

# 局部干法水下激光填丝焊接与增材修复

## 1 背景及意义

核电站乏燃料水池经过长时间运行，不锈钢覆板会出现点蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀开裂等缺陷，会造成水池内的放射性液体泄漏，必须进行及时维修。由于乏燃料水池内部的硼酸水溶液全部排出，其工作量和成本极高，因此相应的应急维修工作基本都在水中进行。目前，国内核电站放射性环境水下焊接维修技术的智能化程度低、成形质量控制难、工艺适应性差。水下激光焊接通过光纤进行能量的长距离传输，焊接维修控制精度高；热源能量高度集中，焊缝的热影响区小，残余应力水平低；焊接系统易于简化和集成，特别适应于狭小空间区域的设备维护；焊接烟尘小，焊接过程清洁无污染，是核电站乏燃料水池水下应急维护的首选技术之一。研发适应于核电站乏燃料水池环境的水下激光焊接应急维修成套装备和维修工艺，对于保证核电站的安全稳定运行具有重要意义。

## 2 技术创新

设计了国内首套激光头局部干法水下激光填丝焊接与增材自动维修系统，自主研发了全密封水下激光头、三方向水下增材运动平台和集成多信号检测功能的一体化排水罩等关键装置，实现了水下修复过程中的持续稳定排水密封和水下焊接增材修复系统的可靠运行。水下激光焊接与增材修复系统由三轴移动定位机构、移动气罩、水下激光焊接-视觉-送丝一体化设备、常压水箱、控制系统组成。

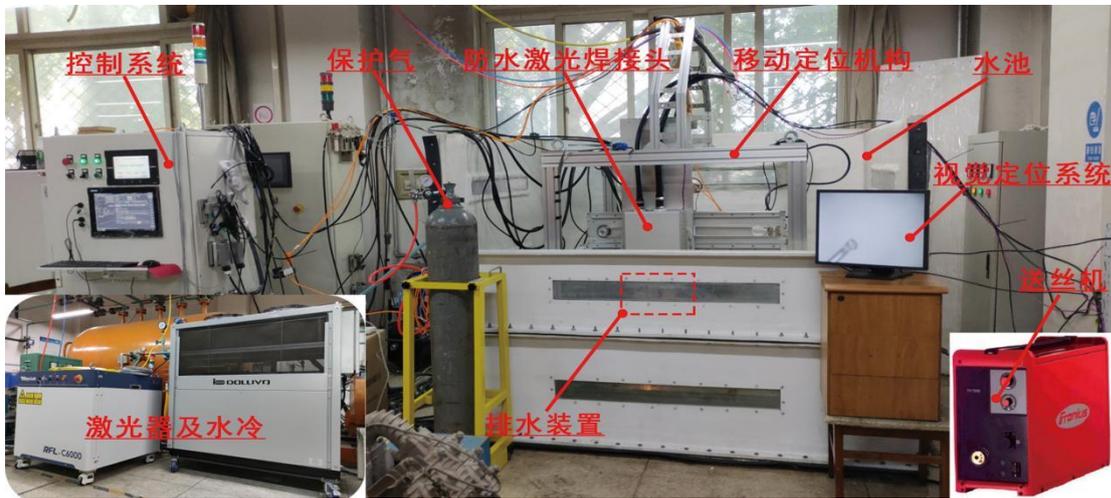
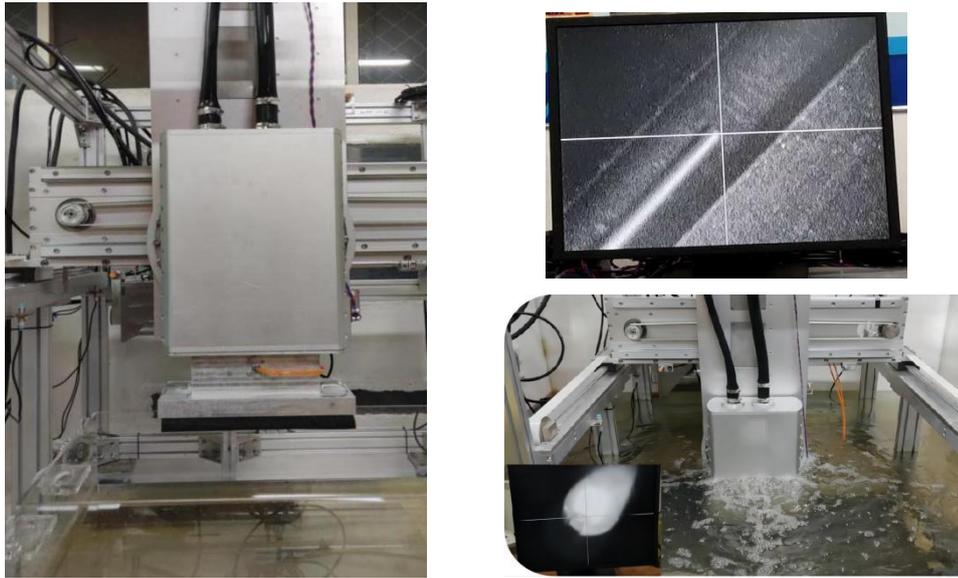


图1 核电站乏燃料水池修复用全水下激光焊接与增材修复系统

通过常压水池模拟真实的水下维修环境，三轴移动定位机构、水下激光头以及排水装置等相关装置均处于水下环境。将激光焊接头、同轴视频监控相机和水下拉丝电机进行集成化防水密封；研制了国内首套集成送丝功能和多种传感器、可实时监测水下激光焊接增材工作环境温湿度和压力等参数的一体化排水装置，排水装置采用内置式管路环向进气，底端设有入水防护机构，包括气动旋转模块、气动提升模以及底部开口挡板，通过组合气动机构控制挡板的打开和闭合，实现焊接增材装置入水时对排水装置内部器件的有效防护，获得持续稳定的局部干式维修环境。排水罩内置照明，结合激光焊接头的同轴视觉监控，可以实现对罩内焊接增材区域的全过程监控，满

足 30m 水深条件下稳定动态排水、排烟的维修要求。



排水气罩和水密激光头集成

水下激光焊接和增材区域的实时检测

图 2 水下激光焊接与增材修复系统的集成与监测



图 3 排水气罩

在进行水下维修时，排水装置内通入保护气体将待焊接位置的水排开，形成局部干式空腔，在此干腔内进行激光填丝焊接与增材维修作业，实现对水下缺陷的现场维修。依托此套装备，首次在水下模拟环境实现了单层多道、多层多道、U 型坡口填充等水下激光填丝修复成形。在此基础上，通过高压实验舱模拟环境水深压力，首次完成了 30m 压力环境下局部干法水下激光焊接修复验证，修复质量均满足空气环境的核电建造标准。

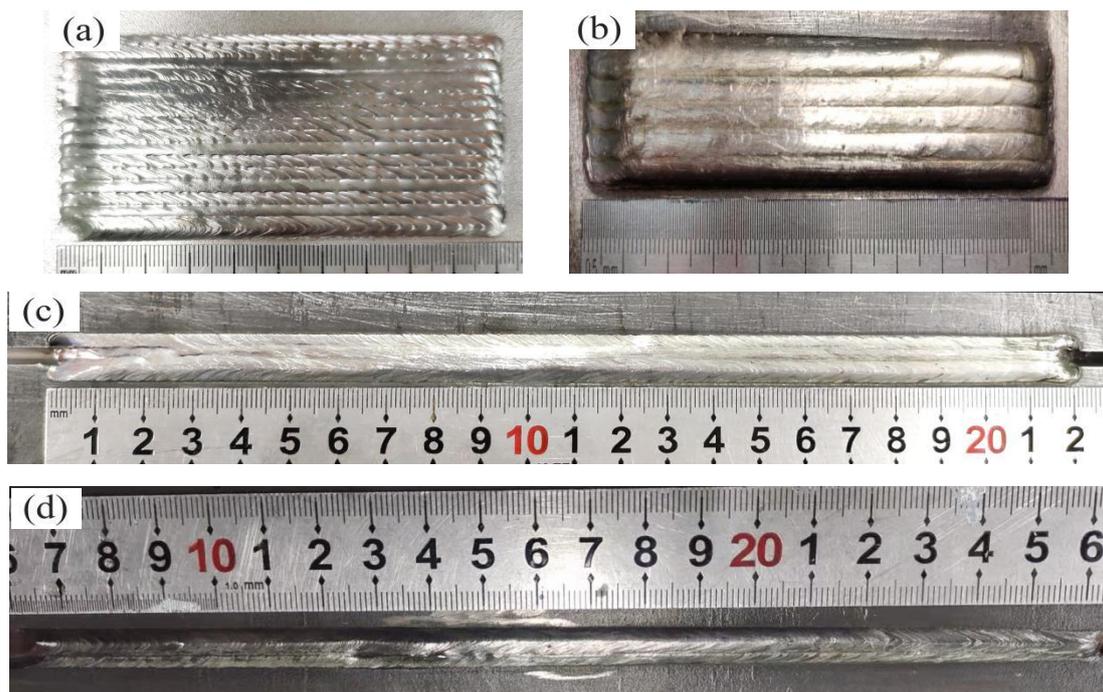


图4 水下激光焊接和增材修复试件 (a)局部干法水下单层多道 (b)局部干法水下多层多道 (c)局部干法水下U型坡口填充 (d)高压局部干法水下U型坡口填充

### 3 推广应用

局部干法水下激光填丝焊接与增材装备及工艺可以应用于核电乏燃料水池、换料水池等水下环境的应急维修，也可以应用于舰船、海洋工程结构物等的水下维修工作中。针对核电燃料水池用 S32101 双相不锈钢材料开展的水下维修试件，经过国家有色金属及电子材料分析测试中心和哈尔滨焊接研究所的各自独立检测，超声、射线、力学、晶间腐蚀等性能均满足核电质量标准要求。以该项目成果为基础，上海核工程设计研究院有限公司获得国家电投集团创新成果一等奖、全国能源化学系统创新成果一等奖。团队成员申请发明专利 4 项，录用 SCI 论文 3 篇、EI 论文 1 篇，获得两项国家级竞赛一等奖。

#### 基于该技术的发明专利

专利名称	专利号
一种水下激光焊接功率检测及自动控制试验装置	CN202010858332.9
一种高压环境激光填丝增材实验平台	CN202110969104.3
常压水下激光增材装备	CN202011178930.8
集成多种传感器水下激光增材排水装置	CN202011251128.7

### 4 联系方式

联系人：朱加雷教授  
邮箱：Zhujiarei@bipt.edu.cn

联系电话：13141227526