

文章编号 : 0258-0926(2017)01-0099-05; doi: 10.13832/j.jnpe.2017.01.0099

# CPR1000 RPV 役前检查缺陷显示问题分析

张 进, 万志坚, 李家康, 董义令, 邓小云, 刘 攀

中广核工程有限公司, 广东深圳, 518172

**摘要:** 针对某中国改进型三环路压水堆 (CPR1000) 反应堆压力容器 (RPV) 出口接管与法兰接管段筒体焊接接头在制造阶段超声检验 (UT) 合格, 而役前检查 (PSI) 阶段 UT 发现“超标”缺陷显示的问题, 对制造阶段和 PSI 阶段 UT 技术要求进行对比分析。结果表明: 将制造阶段采用的 RCC-M 规范验收标准应用于 PSI 阶段 UT 技术方法是导致问题产生的直接原因, 而 PSI 阶段与制造阶段的 UT 缺陷尺寸测量方法和缺陷显示累计要求存在差异是导致问题产生的根本原因。基于 PSI 的目的是建立在役检查的“零点”, 提出如下观点: PSI 阶段发现的“超标”缺陷显示, 如可行, 应考虑采用制造阶段的检验方法和验收标准进行复检和验收。

**关键词:** CPR1000; 反应堆压力容器; 焊接接头 (RPV); 役前检查; 缺陷显示

**中图分类号:** TL38<sup>+</sup>6 **文献标志码:** A

## Analysis of PSI Defect Problem of CPR1000 Reactor Pressure Vessel

Zhang Jin, Wan Zhijian, Li Jiakang, Dong Yiling, Deng Xiaoyun, Liu Pan

China Nuclear Power Engineering Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518172, China

**Abstract:** During the pre-service inspection of a certain CPR1000 reactor pressure vessel (RPV), unacceptable defect is found in the weld between outlet nozzle and flange-nozzle shell which complies with the requirements of ultrasonic testing (UT) during manufacturing. To solve the problem, the comparison of UT technique employed during manufacturing and PSI has been demonstrated. It is proved that the immediate cause of problem is that the acceptance criteria of manufacture according to RCC-M code has been applied to UT technique of PSI, and the root cause is the differences of the sizing method and the grouping requirements for defects between manufacturing and PSI. On account of PSI is intended to act as a zero point for in-service inspection, the view point is presented that unacceptable defects found during PSI, if possible, should be re-examined and accepted in accordance with the testing method and acceptance criteria of manufacturing.

**Key words:** CPR1000, Reactor pressure vessel (RPV), Weld, Pre-service inspection, Defect indication

### 0 前 言

中国改进型三环路压水堆 (CPR1000) 役前检查 (PSI) 结果与制造安装无损检验检查结果不一致情况时有发生, 每一个问题的处理都会引起核安全监管和行业高度关注, 耗费了大量的人力和物力, 甚至制约了工程进度的按期实现。

2014 年 2 月, 某 CPR1000 核电厂反应堆压

力容器 (RPV) 役前检查阶段进行超声检验时发现标号为 H3 (在 CPR1000 RPV 上, H1~H3 分别为 3 个出口接管的标号) 的出口接管与法兰接管段筒体焊接接头存在一处“超标”缺陷显示。缺陷显示性质判定属于体型型, 长度不满足 RCC-M S7714.4 验收标准的规定。但制造单位制造完工报告中, 各个阶段的超声和射线检验报告中检验结

收稿日期: 2016-03-21; 修回日期: 2016-08-15

作者简介: 张 进 (1985—), 男, 工程师, 现主要从事核岛设备无损检验设计和技术服务工作

果均为合格,其中射线照相底片上相关区域无缺陷影像存在;制造单位按照 RCC-M 规范及设计文件的要求对该处缺陷显示进行了超声检验复核,复核结果表明该缺陷满足 RCC-M 规范及设计要求,因此给出了现状接受的处置建议。本文通过比较制造阶段和 PSI 阶段超声检验的技术方法,分析 RCC-M 规范和 RSE-M 规范在超声缺陷显示评价和尺寸测量方面的差异,以确定 RPV H3 出口接管与法兰接管段筒体焊接接头 PSI 阶段与制造阶段超声检验结果不一致的原因及解决措施。

## 1 出口接管与法兰接管段筒体焊接接头及其超声检验

压水堆 RPV 的接管型式主要有“法兰式”、“圆筒式”、“贴式”以及“一体化锻造”等。接管与筒体连接方式主要为“插入式”和“贴式”全焊透对接焊缝或角焊缝。CPR1000 RPV 接管为“法兰式接管”,采用“插入式”马鞍型对接焊缝与筒体相连。CPR1000 出口接管与法兰接管段筒体焊接接头的焊缝结构和缺陷显示的位置分布见图 1,缺陷显示长度约为 66.6 mm。

该焊接接头制造阶段在中间消除应力热处理后、最终消除应力热处理后和工厂水压试验后,在设备几何形状允许的前提下,采用 0°、45°和

60°探头,从容器内、外壁以及接管内壁沿垂直和平行于焊缝方向手动进行扫查。制造阶段要求记录波幅达到 50%参考反射体波幅(DAC)的缺陷显示,尺寸测量采用“最大回波衰减 6 dB 法”(以下简称“-6 dB 法”)。

PSI 阶段仅采用自动检查设备从出口接管内壁垂直于焊接接头进行扫查。实际检查中,为了提高检查效率,检查程序优化为缺陷探测和缺陷定量 2 个部分,仅在缺陷显示波幅达到定量阈值时,才启动定量程序进行缺陷显示尺寸测量。缺陷探测采用 0°、5°、35°和 45°探头进行扫查;缺陷定量采用 0°和 45°聚焦探头进行扫查。PSI 阶段要求记录波幅达到 25%DAC(DAC-12 dB)的缺陷显示,波幅达到 50%DAC(DAC-6 dB)的缺陷显示要求进行尺寸测量,尺寸测量采用“噪声法”。

## 2 缺陷显示及原因分析

### 2.1 缺陷显示分析

经核实,制造完工报告中各个阶段的超声和射线检验报告中检验结果均为合格,其中射线照相底片上相关区域无任何缺陷影像存在。制造单位采用满足 RCC-M 规范及设计文件要求的且与制造阶段相同的检验工艺,分别从容器内、外壁及接管内壁对该处缺陷显示进行复核,同时还要求检测单位给出采用与制造阶段相同“-6 dB 法”的尺寸测量数据,以便开展进一步分析工作。各阶段超声检验确定的缺陷显示特征见表 1。

从表 1 可以看出:缺陷性质方面结论一致,均判定为体积型缺陷显示。此外,制造单位结合焊接工艺判断可能是埋弧焊接过程中焊渣清理不干净而产生的小型不规则的夹渣缺陷。缺陷数量方面没有分歧,均确认存在 2 个缺陷显示。1#缺陷显示波幅介于 RSE-M 规范记录阈值(DAC-12 dB)和 RCC-M 规范记录阈值(DAC-6 dB)之间,其波幅相差较小,属于合理范围;2#缺陷显示波幅超过 RCC-M 规范记录阈值,除工厂中间热处理和最终热处理后的数据存在较大偏差外,工厂水压试验后和现场复核的数据与役前检查数据基本一致。缺陷显示长度方面,由于 2 家单位采用的尺寸测量方法不同以及对于 2 个缺陷是否应进行累计存在分歧,因此给出的缺陷显示长度结果差异较大。检测单位采用的噪声法由于测量灵敏度较高且 2 个缺陷之间的间距相对较小,2 个缺陷连成 1 个缺陷,因此缺陷长度显

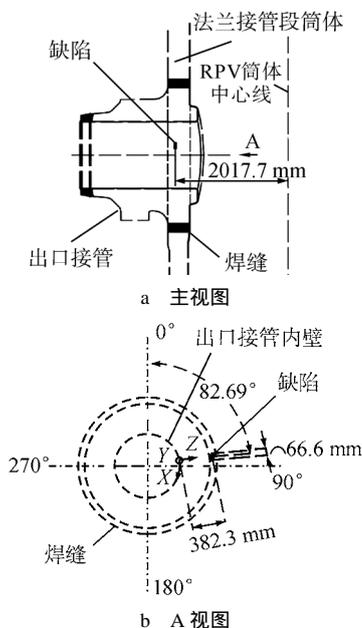


图 1 出口接管与法兰接管段筒体焊缝结构和缺陷显示位置示意图

Fig.1 Sketch for Structure of Weld between Outlet Nozzle and Flange-Nozzle Shell and Location of UT Indication

表 1 缺陷显示的特征  
Table 1 Characteristics of Defect Indications

检验阶段	检验表面	探头角度	最大波幅	尺寸测量		性质	备注
				方法	长度/mm		
役前检查	接管内壁	0°	1#: DAC - 10.4 dB 2#: DAC - 2.3 dB	噪声法	66.6	体积型	噪声法测量, 缺陷显示“合二为一”
				-6 dB 法	1#: 23.4 2#: 12.2 (点状) 累计: 51.3 (含间距 15.7)	体积型	检测单位认为缺陷显示应累计
中间热处理后	容器外壁	—	—	-6 dB 法	—	—	未发现达到 DAC-6 dB 的记录缺陷显示
最终热处理后	容器外壁	60°	1#: DAC - 10.5 dB 2#: DAC - 9 dB	-6 dB 法	1#: 6 (点状) 2#: 5 (点状)	体积型	制造单位记录阈值内控提高为 DAC-12 dB, 评判缺陷显示不应累计
工厂水压试验后	容器外壁	60°	1#: DAC - 9 dB 2#: DAC - 3.7 dB	-6 dB 法	1#: 5 (点状) 2#: 5 (点状)	体积型	同上
现场复核	接管内壁	0°	1#: DAC - 21 dB 2#: DAC - 3.6 dB	-6 dB 法	1#: 5 (点状) 2#: 11 (点状)	体积型	制造单位评判不满足累计要求
	容器外壁	1#: 60° 2#: 45°	1#: DAC - 10 dB 2#: DAC - 9 dB	-6 dB 法	1#: 10 (点状) 2#: 6 (点状)	体积型	

著增大到 66.6 mm；制造单位采用“-6 dB 法”，且 1#缺陷显示未达到 RCC-M 规范规定的记录阈值 (DAC-6 dB)，因此未进行累计。另外，制造单位前后 3 次检查数据差异较大，虽然缺陷显示在合格范围内，但检查数据的波动超出合理范围，应加强过程控制，避免出现最终热处理或水压试验后焊接返修的重大制造不符合项。从役前检查单位提供的 2 个缺陷显示“-6 dB 法”尺寸数据来看，2#缺陷显示的尺寸数据与制造阶段最终数据及现场复核数据差异较小，主要分歧在于 1#缺陷显示是否需累计。

## 2.2 原因分析

“-6 dB 法”属于相对灵敏度尺寸测量方法，“-6 dB 法”通过在扫查面围绕缺陷显示最大波幅位置移动探头使得缺陷显示波幅降至最大波幅的一半，确定缺陷显示的轮廓，进而得出缺陷显示的尺寸。该方法仅适用于缺陷显示尺寸大于同声程处声束尺寸的情况，并且对于垂直于声束、表面光滑及缺陷截面不小于同声程处声束尺寸的缺陷显示，测量精度较高。“噪声法”通过在扫查面围绕缺陷显示移动探头直至缺陷回波降至背景噪声水平，确定缺陷显示的轮廓，进而得出缺陷显示的尺寸，测量精度随噪声水平变化而变化。该方法可用于确定缺陷真实轮廓尺寸或包络尺寸，测量数据在考虑测量不确定度后可用于在役阶段缺陷评价的输入。

从上述分析可以看出，“-6 dB 法”和“噪声法”都属于移动探头进行尺寸测量技术，区别

在于“-6 dB 法”移动探头到缺陷回波降至最大波幅的一半的位置，而“噪声法”移动探头至缺陷显示波幅降至背景噪声水平的位置。一般情况下，低合金钢锻件及焊接接头的背景噪声水平较低，因此对于同一个缺陷显示采用“噪声法”测量的尺寸数据要比“-6 dB 法”尺寸数据大，详见图 2。

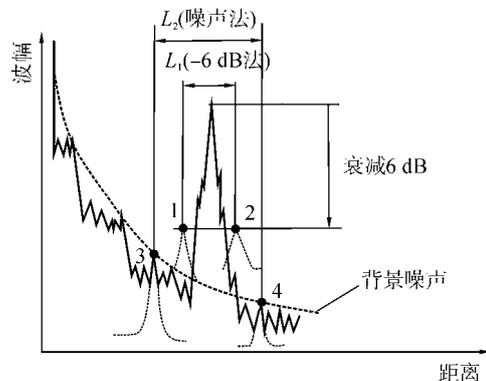


图 2 -6 dB 法与噪声法缺陷显示测量尺寸差异

Fig. 2 Difference between -6 dB Drop from Maximum Technique and Drop to Noise Level Technique for Sizing of Indications

1、3—缺陷左端点；2、4—缺陷右端点； $L_1$ 、 $L_2$ —缺陷显示长度

另外，对于邻近缺陷显示累计的问题，由于其间距大小与尺寸测量方法直接相关，制造阶段按“-6 dB 法”尺寸测量数据评判为不满足累计规定的邻近缺陷显示，役前检查阶段采用噪声法进行尺寸测量，随着缺陷尺寸的增大，其间距将变小，从而满足累计规定，累计后的缺陷显示尺寸可能会超过验收标准的规定，详见图 3。

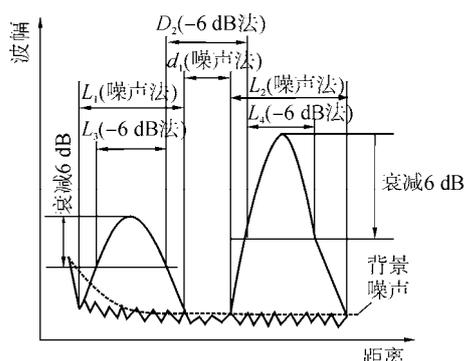


图3 “-6 dB法”与“噪声法”对缺陷显示累计的影响  
Fig. 3 Effect of 6dB Drop from Maximum Technique and Drop to Noise Level Technique for Grouping of Indications

$d_1$ 、 $d_2$ —相邻缺陷间距； $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$ —缺陷显示长度

通过上述分析，可以看出RPV H3出口接管与法兰接管段筒体焊接接头PSI阶段与制造阶段超声检验结果不一致的根本原因为PSI阶段与制造阶段缺陷显示尺寸测量方法及累计要求不同：制造厂采用RCC-M规范规定的显示尺寸测量方法和累计要求，即“-6 dB法”，且仅要求达到RCC-M规定的记录阈值的单个缺陷显示参与累计；PSI则采用更加保守的尺寸测量方法和累计要求，即“噪声法”和所有可识别的缺陷显示均参与累计。因此，判断该缺陷显示是否合格的关键在于以下2个方面：采用RCC-M规范规定的验收标准应基于哪种尺寸测量方法的数据进行验收；2个缺陷是否需累计考虑。

### 3 适用规范分析

CPR1000核电厂核岛机械部件的役前和在役检查主要依据RSE-M规范(1997版+2000补遗)，设计建造主要依据RCC-M规范(2000版+2002年补遗)。针对上述超声检验缺陷显示评定的问题，应依据适用规范相应条款的规定进行分析。

#### 3.1 RSE-M规范

RSE-M规范(1997版+2000补遗)是CPR1000核电厂役前和在役检查所依据的规范。该规范明确规定役前检查的目的是为后续检查提供参考或“零点”，检查结果作为后续在役检查的参考，所发挥的作用不同于承包商制造和安装过程中的检验。因此，规范中并未有涉及役前检查缺陷验收标准的相关内容。

对于超声缺陷显示的记录和尺寸测量要求，RSE-M规范(1997版+2000补遗)规定：所有达到25%DAC(DAC-12 dB)的缺陷显示均应记录，

至少应记录缺陷显示的位置、波幅和记录阈值灵敏度下的缺陷显示的图像尺寸；当缺陷显示的波幅达到50%DAC(DAC-6 dB)时，应进行尺寸测量，尺寸测量通过比较“6 dB衰减”或者“连续6 dB衰减”(即12 dB、18 dB衰减等)确定的缺陷显示图像(轮廓)的变化量与声束尺寸的相对大小，如发现缺陷显示垂直于声束方向的尺寸变化量超过1.5倍同声程处的声束尺寸或焦点尺寸，或缺陷显示波幅变化超过6 dB，或缺陷显示高度(即缺陷深度方向的尺寸)发生变化，则认为缺陷显示尺寸发生显著变化，需开展进一步的检查和分析工作。

分析可见，役前检查的目的是采用与在役检查相同的技术方法建立后续在役检查的“零点”，在役检查主要关注缺陷显示尺寸的相对变化及缺陷的包络尺寸。因此，役前检查根据在役检查的需要可采用灵敏度高于“-6 dB法”的尺寸测量方法。

#### 3.2 RCC-M规范

RCC-M(2000版+2002补遗)S7714.4对于1级焊缝超声缺陷显示的记录和验收标准规定：任何波幅不低于50%(DAC-6 dB)的缺陷显示均应记录，并根据缺陷显示的性质、波幅及长度进行验收；对于波幅低于50%DAC(DAC-6 dB)的单个缺陷显示均不视为需进行返修的缺陷，但当其连续长度超过200 mm时，应进行进一步分析以确定其性质。由此可见，对于低于50%DAC(DAC-6 dB)的单个体积型显示，若其连续长度未超过200 mm，不需要进行返修，即该缺陷显示可接受。

对于DAC法的缺陷显示尺寸的评定，RCC-M MC2000规定：缺陷显示尺寸评定采用最高波幅衰减6 dB的方法。对于邻近的单个缺陷显示累计的问题，RCC-M MC2638规定：如果满足以下2个条件，应进行累计。

(1) 在扫查面上的投影间距不超过较小显示长度6倍或者20 mm(其中1个显示为点状显示)。

(2) 在焊缝横截面上的投影间距不超过20 mm。

累计后的显示波幅为单个缺陷显示的最大波幅，其尺寸通过连接所有显示相距最远的端点确定，即累计后的缺陷显示的尺寸需包含间距。

#### 3.3 小结

RCC-M规范完整规定了缺陷显示的记录阈

值、尺寸测量方法、邻近缺陷显示的累计要求和验收标准；而 RSE-M 规范虽规定了缺陷显示的记录阈值、需进行缺陷显示尺寸测量的测量阈值及测量方法，但并未给出役前检查缺陷显示验收标准，因此对役前检查缺陷显示进行验收评价应采用 RCC-M 规范。同时，采用 RCC-M 规范规定的验收标准时应配套采用 RCC-M 规范规定的尺寸测量方法。

将制造阶段采用的 RCC-M 规范中的验收标准应用于 PSI 阶段的 UT 技术方法是导致本次 RPV H3 出口接管与法兰接管段筒体焊接接头 PSI 阶段与制造阶段超声检验结果不一致的直接原因。RSE-M 规范规定的记录阈值较 RCC-M 规范低，同时 RSE-M 规范允许采用更高灵敏度水平的缺陷显示测量方法，意味着役前检查阶段比制造阶段要求记录更多波幅较小的缺陷显示及其尺寸信息，以便在役检查期间更好地监督和跟踪。对于役前检查缺陷显示的验收，如果过于保守地考虑要求将这类小缺陷也进行累计，将会造成累计后的缺陷显示长度超标的问题，因此役前检查缺陷显示验收时不应考虑这类小缺陷。

#### 4 问题处理结果

综上所述，对于 1#缺陷显示由于其波幅未达到 50%DAC (DAC-6 dB) 的记录阈值且其长度未超过 200 mm，按照 RCC-M 规范，1#缺陷显示验收合格且不需要考虑与 2#缺陷累计；对于 2#缺陷显示，应基于“-6 dB 法”的尺寸测量数据进行验收，验收结果合格。

因此，上述缺陷显示满足 RCC-M 规范(2000 版+2002 年补遗)的规定。检测单位采用噪声法获得的缺陷显示测量数据可作为在役检查的“零点”使用。该分析结论得到设计院、制造厂、役前检查单位、业主和国家核安全局以及国内同行专家的一致认可。此外，设计院还针对该体积型缺陷显示，保守地按平面型缺陷考虑，采用在役期间的分析方法和上述役前检查单位给出的最大的缺陷显示尺寸数据并考虑测量不确定度作为分析输入，开展断裂力学分析验证工作。结果表明：即使该位置存在同样长度的裂纹类缺陷也不会影响 RPV 的结构完整性及 60 a 使用寿命。

#### 5 经验及建议

(1) RPV H3 出口接管与法兰接管段筒体焊接接头 PSI 阶段与制造阶段超声检验结果不一致的根本原因为：PSI 与制造阶段缺陷显示尺寸测量方法及累计要求不同，PSI 采用“噪声法”并要求所有缺陷显示均参与累计，制造阶段采用“-6 dB 法”和仅要求达到 50%DAC (DAC-6 dB) 的缺陷显示参与累计。随着役前和在役检查技术的发展，PSI 可采用更加精细化的检查技术测量缺陷的真实尺寸或包络尺寸，检查结果可作为“零点”使用，便于后续在役检查跟踪和比较，但作为产品验收依据不合适。

(2) 将制造阶段采用的 RCC-M 规范验收标准应用于 PSI 阶段 UT 技术方法是导致本次 RPV H3 出口接管与法兰接管段筒体焊接接头 PSI 阶段与制造阶段超声检验结果不一致的直接原因，采用 RCC-M 规范规定的验收标准，必须配套采用 RCC-M 规范中规定的缺陷显示尺寸测量方法和累计要求。

(3) RSE-M 规范中明确 PSI 作为后续在役检查的零点，检查结果作为后续在役检查的参考，所发挥的作用不同于承包商制造和安装过程中的检验。设备验收检查已在出厂前按 RCC-M 规范及设计要求完成，PSI 阶段如需对缺陷显示进行验收，验收标准不应高于制造阶段的验收标准。对于 PSI 阶段发现的“超标”缺陷显示，首先应考虑采用 RCC-M 规范及设计文件规定的检验方法和验收标准进行复检和验收，如满足 RCC-M 规范及设计文件要求，则产品应正常交付使用。

(4) 制造阶段需针对容易引起检查结果不一致的重点部位，基于 RCC-M 规范和制造单位的实施条件，参考 PSI 要求在合理可行的前提下适当提高要求并制定专用程序，设备制造过程中应加强质量控制，避免出现最终热处理后及工厂水压试验后需焊接返修的重大不符合项和将制造阶段的超标缺陷带入运行阶段。

(5) 针对核安全 1 级设备相关的质量问题的处理，必须邀请设计院、制造厂、役前检查单位共同进行分析、评估和处理，同时邀请国家核安全监管部门的代表进行监督。

(责任编辑：张明军)