

# 激光与光电子学进展

## 激光熔凝不锈钢的组织 and 综合性能

王子璇, 胡艳娇\*, 庞铭

中国民航大学机场学院, 天津 300300

**摘要** 为探究激光熔凝工艺对不锈钢表面综合性能的影响, 本课题组选用 LDF 4000-40 型激光器对 0Cr17Ni12Mo2 不锈钢表面进行处理, 并采用光学显微镜、电子显微镜、能谱扫描仪、显微硬度计、电化学分析仪及磨损试验机等对其微观组织与性能进行表征。结果表明: 由于不同区域的传热、散热差异, 激光熔凝组织与基体的界面呈波浪形, 强化区的表层为等轴晶, 中部为等轴晶和柱状晶, 边缘区域为平面晶, 且强化区的碳元素、铁元素及铬元素存在扩散现象; 由于激光熔凝细化了微观组织, 强化层的最高硬度约为基体最高硬度的 1.5 倍; 与基体相比, 强化层的耐蚀性更好, 但强化层一旦发生腐蚀, 其腐蚀速率比基体高; 由于晶粒细化及硬度增加等原因, 强化层的摩擦因数(0.29)低于基体的摩擦因数(0.35), 且磨损机理为磨粒磨损。

**关键词** 激光技术; 激光熔凝; 不锈钢表面; 综合性能; 微观组织

中图分类号 O436 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1914006

## Microstructure and Comprehensive Properties of Laser-Melted Stainless Steel

Wang Zixuan, Hu Yanjiao\*, Pang Ming

*Airport College of Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China*

**Abstract** To explore the influence of the laser melting process on the comprehensive properties of stainless steel (SS) surface, we selected the LDF 4000-40 laser to treat the 0Cr17Ni12Mo2 SS surface and then used the optical and electron microscopes, an energy spectrum scanner, the microhardness and electrochemical analysis testers, and an abrasion testing machine to characterize the microstructure and performance. The results show that owing to the differences in heat transfer and cooling conditions in different regions, the macroscopic morphology of laser-melted SS is wavy at the interface with the matrix, the strengthened zone's surface layer comprises equiaxed crystals, the middle zone comprises equiaxed and columnar crystals, and the edge areas comprise flat crystals. Carbon, iron, and chromium elements are diffused in the strengthened zone. Because laser melting refines the microstructure, the highest microhardness of the strengthened layer is about 1.5 times higher than the highest hardness of the substrate. The strengthened layer has a stronger corrosion resistance than the substrate. However, once the strengthened layer is corroded, its corrosion rate is higher than that of the matrix. Owing to grain refinement and increased microhardness, the friction coefficient of the strengthened layer (0.29) is lower than that of the matrix (0.35), and the wear mechanism of the strengthened layer is abrasive wear.

**Key words** laser technique; laser melting; stainless steel surface; comprehensive properties; microstructure

**OCIS codes** 140.3380; 000.4430

收稿日期: 2020-11-02; 修回日期: 2021-01-21; 录用日期: 2021-02-17

基金项目: 国家自然科学基金(52076212)

通信作者: \*yjhu@cauc.edu.cn

## 1 引言

不锈钢是制造机场供油阀门的主要材料,但在服役条件下易受到微动磨损、腐蚀等多方面的作用,影响其在役使用寿命。为了提高不锈钢表面防护能力并延长其在服役条件下的使用寿命,工程上常采用表面强化的方法对其进行处理。常用的表面强化处理工艺有物理气相沉积、热喷涂、激光熔凝等,其中:热喷涂法的优势是喷涂效率高且能保留喷涂材料的性能,但该方法制备的涂层在应用于要求涂层与基体之间有较高结合强度的服役环境时有一定的限制。物理气相沉积工艺过程简单,且成膜均匀致密,但其制备的涂层的膜-基结合力有限。激光熔凝工艺可以提高材料表面的防护能力,可以在不添加新材料的基础上,直接将材料本体熔化;该工艺利用激光快速加热和冷却的特性使材料表面的综合性能得以优化和提升,从而延长其使用寿命<sup>[1]</sup>。

目前,国内外已有学者开展了不锈钢表面激光熔凝工艺的研究。黄伟军等<sup>[2]</sup>采用激光熔凝工艺探究了 45 钢在激光处理后组织结构及显微硬度的变化,结果发现,除了表面熔凝区薄层外,显微硬度随着距表面深度的增加呈减小的趋势;但他们没有对熔凝层中的元素变化以及熔凝层的其他力学性能进行研究。付安庆等<sup>[3]</sup>利用激光对超级 13Cr 不锈钢油管进行了表面熔凝强化处理,结果发现,在适宜工艺参数下获得的组织具有较高的硬度及耐蚀性;但他们并未对材料的耐磨性等其他性能进行研究。姜伟等<sup>[4]</sup>利用激光熔凝工艺在不同工艺参数下制备了 1Cr18Ni9Ti 不锈钢熔凝层,有效提高了不锈钢表面的显微硬度和耐磨性,但他们并未进一步探究材料的耐蚀性以及其他力学性能。虽然国内外已开展了一些不锈钢表面激光熔凝的相关研究,但都是基于某种工况条件使某一种或几种性能得到

增强,而未关注其他力学性能是否存在下降趋势。

不锈钢以其良好的力学性能和耐蚀性被广泛应用于机场输油管网的供油阀门。本文研究的对象是埋入土层的机场供油阀门,由于机场输油管网对设备的安全性要求较高,且现有的机场输油管网阀门材料在服役环境下容易出现磨损,因此希望采用一定的方法在不降低阀门材料表面耐蚀性的前提下提高其表面的硬度和耐磨性,以提高输油设施的耐久性和安全性,减少经济损失和环境污染,从而保障机场的正常运行。因此,本次研究选择可在苛刻条件下应用的 0Cr17Ni12Mo2 不锈钢为研究对象,结合机场供油阀门的服役环境,在研究团队前期大量工艺试验的基础上优选出表面成形性能较好的激光参数,探究激光熔凝对阀门用不锈钢耐蚀性、耐磨性、硬度以及宏观形貌、微观组织、元素变化等的影响,以提高机场供油设施的耐久性和安全性,验证激光熔凝工艺对输油管道阀门表面防护的适配性,从而为阀门表面防护的下一步研究工作及实际工程应用提供支撑。

## 2 试验材料和方法

试验材料为 0Cr17Ni12Mo2 不锈钢,试样尺寸为 150 mm×210 mm×5 mm,试样化学成分如表 1 所示。分别采用 240 目、400 目及 600 目砂纸对试样表面进行除锈处理,并用丙酮清洗试样表面的油污。接着,在氩气保护下,利用 LDF 4000-40 型高功率半导体激光器对样板进行单道激光扫描的强化试验(采用氩气保护可以避免扫描过程中材料高温区域发生严重氧化),扫描激光波长  $\lambda=0.98 \mu\text{m}$ ,聚焦镜焦距  $\delta=300 \text{ mm}$ ,激光光斑直径  $d=4 \text{ mm}$ 。通过对本研究团队前期试验的多组工艺参数的结果进行比较,优选出了可以实现较好表面状态的参数组合,具体参数数值为:激光功率  $P=2400 \text{ W}$ ,扫描速度  $v=16 \text{ mm/s}$ 。

表 1 0Cr17Ni12Mo2 钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of 0Cr17Ni12Mo2 steel

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
Mass fraction / %	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.035	≤0.030	16.00-18.50	2.00-3.00	10.00-14.00	Bal.

针对激光扫描后的试样以及未进行扫描处理的试样,分别采用电火花数控线切割机床沿垂直于激光扫描方向的截面进行切割,制取样块,并使用 MP-2B 金相试样磨抛机依次进行打磨和抛光处理。分别采用 TK-C1031EC 光学显微镜、Phenom g5 pure

电子显微镜(SEM)、能谱扫描仪(EDS)及 THV-1MDT 显微硬度计对样块表面进行检测和分析。金相观察前,先将抛光后的试样采用王水浸蚀 9 s,然后依次进行酒精浸洗、清水冲洗、吹风机冷风吹干。硬度测量时的加载载荷为 1.96 N,保载时间为 15 s,

分别沿强化区及基体区的中线位置进行水平等距打点测量,打点间隔为 100  $\mu\text{m}$ 。

利用 CHI604E 电化学分析仪及 M-2000 型磨损试验机对样块进行电化学腐蚀和摩擦磨损测试。电化学腐蚀测试前,先将待测样块用丙酮进行清洗、吹干处理,然后在 3.5% NaCl 溶液中静置浸泡 45 min,试验时的参比电极、辅助电极和工作电极分别为氯化银电极、铂电极及待测试样。

进行摩擦磨损试验时,摩擦力矩的量程为 0~5 N·m,下主轴转速为 200 r/min,加载载荷为 150 N,试验时间为 60 min。试验前利用砂纸对磨盘的磨面进行磨光处理,并采用丙酮对磨盘和销试样进行清洗,以避免上次试验或机器表面存在的污染物对本次试验产生影响。试验前后分别称量试样的质量,称量三次并取其平均值作为最终结果。试验后采用 Phenom g5 pure 电子显微镜观察试样的磨损形貌。

### 3 结果分析和讨论

#### 3.1 宏观形貌

图 1(a) 为激光熔凝不锈钢强化区的正面形貌,从左至右的水平方向为激光扫描方向。从图 1(a) 中可以观察到,强化区长 57.0 mm,起始端 AA' 所对应的强化宽度为 6.5 mm,小于终止端 BB' 所对应的强化宽度(6.8 mm)。这是因为在激光扫描过程中,被扫描的材料表面区域由于吸收能量而以热传导的方式向包括前方待扫描区域在内的四周传递热量,对前方的待扫描区域产生了一定的预热效果,从而使前方区域在扫描瞬间的最高温度升高、能量增强、宽度增大,因此扫描终止端与起始端相比宽度有所增加。在图 1(a) 中的强化区,沿垂直于激光扫描方向的 AA' 位置进行切割,得到强化区的横截面形貌,如图 1(b) 所示。从图 1(b) 中可以看到,强

化区质量良好,无明显的裂纹、气孔等缺陷。强化区通过激光扫描获得的能量密度较大,因此深度较大(为 1.06 mm)<sup>[5]</sup>。激光熔凝不锈钢的横截面形貌整体为月牙形<sup>[6]</sup>,且月牙形的强化区与基体交界处并不是严格的圆弧形,而是呈现为波浪形,这是激光空间输入能量差异和不同区域传/散热不同导致的结果。

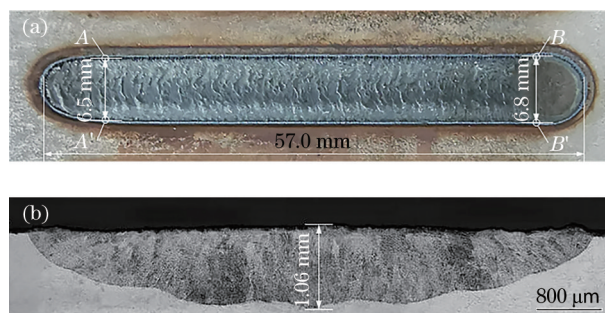


图 1 强化区的宏观形貌。(a) 正面形貌;(b) 横截面形貌

Fig. 1 Images of reinforced area. (a) Front image; (b) cross-sectional image

#### 3.2 组织变化

图 2 为激光强化后试样横截面的金相组织。由图 2 可以观察到,在基体区(不受激光熔凝作用),奥氏体晶粒相对粗大,而受激光影响较多的强化区的组织被极大细化。这是因为在激光的照射下,晶格通过与试样表面的自由电子碰撞而产生热振动,把光能转换成促使试样表面迅速升温并发生奥氏体化的热能<sup>[7]</sup>。此外,脱离激光照射的试样表面又通过与基体的热传导以及与周边环境的对流换热使自身温度迅速下降,这样的“急冷急热”过程留给材料表面奥氏体化的时间极短,使得部分组织形核后来不及长大,因此最终在强化区内形成了比基体晶粒更细小的组织。此外,强化区的热量以热传导方式向热影响区传递,使得温度升高的热影响区组织比基体组织更为细小。

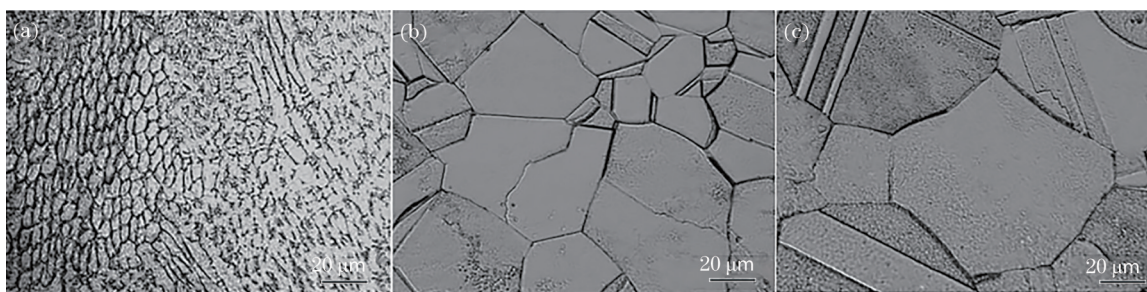


图 2 不同区域的金相组织。(a) 强化区;(b) 热影响区;(c) 基体区

Fig. 2 Metallographic structures of different areas. (a) Strengthened area; (b) heat-affected zone; (c) matrix area

图 3 为强化区不同位置处的 SEM 形貌。从图 3(a) 可以看出, 试样不同深度处以及同一深度不同位置上的组织形态不尽相同, 这是受热程度及形核率等冷却结晶条件不同造成的<sup>[8]</sup>。据此将强化区大致分为强化区表层、强化区中部、强化区侧方边缘及强化区底部边缘 4 个部分, 并分别以 A、B、C、D 位置为代表进行观察, 各部分对应的放大图分别如图 3(b)~(e) 所示。从图 3(b) 中可以观察到强化区表层的急冷晶区主要以等轴晶为主, 这是由于试样表层与外界环境直接接触, 与环境进行对流换热, 而且表层吸收的热量还会向基体方向传导, 极大的冷却速度使得该区域产生了较大的过冷度, 结晶速度增大, 晶核数量增多, 晶粒间的生长相互制约, 从而形成了不同取向的细小等轴晶。强化区中部形

貌如图 3(c) 所示, 可以观察到该区域包含有柱状晶和等轴晶。这是由于中部区域的冷却速度小于表面, 但与形核相比, 晶体长大所需的过冷较小, 从而使得强化区中部的部分组织表现为晶核的继续长大; 又因为晶体的生长方向与最大热流方向相反<sup>[9]</sup>, 因此强化区中部形成了垂直于强化区与基体交界线生长的柱状晶。此外, 由于强化区中部的冷却结晶条件不同, 部分枝晶的生长受到抑制, 因此依旧为无明显取向的等轴晶。图 3(d) 和图 3(e) 分别为强化区侧方和底部边缘的 SEM 形貌, 可以看出, 二者虽然处于不同的深度, 但均为强化区的边缘区域, 该区域的液态金属以靠近基体区的固态基体为核心形核长大, 并沿界面向前缓慢推进, 从而形成了平面晶<sup>[10]</sup>。

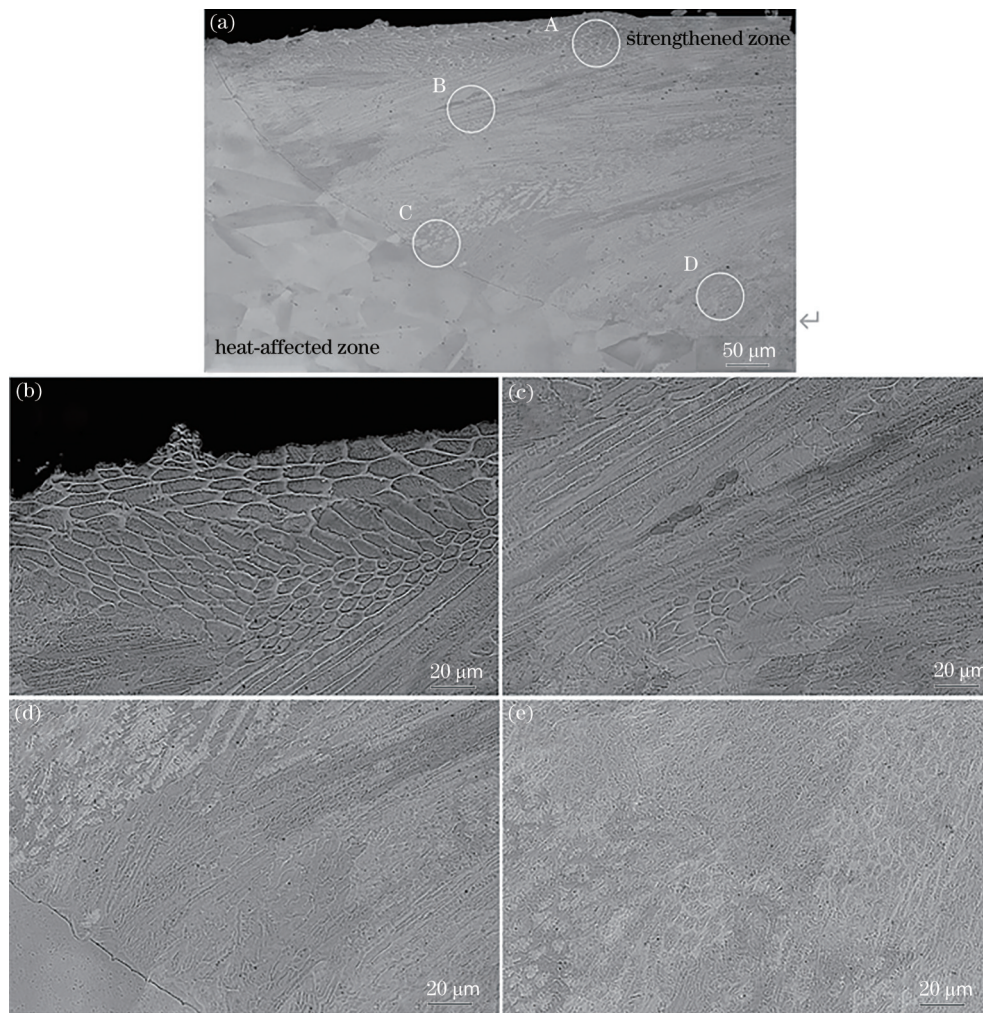


图 3 强化区不同位置处的 SEM 形貌。(a) 强化区局部形貌; (b) A 位置, 强化区表层形貌; (c) B 位置, 强化区中部形貌; (d) C 位置, 强化区侧方边缘形貌; (e) D 位置, 强化区底部边缘

Fig. 3 SEM morphologies at different positions of strengthened zone. (a) Local morphology of strengthened zone; (b) position A, surface morphology of strengthened zone; (c) position B, morphology in the middle of strengthened zone; (d) position C, morphology of side edge of strengthened zone; (e) position D, morphology of bottom edge of strengthened zone

### 3.3 元素分布

分别以强化区表层及热影响区为起点和终点,沿深度方向垂直向下进行线扫描检测,以观察强化区沿深度方向的元素分布情况。扫描方向如图 4 所示。

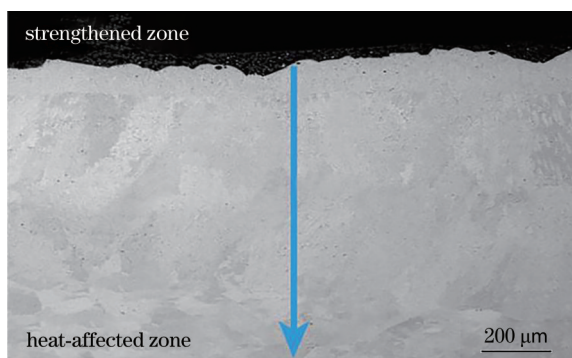


图 4 强化区能谱图线扫描方向示意图

Fig. 4 Schematic of the line scanning direction of the energy spectrum in strengthened zone

图 5 为沿线扫描方向的谱线图,可以看出,在激光熔凝工艺作用下,碳元素沿深度方向的含量明显下降。采用激光照射时,强化区内层的氧含量较少,氧化速度小于间隙碳元素从内层向外层扩散的速度,而高温环境下碳的扩散距离及速度增加,因此表层碳元素含量明显多于内层,且沿深度方向从表层到内层氧含量降低。此外,由图 5 还可以看出:沿强化区深度方向,占比相对较多的铁、铬元素缓慢增多,即元素存在轻微的“下沉”趋势;而占比相对较少的镍、锰、钼三种元素的含量无明显的升降变化,受激光熔凝的影响不大。

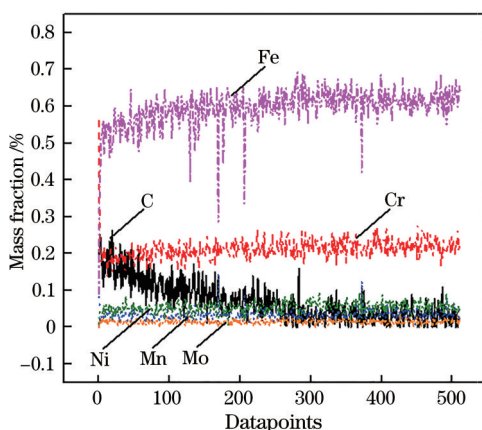


图 5 强化区沿扫描方向的谱线图

Fig. 5 Spectral diagram of strengthened zone along the scanning direction

### 3.4 显微硬度

硬度是对材料抵抗弹塑性变形、破坏等能力的

表征,是集强度、韧性、弹塑性等力学性能于一体的综合性指标;因此,本文分别选取试样强化区中心同一深度下的部分区域以及未被强化的基体对应区域进行显微硬度测量,打点位置如图 6 所示。图 7 为激光熔凝前后不锈钢的显微硬度曲线,从图中可以看到:强化前的不锈钢基体的硬度值基本稳定在 160 HV 附近,强化后的硬度值显著增大,且最高值达到了 278.92 HV,是基体最高硬度值(186.25 HV)的 1.5 倍。这是由细晶强化作用引起的。在不锈钢、合金材料内部,多晶体的晶界具有较大的变形抗力<sup>[11]</sup>;晶粒在变形的同时会受到周边其他晶粒的牵制和影响,当晶粒受到力的作用发生塑性变形时,部分晶粒开始沿晶面进行滑移和增殖,直至到达晶界,此时变形由于无法向相邻晶粒传递而导致塑性变形晶粒内的位错发生塞积。与基体组织相比,受激光“急冷急热”等综合作用影响的强化区中的晶粒被细化<sup>[12]</sup>,单位面积上的相界面及边界增多,位错运动受阻,因此材料硬度增大。

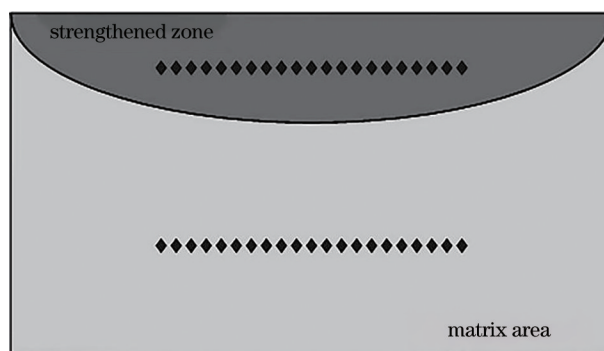


图 6 显微硬度打点位置示意图

Fig. 6 Schematic of the position of microhardness testing points

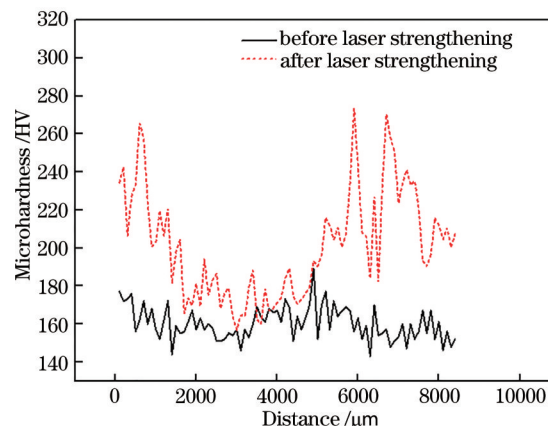


图 7 激光强化前后试样的显微硬度曲线

Fig. 7 Microhardness curves of samples before and after laser strengthening

同时,从图 7 中还可以观察到强化后的硬度值 (159.78~278.92 HV) 较基体区硬度值 (148.25~186.25 HV) 的波动范围更大。强化区不同位置处的冷却结晶条件不同,导致强化区在不同深度及同一深度不同位置上的组织结构存在差异,因此硬化区内的硬度值也会随组织结构的不同而存在差异,故而硬度值出现了较大波动。

### 3.5 耐腐蚀性

图 8 为激光强化前后不锈钢试样在 3.5%NaCl 溶液中进行电化学腐蚀测试所得的极化曲线,其中  $i$  为自腐蚀电流。从图中可以看到,强化前后均存在钝化效果,但未强化试样的钝化区更大,而强化试样更早地进入了钝化区,即更易达到钝化效果。表 2 是根据图 8 所示极化曲线得到的相关数据。由表 2 可知,所测区域面积为  $1 \text{ cm}^2$ ,强化前后试样的自腐蚀电流密度分别为  $4.819 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  和  $7.889 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。自腐蚀电流密度的增加代表材料表面强化后腐蚀速率的增加。从组织结构角度分析,这是由于强化前的基体为奥氏体不锈钢,可以稳定保持奥氏体单相状态,而强化试样表面的部分奥氏体组织发生了转变,不同成分组织间形成了电势差,从而加快了腐蚀反应的进行。另外,在激光熔凝的细晶强化过程中产生的晶粒更细小、晶界更多,导致材料在腐蚀初期的腐蚀速率有所增加<sup>[13]</sup>。从元素角度分析,激光熔凝过程使碳元素由试样内层向表层扩散,致使试样强化区的碳含量大于基体中的碳含量。因此,与基体区相比,强化区含量较高的碳使得与其具有

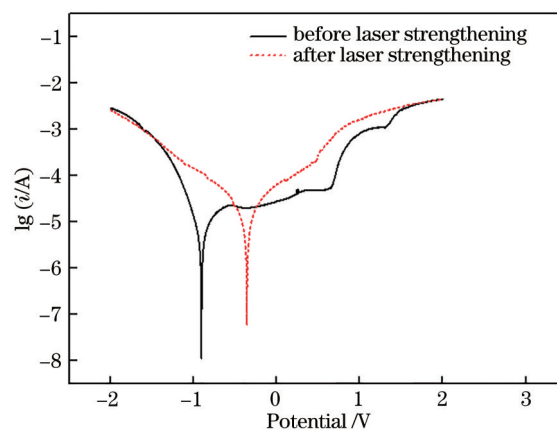


图 8 激光强化前后试样的极化曲线

Fig. 8 Polarization curves of samples before and after laser strengthening

较强亲和力的铬、钼等元素的偏析程度较大,合金的电化学均匀性较弱,腐蚀得更快。自腐蚀电位是对材料表面腐蚀过程中热力学趋势的表征,电位越正腐蚀越难进行<sup>[14]</sup>。强化试样的自腐蚀电位 ( $-359 \text{ mV}$ ) 较强化前 ( $-906 \text{ mV}$ ) 正移了  $547 \text{ mV}$ , 因此材料表面的腐蚀反应驱动力降低。同时,由表 2 中的数据可知,未受到激光强化的基体表面的阴极斜率较大,而激光强化的试样表面的阳极斜率较大。这说明,未受到激光强化的基体在电化学腐蚀过程中受阴极控制,阴极区占据主导作用,而激光强化试样在电化学腐蚀过程中主要受阳极控制,阳极区占据主导作用<sup>[15]</sup>。综上,利用激光熔凝可使材料表面的腐蚀倾向性大大减弱,但腐蚀速率有所增加。

表 2 激光强化前后试样的电化学腐蚀相关数据

Table 2 Electrochemical corrosion related data of samples before and after laser strengthening

Sample	Corrosion current / $\mu\text{A}$	Equilibrium potential / mV	Area / $\text{cm}^2$	Corrosion current density / ( $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	Cathodic Tafel slope	Anodic Tafel slope
Before laser strengthening	4.819	-906	1	4.819	6.327	4.505
After laser strengthening	7.889	-359	1	7.889	4.190	5.069

### 3.6 耐磨性能

分别称量摩擦磨损试验前后的试样并进行计算,得出强化试样表面的磨损量为  $62.7 \text{ mg}$ ,远小于未被强化的不锈钢试样 ( $168.8 \text{ mg}$ )。图 9 为激光强化前后试样的摩擦因数随时间的变化曲线。从图 9 中可以观察到,基体的摩擦因数随时间的变化呈现先升高后趋缓的趋势,并从  $6125 \text{ s}$  左右开始稳定在  $0.35$  附近。这是因为在磨损的起始阶段,接触点不断磨损形成面<sup>[16]</sup>,接触面积的激增最终导致了摩擦因数的增大。强化试样的摩擦因数在升高后并未

直接达到平稳,而是存在一个缓慢下降的过渡阶段。这是由于能谱线扫描中分析到的碳元素从强化区内层扩散到表层使表层碳元素增多,因此耐磨性极大增加,摩擦因数下降。另外,这也与激光强化后形成的显微组织有关,细小晶粒的耐磨性高于粗大晶粒的耐磨性,而试样强化区不同深度上的组织结构、晶粒大小不同,因此曲线会出现波动。激光强化试样的摩擦因数最终稳定在  $0.29$  附近,与基体相比有所减小,耐磨性增大。这与试样的硬度相关,试样的耐磨性会随着硬度的增加而增大,激光

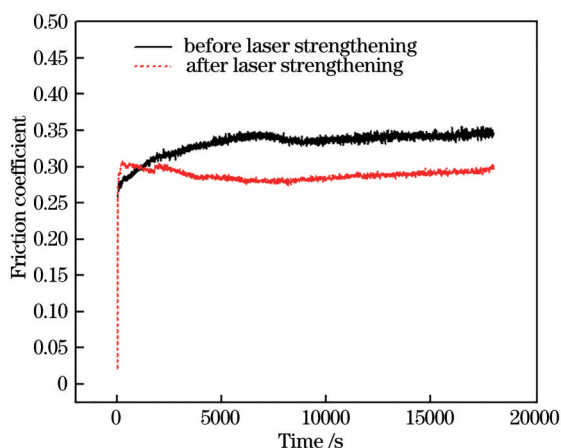


图9 激光强化前后试样的摩擦因数随时间的变化曲线  
Fig. 9 Friction coefficient versus time for samples before and after laser strengthening

强化试样的硬度相比基体升高,因此耐磨性增大<sup>[17]</sup>。从微观角度来说,强化区组织从激光照射前的粗大的奥氏体转变为晶粒细小的马氏体,因此耐磨性升高。另外,摩擦因数曲线存在小幅度跳跃,这是磨损产生的第三体参与承载造成的。

图10为试样强化前后的SEM磨损形貌。在基体表面和强化试样表面均可观察到明显的犁皱状沟槽,属于磨粒磨损<sup>[18]</sup>。由表面相互摩擦产生或由介质带入的微粒充当磨粒对试样表面进行切削,产生的细小裂纹相互连接致使表面产生脱落现象,最终形成了凹坑。与强化试样的表面磨损形貌相比,基体表面的凹坑数量多,犁沟明显,磨损严重。可见,激光熔凝工艺可以提高试样的耐磨性能,并延长其服役寿命。

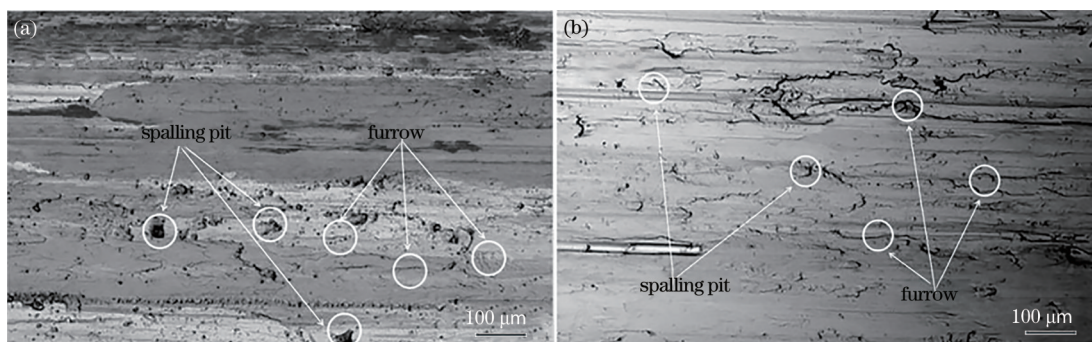


图10 激光强化前后试样的SEM磨损形貌。(a)强化前;(b)强化后  
Fig. 10 SEM morphologies of samples before and after laser strengthening. (a) Before laser strengthening; (b) after laser strengthening

## 4 结 论

经激光熔凝处理后,不锈钢表面沿激光扫描方向的宽度增加,横截面强化区为弓形,强化区与基体的交界面呈波浪形。由于冷却结晶条件不同,强化区不同位置处的组织结构不同:表层是趋向性不明显的等轴晶,中部是与界面垂直的柱状晶及等轴晶,底部是以界面形式向前推进的平面晶。激光的高温作用促进了元素的扩散:强化区内层的氧化作用较小,因此碳元素从内层向外层扩散,而占比较大的铁、铬元素相对应地从外层向内层扩散。

在激光熔凝作用下,不锈钢表面的硬度增加,且硬度值的波动幅度较大。与基体相比,激光强化试样的自腐蚀电流密度增加了64%,电位正移了547 mV,腐蚀反应的驱动力减弱,但腐蚀速度增加。激光强化试样的磨损量为62.7 mg,仅为基体的37%,摩擦因数减小,耐磨性增加,磨损机理主要为磨粒磨损。

## 参 考 文 献

- [1] Li M Y, Wang Y, Han B, et al. Structure and properties of high-Cr steel roller by laser surface melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(2): 498-502.  
李美艳,王勇,韩彬,等.高铬钢轧辊激光熔凝层组织及性能[J].中国激光,2009,36(2):498-502.
- [2] Huang W J, Huang Y J. Microstructure and property of 45 steel by laser melting-hardening strengthening [J]. Hot Working Technology, 2017, 46(8): 58-60.  
黄伟军,黄永俊.激光熔凝强化45钢的组织与性能[J].热加工工艺,2017,46(8):58-60.
- [3] Fu A Q, Zhao M F, Li C Z, et al. Effect of laser surface melting on microstructure and performance of super 13Cr stainless steel[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2019, 39(5): 446-452.  
付安庆,赵密锋,李成政,等.激光表面熔凝对超级

- 13Cr 不锈钢组织与性能的影响研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 39(5): 446-452.
- [4] Jiang W, Zhu X B, Han L. Study on the laser remelting craft to stainless steel[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2010(7): 72-74.  
姜伟, 朱玺宝, 韩莉. 不锈钢激光熔凝工艺研究[J]. 现代制造工程, 2010(7): 72-74.
- [5] Meng Y L, Yang J X, Zhang J Q, et al. Effect of laser melting on microstructure and performance of AerMet100 steel[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 021414.  
孟云龙, 杨胶溪, 张健全, 等. 激光熔凝对 AerMet100 钢显微组织及性能的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 021414.
- [6] Pang M, Liu Q X. Effects of laser parameters on melt microstructure evolution and high temperature mechanical properties of vermicular graphite cast iron [J]. Hot Working Technology, 2019, 48(16): 129-133.  
庞铭, 刘全秀. 激光参数对蠕墨铸铁熔凝组织演变及高温力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(16): 129-133.
- [7] Xu G M, Zhou L Z. Study on microstructure and properties of T10 steel by laser transformation hardening [J]. Hot Working Technology, 2008, 37(12): 71-73.  
徐桂梅, 周立志. T10 钢激光相变硬化的组织与性能研究[J]. 热加工工艺, 2008, 37(12): 71-73.
- [8] Xiao H R. Research on heat treatment process of 13Cr super low carbon martensite stainless steel and its laser surface modification[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017: 45-51.  
肖浩然. 13Cr 超低碳马氏体不锈钢热处理工艺与激光表面强化技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017: 45-51.
- [9] Pang M, Ding Q F. Microstructure and properties of FeCoNiCrAl high entropy alloy by laser cladding[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(8): 108-113.  
庞铭, 丁前峰. 激光熔覆 FeCoNiCrAl 高熵合金的组织与性能[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(8): 108-113.
- [10] Wang Y M. Effects of laser melting on microstructure and mechanical properties of 304 Austenitic stainless steel[D]. Hengyang: University of South China, 2013: 20-29.  
王源蜜. 激光熔凝对 304 奥氏体不锈钢组织及力学性能的影响[D]. 衡阳: 南华大学, 2013: 20-29.
- [11] Amine T, Newkirk J W, El-Sheikh H E D F, et al. Microstructural and hardness investigation of tool steel D2 processed by laser surface melting and alloying[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(9/10/11/12): 1427-1435.
- [12] Jiang G Y, Lei P, Liu Y P, et al. Study on microstructure and mechanical properties of laser welded joint of X65 pipeline steel[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(19): 52-55, 60.  
江国业, 雷璞, 刘宇平, 等. X65 管线钢激光焊接接头组织和力学性能研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(19): 52-55, 60.
- [13] Luo J, Zhang Y, Zhong Q D, et al. Influence of grain size on corrosion resistant of commonly used metals[J]. Corrosion & Protection, 2012, 33(4): 349-352, 356.  
罗检, 张勇, 钟庆东, 等. 晶粒度对一些常用金属耐腐蚀性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(4): 349-352, 356.
- [14] Zhao Y, Song Z M, Jin J B, et al. Electrochemical corrosion properties of Ti-5%TiN composites formed by selective laser melting in Hank's solution [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(9): 0902005.  
赵宇, 宋振明, 金剑波, 等. 激光选区熔化成形 Ti-5%TiN 复合材料在 Hank 溶液中的电化学腐蚀性能[J]. 中国激光, 2019, 46(9): 0902005.
- [15] Dai N W, Zhang L C, Zhang J X, et al. Distinction in corrosion resistance of selective laser melted Ti-6Al-4V alloy on different planes[J]. Corrosion Science, 2016, 111: 703-710.
- [16] Al-Sayed S R, Elshazli A M, Hussein A H A. Laser surface hardening of Ni-hard white cast iron[J]. Metals, 2020, 10(6): 795.
- [17] He S Y, Liu X D, Zhao S Z, et al. Microstructure and wear resistance of carbon fibers reinforced 316L stainless steel prepared using laser cladding[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0502010.  
何松亚, 刘晓东, 赵淑珍, 等. 激光熔覆碳纤维增强 316L 不锈钢的显微组织和耐磨性[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0502010.
- [18] Zhou J Z, He W Y, Xu J L, et al. Strengthening mechanism and wear resistance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe901 composite coating prepared by laser cladding[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0504001.  
周建忠, 何文渊, 徐家乐, 等. 激光熔覆 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe901 复合涂层的强化机制及耐磨性[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0504001.