

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.04.18

Q690钢激光-MIG复合焊焊缝耐腐蚀性能研究

周倩雯, 严春妍, 聂榕圻, 陈锦伊, 田展鹏, 张可召

河海大学 机电工程学院, 江苏 常州 213022

摘要: 采用焊接效率较高的激光电弧复合焊对Q690钢中厚板(16 mm)进行焊接试验, 分析不同激光功率下焊接接头的显微组织和晶粒尺寸的变化, 及其开路电位、交流阻抗谱、极化曲线和腐蚀形貌, 探讨激光功率对焊缝电化学腐蚀行为的影响规律。结果表明, 激光-MIG复合焊焊缝的显微组织由大量针状铁素体和少量侧板条铁素体、粒状贝氏体组成, 其中电弧区的针状铁素体、侧板条铁素体含量多于激光区, 电弧区的晶粒尺寸比激光区略大; 粗晶热影响区显微组织主要由板条马氏体组成。随着激光功率的增加, 焊缝中粒状贝氏体含量减少, 针状铁素体和侧板条铁素体含量增加。当激光功率从1.5 kW增至2.5 kW时, 焊缝的开路电位上升, 容抗弧半径增加, 极化电阻变大, 极化曲线有右移倾向, 自腐蚀电流密度下降, 耐腐蚀性能提高。但当激光功率增至3.0 kW时, 由于组织过于粗大, 耐腐蚀性能反而下降。激光功率为2.5 kW时, 复合焊焊缝的耐腐蚀性能最佳。

关键词: Q690钢; 激光电弧复合焊; 耐腐蚀性能; 显微组织; 激光功率

中图分类号: TG457.11 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)04-0123-06

Research on Corrosion Resistance of Hybrid Laser-MIG Weld Metal of Q690 Steel

ZHOU Qianwen, YAN Chunyan, NIE Rongqi, CHEN Jinyi, TIAN Zhanpeng, ZHANG Kezhao

College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China

Abstract: The hybrid laser arc welding with high efficiency were conducted on Q690 medium thick plate. The microstructure transformation and grain size change of the welded joint under different laser powers were analyzed. The open circuit potential, polarization curve, and EIS of the weld metal under different laser powers were tested, and the effect of laser power on the electrochemical corrosion behavior of the hybrid weld metal was obtained. The results showed that the microstructure of the laser-MIG hybrid welding metal was composed of a large amount of acicular ferrite and a small amount of side plate ferrite and granular bainite. The amount of acicular ferrite and side plate ferrite in the arc zone was greater than those in the laser zone, and the grain size in the arc zone was slightly larger than that in the laser zone. The microstructure of the coarse grain heat affected zone was composed of lath martensite. With the increasing of laser power, the content of granular bainite decreased, and the content of acicular ferrite and side plate ferrite increased in the weld metal. When the laser power increased from 1.5 kW to 2.5 kW, the open circuit potential of the weld metal, the diameters of capacitive loops in Nyquist plot and the polarization resistance all increased, the polarization curve tended to shift right, the self-corrosion current density decreased, and the corrosion resistance improved. The weld metal under 2.5 kW laser power showed the best corrosion resistance.

Keywords: Q690 steel; laser arc hybrid welding; corrosion resistance; microstructure; laser power

引用格式: 周倩雯, 严春妍, 聂榕圻, 等. Q690钢激光-MIG复合焊焊缝耐腐蚀性能研究[J]. 电焊机, 2024, 54(4): 123-128.

Citation: ZHOU Qianwen, YAN Chunyan, NIE Rongqi, et al. Research on Corrosion Resistance of Hybrid Laser-MIG Weld Metal of Q690 Steel[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(4): 123-128.

收稿日期: 2023-05-26 修回日期: 2024-03-23

基金项目: 国家自然科学基金(51804097); 国家级大学生创新创业训练计划(202210294017Z)

作者简介: 周倩雯(2001—), 女, 本科, 主要从事高强钢激光电弧复合焊接的研究。

通讯作者: 严春妍(1982—), 女, 博士, 副教授, 主要从事金属材料焊接性、水下焊接技术及高效焊接技术研究。E-mail: yancy_hhu@163.com。

0 前言

Q690 低合金高强钢具有强度高、韧性好、焊接性良好等优点,被广泛应用于海洋工程、船舶建设、建筑等领域^[1-3]。Q690 钢中厚板结构在焊接过程中常采用多层多道电弧焊方法,需要开大尺寸的坡口,大大增加了焊接工时和焊接材料。激光-电弧复合焊兼具激光焊和电弧焊的优势,可以实现较大的熔深,且对工件的装配精度要求不高,具有较高的焊接效率和较好的焊缝成形,越来越多地被应用到实际焊接生产中^[4]。

在构件服役过程中,焊接接头常暴露在腐蚀介质中,面临着严重的腐蚀问题,对构件的安全性造成了极大的威胁。王凯^[5]等人采用 Gleeble 热模拟试验机研究了 Q690 钢窄间隙焊接热影响区耐腐蚀性能,发现显微组织对于耐腐蚀性能有较大影响,耐腐蚀能力从好到差依次为高温回火贝氏体、粒状贝氏体组织和马氏体组织。姜心怡^[6]等人研究了 X80 管线钢激光-MIG 复合焊焊缝的耐腐蚀性能,发现随着激光功率的增加,焊缝中贝氏体含量减少,耐腐蚀性能有所提升。Liu^[7]等人研究了 Q690 钢 CMT 焊接接头的腐蚀行为,结果表明 Ni 含量较高的焊缝耐腐蚀性比母材好,而组织粗大的粗晶区腐蚀速率较大。Zhang^[8]等人研究了低合金高强钢多层多道焊缝的耐腐蚀性能,发现多层多道焊可以细化焊缝晶粒,提高焊缝的耐腐蚀性能和硬度。

然而,目前针对 Q690 钢中厚板激光电弧复合焊接接头的显微组织及其耐腐蚀性能的研究较少,为此本文采用激光-MIG 复合焊接方法对 16 mm 厚的 Q690 钢中厚板进行焊接,研究激光功率对焊接接头的显微组织和耐腐蚀性能的影响规律,分析了不同激光下焊接接头的显微组织和晶粒尺寸变化以及焊缝的开路电位、阻抗谱、极化曲线等电化学参数,为 Q690 钢的工程应用提供理论指导。

1 试验材料和方法

试验母材为 Q690 低合金高强钢,板厚 16 mm,采用直径 1.2 mm 的 JM-80 焊丝,母材和焊丝的化学成分与力学性能分别如表 1、表 2 所示。

表 1 母材和焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of base metal and welding wire (wt. %)

材料	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cu
Q690	0.18	0.60	2.00	0.80	0.30	0.80
JM-80	0.08	0.67	1.60	0.01	0.01	—

表 2 母材和焊丝的力学性能

Table 2 Mechanical properties of base metal and welding wire

牌号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
Q690	≥690	770~940	≥14
JM-80	660~740	≥760	≥18

焊接试板尺寸为 180 mm×100 mm×16 mm,采用 Y 型坡口,角度为 30°,钝边为 8 mm,装配间隙为 0.5 mm。分别使用不同的激光功率对 Q690 钢进行激光-MIG 复合焊接试验,工艺参数如表 3 所示。采用激光在前、电弧在后的排列方式,分别进行打底焊、填充焊和盖面焊,焊接时保护气体为 99.99% Ar,气体流量为 20 L/min。

表 3 激光-MIG 复合焊接工艺参数

Table 3 Welding parameters of laser-MIG hybrid welding

道次	激光功率 /kW	焊接速度 /(m·min ⁻¹)	焊接电流 /A	离焦量 /mm
打底焊	7.0	1.2	150	-2
	1.5	0.5	230	0
填充焊	2.0	0.5	260	0
盖面焊	2.5	0.5	260	0
	3.0	0.5	260	0

焊后采用线切割截取焊接接头,并使用 4% 硝酸酒精进行腐蚀,在蔡司 Axiolab 5 型光学显微镜下观察焊接接头的显微组织。采用晶粒度试剂腐蚀焊缝,拍摄 50 张焊缝的晶界照片用于统计焊缝区的晶粒尺寸分布。采用武汉科斯特 CS2350H 电化学工作站进行复合焊焊缝的电化学耐腐蚀性能测试。焊缝试样与铜导线相连,四周采用环氧树脂进行封样,仅露出 1 cm² 的测试面,作为工作电极,参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为铂电极。在 25 °C 的 3.5% NaCl 溶液分别进行开路电位、动电位扫描和极化曲线测试,测试频率 100 kHz~0.1 Hz,扰动信号幅值 5 mV,扫描速率为 0.5 mV/s。

2 结果与讨论

2.1 显微组织

Q690 钢母材的显微组织如图 1 所示,可以看出

主要由贝氏体组成,原奥氏体晶界清晰可见。

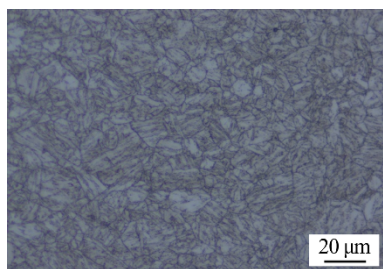


图1 Q690 钢母材显微组织

Fig. 1 Microstructure of Q690 steel base metal

图2为激光复合焊接头的宏观形貌,可以看出焊缝成形良好,不存在气孔、裂纹等焊接缺陷。焊缝呈“高脚杯”形状,焊缝的上部受激光和电弧联合作用,通常被称为“电弧区”;焊缝的下部受到激光的作用较大,被称为“激光区”。

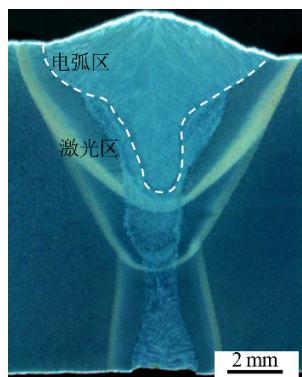


图2 Q690 钢激光-MIG 复合焊接头宏观形貌

Fig. 2 Macroscopic morphology of Q690 steel hybrid welded joint

图3、图4分别为不同激光功率下焊缝(WM)和粗晶热影响区(CGHAZ)的显微组织。当激光功率为1.5 kW时,盖面焊缝的显微组织主要由针状铁素体(AF)和条状贝氏体(LB)组成。盖面电弧区的针状铁素体含量比盖面激光区多,条状贝氏体含量少,这是因为电弧区的冷却速度较慢,有利于针状铁素体形核长大^[9]。

当激光功率为3.0 kW时,焊缝区出现了较多的先共析铁素体(PF)和侧板条铁素体(FSP),条状贝氏体含量减少。随着激光功率的增加,焊接热输入变大,峰值温度变高,冷却速率变慢。先共析铁素体和侧板条铁素体的形成温度比针状铁素体较高,因此在更高激光功率的作用下,出现PF和FSP^[10]。粗晶区组织主要是板条马氏体(LM),晶粒较为粗大,被不同位向的马氏体束分割^[11]。当激光功率为

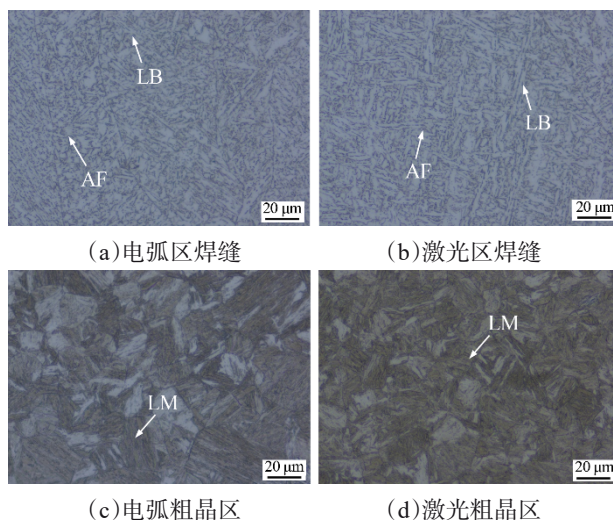


图3 激光功率为1.5 kW的复合焊接头显微组织

Fig. 3 Microstructure in hybrid welded joint of 1.5 kW laser power

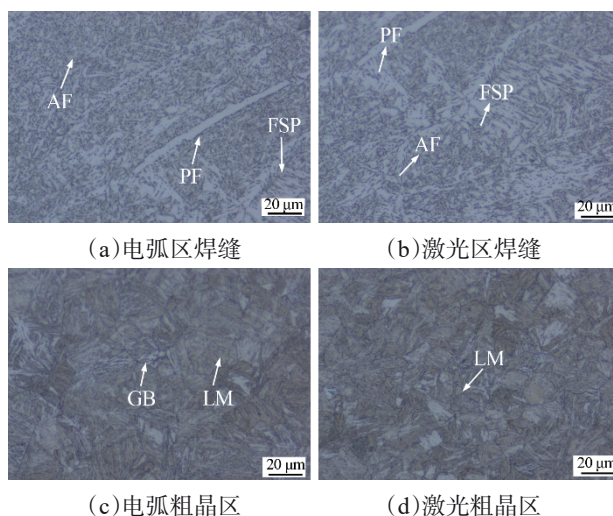


图4 激光功率为3.0 kW的复合焊接头显微组织

Fig. 4 Microstructure in hybrid welded joint of 3.0 kW laser power

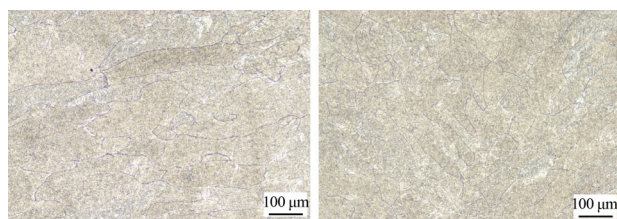
3.0 kW时,粗晶区出现了少量粒状贝氏体(GB)。

2.2 晶粒尺寸

图5为3.0 kW激光功率下焊缝的晶粒尺寸,可以看出电弧区焊缝的晶粒尺寸比激光区焊缝略大,电弧区的平均晶粒尺寸为134 μm,大部分晶粒尺寸则在50~200 μm之间;而激光区的平均晶粒尺寸为98 μm,大部分晶粒尺寸在25~150 μm之间。

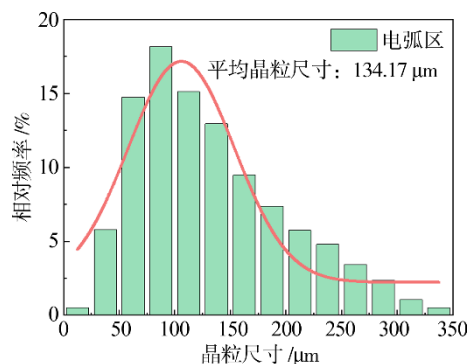
2.3 开路电位

图6为不同激光功率下复合焊焊缝的开路电位。随着测试时间的延长,焊缝的开路电位均呈现下降趋势,直趋向于稳定。1.5 kW、2.0 kW、2.5 kW、3.0 kW的焊缝开路电位分别为-626 mV、-614 mV、

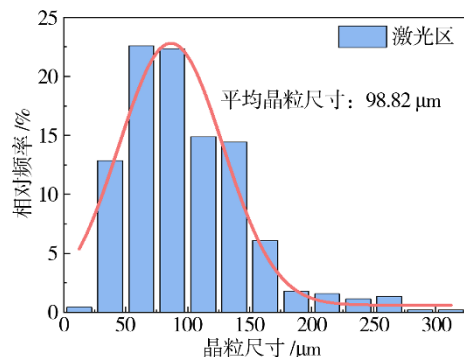


(a) 焊缝电弧区晶界

(b) 焊缝激光区晶界



(c) 焊缝电弧区晶粒尺寸分布直方图



(d) 焊缝激光区晶粒尺寸分布直方图

图5 焊缝晶粒尺寸

Fig. 5 Grain size of weld metal

-591 mV、-604 mV。开路电位表示金属电化学腐蚀的热力学倾向,开路电位越负,表示材料的热力学稳定性越差^[12]。随着激光功率的增加,焊缝的开路电位先上升后下降。激光功率为2.5 kW时,开路电位最高,而当激光功率从2.5 kW增加到3.0 kW时,开路电位有所下降。

2.4 阻抗谱

电化学阻抗谱如图7所示,四个试样的均为单个的容抗弧,表明激光热处理前后焊缝的电极过程为电荷转移控制。容抗弧半径从大到小为2.5 kW、3.0 kW、2.0 kW、1.5 kW。容抗弧半径大小表征电化学反应阻力大小,容抗弧半径越小说明电化学反应阻力越小,腐蚀越容易发生。

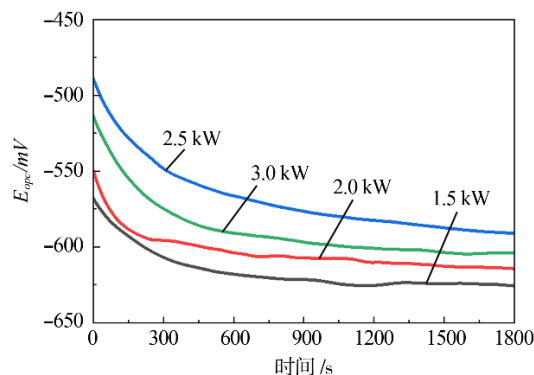


图6 不同激光功率下Q690钢复合焊焊缝的开路电位

Fig. 6 Open circuit potential of Q690 steel hybrid weld metal under different laser powers

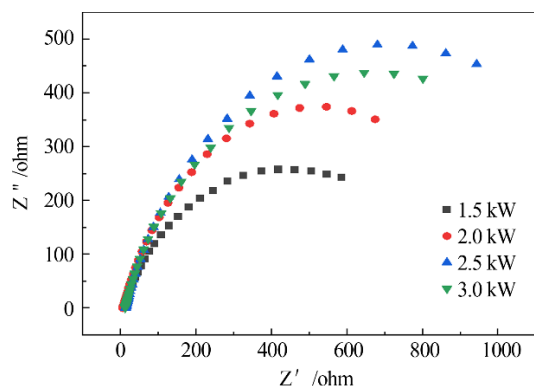


图7 不同激光功率下Q690钢复合焊焊缝的电化学阻抗谱

Fig. 7 EIS of Q690 steel hybrid weld metal under different laser powers

Q690 钢复合焊缝在3.5% NaCl 溶液中等效电路如图8所示,拟合参数如表4所示, R_s 为溶液电阻, R_p 为极化电阻,CPE为常相位角元件。极化电阻 R_p 的大小反映了腐蚀过程中所需克服的阻力大小, R_p 值越大,表明电化学反应的阻力越大,反应过程进行得越困难。当激光功率为2.5 kW时,极化电阻值 R_p 最大,为 $1405.7 \Omega \cdot \text{cm}^2$,极化电阻与容抗弧半径的变化规律一致。

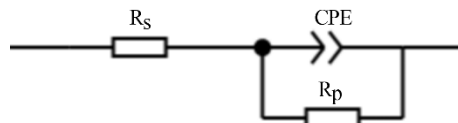


图8 电化学阻抗谱等效电路

Fig. 8 Equivalent circuit diagram of EIS

2.5 极化曲线

不同激光功率下Q690钢复合焊焊缝的极化曲线如图9所示,拟合后的电化学参数如表5所示。由图9可知,不同激光功率的复合焊焊缝未出现明显的钝化行为,处于活性溶解区。这是因为在NaCl

表 4 不同激光功率 Q690 钢复合焊焊缝阻抗试验拟合参数
Table 4 Fitting parameters of EIS for Q690 steel hybrid weld metal under different laser powers

激光功率 /kW	溶液电阻 $R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	极化电阻 $R_p/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$
1.5	9.04	809.92
2.0	6.20	1 154.90
2.5	14.03	1 405.70
3.0	12.78	1 231.00

溶液中存在大量的 Cl^- , 使金属表面的保护膜遭到破坏, 且钝化膜的生成速率低于金属的溶解速率, 所以没有出现明显的钝化区间。激光功率从 1.5 kW 增加到 2.5 kW, 极化曲线出现右移倾向。

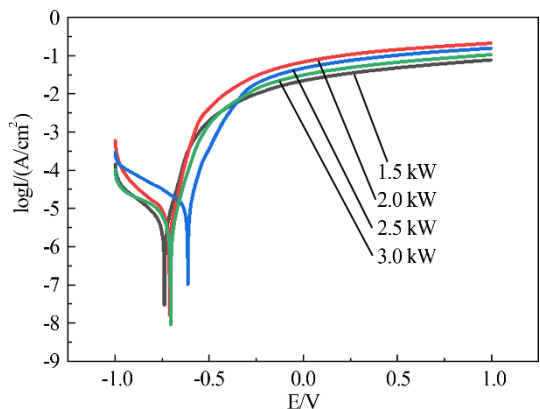


图 9 不同激光功率下 Q690 钢复合焊焊缝的极化曲线
Fig. 9 Polarization curves of Q690 steel hybrid weld metal under different laser powers

表 5 不同激光功率 Q690 钢复合焊焊缝的拟合电化学参数
Table 5 Fitted electrochemical parameters of Q690 steel hybrid weld metal under different laser powers

激光功率 /kW	阴极 Tafel 常数 b_a/mV	阳极 Tafel 常数 b_c/mV	自腐蚀电位 $E_{\text{corr}}/\text{mV}$	自腐蚀电流密度 $I_{\text{corr}}/(\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$
1.5	68.36	249.40	-711.5	7.189
2.0	78.55	282.92	-737.8	5.450
2.5	93.94	780.31	-613.2	2.163
3.0	77.59	314.66	-705.6	5.498

不同激光功率下 Q690 钢复合焊焊缝的阳极 Tafel 常数 b_c 明显大于阴极 Tafel 常数 b_a , 表明腐蚀过程中阳极反应的影响较大。焊缝的自腐蚀电流密度 I_{corr} 随着激光功率的增加先降低后升高, 自腐蚀电位 E_{corr} 先升高后降低, 当激光功率为 2.5 kW 时, 自腐蚀电流密度 I_{corr} 最低, 为 $2.163 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 自腐蚀电位 E_{corr} 最高, 为 -613.2 mV 。自腐蚀电位表明腐蚀的难易程度, 自腐蚀电流密度表明腐蚀速度。自腐蚀电

流密度越小, 腐蚀速度越慢, 表示耐腐蚀性能越好。
Q690 钢复合焊焊缝极化后的腐蚀形貌见图 10。可以看出表面发生了一定程度的腐蚀。2.5 kW 激光功率下的焊缝表面腐蚀产物较少, 部分地方出现均匀细小的腐蚀坑, 而 1.5 kW 激光功率下的焊缝表面全部被腐蚀产物覆盖, 说明腐蚀较严重。

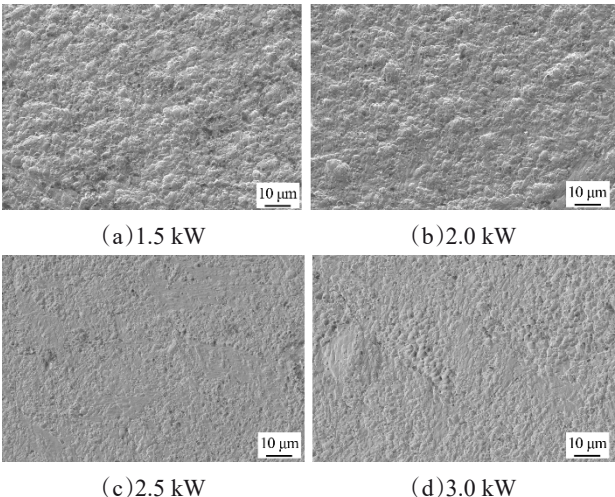


图 10 不同激光功率下 Q690 钢复合焊焊缝的腐蚀形貌
Fig. 10 Corrosion of Q690 steel hybrid weld metal under different laser powers

3 分析与讨论

焊缝的耐腐蚀性能与显微组织和晶粒尺寸有关。粒状贝氏体由铁素体基体和 MA 组元组成, MA 组元和铁素体基体的电势不同, 形成较多小的腐蚀单元^[8]。针状铁素体组织由非金属夹杂物核心、包围在夹杂物四周的铁素体和外层的富碳层组成, 富碳薄膜增加了针状铁素体的晶界活性, 加速腐蚀的发生速度^[13]。侧板条铁素体和先共析铁素体的晶粒较大, 单位面积的晶界数目较小。而晶界是一种晶体缺陷, 能量较高, 化学成分分布不均匀, 容易发生强烈的腐蚀行为, 因此侧板条铁素体和先共析铁素体的耐腐蚀性能较好。
激光功率为 1.5 kW 时, 复合焊焊缝中由较多的粒状贝氏体和针状铁素体组成, 表现出较差的耐腐蚀性能。随着激光功率的增加, 焊缝中晶粒长大, 针状铁素体发生粗化, 随着热输入的增加, 焊缝中出现了侧板条铁素体、先共析铁素体等高温转变组

织,因此耐腐蚀性能提升。当激光功率增加到一定程度后,组织因为过于粗大,在晶界处优先发生腐蚀,因此耐腐蚀性能下降。焊缝的耐腐蚀性能随激光功率的增加先升后降,适当提高激光功率可以提高复合焊焊缝的耐腐蚀性。

4 结论

(1)激光功率为 1.5 kW 时,盖面焊焊缝的显微组织主要由针状铁素体、粒状贝氏体组成,其中焊缝电弧区的晶粒度比激光区大。随着激光功率的增加,耐腐蚀性能较好的先共析铁素体和侧板条铁素体含量增加,粒状贝氏体含量减少,耐腐蚀性能提高。当激光功率为 3.0 kW 时,盖面焊缝存在较多的先共析铁素体和侧板条铁素体,但由于组织过于粗大,晶界处优先腐蚀,导致耐腐蚀性能降低。

(2)Q690 钢复合焊焊缝的电化学测试和极化腐蚀形貌结果均表明,适当增加激光功率可以改善耐腐蚀性能。激光功率为 2.5 kW 时,焊缝的开路电位最高(-591 mV)、极化电阻 R_p 最大($1\,405.70\,\Omega\cdot\text{cm}^2$)、自腐蚀电流密度 I_{corr} 最低($2.163\,\mu\text{A}/\text{cm}^2$),耐腐蚀性能最好。

(3)本文探究了不同激光功率下 Q690 钢激光电弧复合焊焊缝的耐腐蚀性能,揭示了焊缝显微组织对耐腐蚀性能的影响,后续通过焊后热处理或表面改性等方式,进一步对复合焊接头的耐腐蚀性能进行调控改性。

参考文献:

- [1] Guo H, Wei H, Li G, et al. Experimental research on fatigue performance of butt welds of corroded Q690 high strength steel [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 184: 106801.
- [2] 张庆素,陈振业,陈波,等. Q690 抗震耐蚀钢埋弧焊熔敷金属性能研究[J]. 电焊机, 2022, 52(3): 105-110.
Zhang Q S, Chen Z Y, Chen B, et al. Research on the Mechanical Properties of Q690 Seismic and Corrosion Resistant Steel Submerged Arc Welding Deposited Metal [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(3): 105-110.
- [3] Wang W, Wang K, Kodur V, et al. Mechanical properties of high-strength Q690 steel at elevated temperature [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30(5): 04018062.
- [4] Acherjee B. Hybrid laser arc welding: State-of-art review[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 99: 60-71.
- [5] 王凯,易耀勇,卢清华,等. 基于窄间隙焊接的热模拟峰值温度对 Q690 高强钢腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2018, 38(5): 447-454.
WANG K, YI Y Y, LU Q H, et al. Effect of Peak Temperatures on Corrosion Behavior of Thermal Simulated Narrow-gap Weld Q690 High Strength Steel [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2018, 38(5): 447-454.
- [6] 姜心怡,严春妍,周倩雯,等. X80 管线钢激光-MIG 复合焊焊缝耐腐蚀性分析[J]. 电焊机, 2022, 52(04): 51-57.
JIANG X Y, YAN C Y, ZHOU Q W, et al. Corrosion Resistance Analysis of Hybrid Welded Metal of X80 Pipeline Steel [J]. Electric Welding Machine, 2022, 52(04): 51-57.
- [7] Liu P, Han S, Yi Y, et al. Corrosion Behavior of Welded Joint of Q690 with CMT Twin [J]. International Journal of Corrosion, 2018, 2018: 1-9.
- [8] Zhang H, Hao F, Zhang Y, et al. Corrosion behavior and mechanism of the high-strength low-alloy steel joined by multilayer and multipass welding method [J]. Materials and Corrosion, 2022, 73(11): 1826-1832.
- [9] Qi X, Wang X, Shen X, et al. Study on In-Situ Nucleation, Growth Kinetics and Crystallographic Structure of Acicular Ferrite in X100 Pipeline Steel Welds [J]. Metals and Materials International, 2023, 29: 2623-2635.
- [10] Qi X, Wang X, Di H, et al. Acicular ferrite nucleation mechanism in laser-MAG hybrid welds of X100 pipeline steel [J]. Materials Letters, 2021, 304: 130603.
- [11] Zhang Y, Xiao J, Liu W, et al. Effect of welding peak temperature on microstructure and impact toughness of heat-affected zone of Q690 high strength bridge steel [J]. Materials, 2021, 14(11): 2981.
- [12] Sun M, Du C, Liu Z, et al. Fundamental understanding on the effect of Cr on corrosion resistance of weathering steel in simulated tropical marine atmosphere [J]. Corrosion Science, 2021, 186: 109427.
- [13] Shang F, Chen J, Song X, et al. Strength-ductility and corrosion resistance match mechanism of bainite/martensite dual phase 30Cr15MoY alloy steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 832: 142477