

# 机械化焊工艺在核电站 SC 结构焊接中的应用

## Application of Mechanized Welding Process in the Welding of SC Structure of Nuclear Power Plant

薛覃 吕鑫磊

Qin Xue Xinlei Lv

上海核工程研究设计院股份有限公司 中国·上海 200233

Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Shanghai, 200233, China

**摘要:** 某核电站的屏蔽厂房采用钢板混凝土屏蔽墙结构(简称 SC 结构),该结构是由内外双层钢板、中间拉筋、混凝土组成的复合型结构,采用传统的手工焊焊接效率低、焊接质量受人为因素影响大。论文基于 SC 结构焊缝结构简单,周边空间大,焊缝总长度较长的特点,针对 SC 结构开展了焊接模拟试验,根据在工程现场应用效果,形成一种适用于 SC 结构现场安装的激光智能跟踪机械化焊工艺,从而为后续类似大尺寸结构的钢板焊接提供经验。

**Abstract:** The shielding plant of a nuclear power plant adopts steel plate concrete shielding wall structure, which is a composite structure composed of internal and external double-layer steel plates, intermediate tension reinforcement and concrete, and adopts traditional manual arc welding and welding efficiency, and the welding quality is greatly affected by human factors. Based on the characteristics of simple SC structure weld structure, large peripheral space and long total weld length, the welding simulation test is carried out for the SC structure, and according to the application effect in the engineering site, a laser intelligent tracking mechanized welding process suitable for on-site installation of SC structure is formed, so as to provide experience for subsequent steel plate welding similar to large-size structure.

**关键词:** SC 结构;手工焊;机械化焊

**Keywords:** SC structure; manual arc welding; mechanized welding

**DOI:** 10.12346/etr.v5i2.7722

## 1 引言

核电站的屏蔽厂房是核电站抵抗内外部事故最重要的构筑物之一<sup>[1]</sup>,具有辐射屏蔽、飞射物防护、非能动冷却、抵抗龙卷风和地震事件等主要功能。为了进一步提高反应堆厂房抵抗内外部事故的能力以及采用模块化施工的理念,设计上首次采用钢板混凝土屏蔽墙(后续简称屏蔽墙)结构,该结构是由内外双层钢板、中间拉筋、混凝土组成的复合型结构。主要的焊接施工包括钢板墙纵焊缝和横焊缝焊接,径向尺寸大,层数多,焊缝数量多<sup>[2]</sup>。

中国核电站类似结构主要采用手工焊,手工焊焊接效率低、焊接质量受人为因素影响大<sup>[3]</sup>,且考虑屏蔽墙结构焊缝结构简单,周边空间大,焊缝总长度较长,有必要开展屏蔽

墙结构机械化焊接施工技术研究,提高焊接效率和焊缝整体质量。论文主要介绍了针对屏蔽墙结构进行的焊接模拟试验,根据在工程现场应用效果,总结形成一种适用于屏蔽墙结构现场安装的激光智能跟踪机械化焊工艺,从而为后续类似大尺寸结构的钢板焊接提供经验。

## 2 屏蔽墙模拟试验

### 2.1 工艺选用

SC 结构模拟试验件采用 1 : 1 的比例制作,选用与工程实体一致厚度一致的 Q345B 低合金高强度结构钢板。由于屏蔽墙结构中内外侧钢板材质为 Q345B,厚度为 20/25mm,钢板背面有加劲板、中间拉筋,空间受限,因此

【作者简介】薛覃(1991-),女,中国陕西渭南人,硕士,工程师,从事核电厂焊接管理研究。

选用单面焊双面成型工艺。

焊接方法为熔化极气体保护焊 (GMAW)。熔化极惰性气体保护焊, 包括富氩混合气体保护焊, 统称为 MAG 焊。它是在氩气中加入少量的氧化性气体 (氧气、二氧化碳或其他混合气体) 混合而成的一种混合气体保护焊, 焊接时提高了电弧的稳定性, 飞溅量减小, 焊后焊缝成型美观, 并能提高金属的韧性, 焊后清理少, 能明显改善焊接环境<sup>[4]</sup>。

采用经评定合格的手工焊接自动送丝单面焊双面成型焊接工艺进行打底、机械化焊接工艺填充盖面。保护气体为 Ar (80%) + CO<sub>2</sub> (20%) 混合气。根据等强度原则, 匹配 ER70S-6 实心气保焊丝, 规格为 Φ1.2mm。机械化焊采用多层多道焊, 层间温度控制在 250℃ 以下, 采用的焊接工艺参数见表 1。

## 2.2 焊机选用

手工焊接自动送丝焊机选用 YD-500CL 焊机。机械化焊接选用 TPS-500i 焊机。该焊机设备主要包括: 电源 + 水箱、送丝机、控制箱、遥控器、焊接小车、激光传感器、轨道等。它是基于 3D 激光视觉技术开发而成, 通过激光传感器进行坡口图像采集, 并通过中央处理器进行图像处理, 识别焊缝特征点及其坐标等信息, 实现对焊缝坡口轮廓的三维扫描测

量, 进而对焊枪及焊接电源 (焊接电源采用高效 MAG 脉冲焊焊接电源) 进行运动控制及电参数控制, 最终达到智能、高效焊接施工。

## 2.3 主要难点

屏蔽墙结构在拼装、运输、吊装过程中产生的变形将对现场安装焊缝坡口间隙、错边控制都不利, 特别是整圈吊装后组对间隙及错边调整难度较大。同时, 焊缝为单面坡口全熔透焊缝, 焊接量大, 焊接变形控制难度大。考虑以上原因, 在模拟件焊接过程中进行了正常组对间隙、错边量的焊缝焊接, 同时针对大错边焊缝、大间隙焊缝也进行了焊缝焊接试验 (加垫板)。

根据标准要求, 焊缝最大错边量为较薄板板厚的 10%, 且不大于 3mm; 焊接工艺规定间隙范围为 3~5mm。为了模拟屏蔽墙结构正式施工过程中出现大错边和大间隙的情况, 并验证错边和间隙超差且无法调整的情况下焊接工艺是否适用, 在屏蔽墙结构模拟件组对时人为地制造局部错边 5mm 和间隙 8mm 的焊口, 焊接方法为熔化极气体保护焊 (GMAW) 自动焊, 焊工、焊机、焊材及保护气等均与模拟件焊接时保持一致, 详见表 2。

表 1 焊接工艺参数 (半自动打底 + 自动焊填充盖面)

焊接位置	焊道或焊层	电流 (A)	电压 (V)	摆动宽度 (cm)	摆动速度 (cm/min)	焊接速度 (cm/min)	最大热输入量 (kJ/cm)
立缝 (3G)	打底	96~124	15~19	—	—	10~16	9.4
	填充	108~160	18~23	0.9~1.7	240~290	5~8	32.3
	盖面	120~130	17~21	1.6~2.0	260~310	5~7	22.6
横缝 (2G)	打底	98~137	15~19	—	—	5~7	22.5
	填充	203~316	23~27	—	—	30~56	11.3
	盖面	203~262	23~28	—	—	49~87	5.5

表 2 加垫板焊接工艺参数表 (自动焊)

焊接位置	焊道或焊层	电流 (A)	电压 (V)	摆动宽度 (cm)	摆动速度 (cm/min)	焊接速度 (cm/min)	最大热输入量 (kJ/cm)
立缝 (3G)	打底	108~115	20~22	0.6~0.7	260~280	6~8	25.3
	填充	110~125	20~22	0.9~1.7	240~290	6~8	27.5
	盖面	110~120	20~22	1.6~2.0	260~310	6~8	26.4
横缝 (2G)	打底	230~245	25~27	—	—	45~55	8.8
	填充	230~245	25~27	—	—	50~58	7.9
	盖面	220~230	25~27	—	—	55~60	6.8

## 3 试验取样及结果分析

### 3.1 取样位置及特征

模拟件焊接完成后, 混凝土浇筑前, 在横缝①、横缝②、横缝④、立缝④、立缝⑤等焊缝上共取 5 块试板进行理化试验, 取样位置如图 1 所示阴影位置。取样时避开模拟件内部钢筋, 取样后采用同材质同规格的钢板将取样口补焊上, 以满足后续混凝土浇筑试验的需求。5 块试板的取样原则: 立

缝、横缝焊接试验对比, 大间隙、大错边试验对比, 详见表 3。

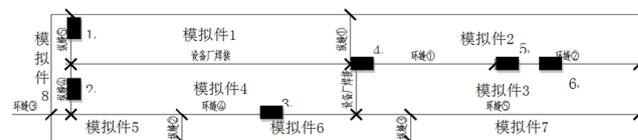


图 1 取样位置示意图

表 3 取样位置及特征

试板编号	试板位置	试板特征	试验项目
1	模拟件内侧立缝⑤	正常条件	超声检测 拉伸 弯曲 冲击 微观金相
2	模拟件外侧立缝④	正常条件	
3	模拟件内侧横缝④	正常条件	
4	模拟件内侧横缝①	大间隙 (8mm)	
5	模拟件内侧横缝②	大错边 (5mm)	

### 3.2 外观检查

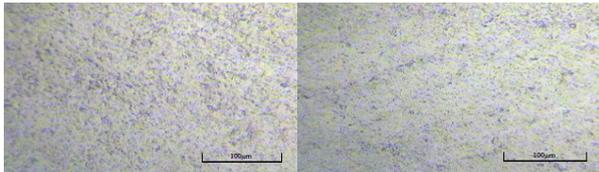
采用上述方法得到的对接焊缝的形状尺寸和外观质量稳定可靠、一致性好,在焊接试件横断面上无裂纹、未熔合、夹渣、弧坑及气孔等缺陷,咬边深度最大 0.3mm,符合 DL/T 868-2014《焊接工艺评定规程》的要求<sup>[3]</sup>。

### 3.3 超声检测

SC 结构模拟件焊缝焊接完成后,为充分验证焊接工艺的可靠性,对焊缝进行了 100% 目视检查和 100% 超声波检测。共检测焊缝 117.2m,无损检测结果 100% 合格。

### 3.4 理化试验

根据 AWS D1.1/D1.1M:2010 Structural Welding Code-Steel 的评定标准,对屏蔽墙结构模拟件取下的 5 组试样进行了力学性能试验结果评定。每组试样包括 2 个拉伸试样、4 个侧弯试样、9 个室温冲击试样、1 个微观金相试样。所有试样试验结果均合格(冲击试验 01~03 为焊缝中心,04~06 为热影响区 1mm 处,07~09 为热影响区 5mm 处)。W1 屏蔽墙 HFQY002 焊缝区及热影响区微观金相图如图 2 所示。



a) 焊缝区微观金相图 b) 焊缝热影响区微观金相图

图 2 W1 屏蔽墙 HFQY002 焊缝区及热影响区微观金相图

## 4 结语

对于屏蔽墙结构钢板焊接,采用单面焊双面成形焊接工艺,立缝和横缝均能够利用机械化焊接,且焊接后在不同位置取样,其抗拉强度、弯曲及冲击性能均能满足标准要求。焊缝区及热影响区微观组织成分均为珠光体和贝氏体,从金相图中可见成分均匀。

在错边 $\leq 5\text{mm}$ 、间隙 3~8mm 的情况下,采用机械化焊单面焊双面成形焊接工艺可以保证焊缝焊接质量。如果出现间隙 $> 8\text{mm}$ 的区域,可采用带垫板焊接工艺。

该机械化焊工艺在核岛屏蔽墙结构钢板焊接过程中投入了使用,采用机械化焊完成的焊缝,表面纹路均匀、成型美观,超声检测结果合格、无内部缺陷。焊接效率方面,机械化焊焊接效率是传统焊条电弧焊的 2 倍。

## 参考文献

- [1] 吴晔华,冯英超,陈鹏,等.核电 SC 模块 MAG 焊接接头组织性能及性能分析[J].工业技术,2018(29):44-47.
- [2] 陈鹏,张树潇,张涛,等.焊电 SC 结构横焊 1:1 子模块焊接变形量方针研究[M].科技与创新,2019(1):35-37.
- [3] 刘非.GMAW-P 自动焊工艺在核电站钢制安全壳中的应用[J].焊接,2017(9):40-44.
- [4] 卢凯,黎水平.基于 MAG 焊接的环缝自动焊接系统研究[J].科技传播,2016(21):135-137.