

乏燃料水池水下局部干法焊接系统与设备研究

周政¹, 张潇¹, 段洪斌¹, 郝庆军¹, 张晓冬², 张斌¹, 王登星², 张力¹, 高晶²

1. 中核武汉核电运行技术股份有限公司 湖北武汉 430000

2. 核工业工程研究设计有限公司 北京 101310

摘要: 目前, 国内核电站无论在建安阶段还是运维阶段, 对不锈钢水池缺陷处理均采用干室环境下的焊接修复。营造干室环境需要耗费大量时间与人力, 且在核电厂运行较长时间后更加难以实现。基于水下局部干法, 研制出一套可实现水下运载+水下局部干法焊接的设备, 通过补板法完成对乏燃料水池钢覆面缺陷的焊接修复, 为核电厂乏燃料水池水下壁面缺陷维修提供技术基础。

关键词: 局部干法焊接; 补板修复; 乏燃料水池钢覆面; 缺陷修复

Research on underwater partial dry welding repair technology for spent fuel pool

ZHOU Zheng¹, ZHANG Xiao¹, DUAN Hongbin¹, HAO Qingjun¹, ZHANG Xiaodong², ZHANG Bin¹,
WANG Dengxing², ZHANG Li¹, GAO Jing²

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

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

Abstract: Currently, both during the construction and operation phases of domestic nuclear power plants, welding repairs for defects in stainless steel water pools are carried out in a dry environment. However, creating a dry environment requires a significant amount of time and manpower, and becomes even more challenging after the nuclear power plant has been in operation for a long time. This article, based on underwater partial dry methods, has developed a set of equipment that can achieve underwater transportation + underwater partial dry welding. Welding repairs for defects on the surface of stainless steel in the spent fuel pool are completed using the plate patch method. This provides a technical foundation for the underwater wall defect repair of spent fuel pools in nuclear power plants.

Keywords: partial dry welding; patch repair; cladding of spent fuel pool; defect repairing.

1 序言

核电站乏燃料水池钢覆面在长期服役过程中受辐射、应力影响, 易出现腐蚀裂纹、表面磨蚀等缺陷, 轻则导致放射性废液处理量增加, 重则导致厂房内环境剂量上升、人员受辐射风险增大。对于水下缺陷的焊接维修一般分为水下湿法、水下干法与局部干法水下焊接3种方式。其中, 水下湿法焊接其焊接热源与水直接接触, 且焊接电弧因水压因素也

会出现电弧不稳定现象, 导致焊接质量较差; 水下干法焊接是在水下建立模拟陆地的大型工作仓中进行的焊接技术, 但工作舱受焊接位置、空间大小等因素影响较大, 成本较高; 而局部干法水下焊接方法利用排水罩将待焊部位与焊枪罩住, 通过气体将罩内水分排除, 从而使待焊区形成一个局部干燥空间, 该方法具有生产率高、操作方便、焊接接头质量好等优点, 广泛应用于水下焊接中^[1]。

当前,国内外学者对水下局部干法焊接技术做了许多研究,且国外相关研究已在核电厂相关设备上使用,而国内在该方面的技术研究主要集中在实验室条件下进行。本研究提出一种适用于核电乏燃料水池的焊接修复技术,基于水下局部干法研制了一套缺陷修复设备,为核电结构的水下缺陷维修提供技术基础。

2 现有方法分析

2.1 现有乏燃料水池缺陷维修方法

储存有乏燃料的水池长期处于满水状态,用于乏燃料的冷却和降低环境剂量。随着我国核电机组服役年限的增加,国内多个机组都曾出现水池泄漏现象。传统的维修方法通常是在停堆并将水全部抽出后,技术人员直接进入水池内部维修。然而,服役较长时间电厂的乏燃料储存量越来越大,很难依靠排空水池的方法进行焊接维修,并且依靠人员手工维修存在许多问题。

一方面,尽管在停堆条件下实施维修,但技术人员仍存在受辐射风险,威胁技术人员健康,且焊接修复质量受焊工技术影响;另一方面,因缺陷修复需要带来的非计划停堆会造成巨大的经济损失^[2]。因此,研究应用于在役核电站环境的缺陷焊接修复技术具有很大经济与社会价值。

由于乏燃料水池钢覆面维修存在辐射剂量高、操作空间小、维修质量要求高等特点,本文拟采用远程水下焊接机器人方式,完成乏燃料水池缺陷的局部干法焊接维修。

2.2 现有局部干法焊接方法

水下局部干法焊接采用微型排水设备,将待焊部位一小块区域的水排开,从而实现近似干法焊接效果,因此焊接效果往往与排水效果关联。

现有局部干法焊接可以通过水帘法实现,其原理如图1所示。由图1可知,内层通入电弧保护气体,外层采用高压水幕。由于该方法只保证了焊接区域小范围内的干室环境,因此也称为干点式水下焊接。这种方法能够完成连续的焊缝移动,但很难满足搭接接头、角接接头的水下焊接。

除气帘式水下局部干法外,还可采用可移动气室法,该方法的气室直径较小,对于较长焊缝,每焊一段要移动一段气室,直至完成整条焊缝焊接。

由于气室结构可以根据待焊焊缝形式进行适应性设计,因此该方法基本能适应所有焊缝形式的焊接,如日本开发的角焊缝水下局部干法焊接装备,其外形如图2所示。

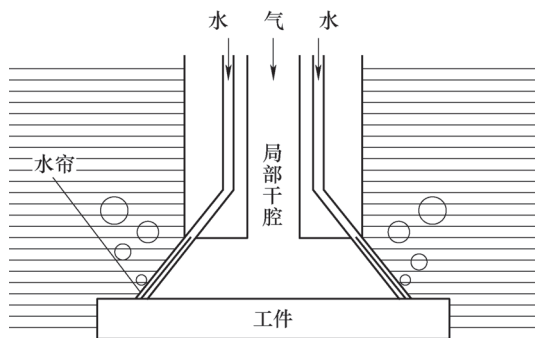


图1 气帘式水下局部干法焊接示意^[1]



图2 日本水下角焊缝气室^[3]

3 技术方案

3.1 总体技术方案

在实验室条件下,气腔室可以通过人为手动调整或结合辅助工具调整到合适位置,进行局部干室焊接过程。但在核电厂乏燃料水池这种高辐射环境且水深较深(可达20m)无法用肉眼观察的条件下,只能依靠机器人实现焊接前的寻位与固定功能。本文采用运载机器人+头部组件(排水罩与焊接结构)的结构形式,将移动功能与焊接功能区分开,头部组件和运载机器人在结构和控制上相对独立,仅在机械结构上存在接口关系,在降低设计结构难度的同时也便于控制相关系统。

运载机器人设计具有以下功能。

- 1) 携带头部组件在水下移动,到达焊接位置。
- 2) 定位调整头部组件位姿,使其满足焊接要求。
- 3) 提供头部组件焊接作业所需的稳定作业环境。

头部组件设计具有以下功能。

- 1) 建立局部干室焊接环境。
- 2) 实现缺陷位置的焊接修复。

在乏燃料水池水下局部干法焊接修复过程中，运载机器人携带焊接系统送丝机、电气舱等设备与头部组件刚性连接，进入水下。通过视觉观测水下环境，移动至待修复缺陷附近，将头部组件放置

在缺陷上方并进行固定。此时，运载机器人不再移动，头部组件进一步对待焊区域进行排水、烘干等，营造干燥的焊接环境，通过TIG焊接机器人完成补板四周的焊接过程。焊接完成后，由运载机器人携带头部组件出水回收。乏燃料水池水下焊接修复结构系统如图3所示。

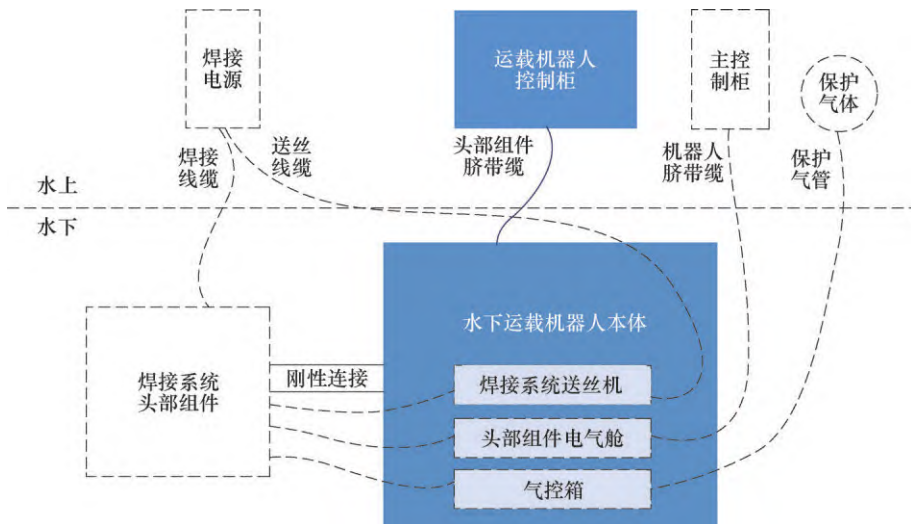


图3 乏燃料水池水下焊接修复结构系统

3.2 焊接技术方案

通过分析乏燃料水池钢覆面结构的裂纹型和贯穿型缺陷，发现大多数缺陷通常尺寸较小，较适合采用“打补丁”的方式进行维修。通过在缺陷四周覆盖一块同材质的不锈钢补板，并在补板四周进行密封焊接，在水池与钢覆面的缺陷间形成有效隔离屏障，保证缺陷或失效处的焊缝不泄漏，从而满足设备部件继续服役的要求。

针对目前水下不锈钢覆面存在的几种典型缺陷，结合缺陷的形状和尺寸，采用方形补板进行焊接修复。根据乏燃料水池钢覆面缺陷位置的不同，补板形式可分为3种，分别为6mm+6mm等厚补板、4mm+4mm等厚补板和4mm+6mm不等厚补板。在补板中间加工一条凹槽，凹槽用于覆盖乏燃料水池钢覆面内原始焊缝，避免补板在贴紧钢覆面时因产生翘边而影响焊接修复，补板实物如图4所示。

由于本文所研究的乏燃料水池不锈钢覆面缺陷尺寸较小，不锈钢补板规格尺寸为80mm×80mm即可覆盖缺陷。此时，需要对补板的四周进行密封焊接，相较于气帘法，采用气室法可实现对整个待焊

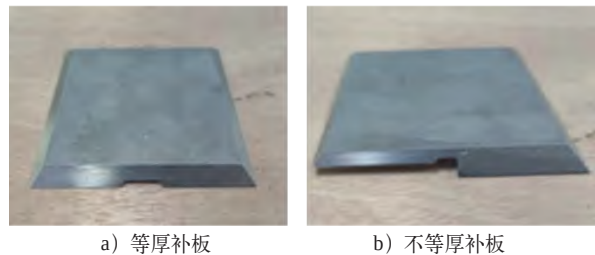


图4 补板实物

空间的覆盖，避免在4个角点处的气帘形成不稳对焊接质量造成影响。且待焊焊缝集中在气室覆盖空间内，不需要多次移动气室来完成整个焊接过程。焊接方法选择核电结构常用的TIG焊，结合水下送丝方法完成水下焊接。

3.3 排水技术方案

目前，关于水下局部干法的排水装置已有许多研究^[4-6]，但实际工程应用过程中，如深水环境下乏燃料水池钢覆板焊接维修，需通过视觉等设备实现焊接全过程监控以保证焊接质量。尽管上述研究在实验室环境下取得了不错的焊接效果，但对罩内设备的入水防护及对排水效果的影响研究相对较少。针对这一问题，本文采用双层气室、多层气道的设计方法对局部干法排水罩结构进行了研究。

排水罩采用上、下两层腔室设计,如图5a所示。由图5a可知,下腔室结构扁平,通过环形进气,使下腔室充气均匀。上腔室采用3层气道进气,以保证入水过程上舱室内部结构的防护和舱门打开后上、下舱室压力平衡。排水罩上腔室进气结构设计有顶部环向进气模块、中部环向进气模块、角落可调节万向进气模块。其中,顶部进气结构、中部进气模块管路结构设置为环向管路进气,可以实现排水罩内部流场稳定,以及均匀排水、排烟的目的;角落进气模块设计为可调节万向进气模式,可实现上下位置及方向调节,完成对焊接过程角落残余烟雾的排出。此外,进气压力满足顶部进气压力>环向进气压力>万向进气压力条件,仿真计算结果如图5b所示。

待水排尽后补板四周仍是浸水后的湿润状态,为了保证焊接质量,通过吹入加热后的空气,对局部干腔室进行烘干,营造适合焊接的环境条件。

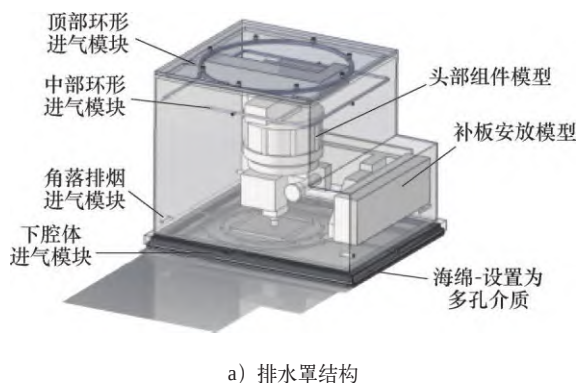
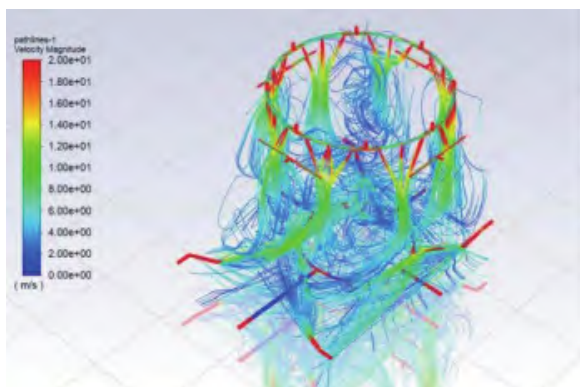


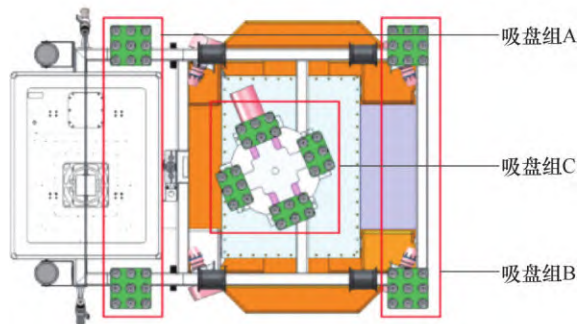
图5 排水罩结构及仿真计算结果

3.4 运载技术方案

运载机器人需要从入水开始运载头部组件下沉至待焊区域,并对待焊区域进行准确移动定位。

常规的运动方式有浮游运动式和贴壁移动式。浮游运动式灵活性好,能够在不同壁面间切换或跨越障碍物;贴壁移动式能对坐标进行精确定位,沿着纵横焊缝进行循迹定位。在乏燃料水池缺陷实际维修中,运载机器人既需要浮游运动来跨越壁面障碍物,也需要贴壁爬行来精确定位,故采用两种方式相结合作为运载方案。

在焊接作业时,对补板的定位精度和姿态具有较高要求。利用运载机器人实现高精度姿态调整,以减少头部组件的功能要求。如果采用履带式或轮式行走方式,由于滑移和复杂的控制模型存在,因此难以实现高精度定位和姿态调整。设计3组吸盘交替步进行走(见图6),依靠行走模块的滑台和转台来实现高精度的移动和旋转,从而达到目标要求。

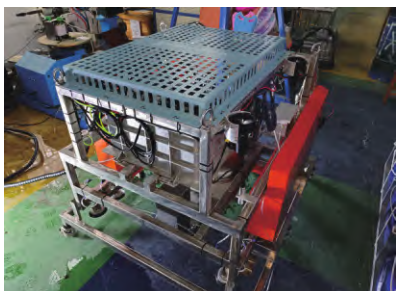


浮游模式下依靠推进器实现动力输出,为满足机器人水下全方位(6自由度)的浮游运动及姿态调整,机体上至少布置6个推进器。机器人由浮游模式转换为贴壁移动模式时,需要施加一个垂直于壁面的下压推力,使真空吸盘紧压在池壁上,进而建立负压产生附着力。因此,在机器人的顶层设置4个推进器,底层设置4个推进器,呈角度对称布置,实现水平面内各个方向的运动。

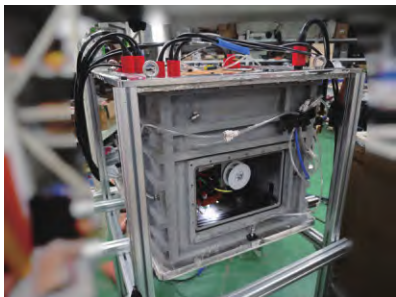
4 试验设备及模拟试验结果

4.1 试验设备

依据前文的技术设计方案,建造了乏燃料水池水下局部干法焊接装备(包含运载机器人及头部组件)。图7所示为运载机器人和头部组件实物,其中运载机器人在空气中自重约为500kg,耐压深度可达20m;头部组件总重约为200kg,入水后运载机器人与头部组件都趋向零浮力状态,以减小对运载机器人负载要求。



a) 运载机器人



b) 头部组件

图7 乏燃料水池水下局部干法焊接设备

4.2 试验及结果

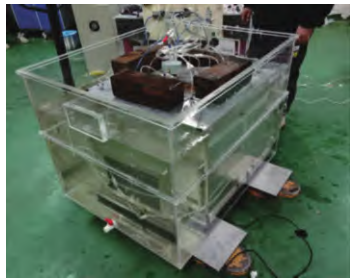
设计加工相关模拟体结构并对运载机器人和头部组件设备功能进行试验验证，包括运载验、排水和焊接等功能试验。运载功能试验主要用于验证运载机器人在工作水深下运动和定位吸附能力；排水功能试验主要用于验证排水罩构建局部干室环境的可行性和稳定性；焊接功能试验主要用于验证不同水深压力下池壁和池底位置下的覆板焊接工艺和成形质量。

经验证结果如下。

1) 运载机器人能够在工作水深下携带头部组件进行运动、缺陷定位和吸附固定，如图8所示。



a) 运载机器人功能试验



b) 排水试验

图8 功能试验

2) 排水罩能够在工作水深下建立局部干室环境，同时在密封舱门开启后，局部干室环境不会被破坏，排水罩内部腔室不会进水，能够为水下焊接

提供良好干室环境条件，如图9所示。

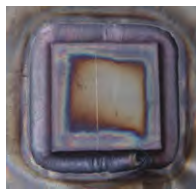


图9 排水功能验证

3) 在不同水深压力下对池壁和池底覆板进行焊接试验，焊接参数见表1，焊后成形如图10、图11所示。对焊缝进行液体渗透及金相检测，渗透检测在焊缝与热影响区进行，在渗透20min、显像10min的条件下未出现缺陷显示；金相检测在10倍显微镜下进行，金相组织如图12所示。由图12可知，所有试样均无裂纹、未焊透、未熔合等缺陷。

表1 池壁和池底焊接参数

焊接位置	焊接电流 / A	送丝速度 / (mm/min)	焊接速度 / (mm/min)	保护气体流量 / (L/min)
池底	120 ~ 250	30 ~ 35	70 ~ 80	20 ~ 40
池壁	70 ~ 170	23 ~ 30	70 ~ 80	20 ~ 40



a) 常压无水环境



b) 水下0.3MPa环境



c) 水下0.3MPa环境

图10 池底不同压力下覆板焊缝成形



a) 常压无水环境



b) 水下0.1MPa环境



c) 水下0.2MPa环境



d) 水下0.3MPa环境

图11 池壁不同压力下覆板焊缝成形



a) 池底水下0.3MPa环境金相组织

a) 池壁水下0.3MPa环境金相组织

图12 池壁和池底覆板金相组织 (10×)

5 结束语

本文针对核电厂乏燃料水池钢覆面缺陷结构特征,采用补板修复形式进行了局部干法焊接修复技术研究。研制了一套水下运载机器人+头部组件设备,经模拟结构试验后,验证了该设备相关功能,在多种压力条件下完成焊接测试,且焊后成形良好,经检测满足相关要求,为核电结构的水下局部干法焊接工程应用提供了技术基础和设计思路。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] HAN L G, WU X M, 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.
- [5] 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, 32.
- [6] 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 (3): 112-116, 134.

MW 20240713

(上接第21页)

料伸长率降低。

参考文献:

- [1] 世界不锈钢协会. 2022年前3季全球不锈钢粗钢同比下降5.1%[J]. 中国钨业, 2022, 46 (6): 40.
- [2] 肖纪美. 不锈钢的金属学问题[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [3] LI WQ, MENG LX, WANG SH, et al. Plastic deformation behavior and strengthening mechanism of SLM 316L reinforced by micro-TiC particles[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 884: 145557.
- [4] LI YJ, MA CHR, QIN FM, et al. The microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel prepared by forge and laser melting deposition[J]. Materials Science and Engineering: A, 2023, 870: 144820.
- [5] 蔺绍江, 熊惟皓, 瞿峻, 等. TiC/316L 复合材料的致密化和力学性能试验[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39 (1): 50-53.
- [6] 张洪涛, 陈晓秋, 尚峰, 等. TiC/316L 复合材料粉末注射成形工艺研究[J]. 热加工工艺, 2022, 51 (10): 61-64.
- [7] JIAN Z, ZHONG Y P, SHI Y L, et al. Investigation of wear behavior of graphite coating on aluminum piston skirt of automobile engine [J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 97: 408-415.
- [8] SUN G F, SHEN X T, WANG Z D, et al. Laser metal deposition as repair technology for 316L stainless steel: Influence of feeding powder compositions on microstructure and mechanical properties[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 109: 71-83.
- [9] 王晓东, 刘奋成, 吕诗劼, 等. 超声振动对激光熔化沉积GH3536高温合金摩擦磨损性能的影响[J]. 金属加工(热加工), 2024 (8): 25-30.
- [10] ZHANG C H, ZHANG H, WU C L, et al. Multi-layer functional graded stainless steel fabricated by laser melting deposition[J]. Vacuum, 2017, 141: 181-187.

MW 20240505