

# 核电用不锈钢双钨极氩弧焊接头组织与性能

程小华<sup>1</sup>, 李小宇<sup>2</sup>

(1. 中国核工业华兴建设有限公司, 南京, 210019; 2. 哈尔滨焊接研究院有限公司, 哈尔滨, 150028)

**摘要:** 针对核电站乏燃料不锈钢水池 6 mm 厚的 304L 不锈钢板材, 采用高效双钨极氩弧焊工艺焊接试板, 对双钨极氩弧焊接头进行拉伸性能、冲击性能、弯曲性能、硬度、金相组织、铁素体含量、抗晶间腐蚀性能及粗晶区晶粒度评级等试验研究。结果表明, 采用双钨极氩弧焊焊接核级 304L 不锈钢材料, 焊接接头综合性能良好; 双热源的工艺虽然增加了热量, 但金相组织仍为奥氏体和少量铁素体的典型形貌, 铁素体含量在 5%~12% 范围内, 同时焊接接头粗晶区未发现明显的粗化现象, 具备一定的抗热裂性能且保持了良好的塑韧性; 晶间腐蚀试验未发现接头有敏化现象, 表明该焊接接头耐腐蚀性能优良。综上试验说明核电站不锈钢水池双钨极氩弧焊接头综合性能可靠。

**创新点:** 首次在核电领域应用双钨极氩弧对接焊工艺, 并对接头的组织与性能综合评价, 为该工艺在核电领域焊接应用提供支持。

**关键词:** 双钨极氩弧焊; 核电站; 304L 不锈钢; 高效

中图分类号: TG 407 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20220409002

## 0 序言

双钨极氩弧焊是一种多热源的高效优质的连接方法, 用于核电站乏燃料不锈钢水池现场施工, 可解决目前焊接存在的效率低, 成形差等问题。常规钨极氩弧焊是一种非熔化极的焊接方法, 由于选用熔点高的钨作电极, 在焊接过程中不发生熔化, 电弧长度保持不变, 焊接过程稳定, 加上采用惰性气体保护, 因此焊接质量优良, 通常用于质量要求高的重要结构焊缝和根部焊道的焊接<sup>[1-3]</sup>。在核电站不锈钢结构的焊接施工中, 钨极氩弧焊是首选的焊接工艺方法之一。但常规钨极氩弧焊电弧能量密度低、焊接速度慢, 若增加焊接电流, 将会使电弧压力显著提高, 在较高的电弧压力下焊接容易造成熔池不稳定, 焊缝易形成各种焊接缺陷<sup>[2]</sup>。双钨极氩弧焊是在原有的钨极氩弧焊基础上增加一个钨极电弧, 在保证钨极氩弧焊优点的同时, 提高了熔敷速度和焊接速度, 进而提高了焊接效率。通过优化两个钨极电弧的位置分布、角度和焊接工艺参数, 改善焊缝成形情况, 特别是横焊位置的焊缝成形,

减少了焊接缺陷<sup>[2-4]</sup>。

以 6 mm 厚的 304L 不锈钢板为研究对象, 针对开发的核电不锈钢水池双钨极氩弧自动焊工艺, 对焊接接头的组织、力学性能、铁素体含量、抗晶间腐蚀性能及粗晶区晶粒度评级等进行试验研究, 并分析双钨极氩弧焊接头的稳定性、均匀性以及产生机理, 为该工艺在核电领域应用提供支持。

## 1 试验方法

试验用母材为核电不锈钢水池所使用的 304L 不锈钢, 规格为 400 mm × 200 mm × 6 mm, 焊接材料为 φ1.2 mm ER308L 实心焊丝。母材及焊丝的化学成分及力学性能如表 1 和表 2 所示, 表中母材、焊丝的单值为最大值。母材和焊丝均为典型 3 系奥氏体不锈钢。表 3 为焊接工艺参数。焊接过程中两个电流 ( $I_1, I_2$ ) 分别由两个焊接电源提供, 参数独立可调, 焊接速度较手工钨极氩弧焊提高 1 倍以上, 焊接热输入在 9.0~16.8 kJ/cm 之间。图 1 为高速摄像拍摄的焊接电弧形态。两个钨极产生的钨极电弧共同作用在一个焊接熔池上, 熔滴过渡方式为搭桥过渡, 电弧稳定无飞溅, 体现了典型的钨极氩弧焊特征。

表 1 304L 不锈钢、ER308L 焊丝和焊缝的主要化学成分(质量分数, %)  
Table 1 Main chemical compositions of 304L stainless steel, ER308L welding wire and weld

材料	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Co	Fe
304L 不锈钢	0.030	0.75	2.0	0.045	0.030	8.00~12.00	17.5~19.5	—	—	余量
ER308L 焊丝	0.030	0.65	1.0~2.5	0.03	0.03	9.00~11.00	19.5~22.0	0.75	0.75	余量
焊缝	0.016	0.34	1.83	0.02	0.0058	9.60	19.42	0.082	0.026	余量

表 2 304L 不锈钢和熔敷金属的力学性能  
Table 2 Mechanical properties of 304L stainless steel and deposited metal

材料	抗拉强度 $R_m$ /MPa	断后伸长率 $A(\%)$
304L 不锈钢	485	40.0
熔敷金属	510	25.0

表 3 焊接工艺参数  
Table 3 Welding parameters

焊接道次	焊接电流		电弧电压 $U/V$	焊接速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$
	$I_1/A$	$I_2/A$		
打底层	80~140	70~140	15	2.5
填充层	80~130	70~130	15	2.5
盖面层	70~120	70~120	15	2.7

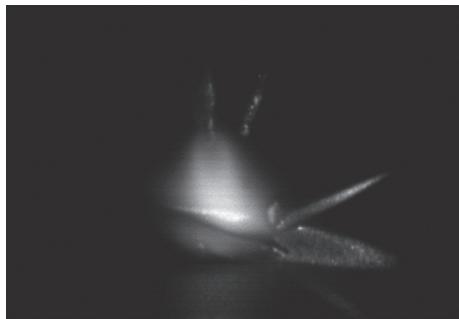


图 1 双钨极氩弧焊电弧形态  
Fig. 1 Arc shape of the double tungsten argon arc hybrid welding

试板焊接结束后, 分别对焊接接头室温拉伸性能、冲击性能、弯曲性能、宏观及微观金相、硬度、抗晶间腐蚀性能、铁素体含量、粗晶区晶粒度等进行测试, 综合评价分析双钨极氩弧焊接头的组织与性能。按照标准 GB/T 2651—2008《焊接接头拉伸试验方法》采用 AG-X plus 型电子拉力试验机进行拉伸试验, 沿着垂直焊缝方向制取试样, 加载速率 1.2 mm/min, 一组试样 2 件。按照标准 GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》采用 ZBC2452-C 型摆锤式冲击试验机在室温下进行冲击试验, 沿着垂直焊缝方向制取试样, 试样尺寸为 55 mm × 10 mm × 2.5 mm, 分别在焊缝中心及热影

响区开 2 mm 深的 V 形缺口, 一组试样 3 件。按照标准 GB/T 2653—2008《焊接接头弯曲试验方法》采用 WE-600A 型液压式万能试验机进行弯曲试验, 压头直径 24 mm, 弯曲角度 180°, 加载速率 5 mm/min, 一组试样 4 件, 其中 2 件面弯、2 件背弯。按照标准 GB/T 2654—2008《焊接接头硬度试验方法》采用 HVS-50 型维氏硬度仪进行硬度试验, 测试载荷为 98 N, 试验位置为焊缝点间距为 1 mm、热影响区距熔合线 0.5 mm 和母材区距熔合线 2.5 mm, 如图 2 所示。

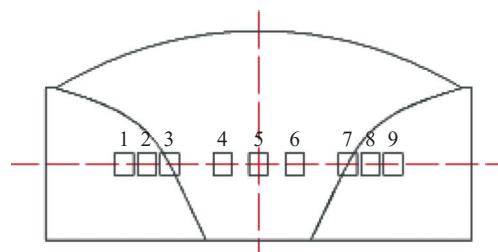


图 2 硬度试验位置  
Fig. 2 Location of hardness test

金相组织和晶粒度评级的检验面为垂直于焊接方向的焊缝横截面, 试样经研磨、抛光、 $\text{CrO}_3\text{-H}_2\text{O}$  溶液电解腐蚀后分别按照标准 GB/T 13289—2015《金属显微组织检验方法》和 GB/T 6394—2017《金属平均晶粒度测定方法》采用 GX51 型金相显微镜进行观察分析, 粗晶区晶粒度试验位置如图 3 所示。按照 GB/T 1954—2008《铬镍奥氏体不锈钢焊缝铁素体含量测量方法》中的磁性法采用 FMP30 型铁素体测量仪进行铁素体含量测量, 测量位置如图 4 所示, 每组测量点横向间隔为 3 mm, 纵向间隔为 4 mm, 共测 4 个位置, 每个位置读取 5 次。按照 GB/T 4334—2020《金属和合金的腐蚀奥氏体及双相(铁素体-奥氏体)不锈钢晶间腐蚀试验方法》E 法进行晶间腐蚀试验, 评价接头抗腐蚀性能, 试验前试样均经过 675 °C × 1 h 的敏化处理, 经研磨、清洗、干燥后将试样装入底部铺满铜屑的烧杯中, 并倒入配制的硫酸-硫酸铜溶液, 通以冷却水, 加热至微沸状态, 在微沸状态下保持 20 h。

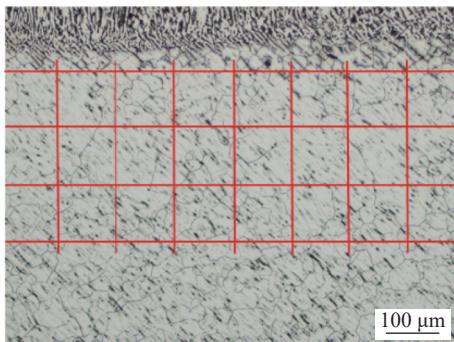


图 3 测量位置  
Fig. 3 Measuring position

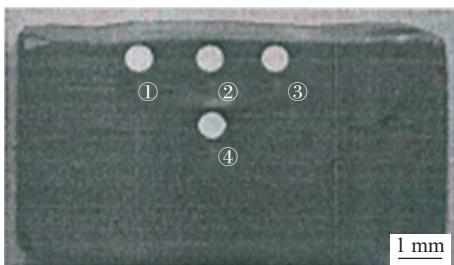


图 4 铁素体测量位置  
Fig. 4 Measurement location of ferrite content

## 2 试验结果与分析

### 2.1 力学性能

双钨极氩弧焊接头的平均抗拉强度为 577 MPa, 满足 RCC-M 标准中大于等于 485 MPa 的要求, 试样均断于焊缝区。试验值较标准值提高 18.97%, 保证了结构的安全运行。抗拉强度的实测值与平均值波动均小于 1%, 说明整个焊缝强度的均匀性较好, 从而保证了结构的一致性。

图 5 为冲击试样的宏观形貌。从图 5 可知, 断口有一定起伏, 且剪切唇明显, 说明试样在断裂前承受较大的塑性变形, 宏观断裂特征表现为塑性断裂。表 4 为双钨极氩弧焊接头的室温冲击试验结果。由于试样厚度为 2.5 mm, 换算成 10 mm 厚度的标准试样值, 各位置的冲击吸收能量均大于 100 J, 远大于标准 GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》要求的 60 J, 体现了接头的优良冲击韧性。此外, 各组试样冲击吸收能量值相差不大。图 6 为冲击试样焊缝和热影响区断口的扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 照片。从图 6 可知, 断口的微观形貌无论是起裂区和扩展区的微观断裂特征均为韧窝, 韧窝尺寸较小, 说明形核点的尺寸较细小, 这是该工艺方法良好的冶金结合体现; 同时, 韧窝有一定深度, 表明断裂前韧窝承受

了一定的塑性变形, 这些均是宏观塑性断口典型的微观表现, 与冲击试验结果有很好的一致性。



图 5 冲击试样形貌  
Fig. 5 Morphology of impact specimen

表 4 接头的室温冲击吸收能量 (J)

Table 4 Impact absorbed energy of welded joints at the room temperature

缺口位置	实测值	平均值
焊缝中心	27.0, 26.5, 26.0	26.5
熔合线 + 0.5 ~ 1 mm	33.5, 29.0, 25.5	29.3

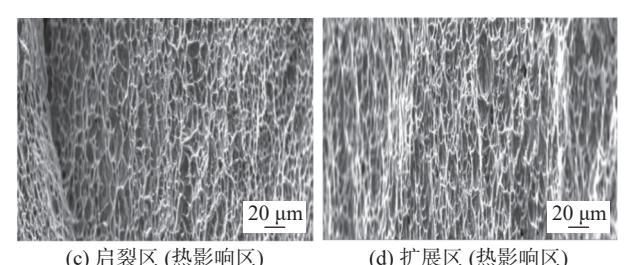
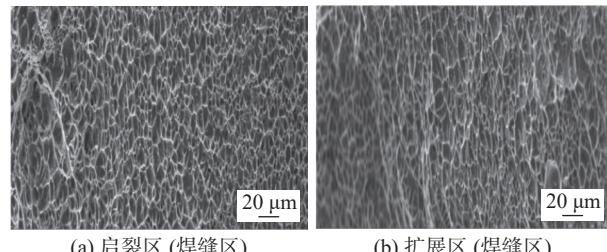


图 6 焊缝和热影响区冲击断口微观形貌  
Fig. 6 Microfracture morphology of impact specimen at weld zone and heat affected zone. (a) crack initiation zone (weld zone); (b) crack growth zone (weld zone); (c) crack initiation zone (heat affected zone); (d) crack growth zone (heat affected zone)

双钨极氩弧焊接头的弯曲试验结果均合格, 试样的侧面和正面均未发现大于 3.0 mm 的单个裂纹、气孔和夹杂物等缺陷, 这表明该接头在弯曲载荷的作用下整体塑性变形能力良好。

图 7 为双钨极氩弧焊接头的硬度试验结果。从整个接头的硬度试验结果来看, 各位置的硬度值在 155 ~ 170 HV10 之间变化, 未发生较大的波动, 焊接接头未发生明显的软化现象。

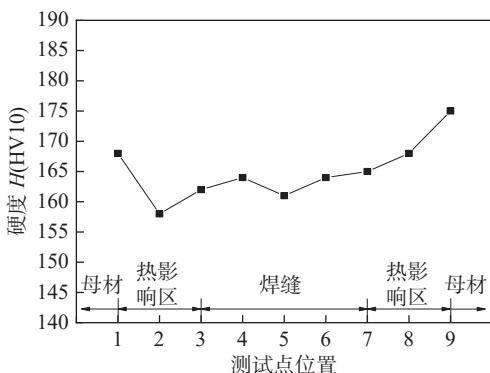


图 7 双钨极氩弧焊接头的硬度试验结果

Fig. 7 Hardness test results of the double tungsten argon arc hybrid welding joint

## 2.2 微观组织和粗晶区晶粒度

图 8 和图 9 分别为双钨极氩弧焊接头的宏观金相与微观组织, 检验面为垂直于焊接方向的焊缝

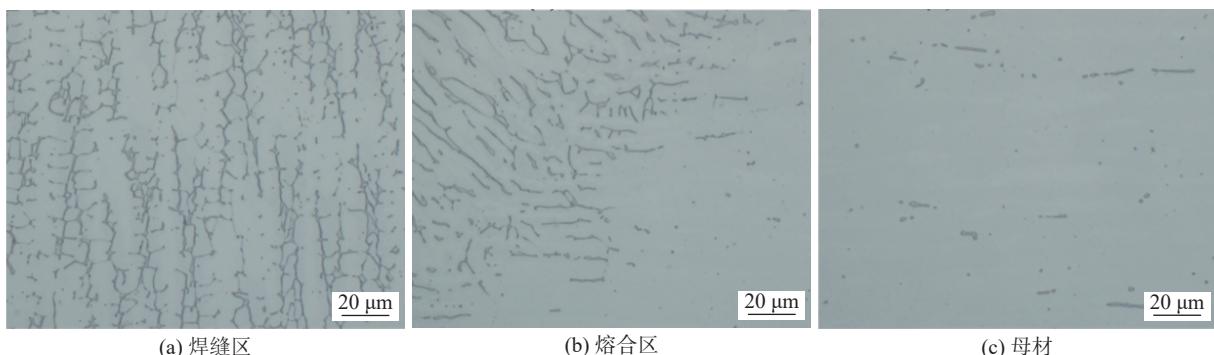


图 9 双钨极氩弧焊接头的微观组织

Fig. 9 Microstructure of the double tungsten argon arc hybrid welding joint. (a) weld zone; (b) fusion zone; (c) base metal

检验面为垂直于焊接方向的焊缝横截面, 依据 GB/T 6394—2017《金属平均晶粒度测定方法》中直线截点法对焊缝热影响区进行平均晶粒度测定。表 5 为晶粒度的测定结果。双钨极氩弧焊虽然较常规钨极氩弧焊多一个热源, 但焊接时熔池尺寸增加不大, 电弧热被传递到熔池中心, 随着焊接时间延长, 熔深和熔宽逐渐增加, 而熔深增加较快, 因此大部分热量用于焊缝熔深的增加, 晶粒尺寸并未明显增长<sup>[5]</sup>。

表 5 晶粒度的测定结果  
Table 5 Measurement results of grain size

编号	交点数 $P_i$	截点数 $P_L$		晶粒度 G(级)
		实测值	平均值	
1	126.5	21.26		
2	201	33.78	25.91	6.10
3	135	22.69		

横截面。从图 8 可见, 双钨极氩弧焊接头未见气孔、裂纹、夹渣、未焊透、未熔合等焊接缺陷。从图 9 可见, 焊缝区、熔合区和母材区组织均为奥氏体 + δ 铁素体, 熔合区组织分布与焊缝区不同, 母材区组织中 δ 铁素体呈带状分布。

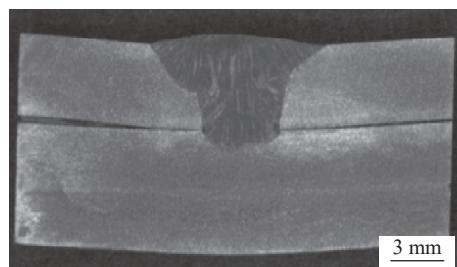


图 8 双钨极氩弧焊接头的宏观金相照片

Fig. 8 Macro metallography of the double tungsten argon arc hybrid welding joint

## 2.3 铁素体含量测量和晶间腐蚀试验

表 6 为焊缝区铁素体含量的测量结果, 铁素体含量均在 5% ~ 12% 之间, 符合标准要求。结果表明, 双钨极氩弧焊接头的铁素体含量控制在一定的范围内, 保证焊缝中不形成过多的脆性相, 同时又降低了焊接时液化裂纹的敏感性<sup>[6-8]</sup>。

表 6 焊缝区铁素体含量(质量分数, %)

Table 6 Ferrite content in weld zone

测量位置	铁素体含量
①	7.6
②	11.0
③	7.5
④	6.0

晶间腐蚀试验试样经冲洗干燥后, 采用压头直径 5 mm 沿熔合线将每个试样弯曲成“V”形, 弯曲角度大于 90°。弯曲试样在显微镜下放大 10 倍观

察, 试样焊缝表面未发生开裂, 说明接头具有较好的抗晶间腐蚀性能。

### 3 结论

(1) 核电不锈钢水池 304L 不锈钢双钨极氩弧焊接头的力学性能均满足核电站相关标准要求, 性能优良, 质量稳定。该接头的抗拉强度波动小, 说明整个焊缝强度的均匀性较好, 室温冲击吸收能量均大于 100 J, 远大于标准要求的 60 J, 且断口特征为韧窝, 体现了接头优良的冲击韧性; 弯曲试验未发现缺陷, 接头的整体塑性变形能力较好; 整个接头硬度值波动不大, 没有明显的软化现象。

(2) 双钨极氩弧焊接头微观组织为奥氏体和少量的铁素体, 铁素体含量在 5%~12% 之间, 且粗晶区晶粒未有明显粗化现象, 说明该接头具有良好的塑韧性, 同时还具有较好的抗热裂纹能力。晶间腐蚀试验表明, 双钨极氩弧焊接头没发生敏化, 说明该接头具有较好的抗晶间腐蚀性能。

### 参考文献

- [1] 郝晓虎. TC4 钛合金/304 不锈钢薄板钨极氩弧焊接头组织及性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2020.  
Hao Xiaohu. Microstructure and mechanical properties of TC4 titanium alloy/304 stainless steel sheets gas tungsten arc welded joint[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [2] 王树保, 张海宽, 冷雪松, 等. 双钨极氩弧焊工艺及焊缝成形机理分析 [J]. 焊接学报, 2007, 28(2): 21~24.  
Wang Shubao, Zhang Haikuan, Leng Xuesong, et al. Twin-electrode TIG welding procedure and mechanism of weld formation[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(2): 21~24.
- [3] 吴统立, 王克鸿, 孔见, 等. 不锈钢高频复合双钨极氩弧焊接工艺方法 [J]. 焊接学报, 2018, 39(10): 20~24.  
Wu Tongli, Wang Kehong, Kong Jian, et al. High frequency hybrid twin-electrode TIG welding process for stainless steel[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(10): 20~24.
- [4] Kobayashi K, Nishimura Y, Iijima T, et al. Practical application of high efficiency twin-arc TIG welding method(sedar-TIG) for pcng storage tank[J]. Welding in the World, 2004, 48: 35~39.
- [5] 王新鑫, 樊丁, 黄健康, 等. 双钨极 TIG 电弧-熔池传热与流动数值模拟 [J]. 金属学报, 2015, 51(2): 178~190.  
Wang Xinxin, Fan Ding, Huang Jiankang, et al. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in double electrodes TIG arc - weld pool[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(2): 178~190.
- [6] John C Lippold, Damian J Kotecki. 不锈钢焊接冶金学及焊接性 [M]. 陈剑虹, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008.  
John C Lippold, Damian J Kotecki. Welding metallurgy and weldability of stainless steels[M]. Chen Jianhong, trans. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [7] 王文斌. 单相奥氏体合金激光焊接凝固裂纹敏感性研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2021.  
Wang Wenbing. Study on solidification cracking susceptibility of single-phase austenitic alloys during laser welding[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021.
- [8] 彭云, 宋亮, 赵琳, 等. 先进钢铁材料焊接性研究进展 [J]. 金属学报, 2020, 56(4): 601~618.  
Peng Yun, Song Liang, Zhao Lin, et al. Research status of weldability of advanced steel[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(4): 601~618.

**第一作者:**程小华, 正高级工程师; 主要研究方向为核工程焊接新材料、新工艺、智能焊接技术应用研究; Email: 727505181@qq.com.

**通信作者:**李小宇, 硕士, 研究员; Email: pearrain@163.com.

(编辑: 戴红)