

AP1000 机组大修下行过程的水化学控制

Water Chemistry Control of AP1000 Unit Overhaul During Shutdown Process

孙明明

Mingming Sun

中广核陆丰核电有限公司 中国·广东 汕尾 516600

CGN Lufeng Nuclear Power Co., Ltd., Shanwei, Guangdong, 516600, China

摘要: AP1000 机组下行阶段化学控制的目的是控制并优化腐蚀产物的溶解和去除, 最小化机组辐射场和人员辐照剂量, 同时, 解决系统局部位置高辐射场和确保换料水池清澈, 为换料操作准备满足要求的冷却剂。

Abstract: The purpose of chemical control in the downstream phase of the AP1000 unit is to control and optimize the dissolution and removal of corrosion products, minimize the radiation field of the unit and the radiation dose of personnel, and at the same time, solve the high radiation field in the local position of the system and ensure that the refueling pool is clear, prepare the required coolant for the replacement operation.

关键词: AP1000; 化学控制; 腐蚀

Keywords: AP1000; chemistry control; corrosion

DOI: 10.12346/etr.v3i6.3698

1 引言

AP1000 机组下行阶段, 反应堆冷却剂水环境会发生剧烈变化, 这种变化会加速腐蚀产物向冷却剂的释放。金属氧化物和硼酸在酸性环境中随着温度的降低其溶解度会不断升高。停堆期间, 为达到停堆裕量向反应堆冷却剂中添加硼酸, 以及进行除锂活动使反应堆冷却剂从碱性还原性环境进入酸性还原性环境。反应堆冷却剂温度和化学环境的变化加速了腐蚀产物的溶解和分解, 这些腐蚀产物主要以含钴的镍基铁酸盐形式沉积在燃料包壳和系统表面。酸性还原性环境促进了镍基铁酸盐向金属镍、钴和四氧化三铁的转化。当从反应堆冷却剂中去除溶解氢, 且引入氧后, 反应堆冷却剂就会进入酸性氧化性环境, 这种环境会将四氧化三铁氧化成三氧化二铁, 并且氧化和溶解生成金属镍和金属钴。目前是通过向反应堆冷却剂添加过氧化氢, 加速氧化过程, 使活化腐蚀产物更加容易释放和移除。

大修下行阶段, 化学控制的重要任务是确保放射性腐蚀产物的释放与去除, 建立酸性还原性环境对腐蚀产物释放与去除有利。下行阶段控制的重点有以下几点:

- ①计划停堆前及下行开始, 进行一回路扫气等操作, 去除一回路放射性气体, 整个下行阶段都要重点控制氩和碘^[1];
- ②计划停堆前, 进行除锂, 控制锂的浓度;
- ③关注一回路硼化, 控制硼的浓度;
- ④在一回路温度到达 82℃, 进行氧化前, 控制溶解氢的浓度, 使溶解氢浓度降低到 5cc/kg;
- ⑤在一回路 82℃时, 进行氧化净化, 重点关注 Co-58 和一回路溶解氧浓度;
- ⑥ AP1000 机组各模式定义如表 1 所示, 注意模式间的切换条件。

2 建立酸性还原环境

计划停堆前 24h, 将冷却剂中溶解氢浓度降至 15~17cc/kg, 且尽可能贴近下限, 必要时间歇性以 0.09m³/h 连续加氢的方式维持反应堆冷却剂的溶氢浓度在 15~17cc/kg, 一旦 RCS 氢气浓度低于 15cc/kg, 则参考化学技术规范进行处理。

计划停堆前 24h, 停止反应堆冷却剂加锌。

开始降功率前, 与化学沟通如有需要则投运化学和容积

【作者简介】孙明明(1988-), 男, 中国安徽淮北人, 本科, 工程师, 任职于中广核陆丰核电有限公司, 从事核电运行研究。

控制系统阳床（除锂床），降低反应堆冷却剂锂浓度（目标浓度小于 0.1ppm）^[2]。

表 1 模式划分

模式	名称	反应性状态 (K_{eff})	额定热功率%	反应堆冷却剂平均温度 (°C)
1	功率运行	≥ 0.99	> 5	不适用
2	启动	≥ 0.99	≤ 5	不适用
3	热备用	< 0.99	不适用	> 215.6
4	安全停堆	< 0.99	不适用	$215.6 \geq T_{avg} > 93.3$
5	冷停堆	< 0.99	不适用	≤ 93.3
6	换料	不适用	不适用	不适用

降功率过程中，需要关注反应堆冷却剂氢浓度大于 15cc/kg，一旦反应堆冷却剂氢气浓度低于 15cc/kg，则参考化学技术规范进行处理。

停堆以前，要确保一回路氢浓度高于 15cc/kg，堆功率降低到一定水平以下后，停止化学和容积控制系统连续加氢。

进入模式 3，开始利用化学和容积控制系统将反应堆冷却剂硼化至换料停堆硼浓度（目标浓度 2700ppm），使冷却剂处于酸性环境，增加腐蚀产物和沉积物的溶解，硼化期间建立稳压器连续喷淋流量，确保稳压器和一回路的硼浓度差维持在 50ppm 以内。

模式 3 继续下行期间，根据化学评估意见确定，是否需要降低裂变气体产物导致的反应堆冷却剂气体放射性浓度，如需要则通过化学和容积控制系统对反应堆冷却剂除气，如需要降低锂浓度，则投入化学和容积控制系统阳床。

3 建立酸性氧化性环境

模式 4，当反应堆冷却剂压力下降到 2.7MPa 左右，温度 177°C 左右，稳压器的气液两相温差开始有明显的表征（ $\Delta T=3^\circ\text{C}$ ）时，开始稳压器排气，在允许操作的情况下，稳压器应尽量高频排气。稳压器排气和化学和容积控制系统下泄脱气同时进行，需限制化学和容积控制系统下泄除气流量在 10m³/h 以内，避免因废气处理系统（处理能力只有 1m³/h）处理能力不足，导致稳压器排气和反应堆冷却剂泄压箱排气冲突。

模式 4，当反应堆冷却剂压力小于 2.76MPa，反应堆冷却剂温度小于 150°C，连接余热排出系统。注意：

①当反应堆冷却剂锂浓度小于 0.1ppm 后才能投运余热排出系统，原因是避免反应堆冷却剂锂进入余热排出系统。若余热排出系统的锂浓度超过了反应堆冷却剂锂浓度，余热排出系统的投运会导致反应堆冷却剂的 pH 值明显升高，在下行过程中必须避免这种情况发生。

②将余热排出系统连接到反应堆冷却剂之前，必须保证余热排出系统的硼浓度大于等于模式 5 无氙停堆裕度时的反应堆冷却剂硼浓度，以防止潜在的正反应性引入事件。

模式 5，稳压器升液位过程中，如果反应堆冷却剂氢浓度增加 5cc/kg，则暂停升液位操作，继续进行反应堆冷却剂除氢操作。一回路除氢的方式与机组热试过程中除氢的方式相同。

一种除氢方式为采用对稳压器气腔排气，排气至泄压箱，泄压箱通过氮气吹扫，把排出的不凝结气体送至废气处理系统处理排放。另外一种除氢方式是化学和容积控制系统下泄脱气，通过化学和容积控制系统下泄，将液体送至废液处理系统脱气塔，将脱出的气体通过废气处理系统处理排放。当稳压器液位达到 90% 或 95%，气液两相的温差小于 10°C，且稳压器排气能维持足够长的时间（如大于 10s），反应堆冷却剂氢气浓度 15cc/kg（期望值 3cc/kg），可以执行灭汽腔操作。

模式 5，当反应堆冷却剂系统水实体建立，温度降至低于 82°C，且溶解氢小于 5cc/kg 后，添加过氧化氢，建立酸性氧化性环境^[3]；氧化运行开始前，要确保溶解氢小于 5cc/kg，防止氢爆的风险。氧化运行的初始条件为：

- ①溶解氢浓度小于 5cc/kg；
- ②反应堆冷却剂水实体；
- ③至少一台主泵维持运行；
- ④化学和容积控制系统混床、阳床投运，最大化净化流量；
- ⑤一回路取样系统在线氧表可用；
- ⑥反应堆冷却剂和稳压器温度小于 82.2°C；
- ⑦脱气塔切至旁路运行，泄压箱气空间完成吹扫，泄压箱氢气浓度 2%；
- ⑧稳压器喷淋开启。

当反应堆冷却剂中加入双氧水后，双氧水就开始和反应堆冷却剂剩余的溶解氢和反应堆冷却剂内表面的腐蚀产物进行反应。反应速度在 43~82°C 没有显著的变化。维持冷却剂过氧化氢浓度有 8~10ppm 的残余，可保证氧化运行工作顺利完成。

系统建立酸性氧化性环境后，镍和钴 -58 快速氧化溶解，同时少量的钴元素和钴 -60 发生释放，通常 90% 以上的释放物都是可溶的，最大化化学和容积控制系统下泄净化流，持续对一回路进行净化，使系统达到最佳的净化效果，减少达到期望活度水平所用的时间。应对净化床进口、出口进行周期性地取样分析，判断树脂床的净化效率，如果净化效率低于 90%，应考虑投运备用净化床。

为了确保充分的搅混，在将要向反应堆冷却剂进行化学添加或硼浓度改变时，应保证至少有一台主泵或预热排出系统泵在运行。

4 结语

水化学控制对于核电机组非常重要，尤其在机组大修下行时，以满足大修和正常运行时辐射防护的要求。

参考文献

- [1] 顾军.AP1000核电站系统及设备[M].北京:原子能出版社,2010.
- [2] 林诚格.非能动安全先进压水堆核电技术[M].北京:原子能出版社,2010.
- [3] 大亚湾运营培训中心.900MW压水堆核电站系统与设备[Z].