

EPR机组在役蒸汽发生器二次侧水压试验取水及加热方案设计与应用

黄会言 许梁 葛飞

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518124

摘要: EPR机组作为第三代压水堆核电机组的典型代表,蒸汽发生器是一、二回路热交换及安全屏障,其运行状态直接决定机组安全性与可用性。根据RSE-M2010规范要求,EPR机组在役阶段每10年内需开展一次蒸汽发生器二次侧水压试验,其中取水与加热是试验成功的关键环节。本文结合台山核电1号机组第三次大修实践,围绕试验核心要求,优化设计取水和方案、设计加热方案,并经现场验证检验方案可行性。结果表明,优化后的取水方案(以辅助给水系统ASGi110BA为水源,增设增压系统、优化充水流程)可满足试验取水需求;设计的加热方案(外接专用加热器水箱与管板辅助加热器结合)可将蒸汽发生器金属温度加热至试验要求,保障试验安全。两种方案可行性强、适配性好,可有效支撑EPR机组在役蒸汽发生器二次侧水压试验顺利开展,为同类机组相关试验提供技术参考。

关键词: EPR机组;蒸汽发生器;二次侧水压试验;取水方案;加热方案

引言: EPR(European Pressurized Reactor)核电机组是第三代压水堆核电机组的典型代表,具有功率大、安全性高、经济性优等特点。其蒸汽发生器核心功能是将一回路冷却剂热量传递至二次侧、产生饱和蒸汽,同时作为安全屏障防止放射性外泄,设备状态直接决定机组可用性与安全性。根据《法国压水堆核岛机械部件在役检查规则》^[1](RSE-M 2010规范)要求,EPR机组首次蒸汽发生器二次侧水压试验后,每10年内需开展一次在役试验,核心目的是评估主二回路的承压能力与密封性能,试验最高压力为118.8bar.g,试验边界主要涵盖RCP系统的蒸汽发生器二次侧,含(VVP、ARE、ASG、VDA等系统),此外还涉及根据试验实际需求拓展的其它系统。在役蒸汽发生器二次侧水压试验涵盖加热、充水排气、升降压、排水等多个环节,其中充水与金属加热直接影响试验效率、安全性及结果有效性。因此,开展针对性的方案设计与优化,解决关键技术难题,具有重要工程实践意义。

1 取水和加热技术要求

蒸发器二次侧水压试验验收标准如下:

(1)二回路总泄漏率不超过230L/h;(2)最高压力平台保压期间,蒸汽发生器不得出现任何永久变形;(3)不出现除整个回路水压试验技术规范以外的可解释的泄漏外的其它任何泄漏;(4)最高压力平台保压时间不少于1小时;(5)试验全过程中,蒸发器管板试验温度需控制在试验最低金属温度及以上。

试验水质需符合核电站化学与放射化学技术规范,充水前需化验合格;水量需满足4台蒸汽发生器

(单台蒸汽发生器容积约250m³,相关管道约50m³),另预留200m³备用水,4台蒸汽发生器需预备总量不低于1400m³;取水需避免干扰在役系统。

蒸汽发生器二次侧试验温度(金属壁温)需控制在合适范围,其中温度下限主要应等于如下值的最大值:一是首次蒸汽发生器二次侧水压试验规定的水温,二是构成蒸汽发生器二次侧材料的最高脆性转变温度加上30℃,又要避免金属温度过高,避免现场检查人员烫伤^[2];优先利用机组自有设备加热,其次采用外接系统,设备需符合核电厂防爆防触电要求;设置温度保护、过载保护等措施。

2 取水方案设计与优化

2.1 取水方案分析

结合EPR机组特点,制定2种取水方案,从水量、便捷性、经济性、适配性等核心维度进行全面对比分析。

方案1:二回路除盐水系统取水。该方案依托机组现有二回路除盐水系统,无需额外投入大量设备,经济性优势显著。但机组停运期间,二回路除盐水系统供水量存在局限性,难以满足试验所需总水量要求;同时,该水源与机组在役期间蒸汽发生器补水系统不一致,存在水质不符合核电站化学技术规范的风险;此外,系统取水管径较小,导致取水效率偏低、耗时较长,难以匹配大修工期要求,整体适配性较差。

方案2:辅助给水系统ASGi110BA取水。该方案供水量充足,EPR机组共配置4个ASGi110BA水箱,容积分别为385m³、436m³、436m³、385m³,总容积可充分满足试验总水量需求,下游取水较大,取水效率较高;且取水水源与机组运行期间蒸汽发生器补水系统一致,水质

控制稳定可靠。但该取水点位于-9m标高,存在取水压头不足的问题,需额外配备增压泵,导致设备投入相对增加,经济性一般。

综合水量、便捷性、经济性、适配性等各维度因素考量,方案2虽存在取水压头不足的短板,但该问题可通过增设增压装置有效解决;同时,该方案具备供水量充足、取水效率较高、水质达标等核心优势,更适配EPR机组在役工况,因此选取该方案作为基础方案,开展后续优化设计工作。

2.2 取水方案优化设计

针对压头不足问题,增设1用1备的防爆增压泵,安装于取水管道入口,配备止回阀。增压系统后外接临时水箱,下游接入离心充水泵往蒸汽发生器充水。优化取水流程:取水前利用ASGi110BA下游管道互通可公用同一接口特性,现场取水短管临时拆卸数量可由拆除4个短管优化为1个。短管拆卸后,在原短管位置靠近水源侧接入法兰临时取水组件,组件下游接入取水管道及增压泵、临时水箱、离心充水泵。试验前确认ASGi110BA水位满足需求,启动增压泵将水从ASGi110BA经临时取水组件取至临时水箱,同步控制增压泵与离心充水泵出口流量,保持水箱液位均衡。

ASG水源增压泵参数:适用介质为水(水质纯净、电离子浓度低、低电导率 $\leq 80\mu\text{S}/\text{cm}$,水温 $0\sim 90^\circ\text{C}$)。ASG水源增压泵参数为:流量 $95\text{m}^3/\text{h}$,扬程 18m ,功率 7.5KW ,该增压泵为单独使用,进出口为DN80板把式快插,移动式底座。

2.3 取水方案应用情况

通过台山核电1号机组第三次大修现场对优化后的取水方案进行可行性验证,现场验证结果表明,优化后的取水路径优,仅通过1处取水组件即可实现由4个ASGi110BA向4台蒸汽发生器供水,取水速率可稳定在 $13\sim 20\text{m}^3/\text{h}$,满足试验取水速率要求;取水期间增压系统运行稳定,未出现故障。验证结果表明,优化后的取水方案适配EPR机组在役工况,满足试验核心要求,可行性强。

3 加热方案设计

3.1 加热方案制定与分析

蒸汽发生器金属加热可以考虑采用提高水源温度、外接加热系统方式进行局部加热进行,制定和分析4种方案如下。

对比四种加热方案:方案1(系统泵对ASGi110BA循环加热)需改造管线,周期长、成本高;方案2(在ASGi110BA内部外接加热棒)安全风险高,存在异物隐患;方案3(从ASGi110BA取水至外接专用加热器水箱加

热)成本低,仅加热效率受功率影响;方案4(在蒸汽发生器二次侧管板区域使用管板辅助加热器)可提前加热关键部位,但加热范围有限。综合选取方案3与方案4结合的方式,同步在蒸汽发生器关键部位安装温度探头,实时监测金属温度。

方案名称	实施方式	优点	缺点
方案1(系统泵循环加热)	系统泵 ASGi220PO 循环加热,需改造管线使泵流量达 $80\text{t}/\text{h}$	一次投入解决机组寿命内加热问题	管线改造,周期长、预算高
方案2(内部外接加热棒)	外接加热棒放入 ASGi110BA 底部加热水源	单次制造成本低	安全质量风险高,存在异物隐患
方案3(外接专用加热器水箱)	取水加热至 $55\sim 90^\circ\text{C}$ 后充入蒸汽发生器二次侧	单次制造成本低,仅需制造专用水箱	加热功率影响效率,管板加热时间长
方案4(管板辅助加热)	管板区域贴加热片,试验前 24h 以上预热	提前加热最困难的管板部位	加热范围有限,无法整体加热

3.2 加热方案设计

3.2.1 加热设备配置

1) 专用加热器水箱整体功能设计:罐体采用不锈钢材质,外表包覆保温层,设计有进水、出水、排污及排气接口,可实现ASGi110BA介质水承接、离心充水泵供水、水箱排污及排气等功能。该水箱具备液位、温度、电压、电流实时测量功能,加热功率可通过PLC自动调节或温控仪手动调节,同时可通过软件界面实现设备运行状态监视、故障报警查看及远程控制。电加热器配置4组,单组功率 150KW ,总功率 600KW 。

2) 管板辅助加热器整体功能设计:硬件设备主要由带磁吸功能及内置测温功能的加热片、视频监控摄像头、就地控制柜、交换机、笔记本工作站、网线及供电线缆等组成。供电线缆从电箱取电后接入就地控制柜,控制柜预留14路加热片取电接口,加热片通过磁吸方式贴合于蒸汽发生器管板外壁后,从对应取电接口取电。通过交换机及网线将加热片的运行信号、数据传输至笔记本工作站,工作站可实现加热片温度、电流的实时监控、数据记录及参数调节。

3.2.2 加热流程设计

1) 在蒸汽发生器二次侧水压试验前,提前24小时启动蒸汽发生器管板辅助加热器,对蒸汽发生器二次侧管板外壁进行持续加热,确保管板温度逐步提升至合理范围。

2) 从辅助给水系统ASGi110BA取水(同步启动增压泵),将水源输送至专用加热水箱;设定加热温度不超

过90℃，启动专用加热水箱内部4组加热器（总功率共计600KW），对水源进行加热，同时启动离心充水泵，向蒸汽发生器二次侧持续充水。

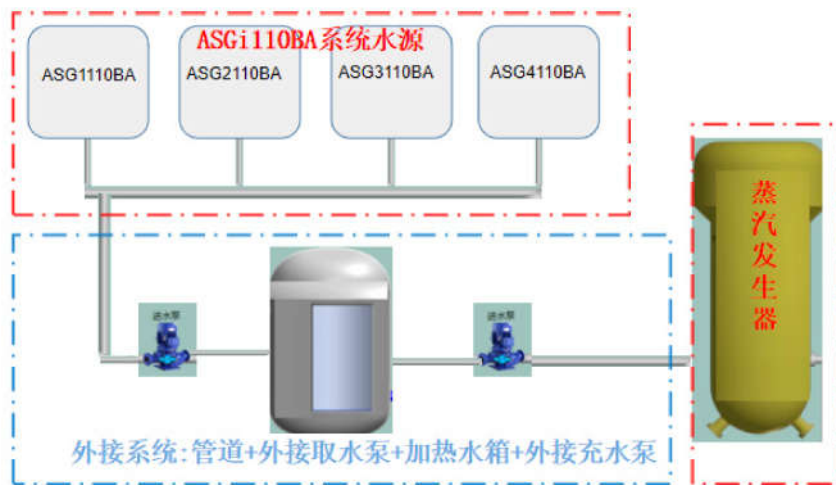
3) 操作流量控制阀，精准调节ASGi110BA取水流量与向蒸汽发生器二次侧充水流量，维持专用加热水箱液位平稳；全程监视水箱液位，防止加热器干烧或水箱满水溢流，同步监测专用加热水箱内水源温度，确保水温控制在55℃以上，保障金属加热效果。

4) 持续开展加热作业，直至蒸汽发生器一次侧冷侧

水室、一次侧热侧水室、二次侧手孔、眼孔附近及二次侧人孔附近的温度探头，均达到43℃（台山核电1号机组第三次大修金属温度下限为30℃）。

5) 待蒸汽发生器金属温度到达在43℃以上时，完成整个系统加热作业，停止从ASGi110BA取水及向蒸汽发生器二次侧充水，关停专用加热水箱加热器及蒸汽发生器管板辅助加热器。

系统加热流程见图如下：



3.3 加热方案现场应用情况

台山核电1号机组第三次大修现场验证情况：投运蒸汽发生器管板辅助加热器24H，蒸汽发生器管板金属温度可加热至43℃以上，ASGi110BA初始水温约25℃，取水至专用加热器水箱，启动加热元件（600KW）加热，可在水箱进出流量15m³/h情况下，将22℃水温加热至55℃左右，可顺利将蒸汽发生器二次侧手眼孔及人孔附近金属加热至43℃以上。该加热方案加热效果达标，满足大修工期要求，具备良好的可行性与可靠性。

结束语

本文围绕EPR机组在役蒸汽发生器二次侧水压试验取水及加热方案展开设计，并在台山大修中进行实践，得出以下结论：一是优化后的ASGi110BA取水方案，可适配在役蒸汽发生器二次侧水压试验工况，满足取水速率及水量要求；二是专用加热器水箱与管板辅助加热器结

合的加热方案，加热效果符合试验要求。

后续可结合更多大修实践，进一步优化取水与加热系统工艺，提升方案通用性与经济性；探索智能化控制技术应用，实现参数自动调节与异常预警，提升试验取水和加热装置的自动化水平。同时，可结合数字化孪生技术构建试验模拟模型，提前预判取水增压、加热过程中的参数偏差，最终为同类第三代压水堆机组在役水压试验提供更全面、更可靠的技术参考。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 吴雷, 李夏书, 代巍巍, 王新刚, 毛海谊, 李文越, 万川. 蒸汽发生器二次侧水压试验管板加热研究及应用[J]. 压力容器, 2021, 38(3): 73-79