

引用格式:曹世杰,毕学松,李志波,等. Q345B 钢 MAG 焊与激光-MAG 复合焊对比研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53(17): 38-41.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20221042

http://www.rjgy.net rjgy@vip.163.com

# Q345B 钢 MAG 焊与激光-MAG 复合焊对比研究

曹世杰<sup>1</sup>, 毕学松<sup>2</sup>, 李志波<sup>2</sup>, 侯艳喜<sup>2</sup>

(1. 唐山松下产业机器有限公司, 河北 唐山 063020; 2. 唐山开元焊接自动化技术研究所有限公司, 河北 唐山 063000)

**摘要:**对 4 mm 和 8 mm 厚的 Q345B 试板分别进行 MAG 焊和激光-MAG 复合焊的工艺试验研究,分析焊缝成形,检测焊接接头宏观形貌、拉伸性能和弯曲性能。结果显示:相对于常规 MAG 焊,激光-MAG 复合焊能够实现单面焊背面无垫板的自由成形;焊接速度显著提高,焊接作业效率提高一倍以上;焊材消耗减少,仅为 MAG 焊的 22%~27%;焊接热输入小,焊后工件变形显著减小;焊接接头的拉伸和弯曲性能合格,满足实际工程应用要求。

**关键词:**MAG 焊;激光-MAG 复合焊;单面焊双面成形;焊接工艺

中图分类号: TG456.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2024)17-0038-04

## Comparative Study on MAG Welding and Laser-MAG Hybrid Welding of Q345B Steel

CAO Shijie<sup>1</sup>, BI Xuesong<sup>2</sup>, LI Zhibo<sup>2</sup>, HOU Yanxi<sup>2</sup>

(1. Panasonic Welding Systems (Tangshan) Co., Ltd., Tangshan 063020, China; 2. Tangshan Kaiyuan Welding Automation Technology Institute Co., Ltd., Tangshan 063000, China)

**Abstract:** MAG welding and laser-MAG hybrid welding process tests were carried out respectively for 4 mm and 8 mm thick Q345B test plates, the weld forming was analyzed and the macromorphology, tensile property and bending property of the welded joints were detected. The results show that compared with the conventional MAG welding, the laser-MAG hybrid welding can realize one-side welding and back side free forming without back plate, the welding speed is significantly improved and the welding efficiency is doubled; the consumption of welding materials is only about 22%~27% of that of MAG; the welding heat input is small, and the workpiece deformation after welding is significantly smaller; the tensile and bending properties of the welded joint are qualified and meet the requirements of practical engineering application.

**Key words:** MAG welding; laser-MAG hybrid welding; one-side welding double-side forming; welding technology

焊接是造船行业的关键环节之一,焊接工时约占船舶建造总工时的三分之一,其作业质量和生产效率直接影响船舶建造周期、生产成本和船舶综合质量<sup>[1-2]</sup>。目前,大部分常规焊接方法和技术在船舶建造过程中都有应用,如手工电弧焊(SMAW)、MIG/MAG 焊、CO<sub>2</sub> 焊、埋弧焊、TIG 焊等<sup>[3-5]</sup>,这些焊接方法在特定焊接条件下各有优势,但普遍存在焊接效率低、热输入大、焊后变形大、焊接接头质量稳定性差、自动化程度低等问题。随着船舶制造行业

的高速发展,对优质高效的焊接新技术需求越来越强烈<sup>[6-7]</sup>。

激光电弧复合焊是将激光热源与电弧热源通过旁轴或同轴的方式相结合作用在同一熔池,形成一种高效复合热源的焊接方法,是一种新型、高效、优质、节能的焊接方法<sup>[4-5]</sup>。在造船行业,德国 Meyer-Werft 船厂最早研究激光复合焊接的工程化应用问题,2001 年底建立了船用甲板和加强梁的激光电弧复合焊接试验生产线,成为激光复合焊接生产线应用最早、最成功的国家<sup>[6]</sup>。之后,德国 Kvaerner Warnow 船厂和 Kvaerner Masa 船厂等也改装应用了激光-电弧复合焊设备<sup>[7]</sup>。

国内学者针对激光电弧复合焊技术也进行了大量研究。严春妍等<sup>[8]</sup>分析复合热源能量分布,研究了 S355 钢激光电弧复合焊接头的显微组织和残余应力。冯聪等<sup>[9]</sup>通过大量实验,获得了激光电弧复合焊单面焊双面成形工艺及工况适应能力。周丹等<sup>[10]</sup>对

收稿日期:2022-04-11

基金项目:河北省创新能力提升计划项目(20567601D);河北省科技研发平台建设专项(215676109H)

作者简介:曹世杰(1981-),男,河北唐山人,工程师,主要从事自动化设备和焊接工艺研发;E-mail:csj1981@126.com

通讯作者:毕学松(1983-),男,河北唐山人,高级工程师,博士,主要从事焊接新工艺、新方法和焊接装置的研发;

E-mail:bixuesong\_ky@126.com

比分析了船用钢 MAG 焊和激光电弧复合焊焊接接头性能特点。同时,国内主流造船企业,如外高桥造船厂、招商重工船厂、广船国际、渤海造船厂、沪东船厂等均引进了国外设备或独立建成了激光电弧工作站,将激光电弧复合焊技术引入到船体制造中<sup>[11-12]</sup>。本文通过试验对比研究 MAG 焊和激光 -MAG 复合焊焊缝成形特点,为激光复合焊技术在造船及相关行业的工程应用提供试验数据。

## 1 试验设备、材料及方法

### 1.1 试验设备

试验设备主要包含松下 YA-2FA261 机器人、YD-500GL5HN 数字 MAG 电源、配套焊枪和送丝机、光纤激光器、大功率激光焊接头、水冷装置、工装平台及控制系统等,如图 1 所示。激光器最大功率为 6kW、光纤芯径为 200 $\mu$ m、激光斑点直径为 0.4mm。激光头和 MAG 焊枪通过夹持装置固定在一起,焊接时沿焊接方向激光在前,形成激光 -MAG 复合焊



图 1 试验设备  
Fig.1 Test equipment

接头,在机器人驱动下进行焊接,可进行单独 MAG 焊、单独激光焊以及激光 -MAG 复合焊试验。

### 1.2 试验材料

焊接试板尺寸为 150mm $\times$ 300mm $\times$ 4mm 和 150mm $\times$ 300mm $\times$ 8mm,其中 4mm 试板采用 I 形坡口,8mm 试板采用 V 形和 Y 形坡口;为确保获得全焊透焊缝,MAG 焊时预留 2mm 间隙,背面加垫板强制成形,激光 -MAG 复合焊不留间隙,背面自由成形,坡口示意图如图 2 所示。试板材质为 Q345B,焊丝牌号为 ER50-6,直径为 1.2mm,保护气采用 20%CO<sub>2</sub>+80%Ar 混合气。试板及焊丝的主要化学成分和力学性能见表 1。

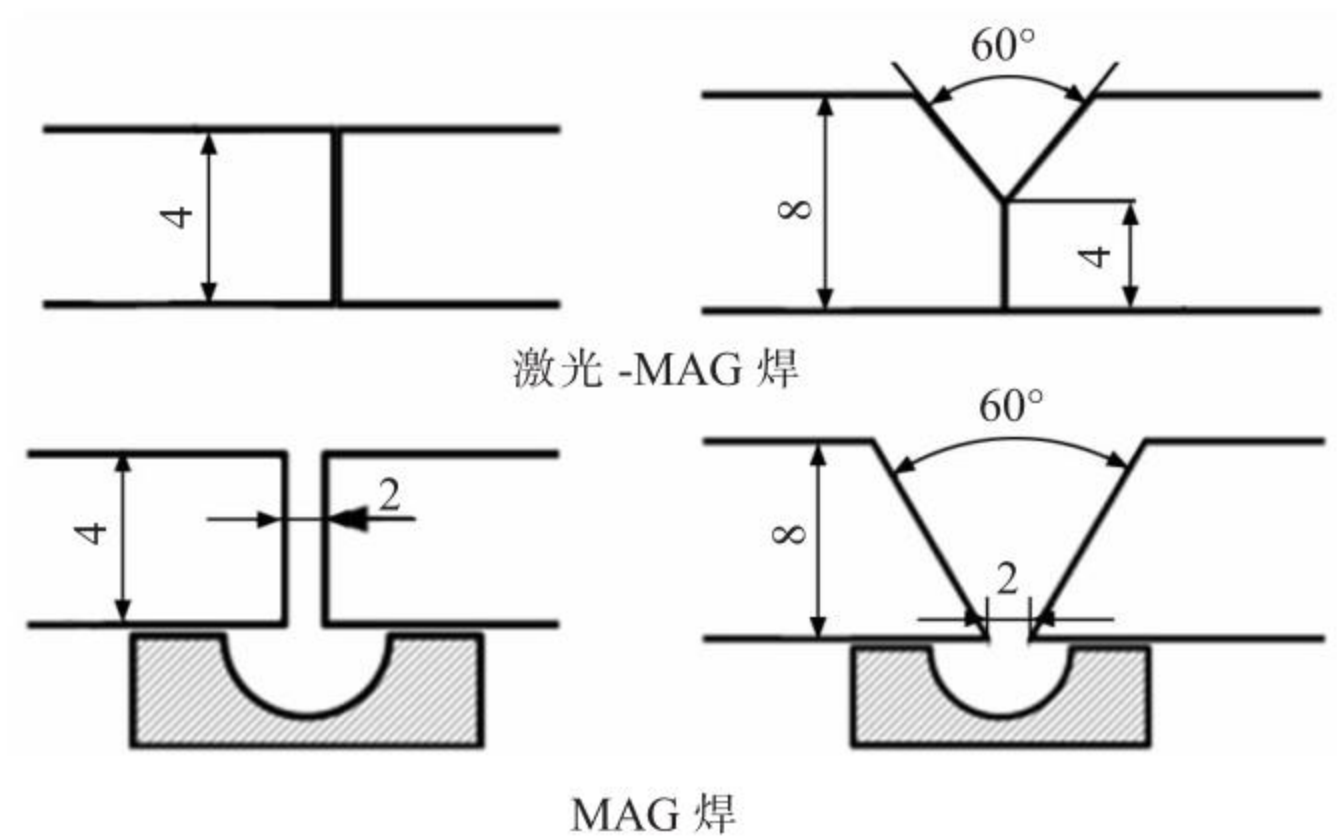


图 2 焊接坡口示意图(mm)

Fig.2 Schematic diagram of welding grooves (mm)

### 1.3 试验方法

进行单独 MAG 焊和激光 -MAG 复合焊工艺试验研究,获得焊接过程稳定,焊缝外观成形良好的工艺参数,见表 2,并对焊接接头外观及变形情况等观察分析。制备检测试样,在 WDW-300E 微机控制电

表 1 试板及焊丝的化学成分(质量分数,%)和力学性能

Tab.1 Chemical composition(wt%) and mechanical properties of test plate and welding wire

材料	C	Si	Mn	P	S	Cu	$R_m$ /MPa	A(%)
Q345B 试板	$\leq 0.24$	$\leq 0.55$	$\leq 1.6$	$\leq 0.035$	$\leq 0.035$	$\leq 0.40$	470~630	20
ER50-6 焊丝	0.06~0.15	0.80~1.15	1.4~1.85	$\leq 0.025$	$\leq 0.035$	$\leq 0.025$	$\geq 500$	$\geq 22$

表 2 焊接工艺参数

Tab.2 Welding process parameters

焊接方法	板厚/mm	层数	激光功率/kW	电弧电流/A	送丝速度/(m $\cdot$ min <sup>-1</sup> )	焊接速度/(mm $\cdot$ min <sup>-1</sup> )	热输入/(J $\cdot$ cm <sup>-1</sup> )	熔敷金属/(g $\cdot$ cm <sup>-1</sup> )
MAG 焊	4	1	-	260	8.5	600	0.77	1.22
		8	1	260	8.5	500	0.91	2.97
	2	-	300	10.4	600	0.96		
激光 -MAG 复合焊	4	1	3.2	180	5.3	1500	0.27	0.28
	8	1	3.8	280	9.6	1000	0.72	0.83

注:热输入为不考虑热损失情况下的理论计算值;熔敷金属为不考虑焊接飞溅损失的量

子万能试验机上检测焊接接头的拉伸性能和弯曲性能;依据 GB/T 26955—2011《金属材料焊缝破坏性试验 焊缝宏观和微观检验》,制取焊缝横截面试样,经砂纸打磨抛光后,利用 5%的硝酸酒精进行腐蚀,之后利用徕卡连续变倍体式显微镜分析焊缝截面形貌;最后对工艺参数和焊接接头性能进行对比分析。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 焊缝成形

试验发现,激光 -MAG 复合焊能够实现背面无垫板情况下的自由成形,而单独 MAG 焊背面不加垫板时,十分容易出现焊透不稳定或焊漏等现象,因此本试验在 MAG 焊时采用铜垫板强制成形。通过大量工艺试验,获得焊接过程稳定,焊缝成形良好的工艺参数,见表 2。其中 4mm 厚试验板一层一道完成焊接;8mm 试验板 MAG 需要两层两道完成焊接,激光 -MAG 复合焊一层一道即能完成焊接。

试验结果显示,与单独 MAG 焊相比,激光 -MAG 复合焊的焊接速度提高一倍以上,可提高焊接生产效率;通过实际送丝速度计算单位焊缝长度的熔敷金属量,激光 -MAG 复合焊的熔敷金属质量仅约为 MAG 焊的 22%~27%,可以显著减少焊材消耗量,降低焊接耗材成本;激光 -MAG 复合焊焊接热输入大幅减小,有利于提高焊缝综合性能,并且焊后变形量显著减小。焊缝完全冷却后,在自由状态下对比激光 -MAG 复合焊与 MAG 焊试件的变形程度。以 4mm 板厚为例,焊后试件横、纵两个方向变形量测量照片如图 3 所示。激光 -MAG 复合焊焊后试件基本无变形,而 MAG 焊两个方向变形都比较明显,最大可达到 9mm。激光 -MAG 复合焊可明显减小工件变形。

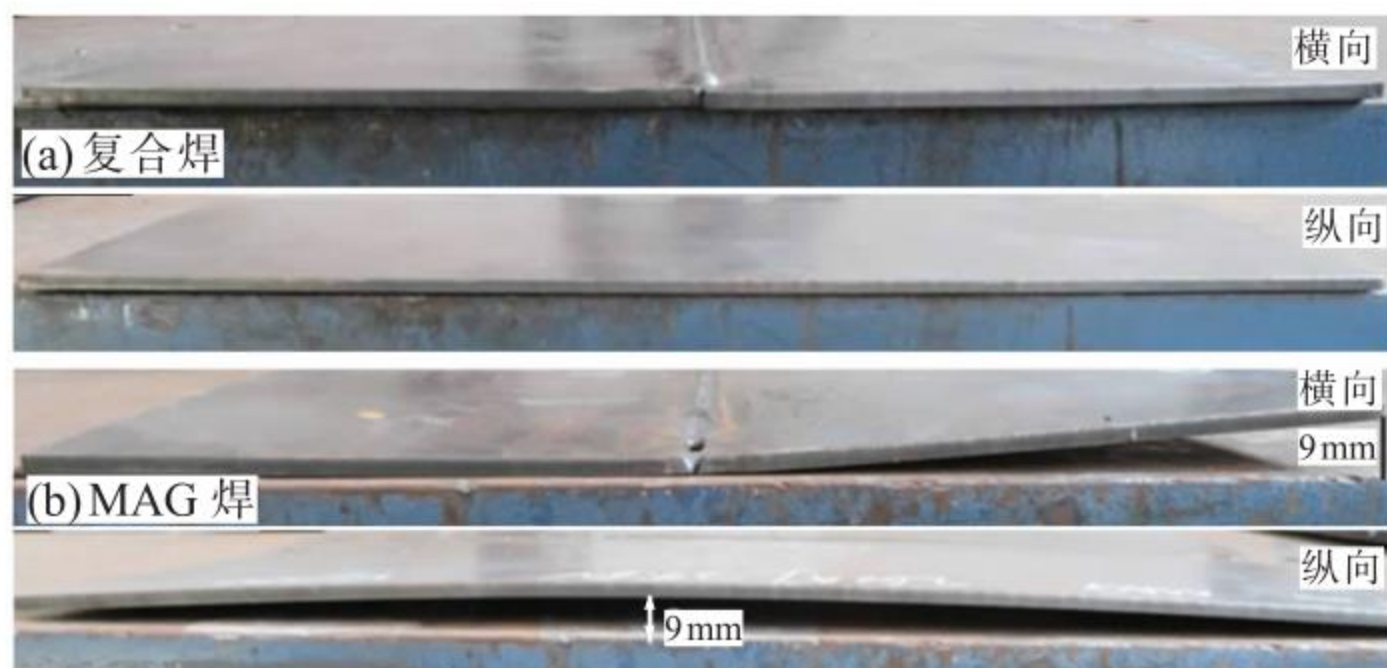


图 3 4 mm 板厚试件焊后变形量测量照片  
Fig.3 Test photos of deformation of 4 mm thick specimens after welding

目视检测焊接接头,两种焊接方法焊缝表面和背面成形良好且均匀一致,均能满足实际生产要求。

图 4、5 分别为 MAG 焊和激光 -MAG 复合焊的焊缝照片。可以看出,MAG 焊的正面和背面熔宽比激光 -MAG 复合焊的大。通过金相图像分析软件测量两种焊缝的热影响区和焊缝区面积,以 4mm 板厚为例,激光 -MAG 复合焊热影响区和焊缝区面积分别为 6.1、10.9mm<sup>2</sup>;而 MAG 焊焊缝热影响区和焊缝区面积较大,高达 12.2、36.5mm<sup>2</sup>,这主要是由于 MAG 焊热输入较大和熔覆金属较多造成的。

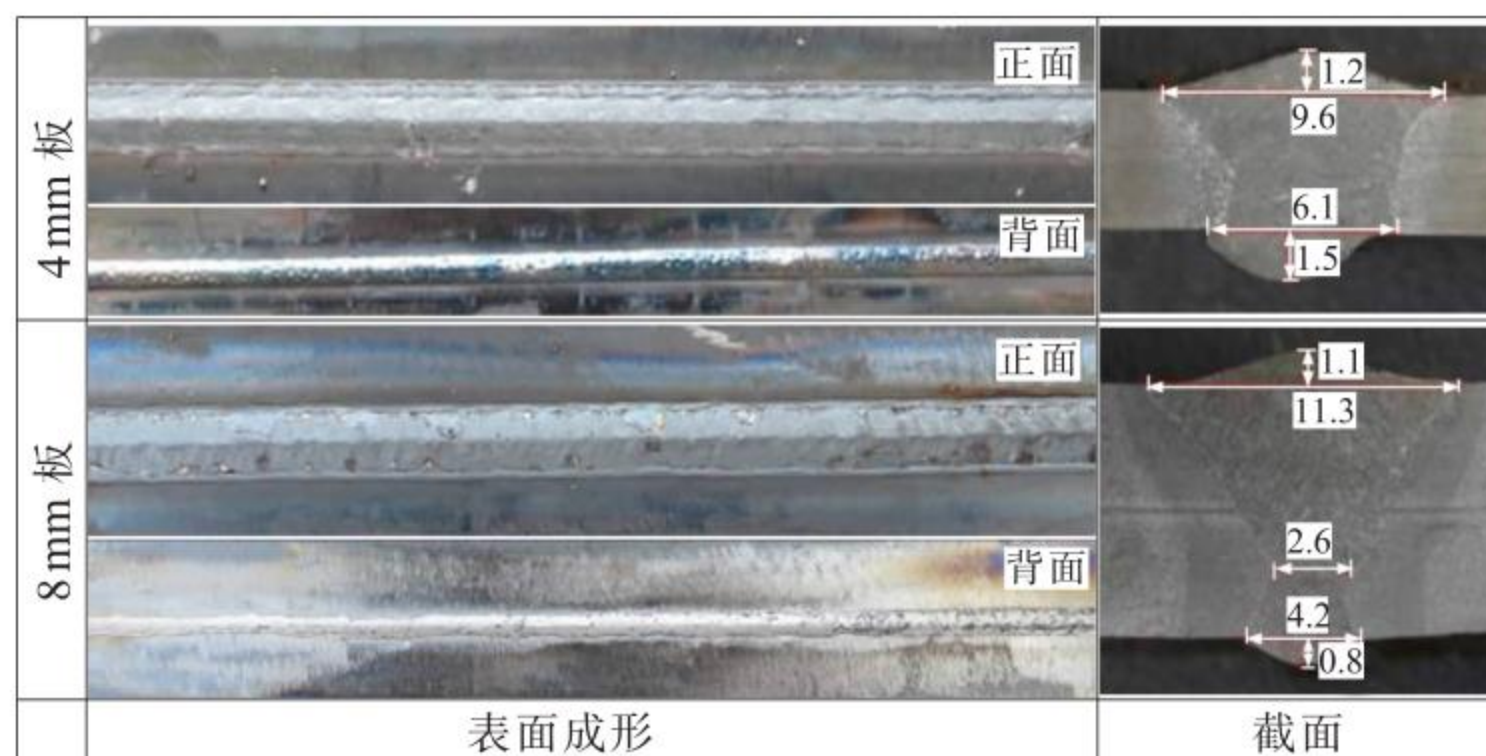


图 4 MAG 焊接头焊缝照片  
Fig.4 Weld photos of MAG welding joints

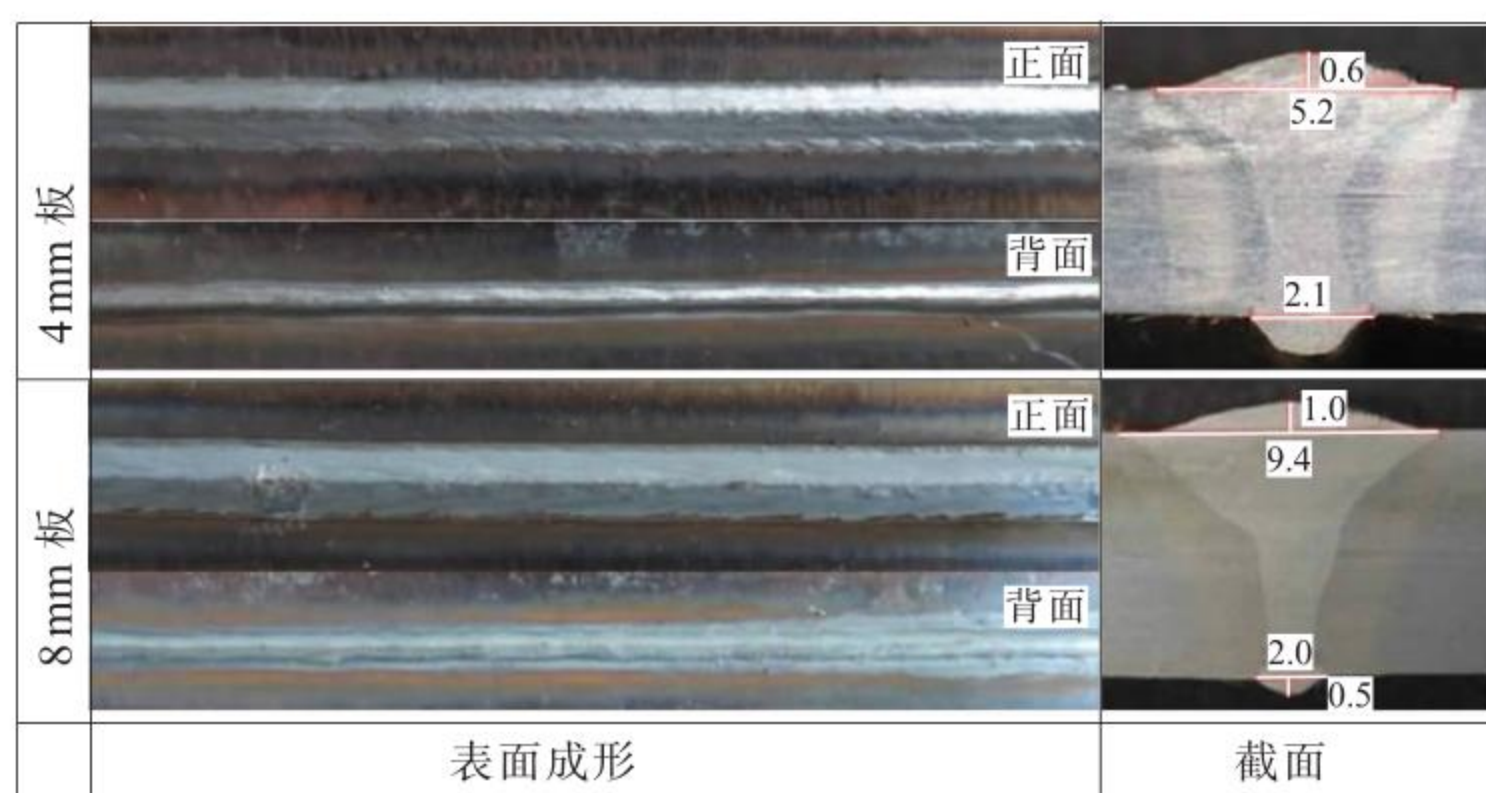


图 5 激光 -MAG 复合焊接头焊缝照片  
Fig.5 Weld photos of laser-MAG hybrid welding joints

### 2.2 焊接接头拉伸性能

参考标准 GB/T 228.1—2010《金属材料室温拉伸试验方法》和 GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》制备试样,每条焊缝分别取两个试件进行检测,结果见表 3。MAG 焊和激光 -MAG 复合焊拉伸试样的断裂位置均为母材,其抗拉强度在 482~495 MPa 之间,为母材自身的抗拉强度。这表明两种焊接方法焊接接头的抗拉强度都大于母材,满足实际工程应用要求。

### 2.3 焊接接头弯曲性能

弯曲性能表征承受弯曲塑性变形的能力,参考 GB/T 232—2010《金属材料弯曲试验方法》和 GB/T 2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》制备试样,每条焊缝分别做 2 个面弯和 2 个背弯检测,弯曲角度为 180°。结果显示,MAG 焊和激光 -MAG 复合焊的

表 3 拉伸检测结果  
Tab.3 Tensile test results

编号	焊接方法	板厚 /mm	抗拉强度 $R_m$ /MPa	断裂位置及特性	拉伸试样照片
1	MAG 焊	4	488	母材 / 韧断	
2		4	482	母材 / 韧断	
3		8	491	母材 / 韧断	
4		8	484	母材 / 韧断	
5	激光 -MAG 复合焊	4	495	母材 / 韧断	
6		4	486	母材 / 韧断	
7		8	493	母材 / 韧断	
8		8	487	母材 / 韧断	

所有弯曲试样外表面均未发现可见裂纹, 弯曲性能检测结果合格, 典型照片如图 6 所示。



图 6 典型弯曲试样照片

Fig.6 Photos of typical bending specimens

对以上试验结果进行对比分析可知, 相对于常规 MAG 焊, 激光 -MAG 复合焊技术能够实现背面无垫板情况下的单面焊双面成形; 其焊接效率提高一倍以上, 热输入更小, 焊后变形小; 焊接坡口更小, 相同板厚和材质情况下, 所需焊丝量显著减少, 详细对比结果见表 4。另外, MAG 焊和激光 -MAG 复合焊在焊接长直焊缝时, 所需设备配置, 如机器人系统、跟踪控制系统、变位装置等基本相同<sup>[12]</sup>, 只是增加了激光器和激光头的投入。随大功率激光器技术和设备应用的不断成熟, 激光复合焊设备投入成本会逐步减小。

表 4 工艺参数及接头性能对比结果

Tab.4 Comparative results of process parameters and joint performance

参数	4 mm 板		8 mm 板	
	MAG	复合焊	MAG	复合焊
坡口	I 形(2 mm 间隙)	I 形(无间隙)	V 形	Y 形
焊接效率 / $(s \cdot m^{-1})$	100	40	220	60
热输入 / $(kJ \cdot cm^{-1})$	0.77	0.27	1.87	0.72
变形量	大	小	较大	小
单面焊背面自由成形	否	是	否	是
填充量 / $(g \cdot cm^{-1})$	1.22	0.28	2.97	0.83
拉伸 / 弯曲性能	合格	合格	合格	合格

### 3 结论

(1) 与常规 MAG 焊相比较, 激光 -MAG 复合焊能够实现单面焊背面无垫板的自由成形, 焊接效率提高一倍以上, 节省焊接了材料, 焊接材料仅为 MAG 焊的 22%~27%, 显著减少焊接变形。

(2) 焊接接头拉伸试样断裂位置位于母材, 弯曲试验未发现可见裂纹, 满足实际工程应用需求。综合分析, 激光 -MAG 复合焊技术在造船行业等许多领域, 都具有广泛的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 陈峰, 王凯, 江泽新, 等. 船用高强钢焊接技术的研究现状与展望[J]. 精密成形工程, 2020, 12(4): 65-75.
- [2] 高健. AH36 船舶钢激光-电弧复合焊工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [3] Chiocca A, Soulié F, Deschaux-Beaume F, et al. Study of the effect of growth kinetic and nucleation law on grain structure simulation during gas tungsten arc welding of Cu-Ni plate[J]. Welding in the World, 2019, 63: 887-901.
- [4] Zeng Huilin, Xu Yuanbin, Wang Changjiang, et al. Research on laser-arc hybrid welding technology for long-distance pipeline construction[J]. China Welding, 2018, 27(3): 53-58.
- [5] 刘浩东, 戴京涛. 激光焊接技术的应用研究进展与分析[J]. 电焊机, 2022, 52(1): 95-102.
- [6] 赵耀邦, 成群林, 徐爱杰, 等. 激光-电弧复合焊接技术的研究进展及应用现状[J]. 航天制造技术, 2014(4): 11-14.
- [7] 赵勇杰, 莫崇君, 等. 舰船激光-电弧复合焊的应用技术研究[J]. 广东造船, 2020, 39(6): 75-77.
- [8] 严春妍, 易思, 张浩, 等. S355 钢激光 -MIG 复合焊接头显微组织和残余应力[J]. 焊接学报, 2020, 41(6): 12-18.
- [9] 冯聪, 马瑞芳, 朱加雷, 等. 激光 -MAG 电弧复合焊接单面焊双面成型工艺[J]. 电焊机, 2017, 47(12): 104-108.
- [10] 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.
- [11] 郑小东, 李洛凡, 李宁. 激光复合焊工艺参数选择[J]. 船海工程, 2021, 50(2): 98-101.
- [12] 雷振, 徐良, 徐富家, 等. 激光-电弧复合焊接技术国内研究现状及典型应用[J]. 焊接, 2018(12): 1-6. 