

文章编号：0258-0926(2017)03-0077-04；doi:10.13832/j.jnpe.2017.03.0077

CPR1000 反应堆压力容器制造无损检验与役前检查不一致的问题分析

李家康, 刘毅, 张进, 刘飞华, 邱振生, 董义令

中广核工程有限公司, 广东深圳, 518172

摘要：重点分析 RCC-M 和 RSE-M 规范的无损检验要求，梳理出中国改进型三环路压水堆（CPR1000）反应堆压力容器（RPV）制造无损检验与役前检查要求的差异项。对差异项开展分析研究，从检验范围、扫描方向、记录水平、显示尺寸测量和评价标准等方面提出针对性的技术改进方案，尽可能解决由于制造和役前检查技术差异而产生检验结果不一致的工程问题。

关键词：中国改进型三环路压水堆（CPR1000）；反应堆压力容器；制造无损检验；役前检查；不一致
中图分类号：TL351⁺.6 **文献标志码：**A

Analysis on Problem of Difference between Non-Destructive Examination in Manufacturing and Pre-Service Inspection for CPR1000 Reactor Pressure Vessel

Li Jiakang, Liu Yi, Zhang Jin, Liu Feihua, Qiu Zhensheng, Dong Yiling

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

Abstract: Through the analysis on the requirements of RCC-M and RSE-M, the paper comprehensively describes the difference between the non-destructive examination in manufacturing and pre-service inspection. The technical improvement scheme is proposed in terms of the inspection extent, scanning direction, recordable condition and acceptance criteria, in order to solve the engineering problem of the different inspection results caused by different technologies used in manufacturing examination and pre-service inspection.

Key words: CPR1000, Reactor pressure vessel, Non-destructive examination in manufacturing, Pre-service inspection, Difference

0 前言

设备制造和安装阶段的无损检验的目的是对设备产品进行验收，从而保证设备产品质量满足规范和设计要求。而役前检查（PSI）是指核电设备服役前的全面检查，至少应包括全面在役检查的检验项目。PSI 目的是提供后续在役检查参考点或者“零点”，即提供设备运行前初始状态下的数据，检查结果作为后续在役检查的比较依据，不同于设备制造和安装阶段所执行的质量检验^[1]。

中国改进型三环路压水堆（CPR1000）项目反应堆压力容器（RPV）按 RCC-M 规范进行设计与建造，其 PSI 按 RSE-M 规范进行检查。由于

两规范适用阶段和检查目的不同等原因，规范要求自身存在一定的差异。此外，由于 PSI 采用与在役检查相同的检验设备、方法和技术，在检验方法和手段上也与制造阶段产品质量验收不同。因此，制造安装阶段无损检验结果与 PSI 阶段的检验评价结果不一致的工程问题时有发生。PSI 出现的每一例评价不合格或返修的事件，不仅受到核安全监管部门的重点关注，要求查找分析原因、做好经验反馈并采取有效措施避免类似问题的重复发生，而且还可能面临缺陷现场返修和重新水压试验的困境。上述工作均需要付出大量的人力、物力及延误工期的代价，严重影响工程项

目的质量、进度与成本。

文中通过分析 RCC-M 和 RSE-M 规范的无损检验要求，梳理出 CPR1000 项目 RPV 制造阶段无损检验和 PSI 的差异项，并就差异项开展分析研究，提出针对性的处理技术方案。

1 RPV 制造无损检验与 PSI 差异项分析方法

首先在 RCC-M 和 RSE-M 规范要求的基础上，通过全面梳理 CPR1000 项目 RPV 制造阶段无损检验和 PSI 的差异项要求，然后深入对比分析差异项的内容，并将其分为以下 3 类：

(1) 有差异、无影响。两者存在差异，但制造阶段的要求可覆盖 PSI 阶段要求，不影响 PSI 阶段的最终评价结果。

(2) 有差异、不具备可比性。两者存在差异，但由于制造阶段与 PSI 阶段的检验目的和关注点均不相同，检验方法或内容也不一致，从技术上考虑不具备可比性。

(3) 有差异、有影响。两者存在差异，且可能导致制造与 PSI 阶段检验评价结果不一致的情况出现。

文中主要是针对“有差异、有影响”的检验要求，因地制宜地制定合理可行的技术处理方案。本次 RPV 制造与 PSI 阶段检验要求差异项分析工作流程详见图 1。

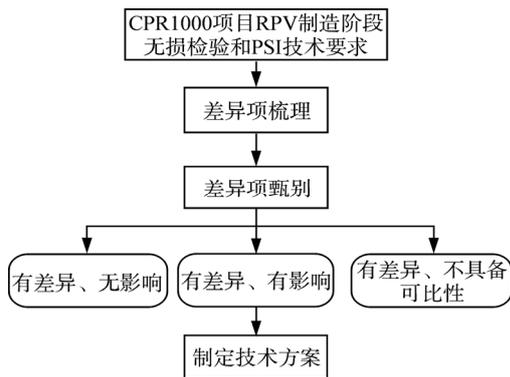


图 1 RPV 制造阶段无损检验与 PSI 差异项分析方法
Fig.1 Analysis Method for Difference of Non-Destructive Examination in Manufacturing and PSI for RPV

2 RPV 制造无损检验与 PSI 差异项分析内容

对于 CPR1000 项目 RPV 制造无损检验与 PSI 的差异项，主要为超声检验技术要求的差异。文

中从检验方式、扫查方向、检验范围、记录水平、显示尺寸测量和累计、检验灵敏度和验收/评价等方面，对 PRV 低合金钢对接焊缝或进出口接管与筒体焊缝在制造阶段和 PSI 技术要求进行深入分析研究。差异项分析内容见表 1。

3 RPV 制造无损检验与 PSI 差异项分析结果

通过分析和研究 CPR1000 项目制造无损检验与 PSI 的详细技术要求，可将差异项归纳为以下几点。

3.1 检验范围

制造与 PSI 阶段检验范围不一致。由于母材与焊缝的检验与验收的要求不同，PSI 阶段检验范围扩大后，有可能导致制造阶段按 RCC-M 母材验收标准验收合格，而在 PSI 阶段按焊缝验收标准评价不合格。

3.2 扫查方向

对于进、出口接管与筒体焊缝的超声检验，PSI 阶段与制造阶段对该焊缝的扫查方向不一致。RSE-M 要求从接管内壁进行轴向扫查，而 RCC-M 未明确要求该类型焊缝类型从接管内壁进行扫查，如图 2 所示。不同的扫查方向，有可能影响最终的检验结果的评价。

3.3 显示尺寸及累计

PSI 阶段使用的显示尺寸测量方法（“噪声法”）灵敏度要远高于制造阶段（“-6dB 法”）。噪声法是通过移动探头使缺陷回波衰减至材料背景噪声水平，从而测量出缺陷尺寸；而“-6dB 法”则是通过移动探头使缺陷最大回波衰减一半的测长方法^[2]。因此，对于同一个缺陷显示，“噪声

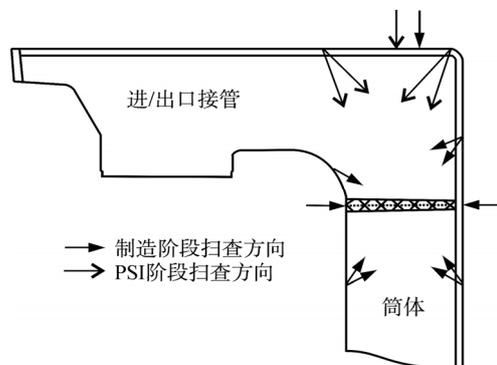


图 2 进、出口接管和筒体焊缝制造与 PSI 阶段扫查方向
Fig. 2 Scanning Direction between Manufacturing and PSI for Welding of Nozzle and Shell on RPV

表 1 CPR1000 项目 RPV 制造阶段超声检验与 PSI 差异项分析

Table 1 Analysis of Difference between Non-Destructive Examination in Manufacturing and PSI for CPR1000 RPV

对比项目	制造阶段 (RCC-M)	PSI (RSE-M)	分析
扫查方向	从 RPV 内、外表面共 14 个方向扫查	对于对接焊缝, 从 RPV 内表面 5 个方向进行扫查。特别地, 对于接管与筒体焊缝, 从 RPV 接管内部进行轴向扫查	差异项: 扫查方式要求不一致; 对比分析: 制造阶段具备更好的检验条件, 可以从双面双侧进行多方向扫查; PSI/ISI 阶段考虑辐射防护及人员操作原因, 通过自动设备从接管内表面扫查。由于 RCC-M 未明确要求该类型焊缝类型从接管内壁进行扫查, 扫查方向不一致, 可能会导致制造阶段验收合格的显示, 到 PSI 阶段评价超标
检验范围	焊缝及两侧至少各 10 mm 母材区域	焊缝及两侧至少各 50 mm 母材区域	差异项: 焊缝检验范围不一致; 对比分析: 由于母材与焊缝的检验与验收的要求不同, 检验范围不一致, 存在按母材验收标准验收合格的显示, 役前阶段按焊缝验收标准评价不合格的风险
记录水平	所有幅度大于或等于基准灵敏度 50% 的显示都应记录	所有幅度大于或等于基准灵敏度 25% 的显示都应记录	差异项: 记录水平要求不一致; 对比分析: PSI 阶段记录水平较制造阶段要求高, 其目的是尽可能多的记录当量波幅较低的显示, 以便跟踪比较显示的相对变化。虽不会影响最终验收结果, 但这类显示如按 RCC-M 规范要求参与累计, 将可能导致其它显示长度超标
显示尺寸测量	最大回波衰减 6dB 法	大于 50% DAC 显示应进行测长。通过采用 -6dB 法或相继 6dB 衰减法 (-12dB, -18dB) 确定显示图外形尺寸变化量与采用相同方法确定的声束尺寸的比较, 以判定缺陷尺寸是否发生显著变化	差异项: 显示尺寸测量方法要求不一致; 对比分析: RSE-M 规定的尺寸测量方法主要关注点是显示的相对变化尺寸, 可以采用灵敏度高于 -6dB 的测长方法。PSI 阶段如采用灵敏度高于 -6dB 法的显示尺寸测量方法, 其检查数据不能采用 RCC-M 规范焊缝验收标准对显示进行评价
显示累计规则	若符合下述 2 条件, 可将分散缺陷信号累计: 缺陷信号在扫查表面上投影相隔距离小于或等于最小缺陷信号显示长度的 6 倍或 20 mm (其中 1 个显示为点状); 缺陷信号在焊缝横截面上的投影相隔距离不大于 20 mm	未明确显示累计规则 (CPR1000 实际做法参照 RCC-M 执行)	差异项: PSI 阶段未明确规定显示累计规则; 对比分析: 鉴于以上制造与 PSI 阶段显示尺寸测量的分析, PSI 阶段测量的单个显示长度有可能大于制造阶段测量的长度。因此, 本来在制造阶段属于分散的缺陷显示, 由于 PSI 阶段单个显示长度评价较长, 满足累计规则成为同一个缺陷显示 (相距长度参与累计), 影响最终检验结果评价
检验灵敏度	焊缝采用 $\phi 2$ mm 长横孔制作 DAC; 其余母材区域的直射波检验采用 $\phi 3$ mm 和 $\phi 5$ mm 平底孔制作 DAC; 斜射波检验采用 $\phi 2$ mm 横孔制作 DAC	焊缝及两侧母材采用 $\phi 2$ mm 横孔制作 DAC	差异项: 人工反射体及基准灵敏度不一致; 对比分析: 不同的人工反射体设置的灵敏度不相同, 结合检验范围和验收评价标准的差异, 部分区域存在按母材验收标准验收合格的显示, 役前阶段按焊缝验收标准评价不合格的风险
验收/评价	焊缝及两侧各 10 mm 母材区域按 RCC-M S7714.4.1) 验收; 超出 25 mm 区域外按锻件采购技术要求	未明确 PSI 阶段评价验收标准 (CPR1000 实际做法参照制造阶段验收标准执行)	差异项: RSE-M 规范未明确规定 PSI 缺陷评价验收标准; 对比分析: 综合上述制造与 PSI 阶段检验范围、显示尺寸测量、累计规则和检验灵敏度的差异分析, 可能会导致制造阶段验收合格的显示, 到 PSI 阶段评价超标

注: DAC—距离幅度校正曲线

法”测量的显示尺寸要大于“-6dB”法测量的尺寸, 如图 3 所示。

此外, 对于相邻缺陷显示的累计评价, 其间距大小与显示本身的测量尺寸有直接关系。显示尺寸测量方法不一致, PSI 阶段测量的单个显示长度要大于制造阶段测量的长度。因此, PSI 阶段可能出现由于显示长度增加、间隙变小, 从而满足 RCC-M 累计规则, 导致累计长度超标的情

况, 如图 4 所示。另外, PSI 阶段较制造阶段记录了一些当量幅值较低的显示, 如满足累计规则, 将有可能导致累计显示长度超标。

3.4 记录水平

PSI 阶段超声检验记录水平要高于制造阶段的要求。PSI 阶段目的是为在役检查提供“零点”, 记录尽可能多的显示, 便于在役期间跟踪比较显示的相对变化, 因此, PSI 阶段对于所有幅度大

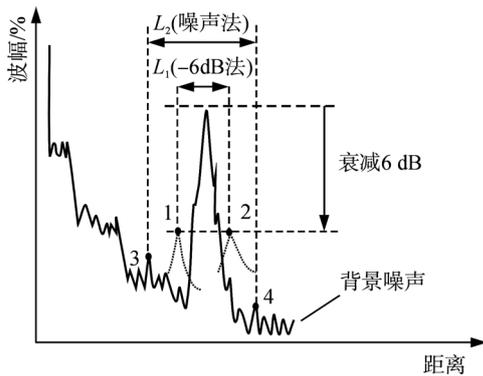


图3 -6dB法与噪声法缺陷显示测量尺寸差异

Fig. 3 Difference between -6dB 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

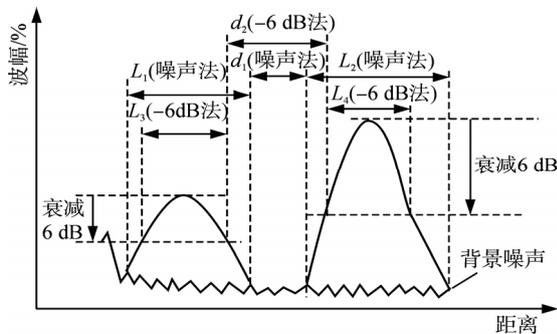


图4 “-6dB法”与“噪声法”对缺陷显示累计的影响

Fig. 4 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_3 、 L_4 —缺陷显示长度

于或等于基准灵敏度 25% 的显示都进行记录，而制造阶段仅对于所有幅度大于或等于基准灵敏度 50% 的显示进行记录。虽然不会影响最终验收评价结果，但这类记录性显示如按 RCC-M 规范要求参与累计，将可能导致累计显示长度超标。

3.5 验收/评价

RSE-M 规范并没有规定 PSI 阶段超声检验的评价标准，目前 CPR1000 项目 PSI 阶段均是按照制造阶段的焊缝验收标准^[3]对结果进行评价。但是考虑制造阶段超声检验与 PSI 阶段的差异，包括焊缝检验范围、扫查方向、显示评价和扫查灵敏度等因素，可能出现在制造阶段检验合格的显示，在 PSI 阶段却评价超标的情况。

4 技术改进方案

针对 CPR1000 项目 RPV 制造无损检验和 PSI

阶段的不一致问题，从技术角度提出了针对性的技术改进方案：

(1) 对于 RPV 低合金钢对接焊缝和进、出口接管与筒体焊缝，制造阶段扩大焊缝超声检验范围，即检验范围应包括焊缝金属和焊缝两侧至少 50 mm 的母材区域。

(2) 对于进、出口接管与筒体焊缝，制造阶段增加从进、出口接管内表面对焊缝进行扫查的要求。其中，包括采用直射波进行垂直扫查，以及采用斜射波沿接管轴向和周向分别进行相对 2 个方向的扫查。

(3) 对于容器低合金钢对接焊缝和进、出口接管与筒体焊缝，制造阶段优化焊缝超声检验记录水平，即任何一个波幅大于或等于 25% 基准反射波幅的显示均应进行记录。

(4) 对于反射波振幅大于或等于 25% 基准反射波振幅的显示，制造阶段均采用最大回波“-6dB 法”进行显示尺寸测量，且对于达到记录水平的显示，如满足 RCC-M MC 2638 的规定，均应进行累计。

(5) 对于容器低合金钢对接焊缝和进、出口接管与筒体焊缝，PSI 阶段超声检验若按照 RCC-M S 7714.4.1 的要求进行结果评价，则应配套使用最大回波“-6dB 法”对缺陷进行显示尺寸测量，以及按 RCC-M MC 2638 的规定进行缺陷累计。

5 结论

通过系统的规范对比、技术分析和可行性评估，对 RPV 制造阶段与 PSI 阶段的无损检验要求进行了全面的对比分析，并在合理可行的前提下，提出了技术改进方案。此方案从源头上尽可能规避了 PSI 阶段合格显示误判的风险，较好地解决了制造阶段与 PSI 阶段无损检验结果不一致的工程问题。

参考文献：

- [1] AFCEN. In-service Inspection Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands : RSE-M (1997 edition + 2000 add) [S].
- [2] AFNOR. Non-destructive testing- Ultrasonic examination -Part 5: Characterization and sizing of discontinuities :NF EN 583-5:2001 [S].
- [3] AFCEN. Design and Construction Rules for Mechanical Components of PWR Nuclear Islands : RCC-M (2000 edition + 2002 add) [S].

(责任编辑：马 蓉)