

核电厂定位销局部干法水下 TIG 焊接工艺

孙清洁^{1,2}, 张清华¹, 赵永庆², 郭佳威², 李天佑², 班华康², 侯少军²

(1. 哈尔滨工业大学, 先进焊接与连接国家重点实验室, 哈尔滨, 150001; 2. 哈尔滨工业大学(威海), 特种焊接技术省重点实验室, 威海, 264209)

摘要: 以核电厂定位销水下焊接为研究对象, 研制双层气体保护的局部干法水下 TIG 旋转焊枪, 运动轨迹通过直流电机带动钨极绕固定直径转动实现. 对核级材料 Z2CN19-10 控氮奥氏体不锈钢进行焊接, 研究局部干法水下 TIG 焊接焊缝成形, 优化工艺参数, 结合热循环曲线及电弧形态, 分析焊接接头显微组织及力学性能. 结果表明, 当焊枪的内层和外层保护气均通氩气时, 焊缝成形良好, 电弧形态稳定; 增大焊接电流或减小焊接速度均使焊缝熔深增大, 熔宽增大; 对比水下焊接接头和陆上焊接接头发现, 水的快速冷却作用会促使熔合线附近的铁素体的形态由树枝状转变为板条状, 奥氏体含量减少, 焊缝中心晶粒细化; 水下焊接接头的显微硬度和力学性能略高于陆上焊接接头.

创新点: (1) 采用自行设计的水下 TIG 焊枪, 研究了不同参数对水下 TIG 焊接的作用规律.
(2) 对比了陆上与水下 TIG 焊接组织性能的差异, 得到了优良的焊接接头.

关键词: 水下局部干法焊接; TIG 焊接; 控氮奥氏体不锈钢; 焊缝成形; 组织性能
中图分类号: TG 456.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20230313003

0 序言

在核电厂运行过程中, 不可避免的会涉及到核电站内部设备的更换及维修, 为了减少核辐射的影响, 这些过程往往在水中进行. 这就对水下焊接技术提出了迫切需求^[1]. 当前水下焊接的主要研究方向是水下药芯焊丝气焊接和水下激光焊接, 但是前者焊接烟尘大, 水下可见度低, 焊接质量差, 不适合核电领域的焊接^[2]. 而后者设备昂贵, 体积较大, 对工件装配精度要求高. 钨极氩弧焊具有焊缝成形美观、焊接过程稳定、焊接质量好等优点^[3]. 适用于核电厂水下设备的更换及维修. 然而, 对于水下作业的 TIG 焊接加工, 水下环境会导致焊接起弧困难并降低焊接过程中的电弧稳定性, 因此局部干燥空腔的形成是局部干法水下 TIG 焊接的关键因素, 持续有效的排水以及营造焊接区域的局部干燥空腔尤为重要.

沈相星等人^[4]开发了一款具备预热功能的水下局部干法焊接专用排水罩, 能够在显著降低焊接接头硬度的同时提高韧性. Wang 等人^[5]研制的双气体结构排水罩可以克服水下焊接过程中焊接区域保护和除渣的困难. Fu 等人^[6]通过自主设计的双层气体保护喷嘴得到的水下焊接接头, 其抗拉强度和冲击韧性接近陆上焊接接头. Liao 等人^[7]将局部干法双脉冲 MIG 焊接技术成功应用于 304 不锈钢板的堆焊, 发现双脉冲电流对熔池具有良好的搅拌效果, 可以改善熔池中元素分布的均匀性, 焊缝微观组织分布更加均匀. Guo 等人^[8]利用自主设计的排水装置进行水下激光焊接, 研究了不同工艺参数下对接接头的力学性能的影响, 水下焊接接头的工艺参数范围与陆上焊接接头性能相当. Han 等人^[9]利用自主设计的排水装置进行局部干法 MIG 焊接时, 发现保护气体压力和排水气体压力的变化均对焊接加工过程产生较大影响, 气体压力较大时焊接电弧出现断弧的情况; 气体压力较小时, 电弧燃烧的稳定性的被水破坏, 影响焊缝的成型性. 为了保证水下 TIG 焊枪的可靠性和灵活性. 该文设计了一款气罩式水下 TIG 焊枪, 并对其焊接工艺进行研究, 以应用于核电水下定位销的更换及修复.

收稿日期: 2023 - 03 - 13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52175299, U1960102); 山东省自然科学基金重点项目 (ZR2020KE010).

Z2CN19-10 控氮不锈钢属于超低碳奥氏体不锈钢, 并含有一定的氮元素, 其特点是含碳量非常低, 因而具有良好的抗晶间腐蚀性能. 奥氏体不锈钢的强度虽然受到超低碳含量的制约, 但是也可以利用氮元素的固溶强化作用来提高. 并且, 控氮奥氏体不锈钢不但具有超低碳不锈钢固有的良好抗晶间腐蚀性能, 而且具有较高的强度和耐中子辐照脆化性能, 因而被广泛应用在核电堆内构件、主管道和水注箱等重要设备制造过程中^[10]. 该文中采用自主研发的水下 TIG 焊接专用焊枪对控氮不锈钢进行水下焊接试验, 研究其进气方式和焊接电流焊接速度对焊缝成形、微观组织以及力学性能的影响.

1 试验方法

水下局部干法 TIG 焊接系统由水下 TIG 焊炬、焊接电源和高速摄像系统组成. 试验用水下焊枪是自主设计制作的气罩式 TIG 焊枪. 具有内、外两个喷嘴. 通过内、外两层保护气的双联保护, 使电弧可以在水下稳定燃烧. 焊接过程采用电源型号为奥地利 Fronius 公司生产的 TransTig 2200 焊机, 电弧形态高速摄像采用日本奥林巴斯公司的 i-SPEED 3 相机, 拍摄速度为 2000 帧/s. 该焊枪结构及加工过程如图 1 所示, 焊枪由驱动电机、导电体、联轴器、编码器、同轴摄像头、导电转动体、铜底座、导流罩、钨极夹、陶瓷喷嘴、钨极等部分组成.

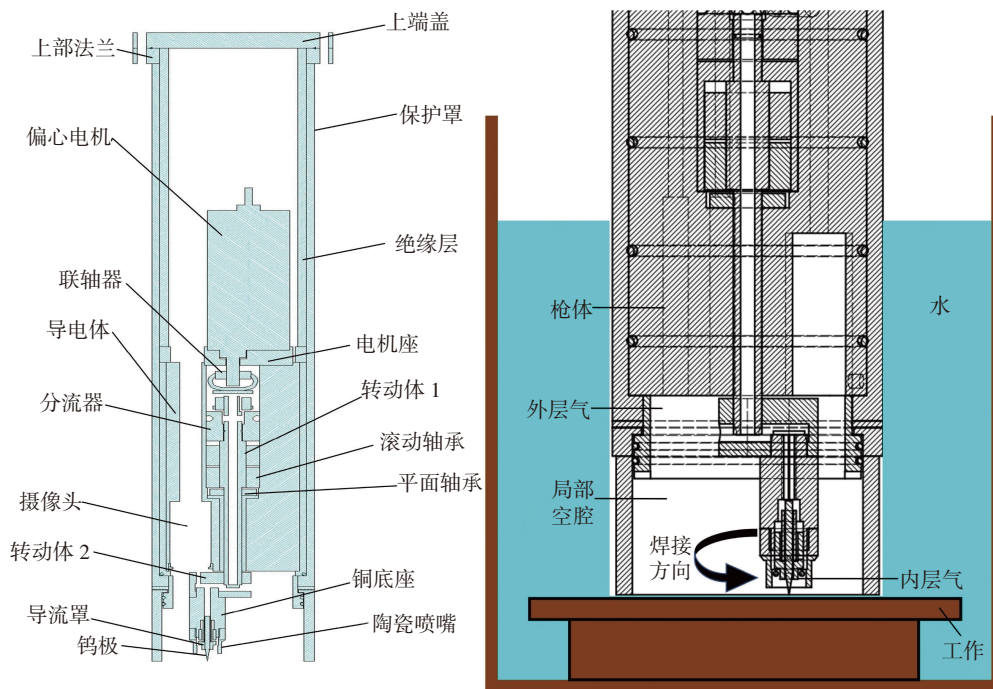


图 1 水下 TIG 焊系统结构及焊接过程示意图

Fig. 1 Schematic of underwater TIG torch and welding process

设计内、外两个喷嘴, 内层保护气从进气口流入后, 从内喷嘴底部围绕钨极流出; 外层保护气从进气口流入后, 充满焊炬内的空腔. 内层保护气主要起排开钨极下方水膜、维持电弧稳定燃烧的作用. 外层保护气在排开焊枪下方水流的同时阻止水流进入焊炬内部. 电弧通过内、外两层保护气的双

联保护, 可以在水下稳定燃烧. 在此基础上, 由偏心电机带动的钨极绕固定直径的圆形路径运动. 仅需将焊炬找正焊接位置, 就可完成整个焊接过程, 使焊接过程简化. 试验材料为核级材料 Z2CN19-10 控氮不锈钢, 成分如表 1 所示.

整个焊接试验均在试验水箱中进行, 水深为

表 1 Z2CN19-10 的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of Z2CN19-10

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N	Cu	Fe
≤0.035	≤1.0	≤2.0	≤0.030	≤0.015	19.21	9.35	≤0.08	≤1.0	余量

50 mm. 如图 2 所示为力学性能检测的实物图. 焊缝性能测试采用 100 kN 万能拉伸试验机夹持自制夹具进行焊接试样的挤出试验, 移动速率为 3 mm/min, 分析不同参数下焊接试样焊缝的力学性能. 同时为了分析验证水下、陆上焊接接头各个区域的硬度值差异, 采用 HVS1000 型显微硬度计对焊接接头进行横向显微硬度测试, 每两个硬度取值点间隔距离为 0.2 mm. 载荷为 4.903 N, 加载时间为 10 s.



图 2 力学性能检测实物图

Fig. 2 Schematic diagram of performance detection

2 结果与讨论

2.1 通气方式对焊接过程稳定性的影响

不同进气方式下的排水效果如图 3 所示, 对比了图 3(a) 中内外均通氩气和图 3(b) 中内层通氩气外层通高压空气的两种不同通气方式下的焊缝成形性、排水效果. 对比了排水过程、焊缝成形以及焊接过程中的电弧形态, 发现虽然两种进气方式均能

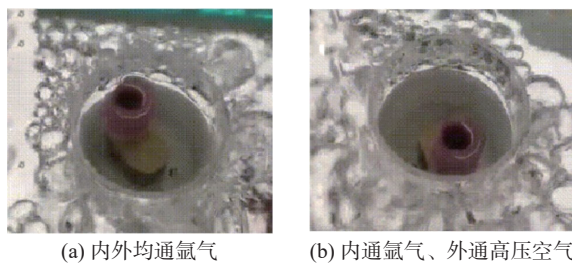


图 3 不同进气方式下的排水效果

Fig. 3 Drainage effect under different gas air intake modes. (a) both argon; (b) argon inside, high pressure air outside

排开焊接区域的水, 但是图 3(b) 中内层通氩气外层通高压空气会将空气卷入焊接区域. 这不但影响电弧稳定性, 而且造成了严重的钨极烧损和焊缝氧化, 不同进气方式下的电弧形态图 4 所示. 此外, 空气环境下难以起弧, 原因是此时空气环境包含的 O_2 , N_2 , CO_2 和 H_2 等双原子分子和多原子分子, 电离前将发生分解反应形成原子, 分解反应吸热, 需要更大的电离能. 因此, 局部干法水下 TIG 焊枪选择内外均通氩气.

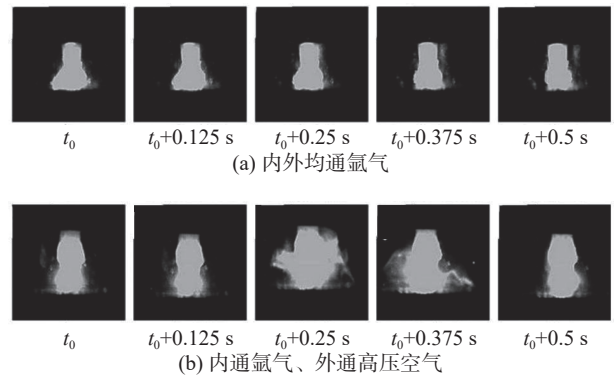


图 4 不同进气方式下的电弧形态

Fig. 4 Arc morphology under different gas intake modes. (a) both argon; (b) argon inside, high pressure air outside

2.2 焊接工艺参数对焊缝质量的影响

2.2.1 焊接电流对焊缝成形的影响

保持焊接速度 2 mm/s 不变, 研究焊接电流对焊缝质量的影响. 不同焊接电流下的焊缝成形及横截面如图 5 所示. 电流过大时焊缝表面成形变差, 焊道也变得弯曲. 原因是焊接电流太大会使水膜来不及被排干净就直接汽化分解, 减弱保护效果. 这是水下焊接环境特殊的冷却条件造成的. 不同焊接电流下的熔宽熔深如图 6 所示, 随着焊接电流增大, 焊缝熔深、熔宽均增加, 但熔深的增长速率明显比熔宽小. 原因是焊接电流较小时, 熔池厚度方向散热速度远大于水平方向, 熔池很难向下流动, 因此熔深增加幅度较小.

2.2.2 焊接速度对焊缝成形的影响

保持焊接电流 70 A 不变, 研究不同焊接速度对焊缝质量的影响, 不同焊接速度下的焊缝成形及横截面如图 7 所示. 从焊缝成形角度分析, 焊接速度过小或过大均不能实现良好的焊接效果, 焊接速度过慢会导致水膜来不及排干就蒸气气化, 降低保护效果; 焊接速度过快导致焊接热输入减少, 加剧了水下熔池凝固过快的现象. 不同焊接速度下的熔

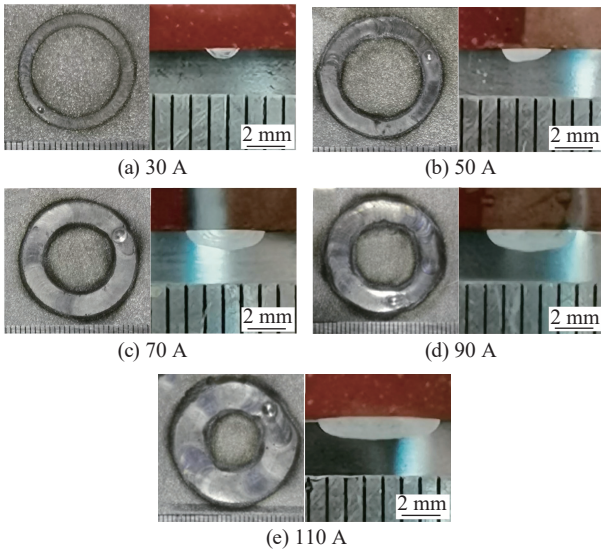


图 5 不同焊接电流下的焊缝成形及横截面

Fig. 5 Weld forming and cross sections under different welding currents. (a) 30 A; (b) 50 A; (c) 70 A; (d) 90 A; (e) 110 A

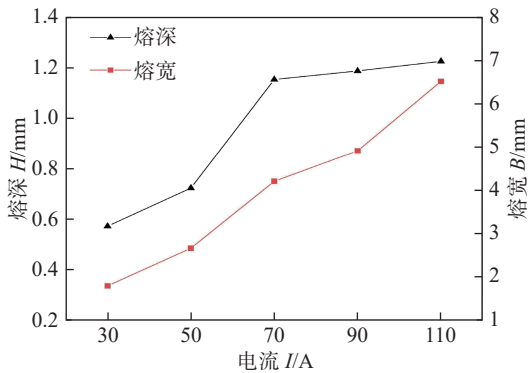


图 6 不同焊接电流下的熔宽熔深

Fig. 6 Melting widths and penetrations at different welding currents

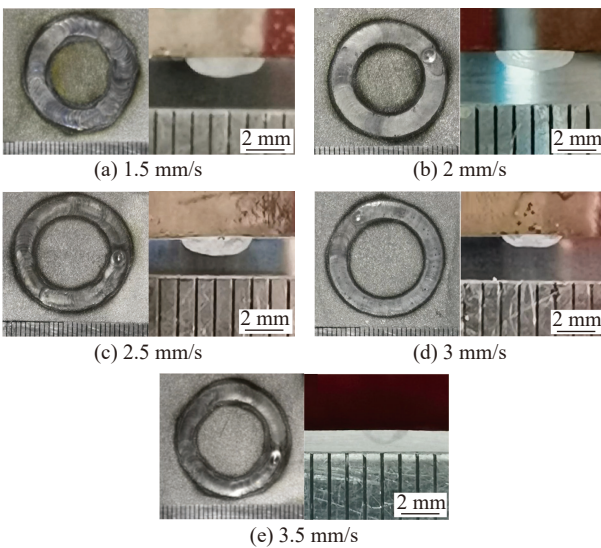


图 7 不同焊接速度下的焊缝成形及横截面

Fig. 7 Weld forming and cross sections under different welding speeds. (a) 1.5 mm/s; (b) 2 mm/s; (c) 2.5 mm/s; (d) 3 mm/s; (e) 3.5 mm/s

宽熔深如图 8 所示,随着焊接速度的增大,焊缝熔深熔宽均随之减小,与陆上焊接得到的规律相似.但是由于水的冷却作用较强,焊缝的熔宽和熔深均无法达到陆上焊接效果.结合上述成形性的分析可知,水下焊接相较于陆上焊接工艺窗口更小.

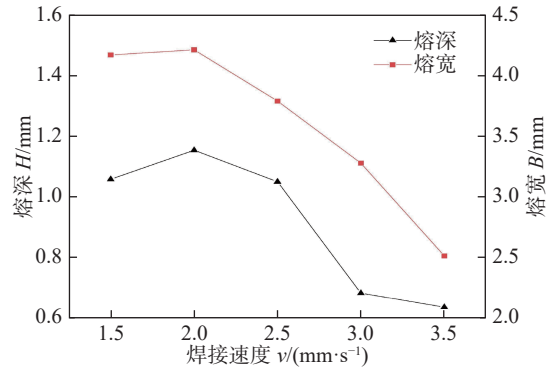


图 8 不同焊接速度下的熔宽熔深

Fig. 8 Melting width and penetration at different welding speeds

2.3 陆上水下焊缝质量对比

水下局部干法焊接与陆上焊接的差别是水下环境,对比不同焊接环境下的焊缝成形、微观组织以及力学性能可以验证焊枪的水下焊接适应性.水下与陆上焊缝成形对比如图 9 所示,陆上焊接时熔深比水下焊接时大,熔宽比水下小.原因是,与陆上焊接相比水下焊接增加了焊接环境中水的影响因素,在水下 TIG 焊接过程中,电弧周围的水加热沸腾需要消耗部分电弧热量,作用在工件上的热输入减少;加之水冷却速度快,在焊接过程中焊缝在厚度方向上的散热速率高于水平方向,热量难以向熔池下方传输,熔化的金属向两侧铺展,从而水下焊接得到的熔深比陆上的小,熔宽比陆上大.

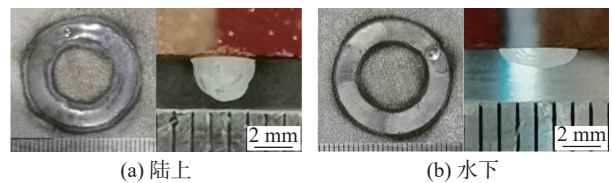


图 9 水下与陆上焊缝成形对比

Fig. 9 Weld seams comparison between underwater and onshore. (a) onshore; (b) underwater

在距焊缝中心 5 mm 处采集陆上和g水下焊接过程中的热循环曲线,如图 10 所示.

陆上焊接时由峰值温度 424 °C 冷却到 100 °C 整个过程持续了大概 44.9 s,受到水下环境的影响,水下焊接的峰值温度约为陆上的一半,冷却过

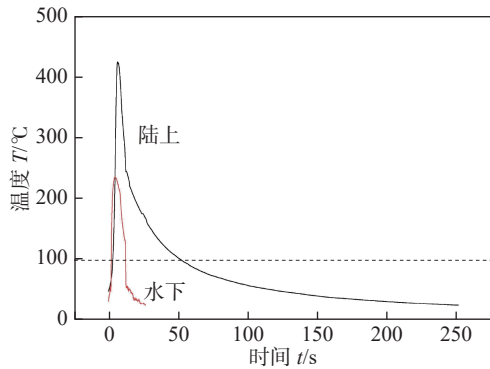


图 10 水下与陆上热循环曲线对比

Fig. 10 Thermal cycles comparison between underwater and onshore

程持续了约 7.7 s, 冷却时间缩短了 83%. 根据元素成分计算此不锈钢的凝固模式为 F-A 凝固模式, 凝固时先析出相为铁素体, 当温度降至固相线后发生固态相变, 大部分的铁素体转变为奥氏体, 其中未转变的铁素体残留在奥氏体边界, 保留到室温. 综

上所述, 焊缝微观组织为奥氏体 (γ -austenite) 和未转变的铁素体 (δ -ferrite). 水下焊接接头和陆上焊接接头的熔合线、焊缝中心和焊缝下部的显微组织如图 11 所示, 焊缝中心处主要分布着奥氏体等轴晶与残留在奥氏体边界的未完全转变的铁素体. 并且, 水下焊接组织较细, 而陆上焊接组织较粗如图 11(b) 所示. 原因是水下环境的快速冷却作用, 提高了焊缝中心组织的形核率, 导致晶粒细化; 陆上 TIG 焊接的熔合线附近分布着较多短而细的碎密铁素体枝晶, 枝晶向焊缝中心生长, 逐渐连贯密集, 并且部分枝晶产生了二次枝晶, 陆上焊接接头熔合线显微组织如图 11(a) 所示, 陆上焊缝下部显微组织如图 11(c) 所示. 在水下局部干法 TIG 焊接过程中, 因为熔池冷却速度的进一步提高, 所以焊缝中的铁素体来不及向奥氏体转变, 导致焊缝中的铁素体含量增加.

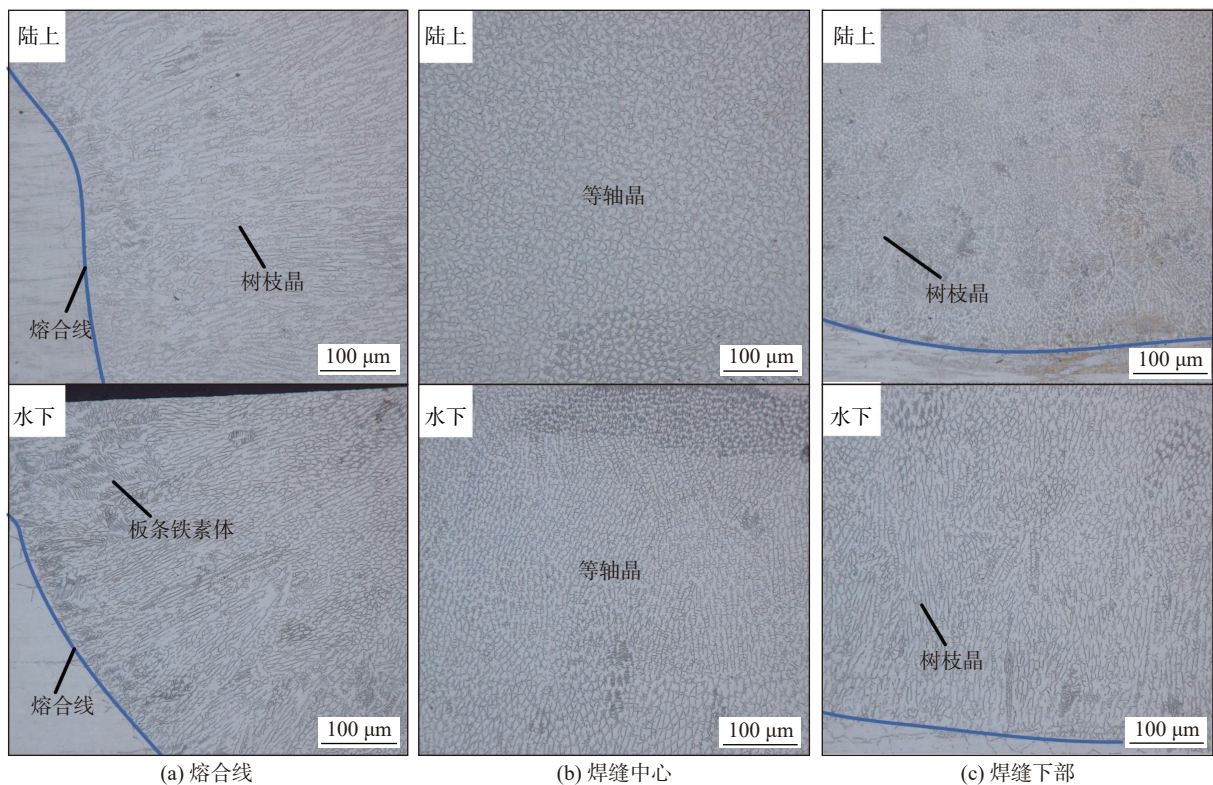


图 11 水下与陆上显微组织对比

Fig. 11 Microstructure comparison between underwater and onshore. (a) fusion line; (b) weld center; (c) the lower part of the weld

熔合线附近的树枝状铁素体出现的更多, 并开始出现板条状铁素体, 枝晶向焊缝中心生长, 先后出现了柱状树枝晶和细小的等轴晶晶粒, 水下焊接接头熔合线显微组织如图 11(a) 所示, 水下焊缝下

部显微组织如图 11(c) 所示. 虽然水下 TIG 焊缝析出的奥氏体含量较低, 一定程度上降低了焊缝强度, 但是在水介质中, 液态金属冷却速度快, 晶粒得到细化, 强度反而有所提高, 总体表现为水下焊缝

强度较高,水下陆上力学性能对比如表 2 所示.

表 2 水下陆上力学性能对比

Table 2 Mechanical properties comparison between underwater and onshore

焊接环境	焊接电流 I/A	焊接速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$	最大压力 F/kN
陆上	70	2	19.045
水下	70	2	25.776

水下焊接接头和陆上焊接接头不同区域的显微硬度分布如图 12 所示.陆上焊接接头和 underwater 焊接接头的焊缝区显微硬度均比母材高,热影响区的显微硬度最低.由于水下焊接接头的晶粒细小,根据霍尔佩奇公式可知,晶粒尺寸越小,材料的显微硬度值就越大.因此水下焊接接头显微硬度的平均值为 171.7HV,高于陆上焊接接头的平均值 168.4HV.上述分析证明了该焊枪的排水效果好、焊接过程稳定,焊接质量与陆上焊缝相当.

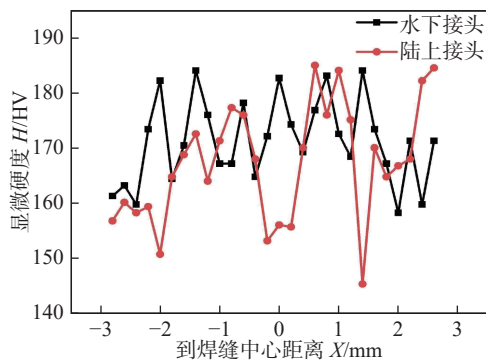


图 12 水下陆上显微硬度对比

Fig. 12 Microhardness comparison between underwater and onshore

3 结论

(1) 对于焊枪保护气进气方式而言,相比内层通氩气外层通高压空气的进气方式,当内层与外层均通氩气时,水下焊接保护效果良好且焊接过程稳定.熔宽随工艺参数的变化速率高于熔深,说明焊缝在深度方向上的散热速率高于水平方向.

(2) 与陆上焊接相比,水的快速冷却作用会使焊缝中奥氏体析出相减小,晶粒明显细化.显微硬度与力学性能的结果证明,将此焊枪应用于水下焊接,可以获得和陆上焊接力学性能相媲美的焊缝.

参考文献

- [1] Jia C B, Zhang Y, Zhao B, *et al.* Visual sensing of the physical process during underwater wet FCAW[J]. *Welding Journal*, 2016, 95(6): 202 – 209.
- [2] 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(4): 48 – 54.
Ma Zhaoxuan, Liu Yibo, Wang Jianfeng, *et al.* Underwater local dry tig welding of duplex stainless steel[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(4): 48 – 54.
- [3] 韩雷刚,钟启明,陈国栋,等.局部干法水下焊接技术的发展[J].*浙江大学学报*, 2019, 53(7): 1252 – 1264.
Han Leigang, Zhong Qiming, Chen Guodong, *et al.* Development of local dry underwater welding technology[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2019, 53(7): 1252 – 1264.
- [4] 沈相星,程方杰,邱新杰,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(3): 112 – 116.
Shen Xiangxing, Fangjie Cheng, Xinjie Di, *et al.* Local-dry underwater welding preheating technology and development of special drain cover[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(3): 112 – 116.
- [5] Wang Z M, Xie F X, Feng Y L, *et al.* Underwater robot local dry welding system[J]. *China Welding*, 2019, 28(4): 22 – 27.
- [6] Fu Y L, Guo N, Cheng Q, *et al.* Underwater laser welding for 304 stainless steel with filler wire[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(6): 15648 – 15661.
- [7] Liao H P, Li X Y, Chi P, *et al.* Effect mechanism of arc oscillation on microstructure and mechanical performance of SUS304 weld seams manufactured by local dry underwater double pulsed MIG welding[J]. *Materials Science and Engineering*, 2023, 887: 145752.
- [8] Guo N, Fu Y L, Xing X, *et al.* Underwater local dry cavity laser welding of 304 stainless steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 260: 146 – 155.
- [9] Han L G, Wu X, Chen G D, *et al.* Local dry underwater welding of 304 stainless steel based on a microdrain cover[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 268: 47 – 53.
- [10] 任伟,吴冰洁,邱阳,等.控氮 304 不锈钢热变形过程中的动态再结晶行为研究[J].*西安交通大学学报*, 2021, 55(3): 145 – 154.
Ren Wei, Wu Bingjie, Qiu Yang, *et al.* Dynamic recrystallization behavior of nitrogen-controlled 304 stainless steel in hot deformation[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2021, 55(3): 145 – 154.

第一作者:孙清洁,博士,教授,博士生导师;主要从事高效焊接方法、设备及焊接机理方面的研究; Email: qjsun@hit.edu.cn.

(编辑: 汤明日)

MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

Investigation on microstructure characteristics of Ti-48Al alloy fabricated using twin-wire directed energy deposition-plasma arc

WANG Lin, HUA Xueming, SHEN Chen, ZHANG Yuelong, LI Fang, ZHOU Wenlu, DING Yuhan(Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China). pp 1-6

Abstract: Ti-48Al alloy is fabricated successfully using plasma arc powered twin wire-directed energy deposition-arc, and its microstructure characteristic before and after heat treatment is systematically investigated. The results show that as-deposited Ti-48Al alloy consists of α_2 and γ phase. The microstructure is characterized by the alternatively distributed dendritic grain and fully lamellar colony along the building direction for as-deposited Ti-48Al alloy, and there is interdendritic Al element segregation in the dendritic grain region. After heat treatment in 1340 °C/10 h/furnace cooling, the duplex microstructure with fine grain size is obtained, and the microstructure heterogeneity is significantly improved, the α_2 phase content is obviously increased, the preferred orientation of microstructure is also weakened.

Highlights: (1) Ti-48Al alloys are successfully fabricated using plasma arc powered twin wire-directed energy deposition-arc system.

(2) Microstructure characteristics and its evolution mechanism of as-deposited Ti-48Al alloy are revealed systematically.

(3) Heat treatment method to eliminate microstructural heterogeneity of additively manufactured Ti-48Al alloy is proposed.

Key words: directed energy deposition-arc; TiAl alloy; microstructure; heat treatment

Local dry underwater TIG welding process of positioning pin in nuclear power plant

SUN Qingjie^{1,2}, ZHANG Qinghua¹, ZHAO Yongqing², GUO Jiawei², LI Tianyou², BAN Huakang², HOU Shaojun²(1. Harbin Institute of Technology, State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin, 150001, China; 2. Harbin Institute of Technology, Provin-

cial Key Laboratory of Special Welding Technology, Weihai, 264209, China). pp 7-12

Abstract: Taking the underwater welding of positioning pin in nuclear power plant as the research object, an underwater TIG welding gun with double-layer gas protection is developed. The motion trajectory is realized by DC motor driving the tungsten pole to rotate around a fixed diameter. The nuclear grade material Z2CN19-10 nitrogen-controlled stainless steel was welded. The weld formation of local dry underwater TIG welding was studied. The process parameters were optimized. The microstructure and mechanical properties of the joint were analyzed by combining the thermal cycle curve and arc shape. The results show that when the inner and outer layers are filled with argon, the weld is well formed and the arc shape is stable. Increasing the welding current or reducing the welding speed increases the weld penetration and the weld width. By comparing the underwater and onshore welded joints, it is found that the rapid cooling of water will promote the ferrite near the fusion line to change from dendritic to lath, reduce the austenite content and refine the grain. The microhardness and mechanical properties of underwater joints are slightly higher than those of onshore joints.

Highlights: (1) The effects of different parameters on underwater TIG welding were studied by using a self-designed underwater TIG welding gun.

(2) The differences of microstructure and properties between onshore and underwater TIG welding were compared, and excellent welded joints were obtained.

Key words: underwater local dry welding; TIG welding; nitrogen controlled austenitic stainless steel; appearance of weld; microstructure and Properties

Quality prediction of aluminum alloy resistance spot welding based on correlation analysis and SSA-BP neural network

DONG Jianwei, HU Jianming, LUO Zhen(School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300350, China). pp 13-18,32

Abstract: Based on the characteristics of the process signals in the resistance spot welding process, three working conditions of different spacing, different gaps and different spacing