

引用格式:温志刚,田雷,沈楠楠,等. 交变磁场对激光-电弧复合焊316L接头组织及腐蚀性能的影响[J]. 热加工工艺, 2025, 54(7): 157-162.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20233080
<http://www.rjggy.net> rjggy@vip.163.com

交变磁场对激光-电弧复合焊316L接头组织及腐蚀性能的影响

温志刚¹, 田雷¹, 沈楠楠¹, 宋付成², 檀财旺²

(1. 海洋石油工程(青岛)有限公司, 山东 青岛 266500; 2. 哈尔滨工业大学(威海) 山东省特种焊接技术重点实验室, 山东 威海 264209)

摘要:以6 mm厚度316L不锈钢板为对象,开展了磁场辅助激光-电弧复合焊接研究。通过改变磁场强度,对比分析了焊后成形、截面形貌、焊缝组织和焊缝的腐蚀性能。结果表明,交变磁场的引入增大了激光-电弧复合焊的熔透能力,熔透状态由局部未熔透转变为熔透良好。此外,焊缝组织明显均匀化,一方面焊缝电弧区和激光区内奥氏体的Cr元素差异降低,另一方面电弧区和激光区的晶粒尺寸差显著降低。交变磁场提高了接头焊缝的抗腐蚀性能,提高了自腐蚀电位,降低了自腐蚀电流密度,焊缝腐蚀速率减慢,点蚀坑密度显著减小。研究表明,对于激光-电弧复合焊,磁场的引入有利于提高熔透能力和焊缝均匀化,改善焊缝的成形和腐蚀性能。

关键词:316L 不锈钢;激光-电弧复合焊接;磁场辅助;腐蚀性能

中图分类号:TG456.7

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2025)07-0157-06

Effect of Alternating Magnetic Field on Microstructure and Corrosion Behavior of Laser-Arc Hybrid Welded 316L Joints

WEN Zhigang¹, TIAN Lei¹, SHEN Nannan¹, SONG Fucheng², TAN Caiwang²

(1. Offshore Oil Engineering (Qingdao) Co., Ltd., Qingdao 266500, China; 2. Shandong Provincial Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: With a 6 mm thick 316L stainless steel plate as the object, the magnetic field assisted laser-arc composite welding study was carried out. By changing the magnetic field intensity, the weld appearance, cross-sectional morphology, weld microstructure and weld corrosion behavior were analyzed. The results show that the alternating magnetic field increase the penetration ability of laser-arc hybrid welding, and the penetration state changes from local incomplete penetration to good penetration. In addition, the microstructure of the weld seam is significantly homogenized. On the one hand, the difference in Cr element between the austenite in the arc zone and the laser zone is obviously reduced, on the other hand, the grain size difference between the arc zone and laser zone is obviously reduced. The alternating magnetic field improves the corrosion resistance of the joint weld. It increases the self-corrosion potential and reduces the current density, thus significantly reduces the density of pitting pits in the weld. The study indicates that for laser-arc hybrid welding, the introduction of magnetic field is beneficial for improving the penetration ability and weld uniformity, which improves the formability and corrosion performance of the weld.

Key words: 316L stainless steel; laser-arc composite welding; magnetic field assistance; corrosion performance

激光-电弧复合焊接结合了传统电弧焊的高间隙适应性和激光焊接的熔透能力,已成为一种广泛应用的焊接技术,在中厚板焊接领域表现出显著的优势^[1-2]。在海洋石油工程领域的厚板及管道焊接中,

往往存在装配条件差、熔透困难等问题,因而在该领域激光-电弧复合焊技术具有广阔的应用前景。

国内外学者在激光-电弧复合焊接研究过程中发现,由于两种热源的熔透能力不同,激光-电弧复合焊的焊缝截面形状可以分为两个区域,即电弧区和激光区,在这两个区域中存在明显的组织不均匀性^[3-4]。尤其是在中厚板中,这种焊缝组织的严重不均匀性可能导致焊缝的性能不均匀。Zhang等^[5]采用

收稿日期:2023-12-27 修回日期:2024-02-04

基金项目:国家自然科学基金项目(52475332)

作者简介:温志刚,主要从事海洋工程焊接技术工作;

E-mail:wenzhg@cooec.com.cn

激光-电弧复合焊接技术焊接 30 mm 厚的钢,发现焊缝底部组织以马氏体为主,焊缝上部组织以奥氏体为主。另外,在激光-电弧复合焊接头中,合金元素的分布不均匀也广泛存在^[6]。Liu 等^[7]在激光-电弧复合焊 600 MPa 级高强度钢时发现,焊缝上部的电弧区存在明显的 Mo、Mn 元素富集现象,不利于中厚板接头的性能。

近年来,磁场辅助技术在焊接中表现出搅拌熔池,促进熔池流动等有利效果^[8-9]。因此,本研究针对 316L 不锈钢中厚板激光-电弧复合焊,对比研究了不同磁场强度下的焊缝组织及元素分布,讨论了焊缝腐蚀性能,为中厚板激光-电弧复合焊接的组织均匀化和腐蚀性能优化提供了可行方法和工艺参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本研究选用尺寸为 150 mm×75 mm×6 mm 的 316L 不锈钢板材作为母材进行焊接试验。母材为奥氏体不锈钢,具有良好的抗腐蚀性。试验所用填充焊丝为直径 1.2 mm 的 ER316 焊丝。母材和焊材的化学成分如表 1 所示。焊接试验前,采用丙酮对待焊母材进行清洗后烘干,以去除钢板表面油污及水分。

表 1 316L 不锈钢和 ER316L 焊丝的化学成分
(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of 316L stainless steel and ER316L filler wire (wt%)

元素	C	Mn	P	Si	Cr	Ni	Mo	Fe
316L	≤0.03	≤2.0	≤0.045	≤1.0	16~18	10~14	2~3	余量
ER316L	0.02	1.85	0.009	0.38	18.73	12.5	2.21	余量

1.2 试验方法及设备

本试验激光部分采用 IPG YLS-6000 光纤激光器,其输出波长为 1070 nm,光束质量为 12 mm·mrad。MIG 热源部分采用林肯焊机 R350,最大输出电流为 350 A。焊接时保护气体采用纯度为 99.99% 的氩气,保护气流量为 20 L/min。焊枪角度为 45°,激光垂直入射。交变磁场辅助激光-电弧复合焊接 316L 不锈钢焊接时,励磁线圈放于焊缝下方,焊接时激光头、弧焊枪及励磁线圈保持固定,待焊母材以焊接速度移动。交变磁场通过磁场控制器产生,磁场控制器产生交流电使电流产生的磁场方向周期改变,试验最终采用的磁场强度为 0、30、90 mT。焊接试验装置示意图如图 1 所示。通过前期预试验探索,保持部分焊接工艺参数不变,如表 2 所示。

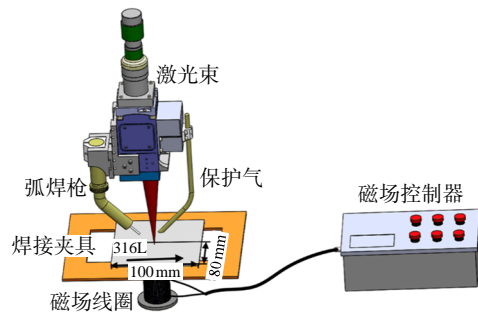


图 1 焊接试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of welding experiment devices

表 2 焊接工艺参数

Tab.2 Welding process parameters

激光功率 /W	焊接电流 /A	焊接速度 / $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	光丝间距 /mm	离焦量 /mm
3500	180	1.0	3.0	0

焊接完成后,分别切取金相 EBSD 试样及腐蚀试样,试样尺寸分别为 20 mm×6 mm×6 mm 和 10 mm×6 mm×3 mm。将金相试样用砂纸打磨并机械抛光至试样表面光亮后,利用王水腐蚀 3 min。采用 OLYMPUS DSX510 光学显微镜进行截面形貌观察;利用 Zeiss MERLIN Compact 电镜进行显微组织和元素组成分析。

对 EBSD 试样进行打磨和机械抛光后,采用电解抛光进一步处理,电解抛光所用电解液为 20% 高氯酸+80% 乙醇溶液,电解时间为 60 s,恒流 1.5 A。完成后采用电镜对其进行 EBSD 测试,分析其组织及相组成等。

对焊缝进行浸泡腐蚀和电化学腐蚀以评价其耐腐蚀性能。在室温下 6% FeCl₃ 水溶液中进行浸泡腐蚀试验,分别将试样浸泡 1、2、3、4 周。对试样进行酒精清洗并干燥后称重,计算并记录试样的失重腐蚀速率。

采用 Zennium 工作站测试电化学腐蚀性能。电化学腐蚀系统为标准的三电极体系,其中焊缝待测试表面为工作电极,饱和甘汞电极为参比电极,铂电极为辅助电极,如图 2 所示。在 6% FeCl₃ 溶液中分别进行焊缝交流阻抗谱及极化曲线测试。阻抗谱测试采用 10 mV 的正弦交流信号,扫描频率为 10 mHz~100 kHz。极化曲线测试扫描速率为 1 mV/s,扫描范围为 -300~+1000 mV。

2 试验结果与分析

2.1 焊缝宏观成形

图 3 为不同交变磁场强度下激光-MIG 复合焊

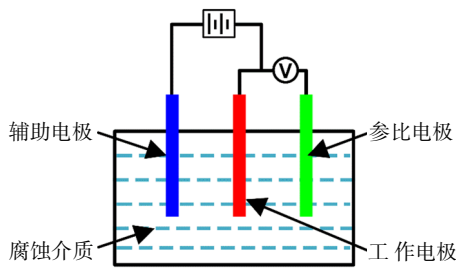


图2 三电极系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of the three-electrode system

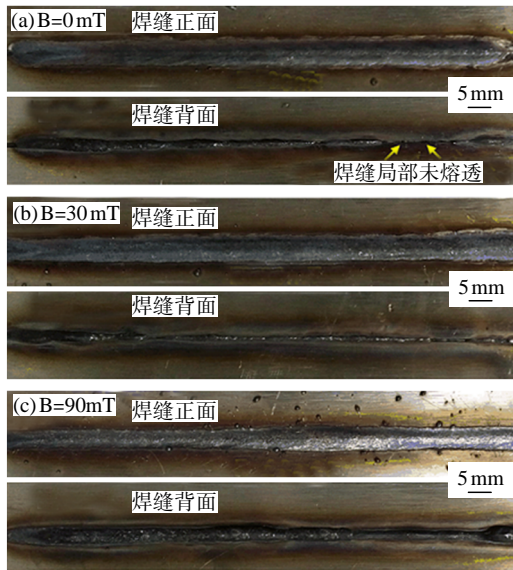


图3 不同磁场强度下复合焊接头的表面形貌
Fig.3 Surface appearance of the hybrid welded joints under different magnetic field intensities

焊缝的表面形貌。在无磁场作用时,存在局部焊缝未熔透现象;在施加交变磁场后,焊缝完全焊透,焊缝局部出现轻微的下塌,当磁场强度增大到 90mT 时,背部塌陷加重。这表明磁场在焊接过程中对熔池产生了向下的力,增强了熔池向下的流动,提高了激光-电弧复合焊的熔透能力^[10]。

图4为不同磁场强度下激光-电弧复合焊焊缝的截面形貌。由图4可知,在未施加磁场时,焊缝截面呈典型“高脚杯”状,焊缝上部为电弧区,下部为激光区。对比发现,未施加磁场时,焊缝激光区较窄,且焊缝底部熔透不足。而添加磁场之后,激光区宽度明

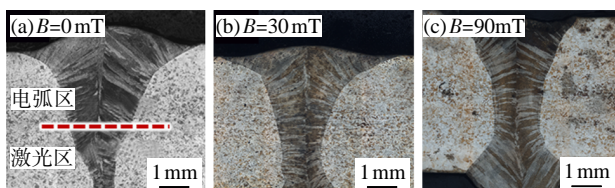


图4 不同磁场强度下复合焊焊缝的截面形貌
Fig.4 Cross-section morphologies of the hybrid weld seams under different magnetic field intensities

显增大,熔透能力增强乃至焊缝出现下塌,磁场引入后上部电弧区宽度减小,0、30、90mT 磁场强度下上部电弧区宽度分别为 5.73、5.31、4.14 mm,焊缝中部和下部激光区宽度均明显增大,激光区宽度由 0mT 的 0.81mm 增大至 2.28、3.32mm。这印证了前文提到的引入磁场促进了焊接热源热量向下的传递,并对熔池产生了向下的力,增强了熔池向下的流动,提高了激光-电弧复合焊的熔透能力。

2.2 焊缝微观组织

图5为典型的激光-电弧复合焊缝微观组织。可以发现,电弧区和激光区均由奥氏体(A)和骨架状铁素体(δ -F)组成。一般地,奥氏体不锈钢焊接表现有四种凝固模式^[11],即 F、FA、AF、A 这 4 种模式。由试验所用的 316L 成分可知,本文中的 316L 凝固为 FA 凝固模式。熔池凝固时,首先析出 δ -F,凝固结束前,部分 δ -F 发生包晶-共晶反应而转变成 A,形成了 δ -F+A 的组织。

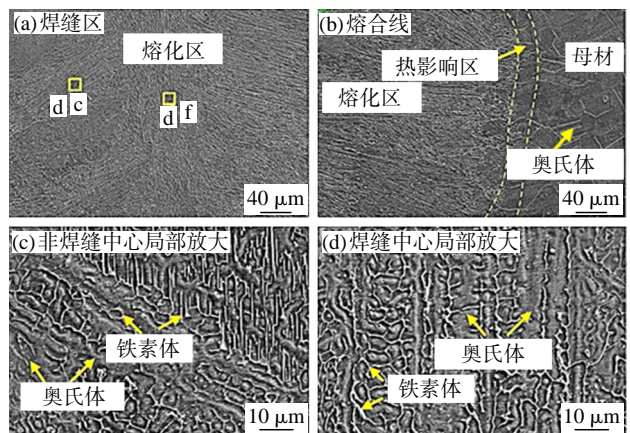


图5 典型的复合焊缝微观组织

Fig.5 Typical microstructure of the composite welded seam

为分析磁场作用下电弧区和激光区的组织变化,考虑到奥氏体为主要相,测量了电弧区和激光区内奥氏体的 Cr 含量,结果如图6所示。奥氏体内的 Cr 元素在无磁场时激光区和电弧区的含量差异较大。在引入磁场后,Cr 元素在激光区和电弧区的差异明显降低,表明磁场引入一定程度上促进了熔池的对流和溶质的均匀分布。

进一步采用 EBSD 对焊缝内激光区和电弧区的晶粒分布进行分析,结果如图7所示(彩图见电子版)。晶粒尺寸统计结果如图8所示。可以发现,无磁场施加时,焊缝电弧区的平均晶粒尺寸较大,达到 320 μ m,而激光区平局晶粒尺寸较小,仅为 173 μ m。引入 90mT 磁场后,焊缝的电弧区晶粒尺寸减小至

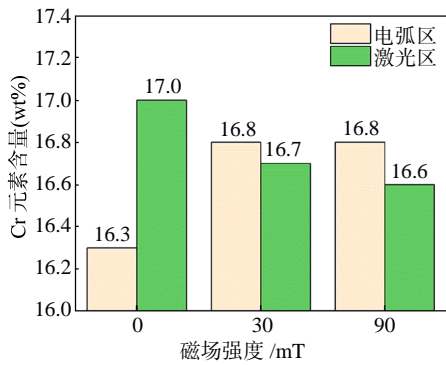


图6 不同磁场强度下焊缝奥氏体的Cr元素含量
Fig.6 Cr element content of austenite in welds under different magnetic field intensities

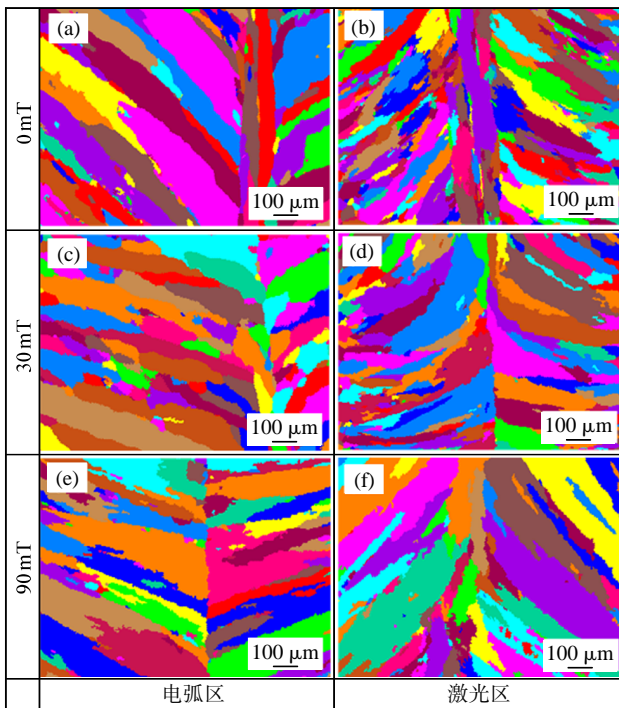


图7 不同磁场强度下焊缝中心晶粒的EBSD图
Fig.7 EBSD images of grains at the center of weld seams under different magnetic field intensities

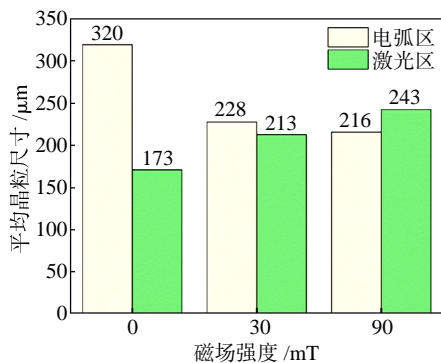


图8 不同磁场强度下的焊缝中心晶粒尺寸统计
Fig.8 Statistics of grain size at the center of weld seams under different magnetic field intensities

216 μm,而激光区晶粒尺寸增大至 243 μm,激光区和电弧区的晶粒尺寸差异显著减小。这是因为磁场增强了熔池的对流,使热量和溶质在熔池内分布更均匀,从而减小了冷却条件和成分差异,导致晶粒生长差异减小。

2.3 焊缝腐蚀性能

首先对焊缝进行浸泡腐蚀测试,通过计算失重腐蚀速率评价材料的耐腐蚀性能。腐蚀失重速率计算公式如下:

$$V_{\text{corr}} = \frac{m_0 - m_1}{S \times t} \quad (1)$$

式中: V_{corr} 为试样的失重腐蚀速率; m_0 、 m_1 分别为腐蚀前、后试样的质量; S 为试样表面积; t 为腐蚀时间。腐蚀失重速率结果如图9所示。室温下,无磁场时焊缝的腐蚀失重速率最快,表明其耐腐蚀性最差。

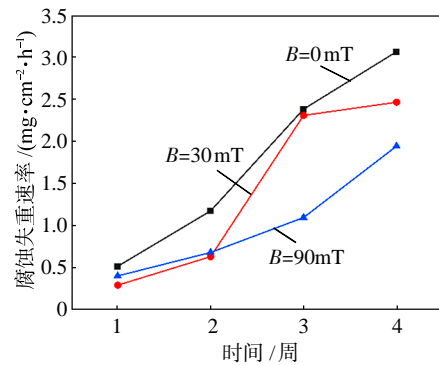


图9 不同磁场强度下的焊缝室温腐蚀失重速率
Fig.9 Corrosion weight loss rate of welds at room temperature under different magnetic field intensities

进一步对焊缝的电化学腐蚀性能进行评价。图10为焊缝的电化学性能曲线。在焊缝阻抗谱中,低频区表现出感抗弧特征,是由于酸性环境中焊缝表面发生局部点蚀,此外焊缝工件表面存在 Fe^{3+} 的吸附和侵蚀现象^[12]。对比发现,无磁场时焊缝的容抗弧半径最小,而引入磁场后,容抗弧半径明显增大,表明磁场作用下的焊缝整体耐腐蚀性增强。

从图10(b)可以看出,焊缝无稳定钝化区,这是由于在高浓度的 Cl^- 和腐蚀性较强的 Fe^{3+} 作用下不易在电极表面形成钝化膜。对比发现,在同一个阳极极化电位下,磁场强度为0mT和30mT的焊缝出现了极窄的钝化区,而磁场强度为90mT的焊缝未出现钝化区。这说明阳极的溶解反应速度很快,而这种结果与实际腐蚀情况相吻合。

表3为不同磁场强度下焊缝的电化学腐蚀特征

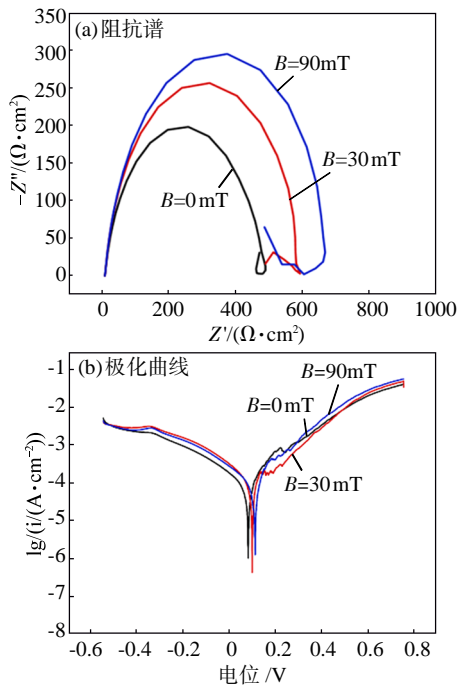


图 10 不同磁场强度下焊缝的电化学性能曲线
Fig.10 Electrochemical performance curves of welds under different magnetic field intensities

表 3 不同磁场强度下焊缝的电化学腐蚀特征参量
Tab.3 Electrochemical corrosion characteristic parameters of welds under different magnetic field intensities

特征参量	0 mT	30 mT	90 mT
$\lg(I_{\text{corr}}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}))$	-3.8636	-3.9909	-3.9040
E_{corr}/V	0.0832	0.1002	0.1134

参量。一般地,耐腐蚀性能强的工件存在自腐蚀电位较高的热力学特征和平均腐蚀电流小的动力学特征。对比发现,无交变磁场时,焊缝点蚀击穿电位较低,腐蚀电流密度较大;而交变磁场的引入后,平均腐蚀电流密度减小,自腐蚀电位正移,焊缝耐腐蚀性提高。

图 11 为不同交变磁场强度下焊缝的电化学腐蚀形貌。可以发现,在无辅助磁场时,焊缝表面的点蚀坑密度最大,点蚀严重。而当磁场强度为 30mT 和 90mT 时,点蚀坑密度显著降低,尤其是 90mT 磁场作用下的焊缝内点蚀发生较少,点蚀坑的尺寸也更小,表现出最好的耐腐蚀性。

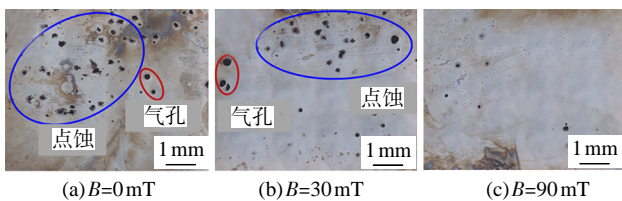


图 11 不同磁场强度下焊缝的电化学腐蚀形貌
Fig.11 Electrochemical corrosion morphology of welds under different magnetic field intensities

图 12 为焊缝电化学腐蚀时点蚀孔的发展过程。由于局部耐腐蚀性差异,首先发生了焊缝局部点蚀(图12(b)、(c))。点蚀孔内表面处于活性溶解状态,而孔外的耐腐蚀性相对较好,则构成了大阴极小阳极的局部腐蚀电池,如图 13 所示。由于孔内发生腐蚀反应,生成 H 离子导致局部 pH 值降低,腐蚀生成产物铁锈在点蚀孔开口处堆积,如图 12(d)~(f)所示,使得溶解的氧得不到及时补充而被耗尽,孔内金属内表面只发生阳极腐蚀溶解,构成浓差腐蚀电池。为了维持孔内电中性,在静电场作用下,孔外活性阴离子向内迁移,使孔内溶液 pH 值降低,阴离子增加,进一步加快速蚀孔内部腐蚀,形成如图 12(d)~(f)所示的局部小点蚀孔迅速发展为中心最大、周边密集小孔的局部严重点蚀形貌。

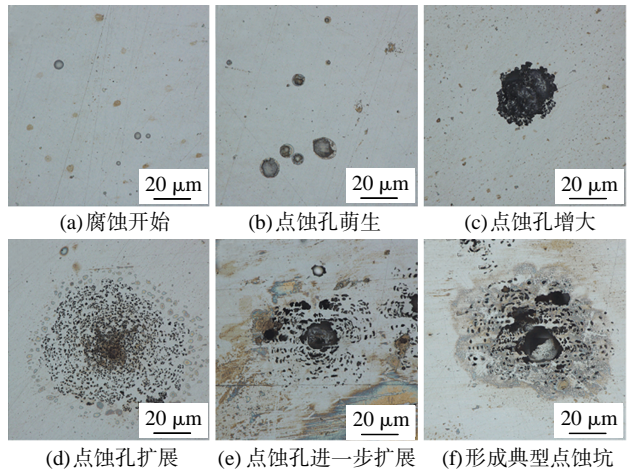


图 12 焊缝点蚀孔发展过程

Fig.12 Development process of weld pits

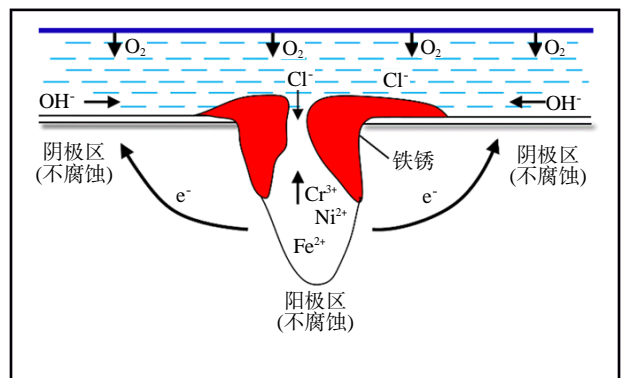


图 13 焊缝钝化金属点蚀的闭塞电池示意图

Fig.13 Schematic diagram of a closed cell with passivated metal pitting on the weld seam

通过以上分析发现,交变磁场引入后,一定程度上使得焊缝晶粒细化,且使元素分布变得更加均匀,有利于提高不锈钢耐腐蚀性^[13-14]。另外,晶粒尺寸的统一化也会降低不同区域的耐腐蚀性差异,避免形

成由于晶粒尺寸差异导致的局部腐蚀电池；合金元素 Cr、Ni 的均匀化也可以改善局部耐腐蚀性差异而提高金属的抗点蚀能力。

3 结论

(1) 在未施加磁场时,激光区焊缝较窄,且焊缝底部熔透不足,局部未熔透。施加磁场后,激光区宽度明显增大,熔透能力增强乃至焊缝下塌。磁场促进了热量向下传递,并对熔池产生了向下作用力,增强了熔池对流,提高了激光-电弧复合焊的熔透能力。

(2) 焊缝组织为铁素体+奥氏体。奥氏体内的 Cr 元素含量在无磁场时激光区和电弧区的差异较大。在引入磁场后,Cr 元素在激光区和电弧区的差异明显降低,表明磁场引入一定程度上促进了熔池的对流和溶质的均匀分布。

(3) 无磁场加入时,焊缝电弧区的平均晶粒尺寸较大,而激光区平均晶粒尺寸较小,激光区和电弧区晶粒尺寸差异较大。引入 90mT 磁场后,焊缝电弧区的晶粒尺寸减小至 216 μm ,而激光区晶粒尺寸增大至 243 μm ,导致晶粒尺寸差异减小。这是因为磁场增强了熔池的对流,从而减小了冷却条件和成分差异,导致晶粒生长差异减小。

(4) 无磁场辅助时,焊缝的腐蚀失重速率明显高于 30mT 和 90mT 磁场辅助的焊缝,电化学阻抗谱容抗弧半径最小,耐腐蚀性最差。极化曲线结果表明,无磁场时,焊缝点蚀击穿电位较低,腐蚀电流密度较高,而磁场的加入使焊缝的平均腐蚀电流密度减小,提高了焊缝的耐腐蚀性。

参考文献:

[1] Faraji A H, Goodarzi M, Seyedein S H, et al. Effects of welding parameters on weld pool characteristics and shape in

hybrid laser-TIG welding of AA6082 aluminum alloy: numerical and experimental studies [J]. *Welding in the World*, 2016, 60: 137-151.

[2] 王凯,朱加雷,焦向东. 激光焊接技术在船舶制造中的发展及应用现状[J]. *电焊机*, 2017, 47(2):58-64.

[3] Gao M, Zeng X, Yan J, et al. Microstructure characteristics of laser-MIG hybrid welded mild steel [J]. *Appl Surf Sci.*, 2008, 254(18):5715-5721.

[4] 刘福运. 交变磁场辅助激光电弧复合焊接物理机制及组织性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.

[5] Zhang X, Mi G, Wang C. Microstructure and performance of hybrid laser-arc welded high-strength low alloy steel and austenitic stainless steel dissimilar joint [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 122: 105878.

[6] 赵琳,塚本进,荒金吾郎,等. 激光-电弧复合焊焊缝合金元素分布的研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(4):210-217.

[7] Liu Z J, Kutsuna M, Xu G J. Microstructure and mechanical properties of CO₂ laser- MAG hybrid weld of high strength steel [J]. *Quarterly Journal of the Japan Welding Society*, 2006, 24 (4):344-349.

[8] 刘政军,李乐成,宗琳,等. 磁场作用下镍基等离子弧堆焊层的组织及耐磨性能[J]. *焊接学报*, 2012, 33(2):53-56.

[9] 柏兴旺,张海鸥,王桂兰. 外加磁场下 GMAW 熔池电磁力的有限元计算[J]. *焊接学报*, 2016, 37(1):46-50

[10] 华爱兵,陈树君,殷树言. 外加纵向磁场对 MAG 焊焊缝形成的影响机理[J]. *北京工业大学学报*, 2010, 36(7):876-881.

[11] Suutala N, Takalo T, Moisio T. The relationship between solidification and microstructure in austenitic and austenitic-ferritic stainless steel welds [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1979, 10(4):512-514.

[12] Chen R, Jiang P, Shao X, et al. Effect of magnetic field applied during laser-arc hybrid welding in improving the pitting resistance of the welded zone in austenitic stainless steel [J]. *Corrosion Science*, 2017, 126:385-391.

[13] 王晓梅. 超细晶界对金属腐蚀性能的影响[J]. *腐蚀与防护*, 2015, 36(8):695-705.

[14] 田文明,巢昺轩,李智勇,等. 晶粒尺寸影响金属钝化行为的研究进展[J]. *失效分析与预防*, 2018, 13(2):130-136. 

欢迎点击本刊网页
<http://www.rjggy.com>
<http://www.rjggy.net>