

船用薄板全熔透对接接头气体保护焊工艺研究

蔡世海, 张辉

招商局重工(江苏)有限公司 江苏南通 226100

摘要: 为了研究适合于船厂薄板全熔透对接接头气体保护焊的焊接工艺, 针对5mm厚AH36船用钢板的全熔透对接焊缝, 进行了 $\phi 1.0\text{mm}$ 药芯焊丝、 $\phi 1.0\text{mm}$ 金属粉芯焊丝和 $\phi 0.8\text{mm}$ 实心焊丝半自动气体保护焊工艺研究, 并针对不同的焊接工艺得到的焊缝外观、焊接变形量、力学性能进行对比分析, 最终获得薄板气体保护焊最佳的工艺参数, 为船厂薄板气体保护焊提供生产经验。

关键词: 薄板; 对接; 气体保护焊; 工艺参数; 焊接变形

Research on gas shielded welding procedure for full penetration butt joint of marine thin plate

CAI Shihai, ZHANG Hui

China Merchants Heavy Industry (Jiangsu) Co., Ltd., Nantong 226100, Jiangsu, China

Abstract: In order to study the welding process suitable for gas shielded welding of thin plate full-penetration butt joint in shipyard, the test of full-penetration butt welding of 5mm thick AH36 marine steel plate was carried out by using three welding methods: gas shielded welding with 1.0mm fluid-core wire, gas shielded welding with 1.0mm metal powder-core wire, and gas shielded welding with 0.8mm solid wire. The weld appearance, welding deformation and mechanical properties obtained by different welding methods were compared and analyzed, and the best way of gas shielded welding procedure of thin plates was finally obtained, providing practical experience for gas shielded welding of thin plates in the shipyard.

Keywords: thin plate; butt joint; gas shielded welding; welding procedure; welding deformation

1 序言

邮轮在建造过程中薄板焊接量相当大, 仅舱室区域厚度4~6mm的薄板占比就高达85%, 但是邮轮的薄板焊接自动化程度较低, 除了甲板分段的焊缝较平直可采用自动焊方式外^[1], 其他区域仍要采用手工焊或半自动方式。目前, 船厂习惯用 $\phi 1.2\text{mm}$ 药芯焊丝 CO_2 气体保护焊和 $\phi 3.2\text{mm}$ 焊条电弧焊, 这些方式较适合板厚为10~40mm钢板的焊接, 对于4~

6mm薄板采用这些方式存在焊接速度慢、焊接热输入大、焊接变形大及变形校正难的问题^[2]。因此, 为了得到质量良好的焊接接头和更小的焊接变形, 针对5mm厚AH36船用钢板的全熔透对接焊缝, 进行了不同直径、不同焊丝的气体保护焊试验, 并针对不同的焊接工艺得到的焊缝外观、焊接变形量、力学性能进行对比分析, 最终获得薄板气体保护焊最佳的工艺参数, 获得了合适的薄板全熔透对接接

第一作者: 蔡世海, 学士, 主要从事船舶与海工焊接技术研究及焊接工程管理, E-mail: caishihai@cmhk.com。

头气体保护焊工艺。

2 试验材料及焊接方式

2.1 试验材料

试验采用厚度为5mm的AH36船用钢板，交货状态为正火（CR），化学成分见表1，力学性能见表2，试验用钢板尺寸为800mm×180mm。分别选用 $\phi 1.0\text{mm}$ 药芯焊丝、 $\phi 1.0\text{mm}$ 金属粉芯焊丝和 $\phi 0.8\text{mm}$ 实心焊丝作为焊接材料，焊丝牌号、直径、化学成分及力学性能等焊接材料信息，分别见表3、表4。试验中涉及到的焊接设备为松下全数字控制CO₂/MAG逆变式焊机，型号YD-350GR5。

2.2 焊接方式

试验采用 $\phi 1.0\text{mm}$ 药芯焊丝半自动CO₂气体保护焊、 $\phi 1.0\text{mm}$ 金属粉芯焊丝半自动富氩气体保护焊和 $\phi 0.8\text{mm}$ 实心焊丝半自动富氩气体保护焊这3种焊接方式^[3]，保护气体见表5。采用V形坡口（见图1），坡口角度30°，坡口采用等离子切割方式制备。组

对前通过打磨去除坡口面及邻近坡口区域母材表面的氧化皮至露出金属光泽。组对时两块试板放在同一高度的钢制平台上，调整根部间隙至4mm，在焊缝的首、中、尾位置分别进行定位焊，焊点在坡口内，定位焊结束后，在焊缝背面贴上陶瓷衬垫，每块试板不加引弧板、引出板和马板。

因船厂实际焊接作业时，平焊和立焊位置的焊缝较多，并且在平焊和立焊位置焊接时的热输入较其他位置要大^[4]，故由两个焊工分别在平焊和立焊位置，采用表5焊接方式各焊接1块试板，每个焊工共焊接6块试板，试板编号见表6。

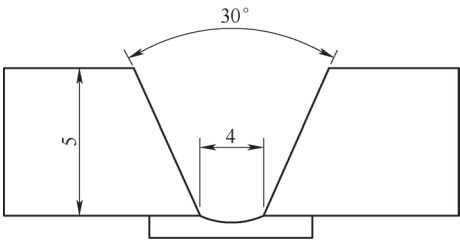


图1 气体保护焊坡口形式

表1 试验用5mm厚AH36船用钢的化学成分（质量分数）（%）

C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Cu	Ni	Cr	Ti	Mo
0.16	0.21	1.18	0.016	0.006	0.012	0.001	0.02	0.01	0.02	0.01	0.005

注：CEV=0.36%

表2 试验用5mm厚AH36船用钢力学性能

屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率（%）	V型缺口冲击能量/J			
			数值			平均
388	535	25.5	—	—	—	—

表3 焊丝规格及熔敷金属化学成分

焊丝牌号	焊丝类别	焊丝直径/mm	元素（质量分数，%）						
			C	S	Mn	P	Si	Cr	Ni
京群GFL-71	药芯	1.0	0.036	0.006	1.30	0.017	0.36	0.04	0.02
京群GCL-11	金属粉芯	1.0	0.073	0.027	1.36	0.012	0.57	0.02	0.01
京群GML-W56	实心	0.8	0.075	0.012	1.47	0.011	0.88	0.03	0.02

表4 熔敷金属力学性能

焊丝牌号	焊丝类别	焊丝直径/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率（%）	冲击试验温度/℃	平均冲击吸收能量/J
京群GFL-71	药芯	1.0	500	566	25	-20	94
京群GCL-11	粉芯	1.0	531	605	26	-20	62
京群GML-W56	实心	0.8	457	568	29	-30	84

表5 焊接方式及焊接保护气体的选用

焊接方式	保护气体	气体流量/（L/min）
$\phi 0.8\text{mm}$ 实心焊丝半自动气体保护焊	80%Ar + 20%CO ₂	20~25
$\phi 1.0\text{mm}$ 药芯焊丝半自动气体保护焊	CO ₂	
$\phi 1.0\text{mm}$ 金属粉芯焊丝半自动气体保护焊	80%Ar + 20%CO ₂	

表6 试板编号

焊工	$\phi 0.8\text{mm}$ 实心		$\phi 1.0\text{mm}$ 药芯		$\phi 1.0\text{mm}$ 金属粉芯	
	平	立	平	立	平	立
01	1	2	3	4	5	6
02	7	8	9	10	11	12

采用单面焊双面成形方式，焊接时选用直流反接，根据焊接材料生产厂家的推荐，两个焊工采

用小电流、小电压和快的焊接速度进行焊接，焊接参数见表7。每块试板共焊接两道，第1道打底焊前的温度控制在 18°C ，第2道盖面焊前的温度控制在 100°C ，焊接时控制每道焊缝的焊接顺序，平焊第1道由试板左端向右端焊，第2道由试板右端向左端焊，立焊两道均由下端向上端焊，以降低5mm厚试板因焊接受热而产生的变形。

表7 单面焊双面成形焊接参数

焊接方式	焊接位置	焊道	焊接电流/A	电弧电压/V	焊接速度/(mm/min)	热输入/(kJ/mm)	焊前温度/ $^{\circ}\text{C}$
$\phi 0.8\text{mm}$ 实心	平焊	打底焊道	105	21.7	140	0.977	18
		盖面焊道	120	22.1	163	0.976	100
	立焊	打底焊道	74	17.8	82	0.964	18
		盖面焊道	87	18.8	104	0.943	100
$\phi 1.0\text{mm}$ 药芯	平焊	打底焊道	173	27.1	286	0.984	18
		盖面焊道	195	27.1	400	0.793	100
	立焊	打底焊道	85	22.3	78	1.458	18
		盖面焊道	90	22.7	123	0.997	100
$\phi 1.0\text{mm}$ 粉芯	平焊	打底焊道	65	17.8	113	0.612	18
		盖面焊道	65	17.9	122	0.571	100
	立焊	打底焊道	65	16.7	50	1.303	18
		盖面焊道	65	16.7	59	1.104	100

3 试验结果

3.1 焊接变形量对比

焊接变形大小对薄板焊接工艺研究意义重大，当焊接变形量小时，可减少焊后机械或感应加热校平作业。

观察不同焊接方式下试板变形大小，3种焊接方式焊后的试板都有较大变形，如图2所示。对试板的平整度进行测量，并比较不同焊接方式产生的焊接变形大小情况。在焊前及焊完焊缝冷却后分别对试板平整度进行测量，测量工具为“直尺+塞尺”，测量方法为：焊接前在试板横向（垂直焊缝方向）画5条测量线（1-1' ~ 5-5'），纵向（平行焊缝方向）画4条测量线（A-A' ~ D-D'），如图3所示。横向

测量时分别以1-1' ~ 5-5' 两点连线作为水平轴，量出各标点A ~ D至水平轴的垂直距离；纵向测量时分别以A-A' ~ D-D'两点连线作为水平轴，量出各标点1 ~ 5至水平轴的垂直距离，在测量每块试板平整度时尽量保持测量位置、读数误差一致。

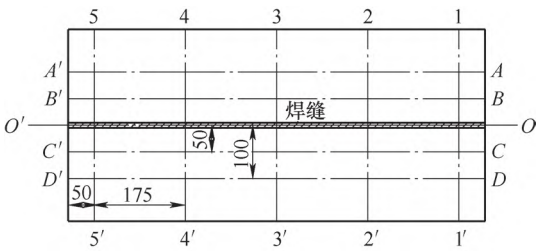


图3 试板平整度测量线示意

测得平整度数据后，把各标点相对于板边，焊后的不平度减去焊前的不平度，作为各标点变形量，并选取各焊接方式及焊接位置最大的变形量进行对比，得到3种焊接方式对应的最大变形量，如图4所示。

由图4可知，立焊位置较平焊位置整体焊接变形大。平焊位置 $\phi 1.0\text{mm}$ 药芯焊丝半自动气体保护焊、 $\phi 1.0\text{mm}$ 金属粉芯焊丝半自动气体保护焊和 $\phi 0.8\text{mm}$



图2 焊后试板变形

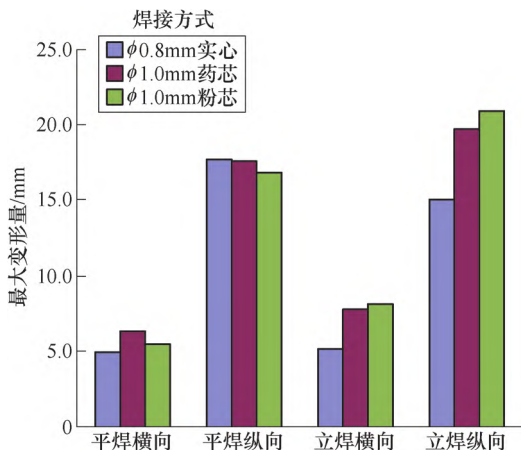


图4 最大变形量与焊接方式关系

实心焊丝半自动气体保护焊这3种焊接方式焊接变形量相当,立焊位置 $\phi 0.8\text{mm}$ 实心焊丝半自动气体保护焊焊接变形量最小, $\phi 1.0\text{mm}$ 金属粉芯焊丝半自动气体保护焊焊接变形量最大。

3.2 焊缝外观对比

焊接外观成形对薄板焊接工艺研究意义重大,当焊缝一次成形优良时,可减少焊后打磨作业。

观察不同焊接方式下焊缝外观特征,3种焊接方式对应的焊缝正面均未见到气孔、裂纹和凹坑缺陷,反面成形都较光滑,但是3种焊接方式对应的焊缝正面成形有细微的区别。不同焊接方式的焊缝外观照片及焊缝成形特征见表8。由表8可知, $\phi 1.0\text{mm}$ 药芯焊丝半自动气体保护焊较其他焊接方式,在平焊位

表8 不同焊接方式焊缝外观特征

焊接方式	焊缝正面成形	
	平焊	立焊
$\phi 0.8\text{mm}$ 实心		
	余高大,焊缝饱满	焊缝咬边严重,余高过高
$\phi 1.0\text{mm}$ 药芯		
	焊缝圆滑光滑	余高较大
$\phi 1.0\text{mm}$ 粉芯		
	飞溅大,焊缝两侧有咬边	焊缝圆滑光滑

置成形更好。 $\phi 1.0\text{mm}$ 粉芯焊丝半自动气体保护焊较其他焊接方式,在立焊位置成形更好。

3.3 力学性能对比

焊接接头力学性能对薄板焊接工艺研究意义重大,当焊接接头力学性能不合格时,是不被接受的。

参照ISO 15614:2017《金属材料焊接工艺规范和评定-焊接工艺试验》要求,分别对3种焊接方式的焊接接头进行力学性能试验,取2个拉伸、4个弯曲、3组冲击和1个硬度试样分别进行试验,确定不同焊接方式下焊接接头力学性能是否满足规范要求。

在室温下,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,采用弯心直径40mm的压头对试样做180°面弯和背弯。利用夏比V型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4.5mm×10mm×55mm,冲击试样缺口位置为焊缝(WM)、熔合线(FL)、熔合线+2mm(FL+2)。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中心、熔合线、热影响区及母材选择定点检测硬度值,检测位置如图5所示。

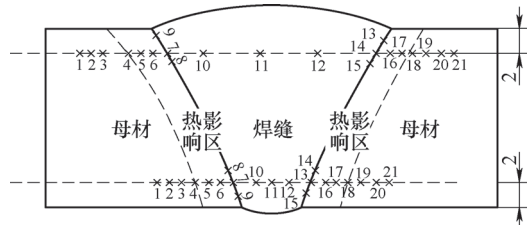


图5 硬度检测位置

3种焊接方式的焊接接头拉伸、冲击及硬度试验结果见表9,弯曲试验在试样受拉面未发现开口缺陷。根据ISO 15614:2017和中国船级社《材料与焊接规范(2021)》,焊接接头的抗拉强度不小于母材规定的抗拉强度490MPa,焊缝中心、母材、热影响区及熔合线位置的平均冲击吸收能量 $\geq 34\text{J}$,焊缝中心、母材、热影响区及熔合线位置的维氏硬度值 $\leq 350\text{HV}10$ 。试验结果表明,3种焊接方式焊接接头的力学性能均满足规范要求, $\phi 1.0\text{mm}$ 药芯焊丝半自动气体保护焊较其他焊接方式,平焊位置和立焊位置低温韧性更优。

表9 不同焊接方式的焊接接头力学性能试验结果

拉伸试验				
试样编号	试样位置	取样方向	抗拉强度/MPa	断裂位置
φ0.8mm实心平焊-1	焊接接头	横向	578	母材
φ0.8mm实心平焊-2	焊接接头	横向	577	母材
φ0.8mm实心立焊-1	焊接接头	横向	564	母材
φ0.8mm实心立焊-2	焊接接头	横向	566	母材
φ1.0mm药芯平焊-1	焊接接头	横向	554	母材
φ1.0mm药芯平焊-2	焊接接头	横向	565	母材
φ1.0mm药芯立焊-1	焊接接头	横向	566	母材
φ1.0mm药芯立焊-2	焊接接头	横向	565	母材
φ1.0mm粉芯平焊-1	焊接接头	横向	548	母材
φ1.0mm粉芯平焊-2	焊接接头	横向	547	母材
φ1.0mm粉芯立焊-1	焊接接头	横向	550	母材
φ1.0mm粉芯立焊-2	焊接接头	横向	551	母材
冲击试验				
试样编号	冲击试样缺口位置		冲击吸收能量/J	平均值/J
φ0.8mm实心平焊-3	焊缝 (WM)		48、52、54	51
	熔合线 (FL)		56、58、62	59
	熔合线+2mm (FL+2)		56、62、50	56
φ0.8mm实心立焊-3	焊缝 (WM)		46、48、48	47
	熔合线 (FL)		54、54、52	53
	熔合线+2mm (FL+2)		50、50、42	47
φ1.0mm药芯平焊-3	焊缝 (WM)		52、54、60	55
	熔合线 (FL)		86、78、80	81
	熔合线+2mm (FL+2)		80、88、72	80
φ1.0mm药芯立焊-3	焊缝 (WM)		55、56、62	58
	熔合线 (FL)		70、66、76	71
	熔合线+2mm (FL+2)		82、90、87	86
φ1.0mm粉芯平焊-3	焊缝 (WM)		46、47、50	47
	熔合线 (FL)		35、48、58	47
	熔合线+2mm (FL+2)		50、45、50	48
φ1.0mm粉芯立焊-3	焊缝 (WM)		52、63、55	57
	熔合线 (FL)		41、42、43	42
	熔合线+2mm (FL+2)		46、42、43	43
硬度试验				
试样编号	区域		硬度HV10	
φ0.8mm实心平焊-4	母材 (BM)		151~176	
	熔合线 (FL)		208~232	
	热影响区 (HAZ)		207~280	
	焊缝中心 (WM)		204~214	
φ0.8mm实心立焊-4	母材 (BM)		163~172	
	熔合线 (FL)		208~245	
	热影响区 (HAZ)		177~222	
	焊缝中心 (WM)		208~216	
φ1.0mm药芯平焊-4	母材 (BM)		156~170	
	熔合线 (FL)		194~204	
	热影响区 (HAZ)		181~214	
	焊缝中心 (WM)		206~222	
φ1.0mm药芯立焊-4	母材 (BM)		160~171	
	熔合线 (FL)		210~262	
	热影响区 (HAZ)		191~225	
	焊缝中心 (WM)		206~217	
φ1.0mm粉芯平焊-4	母材 (BM)		167~173	
	熔合线 (FL)		191~203	
	热影响区 (HAZ)		171~194	
	焊缝中心 (WM)		204~211	
φ1.0mm粉芯立焊-4	母材 (BM)		165~178	
	熔合线 (FL)		170~262	
	热影响区 (HAZ)		181~215	
	焊缝中心 (WM)		191~218	

(下转第54页)

5 结束语

1) 水下局部干法焊条电弧焊在20m、40m水深的压力环境下可以正常工作,并且在坡口内焊接时可获得成形均匀美观,以及侧壁熔合状况与润湿情况良好的焊缝。

2) 在相同电流条件下,随着环境压力的增大,需要采用的焊条送进速度也更大。在压力舱试验环境下,当压力从常压升高到0.4MPa时,电弧稳定性呈现先略微升高后降低的趋势。在压力环境下坡口内焊接时,采用摆动可以显著改善焊缝成形。

3) 经力学性能测试,采用文中焊接参数(焊接电流120A,焊接速度1.5mm/s,焊条送进速度分别采用4.5mm/s和5mm/s,摆动速度1.5mm/s,摆动周期4s)进行试件坡口内多层多道焊,在环境压力为0.2MPa和0.4MPa时可获得力学性能优良的焊接接头。

参考文献:

[1] 李连波,曹军,许威,等. 4种水下焊条焊接工艺性研究[J]. 焊接技术, 2014, 43 (9) : 24-27.

- [2] 程方杰,胡生辉,高文斌,等. 水下焊条电弧焊扩散氢含量及焊缝组织特征分析[J]. 焊接学报, 2014, 35 (9) : 45-48.
- [3] 朱征宇,赵先锐,刘桂香,等. 摆动电弧水下湿法焊条电弧焊焊接控制及工艺[J]. 船舶工程, 2021, 43 (9) : 105-110.
- [4] 焦向东,朱加雷. 海洋工程水下焊接自动化技术应用现状及展望[J]. 金属加工(热加工), 2013 (2) : 24-26.
- [5] 张义林,张玉佳,朱勇辉,等. 局部干法水下激光焊接装置研制及工艺试验[J]. 电焊机, 2024, 54 (1) : 50-54.
- [6] 周国丰,张清华,张红,等. 核电厂水下TIG焊炬设计及焊接工艺研究[J]. 电焊机, 2023, 53 (11) : 16-22.
- [7] 朱征宇,张强勇,陈勇,等. 新型焊条电弧焊水下局部干法焊接装置研制及焊接工艺研究[J]. 电焊机, 2019, 49 (1) : 115-119.

MW 20240806

(上接第49页)

4 结束语

1) 薄板全熔透对接气体保护焊,平焊位置 $\phi 1.0\text{mm}$ 药芯焊丝半自动气体保护焊、 $\phi 1.0\text{mm}$ 金属粉芯焊丝半自动气体保护焊和 $\phi 0.8\text{mm}$ 实心焊丝半自动气体保护焊这3种焊接方式焊接变形量相当,立焊位置 $\phi 0.8\text{mm}$ 实心焊丝半自动气体保护焊焊接变形量最小, $\phi 1.0\text{mm}$ 金属粉芯焊丝半自动气体保护焊焊接变形量最大, $\phi 1.0\text{mm}$ 药芯焊丝半自动气体保护焊焊接变形量适中。

2) 薄板全熔透对接气体保护焊, $\phi 1.0\text{mm}$ 药芯焊丝半自动气体保护焊较其他焊接方式,在平焊位置成形更好, $\phi 1.0\text{mm}$ 粉芯焊丝半自动气体保护焊较其他焊接方式,在立焊位置成形更好。

3) 薄板全熔透对接气体保护焊, $\phi 1.0\text{mm}$ 药芯焊丝半自动气体保护焊、 $\phi 1.0\text{mm}$ 金属粉芯焊丝

半自动气体保护焊和 $\phi 0.8\text{mm}$ 实心焊丝半自动气体保护焊这3种焊接方式焊接接头力学性能均满足ISO 15614: 2017和中国船级社《材料与焊接规范(2021)》要求, $\phi 1.0\text{mm}$ 药芯焊丝半自动气体保护焊较其他焊接方式性能更优。

参考文献:

- [1] 熊好,李勇,洪刚. 关于豪华邮轮薄板的SAW拼板焊接工艺研究[J]. 焊接技术, 2021 (10) : 49-52.
- [2] 司昊宸,李守根,朱加雷,等. TRIZ在邮轮薄板焊接变形控制中的应用[J]. 金属加工(热加工), 2024 (3) : 46-48, 53.
- [3] 包国兴. 内河小型船舶上层建筑的薄板焊接[J]. 江苏船舶, 2001 (2) : 32-34.
- [4] 张文钺. 焊接冶金学(基本原理)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.

MW 20240806