

压力环境对焊条自动平焊过程及焊缝性能的影响

李怀亮¹, 王凤瑞^{2, 3}, 孙有辉¹, 李连波¹, 王海洋^{2, 3}, 包洪慧¹, 郝丽娅^{2, 3}, 王志江^{2, 3}

1. 海洋石油工程股份有限公司 天津 300452

2. 天津大学材料科学与工程学院 天津 300350

3. 天津市现代连接技术重点实验室 天津 300350

摘要: 为了探究水下局部干法焊条电弧焊在40m以下水深环境下坡口内焊接的可行性,并探索合理的焊接参数,采用自主研发的焊条自动焊机构在压力舱中进行模拟20m和40m水深条件下的局部干法自动焊接试验。试验结果表明:在0.2MPa的模拟环境压力下的电弧稳定性优于常压,而在0.4MPa压力下电弧长度变化较为频繁,电弧稳定性有所降低。通过分析工艺试验结果,获得了在两种压力下焊缝成形良好的焊接参数。经力学性能测试验证,采用该焊接参数进行坡口内多层多道焊可以获得性能优良的焊接接头。

关键词: 电弧稳定性;坡口焊接;焊条电弧焊;水下局部干法焊接

The influence of pressure environment on the welding process and weld performance of automatic flat SMAW

LI Huailiang¹, WANG Fengrui^{2, 3}, SUN Youhui¹, LI Lianbo¹, WANG Haiyang^{2, 3}, BAO Honghui¹,
HAO Liya^{2, 3}, WANG Zhijiang^{2, 3}

1. Offshore Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300452, China

2. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China

3. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin 300350, China

Abstract: In order to explore the feasibility of underwater local-dry shielded metal arc welding (SMAW) for groove welding in the water environments (<40m) and to investigate reasonable welding process, automatic welding experiments in a pressure chamber, using a self-developed automatic SMAW mechanism, were conducted to simulate the welding process under water depths of 20m and 40m. The experimental results showed that the arc stability at a simulated-environment pressure of 0.2MPa was better than that at the atmospheric pressure, while the arc length varied more frequently and the stability decreased at a pressure of 0.4MPa. By analyzing the experimental results of the welding process, welding parameters that produced well-formed welds under both pressures were obtained. Mechanical performance tests confirmed that using these welding parameters for multi-layer multi-pass groove welding can produce weld joints with excellent performance.

Keywords: arc stability; groove welding; SMAW; underwater local dry welding

通信作者: 王志江, 博士, 副教授, 主要研究方向为焊接新方法及工艺、焊接过程传感及控制、焊接自动化和增材制造,

E-mail: wangzj@tju.edu.cn.

1 序言

随着我国国民经济高速发展，对资源的需求也日益增长。海上油气资源开发作为重要能源来源之一，推动着海洋工程向深海拓展^[1]。与此同时，水下焊接技术在海洋结构建设、加固与修复等方面的重要性日益凸显^[2, 3]。水下焊接从工作环境中可以分为湿法焊接与干法焊接，其中，干法焊接中的局部干法焊接通过在水下建立一个相对干燥的空间，排除了焊接局部区域内水的干扰，可以改善焊接质量且不需要大型排水设施，成本相对较低，因此成为了当前水下焊接的重要研究方向之一^[4]。

张义林等^[5]研制了一套局部干法水下激光焊接装置，在实现平焊位置焊接的同时，兼顾了角焊缝的水下局部干法焊接作业需求。周国丰等^[6]通过自行设计的局部干法水下TIG焊枪在水中对接控氮不锈钢管板结构进行焊接，研究了焊接参数对水下TIG焊缝成形的影响规律，得到了力学性能不低于陆上焊接的水下焊接焊缝。

关于水下局部干法焊条电弧焊的研究相对较少，朱征宇等^[7]研制了一种水下局部干法焊条电弧焊接装置，进行了一系列焊接工艺试验，得出了气体对电弧压缩会导致熔深增大，焊缝宽度下降的结论，但试验最大水深只有150mm。为了探究更大水深环境下局部干法焊条电弧焊的可行性并探索合理的焊接参数，本文采用自主研发的焊条自动焊机构在压力舱中模拟20m和40m水深条件下的局部干法自动焊接试验。

2 试验设备与材料

试验母材选用DH36船用结构钢，其化学成分及力学性能分别见表1、表2。工件厚度为28mm，单V形坡口，坡口角度37.50°。试验采用直径3.2mm的大西洋CHE58-1低合金钢焊条，选用较为便携且电弧性能优良的Miller XMT 350 CC/CV焊机，其空载电压约为71V。采用自行设计的焊条自动焊机构在压力舱中进行试验，压力舱与自动焊机构如图1所示。

表1 DH36钢的主要化学成分（质量分数）（%）

C	Mn	P	Si	S	Nb
0.120	1.540	0.040	0.340	0.002	0.030

表2 DH36钢的力学性能

抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率（%）
520	380	31.5



a) 试验用压力舱 b) 自动焊机构

图1 压力舱与自动焊机构

3 焊接工艺试验

3.1 试验参数

所有试验均在平焊位置进行，为降低粘条风险，方便机构正常起弧且简化更换焊条时的校对过程，保持焊条垂直于工件。具体焊接参数见表3，其中摆动是通过机构带动工件在垂直焊接方向的周期性往复运动实现的。

表3 试验用焊接参数

焊缝编号	试验压力/MPa	焊接电流/A	焊接速度/(mm/s)	焊条送进速度/(mm/s)	摆动速度/(mm/s)	摆动周期/s
L ₁	0	120	1.5	3.9	1.5	4
L ₂	0.2	120	1.5	3.9	1.5	4
L ₃	0.2	120	1.5	4.5	1.5	4
L ₄	0.2	120	1.5	4.5	0	0
L ₅	0.4	120	1.5	5.0	1.5	4

3.2 试验结果及分析

焊缝L₁与L₂采用相同的焊接参数，分别在常压与0.2MPa下进行焊接，其焊缝成形分别如图2a、b所示，焊接电流、电弧电压信号如图3a、b所示。与L₂相比，L₁焊缝成形均匀美观，无明显缺陷。L₂焊缝后半段出现侧壁未熔合，且存在焊缝下凹现象。从图3b可看出，提高环境压力后随着焊接过程的进行，电弧电压逐渐增大，且波动较为剧烈，这是因为压力舱试验压力由0增加到0.2MPa后，电弧受到压缩，产热增加且热量更加集中。环境压力在0.2MPa时焊条的熔化速度加快，大于焊缝L₁所采用的焊条送进速度，使电弧不断拉长，电弧电压逐渐

增大,导致焊接过程不稳定,焊接质量下降。基于上述结论,焊接焊缝 L_3 时,在 L_1 原参数的基础上将焊条送进速度增加至4.5mm/s,在0.2MPa下获得了较稳定的焊接过程(见图3c),焊缝成形良好,如图2c所示。

保持 L_3 的焊接电流与焊接速度,关闭程序中的摆动模块,在0.2MPa下进行试验得到焊缝 L_4 ,其焊缝成形如图2d所示。与 L_3 相比,其焊缝铺展较差,焊缝成形不均匀,存在侧壁未熔合情况。由此可见,在坡口内焊接时,尤其是在压力环境下,为自动焊机构设置摆动程序能更好地模拟手工焊接特点,起到改善焊缝润湿程度和提高侧壁熔合效果的作用。

借鉴在常压下与0.2MPa压力下的焊接参数变化规律,在0.4MPa环境下采用更大的焊条送进速度进行焊接试验,得到焊缝 L_5 ,如图2e所示,其焊接电流、电弧电压波形如图3d所示。从图3d可看出,采用上述焊接参数可在0.4MPa下获得较为稳定的焊接过程,且焊缝成形良好。对比图3a、图3c可发现,相较于常压,在0.2MPa压力下焊接时,发生短路的频率略微降低,焊接过程稳定性有所提高,这是由于压力舱内通入高压气体后,电弧受压收缩,电弧力有所提高。焊条末端一部分熔融金属在电弧力的作用下,在熔滴接触熔池发生短过渡之前,就以射滴形式进入熔池,使熔滴长大速度有所下降,最终导致电弧稳定性略微上升。

与图3c相比,图3d中的短路频率反而有所升高,且电弧电压出现了一定程度的波动。图4a~e、f~j分别为 L_3 、 L_5 焊接过程中一个摆动周期内的电弧图像。从图4可看出,在0.2MPa下电弧长度波动不大,电弧挺度好;而在0.4MPa下,电弧长度出现较为明显的变化(见图4g、i),且存在短路现象(见图4j),随着摆动的进行,电弧在坡口内发生偏移,电弧挺度有所下降(见图4f),且从图4中可看出,焊缝 L_5 的熔池体积大于 L_3 ,说明在0.4MPa下电弧产热相对更大。结合焊接过程图像与电流电压信号来看,相比于0.2MPa,在0.4MPa下电弧长度、形状变化更加频繁,电弧电压波动相对明显,短路频率增大,电弧的稳定性有所降低,这与电弧产热增大导致熔滴长大速度加快有关。通过上述压力舱模拟试验可知,在其他参数不变的情况下,随着压力

舱气体压力的增大,焊接电弧稳定性呈现先略微升高后降低的趋势。需要注意的是,上述规律是在压力舱中试验时有效,而在实际水下局部干法焊接过程中,除了压力,还有水温(冷却速度)、气体流向、排水设施的限制等其他影响因素,届时焊接过程的电弧稳定性需要根据实际情况加以讨论。

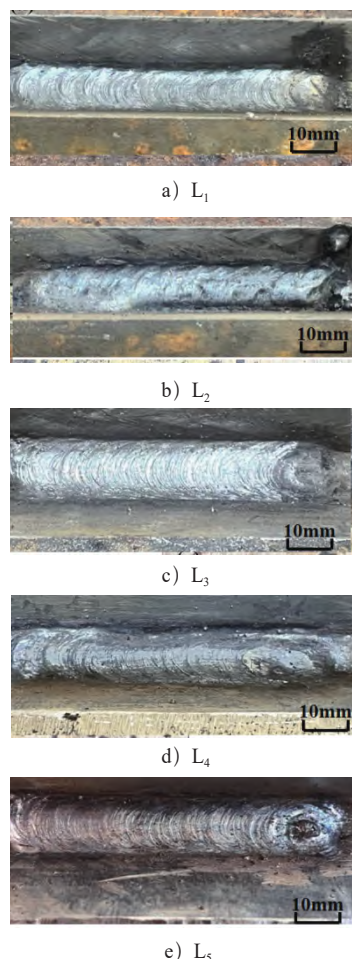


图2 不同参数下的焊缝成形

4 力学性能测试

根据以上焊接方法及焊缝 L_3 、 L_5 所对应的焊接参数分别在0.2MPa、0.4MPa压力下进行多层多道焊,每个压力各一个试件,按照AWS D3.6M: 2017《水下焊接规范》标准取样,分别进行拉伸(试样名称中用T区分)、弯曲(试样名称中用B区分)、冲击(试样名称中用I区分)力学性能测试。焊接接头的拉伸、冲击、弯曲测试结果见表4~表6,弯曲试样如图5所示。其中拉伸试样断裂均发生在母材,焊接接头的抗拉强度较高,均>520MPa。弯曲角度为180°,弯辊直径90mm,弯曲类型为侧弯,

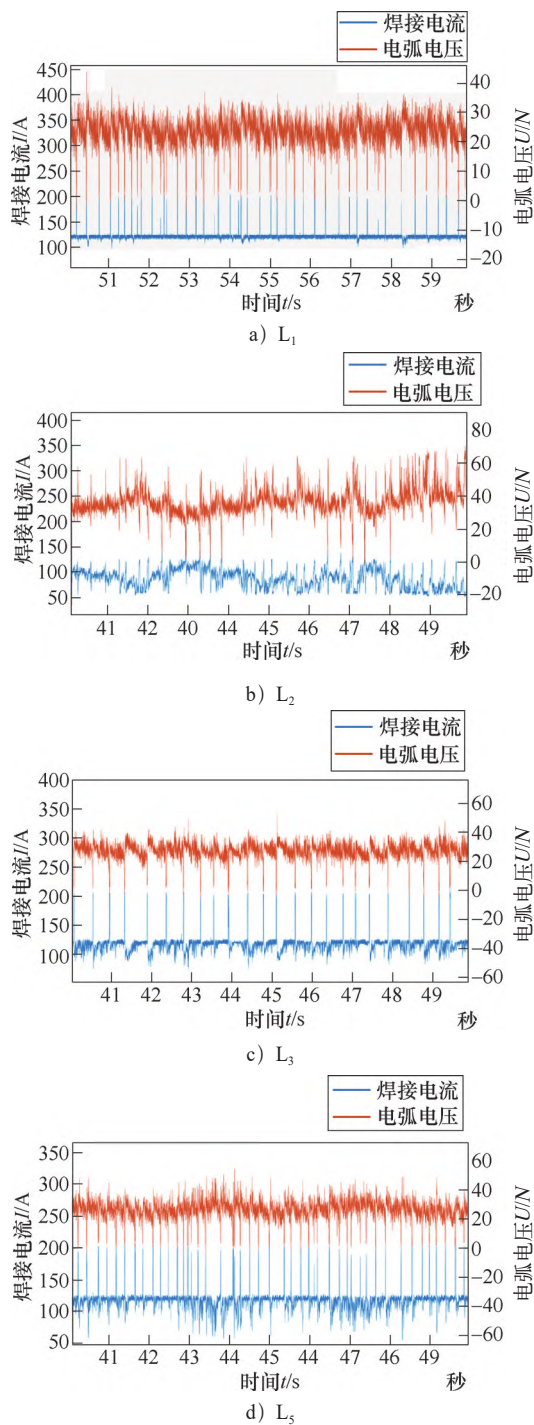


图3 焊接电流、电弧电压信号

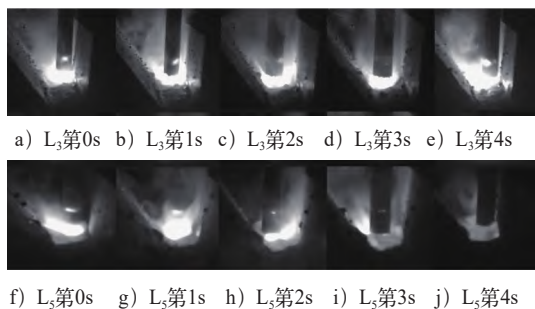


图4 一个摆动周期内的焊接电弧图像

试验效果较好, 试样均未发现明显的裂纹。冲击试验结果表明, 焊缝与熔合线均具有较高的冲击吸收能量。同样, 由于试验中缺乏对工件冷却速度的模拟, 所以冲击吸收能量均偏高; 在实际水下焊接过程中, 应进一步考察冷却速度对冲击吸收能量的影响。

表4 拉伸试验结果

试样名称	试验速率 / (mm/s)	断裂位置	最大力 /kN	抗拉强度 /MPa
L ₃ -T-1	10	母材	291.683	530
L ₃ -T-2	10	母材	288.338	528
L ₅ -T-1	10	母材	298.11	587
L ₅ -T-2	10	母材	299.20	589

表5 V型缺口冲击试验结果 (- 20℃) (J)

试样名称	缺口位置	冲击吸收能量
L ₃ -I-1	顶部焊缝中心线	132
L ₃ -I-2	顶部焊缝中心线	174
L ₃ -I-3	顶部焊缝中心线	202
L ₃ -I-4	根部热影响区	64
L ₃ -I-5	根部热影响区	175
L ₃ -I-6	根部热影响区	143
L ₅ -I-1	顶部焊缝中心线	168
L ₅ -I-2	顶部焊缝中心线	162
L ₅ -I-3	顶部焊缝中心线	168
L ₅ -I-4	根部热影响区	195
L ₅ -I-5	根部热影响区	184
L ₅ -I-6	根部热影响区	130

表6 弯曲试验结果 (侧弯)

试样名称	弯辊直径/mm	弯曲角度/ (°)	试验结果
L ₃ -B-1	90	180	未裂, 合格
L ₃ -B-2	90	180	未裂, 合格
L ₃ -B-3	90	180	未裂, 合格
L ₃ -B-4	90	180	未裂, 合格
L ₅ -B-1	90	180	未裂, 合格
L ₅ -B-2	90	180	未裂, 合格
L ₅ -B-3	90	180	未裂, 合格
L ₅ -B-4	90	180	未裂, 合格



a) L₃-B-1~4

b) L₅-B-1~4

图5 弯曲试验试样 (侧弯)

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