

EPR 机组在役二回路水压试验优化总结

言许梁 葛 飞 黄 会

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518124

摘 要: 本文介绍欧洲先进压水堆(简称:EPR)在役二回路水压试验相关技术方案,并对技术方案中存在不足提出了后续改进意见,为EPR机组在役二回路水压试验方案积累宝贵经验和改进方向。

关键词: 二回路水压试验;EPR机组;试验优化

引言: EPR机组在役二回路水压试验是验证二回路边界承压能力和密封性能重要手段,全球首台EPR机组在役二回路水压试验已成功实施,本文旨在总结试验实施的目的、关键参数、已实施的优化项以及后续再次实施可持续改进的优化空间,可为后续国内三代机组在役二回路水压试验提供可复制的实施经验。

1 二回路水压试验项目概况

1.1 试验目的

EPR机组二回路水压试验的目的是通过二回路在经受一个高于正常运行压力情况下对二回路边界和焊缝进行全面检查,以验证二回路边界系统和设备的承压能力和密封性能,确保一回路系统在本次试验结束到下次试验实施之前,在正常运行和设计事故工况下是安全的,满足核安全法规的要求。

1.2 项目周期

根据RSEM(压水堆核电厂核岛机械设备在役检查规则)2010版要求,二回路水压试验的实施周期定义:参考基准是相应蒸汽发生器最近一次水压试验的实施日期D0,连续两次定期水压试验的间隔应不超过10年,第一次定期水压试验在D0后的30个月内实施,特殊情况下延期不超过一年。

1.3 试验温度和压力

1.3.1 试验温度

根据RSEM2010 B2241章节要求,二回路水压试验温度以蒸汽发生器二次侧管板外壁温度探头测量确定。为保留预防脆性断裂的足够裕度,试验所用水温至少应等于如下值的最大值:

- 首次水压试验规定的水温;
- 构成二次侧材料的最高RTNDT(一般是管板的),加上30° C。

1.3.2 试验压力

根据RSEM2010 B2241章节要求,二回路水压试验压力等于蒸汽发生器最大允许压力的1.2倍;以某EPR电厂

一号机组为例,蒸汽发生器二次侧的设计压力为99bar.g,二回路水压试验压力为设计压力的1.2倍,即试验压力为118.8bar.g。

1.3.3 试验温度和压力限制条件

二回路水压试验期间的升降压最大梯度为:4bar.g/min(二回路系统为单相水实体)。为避免试验升降温速率太大,对系统设备造成过大的冷热冲击,二回路水压试验升温速率不得超过14°C/H,降温速率不得超过2°C/H。

1.4 泄漏率计算

EPR机组二回路水压试验泄漏率计算平台为3bar.g、76bar.g、99bar.g、118.8bar.g,一共实施4次泄漏率计算,其中3bar.g、76bar.g平台为低压平台的估算,主要目的为在设计压力平台、试验压力平台正式泄漏率计算之前,判断二回路系统泄漏情况,根据泄漏率计算结果及稳压情况判断回路是否存在大的泄漏,以便及时发现漏点并启动干预。根据RSEM2010 B2242章节要求,试验压力平台测得的泄漏率可接受标准如下:

- 单台设备试验总泄漏率:230 l/h;
- 两台设备组合的试验总泄漏率:每台230 l/h;

1.5 试验保护

EPR机组二回路水压试验超压保护主要人员保护和设备保护两个方面。

1.5.1 人员保护

二回路水压试验执行期间,需要在不同压力平台执行边界检查工作,为确保人员安全,主要采取以下措施:

- ① 在试验承压边界处均拉设试验边界隔离带,禁止无关人员入内;
- ② 非稳压平台(升降压阶段),禁止人员进入边界开展检查工作;
- ③ 边界检查人员在检查过程中必须站在边界及焊缝的侧面,禁止正对焊缝执行边界检查;

1.5.2 设备保护

二回路水压试验期间,设备保护采取压力定值保护

触发形式，在蒸汽发生器顶部安装压力变送器，在试验操作台设置保护触发压力定值，EPR机组二回路水压试验保护触发定值为122.8bar.g，试验操作台可实时采集蒸发器顶部压力变送器测量的试验实时压力，压力超过设定定值，将触发升压泵或者稳压泵停泵，达成超压保护的目的。

2 试验隔离

二回路水压试验为系统性的水压试验，主要涉及到VVP、ARE、ASG、VDA、APG等多个系统，承压边界至

少需要包含RSEM2010规范B1230章节定义的属于RSEM-1级的主二回路部件。对于边界回路上的一些仪表隔离阀，同样需要在试验升压前进行隔离，避免损坏仪表。

3 试验过程介绍

二回路水压试验整个过程涉及到的压力平台包括升压阶段：3bar.g、76bar.g、99bar.g、118.8bar.g，降压阶段：80bar.g平台、0bar.g。试验各平台的主要工作见表1。

表1：二回路水压试验各平台主要工作

试验平台	主要工作
0bar.g	二回路充水、化学加药、蒸发器顶部充水排气、蒸发器本体加热、仪表隔离、ARE液位计充水排气
升压阶段3bar.g	泄漏率计算、边界查漏
升压阶段76bar.g	VVP系统安全阀锁定、泄漏率计算、边界密封性检查
升压阶段99bar.g	泄漏率计算、边界密封性检查
升压阶段118.8bar.g	泄漏率计算、边界目视检查
降压阶段80bar.g	VVP系统安全阀解锁恢复
0bar.g	试验结束、ARE液位计充水排气、隔离解除、排水、先决条件恢复

4 EPR机组二回路水压试验技术方案优化

EPR机组在役二回路水压试验目前仅某电厂1号机组大修阶段实施过一次，为全球首次实施，不同于中国改进型三环路压水堆（CPR1000），有多次实施经验可参考。对比CPR1000机组，EPR机组二回路水压试验在很多技术方案上进行了进一步的优化，值得参考借鉴。

4.1 超压保护方案优化

CPR1000机组二回路水压试验超压保护通过安装机械式的安全阀来实现，安装前机械式安全阀需校验合格，一般安全阀起跳压力略高于试验压力，起跳压力值相对固定。且机械式的安全阀无法联动试验升压泵，如出现超压情况，需要操作人员手动停泵，对于升降压操盘人员的技能要求极高。而EPR机组二回路水压试验是通过在操作台实时采集蒸发器顶部压力变送器的实时压力，通过触发压力定值使试验升压泵跳泵。对比二代机的方案，超压保护作动压力范围选择更大更灵活，超压保护触发自动联动跳泵，无需靠人员反应执行操作，可第一时间稳定压力，降低人因操作失误风险。^[1]

4.2 试验压力平台优化

EPR机组二回路水压试验为系统水压试验，查询RSEM2010规范及上游来源程序，无强制在下行设计压力平台进行保压的要求，因此在试验方案中取消下行设计压力平台。对比CPR1000机组，仍保留下行设计压力平台及相关检查工作，实际上游程序及法规均无强制要求，试验平台相对简化。^[2]

4.3 进水打压TSD安装方案优化

进水打压TSD的作用是将二回路系统与外接试验设备相连接，作为对二回路系统边界充水及打压的入口，为试验最为重要的TSD工装。CPR1000/EPR机组二回路水压试验进水打压TSD安装在ASG系统上，CPR1000机组3台蒸发器的试验共需安装3个进水打压TSD。EPR机组有4台蒸发器，如参考CPR1000机组方案，则需安装4个进水打压TSD，每台蒸发器试验对应1个，这是其中可选择的一种方案。经过深入研究，EPR机组ASG系统存在公用管线，通过适当改变系统阀门在线状态即可实现1通4，且公用管线承压能力均能够满足试验需求，EPR机组正是采用此安装方案。相比CPR1000机组的方案，减少了TSD安装数量，节省人力成本，降低人因失误风险，更好的利用了三代核电机组的便利性。

4.4 VVP系统管线支吊架锁定方案优化

二回路水压试验与机组正常运行时的情况不同，机组正常运行期间，二回路系统管道的介质主要是水蒸气或者过热水，而二回路水压试验期间管道内介质是水实体，气体含量较少，相对运行期间管道负载更重。因此，CPR1000机组在二回路水压试验前需要对VVP系统边界内的管道支架进行锁定，防止因管道载重变化导致支吊架变形或者损坏，保障系统管道安全。经过研究及讨论，EPR机组VVP系统管道所涉及的支吊架数量相对CPR1000机组更少，查询设计文件，发现该支吊架在设计阶段已考虑了二回路水压试验的工况，无需额外进行支吊架锁定。

4.5 ASG系统水源压头不足方案优化

二回路水压试验用水源需要从ASG系统取水，但EPR

机组由于系统设计原因,单个ASG系统水源罐容积设计较小,约400m³左右,一共设计4个水源罐,ASG水源罐底部取水点位于-9米的厂房标高,试验设备存放0米标高,这意味着需要克服9米高度的负压头将水源引入设备泵组取水口,光靠水源的重力无法将水源压入设备取水口,此情况在二代CPR1000/M310机组是不存在的。因此,在设计试验方案之初,为克服压头不足难题,在-9米标高取水点处,单独增加一台格兰富的水源增压泵,额定流量约22.25m³/H,扬程约44米,通过过渡增压泵组,成功解决水源压头不足问题。

4.6 辅助管板加热装置电源取电方案优化

蒸发器二次侧管板金属温度是影响试验成败的关键参数,整个试验期间需要保证管板金属温度不低于30℃。为此研发了外接辅助管板加热装置,通过专用加热片通电实现对管板金属外壁的加热。以往二代CPR1000/M310机组辅助加热装置电源均从控制区外的试验联合打压装置上取电,需要从控制区外拉一根三项五线电缆至控制区反应堆厂房,整个路径约300米,耗时耗力。EPR机组首次实施前期,为优化电源取电方式,提前在控制区反应堆厂房内核实是否有满足负荷需求的电源开关,直接从厂房内部引入电源,节约300米电缆敷设工作。

5 EPR机组二回路水压试验策略优化建议

通过深度参与实施国内某电厂EPR机组二回路水压试验,总结了成功实施的经验,也发现试验方案存在可进一步优化的可能,总结后续优化建议如下:

5.1 初始水温提升优化

EPR机组二回路水压试验使用ASG系统水源,取自4列ASG大罐,由于系统设计原因,4列ASG大罐无自带系统加热功能,ASG系统初始水温约为22℃,而试验期间金属温度的加热和保温全靠水来承载。这意味着试验期间需要长时间通过蒸发器水压试验联合设备加热器对从取自ASG系统的低温水进行加热,严重影响试验整体加热及充水效率。因此,系统初始水温的高低直接影响试验的执行效率,解决此问题有效措施之一就是在临近试验前,提升ASG管系统水源初始水温。

提升ASG大罐初始水温可通过以下两条手段:

1、通过设计专用加热器,在临近蒸发器水压试验实施前对ASG系统大罐水提前进行加热,以提升初始水温。加热器设计功率可结合控制区内上游电源开关容量设计,建议不低于200KW,系统水源的加热目标水温控制在45~60℃之间。

2、通过系统ASG泵在试验临近前对ASG大罐打循环,通过摩擦产生热量提升初始水温,系统水源的加热目标水温控制在45~60℃之间。

5.2 蒸发器管板金属测温方式优化

EPR机组蒸发器一次侧管板金属温度是决定试验成败的关键参数,整个试验期间需要保持金属温度在30℃以上,当前管板金属温度测量方案为先在蒸发器一次侧水室安装高清视频摄像头,用以辅助监视升降杆安装,人员携带升降杆进入蒸发器一次侧房间,将升降杆安装在一次侧人孔下方,人员远程操作升降杆进行安装及温度测量。此项工作区域为辐射防护橙区,涉及外照射、内污染、表面污染等高风险,可通过优化测温方式,减少人员在高风险区域作业难度和作业时间。优化方案为开发视频监视与红外测温一体化装置,在水室安装摄像头的同时即可实现温度测量,无需额外安装升降杆进行测量,既能提高工作效率,也能降低人员工作风险和难度。

结束语

EPR机组在役二回路水压试验是验证二回路边界承压能力和密封性能重要手段,全球首台EPR机组在役二回路水压试验已成功实施,本文旨在总结试验实施的目的、关键参数、已实施的优化项以及后续再次实施可持续改进的优化空间,可为后续国内三代机组在役二回路水压试验提供可复制的实施经验。

参考文献

- [1]余维铭,邱小平,陈世记,等.EPR机组一回路水压试验压力控制策略探讨[J].核工程研究与设计,2023(02):45-51.
- [2]王庆,初起宝,房永刚,等.水压试验在承压设备安全评价中的作用与利弊分析[J].原子能科学技术,2024,58(8):1245-1252.