表明晶粒内部以小角度晶界为主,由于小角

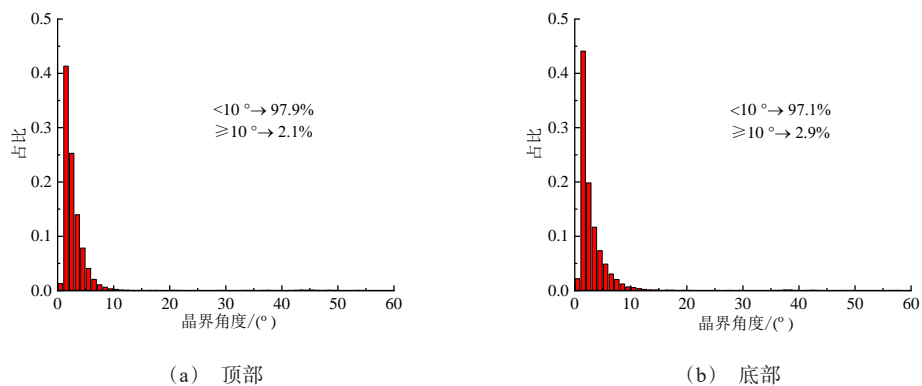


图7 晶界类型统计图

Fig.7 Statistics graphs of grain boundary types

度晶界的界面能较低,有助于提高该区域的耐腐蚀性能<sup>[18]</sup>。

## 2.5 显微硬度分析

图8为再制造区域从基材到修复区顶部的维氏硬度分布图。可以观察到显微硬度从基材到修复层呈上升趋势,表明修复区的显微硬度明显优于基材,但在修复区域的显微硬度存在明显的波动,这与该区域的微观组织结构分布有关,由于制备过程中温度梯度和热历程的不同,熔覆层内及层与层交界区域的微观组织和形貌产生了差异,影响了显微硬度分布;另外每层的中间区域由于枝晶的分布及枝晶间的微观结构不同,导致微区的显微硬度分布存在差异,顶部等轴晶区域的显微硬度高于中部粗大的柱状晶;在每一层的底部区域,由于先形成的熔覆层充当了后面熔覆层的基体,基体表层材料的融入,存在一定程度上的界面软化,因此显微硬度产生了微小的下降。修复区域的平均显微硬度大约为551.50 HV,约为基体平均显微硬度的2.23倍,显微硬度总体的提升对提高再制造试样的性能具有重要的影响<sup>[19]</sup>。

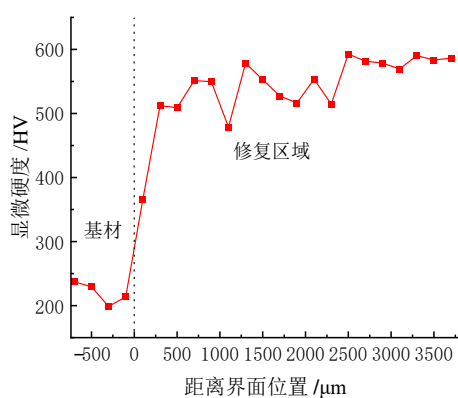


图8 再制造区域截面显微硬度

Fig.8 Microhardness of the cross-section in remanufacturing area

## 2.6 耐腐蚀性分析

图9为316L基材和修复区域在3.5% NaCl溶液中的塔菲尔极化曲线,根据电化学腐蚀原理,材料的耐蚀性与自腐蚀电流密度 $I_{\text{corr}}$ 和自腐蚀电位 $E_{\text{corr}}$ 相关,自腐蚀电流密度越小,材料的腐蚀速率越慢,自腐蚀电位的值越正,材料的腐蚀倾向越小,从图中可以看出,修复区的 $I_{\text{corr}}$ 为 $2.829 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ , $E_{\text{corr}}$ 为

-0.383 V;基材的 $I_{\text{corr}}$ 为 $1.248 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ , $E_{\text{corr}}$ 为-0.469 V,修复区域的自腐蚀电流密度 $I_{\text{corr}}$ 小于316L基材,自腐蚀电位 $E_{\text{corr}}$ 比基材更趋于正向,可见,修复区的耐腐蚀性能明显强于316L基材<sup>[20]</sup>。

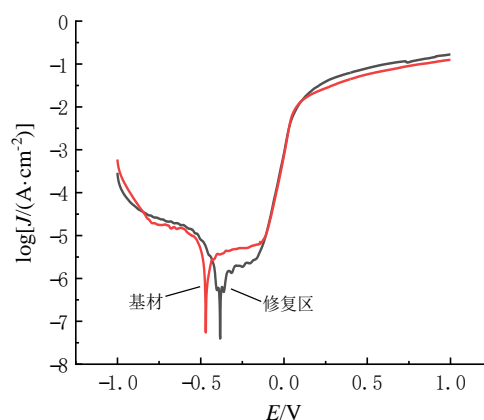


图9 316L基材和修复区在3.5%NaCl溶液中的极化曲线

Fig.9 Polarization curves of 316L substrate and repaired zone in 3.5% NaCl solution

## 3 结论

(1)利用激光熔覆再制造技术在316L基材上进行了多层镍基合金梯形槽试验研究,修复区与基材冶金结合良好,生成了 $\gamma-(\text{Fe}, \text{Ni})$ 、 $\text{Ni}_3\text{B}$ 、 $\text{Cr}_5\text{B}_3$ 和 $\text{Ni}_{17}\text{Si}_3$ 四种强化相。

(2)修复区与基材结合区的微观组织主要表现为胞状晶和柱状晶,熔覆层的微观组织主要表现为柱状晶和等轴晶,具有较高的位错密度,晶粒内部以小角度晶界为主。

(3)修复区域的平均显微硬度约为551.50 HV,约为基体平均显微硬度的2.23倍,相较于基材,修复区具有更好的耐腐蚀性能。

## 参考文献

- [1] 李方义, 戚小霞, 李燕乐, 等. 盾构机关键零部件再制造修复技术综述[J]. 中国机械工程, 2021, 32(7): 820-831.
- [2] 张琦, 张秀芬, 蔚刚. 磨损失效零件激光增材再制造神经网络量化评价方法[J]. 中国表面工程, 2022, 35(6): 244-256.
- [3] 冯晓慧, 高飞, 赵阳, 等. 电弧增材再制造低碳钢疲劳性能研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(11): 1-9.
- [4] Oniuke B, Bandyopadhyay A. Additive manufacturing in

- repair: Influence of processing parameters on properties of Inconel718[J]. *Materials Letters*, 2019, 252: 256-259.
- [5] 刘宏伟, 马世博, 迟永波, 等. 可移动激光再制造修复平台设计与实验[J]. *精密成形工程*, 2023, 15(1): 208-218.
- [6] 何建群, 武成武, 王靖雯, 等. 12CrNi3A 钢凸轮轴激光熔覆再制造技术[J]. *金属热处理*, 2021, 46(2): 200-203.
- [7] 陈放, 王文宇, 杨冠军, 等. 激光增材再制造工艺规划及性能提升研究进展[J]. *热加工工艺*, 2022, 51(21): 1-11.
- [8] 张玉杰, 杨建华, 许玲萍. 激光熔覆技术在表面失效机械件中的应用[J]. *电镀与精饰*, 2021, 43(8): 39-43.
- [9] 和豪涛, 王晨, 李金辉, 等. 汽车用 AZ91 镁合金的表面激光改性研究[J]. *电镀与精饰*, 2023, 45(5): 41-50.
- [10] 曹鹏, 雷高峰, 苏成明, 等. 不同送料工艺对液压支架激光熔覆再制造的影响[J]. *材料导报*, 2021, 35(2): 424-432.
- [11] 夏国俊, 姚喆赫, 陈健, 等. 激光增材再制造 IN939 修复区显微组织与拉伸性能研究[J]. *表面技术*, 2021, 50(2): 277-286.
- [12] Kattire P, Paul S, Singh R, et al. Experimental characterization of laser cladding of CPM 9V on H13 tool steel for die repair applications[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2015, 20: 492-499.
- [13] 陈世鑫, 雷卫宁, 任维彬, 等. 激光熔覆与淬火再制造 QT700 球墨铸铁齿轮熔覆层的组织和性能[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0514003.
- [14] Huang C, Lin X, Yang H, et al. Microstructure and tribological properties of laser forming repaired 34CrNiMo6 steel[J]. *Materials*, 2018, 11(9): 1-13.
- [15] Qian S, Dai Y, Guo Y, et al. Microstructure and wear resistance of multi-layer Ni-based alloy cladding coating on 316L SS under different laser power[J]. *Materials*, 2021, 14(4): 781.
- [16] 于保宁, 赵广辉, 杨杜航, 等. 镍基 625 合金电子束熔覆 TiC 涂层表面改性研究[J]. *精密成形工程*, 2023, 15(8): 139-147.
- [17] 张妍嘉, 凌惠琴, 杭毅, 等. 聚二硫二丙烷磺酸钠对电沉积纳米李晶铜的影响[J]. *电镀与精饰*, 2023, 45(8): 1-6.
- [18] 牛洋洋, 李统, 周文博, 等. 增材制造 Ti6Al4V 钛合金的激波压缩状态方程与动态变形机理研究[J]. *力学学报*, 2023, 55(8): 1673-1685.
- [19] 钱绍祥. 激光熔覆镍基合金及其表面激光喷丸的微观结构、强化机理与性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- [20] 柳小祥, 范文俊, 徐招, 等. 316L 不锈钢金属双极板的电解抛光工艺[J]. *电镀与精饰*, 2020, 42(3): 6-11.