

高效激光-MAG 复合焊接船用高强钢的性能

井志成^{1**}, 张国瑜¹, 王子健¹, 李午红², 王传强², 徐国建^{1*}, 陈冬卅¹, 王蔚³

¹沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870;

²南京中科煜宸激光技术有限公司, 江苏 南京 210038;

³沈阳工业大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110870

摘要 采用光纤激光-MAG 复合焊接技术,在激光输出功率为 10 kW 的条件下单道一次穿透焊接 18 mm 厚 EH36 船用高强钢板,实现了良好的单面焊双面成形工艺技术,且无焊接缺陷存在。本次试验的最佳工艺参数为激光输出功率 10 kW、离焦量 0 mm、光丝间距 3 mm、焊接电流 400 A、焊接电压 31.1 V、送丝速度 14.2 m/min、焊丝伸出长度 20 mm、保护气流量 20 L/min、焊接速度 1.5 m/min。采用分析检测设备对焊接接头的显微组织及力学性能进行分析。结果表明:焊缝上部(电弧作用区)的组织特点是先共析铁素体在柱状晶界以侧板条状生长,在柱状晶内还存在少量粒状铁素体;在柱状晶内,亚结构组织主要由板条状马氏体和针状贝氏体组成,并存在少量上贝氏体;V 形带状组织主要由板条马氏体与少量贝氏体构成。焊缝下部(激光作用区)组织主要由板条马氏体组成。电弧作用区与激光作用区的焊接热影响区组织主要由板条马氏体组成。电弧作用区与激光作用区的焊接接头最高硬度均出现在热影响区,激光作用区的焊缝硬度最高,然后依次为焊缝中 V 形带状组织区、电弧作用区焊缝。焊接接头在室温下的平均抗拉强度为 521 MPa,拉伸试样均断裂于母材;焊接接头正弯试验满足标准要求;在 -20 °C 下,焊缝金属、热影响区及母材的平均冲击功分别为 57,53,52 J,力学性能指标均满足船级社要求。

关键词 材料;激光-MAG 复合焊;EH36 高强钢;焊缝成形;显微组织;力学性能

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0802005

Properties of Marine High-Strength Steel by High-Efficiency Laser-MAG Hybrid Welding

Jing Zhicheng^{1**}, Zhang Guoyu¹, Wang Zijian¹, Li Wuhong²,
Wang Chuanqiang², Xu Guojian^{1*}, Chen Dongsa¹, Wang Wei³

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

²Nanjing Zhongke Raycham Laser Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210038, China;

³School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning 110870, China

Abstract In this study, a fiber laser-MAG hybrid welding technology is adopted under the condition of a 10 kW laser output power. A single pass is performed with high efficiency through the welding of an 18 mm-thick EH36 marine high-strength steel plate, which realizes a good single-side welding and double-side forming technology without welding defects. The optimal process parameters of this test are 10 kW laser output power, 0 mm defocusing amount, 3 mm optical wire spacing, 400 A welding current, 31.1 V welding voltage, 14.2 m/min wire feeding speed, 20 mm wire extension length, 20 L/min protective gas flow, and 1.5 m/min welding speed. The microstructure and mechanical properties of the welded joints are studied using analytical testing equipments. Results show that the microstructure of the upper part of the weld (i. e., arc action zone) is characterized by proeutectoid ferrite growing in the columnar grain boundary in the form of side plates and strips and a small amount of granular ferrite in the columnar grain. The substructure in the columnar crystal mainly comprises lath martensite and acicular bainite, with a small amount of upper bainite. Meanwhile, the V-shaped banded structure is mainly

收稿日期: 2019-01-29; 修回日期: 2019-03-04; 录用日期: 2019-03-27

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1103600)

* E-mail: xuguojian1959@qq.com; ** E-mail: 1757473117@qq.com

composed of lath martensite and a small amount of acicular bainite. The weld microstructure of the lower part of the weld (laser action zone) is mainly composed of lath martensite. The structure of the welding heat-affected zone (HAZ) in the arc and laser action zones is mainly composed of lath martensite. The highest hardness of the welded joint in the arc and laser action zones appears in the HAZ. The laser action zone has the highest hardness, and then the V-shaped banded structure and the arc action zone of the weld. The average tensile strength of the welded joints at room temperature is 521 MPa, and all the tensile joints are fractured on the base metal. The positive bending test of the welded joints meets the standard requirements. The average impact energies of the weld metal, HAZ, and base metal at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ are 57, 53, and 52 J, respectively. The mechanical properties meet the requirements of the classification society.

Key words materials; laser-MAG hybrid welding; EH36 high-strength steel; weld molding; microstructure; mechanical properties

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3390

1 引 言

对于船舶与海洋工程,焊接成形质量与焊接效率一直是制约其发展的两大因素。一方面,焊接的难易及焊接质量的好坏决定了海洋结构件的使用性能,并已成为船用高强钢能否得到实际有效应用的关键^[1]。另一方面,据统计,船舶制造焊接用时占据了总工时的30%~40%,而焊接费用占据了总成本的30%~50%^[2],焊接效率低下制约了我国船舶行业的高速发展。因此,提高船舶制造效率及制造质量具有重要意义^[3-4]。激光-电弧复合焊接兼具激光焊接与电弧焊接的优点,是一种高效、高质量的焊接方法^[5],在船舶与海洋工程中具有天然优势。

EH36 船用高强钢是目前用于船体建造的最常用钢种之一^[6],在低温下具有较高的强度、良好的韧性和耐蚀性。顾思远等^[7]采用激光-电弧复合焊研究了激光功率与电弧电压对3 mm厚高强钢焊接性能的影响。Roepke等^[8]采用激光-电弧焊对10 mm厚EH36钢进行了焊接,研究了激光功率、电弧功率及光纤间距对焊缝成形质量的影响。贾进等^[9]采用光纤激光器对3.2 mm厚E36钢进行了焊接,研究了焊接速度对焊接接头组织、性能的影响。赵洁等^[10]、方建辉^[11]、Cater等^[12]主要基于电弧及摩擦搅拌焊接方法,研究了EH36钢的焊接效率和焊接

质量。到目前为止,船用高强钢的焊接应用主要还是以电弧焊为主,高效率和高质量的激光-电弧复合焊接的应用还比较少,特别是针对超过10 mm厚的EH36船用高强钢板,单道一次穿透焊接,并实现无缺陷的单面焊双面成形,还没有相关的详细报道。针对大厚度船用高强钢,开展高效、高质量的光纤激光-电弧复合焊研究对实际生产具有重要意义。

本文采用10 kW光纤激光器进行激光-电弧复合焊接,确立了18 mm厚EH36钢单道一次穿透焊接的最佳工艺参数,较系统地研究了焊接接头的显微组织和力学性能,为高效、高质量激光-MAG(metal active-gas)复合焊接船用高强钢提供理论支持和实践经验。

2 试验材料及试验方法

焊接试件为18 mm厚的EH36高强钢,其热处理状态为正火。试件尺寸为200 mm×190 mm×18 mm,接头形式对接。单边V型坡口角度为30°,钝边高度为11 mm。焊丝牌号为GHS50NS,直径 $\Phi=1.2\text{ mm}$ 。焊前用砂轮机打磨试件表面(除锈),并用丙酮反复擦拭清洗待焊部位,以去除油污及水等污物。母材和焊丝的化学成分如表1所示。图1为母材(BM)的显微组织,其中层状铁素体(白色)和层状珠光体(黑色)沿着轧制方向分布。

表1 EH36钢和GHS50NS焊丝的化学成分(质量分数,%)

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

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

激光-MAG复合焊接系统采用KR60HA型6轴KUKA机器人,搭配IPG公司生产的波长为1.07 μm 的10 kW光纤激光器(传输光线的芯径为200 μm)、HIGHYAG激光加工头,以及福尼斯公司生产的

TPS4000MT型数字化焊机。EH36船用高强钢的焊接示意图如图2所示,激光束入射角度为0°,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。其他优化后的最佳参数如表2所示。

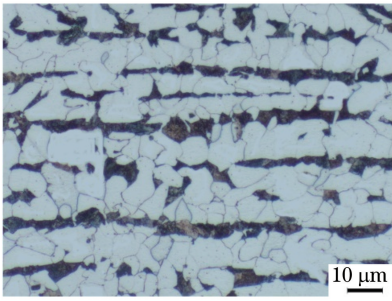


图 1 母材的显微组织

Fig. 1 Optical microstructure of BM

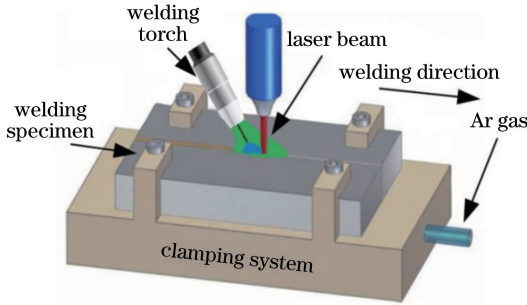


图 2 EH36 船用高强钢焊接示意图

Fig. 2 Schematic of EH36 marine high-strength steel welding

表 2 激光-MAG 复合焊接的最佳工艺参数
Table 2 Optimal processing parameters of laser-MAG hybrid welding

Welding parameter	Content
Laser power /kW	10
Welding speed / (m·min ⁻¹)	1.5
Wire feeding speed / (m·min ⁻¹)	14.2
Heat sources distance /mm	3
Defocus amount /mm	0
Dry extension of welding /mm	20
Arc current /A	400
Welding voltage /V	31.1
Shielding gas	Argon
Flow rate of shielding gas / (L·min ⁻¹)	20

焊后截取焊接接头横截面制成金相试样, 试样经研磨和抛光后采用体积分数为 4% 的硝酸乙醇溶液进行腐蚀。采用 OLYMPUSSZ61 体式显微镜和 OLYMPUSGX51 光学显微镜观察焊缝横断面的形貌和焊接接头的显微组织; 采用日立 S-3400 扫描电子显微镜分析拉伸试样和冲击试样的断口形貌; 采用 HVS-1000A 型数显电子维氏硬度仪测试焊接接头的硬度, 加载载荷为 0.981 N, 保载时间为 10 s; 采用 MTS500 型万能试验机和 JBW-300HD 型冲击试验机按国家标准分别进行拉伸、弯曲及冲击试验。

3 试验结果及分析

3.1 焊缝的宏观形貌

在最佳工艺参数下, 采用激光-MAG 复合焊接实现了 18 mm 厚 EH36 钢的单道一次穿透焊接, 焊接过程稳定, 焊缝表面和背面美观且光亮, 未见塌陷、咬边、飞溅、焊瘤及裂纹等缺陷, 如图 3 所示。激光-MAG 复合焊焊缝呈典型的酒杯状, 可人为划分为两个区域, 即电弧作用区(电弧热源作用为主, 激光热源作用为辅)和激光作用区(激光热源作用为主, 电弧热源作用为辅)^[13]。图 3(c)中 A、B 及 C 分别代表电弧作用区的硬度测试位置、激光作用区硬度测试位置及电弧作用区 V 型组织带硬度测试位置。

3.2 焊接接头显微组织

图 4(a)为电弧作用区焊缝(WM)的显微组织, 可以看出: 基本垂直于熔合线向焊缝内的组织表现出明显的柱状晶特征, 该区域用符号 D 表示; 另外, 在电弧作用区还存在一条 V 型带状(灰白色)组织, 该区域用符号 E 表示。由图 4 可知: 在电弧作用区的焊缝内, 先共析铁素体(PF)在晶界以侧板条状生长, 在柱状晶内存在少量粒状铁素体, 晶界侧的板条铁素体和晶内的粒状铁素体, 如图 4(b)所示; 在柱状晶内, 其亚结构组织主要由板条状马氏体(M)和针状贝氏体(B_L)组成[如图 4(c)所示], 还存在少量上贝氏体(B_U) [如图 4(b)所示]; V 型带状组织主要由板条马氏体与少量贝氏体构成(B) [如图 4(d)所示]。熔池金属开始结晶时, 由于散热方向决定了晶体的生长方向, 故柱状晶基本垂直于熔合线向焊缝内生长, 凝固结晶的同时释放结晶潜热, 使得熔池金属的冷却速度减小, 合金元素的均质化过程比较充分, 成分过冷度较小, 增加了贝氏体组织的转变量, 并形成了马氏体与贝氏体的混合组织; 另外, 在金属的非平衡凝固过程中, 会形成成分起伏, 进一步增大成分过冷度, 而成分过冷度增大又会加速熔池金属的冷却速度, 形成 V 型带状板条状马氏体区域。

激光作用区焊缝金属的结晶形态如图 5(a)所示。上部液态金属由两侧熔合线向焊缝内部平行生长, 焊缝根部散热较慢, 温度高, 使得下部液态金属向斜下方生长直至根部; 由高倍光学显微组织照片可知, 其组织主要由板条状马氏体组成, 此外还存在着少量针状贝氏体, 如图 5(b)所示。

图6(a)为电弧作用区熔合线(FL)附近的显微

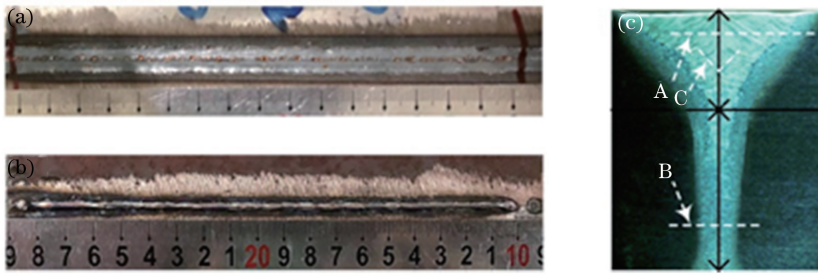


图 3 焊缝形貌。(a)正面形貌;(b)背面形貌;(c)焊缝横断面及区域划分

Fig. 3 Morphologies of WM. (a) Front morphology; (b) back morphology; (c) cross-section of weld and zone division

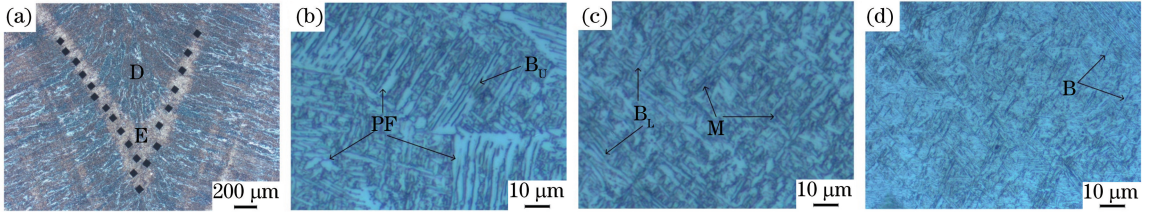


图 4 电弧作用区焊缝的显微组织。(a)结晶形态;(b)晶界处;(c)晶内;(d) V型带

Fig. 4 Microstructures of WM in arc action zone. (a) State of grain growth; (b) boundary of grains;

(c) interior of grains; (d) V-shaped bonds

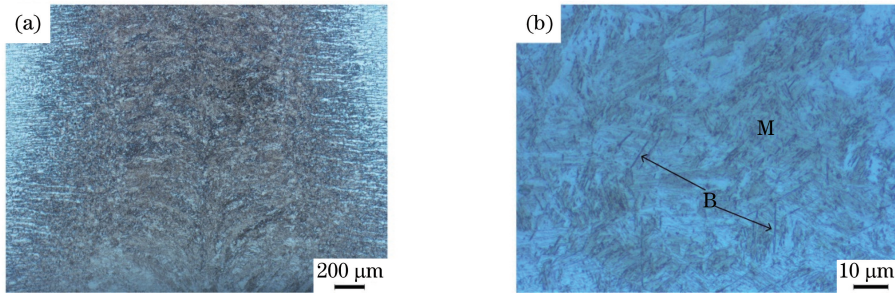


图 5 激光作用区焊缝的显微组织。(a)结晶形态;(b)显微组织

Fig. 5 Microstructures of WM in laser action zone. (a) State of grain growth; (b) microstructure

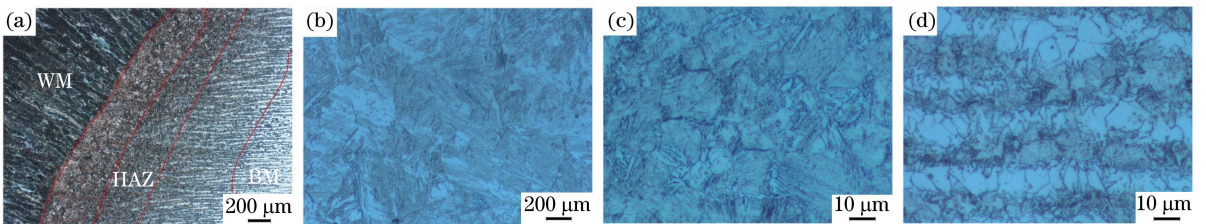


图 6 电弧作用区焊接接头熔合线附近的显微组织。(a)熔合线;(b)粗晶区;(c)细晶区;(d)不完全相变重结晶区

Fig. 6 Microstructures near fusion line of welded joint in arc action zone. (a) Fusion line; (b) coarse grain zone;

(c) fine grain zone; (d) zone of incomplete phase change recrystallization

组织,包括焊缝、热影响区(HAZ)及母材。焊缝金属中柱状晶的生长方向基本垂直于熔合线,母材中的铁素体(白色)和珠光体(黑色)沿着轧制方向分布,热影响区的组织从熔合线向母材方向可以划分为粗晶区、细晶区、不完全相变重结晶区。粗晶区的组织是由粗大的板条状马氏体组成,其尺寸约为 $43\ \mu\text{m}$;细晶区由细小的板条状马氏体组成,其尺寸

约为 $15\ \mu\text{m}$;不完全相变重结晶区的组织由原始的没有相变的铁素体与铁素体之间的珠光体相变组织构成,铁素体之间的珠光体的相变组织由细小的板条状马氏体和贝氏体组成。

激光作用区的热影响区组织特征与电弧作用区的基本相同,这里不再赘述,其特点是焊缝和热影响区都比较窄(与电弧作用区相比)。

3.3 焊接接头的力学性能

3.3.1 硬度

EH36 高强钢激光-MAG 复合焊接接头不同部位的硬度分布如图 7 所示,硬度测试位置如图 3(c) 焊缝横断面所示的 A、B 及 C 位置。图 7 中横坐标原点为焊缝的中心位置,相邻两测试点间隔 0.2 mm,可以看出,焊接接头的硬度以焊缝为中心呈对称分布,上部电弧作用区的焊缝金属的平均硬度约为 327 HV,下部激光作用区的焊缝金属的平均硬度约为 423 HV,V 型带状区的平均硬度约为 367 HV,母材的平均硬度约为 176 HV。电弧作用区、激光作用区及 V 型带状区的硬度均高于母材,这是因为焊缝上部的电弧作用区组织由板条状马氏体与贝氏体组成,电弧作用区的 V 型带状组织内存在大量马氏体(含量高于其他电弧作用区域),激光作用区的组织基本为板条状马氏体。

电弧作用区的热影响区的最高硬度约为 400 HV,明显高于焊缝;激光作用区的热影响区的最高硬度约为 423 HV,与焊缝基本相同。电弧作用区的热影响区的硬度与焊缝金属比较显著提高的原因是热影响区基本由板条状马氏体组成,激光作用区的热影响区的硬度与焊缝金属比较基本相同是因为二者基本上都是由马氏体组成的。

3.3.2 拉伸试验

按照 GB2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》

表 3 EH36 激光-MAG 复合焊接接头拉伸试验结果

Table 3 Tensile test results of EH36 laser-MAG hybrid welded joints

Number	σ_b /MPa	σ_s /MPa	A / %	Z / %	Fracture position	t / °C
1	525.7	364.92	21.68	61.68	BM	23
2	525.7	366.19	20.93	61.35	BM	23
3	516.9	352.15	25.58	60.18	BM	23
4	518.4	361.94	21.42	60.76	BM	23

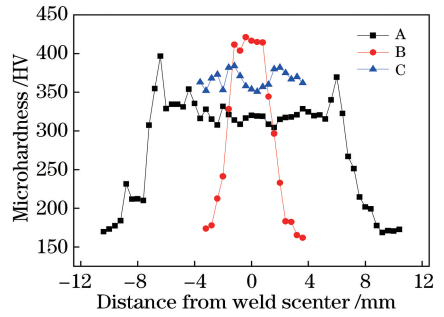


图 7 焊接接头不同位置处的显微硬度分布曲线
Fig. 7 Microhardness distribution curves at different positions of welded joint

对激光-MAG 复合焊接接头进行室温拉伸试验,试验结果如表 3 所示,试样拉断后的宏观照片及断口形貌如图 8 所示。试验结果表明,4 组焊接接头拉伸试样性能均匀,常温下 ($t = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$) 接头抗拉强度 σ_b 的均值为 521 MPa,屈服强度 σ_s 的均值为 361 MPa,断后伸长率 A 的均值为 22.40%,断面收缩率 Z 的均值为 60.99%,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。拉伸试样断口上均匀布满了大量韧窝,可知试样属于韧性断裂。根据 GB 712—2011《船舶及海洋工程用结构钢标准》可知抗拉强度需要在 490~630 MPa 范围内,并要求上屈服强度不低于 355 MPa,断后伸长率不低于 21%。可见,本次试验均满足该标准的要求。

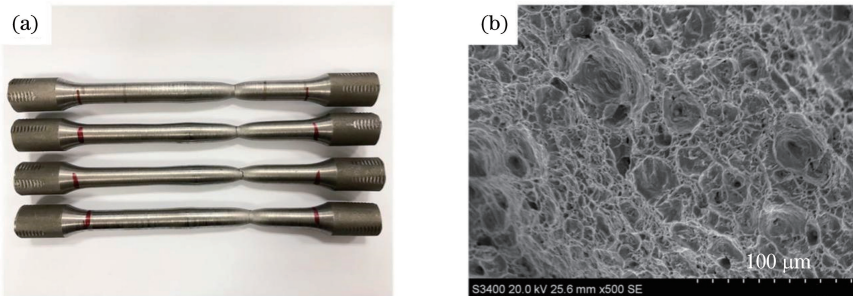


图 8 焊接接头拉伸试验结果。(a) 试样拉断后的宏观照片;(b) 拉伸试样的断口形貌
Fig. 8 Tensile test results of welded joints. (a) Macroscopic photo of fractured specimens;
(b) fracture morphology of tensile specimen

3.3.3 弯曲实验

对 EH36 船用高强钢的激光-MAG 复合焊接接头表面进行机加工处理后,进行室温全厚度正弯试验,弯曲试验机的压头直径为 30 mm,支座辊轮直

径为 30 mm,弯曲角度为 120°。弯曲后的试样如图 9 所示,结果表明,1 号和 2 号试样表面无肉眼可见的裂纹,3 号试样标目存在长度约为 1.5 mm 的小裂纹,均满足标准要求。

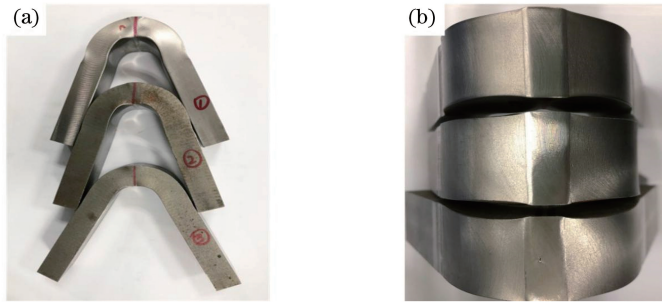


图 9 焊接接头的弯曲试验结果。(a)弯曲实验后试样的宏观照片;(b)焊缝弯曲形貌
Fig. 9 Bending test results of welded joint. (a) Macroscopic photo of bended specimens;
(b) bending morphology of welds

3.3.4 冲击试验

按照 GB 2650—2008《焊接接头冲击试验方法》,对 EH36 母材和激光-MAG 焊接接头进行了 V 型开口夏比冲击试验,温度为 -20 °C,冲击试验结果如表 4 所示。由表 4 可知,母材、焊缝及焊接热影响区的平均冲击吸收功相差不大,焊缝金属略高于母材和热影响区。冲击试样的断口形貌如图 10 所示,试样均属于准解理断裂。与母材和热影响区相比,WM 冲击试样的断口形貌表现出解理面更加均匀细小的特征。V 型冲击试验结果满足 GB 712—

2011《船舶及海洋工程用结构钢标准》所规定的 -20 °C 冲击功不小于 34 J 的要求。

表 4 EH36 激光-MAG 复合焊接接头及母材的冲击试验结果
Table 4 Impact test results of EH36 laser-MAG hybrid welded joint and base metal

Impact position	Groove	Impact work /J	Average /J	t /°C
WM	V	46, 57, 68	57	-20
HAZ	V	56, 54, 48	53	-20
BM	V	48, 56, 53	52	-20

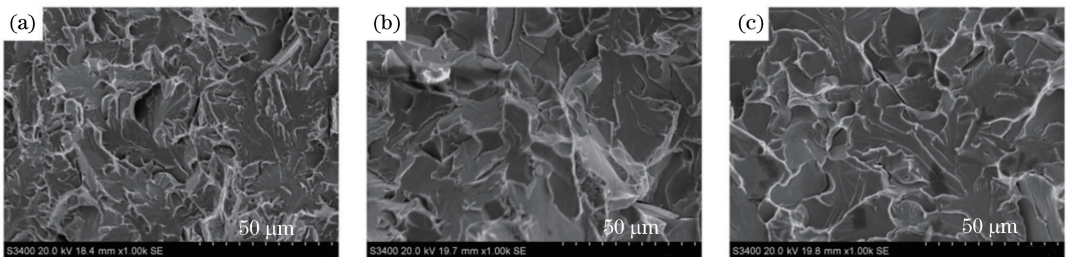


图 10 冲击试样不同位置处的断口形貌。(a)焊缝;(b)焊接热影响区;(c)母材
Fig. 10 Fracture morphologies at different positions of impact specimens. (a) WM; (b) HAZ; (c) BM

4 结 论

利用激光-MAG 复合焊接完成了 18 mm 厚 EH36 船用高强钢的单道一次穿透焊接,在最佳工艺参数(激光输出功率为 10 kW,离焦量为 0 mm,光丝间距为 3 mm,焊接电流为 400 A,焊接电压为 31.1 V,送丝速度为 14.2 m/min,焊丝伸出长度为 20 mm,保护气流量为 20 L/min,焊接速度为 1.5 m/min)下,实现了高效、高质量的激光-MAG 复合焊接工艺,对提高船舶制造效率及制造质量具

有重要意义。

焊缝组织可划分为电弧作用区与激光作用区两部分。相较于激光作用区,电弧作用区因加入了电弧热源而具有更复杂的组织,形成了铁素体、贝氏体及板条马氏体的混合组织,电弧作用区与激光作用区的焊接热影响区组织主要由板条马氏体组成。

EH36 船用高强钢焊接接头中焊接热影响区的硬度最高,约为 423 HV,母材金属的硬度最低,约为 176 HV,激光作用区因形成了板条马氏体组织而使其硬度高于电弧作用区。

EH36 船用高强钢焊接接头的室温抗拉强度达到了 521 MPa,且均断在母材,在-20 ℃下的平均冲击功为 57 J,为母材的 110%,焊接接头的各项力学性能均满足船级社要求,可为 EH36 高强钢在船舶制造领域的应用提供理论指导。

参 考 文 献

- [1] Lu X H, Gao S, Zhang C Y. Development of special steel for ship and marine engineering in China [J]. *Metal Working*, 2015(6): 8-11.
芦晓辉,高珊,张才毅.我国船舶与海工用特种钢材的发展[J].*金属加工(热加工)*,2015(6):8-11.
- [2] Lü W. Research on the application of high efficient welding technology in shipbuilding industry [J]. *Technology and Economic Guide*, 2018, 26(21): 73-74.
吕伟.船舶制造业高效焊接技术的应用探究[J].*科技经济导刊*,2018,26(21):73-74.
- [3] Shi G Q, Howse D. Laser and hybrid laser-MAG welding of steel structures for shipbuilding [J]. *Welding & Joining*, 2007, 37(5): 31-38.
石功奇,David Howse.船用钢结构的激光焊接及激光-MAG复合焊接[J].*焊接*,2007,37(5):31-38.
- [4] Han X H, Zhao Y Q, Yang X Y, *et al.* Forming rules and performances of laser-MAG hybrid welding joints of SUS301L-MT stainless steel [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2017, 52(5): 956-961.
韩晓辉,赵延强,杨晓益,等.不锈钢激光-MAG复合焊接接头成型规律及性能[J].*西南交通大学学报*,2017,52(5):956-961.
- [5] Xu G J, Li X, Xing F, *et al.* Performances of laser-arc hybrid welded high strength steel [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2014, 36(6): 647-651.
徐国建,李响,邢飞,等.激光-电弧复合焊接高强钢的性能[J].*沈阳工业大学学报*,2014,36(6):647-651.
- [6] Pan X, Li X B, Zhang Y, *et al.* Development of low cost shipbuilding steel EH36 with enhanced weldability [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2014, 26(7): 61-69.
潘鑫,李小宝,张宇,等.低成本高焊接性能船板钢 EH36 的开发 [J]. *钢铁研究学报*, 2014, 26(7): 61-69.
- [7] Gu S Y, Liu Z J, Zhang P L, *et al.* Appearance and formation mechanism of welds in high-strength steels by high speed laser-arc hybrid welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(12): 1202007.
顾思远,刘政君,张培磊,等.高速激光电弧复合焊接高强钢焊缝的形貌及成形机理 [J]. *中国激光*, 2018, 45(12): 1202007.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Zhao J, Xu D Z, Tu Y B. Research on the welding technology of the ultra-thick plating in high-strength steel EH36 [J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2014, 43(3): 44-47.
赵洁,徐得志,涂永彬.高强度船体结构用钢 EH36 超厚板焊接工艺研究 [J]. *船海工程*, 2014, 43(3): 44-47.
- [11] Fang J H. Welding of super thick plate(60-80 mm) EH36 high strength steel [J]. *Ship Standardization Engineer*, 2010, 43(4): 40-41.
方建辉.超厚板(60~80 mm)EH36 高强钢的焊接 [J]. *船舶标准化工程师*, 2010, 43(4): 40-41.
- [12] Cater S, Martin J, Galloway A, *et al.* Comparison between friction stir and submerged arc welding applied to joining DH36 and E36 shipbuilding steel [M] // Mishra R, Mahoney M W, Sato Y, *et al.* Friction stir welding and processing VII. Cham: Springer, 2013: 49-58.
- [13] Han L M. Study on laser-MIG hybrid welding process for medium thickness plate of 304 stainless steel [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2018.
韩丽梅.中厚板 304 不锈钢激光-MIG 复合焊工艺研究 [D]. 沈阳:沈阳工业大学,2018.