

文章编号 : 0258-0926(2016)S2-0004-03 ; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.S2.0004

# 秦山核电厂稳压器管嘴 DMW 焊缝堆焊修复 残余应力分析

张世伟, 陈学德, 张 勇, 孙 磊, 李锡华

中国核动力研究设计院, 成都, 610213

**摘要:** 核电厂一回路系统设备的接管嘴与管道的焊缝结构广泛应用合金 81/182, 该类焊缝为异种金属焊 (DMW), DMW 焊缝对一次侧水应力腐蚀 (PWSCC) 较为敏感, 运行过程中易发生裂纹泄漏等问题。堆焊修复方法在国外核电处理该类问题得到广泛应用。本文基于秦山一期核电厂稳压器喷雾管接管嘴尺寸, 建立轴对称有限元模型, 采用生死单元模拟焊接过程的瞬态热输入, 研究了结构在堆焊修复过程中温度场的变化分布特性, 将计算得到的结构热分布历程作为热载荷, 进而获得了堆焊修复过程中结构残余应力的变化特性, 结果表明堆焊修复完成后, DMW 焊缝区域内壁的残余应力能够起到控制 PWSCC 的作用。

**关键词:** 秦山核电厂; 轴对称; 残余应力; 堆焊修复

**中图分类号:** O344.3 **文献标志码:** A

## Analysis of Weld Overlay Residual Stress for Dissimilar Metal Welds in Qinshan Nuclear Power Plant

Zhang Shiwei, Chen Xuede, Zhang Yong, Sun Lei, Li Xihua

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

**Abstract:** Alloy 82/182 were used extensively in PWR primary coolant system as the DMW weld structure for the pipe nozzle and pipelines. The dissimilar metal welds (DMW) easily appears cracking due to the stress corrosion and fatigue after long operation. Based on the service data from foreign nuclear powers, the primary water stress corrosion (PWSCC) is the major factor for cracking, which is sensitive to the stress of pipe inside surface. The structural weld overlay repair is an appropriate way to repair the operating nuclear reactor piping according to the international experiences. Based on the nozzle of Qingshan nuclear power phase I, the axis symmetric FE model was set up to simulate the welding procedures and obtain the thermal field and residual stress field at the area of DMW weld by ANSYS finite element analysis software. The residual stress analysis indicated that PWSCC will be prevented by the resulted inside surface stresses after weld overlay.

**Keywords:** Qinshan nuclear plant, Axial symmetrical, Residual stress, Overlay weld repair

### 0 前言

异种金属焊 (DMW) 广泛用于连接核电厂低合金钢设备与奥氏体不锈钢管道系统, DMW 对一次侧水应力腐蚀 (PWSCC) 较为敏感, 国外核电厂管道系统多次出现裂纹。我国秦山一期核电厂已经运行 25 年左右, 其在一回路主设备稳压器

的接管嘴存在许多 DMW 焊缝结构, 由于长期受到温度、压力载荷和应力腐蚀等因素的影响, 非常需要为 DMW 焊缝可能存在应力腐蚀与裂纹等问题开展研究工作。

基于轴对称特性对稳压器喷雾管建立有限元模型, 将焊接过程的热流输入历程转化为热传导

方式,输入完整的温度相关的材料物理特性和力学特性参数。采用生死单元模拟焊接过程的瞬态热输入,得到了结构时间和空间相关的温度场分布,将计算得到的热分布历程作为热载荷计算结构的残余应力分布。

## 1 堆焊结构简介

稳压器喷雾管接管嘴内径为 128 mm,管道端内径为 114 mm,堆焊层的厚度必须满足 ASME 规范 XI 篇 C-5320 中关于缺陷深度与厚度比的规定,同时还应满足薄膜应力和薄膜加弯曲应力的限值,计算获得堆焊修复结构需要的最小堆焊厚度,靠近管嘴端的堆焊厚度为 11.2 mm,管道端厚度为 9.6 mm。

接管嘴结构由接管嘴、安全端、管道等结构组成,涉及多种材料,管嘴材料为 S271 钢,衬层为 309L,安全端、管道及管端焊缝材料为 F321,衬层和管端焊缝材料为 600 合金,接管嘴与安全端的 DMW 材料为 82/182 合金,堆焊层材料为 690 合金。接管嘴堆焊结构组成见图 1。

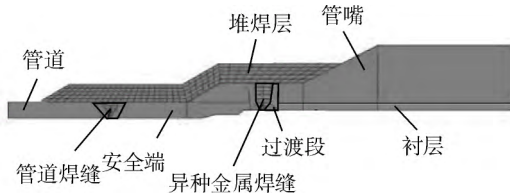


图 1 堆焊结构材料示意

Fig.1 Component of Nozzle Overlay Structure

## 2 分析模型

焊接动态过程的热力学分析极为消耗计算资源和计算时间,为了节约计算成本,基于管嘴结构的对称性,根据结构设计图纸,建立了轴对称二维有限元模型用于接管嘴的瞬态温度场及结构的应力场分析,温度场模拟采用 55 号单元,完成温度场分析后,将单元转换到结构分析采用对应的 42 号单元。有限元模型单元数共计 5756 个,节点数共计 5978 个。模拟结构在焊接过程中的不同阶段,包括管嘴与安全端的 DMW、安全端与管道焊缝焊接以及堆焊修复焊接过程。该轴对称模型需要在中央处理器 (CPU) 为 3.2 GHz 的 4 核工作站上计算 12 h。

焊缝区域残余应力分布是研究的关键所在,沿壁厚方向的路径和焊缝位置管道内壁定义了应

力路径(图 2),路径 1、2 和 3 在管嘴与安全端的异种金属焊缝区域;路径 4、5 和 6 在安全端与不锈钢管道焊缝区域。

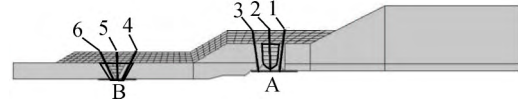


图 2 堆焊结构应力路径

Fig.2 Path of Nozzle Overlay Structure

## 3 温度场分析

### 3.1 焊接温度场分析基础

焊接过程中施加的集中热输入,使得焊接部位形成熔化区,熔化区材料的冷却将引起残余应力和焊接变形。在焊接过程中温度场通过热应变、金属状态和显微组织变化引起的相变、应变决定焊接残余应力。金属材料焊接时,局部集中的随时间改变的热输入会传播到构件边远部分。辐射和对流是焊接热输入过程中两种主要的传热方式,也是构件表面热损失的主要因素。

瞬态非线性热传输分析的热传导方程:

$$\lambda \Delta T + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

$$Q = \frac{\eta UI}{Av \Delta t} \quad (2)$$

式中, $T$ 为温度; $\lambda$ 为导热系数; $\Delta$ 为 Laplace 算子; $Q$ 为热源的热生产率; $\rho$ 为密度; $c$ 为比热; $A$ 为焊道的环向的横截面积; $v$ 为焊接速度; $\Delta t$ 为热输入时间; $U$ 为电压; $I$ 为电流; $\eta$ 为热源效率。

自然对流换热方程:

$$q_c = (T_s - T_0) \quad (3)$$

式中, $q_c$ 为热流密度; $h$ 为管道与空气之间的传热系数; $T_s$ 为固定表面温度; $T_0$ 为气体或液体温度。

### 3.2 焊接温度场计算

模拟稳压器喷雾管接管嘴原焊缝的焊接过程,目的是为了模拟接管嘴在堆焊前的应力状态;模拟堆焊过程以获得堆焊过程的温度场分布,利用该温度场作为输入数据,分析接管嘴的堆焊后的应力场。

在焊接模拟过程中,考虑了通过对流和辐射相关的热损失,焊点熔融最高温度控制在 1500 附近,在当前焊道冷却至 180 以下时,再激活下一个焊道,在所有的堆焊完成之后,将模型冷

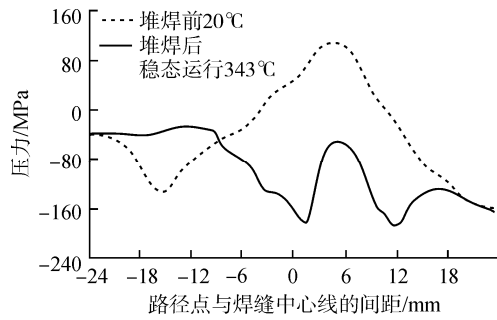


图3 路径 A 的轴向应力对比

Fig.3 Axis Residual Stress of Path A

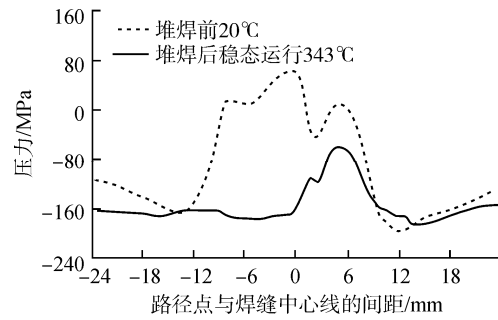


图4 路径 A 的环向应力对比

Fig.4 Hoop Residual Stress of Path A

却到室温 25 。

## 4 残余应力分析

### 4.1 原始焊缝残余应力分析

在完成初始的管嘴与安全端 DMW 焊缝、安全端与管道之间焊缝之后，冷却到 20 后，得到了初始状态的残余应力。初始焊缝模拟完成后，DMW 焊缝区域内表面最大轴向残余应力为 113 MPa，最大环向残余应力为 71 MPa。管道端焊缝区域内表面最大轴向残余应力为 65 MPa，最大环向残余应力为 74 MPa。

### 4.2 堆焊后稳态运行应力分析

将完成初始焊缝模拟的模型冷却至室温，开始堆焊修复模型计算，完成堆焊修复模拟后，再次降温冷却至室温，再施加核电站换料周期运行瞬态，将获得结构堆焊完成后在运行瞬态下的残余应力。

在计算结果中获取堆焊前和堆焊后稳态运行时刻沿 DMW 焊缝内壁分布的轴向应力和环向应

力加以对比，该应力是结构的抗一次侧应力腐蚀和裂纹扩展性能的重要参数。图 3 为路径 A 的轴向应力变化对比，图 4 为路径 A 的环向应力变化对比。从图 3 和图 4 可以明显看出，堆焊修复后在堆焊后稳态运行期间，DMW 焊缝的焊接区域内壁的轴向应力和环向应力均有了明显的改善。

## 5 结论

建立秦山一期核电站稳压器喷雾管接管嘴堆焊结构的轴对称有限元模型，模拟了原始焊缝焊接过程和堆焊修复过程，并且加载了结构运行期间的温度、压力等瞬态载荷，获得了结构在核电一个换料周期内所有工况的应力分布，在堆焊修复后稳态运行期间轴向和环向残余应力均转变为压缩应力，表明堆焊修复后焊缝内壁区域残余应力有明显的改善。

(责任编辑：王中强)