

基于局部干法的核电水池覆面缺陷焊接修复工艺研究

周政¹, 杨驰², 郭方涛², 张潇¹, 朱加雷², 李守根², 李刚³

1. 中核武汉核电运行技术股份有限公司 湖北武汉 430000

2. 北京石油化工学院, 机械工程学院 北京 102617

3. 核工业工程研究设计有限公司 北京 101310

摘要: 针对核电站乏燃料水池钢覆面出现的腐蚀缺陷等问题, 采用了局部干法水下TIG焊接的修复方法对覆板进行焊接修复。首先, 利用设计的压力环境模拟系统进行0.3MPa压力范围内干式焊接试验, 获得不同压力下的覆板焊接最佳工艺; 基于干式环境最佳焊接参数, 开展局部干法水下焊接工艺探索, 并对焊接接头切样进行金相检测。宏观金相结果显示: 焊缝成形良好, 无裂纹、气孔; 微观金相检测结果表明: 显微组织基体为呈枝晶状的奥氏体, 枝晶间为铁素体, 未发现显微裂纹和夹杂物, 为核电站乏燃料水池覆板的在役修复奠定了基础。

关键词: 核电站; 局部干法; TIG; 覆板

Research on the welding repair process for defects on the cladding of nuclear power plant pools based on partial dry techniques

ZHOU Zheng¹, YANG Chi², GUO Fangtao², ZHANG Xiao¹, ZHU Jialei², LI Shougen², LI Gang³

1.China Nuclear Power Operation Technology Co., Ltd., Wuhan 430000, Hubei, China

2.Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China

3.Nuclear Industry Research and Engineering Co., Ltd., Beijing 101310, China

Abstract: In response to the corrosion defects and other issues on the steel cladding of the spent fuel pool in nuclear power plants, this article adopted the repair method of local dry underwater TIG welding to repair the cladding. Firstly, the designed pressure environment simulation system was used to conduct dry welding tests within a pressure range of 0.3MPa, and obtain the optimal welding process for the cladding under different pressures. Based on the optimal process parameters in a dry environment, an exploration of local dry underwater welding process was carried out, and metallographic testing was conducted on the cut samples of the welded joints. The macroscopic crystal phase results showed that the weld formed well without cracks or pores, and the results of microscopic crystal phase testing indicated that the microstructure matrix was dendritic austenite, with ferrite between dendrites, no fiber cracks or precipitates were found. This paper lays the foundation for the in-service repair of the spent fuel pool cladding in nuclear power plants.

Keywords: nuclear power plants; local dry method; TIG; cladding plate

1 序言

水下在线修复技术是核电站长期安全运行的关键技术之一。鉴于核电站的特殊性，其对水下焊接质量有着更高的要求^[1]。当前，根据焊接过程所处的环境不同，水下焊接技术有湿法焊接、高压干法焊接和局部干法焊接。其中，湿法焊接电弧不稳定，易导致成形质量差^[2]；高压干法焊接装置尺寸大，难以适应核电站复杂的空间环境；局部干法焊接利用微型气罩营造一个干燥环境，兼具湿法焊接的灵活性和高压干法的高焊接质量，成为水下焊接技术研究的重点^[3]。局部干法TIG焊接技术可在焊缝区域有效地避免氧化等不良影响，提高焊接质量和稳定性，且局部干法TIG焊接具有较小的热影响区，可减小在局部修复或连接过程中对核电站其他设备热应力的影响^[4]。为此，针对核电站乏燃料水池壁面和底面钢覆面易出现腐蚀等缺陷问题，本研究基于局部干法水下TIG焊接技术搭建了水下焊接试验系统，通过干式环境和水下环境试验建立了水下环境钢覆面的覆板修复作业工艺，经检测表明，该工艺可用于乏燃料水池钢覆面的在役修复

过程^[5, 6]。

2 试验装置、材料与方法

2.1 试验装置

本研究搭建了水下焊接试验系统，如图1所示。由图1可知，该系统由上位机、主控站、压力环境模拟系统、TIG焊接系统、双层气室式排水罩及焊枪移动平台等组成，能够实现水下环境局部干法TIG全自动焊接。焊接电源为WSM-HY-ARC 400焊机，与微型送丝机、弧压跟踪系统、熔池监控相机组成TIG焊接系统。焊枪移动系统为电力驱动，可以通过示教的方法实现焊枪的运动控制、跟踪和摆动。排水罩是局部干法水下焊接的重要装置，该装置采用双层气室设计，中间通过气缸控制舱门移动实现上、下舱室的连通与关闭。压力环境模拟系统包含压力容器、气泵、进气阀及泄压阀等元件，可实现压力容器的注水、排水、加压和泄压过程，从而实现30m水深范围内的水下环境模拟。主控箱、上位机位于压力容器外，实现整个水下焊接试验系统控制和焊接过程监控。采用带有焊缝的焊接模拟体模拟乏燃料水池钢覆面。

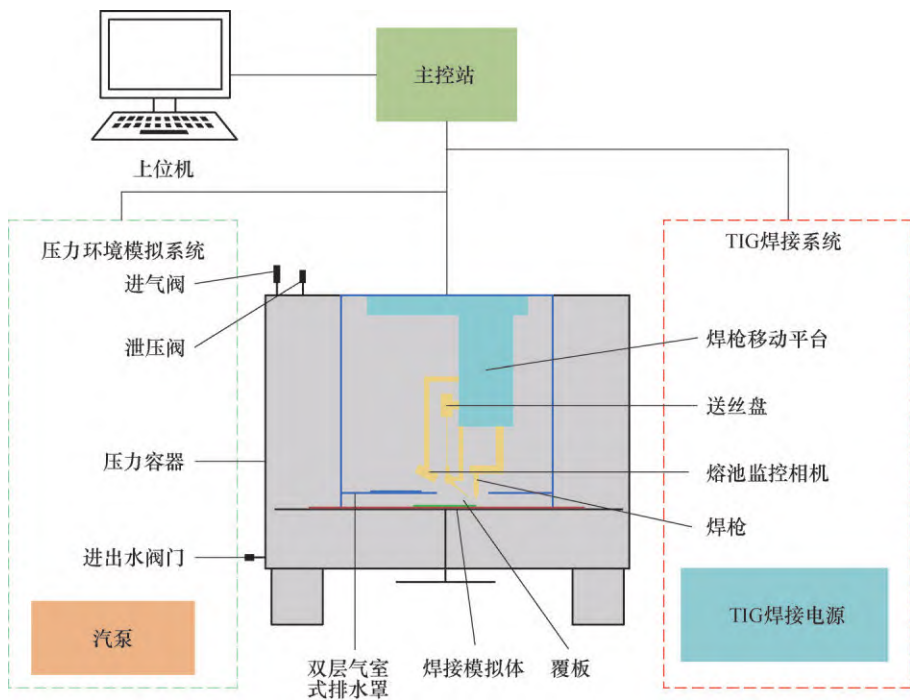
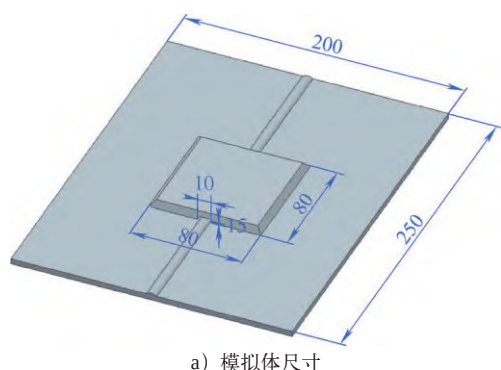


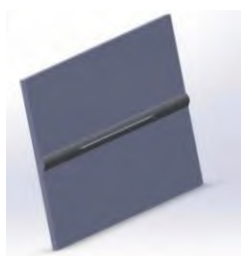
图1 水下焊接试验系统

试验焊接模拟体和覆板材料均选用304L不锈钢，厚度为4mm，具体尺寸如图2所示，其化学成分

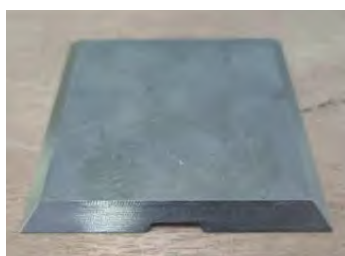
分见表1。焊丝材料为316L、直径1mm，保护气为纯氩气。



a) 模拟体尺寸



b) 网格划分



c) 覆板实物

图2 水下焊接模拟体尺寸和覆板

表1 304L不锈钢的标准化学成分 (质量分数) (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	N	Fe
≤0.03	0.509	1.508	0.032	0.003	18.3	8.02	0.106	0.08	0.036	余量

2.2 试验方法

试验开始时,排水罩进气,使其上气室压力略大于下舱室压力(即压力容器压力);待移动到目标区域,下舱室开始进气排水作业,待下舱室排干后,舱门打开,上下舱室连通,压缩气体持续供气,防止因排水罩压力小于压力容器压力而出现水分倒灌,影响设备安全运行;移动机构将覆板移动到修复区域,气缸下降将覆板凹槽与原始焊缝进行组对,随后在覆板4个转角位置进行定位焊,如图3所示;最后,焊枪移动至焊接模拟体与覆板连接处,进行焊接作业;获得良好成形焊缝后,排出压力容器内水分,将排水罩吊装离开,获取焊接试件。

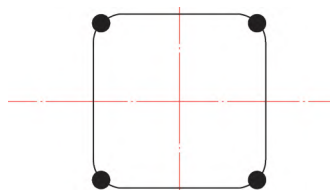
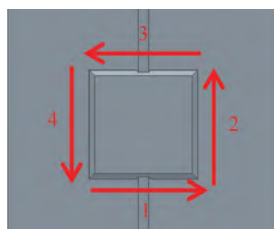


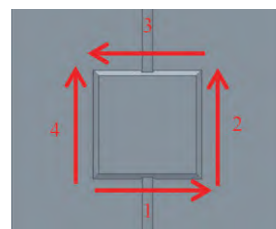
图3 覆板定位焊位置示意

TIG焊接过程会受到各种因素对焊接效果的影响,包括焊接电流、焊接速度、送丝速度及焊接高

度等。考虑到池底与池壁覆板焊接存在平焊、横焊、立焊等多种焊接位置,本研究采用探索并建立池底与池壁的局部干法水下TIG焊接工艺的方法。首先,开展常压干式环境下的焊接参数摸索,采用正交试验对上述因素进行焊接试验探索,结合试验效果选择焊接成形效果良好的参数组合,建立常压干式环境TIG焊接参数组合;然后,利用上述焊接参数,使用水下焊接试验系统开展不同压力(0.1~0.3MPa)、干式环境下的TIG焊接工艺试验,验证常压干式环境焊接工艺的有效性;最后,基于上述焊接参数,开展局部干法水下焊接工艺试验,并进行宏观、微观金相分析,建立局部干法水下TIG焊接工艺。其中,池底覆板焊接采用前送丝、逆时针的运动方式,如图4所示。池壁覆板焊接采用前送丝、横焊与立向上焊的运动方式。



a) 池底位置



b) 池壁位置



c) 焊接过程监控图

图4 TIG焊接修复运动路径

注:1~4代表焊接顺序。

3 试验结果与分析

3.1 池底位置焊接工艺

针对池底位置,本文首先在常压干室环境下对焊接电流、送丝速度、焊接速度和保护气流量4个焊接参数进行了探索,部分焊接参数见表2,成形效果如图5所示。

通过试验最终得出,当焊接电流为130~230A、送丝速度为31.5mm/min、焊接速度为75mm/min、保护气流量为30L/min时,池底位置覆板焊接成形质量

最好。

表2 池底位置焊接参数与成形效果

序号	焊接参数				成形效果
	焊接电流 /A	送丝速度 / (mm/min)	焊接速度 / (mm/min)	保护气流量 / (L/min)	
1	150~210	20~24	90~120	20~40	焊缝熔合不良
2	120~250	24~30	70~80	20~40	焊缝熔宽较小
3	120~250	30~35	70~80	20~40	焊缝成形良好, 无缺陷

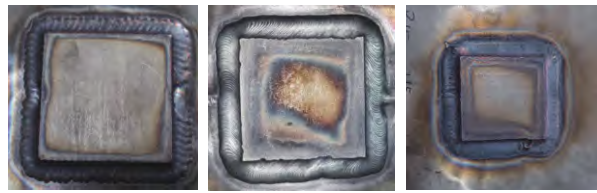


图5 常压干室环境下池底位置焊缝成形

基于上述焊接参数, 分别开展了常压浅水环境、水下0.1MPa环境、水下0.3MPa环境下TIG覆板焊接试验, 验证常压干室环境工艺参数在水下带压环境下的适用性, 焊接成形如图6所示。

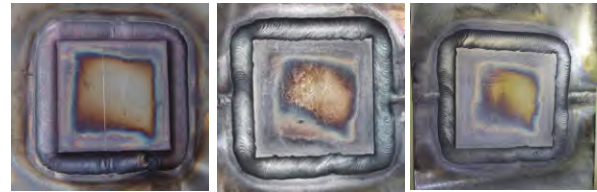


图6 水下压力环境下池底位置焊缝成形

在焊件垂直焊缝处切取试样, 分别做宏观金相和微观金相检测。宏观检测采用法国标准化协会颁布的NF A05-152: 1984《钢铁产品 强无机酸侵蚀宏观组织检验》中钢制结构的检测方法, 利用强无机酸侵蚀后, 使用金相显微镜(SZN7-JX10)观察, 结果如图7、图8所示。由图7、图8可知, 焊缝处未发现裂纹、未焊透、未熔合及气孔等缺陷, 显微组织基体为呈枝晶状的奥氏体, 枝晶间为铁素体, 未发现显微裂纹和夹杂物, 符合技术要求。

3.2 池壁位置焊接工艺

针对池壁位置, 首先在常压干室环境下对焊接电流、送丝速度、焊接速度和保护气流量4个工艺参数进行了探索, 试验结果见表3及图9所示。由表3

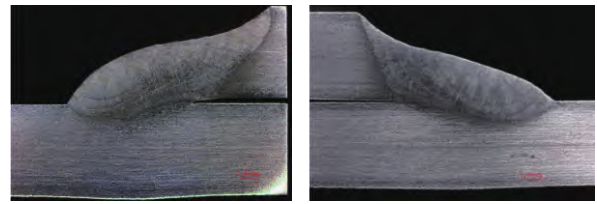


图7 不同压力环境下宏观金相 (10×)



图8 不同压力环境下微观金相 (200×)

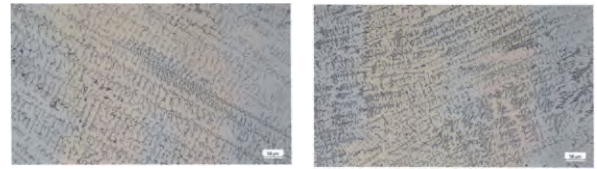


图9 不同压力环境下宏观金相 (10×)



图10 不同压力环境下微观金相 (200×)

可知, 进行池壁焊接工艺试验时, 因涉及平角焊、仰角焊和立焊等多种位置, 需要兼顾多种焊接工艺, 最终得出当焊接电流为70~155A、送丝速度为26mm/min、焊接速度为75mm/min、保护气流量为30L/min时, 池壁位置覆板焊接成形质量较好。

表3 池壁位置焊接参数及成形效果

序号	焊接参数				成形效果
	焊接电流 /A	送丝速度 / (mm/min)	焊接速度 / (mm/min)	保护气流量 / (L/min)	
4	60~130	40~45	105~120	20~40	焊缝熔合不良
5	80~150	35~40	90~105	20~40	焊缝熔合不良
6	80~150	26~32	70~80	20~40	焊缝成形不佳
7	70~170	23~30	70~80	20~40	焊缝成形良好

基于上述工艺参数, 分别开展了常压浅水环境、水下0.1MPa环境、水下0.3MPa环境下TIG覆板焊接试验, 验证常压干室环境工艺参数在水下带压环境下的适用性, 其焊缝成形如图10所示。

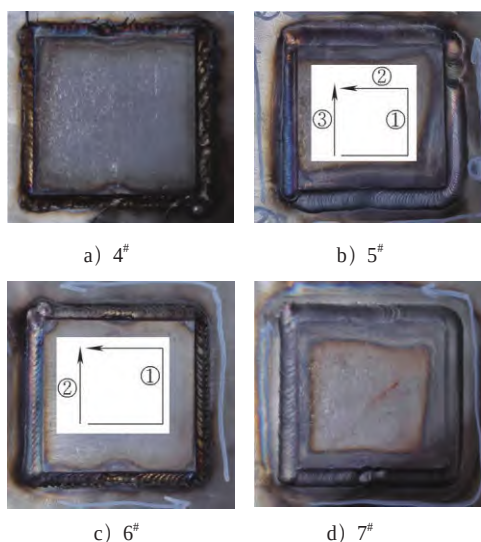


图9 常压干室环境池壁位置焊缝成形

注：①~③代表焊接顺序。

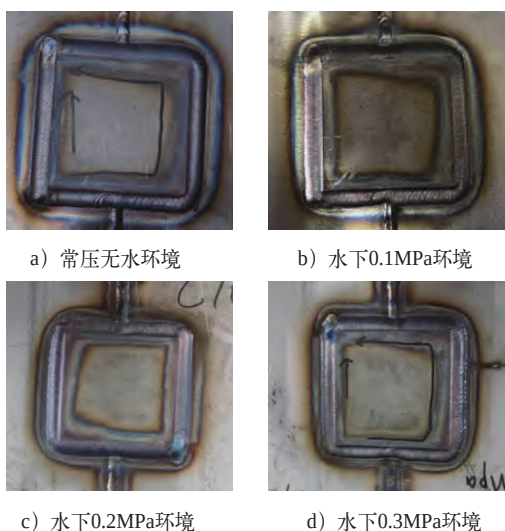


图10 不同压力环境下池壁位置焊缝成形

在焊件垂直焊缝处切取试样，分别做宏观金相和微观金相检测。宏观检测采用NF A05-152：1984《钢铁产品 强无机酸侵蚀宏观组织检验》钢制结构的检测方法，利用强无机酸侵蚀后，利用金相显微镜（SZN7-JX10）观测，结果如图11、图12所示。由图11、图12可知，焊缝处未发现裂纹、未焊透、未熔合及气孔等缺陷，显微组织基体为呈枝晶状的奥氏体，枝晶间为铁素体，未发现显微裂纹和夹杂物，符合技术要求。

4 结束语

核电站乏燃料水池钢覆板的长期服役易出现腐蚀缺陷等问题，威胁安全运行。根据其环境特点，本文基于局部干法水下TIG焊接方法搭建了一套焊

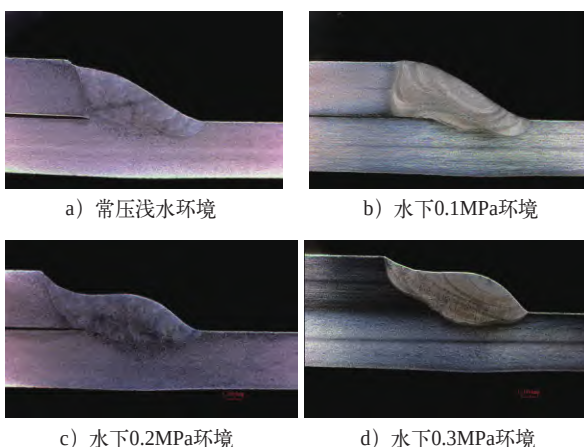


图11 不同压力环境下宏观金相（10×）

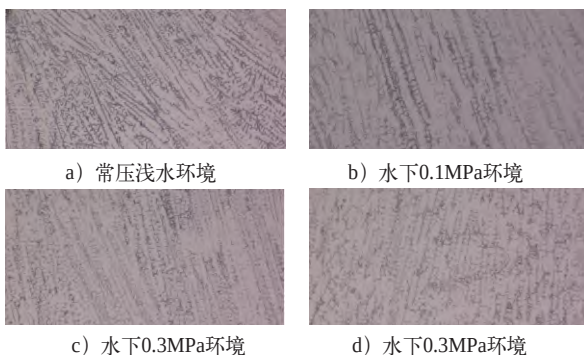


图12 不同压力环境下微观金相（200×）

接修复模拟系统，并针对焊接电流、送丝速度、焊接速度及保护气流量等参数对焊接质量的影响进行了研究。经宏观、微观金相检测表明，试验样件焊缝成形良好，满足核电水池覆面缺陷焊接修复要求，为进一步开展压力环境下局部干法水下TIG焊接修复提供了一定的基础。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 张茂富. 面向80米深水埋弧焊接的新型药芯焊丝研究[D]. 济南：山东大学，2023.
- [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（工学版），2019，53（7）：1252-1264.
- [4] 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.
- [5] 侯瑞麟. 局部干法焊接装置设计及其关键技术研究[D]. 大庆：东北石油大学，2023.
- [6] 朱加雷. 核电厂检修局部干法自动水下焊接技术研究[D]. 北京：北京化工大学，2010.

MW 20240412