

商运核电站一回路相关除盐床投运策略研究

Research on the Operation Strategy of Primary Circuit of Commercial Nuclear Power Plant

阳勤文

Qinwen Yang

广西防城港核电有限公司 中国·广西 防城港 538001

Guangxi Fangchenggang Nuclear Power Co., Ltd., Fangchenggang, Guangxi, 538001, China

摘要: 为了合理控制反应堆功能, 论文通过阐述除盐床除盐原理, 全面研究数值特征, 分析除盐床运行中相关参数, 以及运行操作流程, 有利于工作人员合理控制除盐床运行风险, 预测系统水质变化情况。通过试验证明, 该方法能有效控制反应堆功率, 合理调整水中含硼量, 避免出现硼化现象。

Abstract: In order to reasonably control the function of the reactor, this paper expounds the principle of the desalination bed, comprehensively studies the numerical characteristics, analyzes the relevant parameters in the desalination bed operation and the operation process, which is conducive to the staff to reasonably control the operation risk of the desalination bed and predict the water quality change of the system. It is proved that this method can effectively control the reactor power, adjust the boron content in the water reasonably, and avoid the borization phenomenon.

关键词: 核级树脂; 硼饱和; 运行要求; 投运策略

Keywords: nuclear grade resin; boron saturation; operation requirements; operation strategy

DOI: 10.12346/etr.v5i8.8457

1 引言

中国南方某商运核电站采用 CPR1000 技术路线进行建设, 其设计有两个独立的循环回路, 通过完全隔离的热传导形式将核反应堆产生的热能传递到汽轮机及发电机, 进而转化为机械能和热能。与反应堆接触的封闭的吸热和放热的循环回路我们称之为回路, 该回路采用含硼水对反应堆进行冷却, 同时通过调节水中含硼量作为反应堆功率控制的一种手段。为确保一回路含硼水中的化学成分可控(含硼量及其他离子数量), 在系统中设计有多套除盐床设施, 分别用不同运行工况、针对不同离子的含量进行控制。

论文从 CPR1000 技术路线商运核电厂一回路除盐床离子交换树脂除盐原理、树脂特性出发, 阐述除盐床运行参数标准及投运/退出操作规定, 以便在日常/大修期间进行除盐床投退时控制风险, 防止对系统水质及硼浓度带来非预期的变化。

2 除盐床除盐的原理

离子交换树脂原理是将离子交换树脂作用在水溶液中, 让溶液中的阳离子被转移到树脂上, 而树脂上的 H^+ 交换到水中, 即为阳离子交换树脂原理; 让水中阴离子转移到树脂上, 而树脂上的 OH^- 交换到水中, 即为阴离子交换树脂原理。CPR1000 技术路线商运核电厂一回路除盐床最常见的一类阴离子控制功能为“除硼”, 即减少一回路冷却剂含硼(酸)水中硼酸根的含量^[1]。

3 核级树脂运行特性

3.1 不同硼浓度溶液对硼饱和的影响

树脂上交换基团变化和硼浓度有直接联系: 当硼浓度为 3.5~430ppm, 树脂上 RB 物质逐渐增多, 且随着硼浓度逐渐升高其出现 RB_3 , ROH 数量下降(R 代表树脂基体); 当浓度超过 430ppm, 则 RB_3 占优势。树脂在硼饱和过程中,

【作者简介】阳勤文(1987-), 男, 中国广西桂林人, 本科, 工程师, 从事核电站日常运行管理、核电站群堆管理及应对自然灾害控制策略等研究。

开始对硼的吸附速率很快,之后比较平缓,达到硼饱和的平衡时间受母液硼浓度的影响不大,从试验结果来看,在不同硼浓度下的树脂硼饱和时间在90min左右。如图1所示。

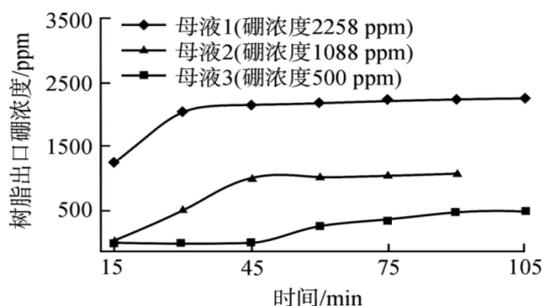


图1 不同硼浓度溶液下的硼饱和曲线

3.2 低浓度的硼酸溶液不能使树脂完全硼饱和和

实验室研究显示,经过低浓度硼饱和的树脂,再用高浓度硼酸溶液进行冲洗,树脂会继续吸收硼,当用硼浓度为2258ppm溶液分别对1088ppm和500ppm硼饱和和树脂淋洗,树脂可再吸附硼47mg和86mg,可见树脂对硼的总交换容量最终可以达到与用高硼溶液直接饱和时相当的交换容量,即树脂对硼的吸收总量处在同一水平,重新达到平衡的时间需要60min左右。如图2所示。

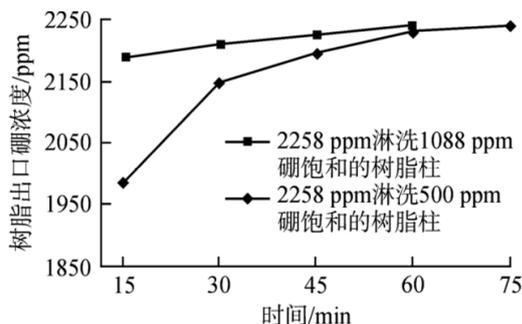


图2 高浓度硼溶液对低浓度硼饱和和后的树脂冲洗曲线

3.3 硼饱和和树脂对硼的释放

当用高浓度的硼酸溶液进行硼饱和而达到硼饱和的树脂,用较低浓度的硼酸溶液进行淋洗时,树脂将有硼释放出来。硼的释放量与淋洗用溶液硼酸浓度有关,若使用蒸馏水对硼饱和和树脂淋洗,将释放较大量硼。

4 除盐床投退运行控制策略

4.1 RCV/TEP 除盐床运行参数控制标准

除盐床用于控制一回路系统水质(包括硼浓度),因此,对于系统运行来说,主要考虑对水质的影响和硼浓度的变化。RCV/TEP除盐床树脂均有控制标准,其中RCV001/002DE(注:DE为除盐床的设备编号缩写,“RCV001DE”为化学和容积控制系统1号除盐床,“TEP”为硼回收系统)相关参数为《核电厂化学与放射化学技术规范》要求。

下面以RCV001/002DE为例,说明除盐床运行控制的

标准:

设计功能:装填Li+/OH-型树脂(混床),用于除去放射性铯、钇、钼以外的大多数放射性产物和裂变产物。正常运行工况下选择其中一台连入系统持续净化一回路系统水质。

更换标准:①在运行周期中,净化一回路系统的裂变和腐蚀产物和其他杂质形成树脂的饱和。②在停堆换料的净化过程中导致的树脂饱和和净化能力的降低。③树脂床压差高。④出口水质不符合《核电厂化学与放射化学技术规范》中要求。⑤运行周期达5年。

正常运行时应控制RCV容控箱气相中的N₂,使其含量低于5%,避免在主回路中形成高浓度的NH₃,过高的氨浓度会导致混床中的锂被置换出来。

更换树脂后首次投运应进行冲洗和硼饱和,使其参数满足如下标准:①硼:当一回路硼浓度>700ppm时,除盐床进出口浓度之差<3%;当一回路硼浓度≤700ppm时,除盐床进出口浓度之差≤20ppm。②氯化物:除盐床出口<0.15ppm。③氟化物:除盐床出口<0.15ppm。

4.2 RCV/TEP 除盐床投运要求

除盐床新床投运或退出后重新投运,由树脂特性分析可知,温度、流体硼浓度的变化将导致除盐床出口水质/硼浓度变化。基于此,《反应性控制细则》针对RCV/TEP除盐床的投运要求如下:①更换树脂后的混床初次投运必须进行硼饱和操作,RCV003DE阳床更换树脂后的初次投运或冲洗,需化学专业取样分析。②化学专业根据除盐床的效率决定RCV001/002DE混床的切换和更换树脂,大修后在线时必须与化学专业沟通确定投入运行的混床。③RCV001/002DE混床的切换必须按程序要求进行冲洗操作,确定化验结果合格。④投运RCV003DE阳床前须查询上次退出时的一回路硼浓度,与当前一回路硼浓度偏差超过50ppm则需要进行冲洗操作。⑤严格根据化学报表要求控制RCV003DE投运时间。⑥RCV003DE阳床退出后须在主控日志中记录退出时一回路的硼浓度。

4.3 RCV001/002DE 投运执行逻辑和过程

根据RCV/TEP床的不同功能和特性,RCV003DE为阳床,树脂不吸附硼,无需进行硼饱和,投运前仅需进行冲洗后化验水质合格即可按需投运;TEP005/007DE为阴床,充填除硼树脂,为保证除硼功能,投运前仅需进行效率验证和低硼水冲洗,不进行硼饱和,后续投运时精确计算投运时间;TEP006DE为混床,阳离子交换比为2.1(厂内使用树脂中阳离子交换容量最高),因此主要用来对阳离子净化。而RCV001/002DE为混床,阴阳离子交换比都较高(分别为1.9/1.2),每次投运前必须考虑进行硼饱和,为此,针对其设定如下投运逻辑:

4.3.1 化学规范要求

更换树脂后首次投运:应进行冲洗和硼饱和,标准详见

《核电厂化学与放射化学技术规范》中规定。

第一次硼饱和后的每次重新投运：必须进行除盐床的硼平衡。

4.3.2 硼饱和和步骤

更换新树脂后的硼饱和步骤：

① 化学专业估算对 RCV001/002DE 冲洗所需的一回路冷却剂体积（考虑到树脂对硼的吸收达不到 100%，建议按照全交换容量的 1.5~3.0 倍估算）。

② 运行专业根据估算的冲洗结果，利用一回路降锂换水的窗口对 RCV001/002DE 执行冲洗硼饱和工作，并将累积冲洗体积记录到运行日志中。

③ 待冲洗冷却剂体积达到或者超过计划的冲洗体积数量时，再安排一次大量体积数冲洗 RCV001/002DE，并在其出口连续取样 3 次，化学专业根据取样结果给出是否已经硼饱和的结论。

如果机组准备将其投入运行，则要求取样数据趋势稳定地趋向一回路硼浓度且满足《核电厂化学与放射化学技术规范》中有关硼饱和的标准^[2]。

如果机组不准备立即将其投入运行，则仅要求数据趋势稳定地趋向一回路硼浓度，根据后续投运计划，停止或者择日继续执行步骤 3 的操作。

已经硼饱和过的树脂的硼平衡（不投运不必做硼平衡）步骤：

① 运行专业和化学专业查阅上次对 RCV001/002DE 硼饱和时对应的一回路和除盐床出口的硼浓度。

② 化学专业估算对 RCV001/002DE 进行硼平衡所需的一回路冷却剂体积（上次硼饱和与当前一回路硼浓度差异越大，需要消耗的体积数越多，建议按照全交换容量的 0.5~1.0 倍估算）。

③ 运行专业根据估算的冲洗结果，利用一回路降锂换水的窗口对 RCV001/002DE 执行冲洗硼平衡工作，并将累积冲洗记录到运行日志中。

④ 待冲洗冷却剂体积数达到或者超过计划的冲洗体积数量时，再安排一次大量体积数冲洗 RCV001/002DE，并在其出口连续取样 3 次，化学专业根据取样结果给出是否已经硼平衡的结论。

如果取样数据趋势稳定地趋向一回路硼浓度且满足《核电厂化学与放射化学技术规范》中有关硼饱和的标准，立即将其投入运行。

如果取样数据不满足，停止或者择日继续执行步骤 4 的操作。

4.3.3 补充说明

① 硼饱和是指在当前硼浓度下，树脂已经对硼酸吸收饱

和（但外界温度或者硼浓度发生变化时会破坏该饱和的状态）；硼平衡是指已经饱和的树脂与外界一定浓度的硼酸进行再吸收或者释放的过程结束后达到的平衡状态。

② 根据过去的历史经验，机组大修停机的热停堆阶段退出的 RCV001DE 或者 RCV002DE 在本轮大修启动阶段重新投运前至少冲洗床体积数的 3 倍即允许投入运行，不强制按照硼饱和的标准执行。

4.4 运行程序关于 RCV/TEP 除盐床投运的具体要求

目前，关于《反应性控制细则》中 RCV/TEP 除盐床投运要求和化学专业关于除盐床投运的控制标准，均已落实到运行程序中。相关投运标准如下：

① RCV001/002DE、TEP006DE：投运前必须冲洗；化学专业计算预估冲洗水量，冲洗完成后进行取样确认除盐床进出口硼浓度小于 20ppm。

② RCV003DE：投运前要求与化学专业核实是否需要冲洗；无论是否需要冲洗都要求化学专业取样，确认除盐床进出口硼浓度小于 20ppm。

③ TEP005/007DE：投运前必须冲洗并进行除硼效率试验；根据效率试验结果精确计算投运时间。

RCV001/002DE 在大修上行时冲洗后投运，之后持续运行；TEP006DE 在功率运行情况下一般不投运，大修投运净化一回路，均进行出口取样化验硼浓度并计算冲洗水量（一般为除盐床体积的 3 倍）。TEP005/007DE 在寿期末投运除硼，投运前根据效率试验结果精确计算投运时间，确保除硼量可预知可控。

日常功率运行时，RCV003DE 投运次数较多，目前采取的控制方式为：对比上一次投运时一回路硼浓度，通知化学专业确认当前硼浓度偏差是否需要冲洗，标准详见《核电厂化学与放射化学技术规范》中规定。

当 RCV 除盐床因缺陷处理或机组工况变化临时退出后再投运，此时除盐床温度下降，树脂吸收硼，导致除盐床容器中存在低硼水，投运后对一回路产生误稀释，针对此类情况，《核电厂化学与放射化学技术规范》中明确规定：“第一次进行硼饱和后的每次投运，必须进行除盐床的硼平衡。”

综上，在 RCV/TEP 除盐床投运操作时，严格遵守运行程序和管理规定要求，可以确保不产生误硼化 / 误稀释事件^[3]。

参考文献

- [1] 王若彤,胡友森,刘斌瀚,等.压水堆一回路硅酸盐饱和和溶解度计算研究[J].核科学与工程,2023,43(2):304-314.
- [2] 鲍一晨,陈志刚,石秀强,等.一回路水化学对燃料包壳表面 CRUD(污垢)的影响[J].腐蚀与防护,2022,43(10):1-6+32.
- [3] 邓才远.核电站放射性除盐床树脂更换工艺改进[Z].广东省,大亚湾核电运营管理有限责任公司,2008-12-18.