

华龙一号机组一回路水压试验

潘洪岩

中广核核电运营有限公司

DOI:10.12238/pe.v2i4.8388

[摘要] 本文介绍了华龙一号机组在役期间一回路水压试验的技术要点,包括验收标准、边界设置、泄漏率计算原理与公式、分类、计算过程,试验过程。华龙一号是具有完全自主知识产权的三代压水堆核电,水压试验是核电机组维修的重要试验,用于验证机组寿期内的承压能力和密封性能,本文对试验的局限性进行了剖析。

[关键词] 华龙一号; 一回路水压试验; 泄漏率

中图分类号: TG315.4+5 **文献标识码:** A

Primary circuit hydraulic test of Hualong 1 unit

Hongyan Pan

CGN Nuclear Power Operation Co., LTD

[Abstract] This paper introduces the technical points of the primary hydraulic test during the service of Hualong 1 unit, including acceptance criteria, boundary setting, calculation principle and formula of leakage rate, classification, calculation process and test process. Hualong 1 is a third-generation pressurized water reactor nuclear power plant with fully independent intellectual property rights. Hydrostatic test is an important test for the maintenance of nuclear power units, which is used to verify the pressure bearing capacity and sealing performance of the life of the unit. This paper analyzes the limitations of the test and summarizes and improves the optimization direction of the test.

[Key words] Hualong 1; hydraulic test of primary circuit; leak rate

引言

华龙一号一回路水压试验是华龙一号机组在役阶段的重要试验项目,其目的是通过一回路系统在经受高于正常运行压力,即法规要求的试验压力,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,是满足核安全法规的。

本文对华龙一号机组在役阶段一回路水压试验验收标准、边界设置、泄漏率计算原理与公式、分类、计算过程,并对试验过程中出现过的问题进行了探讨与分析,提出了试验的优化方向。

1 核电水压试验

核电站的水压试验大体分为容器水压试验和系统水压试验,容器水压试验是指针对某个容器或设备,单独连接增压泵将试验用水直接压入试验设备。系统水压试验代表就是一回路水压试验,原理如图-1所示,无需连接单独的增压设备,依靠系统本身设计自有的泵进行升压,维持压力的也不是一个静止系统,是

存在出水和进水的,通过恒流量柱塞泵向一回路注水,调节高压减压阀的流量控制出水量实现压力调整,压力的稳定也是一个动态平衡的过程。

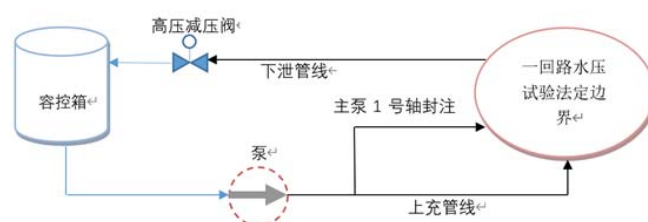


图-1 一回路水压试验示意图

2 试验边界设置

根据RSE-M规范^[1]要求,试验边界必须包含:

反应堆压力容器及其顶盖封头、所有管嘴与接头,包括控制棒驱动机构耐压壳;

一回路主管道,即1—2—3环路的冷段、U形管段和热段;

SG的一次侧;

主泵的泵壳;

稳压器及其波动管线;

PZR安全阀管线;

内径大于25mm的辅助管道及相关的阀门和附件: RIS安注管线、RCV上充下泄管线、PZR的喷淋管线, 直到第二个隔离机构的管线;

内径小于25mm的辅助系统及相关的阀门和附件直到第一个隔离机构的管线。

3 泄漏率计算

一回路水压试验期间将实施两次泄漏率计算, 分别在24.5bar.g和154bar.g试验压力平台下进行, 其中154bar.g压力平台下进行的计算是法规强制要求的。两次泄漏率计算的结果是用来评估构成水压试验回路的一回路焊缝和试验回路密封性是否满足试验要求。

第一次计算: 此次计算是在24.5bar.g压力平台下, 试验回路排气结束后, RIS-RHR系统还没有与主系统隔离的情况下进行的。它的作用是在升压至154bar.g前评估一回路系统的密封性。如果水压试验回路的密封性未满足要求(建议泄漏率小于70L/H), 应考虑将压力降到3bar.g以进行法兰连接的重新紧固和可能的边界阀门检修。

第二次计算: 是在154bar.g压力平台下进行的。该次泄漏计算是规范要求的, 当泄漏率出现下列情况中的任意一个, 需要找到原因后再决定是否继续升压:

- (1) 总泄漏率大于230L/H;
- (2) 未能收集/定位的泄漏率大于50L/H;
- (3) SG管束泄漏率大于44L/H;
- (4) 密封接头泄漏率大于50L/H。

泄漏率计算主要是测量在泄漏率计算开始时刻和泄漏率计算结束时刻RCV容控箱及其它与一回路相连的容器的水位变化, 进行泄漏率计算。

总泄漏率

一回路法定边界总泄漏率, 是通过容控箱液位变化得出容控箱体积变化率加上主泵轴封补水箱体积变化率减去一回路法定边界外的泄漏率。

一回路流体压力、温度的变化导致流体的体积变化

由于一回路流体压力、温度的变化引起流体的体积膨胀或收缩而导致的RCV容控箱的水位变化, 这里引入水压试验的加权平均温度, 因为一回路的主要储水结构为: 环路管道、主设备, 在明确一回路总容量的情况下, 以体积占比作为权重因子结合各个环路和主备的检测仪表即可算出一回路的平均温度。

加权平均温度公式如下($T(6210MT)/T(6112MT)$ 代表稳压器气液相的温度):

$$\theta = \frac{V_{PZR}}{V_{RCP}} \times \frac{1}{2} [T(6210MT) + T(6112MT)] + \frac{V_{\text{环路}}}{V_{RCP}} \times \frac{1}{6} [T_{CLi} + T_{HLi}]$$

计算过程:

初态设置好之后我们默认一回路系统只和容控箱存在水交

换, 如果容控箱本身有补硼和补水操作, 要做定量的记录收集; 在不考虑一回路密度变化的情况下, 一回路全程水实体, 泄漏率计算过程中, 容控箱的减少量为总的一回路泄漏量; 计算一回路的密度变化, 水在不同压力和温度下的密度不同, 但是泄漏率计算是在固定压力下实施, 温度升高代表一回路水体积需要膨胀, 在水实体的情况下, 一回路相当于需要返还一部分水到容控箱, 也就是说如果一回路完全无泄漏升温会导致容控箱水位升高, 那么应该升到的水位减去现有的水位就是总的泄漏。反向同理温度降低, 水的密度变大, 容控箱需要为一回路补充一部分水用来填“补空缺”, 一回路完全不漏的情况下容控箱水位也需要下降, 总的泄漏需要将这部分减掉, 因为没有从一回路泄漏出去。为方便计算我们可以把这部分按照绝对值运算, 升温就加上, 降温就减掉^[2]。上面计算总泄漏率, 前文我们介绍了验收标准中要求不可鉴别的泄漏率不能超过50L/h, 不可鉴别的泄漏率是利用总泄漏率减去法定边界上收集到的定量泄漏从而得到的。

泄漏率计算是很理想的情况下, 实际过程中总会存在很多泄漏点, 这些漏点可能是法定边界上的, 也可能是其他辅助设备管道上的, 需要对这些漏点做定量, 法定边界上的仍然算在总泄漏率中, 但是要将这部分作为可鉴别泄漏, 非法定边界上的泄漏要直接从总泄漏率中减掉。最终形成了下面这个基本公式^[3]:

$$Q_t = (A+B+C) - (E+P1) \pm |D|$$

Q_t : 总给漏率;

A: 容控箱的体积变化率

B: 容控箱补水变化率

C: 容控箱补硼变化率

E: 非法定边界的外漏定量收集的泄漏率

P1: 非法定边界的内漏定量收集的泄漏率

D: 水密度变化产生的体积变化率

4 试验过程

试验分为7个平台, 实际必须存在的为4个, 分别是上升阶段的24.5bar.g、154bar.g、206bar.g以及下降阶段的154bar.g, 下面重点介绍以下几个平台的工作和作用。

24.5bar.g平台是试验初始平台, 正式试验从主泵启动作为起始点, 主泵启动的目的是将水温上升至一个足够的高度, 从而让回路上的主设备, 尤其特指反应堆压力容器的金属外壁温度升高从而保证试验期间不会低于温度下限。这里的温度下限考虑两个方面, 60℃和RTNDT, 60℃是考虑结构安全所采用的最低温度。在根据由辐照引起的变化所修正的反应堆压力容器材料(筒体和焊缝)最大的RTNDT值上增加12℃, 水压试验温度压力曲线的要求, 在役期间水压试验试验压力为206bar.g是设计压力的1.2倍, 根据曲线对应可以得到, 试验金属壁温要超过RTNDT以上12℃, RTNDT的数值确定通过辐照监督试验测得。水温达到足够高度不会让材料金属直接达到试验需求, 需要在最高温度保持10h左右, 温度保持类似稳压的过程, 也是一个动态平衡。主泵运行会产生很大的热量, 里面主要是能量的转化, 机械能转变为内能提升水温, 而系统本身在三个环路各有一路冷源, 一回路

的水温就在一边加热一边冷却的过程中实现稳定。

154bar.g为核电站回路系统的运行压力,在此平台执行正式泄漏率计算,用于评估试验回路的密封性能。

206bar.g为试验压力平台,升压至206bar.g前,一般在190bar.g时我们需要对试验用泵进行切换,需要将上充泵切换为水压试验泵。切换到原因是在一回路在24.5bar.g升至190bar.g前上充泵能够一直提供足够大的流量,能够实现快速升压的操作,但是试验泵因为本身为恒流量泵且流量仅为10t/h,无法在动态平衡的试验过程中实现快速的升降压操作,试验时间过长会导致主设备的金属温度冷却过大,有超下限的风险。所以在上充泵增压接近极限的情况下进行泵切换。完成切换后通过控制高压减压阀缓慢调节升压压力至206bar.g并稳定。压力稳定后执行相关检查,确认检查结果后进行降压。

降压平台的154bar.g为法规要求的检查平台,对法定边界的所有设备进行外观目视检查,判断设备的承压能力,检查工作完成进行降压,在降至24.5bar.g后进行恢复工作,同时试验结束。

其他平台停留的目的是在升压过程中,机组存在很多的保护和逻辑。触发这些逻辑可能会导致类似停泵、报警、阀门动作等信号,所以需要在逻辑信号触发前在一个合适的平台对这些信号进行逻辑上的取消。

5 试验的局限性

5.1 应力水平差异

由于承压设备的材料和尺寸存在差异,导致在同一水压试验的压力下,各部件的应力水平不尽相同。因此各部件能够暴露出的缺陷程度也会因此存在差异,使得某些元件的缺陷可能无法被充分暴露。

5.2 水质问题

水压试验使用的水往往没有经过净化,试验结束后锅炉内表面附着的水容易导致设备的锈蚀。这不仅影响了设备的使用寿命,还可能对设备的安全运行构成潜在威胁。

5.3 操作和维护要求

尽管水压试验操作原理相对简单,但是结合核电厂的机组机构和回路设计,导致实际试验过程中需要进行大量的试验边

界检查,设备状态调整,设备切换,信号强制等操作,任意一个环节失效不仅会导致试验失败,而且面临着超出温度压力控制范围等瞬态,对机组安全造成极大的威胁。另外因为部分设备本身不是参与机组正常运行,仅在水压试验期间作为试验设备,此类设备需要进行定期维护和再鉴定试验进行状态验证,此类基本都是核级的重要设备,维护和保养的成本都很高。

5.4 高温-RTNDT

长期运行的机组,尤其是在寿期末端RTNDT升高到60℃以上,这时如何保障试验期间的反应堆压力容器金属外壁在试验期间一直处于RTNDT加12℃以上的状态就成为试验一大难点。单纯的增加环路内的水温可以给金属外壁一个较高的初始温度,但是散热的机理是温度差,金属外壁60℃向周围环境的散热速率和金属外壁80℃向周围环境的散热速率显示不同,近似理解为温降速率正比于散热温差,试验期间环境温度约为25℃,所以机组寿期末段进行水压试验,无热源后的温降速率约为初期的1.5倍,也就代表了在试验高压阶段的时间要非常迅速。 $h \cdot A \cdot \Delta T$

h : 传热系数;

A : 散热体的有效散热面积;

ΔT : 设备和环境的温差

6 小结

综上所述,一回路水压试验虽然是成熟的检测方法,但也存在一定的局限性。在华龙一号机组实际应用中,应根据实际情况结合机组设计特点及时修改试验的方案,增加其他的检测手段辅助判断机组承压能力和密封性。

[参考文献]

[1]法国压水堆核电厂核岛机械设备在役检查规则:RSE-M[S].FRANCE:AFCEN,2010(B).

[2]郝文涛,李卫华,杨星团,等.基于IAPWS-IF97的自然循环差压测量修正技术[J].原子能科学技术,2012,(42):765-766.

[3]程钢,陆自立,刘伯欢,等.一回路水压试验泄漏率计算优化分析和不确定度研究[D].大亚湾核电,2017.

作者简介:

潘洪岩(1991--),男,汉族,黑龙江省哈尔滨市人,大学本科,工程师,中广核核电运营有限公司,研究方向:核电站水压试验。