

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2023.11.03

核电厂水下 TIG 焊炬设计及焊接工艺研究

周国丰¹, 张清华², 张 红¹, 孙清洁², 王晓磊¹

1. 中广核研究院有限公司, 广东 深圳 518000

2. 哈尔滨工业大学(威海) 特种焊接技术省重点实验室, 山东 威海 264209

摘要: 针对核电厂水下定位销的更换及安装, 为了得到高质高效的自动化焊接方法, 通过自行设计的局部干法水下 TIG 焊枪在水中可控氩不锈钢管板结构进行焊接。首先对局部干法水下 TIG 焊炬进行结构设计, 并采用 ANSYS 进行焊炬的流体仿真模拟, 优化进气口位置、进气方式等并验证其排水效果, 研究了焊接工艺参数对水下 TIG 焊缝成形的影响规律, 并对水下 TIG 焊接焊缝的力学性能进行了测试。结果表明, 经过优化, 此焊炬在水下焊接时通气 3 s 后便可得到稳定的局部干燥空间, 避免了水环境对焊接过程的干扰。使用此焊枪可以在水下得到均匀连续的焊缝, 且焊缝横截面参数随焊接工艺参数变化的规律与陆上焊接相同, 但是熔深和熔宽均比陆上焊接的小; 同时发现水下焊缝的熔深、熔宽的变化可能是由于水下冷却速度快和低温环境对电弧的热压缩交替作用引起的; 焊缝的力学性能与焊接电流成正比, 与焊接速度成反比。水下 TIG 焊接焊缝的力学性能与陆上焊接得到的焊缝相当, 甚至略高。

关键词: 水下焊接; 局部干法; 焊炬设计; 工艺研究; 力学性能

中图分类号: TG456.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2023)11-0016-07

Design of Underwater TIG Welding Torch and Study on Welding Technology for Nuclear Power Plant

ZHOU Guofeng¹, ZHANG Qinghua², ZHANG Hong¹, SUN Qingjie², WANG Xiaolei¹

1. China Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518000, China

2. Provincial Key Laboratory of Special Welding Technology, Harbin Institute of Technology, Weihai 264209, China

Abstract: This paper aims to develop high-quality and efficient automatic welding methods for the replacement and installation of underwater positioning pins in nuclear power plants. To achieve this, a self-designed local dry underwater TIG welding gun is used to weld the nitrogen-controlled stainless steel tube sheet structure underwater and achieve the desired weld quality. Firstly, designs the structure of the local dry underwater TIG welding torch. Fluid simulation of the welding torch is then performed using ANSYS to optimize the position and mode of the air inlet and verify the drainage effect. The study also investigates the influence of welding process parameters on the formation of underwater TIG weld and tests the mechanical properties of the weld. The results show that after optimization, the welding torch can establish a stable local dry space during underwater welding, eliminating interference from the water environment. Using this welding gun, a uniform and continuous weld can be achieved underwater. The variation of cross-section parameters of the weld with welding process parameters is similar to that of onshore welding, but the penetration depth and width are smaller. It is also found that the change in penetration and width of the underwater weld may be attributed to the rapid cooling rate of water and the alternating effect of thermal compression of the arc in a low-temperature environment. Furthermore, the mechanical properties of the weld are directly proportional to the welding current and inversely proportional to the welding speed. The mechanical properties of the underwater TIG weld are equivalent to or even slightly higher than those of onshore welds.

Keywords: underwater welding; local dry method; welding torch design; process research; mechanical properties

收稿日期: 2022-11-01 修回日期: 2023-05-05

作者简介: 周国丰(1971—), 男, 博士, 主要从事核电高端装备的研发。E-mail: zhouguofeng@cgnpc.com.cn。

引用格式: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.

Citation: ZHOU Guofeng, ZHANG Qinghua, ZHANG Hong, et al. Design of Underwater TIG Welding Torch and Study on Welding Technology for Nuclear Power Plant[J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(11): 16–22.

0 引言

近年来,国家核电发展取得了举世瞩目的成就。为了减小辐射,许多设备需要在水下进行更换和修复。核电水下焊接的主要问题是如何实现自动化焊接,以获得清洁、平整、质量可靠的焊缝^[1]。目前,水下焊接主要集中在局部干法焊接上,因为它兼具湿法焊接和干法焊接的优点。局部干法焊接具有良好的焊缝成形、简单的设备要求、低成本和高度自动化等特点,是核电部件水下焊接的首选方法^[2]。而排水罩是水下局部干法焊接中不可或缺的重要组成部分,其排水能力直接影响水下局部干法焊接焊缝的质量^[3]。根据试验需求,郭宁等人^[4]自行设计了一种局部干法双层水下激光排水罩,通过优化工艺,获得了质量较高的焊缝。沈相星等人^[5]研制了一种带预热功能的水下局部干法焊接专用排水罩,通过在主观察口安装可摇动的观察筒解决了观察困难问题。虽然固定式排水罩的接头抗拉强度低于摩擦柱塞焊接和湿法焊接,但固定式排水罩的接头冲击吸收功最高。马兆炫等人^[6]自行研制了一把可移动气室水下 TIG 焊枪,使电弧能够在水下稳定燃烧,并获得高质量的焊缝。通过水陆对比,发现水冷使得钛合金的奥氏体由针状转变为粒状,晶界转变为晶内析出,且晶粒更细化。古志明等人^[7]介绍了一种同轴式水下局部干法 TIG 焊接装置,该装置便于观察电弧形态和熔池状态,能够实时观察焊接过程。梅福欣等人^[8]采用金属丝屏蔽罩局部干法 TIG 焊接,实现了自动化,并且设备简单、操作方便,可焊接不同坡口和不同位置,焊接过程稳定,焊缝美观。王中辉等人^[9]在水下高压环境下进行了 TIG 干法全位置焊,研究了气氛压力对焊缝成形的影响。TAKESHI 等人^[10]对水下 TIG 焊接工艺进行探索,证实了水下 TIG 焊接可以获得与陆上焊接相同质量的可靠性。本文主要研究核电厂水下定位销的焊接,采用自行设计的焊炬进行了一系列工艺研究。

1 试验材料与方法

试验母材为 Z2CN19-10 不锈钢,化学成分(质量分数,%)为:0.035C, 2.0Mn, 1.0Si, 0.015S, 0.03P, 9.35Ni, 19.21Cr, 1.0Cu, 0.08N, 0.1Co, 微量 B。试板尺寸为 100 mm×100 mm×8 mm。本次试验在水箱中进行,采用不填丝 TIG 自熔焊方法。焊接电源型号为松下 YC-200BL3 焊机。如图 1a 所示,针对定位销的尺寸,自行设计水下 TIG 焊炬,采用钨极绕焊枪中心自转的方式,只需找正焊炬位置便可完成整个焊接过程。焊炬长为 220 mm,直径为 48 mm,钨极旋转直径为 23 mm。如图 1b 所示,焊炬上方有 4 个防水格兰头,用于通过线缆并防止焊炬进水。图 1c 为焊炬外层保护罩,材料为聚四氟乙烯,起到绝缘和防水的作用。焊炬整体实物图如图 1d 所示。

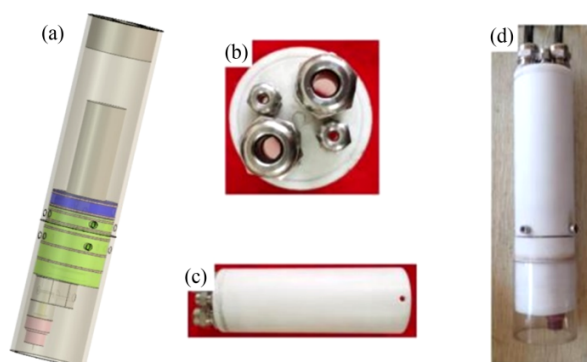


图1 水下 TIG 焊炬示意

Fig. 1 Schematic diagram of the underwater TIG welding torch

采用机械打磨方法去除待焊试板表面氧化膜,然后使用酒精清洗去除油污等杂质。采用单因素控制方法进行工艺研究,焊接电流、焊接速度和水深为变量。完成焊接后,通过线切割方式获取试样,并经过镶样、研磨、抛光和腐蚀处理后观察焊接接头的横截面形貌。

2 ANSYS 流体模拟

局部干法排水罩设计的关键在于排水罩内部合适的进气口位置、角度和数量。进气口位置的选

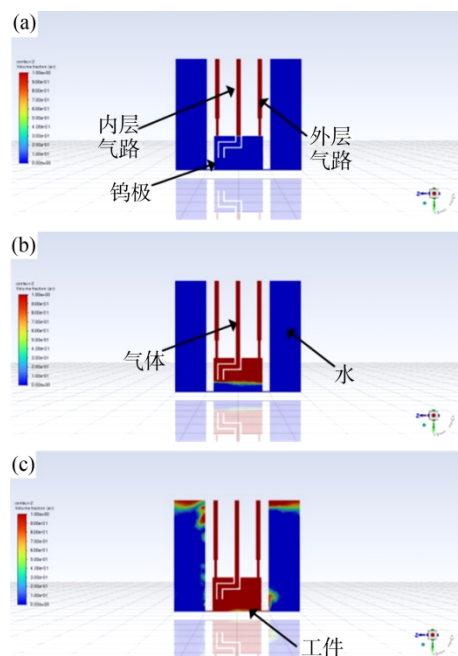
取会影响内部流场分布。因此,建议将进气口位置选择在排水罩正上方,垂直向下进气,使气体自上向下流动,进行排水,减少产生的回流。此外,通过调整进气口的数量和位置,还可进一步优化设计。

通过单口进气流体力学仿真模拟发现,在排水罩出口处,部分气体出现回流现象,无法满足试验需求。因此,设计了4个对称的进气口来优化,以防止流场中的气体回流。因此,整个焊炬由内外两层气路构成。内层气体通过钨极外的陶瓷喷嘴流出,主要保护焊接区域。外层气体通过4个对称的进气口排出焊接区域内的水。

将焊炬模型简化为中间带有气路的圆柱体。在 ANSYS 中设置焊炬整体高度为 220 mm,直径为 48 mm。4 个外层进气口的直径均为 3 mm。气体垂直向下进入排水罩进行排气。焊炬的最下端设置类似于焊枪的结构,钨极与待焊工件之间的距离为 2 mm。环境压力为 0.15 MPa。所有进气口的进气速度均为 15 L/min。

整个排水罩排水试验过程如图 2 所示。红色表示气体,蓝色表示水。在 4 个直径为 3 mm 的进气口中通入进气速度为 15 L/min 的气体后,排水罩内部的水逐渐由上至下排出。观察排水罩与待焊工件之间的缝隙,发现大部分水被排出,只有少量水渍残留。可能是氩气与水之间的界面不清,仿真模型认为两种介质相互混合,也可能是液体表面张力、粘性系数等因素的影响。在进行仿真时可以考虑表面张力、粘度系数等因素,进一步优化模型。

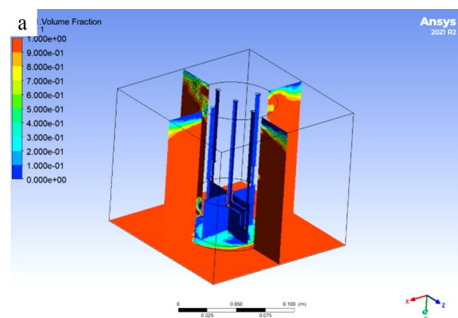
排水罩排水仿真模拟试验的排水效果如图 3 所示。图 3a 为排水罩排水仿真模拟的三维立体图,图 3b 为俯视图。在三维立体图中,排水罩的排水效果良好,几乎没有水渍残留。观察图 3b,根据图中水体积分数等高线的排布,可以使用像素点提取出每个水体积分数等高线的面积占比。运用软件 Origin 绘制出面积分数-残余水量分数图,如图 4 所示。在水体积分数等高线为 0~0.1 之间时,残余水量分数最大,达到 100%;在水体积分数等高线为 0.9~1 之间时,残余水量分数最小,为 10%。通过将不同颜色的面积分数与残余水量分数相乘并加和,可以计算出总的排水量。根据计算结果,排水罩中约 70%



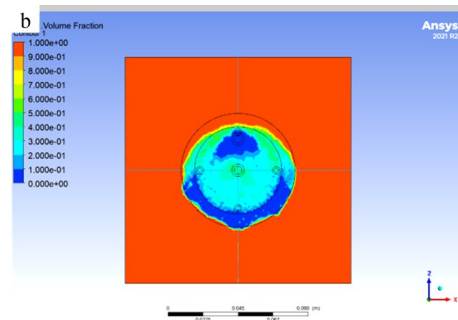
(a)排水 1 s 后;(b)排水 2 s 后;(c)排水 3 s 后

图 2 排水罩排水仿真模拟试验过程流体状态

Fig. 2 Fluid status of drainage cover drainage simulation test process
的水被排干净。为了进一步优化设计,需要确保排水罩内部水分全部排干,以获得稳定且干燥的气相环境,从而提高水下局部干法 TIG 焊接的质量。



(a)三维立体图



(b)俯视图

图 3 排水罩排水仿真模拟试验排水效果

Fig. 3 Drainage cover drainage simulation test drainage effect diagram

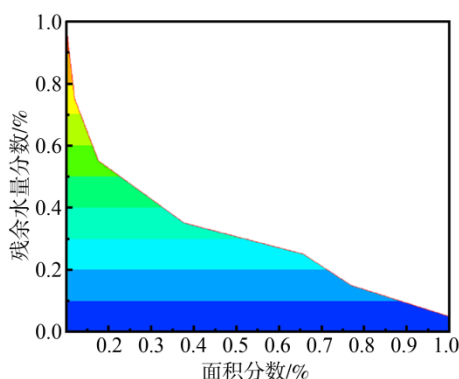


图4 面积分数-残余水量分数

Fig. 4 Area fraction-residual water volume fraction

3 水下 TIG 焊接工艺研究

3.1 焊接电流对焊缝成型的影响

焊接电流是决定焊缝熔深的主要因素。图 5 分别展示了水深 20 mm、焊接速度 2 mm/s、焊接电流分别为 30 A、40 A、50 A、60 A 和 70 A 五种情况下的焊缝宏观形貌和焊缝横截面形貌。

如图 6 所示,与陆上焊接规律相同,随着焊接电流的增大,焊接线能量逐渐增大,焊缝熔深随之增大。在水深、焊接速度等条件一定的情况下,焊接电流增大,热输入量增大,母材熔化量增多,弧柱直径增大,因此熔宽也增大。

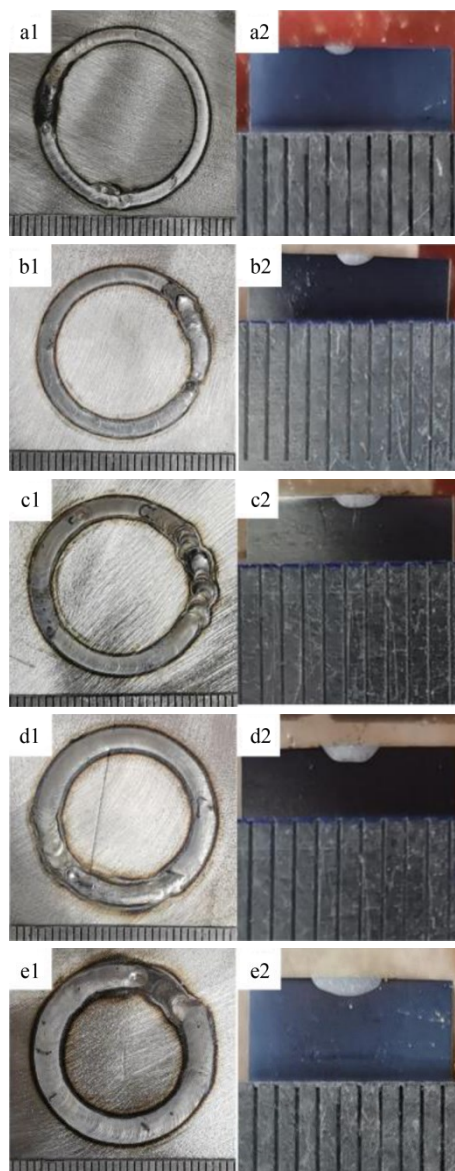
3.2 焊接速度对焊缝成型的影响

图 7 展示了水深 20 mm、焊接电流为 60 A 的情况下,焊接速度分别为 1.5 mm/s、2 mm/s、2.5 mm/s、3 mm/s、3.5 mm/s 时的焊缝宏观成形和焊缝横截面形貌。可以观察到焊缝呈现出明显的银白色金属光泽,成形良好。

不同焊速下的焊缝横截面参数如图 8 所示。可以看出,在水深、焊接电流等条件一定的情况下,焊缝的熔深和熔宽与焊接速度成反比。焊接速度直接决定电弧能量在母材上的作用时间,在焊接电流一定时,焊速越小,电弧作用在母材上时间越长,母材热输入越大,液态金属在母材上的凝固速率越慢,导致其润湿铺展地越充分,从而使焊缝熔深和熔宽增加。

3.3 水深对焊缝成型的影响

水下局部干法 TIG 焊接会因水深的变化导致外



(a)30 A;(b)40 A;(c)50 A;(d)60 A;(e)70 A

图5 不同电流下的焊缝成形

Fig. 5 Weld forming under different welding currents

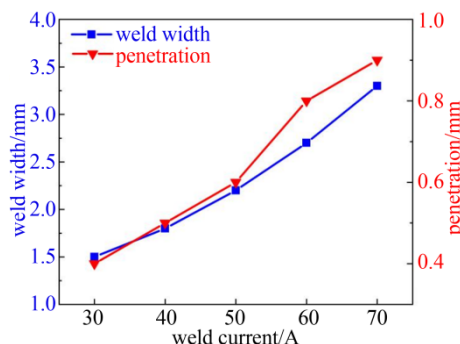
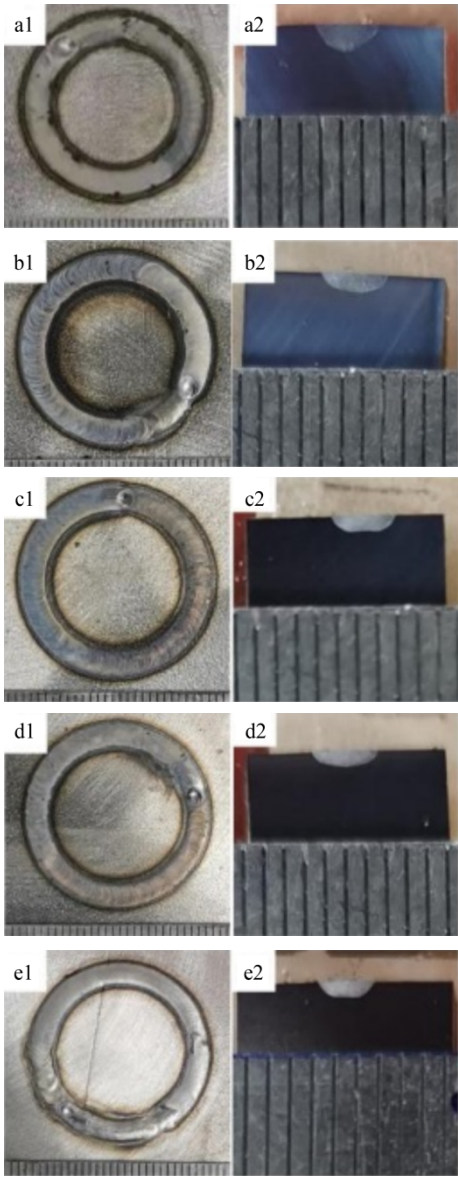


图6 不同电流下的焊缝横截面参数

Fig. 6 Weld cross section parameters at different currents



(a) 1 mm/s; (b) 1.5 mm/s; (c) 2 mm/s; (d) 2.5 mm/s; (e) 3 mm/s

图7 不同焊速下的焊缝成形

Fig. 7 Weld forming under different welding speeds

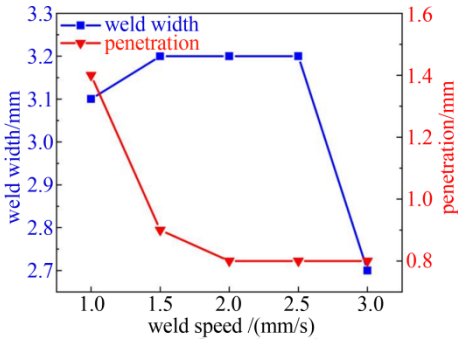
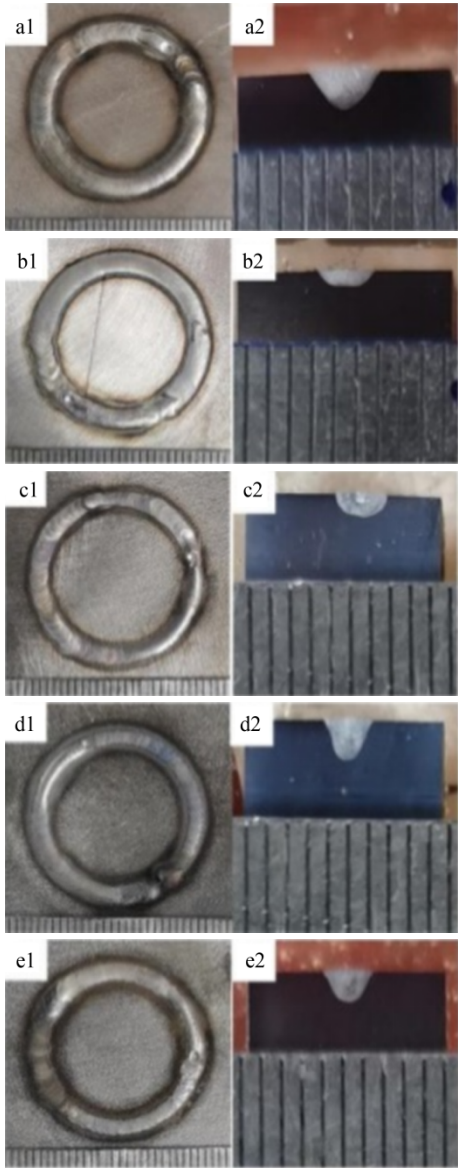


图8 不同焊速下的焊缝横截面参数

Fig. 8 Weld cross section parameters at different speeds

部环境发生变化,进而影响焊缝的成形质量。本次试验对水深从 0 mm 到 50 mm 逐步进行研究。图 9 展示了焊接电流为 60 A,焊接速度为 2 mm/s 的情况下,水深分别为 0 mm、20 mm、30 mm、40 mm、50 mm 时的焊缝成形和焊缝横截面形貌。



(a) 0 mm; (b) 20 mm; (c) 30 mm; (d) 40 mm; (e) 50 mm

图9 不同水深下的焊缝成形

Fig. 9 Weld forming under different depth of water

不同水深下的焊缝横截面参数如图 10 所示。相对于陆上焊接,入水后焊缝熔深降低。从水深为 30 mm 开始,熔深先增大,到 50 mm 时又逐渐减小;熔宽随水深的增大逐渐减小。分析其原因,可能是水的冷却速度和低温环境对电弧的热压缩交替作

用引起的。随着水深的增大,急速冷却作用效果增强,电弧挺度提高,热流集中,电弧指向性和抗干扰能力增强,所以熔深增大、熔宽减小;水深继续增大,水的冷却作用增大,更多的电弧热量散失,使得作用在工件的热输入量减少,熔化的母材迅速凝固,从而导致熔深和熔宽减小。

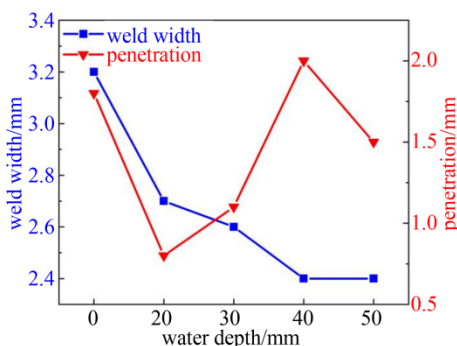


图 10 不同水深下的焊缝横截面参数

Fig. 10 Weld cross section parameters at different depth of water

3.4 水下 TIG 焊对接接头力学性能测试

在水深为 20 mm 的环境下进行水下 TIG 焊对接试验。采用分段焊的形式,整个圆由 3 段焊缝构成。然后使用万能试验机进行力学性能试验,压头以 2 mm/min 的速率向下挤压,直至定位销被压出,并记录最大力。如图 11、图 12 所示,对接试验在不同参数下形成了焊缝,焊缝均匀连续,无明显缺陷,并且可以在水下进行多次起弧。这进一步验证了此 TIG 焊炬在水下焊接方面的可行性。

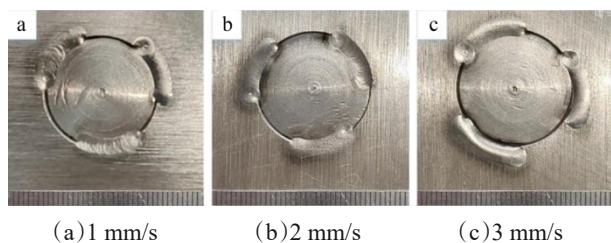


图 11 不同焊速下的焊缝成形

Fig. 11 Weld formation at different welding speeds

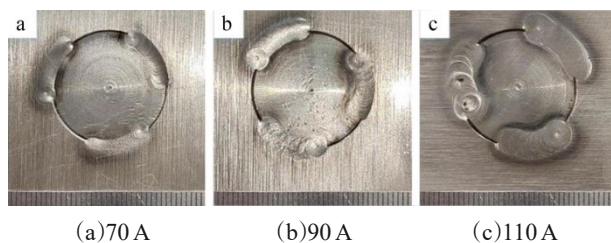


图 12 不同电流下的焊缝成形

Fig. 12 Weld formation at different currents

力学性能测试结果如表 1 所示。由表可知,随着焊接电流的升高,焊缝力学性能也随之升高。同时,随着焊接速度的提高,焊缝力学性能逐渐降低。这个结果与陆上焊接得到的规律基本相似。增大焊接电流和降低焊接速度可以显著提升焊缝的熔深和熔宽,增大焊缝的有效连接面积,从而提高力学性能。

表 1 水下 TIG 力学性能测试

Table 1 Mechanical properties of underwater TIG welding

焊接电流/A	焊接速度/(mm·s ⁻¹)	最大压力/kN	焊接环境
70	1	30.517	水下
70	2	25.776	水下
70	3	16.255	水下
90	2	35.625	水下
110	2	35.561	水下
70	2	19.054	陆上

通过对比相同参数下陆上焊接与水下焊接的焊缝力学性能,可以看出相同参数下陆上和在水下的力学性能相似,水下 TIG 焊接接头的力学性能略高一些。分析认为,水下焊接可能会有水的侵入,导致焊缝缺陷,并且在高冷却速度下,铁素体无法完全转变为奥氏体,导致焊缝中奥氏体的含量降低,从而降低力学性能。然而,高冷却速度也可以使晶粒细化,在一定程度上提升焊缝的力学性能。

4 结论

(1) 采用自行设计的焊炬验证了局部干法水下 TIG 焊接的可行性,水下 TIG 焊接的熔深、熔宽随焊接电流、焊接速度的变化趋势与陆上焊接得到的规律相同。

(2) 水下 TIG 焊接时,熔深、熔宽的变化可能是由水的冷却速度和低温环境对电弧的热压缩交替作用引起的。

(3) 在水下焊接过程中熔化金属冷却速度快,晶粒会得到不同程度的细化,强度会有所提升,可能使水下焊缝强度略高于陆上。

参考文献:

- [1] 梁明, 王国荣, 钟继光. 采用微型排水罩的药芯焊丝水下焊接焊缝自动跟踪系统[J]. 机械工程学报,

- 2007, 43(3):148-153.
- LIANG M, WANG G R, ZHONG J G. Automatic tracking system for underwater welding weld of drug core welding wire with micro drainage cover [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(3): 148-153.
- [2] 朱加雷, 王殿舒, 焦向东, 等. 气室式局部干法水下焊接[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(3): 329-332.
- ZHU J L, WANG D S, JIAO X D, et al. Air chamber-type local dry method of underwater welding [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2015, 49 (3): 329-332.
- [3] Han L G, Wu X M, Chen G D, Zhenmin Wang, Wenyan Fan. Local dry underwater welding of 304 stainless steel based on a microdrain cover [J]. Journal of Materials Processing Tech. 2019, 268(10): 47-53.
- [4] 郭宁, 成奇, 付云龙, 等. TC4 钛合金水下激光填丝焊接工艺研究[J]. 机械工程学报, 2020, 4(07): 1-7.
- GUO N, CHENG Q, FU Y L, et al. Research on TC4 titanium alloy [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 4 (07): 1-7.
- [5] 沈相星, 程方杰, 邸新杰, 等. 水下局部干法焊接预热技术及专用排水罩的研制[J]. 焊接学报, 2018, 39 (03): 112-116.
- SHEN X X, CHENG F J, DI X J, et al. Development of underwater local dry welding preheating technology and special drainage cover [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2018, 39 (03): 112-116.
- [6] 马兆炫, 刘一搏, 王建峰, 等. 双相不锈钢水下局部干法 TIG 焊接工艺[J]. 机械工程学报, 2022, 58 (04): 48-54.
- MA Z X, LIU Y B, WANG J F, et al. TIG welding process of duplex stainless steel [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58 (04): 48-54.
- [7] 古志明, 李尚周, 梅福欣. 同轴式水下局部干法 TIG 电弧焊接[J]. 华南理工大学学报, 1988(03): 1-8.
- GU Z M, LI S Z, MEI F X. Coaxial underwater local dry method of TIG arc welding [J]. Journal of South China University of Technology, 1988 (03): 1-8.
- [8] 李尚周, 梅福欣, 李志明. 水下 TIG 焊接的研究[J]. 华南理工大学学报, 1984, 12(1).
- LI S Z, MEI F X, LI Z M. Research on underwater TIG welding [J]. Journal of South China University of Technology, 1984, 12 (1): 65-68.
- [9] 王中辉, 蒋力培, 焦向东, 等. 气氛压力对水下高压干法全位置焊缝成形的影响[J]. 机械工程学报, 2007, 43(11): 69-73.
- WANG Z H, JIANG L P, JIAO X D, et al. Influence of atmosphere pressure on all position weld formation of underwater high pressure dry method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(11): 69-73.
- [10] TAKESHI O, YASUMITSU H, TOSHIHIRO O, et al. Development of maintenance technology with underwater TIG welding for spent fuel storage pool [J]. Welding International, 2009, 23(5): 382-396.

编辑部网址: <http://www.71dhj.com>