

Analysis and application of in-service inspection of ring welded joint between evaporator nozzle and main water supply in ERP unit

Yan Lu

Taishan Nuclear Power Joint Venture Co., Ltd., Taishan, Guangdong, 529200, China

Abstract

The tie nozzle and main feedwater ring connection welds in the EPR unit's steam generator are of casing type, designed with a thermal sleeve structure. The external main pipe weld is formed by welding the steam generator body tie nozzle to the ARE main feedwater nozzle, requiring ultrasonic testing during outages. The internal ARE feedwater ring and tie nozzle connection thermal sleeve welds consist of stainless steel welded to ferritic steel, necessitating radiographic testing during outages. This paper provides a detailed introduction to the inspection methods for EPR unit steam generator tie tubes and main feedwater header branch connection welds. It also presents improvements in the logical sequence and window optimization arrangements for ultrasonic and radiographic testing based on actual implementation during engineering projects. These advancements offer valuable insights and references for similar weld inspections in other EPR units of the same type.

Keywords

EPR; casing welds; ultrasonic testing; radiographic testing

EPR 机组蒸发器管嘴与主给水连接环焊缝在役检查分析及应用

卢焱

台山核电合营有限公司, 中国·广东 台山 529200

摘要

核电站EPR机组蒸发器管嘴与主给水连接环焊缝结构属于套管类型, 采用热套管结构形式设计, 其外部主管道焊缝通过蒸发器本体管嘴与ARE主管道进行焊接而成, 在机组停堆换料大修期间需实施超声检查, 内部ARE给水环与管嘴连接热套管焊缝为不锈钢材料与铁素体钢焊接而成, 在机组停堆换料大修期间需实施射线检查。本文详细介绍了EPR机组蒸发器管嘴与主给水连接环焊缝相应检查方法, 针对工程实际实施过程中超声检查和射线检查逻辑顺序及窗口优化安排进行改进, 为EPR同类型机组此类焊缝检查提供一定的借鉴及参考。

关键词

EPR; 套管焊缝; 超声检查; 射线检查

1 概述

蒸汽发生器主给水系统(ARE)通过向蒸汽发生器(SG)二次侧供水, 导出堆芯热量, 并可通过调节给水流量, 以维持蒸汽发生器水位在正常运行范围内, 防止过多的给水进入SG而导致一回路过冷。给水发生故障时隔离蒸汽发生器以免蒸汽发生器过度充水。ERP机组蒸发器管嘴与ARE主给水连接环焊缝正常运行期间处于温度突变区域, 易导致应力集中及裂纹产生, 影响机组安全运行。[1]在役检查期间需采用多种无损检测方法对相关区域进行检查, 确保设备安全

可靠, 保障蒸发器二回路供水系统稳定可用。

2 结构分析

ERP机组蒸发器正常运行期间, 正常给水通过主给水接管管嘴进入蒸汽发生器, 该管嘴安装在锥形围壳处以防止产生热分层。蒸发器管嘴与ARE主给水连接环焊缝采用热套管结构形式设计, 其外部主管道焊缝通过蒸发器本体管嘴与ARE主管道进行焊接而成, 规格尺寸为 $\Phi 540 \times 35.25\text{mm}$, 其均为铁素体钢; 其内部ARE给水环与管嘴连接热套管焊缝为不锈钢材料与铁素体钢焊接而成, 与蒸发器本体管嘴进行异种金属焊缝连接, 规格尺寸为 $\Phi 425.5 \times 12.7\text{mm}$, 正常运行设计温度 230°C , 蒸发器二次侧平均温度为 312.5°C , 因为温度差变化较大, 约 82.5°C ,

【作者简介】卢焱(1993-), 男, 中国湖南岳阳人, 本科, 工程师, 从事核电在役检查研究。

根据应力结果计算分析,在役检查期间需重点关注冷热交界区域因温差变化较大产生的应力裂纹,并安排实施相应的在役检查计划。

3 在役检查计划

针对此区域,根据 RCC-M 2007 版 [2] 要求,已完成制定某核电站机组相应的在役检查方法及周期计划。蒸发器本体管嘴与 ARE 主管道连接焊缝安排从外部实施超声检测,检查周期为十年周期,ARE 给水环与管嘴连接热套管焊缝(异种金属焊缝)安排实施射线检测,通过预设计导源孔从内部实施中心曝光,检查周期为十年周期。某 EPR 机组核电站将此检查计划原安排在年度大修中实施,无先后实施逻辑顺序,检验方法相互独立。

4 在役检查方法分析

4.1 超声检测

4.1.1 超声检测要求

外部蒸发器本体管嘴与 ARE 主管道焊缝可采用超声检查工艺实施。[3] 检验设备主要包括超声波检测仪器、探头、标准试块、参考试块、耦合剂等。其检验材质为铁素体钢,使用 A 型脉冲反射式超声波检测仪器,仪器的频率范围可选为 2MHz,探头选择纵波 0° 探头,横波 45°、60°、70°(浅盲区)探头进行扫查。纵波 0° 探头采用垂直或者平行于焊缝方向进行焊缝扫查,横波 45° 探头分别采用垂直于焊缝扫查、采用平行于焊缝扫查,横波 60° 探头可采用垂直于焊缝方向扫查,标准试块的选择可采用 CSK- I A、V2 试块。参考试块应采用与被检部件相同的余料或材质、热处理状态、声学特性与被检部件相似的材料加工。参考试块的扫查面应经过机加工,表面粗糙度 Ra 应不超过 6.3 μm。采用润湿性和渗透性好的专用超声波探伤耦合剂。校准和检测时应采用相同的耦合剂,耦合剂对受检工件不能有腐蚀作用,工作完成后必须去除。检验区域包括熔敷金属及其邻近至少 10mm 范围的母材。工件温度不能高于 40℃,被检表面与参考试块温差不应超过 14℃。

4.1.2 现场检查实施

仪器标定需按 RCC-M (2007 版) 中的规定进行垂直线性、水平线性综合性能测试。探头校验按 RCC-M (2007 版) 中的规定执行。主要为探头声束入射点、探头折射角的测量。折射角的测量值与标称值超过 ±2° 时应更换探头。超声检验使用参考试块上的人工反射体回波建立距离一波幅曲线,定义为基准灵敏度。将探头声束对准参考试块上校准反射体,得到反射体最大回波幅度,并且将波幅调到满屏高度的 80%。然后,依次测出其他校准反射体的最大回波幅度,连接各测点制作 DAC 曲线。信号显示根据焊接技术、缺陷几何位置、回波前沿或形状以及缺陷的定向反射特性等参量为体积型和非体积型两类。一般情况,非体积型缺陷(例如裂纹)的回波幅度较高、上升沿陡峭。

某 EPR 机组核电站现场检修期间,针对蒸发器本体管嘴与 ARE 主管道焊缝区域检查无异常信号显示,结果合格,验证设备安全可靠。

4.2 射线检测

4.2.1 射线检测要求

ARE 给水环与管嘴连接热套管焊缝(异种金属焊缝)可采用射线检查工艺实施。[4] 检验设备主要包括射线源、像质计、增感屏、滤光板、背屏、胶片、暗盒、标识等。射线检验的几何不清晰度的值均应小于等于 0.3mm,被检区应至少包括焊缝填充金属和热影响区,其检查宽度范围为焊缝宽度加其两侧各至少 10mm 的范围。检验范围如图 1。检查时,管壁温度低于 40℃,通过导源孔将放射源置于管子中心,对焊缝进行中心透照,面对管道介质的流动方向,按顺时针方向由小号至大号编制片位号,曝光时间根据曝光量和源活度计算,因被检焊缝管道 Φ425.5×12.7mm 穿插在 Φ540×35.25mm 管道里面,需考虑其结构特殊性制定相应的焊缝透照工艺参数。

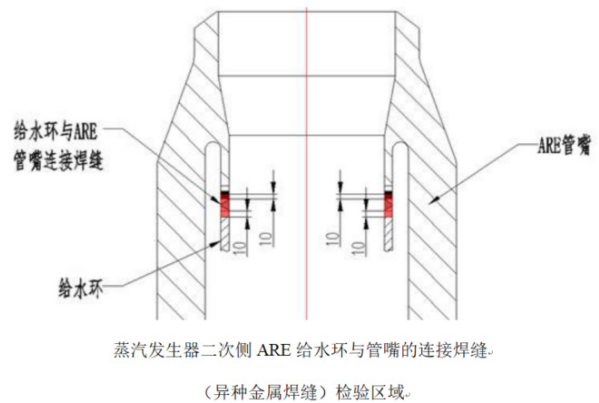


图 1 异种金属焊缝检验区域

像质计选用材质为钢(低合金钢)的阶梯孔型像质计或线型像质计,根据 RCC-M 2007 版 MC3162 和 MC3312.6 的底片质量要求选择像质计,最小可见丝径须达到 0.4mm 及以上。底片黑度必须用黑度计测量。双片观察的黑度应大于 2.7 但不超过 4.5,同一点黑度差不超过 0.5。当单片观察时该片黑度不得小于 2.0。该底片可评定区内的黑度应是逐渐变化的。底片最大黑度不能超过 4.5。

底片评定:因为射线检查工艺为中心透照,其射线束穿透套管母材壁厚和管嘴壁厚,其穿透厚度为 47.95mm,底片评定时需按照热套管实际壁厚进行评定,即 12.7mm 壁厚进行底片缺陷验收。验收标准执行 RCC-M 2007 版规范焊接篇中 S7724.3 规定的验收标准,任何形式的开裂、裂纹、未熔合、未焊透、咬边均不可接受。焊缝处的疲劳裂纹一般源于焊缝内表面的应力集中区域,常会出现在焊缝、靠近焊缝的热影响区或者填充金属内。在底片上的典型影像是轮廓分明的黑线或黑丝,有微小的锯齿,有分叉,粗细和黑度有时有变化,有些裂纹影像呈较粗的黑线与较细的黑线相互缠

绕状，线的端部尖细，端头前方有时有丝状阴影延伸；具有一定长度，有的具有一定的宽度。

4.2.2 现场检查实施

实施检验前应核对受检对象，确保标识号及焊缝有关特性（如类型、级别、位置和尺寸等）准确无误。现场实施前需对保温层进行拆除，应核实检验区域的表面温度不宜过高，需核实表面无锈蚀、异物或任何影响底片评定的不规则状态。受检部件表面根据需要可进行必要的处理。

在役检查期间需考虑机组运行期间二次侧易产生泥渣漂浮物和热套管结构特性导致套管间易沉积泥渣，影响射线底片的判断。某 EPR 机组为首次实施该区域焊缝检查，此先决条件暂未识别，安排射线检验工作，发现射线底片出现类似裂纹类底片影响显示。

4.2.3 影像分析

通过底片影像显示，属于裂纹类典型形貌特征，分析射线探伤底片影像显示，其位置主要分布在焊缝顶部及焊缝下部，结合热套管结构特性进行综合评价，射线透照期间，射线束共穿透 3 层不同介质至底片成像，射线束透照示意图如图 2 所示。主要穿透区域：图 2 ①区域为热套管异种金属焊缝—图 2 ②区域为套管间隙—图 2 ③区域为主管母材区域，此影像需对各层材料间隙进行无损检测，确认是否有异常。核实工程安装期间已完成超声检测和射线检测，核实检查结果记录，无异常影像显示，结果合格，可排除安装期间原始缺陷导致影像异常，确认属于设备在役期间导致异常影像产生。针对此 3 层透照区域使用排除法及多项无损检测手段共同验证，进行逐项安全评估。

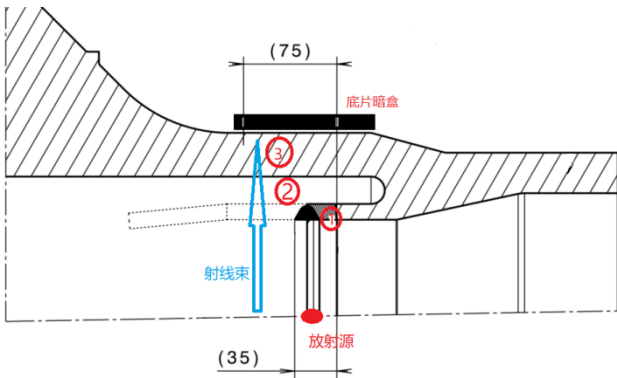


图 2 射线束透照示意图

图 2 ③区域位置主管母材区域，可参考焊缝检验工艺，使用超声检测手段对射线底片覆盖区域进行扫查，核实图 2 ③区域位置主管母材区域是否有超声信号显示。经现场超声检测结果分析，无异常信号显示，可排除图 2 ③区域位置主管母材区域缺陷特征，确认母材区域结果合格。

针对图 2 ②区域套管间隙，使用内窥镜进行视频检查，核实在役运行期间是否有泥渣沉积。某 EPR 机组核电站现

场检修期间，实施蒸发器二次侧已排空，考虑环境剂量水平较高，需对蒸发器二次侧重新进行冲水，使用水屏蔽对蒸发器传热管辐射剂量进行屏蔽，人员从蒸发器二次侧人孔处进入，对套管间隙实施内窥镜视频检查。经现场检查核实确认，其套管间隙内存在泥渣淤积，经取出后确认为在役运行期间产生。

针对图 2 ①区域热套管异种金属焊缝内表面区域，通过从射线源孔进行内表面视频检查，可确认热套管异种金属焊缝内表面完整，无裂纹，热套管焊缝状态存在良好。

4.2.4 分析结论及再验证

经过原因分析及现场验证分析后，重新实施射线探伤检查，其射线探伤底片无裂纹类影像，热套管焊缝清晰可见，热套管焊缝状态存在良好。后续针对此 ERP 机组蒸发器管嘴与 ARE 主给水连接环焊缝实施射线检验工作期间，在蒸发器二次侧高水位的条件下，优先实施完成泥渣清理工作后方可安排射线检验工作。

5 结语

ERP 机组蒸发器管嘴与 ARE 主给水连接环焊缝其结构复杂，考虑在役检查期间现场检修环境复杂，蒸发器二次侧高水位的先决条件，对在役检查策略进行优化如下：

① 检验周期为十年大修周期，将此检查频率和检查轮次与机组十年大修保持一致，优化至十年大修中实施，可满足现场先决条件检查要求及在役检查规范；

② 针对热套管异种金属焊缝，在役检查期间需考虑其运行环境，识别套管间隙其他因素对检查结果的影响；

③ 在进行热套管间隙内窥镜视频检查期间，需与蒸发器二次侧上部内部构件检查窗口同步实施，确保在蒸发器二次侧高水位期间减少辐射剂量的影响；

④ 在役检查期间，实施超声检测仅需满足检测工艺即可实施，无特殊窗口需求，实施射线检测期间，需核实热套管间隙已确认无其他影响因素存在后方可实施。

经窗口优化后，某核电站 EPR 同类型机组再次实施在役检查后结果合格，验证项目优化可行，为后续 EPR 机组核电站在役检查工作提供宝贵实施经验及借鉴意义。

参考文献

- [1] 邢飞龙,陈岩,李庚,等.核电站反应堆压力容器热套管变径区超声检测[J].中国设备工程,2024,(19):192-195.
- [2] 蔡杰,聂勇.压水堆核电站核岛机械在役检查规则研究[J].核科学与工程,2016,36(04):449-458.
- [3] 郑晖,林树青.超声检测 [第2版].北京:中国劳动社会保障出版社.2007
- [4] 强天鹏.射线检测 [第2版].北京:中国劳动社会保障出版社.2007