船用11mm厚AH36钢激光-电弧复合焊接工艺研究

师金凤，伍道亮，张辉，赵倩文，屈江艳
招商局重工（江苏）有限公司　江苏海门　226116

摘要：采用激光-电弧复合焊接方法，以ER70S-6焊丝为填充材料，对船用11mm厚AH36钢进行焊接。分析焊接速度、激光功率及送丝速度对焊缝成形的影响，得出合适的焊接参数，并通过对焊接接头进行无损检测，以及拉伸、弯曲、宏观、冲击和硬度试验，研究了焊接接头力学性能。结果表明：在确定的焊接参数下，船用11mm厚AH36钢激光-电弧复合焊接焊缝正反面成形好，抗拉强度为520MPa，断裂于母材位置，焊缝与母材熔合良好，接头焊缝、熔合线、熔合线＋2mm、熔合线＋5mm位置平均冲击吸收能量为101～221J，接头母材、热影响区、熔合线及焊缝硬度为155～342HV，满足ISO相关标准和中国船级社规范要求。

关键词：激光-电弧复合焊接；焊接接头；力学性能

Research on the laser-arc hybrid welding procedure for 11mm AH36 ship steel

SHI Jinfeng, WU Daoliang, ZHANG Hui, ZHAO Qianwen, QU Jiangyan
China Merchants Heavy Industry (Jiangsu) Co., Ltd., Haimen 226116, Jiangsu, China

Abstract: 11mm AH36 ship steel was welded by laser-arc hybrid welding procedure with ER70S-6 filler material. Effects of welding speed, laser power and wire feed rate on the welding formation were studied. And the optimum technological parameters were obtained. Mechanical properties of welded joint were also studied by means of nondestructive testing and mechanical properties test. The result indicated that the both sides weld were well formed with the suitable technological parameters. And tensile strength of weld joint was 520MPa. The fracture occurred in the base metal. Weld metal and base metal fusion well. The average impact value of weld metal, fusion line, fusion line + 2mm, fusion line + 5mm was 101～221J. The hardness of base metal, heat affected zone, fusion line, weld metal was 155～342HV, which met ISO and China classification society standard.

Keywords: laser-arc hybrid welding; welded joint; mechanical properties

1　序言

船舶焊接是现代造船模式中的关键技术之一。随着造船行业和焊接技术不断发展，国内许多船厂正在或即将开始激光焊方面的尝试。作为一种优质高效的焊接技术之一，激光-电弧复合焊接集众多优点于一身：其采用激光与电弧相结合，利用激光深熔能力和电弧的搭桥能力，可真正实现单面焊接双面成形，减少了片体翻身和吊耳的焊接；该种工艺充分发挥了激光焊和电弧焊的优势，又弥补了各自的不足，使激光和电弧的耦合达到“1＋1＞2”的效果，从而获得优异的综合性能；通过采用激光-电弧复合焊接工艺，其焊接热输入较小，能较大程度地减少焊接变形量，从而提高了焊接质量和生产工艺性，且焊接速度快，大大提高了焊接效率[1，2]。

本文针对船用11mm厚AH36钢，采用激光-电弧复合焊接方法，以ER70S-6焊丝为填充材料，进行了焊接试验。分析了焊接速度、激光功率、送丝速度对焊缝成形的影响，得出合适的焊接参数。并通过对焊接接头进行无损检测，以及拉伸、弯曲、宏观、冲击和硬度试验，研究了焊接接头力学性能，为在工业生产中推广激光-电弧复合焊接船用钢提供了实践经验。

2 试验材料及设备

试验采用厚度为11mm的AH36船用钢，交货状态为冷轧状态（CR），化学成分见表1，力学性能见表2。

表1 11mm厚AH36船用钢化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	P	S	Nb	Al	Cu	Ni	Cr	Ti	N	Mo
0.15	0.23	1.18	0.015	0.013	0.013	0.034	0.02	0.02	0.03	0.012	0.0032	0.004

注：Ceq＝0.36%。

表2 11mm厚AH36船用钢力学性能

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率（%）	V型冲击吸收能量（0℃）/J				
			数值			平均值	方向
365	494	30	72	78	71	74	*L*

试验选择直径为1.2mm的ER70S-6焊丝，其化学成分见表3。根据熔敷金属试验结果，其力学性能见表4。

表3 焊丝化学成分（质量分数） （%）

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti＋Zr
0.07	0.83	1.42	0.018	0.017	0.03	0.04	0.01	0.02	0.01

表4 焊丝熔敷金属力学性能

拉伸试验			冲击试验	
屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率（%）	温度/℃	平均冲击吸收能量/J
470	560	26	－30	100
			－40	90
			－50	70

试验中涉及到的激光-电弧复合焊接设备为门架式结构，配备16kW光纤激光器和CLOOS气体保护焊焊枪，作为激光能量和电弧能量的发生设备进行试验。焊接过程中，焊丝在前、激光在后。激光-电弧复合焊接原理如图1所示。

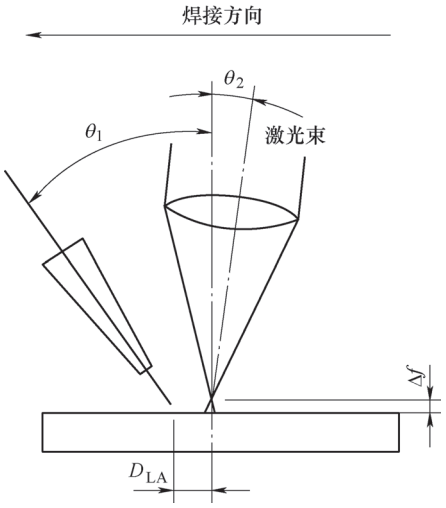

图1 激光-电弧复合焊接原理

注：激光束与弧焊轴线角θ_1＝30°，激光与工件垂线倾斜角θ_2＝0°；离焦量Δf＝－1.5mm，光丝间距D_{LA}＝3.5mm。

3 试验结果及分析

3.1 焊接参数对焊缝成形的影响

（1）焊接速度 试验采用单一变量法来研究焊接参数对焊缝成形的影响。试验中温度为室温，接头形式为Y形。固定激光功率、送丝速度、电弧电压及焊接电流等参数，在180～220cm/min内改变焊接速度，观察焊缝成形变化特征。焊接参数及焊缝成形见表5。

对比1～5组试验，当焊接速度为180cm/min时，焊缝上表面较饱满，熔宽和余高较高；下表面余高较高，有轻微焊瘤。随着焊接速度的增大，焊缝上表面熔宽减小，咬边缺陷增多；焊缝下表面熔宽减小、余高降低。当焊接速度为200cm/min时，焊缝上下表面成形较好。当焊接速度继续增大至220cm/min时，焊缝上表面变窄变细，下表面余高较低，整体不平滑并且有些位置出现点状焊穿。分析认为，当焊接速度较慢时，焊接热输入大，熔池较宽，熔融金属在重力作用下向底部凸出，导致焊缝下表面出现焊瘤。随着焊接速度的增大，单位长度焊缝上热输入减小，熔融金属量减小，熔池流动性变差，熔融金属向两侧铺展的时间缩短，导致咬边及下表面点状焊穿缺陷产生。

（2）激光功率 固定焊接速度、送丝速度、电弧电压与焊接电流等参数，在9～13kW内改变激光功率[3]，观察焊缝成形变化特征，焊接参数及焊缝成形见表6。

表5　不同焊接速度下焊接参数及焊缝成形

组号	焊接速度/（cm/min）	激光功率/kW	送丝速度/（m/min）	电弧电压/V	焊接电流/A	焊缝成形图示	
						上表面	下表面
1	180	11	12	22～24	260～290		
2	190	11	12	22～24	260～290		
3	200	11	12	22～24	260～290		
4	210	11	12	22～24	260～290		
5	220	11	12	22～24	260～290		

表6　不同激光功率下焊接参数及焊缝成形

组号	焊接速度/（cm/min）	激光功率/kW	送丝速度/（m/min）	电弧电压/V	焊接电流/A	焊缝成形图示	
						上表面	下表面
6	200	9	12	22～24	260～290		
7	200	10	12	22～24	260～290		
8	200	11	12	22～24	260～290		
9	200	12	12	22～24	260～290		
10	200	13	12	22～24	260～290		

对比6～10组试验，当激光功率为9kW时，焊缝上表面余高较低，下表面有驼峰焊瘤；随着激光功率的增大，焊缝上表面余高增高，越显饱满；焊缝下表面焊瘤变小，数量变少。当激光功率为11kW时，焊缝成形较好，正反面饱满均匀。分析认为，增加激光功率，焊接热输入增加，焊缝上下表面获得更多能量，熔池流动性好，从而使上下表面饱满均匀，减少咬边及焊瘤缺陷。当激光功率进一步增大，焊缝上表面尖高、不圆滑，下表面不平滑。当激光功率为13kW时，焊缝下表面两侧弯弯曲曲。

（3）送丝速度　试验固定焊接速度、激光功率等参数，在9～13m/min内改变送丝速度，观察焊缝成形变化特征。不同送丝速度下焊接参数及焊缝成形见表7。

表7　不同送丝速度下焊接参数及焊缝成形

组号	焊接速度/（cm/min）	激光功率/kW	送丝速度/（m/min）	焊缝成形图示	
				上表面	下表面
11	200	11	9		
12	200	11	10		
13	200	11	11		
14	200	11	12		
15	200	11	13		

对比11～15组试验，当送丝速度为9m/min时，焊缝上表面飞溅大、咬边且两侧发黑，焊缝下表面烧穿；随着送丝速度的增大，焊缝上下表面成形变得光顺。当送丝速度为12m/min时，焊缝正反面成形好；当送丝速度进一步增大，焊缝下表面析出越来越多，并且产生焊瘤。

3.2 无损检测及宏观形貌

焊接完成48h后，参照ISO 23278：2009《焊缝无损检测-磁粉检测验收等级国际标准》[4]和ISO 5817：2014《焊接钢、镍、钛及其合金的熔焊接头（束焊除外）缺陷质量等级》[5]对焊缝进行磁粉检测（MT）和X射线检测（RT）。结果表明，焊缝表面及内部无气孔、裂纹、未熔合及咬边等缺陷，焊缝经检测合格。10倍放大镜下观察焊缝宏观形貌如图2所示。

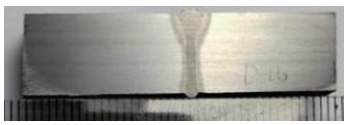

图2 焊缝宏观形貌

3.3 力学性能试验

参照ISO1 5614：2013《金属材料焊接工艺规范和评定》[6]规范对焊接接头进行力学性能试验。取2个拉伸试样、4个弯曲试样、4组冲击试样和3个硬度试样分别进行试验。取样位置如图3所示。

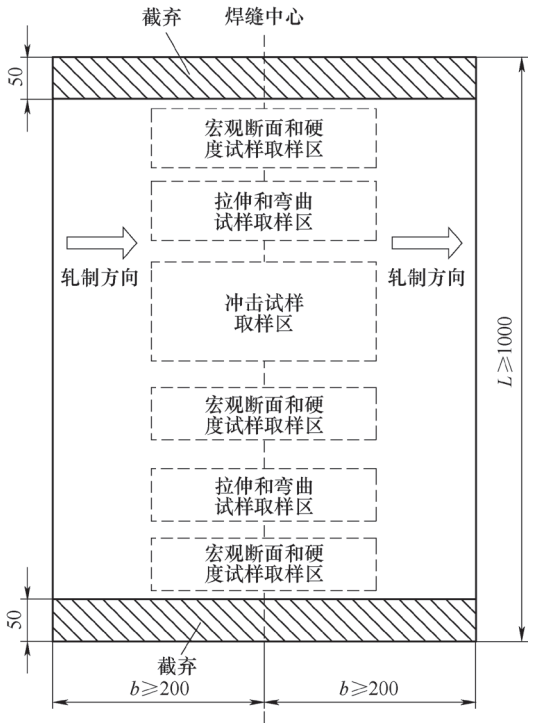

图3 焊接接头力学性能试样取样位置示意

（1）拉伸及弯曲试验 采用WAW-300微机控制电液伺服万能试验机进行焊接接头拉伸及弯曲试验，研究焊接接头强度。拉伸试样如图4所示。拉伸试验结果见表8。

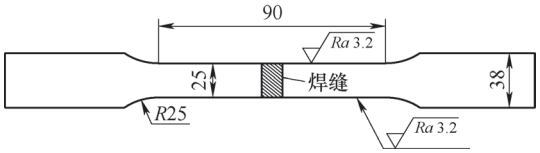

图4 拉伸试样

表8 拉伸试验结果

试样编号	试样截面尺寸/mm	拉伸方向	抗拉强度/MPa	断裂位置
1	25.03×10.89	横向	515	母材
2	24.68×10.86	横向	520	母材

对4个焊接接头分别进行2个面弯和2个背弯试验，弯曲试样如图5所示。压头弯心直径40mm，弯曲角度180°，结果显示弯曲试样无断裂和裂纹产生，表明弯曲试样具有良好的抗弯性能。

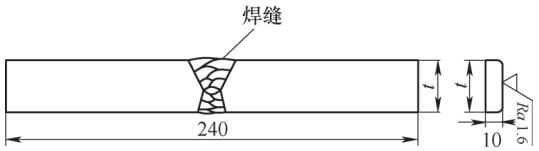

图5 弯曲试样尺寸

（2）冲击试验 利用夏比摆锤冲击试验机对试样进行冲击试验，试验温度为0℃，试样尺寸为10mm×10mm×55mm，冲击试样缺口位置为焊缝、熔合线、熔合线+2mm、熔合线+5mm，冲击试验结果见表9。

表9 冲击试验结果 （J）

冲击试样缺口位置	试验结果	平均值
焊缝	214、206、244	221
熔合线	88、112、104	101
熔合线+2mm	154、150、140	148
熔合线+5mm	86、108、132	109

（3）硬度检测 采用200HVS-10数显小负荷维氏硬度计，选择单点测量方式，在焊接接头表面焊缝、热影响区及母材选择定点检测硬度值，检测位置如图6所示，结果见表10。

中国船级社《船舶结构钢激光-电弧复合焊接工艺认可指南（2021）》[7]规定拉伸试验测得的焊接接头抗拉强度不小于母材规定的抗拉强度，平均冲击吸收能量≥34J，其维氏硬度≤380HV，试验结果表明，接头力学性能满足规范要求。

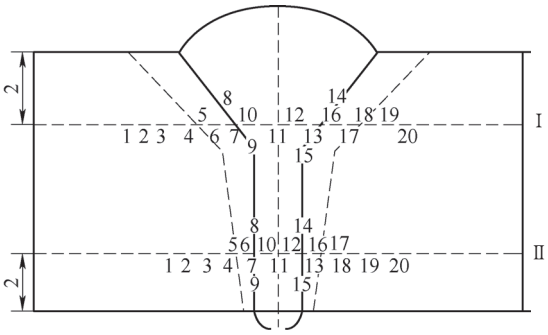

图6　硬度检测位置

4　结束语

1）采用激光-电弧复合焊接方法，以ER70S-6为填充材料，得出11mm厚AH36钢合理的焊接参数，即焊接速度200cm/min，激光功率11kW，送丝速度12m/min，电弧电压22～24V，焊接电流260～290A。

2）经试验分析可知，焊接速度小，焊缝下表面易出现焊瘤缺陷。随着焊接速度的增大，焊缝上表面熔宽减小，余高降低，焊缝上表面咬边缺陷增多，焊缝下表面析出越来越少，且易出现焊穿缺陷。因此，适当降低焊接速度有助于取得较好焊缝成形，减少咬边及焊穿等缺陷。

表10　硬度检测结果　（HV）

取样位置		母材			热影响区		熔合线			焊缝				熔合线			热影响区		母材		
定点编号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
试样1	Ⅰ位置	159	170	165	219	235	314	313	304	339	329	320	303	332	326	332	233	280	171	157	160
	Ⅱ位置	164	174	172	207	220	293	283	310	323	302	309	—	305	299	255	222	245	176	168	170
试样2	Ⅰ位置	154	159	162	223	221	329	326	322	341	340	338	301	317	336	310	241	243	174	168	160
	Ⅱ位置	164	171	170	207	209	316	276	309	301	302	300	—	300	287	295	217	218	174	171	167
试样3	Ⅰ位置	155	158	157	241	247	321	317	324	338	316	342	308	312	339	293	318	247	169	165	162
	Ⅱ位置	162	159	168	216	227	272	290	291	331	301	318	—	284	306	323	243	236	170	167	161

3）随着激光功率的增大，焊缝上表面余高增加；焊缝下表面焊瘤变小，数量变少。当激光功率进一步增大时，焊缝上表面不圆滑，中间凸起变尖，下表面不平滑，两侧弯弯曲曲。因此，适当增加激光功率有助于取得较好焊缝成形，减少咬边及焊瘤等缺陷。

4）当送丝速度较小时，焊缝上表面飞溅大、咬边且两侧黑，焊缝下表面烧穿。随着送丝速度的增大，焊缝上下表面成形变得光顺；当送丝速度进一步增大，焊缝反面析出越来越多，并且产生焊瘤。因此，适当增加送丝速度有助于取得较好焊缝成形。

5）试验测得焊接接头抗拉强度为520MPa，不低于母材，断裂位置发生在母材位置，焊缝与母材熔合良好，接头焊缝、熔合线、熔合线＋2mm、熔合线＋5mm位置平均冲击吸收能量为101～221J，接头母材、热影响区、熔合线及焊缝硬度155～342HV，满足ISO 15614-14：2013和中国船级社规范要求。

参考文献：

[1] 邹家生，严镪，顾晓波. 船舶焊接技术的现状及发展[J]. 江苏船舶，2008，25（1）：1-4.

[2] 蔡艳，唐卓，吴毅雄. 高功率CO_2激光+电弧复合焊接技术在船舶制造业中的应用[J]. 金属加工（热加工），2008（16）：19-22.

[3] 高健，陈淑梅，王克鸿，等. 激光功率对激光-MIG复合焊焊缝成型影响研究[J]. 激光技术，2020，44（2）：178-182.

[4] The International organization for standardization. International standard for non-destructive testing of welds-magnetic particle testing of welds-acceptance levels：ISO 23278：2009[S]. Switzerland：ISO copyright office，2009.

[5] The International Organization for Standardization. International standard for welding-fusion welded joints in steel，nickel，titanium，and their alloys（beam welding excluded）quality levels for imperfections：ISO 5817：2014[S]. Switzerland：ISO copyright office，2014.

[6] The International Organization for Standardization. Specification and qualification of welding procedures for metallic materials -welding procedure test part 14：Laser-arc hybrid welding of steels，nickel and nickel alloys：ISO 15614：2013[S]. Switzerland：ISO copyright office，2013.

[7] 中国船级社. 船舶结构钢激光-电弧复合焊接工艺认可指南（2021）[S]. 北京：中国船级社，2021.

MW 20240412