

# 核电站反应堆压力容器接管安全端焊缝 役前<sup>192</sup>Ir源中心曝光射线检测技术

李得彬

(中广核检测技术有限公司, 苏州 215004)

**摘要:**介绍了岭澳Ⅱ期核电站4号机组反应堆压力容器(RPV)接管安全端役前(PSI)射线检查技术。依据法国压水堆核电站设计建造标准RCC-M和在役检查标准RSE-M,总结了反应堆压力容器接管安全端射线检测的技术要点;同时还介绍了RCC-M和RSE-M标准中的一些特别规定。

**关键词:**安全端焊缝;射线检测;核电站;中心曝光法

中图分类号: TG115.28 文献标志码:B 文章编号:1000-6656(2011)07-0040-03

## Centre Exposure Testing Technology of PST Safe-End-Welds of RPV in Nuclear Power Station

LI De-Bin

(CITEC, Suzhou 215004, China)

**Abstract:** This thesis introduces the PSI RT inspection technology of safe-end-welds of NO. 4 unit's RPV in Ling'ao Nuclear Power Station Period Ⅱ. According to French PWR's standards REE-M and RSE-M, it concludes the key technological points in safe-end-welds of RPV's PSI RT inspection. Meanwhile, it also introduces some special stipulations in RCC-M and RSE-M standards.

**Keywords:** Safe-end-welds; Radiographic testing; Nuclear power station; Centre exposure

反应堆压力容器(RPV)是核岛的核心设备,它用来固定和包容堆芯和堆内构件,使核燃料的裂变反应限制在一个密封的空间内进行。它和一回路管道共同组成高压冷却剂的压力边界,是防止放射性物质溢出的屏障之一<sup>[1]</sup>。因此,保证一回路系统设备,尤其是RPV的完整性和可用性对核电站和核安全的可用率至关重要。这就对RPV无损检测技术提出了很高的要求。

核电站机组役前检测是为了提供初始状态下的数据,作为将来在役检测结果的比较依据,包括射线、超声波、表面和涡流检测等多种方法。文中介绍的RPV射线检测的主要部位为接管安全端焊缝。

岭澳Ⅱ期4号机组反应堆压力容器由筒体和用双头螺栓联接的顶盖两部分组成<sup>[2]</sup>。筒体部分由两段组成,一段为带管嘴(六个管嘴)的环形段,一段为

不带管嘴的筒形环形段。顶盖和带管嘴环形段通过一法兰连接。整个压力容器的材料是Mn-Ni-Mo低合金钢,容器内壁堆焊一层厚度>5 mm的不锈钢。整体规格为 $\phi 4574\text{ mm} \times 12290\text{ mm}$ ,其中上封头规格为 $\phi 4574\text{ mm} \times 1955\text{ mm}$ ,具体尺寸见图1。

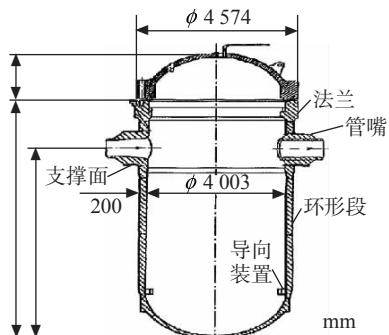


图1 反应堆压力容器示意图

RPV役前射线检测依据法国标准RSE-M《压水堆核岛机械设备设计与建造规则》和RCC-M《压

收稿日期:2010-10-08

作者简介:李得彬(1984-),男,硕士,主要从事核电无损检测。

水堆核电厂在役检测规则》。

## 1 RPV 接管安全端的检查范围和规格

根据压水堆核电厂在役检查规则 RSE-M, RPV 射线检测的主要部位是: RPV 接管与安全端焊缝(异种钢焊缝, 包括预堆边)、安全端与主管道焊缝(同种钢焊缝)以及各焊缝两侧的热影响区。

岭澳Ⅱ期 4 号机组 RPV 管嘴与安全端异种钢焊缝规格为:进水管规格  $\phi 910 \text{ mm} \times 106.1 \text{ mm}$ ; 出水管规格  $\phi 950 \text{ mm} \times 107.1 \text{ mm}$ ; 材质为 16MnD5/Z2CND18.12N2。安全端与主管道同种钢焊缝规格为:进水管规格  $\phi 861.9 \text{ mm} \times 81.7 \text{ mm}$ ; 出水管规格  $\phi 873 \text{ mm} \times 69 \text{ mm}$ ; 材质为 Z3CN20.09M/Z2CND18.12N2。

## 2 RCC-M 和 RSE-M 中对射线检测的具体规定

RCC-M 标准中 MC3000 部分及 RSE-M 标准对压水堆核电站射线检测技术作了具体规定和说明。根据 RPV 接管安全端焊缝的材质和规格, 将适用的规定总结如下:

(1) 接管安全端焊缝射线检测被检区至少包括填充金属和热影响区, 其检测宽度范围为焊缝宽度加其两侧各至少 10 mm(在几何尺寸允许时)。在确定被检区时, 应考虑焊接接头真实位置相对于定位系统的不确定因素。

(2) 射线源应根据标准, 按零件的壁厚和被检区的厚度来选择。

(3) 零件的表面应无铁锈、异物或任何有碍射线照相底片评定的不规则状态。表面可经机加工、磨削、喷砂清理或不经处理。对厚度 $>50 \text{ mm}$ 的焊缝, 应用合适的机械方法, 使焊缝外侧和可接近的内侧表面与母材齐平。

(4) 用<sup>192</sup>Ir 透照: 除 1 级对接焊缝要求使用 1 型和 2 型胶片外, 1~3 型胶片均能使用(胶片按照 AFNOR 标准 NF EN 584-1 分 C1~C6 六类)。

(5) 胶片和射线源的相对位置规定为: 当外径 $>170 \text{ mm}$ , 射线源可以直接或用检查管放入管内时, 最好将其置于管子的中心位置; 如果不能放入, 则应将射线源放在管外进行透照。

(6) 双片观察时, 应评定全部胶片。被检验区应用双片观察, 双层胶片黑度应高于 2.7, 并符合工业用观片灯的亮度水平, 但黑度应不超过 4.5。双

层胶片可评定区域内的黑度应是逐渐变化的; 如果双片的最低黑度在 2.7~3.5 之间, 而双胶片对应于被检验区的某些部分的黑度又大于 4.5, 则采用单层胶片检查, 该胶片黑度至少为 2。该胶片可评定区域内的黑度应是逐渐变化的。除本规则专门规定外, 当采用双层胶片检查时, 在限定黑度区域内每张胶片上相同点测量的黑度差应不超过 0.5。

(7) 被检验区标志: 当被检验区不能直接在胶片上测定时(例如打磨的对接焊缝), 应采用铅制定位标记(最好是一窄条), 置于距原始坡口至少 10 mm 处。这些定位标记的放置应不妨碍底片可评定部分的评定。

## 3 RPV 接管安全端焊缝射线检测技术要点

### 3.1 射线检测的难点

RPV 接管安全端焊缝的检测实质包含三个部位, 即接管预堆边、接管与安全端焊缝异种钢、安全端与主管道的同种钢焊缝。根据 RPV 接管安全端的材质、规格以及现场环境(接管位于 8 m 高度), 对于某一管嘴, 为了能有效地检测上述三个部位, 难点有以下三条: 如何选择透照方式、如何确定透照次数以及如何将射线源送达指定位置。

### 3.2 检测设备和射线源

根据 RCC-M 标准, 选用<sup>192</sup>Ir 射线源对各焊缝进行中心曝光。射线源通过由笔者所在公司自行研制的送源定位工具 TENIS-G 来送达指定位置。TENIS-G 定位精度 $\leq 5 \text{ mm}$ , 源的出射角度为 15°。

### 3.3 检测的准备工作

暗盒准备, 内有两张感光速度相同的胶片和三张增感屏, 交替摆放。每一张底片都应有与焊缝对应的底片编号。正在曝光的房间, 其出入门应关闭, 安全警示牌和警示灯应放置于适当的地方, 或用声光警示灯提示曝光区域, 用警示带圈定曝光可能影响到的地方, 并派专人监护。所有人员配带个人辐射剂量仪, 每个单独活动的小组必须配备 1 台剂量监测仪。为了验证射线照相质量, 第一次拍片前应当依据检验程序拍摄质量参考片, 质量参考片合格后再按制定的技术条件进行拍片。

### 3.4 检测技术要点

#### 3.4.1 透照方式

异种钢金属焊缝<sup>192</sup>Ir 透照方法为: 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 22 mm 处, 出水管偏离焊缝中心线

23 mm 处,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,周向透照安全端侧焊缝。

关于透照预堆边,射线源偏离焊缝中心线一定距离的解释为:预堆边倾角为 6°,预堆边最重要的缺陷类型是坡口未熔合,走向一般沿坡口方向,因此射线的透照方向与坡口方向尽量一致可获得较高的灵敏度。预堆边延长线与管嘴轴线的焦点就是源的摆放位置。对于出水管半径 475 mm,预堆边倾角 6°,焊缝宽度为 53 mm,则通过三角函数关系计算可得出透照预堆边时,源的位置要偏离焊缝中心线 23.4 mm。同理可计算进水口预堆边检测时,偏移量为 22 mm。

同种钢焊缝透照方法为:源置于接管轴线和焊缝中心线交点处,周向透照安全端与主管道连接焊缝。

如图 2 所示,对于 RPV 全部六个接管安全端焊缝,共需要 3×6=18 次中心曝光。

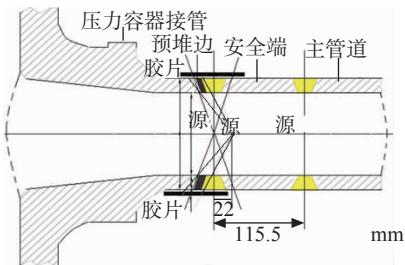


图 2 RPV 安全端焊缝射线检测示意图

### 3.4.2 曝光时间及曝光量

对于  $\gamma$  源,曝光量为曝光时间和放射性源活度的乘积。源的放射性活度短时间内可认为是恒定的,只要确定曝光时间即可。

曝光时间一般依据下面的条件计算:胶片的类型及品牌、滤光板的类型和厚度;透照壁厚、射线源的活度、射线源到胶片的距离、胶片黑度要求及增感屏的类型。根据岭澳二期现场使用的<sup>192</sup>Ir 的活度,通过试验测得对 RPV 接管安全端每道焊缝进行检测需要曝光 8 h。

### 3.4.3 几何不清晰度验证

几何不清晰度  $U_g$  的计算公式为:

$$U_g = \frac{D_f \cdot b}{F - b}$$

式中  $D_f$ —射线源的尺寸;

$b$ —被检区内表面到胶片的距离,mm;

$F$ —源到胶片的距离,mm。

根据 RCC-M 的规定,几何不清晰度要求

$\leq 0.9$  mm。以反应堆压力容器接管与安全端连接焊缝(进水端)为例计算几何不清晰度。若源尺寸  $D_f = 2$  mm,被检表面到胶片的距离  $b = 106$  mm,焦距  $F = 455$  mm,则:

$$U_g = 2 \times \frac{106}{455 - 106} = 0.6$$

其他位置的几何不清晰度为:反应堆压力容器接管与安全端连接焊缝(出水端)  $U_g = 0.58$  mm;反应堆压力容器接管预堆边(进水端)  $U_g = 0.6$  mm;反应堆压力容器接管预堆边(出水端)  $U_g = 0.58$  mm;反应堆压力容器安全端与主管道连接焊缝(进水端)  $U_g = 0.5$  mm;反应堆压力容器安全端与主管道连接焊缝(出水端)  $U_g = 0.4$  mm。

以上数据表明,当源置于接管中心进行周向曝光时,几何不清晰度满足 RCC-M 标准规定。

### 3.4.4 胶片和像质剂的摆放

像质计(IQI)置于胶片侧,沿外壁均布三个像质计。用 F 标识(对比试验在试验室进行)。RSE-M 规定:进水管同种钢焊缝(壁厚 81.7 mm)应可看到孔直径为 1.25 mm 的显示,出水管同种钢焊缝(壁厚 69 mm)应可看到孔直径为 1.00 mm 的显示;进出水管异种钢焊缝(进水管壁厚为 106.1 mm,出水管壁厚 107.1 mm)均应可看到孔直径为 1.25 mm 的显示。

岭澳Ⅱ期 4 号机组射线检查采用 Agfa D3 型胶片。每张胶片两边的搭接至少 20 mm。胶片沿圆周布置,胶片尺寸采用 400 mm×150 mm。根据接管规格可计算得出,接管与安全端连接的异种钢金属焊缝布置 9×2 张胶片,安全端与主管道连接焊缝布置 8×2 张胶片。

### 3.4.5 滤光板和背屏

为防止散射线,RSE-M 规定 RPV 射线无损检测时使用厚度为 2.0 mm 的滤光板,并在一个角上钻有 2 个  $\phi 3$  mm 的孔,每一张滤光板标上记号。

为防止背散射,RSE-M 标准规定使用背屏。背屏由一张或几张铅屏组成,厚度至少为 2 mm。采用一个厚度为 1.5~2.5 mm 的铅制字母“B”,并放置在暗盒与背屏之间,以确定背散射防护效果。若底片上出现的字母“B”颜色较浅,则该底片必须舍弃;若底片上出现的字母“B”颜色较深或不可见,则该底片为合格底片。

## 4 检测结果与分析

根据以上工艺,对岭澳Ⅱ期 4 号机组 RPV 接管

## 奥林巴斯·艾因蒂克西南地区第十一届无损检测学术年会 暨 2011 年(昆明)国际无损检测仪器展览会 云南省机械工程学会无损检测分会第七届代表大会 会议通知

西南地区第十一次无损检测学术年会暨 2011 年(昆明)国际无损检测仪器展览会将于 2011 年 8 月 12—16 日在昆明举行。会议旨在促进无损检测技术在西部的发展,加快国际国内先进无损检测技术在西部的推广与应用。现诚邀全国无损检测事业科技教育、工业战线新老专家、检测人员、厂商企业及各国家地区无损检测同仁踊跃参加会议和展览会;交流新成果、新经验;研讨无损检测的应用现状和发展趋势;促进无损检测事业的繁荣和创新;促进各地区无损检测同行间的相互沟通,相互合作,增加了解,促进友谊。

会议由云南省机械工程学会无损检测分会承办,奥林巴斯(中国)有限公司和艾因蒂克实业有限公司协办,组委会由云贵川渝各分会负责人及国内知名专家学者组成。

**主任:** 鲍宗川

**副主任:** 申卫东 王 珏 钱洪南 马玉明

周黎

**委员:** 徐永昌 强天鹏 屠耀元 邱海莲  
陆健牛 璞 刘文宝 倪振新  
伍晓洪 纪冈成 陈罕新 田 兵  
张瑞 唐雨 李 纯

### 会议内容

- 无损检测新技术专题报告
- 西南地区无损检测技术的发展与交流
- 无损检测新技术、新设备应用介绍和展示

### 会议日程

安全端焊缝进行射线检测,对底片进行评定统计结果为:底片的最低黑度为 2.8,最高黑度为 4.2(均为双片观察);进水管同种钢焊缝(壁厚 81.7 mm)像质剂显示为  $\phi$  1.00 mm 孔,出水管同种钢焊缝(壁厚 69 mm)像质剂显示为  $\phi$  1.00 mm 孔,进出水管异种钢焊缝(进水管壁厚为 106.1 mm,出水管壁厚 107.1 mm)像质剂显示均为  $\phi$  1.00 mm 孔。以上数据表明,黑度和像质剂灵敏度均满足标准要求。

采用以上工艺进行射线检测,未发现超标缺陷,与后来进行的超声波检测结果吻合。

采用以上射线检测技术,很好地解决了 RPV

8 月 12 日报到,8 月 13—14 大会会议,8 月 15—16 参观。

### 会议地点及费用

会议地点:昆明大自然风情园(0871—4311628)

地址:昆明海埂(中国国家体委足球训练基地旁);交通:昆明火车站至昆明大自然风情园,可步行至昆明火车站,乘坐 44 路在红塔路口站下车换乘 135 路在海埂体训基地下车步行 100 m 即到;昆明巫家坝机场至昆明大自然风情园,可步行至民航机场站,乘坐 A2(或 52,67) 路,在双桥村站下车,步行 500 m 转乘 135 路在海埂培训基地下车,步行 100 m 即到。昆明火车站、昆明机场打出租车至昆明大自然风情园费用约 35 元左右,报到当天有专人在火车站和机场迎接。

会务费:800 元/人(参展商请与秘书处联系)

食宿安排:统一安排,费用自理(155 元/人/天)

为提前安排食宿,请各位与会代表于 7 月 30 日前与本会秘书处联系(电话、电子邮件回执均可)。

### 联系方式

电子信箱:lihao25234@sina.com.cn

通信地址:昆明市新迎小区北区十二组团 175 栋 402 室,650233

电话:0871-5630475;传真:(0871—5630475)

联系人: 鲍宗川 (13099909130), 马玉明 (13187899686), 周黎 (13887162159), 李灏 (13888825234)

(云南省机械工程学会无损检测分会)

接管安全端役前无损检测中的各项难题。通过试验验证和现场实际应用,证明了工艺的有效性,并且各项条件和数据均满足 RCC-M 和 RSE-M 标准的规定。<sup>192</sup>Ir 源中心曝光技术的熟练运用还能为在役检测赢得时间,使工作人员的吸收剂量得到控制。

### 参考文献:

- [1] 丁建国.反应堆压力容器顶盖贯穿件及其焊缝的无损检测[J].无损检测,2007,29(2):104—106.
- [2] 陶于春,梁瞻翔,林忠元,等.压水堆核电站在役检查用无损检测技术发展概况[J].无损检测,2009,31(12):959—966.