

文章编号: 1002-5855(2015) 01-0007-03

核电站除盐器废树脂更换系统用阀门配置优化研究

王 亮 李 毅 杨 钊 谢 杨 陈志辉

(中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 四川 成都 610213)

摘要 研究了压水堆核电站化学和容积控制系统除盐器放射性废树脂更换操作工艺相关的阀门配置特点和配置优化方案, 分析了如何降低操作人员的职业照射剂量及简化阀门配置和提高操作可靠性。

关键词 核电站用阀; 除盐器; 配置; 优化

中图分类号: TH134

文献标志码: A

Research on Optimization Configuration of Resin Hydraulic Unloading and Reloading Valve of RCV

WANG Liang, LI Yi, YANG Zhao, XIE Yang, CHEN Zhi-hui

(Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory,

Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China)

Abstract: The valve configuration characteristics relative to the hydraulic unloading and reloading of the radioactive spent resin in the demineralizer of PWR RCV are studied in this paper and solutions to reduce the operating personnel vocational irradiation dose and simplify the valve configuration and enhance the operating reliability are also discussed and analyzed. The valve configuration optimization relative to the hydraulic unloading and reloading of the radioactive spent resin are given in this paper and the research result is helpful in designing the chemical and volume control system.

Key words: nuclear valve; demineralizer; configuration; optimization

1 概述

压水堆核电站化学和容积控制系统(RCV)设置两台混床除盐器和一台阳床除盐器,用来保持反应堆冷却剂的纯度,并使得反应堆冷却剂的放射性水平维持在允许的限值以内。混床除盐器的树脂能够去除离子型腐蚀产物和一些离子型裂变产物,同时也作为过滤器使用。正常情况下一台混床除盐器运行而另一台备用,每台混床除盐器设计容量至少满足一个燃料循环周期使用。阳床除盐器的树脂能够去除反应堆冷却剂中绝大部分的锂和铯同位素。失效后的核级离子交换树脂,作为放射性废物从除盐器中水力卸载到专门的废树脂贮槽中暂存一段时间,当其中的短寿命核素充分衰变后,再送到水泥固化系统中进行固化处理。然后,将新树脂连续不断地装填入除盐器,装填过程中需要对除盐器进行连

续排气,并将多余的除盐水排放。树脂装填完毕后用除盐水对除盐器内的树脂进行连续冲洗,直至除盐器出口水质满足要求。

2 废树脂更换系统

2.1 系统功能

在需要卸载除盐器中失效的核级离子交换树脂时,通过开启和关闭相关阀门,由核岛除盐水分配系统(SED)向除盐器供水,利用水力输送的方式将树脂输运到固体废物处理系统。重新装填新树脂时,通过开启和关闭相关阀门,实现除盐器的排气,由核岛除盐水分配系统向除盐器供水,完成除盐器树脂的冲洗。

2.2 系统组成

除盐器废树脂水力卸载系统主要由除盐器、核岛除盐水分配系统隔离阀、核岛疏水排气系统

作者简介: 王亮(1979-)男,高级工程师,主要从事核动力装置设计和研究工作。

(RPE) 隔离阀和固体废物处理系统(TES) 隔离阀组成(图 1) 。

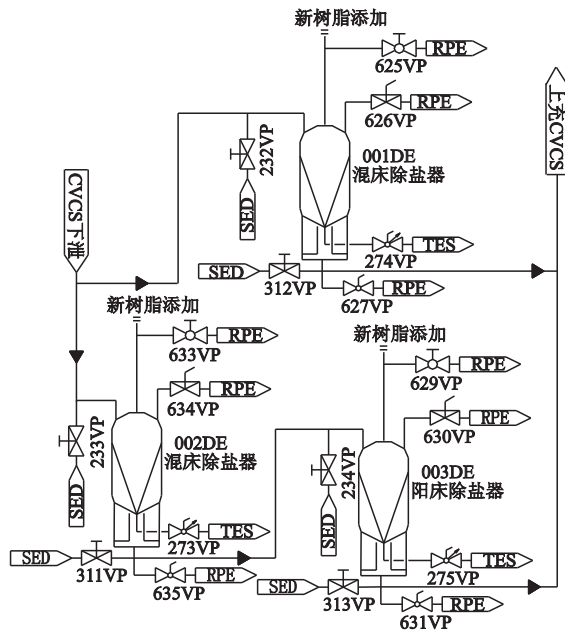


图 1 树脂水力卸载和装填用阀门配置

2.3 系统运行

当除盐器中的核级离子交换树脂达到饱和以后, 将其通过水力卸载的方式输送到固体废物处理系统。

(1) 将除盐器从 RCV 系统中隔离出来, 并卸压至常压。

(2) 打开冲洗水管冲洗相关管道, 然后除盐水通过正常工艺流出口由泵输送至除盐器底部。

(3) 除盐器内除盐水流过截留网, 树脂在逆向流动的除盐水中形成流态化。

(4) 打开除盐器排放接口, 将整床树脂冲排至放射性固体废物处理系统的贮槽。

(5) 连续供应除盐水直至除盐器中树脂排净, 且树脂排放管内的废树脂冲洗干净。

(6) 关闭核岛除盐水分配系统、核岛疏水排气系统和固体废物处理系统的隔离阀。

除盐器废树脂水力卸载完毕以后, 向除盐器中装填新树脂。

(1) 打开除盐器树脂添加接管, 向除盐器中连续添加新树脂。

(2) 装填过程中进行连续排水和排气。

(3) 装填完毕后, 除盐水通过正常工艺流出口由泵输送至除盐器上部, 对新树脂进行冲洗, 直至出口水质满足要求。

(4) 除盐器冲洗完毕后, 恢复树脂添加接管密封和关闭核岛除盐水分配系统、核岛疏水排气系统的阀门, 对除盐器进行密封性水压试验。

3 阀门配置与操作

3.1 配置

除盐器废树脂水力卸载和新树脂装填操作共配置有 18 台手动阀门(表 1) 。

表 1 阀门配置

编号	结构型式	安全等级	质保等级	规范等级	抗震类别	房间号
311VP、 312VP、 313VP	手动 隔膜阀	SC-3	Q2	3	II	ND472
232VP、 233VP、 234VP	手动 隔膜阀	SC-3	Q2	3	II	ND472
625VP、 629VP、 633VP	手动 球阀	SC-3	Q2	3	II	NC472
626VP、 630VP、 634VP	手动 隔膜阀	SC-3	Q2	3	II	NC460
627VP、 631VP、 635VP	手动 球阀	SC-3	Q2	3	II	NC460
273VP、 274VP、 275VP	手动 球阀	SC-3	Q2	3	II	ND338

3 台除盐器阀门配置方案相同, 全部为手动阀门。每台除盐器配置 6 台阀门, 其中 2 台用于分别向除盐器顶部和底部输送除盐水, 3 台用于疏水和排气, 1 台用于排放废树脂。阀门分别为 9 台手动隔膜阀和 9 台手动球阀。具有相同的安全等级、质保等级、规范等级、抗震类别、设计压力和设计温度。其中 311VP、312VP、313VP、232VP、233VP、234VP 具有相同的接管规格, 布置在同一个房间内。626VP、630VP、634VP、627VP、631VP、635VP 具有相同的接管规格, 布置在同一个房间内。

3.2 操作

鉴于 3 台除盐器配置方案相同, 以 001DE 混床除盐器废树脂水力卸载和新树脂装填工艺过程中阀门操作要求为例进行分析。

(1) 打开 626VP 和 312VP, 将除盐水引入除盐器底部。

(2) 当树脂颗粒呈流态化以后, 打开 274VP, 将树脂颗粒输送到放射性固体废物处理系统。

(3) 除盐器中的树脂卸载完毕后, 关闭 626VP、312VP 和 274VP。

(4) 打开除盐器树脂添加管的盲板法兰, 利用树脂装填罐(001BA) 多次向除盐器装填树脂至满足设计值。

(5) 打开 627VP 和 232VP, 将除盐水引入除盐器顶部, 对新装填的树脂床进行冲洗。

(6) 冲洗完毕后关闭 627VP, 打开 625VP, 继续向除盐器充水直至满水, 充水过程中利用 625VP 进行排气。

分析可知, 312VP 和 232VP 具有相同的功能, 即向除盐器输送除盐水, 两台阀门具有相同的参数且布置在同一个房间。626VP 和 627VP 具有相同的功能, 即向 RPE 输送废水, 两台阀门具有相同的参数且布置在同一个房间。

4 优化

4.1 辐射防护原则

核电站辐射防护原则是确保站内人员和公众成员的个人有效剂量不超过核安全法规和国家规定规定的剂量限值, 并保证个人有效剂量合理可行尽量低(ALARA)。用来保持职业受照 ALARA 的方法包括尽可能减少人员在辐射区域内的时间, 或改进设备或改进设施的设计。

在核辅助厂房内除盐器是一个辐射源, 总源强可达 $1.258E+08 \text{ MeV}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 除盐器树脂卸载和装填相关的 18 台阀门及其与除盐器相连的管路内充满了反应堆冷却剂, 并集中布置在为减少放射性照射而设计的廊道内, 在操作人员进行阀门操作期间会受到一定程度的职业辐照。为了消除阀门操作期间对操作人员产生的职业辐照, 考虑将手动阀门改为动力驱动阀门, 操作方式由现场改为远程。

4.2 简化原则

可靠性设计准则和经验指出, 在确保满足功能的前提下, 透彻地掌握了系统和设备所要求执行的功能以及系统各部分互相之间的联系, 采用简化设计技术减少或合并设备可以提高产品的可靠性^[3]。根据阀门功能要求和运行要求, 将 312VP 和 232VP 合并为一台气动三通阀 312VP, 将 626VP 和 627VP 合并为一台气动三通阀 626VP(图 2)。

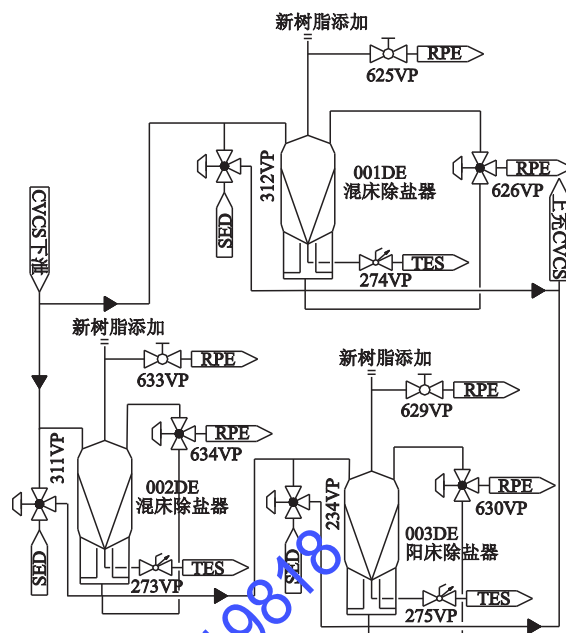


图 2 阀门配置优化系统

阀门配置简化以后, 除盐器废树脂水力卸载和新树脂装填操作配置的 18 台手动阀门减少至 6 台气动阀门和 6 台手动阀门。

4.3 基本可靠性分析

基本可靠性指的是在规定条件下装置无故障工作的持续时间或概率。树脂水力卸载和装填操作相关的任一组成部分发生故障后, 需要进行维修或更换, 因此基本可靠性框图同时还体现了组成单元引起的维修及保障要求。建立基本可靠性框图目的在于, 为设计人员提供权衡人力、物力、费用和任务的有效手段, 通过对比分析, 为判断系统设计的合理性提供依据。对比除盐器 001DE 阀门配置的基本可靠性框图(图 3 和图 4)可知, 除盐器阀门配置优化以后, 可以提高除盐器 001DE 进行树脂水力卸载和装填操作的基本可靠性, 减少了连接阀门管道的焊缝数量, 从而降低了受检部位的在役检查工作量, 更有利于符合 ALARA 原则。

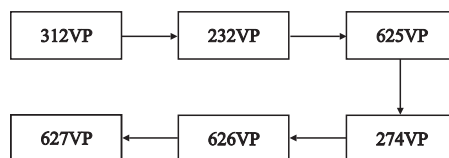


图 3 基本可靠性框图



图 4 优化的基本可靠性框图

(下转第 35 页)

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_4}{\rho g} + \frac{v_4^2}{2g} \quad (8)$$

式中 ρ ——水的密度

v_1 ——阀门管道内水的流速

v_4 ——控制管道内水的流速

设 $\Delta P = P_1 - P_4$ $v_1 = 1.5 \text{ m/s}$ $v_4 = 0.5 \text{ m/s}$, 代入式(8)得

$$\Delta P = \frac{\rho(v_1^2 - v_4^2)}{2g} \quad (9)$$

阀芯启动时, 控制管道介质流速为 0, 代入式(9)得 $\Delta P = 5 \text{ kPa}$ 。阀芯启动瞬间前后端的压力差是由速度变化产生的动压。

4.3 阀门状态(考虑沿程损失)

阀芯启动瞬间前后端的压力差计算是按照阀门从静止到开始运动的瞬间状态讨论的。当阀门前后端压力差达到一定数值时, 阀芯开始运动。当阀芯运动时, 随着介质流动, 阀门前后端压力差开始减小, 沿程损失增加, ΔP 会低于计算值。同时, 随着阀芯开始运动, 摩擦因数由静摩擦变成动摩擦, 而使摩擦因数降低, 阀芯所需推力降低, 因此沿程损失后的 ΔP 仍可以维持阀芯继续运动。沿程压力损失计算较为复杂, 但这些数值可以通过试验得出。为了验证理论分析, 制作了直径 25mm 原理验证样机, 试验结果与预期计算值基本一致。

4.4 控制方式

带有扭转弹簧的拨杆轴带动拨杆, 使拨杆端部

贴在活塞上, 并始终跟随活塞运动。拨杆轴上面的磁铁随拨杆轴转动, 在端盖安装的磁角度测量芯片感知磁铁磁场的变化测量出拨杆轴转动的角度, 该角度信号送给计算机, 计算机根据控上位机阀门开度信号与阀门位置信号比较, 根据比较结果控制三位四通阀门, 改变阀门前后端压强引出端口与阀芯及活塞连接通道的连接方式, 从而控制阀门工作。计算机根据控制信号操纵阀芯移动, 按照线性、等百分比或者抛物线特性方式工作。

5 结语

活塞助力液控调节阀的定性定量分析和试验结果证明, 阀门结构简单, 质量轻, 体积小, 控制功耗低, 特别适合制造大口径调节阀。阀门不使用电机力矩保护等装置, 制造成本低。不会发生因惯性引起的超调现象, 可以减小死区, 提高控制精度。由于阀门是靠介质压差工作, 特别是关闭时压差最大, 且阀芯受力是向关闭方向的, 所以有利于保证阀门在关闭状态时的密封性。

参 考 文 献

- [1] 液控阀门 ZL201320121685.6[P].
- [2] 杨源泉. 阀门设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [3] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [4] 周光炯. 流体力学(下册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

(收稿日期: 2014. 04. 22)

(上接第 2 页)

6 结语

高排逆止阀按 ASME B16.34 及 JB/T 3595 标准制造与检验, 阀门动作灵活, 关闭迅速, 密封可靠, 性能稳定, 满足了工况要求, 已广泛使用在超(超)临界大型火电机组管道上。

参 考 文 献

- [1] ASME B16.34 - 2004, 法兰、螺纹和焊接连接的阀门[S].
- [2] JB/T 3595 - 2002 电站阀门 一般要求[S].
- [3] 杨源泉. 阀门设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
- [4] 沈阳阀门研究所. 阀门设计手册[Z]. 1976.
- [5] 徐灏. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [6] ASME BPVC - III - 1 - 附录 - 1995 压水堆核岛机械设计和建造规则[S].

(收稿日期: 2014. 06. 11)

(上接第 9 页)

5 结语

根据相关阀门执行的功能、操作特点和布置方式等因素的分析结果, 提出的阀门配置优化方案具有更好地符合 ALARA 原则, 提高基本可靠性和降低在役装置检查工作量的特点, 可供核电站化学和容积控制系统设计参考。

参 考 文 献

- [1] 中广核工程有限公司. 压水堆核电厂核岛设计[M]. 北京: 原子能出版社, 2010.
- [2] 陈济东. 大亚湾核电站系统及运行[M]. 北京: 原子能出版社, 1998.
- [3] 顾益宇, 等. 可靠性工程实用导则 - 适用于核及其他技术系统[M]. 北京: 宇航出版社, 2002.

(收稿日期: 2014. 04. 12)