

船用高强钢激光-GMAW复合焊及落锤冲击性能研究

陈俊阳¹, 付娟¹, 赵勇¹, 崔卫杰¹, 陈国强²

(1. 江苏科技大学 先进焊接技术省级重点实验室, 江苏 镇江 212003;

2. 江苏扬子三井造船有限公司, 江苏 苏州 215400)

摘 要 针对8 mm Q355B船用高强钢, 用0.84、1.00 MJ/m两种热输入对其进行激光-GMAW复合焊试验, 研究两种热输入下的焊接接头组织和落锤冲击性能。结果表明: 在0.84、1.00 MJ/m两种热输入下的焊缝成形良好, 无裂纹、塌陷等缺陷; 焊接接头组织均为针状铁素体和板条贝氏体, 热影响区主要由板条马氏体和板条贝氏体组成, 随热输入的增大, 焊接接头热影响区明显增宽; 两种热输入下的焊接接头均有良好的落锤冲击性能, 接头断裂在母材处, 断口为准解理断裂, 焊接接头的冲击性能均高于母材。

关键词 激光-GMAW复合焊; 高强钢; 焊接工艺; 落锤冲击性能

中图分类号 TG406

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2023)05-0012-04

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20230920.002

Laser-GMAW hybrid welding process and drop hammer impact property of marine high-strength steel

CHEN Junyang¹, FU Juan¹, ZHAO Yong¹, CUI Weijie¹, CHEN Guoqiang²

(1. Provincial Key Lab of Advanced Welding Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;

2. Jiangsu Yangzi Mitsui Shipbuilding Co. Ltd., Suzhou 215400, China)

Abstract Two heat inputs of 0.84 MJ/m and 1 MJ/m were used to weld 8 mm Q355B marine high-strength steel by laser-GMAW hybrid welding test, and the microstructure and drop hammer impact properties of welded joint under different heat inputs were studied. The results show that the weld shaping is fine without crack and collapse under the heat inputs of 0.84 MJ/m and 1 MJ/m. The structures of welded joints are acicular ferrite and lath bainite, and the heat affected zones are mainly composed of lath martensite and lath bainite. With the increase of heat input, the heat affected zone of welded joints widens obviously. The welded joints under two heat inputs have good drop hammer impact performance. The joints break at the base material and the fracture is quasi-cleavage fracture. The impact properties of welded joints are higher than those of base materials.

Keywords laser-GMAW hybrid welding; high-strength steel; welding procedure; drop hammer impact performance

与传统的熔化极气体保护焊和激光焊相比, 激光-GMAW复合焊具有速度快、焊件变形小、焊接热影响区小、焊缝的桥接能力强、容许间隙装配大、适宜焊接的材料范围广等显著优点^[1-3]。在船舶结构的传统熔化焊中, 由于焊接缺陷、焊接残余应力和力学性能不均匀等, 使得对焊接接头的优化成为提高船舶结构性能的重要途径^[4-6], 而优化焊接工艺是接头力学性能良好的关键因素, 焊接参数主要有预热温度、热输入、层间温度等^[7-8], 其中热输入能综合地反映焊接电流、电压和焊接速度, 是决定焊接接头组织及性能的关键因素之一^[9-10]。因此选择合理的热输入可以得到综合性能良好的焊接接头, 对保证船舶焊接结构的服役安全至关重要^[11]。

目前, 我国舰船焊接结构制造还是以熔化极气体

保护焊为主, 存在焊接效率低、焊接接头抗爆炸冲击性能差等缺点。与静载荷相比, 冲击载荷作用下接头易发生局部变形, 位错组态、孪晶及绝热剪切等微结构演变, 与静载荷作用下显著不同。探明冲击载荷作用下接头的力学响应特性及失效机制, 探索焊接接头抗冲击的决定性因素是本研究的关键所在。本文作者用0.84、1.00 MJ/m两种热输入对船用钢 Q355B 进行激光-GMAW复合焊焊接试验^[12], 通过焊接工艺优化, 拟得到焊缝成形良好的对接接头, 开展接头的落锤冲击试验, 建立“焊接工艺参数—接头组织—接头冲击性能”之间的关系。

1 试验材料与方法

母材为 200 mm×150 mm×8 mm 的 Q355B 船用钢,

收稿日期: 2023-04-26; 修回日期: 2023-08-27

基金项目: 国家自然科学基金(51901087); 江苏省自然科学基金(BK20190975)

第一作者: 陈俊阳, 男, 硕士研究生。E-mail: 190419877@qq.com。

通信作者: 付娟, 女, 讲师。E-mail: fujuan@just.edu.cn。

接头形式为对接,用ER50-6 实心焊丝,材料化学成分如表 1 所示。焊接时保护气为 82%Ar(体积分数,下同)和 18%CO₂混合气。

为保证焊接一致,用搭载库卡机器人(KuKa KR16)的激光—电弧复合焊接平台进行编程自动化焊接,配以 IPG YLS-10000 激光器及福尼斯 TPS 500i 型焊机。用 0.84、1.00 MJ/m 两种热输入开展焊接试验,焊接工艺参数如表 2 所示。焊后开展对接接头的焊缝成形、组织分析及落锤冲击试验,落锤冲击试件参考标准 GB/T 228.1—2021 执行,对接接头落锤冲击试件如图 1 所示。图 1a 为对接接头落锤冲击试样三维示意图。考虑到实际工程应用,并未对对接接头中的焊缝余高进行去除。图 1b 为冲击试件二维尺寸图。试件板厚为 8 mm,加持段宽度为 100 mm,中间试验段长度为 60 mm,加持段与试验段用半径为 31 mm 的圆弧过渡,试件总长为 360 mm。

表 1 材料化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of materials(mass fraction%)

成分	Q355B	ER50-6	成分	Q355B	ER50-6
C	≤0.20	≤0.100	P	≤0.04	≤0.025
Si	≤0.55	≤0.970	S	≤0.04	≤0.032
Mn	1.00~1.60	1.125	Fe	余量	余量

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Parameters of welding process

参数	R1	R2
激光功率 P/W	6 000	6 000
离焦量 Δ/mm	0	0
焊接电流 I/A	275	295
焊接电压 U/V	26.4	27.1
焊接速度 v _w /(m·min ⁻¹)	0.8	1.0
热输入/(MJ·m ⁻¹)	1.00	0.84

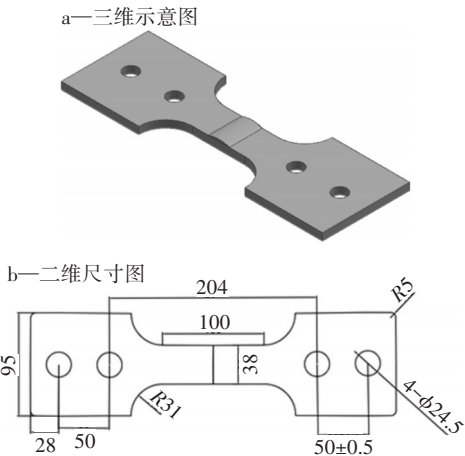


图 1 对接接头落锤冲击试件(mm)

Fig.1 Drop hammer impact test piece of butt joint(mm)

2 结果与分析

2.1 焊缝宏观形貌

图 2 为 R1-1 焊缝宏观形貌。图 3 为 R2-1 焊缝宏观形貌。由图可见,两组热输入下得到的焊缝成形均良好,未出现塌陷、裂纹等焊接缺陷。从焊缝横截面可见,形状近对称,呈酒杯状,上半部分的电弧作用区和下半部分的激光作用区过渡良好。因此,0.84、1.00 MJ/m 的热输入均能得到良好的焊缝成形。

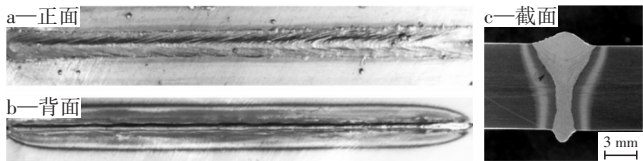


图 2 R1-1 焊缝宏观形貌

Fig.2 Morphology of R1-1 weld

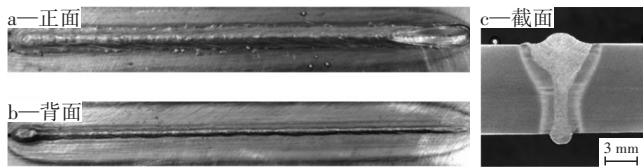


图 3 R2-1 焊缝宏观形貌

Fig.3 Morphology of R2-1 weld

2.2 对接接头落锤冲击结果与分析

针对不同热输入下的焊接接头开展落锤冲击试验,每组工艺参数下选取 4 个落锤冲击试件,得到的 8 mm 对接接头落锤冲击结果见表 3。通过多次调整落锤冲击高度,由 R1-3 和 R1-4 试验结果可知,1 MJ/m 下对接接头落锤冲击临界高度为 1 000 mm,由 R2-3 和 R2-4 试验数据可知,0.84 MJ/m 下对接接头临界冲击高度也为 1 000 mm,颈缩/断裂均发生在母材处,说明在不同热输入下,焊接接头并非薄弱区域,而在母材处,即在 0.84、1.00 MJ/m 两种热输入下,焊接结构断裂机理类似,因此仅对 R1-1 开展断口分析,R1-1 落锤冲击断口宏观和微观形貌如图 4 所示。母材断裂处的微

表 3 8 mm 对接接头落锤冲击结果

Table 3 Drop hammer impact results of 8 mm butt joint

序号	接头编号	落锤释放高度/mm	试验结果
1	R1-1	1 060	母材断裂
2	R1-2	1 030	母材断裂
3	R1-3	1 000	母材断裂
4	R1-4	990	母材颈缩
5	R2-1	950	母材颈缩
6	R2-2	980	母材颈缩
7	R2-3	990	母材颈缩
8	R2-4	1 000	母材断裂

观形貌是韧窝+准解理形貌,属于准解理断裂,且延性脊较少,所占面积小,在材料断裂时能缓解裂纹扩展,说明母材的冲击韧性较好。

图5为对接接头落锤冲击试件变形量、加速度、速度、位移与时间曲线。其中图5a为R2-1试件在950 mm高度下冲击接头的实际变形量,为39.5 mm,加速度峰值为356.87 m/s²。图5b为R1-2试件在1 030 mm

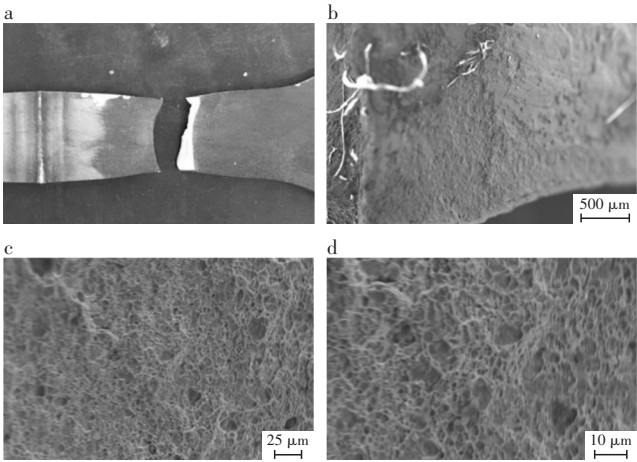


图4 R1-1落锤冲击断口宏观和微观形貌

Fig.4 Macroscopic and microscopic fracture morphology of R1-1 under drop hammer impact

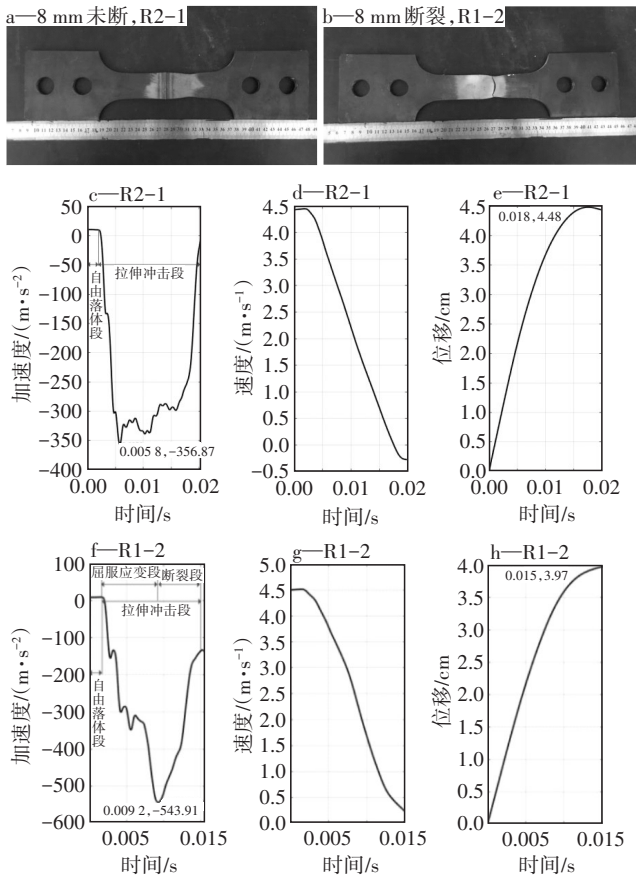


图5 对接接头落锤冲击试件变形量、加速度、速度、位移与时间曲线
Fig.5 Deformation, acceleration, velocity, displacement and time curve of butt joint impact specimen

高度下冲击接头的实际变形量。分析图5c~h认为,当冲击头的加速度下降时冲击头开始接触试件,当加速度重新增至重力加速度时试件受冲击过程结束。冲击过程试件变形可分为自由落体阶段与冲击受力阶段(图5c~e)。试件接头断裂时,冲击受力阶段又可分为屈服变形阶段与断裂阶段,和屈服变形阶段相比,接头断裂阶段所用时间明显减小(图5f~h)。

2.3 接头组织及显微硬度分析

图6为R1-1焊接接头的显微组织。落锤冲击试验的断裂/颈缩位置均在母材处,说明接头组织对工件整体结构的性能影响不大,影响工件整体结构性能的为母材,由图6a可知,焊缝组织主要是针状铁素体和板条状贝氏体,韧性较好,先共析铁素体和板条铁素体等脆性组织含量少,同时淬硬组织含量也较少,生成马氏体的倾向小。由图6b可知,热影响区组织主要是板条状马氏体和板条状贝氏体,因此热影响区部分的强度、硬度较高。

热影响区为焊缝的薄弱区,因此,有必要研究热输入对热影响区的影响。图7为不同热输入下的热影响区的显微组织。由图可见,随热输入的增大,焊接接头热影响区明显增宽。

在焊接过程中,接头在焊接热循环作用下各区域受到的热输入有所差别,因此会发生不同的相变而生成不同的显微组织,呈现出接头硬度分布的差异。分别对电弧作用区焊缝、电弧作用区热影响区、激光作用区焊缝、激光作用区热影响区和母材进行维氏硬度测试,硬度测试点示意图如图8所示。图9为R1-1焊接接头不同位置的显微硬度分布图。

由图9可以看出,焊接接头的硬度分布以焊缝为中心,呈“M”形对称分布。母材硬度约为175HV,电弧作用区与激光作用区硬度分布均为热影响区>焊缝>母材,其中电弧作用区的热影响区硬度最大值为402HV,焊缝的硬度最大值为350HV。由于热影响区组织主要为板条马氏体和板条贝氏体,组织硬而脆,导致硬度最大值出现在热影响区。激光作用区的焊缝硬度约为300HV,热影响区硬度约为310HV。

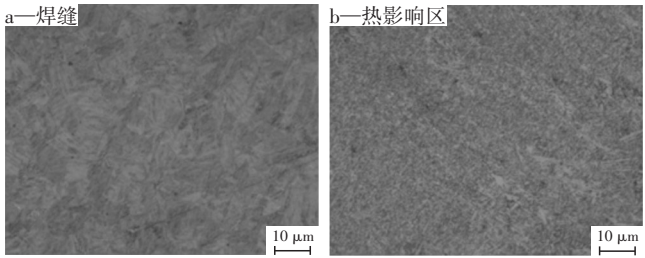


图6 R1-1焊接接头的显微组织
Fig.6 Microstructure of R1-1 weld joint

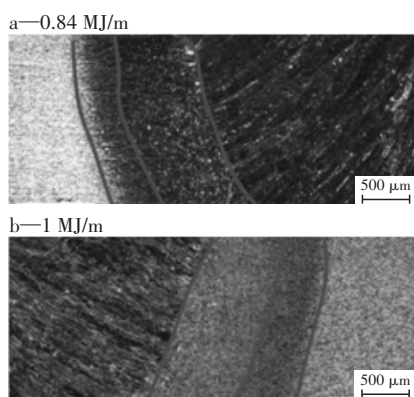


图7 不同热输入下的热影响区的显微组织

Fig.7 Microstructure of heat affected zone under different heat inputs

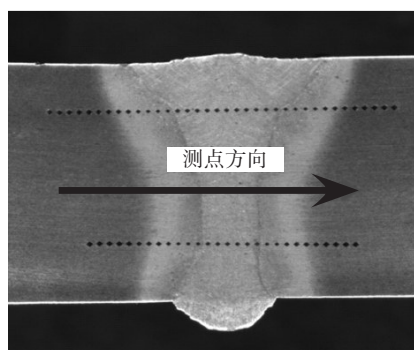


图8 硬度测试点示意图

Fig.8 Schematic diagram of hardness test point

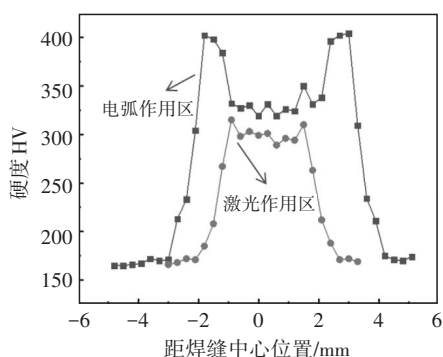


图9 R1-1焊接接头不同位置显微硬度分布图

Fig.9 Microhardness distribution diagram at different positions of R1-1welded joints

3 结论

1) 在0.84、1.00 MJ/m的热输入下用激光-GMAW复合焊焊接Q355B船用钢,得到的焊缝成形良好,无裂纹、塌陷等焊接缺陷。

2) 分别用0.84、1.00 MJ/m的热输入激光-GMAW复合焊焊接Q355B,焊接接头受到落锤冲击时,母材先断裂,断裂形式为准解理断裂,焊接接头的冲击性能均高于母材。

3) 焊缝组织主要为针状铁素体和板条状贝氏体,热影响区组织主要为板条状马氏体和板条状贝

氏体。

4 参考文献

- [1] 周丹,郭计山,喻亮,等. 10 mm船用钢MAG焊及激光电弧复合焊的对比研究[J]. 应用激光,2021,41(1):99-106.
ZHOU Dan, GUO Jishan, YU Liang, et al. Comparative study on MAG welding and laser-arc hybrid welding of 10 mm marine steel[J]. Applied Laser, 2021, 41(1): 99-106. (in Chinese)
- [2] 符成学,马照伟,雷小伟,等. 激光-电弧复合焊接技术现状及其在钛合金领域的研究进展[J]. 材料开发与应用,2021,36(4):82-88.
FU Chengxue, MA Zhaowei, LEI Xiaowei, et al. Current status of laser-arc hybrid welding technology and its research progress in the field of titanium alloy[J]. Development and Application of Materials, 2021, 36(4): 82-88. (in Chinese)
- [3] 陈鹏宇,钟毅. 船用A36钢激光-GMAW复合焊接工艺[J]. 造船技术,2020,4:59-61.
CHEN Pengyu, ZHONG Yi. Welding technology of laser-GMAW hybrid welding for marine steel A36[J]. Marine Technology, 2020, 4: 59-61. (in Chinese)
- [4] 左波. 海底石油管线体积型缺陷ECA评估[D]. 天津:天津大学,2004.
ZUO Bo. Engineering critical assessment of non-planar flaws in offshore pipeline[D]. Tianjin: Tianjin University: 2004. (in Chinese)
- [5] 董立灿. 浅析船舶焊接与结构设计优化[J]. 中国设备工程, 2022, 3: 110-111.
DONG Lican. Analysis of ship welding and structural design optimization[J]. China Plant Engineering, 2022, 3: 110-111. (in Chinese)
- [6] 李佳男,蒋亚勇,李涛. 大型船舶结构焊接变形固有应变法预测研究[J]. 船舶物资与市场,2021,29(11):39-40.
LI Jianan, JIANG Yayong, LI Tao. Research on prediction of natural strain method for welding deformation of large ship structures[J]. Marine Equipment / Materials & Marketing, 2021, 29(11): 39-40. (in Chinese)
- [7] 张亚运. 海洋工程用芯焊丝及接头组织与性能研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2018.
ZHANG Yayun. Study on flux-cored wire for offshore engineering and it's welded joints[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [8] 朱健华,何建峰. 基于焊缝3D检测系统应用的超高强钢焊接工艺优化[J]. 宝钢技术,2020,4:51-55.
ZHU Jianhua, HE Jianfeng. Welding process optimization of ultra-high strength steel based on the application of welding seam 3D detection system[J]. Baosteel Technology, 2020, 4: 51-55. (in Chinese)
- [9] 魏金山,齐彦昌,彭云,等. 热输入对800 MPa级超厚板窄间

激光电弧复合增材制造钛合金的组织 and 性能研究

付娟¹, 钱瑞鹏¹, 赵勇¹, 郭纪龙¹, 陈国强²

(1. 江苏科技大学 先进焊接技术省级重点实验室, 江苏 镇江 212003;

2. 江苏扬子三井造船有限公司, 江苏 苏州 215400)

摘要 为研究热输入对墙体宏观形貌、显微组织及力学性能的影响, 用激光-MIG 电弧复合热源对 TC11 钛合金丝材进行增材制造。结果表明: 墙体柱状晶内组织都以条状 α 集束和 $\alpha+\beta$ 集束组织为主, 存在明显的 β 相界, 但堆积速度小的柱状晶中马氏体 α' 相尺寸较大; 在堆积层重熔区中不同区域的初生 α 相和 $\alpha+\beta$ 网篮组织尺寸差异显著, 堆积速度较大时的组织更细密; 在墙体边界, 堆积速度大时存在一定针状马氏体 α' 相, 而堆积速度小时针状马氏体相对较少; 热输入大的墙体抗拉强度比热输入小的提高 2%, 伸长率和断面收缩率相近, 且水平方向上墙体硬度更高, 塑性更好。

关键词 激光电弧复合增材; TC11 钛合金; 显微组织; 力学性能

中图分类号 TG406

文献标志码 A

文章编号 1004-244X(2023)05-0016-05

DOI: 10.14024/j.cnki.1004-244x.20230919.006

Microstructure and properties of laser-arc hybrid additive manufacturing titanium alloy

FU Juan¹, QIAN Ruipeng¹, ZHAO Yong¹, GUO Jilong¹, CHEN Guoqiang²

(1. Provincial Key Lab of Advanced Welding Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;

2. Jiangsu Yangzi Mitsui Shipbuilding Co. Ltd., Suzhou 215400, China)

Abstract In order to study the effect of heat input on the macroscopic morphology, microstructure and mechanical properties of the additive wall, TC11 titanium alloy wire was additive manufactured by laser-arc hybrid heat source. The results show that microstructures of the wall are mainly composed of strip α cluster and $\alpha+\beta$ cluster, and there is an obvious β -phase boundary, but the size of martensitic α' -phase is larger in the columnar microstructures with low accumulation rate. There are significant size differences between the primary α -phase and $\alpha+\beta$ basket structure in different areas of the remelting zone of the accumulation layer. The structure is finer when the accumulation rate is higher. There is a certain acicular martensite α' -phase at the wall boundary when the accumulation rate is higher. The acicular martensite is relatively small when the accumulation velocity is low. The hardness of the wall with small heat input is higher than that of the wall with large heat input. The tensile strength of the wall decreases slightly, and the elongation and section expansion rate are similar.

Keywords laser-arc hybrid additive manufacturing; TC11 titanium alloy; microstructure; mechanical property

收稿日期: 2023-04-26; 修回日期: 2023-08-14

基金项目: 国家自然科学基金(51901087); 江苏省自然科学基金(BK20190975)

第一作者: 付娟, 女, 硕士, 讲师。E-mail: fujuan@just.edu.cn。

通信作者: 钱瑞鹏, 男, 硕士研究生。E-mail: 2945942163@qq.com。

焊缝金属组织和性能的影响[J]. 焊接学报, 2012, 33(6): 31-34.

WEI Jinshan, QI Yanchang, PENG Yun, 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. (in Chinese)

[10] 牛宽. 轮式装甲车体非均匀焊接裂纹修复方法[J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44(6): 107-110.

NIU Kuan. Repair method of nonuniform welding crack for wheeled armored car body [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2021, 44(6): 107-110. (in Chinese)

[11] 蒋勇, 郭栖利, 梁晨, 等. 焊接热输入对低碳贝氏体金属粉

芯焊丝(CTH120CK4)熔敷金属组织和力学性能的影响[J]. 电焊机, 2021, 51(6): 32-40.

JIANG Yong, GUO Xili, LIANG Chen, et al. Effect of welding heat input on microstructure and mechanical properties of deposited metal for a low carbon bainite metal powder cored wire [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(6): 32-40. (in Chinese)

[12] 余杰, 蔡创, 谢佳, 等. 基于响应面法的低碳贝氏体钢激光-电弧复合焊接工艺参数优化[J]. 中国激光, 2022, 49(16): 179-188.

YU Jie, CAI Chuang, XIE Jia, et al. Process parameter optimization for laser-arc hybrid welding of low-carbon bainite steel based on response surface methodology [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(16): 179-188. (in Chinese)