

# 核电站主回路系统主要设备的射线透照工艺

华雄飞,毛羽飞,张铁辉,李金强,梅义俊,刘顺

(中广核检测技术有限公司,苏州 215004)

**摘要:**核电站主回路系统是核电站役前/在役检查的主要检测对象,从射线检测透照工艺入手,系统地介绍了核电站主回路系统主要设备蒸汽发生器 SG、反应堆压力容器 RPV 以及稳压器 PRZ 的透照方式及实施方法,并对各透照中所使用的专用工具架做了介绍。以岭澳核电站 3,4 号机组役前检查顺利完成的实际经验为依托,为以后役前/在役检查打下基础。

**关键词:**核电站主回路系统;射线检验;蒸汽发生器;反应堆压力容器;稳压器

中图分类号:TG115.28 文献标志码:B 文章编号:1000-6656(2012)02-0060-05

## Radiographic Process for Main Equipment of Nuclear Power Station Primary System in Radiographic Testing

HUA Xiong-Fei, MAO Yu-Fei, ZHANG Tie-Hui, LI Jin-Qiang, MEI Yi-Jun, LIU Shun

(CGNPC Inspection Technology Corporation, Suzhou 215004, China)

**Abstract:** Primary system of nuclear power station is the main examination object of radiographic testing in PSI/ISI. Starting with radiography process in radiographic testing, radiography process and implementation of main equipment as steam generator (SG), reactor pressure vessel (RPV) and pressurizer (PRZ) were introduced quite systematic in primary system of nuclear power station. Radiographic special tools used in each exposure were presented also. Based on the successful experience of pre-service inspection in Ling'ao No. 3 and 4 nuclear power station, foundation is laid for the PSI/ISI later.

**Keywords:** Primary system of nuclear power station; Radiographic testing; Steam generator; Reactor pressure vessel; Pressurizer

根据国家核安全法规 HAF 0302《核电厂在役检查》的要求,核电站在投入运行前需进行一次全检查,即役前检查,其结果作为核电站设备在役检查的原始资料和比较依据。核电站主回路系统由核反应堆、主泵、稳压器、蒸汽发生器和相应管道组成,是核电站役前/在役检查的主要检测对象。

射线检测法是指利用射线的穿透性对工件进行拍照,以胶片作为记录信息介质的无损检测方法,该方法对试件内部的宏观几何缺陷有很好的检测效果。射线检测法是最基本、也是应用最为广泛的一种无损检测方法。

收稿日期:2011-03-21

作者简介:华雄飞(1985—),男,硕士,主要从事射线役前/在役无损检测工作。

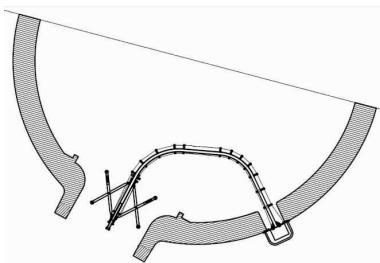
## 1 主回路系统主要设备的射线透照工艺

核岛机械设备的役前射线检测主要针对其破坏可能导致核岛安全受到威胁的主回路系统的压力边界,包括反应堆压力容器安全端焊缝、蒸汽发生器水室和安全端连接异种钢焊缝、安全端和冷却剂管连接焊缝、稳压器上封头与筒体连接焊缝、波动管与下封头连接焊缝、上封头接管安全端焊缝等。役前及在役射线检查中,普遍采用  $\gamma$  源进行透照以缩短曝光时间,从而减少工作人员在役检查时的受辐照剂量,同时也可更方便地对核岛内部部件进行透照。

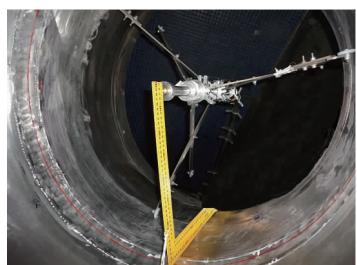
### 1.1 蒸汽发生器(SG)

蒸汽发生器 SG 是一回路冷却剂从反应堆获得的热能传给二回路工质使其变为蒸汽的热交换设备,属于承受高压的部件,其下封头为球形封头,两

侧分别设有冷却剂进、出口管嘴和两个人孔。对水室和安全端异种钢焊缝、安全端与主管道焊缝均采用 $\gamma$ 射线检查。检测中使用专用SG工具架,如图1所示。定位组件可连同输源管从人孔送入水室,到达接管与主管道的焊缝平面中心,支架一端固定在人孔法兰面上,另一端通过人孔处的手轮调节装置将互成120°的3组可收放支腿从收拢状态调节到张开状态从而定位在接管内,再将射线源通过工具架导入,对被检部位进行曝光。此处的关键在于射线源的对中以及支腿的收放自如,难点在于工具架出现故障,如牵引支腿的钢丝绳断线后能将支腿自动收回而无需操作人员进入管道。



(a) 示意图



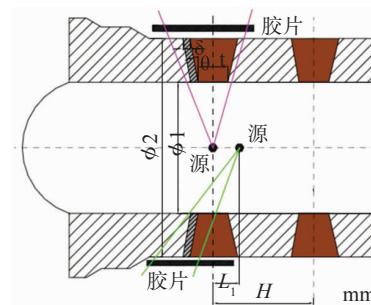
(b) 实物图

图1 SG工具架示意图

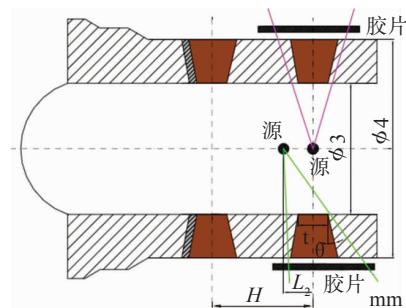
SG水室和安全端连接异种钢金属焊缝透照时,将源置于接管轴线和焊缝中心线交点处,垂直中心透照;SG水室和安全端连接异种钢金属焊缝预堆边透照时,源置于接管轴线和焊缝中心线交点向冷却剂管方向偏移 $L_1$ 处,进行倾斜中心透照,如图2(a)所示。安全端和冷却剂管连接焊缝,即同种钢焊缝透照时,源置于接管轴线和焊缝中心线交点处,垂直中心透照;源置于接管轴线和焊缝中心线交点向异种钢焊缝方向偏移 $L_2$ 处,倾斜中心透照,如图2(b)所示。

图2中偏移距离 $L_1$ 和 $L_2$ 可分别按式(1)和(2)计算:

$$L_1 = \frac{\phi_1 \operatorname{tg}\theta - t - \delta}{2} \quad (1)$$



(a) 异种钢曝光示意图



(b) 同种钢曝光示意图

图2 SG透照示意图

$$L_2 = \frac{\phi_2 \operatorname{tg}\theta}{2} \quad (2)$$

式中 $L_1$ 为异种钢预堆边透照时源偏移距离,mm; $L_2$ 为同种钢透照时源偏移距离,mm; $\phi_1$ 为蒸发器水室和安全端连接异种金属焊缝内径,mm; $\phi_2$ 为同种钢焊缝处内径,mm; $\delta$ 为预堆边宽度,mm; $t$ 为管内焊缝宽度,mm; $\theta$ 为焊缝坡口角。

岭澳核电站3,4号机组役前检查中蒸汽发生器焊缝射线检测采用 $^{192}\text{Ir}$ 源,尺寸采用 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ ,进水端和出水端安全端焊缝检验均满足RCC-M对几何不清晰度不大于0.9 mm的要求,像质计选用及摆放,增感屏、滤光板、背屏的选用,胶片图像质量及黑度等都需满足检测程序要求。透照中,焊缝坡口角 $\theta=10^\circ$ ,则异种钢预堆边透照时源偏移距离 $L_1=57\text{ mm}$ ,同种钢透照时源偏移距离 $L_2=69\text{ mm}$ 。

## 1.2 反应堆压力容器(RPV)

反应堆压力容器RPV固定和包容堆芯与堆内构件,使核燃料的裂变反应限制在一个密封的空间内进行。利用TENIS-G检查装置对反应堆压力容器管嘴与安全端异种金属焊缝及安全端与主管道连接焊缝进行 $\gamma$ 射线检验,如图3所示。检测前必需的各个工艺都需到位,几何不清晰度计算值满足RCC-M标准。检测中将从CITEC公司引进的专用自动检测工具TENIS-G送入到管嘴指定待检部

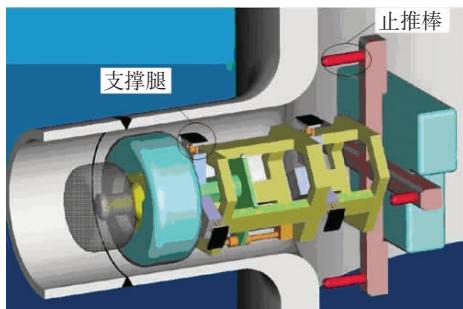
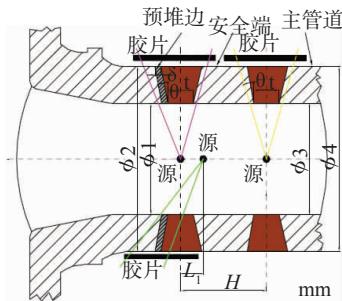


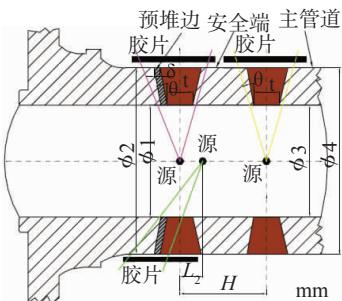
图 3 RPV 检测示意图

位,控制操作面板,对被检部位进行自动曝光检查。

管嘴与安全端连接的异种钢金属焊缝透照时,将源置于接管轴线和焊缝中心线交点向安全端侧偏移,进水管偏离焊缝中心线  $L_1$  处,出水管偏离焊缝中心线  $L_2$  处,倾斜周向透照预堆边焊缝;源置于接管轴线和焊缝中心线交点处,垂直中心透照安全端侧焊缝。安全端与主管道连接焊缝,即同种钢焊缝透照时,将源置于接管轴线和焊缝中心线交点处,垂直中心透照同种钢焊缝。具体透照布置如图 4。



(a) 进水端异、同种钢曝光示意图



(b) 出水端异、同种钢曝光示意图

图 4 反应堆压力容器透照示意图

岭澳核电站 3,4 号机组役前检查中反应堆压力容器焊缝射线检测采用<sup>192</sup>Ir 源,尺寸采用 3 mm × 3 mm,焊缝检验均满足 RCC-M 对几何不清晰度不大于 0.9 mm 的要求,像质计选用及摆放,增感屏、滤光板、背屏的选用,胶片图像质量及黑度等都满足

检测程序要求。检测中检测人员操作及配合须熟练,动作稳定;难点在于该设备在水下作业,易受流体因素影响,且需保证断电时设备不至突然中断而导致脱落受损。透照中,焊缝坡口角  $\theta=6^\circ$ ,同理根据式(1)和(2)算得进水管偏离焊缝中心线 22 mm 处,出水管偏离焊缝中心线 23 mm 处。

### 1.3 稳压器 PRZ

稳压器 PRZ 又称容积补偿器,其作用是补偿一回路系统冷却水温度变化引起回路水容积的变化和调节一回路系统冷却剂的工作压力。

#### 1.3.1 稳压器接管安全端焊缝射线检验

稳压器上封头泄压接管、安全阀接管、喷淋接管、下封头波动管安全端同管嘴连接焊缝进行  $\gamma$  射线检验。透照时胶片和射线源位于工件外侧,使用专用工具架进行双壁单影透照,如图 5 所示。图中焦距为最小要求值,可根据 RCC-M 要求的最大几何不清晰度算得。计算几何不清晰度的公式为:

$$U_g = \frac{d \cdot a}{F - a} \quad (3)$$

式中  $U_g$  为几何不清晰度,mm;  $a$  为被检区内表面到胶片的距离,mm;  $F$  为源到胶片的距离,mm;  $d$  为源的厚度,mm。

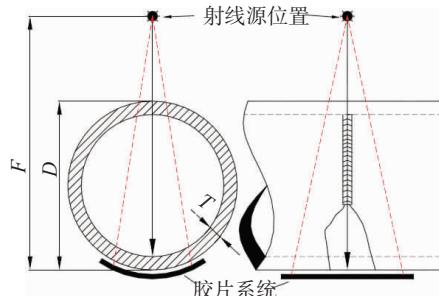


图 5 稳压器接管安全端焊缝透照示意图

由式(3)可推得焦距为:

$$F = a \cdot \left(1 + \frac{d}{U_g}\right) \quad (4)$$

岭澳核电站 3,4 号机组役前检查中,射线源采用<sup>192</sup>Ir,尺寸为 3 mm × 3 mm,上述几何不清晰度 RCC-M 要求不大于 0.3 mm,其中焊缝厚度依次为 30,30,23,8,38 mm,焦距的最小要求值分别为 330,330,265,420 mm。

#### 1.3.2 稳压器筒体接管和封头连接焊缝射线检验

稳压器上封头与筒体连接环焊缝,上封头人孔、泄压管嘴、喷淋管嘴、3 个安全阀管嘴与封头连接焊缝及下封头与波动管管嘴连接焊缝进行  $\gamma$  射线检验。透照时可分四次进行:

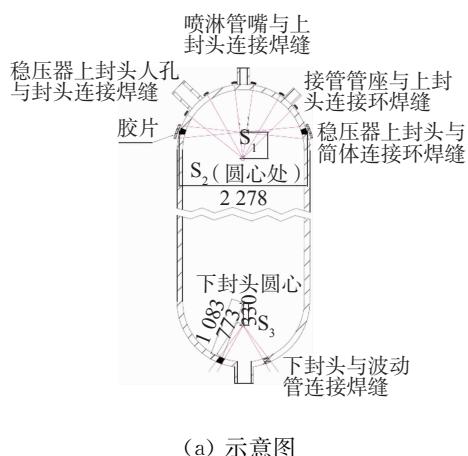
(1) 稳压器上封头与筒体连接环焊缝射线检验时,采用 $^{60}\text{Co}\gamma$ 射线源机,源放于上封头和筒体连接环焊缝横截面圆心处,使用专用工具架进行中心透照周向曝光。

(2) 下封头与波动管连接焊缝射线检验时,使用自主设计的“钓鱼”工具架,射线源定位组件可插入电热元件第二层支撑板中心孔中,依靠该孔进行径向与轴向定位,确保位置的可靠性。曝光时采用 $^{60}\text{Co}\gamma$ 射线源机,源机放在人孔外,源机与射线源定位装置之间通过输源管连接,源放于电加热器隔热板中心孔圆心下侧距离 $L$ 处,采用偏心透照周向曝光。

(3) 稳压器上封头人孔、泄压管嘴、喷淋管嘴、3个安全阀管嘴与上封头连接焊缝射线检验时,采用 $\text{Co}60\gamma$ 射线源机,源放于上封头球心处,使用专用工具架进行中心透照全景曝光。

(4) 由于人孔与上封头受工具架的限制,存在不可达区,对该道焊缝采用更换工具架安装角度进行二次曝光。

图6所示为岭澳核电站3,4号机组役前检查时的曝光示意图, $^{60}\text{Co}$ 源尺寸为小于等于5.27 mm,几何不清晰度RCC-M要求不大于0.6 mm,曝光时



(a) 示意图



(b) 实物图

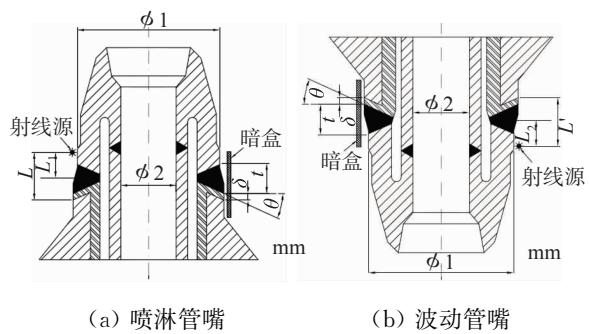
图6 稳压器筒体接管和封头连接焊缝透照示意图

$L$ 要经式(3)验算满足几何不清晰度要求,还需考虑透照效率以及定位工具架的限制,现场 $L$ 值采用100 mm。

### 1.3.3 稳压器热套管射线检验

稳压器的喷淋管嘴热套管和下封头波动管嘴热套管可进行 $\gamma$ 射线检验。

(1) 稳压器喷淋接管嘴热套管 必须在喷淋管连接环的底片上核实该热套管的存在状态。透照时必须把放射源放置在接管外的连接环一侧,与接管/预堆边焊熔合线成一定距离,使得 $\gamma$ 射线入射角与对面焊缝/预堆边焊熔合线的平面呈 $\theta'$ 夹角,放射源至焊缝中心线的距离为 $L_1$ ,装有双层胶片的暗盒放在源的另一侧,具体透照布置如图7(a)。



(a) 喷淋管嘴 (b) 波动管嘴

图7 稳压器热套管曝光示意图

(2) 稳压器波动管接管嘴热套管 必须在波动管连接环的底片上核实该热套管的检验孔的存在。透照时必须把放射源放置在接管外,与接管/预堆边焊熔合线成一定距离,使得 $\gamma$ 射线入射角与对面焊缝/预堆边焊熔合线的平面呈 $\theta'$ 夹角,放射源至焊缝中心线的距离为 $L_2$ ,装有双层胶片的暗盒放在源的另一侧,具体透照布置如图7(b)。

图7(a)中 $\gamma$ 射线入射角与对面焊缝/预堆边焊熔合线的平面呈 $\theta'$ 夹角,则可以求出:

$$L = \Phi_1 \cdot \operatorname{tg}(\theta - \theta') \quad (5)$$

$$L_1 = \Phi_1 \cdot \operatorname{tg}(\theta - \theta') - \delta - \frac{t}{2} \quad (6)$$

式中 $L$ 为射线源到接管/预堆边焊熔合线距离,mm; $L_1$ 为射线源到焊缝中心线距离,mm; $\Phi_1$ 为热套管嘴外径,mm; $\delta$ 为预堆边宽度,mm; $t$ 为热套管管外焊缝宽度,mm; $\theta$ 为焊缝坡口角; $\theta'$ 为 $\gamma$ 射线入射角与对面焊缝/预堆边焊熔合线的平面夹角。

同理,图7(b)也可按相同方法算得 $L_2$ 和 $L'$ 。

以岭澳核电站3,4号机组役前检查为例, $\theta, \theta'$ 和 $\theta''$ 分别为 $25^\circ, 5^\circ$ 和 $15^\circ$ ,喷淋管嘴热套管外径为152 mm,波动管嘴热套管外径为381 mm,则 $L$ 和

$L_1$  分别为 55 和 30 mm,  $L'$  和  $L_2$  分别为 67 和 36 mm。

## 2 役前/在役射线检查技术的探讨

核电站主回路系统射线检测从检测器材的准备、检测的实施、结果的记录及验收是一系列复杂、细致、严格的检测技术的结合,对于如何提高射线检测质量,尽量减少工作时间,降低工作人员的受辐照剂量,笔者提出以下几方面建议:

(1) 优化射线检测中所使用的工具架。工具架的设计开发与优化是提高射线检测技术的重要前提,包括工具架的定位、精度及现场可操作性,还需考虑工具架的重量能否满足操作人员要求等。

(2) 射线源尺寸、活度及位置、焦距、胶片系统、增感屏、滤光板类型、曝光时间等参数的系统性组合优化,从而提高射线底片质量。

(3) 射线检测的自动化和实时成像。射线检测的自动化要求高质量的机械和电气控制系统和相关软件的辅助,同时需要尝试引进和提高实时成像技术。

## 3 结语

核电站主回路系统是核电站役前/在役检查的主要检测对象,笔者从射线检测中透照方式入手,比

(上接第 30 页)

射检测及结果评价方法》<sup>[5]</sup>,对检测结果进行分析,得到如下结论:在压力  $>6.0$  MPa 时,强度  $Q < 60$  dB,为弱强度,活性为强活性,源的综合等级为 D 级;在压力  $<6.0$  MPa 时,强度  $Q < 60$  dB,为弱强度,活性为非活性,源的综合等级为 A 级。

根据上述判定结果可知,此封头的分层缺陷局部区域存在强活性,在交变载荷下存在扩展的可能。缺陷的扩展也在 2011 年的检验中得到了验证。

## 4 结论

由于椭圆封头存在大面积分层缺陷,采用应力分析验证了无应力集中时缺陷封头的可靠性。根据压力储罐的工作介质和加载特点,采用基于护卫传感器的声发射技术对分层缺陷进行了局部监测。监测结果表明,在有护卫传感器的条件下,声发射的信

较系统地介绍了核电站主回路系统的主要设备蒸汽发生器 SG、反应堆压力容器 RPV 以及稳压器 PRZ 的透照方式及实施方法,并对各透照中使用的专用工具架,如 SG 专用工具架、TENIS-G 检查装置以及“钓鱼”工具架做了介绍。以岭澳核电站 3,4 号机组役前检查顺利完成的实际经验为依托,为以后役前/在役检查打下基础,并为如何提高射线检测质量提了几点探讨性建议。

### 参考文献:

- [1] 强天鹏. 射线检测[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社,2007.
- [2] 周大禹. 恰希玛 300 MW 核电站役前  $\gamma$  射线检验[J]. 无损检测,2001,23(11):499—501.
- [3] 夏焕澄,孙凯,刘彧. 岭澳核电站  $\gamma$  射线探伤工艺改进[J]. 吉林电力,2004(2):24—26.
- [4] 周大禹. 岭澳核电站役前  $\gamma$  射线检验技术[J]. 无损检测,2003,25(10):544—545.
- [5] 郑世才. 射线实时成像检测技术与射线照相检测技术的等价性讨论[J]. 无损检验,2003,25(10):500—503.
- [6] 李衍. 射线实时成像检测技术(4)[J]. 无损检测,1996,18(10,11):290—294,324—327.
- [7] 郭伟灿,马夏康,毛建军. 铝合金管道焊缝射线检验工艺研究及缺陷评定[J]. 无损检测,2004,26(05):239—243.

号更能真实地反映缺陷声发射源产生的信号;分层缺陷在交变载荷的作用下,存在缺陷扩展的可能。根据检测结果,建议使用单位更换封头,在未更换封头前尽量使压力保持在 6.0 MPa 以下使用。

### 参考文献:

- [1] 王志文,蔡仁良. 化工容器设计[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [2] 郑津洋,董其伍,桑芝富. 过程设备设计[M]. 北京:化学工业出版社,2010.
- [3] 盛水平. 80 m<sup>3</sup> 液化气卧罐封头夹层缺陷的安全分析[J]. 压力容器,1993,10(5):76—79.
- [4] 林春明,康叶伟,王维斌,等. 护卫传感器在拱顶储罐底声发射检测中的应用[J]. 无损检测,2010,32(8):620—622.
- [5] GB/T 18182—2000 金属压力容器声发射检测及结果评价方法[S].