

# 压水堆核电站 ELPO 运行期间一回路氢含量的控制

丁瑞荣 彭元凯

大亚湾核电管理有限责任公司

DOI:10.12238/pe.v2i6.10452

**[摘要]** 由于压水堆核电站的特殊性,一回路内始终保持氢气覆盖,其浓度需控制在一定的要求范围内,以保证有一个足够的还原环境。在长期低功率运行(ELPO)运行期间,机组需要进行大量的稀释硼化等操作,会导致一回路的氢浓度大幅变化,需要额外的操作来控制 and 保证氢浓度满足核电厂技术规格书和化学技术规范的要求。文章介绍了ELPO期间氢含量变化趋势和控制方法,为其它核电厂类似工作提供了一定的参考。

**[关键词]** 一回路; 长期低功率运行; ELPO; 氢含量

中图分类号: TM623 文献标识码: A

Control of hydrogen content in the primary circuit of pressurized water reactor nuclear power plants during ELPO operation

Ruirong Ding Yuankai Peng

Daya Bay Nuclear Power Management Co., LTD.

**[Abstract]** Due to the special nature of PWR nuclear power, hydrogen is always covered in the primary circuit, and its concentration should be controlled within a certain range to ensure an adequate reduction environment. During long-term low power operation (ELPO), the unit needs a lot of dilution boration and other operations, which will lead to a large change in the hydrogen concentration of the primary circuit, and additional operations are required to control and ensure that the hydrogen concentration meets the requirements of the technical specifications and chemical technical specifications of the nuclear power plant. This paper introduces the variation trend and control method of hydrogen content during ELPO, which provides some reference for similar work in other nuclear power plants.

**[Key words]** primary circuit; Long-term low power operation: ELPO; Hydrogen content

## 引言

根据压水堆核电站运行规程对长期低功率运行(ELPO)定义,ELPO运行是在所有功率补偿棒组全部提出的条件下,反应堆在较低的功率( $<97\%FP$ )运行一段较长的时间( $>12$ 小时)<sup>[1]</sup>。电网日负荷存在很大的谷峰特点,季节性负荷也存在着较大变化,特别是电网大幅的调峰或潮流优化就需要有大量的机组参与升降负荷,随着大型压水堆核电机组逐渐成为电网的主力机组,电网对核电机组的调峰要求也在逐渐增加,核电机组日常和节假日期间调峰降功率运行将成为常态,长期低功率运行(ELPO)是核电站目前应对电网调峰的成熟做法。

## 1 功率运行时氢含量控制及影响因素

氢气是一种还原气体,在反应堆冷却剂系统中添加氢气的目的是为了抑制水的辐照分解产生氧化剂,同时氢也可以与水中的氧基结合,从而去除水中的氧。功率运行期间,一回路内始终保持氢气覆盖,以保证有一个足够的还原环境。功率运

行期间需要对反应堆冷却剂系统中的氢持续进行监测,某核电站功率运行期间反应堆冷却剂的氢浓度必须 $\geq 20\text{ml/kg}$ 且 $< 50\text{ml/kg}$ <sup>[2]</sup>,一回路氢含量的维持主要依靠容控箱内连续覆盖有 $0.5\sim 2.5\text{bar.g}$ 的氢气来实现的。机组上一回路氢含量实际控制按照 $30\sim 35\text{ml/kg}$ (STP)来控制,氢浓度规定的低限值限制水的辐射分解,避免一回路设备产生较大的腐蚀,从而导致一回路边界的完整性被破坏;氢浓度规定的高限值是防止燃料包壳锆合金的氢脆风险和蒸汽发生器因科镍合金传热管一回路侧产生裂纹的风险,同时避免事故情况下大量氢气外泄到核岛中,降低氢爆风险。

一回路氢含量遵守道尔顿分压定律和亨利定律,若一回路是一个封闭系统,则一回路氢浓度的主要影响因素是化学和容积系统中容控箱的温度、压力和氢气纯度,在瞬态或其他干扰因素下,一回路氢含量可能会短时变化,但最终一回路氢含量又会恢复到容控箱氢压对应的浓度。

正常功率运行期间的氢含量监测手段有两种,一方面是主控在线监测氢表,另一方面是化学手动取样分析,其中在线氢表实时性好,但存在探头故障、精度不高等问题。因此对于处于正常运行期间的核电站,运行人员主要通过在线氢表进行监测,当发现氢气浓度异常时,需要化学分析人员手动取样进行对比分析。

若发现一回路氢含量异常下降,排查仪表异常后,就需要提高容控箱氢压和纯度来提高一回路氢含量。反之,一回路氢含量偏高,通过手动为容控箱泄压降低压力或通过一回路换水置换来降低一回路氢含量<sup>[3]</sup>。压水堆核电站一回路与化学和容积系统简图如图1所示:

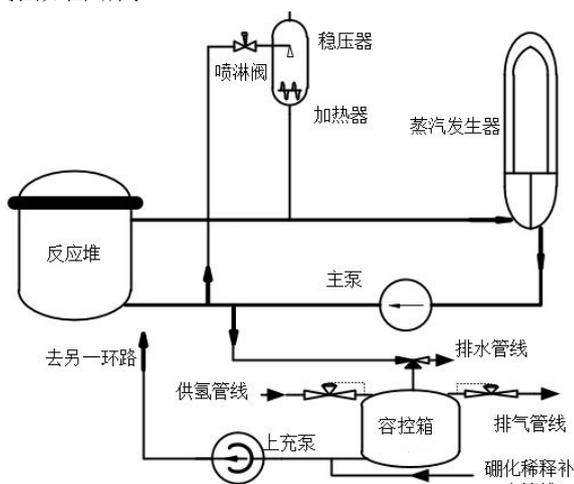


图1 压水堆核电站一回路与化学和容积系统简图

## 2 ELPO运行期间机组主要操作

在ELPO运行机组升降功率期间,为了平衡堆芯反应性,需要大量硼化稀释、投运和退出一回路稳压器加热器、容控箱吹扫等操作,一回路中的含氢冷却剂会被排除,注入不含氢的硼酸溶液或除盐水,导致一回路氢含量发生变化,可能超出控制范围,需要电厂运行人员进行控制,避免一回路氢含量超出标准范围。下文将以国内某CPR1000核电机组为例,介绍ELPO运行期间机组主要操作,同时收集多次机组ELPO期间真实一回路氢浓度的变化数据,分析一回路氢浓度变化趋势,最后给出操作建议。

ELPO运行主要分为五个阶段,第一阶段投运稳压器通断式加热器,目的是为后面升降功率大流量稀释硼化后,均匀一回路和稳压器冷却剂的硼浓度;第二阶段是硼化降功率,降功率过程中通过硼化方式向一回路注入硼酸,向堆芯引入负反应性进行降功率,期间任何时候功率补偿棒组不能离开堆顶;第三阶段是氙毒平衡阶段,功率降到目标后,先需要大量稀释进行补偿氙毒增加引入的负反应性,随后硼化补偿氙毒消失引入的正反应性;第四阶段是稀释升功率,通过稀释操作引入正反应性来进行升功率,升到满功率后继续稀释补偿氙毒增加引入的负反应性;第五阶段是停运稳压器通断式加热器,在一回路和稳压器冷却剂硼浓度均匀后,需要手动停运通断式加热器。

## 3 ELPO运行期间一回路氢浓度变化趋势

第一阶段:初始满功率运行时一回路氢含量约32ml/kg(STP),投入稳压器加热器后,稳压器主喷淋阀自动开启以匹配加热器带来的热效应,维持一回路压力稳定。大量的喷淋水通过喷淋阀以雾化状态进入稳压器汽相,雾状喷淋水中的氢气释放到稳压器气相中,随后稳压器液相中低氢浓度的雾化喷淋冷却剂再次进入一回路,造成一回路氢浓度轻微降低<sup>[3]</sup>。

第二阶段:紧接着随后一回路开始降功率开始,不含氢的硼酸溶液进入一回路,由于硼酸和除盐水等外部补水中没有氢,但却含有微量的氧/氮气等不凝气体,且随着自动控制系统为维持一回路正常的水装量,在上述操作的同时将多余的含氢一回路冷却剂排出,故一回路氢含量会出现缓慢下降的现象,稀释硼化量越多,一回路氢含量下降越快。降功率到目标功率后一回路氢含量最低降至30ml/kg(STP)左右。

第三阶段:氙毒平衡期间稀释和硼化量较多,大量不含氢的硼酸溶液和除盐水进入一回路,同时原一回路含氢冷却剂流失较多,此时一回路氢含量下降比较明显,期间一回路氢含量最低降至约25ml/kg(STP)左右。根据机组控制和化学规范要求,操纵员按需要需要将一回路溶氢调整至初始值附近,可以通过多次容控箱氢气吹扫、提升容控箱压力、调高供氢减压阀定值等方式提升一回路氢含量。一般操纵员主要通过容控箱多次吹扫提高容控箱氢气纯度、提高容控箱液位来提升容控箱压力这两种方式来执行,通过这些操作后,一回路氢含量缓慢上涨,最终恢复接近到降功率前的初始值附近,大约28ml/kg(STP)(数值大小取决于低功率平台停留时间)。此阶段若运行人员干预不及时,一回路氢含量可能会低于要求限值的下限。

第四阶段:升功率至满功率,期间同样需要多次稀释硼化,和之前的原理一样,含氢一回路冷却剂流失,非含氢水进入一回路,导致一回路氢含量缓慢下降,由于此时稳压器汽相中氢含量比一回路中氢含量高,在稳压器持续喷淋过程中,稳压器中高氢冷却剂对一回路进行了补充,导致一回路中氢含量下降幅度比降功率时少很多,仅下降1ml/kg(STP)左右,升到满功率后继续进行容控箱氢气吹扫和提升容控箱压力等方式提升一回路氢含量,一回路氢含量继续缓慢上涨到34ml/kg(STP)左右。

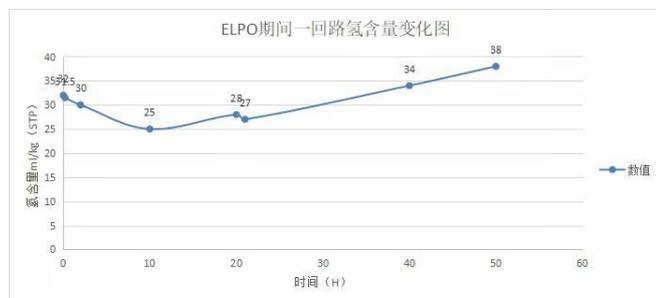
第五阶段:在稳压器主喷淋阀关闭和加热器停运后,其内部恢复原来的连续小流量喷淋,稳压器汽相集聚的氢气缓慢地返溶到稳压器液相,造成稳压器液相溶解氢浓度上涨,在连续小流量喷淋作用下,稳压器液相溶解高浓度含氢冷却剂慢慢进入一回路,从而一回路溶氢浓度继续随之上涨,最高上涨到38ml/kg(STP)左右<sup>[4]</sup>。此阶段若初始值偏高,且运行人员干预不及时,一回路氢含量可能会高于要的限值上限。ELPO期间一回路氢含量变化如图2所示:

## 4 ELPO运行期间一回路氢浓度控制建议

### 4.1 动态氢含量控制策略

根据以上分析,从降功率开始到降到目标功率后,一回路氢含量下降约7ml/kg(STP)左右,所以在时间允许情况下,在ELPO

降功率前,可以将一回路氢气提高7ml/kg(STP)左右,将一回路氢含量控制在40ml/kg(STP)左右,以补偿降功率期间氢含量的降低。也可以在降功率前提高容控箱供氢管线氢气压力,降功率到目标平台氢浓度恢复到初始值后再将容控箱供氢管线氢气压力定值恢复到初始值,减少一回路氢含量下降幅度且能缩短一回路氢含量恢复时间。



图二 ELPO期间一回路氢含量变化图

从ELPO低功率运行结束到升回满功率运行,期间一回路氢含量初始仅轻微降低,约下降2ml/kg(STP)左右,在稳压器主喷淋阀和加热器关闭,氢含量反弹上升约6ml/kg(STP)。所以建议升功率前提升并控制氢含量与初始值(32ml/kg(STP))相当或偏低一点;升功率过程及满功率后的氩毒平衡期间,观察一回路氢含量趋势,控制氢含量不要超过初始值,避免稳压器主喷淋阀和加热器关闭后氢含量过高。

#### 4.2 优化氢气注入和监测系统

引入先进的氢含量监测技术和设备,如新型的在线溶解氢表或激光光谱分析仪等,提高氢含量监测的准确性和实时性。这些先进设备能够更精确地测量一回路冷却剂中氢气的浓度,为及时、准确地控制氢含量提供可靠依据。这样才能根据一回路准确的氢含量测量数据,开发高精度的氢气流量控制器,能够根据一回路氢含量的实时监测数据,结合核电站的具体运行工况,

如功率变化、硼化稀释操作等,动态调整容控箱压力的设定值,精确控制氢气的注入量,确保注入的氢气量与一回路所需的氢含量相匹配,避免氢气注入不足或过量的情况,从而减少运行人员手动干预过程。

#### 5 结语

核电厂在运行期间必须严格遵守技术规格书和化学技术规范中对氢含量的要求,由于在ELPO运行期间,一回路氢含量大幅变化,更需要对氢含量的变化需要保持足够的关注度,提前熟悉氢含量的变化趋势,提前熟悉控制氢含量的多重方式和方法,这样才能保证所有的操作可知可控,对于确保核电站的长期安全稳定运行、减少设备腐蚀和放射性产物生成以及提高系统可靠性和经济性具有重要意义。

#### [参考文献]

- [1]王柏飞.核电机组实施ELPO期间的运行控制策略[J].中小企业管理与科技,2015,(7):45-46.
- [2]大亚湾核电运营管理有限公司[S].化学与放射化学技术规范,2023.
- [3]黄昭,吴辉,苏欣.百万千瓦压水堆一回路氢含量控制及异常时的处理[J].科技经济导刊,2019,(6):117.
- [4]刘主根,杨魁.核反应堆一回路溶解氢浓度理论计算及影响因素分析[J].核科学与工程,2021,(3):538-542.

#### 作者简介:

丁瑞荣(1985--),男,汉族,江苏南通人,本科,大亚湾核电运营管理有限公司,工程师,从事压水堆核电站生产运行、核安全管理等方面研究。

彭元凯(1984--),男,汉族,山东菏泽人,本科,大亚湾核电运营管理有限公司,工程师,从事压水堆核电站生产运行、核安全管理等方面研究。