

EPR 机组在役一回路水压试验总结优化

Summary and Optimization of Primary Circuit Hydrostatic Test for EPR Units in Service

付悦 潘洪岩

Yue Fu Hongyan Pan

中广核核电运营有限公司 中国·广东 深圳 518124

China Nuclear Power Operations Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518124, China

摘要: 论文主要介绍欧洲先进压水堆 (EPR) 在役一回路水压试验相关技术要求, 并分析当前技术方案存在的不足并提出了建设性优化改进意见, 为后续 EPR 机组一回路水压试验提供了宝贵经验。

Abstract: This paper mainly introduces the relevant technical requirements for the in-service primary hydraulic test of European advanced pressurized water reactor (EPR), analyzes the shortcomings of the current technical scheme, and puts forward suggestions for constructive optimization and improvement, which provides valuable experience for the subsequent primary hydraulic test of EPR units.

关键词: EPR 机组; 一回路水压试验; 总结优化

Keywords: EPR unit; primary hydrostatic test ; summary optimization

DOI: 10.12346/peti.v5i1.7520

1 一回路水压试验项目概况

1.1 试验目的

EPR 机组在役一回路水压试验的目的是通过一回路系统在经受高于正常运行压力执行对一回路设备及焊缝的全面检查, 来验证一回路设备的性能是可靠的 (主要包括承压能力和边界密封性能)。确保一回路系统在本次试验结束到下次试验实施之前的这段时间里, 在正常运行和设计事故工况下是安全的, 同时满足核安全法规的要求。

1.2 试验周期

根据 RSE-M (压水堆核电厂核岛机械设备在役检查规则) 2010 规范的要求, 一回路水压试验周期定义: 两次试验间的间隔不应大于 10 年, 但是首次的一回路水压试验应在装料后的 30 个月内进行, 特殊情况的申请延期不能超过一年。

1.3 试验温度和压力

1.3.1 试验温度

一回路水压试验的试验温度由反应堆压力容器 (RPV) 下封头外壁的温度探头测得并确定。根据 RSE-M2010 B2231 章节要求, 一回路水压试验最低金属温度取下述温度中的最高值:

- ①第一次水压试验规定的温度 (役前);
- ②由辐照监督试验修正的反应堆压力容器 (RPV) 材料最高 RT_{NDT} (韧脆转变温度);

③试验压力为设计压力的 1.2 倍时, RPV 材料 RT_{NDT} 增加 12°C ;

④试验压力为设计压力的 1.33 倍时, RPV 材料 RT_{NDT} 增加 18°C ;

⑤ 60°C (满足结构最低安全温度)。

一回路水压试验期间为了防止试验回路中的金属温度过高而造成检查人员烫伤, 最高金属温度不要超过 100°C , 当金属温度超过 80°C 时, 检查人员必须采取防烫伤措施, 避免人员烫伤。

1.3.2 试验压力

根据 RSE-M 2010 B2000 中相关章节的规定, 试验压力应至少等于组成主一回路设备设计压力的 1.2 倍。以某 EPR 电厂一号机为例, RPV 设计压力为 175bar.g, 一回路水压试验压力为 RPV 设计压力的 1.2 倍, 即 210bar.g。

1.3.3 温度和压力限制条件

一回路水压试验期间升压和降压的最大梯度为: 4bar.g/min (一回路系统为单相水实体)。为避免升降温太快, 以免对设备、构件产生太大的热冲击, 一回路升降温速率要求见表 1, 其中 $-2^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 为主泵停运时一回路最大降温梯度^[1]。

1.4 泄漏率计算

EPR 机组在役一回路水压在分别在 24.5bar.g、109bar.g、154bar.g 试验压力下实施三次泄漏率计算, 根据这三次泄

【作者简介】付悦 (1991-), 男, 中国广东深圳人, 本科, 工程师, 从事水压试验研究。

漏率计算结果来评估一回路焊缝和试验回路的密封性。其中 24.5bar.g 平台泄漏率计算是在余热排出系统 (RIS-RHR) 没有与一回路隔离的情况下进行, 主要目的是在正式升压前评估一回路系统的密封性。109bar.g 平台泄漏率不是强制要求, 可视情况执行。154bar.g 平台泄漏率计算是 RSE-M 2010 规范强制要求的, 在得到监管当局现场见证同意后才能离开 154bar.g 平台。

各平台泄漏率计算限值如下: 24.5bar.g 平台总泄漏率应小于 70L/h; 109bar.g 平台总泄漏率应小于 100L/h; 154bar.g 平台: 一回路未收集到和不可量化的泄漏率必须低于 50L/h, 一回路总的泄漏率应该低于 230L/h, 一回路密封接头部位泄漏率低于 50L/h。

1.5 试验保护

一回路水压试验过程中所涉及的保护主要有两个方面。一方面是工作人员的保护, 另一方面是系统、设备的防超压保护。

1.5.1 人员保护

为了进行水压试验期间的焊缝检查, 一回路系统可拆卸的保温已经全部拆除。一回路系统上设备、构件的金属温度应尽量保持低于 80℃ 以避免工作人员意外烫伤。

1.5.2 防超压保护

在整个一回路水压试验期间, 稳压器安全阀处于有效隔离状态, 即稳压器安全阀不会起跳。防超压保护分以下三个

阶段:

①在 24.5bar.g 及 24.5bar.g 压力以下, 余热排出系统 (RIS-RHR) 处于投运状态, 一回路保护将通过余热排出系统 (RIS-RHR) 的安全阀来实现;

②在 24.5bar.g 和 165bar.g 之间, 超压保护系统发出报警保护信号和开启高压减压站 RCV1324VP 后的 RCV1325/1511VP 阀门动作来进行干预操作;

③在 165bar.g 和 210bar.g 试验压力之间, 超压保护由超压保护系统发出报警、停水压试验泵 RBS4220PO 和开启高压减压站 RCV1324VP 后的 RCV1325/1511VP 阀门动作等保护信号来实现。

2 一回路水压试验主隔离以及仪表隔离

2.1 水压试验主隔离

一回路水压试验期间, 很多阀门状态与正常运行期间不一致, 因此根据一回路水压试验阀门设置要求对边界阀门单独进行设置, 所以需要单独编制主隔离进行边界阀门设置, 主隔离清单见表 2。

2.2 仪表隔离

一回路水压试验最高压力超过了仪表的正常运行压力, 因此需要根据仪表功能, 分阶段对仪表进行隔离, 仪表隔离清单见表 3。

表 1 一回路升温速率

金属外壁温度梯度		稳压器压力	
		$P_{PZR} \leq 28.5\text{bar.g}$	$P_{PZR} > 28.5\text{bar.g}$
RPV 底封头金属温度 T_{RCS}	$T_{RCS} \leq 50^\circ\text{C}$	$-14^\circ\text{C/h} < dT/dt < 14^\circ\text{C/h}$	$-2^\circ\text{C/h} < dT/dt < 20^\circ\text{C/h}$
	$T_{RCS} > 50^\circ\text{C}$	$-20^\circ\text{C/h} < dT/dt < 20^\circ\text{C/h}$	$-2^\circ\text{C/h} < dT/dt < 20^\circ\text{C/h}$

表 2 一回路水压试验主隔离

编码	标题	主隔离目的
EHP RCP 001	各系统状态配置	一回路排气后实施与正常运行状态不同的设备、阀门与多余的一回路补水管线的隔离
EHP RCP 002	稳压器加热器隔离	水压试验压力和温度控制需要
EHP RCP 003	稳压器辅助喷淋管线状态设置	通过下泄管线引流对上充管线充压
EHP RCP 004	水压试验超压保护状态设置	防止水压试验超压保护执行机构意外动作
EHP RCP 005	安全注入系统 (RIS) 注入管线状态设置	余热排出系统 (RIS-RHR) 隔离后用于安全注入系统 (RIS) 的状态设置
EHP RCP 006	水压试验泵管线状态设置	水压试验泵在线至容控箱取水, 水压试验泵注入管线状态设置
EHP RCP 007	主泵隔离	压力高于 154bar.g 时禁止主泵启动

表 3 一回路水压试验仪表隔离

编码	标题	主隔离目的
EHP CAP 001	24.5bar.g 仪表隔离	隔离稳压器压力表、环路水位计、一回路压差测量试验仪表
EHP CAP 002	109bar.g 仪表隔离	轴封注入试验仪表, 下泄管线部分仪表
EHP CAP 003	154bar.g 仪表隔离	隔离安全注入系统 (RIS) 冷热段压力表、反应堆冷却剂系统 (RCP) 环路压差表、主泵 1 号轴封压差表
EHP CAP 004	165bar.g 仪表隔离	稳压器压力及液位仪表
EHP CAP 005	175bar.g 仪表隔离	隔离安全注入系统 (RIS) 热段宽量程压力表

3 试验过程介绍

一回路水压试验整个过程所涉及的压力平台分别是升压阶段的 24.5bar.g、109bar.g、154bar.g、165bar.g、175bar.g、RCV/RBS 泵切换平台、210bar.g 以及降压阶段的 RBS/RCV 泵切换平台、175bar.g、165bar.g、154bar.g、24.5bar.g。各平台主要工作见表 4。

4 EPR 机组一回路水压试验技术方案优化

EPR 机组在役一回路水压试验属于全球首次实施，很多技术方案无参考。与中国改进型三环路压水堆（CPR1000）机组的一回路水压试验技术方案相比，有很多技术方案优化值得参考借鉴。

4.1 超压保护方案优化

CPR1000 机组设置报警、停泵、开阀卸压三个执行动作，外接压力变送器 EHP001/002MP（定值保护），再加上系统的 RCP016MP/017LP（差值保护），结合使用实现保护功能。RCP016MP 为系统压力（正压侧）与静载压力计 RCP017LP（负压侧）的差值，差值保护就是通过 RCP016MP 的读数

来触发保护动作。其中 RCP017LP 具有人为误操作和设备漏油等不稳定性，可能会误触发跳泵信号，给机组带来瞬态冲击。考虑到 EPR 机组取消了静载压力计 RCP017LP 和 RCP016MP 类似设计，EPR 机组超压保护全部采取定值保护，为全集团在役一回路水压试验首次使用。

经过调研国内其他核电厂机组一回路水压试验超压保护实施情况，比较 CPR1000 机组和 EPR 机组超压保护方案如表 5 所示。经过对比分析，EPR 机组设计上无 RCP016MP 和 RCP017LP，不需要安排人员操作 RCP017LP，降低了 RCP017LP 故障或者误操作可能引发跳泵导致的水压试验设计瞬态次数消耗^[2]。

4.2 温度监视系统优化

CPR1000 机组原方案为选取性能试验数据采集系统（KME 系统）大修期间不用的测点名作为金属温度测点的输出终端，将连接至记录仪的线缆接至 KME 采集柜相应测点，通过专用电脑监视金属温度。EPR 机组无 KME 系统可用，金属温度远程监视很困难。项目组通过多方研究调研，确定了两种可行的技术方案。具体如下：

表 4 一回路水压试验各平台主要工作

试验平台	主要工作
升压阶段 24.5bar.g 平台	主泵再检定；泄漏率计算；一回路化学取样；一回路水压试验相关主隔离；仪表隔离；边界目视检查；投运超压保护装置；金属温度满足要求后停运 4 台主泵并隔离 RIS-RHR
升压阶段 109bar.g 平台	仪表隔离；边界目视检查；高压减压站 RCV1314VP 设置机械挡块
升压阶段 154bar.g 平台	泄漏率计算；边界目视检查；仪表隔离；一回路化学取样
升压阶段 165bar.g 平台	隔离上充管线，连接上充下泄短循环管线；仪表隔离；切换超压保护装置（闭锁低压保护）
升压阶段 175bar.g 平台	仪表隔离，声发射正式采样
升压阶段 RCV/RBS 切换平台	启动水压试验泵 RBS4220PO；生效水压试验泵相关保护
210bar.g 平台	边界目视检查；主泵法兰泄露检查；安全局现场见证
降压阶段 RCV/RBS 切换平台	取消水压试验泵相关保护；停运水压试验泵 RBS4220PO
降压阶段 175bar.g 平台	解除仪表隔离；停运声发射监测
降压阶段 165bar.g 平台	切换超压保护装置（生效低压保护）；隔离上充下泄短循环管线，投运上充管线；解除仪表隔离
降压阶段 154bar.g 平台	边界目视检查；取消高压减压站 RCV1314VP 30% 开启限制；解除仪表隔离
降压阶段 109bar.g 平台	解除仪表隔离
降压阶段 24.5bar.g 平台	连接 RIS-RHR；一回路化学取样；解除相关仪表隔离以及主隔离

表 5 EPR 机组与 CPR1000 机组超压保护方案对比表

压力	保护措施	CPR1000 机组原始方案超压保护逻辑 试验压力：206bar	EPR 机组台山核电厂 1 号机超压保护逻辑 试验压力：210bar
低压平台	报警	XU1： EHP002MP=168 bar	XU1： EHP002MP=172bar
	开阀	XU2： EHP002MP=172 bar	XU2： EHP002MP=175bar
高压平台	报警 1	XU3： RCP016MP=0 bar	XU3： EHP001MP=213bar
	报警 2	无	无
	停泵	XU4： RCP016MP=0.4 bar	XU4： EHP001MP=215bar
	开阀	XU5： EHP002MP=209 bar	XU5： EHP001MP=217bar

方案一：选取10个大修期间不需要使用的正式温度探头，将温度探头通过信号线连接到正式的温度测量通道，在电站计算机信息和控制系统（KIC系统）或者实时信息监控系统（KNS系统）中可以监视金属温度。

方案二：借用安全壳泄漏监测系统（EPP系统）专用通道，将温度探头通过线缆连接到EPP系统核岛内接头，通过专用电脑可在核岛外远程监视。

4.3 TCA（临时控制变更）方案

一回路水压试验温度压力和正常运行工况不同，如果不执行相关TCA，一回路水压试验期间会触发自动化保护动作并对机组状态产生不可控的严重影响。EPR机组仪控保护比CPR1000机组复杂，为了避免不需要触发的自动化动作触发，需要从上万个逻辑信号中梳理出影响试验的信号。由于冷态功能试验时很多保护未投运，因此冷态功能试验时的TCA方案也无法参考。

最终确定的TCA梳理原则为：①梳理出一回路边界内的所有执行机构（包括泵、阀门等），同时考虑到水压试验对金属温度的要求，需要避免核岛内风机自动启动，梳理出核岛内所有风机清单；②梳理所有执行机构（泵、阀门、风机等）的上游信号；③逐个信号进行分析，梳理出需要闭锁的信号清单。最终EPR机组一回路水压试验实施TCA超过了500条。

5 一回路水压试验策略优化建议

通过深度参与实施EPR机组某电厂一回路水压试验，总结一回路水压试验准备实施期间的经验反馈，发现当前一回路水压试验方案存在部分不足，提出了以下优化建议：

5.1 仪表隔离优化

EPR机组一回路水压试验仪表隔离原方案为分成5步进行隔离，通过分析109bar.g平台需要隔离的仪表功能，确定这些仪表在一回路升压阶段不需要使用，所以可以将这一部分仪表调整到24.5bar.g平台进行统一隔离，优化后可以减少一次仪表隔离操作。

154bar.g平台仪表隔离策略优化：正常154bar.g平台仪表隔离逻辑是泄漏率计算完成后进行仪表隔离，通过分析发现RIS系统、RCPI/4号主泵相关仪表泄漏率计算期间不需要使用，这些仪表可以在一回路压力到达154bar.g平台时就立即开始隔离，剩余仪表在泄漏率计算结束后隔离。由于泄漏率计算结束后的仪表隔离是关键路径工作，通过将部分仪表提前隔离，可以有效节省关键路径时间。

5.2 泄漏率计算优化

EPR机组某电厂一回路水压试验泄漏率计算期间，由于部分仪表精度问题，导致泄漏率计算出现负值，与实际

情况不符。

优化措施：对于由于仪表精度导致的泄漏率为负值的情况，在计算规程中加入关于相关参数仪表出现负值处理方法。

5.3 一回路加热策略优化

正常EPR机组一回路水压试验方案为将一回路水温加热到 $87 \pm 2^\circ\text{C}$ 来对一回路系统金属温度进行加热。考虑到一回路水温温度越大加热金属效率越高，所以可以通过提高一回路水温到 90°C 以上（考虑到人员安全，一回路水温不超过 100°C ），可以节省金属温度加热时间。

5.4 高压减压站RCV1314VP划线窗口优化

为避免一回路水压试验期间出现RCV1314VP全开导致一回路压力下降过快，因此需要将RCV1314VP机械挡块设置在30%开度，通过机械调整限制保证即使阀门异常开启最多也只能达到30%，不会100%全开，从而避免出现阀门异常全开造成的压力瞬态^[1]。初始方案是在一回路24.5bar.g平台期间，将RCV1314VP调节到30%开度然后进行划线操作，109bar.g将机械挡块设置到30%开度处。该方案的缺点是24.5bar.g平台将RCV1314VP调节到30%开度，操作比较复杂，一回路有一定超压风险。通过分析论证，考虑将RCV1314VP划线工作实施窗口调整到阀门再检定窗口，降低了操作风险。

5.5 上充流量调节阀脉冲调节

一回路水压试验时发现，EPR机组上充流量调节阀RCV6114VP开度从1%调节到2%时，上充流量增加很大，导致一回路压力升高速度较快，瞬时升压速率可能会超过4bar/min的设计要求。所以需要让RCV6114VP的调节更加精确，即每一个脉冲，阀门动作幅度更小。优化措施：通过实施临时控制变更（TCA）将RCV6114VP的调节脉冲调小，使阀门调节更加精确。

6 结语

论文通过总结EPR机组一回路水压试验过程以及要点，结合EPR机组一回路水压试验实施经验，提出了一些具体的建设性优化措施，可以有效降低风险提高效率，为后续EPR机组的一回路水压试验提供了宝贵的经验。

参考文献

- [1] FRAMATOME. Test sequence Procedure: TP ENS 21 - Cold Functional Tests[S].2018.
- [2] 瞬变统计:T-TP-I-X-NNN-206.A3版.2019.
- [3] AREVA NP.Specification for the Overpressure Protection Device for the Primary Hydrostatic Test[S].2015.