

Study on continuous small flow water replenishment scheme for spent fuel pool cooling and purification system

Jie Shen Shishuo Yin

Operation 5, China National Nuclear Power Operation Management Co., Ltd., Jiaxing, Zhejiang 314300, China

Abstract

The spent fuel pool at Qin San Plant has experienced a drop in liquid level due to natural evaporation. To compensate for water loss and maintain normal liquid levels, regular refilling is required. In practice, manual activation of 7165-V7205 pump for refilling is typically employed. According to the Process Information System (PI), manual refilling operations occurred 348 times within a year—approximately once daily—a high-frequency operation that significantly consumed manpower and increased personnel radiation exposure. Current methods require about 15 minutes per refill cycle with an environmental dose rate of $1 \mu\text{Sv/h}$, resulting in an annual total radiation dose of approximately $87 \mu\text{Sv}$. To address these challenges, this study proposes a new low-flow continuous refilling method designed to optimize labor efficiency while reducing radiation exposure.

Keywords

spent fuel pool; continuous water supply; liquid level

乏燃料池冷却与净化系统持续小流量补水方案探究

沈捷 尹士硕

中核核电运行管理有限公司运行五处, 中国·浙江 嘉兴 314300

摘要

秦三厂乏燃料池因自然蒸发而液位降低。为弥补乏池失水, 保持乏燃料池液位正常, 需要经常对其补水。实际操作中一般通过手动打开7165-V7205进行补水。经查询PI系统, 一年内共执行手动补水348次, 约一天一次, 频率较高, 极大地消耗了人力, 同时也增加了人员受辐射剂量。目前采用的方式, 单次补水约需15分钟, 环境剂量率为 $1 \mu\text{Sv/h}$, 一年辐射总剂量约 $87 \mu\text{Sv}$ 。因此, 拟提出一种新的小流量持续性补水方式, 以期达到节省人力, 同时减少人员受辐射剂量的目的。

关键词

乏燃料池; 持续补水; 液位

1 系统概述

乏燃料池冷却和净化系统正常运行时, 消除积聚在乏燃料池中的热量, 维持乏燃料池温度在可接受的水平, 确保不锈钢结构不会变形。给乏燃料提供屏蔽保护, 维持可接受的温度。维持乏燃料池水质澄清和减少放射性^[1]。

乏燃料储存池的乏燃料设计热负荷是1.8MW, 系统在四级电源运行条件下, 维持储存池平均水温 38.5°C , 最高水温不超过 40°C , 这是在85%的功率因子下9年的乏燃料的累积所对应的热负荷, 乏燃料储存池的大小能保证储存池在失去冷却的12小时内温度不会超过 49°C 。乏燃料接收池的设计热负荷(乏燃料从卸料池输送到储存池过程中产生的热量)是0.3MW, 系统正常运行维持接收池最高水温不超过 40°C 。

与除盐水分配系统(71650)接口: 从除盐水分配系统向乏燃料池冷却和净化系统供给除盐水以维持储存池和接收池的水量, 保证足够的冷却; 在乏燃料池冷却及净化系统离子交换床3441-IX7001或3441-IX7002进行去气操作时提供水源。

1.1 系统设备

该系统设置了三台容量为50%的水平单级离心泵(3441-P7001, P7002和P7003), 及一台真空清扫泵3441-P7006, 正常运行时, 3441-P7001为乏燃料储存池循环冷却提供动力, 3441-P7003为乏燃料接收池服务, 而3441-P7002作为备用设备, 根据系统运行方式的改变可以选择为储存池服务或者为接收池服务。在储存池和接收池底部累计一定量的杂物后, 可以手动投入真空清扫泵3441-P7006对水池底部进行清洁。

正常运行时热交换器3441-HX7001为乏燃料储存池提供冷却, 热交换器3441-HX7003为乏燃料接收池提供冷却, 热交换器3441-HX7002作为3441-HX7001的备用, 可以根

【作者简介】沈捷(1975-), 男, 中国上海人, 本科, 工程师, 从事核工程技术研究。

据热负荷的变化及运行模式的改变选择投切^[2]。

1.2 系统流程

正常运行时 3441-P7001、3441-HX7001、3441-FR7001、3441-IX7001 为乏燃料储存池提供冷却及净化；3441-P7003、3441-HX7003、3441-FR7002、3441-IX7002 为乏燃料接收池提供冷却及净化。而 3441-P7002 和 3441-HX7002 作为备用设备，根据需要进行投切。系统流程简图如下^[3]：

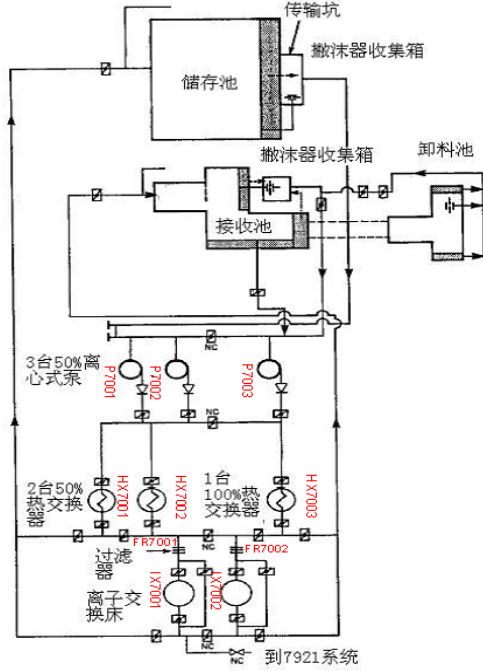


图 1 3441 系统流程简图

1.3 液位控制原理

水池充满着除盐水，每个水池有自己的传输坑进行水位调整。液位过低，会导致泵气蚀并降低对乏燃料的屏蔽。通过安装在合适位置的撇沫器，滤去水池表面的悬浮物、调整水池水位使水池表面保持清洁。水池的水位应保持在撇沫器边缘以上 5mm 的位置。

表 1 乏池传输坑液位测量范围

仪控设备	位置	A/I	正常读数
63441-LI7201	储存池传输坑	0640	1750-1988mm
63441-LI7201	接收池传输坑	0641	1750-1988mm

乏燃料储存池的液位是通过位于传输坑内的气泡液位计 LT-7201 测量所得。就地盘 60710-PL650 上的液位计 LI-7201 从 LT-7201 取得信号，同时 3 个液位开关 LS-7201#1,#2 和 #3 也是从 LT-7201 取得信号。同时相应的 AI 信号也送到主控室的电站计算机上。液位开关 LS-7201#1 会在主控室触发一个低液位报警，同时会跳掉 3441-P7001 和 P7002(取决于当时是哪台泵为乏燃料储存池服务)。液位开关 LS-7201#2 会触发一个低液位报警，同时会打开 SV-7201 将除盐水补入传输坑中。第三个液位开关 LS-7201#3 仅仅是在

主控室触发一个高液位报警。乏燃料储存池传输坑液位变送器 63441-LT-7201 的量程是 0—2m，其零点对应的高度是 97.86m。

2 现补水方式及存在的问题

2.1 现在的补水方式

乏燃料池的失水方式有两种，一种是自然蒸发，还有一种是不锈钢衬底泄露。水池如果有漏点，泄漏的水通过水池的不锈钢衬墙收集到地坑 71720-Sump#1，所以可通过对地坑 71720-Sump#1 收集的水判断水池是否有泄漏。地坑 71720-Sump#1 的底部低于乏燃料池的底部。储存池和接收池泄露的水都会流到地坑 71720-Sump#1 中。

目前的乏燃料储存池及接收池补水方式有两种：

第一种：储存池和接收池的液位到低液位时，除盐水补水阀 63441-SV7201 或 63441-SV7202 会自动打开为其补水。

第二种：手动缓慢打开大流量阀 7165-V7204 或 7165-V7205 至两格开度对储存池或接收池进行补水。

实际操作中，由于补水阀 63441-SV7201 和 63441-SV7202，动作信号取自储存池和接收池，而非其对应的转运坑，正常运行期间，储存池和接收池液位变化很小，无法实现自动动作补水。因此，一般采用第二种方式，通过手动打开 7165-V7205 进行补水。

2.2 存在的问题

经查询 PI 系统中乏燃料池历史液位趋势图可知，过去一年，共执行乏燃料池手动补水 348 次，约为一天一次，频率非常高，极大地消耗了现场及主控的操作人力，同时也增加了人员的受辐射剂量。目前采用的手动补水方式，单次补水约需十五分钟，根据现场布置的辐射分区标示牌，S-124 和 S-126 房间环境剂量率为 1 μSv/h，计算可得，一年内人员受辐射总剂量为 87 μSv。

总剂量 $A=1 \mu\text{Sv/h} \times 15\text{min} \times 348=87 \mu\text{Sv}$ 。

另外，补水阀开、关过快或开度过大可能会引起除盐水压力波动导致备用除盐水泵启动，影响除盐水系统稳定性。

3 持续小流量补水方案的提出与可行性探究

3.1 乏燃料池蒸发量计算

在我国，蒸发量计算一般采用根据道尔顿定理公式导出的经验公式^[4]：

$$W=0.22 * (E-e_{150}) * \sqrt{1+0.32 u_{150}^2}$$

则： $W=0.22 * (54.2-54.2 * 80\%) * 1=2.385\text{mm/d}$ 。

即乏燃料储存池和接收池平均每天蒸发 2.385mm 高度的水。

根据公式，体积 $V=S * W$ ，其中 S 为储存池、接收池面积之和。查询设计手册，可知储存池 236 m²，接收池 103 m²，所以 $S=236+103=339 \text{ m}^2$ 。

得 $V=339 \text{ m}^3 \times 2.385 \text{ mm}=808515 \text{ mL}$ 。

即乏燃料储存池和接收池每天蒸发水的体积 V 为 808515 mL 。

另外，有：年蒸发水高度 $H=2.385 \times 365=870.525 \text{ mm}$ ，
平均每次补水高度 $h=H/348=870.525/348=2.50 \text{ mm}$ 。

3.2 新方案一简介

经讨论，拟定如下方案。在 S-023 房间，有 S-023 除盐冷水进水阀 7165-V7321 和净化床 IX7001 出口取样阀 3441-V7119，两个阀门相距仅 50cm 左右，将二者相连，即可实现补水。7165-V7321 为常关阀。另，咨询化学处，取样阀 3441-V7119 每两周进行一次取样。因此，可实行改造。

在系统中增加一个调节阀，一个隔离阀和一个流量计。改造后，调节阀和隔离阀常开，以实现补水。7165-V7321 和 3441-V7119 常关。

当化学处需要进行取样时，先将隔离阀关闭，停止补水，即可进行取样。取样结束后，将隔离阀打开，恢复补水，整个取样过程无需操作调节阀，恢复后不会改变补水流量。取样过程一般不超过十分钟，短时间不补水，对乏池液位影响可以忽略。当 S-023 房间需要使用除盐水时，打开 7165-V7321 即可。

如此，在不影响系统原有功能的情况下，实现了对 3441 系统的小流量持续补水。

3.3 新方案二简介

方案一完成后，在不影响系统原有功能的情况下，实现了对 3441 系统的小流量持续补水。但是也存在一些不足：

乏池蒸发量随季节、温度、通风系统运行与否等因素变化，仍需要每天微调 7165-V7321 与新增流量调节阀开度；受乏池冷却泵不同运行模式影响，补水阀前后压差会有一定变化，补水流量存在波动；补水直接补至 3441-IX7001 下游，流量调节阀调整开度后，需要约 8 小时，监视的转运坑液位才有变化，响应时间过长；由于与电厂变更工作冲突，该接口已被占用，流程上无法使用该接口。

因此，提出了方案二，从 7165-V7254 下游，直接接一个三通阀，三通阀后加一隔离阀 V8001，其后加一流量计，便于调节，阀门下游直接通往储存池水面，即储存池撇沫器与储存池壁面之间。

正常运行期间，7165-V7254 全开，其下游三个负荷分别为 SWS 冲洗水、SWS 排风机组过滤器冲洗水、FLASK 去污冲洗水，均为关闭状态。SWS 冲洗水 63537-SV0004 是燃料篮冲洗水的电磁阀，只有在乏贮生产且进行燃料篮烘干焊接时使用，每次使用时间大约 20 分钟；SWS 排风机组过滤器冲洗水 7165-V8301 是在乏贮排风机过滤器不干净需要冲洗时使用，目前几乎没用过；FLASK 去污冲洗水 7165-V8302 是用于屏蔽运输容器有污染需要去污时使用，目前也几乎没用过。并且目前 1 号机组乏贮生产暂停，除盐水暂时不使用。

因此，7165-V7254 其下游三个负荷几乎均未投运，对

系统正常运行无影响。即使需要投运下游负荷，对乏池连续补水的流量最高只有 13 mL/s ，对下游除盐水使用时的压力和流量影响极小。

3.4 新方案三简介

为避免方案二改造过程中带来的管道切割、焊接等工作引起的异物风险，提出了方案三。从 63537-SV0004 阀门上游连接处，直接接一个三通阀，三通阀后加一隔离阀 V8001，其后加一流量计，便于调节，阀门下游直接通往储存池水面，即储存池撇沫器与储存池壁面之间，流程图与方案二一致，但新增三通阀位置由靠近 7165-V7254 侧，改为靠近 63537-SV0004 侧。

方案三与方案二相比，具有以下特点：改造过程不需要切割、焊接管道，63537-SV0004 连接处为螺母连接，非常方便，最大程度避免为储存池引入异物风险，操作简单；小流量补水管道无需经过地面，由空中经过承重柱引至预留的电缆孔完成补水，对人员通行无影响；该方案管道长度较长，且管道直径较细，需额外考虑增加管道支撑和固定装置。

4 结语

通过本文提出的方案，来实现对乏燃料池的持续小流量补水是切实可行的。在对应 7-9 月、10-12 月和 1-6 月，持续补水小流量分别取值 13 mL/s 、 5.5 mL/s 、 7.5 mL/s 的时候，每个时间段内还需手动补水 8 次、11 次、21 次，一年内共计 40 次。即每年少执行手动补水 308 次。按单次补水约需十五分钟，环境剂量率为 $1 \mu \text{ Sv/h}$ 计算，每年可以降低人员受辐射剂量 $77 \mu \text{ Sv}$ 。对比如表 2 所示。

表 2 自动补水前后对比

	方案前	方案后
1 年补水次数	348 次	约 40 次
1 年人员辐照剂量	$87 \mu \text{ Sv}$	$10 \mu \text{ Sv}$

若采取方案一：初期试运行，采取 7165-V7321 和新增的流量调节阀双重节流的方式，每班微调一次 7165-V7321 和流量调节阀开度。

若采取方案二或方案三：使用新增的流量调节阀节流，初期试运行，调节流量调节阀开度次数减少。

三种方案的目标，为使储存池液位保持平稳或略微下降的趋势，之后减少手动次数，节省了人力；同时，调节阀门分别位于 S-023 和 S-126 房间，操作时间短，减少了人员受辐射剂量。

综合考虑下，方案三在预想的各种工况下，能保证乏燃料池液位符合预期，保证系统安全，有效地减少运行人员手动补水频率，并且改造过程简单，具有较高的可行性。

参考文献

- [1] 何伯述. 工程热力学[M]. 4版. 北京: 北京交通大学出版社, 2020.
- [2] 罗惕乾. 流体热力学[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [3] 潘颢丹 贾冯睿. 工程热力学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2020.