

14 mm 厚 EH36 高强钢光纤激光-MAG 复合焊工艺及接头组织性能

王子健^{1**}, 徐国建^{1*}, 李午红², 王传强³, 吴世凯⁴

¹沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

²沈阳中科煜宸科技有限公司, 辽宁 沈阳 110021;

³辽宁增材制造产业技术研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110021;

⁴北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 利用光纤激光-MAG 复合焊工艺焊接了 14 mm 厚的 EH36 高强钢, 研究了激光功率、焊接速度和焊接电流对焊缝成形的影响, 并分析了优化工艺下焊接接头的组织和性能。结果表明, 随着激光功率的增大, 焊缝的熔深增大, 熔宽基本不变; 随着焊接速率的增大, 焊缝的熔宽减小; 随着焊接电流的增大, 焊缝的熔宽基本不变。最佳焊接工艺下得到的焊缝成形良好且无焊接缺陷存在; 焊缝及热影响区的组织主要由板条马氏体组成; 焊缝金属的硬度大于母材的; 拉伸试样断裂位置在母材; 焊缝横向侧弯试验后, 拉伸面没有出现裂纹; 焊缝冲击试样断面为准解理断口形貌。

关键词 激光技术; 激光-MAG 复合焊; EH36; 焊缝成形; 显微组织

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1002007

Fiber-Laser-MAG Hybrid Welding Process of 14-mm-Thick EH36 High Strength Steels and Joint Performances

Wang Zijian^{1**}, Xu Guojian^{1*}, Li Wuhong², Wang Chuanqiang³, Wu Shikai⁴

¹School of Material Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China;

²Shenyang Zhongke Raycgam Science and Technology Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110021, China;

³Industrial Technology Research Institute of Liaoning Additive Manufacturing Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110021, China;

⁴Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract The 14 mm thick EH36 high strength steels are welded by the fiber-laser-MAG hybrid welding process. The effects of laser power, welding speed and welding current on the weld formation are investigated and the microstructures and performances of welded joint under the optimal process parameters are analyzed. The results show that the weld penetration increases and the weld width is basically unchanged with the increase of laser power. With the increase of welding speed, the weld width decreases and with the increase of welding current, the weld width is basically unchanged. Under the optimal welding process parameters, the weld formation is good and there are no welding defects. The microstructures of the heated affected zone and weld zone are mainly composed of lath martensite. The hardness of weld metal is greater than that of the base metal. The fracture position of the tensile specimen is within the base metal. There are no cracks on the tensile surface after the transverse bending test. The fracture morphology of weld impact specimen is quasi cleavage fracture.

Key words laser technique; laser-MAG hybrid welding; EH36; weld formation; microstructures

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

收稿日期: 2018-04-28; 修回日期: 2018-05-15; 录用日期: 2018-06-04

* E-mail: xuguojian1959@hotmail.com; ** E-mail: 865856587@qq.com

1 引 言

随着船舶行业的发展,各国的客船、旅游船和军用船的需求量不断增长^[1]。由于海水中行驶的船体要承受非常大的水压,因此,许多船体结构采用了铸铁结构件;为了减轻船体的自身质量、降低成本及提高生产效率,研究高强钢 EH36 焊接结构件取代传统的铸铁结构件具有重要意义。EH36 在低温下具有较大的强度、韧性和优异的耐蚀性,但是电弧焊接的结构件的性能较差,焊缝表面易产生凹陷和咬边等缺陷,背面易产生焊瘤,焊接变形大且焊接效率低^[2]。

国内外学者采用新型电弧焊、单激光和激光-电弧复合焊工艺研究了 EH36 的焊接性能^[3-5]。贾进等^[6]研究发现,当光纤激光器的焊接速率小于 $70 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,3.2 mm 厚的 EH36 拉伸试样断裂位置在母材。檀财旺等^[7]采用双面双电弧立焊焊接了 50 mm 厚的 EH36,获得了成形良好的多层焊缝,但焊接效率低。冯向阳等^[8]研究发现,采用熔化极气体保护焊得到的 EH36 焊接接头的各区域力学性能满足船级社的要求。Cater 等^[9]研究发现,埋弧焊

的 EH36 焊缝比搅拌摩擦焊的具有更好的力学性能。Roepke 等^[10]用激光-电弧焊的方法焊接了 10 mm 厚的 EH36,研究了激光功率、电弧功率和光丝间距对焊缝成形的影响。因此,采用多层多道焊接方法制备大于 10 mm 厚船用钢结构件的效率极低、焊缝成形比较差。

本文研究了 14 mm 厚的 EH36 在激光输出功率为 7 kW 时的单道一次熔透高效焊接新技术,提高了生产效率、焊缝成形质量及焊接接头性能,为造船业应用 EH36 结构件提供了试验依据。

2 试验材料和方法

采用 14 mm 厚的 EH36 低合金高强钢作为试验材料,其热处理状态为正火。试件尺寸为 $200 \text{ mm}\times 140 \text{ mm}\times 14 \text{ mm}$,采用平板对接焊进行试验。焊接坡口为单面 V 型坡口,坡口角度为 30° ,坡口钝边深度为 8 mm;焊丝牌号为 GHS50NS,直径为 1.2 mm,EH36 钢板和 GHS50NS 焊丝的化学成分见表 1。EH36 母材的显微组织如图 1 所示。可以看出,EH36 由大量的铁素体和少量的珠光体组成。

表 1 EH36 钢板和 GHS50NS 焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of EH36 steel and GHS50NS welding wire (mass fraction, %)

Material	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	Ti	Ni	Fe
EH36	0.10	0.37	1.47	0.02	0.001	0.023	0.031	0.012	0.13	Bal.
GHS50NS	0.08	0.81	1.24	0.005	0.001	-	-	-	0.46	Bal.

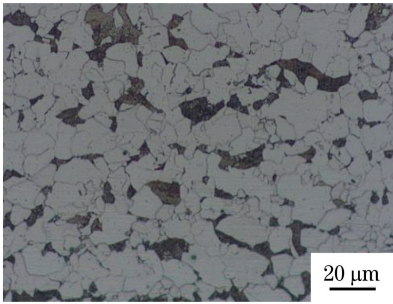


图 1 EH36 母材的显微组织

Fig. 1 Microstructure of EH36 base metal

激光-电弧复合焊系统包括美国 IPG 公司生产的波长为 $1.06 \mu\text{m}$ 的 10 kW IPG 光纤激光器,光纤传输芯径为 $200 \mu\text{m}$;德国生产的 HIGHYAG 激光加工头,焦距为 300 mm,聚焦后的光斑直径为 0.3 mm;德国生产的 KR60HA 型 6 轴 KUKA 机器人;福尼斯公司生产的 TPS4000MT 型数字化焊机。

通过正交试验获得的最佳焊接工艺参数:激光

入射角度和离焦量均为 0;焊接保护气由 Ar 和 CO_2 组成,体积分数分别为 80% 和 20%,气体流量为 $20 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$;光斑直径为 0.3 mm;焊枪与工件的夹角为 60° ;采用激光在前、电弧在后的旁轴复合方式,其他参数见表 2。

焊前采用砂轮机对试件进行除锈处理,并用丙酮对施焊部位进行清洗。焊后用机械加工方法获得焊缝横断面,然后进行研磨、抛光及腐蚀。采用日本奥林巴斯公司生产的 OLYMPUSSZ61 体式显微镜和 OLYMPUSGX51 金相显微镜,分别观察焊缝横断面形貌和焊接接头显微组织;采用重庆双清仪器有限公司生产的 HVS-1000A 型数显电子显微硬度仪测试焊接接头的维氏硬度分布,载荷为 0.981 N,加载时间为 10 s;采用美国 MTS 公司生产的 MTS500 型材料试验机和宁波智琳检测仪器有限公司生产的 JBW-300HD 型冲击试验机,分别测试焊接接头的拉伸、弯曲和冲击性能。

表 2 光纤激光-MAG 复合焊的工艺参数
Table 2 Process parameters of fiber-laser-MAG hybrid welding

Welding parameter	Value
Laser power /kW	7
Welding speed /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	0.02
Wire feeding speed /($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	9.5
Arc current /A	298
Welding voltage /V	27.4
Heat source distance /mm	3
Weld torch angle /($^{\circ}$)	60
Dry extension of welding wire /mm	22
Defocusing /mm	0

3 试验结果和分析

3.1 焊接工艺参数对焊缝成形的影响

当焊接速度和焊接电流不变时,激光功率对焊缝的影响如图 2 所示。可以看出,当激光功率为 5 kW 时,试样没有完全熔透,焊缝的熔深仅为 12 mm,焊缝正面余高较大;当激光功率增大到 6~7 kW 时,试样被完全熔透,焊缝表面较光滑;当激光功率增大到 7.5 kW 时,焊缝表面出现了塌陷的现象,焊缝背面余高过大。因此,随着激光功率的增大,电弧稳定性及激光作用的小孔效应均增强;激光小孔效应的增强使得更多诱导电弧能量进入激光作用的小孔中,小孔内的能量密度增大,从而增大了焊缝的熔深及背面余高。

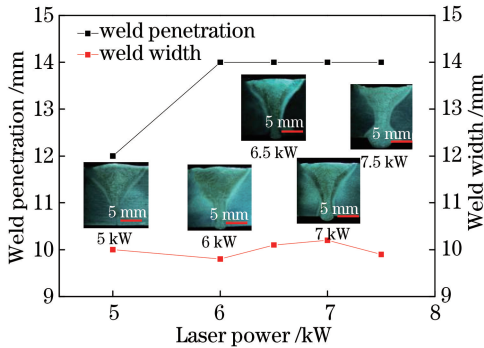


图 2 激光功率对焊缝的影响

Fig. 2 Effect of laser power on weld

当激光功率和焊接电流不变时,焊接速率对焊缝熔宽的影响如图 3 所示。可以看出,当焊接速率为 $0.010 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,焊接线能量较大,激光的穿透能力较强,导致焊缝的宽度较大,正面出现塌陷,背面余高较大;随着焊接速率的增大,焊缝的宽度减小,正面塌陷及背面余高得到改善,这是因为随着焊接速率的增大,热输入能量密度减小使得激光的穿透

能力减弱。然而,当焊接速率过大时,焊缝会产生咬边缺陷。这是由于焊缝上表面的宽度主要取决于电弧电压,随着焊接速率的增大,焊接线能量逐渐减小,焊趾处温度降低,熔池宽度减小的速率小于焊接速率增大的速率,使得该处熔池金属的流动性及润湿性变差。

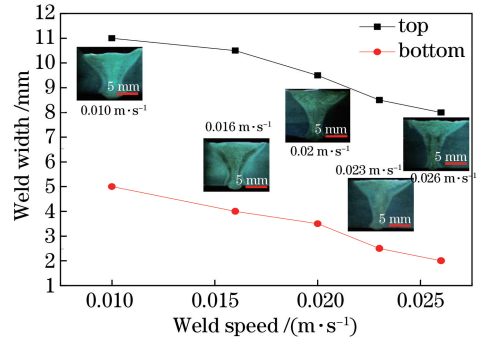


图 3 焊接速率对焊缝熔宽的影响

Fig. 3 Effect of welding speed on weld width

当激光功率和焊接速率不变时,焊接电流对焊缝熔宽的影响如图 4 所示。可以看出,当焊接电流为 243 A 时,焊缝表面产生严重的咬边,随着焊接电流的增大,焊缝正面的咬边缺陷有所改善,焊缝背部余高稍有增大;当焊接电流增大到 298 A 时,焊缝表面成形较均匀且质量较好。随着焊接电流的增大,电弧能量密度增大,试样的上表面有更多的金属熔化,造成焊缝正面宽度增大;焊缝背面宽度基本不变是由于其主要取决于激光输出功率、光束质量及光斑尺寸,而这些参数在电流变化时都保持不变。

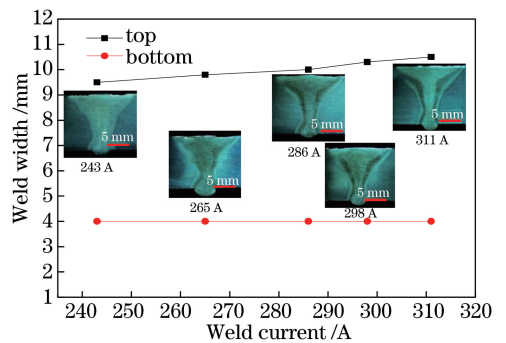


图 4 焊接电流对焊缝熔宽的影响

Fig. 4 Effect of welding current on weld width

3.2 焊缝外观成形

在最佳工艺参数条件下,光纤激光-MAG 复合焊的焊缝形貌如图 5 所示。从图 5(a)、(b)可知,焊接试样单次一次焊透,焊缝表面和背面成形美观且光亮,无塌陷和余高过大、飞溅及焊瘤等缺陷。从图 5(c)可知,焊缝呈高脚杯形,可划分为电弧作用区及激光作用区。

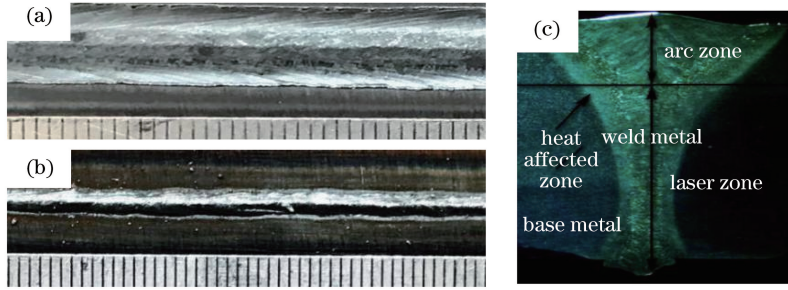


图 5 光纤激光-MAG 复合焊的焊缝形貌。(a)正面;(b)背面;(c)横断面

Fig. 5 Weld morphology under fiber-laser-MAG hybrid welding. (a) Front side; (b) back side; (c) cross section

3.3 焊接接头显微组织

焊接接头由焊缝、熔合区和热影响区(HAZ)组成,其金相显微组织如图 6 所示。从图 6(a)、(b)可以看出,电弧作用区的焊缝组织由大量板条状马氏体(M)、少量贝氏体(B)及微量块状铁素体(F)组成,激光作用区的焊缝组织由大量板条马氏体、少量贝氏体及微量块状铁素体组成。电弧作用区的焊缝组织中板条状马氏体含量小于激光作用区的,贝氏体和铁素体含量大于激光作用区的。在焊接过程中,电弧作用区主要是电弧热源作用为主,激光热源作用为辅,该区温度高,相变点以上停留时间长,容易获得粗大的奥氏体晶粒;在随后的冷却相变过程中,电弧作用区易形成比较粗大的板条状马氏体、贝氏体及铁素体组织^[11]。激光作用区主要是激光热源作用为主,电弧热源作用为辅,该区热输入量小且冷却速度快,高温相变点以上停留时间较短,奥氏体晶粒来不及长大;另外,该区冷却速度快导致相变温度下降、新生相与旧相自由能差变大、所需临界形核功减小、单位时间的形核率增大^[12],因此,激光作用区易获得比较细小的板条状马氏体、贝氏体及铁素体。

在焊接热循环的作用下,接头的 HAZ 过热区奥氏体晶粒过度长大,韧性大幅度下降。从图 6(c)、(d)可知,电弧作用区的 HAZ 显微组织主要由大量马氏体及少量贝氏体组成;该区的奥氏体晶粒相变后,内部分布了多个具有不同位向关系的板条状马氏体。与电弧作用区的焊缝组织相比,电弧作用区的 HAZ 过热区的马氏体组织的晶粒粗大且含量高。HAZ 过热区的热输入较大,使得 HAZ 在高温相变点以上停留时间长,促使奥氏体晶粒比较粗大,从而在随后的冷却相变过程中得到了粗大的板条马氏体组织。激光作用区的 HAZ 的热输入量较小,受到的热影响较小,高温相变点以上的停留时间短,使得 HAZ 奥氏体晶粒粗化程度减弱;另外,由于激光作用区冷却速度较快,奥氏体的稳定性下降,因此,在随后的冷却过程中获得了比较细小的板条马氏体组织^[13]。与激光作用区的焊缝金属组织相比,激光作用区的 HAZ 过热区的马氏体组织的晶粒粗大且含量高。与激光作用区的 HAZ 过热区比较,电弧作用区的 HAZ 过热区马氏体晶粒粗大且含量高,而贝氏体含量低。

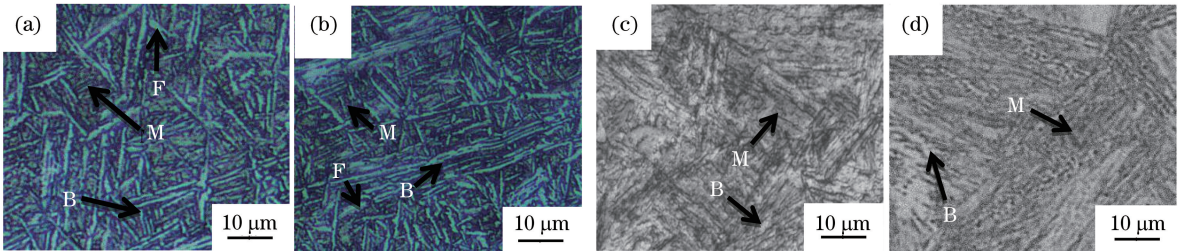


图 6 光纤激光-MAG 复合焊焊缝的金相显微组织。(a)电弧作用区;(b)激光作用区;(c)电弧作用区的 HAZ 过热区;(d)激光作用区的 HAZ 过热区

Fig. 6 Metallographic microstructures of welds under fiber-laser-MAG hybrid welding. (a) Arc action zone; (b) laser action zone; (c) HAZ overheated zone in arc action zone; (d) HAZ overheated zone in laser action zone

3.4 接头力学性能

焊接接头硬度的分布曲线如图 7 所示。可以看出,接头硬度以焊缝中心呈对称分布。激光作用区

的焊缝金属硬度约为 360 HV,HAZ 最高硬度约为 400 HV;电弧作用区的焊缝金属硬度约为 340 HV, HAZ 最高硬度约为 450 HV;母材的硬度约为

220 HV。由此表明,HAZ 硬度大于焊缝金属硬度,这是由于 HAZ 的马氏体含量大于焊缝金属的。激光作用区的焊缝金属硬度大于电弧作用区的,这是由于激光作用区的马氏体含量高;激光作用区的

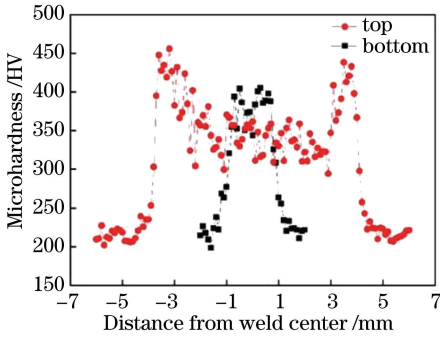


图 7 焊接接头硬度的分布曲线

Fig. 7 Hardness distribution curves of welded joint

HAZ 硬度小于电弧作用区的,这是由于激光作用区的 HAZ 窄小且马氏体晶粒较细小^[14]。

焊接接头的室温拉伸试验结果见表 3,拉伸断裂试样如图 8 所示。由拉伸试验结果可知,三组焊接接头拉伸性能较均匀,室温状态下试样的抗拉强度和屈服强度相近,焊接接头平均抗拉强度为 569.4 MPa,平均屈服强度为 422.25 MPa,平均延伸率约为 21%,平均断面收缩率约为 49%,拉伸试样断裂位置均位于远离焊缝的母材上,断口轮廓线与拉伸方向基本成 90°,断口附近有明显的颈缩现象。由上述的组织分析可知,母材组织由大量铁素体和少量珠光体组成,焊缝金属组织由大量马氏体、少量贝氏体及微量铁素体组成,马氏体和贝氏体组织比铁素体和珠光体具有更大的强度和硬度,故焊缝金属的强度高于母材^[15],断裂位置位于母材上。

表 3 焊接接头室温拉伸试验结果

Table 3 Tensile test results of welded joints at room temperature

Number	Tensile strength /MPa	Yield strength /MPa	Elongation /%	Fracture position	Temperature /°C
1	572.7	425.54	20.79	Base metal	23
2	565.3	417.40	20.90	Base metal	23
3	570.2	423.82	21.31	Base metal	23

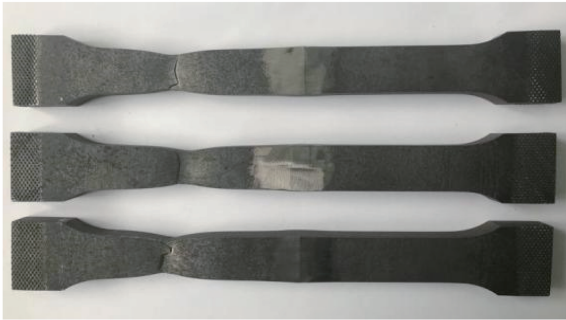


图 8 拉伸断裂试样

Fig. 8 Tensile fracture specimens

为了进一步研究焊接接头的塑性,对焊接接头进行了室温横向侧弯试验。弯曲试验机的压头直径

为 30 mm,支座的直径为 30 mm,试样横向侧弯 180°。横向侧弯试样如图 9 所示。可以看出,横向侧弯试样拉伸面没有裂纹产生。

焊接接头室温冲击试验结果见表 4。可以看出,室温冲击吸收功值由大到小的排序为母材金属、焊缝金属、HAZ。这是因为母材组织主要由铁素体和珠光体组成,韧性较好;焊缝金属组织主要由大量板条状马氏体、少量贝氏体及微量铁素体组成,韧性次之;HAZ 组织主要由大量马氏体和少量贝氏体组成,韧性最差。焊缝金属冲击试样的断口形貌如图 10 所示。可以看出,焊缝金属的冲击试样断面为准解理断口形貌。

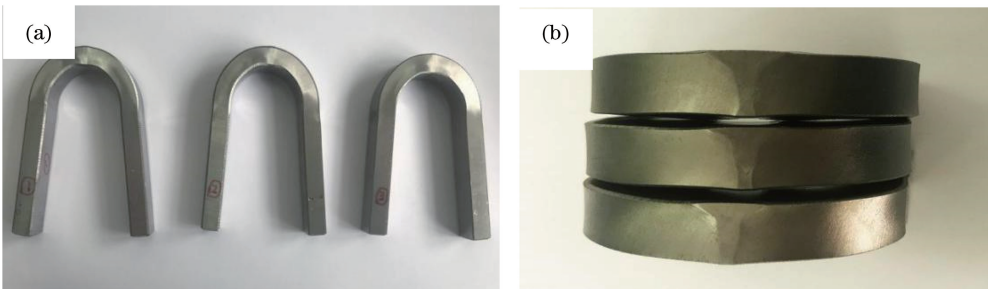


图 9 横向侧弯试样。(a)弯曲宏观图;(b)焊缝弯曲形貌

Fig. 9 Transverse bending specimens. (a) Macrograph of bending; (b) bending morphology of weld

表 4 焊接接头室温冲击试验结果

Table 4 Impact test results of welded joints at room temperature

Item	Weld metal	HAZ	Base metal
Impact work /J	90,92,94	82,87,95	106,90,79
Impact absorbing energy /J	92	88	96.67

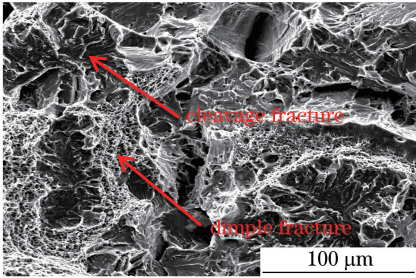


图 10 焊接接头冲击试样的断口形貌

Fig. 10 Fracture morphology of impact specimen of welded joint

4 结 论

利用光纤激光-MAG 复合焊,实现了 14 mm 厚 EH36 高强钢的一次单道焊透,得到了成形良好的焊接接头,并得到以下结论。

1) 焊接的最佳工艺参数:激光功率为 7 kW,焊接电流为 298 A,焊接速率为 $0.02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,送丝速率为 $9.5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 。在最佳工艺参数下获得了成形良好及内部无缺陷的焊接接头。

2) 电弧作用区和激光作用区的焊缝金属组织由大量马氏体、少量铁素体及微量铁素体组成。电弧作用区和激光作用区的 HAZ 组织由大量板条状马氏体及少量的贝氏体组成。

3) EH36 钢的室温焊接接头的平均抗拉强度为 569.4 MPa,平均屈服强度为 422.25 MPa,平均延伸率为 21%,平均断面收缩率为 49%,拉伸试样断裂位置均发在母材上。

参 考 文 献

[1] Xie W, Lu C. Initial analyses of future sea strategies and ships of China[J]. *Ship and Ocean Engineering*, 2013, 42(3): 127-132.
 谢伟, 陆超. 浅析我国海洋发展战略及未来船舶发展趋势[J]. *船海工程*, 2013, 42(3): 127-132.
 [2] Zhang G H, Cheng L, Li Y, *et al.* Progress on marine corrosion resistant steels [J]. *Materials*

China, 2014, 33(7): 426-435.

张国宏, 成林, 李钰, 等. 海洋耐蚀钢的国内外进展 [J]. *中国材料进展*, 2014, 33(7): 426-435.

[3] Wang B. Research on welding process of EH36 marine high strength steel [J]. *Marine Vocational Education*, 2017, 5(1): 59-61.
 王博. EH36 船用高强度钢焊接工艺研究 [J]. *船舶职业教育*, 2017, 5(1): 59-61.
 [4] Sui Z Q, Qi Y C, Wang J L, *et al.* Effects of welding processes on microstructure and corrosion resistance of weld metal of corrosion resistant ship plate steel DH36 [J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2016, 40(3): 61-65.
 隋志强, 齐彦昌, 王军丽, 等. 焊接工艺对 DH36 耐蚀船板钢焊缝金属组织与耐蚀性能的影响 [J]. *机械工程材料*, 2016, 40(3): 61-65.
 [5] Li Z, Wu Y M, Zhang J X, *et al.* Study on thermal cycle and microstructure characteristics of 10CrNiCu steel by hybrid laser-MAG welding [J]. *Development and Application of Materials*, 2014, 29(1): 18-22.
 李治, 吴艳明, 张俊旭, 等. 10CrNiCu 钢激光-MAG 复合热循环及组织特性研究 [J]. *材料开发与应用*, 2014, 29(1): 18-22.
 [6] Jia J, Yang S L, Ni W Y, *et al.* Study on microstructure and properties of laser welding joints of marine high strength steel E36 [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(2): 0203002.
 贾进, 杨尚磊, 倪维源, 等. 船用高强钢 E36 激光焊接接头组织和性能的研究 [J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0203002.
 [7] Tan C W. Research on welding characteristics of EH36 steel by using double-sided arc welding [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
 檀财旺. EH36 钢厚板双面双弧立焊焊接特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
 [8] Feng X Y, Qi Y C, Peng Y, *et al.* Investigation on corrosion behaviors of anti-corrosion steels joints for cargo oil tanks [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2012, 24(3): 44-49.
 冯向阳, 齐彦昌, 彭云, 等. 货油舱用耐蚀钢焊接接头的耐腐蚀性能 [J]. *钢铁研究学报*, 2012, 24(3): 44-49.
 [9] Cater S, Martin J, Galloway A, *et al.* Comparison between friction stir and submerged arc welding applied to joining DH36 and E36 shipbuilding steel [J]. *Friction Stir Welding and Processing*, 2013, 7: 49-58.
 [10] Roepke C, Liu S, Kelly S, *et al.* Hybrid laser arc welding process evaluation on DH36 and EH36 steel [J]. *Welding Journal*, 2010, 89(7): 140S-150S.
 [11] Li D Q, Wang S S. Study on microstructures and

- properties of welded joint for EH36 steel with high heat input[J]. *Angang Technology*, 2017(3): 14-18.
- 李德强, 王树森. EH36 大线能量用钢焊接接头组织与性能研究[J]. *鞍钢技术*, 2017(3): 14-18.
- [12] Wei J S, Qi Y C, Peng Y, *et al.* Effect of heat input on the microstructure and properties of weld metal welding in a 800 MPa grade heavy steel plate with narrow gap groove [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(6): 31-34.
- 魏金山, 齐彦昌, 彭云, 等. 热输入对 800 MPa 级超厚板窄间隙焊缝金属组织和性能的影响[J]. *焊接学报*, 2012, 33(6): 31-34.
- [13] An T B, Shan J G, Wei J S, *et al.* Effect of heat input on microstructure and performance of welded joint in 1000 MPa grade steel for construction machinery[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(22): 42-49.
- 安同邦, 单际国, 魏金山, 等. 热输入对 1000 MPa 级工程机械用钢接头组织性能的影响[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(22): 42-49.
- [14] Wang Q M, Qiao J N, Zou J L, *et al.* Fiber laser-variable polarity TIG hybrid welding of A7N01 aluminum alloy with filler wire[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0602004.
- 王启明, 乔俊楠, 邹江林, 等. A7N01 铝合金光纤激光-变极性 TIG 复合填丝焊接工艺研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0602004.
- [15] Xu G J, Zhu Y, Hang Z X, *et al.* CO₂ laser-MAG hybrid welding performance of high strength steel [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 37(7): 17-21.
- 徐国建, 祝影, 杭争翔, 等. 高强钢 CO₂ 激光-MAG 复合焊接性能[J]. *焊接学报*, 2016, 37(7): 17-21.