

基于激光重熔的不锈钢表面耐腐蚀性能研究

李 鹏^{1,2} 孔令华^{1,2} 黄 旭^{1,2} 练国富^{1,2} 杨金伟^{1,2}

(1.福建工程学院机械与汽车工程学院; 2.数字福建工业制造物联网实验室)

摘 要 为了提高不锈钢的耐腐蚀性,以 304、316L、410 和 420J2 不锈钢板材为原材料,采用激光重熔技术对板材表面进行处理,用光学显微镜(OM)和能谱仪(EDS)分析重熔层的微观组织,进行电化学试验,分析不锈钢重熔前后的耐腐蚀性能的变化。结果表明,激光重熔处理不锈钢表面可以改变其微观组织,细化晶粒;当激光功率为 1 800 W、扫描速度为 10 mm/s 时,304 和 410 不锈钢的自腐蚀电位分别为-0.005 V 和-0.552 V,是基体的 0.008 倍和 0.86 倍左右;当激光功率为 1 400 W、扫描速度为 10 mm/s 时,316L 和 420J2 不锈钢的自腐蚀电位分别为-0.367 V 和-0.577 V,是基体的 0.67 倍和 0.98 倍左右。因此,对不锈钢表面进行激光重熔处理可有效提高其耐腐蚀性能。

关键词 不锈钢;激光重熔;电化学;耐腐蚀性能

中图分类号 TG113.22⁺1;TG142.71 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.08.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Corrosion Resistance of Stainless Steel Surface Based on Laser Remelting

Li Peng^{1,2}, Kong Linghua^{1,2}, Huang Xu^{1,2}, Lian Guofu^{1,2}, Yang Jinwei^{1,2}

(1.School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology;

2.Digital Fujian Industrial Manufacture IOT Laboratory)

Abstract: In order to improve the corrosion resistance of stainless steel, taking 304, 316L, 410 and 420J2 stainless steel plates as raw materials, laser remelting technology was acted on the surface of the plates to analyze micro-structure of the remelted layer by optical microscope (OM) and energy spectrometer (EDS). Electrochemical experiments were conducted to analyze the changes in the corrosion resistance of stainless steel before and after remelting. The results indicate that the microstructure is transformed and grains are refined after laser remelting action on the surface of stainless steel. When the laser power is 1 800 W and the scanning speed is 10 mm/s, the self-corrosion potentials of 304 and 410 stainless steel are -0.005 V and -0.552 V, respectively, which are about 0.008 times and 0.86 times that of the substrate. When the laser power is 1 400 W and the scanning speed is 10 mm/s, the self-corrosion potentials of 316L and 420J2 stainless steel are -0.367 V and -0.577 V, respectively, which are 0.67 times and 0.98 times that of the substrate. Therefore, the corrosion resistance of stainless steel can be effectively improved after laser remelting.

Key Words: Stainless Steel, Laser Remelting, Electrochemistry, Corrosion Resistance

激光重熔是一种涉及物理、冶金、材料学等领域的表面改性技术^[1,2],通过高能量激光束在合金表面不间断扫描,形成薄的熔化层,再利用基体热传导作用使熔池中的金属液快速冷却、凝固,从而细化合金组织,减少

的组织与性能[J].粉末冶金技术,2016(6): 268-271.

收稿日期:2021-02-14;修改稿收到日期:2021-03-19

基金项目:福建省科技重大专项资助项目(2020HZ03018)

第一作者简介:李鹏,男,1996 年出生,硕士研究生,福州(350118),E-mail: yiyezhiqiu239360@163.com

通信作者:孔令华,男,1963 年出生,教授,福州(350118),E-mail: 15392030898@163.com

引用格式:李鹏,孔令华,黄旭,等. 基于激光重熔的不锈钢表面耐腐蚀性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(8): 995-1 000.

LI P, KONG L H, HUANG X, et al. Corrosion resistance of stainless steel surface based on laser remelting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(8): 995-1 000.

[12] 温立哲,黄元盛,林津文. 拉伸变形对高熵合金激光涂层组织和性能的影响[J].粉末冶金工业,2018 (4): 45-48.
[13] 温立哲,黄元盛. Al₃Ti₃CoCrCu_{0.5}FeMoNi 高熵合金激光涂层的研究[J]. 有色金属(冶炼部分),2017(6): 67-70.
[14] 黄元盛,温立哲. 退火处理对 Al₃CoCrCu_{1/2}FeMoNiTi 高熵合金激光涂层组织和性能的影响[J]. 表面技术,2016,45(7):162-166.
[15] 温立哲,黄元盛. 激光熔覆 AlCoCrCu_{0.5}FeMoNiTi 高熵合金涂层

的组织与性能[J].粉末冶金技术,2016(6): 268-271.
[16] AKIRAT, AKIHISA I. Analyses of characteristics of atomic pairs in ferrous bulk metallic glasses using classification of bulk metallic glasses and pettifer map[J]. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2006, 8(5): 1 679-1 684.

(编辑:刘晨辉)

偏析,形成高度过饱和固溶体等亚稳定相乃至非晶态,从而改善工件原有的气孔、裂纹、夹杂等缺陷,其中急冷重结晶获得的组织有较高的硬度、耐磨性,耐腐蚀性也会获得显著改善,达到合金表面改性的目的。

目前已有学者研究了激光参数和离子液体等对于材料性能的影响^[3~10]。王继月等^[11]研究了奥氏体不锈钢堆焊层激光表面重熔,发现激光重熔后表面显微组织是胞状晶奥氏体,电化学试验中自腐蚀电流密度和维钝电流密度远低于焊态试样,耐腐蚀性较好。刘月洋等^[12]研究了不同功率下激光重熔对 Mg-Zn-Y-Zr 合金性能的影响,发现经过重熔处理的合金凝固组织明显细化,且随着功率升高,晶粒变大,第二相分布愈加弥散。崔妍等^[13]研究激光重熔时不同激光功率对 AZ31B 镁合金耐腐蚀性能的影响,发现激光重熔后,熔凝层晶粒得到显著细化,晶粒尺寸随着激光功率的增加而逐渐增加。当激光功率为 2 000 W 时,熔凝层具有最优的耐腐蚀性能。邓德伟等^[14]研究重熔及退火对 316L 不锈钢激光熔覆层残余应力的影响,发现激光重熔后熔覆层组织结构未发生显著改变,单位面积熔覆层获得的能量越高,金属元素扩散到熔覆层的时间也越长。安朋亮等^[15]通过动电位极化及阻抗谱等方法研究了温度对 Cr23Mo1N 奥氏体不锈钢的耐点蚀性能的影响,发现随着温度的不断升高,高氮钢的自腐蚀电位和点蚀电位呈下降趋势,腐蚀电流密度逐渐增大,钝化膜阻抗降低,高氮钢点蚀敏感性增大,已发生点蚀的试样不能自修复。吴恒等^[16]使用电化学方法研究了不同温度对淡化海水中 304 不锈钢的耐蚀性的影响,发现随着温度升高,304 不锈钢的极化电阻和点蚀击穿电位均减小,耐蚀性下降。张程等^[17]对比研究了两种 Cr-Mn 系不锈钢与 304 不锈钢在酸性食物环境中的耐腐蚀性能,发现两种 Cr-Mn 系不锈钢在溶液中均处于稳定钝化状态,耐点蚀性能均略低于 304 不锈钢。段传成等^[18]研究了电位扫描速率对测试 304 不锈钢在 3.5% 的 NaCl 水溶液中腐蚀行为的影响,发现随着电位扫描速率的增大,304 不锈钢钝化膜的击穿电位降低,自腐蚀电流密度增大,自腐蚀电位负移。于明飞等^[19]采用动电位极化曲线和电化学阻抗谱研究了超级奥氏体不锈钢 904L 在高温高浓度硫酸中的腐蚀行为,发现随着温度的升高,904L 不锈钢在浓硫酸中耐蚀性逐渐降低,在高浓度的硫酸溶液中 904L 更容易发生自钝化。

本课题以不同牌号不锈钢为研究对象,通过激光重熔技术,研究激光功率和扫描速度对其微观组织的影响,并测试不同牌号不锈钢在 3.5% 的 NaCl 溶液中的电化学行为,为激光重熔强化不锈钢耐腐蚀性的工艺优

化和组织调控机理提供参考。

1 试验方法

1.1 试验材料及方法

基体材料分别为 304、316L、410 和 420J2 不锈钢,其尺寸均为 60 mm×40 mm×10 mm。将 4 种不锈钢材料表面逐级打磨至 2 500 目,用无水乙醇清洗干净,去除表面油污和杂质并自然风干,4 种不锈钢的化学成分见表 1。激光重熔试验参数见表 2,使用激光熔覆系统按照试验参数进行单道重熔试验,重熔过程中采用氩气作为保护气体,氩气流量为 15 L/min。

表 1 4 种不锈钢的化学成分

Tab.1 Chemical composition of stainless steels %									
不 锈钢	ω_B								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Fe
304	0.019	0.48	1.60	0.032	0.001	18.030	8.12	—	余量
316L	0.025	0.52	1.66	0.028	0.016	16.200	10.86	2.22	余量
410	0.045	0.45	0.50	0.020	0.001	13.000	—	—	余量
420J2	0.271	0.59	0.34	0.018	0.001	13.114	0.15	—	余量

表 2 激光重熔试验参数

Tab.2 Experimental parameters of laser remelting			
序号	激光功率/W	扫描速度/(mm·s ⁻¹)	线能量密度/(J·m ⁻¹)
A	1 400	10	1.4×10 ⁵
B	1 600	10	1.6×10 ⁵
C	1 800	10	1.8×10 ⁵
D	1 800	8	2.25×10 ⁵
E	1 800	6	3.0×10 ⁵
F	1 800	4	4.5×10 ⁵

用线切割方式切割成尺寸为 10 mm×10 mm×1 mm 的试样,将试样放入无水乙醇中利用超声波清洗,并用压缩空气吹干,然后用电烙铁熔化锡丝将铜线焊接在试样非工作面,用万用表检测导线与试样的导通情况,将焊接好的试样平整的放入模具中,用环氧树脂进行镶嵌,对镶嵌固化后的试样用水砂纸细水流逐级磨至 2 500 目,最后抛光至镜面。

1.2 分析测试方法

用线切割将试样切割成 10 mm×10 mm×10 mm 的小块,通过金相镶嵌机镶嵌之后,将表面用砂纸逐步打磨至 2 500 目,用金相抛光机抛光至镜面,配置王水后腐蚀 20 s,制备金相试样。用 MR5000 型金相显微镜观察重熔区的微观组织,用 TM3030-PLUS 型扫描电镜和 Model-550i 型透射电镜分析重熔区的元素分布。使用 CHI760E 电化学工作站进行试验,甘汞电极作为参比电极,铂片电极作为辅助电极,4 种不锈钢作为工作电极,配置质量分数为 3.5% 的 NaCl 腐蚀液,测试 4 种不锈钢的开路电位、动电位极化曲线和阻抗谱曲线。

2 试验结果与讨论

2.1 4 种不锈钢激光重熔后的微观组织

图 1~图 4 分别为 4 种不锈钢激光重熔后的组织形貌。可以发现,304 和 316L 不锈钢是奥氏体不锈钢,

经过激光重熔之后发生了显著变化。根据激光功率和扫描速度的不同,形成的熔池大小也不同,总体呈圆弧形,熔池随着激光能量密度的增大而增大,且热影响区越来越明显。由图 1a 可以看出,在激光重熔之后,重熔区与基体冶金结合良好,重熔区组织比较致密,主要是产生了细小的柱状晶和规则的等轴晶奥氏体,其形成是

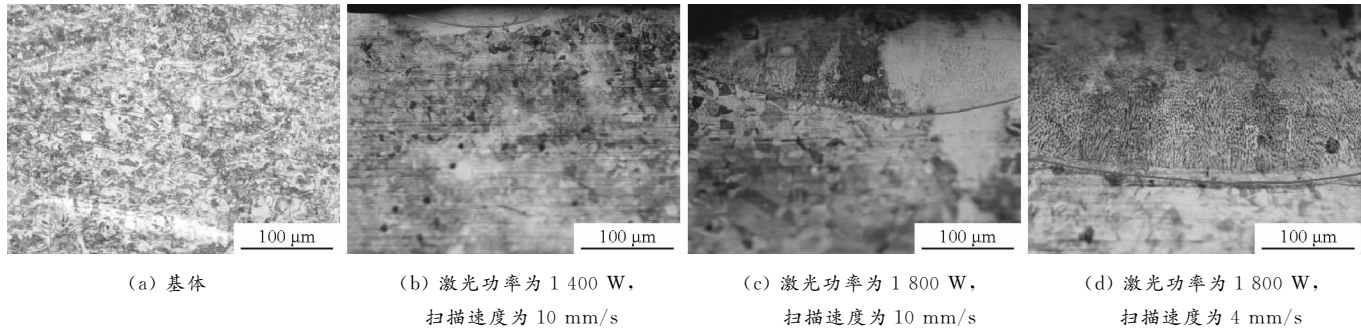


图 1 304 不锈钢基体与不同工艺参数下激光重熔后的金相组织

Fig.1 Metallographic structure of 304 matrix before and after laser remelting under various processes

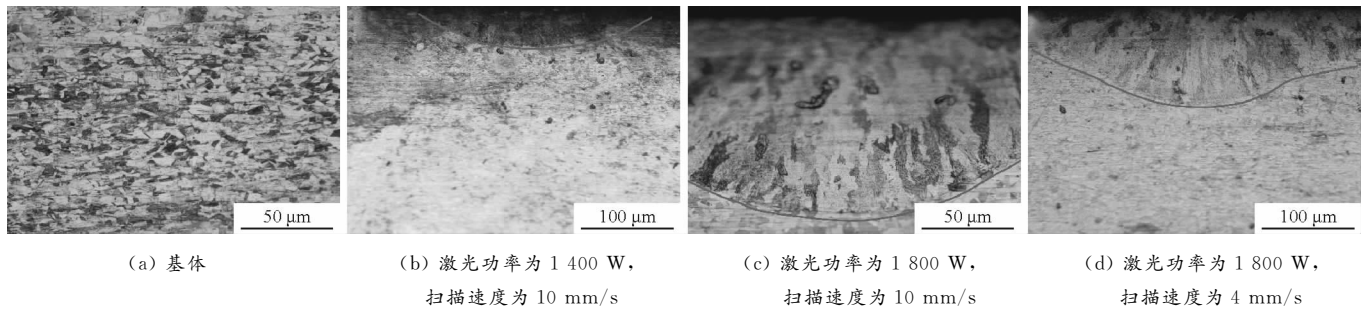


图 2 316L 不锈钢基体与不同工艺参数下激光重熔后的金相组织

Fig.2 Metallographic structure of 316L matrix before and after laser remelting under various processes

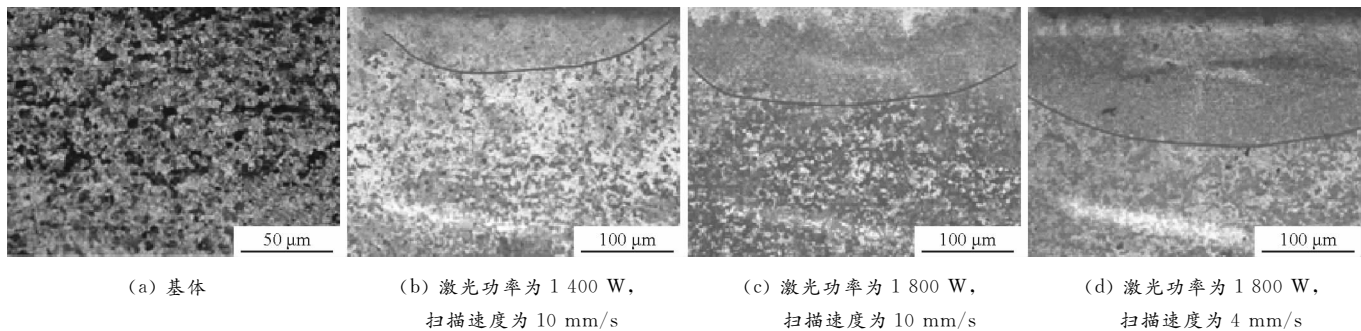


图 3 410 不锈钢基体与不同工艺参数下激光重熔后的金相组织

Fig.3 Metallographic structure of 410 matrix before and after laser remelting under various processes

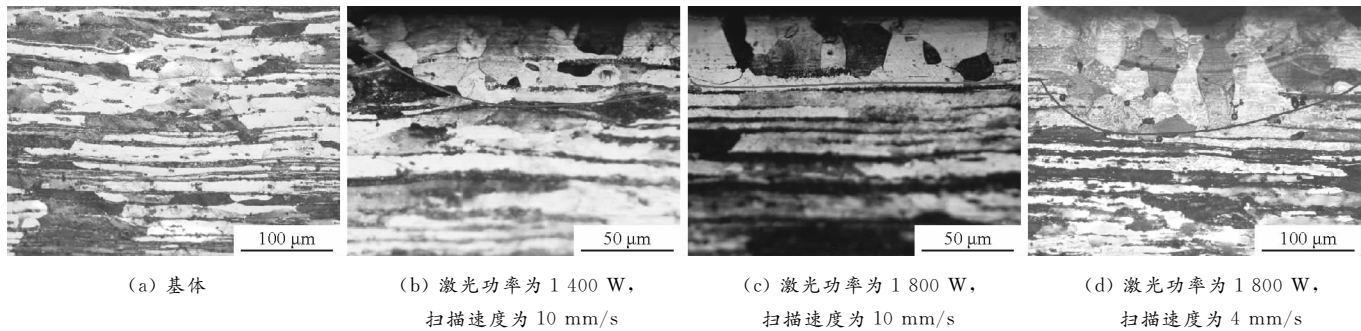


图 4 420J2 不锈钢基体与不同工艺参数下激光重熔后的金相组织

Fig.4 Metallographic structure of 420J2 matrix before and after laser remelting under various processes

由于熔池在凝固过程中温度梯度减缓导致形核变得困难,柱状晶的生长方向垂直于熔池和基体的分界线^[5]。从图 1b、图 1c 可以看出,当扫描速度一定时,随着激光功率增加,组织中存在明显的热影响区,且重熔区变大。从图 1c 和图 1d 看出,当激光功率不变时,随着扫描速度减小,热影响区会越来越明显,且由于温度升高,熔池烧蚀的更明显,随着激光功率增加和扫描速度减小,熔池的温度逐渐增加,使得温度向基体扩散,从而导致柱状晶逐渐长大。

从图 3 可知,不同激光工艺重熔后的 410 不锈钢的马氏体晶粒尺寸明显比基体的小,这说明激光重熔能够细化 410 不锈钢的表层晶粒组织^[3]。从图 3b 和图 3c 可以看出,当扫描速度一定时,随着激光功率增大,晶粒细化的效果更好,对比图 3c 和图 3d 可知,当激光功率一定时,随着扫描速度的降低,熔池变大,晶粒细化的范围变得更大,这是因为激光扫描速度的降低导致熔池温度快速升高,而后又快速冷却。

420J2 不锈钢基体的板条状马氏体粗大、细长,并且近似平行排列,内部产生位错堆积及位错缠结现象。

在激光重熔之后,熔池内的板条状马氏体变成了珠光体和铁素体,见图 4a。从图 4b 和图 4c 可以看出,在激光功率增加后,晶粒向两边生长,在扫描速度下降后,熔池内温度升高,熔池变大,晶粒接着向基体生长见图 4c 和图 4d,总体呈圆弧状^[13]。

随着激光功率的增大和扫描速度的减小,重熔区组织从临界树枝状到树枝晶转变,主要因为激光在深度方向的热作用被弱化,但在宽度方向的热作用被强化,导致重熔区上部热输入较大,温度梯度较高,结晶速度较慢,所以在重熔区中以树枝晶进行生长。随着激光功率增大,使得重熔区中的温度梯度增高,结晶速度降低,因此向胞状晶转变;随着扫描速度增大,使得重熔区中的温度梯度降低,结晶速度增高,导致向胞状晶转变^[20]。

图 5 为 316L 不锈钢在不同激光功率和扫描速度形成熔池的元素分布(EDS)结果。可以看出,当激光功率增加和扫描速度减小时,熔池中 Mn 和 Mo 含量逐渐降低,Ni 和 Fe 含量逐渐增加,由此可以推断,Fe 含量表现为由基体逐渐向熔池增大,结果显示了重熔层和基体之间达到冶金结合的程度^[21]。

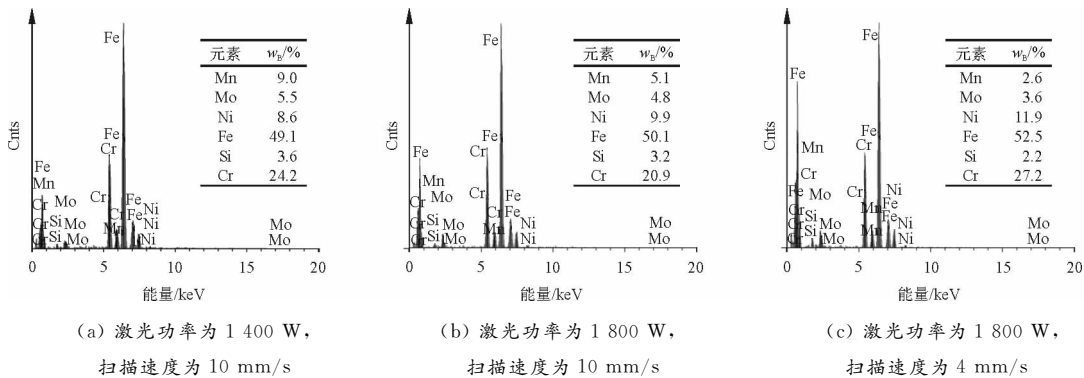


图 5 316L 不锈钢不同熔池的 EDS

Fig.5 EDS results of different molten pools of 316L stainless steel

2.2 不同工艺参数激光重熔后不锈钢的耐腐蚀性能

利用电化学工作站在三电极体系中测试 4 种不锈钢在 3.5% 的 NaCl 溶液中的开路电压、动电位极化曲线和阻抗谱曲线,测试结果见表 3。仅通过开路电位的高低并不能判断金属的耐腐蚀性好坏,还需要进一步测量金属的动电位极化曲线和阻抗谱曲线来综合判别。图 6 为 4 种不锈钢在 3.5% 的 NaCl 溶液中的极化曲线。可以看出,4 种不锈钢的极化曲线体现了不锈钢的自钝化过程,存在明显的钝化区,说明 4 种不锈钢有较好的抗腐蚀能力。可以得到 304 不锈钢的自腐蚀电位分别为-0.575、-0.617、-0.005 和-0.339 V;316L 不锈钢的自腐蚀电位分别为-0.543、-0.367、-0.394 和-0.449 V;410 不锈钢的自腐蚀电位分别为-0.641、-0.565、-0.552、-0.727 V。420J2 不锈钢的自腐蚀

电位分别为-0.586、-0.577、-0.603 和-0.580 V。

表 3 4 种不锈钢试样在 3.5% 的 NaCl 溶液中的开路电压

Tab.3 Open circuit voltage of stainless steel specimens in 3.5% NaCl solution

编号	试验	开路电位/V	编号	试验	开路电位/V
1	304-基体	-0.066	9	410-基体	-0.173
2	304-A	-0.081	10	410-A	-0.208
3	304-C	-0.116	11	410-C	-0.175
4	304-F	-0.081	12	410-F	-0.165
5	316L-基体	-0.124	13	420J2-基体	-0.008
6	316L-A	-0.137	14	420J2-A	-0.179
7	316L-C	-0.159	15	420J2-C	-0.069
8	316L-F	-0.164	16	420J2-F	-0.152

每种不锈钢都有 4 个自腐蚀电位值,基体和另外 3 种工艺参数下的自腐蚀电位,因为后面 3 种参数下的电位对比基体大小不一,选择较优的试验结果与基体进行比较,体现出激光重熔可以改善不锈钢表面的耐腐蚀性

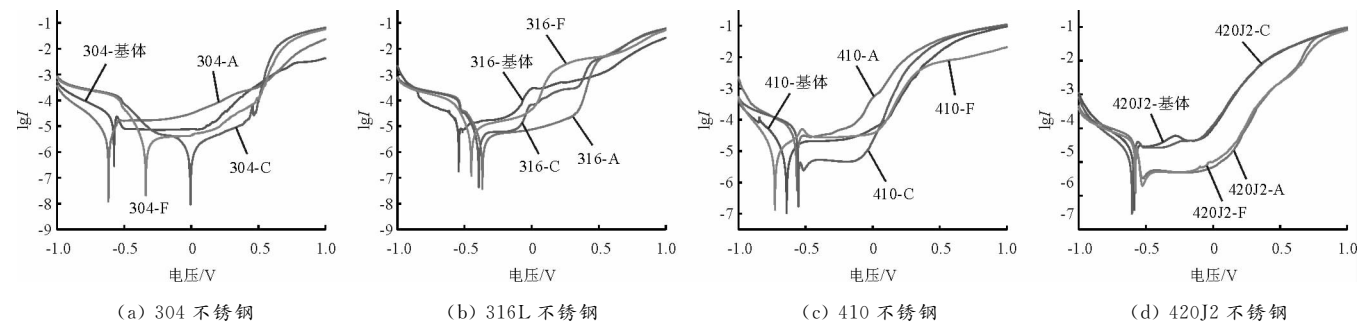


图 6 4 种不锈钢在 3.5% 的 NaCl 溶液中的极化曲线

Fig.6 Polarization curves of different stainless steel in 3.5% NaCl solution

能。

从试验结果可以看出,4 种不锈钢的极化曲线上都能看到明显的钝化区,在工作电极的表面形成一层耐腐蚀的钝化膜。进入过钝化区之后,随着电位的增加,金属表面的钝化膜被击穿,之后腐蚀加剧导致电流密度增大,经过激光重熔处理之后的不锈钢的自腐蚀电位增大,极化曲线均正向移动,证明了激光重熔可提高不锈钢的耐腐蚀性能^[11]。其中 304 和 420J2 不锈钢的自腐蚀电位增加幅度没有 316L 和 410 不锈钢的大,自腐蚀电位随着激光重熔的激光功率的增大而增大,随着激光重熔时扫描速度的减小而增大。

激光重熔区晶粒细化明显,特别是激光直接作用的重熔区上表面,组织为大量细小的等轴晶,有利于耐腐蚀性的改善,但重熔区由于存在极大的温度梯度,线能量密度过大时,晶界和相界处极易产生明显的成分偏析,在微区形成具有电势差的原电池组,大大加速腐蚀过程。

4 种不锈钢在中性 NaCl 溶液中发生吸氧腐蚀,在腐蚀过程中氧气溶解在水中,在阴极得到电子被还原成 OH⁻,工作电极在 NaCl 溶液发生吸氧腐蚀产生 Fe(OH)₃ 絮状腐蚀产物,在电解池中发生的电化学腐蚀反应方程式如下:

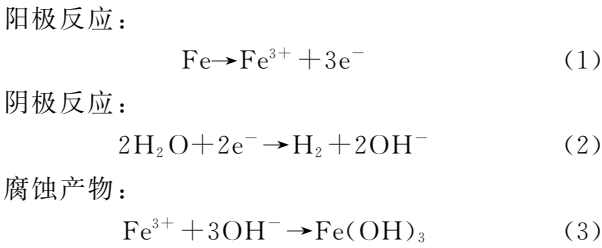


图 7 为 4 种不锈钢试样在 3.5% 的 NaCl 溶液中的阻抗谱曲线。阻抗谱曲线的半径越大,表示试样的耐腐蚀性越好^[22]。可以看出,304 不锈钢在激光重熔时激光功率为 1 800 W,扫描速度为 10 mm/s 的阻抗弧半径最大,耐腐蚀性最好;扫描速度为 4 mm/s 时的阻抗弧半径最小,耐腐蚀性最差,见图 7a;316L 不锈钢在激光功率为 1 400 W、扫描速度为 10 mm/s 时的阻抗弧半径最大,在激光功率为 1 800 W,扫描速度为 4 mm/s 时的阻抗弧半径最小,见图 7b;410 不锈钢在激光功率为 1 800 W,扫描速度为 10 mm/s 时的阻抗弧半径最大,在激光功率为 1 800 W,扫描速度为 4 mm/s 时的阻抗弧半径最小,见图 7c;420J2 不锈钢在激光功率为 1 400 W,扫描速度为 10 mm/s 时的阻抗弧半径最大,在激光功率为 1 800 W,扫描速度为 10 mm/s 时的阻抗弧半径最小,见图 7d,阻抗谱曲线得到的结果与动电位极化曲线的结果一致。

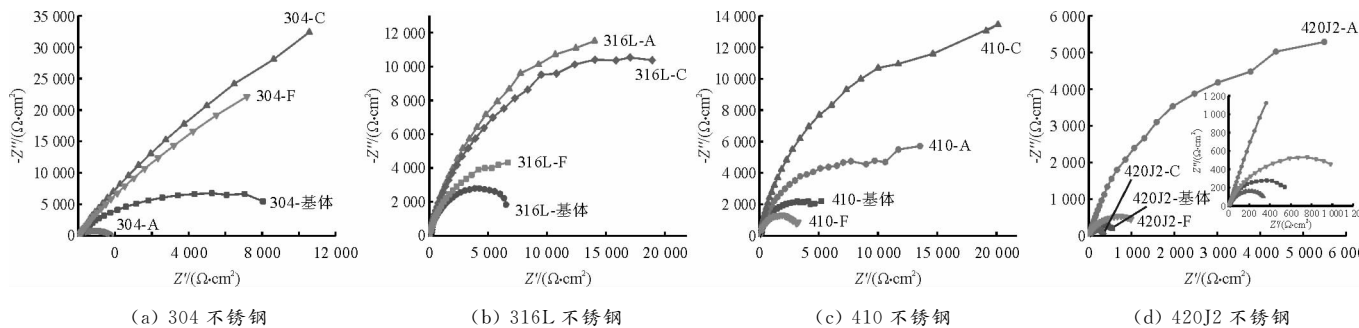


图 7 4 种不锈钢在 3.5% 的 NaCl 溶液中的阻抗谱曲线

Fig.7 Impedance spectrum curves of different stainless steel in 3.5% NaCl solution

304 和 410 不锈钢的耐腐蚀性都是在激光功率为 1 800 W,扫描速度为 10 mm/s 时最好,其原因是由于不锈钢的晶粒细化程度不一样。通过试验结果可知,在

3 种工艺参数下的自腐蚀电位只有在激光功率为 1 800 W,扫描速度为 10 mm/s 时最高,因此耐腐蚀性最好。引入线能量密度作为激光重熔的综合参数,是为了更好

地解释激光功率和扫描速度对于不锈钢在激光重熔后的耐腐蚀性能的变化^[23]。

只讨论这 3 种工艺参数来分析的原因在于,在激光重熔试验的 6 种工艺参数中,这 3 种工艺参数最具有代表性,之间的差别最大,能够反映参数的差值对于不锈钢表面的耐腐蚀性的变化。

从线能量密度的角度分析,3 种工艺条件下对应的线能量密度分别为 1.4×10^5 、 1.8×10^5 和 4.5×10^5 J/m,该参数中,当线能量密度较小时,熔池的温度不高,对于不锈钢表面的缺陷不能很好地消除,随着线能量密度增大,熔池的温度逐渐升高,可以有效地较少缺陷,当激光光斑离开之后,熔池温度会急剧下降,导致产生孔隙、气泡等缺陷,当线能量密度过大时,熔池的温度过高,导致产生过烧现象。

由于激光重熔的激光功率和扫描速度不同,导致不同牌号不锈钢在不同的温度作用下晶粒细化的程度不一样,当采用氩气作为保护气体时,氩气在高温下融入熔池,当激光扫描速度过快时,氩气在熔池金属液凝固过程中来不及排出,形成细小的气孔缺陷,当进行电化学试验时,容易形成原电池加速腐蚀,不利于提升其耐腐蚀性能,因此激光重熔参数不一样,其耐腐蚀性能也不一样。

3 结 论

(1)通过金相显微镜观察激光重熔后的微观组织,激光重熔可以细化晶粒,而且重熔区的大小随着激光功率的增加和扫描速度的减小而变大。

(2)通过电化学试验可知,304 和 410 不锈钢在激光功率为 1 800 W,扫描速度为 10 mm/s 时的自腐蚀电位最大,分别为 -0.005 V 和 -0.552 V,是基体的 0.008 倍和 0.86 倍,耐腐蚀性能最好;316L 和 420J2 不锈钢在激光功率为 1 400 W,扫描速度为 10 mm/s 时的自腐蚀电位最大,分别为 -0.367 V 和 -0.577 V,是基体的 0.67 倍和 0.98 倍,耐腐蚀性能最好,结果表明,激光重熔技术可以改善不锈钢表面的耐腐蚀性能。

参 考 文 献

- [1] 柴晓徽,孙志平,张鑫.激光重熔调控合金组织和性能研究进展[J].特种铸造及有色合金,2019,39(6):608-612.
- [2] 杜辉辉,赵运才.激光重熔喷涂涂层研究进展[J].激光与红外,2018,48(11):1 330-1 336.
- [3] 胡科,卢书媛,陈希章.激光重熔低温相变合金喷焊层的组织与性能[J].热加工工艺,2019,48(2):127-131.
- [4] 陈劲松,乔斌,杨建明,等.激光重熔对纳米 $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$ 复合镀层耐腐蚀性能的影响[J].热加工工艺,2011,40(20):119-121.
- [5] 叶四友,刘建永,杨伟.激光熔覆 316L 不锈钢涂层组织和性能的研究[J].表面技术,2018,47(3):48-53.
- [6] 陈泉.激光重熔低压等离子喷涂 MoB/CoCr 梯度涂层组织与性能研究[J].表面技术,2012,41(2):23-25,46.
- [7] KOCLĘGA D, RADZISZEWSKA A, DYMEK S, et al. Improvement of corrosion resistance of 13CrMo4-5 steel by ni-based laser cladding coatings[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(6): 3 702-3 713.
- [8] LALEH M, HUGHES A E, XU W, et al. Unexpected erosion corrosion behaviour of 316L stainless steel produced by selective laser melting[J]. Corrosion Science, 2019, 155: 67-74.
- [9] SINGH A K, KUMAR B S, JHA P, et al. Surface micro-structuring of type 304 stainless steel by femtosecond pulsed laser: effect on surface wettability and corrosion resistance[J]. Applied Physics, 2018, A124(12): 1-9.
- [10] TIONGSON J K A, AGANDA K C C, BRUZON D A V, et al. Exploring the corrosion inhibition capability of FAP-based ionic liquids on stainless steel[J]. Royal Society Open Science, 2020, 7(7): 200 580.
- [11] 王继月,包晔峰,蒋永锋,等.奥氏体不锈钢堆焊层激光表面重熔组织及耐腐蚀性能[J].电焊机,2016,46(5):31-35,113.
- [12] 刘月洋,高士友,周英才,等.不同功率下激光重熔对 Mg-Zn-Y-Zr 合金性能的影响研究[J].光学学报,2020,40(6):110-120.
- [13] 崔妍,胡绳苏.激光表面重熔对 AZ31B 镁合金耐腐蚀性能的影响[J].焊管,2018,41(3):29-33.
- [14] 邓德伟,马云波,马玉山,等.重熔及退火对 316L 不锈钢激光熔覆层残余应力的影响[J].金属热处理,2020,45(8):113-118.
- [15] 安朋亮,刘峰,梁平,等.Cr23Mo1N 奥氏体不锈钢的耐点蚀性能研究[J].当代化工,2017,46(3):409-412.
- [16] 吴恒,肖贵学,李超,等.不同温度淡化海水中 304 不锈钢的耐蚀性[J].材料保护,2015,48(6):45-47,54.
- [17] 张程,颜海涛,黄蓉芳,等.不锈钢在酸性食物环境中的耐腐蚀性能研究[J].中国科技论文,2017,12(10):1 167-1 170.
- [18] 段传成,程从前,赵杰.电位扫描速率对测试 304 不锈钢腐蚀行为的影响[J].腐蚀与防护,2013,34(3):197-199.
- [19] 于明飞,向嵩,马国强,等.超级奥氏体不锈钢 904L 在高温高浓度硫酸中腐蚀行为[J].材料热处理学报,2018,39(4):85-92.
- [20] 闻龙,张若研,石岩.304 不锈钢激光焊接接头耐腐蚀性能研究[J].应用激光,2016,36(2):165-170.
- [21] 李涛,丁文文,吴何畏.车用 316L 不锈钢上激光熔覆 Co-9Al-12W 合金组织及腐蚀性能分析[J].真空科学与技术学报,2020,40(8):719-723.
- [22] 尹叶芳.不同腐蚀环境下激光冲击 2Cr13 不锈钢抗腐蚀性能的检测与分析[D].江苏镇江:江苏大学,2019.
- [23] 潘露,刘麒慧,王亮,等.线能量密度对选区激光熔化制备 316L 不锈钢缺陷的影响[J].应用激光,2019,39(1):17-23.

(编辑:刘卫)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com