

CPR1000机组大修B10调整优化方案研究

陈文彬, 张 雷

大亚湾核电运营管理有限责任公司, 广东 深圳

收稿日期: 2024年5月27日; 录用日期: 2024年6月13日; 发布日期: 2024年7月18日

摘 要

该总结描述了一种用于CPR1000机组一回路提高B10丰度的系统及方法, 系统包括: 一回路系统、与一回路系统连接的硼溶液贮存箱, 以及用于制备富集硼酸的临时装置; 与临时装置连接的硼回收系统中间箱。该优化方案方法, 通过临时装置将富集硼注入中间箱内, 并利用中间箱、硼溶液贮存箱和换料水箱之间的硼水传输过程, 将富集硼带入至相关系统, 从而将一回路B10丰度提高至正常水平。

关键词

B10丰度调整, 制硼装置, 大修, 硼回收系统

Study on B10 Adjustment and Optimization Scheme of CPR1000 Unit Overhaul

Wenbin Chen, Lei Zhang

Daya Bay Nuclear Power Operations and Management Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Received: May 27th, 2024; accepted: Jun. 13th, 2024; published: Jul. 18th, 2024

Abstract

This paper presents a system and method designed to enhance the abundance of B10 in the primary circuit of CPR1000 unit. The system comprises a primary circuit system, a boron solution storage tank connected to the primary circuit system, and a temporary device for preparing and enriching boric acid. An intermediate box of boron recovery system is connected to the temporary unit. In this optimization scheme, enriched boron is injected into the intermediate tank through a temporary device, and the transfer process of boron water between the intermediate tank, the boron solution storage tank, and the refueling tank are utilized to introduce enriched boron into the relevant system, thereby increasing the primary B10 abundance to normal levels.

Keywords

B10 Abundance Adjustment, Boron Production Device, Overhaul, Boron Recovery System

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

CPR1000 机组切换为 18 个月换料以后, 随着机组运行, 各机组陆续出现寿期中一回路硼偏差超过 50 mg/kg 的情况。根本原因为一回路 B10 丰度下降。导致硼偏差持续扩大, 进而导致安全裕度下降, 相关数据见[1]。为应对 B10 丰度下降问题, 电站通过向相关系统注入富集硼溶液来解决丰度下降问题, 相关方法应用效果见[2], 但相关方法在解决 B10 丰度下降的问题过程中, 不可避免的引入了新的质量安全风险, 因此需要进一步研究一套更为安全的 B10 调整方案。

2. 背景介绍

2.1. 问题描述

CPR1000 核电机组 B10 调整是由下述两种方案实现的:

1) 日常运行期间当化学专业监测到 REA/RCP 中 B10 低于报警值时, 由运行专业在反应堆硼和水补给系统(REA)的浓硼罐(REA004BA 或者 REA003BA)中加入富集硼酸, 使其 B10 丰度提高至 20%左右, 通过功率运行期间一回路加锂换水或硼化降功率将 REA004BA 或者 REA003BA 中的硼酸溶液注入 RCP 中, 逐步恢复 RCP B10 丰度。

2) 每次大修换料时, 反应堆压力容器打开以后, 换料水箱内较高 B10 丰度的硼酸溶液与反应堆一回路低 B10 丰度的硼酸溶液混合, 使得换料水箱内的 B10 丰度呈现逐次大修降低。为将 PTR001BA 的 B10 恢复至天然丰度 19.8%附近, 专业通过在反应堆水池边制备富集硼溶液, 在卸料完成后至反应堆水池开始排水前时间段内, 将富集硼酸排入反应堆换料池。

2.2. 现有技术风险分析

现有技术中, 在大修期间, 直接向堆池注入高浓度富集硼溶液存在人员坠落、堆池中引入异物等安全隐患; 在日常期间, 因反应堆硼和水补给系统直接向一回路提供硼溶液, 直接向反应堆硼和水补给系统中注入高丰度的硼溶液容易导致反应堆硼和水补给系统的硼丰度超出标准, 从而影响一回路的反应性控制, 一回路硼丰度调节过程的可控性较差而需改进。

2.3. 研究目标

- 1) 通过研究方法, 将一回路 B10 丰度有效恢复至天然丰度 19.8%附近。
- 2) 提高 B10 丰度过程中, 将工作引入的相关质量风险降低为 0。

3. 方案研究

3.1. CPR1000 机组硼水相关系统分析

通过对 CPR1000 机组系统进行分析, 可以得到与一回路硼浓度控制相关的系统如下[3] [4]。

3.1.1. 硼和水的补给系统(REA)

硼和水的补给系统(REA)设计用于与化容控制(RCV)联合用于:反应性的控制:配制 REA4%和 RIS4%的硼酸溶液(7000~7700 ppm 和 7000~9000 ppm)并贮存 4%的溶液,在慢的反应性控制时,改变反应堆冷却剂系统 RCP 的硼浓度。容积控制:为了补偿 RCP 的泄漏,或补偿由于冷却瞬态引起冷却剂总量的收缩,提供除盐水与硼酸溶液。因此 REA 系统具备向一回路注入富集硼溶液的接口。

3.1.2. 反应堆换料腔和乏燃料水池的冷却和处理系统(PTR)

PTR 设计中有配合一回路充水和排空的功能,与此相关的有:对传输水池和装罐水池进行充水和排空;换料期间对反应堆池和堆内构件池进行充水和排空;同时在事故工况下,PTR 系统还设计通过 RCV 系统向 RCP 系统紧急提供 2100~2300 ppm 硼酸溶液的补水;因此 PTR 系统具备向一回路注入富集硼溶液的接口。

3.1.3. 硼和水回收系统(TEP)

TEP 收集经化学和容积控制系统(RCV)的下泄管线而来的反应堆冷却剂系统的含氢反应堆冷却剂和来自于排气和疏水系统(RPE)的反应堆冷却剂疏水箱的含氢反应堆冷却剂。经过滤、除盐、除气和硼水分离后,向 REA 提供水和 4%硼酸溶液,其设计可以向 REA 系统及 PTR 系统补充必要硼水。

3.2. 相关系统间的接口关系

相关系统接口关系如下图 1 所示,从关系图中可知,L8STEP 系统具有向 REA/PTR 系统注入富集 B10 溶液的能力,但同时因其又不与一回路直接相联,不会对一回路反应性控制产生影响,因此能很好的缓冲调整 B10 丰度过程中相关参数超标风险。

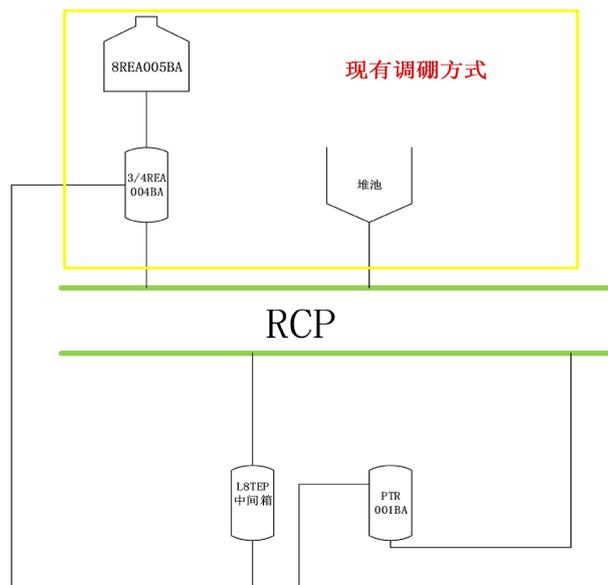


Figure 1. Interface diagram of relevant systems

图 1. 相关系统接口关系图

3.3. TEP 系统注入存在问题

3.3.1. 注入方法

由于 L8STEP 系统中间箱为存储箱,其系统原始设计不具备溶液注入条件,项目组通过对大亚湾基地

2 件机组运行事例分析确定注入方式, 并最终确定方案: 通过设计制作一套临时制硼装置, 并改造 L8TEP 系统中间箱管线, 增加注入接口, 实现富集 B10 溶液注入。

事例一: 2020 年, 大亚湾核电站 TEP 系统中间箱出现硫元素高的问题, 电站为解决该问题, 通过改造循环管线, 增加系统临时净化回路接口, 接入临时除盐床对 TEP 中间箱进行净化。

事例二: 岭澳二期核电站, 调试启动期间, PTR 乏燃料水池需配置大量硼水, 为确保调试进度, 调试人员设计制作一套临时制硼装置, 大量配置合格硼溶液注入乏池。

3.3.2. 硼回收系统接口改造

硼回收系统原设计无相关设备及接口[3], 因此, 项目组在硼回收系统原设计的循环回路上通过改造(图 2), 增一个临时接口, 临时制硼装置所制备的富集硼溶液可以在气动泵压力下, 通过循环管线注入至相应的中间箱。

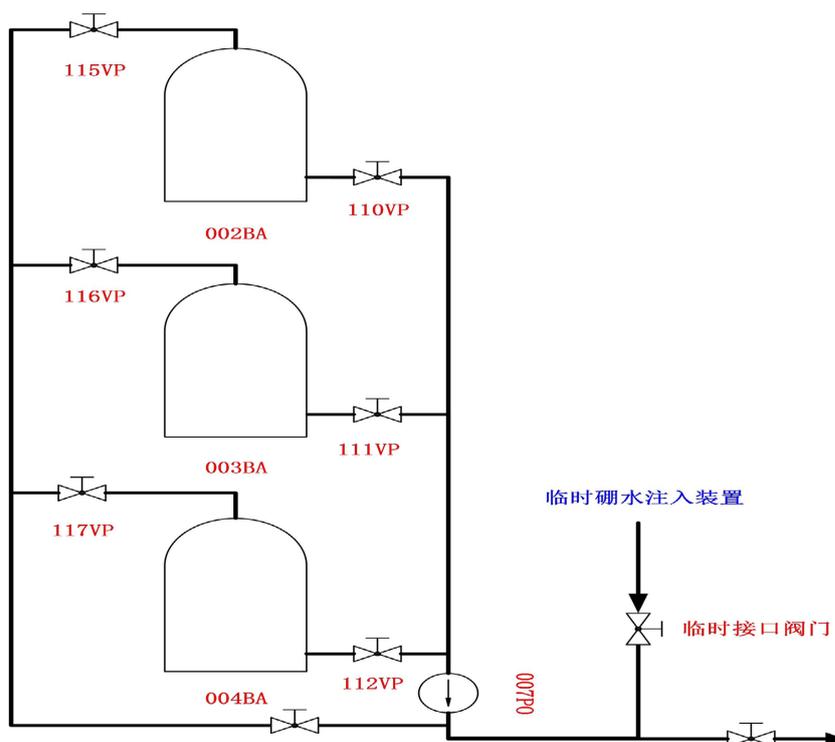


Figure 2. Schematic diagram of renovation on the circulation circuit of boron recovery system

图 2. 硼回收系统循环回路上改造示意图

3.3.3. 临时制硼装置制作

临时制硼装置由三个部分组成, 设计图与现场实物见下图(图 3、图 4):

1) 制硼容器: 制作一个容积为 1M3 塑料容器: 通过将天然固体硼倒入塑料容器, 并注入除盐水溶解, 从而获得所需的富集硼溶液, 同时塑料容器顶部安装有放置搅拌器, 搅拌器通过电缆卷盘供电, 实现加速固体硼溶解, 防止沉淀均匀硼水。

2) 传输装置: 由一个气动泵及相应管道组成, 使用压缩空气做为动力源, 将制硼容器中硼溶液注入硼回收系统。

3) 支座: 用于支撑塑料容器, 支座底部安装的滚轮, 便于装备移动运输。

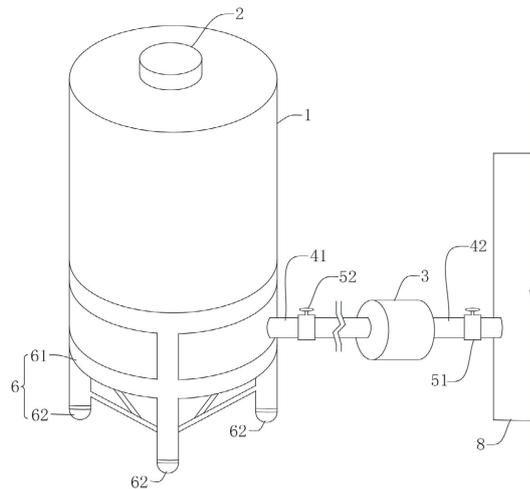


Figure 3. Schematic diagram of temporary boron injection device

图 3. 临时注硼装置简图



Figure 4. Site layout diagram of temporary boron production device

图 4. 临时制硼装置现场布置图

3.3.4. B10 注入时机选择

由于日常运行期间, L8TEP 系统为两机组共用, 因此在 L8TEP 系统中调整 B10 丰度为对相邻机组产生影响, 为降低影响, 项目组确定利用机组大修进行富集硼注入, 具体为以下两个阶段:

在 CPR1000 机组大修准备阶段, 为确保大修期间用硼, 运行会提前在硼回收系统中储备约 450 m³ 标准硼浓度硼水, 在此阶段, 利用临时装置向中间箱注入富集硼, 将中间箱 B10 丰度调整至允许最高值(至 19.9% 左右, 不得超出 20.2%)储存在硼回收系统中间箱备用, 此部分硼水将在一回路下行过程中, 通过 REA 系统补充至一回路中, 实现部分提高一回路 B10 丰度。

在大修期间一回路排空窗口, 一回路部分硼水排放至硼回收系统中间箱暂存, 在随后的机组上行过程中, 此部分硼水将通过 PTR 系统补充至一回路, 在此阶段, 通过计算获得一回路 B10 提高至标准水平所需的富集硼量, 利用临时装置, 将所需富集硼量注入至硼回收系统中间箱, 随后通过一回路水传输实

现最终提高一回路 B10 丰度。

4. 大修 B10 调整方案优化方案

4.1. 优化方案概述

本优化方案是利用机组大修停机窗口, 充分利用大修前硼水准备阶段及一回路排空窗口, 通过将富集硼注入 TEP 中间箱, 随后利用大修期间硼回收系统中间箱与 PTR 系统、RCP 系统、REA 系统之间的硼水传输过程, 将富集硼带入至相关系统, 从而将一回路 B10 丰度提高至正常水平的, 优化前后方案不同点如下(见表 1)。

Table 1. Comparison of B10 adjustment schemes

表 1. B10 调整方案对比

	富集硼注入窗口	富集硼注入方式
优化前	大修期间	直接向堆池中注入高浓度富集硼溶液
	日常期间	通过 REA005BA 向 REA004BA 补充
优化后	大修前(备硼阶段)	硼回收系统中间箱备硼后, 向中间箱注入富集硼
	大修期间	一回路排水后, 再次向中间箱注入富集硼

4.2. 大修前备硼阶段 B10 丰度调整执行步骤如下

当反应堆需从功率运行状态转向停堆检修状态时, 运行专业在此窗口将利用硼回收系统中间箱储备大量硼水以确保停堆检修用硼, 在此窗口下, 如图 5 所示, 执行以下步骤部分抬高一回路 B10 丰度。

步骤 1: 在反应堆需从功率运行状态转向停堆检修状态之前, 一回路系统中的部分硼水排放至硼回收系统中间箱后不再复用, 在此期间 REA 系统硼水消耗通过 REA005BA 制备补充, 硼回收系统储存足够大修用硼水后, 通过化验获取硼回收系统中间箱内硼水中的 B10 的丰度。

步骤 2: 测量中间箱内硼水中的 B10 的丰度, 通过计算确定所需富集硼酸的添加量, 并通过临时装置制备所需添加量的富集硼酸溶液。

步骤 3: 将制备好的富集硼酸通过改造接口输出至中间箱, 以在中间箱中制备富集硼溶液。

步骤 4: 且当反应堆需从功率运行状态转向停堆检修状态时, 随着一回路硼化操作, REA 系统中硼溶液不断消耗, 此时通过对硼回收系统中间箱蒸发制硼对 REA 系统硼溶液进行补充, 在此过程中, 中间箱集硼水输出至 REA 硼溶液贮存箱。

步骤 5: 随着一回路硼化操作 REA 硼溶液贮存箱中混合有富集硼溶液介质进入一回路, 实现部分提高一回路 B10 丰度。

在本方案中, 计算要达到预设丰度时所需添加的富集硼酸的总质量[1] [2] [4] [5]。

$$M = \frac{B \times V \times (X1 - X2 \times T0) \times (T - T1)}{(X3 - X2 \times T1) \times (T0 - T)}$$

其中, M 为所需添加的富集硼酸总质量, g;

B 为当前硼酸浓度, g/t;

V 为当前硼酸体积, m³;

$T0$ 为富集硼酸的 B10 丰度, %;

$T1$ 为当前硼酸的 B10 丰度, %;

T 为调整后硼酸的目标 B10 丰度, %;

$X1$ 、 $X2$ 和 $X3$ 为常数。

在本方案中, $X1$ 为 62.009, $X2$ 为 0.997, $X3$ 为 11.009。

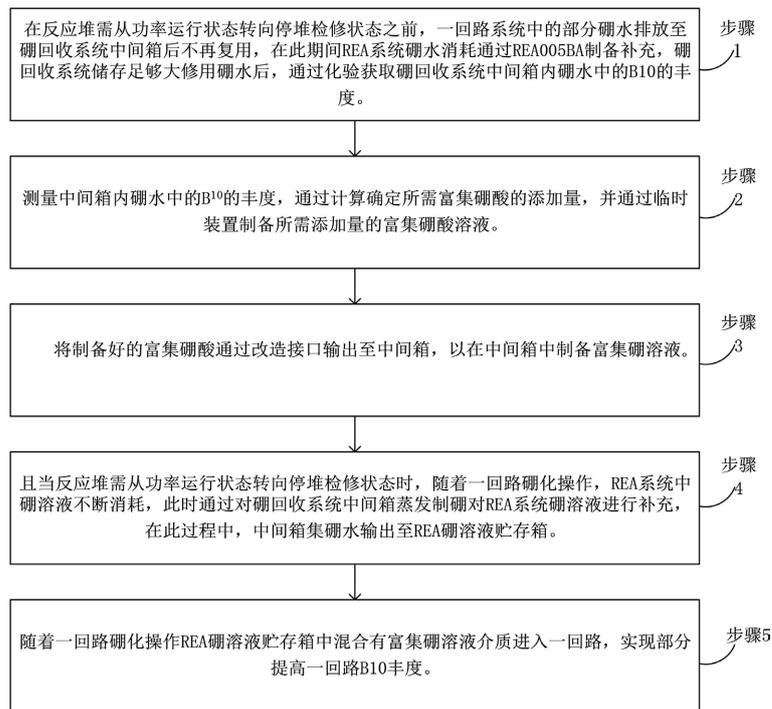


Figure 5. Logic diagram of enriched boron injection during major maintenance stage

图 5. 大修备硼阶段注入富集硼逻辑框图

4.3. 大修期间 B10 丰度调整执行步骤如下

在反应堆需停堆检修阶段, 此时为配合检修工作, 运行需要排空一回路系统中的硼水, 并将排出的硼水输出至硼回收系统中间箱和换料水箱, 如图 6 所示, 执行以下步骤实现最终抬高一回路 B10 丰度。

步骤 1: 在将一回路排出的硼水输出至中间箱和换料水箱, 可先将一回路系统中的硼水传输至换料水箱, 当换料水箱装满后, 再将一回路系统排出的硼水传输至中间箱。随后通过打循环取样获取中间箱和换料水箱硼水中的 B10 丰度;

步骤 2: 中间箱和换料水箱硼水中的 B10 丰度, 确定富集硼酸的添加量, 并通过临时装置制备第一添加量的富集硼酸溶液。在此过程中需考虑换料水箱与中间箱的总添加量;

步骤 3: 将临时装置中制备好的富集硼酸溶液输出至中间箱, 以提高中间箱中的 B10 丰度。

步骤 4: 随着一回路补水排气等操作, 换料水箱中硼溶液不断消耗, 将中间箱制备好的富集硼水补充至换料水箱, 以提高换料水箱中的 B10 丰度。

步骤 5: 随着换料水箱中的硼水不断补充至一回路系统。实现最终抬高一回路 B10 丰度。

5. L410 大修期间优化方案应用

根据优化方案, 运行与化学专业在 L410 大修中进行应用, L410 大修结束后 L4PTR001BA 及 L4RCP B10 丰度达到天然 B10 丰度, 方案应用效果良好, 大修前、后监测各系统回路 B10 丰度数据如下(见表 2)。

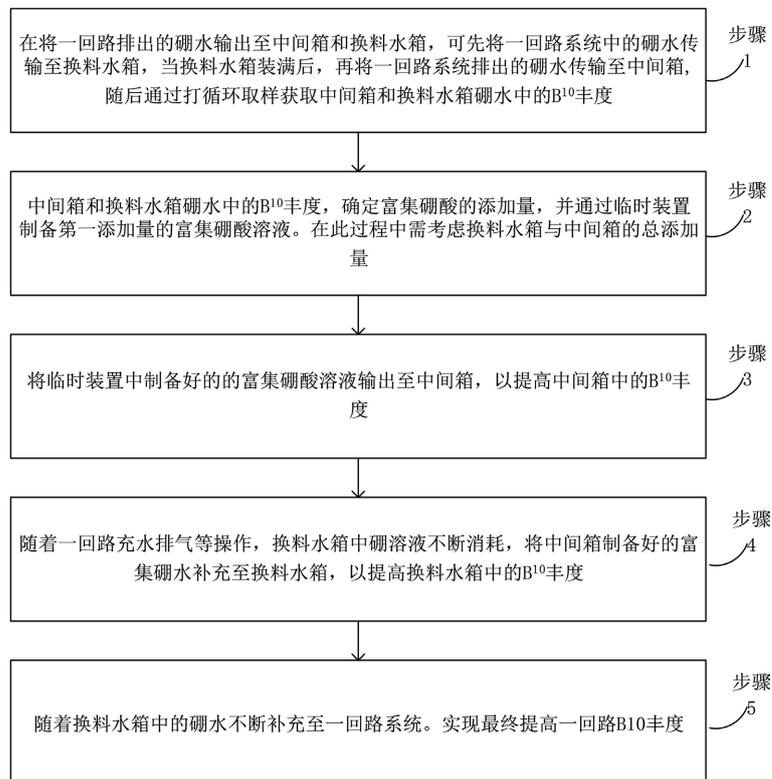


Figure 6. Logic diagram of enriched boron injection during major maintenance stage

图 6. 大修检修阶段注入富集硼逻辑框图

Table 2. Comparison of B10 abundance adjustment effect during L410 major maintenance

表 2. L410 大修 B10 丰度调整效果对比

储罐	L410 大修 B10 调整	
	调整前	调整后
硼回收系统 002BA	19.52	19.97
硼回收系统 004BA	19.24	20.18
L4RCP 一回路	19.1	19.8
L4PTR001BA	19.5	19.77
L4REA004BA	NA	NA
L8REA003BA	19.9	20.1

6. 结束语

本优化方案为 CPR1000 机组首次实施并应用, 相关应用策略以及为配合方案实施设计制作的专用制硼装置、硼回收系统系统实施改造增加系统接口均已申请国家专利并受理通过。

L410 大修期间, 通过本方案应用有效提升 L4 号机一回路 B10 丰度(由大修前 19.1%提升至 19.8%)有效避免了原设计调整方案所产生的相关安全质量风险, 同时本方案除应用于 B10 丰度调整工作外, 在 L410 大修备硼阶段还应用于机组大规模补硼操作中, 该方案应用后, 有效减少运行人员 L8REA005BA 制硼次数(减少约 5 次)节约工时约 10 h, 同时有效避免了制硼期间所产生的工业安全风险及异物风险。

参考文献

- [1] 张卫江. 富集硼 10 同位素的应用[C]//第四届中国核学会省市区“三核”论坛论文汇编. 天津: 天津大学化学工程研究所, 2007: 4.
- [2] 谭世杰, 廉志坤, 李志军, 周晓凌, 胡汝平, 高景辉. CPR1000 核电机组一回路临界硼浓度偏差机理研究[J]. 核动力工程, 2019, 33(1), 112-116.
- [3] 广东核电培训中心. 大亚湾核电站系统及运行: 上册[M]. 北京: 原子能出版社, 1995.
- [4] 王绪懿, 程嘉林, 刘通. 秦山第二核电厂硼和水补给系统制硼方案的研究与改进[J]. 产业与科技论坛, 2019, 18(16): 47-48.
- [5] 蔡光明. 反应堆一回路可溶硼 10B 丰度的跟踪计算[J]. 核科学与工程, 2007, 27(3): 240-245.